

压力容器焊接接头性能强化分析

古军如

湖北特检院宜昌分院, 湖北 宜昌 443003

摘要: 能源、化工与航空航天等领域广泛应用压力容器, 它的焊接接头性能直接关系到设备的安全性和使用寿命。性能不足的焊接接头可能导致压力容器在使用过程中出现泄漏、裂纹甚至爆炸等严重事故, 造成巨大的经济损失和人员伤亡。本文从优化焊接工艺与改进焊接材料、热处理方法以及表面强化技术等方面, 分析了压力容器焊接接头性能强化的方法。开发具有更高性能的焊接材料和表面强化技术, 将进一步提升压力容器焊接接头的质量和安全性。文章对未来的研究方向进行了展望, 旨在为提高压力容器焊接接头的性能和可靠性提供理论依据和技术支持。

关键词: 压力容器; 焊接接头; 性能强化

DOI:10.63887/jeti.2025.1.3.18

引言

压力容器在众多行业中都发挥着重要作用, 而焊接接头是压力容器中最易出现薄弱环节的部位之一^[1]。由于焊接过程中不可避免地产生应力集中、微观缺陷及组织不均匀性, 焊接接头常成为压力容器失效的关键部位。强化焊接接头性能主要是表面处理技术, 如超声冲击处理 (UIT)、喷丸处理等, 通过细化晶粒和引入残余压应力提高疲劳强度。高温回火消除残余应力改善组织均匀性的焊后热处理 (PWHT), 或调整合金设计或焊接工艺, 提升材料的综合性能^[2]。

1. 压力容器焊接接头性能研究现状

Q345R 钢是低合金高强度结构钢, 碳含量 $\leq 0.22\%$ 并具有优异的综合力学性能和经济性, 焊接工艺要求低线能量焊接 (≤ 2.0 kJ/mm) 且避免热影响区 (HAZ) 形成淬硬组织, 层间温度控制 $50-70^\circ\text{C}$ 防止过热导致晶粒粗化, 推荐 E50 型焊条 (如 E5015), 低温环境需预热至 $100-150^\circ\text{C}$, 焊后需进行保温处理 ($620-650^\circ\text{C}$ 回火), 消除残余应力并改善组织均匀性^[3]; SA516Gr70 钢低温压力容器常用材料, 低温韧性优异但焊接时需严格控制氢扩

散, 选择焊材为低氢焊条 (如 E7018) 或气体保护焊 (TIG/MIG) 以降低氢致裂纹风险, 预热 $100-200^\circ\text{C}$ 且层间温度 $\leq 150^\circ\text{C}$, 焊后热处理 $620-650^\circ\text{C}$ 回火, 消除残余应力并提升低温韧性; 奥氏体不锈钢材料具有高耐腐蚀性, 但焊接易产生热裂纹和晶间腐蚀, 选择酸性焊条 (如 E308L) 或渣流动性良好的焊丝 (如 ERNiCr-3) 并避免晶界贫铬, 焊后进行固溶处理 ($1050-1150^\circ\text{C}$) 或稳定化退火 ($850-900^\circ\text{C}$), 消除敏化温度区间 ($450-850^\circ\text{C}$) 的晶间腐蚀风险^[4]。

2. 焊接接头性能强化技术分析

2.1 超声冲击处理 (UIT) 技术

超声冲击处理 (Ultrasonic Impact Treatment, UIT) 是利用高频振动冲击针头 (频率 $20-25$ kHz) 对焊接接头表层施加周期性塑性变形, 实现晶粒细化和残余压应力引入及优化表面粗糙度。冲击针的高速往复运动使表层晶粒沿冲击方向拉长并细化, 晶粒尺寸可从原始的几十微米降至几微米。消除焊接残余拉应力并引入均匀分布的压应力 (可达 530 MPa), 可以降低应力腐蚀开裂风险。表面形成厚度约 $300\ \mu\text{m}$ 的硬化层, 表面硬度提升 38 HV(Q355B

钢案例)的同时改善其耐磨性。冲-滚式 UIT (2A-6min)处理厚的表面粗糙度可降低至 Ra 0.8-1.2 μm。Q345qD 钢对接接头疲劳寿命提升 2-6 倍, 200 万循环周次下的疲劳强度 (FAT-200) 从 157.5 MPa 提升至 194.2 MPa。

2.2 焊后热处理 (PWHT) 技术

焊后热处理 (Post-Weld Heat Treatment, PWHT) 技术是通过高温回火 (620-650℃)

或固溶处理消除焊接残余应力并优化组织。厚壁结构 (如 SA516Gr70 钢) 采用消除应力退火, 620-650℃ 保温 1-2 小时, 残余应力消除率超 90% 降低冷裂纹风险。正火+回火适用于低合金钢 (如 15CrMoR 钢), 细化晶粒并提升低温冲击韧性。奥氏体不锈钢 (如 304/316L) 则使用 1050-1150℃ 高温处理后快速冷却, 消除敏化温度区间 (450-850℃) 的晶间腐蚀风险。压力容器材料处理效果对比见图 1。

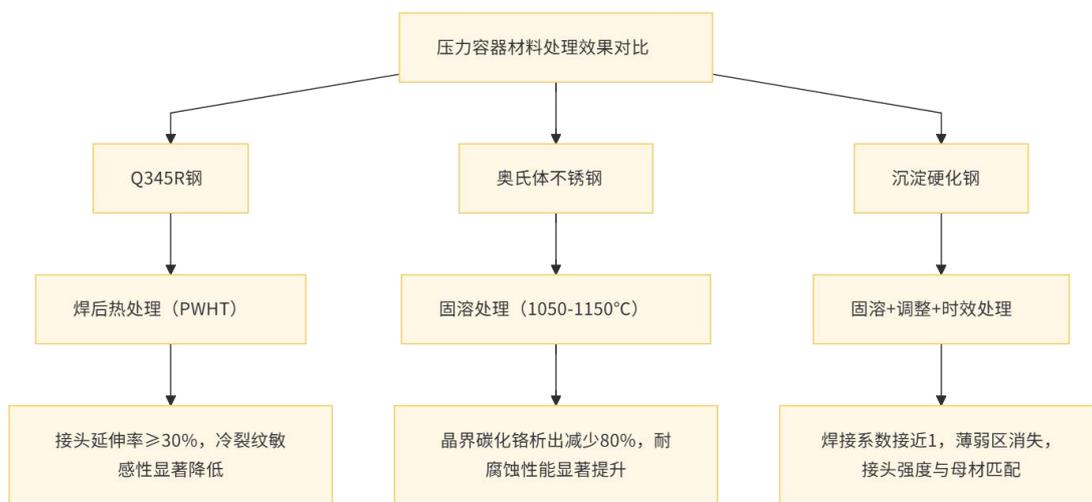


图 1 压力容器材料处理效果对比

2.3 晶粒细化技术

焊接热输入 (单位: kJ/mm) 直接影响热影响区 (HAZ) 和焊缝的晶粒尺寸, 线能量 = 电流 × 电压 ÷ 焊接速度。热输入过高会导致晶粒粗化, 热输入过低则可能引发未熔合或冷裂纹。Ti (钛) 和 Nb (铌) 等微量元素通过异质形核形成 TiB₂、TiN、NbC 等微合金相增加形核率, 高温下阻碍晶界移动可以限制晶粒长大, 且减少析出晶界脆性相 (如碳化物)。在焊丝或焊剂中添加 0.01%-0.06% Ti/B 或 0.02%-0.04% Nb, 如 E36 钢中添加 Ti 可形成 MnO-TiO₂ 复合夹杂物, 诱导晶内铁素体形核

使 HAZ 晶粒细化。Nb 以 Nb(C, N) 形式析出, 阻止奥氏体晶粒长大并提升钢的韧性和疲劳性能。奥氏体不锈钢焊材中添加 0.05%-0.1% Ti/Nb, 细化晶粒并降低晶间腐蚀倾向。SA516Gr70 钢焊缝中添加 0.02% La 可使晶粒尺寸减少 30%。

2.4 焊接工艺

选择焊接方法应根据容器参数, 一般来说 TIG 焊适用于薄壁容器焊接, 因为它热输入较低, 能够减少焊接变形和焊缝缺陷。而埋弧焊适用于厚壁容器焊接, 具有较高的焊接效率和质量。工艺优化策略见表 1。

表 1 工艺优化策略

技术原理	适用场景	参数/控制方法	效果/目标
TIG 焊（薄壁容器） 低热输入（ ≤ 1.5 kJ/mm） 惰性气体保护（氩气） HAZ 区域狭窄，变形小	薄壁压力容器（厚度 ≤ 6 mm） 不锈钢薄板（如 304/316L 管道）	热输入控制： ≤ 1.5 kJ/mm 氩气保护	减少气孔、变形，提升接头韧性
SAW 焊（厚壁容器） 高熔深（10-20 mm） 线能量控制（2.5-3.0 kJ/mm） 焊剂覆盖防氧化	厚壁压力容器（厚度 ≥ 12 mm） 低合金钢（如 Q345R 钢）	线能量控制： 2.5-3.0 kJ/mm 焊剂覆盖	提高生产效率，减少夹渣和氧化

2.5 表面强化技术

表面强化技术中喷丸强化工艺是利用高速运动的弹丸（如钢丸、玻璃丸、陶瓷丸等）冲击材料表面，使其表层产生塑性变形和残余压应力从而提高其疲劳强度和抗腐蚀性。弹丸材料可以是钢丸（适用于黑色金属）、玻璃丸（适用于有色金属，避免铁污染）或者陶瓷丸（高硬度、长寿命），弹丸直径 0.05-1.5 mm，直径越小表面粗糙度越低。喷射速度通常由压缩空气或离心力驱动，速度范围为 20-80 m/s，喷丸强度和表面覆盖率（如 Almen 试片测试）评估强化效果^[5]。

3. 实验设计与方法

3.1 材料与设备

材料为 Q345R 钢板（厚度 12mm）低合金高强度钢，它常被用于中高压压力容器，具有良好的综合机械性能。SA516Gr70 钢板（厚度 10mm）低温压力容器用碳钢，具备优异的低温韧性和抗腐蚀性能。设备采用超声冲击枪（型号 UIT-3000，频率 20-25 kHz）：冲击针直径 2 mm，最大输出功率 3 kW。CO₂ 气体保护焊机（型号 NBC-500）焊接电流 200-350 A，电压 22-32 V，保护气体纯度 $\geq 99.9\%$ 。金相显

微镜（型号 UMT102I）分辨率 0.2 μm ，配备 EDS 能谱分析模块。电子万能试验机（型号 Instron 5966）最大载荷 50 kN，位移精度 ± 0.5 μm 。X 射线应力仪（型号 XST-1200）测量精度 ± 10 MPa，探测器分辨率为 0.1°。

3.2 实验流程

制备 5 组平行试样（每组 5 个），尺寸为 200 mm \times 100 mm \times 12 mm，采用对接接头形式。焊后立即清理表面，去除飞溅和氧化物。超声冲击处理（UIT）冲击电流：1.5A（3 min）、2A（6 min），冲击方向沿焊缝轴向。冲击覆盖范围焊缝宽度 ± 10 mm 区域，每次处理后测量表面粗糙度（Ra 值），确保 ≤ 1.2 μm 。焊后热处理（PWHT）加热速率 $\leq 150^\circ\text{C}/\text{h}$ ，保温温度 $620^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ ，保温时间 1 h，冷却方式空冷。金相分析确认 HAZ 区域马氏体向回火索氏体转变。SEM（扫描电镜）观察晶粒尺寸及相分布，加速电压 15 kV。

3.3 实验结果与分析

UIT 处理后焊缝表层晶粒细化至 300 μm ，变形层厚度达 250-300 μm ，明显增多的晶界形成细小等轴晶。HAZ 区域的粗大马氏体组织被部分细化，但仍存在局部未完全再结晶区域。PWHT 后 HAZ 区域的马氏体组织转变为回

火索氏体，显著改善了组织均匀性，碳化物弥散分布。焊缝金属中残余应力降低，晶粒尺寸略有增大，但整体组织稳定性提高。力学性能测试结果见表 2。

表 2 力学性能测试结果

工艺参数	硬度 (HV0.3)	残余压应力 (MPa)	疲劳强度 (MPa)	疲劳寿命 (循环次数)
基准焊缝	220 ± 5	150 ± 10	350 ± 15	1.0×10 ⁶
UIT (2A-6min)	280 ± 8	530 ± 20	437.5 ± 18	1.4×10 ⁶
PWHT (620℃)	240 ± 6	200 ± 15	393.8 ± 20	1.8×10 ⁶

结语

深入分析压力容器焊接接头性能强化方法可知，多种手段都能有效提高焊接接头的性能和可靠性。UIT 处理可以提升焊缝表层的硬

度和抗裂纹萌生能力，PWHT 处理能消除焊接残余应力和优化组织，提高了接头的整体疲劳寿命。未来计算机模拟技术以及先进检测技术会为压力容器焊接接头性能强化研究带来更广阔的发展前景。

参考文献

- [1]周海鹏,邢松龄,韩赞东,王旭东,沈旭奎. 6005A-T6 铝合金搅拌摩擦焊接头的疲劳性能分析[J]. 热加工工艺, 2025, 54(3): 35-40
 - [2]张乐,陈元园,冯庆,李耀辉. TA2 薄钛板搅拌摩擦焊接头的显微组织与力学性能分析[J]. 材料研究与应用, 2025, 19(1): 196-200
 - [3]聂印,莫伟先,骆开军,顾舒扬. 基于压力容器制造过程常见问题应力疲劳分析[J]. 化工设计通讯, 2025, 51(2): 48-51
 - [4]孙艳芬,朱天一,田松亚. 埋弧焊热输入对 Q355B 厚板焊接接头组织及性能的影响[J]. 精密成形工程, 2025, 17(2): 122-129
 - [5]李光锋. 压力容器焊接接头工艺性能优化研究[J]. 中国新技术新产品, 2023(9): 66-68.
- 课题项目：酰胺及尼龙新材料项目，合成氨改造项目