

船舶材料与焊接

第一节 金属材料的力学性能

一、强度和塑性

金属的强度、刚度、弹性及塑性一般可以通过金属拉伸试验来测定。它是按 GB228—87 规定，把一定尺寸和形状的金属试样（如图所示）装夹在试验机上，然后对试样逐渐施加拉伸载荷，直至把试样拉断为止。根据试样在拉伸过程中承受的载荷和产生的变形量之间的关系，可测出该金属的拉伸曲线，并由此测定该金属的强度、刚度、弹性及塑性。

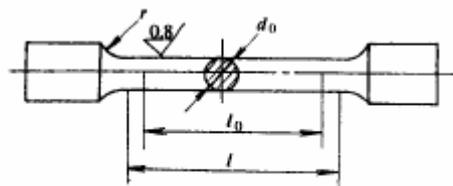


图 1-2-1 圆形拉伸试样

(一) 强度

强度是指金属材料在静载荷作用下，抵抗永久变形和断裂的性能。由于载荷的作用方式有拉伸、压缩、弯曲、剪切等形式，所以强度也分为抗拉强度、抗压强度、抗弯强度、抗剪强度等。

按 GB228—87 规定，可用屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 来表示该材料开始产生明显塑性变形时的最低应力值。屈服强度为试样标距部分产生 0.2% 残余伸长时的应力值，即

$$\sigma_{0.2} = F_{0.2} / A_0 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

式中： $F_{0.2}$ ——试样标距产生 0.2% 残余伸长时的载荷；

A_0 ——试样的原始横截面积。

达到 $F_{0.2}$ 拉力后试棒伸长率不再按先前比例，而是大幅度增加。同时，在这里介绍一下弹性变形概念，即指应力撤消后立即消失的变形。

抗拉强度 σ_b 是表示塑性材料抵抗大量均匀塑性变形的能力。脆性材料在拉伸过程中，一般不产生缩颈现象，因此，抗拉强度 σ_b 就是材料的断裂强度，它是表示材料抵抗断裂的能力。抗拉强度是零件设计时的重要依据，同时也是评定金属材料的强度重要指标之一。

$$\sigma_b = F_b / A_0 \text{ (kgf/mm}^2\text{)}$$

式中： F_b ——试样被拉断时的断裂载荷；

A_0 ——试样的原始横截面积。

一般船用材料当加热温度达到 600°C 以上时，它的屈服强度接近常温下的 $1/10$ ；当加热温度达到 800°C 以上时，它的屈服强度接近于零；

（二）塑性

塑性是指金属材料在静载荷作用下，产生塑性变形而不破坏的能力。伸长率 δ 和断面收缩率 ψ 是表示材料塑性好坏的指标。

1. 伸长率

伸长率是指试样拉断后标距增长量与原始标距之比，即

$$\delta = \frac{L_k - L_0}{L_0} \times 100\%$$

式中： L_k ——试样断裂后的标距；

L_0 ——试样原始标距。

2. 断面收缩率

断面收缩率是指试样拉断处横截面积的缩减量与原始横截面积之比，即

$$\psi = \frac{A_0 - A_k}{A_0} \times 100\%$$

式中： A_k ——试样断裂处的最小横截面积；

A_0 ——试样的原始横截面积。

虽然塑性指标通常不直接用于工程设计计算，但任何零件都要求材料具有一定塑性。因为零件使用过程中，偶然过载时，由于能发生一定的塑性变形而不致于突然脆断。

二、硬度

硬度是衡量金属材料软硬程度的指标。目前生产中，测定硬度方法最常用的是压入硬度法，它是用一定几何形状的压头，在一定载荷下，压入金属材料表面时，压入程度愈大，则材料的硬度值愈低；反之，硬度值就愈高。因此，压入法所表示的硬度是指材料表面抵抗更硬物体压入的能力。

测定硬度的方法很多，生产中应用较多的有布氏硬度、洛氏硬度和维氏硬度等实验方法。

（一）布氏硬度

布氏硬度试验法是用规定直径的淬火钢球或硬质合金球，在规定载荷的作用下压入被测试金

属的表面，停留一定时间后卸除载荷，测量被测试金属表面上所形成的压痕直径，由此计算压痕的球缺面积，然后求出压痕的单位面积所承受的平均压力，由此作为被测试金属的布氏硬度值。

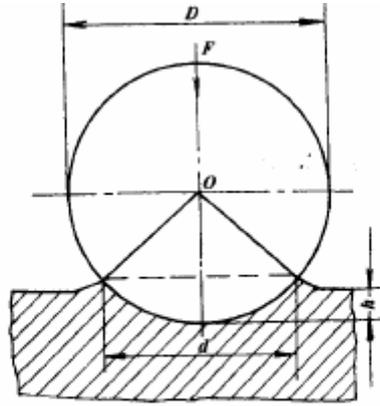


图 1-2-4 布氏硬度试验原理示意图

布氏硬度的单位为： N/mm^2 ，但习惯上只写明硬度的数值而不标出单位。一般硬度符号HBS或HBW前面的数值为硬度值，符号后面的数值依次表示球体直径、载荷大小及载荷保持时间（保持时间为10~15s时不标注）。例如，120HBS10/1000/30表示用直径10mm钢球，在9806.65N载荷作用下保持30s，测得的布氏硬度值为120。

（二）洛氏硬度

洛氏硬度试验法是目前工厂中应用最广泛的试验法。它是用一个锥顶角 120° 的金刚石圆锥体或一定直径的钢球为压头，在规定载荷作用下压入被测金属表面，由压头在金属表面所形成的压痕深度来确定其硬度值。

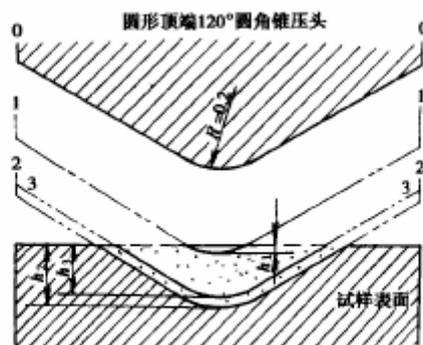
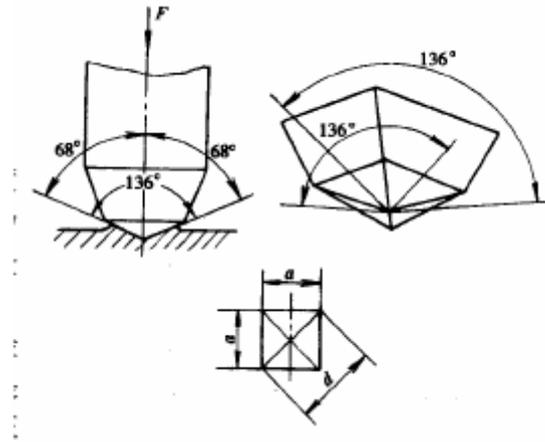


图 1-2-5 洛氏硬度试验原理示意图

洛氏硬度值为一无名数，它置于符号HR的前面表示，HR后面为使用的标尺。例如，50HRC表示用C标尺测定的洛氏硬度值为50。在试验时，硬度值一般均由硬度计的刻度盘上直接读出。

(三) 维氏硬度

为了能在同一种硬度标尺上,测定由极软到极硬金属材料的硬度值,特制定了维氏硬度试验法。试验原理基本上和布氏硬度试验相同,它是用一个相对面夹角为 136° 的金刚石正四棱锥体压头,在规定载荷作用下压入被测试金属表面,保持一段时间后卸除载荷测量数据并计算得出的金属的硬度值,称为维氏硬度,用符号HV表示。



在硬度符号 HV 之前的数值为硬度值, HV 后面的数值依次表示载荷(单位为 N,)和载荷保持时间(保持时间为 10~15s 时不标注)。例如, 640HV30 表示在 30kgf 载荷作用下,保持 10~15s 测得的维氏硬度为 640。

由于各种硬度试验的条件不同,因此相互间没有理论的换算关系。但根据试验结果,可获得粗略换算公式如下:

$$\begin{array}{ll} \text{当硬度在 } 200 \sim 600\text{HBS (或 HBW) 范围内} & \text{HRC} \approx \frac{1}{10}\text{HBS (或 HBW)} \\ \text{当硬度小于 } 450\text{HBS 时} & \text{HBS} \approx \text{HV} \end{array}$$

三、冲击韧性

以很大速度作用于工件上的载荷为冲击载荷。金属材料在冲击载荷作用下,抵抗破坏的能力叫做冲击韧性。为了评定金属材料的冲击韧性,需进行一次冲击试验。一次冲击试验是一种动载荷试验,它包括冲击弯曲、冲击拉伸、冲击扭转等几种试验方法。本节将介绍其中最普遍的一次冲击弯曲试验。

(一) 冲击试验方法

一次冲击弯曲试验通常是在摆锤式冲击试验机上进行的,通过冲击试验得出材料断裂前吸收的能量,用此来衡量材料的韧性水平,以公斤*米或焦耳表示。为了使试验结果能相互比较,所用试样必须标准化。GB/T229-1994 规定,冲击试验标准试样有夏比 U 型缺口试样和夏比

V 型缺口试样两种。两种试样的尺寸及加工要求如图所示。

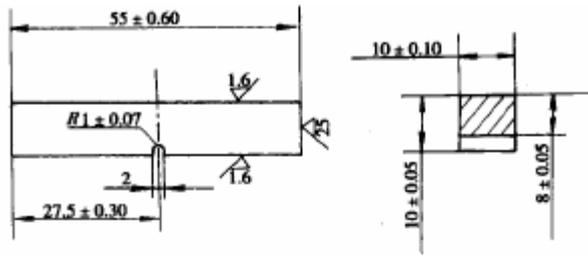


图 1-2-7 夏比 U 型缺口试样

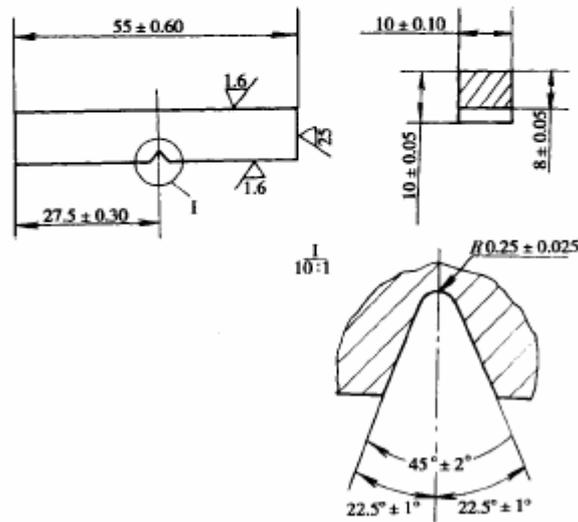


图 1-2-8 夏比 V 型缺口试样

根据两种试样缺口形状不同，冲击吸收功分别用 A_{ku} 和 A_{kv} 表示，单位为焦耳（J）。冲击吸收功的值可从试验机的刻度盘上直接读得。

一般把冲击吸收功值低的材料称为脆性材料，值高的材料称为韧性材料。脆性材料在断裂前无明显的塑性变形，断口较平整、呈晶状或瓷状，有金属光泽；韧性材料在断裂前有明显的塑性变形，断口呈纤维状，无光泽。

试验表明：钢材的力学性能会随温度的变化而变化。温度降低，屈服强度/抗拉强度会升高；而塑性、韧性会降低，其中冲击韧性的变化最早、最明显。

当温度降低到 T_c 附近时，材料的冲击韧性值从原来的较高、较稳定陡然下降到很低水平。这一温度叫做脆性转变温度，此温度越低表明韧性越好。 $T_c < -195^\circ\text{C}$ 材料叫低温用钢。

（二）冲击试验的应用

冲击弯曲试验主要用途是揭示材料的变脆倾向，其具体用途有：

1. 评定材料的低温变脆倾向

有些材料在室温 20℃左右试验时并不显示脆性，而在低温下则可能发生脆断，这一现象称为冷脆现象。为了测定金属材料开始发生这种冷脆现象的温度，应在不同温度下进行系列冲击试验，测出该材料的冲击吸收与温度间关系。

试验表明：冲击吸收功随温度的降低而减小，当试验温度降低到某一温度范围时，其冲击吸收功急剧降低，使试样的断口由韧性断口过渡为脆性断口。因此，这个温度范围称为韧脆转变温度范围。在这温度范围内，通常可根据有关标准或双方协议，确定某一温度为该材料的韧脆转变温度。

韧脆转变温度的高低是金属材料质量指标之一。韧脆转变温度越低，材料的低温冲击性能就越好。这对在寒冷地区和低温下工作的机械和工程结构（如运输机械、地面建筑、输送管道等）尤为重要，由于它们的工作环境温度可能在 $-50\sim+50^{\circ}\text{C}$ 之间变化，所以必须具有更低的韧脆转变温度，才能保证工作的正常进行。

四、疲劳

（一）疲劳现象

根据变动载荷的作用方式不同，零件承受的应力可分为交变应力与重复应力两种，承受交变应力或重复应力的零件，在工作过程中，往往在工作应力低于其屈服强度的情况下发生断裂，这种现象称为疲劳断裂。疲劳断裂与在静载荷作用下的断裂不同，不管是脆性材料还是韧性材料，疲劳断裂都是突然发生的，事先均无明显的塑性变形的预兆，很难事先觉察到，也属低应力脆断，故具有很大的危险性。

产生疲劳断裂的原因，一般认为是由于在零件应力高度集中的部位或材料本身强度较低的部位。例如原有裂纹、软点、脱碳、夹杂、刀痕等缺陷处，在交变或重复应力的反复作用下产生了疲劳裂纹，并随着应力的循环周次的增加，疲劳裂纹不断扩展，使零件承受载荷的有效面积不断减小，最后当减小到不能承受外加载荷的作用时，零件即发生突然断裂。因此，零件的疲劳失效过程可分为疲劳裂纹产生、疲劳裂纹扩展和瞬时断裂三个阶段。

（二）疲劳曲线与疲劳极限

大量试验证明，金属材料所受的最大交变应力愈大，则断裂前所经受的循环周次（定义为疲劳寿命）愈少，这种交变应力与疲劳寿命的关系曲线称为疲劳曲线。

一般钢铁材料特征是当循环应力小于某一数值时，循环周次可以达到很大，甚至无限大，而试样仍不发生疲劳断裂，这就是试样不发生断裂的最大循环应力，该应力值称为疲劳极限。

按GB4337—84规定，一般钢铁材料取循环周次为 10^7 次时，能承受的最大循环应力为疲劳极限。

（三）提高疲劳极限的途径

由于金属疲劳极限与抗拉强度的测定方法不同，故它们之间没有确定的定量关系。但经验证明，在其它条件相同情况下，材料抗拉强度高时，其疲劳极限也愈高。疲劳极限除与选用材料的本性有关外，还可通过以下途径来提高零件的疲劳极限。

（1）在零件结构设计方面尽量避免尖角、缺口和截面突变，以免应力集中及由此引起的疲劳裂纹。

（2）降低零件表面粗糙度，提高表面加工质量，以及尽量减少能成为疲劳源的表面缺陷（氧化、脱碳、裂纹、夹杂等）和表面损伤（刀痕、擦伤、生锈等）。

（3）采用各种表面强化处理，如化学热处理、表面淬火和喷丸、滚压等表面冷塑性变形加工，不仅可提高零件表层的疲劳极限，还可获得有益的表层残余压应力，以抵消或降低产生疲劳裂纹的拉应力。

五 钢的热处理性能

通常Hb、Hv用来表示钢的硬度，钢在加热后以不同的冷却速度冷却会使硬度以及其他力学性能发生变化，冷却速度加快硬度、强度会同时升高，而塑性则会成倍降低。这种通过控制加热温度和冷却速度来改变钢材性能的方法叫钢的热处理

常用的有退火：加热至 850°C 后随炉冷却；

正火：加热至 850°C 后炉外空冷；

淬火：加热至 850°C 后水中淬冷；

回火：加热到不超过 723°C （通常 600°C ）后冷却下来的方法；

经过淬火变硬而脆的钢，再经回火处理它的硬度降低、塑性韧性提高，这种淬火后又回火的方法叫调质处理。回火能够降低甚至消除钢中的残存内应力。

第二节 钢材

钢在冶炼过程中不可避免的含有一些其它元素。各种元素对钢材性能的影响是不同的。为了提高钢材的机械、物理、化学性能，有意向钢中加入一些其它元素，这样的钢称合金钢。在一些恶劣条件下（受复杂应力、冲击载荷、摩擦等作用）工作的设备往往离不开合金钢。碳素钢冶炼、加工比较方便，价格低廉，机械性能可满足多方面要求，尤其是经过热处理后性能有很大改善。因此，碳素钢在工业中应用广泛。它的产量占钢材总产量的90%。

目前，合金钢中常加的合金钢元素有 Si、Mn、Cr、Ni、W、Mo、V、Ti、Zr、Al、Cu、Co、N、B、Xt。

一. 钢材的分类与编号

我国现行的钢材表示法是根据（GB211—63）规定，采用汉字牌号，汉语拼音字母并用，并与国际化学元素符号及阿拉伯数字相结合的编号方法。下表表示钢铁材料的用途、冶炼、浇铸方法、汉字和汉语拼音字母代号。

表 1-2-2 名称、用途、冶炼方法、浇铸方法、代号

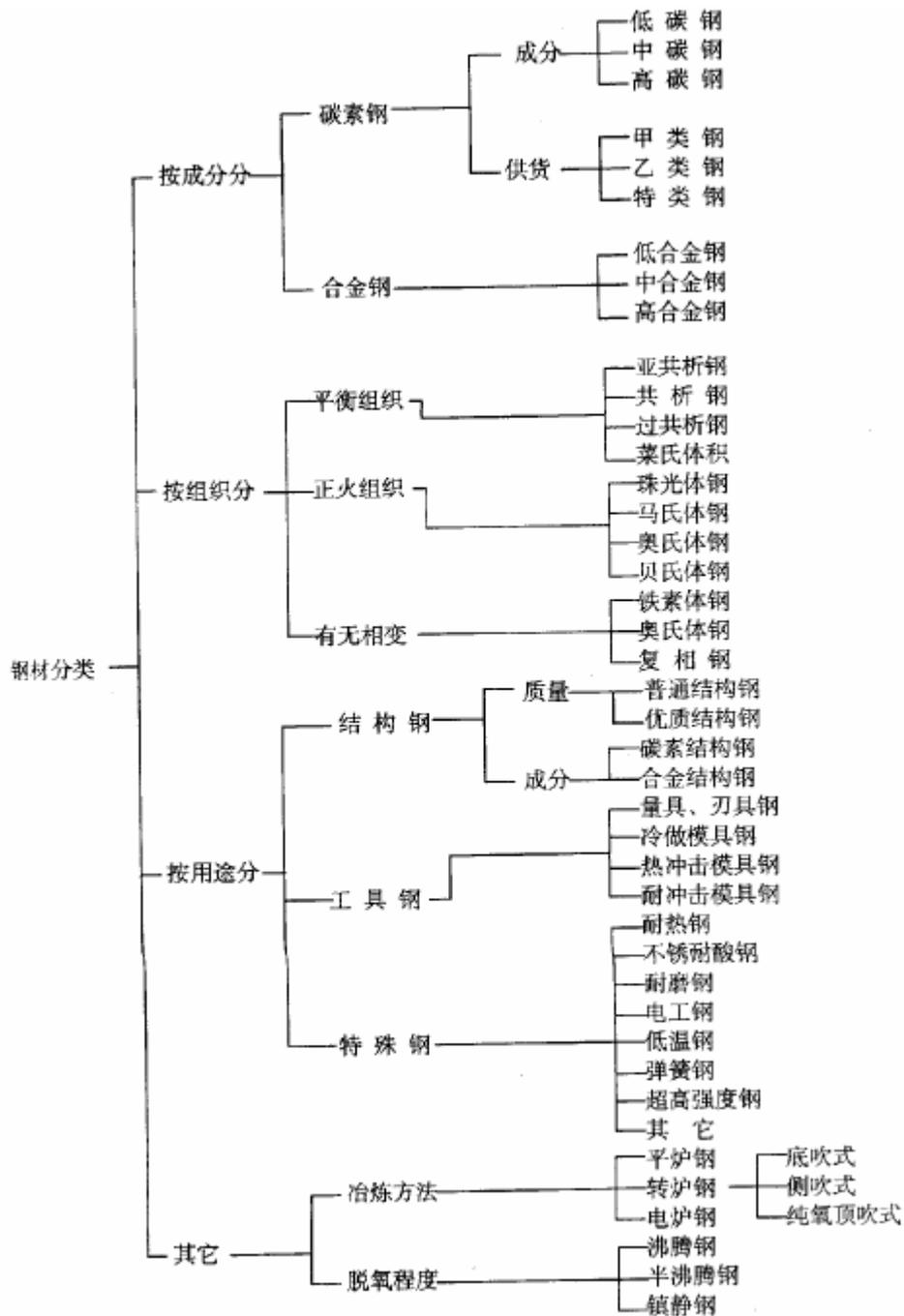
名称	牌号表示		名称	牌号表示		名称	牌号表示	
	汉字	拼音字母		汉字	拼音字母		汉字	拼音字母
平炉	平	P	特类钢	特	C	钢轨钢	轨	U
酸性转炉	酸	S	易切削钢	易	r	焊条用钢	焊	H
碱性侧吹转炉	碱	J	碳素工具钢	碳	T	高温合金	高温	GH
顶吹转炉	顶	D	滚动轴承钢	滚	G	铸钢	铸	ZG
沸腾钢	沸	F	高级优质钢	高	A	磁钢	磁	C
半镇静钢	半	b	船用钢	船	C	铆螺钢	铆螺	ML
甲类钢	甲	A	桥梁钢	桥	q	容器用钢	容	R
乙类钢	乙	B	锅炉钢	锅	g			

（一）普通碳素钢

普通碳素钢分为三类，以上表中的汉字用甲、乙、特或字母 A、B、C 表示。钢号的书写方法是：钢类，炉种的汉字或字母，顺序号，沸腾钢或半镇静钢的汉字或字母。平炉钢和镇静钢在钢号中不注出。

（二）优质碳素结构钢

含碳量以万分之一为单位表示。45 号钢表示平均含碳量为 0.45%。沸腾钢及半镇静钢应特别标明，如 10 沸。锰含量较高的优质碳素钢将锰标出。



(三) 碳素工具钢

为了与碳素结构钢区别，以碳或 T 表示碳素工具钢。含碳量以千分之一表示。如平均含碳量 0.85%，含锰量 0.35%~0.60%以碳 8 锰或 T8Mn 表示。

(四) 合金钢

二、合金元素的影响

任何一种钢材中除 Fe、C 外，还含有 Mn、Si、Cr、Ni.....P、S、H、O、N 等多种元

素，这些元素基本属于两种情况：

(1) 杂质

对钢材的性能有很大影响，能使其产生若干种缺陷：偏析、气孔、裂纹、降低韧性等。

(2) 合金元素

为了改善钢材的性能，在冶炼时有意加入钢中的元素。

(一) 杂质对钢材性能的影响

1. 硫的影响

硫常以 FeS 的形式存在于钢中，钢水结晶时 FeS 分布于晶界周围，FeS 塑性差、熔点低，并能与铁在 985℃ 时形成低熔点共晶，所以在 800~1200℃ 时，轧制或锻造常导致晶界开裂，此现象即通常所说钢的热脆现象。

若钢材中有锰存在，则可形成高熔点 MnS (1600℃)，而在结晶时呈颗粒状分布于晶内，这样就可以大大减弱硫的危害。硫作为有害杂质。钢中常限制在 $\leq 0.04\%$ 。

2. 磷的影响

磷的存在既能使钢脆化，冲击韧性降低又能提高钢的屈服强度，当磷、铜共存时又可大大提高钢的抗腐蚀性能。生产中采用把碳控制在 0.12% 以下，钢中加入铝、钛细化晶粒，这样既可消除冷脆。又能显著提高钢的塑性、韧性。传统把磷作为有害杂质控制在 $\leq 0.04\%$ ，而我国针对磷的有害和有益两方面作用研究出一系列含磷量为 0.07%~0.15% 的磷钢。

3. 氮的影响

在 200~300℃ 加热过程中常呈氮化物析出（时效现象），使钢的强度极限升高，塑性下降，这种现象称作钢的兰脆现象。除氮的有效方法是在钢中加入铝进行脱氮处理，使氮固定在 AlN 中，这样就消除了产生时效的可能。

4 氧的影响

炼钢过程就是氧化过程，氧化钢中的杂质调整钢中各元素的含量。在氧化过程中，钢中一部分铁氧化成 FeO。氧主要以 FeO 的形式存在于钢中。钢中由于存在 FeO，致使其强度、塑性下降。

一般脱氧程度差的沸腾钢比镇静钢具有更大的时效倾向。通常使用锰铁、硅铁或铝进行脱氧。

5 氢的影响

氢在钢的不同相中溶解度相差很大，如果冷却速度太快。氢来不及扩散到金属外部而只能聚积在晶体的缺陷处，（空位、滑移线、晶界），这样，聚积的氢将产生很大压力，使钢材的

内部出现裂纹（所谓白点）。对于合金钢，氢的影响尤为显著。

（二）合金元素的影响

最常见的合金元素有：Mn（>0.08%）、Si（>0.50%）、Cr、Ni、Mo、W、V、Ti、Al等。这些元素以下面的方式存在于钢中。

（1）溶于铁基固溶体中，形成合金铁素体、合金奥氏体、合金马氏体，起强化基体作用。

（5）溶于渗碳体中。形成合金渗碳体或单独成化合物，可大大改善钢的性能。合金元素还可与碳形成碳化物，各元素形成碳化物的能力由强到弱如下：



1 延缓奥氏体的形成

2 合金元素阻碍奥氏体晶粒长大

3 对过冷奥氏体稳定性（淬透性）的影响

一般认为，合金元素在奥氏体中扩散速度小，并且碳原子受到碳化物的形成元素的影响扩散速度减慢，使过冷奥氏体分解速度减少。

由于合金元素的作用，能够降低临界冷却速度，故合金钢比一般碳素钢具有更大淬透性。

4 合金元素对马氏体的影响

合金元素对马氏体的转变的主要影响是：显著改变马氏体的转变温度及改变残余奥氏体的含量。

表 1-2-3 合金元素对钢的性能和相变的影响

元素	晶粒大小	过热的可能性	淬透性	退火、正火、淬火的温度	硬度和强度	塑性
C		增	增	降	增	降

元素	晶粒大小	过热的可能性	淬透性	退火、正火 淬火的温度	硬度和强度	塑性
Mn	稍增	稍增	增	降	增	低碳钢中 < 1.0%℃ 不降高碳钢中降
Si	低含量时减小, 含量 2% 时增大	影响小	增	增	降	
Mo	减小	影响小	急增	增	增	含量 < 6% 时增
Al	含量 < 1.0% 时 减小	显著减少	影响小	显增	增	含量低时增
Co	影响小	影响小	减小	影响小	稍增	降
Ti	减小	减	减	增	低合金时增	稍增
V	显著减小	显著减小	急增	增	增	增
W	减小	减小	增	增	增	含量 1.0% 时稍增
Cr	减小	稍减小	增	增	增	小于 1.5% 时不降
Ni	影小	增	降	降	增	稍增
Cu	影响小	影响小	稍增	稍降	增	含量 0.5% 时增含量 高时降
Nb	急减	减小	小含量时 增大含量 时减	显增	稍增	含量 1.0% 时稍增

5 合金钢的回火特点

合金钢在回火时，将产生回火脆现象。回火温度对钢材韧性的影响见图，回火脆的温度一处在 300℃，另一处在 550℃。一般 300℃ 处称作第一次回火脆或低温回火脆，550℃ 处称作第二次回火脆或高温回火脆，它仅在缓冷时产生而在快冷时不出现。对具有高温回火脆的钢材，可重新加热快速冷却消除，故称这类回火脆为可逆回火脆。

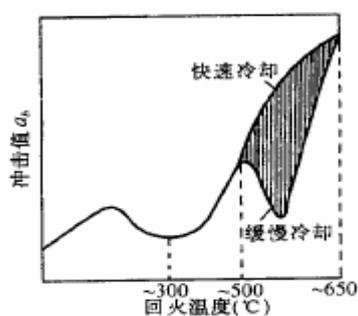


图 1-2-19 回火温度对合金钢冲击韧性的影响

三、特殊钢

(一) 调质钢

1 调质钢的性质和合金元素的作用

调质钢是指经过调质处理后使用的碳素结构钢和合金结构钢。大多数调质钢属于碳素钢，其含碳量 0.30%~0.60%，调质处理后钢的组织为回火索氏体。40、45 号钢经调质处理后的机械性能大致为 $\sigma_b=620\sim700\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_s=450\sim500\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_b=620\sim700\text{N/mm}^2$ 、 $\delta=7\%\sim20\%$ 、 $\psi=45\%\sim50\%$ 、 $\alpha_k=70\sim80\text{J/Cm}^2$ 。

合金调质钢中的合金元素 Cr、Ni、Mn、Si 的作用主要是增加合金调质钢的淬透性，使淬火和高温回火的索氏体组织得到强化。实际上，这些合金元素大多都能溶于铁素体中，使铁素体得到强化，又能不明显降低韧性。Mo、V、Al、B 在合金调质钢中含量少，Mo 起防止合金调质钢在高温时，发生高温回火脆；V 能阻碍高温时奥氏体晶粒长大；Al 能加速合金调质钢的氮化；微量的 B 能显著增加合金调质钢的淬透性。

2. 调质钢的热处理特点

(1) 钢材加热具体温度由具体钢种决定。含

B 钢的淬透性对淬火温度十分敏感，要求严格控制温度。一般碳素调质钢在水中淬火；合金调质钢在油中淬火；而对合金元素含量较高，淬透性大的工件甚至可在空气中冷却。

(2) 在 500~600℃回火，回火的具体温度由钢的成分、性能决定，通过调整回火温度可得到不同的最终性能。

调质钢在高温回火虽然可获得良好的机械性能，但对于某些合金钢（如铬镍钢或铬锰钢）自高回火温度缓慢冷却时，往往会出现高温回火脆现象。大截面的调质钢构件采用快速冷却抑制回火脆的发生是有困难的，因此常常在调质钢中加入（0.15%~0.30%）Mo 或（0.8%~1.2%）W。

调质钢通常除要求具有良好的综合机械性能外，往往要求表面层具有良好的耐磨性，所以经调质处理的零件往往还要进行感应加热表面淬火。如选用 38CrMoAlA 要进行表氮处理。

根据需要调质钢亦可在中、低温回火状态下使用。此时其金相组织为回火屈氏体或回火马氏体，较回火索氏体有较高的强度，但冲击韧性较低。

(二) 不锈钢

腐蚀是金属制件经常发生的一种现象。钢的生锈，高温下氧化，石油管道，化工设备和船舶

壳体的损坏都是与腐蚀有关的。腐蚀一般包括化学腐蚀和电化学腐蚀两种：

(1) 化学腐蚀。

钢在高温时的氧化，钢的脱碳，钢在石油中的腐蚀，氢和含氢气体对普通碳素钢的腐蚀均属于化学腐蚀。

(2) 电化学腐蚀。

这种腐蚀是由于金属在电解溶液中发生电化学反应（在化学反应过程中有电流产生）形成原电池或微电池而引起的。

钢中加入一定量的合金元素铬就使电位提高，抗腐蚀性能大大提高。基体中含铬量 $\geq 11.7\%$ 的含铬不锈钢能在阳极（负极）区的基体表面形成一层富铬的氧化物保护膜，这层膜能阻碍阳极区的反应，并增加电极电位，致使电化学过程减缓。

铬镍不锈钢

这类不锈钢均属于奥氏体型钢，强度、硬度很低、塑性、韧性均较 Cr13 型不锈钢好，无磁性，奥氏体不锈钢适合冷作成型，焊接性能好；但切削加工性能差，在一定的条件下会产生晶间腐蚀。

钢中含铬 18% 的主要作用是产生钝化，提高阳极电位增加耐蚀性；含镍 9% 主要作用是扩大奥氏体区，降低 M_s （使马氏体转变温度降至室温以下），使钢材在室温时具有单相奥氏体。

(三) 低温钢

近年来，工业中大量使用液氧、液氮、液化天然气、液化石油气，为了储存，运输这些液化气体需要大量低温容器，运输船舶。低温容器、运输船舶必须采用具有特殊性能的低温钢制造。对低温钢的性能有一定的要求：

(1) 低温强度。

保证材料在低温条件下有足够的强度。

(2) 低温韧性。

凡是体心立方晶格的金属都有冷脆性，随着温度降低出现脆性转变温度 T_c ，材料的断裂从韧性转变为脆性。对于低温用钢来说在低温条件下的缺口韧性很重要，一般要求梅氏试样 $\alpha_k \geq 60 \text{ J/cm}^2$ ；夏氏 V 型缺口试样 $C_v \geq 25 \text{ J/cm}^2$ （三个试样平均值），单试样 $C_v \geq 20 \text{ J/cm}^2$ 。

(3) 工艺性。

要求考虑到制造低温容器时钢材的可焊性及工艺性，可焊性主要以低温钢中的合金元素的碳当量判断。

(4) 耐腐蚀性。

要求对所容纳的物质具有一定的耐腐蚀性。

1 奥氏体低温钢

奥氏体不锈钢具有良好的低温性能，25Cr-20Ni 是最稳定的奥氏体不锈钢，用于超低温（-268.9℃液氮）条件。我国为节约铬、镍，研制了 15Mn26A14，现已在生产中开始使用。

2 低碳马氏体低温钢

属于这类钢主要是 1Ni9。镍可以改善铁素体的低温韧性，降低脆性转变温度，可用制造-196℃条件下使用的液氮、液化天然气设备。

1Ni9 钢具有良好的可焊性，但经过冷变形后须进行 565℃消除应力退火，以提高室温和低温时钢的韧性。

3 铁素体型低温钢

属于这类低温钢是一些低合金钢，其金相组织为铁素体-少量珠光体。

(1) 16MnXt: 用作-40℃使用的低温钢

(2) 5%Ni 钢: 其使用温度范围-100~-150℃，一般采用 840~850℃正火或淬火后，550~560℃回火。

(3) 06AlNbCuN: 最低使用温度-120℃。铝、铌的作用是生成 AlN、NbN、氮化物在热轧状态大部分溶解，经正火处理可使氮化物以极细形状呈弥散分布，从而细化晶粒，提高钢的低温韧性。该钢应进行正火处理，最好的正火温度是 940℃。

常用的低温钢的成分、热处理和机械性能见下页表格：

(四) 耐磨钢

耐磨钢一般指高锰钢，普通低合金中亦有一类耐磨性能较好的钢用于农业和矿山机械。

(五) 低磁钢

高锰钢，我国（917）奥氏体型低磁钢，主要用于船舶驾驶台的磁罗径围壁，也用于制造扫雷艇的船体。

(六) 耐大气及海水腐蚀用钢

船舶与海洋工程结构运行与工作在海环境中不可避免的要受到海洋大气和海水的腐蚀，为确保安全使用，结构设计要在满足强度和刚度的条件下加放腐蚀量（腐蚀速度×使用年限）。

因此，提高钢材的耐腐蚀性能对减轻结构的重量和降低结构的建造成本有重大意义。

通常为提高低合金结构钢的抗大气、耐海水腐蚀性能是向钢中加入合金元素来达到。Mo 与

Cr、Cu、Nb、Ti 等配合使用能形成难溶性金属盐，从而抑制了阳极反应并增强了锈层的致密性和附着性，因此提高了钢材的抗大气和耐海水腐蚀能力。

表 1-2-8 常用低温钢的成分

钢号	温度℃ 等级	C	Si	Mn	S \leq	P \leq	Ni	AL	Cu	其它
16MnRe	-40	≤ 0.20	0.20~ 0.60	1.20~ 1.60	0.045	0.040				
09Mn2VRe	70	≤ 0.12	0.20~ 0.50	1.40~ 1.80	0.040	0.040				V 0.04~0.10
09MnTiO1Re	-70	≤ 0.12	≤ 0.40	1.40~ 1.70	0.040	0.040			0.20~ 0.40	Ti 0.03~0.08 Re ≤ 0.15
3.5%Ni (10Ni4)	-100	≤ 0.17	0.15~ 0.30	≤ 0.70	0.040	0.035	3.25~ 3.75			
5%Ni (13Ni5)	-100 — -150	0.10~ 0.17	0.17~ 0.37	0.30~ 0.60	0.030	0.030	4.50~ 5.00			Cr ≤ 0.30
06AlN6CuN	-120	≤ 0.08	≤ 0.35	0.90~ 1.30	0.035	0.020		0.04~ 0.15	0.30~ 0.50	Nb 0.04~0.09 NO.010~0.018
9%Ni (1Ni9)	-196	≤ 0.13	0.15~ 0.30	≤ 0.90	0.040	0.035	8.5~ 9.50			
18Cr-9Ni	-253	<0.08	≤ 1.00	≤ 2.00	0.030	0.040	8.00~ 10.50			Cr 18.0~20.0
15Mn26Al4	-253	0.13~ 0.19	≤ 0.60	24.5~ 27.0	0.035	0.035		3.80~ 4.70		
25Cr-20Ni	-269	<0.08	≤ 1.50	≤ 2.00	0.030	0.040	19.00~ 22.00			Cr 24.0~26.0

表 1-2-9 常用低温钢的热处理及机械性能

钢号	板厚 mm	热处理	σ_s N/mm ²	σ_b N/mm ²	δ_5 %	温度℃	低温 a_k J/Cm ²	冷弯 180 不裂
16MnRe	6-16	热轧	≥ 350	≥ 520	≥ 21	-40	≥ 35	d=2a
	17-26		≥ 330	≥ 500	≥ 20			d=3a
09Mn2VRe	5-20	热轧	≥ 350	≥ 500	≥ 21	-70	≥ 35	d=2a

钢号	板厚 mm	热处理	σ_s N/mm ²	σ_b N/mm ²	δ_5 %	温度℃	低温 a_k J/Cm ²	冷弯 180 不裂
09MnTiCuRe	≤30 31 - 50	正火	≥ 320 ≥ 30	≥ 450 ≥ 430	≥ 21 ≥ 21	- 70	≥ 60	d = 2a
3.5% Ni (10Ni4)		正火或正 火 + 回火	≥ 260	460 - 540	≥ 23	- 100	≥ 22	
50% Ni	φ120	淬火 + 回	≥ 350	≥ 600	≥ 18	- 100	≥ 50	D = 40mm
06AlNbCuN	3 - 14 > 14	正火水淬 + 正火	≥ 300 ≥ 300	≥ 400 ≥ 400	≥ 21 ≥ 21	- 120	≥ 60	D = 2a
9% Ni (1Ni9)		淬火 + 回火	≥ 600	700 - 840	≥ 20	- 196	≥ 35	
18Cr - 8Ni		固溶	≥ 210	≥ 530	≥ 40			
15Mn26A14		热轧固溶	≥ 250 ≥ 200	≥ 500 ≥ 480	≥ 30 ≥ 30	- 196 - 253	120 120	
25Cr - 20Ni		固溶	≥ 210	≥ 530	≥ 40			

第三节 船用钢材介绍

一. 钢板规格

船体结构用钢材的选用，首先遇到的是钢的屈服强度指标，根据钢的屈服强度，并考虑结构需要的安全系数，确定船体构件截面尺寸，以保证结构具有足够的强度、刚度和稳定性。

在具体施工中钢材的代用原则：

- (1) 以较高强度等级代替较低强度等级：如以低合金钢代替碳素钢，个别代用尺度不变；大量代用，应重新计算，并征得有关方同意。
- (2) 以较低强度等级代替较高强度等级：如非受力构件允许代用。大量代用，则重新计算，并征得有关部门同意。
- (4) 钢种的代用应考虑焊接的可能性，并注意不同钢种的电化腐蚀影响。代用后，在完工部位要标注。

普碳钢与高强钢从强度、韧性方面如下区分：

普碳钢强度指标： $\sigma_s \geq 235\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_b = 400 \sim 520\text{N/mm}^2$ 韧性指标有A、B、D、E之分。

高强钢强度指标：32级 $\sigma_s \geq 315\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_b = 400 \sim 590\text{N/mm}^2$ 韧性指标有A、D、E、F之分。

36级 $\sigma_s \geq 355\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_b = 490 \sim 620\text{N/mm}^2$

40级 $\sigma_s \geq 390\text{N/mm}^2$ 、 $\sigma_b = 510 \sim 650\text{N/mm}^2$

常用板材：热轧船用钢板（GB709）——热轧船用钢板材料牌号和常用规格列于下表：

表 1-2-39 热轧船用钢板材料牌号和常用规格

材料牌号	规格 $l \times b \times L$ (mm)	质量 (kg/m)	材料牌号	规格 $l \times b \times L$ (mm)	质量 (kg/m)
A 级钢 B 级钢	3 × 1250 × 6000	29.44	A 级钢 B 级钢	7 × 1500 × 6000	82.43
	4 × 1250 × 6000	39.25		7 × 1500 × 8000	82.43
	5 × 1500 × 6000	58.88		7 × 1800 × 8000	98.91
	6 × 1500 × 6000	70.65		8 × 1500 × 6000	94.20
	6 × 1800 × 8000	84.78		8 × 1500 × 8000	94.20
	8 × 1800 × 8000	113.04		12 × 1800 × 8000	169.56
	9 × 1500 × 6000	105.98		13 × 1800 × 8000	183.69
	9 × 1500 × 8000	105.98		14 × 1800 × 8000	197.82
	9 × 1800 × 8000	127.17		14 × 2000 × 12000	219.80
	10 × 1500 × 6000	117.75		15 × 1800 × 8000	211.95
	10 × 1500 × 8000	117.75		15 × 2000 × 12000	235.50
	10 × 1800 × 8000	141.30		16 × 1800 × 8000	226.08
A 级钢 B 级钢	11 × 1500 × 6000	129.53	16 × 2000 × 12000	251.20	
	11 × 1500 × 8000	129.53	17 × 1800 × 8000	240.21	
	11 × 1800 × 8000	155.43	17 × 2000 × 12000	266.90	
	12 × 1500 × 6000	141.30	18 × 1800 × 8000	254.34	
	12 × 1500 × 8000	141.30	18 × 2000 × 12000	282.60	
	19 × 1800 × 8000	268.47	24 × 2000 × 12000	376.80	
A 级钢 B 级钢 D 级钢	19 × 2000 × 12000	298.30	A 级钢	25 × 1800 × 8000	353.25
	20 × 1800 × 8000	282.60	B 级钢	25 × 1800 × 12000	353.25
	20 × 2000 × 12000	314.00	D 级钢	26 × 1800 × 8000	367.38
	21 × 1800 × 8000	296.73	A 级钢 B 级钢 D 级钢	28 × 1800 × 8000	395.64
21 × 2000 × 12000	329.70	30 × 1800 × 8000		423.90	
22 × 1800 × 8000	310.86	32 × 2000 × 12000		425.16	
22 × 2000 × 12000	345.40	34 × 1800 × 8000		480.42	
23 × 1800 × 8000	324.99	36 × 1800 × 8000		508.68	
23 × 2000 × 12000	316.10	40 × 1800 × 8000		565.20	
24 × 1800 × 8000	339.12				

二. 钢材与焊材

组成船体结构所使用的钢板、型材及焊接材料均应持有本社颁发的产品证书，以证明它们符合本社材料与焊接规范的有关要求。

● 钢材

衡量钢材主要有两个指标，一是材料的屈服极限，它体现的是强度，一般分为普通钢和高强度钢两类；另一个是材料的韧性，它是用冲击试验的温度来衡量的，分为 A、B、D、E、F 五个等级。其中 F 级的钢材只有高强度钢才有，而 B 级钢只有一般强度钢。

这两个指标都不得低于图纸的要求。一般来说强度超出图纸的要求太多也是要谨慎的，因为这也会带来一些其他方面的问题。

钢材的等级可以从它的牌号中看出来，一般强度钢是船舶结构最常用的钢材，它们的牌号有 4 种：A、B、D、E；表示它们的韧性等级。一般强度钢的屈服强度要求不低于 235N/mm²。高强度钢有 32 级、36 级、40 级，它们的屈服强度分别是：315N/mm²、355N/mm²、390N/mm²。高强度钢的牌号比较好记，一般是韧性等级符号在前，后面跟着是强度等级。如：D32 表示屈服强度为 315N/mm²，韧性等级为 D 级的高强度钢；而 E36 表示屈服强度为 355N/mm²，韧性等级为 E 级的高强度钢。

至于钢材的韧性，是用冲击试验的温度来衡量的。每一个强度级别的船用钢材，它要求的平均冲击功都是一样的，但每相差一个韧性等级，要求的冲击试验温度相差 20℃。

下表是常用高强度钢的性能：

强度等级		试验温度				
		+20℃	0℃	-20℃	-40℃	-60℃
普通强度钢 235N/mm ²		A	B	D	E	-----
高强度钢	315N/mm ²	-----	A32	D32	E32	F32
	355N/mm ²	-----	A36	D36	E36	F36
	390N/mm ²	-----	A40	D40	E40	F40

● 焊材

焊接材料同样应持有相关船级社证书，以证明它们符合该社材料与焊接规范的有关要求。焊材同样有等级，焊接不同的钢材时要使用相应等级的焊材。焊材同样是在强度和韧性方面区分。常用的焊接材料有：1、2、3、1Y、2Y、3Y、4Y 等几个等级。其中前面的数字表示韧性等级，后面的 Y 或 Y40 等表示强度级别。

它们的力学能见下表：

N/mm ²			
N/mm ²			

根据钢材和焊接材料的性能对比，可以得出焊接材料的选用配套表：

钢材等级	选用焊材的等级
A	1

A, B, D	2
A, B, D, E	3
A32, A36	1Y
A32, A36, D32, D36	2Y
A32, A36, D32, D36, E32, E36	3Y
A32, A36, D32, D36, E32, E36, F32, F36	4Y

修船中要知道所采用的是何种等级的焊材，可以查看焊材的产品证书。

第四节 焊接基本知识介绍：

焊接电弧是一种持久的、稳定的放电现象。它能产生高温将填充金属和部分被焊金属熔化，经冷却、冷固形成焊缝。

一. 焊接电弧特性

1. 焊接线能量

线能量：在一定焊接规范（电弧电压、焊接电流、焊接速度）条件下，单位长度焊缝从焊接电弧中吸收的热量称作该规范的线能量，以下式表示。

$$E = 0.24\eta_p I_h U_h / V_h$$

其中，E——焊接线能量（cal/cm）；

η_p ——热效率；

I_h ——焊接电流（A）；

U_h ——电弧电压（V）；

V_h ——焊接速度（cm/s）。

或

$$E = \eta_p I_h U_h / V_h$$

其中，E——焊接线能量（J/cm）。

焊接线能量作为冲击韧性的考核指标，与电流成正比，与焊接速度成反比。在冬季施工中选择焊条的线能量又不能太低，线能量过小焊缝冷却速度快容易产生冷裂纹。

相反，对大坡口焊接的平、立对口接缝，最好不要用大幅度横向摆动的运条方法。大幅度的横向摆动产生很大线能量造成焊缝机械性能降低。应采用多层多道焊。

一般情况下，横向的裂纹和材料有关；纵向的裂纹和焊接方法有关。

2. 焊条的熔化系数

焊条或焊丝在焊缝金属中约占 30%~80%，因此焊条或焊丝熔化速度反映着焊接生产率的高低。焊条或焊丝的熔化速度可用熔化系数、熔敷系数和损失系数表示。

(1) 熔化系数。

熔化系数是指在 1 小时内每 1 安培电流所熔化的焊芯或焊丝重量。

$$\alpha_p = \frac{G_p}{I_h t} \times 3600 \quad (\text{g/A}\cdot\text{h})$$

其中， G_p ——在 t 时间内焊芯或焊丝金属熔化重量 (g)；

I_h ——焊接电流 (A)；

t ——焊芯或焊丝熔化时间 (s)。

影响焊芯或焊丝的熔化系数主要与电弧电压，直流焊接中的极性和焊条药皮成分有关。

(2) 熔敷系数。

焊芯或焊丝熔化的金属并非全部进入熔池，其中一部分飞溅损失了。实际熔入熔池中的焊芯或焊丝金属量用熔敷系数表示。

$$\alpha_H = \frac{G_H}{I_h t} \times 3600 \quad (\text{g/A}\cdot\text{h})$$

其中， G_H ——在 t 时间内实际过渡到焊缝的焊芯或焊丝金属量 (g)；

I_h ——焊接电流 (A)；

t ——焊芯或焊丝熔化时间 (s)。

(3) 损失系数。

损失系数表示焊芯或焊丝飞溅损失程度，以下式表示。

$$\psi = \frac{G_p - G_H}{G_p} \times 100\%$$

三者之间的关系为：

$$\alpha_H = \alpha_p (1 - \psi)$$

3. 焊缝形成

焊接熔池是由焊芯或焊丝熔滴金属和部分熔化了了的母材金属组成。随着焊接电弧的移动，焊接熔池不断形成、结晶，从而形成了焊缝。

熔池中的液态金属以熔池边缘上处于半熔化状态的母材晶料为核心，成长为束状晶体，这种结晶称作胞状结晶。从横剖面看焊缝金属的结晶垂直于熔合线，最后以树枝状结晶汇集于焊缝中心，这是由于焊接熔池液态金属冷却散热的方向与熔合线垂直的缘故。

金属熔点较高，冷却时较早结晶；杂质熔点较低，结晶较晚，一般分布在金属枝晶间或焊缝金属最后结晶处。

4. 焊缝的几何参数。

焊缝的横剖面如图所示。熔深 H 、熔宽 B 和余高 e ，这些尺寸与焊接规范、焊接质量有密切关系。熔宽与熔深之比称作焊缝的**成形系数**，关系式如下。

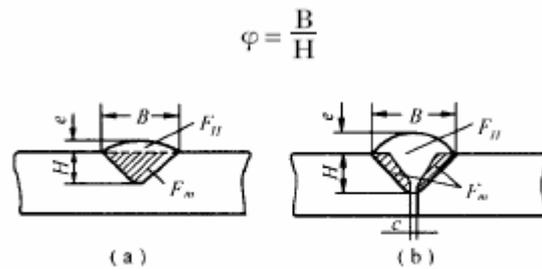


图 3-7-8 焊缝的横截面

成形系数较大时说明焊缝熔宽大而熔深浅，低熔点杂质易浮到焊缝上面。较小时说明焊缝窄而深，低熔点杂质不易浮到焊缝表面，易集中到焊缝中心，这时焊缝往往易出现夹渣、裂纹等缺陷。手工电弧焊、埋弧自动焊较适宜的成形系数为 1.3~2。

熔宽与余高之比称作焊缝的**增高数**，关系式如下。

$$\psi = \frac{B}{e}$$

较大时说明焊缝增高小，焊缝外形尺寸过渡较平缓，焊趾处应力集中较小。反之，则应力集中较大。手工电弧焊、埋弧自动焊较适宜的增高数为 4~8。

焊接层数：通常为板厚与焊条直径的比值： $n = t/d$ ，每层焊道的厚度约为焊条直径的 0.8~1.2 倍。

二. 焊缝形成

1. 熔渣的作用。

焊接时熔化了了的焊条药皮或焊剂形成一种浮在液体金属面上的金属和非金属氧化物称作熔渣。

在焊接过程中，熔渣能够保护焊接熔池金属在熔化、凝固时不受空气影响，使熔池金属冷却缓慢以利于焊缝中气体排除。另外，熔渣中的添加成分可以通过冶金反应去掉或减少焊缝金属中的有害杂质（如硫、磷等），从而改变焊缝成分。

2. 氧对焊缝的影响

氧在焊缝中不论以何种形式存在对材料的性能都有很大影响，随着含氧量的增加，其硬度、强度、塑性明显下降，尤其是低温冲击韧性急剧下降，此外，由于氧的存在还会引起红脆、冷脆和时效硬化。氧存在于焊缝金属中是一种有害元素，焊接时应消除或减少其含量。

3. 氢对焊缝的影响与控制措施

焊接许多金属及合金时氢是有害的。对结构钢氢的有害作用可分两类：一类氢脆、白点等，这类经过时效或热处理，氢自焊接接头逸出缺陷即可消除；另一类气孔、冷裂纹，它一旦出现就永久不能消除。

(1) 氢脆。

在室温附近，氢使钢的塑性严重下降而强度几乎不受影响的现象称作氢脆

(2) 白点。

碳钢或低合金钢焊缝含氢量较高，在其拉伸或弯曲试件的断面上常常出现白色圆形局部脆断点，称作白点。白点的直径一般 0.5~3mm，多数情况白点中心有小夹杂物或气孔，其周围为韧性断口。

(3) 气孔。

熔池中如果吸收较多氢，在熔化金属冷却结晶时，由于溶解度突然下降使氢处于过饱和状态，反应生成的分子氢不溶于金属，于是在液态金属中形成气泡，当气泡的逸出速度小于液态金属的结晶速度时，将在焊缝中形成气孔。

(4) 冷裂纹。

冷裂纹是焊后冷至较低温度下产生的。对于低合金高强度钢大约在马氏体转变温度附近，由于拘束应力、淬硬组织和氢的共同作用而产生的。

氢引起的冷裂纹具有延迟现象，故称延迟裂纹。延迟裂纹的产生主要取决于钢材的淬硬倾向、焊接接头的应力状态和熔敷金属中的扩散氢含量。

控制氢的措施：

(1) 限制材料中的含氢量。

(2) 清除焊丝和焊件表面上的杂质。

焊接时应仔细清理焊丝、焊件坡口表面的铁锈、油污和吸附的水分，因为这些物质都含氢是增加焊缝金属中含氢量的主要原因。

(3) 控制焊接规范。

手工电弧焊时，增大焊接电流会使熔滴吸收氢量增加；增加电弧电压会使焊缝含氢量减少。气体保护焊时，射流过渡比滴状过渡含氢量低，这是由于射流过渡时金属蒸气压力急剧增大，使氢的分解压下降的缘故。

(4) 焊后热处理。

焊后把焊件加热到 350℃，保温 1 小时，可将绝大部分扩散氢除去。

4. 氮对焊缝的影响与控制

焊接区周围空气是气相氮的主要来源。根据氮与金属作用可分二种情况。一类金属不与氮发生作用，它们既不溶解氮又不形成氮化物，这类金属有铜和镍等。另一类金属与氮发生作用，既能溶解氮又能与氮形成稳定化合物，这类金属有铁、锰、钛、硅、铬等。

(1) 氮对焊接质量的影响。

氮对于能与它发生反应的金属是有害的，在焊接这类金属时应控制氮的含量。

① 气孔。

能与氮发生反应的金属在液态高温时可溶解大量氮，在其凝固时氮的溶解度突然下降，过饱和的氮以气泡形式从溶池向外逸出，当焊缝金属的冷却速度大于气泡的逸出速度时就形成气孔。

② 对金属性能的影响。

室温下氮的溶解度很小，焊接时熔池中含有较多氮，焊接冷却速度较快，一部分氮以过饱和形式存在于固溶体中，另一部分氮以针状氮化物（ Fe_4N ）形式析出，分布于晶界或晶内，使焊缝金属的强度、硬度升高；塑性和韧性下降。

焊缝中过饱和氮会随时间延长逐渐析出，形成稳定的针状 Fe_4N ，脆性针状 Fe_4N 使材料的强度和硬度上升而塑性和韧性下降，这种现象称作时效。当焊缝金属中加入能与氮形成稳定化合物的元素（钛、铝和锆等）可抑制或消除时效现象。

(2) 控制氮的措施。

① 气渣联合保护。

药皮的保护只是一方面，是有限的。在药皮中加入造气剂（碳酸盐、有机物等）形成气渣联合保护可使焊缝中含氮量下降到 0.02% 以下。

② 焊接规范

直流反接焊接时焊缝金属中的含氮量比直流正接焊接时焊缝金属中含氮量少。

5. 硫的危害及控制。

当硫以 FeS 形式存在时危害性很大，因为 FeS 与液态铁几乎可无限互溶，在熔池金属结晶时，呈片状或链状分布于晶界，产生偏析。这样会增加焊缝金属产生结晶裂纹倾向，同时还会降低冲击韧性和抗腐蚀性。

控制硫的措施。

① 限制材料中的含硫量。

② 冶金方法脱硫。

6. 磷的危害及控制

磷在液态铁中溶解较多，主要以 Fe_2P 、 Fe_3P 的形式存在，快速结晶时磷易发生偏析，脆硬的磷化铁常分布于晶界，减弱了晶粒间的结合，增加了焊缝金属的冷脆性，即冲击韧性降低脆性转变温度升高。

控制磷的措施。

① 限制材料中的含磷量。

② 冶金方法脱磷。

三. 焊接接头的金相组织

焊接时距热源不同距离的各点被加热的最高温度不同，显然离焊缝越近被加热的温度越高；离焊缝越远被加热的温度越低。焊接加热、冷却过程与热处理相似，同样影响母材的组织性能。

(一) 热影响区组织

热影响区范围内组织硬度会出现峰值，而韧性会明显下降。下图左方是低碳钢焊接接头组织示意图，右方为铁碳合金状态图和距离焊缝不同距离点在焊接过程中的热循环曲线。

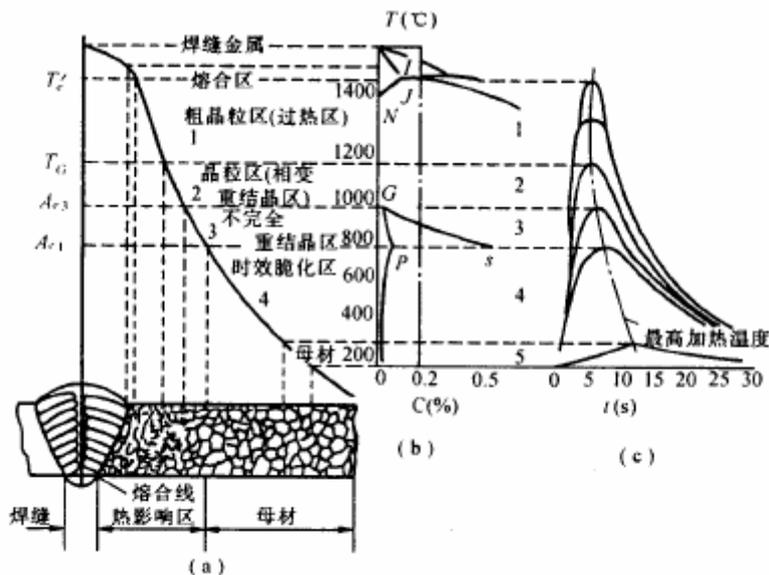


图 3-7-15 焊接热影响区不同温度范围与铁碳状态图的关系

1. 熔合区

熔合线附近部分温度处于液相线与固相线之间，该区被加热温度高，晶粒粗大，化学成分与组织不均匀，冷却后为过热组织。该区域很窄，显微镜下亦难区分。

由于化学成分和组织的不均匀,所以对焊接接头的强度和韧性都有很大影响,在许多情况下熔合区是产生裂纹和脆性破坏的发源地,应当引起重视。

2. 粗晶区(过热区)

温度在 $A_{C3}+50^{\circ}\text{C}$ 至固相线以下,金属处于过热状态,奥氏体晶粒发生了严重长大,冷却后得到粗大晶粒组织(一般对低碳钢讲,焊后晶粒度为(1~2)级,造船对材料晶粒度要求为5级),在气焊和电渣焊时常出现魏氏体组织。此区韧性很低,通常冲击韧性要降低20%~30%,但强度变化不大。

3. 细晶区(相变重结晶区)

焊接时母材金属被加热至 $A_{C3}+30^{\circ}\text{C}\sim A_{C3}+50^{\circ}\text{C}$,发生珠光体和铁素体全部转变为奥氏体,然后在空气中冷却就会得到均匀细小的珠光体和铁素体(相当于热处理中的重结晶,得到的是正火组织),此区的塑性和韧性都比较好。

4. 不完全重结晶区(部分相变区)

焊接时母材被加热至 $A_{C1}\sim A_{C3}$ 间,只有一部分组织发生相变重结晶,相变为奥氏体的部分冷却结晶为细小铁素体和珠光体,另一部分未溶入奥氏体的铁素体成为粗大的铁素体。该区晶粒大小不一,组织不均匀,因此机械性能也不均匀。

5. 再结晶区

母材焊前受冷加工变形或热应力变形,再被加热至 $T_{再}\sim A_{C3}$ (材料的再结晶温度, $T_{再}\approx 0.4T_{熔}$)将发生再结晶和应变时效过程,金相组织有时看不到明显变化。然而对于具有时效应变敏感性强的钢种,在该温度范围将发生脆化现象,表现出较强的缺口敏感性。

焊接热影响区的大小受许多因素影响,如焊接方法、线能量、板厚等。不同方法焊接低碳钢时,热影响区的平均尺寸,见表。

表 3-7-5 不同焊接方法热影响区的平均尺寸

焊接方法	各区的平均尺寸 mm			总宽 mm
	粗晶区	结晶区	部分相变区	
手工电弧焊	2.2~3.0	1.5~2.5	2.2~3.0	6.0~8.5
埋弧自动焊	0.8~1.2	0.8~1.7	0.7~1.0	2.3~4.0
电渣焊	18~20	5.0~7.0	2.0~3.0	25~30
氧乙炔气焊	21	4.0	2.0	27.0
真空电子束焊	—	—	—	0.05~0.75

四. 常用金属材料的可焊性与焊接方法

(一) 金属材料的可焊性

通常金属材料的可焊性指使用可焊性和工艺可焊性两个方面

使用可焊性指焊接接头的机械性能（强度、韧性、塑性、硬度）及特殊性能（耐热性、耐磨性、耐腐蚀性）；工艺可焊性指接头出现各焊接缺陷的敏感性；

1. 钢的可焊性

在钢材的各种元素之中碳对可焊性的影响最大，因为碳是引起钢材淬硬的主要原因。钢材中碳当量越高则可焊性越差。如低碳钢 Q215、Q235 等可焊性都良好，中碳钢 Q275 可焊性就差，这类钢材在焊接中就需要采取一些相应的工艺措施，预热、焊后缓冷等，否则可能产生裂纹。

2. 碳当量 C_{eq}

钢中除了碳以外还有其他各种合金元素，根据他们对可焊性的影响大小折合成相当的碳元素的总量，称之为碳当量。国际焊接协会（IW）推荐碳钢和低合金钢碳当量公式：

$$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15 \quad (\%)$$

注：元素符号代表其在钢中含量的百分数

碳当量可以作为评定钢材可焊性的指标：

$C_{eq} < 0.25\%$ ，可焊性良好、焊接时不必预热

C_{eq} 在 0.25~0.4% 之间，钢材淬硬倾向不明显，可焊性良好、焊接时一般不需预热

C_{eq} 在 0.4~0.6% 之间，钢材淬硬倾向逐渐明显，可焊性尚可，需要适当采取预热、控制线能量的工艺措施

$C_{eq} > 0.6\%$ ，淬硬倾向很强，可焊性差，应采取较高预热温度及严格的施工工艺

3. 可焊性试验

(1) 抗裂性试验，一般用比较的方法，把未知可焊性材料与已知可焊性材料作比较

(2) 接头性能试验包括：T 字型弯曲试验、异种钢连接使用、焊接接头性能试验和国际焊接协会最高硬度试验

(3) 工艺适应性试验，此试验主要是根据实际施工条件而设计的，如多次重复焊、碳弧气刨后材料性能的影响、定位焊试验等

(二) 碳素钢的焊接

碳素钢是以铁为基体，以碳为主要合金元素的铁碳合金（含碳量小于 2.0%），一般工业上所用碳素钢其含量很少超过 1.4%，按其含碳量多少可分为：低碳钢（ $\leq 0.3\%$ ）、中碳钢（0.3~0.6%）、高碳钢（ $> 0.6\%$ ）。

一般强度船体结构钢含碳量在 0.18~0.23% 之间,属于低碳钢。对于低碳钢焊件焊后一般不进行热处理,只在焊件结构刚性较大的情况下,如低碳钢管壁厚大于 35mm 时,焊后进行热处理,一般选用 600℃~650℃退火即可。

当焊件厚度大、结构刚性大、或施工环境温度较低时,尤其对 D、E 级钢焊接时应预热:

板厚 (mm)	环境温度 (°C)	预热温度 (°C)
<16	<-10	100~150
16~24	<-5	
24~40	<0	
>40	任意温度	

中碳钢的焊接 (0.3~0.6%),常见有 35、45、55 号钢。一般中碳钢作为铸锻件和热压件用于制造各种齿轮和曲轴,造船中常用于推力轴、中间轴、艉轴等。

(三) 合金钢的焊接

普通低合金钢是在碳钢基础上加入少量的合金元素而改善了某些性能的钢材,是生产上大量使用的一种结构用钢。一般钢中的合金元素总量不超过 5%,简称普低钢。大致可分为四类:高强度钢、耐热钢、耐蚀钢、低温钢。

1. 在这里我们主要讲以下低合金高强度钢,低合金高强度钢按钢材的屈服强度大小分类。

目前我国应用广泛的普低钢其屈服强度大都在 300~600Mpa 之间,其中的 300~450Mpa 的钢种一般以热轧或正火状态供货;而较高强度级 (450Mpa 以上) 钢种还应通过适当的热处理 (调质处理),以获取更高的性能要求。

(1). 船用低合金高强度钢,它按屈服强度划分为 32 千克级 (320Mpa) 和 36 千克级 (360Mpa) 两个强度级别,每一级别又按其缺口韧性不同而分为 A、D、E 三个级别。也就是高强度船体结构钢种类有: A/D/E32 和 A/D/E36 六个级别,他们都是镇静钢。

(2). Z 向钢,通过真空除气、脱硫等冶金措施使 S、P 含量减少,尤其是 S 的含量控制在 0.001% 以下,使 Z 向断面收缩率大于 15%。例如, D36-Z35 钢就是一种 D 级船体高强度结构钢,其屈服强度为 360Mpa,又保证 Z 向断面收缩率大于 35%。

2. 低合金高强度钢焊接容易出现的问题

(1) 热影响区的淬硬倾向

一般来说钢中含碳量和所含合金元素量越高其淬硬倾向越大。当碳当量 $C_{eq} > 0.45\%$ 时,热影响区淬硬倾向增大、硬度明显增高,塑性和韧性降低。

另一个影响淬硬倾向的因素是冷却速度，热影响区的淬硬程度主要取决于 800~850℃温度区间的冷却速度。焊件冷却速度越快其淬硬倾向越大；如“弧伤”使高强度钢的热影响区淬硬、且应力集中而形成微裂纹。

(2) 焊接接头的冷裂纹

低合金高强度钢在焊接时常在焊缝金属和热影响区产生冷裂纹。它一般是在冷却过程中产生，有时甚至放置相当长时间后产生，故而又称延迟裂纹。其裂纹主要在强度等级高的厚板中产生。在钢种一定的条件下，产生冷裂纹的原因是：

- ① 焊接接头处产生淬硬组织
- ② 焊接接头内含氢量较多
- ③ 残余应力较大

上述三个因素同时存在时才会产生冷裂纹，生产中①&②项可以改进。

(3) 焊接接头的热裂纹

热裂纹特征是沿晶界开裂，裂纹表面有明显的氧化色彩，多数分布在焊缝中心，沿焊缝纵向成不规则锯齿形。也可能在近缝区出现横向裂纹。

正常情况下，产生热裂纹的可能性比冷裂纹小的多，只有在原材料化学成分不符合规格，产生严重偏析使局部硫和磷的含量偏高，焊接时产生残余应力又较大时才有可能产生热裂纹。

(4) 再热裂纹

它在低合金高强度钢焊后热处理过程中出现，原因是在加热消除应力的过程中所发生的变形超出了热影响区金属在该温度小塑性变形的能力而引起的。

(5) 热影响区的层状撕裂

对大厚度轧制钢板焊接时，在热影响区附近可能产生与板面平行的裂缝，称其为层状撕裂。多数产生在三通管接头或 T 字接头的角焊缝处，与母材的层状杂种偏析有密切关系。

3. 低合金高强度钢的焊接预热

碳当量 C_{eq} 在 0.41~0.45% 之间时，可按一般强度船体结构钢的预热要求进行；

碳当量 $C_{eq} > 0.45\%$ 时应根据 ZC 船规进行预热，温度在 100~150℃，并考虑进行焊后热处理。操作时线能量应控制在 35 千焦/厘米以内。尤其在焊接 E 级钢时，切忌胡乱引弧，造成弧伤的地方必须用砂轮磨去，防止弧伤处出现微裂纹而造成事故，局部的缺陷修补焊缝长度必须大于 50mm。

(四) 焊接中的热裂纹与冷裂纹

热裂纹：焊接过程中焊缝和热影响区金属冷却到固相线附近的高温区所产生的裂纹。一般分为结晶裂纹、高温液化裂纹、多边化裂纹，其中结晶裂纹最主要。

结晶裂纹：指焊缝在结晶过程中，固相线附近由于凝固金属收缩时残余液相不足，致使沿晶界开裂的现象。结晶裂纹主要出现在含杂质较多的碳钢焊缝中，特别是 S、P、Si、C 较多的焊缝。

1. 热裂纹的特点

- (1) 产生的温度和时间：一般在金属凝固过程中，也有在凝固结束以后。从时间上说应是处于焊接过程中。
- (2) 产生部位：绝大多数出现在焊缝金属中，有时也可能在热影响区产生。
- (3) 外观特征：沿焊缝长度方向分布，大多数向表面开口，开口宽度约 0.05~0.5mm，裂纹末端呈圆形，有明显的氧化色彩。
- (4) 金相特征：热裂纹都发生在晶界上，具有晶间断裂特征，所以也称晶裂纹。

2. 热裂纹产生原因

根本原因：低熔点共晶所形成的液态薄膜

必要条件：焊缝金属在冷却凝固以及随后的继续冷却过程中产生的拉应力

3. 影响热裂纹产生的因素

- (1) S，钢中有害元素与铁形成 FeS。在焊缝中与铁形成低熔点共晶；
- (2) C：钢中含碳量增加焊缝的淬硬性就增加，使焊缝中由于组织变化而产生的拉应力增大；更主要的碳 C 与 Cr、Ni 元素形成低熔点共晶，而且降低 S 在铁中的溶解度，使 S 与 Fe 化合呈 FeS 的可能性增加。
- (3) Si：与 C 相似，但要弱一些。
- (4) 工艺因素：
 - ① 焊接速度（快）
 - ② 根部间隙（大）
 - ③ 焊接顺序、方向不当，增加焊件刚性，焊接应力加大
 - ④ 母材强度，屈服强度大容易产生较大拉应力

其他工艺因素：象接头形式、板材厚度、热输出量、焊缝尺寸、冷却速度等都有可能。

冷裂纹：焊接接头冷却到较低温度下（对于钢来说在 MS 温度以下）时产生的焊接裂纹叫冷裂纹。一般分成延迟裂纹、淬硬脆化裂纹、低塑性脆化裂纹等，其中延迟裂纹最为普遍。

延迟裂纹：指焊接接头冷却到室温后并在一定时间（几小时、几天、甚至十几天）才出现的焊接裂纹。它主要出现在中碳钢、高碳钢及合金结构钢的焊接接头中。

1. 冷裂纹的特点

- (1) 产生的温度和时间：温度通常在 200~300℃ 以下，时间在焊接以后
- (2) 产生部位：多产生在母材或母材与焊缝交界的熔合线上，常出现在焊道下、焊趾或根部
- (3) 外观特征：冷裂纹走向大体与熔合线平行，即所谓的纵向裂纹，少数情况下会出现走向垂直于熔合线或焊缝轴线的横向裂纹。从宏观看冷裂纹断口没有明显的氧化色彩，具有发亮的金属光泽
- (4) 金相特征：可以是晶间断裂也可以是晶内（穿晶）断裂，而且常常可以见到晶间与晶内的混合断裂

2. 冷裂纹产生的原因

- (1) 焊接应力：外应力——随焊接过程的进行，结构刚性不断增大，对接焊缝也产生越来越大的拘束力（焊接应力）；

内应力——来自于接头内部，即由于温度分布不均而造成的温度应力和由于变相（特别是马氏体转变）时形成的组织应力；

- (2) 淬硬组织：在易淬火钢焊接接头的热影响区中，凡是加热温度超过了相变温度而出现奥氏体晶粒的区域，在焊后冷却较快的条件下都可能出现马氏体组织。马氏体的硬度高、塑性差，其晶粒越是粗大则焊接接头的脆性就越严重。易淬火钢焊接接头的熔合线和过热区的淬火组织都是粗大马氏体，因此这个部位在整个接头中是脆化最严重、抗裂性最差的区域。当受焊接应力作用时，熔合线或过热区就最容易出现裂纹。焊道下裂纹、焊根裂纹、焊趾裂纹都产生在这个区域。

- (3) 焊缝含氢量

焊接母材原有的氢和焊接时焊缝金属吸收的氢是产生裂纹的另一个重要原因。焊接时随着温度降低，氢的溶解度也降低，因此便有相当多的氢析出而聚集在热影响区熔合线附近，形成一个富氢带。当此处存在显微缺陷如，晶格空位、空穴时，氢原子就在这些部位结合成分子状态的氢，在局部地区造成很大压力，加之已产生的焊接应力，就促使接头产生冷裂纹。

3. 防止冷裂纹产生的措施

- (1) 选用低氢型焊条，减少焊缝中氢含量
- (2) 焊材合理保管、烘干、谨防受潮

(3) 清理坡口边缘的污油、水分、锈迹、减少氢来源

(4) 选择合理的焊接工艺参数和采用合适的焊接工艺措施，如：预热、缓冷、后热，控制层间温度、焊后热处理、合理的装焊顺序、焊接方向等。

预热：焊前对焊件的全部或局部进行 $80^{\circ}\text{C}\sim 150^{\circ}\text{C}$ 的加温或保温，使其缓冷的工艺措施

后热处理：刚性较大的高强度钢焊后如不能及时进行焊后热处理，应立即将焊件加热到 $250^{\circ}\text{C}\sim 350^{\circ}\text{C}$ 保温 6 小时，而后空冷，此方法也叫消氢处理，即消除焊接时溶入接头中的氢，同时也有减慢冷却速度的作用。

层间温度：指多层焊时在施焊后续焊道之前，其相邻焊道应保持的最低温度

焊后热处理：指焊后为改善焊接接头的组织和机械性能，或为消除残余应力而进行的工艺措施。结构钢的焊后热处理温度以不超过母材的回火温度为准，一般为 $550^{\circ}\text{C}\sim 620^{\circ}\text{C}$ ，保温时间视焊件厚度而定，保温时焊件内外表面温度差不超过 30°C 。

（五）高强度钢使用的不利影响

大型船舶的结构经过优化后，应力水平大大提高，船上应力较高的部位，就必须采用高强度钢。同时为了减轻船舶的自重，降低建造成本，提高经济性，船厂也愿意大量采用高强度钢。所以大量采用高强度钢是大型船舶的又一大特点。但是，高强度钢的大量使用对船舶结构带来了一些不利的影响。当结构局部的应力水平超过屈服强度时，这个部位的材料就会屈服，使得应力会在结构系统中重新分布。高强度钢有一个特点，就是从屈服点到强度极限之间的应变区间比例偏低。也就是说，高强度钢组成的结构系统，这种应力重新分布的能力比较低。由于高强度钢的大量使用，钢材经常工作在接近屈服点的区域，根据钢材的特性，在这些高应力部位，钢材的应变量大。目前船用的大部分涂料的弹性都跟不上，这就导致涂层得开裂。另一方面，应力水平的提高，使得应力腐蚀更加严重。这给防腐工作带来了更高的难度。这也是大型船舶的一个特点。

同时，高强度区域的大量存在，船舶结构的损坏方式也有所不同。疲劳损坏的情况经常出现。这种损坏的可怕在于它更难以发觉和检查，从而威胁到船舶的安全。

高强度钢的使用也使得结构尺寸减小，从而使得结构发生屈曲的可能性大大增加。根据上述特点，我们应该针对大型船舶的特性进行管理和保养，才能够既降低营运的成本，又能够保证安全。

五 常用焊接方法介绍

1. 焊接方法缩写

SAW：埋弧焊

SMAW: 手工电弧焊

EGW: 垂直气电焊

GMAW: 手工氩弧焊

FAB: 半自动 CO₂ 焊单面焊双面成型 (石棉衬垫)

FCB: flux copper backing welding (铜质衬垫)

MAG 指所有通过气体保护方法来完成的焊接。另外, 还有一种带极焊, “极”指板或材料, 此方法能够完成两种材料的复合。是不同于爆炸法的复合板制作的一种方法。

此外, 手工下行焊在立角缝的施工中也时常采用, 常用焊条, 57V、47V;

2. 焊接电源的极性

直流焊机有正、负两极, 使用中有正、反两种接法: 直流正接, 即焊机的正极与焊件连接, 负极接焊条; 直流反接则正好相反; 现场焊接中对于低氢型碱性焊条要求用直流反接, 而酸性焊条在用直流焊机时则要反接;

在使用交流电源焊接时, 极性是交替变化的, 没有极性的选择。

3. 常用的焊材

目前船厂大量采用的焊材分为焊丝和焊条两种。虽然焊条是一种最为古老的焊接材料, 但是由于它有着特别的性能和灵活的焊接方式, 所以在船厂里还在大量地使用。焊条分为酸性焊条和碱性焊条两大类, 他们有着不同的性能: 酸性焊条, 施工方便、脱渣容易、焊缝金属韧性低; 碱性焊条, 施工不方便、脱渣较难、焊缝金属韧性好。

我们知道材料的韧性对于结构安全十分重要, 所以规范中对于以下部位, 要求采用碱性焊条:

- (1) 船体大合拢时的环形对接缝和纵桁材对接缝;
- (2) 具有冰区加强级的船舶, 船体外板端接缝和边接缝;
- (3) 桅杆、吊货杆、吊艇架、系缆桩等承受强大载荷的舢装件及其所有承受高应力的零部件;
- (4) 要求有较大刚度的构件, 如首框架、尾框架、尾轴架等, 及其与外板和船体骨架的接缝。
- (5) 主机基座及其相连接的构件。其实, 焊材选用的原则非常明确, 可以按照以下原则来选用焊材: 一般情况下, 选用的焊接材料的强度和韧性均应不低于母材。在高强度钢和高等级钢材的焊接时要特别注意。

母材被焊接连接时, 除在结构不连续处或应力集中区域内应选用较高强度等级的焊接材料外, 一般可选用与较低强度级别的母材相适应的焊接材料。

母材的连接强度相同, 韧性级别不同时, 结构受力情况复杂或施工条件恶劣者外, 一般可选用

与较低韧性级别相适应的焊接材料。

上面是一般的选用原则，但还有一些特别的情况，尤其对于一些高应力区和重要的部位，验船师可能会要求采用较高等级的焊材。以保证焊接部位的性能。下面是一些常用焊条的性能：

牌号	新牌号 (GB 标准)	美国牌号	日本牌 号	焊缝金属强度 (kgf/mm ²) (抗拉/屈服)	药皮类型	电流 形式	适用范围
J421	E4313	E6012 E6013	D4313	42/30	氧化钛型 (酸性)	交直流	一般低碳钢结构。
J422	E4303		D4303	42/30	钛钙型 (酸性)	交直流	一般低碳钢结构，船舶 结构中最常用。
J423	E4301		D4301	42/30	钛铁矿型 (酸性)	交直流	一般低碳钢结构。
J424	E4320	E6020	D4327	42/30	氧化铁型 (酸性)	交直流	同上
J427	E4315	E7015C1		42/30	低氢型	直流	重要低碳钢结构，及某 些普通低碳钢结构。是 船舶结构最常用的低 氢焊条。
J506	E5016	E7016	D5016	50/35	低氢型	交直流	重要低、中碳钢结构。 以前较为常用。
J507	E5015	E7015		50/35	低氢型	直流	重要低、中碳钢结构。 在船舶结构中较为常 用。
J607	E6015-D1	E9015-D1	D5816	60/45	低氢型	直流	相应强度的低合金高 强度钢结构。
J707	E7015-D2	E10015-G		70/50	低氢型	直流	相应强度的低合金高 强度钢结构。

目前船厂最常用的手工焊条有 J422、J427、J502、J506、J507 几种。

其中 J422 的用量最大，它是属于 1 级焊材。普遍用于船体的一般结构的焊接。其次是 J427，这是一种碱性（低氢）焊条，属于 3 级焊材。一般用于韧性要求较高的一般强度钢材的焊接。

J502 是一种比较常见的高强度焊条，属于 1Y 级。但这种焊条的韧性不好，限制了它的使用。

J506 和 J507 都是高强度碱性焊条，属于 3Y 级焊材。主要用于高强度钢的焊接。

由于手工电弧焊具有焊接效率低、线热量大、自动化程度低等一些缺点。所以近年来船厂大量采用埋弧自动焊和 CO₂ 气体保护焊等高效焊接方式。这些高效焊接方式大多数采用焊丝。埋弧自动焊的原理与手工焊类似，只不过焊条的药皮换成了颗粒状的焊药而已。埋弧自动焊采用的焊丝较粗。熔敷金属的强度主要是由焊丝来保证的，而熔敷金属的韧性主要是由焊药来保证的。所以焊药对于熔敷金属的韧性起到关键的作用。

CO₂ 气体保护焊具有较大的灵活性，可以用于各种部位的焊接，同时又具有较高的焊接效率。

所以应用日益广泛。

CO₂ 气体保护焊由于采用直流反接的电流形式，使得氢离子容易获得电子而变成氢气挥发掉，所以 CO₂ 气体保护焊的焊缝金属的韧性一般比普通酸性焊条要好一些。普遍认为 CO₂ 气体保护焊是一种准低氢的焊接方式，所以可以用于大部分要求用碱性焊条焊接的部位。CO₂ 气体保护焊所用的焊丝分为实心焊丝和药心焊丝两种。实心焊丝由于电弧的稳定性不如药心焊丝，所以尽管药心焊丝的价钱较高，还是得到了广泛的应用。但药心焊丝的焊药被包裹在焊丝的内部，无法进行烘干。由于碱性焊药对水分非常敏感，所以目前还没有包裹碱性焊药的焊丝。