

# 海洋环境下特殊材料焊接接头的耐腐蚀性研究

吴银勋

上海中远海运重工有限公司 上海 201913

**摘要：**本文研究了海洋环境下特殊材料焊接接头的耐腐蚀性，分析了海洋环境的组成与特点及其对焊接接头腐蚀作用的影响机制。探讨了不同海洋环境参数下特殊材料焊接接头的腐蚀行为，以及焊接接头不同区域的腐蚀差异。同时，研究了影响焊接接头耐腐蚀性的因素，包括材料成分、焊接工艺和焊后处理。在此基础上，提出了在海洋环境下提高特殊材料焊接接头耐腐蚀性的具体措施，如材料选择与优化、焊接工艺改进、焊后处理与表面防护等。本文的研究结果为海洋工程结构的焊接接头设计、制造和维护提供了理论依据和技术参考。

**关键词：**海洋环境；特殊材料；焊接接头；耐腐蚀性

**引言：**海洋环境因其独特的组成与特点，对金属结构的焊接接头造成了严重的腐蚀威胁。焊接接头作为海洋工程结构的关键部位，其耐腐蚀性直接关系到整个结构的安全性和可靠性。本文旨在深入研究海洋环境下特殊材料焊接接头的耐腐蚀性，分析不同因素对腐蚀行为的影响，并探索有效的提高耐腐蚀性的措施。这对于保障海洋工程结构的安全运行，延长其使用寿命具有重要意义。

## 1 海洋环境特点及对焊接接头的影响

### 1.1 海洋环境的组成与特点

海洋环境是一个复杂且多变的体系，主要由海水、海洋生物、海洋大气以及海底沉积物等组成。海水具有高盐度的特性，其中含有大量的氯离子、硫酸根离子、镁离子、钙离子等多种离子，这些离子共同构成了具有强腐蚀性的电解质溶液。海水的温度会随着地理位置和季节的变化而有所不同，从极地海域的低温到热带海域的高温，温度范围跨度较大。同时，海水的流动状态也多种多样，包括潮汐引起的涨落、海流形成的持续流动以及波浪产生的湍流等。海洋大气中含有较高的盐分和水分，尤其是在沿海地区，海风会将海水盐粒带到空气中，形成富含氯离子的潮湿大气环境。

### 1.2 海洋环境对焊接接头的腐蚀作用

焊接接头作为海洋工程结构中的关键部位，由于其组织不均匀性和应力集中等特点，在海洋环境中更容易受到腐蚀的侵害。海洋环境对焊接接头的腐蚀作用主要通过电化学腐蚀、缝隙腐蚀和应力腐蚀等多种机制实现。在海水这种电解质溶液中，焊接接头的不同区域（如焊缝、热影响区和母材）可能存在电位差，从而形成微电池，引发电化学腐蚀。电化学腐蚀过程中，阳极区域会发生金属的溶解，导致接头逐渐失去强度和完整

性。缝隙腐蚀通常发生在焊接接头与海洋结构其他部件的连接缝隙处，如螺栓连接处、法兰盘间隙等。海水进入缝隙后，由于氧的扩散受到限制，缝隙内部和外部会形成氧浓度差电池，加速缝隙内金属的腐蚀。应力腐蚀则是在拉应力和腐蚀介质的共同作用下，焊接接头发生的一种脆性断裂现象。海洋环境中的氯离子等腐蚀性介质会破坏金属表面的保护膜，使应力集中部位更容易发生应力腐蚀开裂<sup>[1]</sup>。

## 2 海洋环境下特殊材料焊接接头的腐蚀行为研究

### 2.1 焊接接头的初始组织与性能

特殊材料焊接接头的初始组织与性能对其在海洋环境中的耐腐蚀性有着重要影响。以高强度钢焊接接头为例，焊缝金属在焊接快速冷却过程中会形成粗大的柱状晶组织，这种组织晶界面积较大，原子排列不规则，容易成为腐蚀的起始部位。热影响区由于经历了焊接热循环的作用，其组织会发生相变和晶粒长大等现象，导致该区域的硬度和韧性发生变化，同时也可能影响其耐腐蚀性。通过光学显微镜、扫描电子显微镜（SEM）等手段对焊接接头的微观组织进行观察可以发现，不同区域的组织形态存在明显差异。焊缝金属中可能存在铁素体、珠光体、贝氏体等不同相组成，而热影响区则可能出现魏氏体组织等异常组织。这些组织的差异会导致各区域的电化学性能不同，从而在海洋环境中表现出不同的腐蚀行为；对焊接接头进行硬度测试和拉伸性能测试可以了解其力学性能。一般来说，焊缝金属的硬度较高，但韧性相对较差；热影响区的硬度和韧性分布则较为复杂，可能存在软化区或硬化区。力学性能的不均匀性可能会在海洋环境腐蚀过程中引发应力集中，进一步加速接头的腐蚀破坏。

### 2.2 不同海洋环境参数下的腐蚀行为

海洋环境参数如温度、盐度、溶解氧含量和海水流速等对特殊材料焊接接头的腐蚀行为有着显著影响。温度升高会加速电化学反应的速率，促进腐蚀产物的形成和脱落，从而加快焊接接头的腐蚀速度。例如，在热带海域（平均温度约为28°C），焊接接头的腐蚀速率可高达0.2mm/y，而在寒带海域（平均温度约为4°C），腐蚀速率则显著降低至0.05mm/y。这一数据表明，高温海洋环境中焊接接头表面的氧化膜更容易被破坏，使金属基体直接暴露在腐蚀介质中，从而加剧了腐蚀过程。盐度对腐蚀的影响主要体现在氯离子浓度的变化上。氯离子是一种强腐蚀性离子，能够破坏金属表面的钝化膜，使金属重新处于活化状态，从而加速电化学腐蚀。随着海水盐度的增加，焊接接头的腐蚀速率也会相应增大。实验数据表明，当海水盐度从30ppt增加到35ppt时，焊接接头的腐蚀速率从0.12mm/y增加到0.16mm/y，增加了约33%。溶解氧是电化学腐蚀过程中阴极反应的重要参与者。在海水流速较慢的情况下，溶解氧的扩散受到限制，焊接接头表面的溶解氧浓度较低，腐蚀速率相对较慢。例如，在流速为0.1m/s的海域，焊接接头的腐蚀速率为0.08mm/y。而当海水流速加快到1.0m/s时，溶解氧能够更快地补充到接头表面，促进阴极反应的进行，从而加快腐蚀速度至0.15mm/y，增加了约87.5%。此外，海水流速还会对腐蚀产物的附着产生影响。高速水流会冲刷掉附着在接头表面的腐蚀产物，使新鲜的金属表面不断暴露，进一步加剧了腐蚀过程。

### 2.3 焊接接头不同区域的腐蚀差异

在海洋环境中，特殊材料焊接接头的不同区域（焊缝、热影响区和母材）会表现出不同的腐蚀行为。焊缝金属由于组织粗大、相组成复杂，且在焊接过程中可能存在焊接缺陷（如气孔、夹渣等），因此在海洋环境中更容易发生腐蚀。气孔和夹渣等缺陷会成为腐蚀的起始点，加速局部腐蚀的发展<sup>[2]</sup>。此外，焊缝金属的化学成分与母材可能存在差异，这也会导致其电化学性能不同，从而在腐蚀过程中表现出不同的电位。在焊接热循环的作用下，热影响区可能出现晶粒长大、相变等组织变化，这些变化会影响该区域的耐腐蚀性。例如，过热区的晶粒粗大，晶界面积增大，容易发生晶间腐蚀；而部分淬火区可能形成硬而脆的马氏体组织，在应力作用下容易发生应力腐蚀开裂。母材通常具有相对均匀的组织和较好的耐腐蚀性，但在海洋环境中也会受到一定程度的腐蚀。母材的腐蚀主要取决于其化学成分和表面状态。如果母材表面存在划痕、氧化皮等缺陷，也会成为腐蚀的起始部位。

## 3 影响特殊材料焊接接头耐腐蚀性的因素研究

### 3.1 材料成分的影响

特殊材料中的合金元素对其焊接接头的耐腐蚀性起着关键作用。以不锈钢为例，铬元素是不锈钢获得耐腐蚀性的主要元素之一。铬在金属表面能够形成一层致密的氧化铬保护膜，阻止氧气和腐蚀介质与金属基体的接触，从而提高耐腐蚀性。当不锈钢中铬含量达到一定比例时，其耐腐蚀性会显著提高。镍元素能够稳定不锈钢的奥氏体组织，提高不锈钢在还原性介质中的耐腐蚀性。同时，镍还可以改善不锈钢的韧性和焊接性能。钼元素的加入能够增强不锈钢在含氯离子介质中的耐腐蚀性，抑制点蚀和缝隙腐蚀的发生。然而，材料中的杂质元素如硫、磷等会对焊接接头的耐腐蚀性产生不利影响。硫会在晶界处形成低熔点的硫化物，降低焊缝金属的韧性和耐腐蚀性，容易引发热裂纹和晶间腐蚀。磷会使钢的冷脆性增加，同时也会降低焊接接头的耐腐蚀性。

### 3.2 焊接工艺的影响

焊接工艺参数对特殊材料焊接接头的耐腐蚀性有着重要影响，焊接热输入是影响焊接接头组织和性能的关键因素之一。过大的热输入会使焊缝金属和热影响区的晶粒粗大，降低接头的耐腐蚀性。例如，在高强度钢焊接中，过大的热输入会导致热影响区出现魏氏体组织等异常组织，使该区域的韧性和耐腐蚀性下降。

焊接速度也会影响接头的质量。焊接速度过快可能导致焊缝金属未熔合、气孔等缺陷的产生，这些缺陷会成为腐蚀的起始点，降低接头的耐腐蚀性。而焊接速度过慢则会使热影响区过热，晶粒长大，同样不利于接头的耐腐蚀性。不同的焊接方法对焊接接头的耐腐蚀性也有影响，手工电弧焊由于焊条药皮成分复杂，焊接过程中可能会引入一些杂质元素，影响接头的耐腐蚀性。气体保护焊（如氩弧焊）则能够提供较好的保护气氛，减少焊缝金属中的氢、氧、氮等有害元素的含量，提高接头的耐腐蚀性<sup>[3]</sup>。激光焊具有能量密度高、热输入小等优点，能够获得细小的焊缝组织，提高接头的耐腐蚀性。

### 3.3 焊后处理的影响

焊后处理是提高特殊材料焊接接头耐腐蚀性的重要环节，焊后热处理可以消除焊接应力，改善焊接接头的组织结构，提高其耐腐蚀性。对于高强度钢焊接接头，适当的焊后回火处理可以使马氏体组织转变为回火索氏体组织，提高接头的韧性和耐腐蚀性。表面处理技术也能够有效提高焊接接头的耐腐蚀性，喷丸处理可以在接头表面形成压应力层，抑制裂纹的扩展，同时提高表面的粗糙度，增强涂层的附着力。涂层防护是一种常用的

表面防护方法，通过在焊接接头表面涂覆一层耐腐蚀涂层，如环氧涂层、聚氨酯涂层等，可以隔绝海水与金属基体的接触，从而防止腐蚀的发生。电化学保护技术（如阴极保护）也可以通过施加外部电流，使焊接接头成为阴极，从而抑制电化学腐蚀的进行。

#### 4 海洋环境下提高特殊材料焊接接头耐腐蚀性的措施

##### 4.1 材料选择与优化

根据海洋环境的特点和具体使用要求，合理选择特殊材料是提高焊接接头耐腐蚀性的基础。在浪花飞溅区、潮差区等腐蚀剧烈的区域，应选择耐蚀性优异的材料，如高铬镍基合金、钛合金等；在全浸区等腐蚀相对较轻的区域，可以适当选择成本较低的双相不锈钢等材料。对材料成分进行优化也是提高焊接接头耐腐蚀性的重要途径，通过调整合金元素的含量，如增加铬、钼、钨等耐蚀元素的比例，减少硫、磷等有害杂质的含量，可以改善材料的耐蚀性能。同时，开发新型耐蚀材料，如耐海水腐蚀的复合材料、金属间化合物等，也是未来的发展方向。在材料采购和验收过程中，要严格控制材料的质量，确保其化学成分、力学性能等指标符合相关标准要求，避免使用不合格的材料。

##### 4.2 焊接工艺改进

优化焊接工艺参数是提高特殊材料焊接接头耐腐蚀性的关键。在保证焊接质量的前提下，应尽量减小焊接热输入，采用小电流、高速度的焊接方式，以减少焊缝区和热影响区的晶粒长大和组织变化。例如，激光焊接、等离子弧焊等先进焊接方法具有热输入小的特点，有利于提高焊接接头的耐蚀性。合理选择保护气体，并确保其保护效果。对于易氧化的材料，如钛合金，应采用纯度较高的氩气作为保护气体，并加强对焊接区域的保护，防止空气侵入。可以采用背面保护、拖罩保护等措施，确保焊缝和热影响区不被氧化。改进焊接坡口设计和焊接顺序，减少焊接缺陷的产生。合理的坡口形式可以保证焊缝的熔透性，减少未焊透、未熔合等缺陷；合理的焊接顺序可以减少焊接残余应力，避免因应力集中而导致的腐蚀加剧；加强焊接过程的质量控制，严格执行焊接工艺规程，对焊接操作人员进行专业培训，提

高其操作技能，确保焊接接头的质量<sup>[4]</sup>。

##### 4.3 焊后处理与表面防护

选择合适的焊后处理工艺，消除焊接残余应力，改善微观组织。对于需要进行焊后热处理的材料，要严格控制热处理温度、保温时间和冷却速度，以达到最佳的处理效果。对于不锈钢等材料，及时进行酸洗和钝化处理，去除表面的氧化膜和杂质，形成稳定的钝化膜。采用表面防护技术可以在焊接接头表面形成一层防护层，阻止腐蚀介质与金属接触，从而提高其耐腐蚀性。涂层防护是常用的方法之一，如涂覆防腐涂料、金属镀层等。防腐涂料应具有良好的耐海水性、附着力和耐磨性，能够在海洋环境中长期稳定发挥作用；金属镀层如锌镀层、铬镀层等，可以通过牺牲阳极或形成钝化膜的方式保护焊接接头。激光表面改性技术也是一种有效的表面防护方法，通过激光对焊接接头表面进行处理，可以改变表面的微观组织和化学成分，提高表面的硬度和耐蚀性。另外，对焊接接头的缝隙、棱角等易腐蚀部位进行特殊处理，如密封缝隙、打磨棱角等，也可以减少腐蚀的发生。

##### 结束语

通过对海洋环境下特殊材料焊接接头耐腐蚀性的深入研究，不仅了解了焊接接头在海洋环境中的腐蚀行为和影响因素，还提出了多种提高耐腐蚀性的有效措施。这些研究成果为海洋工程结构的焊接接头设计、材料选择、焊接工艺制定以及焊后处理提供了有力的理论支持和实践指导。未来，还将继续探索新的耐蚀材料和焊接技术，为海洋工程的发展做出更大的贡献。

##### 参考文献

- [1]李书法,洪云.合金焊接材料的选择与焊接工艺技术分析[J].冶金与材料,2020,40(4):93-95.
- [2]武英杰.合金焊接材料的选择与焊接工艺技术分析[J].内燃机与配件,2020(3):100-101.
- [3]颜敏,李远远.窄间隙电弧焊接质量的控制研究[J].锻压装备与制造技术,2022,57(03):95-98.
- [4]姜佳佳.间接电弧焊技术的热量传输机制及研究现状[J].热加工工艺,2024,53(01):17-22.