



# 梁肘板结构工艺性研究

· 王广戈 ·

26/1.4

**提 要** 本文论述了梁肘板的结构工艺性概念。从梁肘板是“Π”型框架节点的重要加强构件出发,提出了“基本单元法”思想,对梁肘节点进行分析,为有限元计算提供了良好依据。从而使梁肘节点的力学模型的建立更趋于合理化。

**主题词** 船体梁 肘板 焊接接头  
工艺性能 结构模型

## 一、概述

所谓结构工艺性,就是指要解决结构与工艺之间的矛盾,就是对所设计的船体结构,能使造船厂在现有设备的基础上以最少量的劳力和资金,于最短的时间内完成船体结构的建造;同时,结构设计人员必须保证结构便于实施施工工艺过程,使产品具有很高的质量。上述这些条件满足得愈充分,说明结构工艺性愈好。因此,我们必须明了结构及其建造工艺是有着非常密切的关系。二者相互影响,相互促进,而有时又相互矛盾。一般说来,结构应按工艺学要求进行设计,而工艺过程又应视结构而定。即是说,建造工艺性是船体结构设计的重要要求之一,但不是唯一的要求,我们绝不能以降低船体设计质量的方法来提高结构工艺性,相反,应在满足强度要求条件下,减轻重量,节约材料,提高经济效益。

为满足使用要求,在特定条件下,可牺牲工艺性。由此可见,结构工艺性应是研究结构施工

的可靠性和结构质量的可能性,以及产品的经济性的三者的统一;是简化生产过程,降低对劳动者熟练程度要求,缩短造船周期,提高经济效益,从而使造船生产逐步走向机械化生产的重要条件。因此,船体上的结构件的结构工艺性,应明确体现其良好的结构设计和可靠的施工工艺性,以及最佳的工艺性。

梁肘板是舷顶角的重要构件之一,舷顶角节点自钢船采用焊接以来一直倍受重视。因此,研究梁肘板节点的结构工艺性具有更现实的意义。

梁肘板的结构工艺性包括梁肘板的结构设计,即梁肘板的尺寸与形式;舷顶角节点的受力;梁肘板的施工可能性及其焊接质量的可靠性等。

梁肘板的形式可参见文献[5],梁肘板边长 $a > (2 \sim 2.5)h$  ( $h$  为肋骨高度)。由计算与试验表明,只有采用这一尺寸比,方能有效地减小应力集中。

## 二、梁肘板的力学模型

梁肘板是Π型框架折角处的加强构件,包括为肋骨与横梁交界点的连接件。梁肘板节点由梁肘板、肋骨、横梁、甲板板与舷顶列板等构件组成(见图1)。要想精确地确定梁肘节点的受力分布是不大可能的。这是由船体外力的随机性和动力响应的不确定性,以及梁肘节点与船总体关系的复杂性而决定的。一般说来,各肋

骨框架的受力状态是相同的,因此采用横强度理论对梁肘节点进行简化计算是可行的。

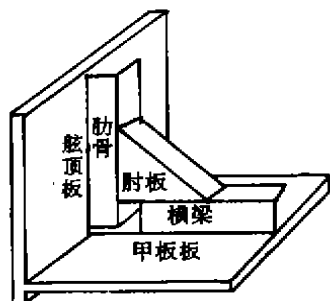
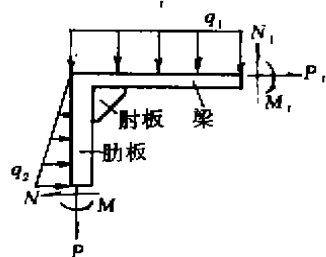
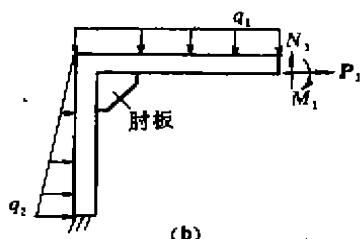


图 1

在离梁肘节点足够远处( $X=a$  或  $b$ ), 肋骨腹板的应力状态可用沿肋骨腹板高度是线性分布的正应力和抛物线分布的剪应力来刻画。肋骨面板上的应力是均布的, 同样, 横梁上的应力分布状态亦如此。上述简要分析在理论和实践上已得到证明, 可以认为梁材截面上的应力状态是已知的。梁肘节点及其周围应力场与外载荷、结构形式、趾端部固定情况等因素有关, 这也是我们所要研究的主要对象。为此, 我们把梁肘板及其周围一段梁截取出来, 考虑梁对截离体的作用, 在其两端加上弯矩  $M$ 、垂直梁轴线的剪力  $N$ 、平行于梁轴线的拉力  $P$ , 见图 2 a。显



(a)



(b)

图 2

然该截离体的应力场将维持原来的受力状态。为计算方便, 将该截离体的肋骨下端置换为固定支座。当截离体足够大时, 则梁肘节点的应力场亦保持不变。这种设想见图 2 b。上述分析方法, 称为基本单元法。这是将对梁系的分析简化为对某节点的分析。

现行规范如 LR78、ZC89 等, 对肘板处理有如下两点规定。

(1) 在求静不定问题时, 不考虑由于肘板的存在而引起的构件断面的变化, 即忽略肘板的影响;

(2) 当确定构件的应力时, 其剖面模数的计算应考虑肘板的影响, 特别是对具有大肘板的构件要考虑跨距点的改变。

由上述考虑, 规范规定肘板尺寸由肋骨(或横梁)的剖面模数确定, 这种考虑对小肘板来说具有一定的可行性, 而对于大肘板如油船、矿砂船等, 就不合理, 因为此时肘板的存在导致肘板节点的应力重新分布, 一般来说, 在节点处弯矩是增大的。若不考虑肘板对剪力、弯矩的影响, 则可能偏于危险。

然而, 在工程实践中使用的梁, 除了上述考虑之外, 一般对梁还有极严格的要求, 不允许有过大的变形。因此, 我们讨论此问题时, 采用基本单元法的思想是可行的。在小变形情况下, 线性叠加原理也是可采用的。由此, 我们将图 2 b 的悬臂计算单元体分解为在外载荷  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $P$ 、 $N$ 、 $M$  单独作用下的应力场之和(见图 3)。根据圣维南原理只要梁肘节点外的梁有一定长度, 则自由端的外载荷( $M$ 、 $N$ 、 $P$ )在端部的分布形状对梁肘节点的影响是很小的。

根据上述梁肘节点的力学模型——基本单元法; 同时针对目前实际存在的梁肘节点的形式, 即对接形、搭接形、圆弧形及无肘板形等, 采用“空间组合平板和杆的有限元法程序”, 将梁肘板的腹板、面板、梁、肋的腹板等离散化为若干三角形的平面单元, 进行了有限元计算。计算了 11 种梁肘节点形式, 对每一种梁肘节点形式, 分别计算了在剪力或弯矩作用下的静力响

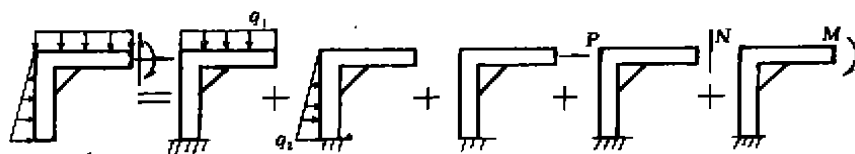


图 3

应。而其余外力  $q_1$ 、 $q_2$ 、 $P$  可以转化为  $N$ 、 $M$  的形式,因此不予计算。对圆弧形梁肘节点计算了不同半径下的应力响应,对纵骨架式梁肘节点的应力集中程度进行了比较。

### 三、有限元计算分析

有限元计算结果表明,无论是哪一种梁肘节点形式,肘板趾端的应力较大。这说明其应力集中程度较大。纵骨架式梁肘节点的肘板边界作用力为空间力,因此,纵骨架式梁肘板受力较横骨架式梁肘板为复杂。横骨架式梁肘板两端以剪力和弯矩计算,与实际受力状态较为吻合,虽受力大小相差较多,但其应力场的状态比较是可行的。由有限元计算得出如下几点结论是有相当实际意义的。

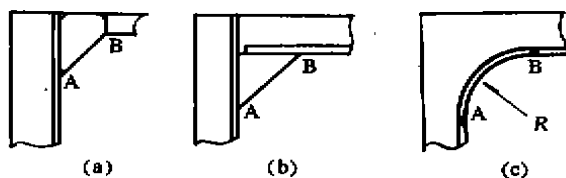


图 4

#### 1. 纵骨架式梁肘节点(见图 4 a)

(1)由计算知,肘板在趾端 A、B 处出现应力集中现象。

(2)在肘板趾端 B,各肘板的应力集中程度差别较小;而在 A 端则差别较大,其中以搭接有折边的节点应力集中程度最小,对接有折边次之,对接无折边最差,即应力集中程度最大。

(3)在梁肘板的斜边上,搭接有折边肘板的应力值过渡最为平缓;其次是搭接无折边、对接有折边,过渡最不平缓的是对接无折边形式。

(4)肘板折边的存在,一般来说降低了带板和肋骨上的应力值,但不影响应力的过渡平滑程度。

(5)搭接形式肘板较对接形式肘板给肋骨和带板带来较高的应力,这是因为在外载荷作用下有“二次弯曲应力”产生。

#### 2. 横骨架式梁肘节点(见图 4 b)

(1)由有限元计算可知,肘板趾端 A 的应力集中现象不甚明显;趾端 B 存在着较大的应力集中现象。这种现象不够正常,但由试验结果看,趾端 A、B 均存在应力集中现象,两者属同一量级。

(2)搭接肘板的应力集中区域的应力较对接肘板的略大些,但两者属于同一量级。

(3)肘板折边存在,有利于缓和肘板、纵骨及横梁的应力,增加肘板刚性。

(4)剪力和弯矩若分别作用于梁肘节点,其应力分析趋势仍然相似。

#### 3. 横骨架式圆弧形肘板(图 4 c)

(1)沿圆弧边缘应力变化,当圆弧半径  $R$  为横梁高度  $h$  的 2.5 倍时,变化较为平缓;当  $R/h < 2.5$  时,则应力变化不平缓,且在圆弧过渡点 A、B 处产生应力集中现象。因此在设计圆弧形肘板时应控制圆弧半径。

(2)无论是剪力或是弯矩作用,有折边的肘板沿圆弧边缘上因力的变化比无折边的平缓,应力集中程度也有所好转,因此,肘板折边有利于减小肘板、横梁、肋骨上的应力。

从上述有限元计算的应力分布状态看,横骨架式梁肘板以半径为横梁腹高 2.5 倍时的圆弧形有折边肘板为最佳,此时应力集中程度最小。然而,在实际的设计中,除了考虑应力因素外,还应考虑工艺因素、结构形式、结构尺寸、工

人技术水平等,即在船舶寿命期内,肘板的可靠性程度。

#### 四、梁肘节点的试验研究

梁肘节点的试验研究主要包括两个方面:一是静强度试验,其目的是研究梁肘节点在指定载荷下,测定各部位的应力状态,观其应力集中程度;二是疲劳强度试验,可见研究报告《梁肘板的疲劳性能》一文,其目的是研究梁肘节点在交变载荷作用下,裂纹产生及其扩展断裂,以期确定疲劳寿命及其影响因素。本文将其要点归纳如下:

##### 1. 静强度试验

(1)试件设计。试验试件的设计是由力学模型的分析 and 有限元计算后,筛选其中典型的梁肘节点形式(见图 5)。

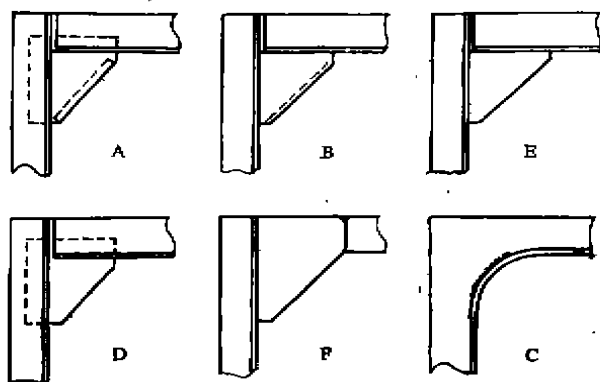


图 5

在图 5 中,A 型为搭接有折边肘板;B 型为对接有折边肘板;D 型为搭接无折边肘板;E 型为对接无折边肘板;F 型为纵骨架式梁肘板;C 型为圆弧形梁肘板。

(2)分析。对 A、B、C、D、E 等五型梁肘节点进行静拉伸破坏试验,由试验结果知其断裂一般位于夹持焊缝处,这是由于未焊透而引起的,这种断裂对肘板及其趾端无多大影响。说明梁肘节点的损坏不是由于静强度而引起的。

测量 A、B、D、E 等四型梁肘节点的应力分布情况,并进行肘板趾端应力比较。试验结果表明:

(1)梁肘趾端的正应力或剪应力,无论是对接还是搭接,其应力的大小是属同一量级,且数量大小差不多,约 10%左右,这与有限元计算相吻合。

(2)由肘板应力分布状态看(图 6),肘板趾端 C、J 点应力最大(包括剪应力在内亦如此),说明有应力集中现象存在。两点的最大相当应力相差约 5%,应力集中系数  $K=1.26$ 。从而也说明了肘板的存在减小了应力集中程度。

(3)从肘板应力分布看,C、J 点应力最大,H 点应力次之,K 点最小。这是与肘板受力状态有关,也与实际情况相符。

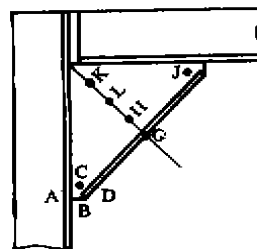


图 6

##### 2. 疲劳强度试验

疲劳试验的试件采用图 5 中 A、B、C、D、E 等五种形式。将此分为六组,每组 5 件,进行对比试验。

由试验结果可知:

(1)上述几组形式除圆弧形 C 型外,裂纹几乎都发生于肘板横梁趾端处。这是因为,此处是结构不连续的最薄弱部位。C 型裂纹发生于圆弧过渡处的夹头焊缝中,这与实际断裂位置不同,这是因为试件夹持处焊缝未焊透,具有较差的结构不连续性,实际多半发生于圆弧中央。

(2)由成组对比计算结果可见,无论是对接还是搭接,有折边的梁肘板能提高其疲劳强度。

(3)由成组对比检验结果知,对接焊缝的疲劳寿命高于搭接焊缝,这是因为搭接焊缝扰乱

了应力线的流畅性,出现了“二次弯曲应力”,从而使疲劳寿命下降。

(4)由圆弧形肘板与对接有折边的三角形肘板比较,其疲劳寿命为同一量级,这是与事实不符的。事实是圆弧形肘板的疲劳寿命高于三角形肘板。其原因在于,圆弧形肘板节点试件在夹持处焊缝未焊透,此处结构连续性较差。

## 五、梁肘节点研究的几点意见

### 1. 梁肘板结构工艺性分析

梁肘板虽小,但它作为船体结构的重要组成部分之一是毋庸置疑的。从梁肘节点研究看,其主要问题是如何防止应力集中。肘板是减少应力集中程度的有效构件,由文献[5]可知,梁肘节点应力集中系数 $K$ ,无肘板的为有肘板的1.5~3.5倍。可见,梁肘板的存在大大地降低了该节点的应力集中程度。然而肘板的存在并没有消除应力集中,而且在肘板的趾端产生新的应力集中源。由文献[4]可知,梁肘节点裂纹总是在肘板趾端的焊缝区域产生,而且总是在横梁位置首先出现裂纹,然后引向肘板、横梁,直至撕裂为止。这是因为裂纹总是在薄弱构件上产生的缘故。同时,肘板的存在给梁肘节点的结构工艺性带来了复杂性,由此而产生梁肘板采用什么形式为好的问题。

目前船体典型节点的连接的梁肘板有三种形式。从应力集中角度考虑,采用圆弧形肘板为好,这种形式对于强横梁连接肘板最为适宜。而在圆弧与梁肘交界点处应设置扶强材于复板上,这样可减少应力集中。在横梁连接处的梁肘板,通常采用三角形肘板,其中有对接与搭接两种形式。这两种形式,从受力效果看,对接比搭接好,因为搭接易使梁端产生挠曲,或使肘板产生翘曲;从工艺性考虑,以搭接为好,因为对接要求构件间有较精确的配合,而搭接肘板的配合精度可降低。因此,从梁肘板的结构工艺性考虑,三种形式均可按实际情况采用。从试验效果

看,梁肘板趾端的包角焊及搭接板端点的包角焊处,全焊透比未焊透的疲劳寿命大。因此,为抑制肘板趾端的裂纹产生,包角焊处必须施行全焊透。

所以,在设计梁肘板时,认为除了“T”形框架的梁肘节点采用对接外,在其他梁肘板部位应尽可能地采用搭接肘板。为使梁肘板节点的结构工艺性优良,我们提出如下五条标准:

- (1)减少梁肘下料加工的工作量;
- (2)便于安装,减少肘板装饰的工作量;
- (3)便于施工,减少肘板焊接的工作量;
- (4)保证结构的连续性,减少应力集中;
- (5)减少肘板规格,增加其通用性。

### 2. 梁肘板研究与规范的关系

肘板研究历来是国内外许多学者的研究课题,如50年代哈夫(B. P. Haiph)与斯姆拿可夫(Б. Н. Смолаков)等人的无肘板之争;60年代加格尔(H. E. Jacger)等人的试验;70年代皮特尔沙根(H. E. Petersshagen)等人的计算,瓦兴坦(D. C. Washington)等人的实船调查;80年代引入电子计算机进行分析;以及我国学者范恩翔、方双等人讨论。以上只是从各个侧面来谈论上述问题,为解决肘板存在的现实性问题,各国规范对梁肘板的尺寸与结构形式进行了规定(见表1)。

由表1可见,规范把梁肘板尺寸与结构形式简单归纳为与肋骨的剖面模数有关。这个规定具有相当的模糊性,它不能确切解决梁肘板的实质问题。由试验与计算表明,梁肘板节点研究主要解决两方面问题。

(1)梁肘板的受力。在外载荷作用下,梁肘板两趾端出现应力集中现象,而且在薄弱趾端首先产生裂缝。这里要研究趾端效应及其影响因素;肘板疲劳损伤的条件及其寿命的确定;肘板的受力是较复杂的,应力流的传导是多变的,因而若要进行计算、试验与分析,首先要选定一个确定可行的计算模型,即力学模型。

(2)梁肘板的工艺性。要弄清梁肘板的尺寸、结构型式与其他构件的关系及其装焊的可

表 1

$W(\text{cm}^4)$	$a, b(\text{mm})$	$t_{\text{折}}(\text{mm})$	$t_{\text{无}}(\text{mm})$	$c(\text{mm})$
$\leq 30$	120	—	6.5	—
50	150	—	7.0	—
100	220	6.5	8.5	50
200	325	7.5	9.5	50
300	400	8.5	11.5	55
400	495	9.5	—	55
500	545	10.0	—	60
600	590	10.5	—	65
700	630	11.0	—	70
800	660	11.5	—	75
900	690	12.0	—	75
1000	715	12.5	—	80
1100	740	13.0	—	85
1200	760	13.5	—	90
1300	775	14.0	—	95
1400	795	14.5	—	95
1500	810	15.0	—	100

说明:  $W$ ——肋骨剖面模数;  
 $a, b$ ——肘板高度或宽度;  
 $t_{\text{折}}$ ——有折边肘板厚度;  
 $t_{\text{无}}$ ——无折边肘板厚度;  
 $c$ ——折边宽度

能性与现实性。这样才能省工时、省材料,便于装、焊、修。

表 1 首先规定肘板高度。由有限元计算表明,肘板高度对肘板趾端的应力集中程度的影响是有利的,但这种影响很小。由此,建议规范上的高度档次可减少,由 17 档改为 9 档。

其次规定板厚度。由有限元计算表明,肘板厚度增加,趾端应力集中程度随之减小,而且趾端区域的横梁、肋骨上的应力变化很小,因此,肘板增厚对肘板趾端应力降低是有效的。

再次梁对肘板趾端的应力集中影响不大。折边的存在主要使肘板、梁、肋上的应力杂乱程度缓和。因此将折边端部削斜,可使折边不利影响下降,折边的存在主要在于增加肘板刚性。

计算表明,甲板与舷侧板厚度对趾端应力集中无多大影响。横梁与肋骨的厚度增加,有利

于减小趾端的应力集中程度。

无疑,各种缺陷,如气孔、夹渣等将引起肘板局部应力的集中程度增加,有时甚至是十分危险的。

由上述讨论看,ZC 89 等规范的规定应有修改,如表 2 形式为宜。

### 3. 梁肘板疲劳寿命的确定

船舶在实际航行时承受交变应力的作用,据考查,目前船体结构构件的损伤,从静强度看是不成问题的,损伤的因素主要取决于结构的疲劳强度,即梁肘板的损伤是结构件上的应力

表 2

$W(\text{cm}^4)$	$a, b(\text{mm})$	$t_{\text{折}}(\text{mm})$	$t_{\text{无}}(\text{mm})$	$c(\text{mm})$
$\leq 30$	10	—	7	—
50	150	—	8	—
100	200	7	9	50
200	300	8	11	55
300	400	9	—	60
400	500	10	—	70
600	600	11	—	80
1000	700	13	—	90
1500	800	15	—	100

说明:  $W$  等含义同表 1

集中源在交变载荷作用下的损坏。因此,梁肘的寿命值应与船龄同步,即 20 年设计值,则疲劳寿命允许值可由下式确定:

$$N = K \cdot \frac{t}{T} \cdot \exp$$

式中  $N$ ——船体结构的疲劳寿命允许值,次;  
 $K$ ——疲劳安全系数,通常取  $K = 1/3 \sim 1/5$ ;

$T$ ——冲击周期, s, 据有人 20 年观察各大海洋的统计资料表明,取  $T = 8$  s;

$t$ ——每年使用的时间, s, 通常货船取半年航行期,取  $t = 1.5 \times 10^7$  s;

$\exp$ ——波浪冲击概率,取 20%。

由计算可见,船体构件的疲劳寿命值为  $10^5 \sim 10^6$ 。然而事实上,由于装焊质量的差异,

