

# 造船特殊材料焊接技术研究

费国华<sup>1</sup> 刘江<sup>2</sup>

1. 中船澄西船舶修造有限公司 江苏 无锡 214000
2. 中国船级社实业有限公司重庆分公司 重庆 400000

**摘要:** 焊接技术是现代工业的基础技术之一,造船焊接技术是现代船舶制造的关键工艺技术,在船体建造中,焊接质量是评价造船质量的重要指标,焊接技术进步对推动造船发展具有十分重要的意义。

**关键词:** 焊接; 铸钢件; 奥氏体不锈钢; 焊接变形

引言: 船舶制造过程中,一些特殊材料,如铸钢件、奥氏体不锈钢、较薄板等的焊接往往是造船过程中需要解决的几大难题。本文结合材料与焊接规范等资料,通过总结造船实践经验,对过程中的一些特殊材料的焊接要求,常见问题及方案进行简要阐述。

## 1 船用铸钢件缺陷修正及焊接要求

船用铸钢件通常分为船体结构铸钢件(首柱、尾柱、舵承、尾轴支架、挂舵臂、尾轴管毂、舵叶用铸钢件)、机械结构铸钢件(柴油机机座、活塞顶和气缸盖铸钢件),以及锅炉、受压容器和管系的铸钢件等。船体结构铸钢件通常为碳钢或碳锰钢的铸钢件,含碳量不超过0.23%或碳当量 $C_{eq}$ 不超过0.41%。

表1 船体结构用铸钢件的化学成分(%)

C	Mn	Si	P	S	残余元素			
					Cu	Cr	Ni	Mo
≤ 0.23	≤ 1.60	≤ 0.60	≤ 0.04	≤ 0.04	≤ 0.30	≤ 0.30	≤ 0.40	≤ 0.15

### 1.1 铸钢件出厂前检验

船用铸钢件出厂前要经过外观检验、热处理、理化试验及无损探伤试验,试验全部合格后,提供铸钢件的化学成分报告、热处理报告、力学性能报告和无损探伤报告。检验认可的铸钢件上应打上炉号、验船师及检验日期等钢印标记,由船级社颁发船用产品检验证书。CCS规范对铸钢件无损检测的规定:凡用作尾柱、舵和螺旋桨轴架的铸钢件,均应进行超声波检测和磁粉检测,并符合公认的有关标准。

### 1.2 铸钢件缺陷的修补

#### 1.2.1 铸钢件缺陷根据修补程度划分<sup>[1]</sup>如下:

- (1) 大焊补: 修理深度大于壁厚的25%或25mm(取较小值);或铸件上焊接修补面积超过2%铸件表面积。
- (2) 小焊补: 总面积超过500mm<sup>2</sup>的焊接修补。
- (3) 修饰性焊补: 除上述(1)和(2)外的其他焊接修补。

(4) 不必焊补修理: 非机加工表面处去除缺陷的深度不超过15mm或壁厚的10%(取较小值),且长度不超过100mm的修理。

#### 1.2.2 铸钢件缺陷去除方法:

- (1) 打磨、机加工;
- (2) 钎凿、打磨;
- (3) 气割或碳弧气刨、打磨。

#### 1.2.3 铸钢件缺陷修补工艺:

(1) 缺陷去除后,应进行无损检测以证实缺陷已被完全消除。不必焊补的缺陷,浅槽或凹坑应打磨成光滑的圆弧表面,使其顺利过渡。如去除缺陷后需要进行焊补,则剔除缺陷时应使坡口形状能方便后续的焊接操作。

(2) 采用焊补方法进行修补时,焊接工艺规程应提交CCS认可。

(3) 焊补应采用经认可的低氢型焊接材料,其焊缝的熔敷金属应具有不低于铸钢件母材规定的力学性能。

(4) 焊补前均应进行适当的预热,碳钢和碳锰钢铸钢件也可根据其化学成分、缺陷的大小和位置进行预热。焊补完毕后,铸钢件应进行温度不低于550℃的消除应力的热处理,或根据铸件化学成分、修补尺寸、位置和特点进行适当的热处理。焊后热处理以后,焊补处及其邻近的母材应打磨光滑,并根据原来缺陷的数量、大小和部位的草图,并用原定的无损检测方法作复查,以确保修补处的质量满足要求。

### 1.3 铸钢件和船体结构的焊接

当船体结构件的材料为铸钢件时,其焊接应符合下列要求:

(1) 相应的生产设计图中应对节点有明确要求,装配时应按照图纸开出坡口,若超出公差范围,则需进行修正。坡口及焊缝周围30mm区域内应清洁,没有水、油、渣、铁锈、氧化物杂质。

(2) 焊接前、后应采取相应的预热和保温措施;对坡

口及两侧各 100mm 范围内进行预热, 预热应根据节点形状及构件大小等实际情况, 来确定选用电加热或是火焰加热, 预热温度为至少 150℃。

(3) 采用 CO<sub>2</sub> 气保护焊时, 特别要做好防风措施, 焊接时层间温度不得低于预热温度且最高不超过 250℃, 焊接要求连续进行。

(4) 采用手工焊、CO<sub>2</sub> 气体保护焊进行焊接的首柱、尾柱、舵杆和尾轴架等应在焊后进行回火处理。采用电渣焊方法焊接而成的首柱、尾柱和舵杆, 在焊后应进行正火-回火处理。若首柱、尾柱、舵杆和尾轴架等构件的尺度较大, 整体热处理条件不足时, 允许采用有效的局部热处理方法。

(5) 焊后采用陶瓷电加热对接头局部进行加热处理, 消除应力热处理的进行应是缓慢、均匀地将接头加热至 600℃±20℃, 300℃ 以上的高温区域加热和降温时, 必须按照一定的速率, 每小时不得大于 75℃。保温时间按板厚 (1 小时/英吋) 计算。在热处理设施中慢慢冷却至 300℃, 然后在空气中完全冷却至常温后, 对焊缝进行打磨光滑, 并进行相关的无损检测。

## 2 奥氏体不锈钢焊接特点和技术要求

### 2.1 奥氏体不锈钢的物理性能

奥氏体不锈钢与普通的碳钢相比, 物理性能有显著的不同, 具有下列特点:

(1) 大的线膨胀系数, 不锈钢的热膨胀性大于普通碳钢, S316L 尤其显著, 比碳钢大 40%, 并随着温度的升高, 线膨胀系数的数值也相应地提高。

(2) 低的热导率, 不锈钢的热导率要比普通碳钢低, 约为碳钢的 1/3。焊接时产生的热量就大量集中在焊接接头附近。

(3) 高的电阻率, 约为碳钢的 5 倍。

表2 金属材料物理特性对比

钢材类型	$\alpha$ ( $\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$ )	$\lambda$ (W/m $^\circ\text{C}$ )	$\Omega$ (n $\Omega\text{m}$ )	E (kN/mm <sup>2</sup> )
碳钢	13	47	150	205
铁素体	12.5	24	600	225
铁素体-奥氏体	13.5	17	850	200
奥氏体	19.5	15	700	200

$\alpha$ : 20-800℃时的热膨胀系数  $\lambda$ : 20℃时的热导率  $\Omega$ : 20℃时的电阻 E: 20℃时的弹性模量

由于奥氏体不锈钢具有上述的特殊的物理性能, 在焊接过程中会产生较大的焊接变形。特别是在异种金属 (碳钢、低合金钢) 焊接时, 由于这两种材料的热导率和线膨胀系数有较大差异, 会产生很大的焊接残余应

力, 也成为焊接接头产生裂纹的原因之一。

### 2.2 奥氏体不锈钢的腐蚀及预防措施

通常所说的不锈钢的耐腐蚀性要归功于表面的一层氧化薄膜, 即钝态膜。当氧化膜破损后, 暴露于海水中的相邻母金属就作为牺牲阳极。其电势接近于普通碳钢的电势, 就会发生点蚀, 通常频率很高。化学品船最常用的奥氏体不锈钢是经受不住暴露在海水中的, 在化学品船上发现的腐蚀类型通常是点蚀、裂隙腐蚀、应力腐蚀、电蚀、晶间腐蚀。整体的腐蚀通常比局部的后果轻微的多, 局部腐蚀会造成无法预料甚至很严重的破坏。在这里介绍两种最常见的腐蚀类型。

(1) 点蚀, 是钢材钝化膜的局部破损, 在一定的温度及 PH 酸性含氯化物存在条件下引起的腐蚀, 导致金属产生孔洞, 如图片 2.2.1 所示, 由于压载试验时使用海水, 随后没有用淡水充分冲洗, 导致货舱管系 316L 的焊缝及热影响区发生的点蚀及渗漏。



图1 316L的焊缝及热影响区点蚀

(2) 点蚀预防措施: 增加提高抗点蚀的合金元素 Cr, Mo 和 N; 除去表面的污染物质, 保证表面光滑。

(3) 晶间腐蚀是沿着晶界发生的一种严重侵蚀, 当碳含量大于 0.03%, 金属被加热到 550~850℃ 时, 焊缝热影响区成为敏感区域, 耐腐蚀性会减弱, 易产生此类腐蚀。

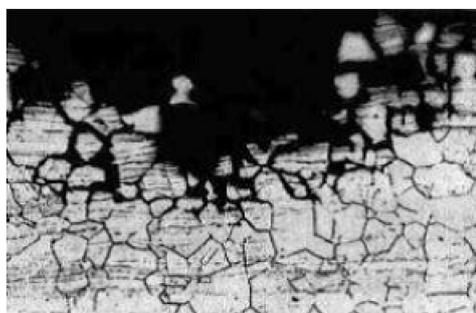


图2 焊缝热影响区晶间腐蚀

(4) 晶间腐蚀预防措施: 采用超低碳不锈钢 (C < 0.03%); 选用适当的焊接方法, 使它输入焊接熔池的热

量最小，缩短在敏化温度区停留时间，在保证焊缝质量的前提下，用小的焊接电流、最快的焊接速度；进行稳定化处理或固溶处理能防止这种腐蚀的发生。

### 2.3 奥氏体不锈钢材料焊接工艺

奥氏体不锈钢的焊接应严格按焊接工艺规程进行，并符合下列规定<sup>[2]</sup>：

(1)通常选用其熔敷金属的化学成分与母材基本相当的焊接材料，宜选用其熔敷金属的金相结构中奥氏体组织多于铁素体组织的焊接材料，或直接选用相适应的奥氏体不锈钢焊接材料。

(2)焊接接头设计和焊接工艺的编制，应尽量减少焊接应力的产生，面向腐蚀介质一侧的焊道通常在最后焊接。

(3)焊前板材表面应彻底清除油、漆、污物和杂质，邻近焊缝的不锈钢板或复合板复层材的表面应有适当的保护措施，以防焊接过程中飞溅或其他物体沾污或擦伤板材表面。

(4)坡口应采用机加工或磨削的方法制备。避免采用火焰切割，复合钢板的坡口的形状应予以特别考虑。加工后应检查坡口表面(包括钝边部分)，不应有裂纹和复层脱开现象。

(5)宜采用能量集中的焊接方法进行焊接(如熔化极惰性气体保护焊、非熔化极惰性气体保护焊、等离子弧焊等)。

(6)焊接层间温度应尽可能低，建议不超过100℃，且最高不超过150℃；焊接工艺参数，应遵循认可的焊接工艺，通常应以低热输入、短电弧的方法进行焊接。焊接时应使电弧稳定而快速地直线移动，避免两边摆动。

(7)为使焊接区域具有良好的耐腐蚀性能，必要时进行焊后处理(酸化或钝化)。焊缝质量应符合CCS接受的标准的要求，缺陷的焊补方法应取得CCS验船师同意。

表3 奥氏体不锈钢焊接接头颜色与保护效果的关系

焊接接头颜色	银白、金黄	蓝色	红灰	灰色	黑色
保护效果	最好	良好	较好	不良	最坏

### 3 薄板焊接变形原因与控制

船体结构(如上层建筑)薄板具有重量轻、工艺性

性能好(易加工成型)和连接方便等特点，但由于自身拘束小，焊接时变形较大，严重时由于失稳而产生波浪变形，且很难矫正，通常对于6mm以下的薄板、不锈钢等一些热膨胀系数较大的材料，变形尤其严重。

#### 3.1 薄板失稳变形的原因

薄板在焊接过程中，产生不均匀的温度场，且由于受到拘束作用，焊缝附近为拉应力而远处为压应力，如果压缩残余应力的数值达到结构的屈曲失稳临界载荷，薄板就会发生失稳(屈曲)，产生波浪变形。

#### 3.2 控制薄板变形的�主要方法<sup>[3]</sup>

焊接失稳变形主要受薄板几何形状、面积、厚度、板件初始不平度和支承条件的影响，同时焊接方法、焊接工艺和焊接顺序也显著影响实际焊接变形的程度。薄板结构的焊接变形可以从设计和工艺两个方面来解决。

(1)设计方面，合理选择焊缝尺寸和形式，采用更小的坡口角度和间隙，严格控制焊角尺寸；减少不必要的焊缝；合理安排焊接顺序。

(2)工艺方面，选择正确的焊接方法和焊材，选热输入量低，熔敷效率更高的焊接方法；反变形和刚性固定法；选择焊接规范参数，减少焊接热输入，使用更小的电流，更快的速度。

#### 结束语

科技的进步极大地促进了造船业的发展，扩大了钢材品种和金属材料的应用，直接推动了船舶焊接技术的发展。在建造船舶时，需熟悉各种金属材料特性，熟悉各种焊接材料和焊接方法及其特点，选用合理的焊接方法，焊接工艺，才能真正发挥焊接技术的优越性，建造更多的优质船舶。

#### 参考文献

[1]材料与焊接规范2022  
 [2]吴润辉.船舶焊接工艺[M].哈尔滨工程大学出版社.1996.99-100  
 [3]邓洪军.焊接结构生产[M].机械工业出版社.2019.103-104