

### 2.5.2 圆弧舷顶列板

圆弧舷顶列板的净厚度应不小于相邻甲板板的实际净厚度。

### 2.5.3 长上层建筑中断处的舷顶列板的净厚度

对船中  $0.5L$  长度范围内的长上层建筑中断处，应在该上层建筑末端每侧约  $1/6$  船宽的长度范围内增加舷顶列板的净厚度。

净厚度的这种增加应不小于舷顶列板净厚度的 40%，但无需超过 4.5 mm。

如果上层建筑中断于船中  $0.5L$  以外，净厚度的增加可减少至 30%，但无需超过 2.5mm。

### 2.5.4 短上层建筑中断处的舷顶列板的净厚度

对船中  $0.6L$  之内的短上层建筑中断处，应沿该上层建筑末端每侧约  $1/6$  船宽的长度增加舷顶列板的净厚度。

净厚度的这种增加应等于 15%，但无需超过 4.5 mm。

## 2.6 甲板边板

### 2.6.1 一般要求

甲板边板的净厚度应不小于相邻甲板板材的实际净厚度。

### 2.6.2 长上层建筑中断处的甲板边板的净厚度

对船中  $0.5L$  长度范围内的长上层建筑中断处，应在该上层建筑末端每侧约  $1/6$  船宽的长度范围内增加甲板边板的净厚度。

净厚度的这种增加应不小于甲板边板净厚度的 40%，但无需超过 4.5mm。

如果上层建筑中断于船中  $0.5L$  以外，净厚度的增加可减少至 30%，但无需超过 2.5mm。

### 2.6.3 短上层建筑中断处的甲板边板的净厚度

对船中  $0.6L$  长度范围内的短上层建筑中断处，应在该上层建筑末端每侧约  $1/6$  船宽的长度范围内增加甲板边板的净厚度。

净厚度的这种增加应等于 15%，但无需超过 4.5 mm。

## 2.7 承载有木质支撑钢卷的内底

### 2.7.1 一般要求

拟载钢卷的船舶，其内底、艀部底边舱斜板和内壳的净厚度应符合 [2.7.2] 至 [2.7.4] 的要求。

此规定基于将图 6-2 所示方式假定为钢卷的标准系固方式。如果钢卷排为两层或两层以上，则对于仅最底层钢卷触及艀部底边舱斜板或内壳板的情况，可采用 [2.7.2] 至 [2.7.3] 的公式。在其他情况下，通过直接强度分析或其他方法计算板厚。

### 2.7.2 内底板

纵骨架式内底板的板材净厚度 (mm) 应不小于按下式求得的值：

$$t = K_1 \sqrt{\frac{(g + a_z) F}{\lambda_P R_Y}}$$

式中： $K_1$ ——系数，取为：

$$K_1 = \sqrt{\frac{1.7slK_2 - 0.73s^2K_2^2 - (l - l')^2}{2l'(2s + 2lK_2)}}$$

$a_z$ ——垂向加速度， $m/s^2$ ，定义见第 4 章第 2 节 [3.2]；

$F$ ——力，kg，取为：

$$F = K_S \frac{W n_1 n_2}{n_3}$$

$\lambda_p$ ——表 6-6 定义的系数;

$K_s$ ——系数, 取为:

$K_s=1.4$ , 当钢卷排成一层, 以一个钢卷锁紧时;

$K_s=1.0$ , 在其他情况下;

$W$ ——单个钢卷的质量, kg;

$n_1$ ——钢卷的层数;

$n_2$ ——内底每一基本板格的载荷点数量, 取为:

• 如果钢卷如图 6-3 所示装载,  $n_2$  按  $n_3$  和  $l/l_s$  的值从表 6-3 获得;

• 如果钢卷如图 6-4 所示装载,  $n_2 = n_3$ ;

$n_3$ ——单个钢卷的支承垫料数量;

$l_s$ ——钢卷的长度, m;

$K_2$ ——系数, 取为:

$$K_2 = -\frac{s}{l} + \sqrt{\left(\frac{s}{l}\right)^2 + 1.37 \left(\frac{l}{s}\right)^2 \left(1 - \frac{l'}{l}\right)^2 + 2.33}$$

$l'$ ——沿船长方向, 内底板每一基本板格的载荷点之间的距离, 取为:

• 如果钢卷如图 6-3 所示装载,  $l'$  按  $l$ ,  $l_s$ ,  $n_2$  和  $n_3$  之值从表 6-4 获得;

• 如果钢卷如图 6-4 所示装载,  $l'$  是实际值。

### 2.7.3 底边舱斜板和内壳板

纵骨架式底边舱斜板和内壳的板材净厚度 (mm) 应不小于按下式求得的值:

$$t = K_1 \sqrt{\frac{[g \cos(\theta_1 - \theta_2) + a_y \sin \theta_1] F'}{\lambda_p R_Y}}$$

式中:  $K_1$ ——系数, 定义见 [2.7.2];

$\theta_1$ ——内底板与底边舱斜板或内壳板之间的夹角, deg;

$\theta_2$ ——横摇单幅值, deg, 定义见第 4 章第 2 节 [2.1];

$a_y$ ——横向加速度,  $m/s^2$ , 定义见第 4 章第 2 节 [3.2];

$F'$ ——力, kg, 取为:

$$F' = \frac{W n_2 C_k}{n_3}$$

$\lambda_p$ ——按表 6-6 定义的系数;

$W$ ,  $n_2$ ,  $n_3$ ——同 [2.7.2] 中的定义;

$C_k$ ——系数, 取为:

$C_k=4.0$ , 用于钢卷排为两层或两层以上的情况, 或钢卷排为一层且锁紧钢卷位于底边舱斜板或内壳板起第二个的情况;

$C_k=2.5$ , 在其他情况下。

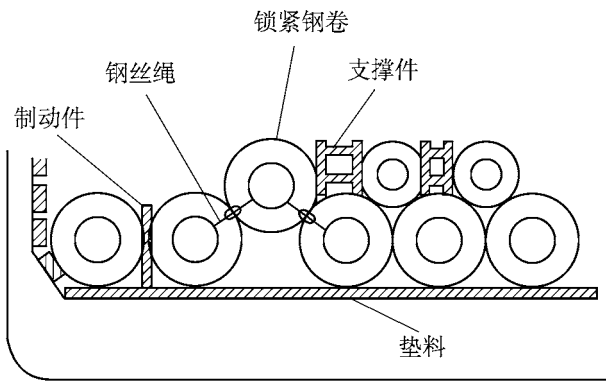


图 6-2 承载钢卷的内底

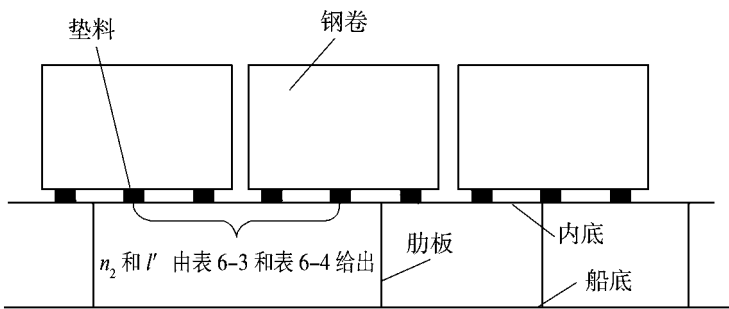


图 6-3 钢卷装载工况

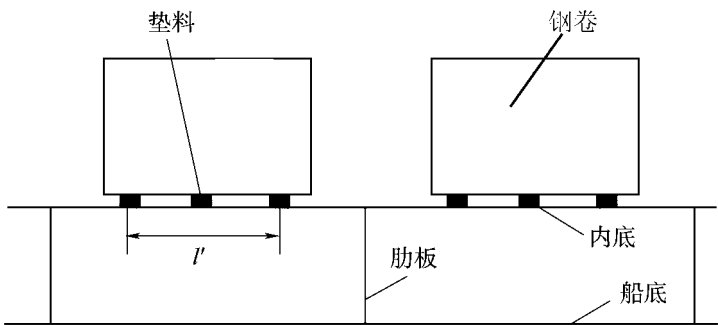


图 6-4 钢卷装载工况

每一基本板格的载荷点数量 表 6-3

$n_2$	$n_3=2$	$n_3=3$	$n_3=4$	$n_3=5$
1	$0 < \frac{l}{l_s} \leq 0.5$	$0 < \frac{l}{l_s} \leq 0.33$	$0 < \frac{l}{l_s} \leq 0.25$	$0 < \frac{l}{l_s} \leq 0.2$
2	$0.5 < \frac{l}{l_s} \leq 1.2$	$0.33 < \frac{l}{l_s} \leq 0.67$	$0.25 < \frac{l}{l_s} \leq 0.5$	$0.2 < \frac{l}{l_s} \leq 0.4$
3	$1.2 < \frac{l}{l_s} \leq 1.7$	$0.67 < \frac{l}{l_s} \leq 1.2$	$0.5 < \frac{l}{l_s} \leq 0.75$	$0.4 < \frac{l}{l_s} \leq 0.6$
4	$1.7 < \frac{l}{l_s} \leq 2.4$	$1.2 < \frac{l}{l_s} \leq 1.53$	$0.75 < \frac{l}{l_s} \leq 1.2$	$0.6 < \frac{l}{l_s} \leq 0.8$
5	$2.4 < \frac{l}{l_s} \leq 2.9$	$1.53 < \frac{l}{l_s} \leq 1.87$	$1.2 < \frac{l}{l_s} \leq 1.45$	$0.8 < \frac{l}{l_s} \leq 1.2$
6	$2.9 < \frac{l}{l_s} \leq 3.6$	$1.87 < \frac{l}{l_s} \leq 2.4$	$1.45 < \frac{l}{l_s} \leq 1.7$	$1.2 < \frac{l}{l_s} \leq 1.4$
7	$3.6 < \frac{l}{l_s} \leq 4.1$	$2.4 < \frac{l}{l_s} \leq 2.73$	$1.7 < \frac{l}{l_s} \leq 1.95$	$1.4 < \frac{l}{l_s} \leq 1.6$
8	$4.1 < \frac{l}{l_s} \leq 4.8$	$2.73 < \frac{l}{l_s} \leq 3.07$	$1.95 < \frac{l}{l_s} \leq 2.4$	$1.6 < \frac{l}{l_s} \leq 1.8$
9	$4.8 < \frac{l}{l_s} \leq 5.3$	$3.07 < \frac{l}{l_s} \leq 3.6$	$2.4 < \frac{l}{l_s} \leq 2.65$	$1.8 < \frac{l}{l_s} \leq 2.0$
10	$5.3 < \frac{l}{l_s} \leq 6.0$	$3.6 < \frac{l}{l_s} \leq 3.93$	$2.65 < \frac{l}{l_s} \leq 2.9$	$2.0 < \frac{l}{l_s} \leq 2.4$

沿船长方向内底每一基本板格的载荷点之间的距离 表 6-4

$n_2$	$n_3$			
	2	3	4	5
1	垫料的实际宽度			
2	$0.5l_s$	$0.33l_s$	$0.25l_s$	$0.2l_s$
3	$1.2l_s$	$0.67l_s$	$0.50l_s$	$0.4l_s$
4	$1.7l_s$	$1.20l_s$	$0.75l_s$	$0.6l_s$
5	$2.4l_s$	$1.53l_s$	$1.20l_s$	$0.8l_s$
6	$2.9l_s$	$1.87l_s$	$1.45l_s$	$1.2l_s$
7	$3.6l_s$	$2.40l_s$	$1.70l_s$	$1.4l_s$
8	$4.1l_s$	$2.73l_s$	$1.95l_s$	$1.6l_s$
9	$4.8l_s$	$3.07l_s$	$2.40l_s$	$1.8l_s$
10	$5.3l_s$	$3.60l_s$	$2.65l_s$	$2.0l_s$

2.7.4 若每一基本板格的载荷点数量  $n_2$  大于 10 和 / 或垫料数量  $n_3$  大于 5, 内底可视为承载匀布载荷。在此情况下, 内底板厚度应按 [3.2.1] 求得。

### 3 承受侧向压力的板材的强度校核

#### 3.1 载荷模型

##### 3.1.1 一般要求

应考虑完整工况下由海水和不同种类货物以及压载引起的静水和波浪侧向压力, 这取决于所考虑的板材位置和其相邻舱室的类型。

组成不拟载运液体的舱室边界的板材 (不包括船底板和舷侧外板) 应承受进水工况下的侧向压力。

在第 4 章第 4 节定义的相互独立的载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2 下, 应按  $10^{-8}$  概率水平计算波浪侧向压力和船体梁载荷。

##### 3.1.2 完整工况下的侧向压力

完整工况下的侧向压力由静水压力和波浪压力组成。

静水压力  $p_s$  包括:

- 第 4 章第 5 节 [1] 定义的静水压力;
- 第 4 章第 6 节定义的不同种类货物和压载的静水内部压力。

对各载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2, 波浪压力  $p_w$  包括:

- 第 4 章第 5 节 [1] 定义的水动压力;
- 第 4 章第 6 节定义的不同种类货物和压载的惯性压力。

##### 3.1.3 进水工况下的侧向压力

进水工况下的侧向压力  $p_F$  定义见第 4 章第 6 节 [3]。

##### 3.1.4 试验工况下的侧向压力

试验工况下的侧向压力  $p_T$  取为:

- 对于船底外板和舷侧外板,  $p_T = p_{ST} - p_s$
- 其他,  $p_T = p_{ST}$

式中:  $p_{ST}$ ——第 4 章第 6 节 [4] 定义的试验压力;

$p_s$ ——压力, 其值取为:

- 如果试验在船舶处于漂浮状态时进行: 第 4 章第 5 节 [1] 定义的静水压力, 其吃水  $T_1$  为设计者定义的试验吃水。如果未定义  $T_1$ , 则视为试验不在船舶处于漂浮状态时进行。
- 如果试验不在船舶处于漂浮状态时进行:  $p_s=0$

##### 3.1.5 正应力

对船体梁总纵强度起作用的板材进行强度校核时考虑的正应力是从下列公式获得的中垂和中拱工况 (如适用) 中  $\sigma_x$  的最大值,  $N/mm^2$ :

$$\sigma_x = \left[ C_{SW} \left| \frac{M_{SW}}{I_Y} \right| (z - N) + C_{WV} \left| \frac{M_{WV}}{I_Y} \right| (z - N) - C_{WH} \left| \frac{M_{WH}}{I_Z} \right| y \right] \times 10^{-3}$$

式中： $M_{SW}$ ——中拱或中垂工况（视具体情况）中的许用静水弯矩， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；

$M_{WV}$ ——第 4 章第 3 节定义的中拱或中垂工况（视具体情况）中的垂向波浪弯矩， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；

$M_{WH}$ ——第 4 章第 3 节定义的水平波浪弯矩， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；

$C_{SW}$ ——表 6-5 中定义的每种载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2 的组合因子；

$C_{WV}$ ， $C_{WH}$ ——表 6-5 中给出的第 4 章第 4 节 [2.2] 中定义的每种载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2 的组合因子。

组合因子 $C_{SW}$ ， $C_{WV}$ 和 $C_{WH}$						表 6-5
LC	中拱			中垂		
	$C_{SW}$	$C_{WV}$	$C_{WH}$	$C_{SW}$	$C_{WV}$	$C_{WH}$
H1	不适用			-1	-1	0
H2	1	1	0	不适用		
F1	不适用			-1	-1	0
F2	1	1	0	不适用		
R1	1	0	$1.2 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	-1	0	$1.2 - \frac{T_{LC}}{T_S}$
R2	1	0	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 1.2$	-1	0	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 1.2$
P1	1	$0.4 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	0	-1	$0.4 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	0
P2	1	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 0.4$	0	-1	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 0.4$	0

3.2 板材厚度

3.2.1 完整工况

横向承载板格的净厚度应不小于从下列公式中获得之值，mm：

$$t = 15.8c_a c_r s \sqrt{\frac{P_S + P_W}{\lambda_P R_Y}}$$

式中： $\lambda_P$ ——表 6-6 定义的系数。

系 数 $\lambda_P$			表 6-6
板 材		系 数 $\lambda_P$	
对船体梁总纵强度起作用	纵骨架式板材	$0.95 - 0.45 \left  \frac{\sigma_X}{R_Y} \right $	，取为不大于 0.9
	横骨架式板材	$0.95 - 0.90 \left  \frac{\sigma_X}{R_Y} \right $	，取为不大于 0.9
对船体梁总纵强度不起作用		0.9	

### 3.2.2 进水工况下的净厚度（分隔货舱的垂直槽形横舱壁的槽条除外）

组成不拟载运液体的舱室边界的板材（不包括船底板和舷侧外板）应在进水工况下进行校核，但分隔货舱的垂直槽形横舱壁除外。为此，其净厚度应不小于从下列公式中获得之值，mm：

$$t = 15.8 c_a c_r s \sqrt{\frac{p_F}{\alpha \lambda_p R_Y}}$$

式中： $\lambda_p$ ——表 6-6 定义的系数，通过计及进水工况下的  $\sigma_x$  来确定；

$\alpha$ ——系数，取为：

$\alpha = 0.95$ ，对于防撞舱壁的板材

$\alpha = 1.15$ ，对于舱室的其他水密边界的板材

### 3.2.3 进水工况下分隔货舱的垂直槽形水密横舱壁的槽条净厚度

分隔货舱的垂直槽形水密横舱壁的板材净厚度  $t$ ，mm，应不小于从下列公式中获得之值：

$$t = 14.9 s \sqrt{\frac{1.05 p}{R_{eH}}}$$

式中： $p$ ——第 4 章第 6 节 [3.3.7] 中定义的合成压力，kN/m<sup>2</sup>。

对于组合型槽形舱壁，当翼板和腹板的厚度不同时：

- 较窄的板材的净厚度应不小于从下列公式中获得之值，mm：

$$t_N = 14.9 s \sqrt{\frac{1.05 p}{R_{eH}}}$$

- 较宽的板材的净厚度应不小于从下列公式中获得之值的大者，mm：

$$t_W = 14.9 s \sqrt{\frac{1.05 p}{R_{eH}}}$$

$$t_W = \sqrt{\frac{462 s^2 p}{R_{eH}}} - t_{NP}^2$$

式中： $t_{NP}$ ——较窄板材的实际净厚度，mm，取不大于：

$$t_{NP} = 14.9 s \sqrt{\frac{1.05 p}{R_{eH}}}$$

### 3.2.4 试验工况

第 4 章第 6 节 [4] 定义的舱室或结构的板材应在试验工况下进行校核。为此，其净厚度应不小于从下列公式中获取的值，mm：

$$t = 15.8 c_a c_r s \sqrt{\frac{p_T}{1.05 R_Y}}$$

## 第2节 普通扶强材

符号

本节中未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

$L_0$ : 规范船长，但不取为大于 300m。

$I_y$ : 船体横剖面对其水平中和轴的净惯性矩， $m^4$ ，按第 5 章第 1 节 [1.5] 计算，对于所有构件，按总提供厚度减去  $0.5t_c$  计。

$I_z$ : 船体横剖面对其垂向中和轴的净惯性矩， $m^4$ ，按第 5 章第 1 节 [1.5] 计算，对于所有构件，按总提供厚度减去  $0.5t_c$  计。

$N$ : 第 5 章第 1 节 [1.2] 所定义的船体净横剖面重心在第 1 章第 4 节 [4] 定义的坐标系统中的  $Z$  坐标，对于所有构件，按总提供厚度减去  $0.5t_c$  计。

$p_s, p_w$ : [3.1.2] 定义的完整工况下的静水和波浪压力， $kN/m^2$ 。

$p_F$ : [3.1.3] 定义的进水工况下的压力， $kN/m^2$ 。

$p_T$ : [3.1.4] 定义的试验工况下的压力， $kN/m^2$ 。

$\sigma_x$ : [3.1.5] 定义的正应力， $N/mm^2$ 。

$s$ : 普通扶强材的间距，m，沿跨距中点处弦长量取。

$l$ : 普通扶强材的跨距，m，在支撑构件之间沿弦长量取，见第 3 章第 6 节 [4.2]。

$h_w$ : 腹板高度，mm。

$t_w$ : 腹板净厚度，mm。

$b_f$ : 面板宽度，mm。

$t_f$ : 面板净厚度，mm。

$b_p$ : 扶强材带板宽度，m，用于屈服校核，定义见第 3 章第 6 节 [4.3]。

$w$ : 扶强材净剖面模数， $cm^3$ ，其带板宽度为  $b_p$ ，按第 3 章第 6 节 [4.4] 进行计算。

$A_{Sh}$ : 扶强材净剪切截面积， $cm^2$ ，按第 3 章第 6 节 [4.4] 进行计算。

$m$ : 系数，取为：

$m = 10$ ，对于垂直扶强材

$m = 12$ ，对于其他扶强材

$\tau_a$ : 许用剪应力， $N/mm^2$ ，取为：

$$\tau_a = \frac{R_y}{\sqrt{3}}$$

### 1 一般要求

#### 1.1 适用范围

1.1.1 本节的要求适用于承受侧向压力的普通扶强材以及承受船体梁正应力的对船体梁纵强度起作用的普通扶强材的屈服校核。

承受特定载荷的普通扶强材也应进行屈服校核，例如集中载荷。

另外，应按第 6 章第 3 节对普通扶强材进行屈曲校核。

#### 1.2 净结构尺寸

1.2.1 如第 3 章第 2 节所规定的，本节中的所有结构尺寸均为净结构尺寸，即它们不包括任何腐蚀增量。

总结构尺寸按第 3 章第 2 节 [3] 的规定求得。

### 1.3 压力组合

#### 1.3.1 外壳构件

静水和波浪侧向压力的计算应分别考虑：

- 外部海水静水压力和波浪压力；
- 与外板邻接舱室在装载情况下的内部静水和波浪压力。如与外板邻接舱室拟装液体，该内部静水和波浪压力应从相应的外部海水静水和波浪压力中减去。

#### 1.3.2 非外壳构件

对于分隔两个相邻舱室的构件，作用于该构件的侧向静水和波浪压力是分别考虑这两个舱室分别被装载时的压力。

### 1.4 载荷计算点

#### 1.4.1 水平扶强材

除非另有规定，应在所考虑的普通扶强材的跨距中点计算侧向压力和船体梁应力（如有）。

#### 1.4.2 垂直扶强材

侧向压力  $p$  应取为在跨距中点求得的值与从下列公式求得值中的最大值：

$$p = \frac{p_U + p_L}{2} \quad , \quad \text{当垂直扶强材的上端在最低零压力水平线之下时}$$

$$p = \frac{l_1}{l} \frac{p_L}{2} \quad , \quad \text{当垂直扶强材的上端在最低零压力水平线处或之上时（图 6-5）}$$

式中：  $l_1$ ——垂直扶强材下端与最低零压力线之间的距离，m；

$p_U$ ,  $p_L$ ——分别是垂直扶强材跨距  $l$  的上端和下端的侧向压力。

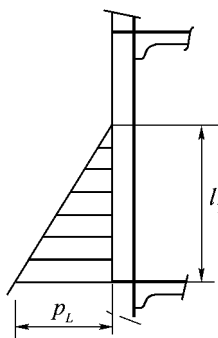


图 6-5 垂直扶强材压力的定义

## 2 一般要求

### 2.1 槽形舱壁

2.1.1 除非另有规定，槽条的净剖面模数和净剪切剖面面积应不小于按  $s$  取为  $S_C$  求得的普通扶强材净剖面模数和净剪切剖面面积，定义见图 6-6。

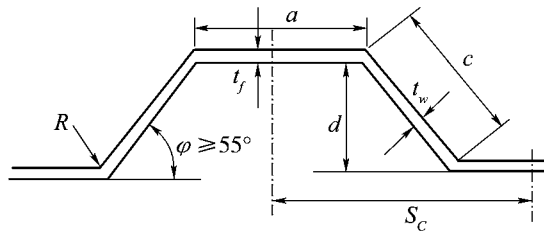


图 6-6 槽形舱壁

## 2.2 普通扶强材腹板的最小净厚度

2.2.1 除单舷侧散货船的肋骨之外的普通扶强材

普通扶强材腹板的净厚度应不小于以下大者，mm：

- $t = 3.0 + 0.015L_2$
- 带板的净提供厚度的 40%

且应小于带板净提供厚度的 2 倍。

2.2.2 单舷侧散货船的肋骨

货物区域内肋骨腹板的净厚度应不小于从下列公式中获得之值，mm：

$$t_{MIN} = 0.75 \alpha (7 + 0.03L)$$

式中：α——系数，取为：

α=1.15，对于在最前面货舱处的肋骨腹板

α=1.00，对于在其他货舱处的肋骨腹板

## 2.3 普通扶强材的净尺寸

2.3.1 扁钢

扁钢普通扶强材（图 6-7）的净尺寸应符合下列要求：

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 20\sqrt{k}$$

2.3.2 T 形材

T 形材普通扶强材的净尺寸（图 6-8）应符合下列要求：

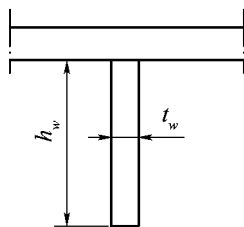


图 6-7 扁钢的净尺寸

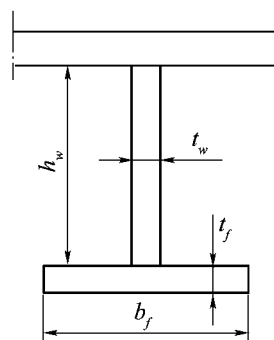


图 6-8 T 形材的净尺寸

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 65\sqrt{k}$$

$$\frac{b_f}{t_f} \leq 33\sqrt{k}$$

$$b_f t_f \geq \frac{h_w t_w}{6}$$

### 2.3.3 角钢

角钢普通扶强材的净尺寸（图 6-9）应符合下列要求：

$$\frac{h_w}{t_w} \leq 55\sqrt{k}$$

$$\frac{b_f}{t_f} \leq 16.5\sqrt{k}$$

$$b_f t_f \geq \frac{h_w t_w}{6}$$

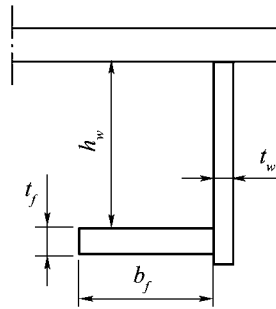


图6-9 角钢的净尺寸

## 2.4 连接普通扶强材的撑柱

2.4.1 连接普通扶强材的撑柱的净剖面面积  $A_{SR}$ ,  $\text{cm}^2$ , 和对主轴的净惯性矩  $I_{SR}$ ,  $\text{cm}^4$ , 应不小于从下列公式中获得之值：

$$A_{SR} = \frac{p_{SR} s l}{20}$$

$$I_{SR} = \frac{0.75 s l (p_{SR1} + p_{SR2}) A_{ASR} l_{SR}^2}{47.2 A_{ASR} - s l (p_{SR1} + p_{SR2})}$$

式中： $p_{SR}$ ——压力，取下列公式中获得的较大值， $\text{kN/mm}^2$ ；

$$R_{SR} = 0.5 (P_{SR1} + P_{SR2})$$

$$R_{SR} = R_{SR3}$$

$p_{SR1}$ ——撑柱处的外部压力， $\text{kN/m}^2$ ，作用于撑柱所在舱室外的一舷；

$p_{SR2}$ ——撑柱处的外部压力， $\text{kN/m}^2$ ，作用于撑柱所在舱室外的另一舷；

$p_{SR3}$ ——撑柱跨距中点处的内部压力， $\text{kN/m}^2$ ，位于撑柱所在舱室内；

$l$ ——撑柱连接的普通扶强材的跨距， $\text{m}$ （见第 3 章第 6 节 [4.2.3]）；

$l_{SR}$ ——撑柱长度， $\text{m}$ ；

$A_{ASR}$ ——撑柱的实际净剖面面积， $\text{cm}^2$ 。

## 2.5 承载有木质支撑钢卷内底的普通扶强材

### 2.5.1 一般要求

本条要求适用于承载有木质支撑（垫料）钢卷的内底、底边舱斜板和内壳上的普通扶强材，如第 6 章第 1 节图 6-2 所示。

如果钢卷排为两层或两层以上，则对于仅最底层钢卷触及底边舱斜板或内壳板的情况，可采用 [2.5.2] 至 [2.5.3] 的公式。在其他情况下，通过直接强度分析或其他方法计算净剖面模数和净剪切剖面面积。

### 2.5.2 内底板上的普通扶强材

内底板上的单跨普通扶强材的净剖面模数  $W$ ， $\text{cm}^3$  和净剪切剖面面积  $A_{sh}$ ， $\text{cm}^2$ ，应不小于按下列公式求得之值：

$$W = K_3 \frac{(g + a_z) F}{8 \lambda_s R_Y}$$

$$A_{sh} = \frac{5 (g + a_z) F}{\tau_a \sin \phi} \times 10^{-3}$$

式中： $K_3$ ——系数，定义见表 6-7；

$a_z$ ——垂向加速度， $\text{m/s}^2$ ，定义见第 4 章第 2 节 [3.2]；

$F$ ——力， $\text{kg}$ ，定义见第 6 章第 1 节 [2.7.2]；

$\lambda_s$ ——系数，定义见表 6-9；

$\phi$ ——夹角， $\text{deg}$ ，定义见 [3.2.3]。

### 2.5.3 底边舱斜板或内壳板上的普通扶强材

底边舱斜板或内壳板上的单跨普通扶强材的净剖面模数  $W$ ， $\text{cm}^3$ ，和净剪切剖面面积  $A_{sh}$ ， $\text{cm}^2$ ，应不小于按下列公式求得之值：

$$W = K_3 \frac{[g \cos (\theta_1 - \theta_2) + a_Y \sin \theta_1] F'}{8 \lambda_s R_Y}$$

$$A_{sh} = \frac{5 a_Y F'}{\tau_a \sin \phi \sin \phi}$$

式中： $K_3$ ——系数，定义见表 6-7；

$\theta_1$ ， $\theta_2$ ——夹角， $\text{deg}$ ，定义见第 6 章第 1 节 [2.7.3]；

$a_Y$ ——横向加速度， $\text{m/s}^2$ ，定义见第 4 章第 2 节 [3.2]；

$F'$ ——力， $\text{kg}$ ，定义见第 6 章第 1 节 [2.7.3]；

$\lambda_s$ ——系数，定义见表 6-9；

$\phi$ ——夹角， $\text{deg}$ ，定义见 [3.2.3]；

$\varphi$ ——内底板与底边舱斜板或内壳板的夹角， $\text{deg}$ 。

$l'$ ——沿船长方向，内底板、底边舱斜板或内壳板每一基本板格的载荷点之间的距离， $\text{m}$ 。定义见第 6 章第 1 节 [2.7.2]。

系 数  $K_3$

表 6-7

$n_2$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$K_3$	$l$	$l - \frac{l'^2}{l}$	$l - \frac{2l'^2}{3l}$	$l - \frac{5l'^2}{9l}$	$l - \frac{l'^2}{2l}$	$l - \frac{7l'^2}{15l}$	$l - \frac{4l'^2}{9l}$	$l - \frac{3l'^2}{7l}$	$l - \frac{5l'^2}{12l}$	$l - \frac{11l'^2}{27l}$

2.5.4 若每一基本板格的载荷点数量  $n_2$  大于 10 和 / 或垫料数量  $n_3$  大于 5, 内底可视为承载匀布载荷。在此情况下, 内底普通扶强材的结构尺寸应按 [3.2.3] 求得。

### 2.6 用于救生艇或救助艇的降落设备处的甲板普通扶强材

2.6.1 甲板普通扶强材的结构尺寸应由直接计算确定。

2.6.2 降落设备施加的载荷应与降落设备的安全工作载荷一致。

2.6.3 合成应力,  $\text{N/mm}^2$ , 应不超过以下小者:

$$\frac{100}{235} R_{eH} \quad \text{和} \quad \frac{54}{235} R_m$$

式中:  $R_m$ ——扶强材材料的极限抗拉强度,  $\text{N/mm}^2$ 。

## 3 屈服校核

### 3.1 载荷模型

#### 3.1.1 一般要求

应考虑完整工况下由海水以及不同种类货物和压载引起的静水和波浪侧向载荷, 这取决于所考虑的普通扶强材的位置和其相邻舱室的类型。

组成不拟载运液体的舱室边界的板材上的普通扶强材 (不包括船底板和舷侧外板上的普通扶强材) 在进水工况下应经受侧向压力。

在第 4 章第 4 节定义的相互独立的载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2 中, 应按  $10^{-8}$  概率水平计算波浪侧向载荷和船体梁载荷。

#### 3.1.2 完整工况下的侧向压力

完整工况下的侧向压力由静水压力和波浪压力组成。

静水压力  $p_s$  包括:

- 第 4 章第 5 节 [1] 定义的静水压力;
- 第 4 章第 6 节定义的不同种类货物和压载的静水内部压力。

对每种载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2, 波浪压力  $p_w$  包括:

- 第 4 章第 5 节 [1] 定义的水动压力;
- 第 4 章第 6 节定义的不同种类货物和压载的惯性压力。

#### 3.1.3 进水工况下的侧向压力

进水工况下的侧向压力  $p_F$  定义见第 4 章第 6 节 [3]。

#### 3.1.4 试验工况下的侧向压力

试验工况下的侧向压力  $p_T$  等于:

- $p_T = p_{ST} - p_s$ , 对于船底板和舷侧外板
- $p_T = p_{ST}$ , 其他

式中:  $p_{ST}$ ——第 4 章第 6 节 [4] 定义的试验压力;

$p_s$ ——压力, 其值等于:

• 如果试验在船舶处于漂浮状态时进行: 第 4 章第 5 节 [1] 定义的静水压力, 其吃水  $T_1$  为设计者定义的试验吃水。如果未定义  $T_1$ , 则视为试验不在船舶处于漂浮状态时进行。

- 如果试验不在船舶处于浮态时进行:  $p_s = 0$

#### 3.1.5 正应力

对船体梁总纵强度起作用的普通扶强材进行强度校核时考虑的正应力是从下列公式获得的中垂和中拱工况 (如适用) 中  $\sigma_x$  的最大值,  $\text{N/mm}^2$ :

$$\sigma_x = \left[ C_{SW} \left| \frac{M_{SW}}{I_Y} \right| (z - N) + C_{WV} \left| \frac{M_{WV}}{I_Y} \right| (z - N) - C_{WH} \left| \frac{M_{WH}}{I_Z} \right| y \right] \times 10^{-3}$$

式中： $M_{SW}$ ——中垂或中拱工况（视具体情况）中的许用静水弯矩，kN·m；  
 $M_{WV}$ ——第 4 章第 3 节定义的中垂或中拱工况（视具体情况）中的垂向波浪弯矩，kN·m；  
 $M_{WH}$ ——第 4 章第 3 节定义的水平波浪弯矩，kN·m；  
 $C_{SW}$ ——表 6-8 中定义的每种载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2 的组合因子；  
 $C_{WV}$ ， $C_{WH}$ ——表 6-8 中给出的第 4 章第 4 节 [2.2] 中定义的每种载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2 的组合因子。

组合因子  $C_{SW}$ ， $C_{WV}$  和  $C_{WH}$  表 6-8

LC	中拱			中垂		
	$C_{SW}$	$C_{WV}$	$C_{WH}$	$C_{SW}$	$C_{WV}$	$C_{WH}$
H1	不适用			-1	-1	0
H2	1	1	0	不适用		
F1	不适用			-1	-1	0
F2	1	1	0	不适用		
R1	1	0	$1.2 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	-1	0	$1.2 - \frac{T_{LC}}{T_S}$
R2	1	0	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 1.2$	-1	0	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 1.2$
P1	1	$0.4 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	0	-1	$0.4 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	0
P2	1	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 0.4$	0	-1	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 0.4$	0

3.2 除单舷侧散货船的肋骨之外的单跨普通扶强材的强度衡准

3.2.1 边界条件

本条的要求适用于视为两端固定的普通扶强材。

对于其他边界条件，应逐例考虑屈服校核。

3.2.2 相同普通扶强材组

如设有一组相同普通扶强材，将 [3.2.3] 至 [3.2.7] 中计算的最小净剖面模数作为对同组所有扶强材要求值的平均值是可以接受的，但该平均值应不小于最大要求值的 90%。

这同样适用于最小净剪切剖面面积。

3.2.3 完整工况下的单跨普通扶强材的净剖面模数和净剪切剖面面积

承受侧向压力的单跨普通扶强材的净剖面模数  $W$ ， $\text{cm}^3$ ，和净剪切剖面面积  $A_{sh}$ ， $\text{cm}^2$ ，应不小于从下列公式中获得之值：

$$W=\frac{(p_S+p_W)}{m\lambda_S R_Y}sl^2\times 10^3$$

$$A_{sh}=\frac{5(p_S+p_W)sl}{\tau_a\sin\phi}$$

式中： $\lambda_s$ ——表 6-9 定义的系数；  
 $\phi$ ——扶强材腹板和外板的夹角，deg，在扶强材跨距中点量取，当  $\phi$  小于  $75^\circ$  时，应予以修正。

系 数  $\lambda_s$ 表 6-9

普通扶强材	系数 $\lambda_s$
对船体梁总纵强度起作用的纵向扶强材	$1.2\left(1.0-0.85\left \frac{\sigma_X}{R_Y}\right \right)$ ，取不大于 0.9
其他扶强材	0.9

3.2.4 船长  $L$  小于 150 m 船舶的压载货舱槽形舱壁的净剖面模数

船长  $L$  小于 150 m 的船舶，承受横向压力的压载货舱槽形舱壁的净剖面模数  $W$ ， $\text{cm}^3$ ，应不小于从下述公式中获得的值：

$$W=K\frac{(p_S+p_W)s_Cl^2}{m\lambda_S R_Y}\times 10^3$$

式中： $K$ ——系数，根据端部连接形式由表 6-10 和表 6-11 给出。当  $d_H < 2.5d_0$ ，每一半间距槽形舱壁的剖面模数和内底处底墩的剖面模数都应计算；  
 $s_C$ ——槽形的半间距长度，m，定义见 [2.1.1]；  
 $l$ ——支点间的长度，m，如图 6-10 所示；  
 $\lambda_s$ ——系数，定义见表 6-9。

$K$  值， $d_H \geq 2.5d_0$  时表 6-10

底 端	上 端		
	由桁材支撑	直接焊接至甲板	焊接至被船体结构有效支撑的顶墩
由桁材支撑或直接焊接至甲板或内底	0.83	1.25	1.25
焊接至被船体结构有效支撑的底墩	1.25	1.00	0.83

***K*值，  $d_H < 2.5d_0$ 时** **表6-11**

上端支撑	由桁材支撑	连接至甲板	连接至凳
槽形舱壁剖面模数	0.83	0.71	0.65
凳底处的剖面模数	0.83	1.25	1.13

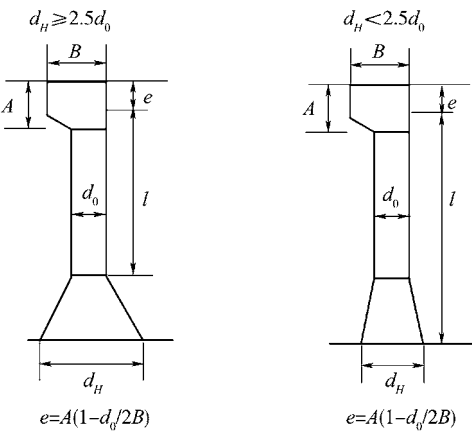


图 6-10 *l* 的量取

3.2.5 进水工况下单跨普通扶强材的净剖面模数和净剪切剖面积（不包括分隔货舱的垂直槽形横舱壁槽条）。

进水工况下单跨普通扶强材的净剖面模数  $W$ ， $\text{cm}^3$ ，和净剪切剖面积  $A_{sh}$ ， $\text{cm}^2$ （不包括分隔货舱的垂直槽形横舱壁槽条），应不小于从下列公式中获得之值：

$$W = \frac{p_F s l^2}{16 \alpha \lambda_s R_Y} \times 10^3$$

$$A_{sh} = \frac{5 p_F s l}{\alpha \tau_a \sin \phi}$$

式中：  $\lambda_s$ ，  $\phi$ ——[3.2.3] 条定义的系数和夹角，通过计及进水工况下的  $\sigma_x$  来确定  $\lambda_s$   
 $\alpha$ ——系数，等于：

- $\alpha = 0.95$ ，对于防撞舱壁的普通扶强材
- $\alpha = 1.15$ ，对于舱室的其他水密边界的普通扶强材
- $\alpha \lambda_s$  不取为大于 1.0。

3.2.6 分隔货舱的垂直槽形水密横舱壁的槽条在进水工况下的弯曲能力和剪切能力  
分隔货舱的水密舱壁的槽条的弯曲能力和剪切能力应符合下列公式：

$$0.5W_{LE} + W_M \geq \frac{M}{0.95R_{eH}} \times 10^3$$

$$\tau \leq \frac{R_{eH}}{2}$$

式中：  $M$ ——从下列公式中获得的槽条弯矩， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；  
 $M = Fl_C/8$

$F$ ——按第 4 章第 6 节 [3.3.7] 计算的合成力, kN;

$l_c$ ——槽条跨距, m, 根据第 3 章第 6 节 [10.4.4] 获得;

$W_{LE}$ ——槽条半宽的净剖面模数  $\text{cm}^3$ , 应按第 3 章第 6 节 [10.4.13] 在槽条的下端计算, 不大于从下列公式中获得之值:

$$W_{LE,M} = W_G + \left( \frac{Qh_G - 0.5h_G^2 s_C p_G}{R_{eH}} \right) \times 10^3$$

$W_G$ ——槽条半宽的净剖面模数,  $\text{cm}^3$ , 应按第 3 章第 6 节 [10.4.14] 在泄货板或封槽板(按适用情况)的上端处计算;

$Q$ ——从下列公式获得的槽条的剪切力, kN

$$Q = 0.8F$$

$h_G$ ——泄货板或封槽板(按适用情况)的高度, m (见第 3 章第 6 节图 3-33 ~ 3-37);

$p_G$ ——合成压力,  $\text{kN/m}^2$ , 应按第 4 章第 6 节 [3.3.7] 在泄货板或封槽板(按适用情况)的中间处计算;

$s_C$ ——槽条间距, m, 应按图 6-6 取;

$W_M$ ——槽条半宽的净剖面模数,  $\text{cm}^3$ , 应按第 3 章第 6 节 [10.4.14] 在槽条的跨距中点计算, 取不大于  $1.15W_{LE}$ ;

$\tau$ ——槽条的剪切应力,  $\text{N/mm}^2$ , 按下式求得:

$$\tau = 10 \frac{Q}{A_{sh}}$$

$A_{sh}$ ——剪切面积,  $\text{cm}^2$ , 按第 3 章第 6 节 [10.4.15] 计算。

### 3.2.7 试验工况下的单跨普通扶强材的净剖面模数和净剪切剖面积

试验工况下的单跨普通扶强材的净剖面模数  $W$ ,  $\text{cm}^3$ , 和净剪切剖面积  $A_{sh}$ ,  $\text{cm}^2$ , 应不小于从下列公式中获得之值:

$$W = \frac{p_T s l^2}{1.05 m R_Y} \times 10^3$$

$$A_{sh} = \frac{5 p_T s l}{1.05 \tau_a \sin \phi}$$

式中:  $\phi$ ——[3.2.3] 中定义的角度。

## 3.3 单舷侧散货船肋骨的强度衡准

### 3.3.1 肋骨的净剖面模数和净剪切剖面积

承受侧向压力的肋骨的净剖面模数  $W$ ,  $\text{cm}^3$  和净剪切剖面积  $A_{sh}$ ,  $\text{cm}^2$ , 在跨距中点区域内应不小于从下列公式中获得之值:

$$W = 1.125 \alpha_m \frac{(p_S + p_W) s l^2}{m \lambda_S R_Y} \times 10^3$$

$$A_{sh} = 1.1 \alpha_S \frac{5 (p_S + p_W) s l}{\tau_S \sin \phi} \left( \frac{l - 2l_B}{l} \right)$$

式中:  $\alpha_m$ ——系数, 等于:

$\alpha_m = 0.42$ , 对于 BC-A 船舶

$\alpha_m = 0.36$ , 对于其他船舶

$\lambda_s$ ——系数, 等于 0.9;

$l$ ——第 3 章第 6 节图 3-21 中定义的肋骨跨距, m, 取值应不小于  $0.25D$ ;

$\alpha_s$ ——系数, 等于:

$\alpha_s = 1.1$ , 对于 BC—A 船规定为空舱的货舱肋骨

$\alpha_s = 1.0$ , 对于其他肋骨

$l_B$ ——图 6-11 中定义的下肘板长度, m。

除以上规定外, 对于拟装载压载水的货舱, 货舱肋骨将承受侧向压力, 其净剖面模数  $W$ ,  $\text{cm}^3$ , 和净剪切剖面面积  $A_{sh}$ ,  $\text{cm}^2$ , 应符合 [3.2.3] 的要求。

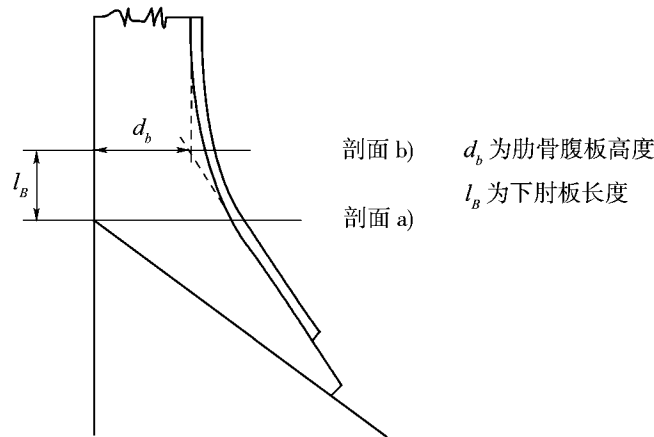


图 6-11 肋骨下肘板长度

### 3.3.2 补充强度要求

除了 [3.3.1] 的要求外, 直接位于防撞舱壁后面的 3 道肋骨的净惯性矩,  $\text{cm}^4$ , 应不小于从下列公式中获得之值:

$$I = 0.18 \frac{(p_s + p_w) l^4}{n}$$

式中:  $l$ ——肋骨跨距, m;

$n$ ——从舱壁至所考虑肋骨的肋骨数量, 等于 1, 2 或 3;

$s$ ——肋骨间距, m。

作为替代, 支撑结构, 例如水平纵桁, 应设在防撞舱壁和与顶边舱和底边舱的横框架处于同一位置的肋骨之间, 从最前面的货舱内保持首尖舱纵桁的连续性。

### 3.3.3 肋骨的下肘板

另外, 在第 3 章第 6 节图 3-21 所示的下肘板水平线, 肋骨和肘板或整体肘板以及连带外板的净剖面模数应不小于从 [3.3.1] 获得的肋骨跨距中点区域所要求的净剖面模数  $W$  的 2 倍。

肋骨下肘板的净厚度  $t_{LB}$ , mm, 应不小于肋骨腹板的净厚度加上 1.5 mm。

此外, 肋骨下肘板的净厚度  $t_{LB}$  应符合下列公式:

- 对于对称翼板肋骨:

$$\frac{h_{LB}}{t_{LB}} \leq 87\sqrt{k}$$

- 对于不对称翼板肋骨:

$$\frac{h_{LB}}{t_{LB}} \leq 73\sqrt{k}$$

下肘板的腹板深度  $h_{LB}$  可从底边舱的斜舱壁与舷侧外板的相交处垂直于下肘板的面板进行测量 (见第 3 章第 6 节图 3-24)。

对于直接位于防撞舱壁后的 3 道肋骨, 其尺寸按 [3.3.2] 增加, 当  $t_{LB}$  大于  $1.73t_W$  时, 厚度  $t_{LB}$  可取作从下列公式中获得的  $t'_{LB}$ :

$$t'_{LB} = (t_{LB}^2 t_W)^{1/3}$$

式中:  $t_W$ ——按 [3.3.1] 确定的对应于  $A_{Sh}$  的净厚度。

翼板突出量应不超过净翼板厚度的  $12k^{0.5}$  倍。

### 3.3.4 肋骨的上肘板

另外, 在第 3 章第 6 节图 3-21 所示的上肘板水平线, 肋骨和肘板或整体肘板以及连带外板的净剖面模数应不小于从 [3.3.1] 获得的肋骨跨距中点区域所要求的净剖面模数  $W$  的 2 倍。

肋骨上肘板的净厚度  $t_{UB}$ , mm, 应不小于肋骨腹板的净厚度。

## 3.4 单舷侧散货船的肋骨的上下连接

### 3.4.1 下列构件的剖面模数:

- 支撑下部连接肘板的舷侧外板和底边舱纵骨;
- 支撑上部连接肘板的舷侧外板和顶边舱纵骨。

对于每个下部和上部连接肘板, 均能分别满足下列等式关系 (见第 3 章第 6 节图 3-24):

$$\sum_n w_i d_i \geq \alpha_T \frac{(p_S + p_W) l^2 l_1^2}{16R_y}$$

式中:  $n$ ——支撑肋骨下 / 上端连接肘板的舷侧外板和底边舱 / 顶边舱的纵向扶强材的数量, 如适用;

$w_i$ ——支撑肋骨下 / 上端连接肘板的舷侧外板或底边舱 / 顶边舱的第  $i$  个纵向扶强材的净剖面模数,  $\text{cm}^3$ ;

$d_i$ ——从上述第  $i$  个纵向扶强材至舷侧外板与底边舱 / 顶边舱的交点的距离, m;

$l_1$ ——底边舱 / 顶边舱中横向支撑强框架的间距, m, 如适用;

$R_y$ ——支撑边肋骨下 / 上端肘板的舷侧外板和底边舱 / 顶边舱的纵向扶强材材料的等效屈服应力的最低值,  $\text{N/mm}^2$ ;

$\alpha_T$ ——系数, 等于:

$\alpha_T = 150$ , 对于支撑下部连接肘板的纵向扶强材

$\alpha_T = 75$ , 对于支撑上部连接肘板的纵向扶强材

$l$ ——[3.3.1] 中定义的肋骨跨距, m。

3.4.2 由第  $i$  个纵向扶强材支撑的肘板的净连接面积  $A_i$ ,  $\text{cm}^2$ , 应从下列公式中获得:

$$A_i = 0.4 \frac{W_i s}{l_1^2} \frac{k_{bkt}}{k_{lg,i}}$$

式中:  $W_i$ ——支撑肋骨的下端或上端连接肘板的舷侧舱壁或斜舱壁 (按适用情况) 的第  $i$  个纵向扶强材的净剖面模数,  $\text{cm}^3$ ;

$l_1$ ——定义见 [3.4.1];

$k_{bkt}$ ——肘板的材料系数;

$k_{lg, i}$ ——第  $i$  个纵向扶强材的材料系数。

3.5 多跨普通扶强材的强度衡准

3.5.1 校核衡准

按 [3.5.2] 计算的多跨距普通扶强材的最大正应力  $\sigma$  和剪应力  $\tau$  应符合表 6-12 中的公式。

多跨普通扶强材的校核衡准 表 6-12

工况	完整	进水	试验
正应力	$\sigma \leq \lambda_s R_Y$	$\sigma \leq \alpha \lambda_s R_Y$	$\sigma \leq 1.05 R_Y$
剪应力	$\tau \leq \tau_a$	$\tau \leq \alpha \tau_a$	$\tau \leq 1.05 \tau_a$

注:  $\lambda_s$ ——[3.2.3] 中定义的系数;

$\alpha$ ——[3.2.5] 中定义的系数。

3.5.2 多跨普通扶强材

多跨普通扶强材的最大正应力  $\sigma$  和剪应力  $\tau$  由直接计算确定, 并计及:

- 静水和波浪压力和力的分布, 如有;
- 中间支撑 (甲板, 桁材等) 的数量和位置;
- 扶强材两端和中间支撑的固定情况;
- 扶强材中间跨距上的几何特征。

4 主要支撑构件的腹板加强筋

4.1 净结构尺寸

4.1.1 如果主要支撑构件的腹板加强筋与普通扶强材面板焊接, 腹板加强筋一半高度处的净剖面面积应不小于从下列公式中获得之值,  $\text{cm}^2$ :

$$A=0.1k_1psl$$

式中:  $k_1$ ——系数, 取决于腹板与普通扶强材的连接, 取为:

$k_1 = 0.30$ , 对无领板的连接 (见第 3 章第 6 节图 3-10)

$k_1 = 0.225$ , 对有一块领板的连接 (见第 3 章第 6 节图 3-11)

$k_1 = 0.20$ , 对有一块或两块大领板的连接 (见第 3 章第 6 节图 3-12 和 3-13)

$p$ ——作用在普通扶强材上的压力,  $\text{kN/m}^2$ 。

4.1.2 非水密主要支撑构件的腹板加强筋的净剖面模数应不小于从下列公式中获得之值,  $\text{cm}^3$ :

$$W=2.5s^2tS_s^2$$

式中:  $s$ ——腹板加强筋的长度,  $\text{m}$ ;

$t$ ——主要支撑构件的腹板净厚度,  $\text{mm}$ ;

$S_s$ ——腹板加强筋的间距,  $\text{m}$ 。

4.1.3 腹板加强筋的连接端部

当不设置肘板时, 压载水舱中主要支撑构件的腹板加强筋的端部处应力,  $\text{N/mm}^2$ , 应符合下式:

$$\sigma \leq 175$$

$$\sigma=1.1K_{con}K_{longi}K_{stiff}\frac{\Delta\sigma}{\cos\theta}$$

式中:  $K_{con}$ ——考虑应力集中的系数, 取为:

$K_{con} = 3.5$ , 对于在双层底或双舷侧舱中的扶强材 (图 6-12)

$K_{con} = 4.0$ , 对于其他情况 (例如底边舱, 顶边舱等) (图 6-12)

$K_{longi}$ ——考虑纵骨横剖面形状的系数, 取为:

$K_{longi} = 1.0$ , 对于对称剖面的扶强材 (例如 T 型材, 扁钢)

$K_{longi} = 1.3$ , 对于非对称剖面的扶强材 (例如角钢, 球扁钢)

$K_{stiff}$ ——考虑扶强材端部形状的系数, 取为:

$K_{stiff} = 1.0$ , 对于扶强材端部的标准形状 (图 6-13)

$K_{stiff} = 0.8$ , 对于扶强材端部的改进形状 (图 6-13)

$\theta$ ——如图 6-14 中给出;

$\Delta \sigma$ ——从纵骨传入腹板加强筋端部的应力范围,  $N/mm^2$ , 由下式获得:

$$\Delta \sigma = \frac{2W}{0.322h'[(A_{w1}l_2) + (A_{w2}l_2)] + A_{s0}}$$

$W$ ——动载荷, N, 由下式获得:

$$W = 1000(l - 0.5s)sp$$

$p$ ——按第 4 章第 6 节 [2] 由液体引起的概率水平为  $10^{-4}$  的最大惯性压力,  $kN/m^2$ ;

$l$ ——纵骨跨距, m;

$s$ ——纵骨间距, m;

$A_{s0}$ ,  $A_{w1}$ ,  $A_{w2}$ ——图 6-14 中给出的几何参数,  $mm^2$ ;

$l_1$ ,  $l_2$ ——图 6-14 中给出的几何参数, mm;

$h'$ ——由下式获得, mm;

$$h' = h_s + h'_0$$

$h_s$ ——图 6-14 给出, mm;

$h'_0$ ——由下式获得, mm;

$$h'_0 = 0.636b' \text{ , 对于 } b' \leq 150$$

$$h'_0 = 0.216b' + 63 \text{ , 对于 } 150 < b'$$

$b'$ ——腹板加强筋端部的最小宽度, mm, 如图 6-14 所示。

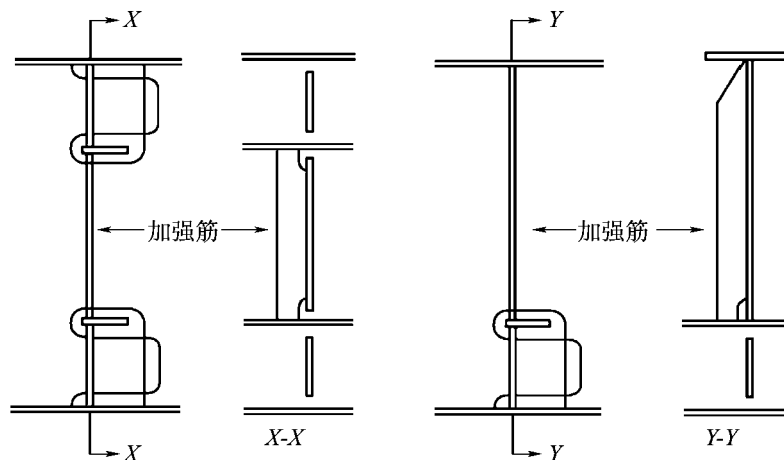


图 6-12 设置在主要支撑构件上的腹板加强筋

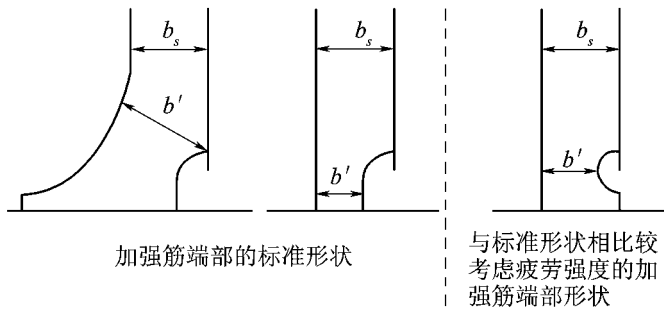


图 6-13 腹板加强筋的端部形状

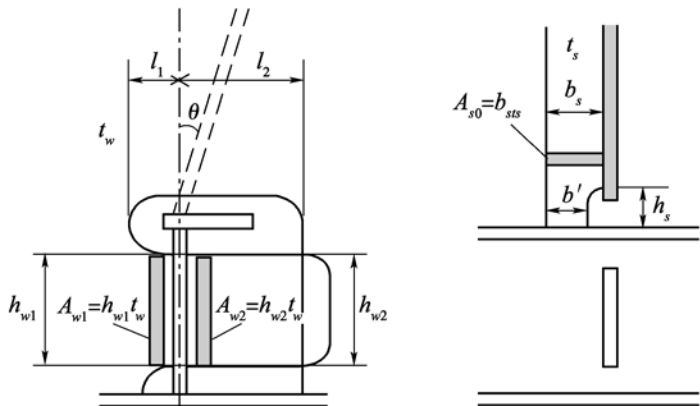
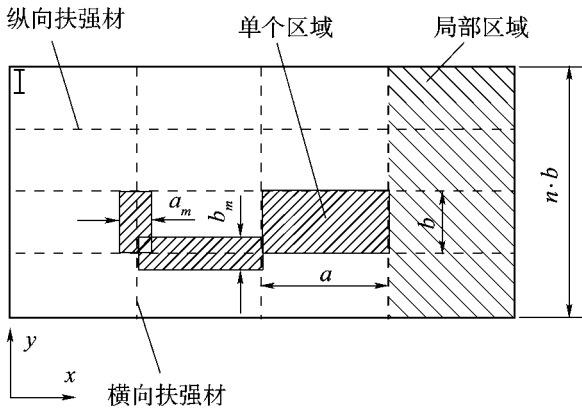


图 6-14 几何参数的定义

第3节 普通扶强材和加筋板格的屈曲和极限强度

符号

本节中未定义的符号参见第 1 章第 4 节。  
本节中，压应力和剪应力取为正值，拉应力取为负值。  
 $a$ ：单个或局部板格的长度，mm(图 6-15)。  
 $b$ ：基本板格的宽度，mm。



纵向：长度 $a$ 方向的扶强材；横向：宽度 $b$ 方向的扶强材

图 6-15 板格总体布置

$\alpha$ ：基本板格的长宽比，取为：

$$\alpha = \frac{a}{b}$$

$n$ ：局部或整个板格内基本板格宽度的数量。

$t$ ：净板厚，mm。

$\sigma_n$ ：船体梁弯曲引起的正应力，N/mm<sup>2</sup>。

$\tau_{SF}$ ：[2.1.3] 定义的剪力引起的剪应力，N/mm<sup>2</sup>。

$\sigma_x$ ： $x$  方向的膜应力， N/mm<sup>2</sup>。

$\sigma_y$ ： $y$  方向的膜应力， N/mm<sup>2</sup>。

$\tau$ ： $x$ - $y$  平面的剪应力，N/mm<sup>2</sup>。

$\lambda$ ：基准细长度，取为：

$$\lambda = \sqrt{\frac{R_{eH}}{K\sigma_e}}$$

$K$ ：按表 6-14 和表 6-15 的屈曲因子。

$\sigma_e$ ：基准应力，取为：

$$\sigma_e = 0.9E \left( \frac{t}{b'} \right)^2$$

$b'$ ：基本板格的短边

$\psi$ ：边缘应力比，取为：

$$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$$

式中： $\sigma_1$ ——最大压应力；

$\sigma_2$ ——最小压应力或拉应力。

$S$ ：安全因子，取为：

$S=1.0$ ，除涉及以下情况之外

$S=1.1$ ，对于单独的无遮掩的承受局部载荷的结构（如舱口盖、基座）

$S=1.15$ ，对于按 [4.2] 计算的舱口围板、顶边舱和底边舱斜板、内底、内壳（如可能）、单舷侧构造的舷侧外板和横舱壁的顶凳和底凳的纵向和横向普通扶强材在侧向屈曲模式下的极限强度。

对铝合金结构，安全系数在每一工况中增加 0.1。

$F_1$ ：根据表 6-13，基本板格沿长边扶强材的边界条件修正系数。如果板格纵向边上的固定程度不相等时，则应采用适用的  $F_1$  系数的最小值。

修正系数  $F_1$  表 6-13

	$F_1^{(2)}$	板边的扶强材
两端削斜的扶强材	1.00	
当两端与邻近结构有效连接 <sup>(1)</sup> 的指导值	1.05	扁钢
	1.10	球扁钢
	1.20	角钢和 T 型材
	1.30	刚性大的桁材（如底肋板）

注：（1）精确值可通过直接计算来确定。

（2）对于具有不同边缘扶强材的板格，应采用  $F_1$  的平均值。

## 1 一般要求

### 1.1

1.1.1 本节要求适用于承受压应力、剪应力和侧向压力的构件的屈曲校核。

1.1.2 应对下列部件进行屈曲校核：

a) 按 [2]、[3] 和 [4] 的要求及对第 4 章第 4 节所定义的完整工况下的所有载荷工况：

- 船体横剖面分析中的基本板格和普通扶强材；
- 第 7 章所要求的有限元模型中的基本板格模型。

b) 按 [6] 的要求且仅在进水工况下：

- BC—A 和 BC—B 船舶的垂直槽形水密横舱壁。

1.1.3 基本板格的边界条件应视为简支。如果边界条件与简支有明显区别，可按表 6-14 的情况 3、4 和 7 至 10，采用更为合适的边界条件。

## 2 适用范围

### 2.1 用于船体横剖面分析的载荷模型

#### 2.1.1 一般要求

所计及船体横剖面的构件应按以下各项的组合根据屈曲衡准进行校核：

- 船体梁弯曲引起的正应力  $\sigma_n$ ，定义见 [2.1.2]；
- 剪应力  $\tau_{SF}$ ，定义见 [2.1.3]；
- 视具体情况在完整工况下施加在构件上的侧向压力。

在第 4 章第 4 节定义的相互独立的载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2 中，应按  $10^{-8}$  的概率水平计算侧向压力和船体梁载荷。

#### 2.1.2 正应力 $\sigma_n$

对于 [2.1.1] 中所指的每个相互独立的载荷工况，计及的正应力  $\sigma_n$  为按第 6 章第 1 节 [3.1.5] 和第 6 章第 2 节 [3.1.5] 中的公式，分别按基本板格和普通扶强材计算的在所考虑结构件上的最大压应力。

对普通横向扶强材，每个相互独立载荷工况的正应力  $\sigma_n$  是每端计算的最大压应力。

#### 2.1.3 剪应力

对于 [2.1.1] 中所指的每个相互独立载荷工况，计及的剪应力  $\tau_{SF}$  是剪力引起的剪应力，kN，等于：

$$Q = Q_{SW} + C_{QW}Q_{WV}$$

式中： $Q_{SW}$ ——所计及船体横剖面在完整工况下的设计静水剪力，kN，定义见第 4 章第 3 节 [2.3]；

$Q_{WV}$ ——所计及船体横剖面在完整工况下的垂向波浪剪力，kN，定义见第 4 章第 3 节 [3.2]；

$C_{QW}$ ——载荷组合因子，定义见第 4 章第 4 节表 4-6。

如果在初步设计阶段无设计静水剪力数据，可用以下默认值，kN：

$$Q_{SW0} = 30CLB(C_B + 0.7) \times 10^{-2}$$

#### 2.1.4 侧向压力

屈曲校核所应计及的侧向压力，其对于曲面板格的定义见第 6 章第 1 节 [3.1]，对于普通扶强材的定义见第 6 章第 2 节 [3.1]。

曲面板格的载荷计算点位于曲面板格沿曲线的两端长度中点。

普通扶强材的载荷计算点的定义见第 6 章第 2 节 [1.4]。

## 2.2 适用范围

2.2.1 屈曲和极限强度衡准的适用范围在本章附录 1 中描述。

### 3 基本板格的屈曲衡准

#### 3.1 板

##### 3.1.1 一般要求

基本板格的净厚度应符合下列要求：

$$t \geq b/100$$

在船体横剖面分析中，基本板格的验证应按 [3.1.2] 进行。应针对以下两种不同的应力组合情况进行验证：

- 应力组合 1：[2.1.2] 中定义的正应力的 100% 和 [2.1.3] 中定义的剪应力的 70%；
- 应力组合 2：[2.1.2] 中定义的正应力的 70% 和 [2.1.3] 中定义的剪应力的 100%。

在有限元模型分析中，基本板格的验证应按 [3.2] 进行。

##### 3.1.2 横剖面分析中的基本板格验证

每个基本板格均应符合下列衡准，且考虑 [2.1] 中定义的载荷：

- 纵骨架式板材

$$\left( \frac{|\sigma_x|S}{\kappa_x R_{eH}} \right)^{e_1} + \left( \frac{|\tau|S\sqrt{3}}{\kappa_\tau R_{eH}} \right)^{e_1} \leq 1.0, \text{ 对于应力组合 1, 且 } \sigma_x = \sigma_n \text{ 及 } \tau = 0.7 \tau_{SF}$$

$$\left( \frac{|\sigma_x|S}{\kappa_x R_{eH}} \right)^{e_1} + \left( \frac{|\tau|S\sqrt{3}}{\kappa_\tau R_{eH}} \right)^{e_1} \leq 1.0, \text{ 对于应力组合 2, 且 } \sigma_x = 0.7 \sigma_n \text{ 及 } \tau = \tau_{SF}$$

- 横骨架式板材

$$\left( \frac{|\sigma_y|S}{\kappa_y R_{eH}} \right)^{e_1} + \left( \frac{|\tau|S\sqrt{3}}{\kappa_\tau R_{eH}} \right)^{e_1} \leq 1.0, \text{ 对于应力组合 1, 且 } \sigma_y = \sigma_n \text{ 及 } \tau = 0.7 \tau_{SF}$$

$$\left( \frac{|\sigma_y|S}{\kappa_y R_{eH}} \right)^{e_1} + \left( \frac{|\tau|S\sqrt{3}}{\kappa_\tau R_{eH}} \right)^{e_1} \leq 1.0, \text{ 对于应力组合 2, 且 } \sigma_y = 0.7 \sigma_n \text{ 及 } \tau = \tau_{SF}$$

上述条件中的每一项必须小于 1.0。

折减系数  $k_x$  和  $k_y$  由表 6-14 和 / 或表 6-15 给出。

系数  $e_1$ 、 $e_2$  和  $e_3$  按表 6-16 中的定义。

为确定  $e_3$ ，对于纵骨架式板材， $k_y$  应取 1，对于横骨架式板材， $k_x$  应取 1。

#### 3.2 有限元模型分析中的基本板格验证

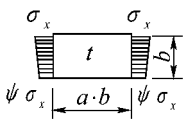
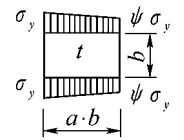
##### 3.2.1 一般要求

基本板格的屈曲校核应在 [3.2.2] 中定义的载荷下，按照 [3] 的要求进行。

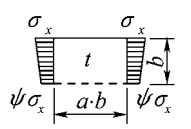
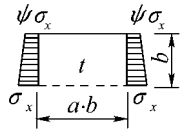
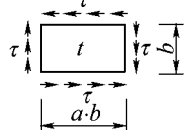
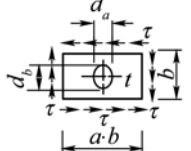
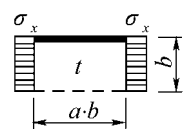
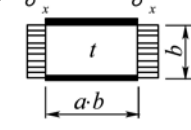
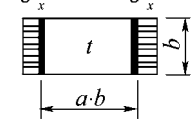
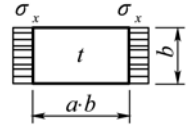
对于表 6-14 的每一相关工况，屈曲和折减系数应按 [3.2.2] 加载到所考虑的基本板格上所得的计算应力而确定。

基本板格的屈曲和折减系数

表 6-14

屈曲载荷工况	板边应力比 $\psi$	长宽比 $\alpha = a/b$	屈曲系数 $K$	折减系数 $\kappa$
1 	$1 \geq \psi \geq 0$	$\alpha \geq 1$	$K = \frac{8.4}{\psi + 1.1}$	$\kappa_x = 1$ , 对 $\lambda \leq \lambda_c$ $\kappa_x = c \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{0.22}{\lambda^2} \right)$ , 对 $\lambda > \lambda_c$
	$0 > \psi > -1$		$K = 7.63 - \psi \quad (6.26 - 10\psi)$	$c = (1.25 - 0.12\psi) \leq 1.25$
	$\psi \leq -1$		$K = (1 - \psi)^2 \cdot 5.975$	$\lambda_c = \frac{c}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{0.88}{c}} \right)$
2 	$1 \geq \psi \geq 0$	$\alpha \geq 1$	$K = F_1 \left[ 1 + \frac{1}{\alpha^2} \right]^2 \frac{2.1}{(\psi + 1.1)}$	$\kappa_y = c \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{R + F^2(H - R)}{\lambda^2} \right)$  $c = (1.25 - 0.12\psi) \leq 1.25$  $R = \lambda \left( 1 - \frac{\lambda}{c} \right)$ , 对 $\lambda < \lambda_c$  $R = 0.22$ , 对 $\lambda \geq \lambda_c$  $\lambda_c = \frac{c}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{0.88}{c}} \right)$
	$0 > \psi > -1$	$1 \leq \alpha \leq 1.5$	$K = F_1 \left[ \left( 1 + \frac{1}{\alpha^2} \right)^2 \frac{2.1(1 + \psi)}{1.1} - \frac{\psi}{\alpha^2} (13.9 - 10\psi) \right]$	$F = \left[ 1 - \frac{K}{0.91 \lambda_p^2} - 1 \right] \cdot c_1 \geq 0$  $\lambda_p^2 = \lambda^2 - 0.5$ , 对 $1 \leq \lambda_p^2 \leq 3$  $c_1 = 1$ , 对直接载荷引起的 $\sigma_y$  $c_1 = \left[ 1 - \frac{F_1}{\alpha} \right] \geq 0$ , 对弯曲 (一
		$\alpha > 1.5$	$K = F_1 \left[ \left( 1 + \frac{1}{\alpha^2} \right)^2 \frac{2.1(1 + \psi)}{1.1} - \frac{\psi}{\alpha^2} (5.87 + 1.87\alpha^2 + \frac{8.6}{\alpha^2} - 10\psi) \right]$	
	$\psi \leq -1$	$1 \leq \alpha \leq \frac{3(1 - \psi)}{4}$	$K = F_1 \left( \frac{1 - \psi}{\alpha} \right)^2 \cdot 5.975$	般情况下) 引起的 $\sigma_y$  $c_1 = 0$ , 对极端工况下 (如水密舱壁) 的弯曲引起的 $\sigma_y$  $H = \lambda - \frac{2\lambda}{c(T + \sqrt{T^2 - 4})} \geq R$  $T = \lambda + \frac{14}{15\lambda} + \frac{1}{3}$
		$\alpha > \frac{3(1 - \psi)}{4}$	$K = F_1 \left[ \left( \frac{1 - \psi}{\alpha} \right)^2 \cdot 3.9675 + 0.5375 \left( \frac{1 - \psi}{\alpha} \right)^4 + 1.87 \right]$	

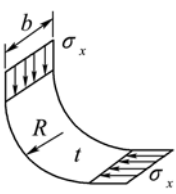
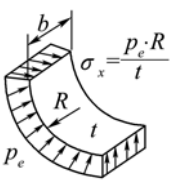
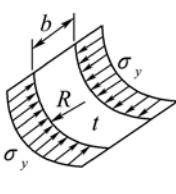
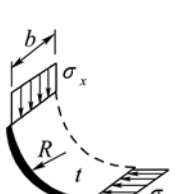
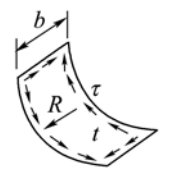
续表 6-14

屈曲载荷工况	板边应力比 $\psi$	长宽比 $\alpha = a/b$	屈曲系数 $K$	折减系数 $\kappa$
	$1 \geq \psi \geq 0$	$\alpha > 0$	$K = \frac{4 \left( 0.425 + \frac{1}{\alpha^2} \right)}{3\psi + 1}$	$\kappa_x = 1$ , 对 $\lambda \leq 0.7$ $\kappa_x = \frac{1}{\lambda_2 + 0.51}$ , 对 $\lambda > 0.7$
	$0 > \psi \geq -1$		$K = 4 \left( 0.425 + \frac{1}{\alpha^2} \right) (1 + \psi) - 5\psi(1 - 3.42\psi)$	
	$1 \geq \psi \geq -1$	$\alpha > 0$	$K = \left( 0.425 + \frac{1}{\alpha^2} \right) \frac{3 - \psi}{2}$	
	$\psi = 0$		$K = K_\tau \sqrt{3}$	$\kappa_\tau = 1$ , 对 $\lambda \leq 0.84$ $\kappa_\tau = \frac{0.84}{\lambda}$ , 对 $\lambda > 0.84$
		$\alpha \geq 1$	$K_\tau = \left[ 5.34 + \frac{4}{\alpha^2} \right]$	
		$0 < \alpha < 1$	$K_\tau = \left[ 4 + \frac{5.34}{\alpha^2} \right]$	
	$\psi = 0$		$K = K' r$ $K' = K$ , 按照载荷工况 5 $r =$ 折减因子 $r = \left( 1 - \frac{d_a}{a} \right) \left( 1 - \frac{d_b}{b} \right)$ 且 $\frac{d_a}{a} \leq 0.7$ 和 $\frac{d_b}{b} \leq 0.7$	
	$\psi = 0$	$\alpha \geq 1.64$	$K = 1.28$	$\kappa_x = 1$ , 对 $\lambda \leq 0.7$ $\kappa_x = \frac{1}{\lambda^2 + 0.51}$ , 对 $\lambda > 0.7$
		$\alpha < 1.64$	$K = \frac{1}{\alpha^2} + 0.56 + 0.13 \alpha^2$	
	$\psi = 0$	$\alpha \geq \frac{2}{3}$	$K = 6.97$	$\kappa_x = 1$ , 对 $\lambda \leq 0.83$ $\kappa_x = 1.13 \left[ \frac{1}{\lambda} - \frac{0.22}{\lambda^2} \right]$ , 对 $\lambda > 0.83$
		$\alpha < \frac{2}{3}$	$K = \frac{1}{\alpha^2} + 2.5 + 5\alpha^2$	
	$\psi = 0$	$\alpha \geq 4$	$K = 4$	
		$4 > \alpha > 1$	$K = 4 + \left[ \frac{4 - \alpha}{3} \right]^4 \cdot 2.74$	
		$\alpha \leq 1$	$K = \frac{4}{\alpha^2} + 2.07 + 0.67 \alpha^2$	
	$\psi = 0$	$\alpha \geq 4$	$K = 6.97$	
		$4 > \alpha > 1$	$K = 6.97 + \left[ \frac{4 - \alpha}{3} \right]^4 \cdot 3.1$	
		$\alpha \leq 1$	$K = \frac{4}{\alpha^2} + 2.07 + 4 \alpha^2$	
边界条件说明 ----- 板边为自由 ===== 板边为简支 ===== 板边为固定				

注：表 6-14 的载荷工况为一般工况。应力的每个分量（ $\sigma_x$ ， $\sigma_y$ ）应理解为局部坐标之值。

曲板板格的屈曲系数和折减系数,  $R/t \leq 2500$ 

表 6-15

屈曲载荷工况	长宽比 $b/R$	屈曲系数 $K$	折减系数 $\kappa$
1a 	$\frac{b}{R} \leq 1.63 \sqrt{\frac{R}{t}}$	$K = \frac{b}{\sqrt{Rt}} + 3 \frac{(Rt)^{0.175}}{b^{0.35}}$	$\kappa_x = 1$ , 对 $\lambda \leq 0.4^2$ $\kappa_x = 1.274 - 0.686 \cdot \lambda$ , 对 $0.4 < \lambda \leq 1.2$
1b  $p_e$ 为外部压力, $\text{N/mm}^2$	$\frac{b}{R} > 1.63 \sqrt{\frac{R}{t}}$	$K = 0.3 \frac{b^2}{R^2} + 2.25 \left( \frac{R^2}{bt} \right)^2$	$\kappa_r = \frac{0.65}{\lambda^2}$ , 对 $\lambda > 1.2$
2 	$\frac{b}{R} \leq 0.5 \sqrt{\frac{R}{t}}$	$K = 1 + \frac{2}{3} \frac{b^2}{Rt}$	$\kappa_y = 1$ , 对 $\lambda \leq 0.25^2$ $\kappa_y = 1.233 - 0.933 \cdot \lambda$ , 对 $0.25 < \lambda \leq 1$ $\kappa_y = 0.3 / \lambda^3$ , 对 $1 < \lambda \leq 1.5$ $\kappa_y = 0.2 / \lambda^2$ , 对 $\lambda > 1.5$
	$\frac{b}{R} > 0.5 \sqrt{\frac{R}{t}}$	$K = 0.267 \frac{b^2}{Rt} \left[ 3 - \frac{b}{R} \sqrt{\frac{t}{R}} \right] \geq 0.4 \frac{b^2}{Rt}$	
3 	$\frac{b}{R} \leq \sqrt{\frac{R}{t}}$	$K = \frac{0.6b}{\sqrt{Rt}} + \frac{\sqrt{Rt}}{b} - 0.3 \frac{Rt}{b^2}$	同载荷工况 1a
	$\frac{b}{R} > \sqrt{\frac{R}{t}}$	$K = 0.3 \frac{b^2}{R^2} + 0.291 \left( \frac{R^2}{bt} \right)^2$	
4 	$\frac{b}{R} \leq 8.7 \sqrt{\frac{R}{t}}$	$K = K_\tau \sqrt{3}$ $K_\tau = \left[ 28.3 + \frac{0.67b^3}{R^{1.5}t^{1.5}} \right]^{0.5}$	$\kappa_\tau = 1$ , 对 $\lambda \leq 0.4$ $\kappa_\tau = 1.274 - 0.686 \cdot \lambda$ , 对 $0.4 < \lambda \leq 1.2$
	$\frac{b}{R} > 8.7 \sqrt{\frac{R}{t}}$	$K_\tau = 0.28 \frac{b^2}{R\sqrt{Rt}}$	$\kappa_\tau = \frac{0.65}{\lambda^2}$ , 对 $\lambda > 1.2$
边界条件说明 - - - - - 板边自由 = = = = = 板边简支 — — — — — 板边固定			

注: (1) 对半径很大的曲板区域,  $K$  值不必取小于按扩展的平面区域得出的值;

(2) 对位于平面内局部或整个区域的曲面单个区域, 如舭列板, 折减系数可按如下取为:

载荷工况 1b:  $\kappa_x = \frac{0.8}{\lambda^2} \leq 1.0$

载荷工况 2:  $\kappa_y = \frac{0.65}{\lambda^2} \leq 1.0$

3.2.2 应力

对于屈曲校核，屈曲应力应按表 6-14 或表 6-15，包括对于第 4 章第 7 节要求的装载工况和按第 7 章要求得到的应力比  $\psi$  予以确定。

3.2.3 泊松效应

对于屈曲评估，用叠加法或直接法求解的应力应予以折减，这是因为泊松效应在两个分析方法中均被计入。修正应在局部和整体载荷引起的应力累加之后进行。

$\sigma_x^*$  和  $\sigma_y^*$  两者均为压应力，以应用于按下列公式进行的应力折减：

$$\sigma_x=(\sigma_x^*-0.3\sigma_y^*)/0.91$$
$$\sigma_y=(\sigma_y^*-0.3\sigma_x^*)/0.91$$

式中： $\sigma_x^*$ 、 $\sigma_y^*$ ——含有泊松效应的应力：

若压应力满足条件  $\sigma_y^*<0.3\sigma_x^*$ ，则  $\sigma_y=0.3$  和  $\sigma_x=\sigma_x^*$

若压应力满足条件  $\sigma_x^*<0.3\sigma_y^*$ ，则  $\sigma_x=0$  和  $\sigma_y=\sigma_y^*$

3.2.4 校核衡准

每个基本板格均应符合以下衡准，且考虑 [2.1] 中定义的载荷：

$$\left(\frac{|\sigma_x|S}{\kappa_x R_{eH}}\right)^{e_1}+\left(\frac{|\sigma_y|S}{\kappa_y R_{eH}}\right)^{e_2}-B\left(\frac{\sigma_x\sigma_yS^2}{R_{eH}^2}\right)+\left(\frac{|\tau|S\sqrt{3}}{\kappa_\tau R_{eH}}\right)^{e_3}\leqslant 1.0$$

此外，每个压应力  $\sigma_x$  和  $\sigma_y$ ，以及剪应力  $\tau$  应满足下列公式：

$$\left(\frac{|\sigma_x|S}{\kappa_x R_{eH}}\right)^{e_1}\leqslant 1.0$$
$$\left(\frac{|\sigma_y|S}{\kappa_y R_{eH}}\right)^{e_2}\leqslant 1.0$$
$$\left(\frac{|\tau|S\sqrt{3}}{\kappa_\tau R_{eH}}\right)^{e_3}\leqslant 1.0$$

系数  $e_1$ 、 $e_2$  和  $e_3$  和系数  $B$  表 6-16

指数 $e_1 \sim e_3$ 和系数 $B$	板 格	
	平面	曲面
$e_1$	$1+\kappa_x^4$	1.25
$e_2$	$1+\kappa_y^4$	1.25
$e_3$	$1+\kappa_x\kappa_y\kappa_\tau^2$	2.0
$B$ $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ 为正值（压应力）	$(\kappa_x\kappa_y)^5$	0
$B$ $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ 为负值（拉应力）	1	—

折减因数  $\kappa_x$  和  $\kappa_y$  由表 6-14 和 / 或表 6-15 给出。

- 当  $\sigma_x \leq 0$  (拉应力), 则  $\kappa_x = 1.0$
- 当  $\sigma_y \leq 0$  (拉应力), 则  $\kappa_y = 1.0$

系数  $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$  以及系数  $B$  按表 6-16 中的定义。

### 3.3 腹板和翼板

对桁材剖面的非加筋腹板和翼板, 应按 [3.1] 证实其基本板格有足够的屈曲强度。

## 4 局部和整体板格的屈曲衡准

### 4.1 纵向和横向扶强材

4.1.1 在船体横剖面分析中, 局部和整体板格的纵向和横向普通扶强材应符合 [4.2] 和 [4.3] 的要求。

### 4.2 侧向屈曲模式中的极限强度

#### 4.2.1 校核衡准

纵向和横向普通扶强材应符合以下衡准:

$$\frac{\sigma_a + \sigma_b}{R_{eH}} S \leq 1$$

式中:  $\sigma_a$ ——扶强材轴向均布压应力,  $\text{N/mm}^2$ :

$\sigma_a = \sigma_n$ , 对纵向扶强材

$\sigma_a = 0$ , 对横向扶强材

$\sigma_b$ ——扶强材弯曲应力,  $\text{N/mm}^2$ :

$\sigma_b$  按 [4.2.2] 计算, 且  $\sigma_x = \sigma_n$  及  $\tau = \tau_{SF}$

#### 4.2.2 弯曲应力 $\sigma_b$ 的估算

扶强材弯曲应力  $\sigma_b$ ,  $\text{N/mm}^2$ , 应等于:

$$\sigma_b = \frac{M_0 + M_1}{W_{st} \times 10^3}$$

式中:  $M_0$ ——由扶强材变形  $w$  引起的弯矩,  $\text{N} \cdot \text{mm}$ , 应为:

$$M_0 = F_{Ki} \frac{p_z w}{c_f - p_z}$$

且  $c_f - p_z > 0$

$M_1$ ——由侧向载荷  $p$  引起的弯矩,  $\text{N} \cdot \text{mm}$ , 应为:

$$M_1 = \frac{p b a^2}{24 \times 10^3}, \text{ 对纵向扶强材}$$

$$M_1 = \frac{p a (n b)^2}{8 c_s \times 10^3}, \text{ 对横向扶强材, 且对普通横向扶强材, } n \text{ 取 } 1$$

式中:  $W_{st}$ ——(纵向或横向)扶强材的净剖面模数,  $\text{cm}^3$ , 包括按 [5] 的板材有效宽度, 应为:

- 若侧向压力施加于扶强材上:

若侧向压力作用在扶强材同侧, 则  $W_{st}$  为翼板处计算的净剖面模数。

若侧向压力作用在扶强材背面, 则  $W_{st}$  为带板处计算的净剖面模数。

- 若未有侧向压力施于扶强材上:

则  $W_{st}$  为翼板和带板处所计算的最小的净剖面模数。

$c_s$ ——计入横向扶强材边界条件的系数:

$c_s = 1.0$ , 对于简支扶强材

$c_s = 2.0$ , 对于受部分约束的扶强材

$p$ ——侧向载荷,  $\text{kN/m}^2$ , 按第 4 章第 5 节和第 4 章第 6 节定义, 且按第 6 章第 2 节 [1.4.2] 定义的载荷点计算。

$F_{ki}$ ——扶强材的理想屈曲力, N, 应为:

$$F_{Kix} = \frac{\pi^2}{a^2} EI_x \times 10^4, \text{ 对于纵向扶强材}$$

$$F_{Kiy} = \frac{\pi^2}{(nb)^2} EI_y \times 10^4, \text{ 对于横向扶强材}$$

$I_x, I_y$ ——纵向或横向扶强材的净惯性矩,  $\text{cm}^4$ , 包括按 [5] 要求的带板有效宽度。 $I_x$  和  $I_y$  应符合下列衡准:

$$I_x \geq \frac{bt^3}{12 \times 10^4}$$

$$I_y \geq \frac{at^3}{12 \times 10^4}$$

$p_z$ ——由  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\tau$  引起的扶强材名义侧向载荷,  $\text{N/mm}^2$ :

$$p_{zx} = \frac{t_a}{b} \left( \sigma_{xl} \left( \frac{\pi b}{a} \right)^2 + 2c_y \sigma_y + \tau_1 \sqrt{2} \right), \text{ 对于纵向扶强材}$$

$$p_{zy} = \frac{t_a}{a} \left( 2c_x \sigma_{xl} + \sigma_y \left( \frac{\pi a}{nb} \right)^2 \left( 1 + \frac{A_y}{at_a} \right) + \tau_1 \sqrt{2} \right), \text{ 对于横向扶强材}$$

$$\sigma_{xl} = \sigma_x \left( 1 + \frac{A_x}{b \cdot t_a} \right)$$

$t_a$ ——带板的净提供厚度, mm;

$c_x, c_y$ ——考虑垂直于扶强材轴线且沿扶强材长度呈变化分布应力的系数, 应为:

$$0.5 (1 + \psi), \text{ 对 } 0 \leq \psi \leq 1$$

$$\frac{0.5}{1 + \psi}, \text{ 对 } \psi < 0$$

$A_x, A_y$ ——不计带板的纵向或横向扶强材的净剖面面积,  $\text{mm}^2$ :

$$\tau_1 = \left[ \tau - t \sqrt{R_{eH} E \left( \frac{m_1}{a^2} + \frac{m_2}{a^2} \right)} \right] \geq 0$$

$m_1, m_2$ ——系数, 应为:

$$\frac{a}{b} \geq 2.0 : m_1 = 1.47 \quad m_2 = 0.49$$

对于纵向扶强材

$$\frac{a}{b} < 2.0 : m_1 = 1.97 \quad m_2 = 0.37$$

$$\frac{a}{n \cdot b} \geq 0.5 : m_1 = 0.37 \quad m_2 = \frac{1.96}{n^2}$$

对于横向扶强材

$$\frac{a}{n \cdot b} < 0.5 : m_1 = 0.49 \quad m_2 = \frac{1.47}{n^2}$$

$$w = w_0 + w_1$$

$w_0$ ——假定的缺陷, mm, 取为:

$$w_0 = \min\left(\frac{a}{250}, \frac{b}{250}, 10\right), \text{ 对于纵向扶强材}$$

$$w_0 = \min\left(\frac{a}{250}, \frac{n \cdot b}{250}, 10\right), \text{ 对于横向扶强材}$$

对两端削斜的扶强材,  $w_0$  应不小于带板中点至计及带板有效宽度的扶强材中和轴的距离。

$w_1$ ——由侧向载荷  $p$  导致的扶强材在其跨距中点处的变形, mm, 如为均布载荷,  $w_1$  可用下列之值:

$$w_1 = \frac{pba^4}{384 \times 10^7 EI_x}, \text{ 对于纵向扶强材}$$

$$w_1 = \frac{5ap(nb)^4}{384 \times 10^7 EI_y c_s}, \text{ 对于横向扶强材}$$

$c_f$ ——扶强材提供的弹性支持, N/mm<sup>2</sup>, 应为:

- 对纵向扶强材

$$c_f = F_{Kix} \frac{\pi^2}{a^2} (1 + c_{px})$$

$$c_{px} = \frac{1}{1 + \frac{0.91 \left( \frac{12 \cdot 10^4 I_x}{t^3 b} - 1 \right)}{c_{xa}}}$$

$c_{xa}$ ——系数, 取为:

$$c_{xa} = \left[ \frac{a}{2b} + \frac{2b}{a} \right]^2, \text{ 对于 } a \geq 2b$$

$$c_{xa} = \left[ 1 + \left( \frac{a}{2b} \right)^2 \right]^2, \text{ 对于 } a < 2b$$

- 对于横向扶强材:

$$c_f = c_s F_{Kly} \frac{\pi^2}{(n \cdot b)^2} (1 + c_{py})$$

$$c_{py} = \frac{1}{1 + \frac{0.91 \left( \frac{12 \cdot 10^4 I_x}{t^3 b} - 1 \right)}{c_{ya}}}$$

$c_{ya}$ ——系数, 取为:

$$c_{ya} = \left[ \frac{nb}{2a} + \frac{2a}{nb} \right]^2, \text{ 对于 } nb \geq 2a$$

$$c_{ya} = \left[ 1 + \left( \frac{nb}{2a} \right)^2 \right]^2, \text{ 对于 } nb < 2a$$

#### 4.2.3 不承受侧向压力的纵向和横向普通扶强材的等效平衡

不承受侧向压力的纵向和横向普通扶强材, 如其净惯性矩  $I_x$  和  $I_y$ ,  $\text{cm}^4$ , 不小于按下式所得之值, 则视为符合 [4.2.1] 之要求:

- 对纵向扶强材:

$$I_x = \frac{p_{zx} a^2}{\pi^2 \times 10^4} \left( \frac{w_{0x} h_w}{\frac{R_{eH}}{S} - \sigma_x} + \frac{a^2}{\pi^2 E} \right)$$

- 对横向扶强材:

$$I_y = \frac{p_{zy} (nb)^2}{\pi^2 \times 10^4} \left( \frac{w_{0y} h_w}{\frac{R_{eH}}{S} - \sigma_y} + \frac{(nb)^2}{\pi^2 E} \right)$$

### 4.3 扭转屈曲

#### 4.3.1 纵向扶强材

纵向扶强材应符合以下平衡:

$$\frac{\sigma_x S}{\kappa_T R_{eH}} \leq 1.0$$

式中:  $\kappa_T$ ——系数, 应为:

$$\kappa_T = 1.0, \text{ 对于 } \lambda_T \leq 0.2$$

$$\kappa_T = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda_T^2}}, \text{ 对于 } \lambda_T > 0.2$$

$$\Phi = 0.5 (1 + 0.21 (\lambda_T - 0.2) + \lambda_T^2)$$

$\lambda_T$ ——基准细长度, 应为:

$$\lambda_T = \sqrt{\frac{R_{eH}}{\sigma_{KIT}}}$$

$$\sigma_{KIT} = \frac{E}{I_p} \left( \frac{\pi^2 I_w \times 10^2}{a^2} \varepsilon + 0.385 I_T \right) \quad \text{N/mm}^2$$

$I_p$ ——扶强材的净极惯性矩，cm<sup>4</sup>，按表 6-17 定义，且与图 6-16 所示的点 C 相关；  
 $I_T$ ——扶强材的净圣维南惯性矩，cm<sup>4</sup>，按表 6-17 定义；  
 $I_w$ ——扶强材的净扇形惯性矩，cm<sup>6</sup>，按表 6-17 定义，且与图 6-16 所示的点 C 相关；  
 $\varepsilon$ ——固定程度，应为：

$$\varepsilon = 1 + 10^{-4} \sqrt{\frac{a^4}{\frac{3}{4} \pi^4 I_w (b/t^3 + 4h_w/3t_w^3)}}$$

$A_w$ ——腹板净面积，为： $A_w = h_w t_w$   
 $A_f$ ——翼板净面积，为： $A_f = b_f t_f$

$$e_f = h_w + \frac{t_f}{2} \quad \text{mm}$$

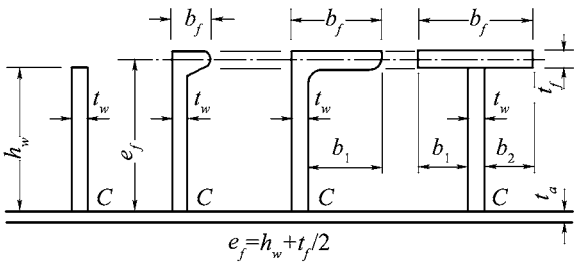


图 6-16 扶强材的尺寸  
惯 性 矩

表 6-17

剖 面	$I_p$	$I_T$	$I$
扁钢	$\frac{h_w^3 t_w}{3 \times 10^4}$	$\frac{h_w t_w^3}{3 \times 10^4} \left( 1 - 0.63 \frac{t_w}{h_w} \right)$	$\frac{h_w^3 t_w^3}{36 \times 10^6}$
有球缘或折边的型材	$\left( \frac{A_w h_w^2}{3} + A_f e_f^2 \right) \times 10^{-4}$	$\frac{h_w t_w^3}{3 \times 10^4} \left( 1 - 0.63 \frac{t_w}{h_w} \right) + \frac{b_f t_f^3}{3 \times 10^4} \left( 1 - 0.63 \frac{t_f}{b_f} \right)$	对球扁钢和角钢剖面： $\frac{A_f e_f^2 b_f^2}{12 \times 10^6} \left( \frac{A_f + 2.6 A_w}{A_f + A_w} \right)$ 对 T 型剖面： $\frac{b_f^3 t_f e_f^2}{12 \times 10^6}$

4.3.2 横向扶强材

承受轴向压应力且不受纵向扶强材支撑的横向扶强材，应近似地符合 [4.3.1] 的要求。

5 带板的有效宽度

5.1 普通扶强材

5.1.1 普通扶强材带板的有效宽度由下式确定（另见图 6-15）：

- 对纵向扶强材： $b_m = \min ( \kappa_x b, \kappa_s s )$
- 对横向扶强材： $a_m = \min ( \kappa_y a, \kappa_s s )$

式中:

$$\kappa_s = 0.0035 \left( \frac{l_{eff}}{s} \right)^3 - 0.0673 \left( \frac{l_{eff}}{s} \right)^2 + 0.4422 \left( \frac{l_{eff}}{s} \right) - 0.0056, \text{ 且不大于 } 1.0$$

$s$  ——扶强材间距, mm;

$l_{eff}$  ——按以下方式取值:

- 对纵向扶强材:  
 $l_{eff} = a$ , 若两端简支  
 $l_{eff} = 0.6a$ , 若两端固定
- 对横向扶强材:  
 $l_{eff} = b$ , 若两端简支  
 $l_{eff} = 0.6b$ , 若两端固定

## 5.2 主要支撑构件

5.2.1 主要支撑构件加筋翼板的有效宽度  $e'_m$  可按以下 a) 项和 b) 项所述确定, 且标注为:

$e$ : 受支撑板材的宽度, mm, 从其中心量至相邻未受支撑区域的中心。

$e_m$ : 主要支撑构件带板的有效宽度, mm, 按表 6-18 并考虑加载类型 (为确定单侧或不对称翼板的有效宽度, 可要求作专门计算)。

$e_{m1}$  适用于承受均布载荷或承受不少于 6 个等间距的单个载荷的主要支撑构件。

$e_{m2}$  适用于承受 3 个或更少的单个载荷的主要支撑构件。

a) 平行于主要支撑构件腹板的加强 (图 6-17)

$$b < e_m$$

$$e'_m = n \cdot b_m$$

式中:  $n$  ——有效宽度  $e_m$  内的加强筋间距  $b$  的整数, 应为:

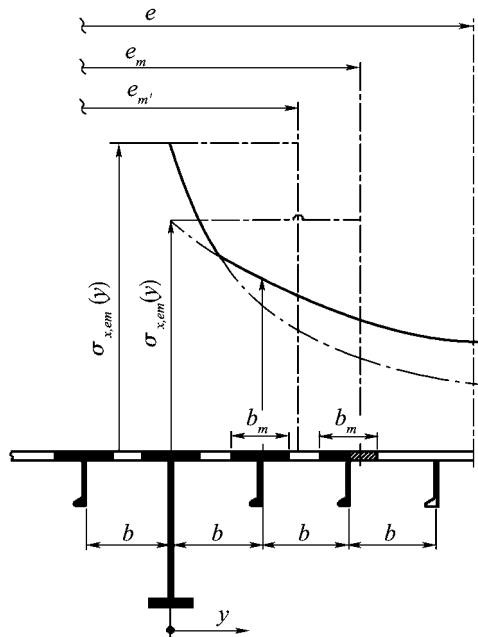


图 6-17 平行于腹板的加强

$$n = \text{int}\left(\frac{e_m}{b}\right)$$

b) 垂直于主要支撑构件腹板的加强（图 6-18）

$$a \geq e_m$$
$$e'_m = na_m < e_m$$

对于  $b > e_m$  或  $a < e_m$ ， $b$  和  $a$  应分别予以对换。

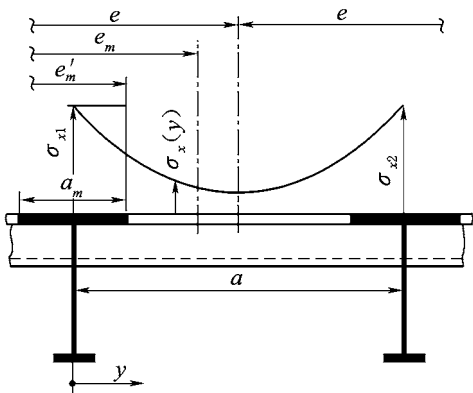


图 6-18 垂直于腹板的加强  
带板的有效宽度

表 6-18

$l/e$	0	1	2	3	4	5	6	7	$\geq 8$
$e_{m1}/e$	0	0.36	0.64	0.82	0.91	0.96	0.98	1.00	1.0
$e_{m2}/e$	0	0.20	0.37	0.52	0.65	0.75	0.84	0.89	0.9

注：中间值可通过直接内插法获得。

$l$ ——弯矩曲线上零弯矩点之间的长度，即，如果是简支桁材，等于无支撑的跨距，如果桁材两端受到约束，等于 0.6 倍的无支撑的跨距。

6 BC—A 和 BC—B 的船舶在进水工况下的垂直槽形水密横舱壁

6.1 一般要求

6.1.1 舱壁槽条腹板的剪切屈曲校核

按第 6 章第 2 节 [3.2.5] 计算的剪应力  $\tau$  应符合下列公式：

$$\tau \leq \tau_c$$

式中： $\tau_c$ ——临界剪切屈曲应力， $\text{N/mm}^2$ ，从下列公式中求得：

$$\tau_c \leq \tau_E, \text{ 对于 } \tau_E \leq \frac{R_{eH}}{2\sqrt{3}}$$
$$\tau_c = \frac{R_{eH}}{\sqrt{3}} \left( 1 - \frac{R_{eH}}{4\sqrt{3}\tau_E} \right), \text{ 对于 } \tau_E > \frac{R_{eH}}{2\sqrt{3}}$$

$\tau_E$ ——欧拉剪切屈曲应力， $\text{N/mm}^2$ ，从下列公式中求得：

$$\tau_E = 0.9k_t E \left( \frac{t_w}{10^3 c} \right)$$

$k_t$ ——系数，取为 6.34；

$t_w$ ——槽条腹板的净厚度，mm；

$c$ ——槽条腹板的宽度，m（见第 6 章第 2 节图 6-6）。

## 第4节 主要支撑构件

符号

本节中未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

$L_2$ ：规范船长  $L$ ，但取不大于 300m。

$I_y$ ：船体横剖面对其水平中和轴的净惯性矩， $m^4$ ，按第 5 章第 1 节 [1.5] 计算，对于所有构件，按总提供厚度减去  $0.5t_c$  计。

$I_z$ ：船体横剖面对其垂直中和轴的净惯性矩， $m^4$ ，按第 5 章第 1 节 [1.5] 计算，对于所有构件，按总提供厚度减去  $0.5t_c$  计。

$N$ ：第 5 章第 1 节 [1.2] 所定义的船体净横剖面重心在第 1 章第 4 节 [4] 定义的参考坐标系中的  $Z$  坐标，m，对于所有构件，按总提供厚度减去  $0.5t_c$  计。

$p_s, p_w$ ：[2.1.2] 定义的完整工况下的静水和波浪压力， $kN/m^2$ 。

$\sigma_x$ ：[2.1.5] 定义的正应力， $N/mm^2$ 。

$s$ ：主要支撑构件的间距，m。

$l$ ：主要支撑构件的跨距，m，在支撑构件之间量取，见第 3 章第 6 节 [5.3]。

$h_w$ ：腹板高度，mm。

$t_w$ ：腹板净厚度，mm。

$b_f$ ：面板宽度，mm。

$t_f$ ：面板净厚度，mm。

$b_p$ ：构件带板的宽度，m，对于屈服校核，定义见第 3 章第 6 节 [4.3]。

$W$ ：构件净剖面模数， $cm^3$ ，其带板宽度为  $b_p$ ，按第 3 章第 6 节 [4.4] 计算。

$A_{sh}$ ：构件净剪切剖面积， $cm^2$ ，按第 3 章第 6 节 [5.5] 计算。

$m$ ：系数，等于 10。

$\tau_a$ ：许用剪应力， $N/mm^2$ ，取为：

$$\tau_a = 0.4R_y$$

$k$ ：第 1 章第 4 节 [2.2.1] 中定义的材料系数。

$x, y, z$ ：第 1 章第 4 节中定义的参考坐标系的计算点的  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  坐标，m。

### 1 一般要求

#### 1.1 适用范围

1.1.1 本节要求适用于支柱和对船体梁总纵强度起作用的承受侧向压力和船体梁正应力的主要支撑构件的强度校核。

承受特定载荷的构件也应进行屈服校核，例如集中载荷。

#### 1.2 船长 $L$ 小于 150 m 船舶的主要支撑构件

1.2.1 对于船长  $L$  小于 150 m 船舶的主要支撑构件，其强度校核应按 [2] 与 [4] 的规定进行。

1.2.2 虽有上述规定, 这些构件的强度校核可通过船级社认为适当的直接强度评估来进行。

### 1.3 船长 $L$ 为 150 m 及以上船舶的主要支撑构件

1.3.1 对于船长  $L$  为 150m 及以上的船舶的主要支撑构件, 应按第 7 章的规定进行直接强度分析。  
另外, BC—A 和 BC—B 船的主要支撑构件应符合 [3] 与 [4] 的要求。

### 1.4 净结构尺寸

1.4.1 按第 3 章第 2 节的规定, 本节中的所有结构尺寸均为净结构尺寸, 即它们不包括任何腐蚀增量。  
总结构尺寸按第 3 章第 2 节 [3] 获取。

### 1.5 主要支撑构件腹板的最小净厚度

1.5.1 主要支撑构件腹板的净厚度, mm, 应不小于  $0.6\sqrt{L_2}$ 。

## 2 船长 $L$ 小于 150m 的船舶的主要支撑构件的结构尺寸

### 2.1 载荷模型

#### 2.1.1 一般要求

应考虑完整工况下海水以及不同种类货物和压载引起的静水和波浪侧向载荷, 这取决于所考虑的主要支撑构件的位置和相邻舱室的类型。

在第 4 章第 4 节定义的相互独立的载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2 下, 应按  $10^{-8}$  概率水平计算波浪侧向载荷和船体梁载荷。

#### 2.1.2 完整工况下的侧向压力

完整工况下的侧向压力由静水压力和波浪压力组成。

静水压力 ( $p_s$ ) 包括:

- (a) 第 4 章第 5 节 [1] 定义的静水压力;
- (b) 第 4 章第 6 节定义的不同种类货物和压载的内部静水压力。

对各载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2, 波浪动压力 ( $p_w$ ) 包括:

- (a) 第 4 章第 5 节 [1] 定义的水动压力;
- (b) 第 4 章第 6 节定义的不同种类货物和压载的惯性压力。

#### 2.1.3 外壳构件

静水和波浪侧向压力的计算应分别考虑:

- 外部海水静水和波浪压力;
- 考虑邻接外壳的舱室作为装载的静水和波浪内部压力。

邻接外壳的舱室如不拟装载液体, 则仅计及外部海水压力。

#### 2.1.4 非外壳构件

对于分隔两个相邻舱室的某个构件, 其静水和波浪侧向计算压力为考虑这两个舱室分别装载时得到的压力。

#### 2.1.5 正应力

对船体梁总纵强度起作用的主要支撑构件进行强度校核时, 所考虑的正应力应由下列公式获得的中垂和中拱工况 (如适用) 中  $\sigma_x$  的最大值, N/mm<sup>2</sup>:

$$\sigma_x = \left[ C_{SW} \left| \frac{M_{SW}}{I_Y} \right| (z - N) + C_{WV} \left| \frac{M_{WV}}{I_Y} \right| (z - N) - C_{WH} \left| \frac{M_{WH}}{I_Z} \right| y \right] \times 10^{-3}$$

式中： $M_{SW}$ ——中拱或中垂工况（视具体情况）中的许用静水弯矩， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；  
 $M_{WV}$ ——第 4 章第 3 节定义的中拱或中垂工况（视具体情况）中的垂向波浪弯矩， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；  
 $M_{WH}$ ——第 4 章第 3 节定义的水平波浪弯矩， $\text{kN} \cdot \text{m}$ ；  
 $C_{SW}$ ——表 6-19 中定义的各种载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2 的组合因子；  
 $C_{WV}$ ， $C_{WH}$ ——表 6-19 中给出的第 4 章第 4 节 [2.2] 定义的各种载荷工况 H1、H2、F1、F2、R1、R2、P1 和 P2 的组合因子。

组合因子 $C_{SW}$ ， $C_{WV}$ 和 $C_{WH}$						表6-19
LC	中拱			中垂		
	$C_{SW}$	$C_{WV}$	$C_{WH}$	$C_{SW}$	$C_{WV}$	$C_{WH}$
H1	不适用			-1	-1	0
H2	1	1	0	不适用		
F1	不适用			-1	-1	0
F2	1	1	0	不适用		
R1	1	0	$1.2 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	-1	0	$1.2 - \frac{T_{LC}}{T_S}$
R2	1	0	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 1.2$	-1	0	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 1.2$
P1	1	$0.4 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	0	-1	$0.4 - \frac{T_{LC}}{T_S}$	0
P2	1	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 0.4$	0	-1	$\frac{T_{LC}}{T_S} - 0.4$	0

2.2 中桁材和旁桁材

2.2.1 腹板净厚度

双层底结构内桁材，按各自位置其净厚度，mm，应不小于下列公式所规定的  $t_1$  至  $t_3$  的最大值：

$$t_1=C_1\frac{pS|x-x_c|}{(d_0-d_1)\tau_a}\left\{1-4\left(\frac{y}{B_{DB}}\right)^2\right\}$$
$$, \text{ 若 } |x-x_c| \text{ 小于 } 0.25l_{DB}, \text{ 则 } |x-x_c| \text{ 取作 } 0.25l_{DB}$$

$$t_2=1.75\sqrt[3]{\frac{H^2a^2\tau_a}{C_1'}}t_1$$

$$t_3=\frac{C_1''a}{\sqrt{k}}$$

式中： $p$ ——下列公式中给出的压力差， $\text{kN}/\text{m}^2$ ：

$$p=|(p_{s, \text{ } IB}+p_{w, \text{ } IB})-(p_{s, \text{ } BM}+p_{w, \text{ } BM})|$$

$P_{s, \text{ } IB}$ ——内底板在静水中的货物或压载压力， $\text{kN}/\text{m}^2$ ，按第 4 章第 6 节在所考虑双层底结构的中心处计算；

$P_{w, IB}$ ——惯性引起的内底板的货物或压载压力,  $\text{kN/m}^2$ , 按第 4 章第 6 节在所考虑双层底结构的中心处计算;

$P_{s, BM}$ ——船底板在静水中的外部海水和压载压力,  $\text{kN/m}^2$ , 按第 4 章第 5 节与第 4 章第 6 节在所考虑双层底结构的中心处计算;

$P_{w, BM}$ ——惯性引起的船底板的外部海水和压载压力,  $\text{kN/m}^2$ , 按第 4 章第 5 节与第 4 章第 6 节在所考虑双层底结构的中心处计算;

$S$ ——所考虑的中桁材或旁桁材的两个相邻处所的中心之间的距离,  $\text{m}$ ;

$d_0$ ——所考虑的中桁材或旁桁材的高度,  $\text{m}$ ;

$d_1$ ——所考虑点处的开口高度 (如有时),  $\text{m}$ ;

$l_{DB}$ ——双层底长度,  $\text{m}$ , 若横舱壁设有壁墩,  $l_{DB}$  可取作趾端之间的距离;

$x_c$ ——所考虑双层底结构的中心在第 1 章第 4 节定义的参考坐标系中的  $x$  坐标,  $\text{m}$ ;

$B_{DB}$ ——船中部底边舱趾端之间的距离,  $\text{m}$ , 见图 6-20;

$C_1$ ——由表 6-20 获得的系数, 取决于  $B_{DB}/l_{DB}$ 。对于  $B_{DB}/l_{DB}$  的中间值,  $C_1$  应用线性插值方法确定;

$a$ ——所考虑点处的桁材高度,  $\text{m}$ 。然而, 如果桁材上设有水平扶强材,  $a$  为从该水平扶强材至船底板或内底板的距离, 或所考虑水平扶强材之间的距离;

$S_1$ ——垂直普通扶强材或肋板的间距,  $\text{m}$ ;

$C'_1$ ——由表 6-21 获得的系数, 取决于  $S_1/a$ 。对于  $S_1/a$  的中间值,  $C'_1$  应通过线性插值方法确定;

$H$ ——其值从下列公式中获得:

- 当桁材设有未加强的开口:  $H = 1 + 0.5 \frac{\phi}{\alpha}$
- 其他情况:  $H = 1.0$

$\phi$ ——开口的长径,  $\text{m}$ ;

$\alpha$ —— $a$  或  $S_1$  的大者,  $\text{m}$ ;

$C''_1$ ——由表 6-22 获得的系数, 取决于  $S_1/a$ , 对于  $S_1/a$  的中间值,  $C''_1$  应通过线性插值方法确定。

系 数  $C_1$

表 6-20

$B_{DB}/l_{DB}$	0.4 及以下	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6 及以上
$C_1$	0.5	0.71	0.83	0.88	0.95	0.98	1.00

系 数  $C'_1$

表 6-21

$S_1/a$	0.3 及以下	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4 及以上
$C'_1$	64	38	25	19	15	12	10	9	8	7

系 数  $C''_1$

表 6-22

$S_1/a$		0.3 及以下	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4	1.6 及以上
$C''_1$	中桁材	4.4	5.4	6.3	7.1	7.7	8.2	8.6	8.9	9.3	9.6	9.7
	旁桁材	3.6	4.4	5.1	5.8	6.3	6.7	7.0	7.3	7.6	7.9	8.0

## 2.3 肋板

### 2.3.1 腹板净厚度

双层底结构内肋板, 按各自位置其净厚度,  $\text{mm}$ , 应不小于下列公式所规定的  $t_1$  至  $t_3$  的最大值:

$$t_1 = C_2 \frac{pSB_{DB}}{(d_0 - d_1)\tau_a} \left( \frac{2|y|}{B'_{DB}} \right) \left\{ 1 - 2 \left( \frac{x-x_c}{l_{DB}} \right)^2 \right\}, \text{ 若 } |x-x_c| \text{ 小于 } 0.25l_{DB}, \text{ 则 } |x-x_c| \text{ 取作 } 0.25l_{DB},$$

若  $|y|$  小于  $B'_{DB}/4$ , 则  $|y|$  取作  $b'/4$ ,

$$t_2=1.75\sqrt[3]{\frac{H^2a^2\tau_a}{C_2'}}t_1$$
$$t_3=\frac{8.5S_2}{\sqrt{k}}$$

- 式中： $S$ ——实肋板间距，m；  
 $d_0$ ——所考虑点处的实肋板高度，m；  
 $d_1$ ——所考虑点处的开口高度，如有时，m；  
 $B'_{DB}$ ——所考虑实肋板位置处底边舱趾端之间的距离，m；  
 $C_2$ ——由表 6-23 获得的系数，取决于  $B_{DB}/l_{DB}$ ，对于  $B_{DB}/l_{DB}$  的中间值， $C_2$  应通过线性插值方法确定；  
 $p, B_{DB}, x_c, l_{DB}$ ——定义见 [2.2.1]；  
 $a$ ——所考虑点处的实肋板高度，m，然而，如果肋板上设有水平扶强材， $a$  为从该水平扶强材至船底板或内底板的距离，或所考虑水平扶强材之间的距离；  
 $S_1$ ——垂直普通扶强材或桁材的间距，m；  
 $C'_2$ ——表 6-24 给出的系数，取决于  $S_1/d_0$ ，对于  $S_1/d_0$  的中间值， $C'_2$  应通过线性插值方法确定；  
 $H$ ——其值从下列公式中获得：
- a) 当实肋板上有加强的开口或无开口：
- 1) 若切口未加强：

$$H=\sqrt{4.0\frac{d_2}{S_1}-1.0} \quad , \text{ 且不小于 } 1.0$$

- 2) 若切口设有加强：  $H= 1.0$
- b) 若实肋板上有未加强的开口：
- 1) 若切口未加强：

$$H=\left(1+0.5\frac{\phi}{d_0}\right)\sqrt{4.0\frac{d_2}{S_1}-1.0} \quad , \text{ 不小于 } 1+0.5\frac{\phi}{d_0}$$

- 2) 若切口设有加强

$$H=1+0.5\frac{\phi}{d_0}$$

- $d_2$ ——在实肋板的上、下部未加强切口的深度，m，取大者；  
 $\phi$ ——开口的长径，m；  
 $S_2$ —— $S_1$  或  $a$  的小者，m。

系 数  $C_2$  表 6-23

$B_{DB}/l_{DB}$	0.4 及以下	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4	1.6 及以上
$C_2$	0.48	0.47	0.45	0.43	0.40	0.37	0.34

系 数  $C'_2$  表 6-24

$S_1/d_0$	0.3 及以下	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4 及以上
$C'_2$	64	38	25	19	15	12	10	9	8	7

2.4 双舷侧结构的水平桁

2.4.1 腹板净厚度

双舷侧结构中的水平桁材，按各位置其净厚度，mm，应不小于下列公式所规定的  $t_1$  至  $t_3$  的最大值：

$$t_1 = C_3 \frac{pS|x-x_c|}{(d_0-d_1)\tau_a}, \text{ 若 } |x-x_c| \text{ 小于 } 0.25l_{DS}, \text{ 则 } |x-x_c| \text{ 取作 } 0.25l_{DS}$$
$$t_2 = 1.75 \sqrt[3]{\frac{H^2 a^2 \tau_a}{C'_3}} t_1$$
$$t_3 = \frac{8.5S_2}{\sqrt{k}}$$

式中：  $p$  ——由下列公式给出的压力差， $\text{kN/m}^2$ ：

$$p = |(p_{s, SS} + p_{w, SS}) - (p_{s, LB} + p_{w, LB})|$$

- $p_{s, SS}$  ——舷侧外板在静水中的外部海水和压载压力， $\text{kN/m}^2$ ，按第 4 章第 5 节与第 4 章第 6 节，垂向在底边舱上端及纵向在  $l_{DS}$  中心量取；
- $p_{w, SS}$  ——惯性引起的舷侧外板的外部海水和压载压力， $\text{kN/m}^2$ ，按第 4 章第 5 节与第 4 章第 6 节，垂向在底边舱上端及纵向在  $l_{DS}$  中心量取；
- $p_{s, LB}$  ——纵舱壁静水压载压力， $\text{kN/m}^2$ ，按第 4 章第 6 节，垂向在底边舱上端及纵向在  $l_{DS}$  中心量取；
- $p_{w, LB}$  ——惯性引起的纵舱壁压载压力， $\text{kN/m}^2$ ，按第 4 章第 6 节，垂向在底边舱上端及纵向在  $l_{DS}$  中心量取；
- $S$  ——水平桁材所支撑部分的宽度， $\text{m}$ ；
- $d_0$  ——水平桁材深度， $\text{m}$ ；
- $d_1$  ——所考虑点处的开口（如有时）深度， $\text{m}$ ；
- $x_c$  ——所考虑双舷侧结构中心在第 1 章第 4 节所定义的参考坐标系中的  $x$  坐标；
- $l_{DS}$  ——横舱壁之间所考虑的双舷侧结构长度， $\text{m}$ ；
- $h_{DS}$  ——底边舱上端和顶边舱下端之间的双舷侧结构高度， $\text{m}$ ；
- $C_3$  ——表 6-25 给出的系数，取决于  $h_{DS}/l_{DS}$ ，对于  $h_{DS}/l_{DS}$  中间值， $C_3$  用线性插值方法确定；
- $a$  ——所考虑点处的水平桁材深度， $\text{m}$ ，如水平桁材上设有水平扶强材， $a$  为所考虑的水平扶强材至双舷侧结构舷侧外板或纵舱壁的距离，或所考虑水平扶强材之间的距离；
- $S_1$  ——横向普通扶强材或强肋骨间距， $\text{m}$ ；
- $C'_3$  ——表 6-26 给出的系数，取决于  $S_1/l_a$ 。对于  $S_1/l_a$  中间值， $C'_3$  用线性插值方法确定；
- $H$  ——其值由下式求得：

- 纵桁如有一个未加强的开口：  $H = 1 + 0.5 \frac{\phi}{\alpha}$
- 其他情况：  $H = 1.0$

- $\phi$  ——开口的长径， $\text{m}$ ；
- $\alpha$  —— $a$  或  $S_1$  的大者， $\text{m}$ ；
- $S_2$  —— $a$  或  $S_1$  的小者， $\text{m}$ 。

系 数  $C_3$  表 6-25

$h_{DS}/l_{DS}$	0.5 及以下	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3 及以上
$C_3$	0.16	0.23	0.30	0.36	0.41	0.44	0.47	0.50	0.54

系 数  $C'_3$  表 6-26

$S_1/a$	0.3 及以下	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4 及以上
$C'_3$	64	38	25	19	15	12	10	9	8	7

2.5 双舷侧结构中的横框架

2.5.1 横框架腹板净厚度

双舷侧结构中横框架腹板按各自位置，其净厚度，mm，应不小于下列公式所规定的  $t_1$  至  $t_3$  的最大值：

$$t_1 = C_4 \frac{pSh_{DS}}{(d_0 - d_1) \tau_a} \left( 1 - 1.75 \frac{z - z_{BH}}{h_{DS}} \right) \quad , \quad \text{若 } z - z_{BH} \text{ 大于 } 0.4h_{DS}, \text{ 则 } z - z_{BH} \text{ 取为 } 0.4h_{DS}$$

$$t_2 = 1.75 \sqrt[3]{\frac{H^2 a^2 \tau_a}{C'_4}} t_1$$

$$t_3 = \frac{8.5S_2}{\sqrt{k}}$$

式中： $S$ ——横框架所支撑部分的宽度，m；  
 $d_0$ ——横框架深度，m；  
 $d_1$ ——所考虑点处的开口深度，m；  
 $C_4$ ——表 6-27 给出的系数，取决于  $h_{DS}/l_{DS}$ ，对于  $h_{DS}/l_{DS}$  中间值， $C_4$  用线性插值方法确定；  
 $Z_{BH}$ ——底边舱上端在第 1 章第 4 节所定义的参考坐标系中的  $z$  坐标；  
 $p$ ， $h_{DS}$  和  $l_{DS}$ ——按 [2.4.1] 的要求；  
 $a$ ——所考虑点处的横框架深度，m，然而如横框架设有垂直扶强材， $a$  为所考虑的垂直扶强材至舷侧外板或纵舱壁的距离，或所考虑的垂直扶强材之间的距离；  
 $S_1$ ——水平普通扶强材或水平桁材间距，m；  
 $C'_4$ ——表 6-28 给出的系数，取决于  $S_1/a$ ，对于  $S_1/a$  中间值， $C'_4$  用线性插值方法确定；  
 $H$ ——其值由下式求得：

• 横框架如有一个未加强开口：  $H = 1 + 0.5 \frac{\phi}{\alpha}$

• 其他情况：  $H = 1.0$

$\phi$ ——开口的长径，m；  
 $\alpha$ —— $a$  或  $S_1$  的大者，m；  
 $S_2$ —— $a$  或  $S_1$  的小者，m。

系 数 $C_4$									表6-27
$h_{DS}/l_{DS}$	0.5 及以下	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3 及以上
$C_4$	0.62	0.61	0.59	0.55	0.52	0.49	0.46	0.43	0.41

系 数 $C'_4$										表 6-28
$S_1/a$	0.3 及以下	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.2	1.4 及以上
$C'_4$	64	38	25	19	15	12	10	9	8	7

2.6 艤部底边舱和顶边舱及其他结构的主要支撑构件

2.6.1 载荷计算点

水平构件的侧向压力和船体梁应力（如有），除另有规定外，应在所考虑的主要支撑构件的跨距中点处计算。

垂直构件的侧向压力  $p$  应取在跨距中点处的计算值和按下式计算所得压力值中的最大值：

第 187 页

- $p = \frac{p_U + p_L}{2}$  , 当垂直构件上端在最低零压力面以下时;
- $p = \frac{l_1}{l} \frac{p_L}{2}$  , 当垂直构件上端在最低零压力面或以上时 (图 6-19)。

式中:  $l_1$ ——垂直构件下端和最低零压力面之间的距离, m;  
 $p_U, p_L$ ——分别为垂直构件跨距  $l$  上下端的侧向压力。

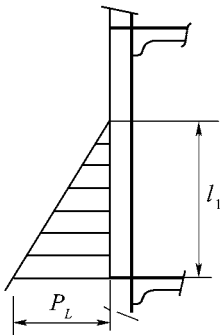


图 6-19 垂直构件的压力定义

2.6.2 边界条件

本项要求适用于视为两端刚固的主要支撑构件。对明显偏离上述条件的边界条件, 应逐例考虑屈服强度校核。

2.6.3 完整工况下的净剖面模数、净剪切剖面积和腹板净厚度

承受侧向压力的净剖面模数  $W$ ,  $\text{cm}^3$ , 净剪切剖面积  $A_{sh}$ ,  $\text{cm}^2$ , 和腹板净厚度  $t_w$ , mm, 应不小于由下式计算所得之值:

$$W = \frac{(p_s + p_w)sl^2}{m \lambda_s R_y} \times 10^3$$

$$A_{sh} = \frac{5(p_s + p_w)sl}{\tau_a \sin \phi}$$

$$t_w = 1.75 \sqrt{\frac{h_w \tau_a}{10^4 C_5} A_{sh}}$$

式中:  $\lambda_s$ ——表 6-29 所定义的系数;  
 $\phi$ ——主要支撑构件腹板和外板的夹角, deg, 在构件跨距中点量取; 当  $\phi$  小于  $75^\circ$  时, 应作修正;  
 $C_5$ ——表 6-30 给出的系数, 取决于  $s_1$  和  $d_0$ , 对于  $s_1/d_0$  中间值, 系数  $C_5$  用线性插值方法确定;  
 $s_1$ ——腹板加强筋或防倾肘板间距, m;  
 $d_0$ ——平行于外板的腹板加强筋间距, m。

系 数  $\lambda_s$  表6-29

主要支撑构件	系数 $\lambda_s$
对船体梁总纵强度起作用的纵向构件	$1.1 \left( 1.0 - 0.85 \left  \frac{\sigma_X}{R_Y} \right  \right)$ , 且取不大于 0.8
其他构件	0.8

系 数 $C_5$										表 6-30
$S_1/d_0$	0.3 及以下	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.5	2.0 及以上
$C_5$	60.0	40.0	26.8	20.0	16.4	14.4	13.0	12.3	11.1	10.2

3 BC—A 和 BC—B 船舶主要支撑构件附加要求

3.1 进水工况下双层底能力和货舱许用装载评估

3.1.1 双层底剪切能力

双层底剪切能力应按以下各构件端部剪切强度之和计算：

- 邻近两个底边舱的所有肋板端部，邻近每个舱壁凳（若未设凳（图 6-20），则为横舱壁）的两个肋板取小于其一半的剪切强度；肋板剪切强度按 [3.1.2] 计算；

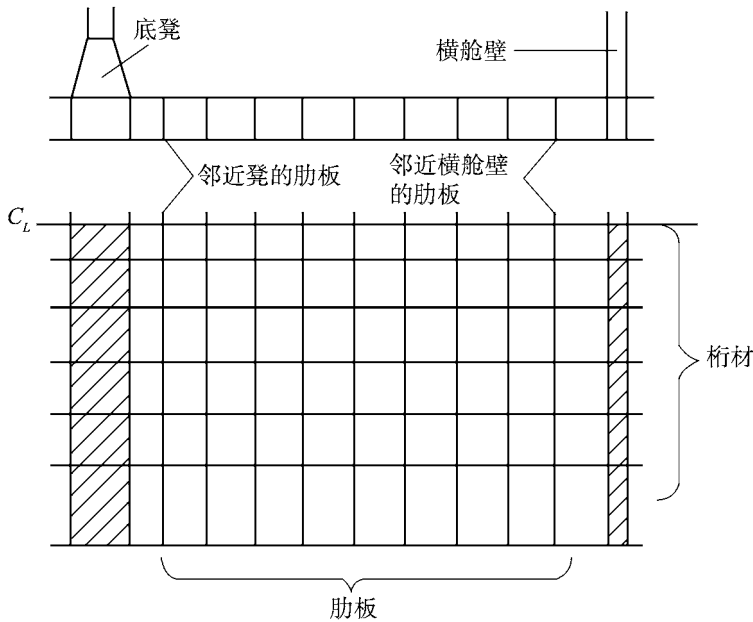


图6-20 双层底结构

- 邻近两个舱壁凳（或如不设凳，则为横舱壁）的所有双层底纵桁端部，桁材剪切强度按 [3.1.3] 计算。在端部货舱内桁材或肋板如中途终止且不直接与边界凳或底边舱桁材相连，其强度仅按一端评估。在计算双层底剪切能力时，所计及的肋板和桁材是底边舱和凳（如不设凳，则为横舱壁）构成的货舱限界以内的桁材和肋板。底边舱旁桁材与直接位于凳（如不设凳，则为横舱壁）与内底连接处以下的肋板不可计入。

当双层底的几何形状和 / 或结构布置与以上假定不符时，双层底剪切能力应尽量在适用情况下按第 7 章的要求以直接计算确定。

3.1.2 肋板剪切强度

肋板剪切强度应从下列公式获得，kN：

- 位于邻近底边舱的肋板板格处：

$$S_{f1} = A_f \frac{\tau_a}{\eta_1} \times 10^{-3}$$

- 位于最外格（即较靠近底边舱的格）的开口处：

$$S_{f2} = A_{fh} \frac{\tau_a}{\eta_2} \times 10^{-3}$$

式中:  $A_f$ ——邻近底边舱的肋板的净剖面积,  $\text{mm}^2$ ;

$A_{f,h}$ ——位于最外格 (即较靠近底边舱的格) 的开口处的肋板的净剖面积,  $\text{mm}^2$ ;

$\tau_A$ ——许用剪切应力,  $\text{N/mm}^2$ , 等于下列二值中的小者:

$$\tau_A = 0.645 \frac{R_{eH}^{0.6}}{(s/t_N)^{0.8}} \quad \text{和} \quad \tau_A = \frac{R_{eH}}{\sqrt{3}}$$

$t_N$ ——肋板腹板净厚度,  $\text{mm}$ ;

$s$ ——所计及板格的加强筋的间距,  $\text{m}$ ;

$\eta_1$ ——系数, 等于 1.1;

$\eta_2$ ——系数, 一般等于 1.2, 若在最外格的开口处进行适当加强, 经船级社逐例审查, 可减为 1.1。

### 3.1.3 桁材剪切强度

桁材剪切强度, 应从下列公式获得,  $\text{kN}$ :

- 邻近凳 (或横舱壁, 如无凳) 的桁材板格处:

$$S_{g1} = A_g \frac{\tau_A}{\eta_1} \times 10^{-3}$$

- 最外格 (即较靠近凳, 或如无凳则较靠近横舱壁) 的最大开口处:

$$S_{g2} = A_{g,h} \frac{\tau_A}{\eta_2} \times 10^{-3}$$

$A_g$ ——邻近凳 (或横舱壁, 如无凳) 的桁材板格的净剖面面积,  $\text{mm}^2$ ;

$A_{g,h}$ ——位于最外格 (即较靠近凳, 或如无凳则较靠近横舱壁) 的最大开口处的桁材板格的净剖面面积,  $\text{mm}^2$ ;

$\tau_A$ ——[3.1.2] 定义的许用剪切应力,  $\text{N/mm}^2$ , 其中  $t_N$  是桁材腹板的净厚度;

$\eta_1$ ——系数, 等于 1.1;

$\eta_2$ ——系数, 一般等于 1.15, 若在最外格的最大开口处进行适当加强, 经船级社逐例审查, 可减为 1.1。

### 3.1.4 许用货舱装载

许用货舱装载,  $t$ , 应从下列公式获得:

$$W = \rho_c V \frac{1}{F}$$

式中:  $F$ ——系数, 等于:

- $F = 1.1$ , 一般货物
- $F = 1.05$ , 对于钢材产品

$V$ ——水平面  $h_B$  处货物的体积,  $\text{m}^3$ ;

$h_B$ ——从下列公式获得的货物平面,  $\text{m}^2$ ;

$$h_B = \frac{X}{\rho_{cg}}$$

$X$ ——从下列公式获得的压力,  $\text{kN/m}^2$ :

- 对于干散货, 取下列小者:

$$X = \frac{Z + \rho g(z_F - 0.1D_1 - h_F)}{1 + \frac{\rho}{\rho_c}(\text{perm} - 1)}$$

$$X = Z + \rho g(z_F - 0.1D_1 - h_F \text{perm})$$

- 对于钢材产品:

$$X = \frac{Z + \rho g(z_F - 0.1D_1 - h_F)}{1 - \frac{\rho}{\rho_C}}$$

$D_1$ ——在船中舷侧处, 从基线量至干舷甲板的距离, m;

$h_F$ ——内底进水压头, 此系当船舶在正浮状态时从内底垂直量至基线以上高度  $z_F$  处的距离, m;

$z_F$ ——进水水位, m, 定义见第 4 章第 6 节 [3. 3. 3];

$perm$ ——货物的渗透率, 不必取大于 0.3;

$Z$ ——压力,  $\text{kN/m}^2$ , 取下列二值中的小者:

$$Z = \frac{C_H}{A_{DB,H}}$$

$$Z = \frac{C_E}{A_{DB,E}}$$

$C_H$ ——双层底的剪切能力, kN, 按 [3. 1. 1] 计算, 对每个肋板计及剪切强度  $S_{f1}$  和  $S_{f2}$  (见 [3. 1. 2]) 中的小者, 对每个桁材计及剪切强度  $S_{g1}$  和  $S_{g2}$  (见 [3. 1. 3]) 中的小者;

$C_E$ ——双层底的剪切能力, kN, 按 [3. 1. 1] 计算, 对每个肋板计及剪切强度  $S_{f1}$  (见 [3. 1. 2]), 对每个桁材计及剪切强度  $S_{g1}$  和  $S_{g2}$  (见 [3. 1. 3]) 中的小者;

$$A_{DB,H} = \sum_{i=1}^n S_i B_{DB,i}$$

$$A_{DB,E} = \sum_{i=1}^n S_i (B_{DB} - s)$$

$n$ ——墩 (或横舱壁, 如无墩) 之间的肋板数量;

$S_i$ ——第  $i$  个肋板的间距, m;

$B_{DB, i}$ ——宽度, m, 等于:

$B_{DB, i} = B_{DB} - s$ , 对于  $S_{f1} < S_{f2}$  的肋板 (见 [3. 1. 2])

$B_{DB, i} = B_{DB, h}$ , 对于  $S_{f1} \geq S_{f2}$  的肋板 (见 [3. 1. 2])

$B_{DB}$ ——底边舱之间双层底的宽度, m (图 6-21);

$B_{DB, h}$ ——所计及的两个开口之间的距离, m (图 6-21);

$s$ ——邻近底边舱的内底纵向普通扶强材的间距, m。

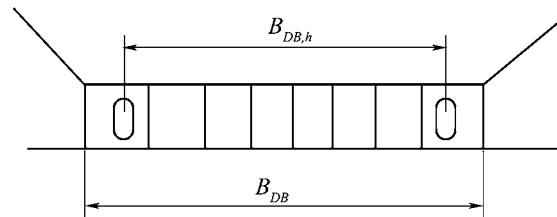


图6-21 尺寸 $B_{DB}$ 和 $B_{DB, h}$

4. 支柱

4.1 承受轴向压缩载荷支柱的屈曲

4.1.1 一般要求

应校核支柱压应力不超过按 [4.1.2] 计算的临界柱屈曲应力。

4.1.2 支柱临界柱屈曲应力

支柱的临界柱屈曲应力，N/mm<sup>2</sup>，应从下列公式获得：




$$\sigma_B = \sigma_{E1}, \text{ 对于 } \sigma_{E1} \leq \frac{R_{eH}}{2}$$
  
$$\sigma_{cB} = R_{eH} \left( 1 - \frac{R_{eH}}{4 \sigma_{E1}} \right), \text{ 对于 } \sigma_{E1} > \frac{R_{eH}}{2}$$

式中：σ<sub>E1</sub>——欧拉柱屈曲应力，N/mm<sup>2</sup>，从下列公式获得：

$$\sigma_{E1} = \pi^2 E \frac{I}{A (fl)^2} \times 10^{-4}$$

- I——支柱的最小净惯性矩，cm<sup>4</sup>；
- A——支柱的净剖面积，cm<sup>2</sup>；
- f——系数，由表 6-31 给出。

系 数 *f* 表 6-31

支柱的边界条件	<i>f</i>
两端刚固 	0.5
一端刚固，一端铰接 	$\frac{\sqrt{2}}{2}$
两端铰接 	1.0

## 附录1 屈曲和极限强度

### 1 对第 6 章第 3 节的应用

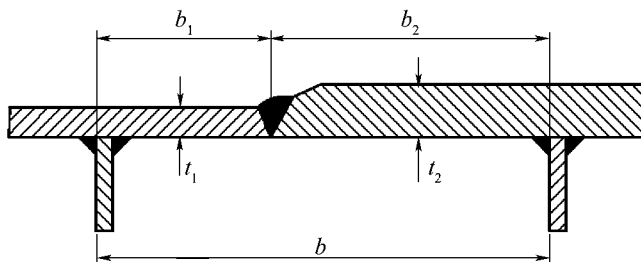
#### 1.1 总体应用要求

##### 1.1.1 变化的剪应力

如果剪应力在基本板格的宽度  $b$  上不均匀, 则应采用以下两值的大者:

- $\tau$  的平均值
- $0.5 \tau_{\max}$

##### 1.1.2 基本板格内的厚度变化 (附图 6-1)



附图 6-1 区域宽度内的板厚变化

如果基本板格的板厚在宽度  $b$  范围内变化, 则屈曲校核可按厚度等于较小板厚  $t_1$  的等效基本板格  $a \times b'$  进行。此等效基本板格宽度定义如下:

$$b' = b_1 + \left( \frac{t_1}{t_2} \right)^{1.5} b_2$$

式中:  $b_1$ ——较小板厚  $t_1$  的那部分基本板格宽度;

$b_2$ ——较大板厚  $t_2$  的那部分基本板格宽度。

##### 1.1.3 具有开孔的肋板或其他高腹桁材的评估

下列计算流程可用于具有开孔的高腹桁材的评估:

(a) 将板材区域按附图 6-2 分成小基本板格

(b) 对基本板格和所有的小基本板格按下列边界条件分别予以计算:

- 对小板格 1 至 4: 所有边缘简支 (第 6 章第 3 节表 6-14 中的载荷工况 1 和 2);
- 对小板格 5 至 6: 简支, 且一边自由 (第 6 章第 3 节表 6-14 中的载荷工况 3)。

### 1.2 船体梁横剖面分析的应用

#### 1.2.1 基本板格的理想化 (附图 6-3)

基本板格的屈曲校核应在第 6 章第 3 节 [2.1] 中定义的载荷下, 按第 6 章第 3 节 [3] 要求进行。

对屈曲和折减系数, 平板格按第 6 章第 3 节表 6-14 确定, 曲面板格按第 6 章第 3 节表 6-15 确定。

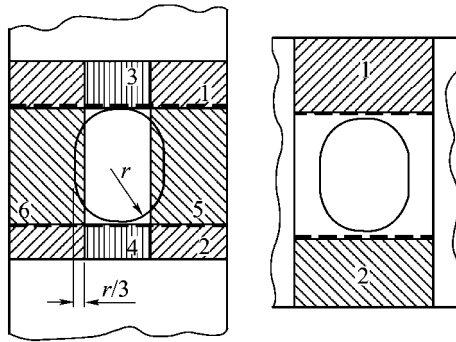
对第 6 章第 3 节表 6-14 中的屈曲和折减系数的确定, 下列工况应按板材的应力类型和骨架形式取用:

- 对于压缩正应力:

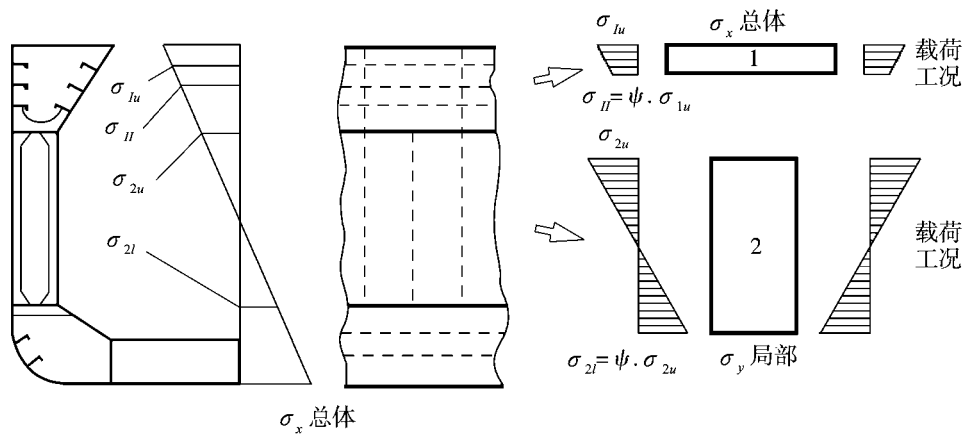
(a) 对于纵骨架式板材, 屈曲载荷工况 1,  $x$  方向的膜应力为第 6 章第 3 节 [2.1.2] 中定义的正应力  $\sigma_n$ ;

(b) 对于横骨架式板材, 屈曲载荷工况 2,  $y$  方向的膜应力为第 6 章第 3 节 [2.1.2] 中定义的正应力  $\sigma_n$ , 且对换  $a, b$  值, 以获得在载荷工况 2 中的所计及的  $a$  值大于 1。

- 对剪应力：屈曲工况 5， $\tau$  为第 6 章第 3 节 [2.1.3] 中定义的剪应力  $\tau_{SF}$ 。



附图 6-2 具有开孔的高腹桁材的基本板格



附图 6-3 基本板格的理想化

### 1.2.2 普通扶强材

局部和整体板格的纵向和横向普通扶强材的屈曲校核应在第 6 章第 3 节 [2.1] 中定义的载荷下，按第 6 章第 3 节 [4] 进行，且：

- $\sigma_x$  = 在第 6 章第 3 节 [2.1.2] 中定义的正应力  $\sigma_n$ ；
- $\sigma_y = 0$ 。

扶强材带板的有效宽度应按第 6 章第 3 节 [5] 确定。常量应力值应假定为下列数值中对应的大者：

- 扶强材长度一半处的应力；
- 相邻基本板格最大压应力的 0.5 倍。

### 1.2.3 设有与其平行的扶强材的主要支撑构件

主要支撑构件带板的有效宽度应按第 6 章第 3 节 [5.2] 的要求确定。

此外，当普通扶强材设于主要支撑构件的带板上并与主要支撑构件平行时，屈曲校核应计及惯性矩  $I_x$ ，且计入与带板相连的平行普通扶强材的惯性矩（见第 6 章第 3 节图 6-17）。

### 1.2.4 设有垂直于桁材的扶强材的主要支撑构件

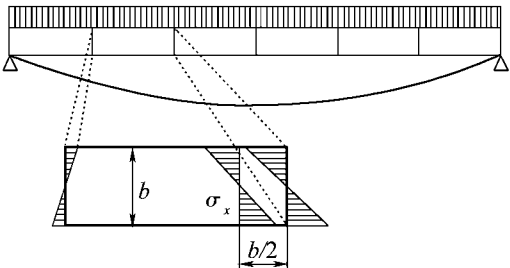
主要支撑构件带板的有效宽度应按第 6 章第 3 节 [5.2] 的要求确定。

此外，当普通扶强材设于主要支撑构件的带板上并与主要支撑构件垂直时，屈曲校核应计及惯性矩  $I_x$ ，且计入有效宽度（见第 6 章第 3 节图 6-18）。

## 1.3 有限元模型分析的其他应用

### 1.3.1 沿屈曲板格长度非均匀压应力

如果压应力在非承载板边缘的整个长度上不均匀（如桁材承受弯曲时），压应力值应取距离具有最大压应力的横向板边  $b/2$  处之值（附图 6-4）。该值应不小于沿纵向边缘压应力的平均值。

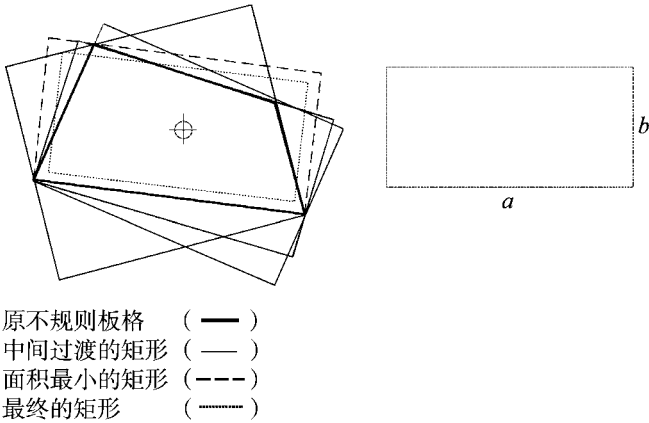


附图 6-4 沿纵向边缘  $a$  的非均匀压应力

1. 3. 2 非矩形基本板格的屈曲应力计算

a) 四边形板格

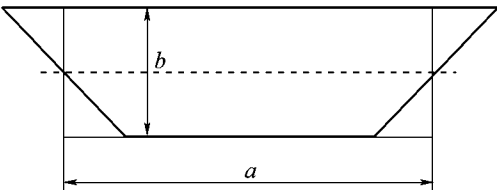
按附图 6-5，搜索出可完全环绕不规则屈曲板格的一组矩形。在几种可能之中，取出面积最小的矩形。将该矩形收缩成原板格的面积，且保持长宽比和中心位置不变。从而求出具有尺寸  $a$ 、 $b$  的最后的矩形板格。



附图 6-5 非矩形基本板格的近似

b) 梯形的基本板格

用上、下边的平均值  $a$ ，原板格高度  $b$  求得矩形，见附图 6-6。



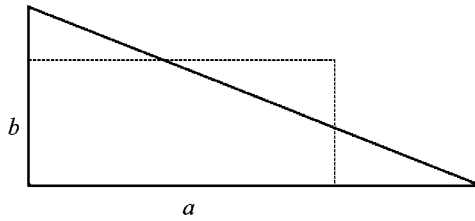
附图 6-6 梯形基本板格的近似

c) 直角三角形

将直角三角形的勾、股边乘以  $\sqrt{0.5}$ ，以求得同样面积和长宽比的矩形，见附图 6-7。

d) 一般三角形

一般三角形按上述 a) 处理。



附图 6-7 直角三角形的近似

## 1.3.3 舷侧外板的屈曲评估

为计算垂直加筋的舷侧外板的屈曲衡准，下列工况应予考虑：

若垂向应力和剪应力在基本板格的高度范围呈大致的常量：

- 按照第 6 章第 3 节表 6-14 中的屈曲载荷工况 1、2 和 5 应予考虑
- $\psi = f(\sigma_1, \sigma_2)$ ，对于水平应力
- $\psi = 1.0$ ，对于垂向应力
- $t = t_{\min}$ （基本板格）

若在基本板格的高度范围分布水平应力、垂向应力和剪应力，则下列应力情况应予以分开考虑：

## a) 纯垂向应力

- 屈曲区域的尺寸按  $b \times b$  ( $\alpha = 1$ ) 考虑
- $\psi = 1.0$
- 基本板格中的最大垂向应力应按适用的衡准考虑

## b) 剪应力与垂向应力相关联

- 屈曲区域的尺寸按  $2b \times b$  ( $\alpha = 2$ ) 考虑
- $\psi = 1.0$
- 下列两个应力合成应予以考虑：
  - 基本板格中最大垂向应力加上剪应力和发生最大垂向应力处的总纵应力
  - 基本板格中最大的剪应力加上垂向应力和发生最大剪应力处的总纵应力
- 计入的板厚为最大垂向 / 剪应力发生之处的板厚

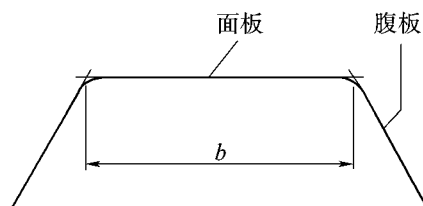
## c) 分布的纵向应力与垂向应力和剪应力相关联

- 采用基本板格的实际尺寸 ( $\alpha = f(a, b)$ )
- 对纵向应力，采用实际的板边应力比  $\psi$
- 对垂向应力和剪应力，采用其平均值
- $t = t_{\min}$ （基本板格）

## 1.3.4 槽型舱壁的屈曲评估

横向基本板格（面板）应使用平行于槽条的正应力进行评估。斜的基本板格（腹板）应使用正应力和剪应力的合成进行评估。

板格宽度  $b$  应按附图 6-8 量取。

附图 6-8 槽型舱壁  $b$  的量取

- a) 面板评估
  - 采用  $F_1=1.1$
  - 按第 6 章第 3 节表 6-14, 采用屈曲载荷工况 1
  - 屈曲区域的尺寸按  $b \times b$  ( $\alpha=1$ ) 考虑
  - $\psi=1.0$
  - 基本板格中的最大垂向应力应按适用的衡准考虑
  - 计入的板厚为最大垂向应力发生之处的板厚
- b) 腹板评估
  - 采用  $F_1=1.1$
  - 按第 6 章第 3 节表 6-14, 采用屈曲载荷工况 1 和 5
  - 屈曲区域的尺寸按  $2b \times b$  ( $\alpha=2$ ) 考虑
  - $\psi=1.0$
  - 下列两个应力合成应予以考虑:
    - 基本板格中最大垂向应力加上剪应力和发生最大垂向应力处的总纵应力
    - 基本板格中最大的剪应力加上垂向应力和发生最大剪应力处的总纵应力
  - 计入的板厚为最大垂向应力 / 剪应力发生之处的板厚

## 第7章 直接强度分析

### 第1节 主要支撑构件的直接强度评估

#### 1 一般要求

##### 1.1 适用范围

1.1.1 船长 150m 及以上的船舶，应基于三维（3D）有限元（FE）分析进行主要支撑构件的直接强度评估。

1.1.2 本章规定了三个有限元分析步骤：

（a）整体舱段有限元强度分析（有限元分析第一步），用于评估货舱结构主要支撑构件的整体强度，按照第 2 节进行。

（b）详细应力评估（有限元分析第二步），用细化网格评估高应力区域，按照第 3 节进行。

（c）热点应力分析（有限元分析第三步），用精细网格计算应力集中点的热点应力进行疲劳强度评估，按照第 4 节进行。

直接强度评估的有限元分析流程图见图 7-1。

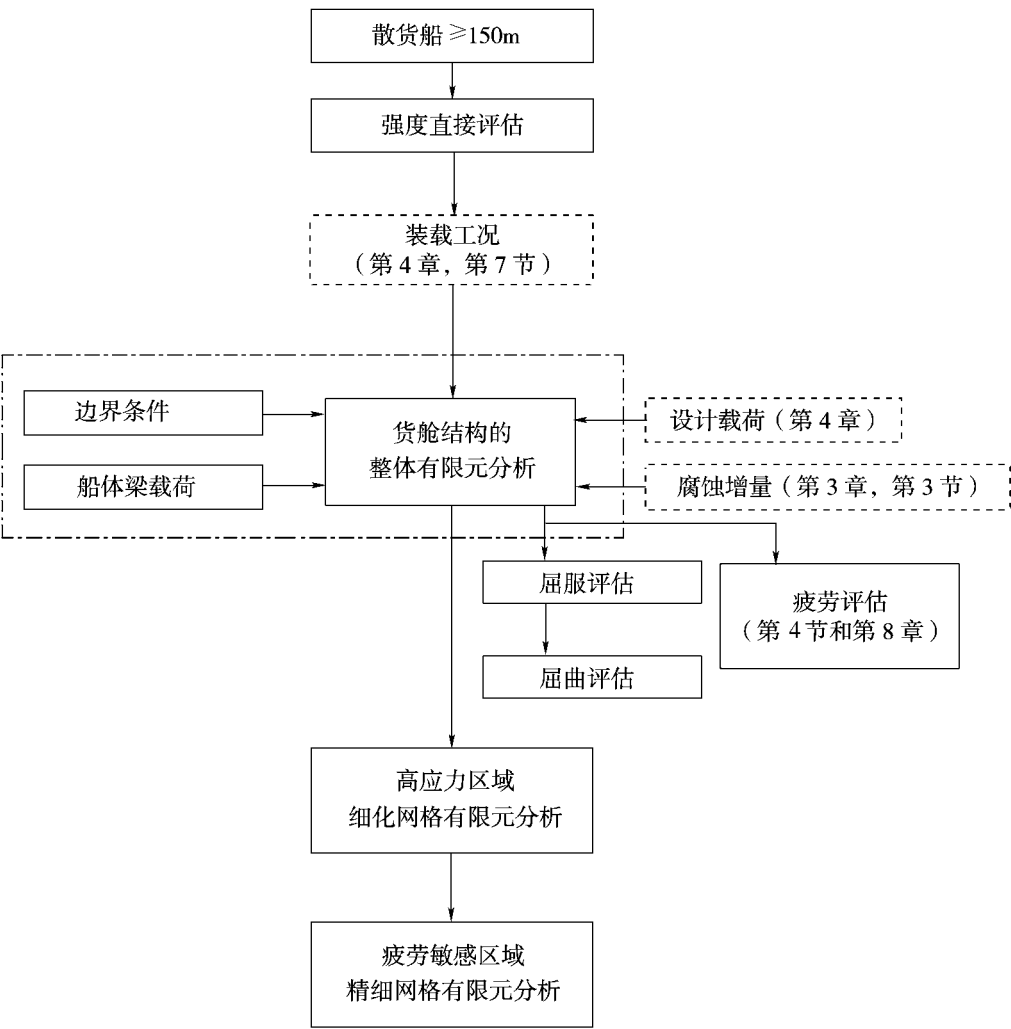


图7-1 有限元分析流程

## 1.2 计算机程序

1.2.1 用于有限元分析的计算机程序应适合于拟进行的分析。在分析开始前，未经认可的程序应向船级社证明其可靠性，并令船级社满意。

## 1.3 提交分析报告

1.3.1 应提交一份详细的有限元直接强度分析报告，包括分析的背景资料。该报告应包括以下资料：

- a) 分析中所用图纸清单，包括日期和版本；
- b) 结构建模准则的详细说明，以及模型与实际结构的任何差别；
- c) 结构模型图；
- d) 模型中所用材料特性、板厚及梁特性；
- e) 边界条件的详情；
- f) 所有分析的装载工况；
- g) 载荷施加信息；
- h) 挠度结果的汇总和图表；
- i) 应力结果的汇总和图表；
- j) 屈曲强度评估的详情；
- k) 表明结构满足设计衡准的表列结果；
- l) 所用的有限元计算程序，包括日期和版本。

## 1.4 净尺寸

1.4.1 直接强度计算应基于第 3 章第 2 节规定的净尺寸方法。

## 1.5 施加的载荷

### 1.5.1 设计载荷

直接强度分析应施加按第 4 章给定的设计载荷，载荷的概率水平为  $10^{-8}$ ，疲劳强度评估设计载荷的概率水平为  $10^{-4}$ 。应将可能作用于船体结构上的最恶劣载荷状态的静、动载荷组合施加到三维有限元模型上。

### 1.5.2 结构重量

船体结构重量的影响应包括在静载荷中，但不应包括在动载荷中。钢材的标准密度应取  $7.85\text{t/m}^3$ 。

### 1.5.3 装载工况

三维有限元分析中，应考虑第 4 章第 7 节规定的装载工况。

## 第2节 货舱结构整体舱段有限元强度分析

### 符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

$M_{SW}$ : 设计垂向弯矩，定义见第 4 章第 7 节表 4-19。

$M_{WV}$ : 中拱或中垂状态下垂向波浪弯矩，定义见第 4 章第 3 节 [3.1.1]。

$M_{WH}$ : 水平波浪弯矩，定义见第 4 章第 3 节 [3.3.1]。

$Q_{SW}$ : 所考虑横舱壁位置处的许用静水剪力，见第 4 章第 7 节表 4-20。

$Q_{WV}$ : 垂向波浪剪力，定义见第 4 章第 3 节 [3.2.1]。

$C_{WV}, C_{WH}$ : 载荷组合因子，定义见第 4 章第 4 节表 4-6。

## 1 一般要求

### 1.1 适用范围

1.1.1 本节规定的流程针对船中区域的货舱结构直接强度分析。

1.1.2 货舱结构整体舱段有限元强度分析用于验证在所施加的静、动载荷作用下，以下各项内容满足在可接受的衡准范围内：

- a) 船体梁和主要支撑构件的应力水平；
- b) 主要支撑构件的屈曲能力；
- c) 主要支撑构件的挠度。

## 2 分析模型

### 2.1 模型范围

2.1.1 有限元模型的纵向范围应覆盖三个货舱和四个横舱壁。模型端部的横舱壁连同各自壁墩应包括在模型中。模型的两端均应形成垂直平面，任何位于端面位置的强框架应包括在模型中。模型范围的详细要求见本章附录 1。

2.1.2 有限元模型应包括船舶的两舷，以考虑横向波浪载荷的不对称性。

2.1.3 所有主要构件应在有限元模型中建模，其中包括：内壳和外壳、双层底肋板和桁材系统、横框架和垂直桁材、水平纵桁以及横舱壁和纵舱壁。这些构件上的所有板和扶强材均应建模。

### 2.2 有限元建模

2.2.1 [2.1.3] 所述的所有主要构件（板和扶强材）均应在有限元模型中建模。

2.2.2 有限元网格边界应尽可能模拟实际结构的扶强材排列规律，并应表示扶强材之间板格的真实几何形状。

2.2.3 应以适当的单元类型恰当表示每个构件的刚度。选择单元类型应按照以下准则：

(1) 扶强材应以梁单元或具有轴向、扭转、双向剪切和弯曲刚度的杆单元建模。但主要支撑构件的腹板加强筋和面板可用仅具有轴向刚度、沿单元长度剖面面积不变的杆单元建模。

(2) 板应以具有面外弯曲刚度、双轴向刚度和面内刚度的壳单元建模。对于不承受侧向压力的板可用仅具有双轴向刚度、面内刚度的膜单元建模。

对于膜元和壳元，应仅采用图 7-2 所示的线性四边形单元或三角形单元。

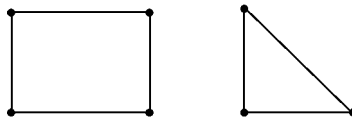


图7-2 线性四边形和三角形的膜、壳单元

应尽可能避免三角形单元，特别是在高应力区域和开孔周围、肘板连接处和折角连接处这些应力梯度大的区域。

(3) 加筋板可用能恰当表示板格刚度的二维（2D）正交异性单元建模。

2.2.4 当有限元模型中没有使用正交异性单元时：

- 网格尺寸应小于等于所表示的纵骨间距或舷侧肋骨间距。
- 扶强材应以杆（rod）和 / 或梁（beam/bar）单元建模。
- 如设置双壳，主要支撑构件腹板沿高度方向应至少分为 3 个单元。
- 如没有设置双壳，舷侧肋骨和端部肘板的腹板应以壳单元建模，面板应以壳 / 梁 / 杆单元建模。舷侧肋骨腹板沿高度方向可不划分多个单元。
- 单元长宽比应不大于 4:1。

典型网格示例见本章附录 1。

2.2.5 当有限元模型中加筋板用正交异性单元表示时：

- 对于双层底纵桁或肋板构件，单元高度应为双层底高度。

- 如扶强材位于两个正交异性单元间的边缘，扶强材既可使用梁 / 杆元建模，也可将扶强材刚度赋到两个正交异性单元上来虚拟建模。
- 如果扶强材位于一个正交异性单元和一个膜 / 壳单元间的边缘，扶强材应以梁 / 杆单元建模。
- 如果扶强材位于两个膜 / 壳单元间的边缘，扶强材应使用梁 / 杆单元建模。
- 如设置双壳，主要支撑构件的腹板沿高度应以一个单元建模。
- 如没有设置双壳，至少三档肋骨应有一根建模，肋骨与其相连的端部肘板的腹板应以壳单元建模，面板应以壳 / 梁元建模。
- 单元长宽比应不大于 2:1。

2.3 边界条件

2.3.1 模型两端应按表 7-1 和表 7-2 要求简支。端部两剖面的纵向构件节点应与位于中心线上中和轴处的独立点刚性关联，见表 7-1。两端独立点应按表 7-2 约束。

两端的刚性关联						表7-1
模型两端的纵向构件节点	平 移			旋 转		
	$D_x$	$D_y$	$D_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$
所有纵向构件	RL	RL	RL	—	—	—
“RL”是指与独立点的相关自由度刚性关联。						

独立点的支撑条件						表7-2
独立点的位置	平 移			旋 转		
	$D_x$	$D_y$	$D_z$	$R_x$	$R_y$	$R_z$
模型后端的独立点	—	约束	约束	—	—	—
模型前端的独立点	约束	约束	约束	约束	—	—

2.4 装载工况

2.4.1 一般要求

装载工况由装载模式和载荷工况组成，见第 4 章附录 2，对于常规设计船舶是强制工况。

2.5 船体梁载荷的考虑

2.5.1 一般要求

每个装载工况应与其相应的船体梁载荷相关。载荷组合应采用第 4 章第 4 节对每个载荷工况规定的波浪垂向、水平弯矩和波浪垂向剪力的载荷组合因子（LCFs）。

2.5.2 垂向弯矩分析

应对第 4 章第 7 节表 4-19 所列的工况进行垂向弯矩分析，最少要求的工况见第 4 章附录 2。

在垂向弯矩分析中，船体梁载荷目标值为在有限元模型的中部舱中心处可能产生的最大垂向弯矩。船体梁目标值应按照表 7-3 得到，并考虑第 4 章第 7 节表 4-19 和第 4 章附录 2 规定的垂向静水弯矩。

垂向弯矩分析的目标载荷				表7-3
船体梁作用	静水	波浪	考虑位置	
垂向弯矩	$M_{SW}$	$C_{wv} M_{wv}$	中部舱中心	
垂向剪力	0	0	中部舱中心	
水平弯矩	—	$C_{wh} M_{wh}$	中部舱中心	
水平剪力	—	0	中部舱中心	

### 2.5.3 垂向剪力分析

应对第 4 章第 7 节表 4-18 所列的工况进行垂向剪力分析，最少要求的工况见第 4 章附录 2。

在垂向剪力分析中，船体梁载荷目标值为在有限元模型的中部舱横舱壁处可能产生的最大垂向剪力，折减后的垂向弯矩应同时考虑。船体梁载荷目标值应按照表 7-4 得到，并考虑第 4 章第 7 节表 4-17、表 4-18 和第 4 章附录 2 规定的垂向静水弯矩和剪力。

垂向剪力分析的目标载荷

表7-4

船体梁作用	静水	波浪	考虑位置
垂向弯矩	$0.8M_{SW}$	$0.65C_{WV}M_{WV}$	横舱壁
垂向剪力	$Q_{SW}$	$Q_{WV}$	横舱壁
水平弯矩	—	0	横舱壁
水平剪力	—	0	横舱壁

### 2.5.4 局部载荷的影响

由于施加在模型上的局部载荷引起的船体梁剪力和弯矩分布按照船体梁简单梁理论计算。模型两端的反作用力和由于局部载荷引起的船体梁剪力和弯矩分布应按照下列公式计算：

$$R_{V\_fore} = -\frac{\sum_i (x_i - x_{aft}) f_i z}{x_{fore} - x_{aft}}, \quad R_{V\_aft} = \sum_i f_i z + R_{V\_fore}$$

$$R_{H\_fore} = -\frac{\sum_i (x_i - x_{aft}) f_i y}{x_{fore} - x_{aft}}, \quad R_{H\_aft} = -\sum_i f_i y + R_{H\_fore}$$

$$Q_{V\_FEM}(x) = R_{V\_aft} - \sum_i f_i z, \quad \text{当 } x_i < x$$

$$Q_{H\_FEM}(x) = R_{H\_aft} + \sum_i f_i y, \quad \text{当 } x_i < x$$

$$M_{V\_FEM}(x) = (x - x_{aft}) R_{V\_aft} - \sum_i (x - x_i) f_i z, \quad \text{当 } x_i < x$$

$$M_{H\_FEM}(x) = (x - x_{aft}) R_{H\_aft} + \sum_i (x - x_i) f_i y, \quad \text{当 } x_i < x$$

式中： $x_{aft}$ ——尾端支撑的位置；

$x_{fore}$ ——首端支撑的位置；

$x$ ——计算位置；

$R_{V\_aft}$ ,  $R_{V\_fore}$ ,  $R_{H\_aft}$ ,  $R_{H\_fore}$ ——首端和尾端的垂向、水平反作用力；

$Q_{V\_FEM}$ ,  $Q_{H\_FEM}$ ,  $M_{V\_FEM}$ ,  $M_{H\_FEM}$ ——施加在有限元模型上的局部载荷引起的船体梁垂向、水平剪力和弯矩；

$f_i$ ——所有局部载荷引起的节点  $i$  处的作用力；

$x_i$ ——节点  $i$  的纵向坐标。

### 2.5.5 计算船体梁载荷的方法

弯矩分析中，评估主要支撑构件时考虑船体梁载荷 / 应力可以采用两种不同的方法。

a) 将船体梁载荷直接施加到有限元模型上（直接法），或

b) 将采用侧向载荷的结构分析中得到的应力单独与船体梁应力相叠加（叠加法）。

剪力分析时，应使用直接法。

### 2.5.6 直接法

直接法中，在三维有限元模型中直接考虑船体梁载荷的影响。为了考虑 [2.5.2] 和 [2.5.3] 规定的船体梁载荷和 [2.5.4] 规定的局部载荷影响，应在模型两端施加平衡载荷。

为了控制目标位置处的剪力，两组强迫弯矩应施加在模型两端。这些弯矩按照下列公式计算：

$$M_{Y\_aft\_SF} = M_{Y\_fore\_SF} = \frac{(x_{fore} - x_{aft})}{2} [Q_{V\_T}(x_{eq}) - Q_{V\_FEM}(x_{eq})]$$

$$M_{Z\_aft\_SF} = M_{Z\_fore\_SF} = \frac{(x_{fore} - x_{aft})}{2} [Q_{H\_T}(x_{eq}) - Q_{H\_FEM}(x_{eq})]$$

为了控制目标位置处的弯矩，另外两组强迫弯矩应施加在模型两端。这些弯矩按照下列公式计算：

$$M_{Y\_aft\_BM} = -M_{Y\_fore\_BM} = - \left[ M_{V\_T}(x_{eq}) - M_{V\_FEM}(x_{eq}) - M_{Y\_aft\_SF} \left( 2 \frac{x_{eq} - x_{aft}}{x_{fore} - x_{aft}} - 1 \right) \right]$$

$$M_{Z\_aft\_BM} = -M_{Z\_fore\_BM} = - \left[ M_{H\_T}(x_{eq}) - M_{H\_FEM}(x_{eq}) - M_{Z\_aft\_SF} \left( 2 \frac{x_{eq} - x_{aft}}{x_{fore} - x_{aft}} - 1 \right) \right]$$

式中： $x_{eq}$ ——船体梁载荷评估时所考虑的位置；

$Q_{V\_FEM}$ ,  $Q_{H\_FEM}$ ,  $M_{V\_FEM}$ ,  $M_{H\_FEM}$ ——定义见 [2.5.4]；

$Q_{V\_T}$ ,  $Q_{H\_T}$ ,  $M_{V\_T}$ ,  $M_{H\_T}$ —— $x_{eq}$  位置处的垂向、水平剪力和弯矩目标值，定义见表 7-3 或表 7-4；

$M_{Y\_aft\_SF}$ ,  $M_{Y\_fore\_SF}$ ,  $M_{Y\_aft\_BM}$ ,  $M_{Y\_fore\_BM}$ ——为控制垂向剪力和弯矩而施加在模型前后端的强迫弯矩，绕  $y$  轴顺时针方向为正；

$M_{Z\_aft\_SF}$ ,  $M_{Z\_fore\_SF}$ ,  $M_{Z\_aft\_BM}$ ,  $M_{Z\_fore\_BM}$ ——为控制水平剪力和弯矩而施加在模型前后端的强迫弯矩，绕  $z$  轴顺时针方向为正；

模型端部的强迫弯矩可以由以下方法生成：

- 模型端部剖面施加分布力，产生的合力应等于零，产生的弯矩应等于强迫弯矩。分布力应施加到纵向构件节点上，边界条件按照表 7-1 规定。分布力根据薄壁梁理论确定。

- 在 [2.3.1] 中定义的独立点上施加集中弯矩。

### 2.5.7 叠加法

叠加法中，垂向弯矩分析时，按照下式计算得到的应力应与三维有限元分析的纵向构件每个单元的纵向应力叠加。垂向剪力分析应按照 [2.5.6]。

$$\sigma_{SIM} = \frac{M_{V\_T}}{I_y / (z - N)} - \frac{M_{H\_T}}{I_z / y}$$

式中： $M_{V\_T}$ ,  $M_{H\_T}$ ——分别为所考虑剖面的垂向、水平弯矩目标值，包括局部载荷引起的修正，取为：

$$M_{V\_T} = M_{SW} + C_{WV} \cdot M_{WV} - M_{V\_FEM}$$

$$M_{H\_T} = C_{WH} \cdot M_{WH} - M_{H\_FEM}$$

$I_y$ : 剖面绕水平中和轴的垂向惯性矩, 按照第 3 章第 2 节 [3.2.1] 计算;  
 $I_z$ : 剖面的水平惯性矩, 按照第 3 章第 2 节 [3.2.1] 计算;  
 $N$ : 船体横剖面重心的  $Z$  坐标, 定义见第 5 章第 1 节;  
 $y$ : 单元的  $Y$  坐标;  
 $z$ : 单元的  $Z$  坐标。

### 3 分析衡准

#### 3.1 一般要求

##### 3.1.1 评估货舱

三舱段(1+1+1)有限元模型的中部舱的所有主要支撑构件(包括舱壁), 应进行三维有限元分析评估。

3.1.2 结构分析结果应满足屈服强度、屈曲强度和主要构件挠度的衡准。

#### 3.2 屈服强度评估

##### 3.2.1 参考应力

参考应力应为有限元分析中得到的平面单元(壳或膜)中心的 Von Mises 相当应力, 或线单元(梁或杆)的轴向应力, 有限元分析应按照 [2.5.4] 或 [2.5.5] 考虑船体梁载荷。

如果 FE 模型中没有考虑开孔效应, 开孔周围的参考应力应按照腹板高度和开孔高度之比调整剪切应力的方法适当修正。

##### 3.2.2 相当应力

Von Mises 相当应力按照下式计算:

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \sigma_y + \sigma_y^2 + 3\tau_{xy}^2}$$

式中:  $\sigma_x, \sigma_y$ ——单元正应力,  $\text{N/mm}^2$ ;  
 $\tau_{xy}$ ——单元剪应力,  $\text{N/mm}^2$ 。

在叠加法中, 应力  $\sigma_{SM}$  (定义见 [2.5.7]) 应与纵向应力分量叠加。

##### 3.2.3 许用应力

有限元模型中没有正交各向异性单元(见 [2.2.4]) 时, 参考应力应不超出  $235/k \text{ N/mm}^2$ , 其中  $k$  为材料系数, 定义见第 3 章第 1 节。

有限元模型中包含正交异性单元(见 [2.2.5]) 时, 参考应力应不超过  $205/k \text{ N/mm}^2$ , 其中  $k$  为材料系数, 定义见第 3 章第 1 节。

#### 3.3 屈曲和极限强度评估

##### 3.3.1 一般要求

主要支撑构件的板格屈曲和极限强度评估应按照第 6 章第 3 节进行。

##### 3.3.2 板格应力

每块板格的应力应按照下列步骤得到:

1) 当网格模型与基本板格的几何形状不同时, 作用于基本板格上的应力  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$  和  $\tau$  应将周围网格的单元应力或附录 2 所述方法得到的位移用外插和 / 或内插法得到。

2) 在屈曲评估中, 由于泊松效应, 叠加法或直接法两种分析方法得到的应力均应进行折减, 修正应在局部、整体载荷应力求和之后进行。

当  $\sigma_x^*$ ,  $\sigma_y^*$  应力均为压应力时, 应力折减应按照下式进行:

$$\sigma_x = (\sigma_x^* - 0.3\sigma_y^*)/0.91$$

$$\sigma_y = (\sigma_y^* - 0.3\sigma_x^*)/0.91$$

如压应力满足条件  $\sigma_y^* < 0.3\sigma_x^*$ , 则  $\sigma_y=0$ ,  $\sigma_x=\sigma_x^*$

如压应力满足条件  $\sigma_x^* < 0.3\sigma_y^*$ , 则  $\sigma_x=0$ ,  $\sigma_y=\sigma_y^*$

$\sigma_x^*$ ,  $\sigma_y^*$  为包含泊松效应的应力。

3) 通过适当的线性近似, 沿所考虑的屈曲板格边缘确定应力分布, 如图 7-3 所示。

4) 按照第 6 章第 3 节计算边缘因子  $\psi$ 。

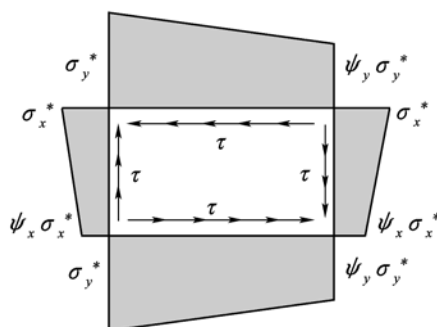


图7-3 用于屈曲评估的板格应力

### 3.3.3 边界条件

评估时, 应根据应力分布和开孔几何形状将第 6 章第 3 节表 6-14 的屈曲工况 1、2、5 或 6 施加到屈曲板格上。

如果实际边界条件与简支条件有明显不同, 第 6 章第 3 节表 6-14 的其他工况可施加到屈曲板格上。

### 3.3.4 安全因子

板的屈曲和极限强度评估安全因子应取 1.0。

## 3.4 主要支撑构件的挠度

有限元分析中得到的双层底和前部（或后部）横舱壁之间的最大相对挠度应不超过以下衡准：

$$\delta_{\max} \leq \frac{i}{150}$$

式中： $\delta_{\max}$ ——双层底和前部（或后部）横舱壁之间的最大相对挠度，mm；

$i$ ——双层底平坦部分的长度或宽度，mm，取小者。

## 第3节 详细应力评估

### 1 一般要求

#### 1.1 适用范围

1.1.1 本节给出了用细化网格进行详细应力评估的步骤, 以评估主要支撑构件的高应力区域。

### 2 分析模型

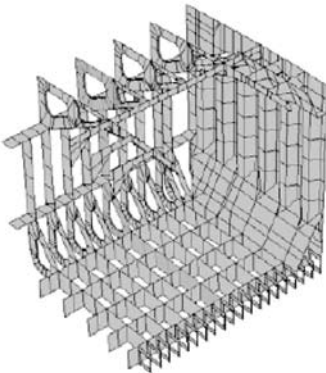
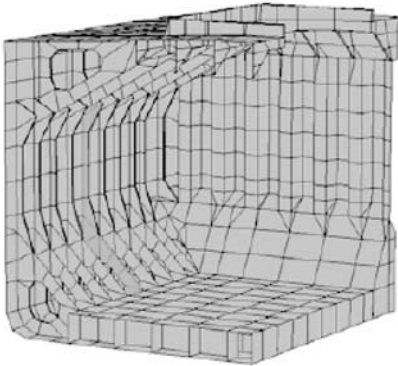
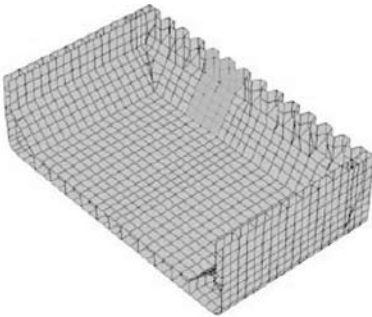
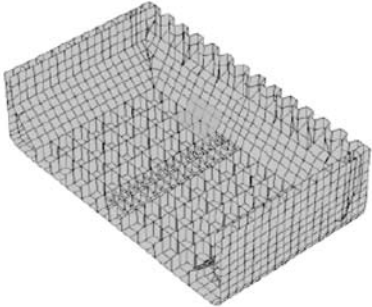
#### 2.1 应细化的区域

2.1.1 用符合第 2 节 [2.2.4] 建模准则的模型进行第 2 节要求的整体舱段分析时, 若表 7-5 中所列区域计算应力超过第 2 节 [3.2.3] 规定的许用应力的 95%, 则应予以细化。

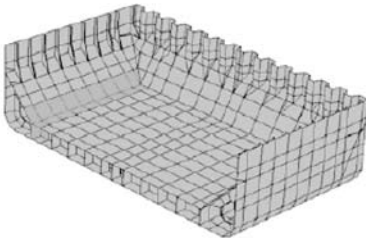
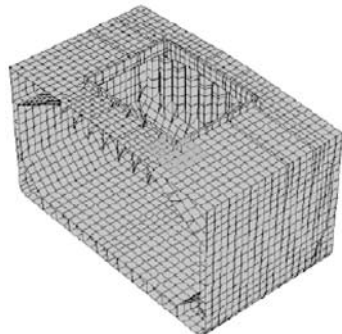
2.1.2 用符合第 2 节 [2.2.5] 建模准则的模型进行第 2 节要求的整体舱段分析时, 下列所有高应力区域均应予以细化：

- 计算应力超过第 2 节 [3.2.3] 规定许用应力的 85% 的区域。
- 表 7-5 所示主要支撑构件的典型细部。
- 表 7-5 所示所考虑货舱的横舱壁的典型细部。

应细化的典型细部 表 7-5

构 件	关 注 区 域	补 充 说 明	描 述
主要支撑构件	双舷侧散货船应力最大的横向主要支撑构件	应力最大的横向主要支撑构件的细化，在以下部位： <ul style="list-style-type: none"><li>• 双层底</li><li>• 底边舱</li><li>• 双舷侧</li><li>• 顶边舱</li></ul>	
	单舷侧散货船应力最大的横向主要支撑构件	应力最大的横向主要支撑构件的细化，在以下部位： <ul style="list-style-type: none"><li>• 双层底</li><li>• 底边舱</li><li>• 顶边舱</li><li>• 有端肘板并与底边舱和顶边舱相连的舷侧肋骨</li></ul>	
横舱壁及相关底墩	槽条与底墩的连接部应力最大处	高应力单元（包括底墩隔板）应建模	
	底墩与内底的连接部应力最大处	高应力单元应建模	

续上表

构 件	关 注 区 域	补 充 说 明	描 述
内底和底边舱斜板及相关支撑构件	内底与底边舱斜板的连接部应力最大处	下列构件应力最大处的细化 • 内底 • 底边舱斜板 • 肋板 • 纵桁	
甲板	应力最大的舱口角隅处的甲板	高应力单元应建模	

2.2 细化方法

2.2.1 高应力区域的细化可使用两种方法：

- 细化区域可直接包含在整体舱段分析（第 7 章第 2 节）的有限元模型中（图 7-4）。
- 细化区域的详细应力可用单独的子模型分析。

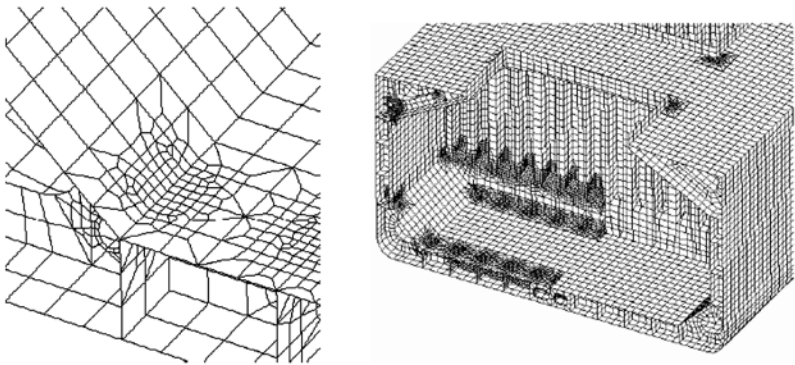


图7-4 细化网格的“直接”建模

2.3 建模

2.3.1 单元类型

每个构件应按照第 2 节 [2.2.3] 的建模准则用与结构相匹配的单元类型建模，正交异性单元不得用于细化区域。

2.3.2 网格

细化区域的单元尺寸应为相应区域普通扶强材间距的四分之一左右，例如：对普通扶强材间距为 800mm 的结构，单元尺寸为 200mm×200mm。

另外，主要支撑构件腹板和单舷侧散货船舷侧肋骨腹板的高度方向至少应划分 3 个单元。

单元的长宽比不超过 3，四边形单元的角应尽可能为 90°，或应在 45° 和 135° 之间。

### 2.3.3 子模型范围

子模型的最小范围是：子模型的边界应对应于相邻支撑构件所在的位置（图 7-5）。

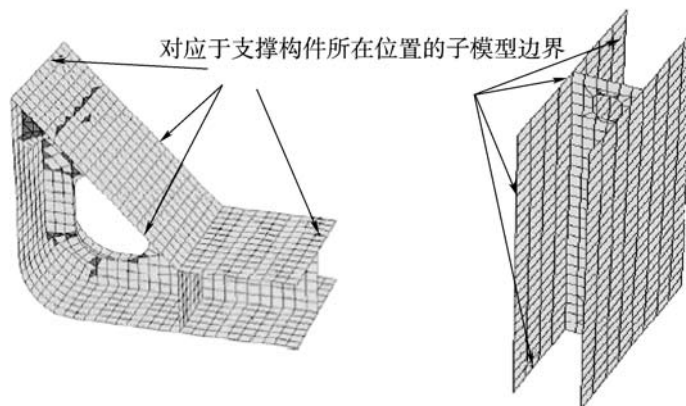


图7-5 子模型的边界

## 2.4 装载工况

2.4.1 详细应力评估中应考虑装载工况为：作用于按照第 2 节建立的整体舱段分析三维有限元模型上，且在所考虑位置处引起超出 [2.1] 规定衡准应力的装载工况。

## 2.5 边界条件

2.5.1 第 2 节 [2.3.1] 规定的边界条件应施加到包含细化网格的整体舱段有限元模型上。

2.5.2 将第 2 节整体舱段分析得到的节点力或节点位移施加到子模型上。如给出节点力，位于子模型边界上的支撑构件应包含在子模型中。如给出节点位移并且子模型中有附加节点，附加节点的节点位移用合适的内插法求得。

## 3 分析衡准

### 3.1 许用应力

3.1.1 细化区域内的板单元的 Von Mises 相当应力和线单元的轴向应力应不超过  $280/k \text{ N/mm}^2$ ， $k$  为材料系数，定义见第 3 章第 1 节。

如所用单元明显小于 [2.3.2] 规定尺寸，本衡准适用于与 [2.3.2] 规定尺寸的单个单元相当的区域中所包含的所有单元的平均应力。

## 第4节 疲劳强度评估的热点应力分析

### 1 一般要求

#### 1.1 适用范围

1.1.1 本节给出了用有限元方法计算热点应力的步骤，用于第 8 章第 1 节表 8-1 规定的各位置的疲劳强度评估。

1.1.2 热点应力分析时应考虑 [2.2] 规定的装载工况和载荷工况。

### 2 分析模型

#### 2.1 建模

2.1.1 疲劳评估的热点应力应由整体舱段模型得到，其中疲劳评估区域用精细网格建模，如图 7-6 所示。

另外，热点应力也可以从子模型中得到，采用第 3 节 [2] 的相似步骤。

2.1.2 从热点位置向外所有方向至少四分之一肋距范围内应使用精细网格建模, 精细网格区域的单元尺寸应近似等于评估区域的净厚度, 单元的长宽比应接近 1。

2.1.3 网格尺寸应从精细网格逐渐过渡到细化网格, 过渡区域如图 7-7 所示。过渡区域内所有构件, 包含肘板、扶强材、纵骨、横框架面板等, 应使用具有弯曲和膜特性的壳单元建模。焊接的几何形状不必建模。

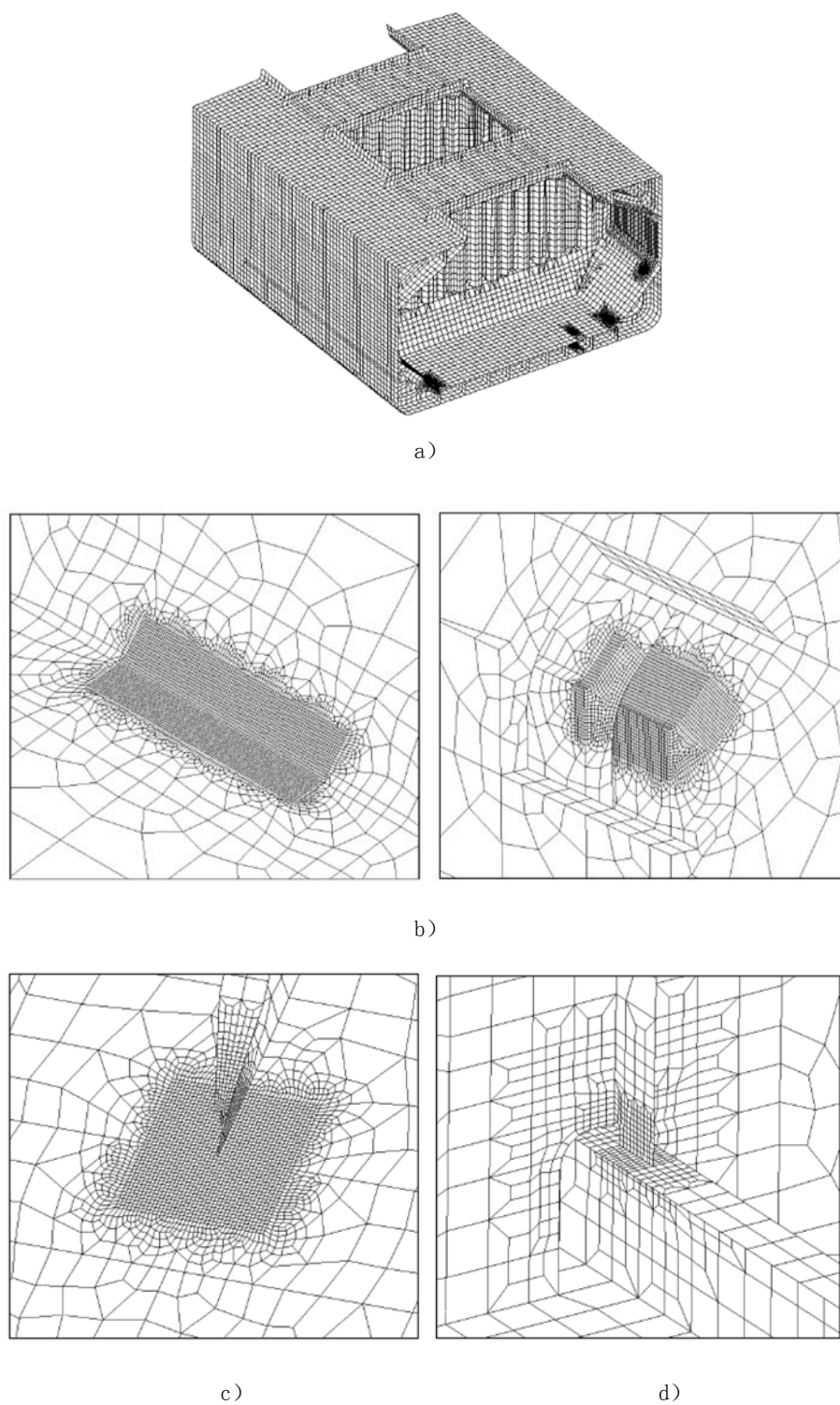


图7-6 精细网格模型示例

a) 有精细网格的整体舱段模型的部分; b) 底边舱折角部分; c) 货舱肋骨的端部; d) 纵骨

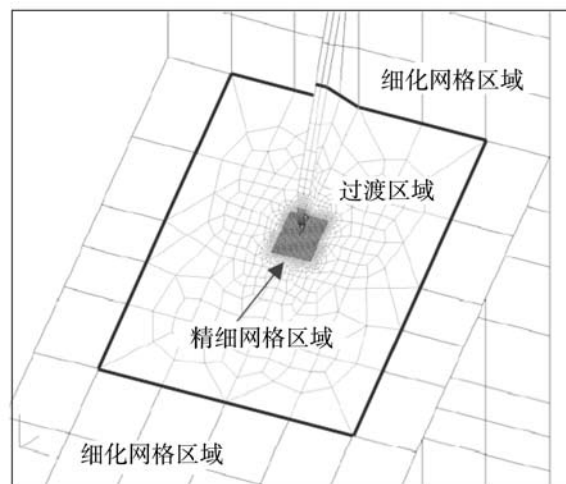


图7-7 精细网格区域、过渡区域和细化网格区域

## 2.2 装载工况

2.2.1 应考虑的装载工况见第 8 章第 1 节表 8-2 规定和第 4 章附录 3 说明。

2.2.2 应按  $10^{-4}$  概率水平计算设计载荷。

## 2.3 边界条件

2.3.1 第 2 节 [2.3.1] 规定的边界条件应施加到包含局部精细网格的整体舱段有限元模型或采用子模型法的母模型上。用子模型时，由母模型获得的节点力或节点位移应施加到子模型上。

# 3 热点应力

## 3.1 定义

3.1.1 热点表面的结构几何应力称为热点应力。

3.1.2 用叠加法得到的热点应力应按照第 8 章第 2 节 [2.2] 和 [3.2] 进行修改。

## 3.2 热点应力评估

3.2.1 精细网格的热点应力应用线性外插法求得。应由位于 0.5 倍和 1.5 倍净厚度处的应力外插到热点位置，见图 7-8 和图 7-9。

热点处与假定疲劳裂纹夹角大于  $45^\circ$  的主应力应视为热点应力。

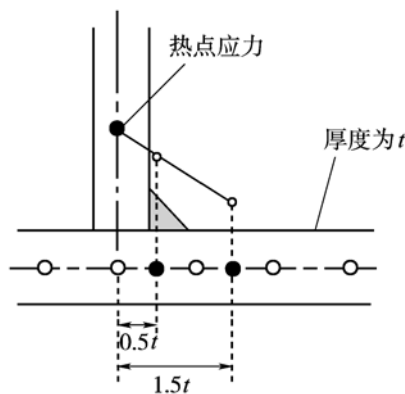


图7-8 两板相交处热点应力的定义

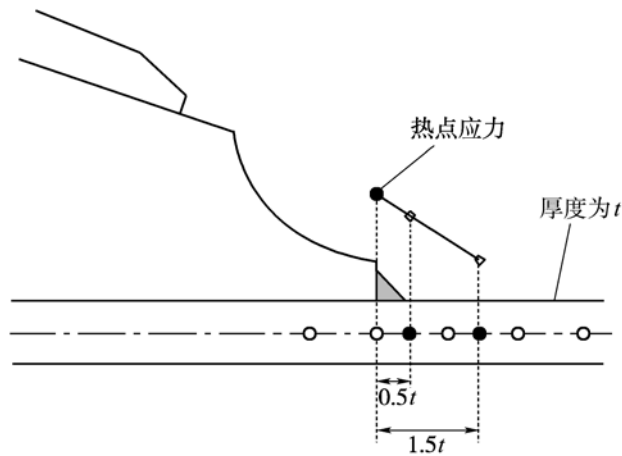


图7-9 板和肘板相交处热点应力的定义

3.2.2 考虑实际热点位置和假定热点位置的差异以及应力梯度随两板之间的夹角  $\theta$  ( $0^\circ \sim 90^\circ$ ) 不同而有所差异，按 [3.2.1] 得到的两板相交处的热点应力应乘上如下定义的修正因子  $\lambda$ 。

- 平板间焊接交线：

$$\lambda = \begin{cases} 0.8, & \theta \leq 75 \\ 0.8 - \frac{0.2}{15}(\theta - 75), & 75 < \theta \end{cases}$$

- 弯曲板和平板间焊接交线：

$\lambda = 0.7$ （如：弯曲形的舭部折角部分）

3.2.3 非焊接区域或者自由边上的热点应力应由相邻两个单元的主应力外插得到，如图 7-10 所示。

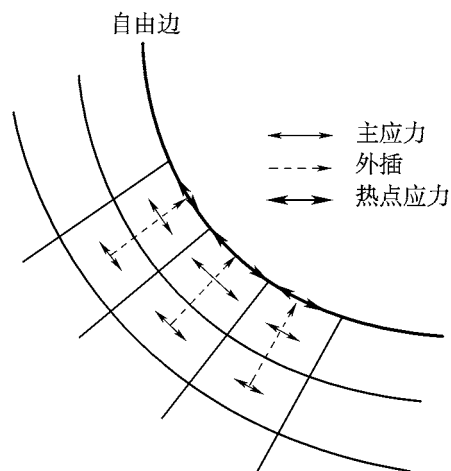


图7-10 自由边的热点应力定义

### 3.3 底边舱折角部分的简化方法

3.3.1 在底边舱折角部分，热点应力  $\sigma_{hotspot}$  可用名义应力  $\sigma_{nominal}$  乘上 [3.3.3] 规定的应力集中因子  $K_{gl}$  得到：

$$\sigma_{hotspot} = K_{gl} \sigma_{nominal}$$

3.3.2 热点位置的名义应力应按距热点位置 1.5 倍和 2.5 倍肋距处的膜应力外插确定，如图 7-11 所示。

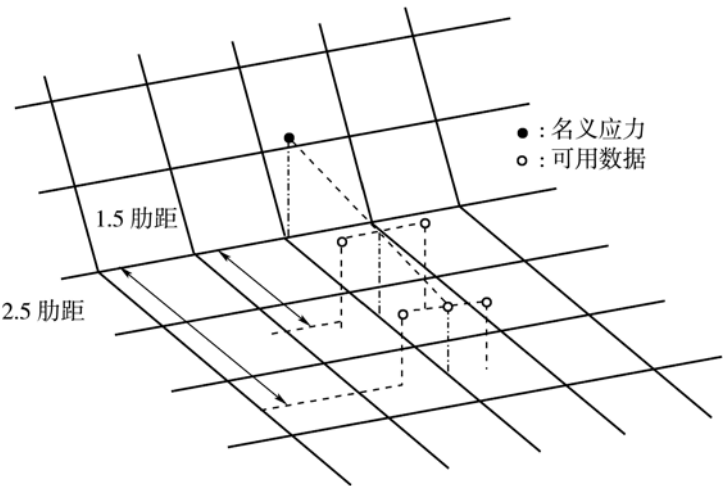


图7-11 底边舱折角部分的名义应力定义

3.3.3 底边舱折角部分的几何应力集中因子  $K_{gl}$  按下式计算：

$$K_{gl}=K_0K_1K_2K_3K_4$$

式中： $K_0$ ——取决于所考虑结构尺寸的应力集中因子，定义见表 7-6；  
 $K_1$ ——取决于折角连接类型的修正系数，定义见表 7-7；  
 $K_2$ ——取决于横框架厚度增量的修正系数，定义见表 7-7，如无厚度增量则取为 1.0；  
 $K_3$ ——取决于插入水平封槽板或纵向肋骨（图 7-12）的修正系数，定义见表 7-7，如无水平封槽板或纵向肋骨则取为 1.0；  
 $K_4$ ——取决于插入横向肋骨的修正系数，定义见表 7-7（图 7-13），如无横向肋骨则取为 1.0。

应力集中因子 $K_0$  表7-6

板厚 $t$ (mm)	底边舱斜板与水平面夹角 $\theta$ (°)			
	40	45	50	90
16	3.0	3.2	3.4	4.2
18	2.9	3.1	3.3	4.0
20	2.8	3.0	3.2	3.8
22	2.7	2.9	3.1	3.6
24	2.6	2.8	3.0	3.5
26	2.6	2.7	2.9	3.4
28	2.5	2.7	2.8	3.3
30	2.4	2.6	2.7	3.2

注：作为选择， $K_0$  也可以用下式确定：

$$K_0=\frac{0.14\theta\cdot(1.15-0.0033\theta)}{(0.5t)^{(0.2+0.0028\theta)}}$$

修 正 系 数				表7-7
折角类型	$K_1$	$K_2$	$K_3$	$K_4$
焊缝类型	1.7	0.9	0.9	0.9
弯曲类型	1.75; $R/t < 4$ 2.80; $R/t > 8$		0.85; $R/t < 4$ 0.55; $R/t > 8$	

注：(1) 当 $4 \leq R/t \leq 8$ 时，线性内插， $R$ 为弯曲部分半径； $t$ 为板厚。  
(2) 在应用修正系数 $K_2$ 时，构件的布置应使圆弧部分的弯曲变形得到有效抑制。  
(3) 腹板厚度的增加量根据内底板的板厚取值。

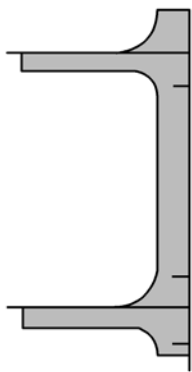


图7-12 水平角撑板或纵向肋骨插入示例

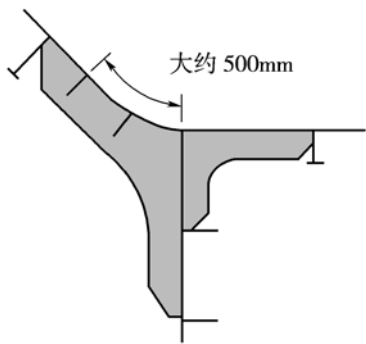
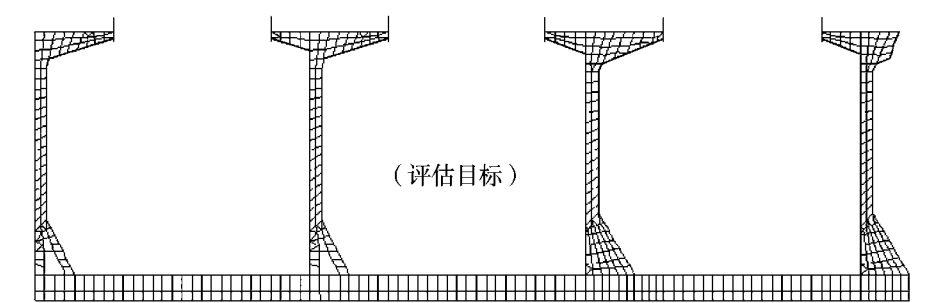


图7-13 横向肋骨插入示例

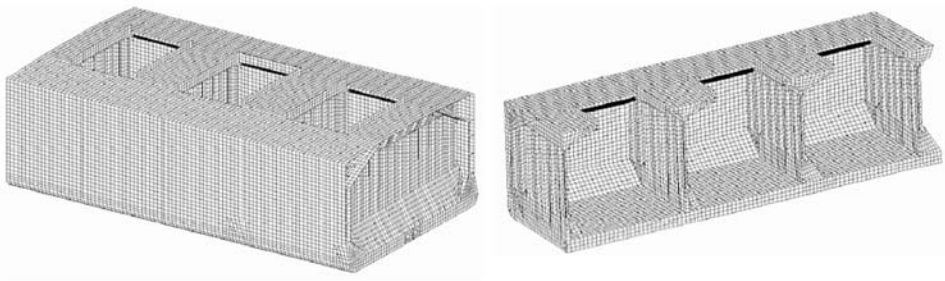
## 附录1 有限元模型的纵向范围

### 1 纵向范围（附图7-1）

分析时建议采用三个货舱长度的有限元模型，其中中部货舱为评估目标。  
三舱段有限元模型将边界条件对被评估中部货舱的不利影响降至最低。有限元模型示例见附图7-2。

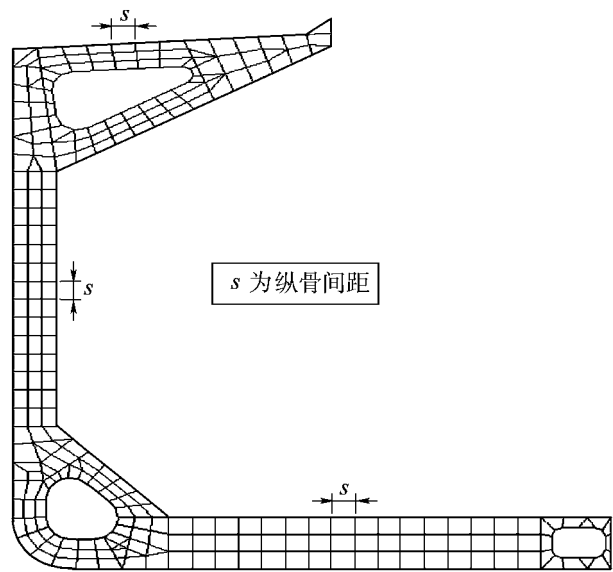


附图7-1 有限元模型的纵向范围



附图7-2 有限元模型的示例

### 2 典型网格（附图7-3）



附图7-3 一个强框架的典型网格

## 附录2 有限元分析中基于位移的屈曲评估

符号

本节未定义的符号，参见第 1 章第 4 节。

$a$ ：板格长边的长度。

$b$ ：板格短边的长度。

$x$ ：平行于  $a$  的方向，取为纵向。

$y$ ：平行于  $b$  的方向，取为横向。

$C$ ：系数，取为：

$$\text{对于 4 节点屈曲板格： } C = \frac{E}{2(1-\nu^2)}$$

$$\text{对于 8 节点屈曲板格： } C = \frac{E}{4(1-\nu^2)}$$

$\nu$ ：泊松比。

$m$ ：系数，取为：

$$m=1-\nu$$

### 1 引言

#### 1.1

1.1.1 本附录给出了从有限元计算得到基本板格（EPP）的屈曲应力和边缘应力比的方法。该方法称为“位移法”。

### 2 位移法

#### 2.1 一般要求

2.1.1 由于有限元网格一般不与屈曲板格相对应，基本板格的节点可以映射到有限元网格对应，这些节点的位移可从有限元计算中得到。

当对位移进行任何操作时，应采用位移的全数值精度。

#### 2.1.2 4 节点和 8 节点板格

如果 EPP 的长宽比小于 3 且沿 EPP 纵向的纵向应力差别较小时，可以使用 4 节点板格。否则应使用 8 节点板格。

#### 2.1.3 节点位移计算

可能有以下三种不同的节点位置：

- 当屈曲板格的节点位于有限元节点上时，位移可以直接转换。
- 当屈曲板格的节点位于平面应力单元的边界上时，位移可在边界上的有限元节点之间采用线性内插得到。
- 当屈曲板格的节点位于单元内时，位移可以在单元所有节点之间采用双向线性内插得到。

#### 2.1.4 局部系统的转换

将节点位移从总体有限元系统转换至屈曲板格局部系统应按下式进行：

$$(u) = [\lambda] \cdot (u_g)$$

式中： $(u)$  ——局部位移矢量；

$(u_g)$  ——总体位移矢量；

$[\lambda]$  ——转换矩阵（ $2 \times 3$ ），由两组坐标轴所形成夹角的方向余弦组成。

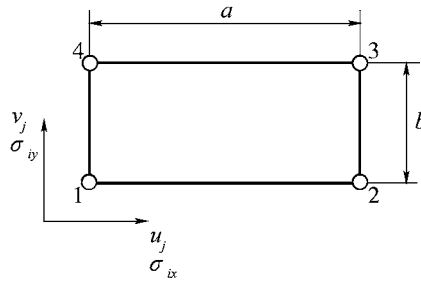
## 2.2 屈曲应力和边缘应力比的计算

2.2.1 在基本板格的角上获得的位移应视为获得特定点应力值的输入。对于4节点屈曲板格，这些点相同；而对于8节点屈曲板格，这些点不同。位置和编号规律可按附图7-4和附图7-5取。

按照第6章第3节，EPP角节点处得到的应力可以直接用于屈曲评估的输入。第7章规定的有限元屈曲评估应考虑屈曲载荷工况为第6章第3节表6-14的屈曲载荷工况1、2和5和第6章第3节表6-15的屈曲载荷工况1a、1b、2和4。在特殊情况下，屈曲评估可以用其他的屈曲载荷工况进行手工计算。

### 2.2.2 4节点屈曲板格

4节点屈曲板格的应力位移关系（压应力为正）：



附图7-4 4节点屈曲板格

通过下式可由 EPP 角节点的位移得到这些节点的应力：

$$\begin{pmatrix} \sigma_{1x}^* \\ \sigma_{1y}^* \\ \tau_1 \\ \sigma_{2x}^* \\ \sigma_{2y}^* \\ \tau_2 \\ \sigma_{3x}^* \\ \sigma_{3y}^* \\ \tau_3 \\ \sigma_{4x}^* \\ \sigma_{4y}^* \\ \tau_4 \end{pmatrix} = -C \cdot \begin{pmatrix} -2/a & -2v/b & 2/a & 0 & 0 & 0 & 0 & 2v/b \\ -2v/a & -2/b & 2v/a & 0 & 0 & 0 & 0 & 2/b \\ -m/b & -m/a & 0 & m/a & 0 & 0 & m/b & 0 \\ -2/a & 0 & 2/a & -2v/b & 0 & 2v/b & 0 & 0 \\ -2v/a & 0 & 2v/a & -2/b & 0 & 2/b & 0 & 0 \\ 0 & -m/a & -m/b & m/a & m/b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2v/b & 2/a & 2v/b & -2/a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -2/b & 2v/a & 2/b & -2v/a & 0 \\ 0 & 0 & -m/b & 0 & m/b & m/a & 0 & -m/a \\ 0 & -2v/b & 0 & 0 & 2/a & 0 & -2/a & 2v/b \\ 0 & -2/b & 0 & 0 & 2v/a & 0 & -2v/a & 2/b \\ -m/b & 0 & 0 & 0 & 0 & m/a & m/b & -m/a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{pmatrix}$$

式中： $(\sigma_{1x}^*, \sigma_{1y}^*, \tau_1, \dots, \sigma_{4x}^*, \sigma_{4y}^*, \tau_4)^T = (\sigma^*)$ ，为单元的应力矢量；

$(u_1, v_1, \dots, u_4, v_4)^T = (u)$ ，为局部节点的位移矢量。

当 $\sigma_x^*$ 和 $\sigma_y^*$ 均为压应力时， $\sigma_x$ 和 $\sigma_y$ 应按下式得出：

$$\sigma_x = (\sigma_x^* - 0.3\sigma_y^*)/0.91$$

$$\sigma_y = (\sigma_y^* - 0.3\sigma_x^*)/0.91$$

如压应力满足条件 $\sigma_y^* < 0.3\sigma_x^*$ ，则 $\sigma_y = 0$ ， $\sigma_x = \sigma_x^*$