

特种设备压力容器焊接工艺分析

王根山

湖北特种设备检验检测研究院仙桃分院 湖北 仙桃 433000

摘要: 特种设备压力容器焊接工艺直接影响设备安全与性能。其焊接工艺涵盖手工电弧焊、埋弧焊、氩弧焊及气体保护焊等多种方法,需根据材料特性、结构形式及使用环境科学选择。焊接过程中需严格控制预热、层间温度及热处理参数,防止氢致裂纹与应力变形。此外,无损检测技术是保障焊接质量的关键,配合标准化管理,可显著提升压力容器制造的可靠性与安全性。

关键词: 特种设备;压力容器;焊接工艺

引言:特种设备压力容器广泛应用于化工、能源等诸多关键领域,其质量关乎生产安全与人民生命财产安全。焊接作为压力容器制造的核心工艺,焊接质量的好坏直接影响容器的结构完整性与使用性能。不同结构、材料的压力容器对焊接工艺要求各异,且焊接过程中易产生裂纹、气孔等缺陷。深入分析其焊接工艺,探索科学的焊接方法与质量控制手段,对保障压力容器安全可靠运行意义重大。

1 特种设备压力容器焊接基础理论

1.1 压力容器结构与材料特性

(1) 典型结构形式中,球形压力容器受力均匀,材料利用率高,多用于储存高压介质,如液化天然气储罐;圆柱形压力容器制造工艺简便、成本较低,是工业中应用最广的类型,常见于化工反应釜、蒸汽锅炉;异形压力容器则根据特殊工况设计,如锥形、组合形结构,适用于空间受限或特殊介质输送场景,但制造难度和焊接要求更高。(2) 常用材料分类里,低合金钢强度高、韧性好,在中低温压力容器中的应用广泛,如Q345R钢;不锈钢具备优异的耐腐蚀性,适用于化工、食品等有腐蚀介质的环境,常用304、316L等型号;复合材料由基层(保证强度)和复层(提供耐蚀性)组成,如不锈钢复合钢板,可兼顾成本与性能,多用于复杂工况的压力容器。

1.2 焊接方法分类与选择依据

(1) 弧焊中, SMAW(手工电弧焊)设备简单、操作灵活,适用于现场维修和小批量焊接; GMAW(熔化极气体保护焊)效率高、焊缝成形好,适合中厚板自动化焊接; GTAW(钨极氩弧焊)焊接质量高、热影响区小,常用于不锈钢、薄壁容器的打底焊。(2) 埋弧焊(SAW)焊接效率高、焊缝质量稳定,适合厚壁压力容器的长直焊缝焊接;电渣焊(ESW)可一次焊成厚壁接头,多用于大型压力容器的环缝焊接,但热输入大,需控制

后续热处理。(3) 新兴技术中,激光焊能量密度高、热影响区小,适用于精密压力容器焊接;搅拌摩擦焊无熔池,焊接变形小,适合铝合金等轻金属压力容器,但设备成本较高^[1]。

1.3 焊接热过程与应力变形机制

(1) 热输入对母材性能影响显著,热输入过大易导致母材晶粒粗大,降低冲击韧性,尤其对低合金钢影响明显;热输入过小则易产生未熔合、未焊透等缺陷,需根据母材材质和厚度合理匹配热输入参数,如不锈钢焊接需控制热输入以防晶间腐蚀。(2) 残余应力分布多呈现焊缝区为拉应力、母材区为压应力的特点,拉应力易引发焊缝开裂,需通过焊后热处理(如退火)或机械拉伸法消除;变形控制可采用反变形法、刚性固定法,如圆柱形压力容器焊接时采用刚性夹具固定,减少焊接变形,同时优化焊接顺序,避免应力集中。

2 特种设备压力容器关键焊接工艺参数分析

2.1 预热与后热处理工艺

(1) 预热温度与保温时间直接影响氢致裂纹的产生概率。当预热温度过低时,焊接区域冷却速度加快,氢原子难以充分扩散逸出,易在焊缝及热影响区聚集,形成氢致裂纹;若预热温度过高,可能导致母材晶粒粗大,降低力学性能。保温时间需与预热温度匹配,例如低合金钢焊接时,当预热温度设定为150~250℃,保温时间通常控制在0.5~1h/25mm板厚,确保焊接区域温度均匀,为氢扩散创造充足时间,有效抑制裂纹萌生^[2]。(2) 后热消氢处理主要适用于易产生氢致裂纹的场景:一是焊接低合金高强度钢、高碳钢等淬硬倾向大的材料时,需通过后热(250~350℃,保温2~4h)加速氢逸出;二是在潮湿、多雨等高氢环境下焊接,或使用低氢型焊条但仍存在氢残留风险时;三是焊接厚度大于30mm的厚壁容器,因焊缝体积大、氢含量高,后热处理可显著降低氢致裂纹风险。

2.2 焊接线能量控制

(1) 焊接线能量公式为 $Q = 60IU/v$ (Q 为线能量, 单位 J/cm ; I 为焊接电流, A ; U 为电弧电压, V ; v 为焊接速度, cm/min)。实际工程中调整策略需结合母材特性与焊接要求: 当焊接薄板或易过热的不锈钢时, 可通过降低电流、提高焊接速度减少线能量; 焊接厚壁低合金钢时, 若存在未焊透风险, 可适当提高电压、降低速度以增大线能量, 但需避免超出材料耐受上限。此外, 还可通过分段焊接、交替施焊等方式, 间接控制局部线能量积累。

(2) 高强钢材料的线能量上限需通过实验确定。以Q690高强钢为例, 实验采用不同线能量(15–40 kJ/cm)进行焊接, 通过拉伸、冲击实验及金相分析发现: 当线能量超过30 kJ/cm 时, 热影响区冲击韧性显著下降(–40 $^{\circ}C$ 冲击功从60J降至35J以下), 且出现晶粒粗大现象; 线能量低于20 kJ/cm 时, 焊缝易出现未熔合缺陷。因此, Q690高强钢焊接线能量上限通常设定为30 kJ/cm , 实际应用中需根据板厚微调^[3]。

2.3 多层多道焊工艺优化

(1) 层间温度控制需根据母材类型确定, 例如低合金钢多层焊时, 层间温度需控制在150–250 $^{\circ}C$, 若低于下限, 易导致冷裂纹; 高于上限, 会加剧晶粒粗大。道间清理规范要求采用角磨机或钢丝刷彻底清除焊渣、飞溅及氧化皮, 尤其要清理焊缝边缘的夹渣, 避免后续焊接产生夹渣、未熔合缺陷。清理后需检查焊缝表面, 确保无油污、锈蚀, 必要时进行无损检测。(2) 案例分析: 某30mm厚Q345R钢板压力容器环缝焊接, 采用多层多道焊工艺。初期未控制层间温度(部分区域降至80 $^{\circ}C$), 且道间清理不彻底, 导致焊缝出现冷裂纹及夹渣。优化后: ①将层间温度稳定在180–220 $^{\circ}C$, 通过红外测温仪实时监控; ②每道焊后用角磨机清理焊渣, 重点打磨熔合线; ③调整焊接顺序, 采用对称施焊减少变形。最终焊缝无损检测合格率从75%提升至98%, 焊接变形量控制在2mm以内。

2.4 特殊环境焊接技术

(1) 低温环境(–10 $^{\circ}C$ 以下)焊接时, 预热温度需比常温提高50–100 $^{\circ}C$, 例如常温下Q245R钢预热温度为80–120 $^{\circ}C$, 低温环境下需提升至130–220 $^{\circ}C$, 并延长保温时间, 防止焊接区域快速冷却。焊材选择需优先选用低氢型或超低氢型焊材, 且焊材使用前需经350–400 $^{\circ}C$ 烘焙1–2h, 存入80–100 $^{\circ}C$ 保温筒, 避免吸潮导致氢含量升高。(2) 不锈钢晶间腐蚀防护工艺主要包括: ①控制焊接线能量, 例如304不锈钢焊接线能量不超过25 kJ/cm , 减少碳化物析出; ②采用稳定化元素(Ti、Nb)的不锈钢

(如321、347), 抑制碳与铬结合; ③焊后进行固溶处理(1050–1100 $^{\circ}C$ 加热, 快速冷却), 溶解析出的碳化物; ④焊接时采用惰性气体(氩气)背面保护, 防止焊缝背面氧化, 避免形成贫铬区。此外, 还需避免不锈钢与碳钢直接接触, 防止铁离子污染引发晶间腐蚀。

3 特种设备压力容器焊接缺陷成因与预防措施

3.1 常见缺陷类型与检测方法

(1) 气孔在超声波检测中表现为单个或密集的点状回波, 波幅较低且伴随明显衰减, 移动探头时回波位置固定; 夹渣多呈现不规则块状或条状回波, 波幅不稳定, 回波前沿较模糊; 未熔合则显示为线性连续回波, 波幅较高, 且与焊缝边界平行, 调节灵敏度时回波变化明显。

(2) 裂纹的磁粉检测中, 表面或近表面裂纹会吸附磁粉形成清晰的线性磁痕, 磁痕清晰、连续且边缘锐利, 可直观判断裂纹走向与长度; 金相分析时, 氢致裂纹多呈穿晶或沿晶分布, 断口呈脆性特征, 热裂纹则表现为沿晶界扩展的缝隙, 伴随晶界氧化现象, 通过金相显微镜可观察到裂纹微观形态与周围组织的关联性^[4]。

3.2 缺陷形成机理研究

(1) 氢致裂纹的扩散动力学模型指出, 焊接过程中氢原子在高温下溶解于熔池, 冷却时随温度降低溶解度下降, 氢原子向应力集中区域扩散, 当氢浓度达到临界值且局部应力超过材料屈服强度时, 便会形核并扩展为裂纹, 模型中氢的扩散系数与温度呈正相关, 低温阶段氢扩散速率降低, 易导致氢富集。(2) 热裂纹与再热裂纹的形成受应力–温度耦合作用影响: 热裂纹产生于焊缝凝固后期, 此时焊缝处于固液两相区, 晶间强度低, 若焊接应力超过晶间结合力, 便会沿晶界形成裂纹; 再热裂纹则发生在焊后热处理或高温服役阶段, 材料在温度与残余应力共同作用下, 晶界析出相导致晶界弱化, 应力释放过程中引发沿晶裂纹。

3.3 预防与返修工艺

(1) 焊前需彻底清理母材与焊材表面的油污、锈蚀、水分及氧化皮, 可采用机械打磨或化学清洗(如不锈钢用丙酮擦拭), 防止杂质在焊接过程中形成气孔或夹渣; 保护气体纯度需严格控制, 氩气纯度不低于99.99%, 二氧化碳气体纯度不低于99.5%, 避免因气体杂质导致焊缝氧化或产生气孔。(2) 缺陷定位需结合无损检测结果, 采用标记笔在工件表面标注缺陷中心位置与范围, 返修前需通过机械加工(如碳弧气刨)彻底清除缺陷, 确保缺陷清除干净且坡口形状符合要求; 补焊时需匹配与母材同材质的焊材, 严格控制焊接线能量与层间温度, 补焊后需进行局部热处理消除残余应力, 并重新进行无损

检测，确保返修质量达标。

4 特种设备压力容器焊接质量控制与标准化管理

4.1 焊接工艺评定（PQR）与规程（WPS）

（1）评定试验项目需覆盖关键力学性能：拉伸试验需测定焊缝及热影响区的抗拉强度，要求不低于母材标准值的90%；弯曲试验分为面弯、背弯与侧弯，试样弯曲至规定角度（通常180°）后，受拉面裂纹长度不得超过3mm；冲击试验需在指定温度（如-40℃、0℃）下进行，冲击功需满足设计要求（如低合金钢不低于27J），且断口纤维率不低于50%。合格标准需同时符合国家规范（如GB/T25774）与设备设计文件要求。（2）WPS编制需明确焊接方法、母材与焊材型号、预热温度、线能量范围、层间温度等关键参数，同时标注检验要求与应急处理措施；动态更新机制要求当母材材质变更、焊材型号替换或生产工艺调整时，需重新进行工艺评定并修订WPS，修订后需经技术部门审核、企业负责人批准，确保WPS与实际生产工况一致。

4.2 焊工技能评定与资格管理

（1）国际认证体系对比：ISO9606注重焊工操作技能的通用性，评定项目涵盖平、立、横、仰等焊接位置，考核周期为2-3年；ASMEIX更强调与特定产品标准的匹配性，除操作技能外，还需考核焊工对焊接工艺参数的理解与调整能力，资格有效期为6个月，且需定期进行复评。两者均要求焊工通过实操考核与理论测试，但其评定标准与适用范围存在差异^[5]。（2）模拟训练与实操考核结合模式：训练阶段采用与实际工件相同材质、厚度的试板，模拟压力容器的环缝、纵缝焊接场景，通过智能焊接模拟器实时反馈焊接参数偏差；实操考核需在指定位置完成焊接，考核内容包括焊缝成形、无损检测合格率等，考核合格后颁发资格证书，且需每12个月进行一次模拟训练复训，确保焊工技能稳定性。

4.3 无损检测技术应用

（1）TOFD与相控阵超声的检测精度对比：TOFD技术

对埋藏缺陷的定位精度更高，深度误差可控制在±0.1mm，适合检测厚壁容器的内部缺陷；相控阵超声可通过电子扫描快速覆盖检测区域，对表面及近表面缺陷的检出率更高，检测速度比TOFD快30%，但对埋藏较深的小缺陷灵敏度略低。两者结合使用可实现优势互补，提高缺陷检测准确性。（2）射线检测的辐射防护需符合GB18871要求，检测人员需佩戴个人剂量计，作业区域设置警示标识与防护屏障，采用遥控操作减少辐射暴露；图像解析需通过专业软件测量缺陷尺寸，圆形缺陷需统计当量直径，线性缺陷需测定长度与宽度，解析结果需与标准图谱对比，判定缺陷是否合格，同时需保存检测图像与报告，便于追溯管理。

结束语

特种设备压力容器焊接工艺复杂且关键，涉及多种焊接方法、精准的参数控制以及严格的质量管理。从基础理论到关键工艺参数，从缺陷成因与预防到质量控制与标准化管理，每一环节都紧密相连、缺一不可。只有不断优化焊接工艺，严格把控质量，提升焊工技能，合理运用无损检测技术，才能确保压力容器焊接质量，使其在各领域安全稳定运行，为工业发展和人民生活提供坚实保障。

参考文献

- [1]徐长伟.特种设备压力容器焊接工艺分析[J].市场调查信息:综合版,2021,(21):105-107.
- [2]宋长原.特种设备压力容器焊接方法的选择探究[J].装备维修技术,2021,(13):205-206.
- [3]王艳荣刘汉青.锅炉压力容器的焊接工艺与设备发展[J].神州,2020,(07):277-279.
- [4]王毅.特种设备压力容器焊接方法研究[J].中国化工贸易,2020,12(30):70-71.
- [5]安峻永,王郡良,廖先良.特种设备压力容器焊接工艺分析[J].中国设备工程,2024,(20):82-84.