

# Study on welding process of stainless steel

Youxin Ye<sup>1,2</sup>

1. Guangxi Boschke Environmental Protection Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530007, China
2. Guangxi Kejia Equipment Technology Co., Ltd., Nanning, Guangxi, 530007, China

## Abstract

the quality of stainless steel welding directly affects the product performance and service life of the equipment. This paper systematically expounds the technical points of the whole process of stainless steel welding, including common defects and their causes, construction environment, process control, advantages and disadvantages of different welding methods and selection. By analyzing the applicable scenarios and operation specifications of different welding methods, this paper summarizes the common problems and causes of welding cracks and deformation, and provides a complete set of quality control system for engineering practice. This paper mainly puts forward professional suggestions for the construction environment, process control and other links that are easy to be ignored, in order to help welding technicians comprehensively improve the quality and efficiency of stainless steel welding.

## Keywords

stainless steel welding; Welding cracks; Temperature and humidity; Welding method; pickling

# 不锈钢焊接工艺研究

叶又鑫<sup>1,2</sup>

1. 广西博世科环保科技股份有限公司, 中国·广西南宁 530007
2. 广西科佳装备科技有限公司, 中国·广西南宁 530007

## 摘要

不锈钢焊接质量直接影响设备的产品性能和使用寿命, 本文系统阐述了不锈钢焊接的全流程技术要点, 包括常见缺陷及其成因、施工环境、工艺控制、不同焊接方法优劣及选择等方面。通过分析不同焊接方法的适用场景与操作规范, 总结焊接裂纹与变形等常见问题及其成因, 为工程实践提供了一套完整的质量控制体系。本文主要并针对施工环境、工艺控制等易被忽视的环节提出了专业建议, 旨在帮助焊接技术人员全面提升不锈钢焊接质量与效率。

## 关键词

不锈钢焊接; 焊接裂纹; 温湿度; 焊接方法; 酸洗

## 1 引言

不锈钢凭借其优异的耐腐蚀性、良好的机械性能和表面特性, 广泛应用于环保、化工、食品医药等诸多领域。随着工业技术的不断发展, 不锈钢的应用范围持续扩大, 对其焊接质量的要求也日益提高。然而, 不锈钢焊接过程中存在诸多技术难点, 包括热裂纹敏感性高、焊接变形大、晶间腐蚀风险等, 这些都给焊接施工带来了严峻挑战。

不锈钢焊接的特殊性主要源于其物理化学特性。奥氏体不锈钢对硫、磷等微量杂质极为敏感, 焊接时易形成低熔点共晶, 增加了热裂纹的产生风险。与普通碳钢相比, 不锈钢具有较低的导热系数(约为碳钢的1/3)和较高的热膨胀系数(比碳钢大1.5倍), 这导致焊接时热量集中且变形倾

向显著增加。同时, 不锈钢中的铬元素在450-850℃温度区间内容易与碳结合形成碳化铬, 造成晶界贫铬区域, 严重降低材料的耐腐蚀性能。

## 2 不锈钢焊接常见问题及其成因

不锈钢焊接过程中由于材料特性和工艺因素的影响, 容易出现多种问题, 主要包括以下几类:

### 2.1 焊接裂纹

不锈钢焊接裂纹主要分为热裂纹、冷裂纹和应力腐蚀裂纹三大类, 每种裂纹的成因和特征不同, 具体如下:

热裂纹是不锈钢焊接中最常见的缺陷之一, 主要包括结晶裂纹和液化裂纹。结晶裂纹主要发生在焊缝中心, 液化裂纹出现在热影响区, 由于晶界局部熔化导致。由于不锈钢中的硫、磷等杂质在晶界形成低熔点共晶凝固时拉应力导致开裂, 焊接工艺不当(电流过大、焊接速度过快, 加剧熔池成分不均)等问题造成。奥氏体不锈钢对热裂纹尤为敏感, 特别是含硫、磷等杂质元素较高时更为严重, 生产过程中需

【作者简介】叶又鑫(1990-), 男, 中国广西钦州人, 本科, 工程师, 从事钛焊接, 不锈钢焊接, 碳钢焊接, 机械加工研究。

严格控制。

冷裂纹常见于热影响区，包括氢致裂纹和淬硬裂纹。主要由于焊材或环境中的氢在冷却时聚集，引发脆性开裂（如奥氏体不锈钢对氢敏感）；焊接后快速冷却，残余应力导致裂纹；结构刚性大或预热不足时，焊接应力无法释放。

应力腐蚀裂纹为延迟性裂纹，发生在特定腐蚀环境中。主要由于环境中的氯离子（Cl<sup>-</sup>）或高温碱液环境诱发，焊接后未消除应力，与腐蚀介质协同作用导致。

## 2.2 焊接变形

焊接热输入不均，局部高温加热导致材料膨胀，冷却后收缩不均，产生变形。不锈钢导热性差，热量易集中，加剧变形。焊接过程中，熔池凝固和热影响区相变会产生内应力，当应力超过材料屈服强度时，引发翘曲或扭曲。不锈钢热膨胀系数较高（如304不锈钢约为碳钢的1.5倍），相同热输入下变形量更大。刚性不足的薄板结构或复杂焊缝布局（如长焊缝、交叉焊缝）易因应力集中变形。电流过大、焊速过慢、坡口设计不合理等，会增加热输入和收缩应力。

## 2.3 气孔缺陷

不锈钢焊接由于氢、碳、氮元素控制异常导致产生氢气孔、CO气孔和氮气孔。保护气体不足或污染，惰性气体（如氩气）纯度不足、流量不当或喷嘴堵塞，导致熔池保护不良，空气中的氧气、氮气侵入焊缝，气体管路漏气或焊接环境有强风，破坏气体保护效果。焊件或焊材污染，母材或焊丝表面存在油污、水分、锈迹、油漆等杂质，高温下分解产生气体（如氢气、一氧化碳），焊剂受潮或保存不当，焊接时释放水蒸气。焊接工艺参数不当，电流过小、电压过高或焊接速度过快，导致熔池凝固过快，气体无法逸出，电弧过长或摆动幅度过大，增加空气侵入风险。

## 2.4 未熔合与未焊透

由于不锈钢熔池流动性差、导热慢，易出现层间未熔合，根部未焊透，坡口边缘未熔合等缺陷。

## 2.5 晶间腐蚀

晶间腐蚀是奥氏体不锈钢焊接后的典型问题，在450-850℃的敏化温度区间，碳化铬在晶界析出，导致晶界附近形成贫铬区，耐蚀性显著下降，在腐蚀环境中，贫铬区优先被腐蚀。

# 3 不锈钢焊接过程控制

为了提供不锈钢焊接品质，需要在焊接环境温湿度控制、风速、焊材烘烤、气体保护、坡口等方面进行严格控制。与普通碳钢焊接相比，不锈钢焊接对环境条件的要求更为严格，这主要源于不锈钢材料本身的特性及其焊接工艺的特殊性。

## 3.1 环境温度与湿度的控制要求

环境温度对不锈钢焊接的影响不容忽视。当环境温度低于0℃时，焊接接头冷却速度加快，容易导致热影响区硬

化，增加冷裂纹风险。对于铬不锈钢（如马氏体不锈钢），低温环境下焊接必须进行预热处理，预热温度通常控制在80-100℃。即使是焊接性能较好的奥氏体不锈钢，在低温环境下焊接时也应采取适当的保温措施，如使用预热枪对焊接区域进行局部加热，或搭建保温棚维持焊接环境温度在5℃以上。

环境湿度是另一个关键控制因素。不锈钢焊条药皮容易吸潮，当环境湿度过高时，焊条中的水分在焊接高温下分解为氢和氧，氢原子融入熔池会导致焊缝产生气孔，并增加氢致裂纹的风险；而氧则会与熔池中的合金元素反应，降低焊缝金属的耐腐蚀性能。因此，不锈钢焊接应在相对湿度不超过60%的环境中进行。当环境湿度超过这一限值时，必须对焊条进行严格烘干：钛钙型药皮焊条需在150℃烘干1小时，低氢型药皮焊条则需在200-250℃烘干1小时。烘干后的焊条应存放在100-150℃的保温筒内，随用随取，外露超过2小时应重新烘干，但重复烘干次数不宜超过3次，否则会导致药皮开裂剥落。

## 3.2 防风措施

不锈钢焊接对风极为敏感，风速>0.5m/s可能破坏保护气体层，导致焊缝氧化、产生气孔等缺陷。因此，在室外或有风环境进行不锈钢气体保护焊时，必须采取有效的防风措施，如搭建防风棚、使用防风屏等。对于TIG焊接，保护气体流量一般为815L/min（根据电流大小调整），喷嘴至工件的距离不应超过15mm，以确保良好的气体保护效果。

## 3.3 焊接区域洁净度管理

不锈钢焊接对焊接区域洁净度要求较高，焊接区域应保持清洁，避免灰尘、油污等污染物，这些污染物在高温下会分解产生有害气体，污染熔池，导致焊缝产生气孔、夹杂等缺陷。特别是在化工、食品、医药等行业的不锈钢设备焊接中，对焊缝洁净度要求更高。施工前应用丙酮或酒精彻底清理焊接坡口及两侧50mm范围内的油污、铁锈等杂质，必要时可涂刷白石灰粉浆以防止飞溅物粘附，焊后再予以清除。

## 3.4 焊接场所的通风与换气要求

焊接过程中会产生有害气体和金属烟尘，尤其是六价铬化合物，对人体健康危害极大。因此，在密闭空间内进行不锈钢焊接时，必须设置有效的通风系统，但需注意通风气流不应直接吹向焊接区域，以免影响保护气体效果。可采用顶部抽风或侧向吸风的方式，保证空气流通的同时，又不干扰焊接过程。

通过系统控制上述因素，可以为不锈钢焊接创造良好的施工条件，有效降低焊接缺陷发生率，提高焊缝质量和性能。除了以上要求，在实际工程中，还需根据具体材料类型和产品要求，选择合适的焊接方法，制定针对性焊接控制方案，并在焊接过程中严格执行，确保焊接各环节处于受控状态。

## 4 焊接方法选择

不锈钢焊接的焊接方法较多，常见的焊接方法有手工电弧焊、二氧化碳保护焊、钨极氩弧焊、埋弧焊、激光焊、等离子焊接等，根据焊接材料厚度、工艺要求、成本控制

等进行选择，不同焊接方法的优缺点和应用场景有：

焊接方法的种类很多，在实际操作中，焊接人员应根据具体材料类型、焊接方法和产品使用环境，灵活应用这些原则，并结合实际经验不断优化工艺参数和操作技巧，以达到最佳的焊接效果，提升焊接品质。

表一 不锈钢焊接方法优缺点

序号	焊接方法	优点	缺点	适用场景
1	手工电弧焊 (SMAW)	设备简单，成本低；操作灵活，适合户外作。	焊接质量依赖焊工技术，焊接速度慢，焊缝质量不稳定，易产生气孔、裂纹、氧化和变形。	适用于厚度 3mm 以上的不锈钢小批量生产，建筑、维修及野外作业。
2	二氧化碳保护焊 (GMAW)	效率高，熔深大，成本较低，适合自动化生产。	飞溅较大，焊缝外观较差；保护气体可能影响不锈钢耐腐蚀性	适用于中厚板焊接（如结构件、车辆、容器制造），但对表面质量要求不高的场合
3	钨极氩弧焊 (GTAW)	焊缝质量高、变形小、气孔少，无焊渣。	速度慢，效率低，对焊工技术要求高，设备成本较高	适用于薄板、精密焊接（如管道、食品设备、化工容器）及高要求外观的场合
4	埋弧焊 (SAW)	焊接效率高，适合厚板；焊缝质量稳定，成型好，无弧光辐射。	设备复杂，灵活性差，仅适合平焊或小角度焊接，焊剂需清理。	适用于大型厚壁结构（如压力容器、储罐、船舶）的批量生产。
5	激光焊 (LBW)	能量集中，变形小，焊接速度快，精度高，可自动化集成。	设备昂贵，对工件定位和参数调整要求严格。	适用于微型设备、精密仪器及高精度焊接需求。
6	等离子焊接 (PAW)	高温高能，适用于多种不锈钢材质，焊接质量高。	设备复杂，操作难度大，成本较高。	适用于高品质焊接，如化工设备、高压管道、压力容器

## 5 焊后酸洗处理

不锈钢焊接完成后需要进行酸洗，通过酸洗处理，不锈钢制品可获得理想的表面状态和最优的耐腐蚀性能，这一工艺在化工设备、食品机械、医疗器械等领域具有不可替代的重要作用，焊后酸洗的要求有：

### 5.1 酸洗注意事项

操作人员必须穿戴防酸服、面罩、橡胶手套及防酸靴，必须在焊接完成后 24 小时内进行酸洗处理，最佳窗口期为焊接后 48 小时，对于高温焊接 (> 350℃) 的接头，应在冷却至 80℃ 以下立即处理。重点处理焊缝区（包括熔合线两侧各 20mm 范围），可分多次酸洗；对热影响区采用梯度酸洗方式，随焊缝距离增大缩短酸洗时间，角焊缝需保证酸液充分接触内凹区域。焊缝飞溅物机械清理要使用不锈钢专用钢丝刷，去除焊接氧化色（彩虹色），直至露出金属本色，对咬边、气孔等缺陷应先修补再酸洗。

### 5.2 溶液特殊性要求

推荐使用专用焊道酸洗膏（含 58% $\text{HNO}_3$ +35% $\text{HF}$ +增稠剂），对奥氏体不锈钢采用低温（40-50℃）稀酸（58% $\text{HNO}_3$ +12% $\text{HF}$ ），双相钢需添加 0.5-1.5% 柠檬酸抑制选择性腐蚀。

焊后酸洗是不锈钢焊接质量控制的关键环节，通过焊后酸洗，修复因高温氧化损失的钝化膜，提升焊接接头品质，为渗透检测（PT）提供理想表面，提高微裂纹的检出率，改善不锈钢表面外观，可同时实现表面美观性和使用可靠性的双重提升。

## 6 结语

不锈钢焊接质量控制是一个系统工程，需要从材料选择、工艺设计、过程控制和焊后处理等多个环节进行综合管控。针对不同类型的不锈钢，应采取差异化的焊接策略。

### 参考文献

- [1] 中国机械工程学会焊接学会 编. 焊接手册（第3版修订本）. 北京：机械工业出版社，2015.
- [2] 陈勇;陆建华;徐育焱;王业方;张涛;张梦贤;不同焊接工艺下304 不锈钢薄壁管件纵缝微观组织及力学性能研究[J].热加工工艺, 2022,v.51;No.585(11).
- [3] 栗卓新,李冬梅,杨玉君.不锈钢的高效、低成本、自动化焊接技术—— $\text{CO}_2$ 气保护不锈钢药芯焊丝电弧焊[J].兵器材料科学与工程,2001(02).
- [4] 林百春;.不锈钢表面处理:酸洗、钝化与抛光[J].材料开发与应用,2006(03).