

低温压力容器的焊接制造

全莲菊 郭超

杭州杭氧低温容器有限公司 浙江 杭州 311107

摘要：低温压力容器焊接制造需兼顾材料适配、工艺参数优化与全流程质量管控。聚焦液化天然气储运、深冷空气分离等场景，通过严格材料匹配、精准参数控制及系统缺陷预防，确保焊缝在极端低温环境下保持高韧性、抗裂性及密封性。本文从材料选择、参数设计、接头制备、环境防护及质量监测五方面展开，形成覆盖制造全周期的技术体系，保障容器安全运行。

关键词：低温压力容器；焊接制造；质量控制

引言：随着深冷技术发展，低温压力容器在能源储运、工业气体分离等领域应用日益广泛。其焊接制造需满足极端温度下的性能要求，焊缝需具备高低温韧性、抗裂性及密封性。制造过程涉及材料适配、工艺参数设计、接头结构优化及环境防护等多维度技术环节，需通过系统性质量控制确保设备安全可靠，支撑低温工业装备的高效运行。

1 低温压力容器焊接制造概述

低温压力容器焊接制造聚焦于满足低温环境下设备安全运行的特殊需求，其工艺设计需兼顾材料特性、焊接方法与质量管控的协同作用。这类容器常用于液化天然气储运、深冷空气分离等场景，对焊缝的低温韧性、抗裂性能及密封性要求极为严苛，需通过针对性工艺确保其在-196℃甚至更低温度下不发生脆性失效。（1）材料适配性要求：低温用钢需经过严格的低温冲击试验验证，确保在目标温度下仍保持足够韧性。焊接材料需与母材在化学成分、金相组织上实现良好匹配，避免因成分差异导致焊缝区域性能突变，影响整体低温可靠性。

（2）工艺参数精细化控制：焊接过程中需精确调控线能量、层间温度等参数，防止因热输入过大引发晶粒粗化或残余应力集中。采用脉冲焊接、激光复合焊等先进技术，可在减少热影响区范围的同时提升焊缝均匀性，降低低温裂纹产生风险。（3）全流程质量追溯体系：从焊前坡口清理、层间温度监控到焊后无损检测，需建立完善的质量控制链条^[1]。通过超声波检测、射线探伤等手段排查内部缺陷，配合低温拉伸试验验证焊缝力学性能，确保每道工序符合低温使用标准，最终实现容器在极端温度下的长期安全运行。

2 低温压力容器焊接制造关键技术环节

2.1 焊接材料选择与适配

低温压力容器焊接材料选择与适配需聚焦低温环境

下的性能稳定性，确保焊缝在低温工况下保持足够韧性，避免脆性失效。（1）化学成分匹配性：焊接材料需与母材化学成分高度兼容，控制碳、硫、磷等杂质元素含量，防止焊缝区形成脆性相；例如，采用与母材同质或相近的焊条、焊丝，确保焊缝金属的低温冲击吸收能量满足设计要求，降低冷裂纹风险。（2）低温韧性验证：焊接材料必须通过低温冲击试验验证，在低于或等于容器设计温度的条件下，焊缝及热影响区的冲击功需达到标准值；通过严格控制冷却速度与热输入，避免晶粒粗化导致韧性下降，保障设备在极端低温下的安全运行。（3）工艺适应性优化：根据焊接方法（如手工电弧焊、气体保护焊）选择适配的焊接材料，并考虑预热、层间温度控制及后热处理措施；例如，高强度钢焊接时采用低氢型焊材，配合适当的预热温度，减少焊接应力与氢致裂纹倾向，提升焊缝综合性能。通过上述环节的精准控制，实现焊接材料与低温压力容器制造需求的深度适配，为设备安全可靠运行提供坚实保障。

2.2 焊接工艺参数设计

低温压力容器焊接工艺参数设计需围绕材料特性与低温性能要求展开，通过精准参数控制保障焊缝质量与结构可靠性。（1）热输入量优化：热输入需根据母材厚度、焊接位置动态调整，通常控制在0.8-1.2kJ/mm范围内。例如，厚板焊接时适当提高热输入可减少未焊透风险，而薄板则需降低热输入以避免烧穿缺陷，确保焊缝成形均匀。（2）焊接速度匹配：焊接速度需与电流、电压参数协同设定，避免因速度过快导致熔池冷却过快引发裂纹，或过慢导致热影响区晶粒粗化。某类低温钢焊接时，速度控制在15-20cm/min可实现最佳晶粒细化效果，提升低温韧性。（3）电流电压协同控制：焊接电流需根据焊丝直径选择，电压则需匹配电流以维持稳定电弧。例如，采用 $\phi 1.2\text{mm}$ 焊丝时，电流可设定为120-

150A, 电压18-22V, 确保熔滴过渡顺畅, 减少飞溅与气孔缺陷^[2]。上述参数设计通过多维度协同控制, 实现焊接过程的稳定性与焊缝性能的可靠性, 为低温压力容器在极端温度下的安全运行提供工艺支撑。

2.3 焊接接头结构制备

低温压力容器焊接接头结构制备需以力学性能与制造工艺的平衡为核心, 通过科学设计提升接头可靠性。

(1) 接头形式选择: 根据容器受力特征与结构特点, 优先选用对接接头形式, 其承载能力更优。对于复杂结构部位, 可结合角接或T型接头, 但需通过应力分析验证接头强度, 避免应力集中导致失效风险。(2) 坡口设计优化: 坡口角度与根部间隙需精确控制, 确保焊缝根部完全熔合。例如, 采用V型坡口时, 角度通常控制在60°-70°, 根部间隙保持2-3mm, 既保障熔透性又避免烧穿缺陷, 提升焊缝成型质量。(3) 装配精度保障: 装配过程中需严格控制接头间隙与错边量, 通过专用工装实现精准定位。错边量需控制在母材厚度的10%以内, 间隙偏差不得超过1mm, 确保焊接过程稳定, 减少因装配误差引发的焊接缺陷, 保障接头几何尺寸与性能一致性。各环节紧密关联, 从形式选择到坡口设计、从装配控制到质量保障, 形成系统性制备方案, 最终实现焊接接头结构与低温压力容器制造需求的精准匹配。

2.4 低温环境焊接防护技术

低温环境焊接防护技术需针对低温条件下材料特性变化与焊接工艺挑战, 构建全方位防护体系, 保障焊接质量与操作安全。(1) 低温材料预热处理: 焊接前对母材及焊材进行预热, 可降低材料脆性, 减少焊接裂纹风险。预热温度需根据材料类型设定, 例如某类低温钢预热至150-200℃, 可显著提升焊缝低温韧性, 避免冷裂纹产生。(2) 焊接过程温度监控: 采用红外测温仪实时监测焊接区域温度, 确保热输入稳定且符合工艺要求。通过动态调整焊接参数, 维持熔池温度在合理区间, 防止因温度波动导致焊缝组织不均匀或性能下降。(3) 焊后保温缓冷措施: 焊接完成后对焊缝区域进行保温处理, 减缓冷却速率, 降低残余应力。例如, 使用石棉被或陶瓷纤维毯包裹焊缝, 控制冷却速度不超过50℃/h, 避免因快速冷却引发焊缝脆化或裂纹扩展^[3]。上述技术通过预热、监控与保温的协同作用, 形成低温环境焊接的完整防护链, 有效提升焊接质量与结构可靠性, 为低温压力容器的安全运行提供技术保障。

3 低温压力容器焊接制造过程质量控制要点

3.1 焊接前质量管控

低温压力容器焊接前质量管控是确保焊接质量的关键前置环节, 需围绕材料适配、工艺规划、设备保障三大

核心维度展开系统性控制。(1) 材料适配性验证: 低温环境对材料低温韧性要求极高, 优先选用符合国际通用标准的专用钢材, 通过化学成分分析、力学性能测试及低温冲击试验, 验证材料在低温工况下的性能稳定性, 杜绝因材料先天不足导致的焊接缺陷。(2) 工艺参数科学设定: 结合材料特性与容器结构特点, 制定针对性焊接工艺方案, 明确焊接方法、预热温度范围、层间温度控制区间及焊后热处理要求, 通过工艺评定试验验证参数可行性, 确保焊接过程稳定可控, 降低裂纹、未熔合等缺陷发生概率。(3) 设备与工装精准管理: 焊接设备需定期性能校验, 保障电流、电压输出精度; 工装夹具按容器结构定制设计, 严控装配与定位精度, 减少焊接变形与应力集中风险, 提升焊接过程的一致性与可靠性。三者协同作用, 形成从材料源头到工艺实施、设备保障的全流程闭环管控, 为低温压力容器焊接质量奠定坚实基础, 最终提升设备安全运行性能与长期使用寿命。

3.2 焊接过程质量监测

焊接过程质量监测是低温压力容器焊接质量控制的核心环节, 需通过多维度、实时性的监控手段保障焊接工艺的的稳定执行与质量达标。(1) 实时参数精准调控: 采用智能焊接系统对焊接电流、电压、焊接速度等关键参数在线监测, 确保其波动范围控制在±5%以内。例如, 当监测到某参数超出阈值时, 系统可自动触发调整机制, 避免因参数偏差导致焊缝晶粒粗化或韧性下降。(2) 缺陷早期识别技术: 运用红外热成像仪与超声波传感器对焊接区域实时扫描, 可快速识别气孔、未熔合、裂纹等潜在缺陷。此类技术能在缺陷形成的初期阶段发出预警, 使操作人员及时采取补焊或工艺修正措施, 降低返工率。(3) 工艺数据动态分析: 通过采集焊接过程中的温度、应力等数据, 结合数据分析模型评估焊缝的低温性能趋势。某企业应用此类分析后, 优化了焊接热输入策略, 使焊缝在极端低温条件下的冲击韧性得到显著提升, 同时减少了焊接变形量。上述监测手段通过实时反馈与动态调整, 形成闭环控制体系, 有效提升焊接过程可控性与产品质量可靠性, 为低温压力容器安全运行提供坚实保障。

3.3 焊接缺陷预防措施

低温压力容器焊接缺陷预防需从工艺、操作、环境三方面协同管控, 通过系统性措施降低裂纹、气孔、未熔合等缺陷发生风险。(1) 工艺参数精准控制: 焊接前根据材料特性与结构特点, 科学设定预热温度、层间温度及焊接速度等参数。例如, 低温钢焊接时严控层间温

度不超过工艺规定上限,避免温度梯度过大引发焊接裂纹,确保熔池稳定成型。(2)操作规范严格执行:焊工需经专业培训并持证上岗,熟练掌握引弧、运条、收弧等操作技巧。焊接过程中保持焊枪角度一致、运条速度均匀,避免操作失误导致焊缝成形不良或内部缺陷,定期检查焊丝、焊剂质量,杜绝使用不合格材料。(3)环境条件动态管理:焊接环境需保持干燥、无风,避免潮湿空气或气流干扰熔池保护效果。露天作业需搭建防风棚并配备除湿设备,确保环境湿度合理,防止氢致裂纹等环境敏感缺陷产生^[4]。三者协同管控,通过参数控制稳定焊接过程、操作规范保障作业质量、环境管理消除外部干扰,实现焊接缺陷有效预防,提升低温压力容器焊接质量与安全性能。

3.4 焊后热处理质量控制

低温压力容器焊后热处理是保障其低温性能的关键步骤,通过控制加热温度、保温时间及冷却速率,可有效消除焊接残余应力,优化焊缝组织结构,提升材料在低温环境下的韧性表现。(1)温度区间精准控制:热处理温度需根据母材特性设定,通常控制在适宜高温区间,避免温度过高导致晶粒粗化或过低无法充分消除应力;例如,某类低温钢在此温度区间保温合理时长后,残余应力可得到显著降低。(2)冷却速率梯度设计:冷却过程需采用分段控制策略,先以平缓速率缓慢冷却至特定温度,再以空气冷却至室温;这种梯度冷却可减少热应力产生,防止焊缝区域出现新的裂纹缺陷,保障焊缝韧性不受影响。(3)组织性能动态监测:通过金相显微镜观察焊缝晶粒形态,结合低温冲击试验验证韧性提升效果;例如,经热处理后,焊缝在-196℃下的冲击吸收能量可提高15%,满足极端温度使用要求。上述措施通过精细化工艺控制与性能验证,确保焊后热处理环节的质量可靠性,为低温压力容器的安全运行提供双重保障。

3.5 焊接接头性能检测

焊接接头性能检测是验证低温压力容器焊接质量的

核心手段,需通过多维度测试确保接头在低温环境下满足强度、韧性及密封性要求。(1)低温力学性能验证:在-196℃或更低温度下进行冲击试验,测定焊缝及热影响区的冲击吸收能量;例如,某类低温钢接头在此温度下的冲击功需达到50J以上,确保避免脆性断裂风险。(2)无损检测全面覆盖:采用超声波检测排查内部未熔合、裂纹等缺陷,结合射线检测验证焊缝成形质量;检测灵敏度需要达到Φ2mm当量平底孔水平,确保微小缺陷无所遁形。(3)金相组织微观分析:通过金相显微镜观察焊缝晶粒形态、夹杂物分布及热影响区组织变化;例如,细晶粒组织可提升低温韧性,而粗大晶粒则可能引发应力集中,需通过工艺调整优化组织结构^[5]。上述检测手段通过宏观性能测试与微观组织分析相结合,形成完整的质量评价体系,确保焊接接头在极端温度下的可靠性,为低温压力容器的安全运行提供科学依据。

结束语:未来,需持续深化焊接工艺参数的智能化调控,通过引入AI算法实现热输入、焊接速度的动态优化;强化缺陷早期识别技术,如开发高精度红外热成像与声发射联合检测系统;同时加强极端温度下材料性能的实时监测与寿命预测模型研究,推动低温压力容器制造技术向自适应、高可靠方向发展,为深冷工业装备升级提供核心支撑。

参考文献

- [1]谭雪龙,朱婷.压力容器制造工艺参数对焊接质量的影响研究[J].现代制造技术与装备,2025,61(1):132-134.
- [2]臧棚浩,胡素峰,刘星池.压力容器制造企业焊接车间HSE管理问题分析[J].化工管理,2025(11):24-26.
- [3]杨杰,吕宪雷,王刚.压力容器制造过程中金属材料焊接缺陷控制分析[J].冶金与材料,2025,45(4):116-118.
- [4]鲍婕.化工机械压力容器制造中焊接质量的控制[J].化工管理,2025(32):137-140.
- [5]叶俊.压力容器制造过程中的金属材料焊接缺陷控制研究[J].热处理技术与装备,2025,46(5):39-42.