

二氧化碳气体保护焊接缺陷的成因分析与预防措施

黄洁

黄河鑫业有限公司

DOI:10.12238/etd.v6i10.17157

[摘要] 二氧化碳气体保护焊在焊接过程中易出现气孔、裂纹、飞溅及未熔合等缺陷,严重影响焊接质量。本文系统分析各类缺陷的形成机理,从材料、工艺、操作及环境等多维度探讨成因,并提出针对性预防措施。通过优化焊接参数、严格材料管控、规范操作流程及改善作业环境,可有效降低缺陷发生率,提升焊缝的致密性、强度及耐久性,为实际生产提供理论依据与实践指导。

[关键词] 二氧化碳气体保护焊接; 焊接缺陷; 缺陷成因; 预防措施

中图分类号: TG444+.74 **文献标识码:** A

Cause Analysis and Preventive Measures for CO₂ Gas Shielded Welding Defects

Jie Huang

Yellow River XinYe Co., Ltd

[Abstract] CO₂ gas shielded welding is prone to defects such as porosity, cracks, spatter, and lack of fusion during the welding process, which significantly compromise welding quality. This paper systematically analyzes the formation mechanisms of various defects, investigates their causes from multiple dimensions including materials, processes, operations, and environmental factors, and proposes targeted preventive measures. By optimizing welding parameters, implementing strict material control, standardizing operational procedures, and improving the working environment, the occurrence of defects can be effectively reduced, thereby enhancing the compactness, strength, and durability of welds. This study provides a theoretical basis and practical guidance for actual production.

[Key words] CO₂ Gas Shielded Welding; Welding Defects; Causes of Defects; Preventive Measures

引言

二氧化碳气体保护焊接因效率高、成本低等优势,广泛应用于机械制造、钢结构等领域,对工业生产意义重大。但焊接过程中易产生气孔、裂纹等缺陷,这些缺陷会削弱焊缝性能,降低构件承载能力与安全性,影响产品质量与使用寿命。深入研究二氧化碳气体保护焊接缺陷的类型、成因及预防措施,对解决实际焊接问题、推动焊接技术优化升级具有重要现实意义。

1 二氧化碳气体保护焊接核心缺陷类型与特征

1.1 气孔缺陷

气孔按气体来源分为氢气孔、氮气孔、一氧化碳气孔。氢气孔多呈现圆形或条形(直径0.1~2mm),部分因气体逸出不充分会形成细长条形(长度2~5mm),常以单点或密集状态分布,既可能直接暴露在焊缝表面,也可能隐藏在焊缝内部深处。氢气孔会使焊缝抗腐蚀性能下降,同时降低焊缝的抗拉强度(可达30~80MPa),在受力时易成为应力集中点引发断裂。氮气孔多为细小圆形(直径0.05~0.5mm),分布相对分散,常见于焊缝表面或近表面区域,会打断焊缝金属的连续性,导致焊缝整体承载能力

下降^[1]。一氧化碳气孔多为不规则圆形(直径0.2~1.5mm),部分伴随细小分支(长度1~3mm),常分布在焊缝内部靠近熔合线的位置,会加剧焊缝内部应力集中,使焊缝冲击韧性降低10~30J/cm²。

1.2 裂纹缺陷

裂纹按产生时机与机理分为热裂纹(结晶裂纹)、冷裂纹(延迟裂纹)、再热裂纹。热裂纹多在焊接过程中高温阶段(温度800~1200℃)产生,扩展路径以沿晶界为主,开裂形态多为直线型或断续直线型(长度5~20mm),部分呈现树枝状分支(分支长度2~8mm),会直接破坏焊缝金属的晶界结合力,导致焊缝断裂韧性显著降低(可达20~60MPa·m^{1/2})。冷裂纹多在焊接接头冷却至室温后产生,部分会延迟2~72小时出现,扩展路径常穿晶体进行,开裂形态多为尖锐直线型(宽度0.01~0.1mm),对焊缝抗疲劳性能破坏极大,威胁结构整体安全性。再热裂纹多在焊后热处理(温度500~700℃)或长期处于高温环境时产生,扩展路径以沿晶界为主,开裂形态多为断续裂纹(间距1~5mm),会削弱焊缝在高温工况下的稳定性,导致结构在高温载荷作用下出现突发性失效。不同类型裂纹特征对比如表1所示。

表 1

裂纹类型	产生温度	扩展路径	形态尺寸(长度/宽度)
热裂纹	800-1200℃	沿晶界	5-20mm/0.05-0.2mm
冷裂纹	室温以下	穿晶体	3-15mm/0.01-0.1mm
再热裂纹	500-700℃	沿晶界	2-10mm/0.03-0.15mm

1.3 飞溅缺陷

飞溅按颗粒形态与大小分为细雾状飞溅、颗粒状飞溅、块状飞溅。细雾状飞溅颗粒直径极小(0.01-0.1mm)，产生量较大(每米焊缝可达5-15g)，分布范围覆盖焊缝周边10-30mm区域，附着强度较低(附着力1-5N)但清理难度大，会破坏焊缝外观平整度，增加后续打磨清理工作量(每米焊缝需1-3分钟)。颗粒状飞溅颗粒直径适中(0.1-1mm)，产生量中等(每米焊缝3-8g)，分布范围相对集中在焊缝附近5-15mm区域，附着强度中等(附着力5-15N)，部分颗粒会嵌入焊缝表面影响外观质量，清理时需借助工具剥离，可能对焊缝表面造成划伤(深度0.05-0.2mm)。块状飞溅颗粒直径较大(1-5mm)，产生量较少(每米焊缝1-3g)但附着强度高(附着力15-30N)，常局部堆积在焊缝边缘，严重破坏焊缝外观，可能导致后续装配时出现0.1-0.5mm间隙偏差。

1.4 未熔合缺陷

未熔合按未结合部位分为母材与焊缝金属未熔合、焊缝层间未熔合、坡口侧壁未熔合。母材与焊缝金属未熔合的界面常存在明显分离间隙(0.05-0.3mm)，部分区域仅局部粘连，检测识别难度较高，会使焊缝与母材无法形成整体受力结构，大幅降低焊缝的整体承载能力(可达40%-70%)。焊缝层间未熔合的界面多呈现不规则分离状态，层间存在未熔化的金属夹层(厚度0.1-0.5mm)，检测识别难度高，破坏焊缝金属的连续性，导致焊缝抗冲击性能显著下降(冲击功降低20-50J)。坡口侧壁未熔合的界面常伴随氧化层(厚度0.01-0.05mm)，未结合区域多隐藏在坡口深处(深度2-8mm)，检测时需精准定位，削弱焊缝的侧向承载能力，在结构承受横向力时易引发坡口处断裂。

2 核心缺陷的产生机制与多维度成因分析

2.1 气孔缺陷的产生机制与成因

气孔形成机制为：焊接时水分分解的氢、空气侵入的氮、熔渣反应生成的一氧化碳在熔池内聚集形成气泡，若熔池凝固过快，气泡未逸出即被包裹，最终形成孔洞^[2]。其成因涉及多方面：材料上，二氧化碳纯度不足含水分、氧气杂质，焊丝表面油污或锈蚀引入氢，保护气体流量过大或过小破坏保护氛围；工艺上，电弧过长导致气体保护不足，焊接速度过快缩短熔池停留时间使气体难逸出，熔滴过渡不稳定(如短路过渡)易卷入空气；环境上，湿度过高致空气中水分融入熔池，室外风速过大吹散保护气体层，失去保护的熔池易受空气影响。

2.2 裂纹缺陷的产生机制与成因

不同类型裂纹机制不同：热裂纹是熔池凝固后期晶间形成

低熔点共晶体，在收缩应力下晶间结合力被破坏；冷裂纹是焊缝形成淬硬组织后，氢原子在缺陷处聚集，叠加焊接残余应力引发；再热裂纹是焊后热处理时晶界强度下降，在残余应力作用下逐渐扩展。成因包括：材料上，焊丝硫、磷含量过高易形成低熔点共晶，母材碳当量高则淬硬倾向大，保护气体氧化性成分过高加剧焊缝脆化；工艺上，焊接线能量过大增热裂纹风险，冷却速度过快升冷裂纹风险，焊后未及时消应力处理提再热裂纹风险；结构与操作上，接头拘束度大导致应力集中，坡口清理不彻底残留油污、水分增氢含量，多层焊层间温度控制不当也会诱发裂纹。

2.3 飞溅缺陷的产生机制与成因

飞溅由电弧力与电磁力共同作用导致：熔滴过渡不稳定，短路过渡时熔滴与熔池接触短路后爆断，颗粒过渡时熔滴受电弧力冲击击碎，脱离的金属颗粒飞溅形成缺陷。成因主要有：工艺上，电流与电压不匹配(电流过大/电压过小引发短路爆断飞溅，电流过小/电压过大引发颗粒飞溅)，送丝速度与焊接速度不同步致熔滴供给失衡；操作上，焊枪角度偏差造成电弧偏吹使熔滴受力不均，电弧过长致熔滴分散、过短引发短路爆断；设备上，焊枪喷嘴磨损致气体流场紊乱，送丝机构精度不足使送丝忽快忽慢，破坏熔滴过渡稳定性。

2.4 未熔合缺陷的产生机制与成因

未熔合是因焊接时母材或前层焊缝表面未达熔化温度，新熔敷金属无法与基材形成冶金结合，仅呈机械附着或局部接触。成因涵盖：工艺上，焊接电流过小致热输入不足，焊接速度过快缩短热作用时间，坡口角度过小或间隙过窄使热量集中焊缝中心、侧壁难受热；操作上，焊枪摆动幅度不足难覆盖坡口两侧，焊枪偏离焊缝中心致加热偏移，多层焊前层熔渣未清理阻碍金属融合；材料与环境上，母材表面氧化皮、锈蚀起隔热作用且阻碍熔合，环境温度过低加速热量散失，使基材难达熔化温度。

3 核心缺陷的针对性预防措施

3.1 气孔缺陷的预防措施

气孔预防需从材料管控、工艺优化、环境与操作控制协同发力。材料上，选用纯度≥99.5%的二氧化碳气体，使用前经80-100℃干燥装置除水，避免水分引入氢元素；焊丝需通过120目砂纸机械打磨或10%-15%浓度清洗剂化学清洗，去除表面油污锈蚀，必要时在80-120℃低温烘干；根据室内(8-15L/min)、室外(15-25L/min)及板厚差异确定保护气体流量，保障熔池稳定覆盖^[3]。工艺上，将电弧长度调整为焊丝直径的0.8-1.2倍，控制焊接速度在30-60cm/min以预留气体逸出时间，优先采用短路过渡减少空气卷入。环境与操作方面，室外焊接搭防风棚或用高度≥1.5m的挡板，室内通过除湿设备将湿度控制在<60%；操作时保持焊枪喷嘴与工件10-15mm距离稳定，避免破坏气体保护层。

3.2 裂纹缺陷的预防措施

裂纹预防需强化材料匹配、工艺调控与结构操作优化的协同。材料匹配上，按母材选氢含量≤5mL/100g的低氢型焊丝，严控硫≤0.03%、磷≤0.04%以减少低熔点共晶；对碳当量>0.45%、

淬硬倾向大的母材, 选用含锰1.2%-1.6%、镍0.8%-1.2%的焊丝改善韧性, 必要时采用80%CO₂+20%Ar混合保护气降低焊缝氧化性。工艺上, 优化焊接线能量(厚板30-50kJ/cm、薄板10-20kJ/cm)避免热裂或冷裂风险, 采用多层多道焊分散应力; 根据母材碳当量确定80-350℃预热温度, 焊后24小时内进行250-350℃消应力热处理或覆盖50mm厚保温棉缓冷。结构与操作上, 合理设计焊接结构减小接头拘束度(≤50kN/m), 焊前用丙酮彻底清理坡口及周边20mm范围油污水分以降氢; 多层焊时用测温仪严控层间温度≥150℃, 防止应力累积诱发裂纹。

3.3 飞溅缺陷的预防措施

飞溅预防聚焦工艺匹配、操作规范与设备维护。工艺参数上, 通过试焊确定电流与电压最佳区间(如100A配18-20V、200A配20-22V), 避免短路爆断或颗粒飞溅; 同步调整送丝速度(8-15m/min)与焊接速度(30-80cm/min), 保证熔滴供给与熔池消耗平衡。操作时, 平焊保持10°-15°焊枪角度防电弧偏吹, 以30-50cm/min匀速运枪减少熔池扰动, 立焊时将角度调整为20°-30°、横焊调整为5°-10°, 适配不同位置确保熔滴平稳过渡。设备维护方面, 定期检查焊枪喷嘴, 当磨损量>0.5mm时及时更换, 保障气体流场稳定; 每焊接50小时维护送丝机构, 清洁送丝滚轮并调整0.2-0.5MPa送丝压力确保精度。可在喷嘴处加装陶瓷防飞溅罩, 或在工件表面涂覆水溶性防飞溅剂, 减少颗粒附着与后续清理难度。

3.4 未熔合缺陷的预防措施

未熔合预防需强化工艺调整、操作优化与预处理控制。工艺上, 根据板厚增大焊接电流(薄板80-150A、厚板150-300A)提

升热输入, 降低焊接速度至20-50cm/min延长热作用时间; 优化坡口设计, 将角度增大至30°-60°、间隙调整为1-3mm, 确保热量覆盖侧壁及根部。操作时, 焊枪摆动幅度控制在5-15mm以覆盖坡口侧壁, 保持焊枪对准焊缝中心(偏差≤2mm)防加热偏移; 多层焊每道焊后用钢丝刷彻底清理前层熔渣与氧化皮, 露出洁净金属表面。预处理与环境上, 焊前通过机械打磨或10%盐酸酸洗去除母材表面0.05mm以上氧化皮与锈蚀; 厚板(>20mm)或环境温度<0℃焊接时, 进行80-200℃焊前预热, 减少热量散失, 确保基材达到熔化温度实现冶金结合。

4 结束语

二氧化碳气体保护焊接缺陷成因复杂多样, 涵盖材料、工艺、操作与环境等多方面。通过对气孔、裂纹、飞溅、未熔合等核心缺陷的深入剖析, 明确了各缺陷的产生机制与关键成因。针对性提出的预防措施, 从材料、工艺、操作及设备维护等多维度入手, 为减少焊接缺陷提供了有效途径。实际应用中, 需综合考量各因素, 灵活运用预防措施, 以提升焊接质量, 保障焊接结构安全可靠。

[参考文献]

- [1]臧联防, 邵亮亮. 二氧化碳气体保护焊焊接技术要领[J]. 汽车维修与保养, 2023(10):77-78.
- [2]孙瑞, 刘强. 二氧化碳气体保护焊双面成型焊接技术的应用[J]. 大众科学, 2024, 45(16):44-46.
- [3]姚海龙, 张恩涛, 刘胜合等. 二氧化碳气体保护焊在不锈钢焊接中的优势[J]. 纯碱工业, 2022(05):44-46.