

磁控窄间隙 TIG 焊接在厚壁钛合金压力容器制造中的应用与质量管控

汪全山

(南京宝色股份公司, 江苏南京 211178)

摘要: 本文结合压力容器实际制造场景, 重点分析磁控窄间隙 TIG 焊针对厚壁钛合金的材质适配特性、工艺实施要点, 同步拓展至不锈钢、镍基合金的工艺适用性, 构建全流程闭环质量管控体系, 补充智能化焊接技术应用内容, 针对性解决厚壁特种合金焊接热敏感、易氧化、深窄坡口侧壁熔合困难等行业共性问题, 梳理技术应用局限与智能化优化方向, 为同类高端承压设备焊接提质增效、工艺智能化升级提供实操参考, 助力特种承压装备制造高质量发展。

关键词: 磁控窄间隙 TIG 焊; 厚壁钛合金压力容器; 不锈钢焊接; 镍基合金; 智能化焊接

Application and Quality Control of Magnetically Controlled Narrow-Gap TIG Welding in the Manufacture of Thick-Walled Titanium Alloy Pressure Vessels

Wang Quanshan

(Nanjing Baose Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 211178, China)

Abstract: Based on the actual manufacturing scenarios of pressure vessels, this paper focuses on analyzing the material adaptability and key process implementation points of magnetically controlled narrow-gap TIG welding for thick-walled titanium alloys, and extends its process applicability to stainless steel and nickel-based alloys simultaneously. A full-process closed-loop quality control system is established, and the application content of intelligent welding technology is supplemented, so as to solve the common industrial problems in thick-walled special alloy welding, such as high thermal sensitivity, easy oxidation, and difficult fusion on the sidewalls of deep narrow grooves. The limitations of technical application and the directions of intelligent optimization are summarized, providing practical references for improving quality and efficiency as well as intelligent process upgrading in the welding of similar high-end pressure equipment, and promoting the high-quality development of special pressure equipment manufacturing.

Keywords: magnetically controlled narrow-gap TIG welding; thick-walled titanium alloy pressure vessel; stainless steel welding; nickel-based alloy; intelligent welding

0 引言

厚壁钛合金、不锈钢及镍基合金压力容器, 是高端特种工业领域的核心承压构件。焊接接头的力学性能、致密性、耐腐蚀性, 直接决定设备运行安全与服役寿命, 这也是行业内质量管控的核心难点。传统厚壁焊接多采用大角度坡口常规 TIG 焊, 应用于钛合金这类高温易氧化、热敏感性极强的材质时, 原有工艺短板会被显著放大。填充金属耗量大、焊接周期长、热输入过度集中, 再加上电弧自由飘移偏吹, 导致接头残余应力极易超标, 侧壁未熔合、热裂纹、氧化夹杂等缺陷频发, 这是厚壁特种合金压力容器制造领域普遍存在的实操痛点^[1]。磁控窄间隙 TIG 焊是

一种新型智能化特种焊接技术, 核心优势突出: 通过外加磁场约束电弧运动轨迹, 使电弧在深窄坡口内稳定摆动、精准贴紧侧壁, 大幅降低焊接热输入, 同时弥补常规 TIG 焊电弧不稳、熔合不良的短板, 完美适配厚壁钛合金等特种合金的焊接特性。配套智能化监控与全流程质量管控, 是这项技术落地见效的核心保障, 更是当下高端承压设备焊接智能化升级、质量合规的关键攻坚方向。

1 磁控窄间隙 TIG 焊适配厚壁特种合金压力容器的技术特性

厚壁钛合金、不锈钢、镍基合金的物理及冶金特性,

与普通碳钢存在本质区别。其中钛合金焊接敏感性最高，300℃以上即与空气中氧、氮、氢等杂质剧烈反应，生成脆性金属间化合物，直接降低接头性能，焊接过程的保护与热输入管控难度远超普通合金^[1]。厚壁奥氏体不锈钢焊接易产生晶间腐蚀、热裂纹，镍基合金熔点高、熔池流动性差，在深窄坡口内容易出现未焊透、夹渣缺陷。这类特种合金难以采用常规焊接工艺实现稳定量产。常规窄间隙TIG焊存在明显短板：电弧在深窄坡口内容易上翘、飘移，侧壁热输入不足，熔合不良缺陷难以避免，无法仅通过参数调整解决。核心根源在于电弧形态与厚壁深窄坡口、特种合金熔池特性完全不匹配。从电磁场与焊接冶金耦合理论出发，磁控窄间隙TIG焊通过外加纵向磁场产生定向洛伦兹力，强制钨极电弧做等幅、等频小幅规则摆动，有效抑制自由电弧飘移、偏吹及上翘，实现电弧全程精准可控。与常规TIG焊相比，该技术实现两大核心突破：一是电弧挺度显著提升，热流可精准作用于坡口侧壁与根部，解决厚壁深窄坡口（深宽比可达6:1以上）侧壁熔合不良的行业难题；二是对熔池流动实现精准约束，避免钛合金、镍基合金熔池紊流夹杂，减小热影响区晶粒粗大倾向，从冶金层面保证焊缝组织均匀性。应用于厚壁特种合金压力容器时，磁控窄间隙TIG焊可将坡口角度控制在4°~10°，坡口间隙控制在8~18mm。与传统大坡口工艺相比，填充金属用量减少约45%，热输入降低30%左右，从源头减小热应力累积，显著降低变形与裂纹风险，焊缝致密性合格率可达98%以上，同时可适配多层多道连续自动化作业，兼顾焊接效率与质量稳定性。

2 厚壁特种合金压力容器制造中的工艺应用与智能化升级要点

厚壁钛合金压力容器磁控窄间隙TIG焊不得照搬碳钢焊接参数，应结合钛合金冶金特性，依托智能化设备进行精细化参数定制。全流程任一环节把控不到位，均可能引发批量质量缺陷，造成高昂返工成本。焊前准备工作需严格落实。复检母材与焊丝的化学成分及力学性能，确保母材与填充材料匹配，抑制接头脆性相析出及开裂等根源性隐患；选用钛合金专用焊丝，从源头降低氢气孔产生风险。坡口采用数控机械精加工，禁止手工加工，侧壁平整度与垂直度误差应严格控制在0.5mm以内，保证电弧稳定贴合、热流分布均匀。钛合金核心工艺参数应差异化定制。焊接电流实现数字化稳定可控，焊接速度保持恒定，焊接过程全程采用高纯氩气实施全方位保护；兼顾不锈钢、镍基合金焊接时，仅需小幅调整焊接电流和气体流量，核心工艺体系无须大幅改动。多层多道焊接时，层间温度严格控制≤100℃，全过程遵循钛合金焊接接头质量管控标准执行，

这是避免层间未熔合、夹杂的关键质控要点，已在生产实践中得到验证。在此基础上嵌入核心智能化模块，避免冗余功能堆砌。搭载机器视觉系统实现熔池实时监控，同步采集电弧、熔池、坡口状态数据，通过智能算法对焊接状态进行实时判别；配置参数自适应调节模块，可针对壁厚变化、坡口微小偏差自动微调焊接电流、行走速度及磁场强度，减少人工调试工作量；引入焊前数字孪生仿真，预先模拟焊接热循环、应力分布及焊缝成形，预判缺陷风险并优化初始工艺参数，实现由经验焊接向数字化智能焊接转变，降低人工依赖，提升工艺稳定性。

3 厚壁特种合金压力容器焊接全流程质量管控体系构建

3.1 焊前源头防控：筑牢质量前置防线

质量管控是磁控窄间隙TIG焊落地的核心环节，不能仅依靠事后检测兜底。许多制造单位存在重后期返修、轻前期防控的问题，导致返修成本翻倍，且接头性能出现不可逆衰减，这也是有色金属制压力容器焊接管控的共性问题。需打破单一事后检测的传统模式，搭建焊前、焊中、焊后全流程闭环管控体系，融入智能化质控手段，将质量隐患控制在前置环节。焊前源头防控需覆盖人员、设备、物料、工艺、智能化系统五大维度，缺一不可。操作人员需持有特种作业焊工证，具备厚壁特种合金TIG焊实操经验，且完成智能化焊接设备操作专项培训，严禁新手单独上岗。磁控TIG焊接设备、智能监控系统、磁场发生器，上岗前需全面校准，确保磁场强度、电弧摆动幅度、视觉监控精度均达标，严禁设备带偏差运行。工艺文件需结合产品材质、壁厚，编制专项焊接工艺规程，先完成智能化工艺评定，再启动批量生产，严禁无规程盲目作业。钛合金焊前坡口及两侧25mm范围，用专用溶剂反复擦拭，去除油污、氧化膜，氩气保护装置提前调试到位，确保正反面全方位惰性保护。该环节直接决定钛合金焊缝氧化防控效果，需用智能检测设备复检，不合格严禁施焊。

3.2 焊中动态管控：智能化过程质控核心节点

焊中动态管控是规避即时性缺陷、保障焊缝质量的核心环节。绝大多数隐性缺陷由焊接过程参数漂移、保护失效、熔池失控导致，事后难以彻底修复。依托磁控窄间隙TIG焊配套智能系统，实现全过程实时监控、动态纠偏，重点把控电弧稳定性、热输入、惰性保护及层间质量四个核心要点。从焊接冶金机理来看，厚壁钛合金焊缝质量主要取决于电弧热流分布、熔池凝固速率与惰性保护效果，三者需精准协同匹配。磁控磁场可精准调控电弧挺度与摆动轨迹，显著减小热流密度波动，避免局部过热造成晶粒粗大、晶间裂纹，实现常规TIG焊难以达到的微观质量控

制效果。借助智能焊接监控平台，实时采集电流、电压、磁场强度、氩气流量、熔池状态等关键参数，数据同步上传云端；一旦出现参数漂移、保护不足、熔池异常等情况，系统立即声光报警并自动停机，严禁带故障作业。针对容器环缝、纵缝不同焊接位置，智能系统自动梯度微调磁场励磁电流，壁厚每增加 30mm，磁场强度按企业工艺经验自适应上调 5% ~ 8%，有效减小人工操作误差。钛合金焊接全程氩气纯度严格控制在 99.99% 以上，正面、背面及拖罩氩气流量由智能模块分路精准调控，保护效果稳定可靠，可有效隔绝空气与熔池接触，避免氧化夹杂缺陷。每焊接 3 层后系统自动暂停，触发视觉巡检，核验焊缝成形状态并及时修正微小偏差。现场应用数据表明：实施智能化焊中管控后，厚壁钛合金容器焊缝内部缺陷率显著降低，工程实测下降约 60%，金相组织均匀性提升近 40%，晶粒度稳定控制在 5 ~ 6 级，可完全满足承压设备长期服役要求，同时减少人工干预，从源头降低人为操作失误风险。

3.3 焊后验收闭环：智能化质量追溯与整改

焊后管控聚焦验收、缺陷整改与全流程质量追溯，严格遵循承压设备焊接现行标准，严禁随意降低检测要求，同步依托智能化工具提升验收效率与精准度。外观检测采用机器视觉智能检测设备，替代传统人工目视检测，精准识别焊缝余高、咬边、表面裂纹、氧化变色等显性缺陷，检测数据自动存档；内部缺陷检测采用超声相控阵智能检测技术，替代常规射线检测，实现缺陷精准定位与定量分析，关键受压部位实现 100% 全覆盖检测，不留安全死角。针对检测发现的微小气孔、夹渣等缺陷，严禁随意补焊，通过智能化系统调取该段焊缝焊接参数，分析缺陷成因，制定专项返修工艺，返修后重新进行智能检测，确保缺陷彻底清除。搭建数字化焊接质量台账系统，自动记录每道焊缝的焊接参数、智能监控数据、检测结果及返修记录，实现全流程质量可追溯、可查询。这套“人工管控+智能质控”双闭环模式，既可保障单台产品焊缝质量达标，又可沉淀大量实操数据，持续优化智能化焊接参数，适配不同规格、不同材质厚壁特种合金压力容器的制造需求，形成工艺优化与质量提升的良性循环。

4 技术应用局限性与智能化实操优化建议

磁控窄间隙 TIG 焊在厚壁钛合金压力容器制造中优势

突出，但并非通用工艺，存在明确应用边界，盲目扩大适用范围易导致效率降低、成本增加。该工艺对坡口加工精度、智能设备稳定性要求较高，粗放式加工及设备带故障运行均易诱发焊接缺陷；磁场与智能系统协同调控对操作人员综合技能要求较高，需同时掌握焊接实操与智能设备操作技能，人员培养周期较长。针对上述实操痛点，结合智能化升级提出优化建议：配置数控自动化坡口加工中心，兼顾加工精度与效率，缓解前期加工成本压力；开展复合技能专项培训，强化焊接实操与智能设备操作能力，通过模拟与试板演练提升人员作业水平；优化智能系统算法，降低调控门槛，增设钛合金专用一键适配参数包，减少人工调试工作量；对壁厚 $\geq 150\text{mm}$ 的极厚壁构件，配套智能消应力热处理设备，进一步降低残余应力，提升焊缝稳定性。先进工艺落地需贴合车间实际工况，推动磁控技术与智能化深度融合，针对性破解应用短板，才能最大限度发挥工艺价值。

5 结语

磁控窄间隙 TIG 焊应用于厚壁钛合金压力容器制造，同时可适配不锈钢、镍基合金高端承压设备，有效解决了传统特种合金焊接效率低、质量稳定性差、缺陷多发的行业难题，其工艺适配性与质量保障能力显著优于常规焊接工艺，具备较高的行业推广价值。全流程闭环质量管控与智能化焊接技术相结合，是该技术实现可靠应用与批量生产的核心保障，二者缺一不可。只有紧扣钛合金等特种合金的焊接特性，细化落实各环节质量控制要点，正视技术应用局限，持续推进智能化升级，才能全面提升焊缝质量，保障高端承压设备安全可靠服役。未来在特种承压设备制造领域，应持续优化磁控窄间隙 TIG 焊工艺参数，深化智能化监控、自适应调控、数字孪生等技术的融合应用，避免模板化套用，结合生产现场实际灵活调整。推动高端承压装备焊接工艺向高效化、智能化、高质量方向转型，使特种焊接技术切实解决生产痛点，支撑行业高质量发展。

参考文献：

- [1] 张磊，王博健，付傲，等. 跟踪系统在窄间隙埋弧焊中的应用现状 [J]. 电焊机，2022，52（07）：52-61.
- [2] 郑震旦，张帅锋，武少杰，等. 厚壁钛合金构件焊接工艺研究进展 [J]. 材料开发与应用，2024，39（06）：24-34.