

机电特种设备焊接工艺和焊接现状分析

陈军

内蒙古自治区特种设备检验研究院阿拉善分院 内蒙古 阿拉善盟 750306

摘要：本文围绕机电特种设备焊接展开研究，先详细介绍熔化极、非熔化极及特种焊接工艺类型，包括手工电弧焊、埋弧自动焊、钨极氩弧焊、激光焊等，阐述各工艺原理与适用场景。接着分析焊接工艺在结构复杂性、动载荷与疲劳性能、材料兼容性方面的特点，随后从工艺应用、质量控制、行业痛点三方面剖析焊接现状，最后提出智能化与自动化升级、新材料与新工艺融合、全生命周期质量管理的工艺优化方向，为提升机电特种设备焊接质量与行业发展提供参考。

关键词：机电特种设备；焊接工艺；焊接现状；工艺优化；质量控制

引言：机电特种设备在工业生产与生活中应用广泛，焊接作为制造的关键环节，直接影响设备质量与安全。不同焊接工艺适用于不同结构与材料，当前行业在自动化、特种工艺应用等方面取得进展，但仍面临诸多挑战。深入分析焊接工艺类型、特点及现状，探索优化方向，对提升机电特种设备制造水平具有重要意义。

1 机电特种设备常用焊接工艺类型

1.1 熔化极焊接工艺

手工电弧焊（SMAW）在机电特种设备焊接中应用广泛，依赖涂有药皮的焊条与工件间电弧工作。电弧高温熔化焊条和工件表面金属，冷却后形成焊缝；药皮分解产生气体保护熔池，还能形成熔渣覆盖焊缝，减少外界对质量的影响^[1]。其设备由焊钳、电缆、电源等简单部件构成，操作可依工件结构灵活调整角度与位置，在短焊缝及复杂结构特种设备部件焊接中优势显著，常用於起重机局部连接件或电梯框架异形部位焊接。埋弧自动焊（SAW）以电弧在焊剂层下燃烧为核心，焊接时焊丝通过送丝机构自动送进，焊剂均匀覆盖焊接区域。电弧热量熔化焊丝、部分焊剂及工件金属，熔池被焊剂层包裹以隔绝空气，减少气孔、夹渣等缺陷。该工艺过程稳定，能获均匀高质量焊缝，且熔深大，可一次性完成较厚板材焊接，无需多次堆焊，生产效率高，特别适合机电特种设备中中厚板长焊缝，如大型游乐设施支撑梁或客运索道支架长直焊缝焊接。气体保护焊（GMAW/MIG/MAG）以二氧化碳或氩气与二氧化碳混合气体为保护介质。焊接时，连续送丝与工件间产生电弧，保护气体从焊枪喷嘴喷出，在电弧和熔池周围形成保护氛围防空气侵入。其焊接速度快、电弧热量集中，对工件热影响区小，能减少焊接后变形，适合薄板类特种设备部件焊接，也便于配合自动化设备实现批量生产，多应用于电

梯轿厢薄板拼接或小型游乐设施精密部件焊接。

1.2 非熔化极焊接工艺

钨极氩弧焊（TIG）采用钨极作为电极，钨极在焊接过程中不熔化，仅通过电弧产生的热量熔化工件金属。焊接时，氩气从焊枪中持续喷出，形成稳定的保护气流，将电弧和熔池与空气完全隔离，避免金属氧化。该工艺能够精确控制电弧温度和熔池大小，焊接后的焊缝成型美观，力学性能良好，且工件焊接变形量小，对焊接精度要求较高的机电特种设备部件尤为适用，比如薄板类特种设备的密封焊缝，或是对尺寸精度要求严格的精密部件焊接。

1.3 特种焊接工艺

等离子弧焊利用特殊装置产生高密度的等离子束，等离子束具有极高的能量密度，能够快速熔化工件金属并形成焊缝。焊接过程中，等离子束的方向性强，能量集中，对工件的热影响区域狭窄，可有效减少焊接变形，适合机电特种设备中超薄金属部件的焊接，同时也能应对一些难熔金属材料的焊接需求，比如部分特种设备中耐高温部件的焊接。激光焊借助高能激光束作为热源，激光束照射到工件表面时，能量被工件吸收并转化为热能，使金属熔化并形成焊缝。这种焊接方式属于非接触式焊接，无需与工件直接接触，可避免对工件造成机械损伤，焊接精度高，能够实现微小焊缝的焊接，同时适用于不同种类金属材料的焊接，在机电特种设备中精密结构部件的焊接，或是异种材料连接的场景中发挥重要作用。

2 机电特种设备焊接工艺特点

2.1 结构复杂性要求

机电特种设备为满足功能需求，常采用管状结构、箱形梁等多种复杂构件，这些构件需通过焊接实现高强

度连接以保障整体结构稳定性。不同构件的连接需求差异较大，对应的焊缝类型也需精准匹配。对接焊缝主要承担设备运行中的主应力，在承受载荷较大的关键部位应用广泛，例如起重机主梁与端梁的连接部位，需通过对接焊缝确保足够的承载能力；贴角焊缝则主要发挥辅助补强作用，用于增强构件之间的连接强度，减少结构薄弱点，比如电梯轿厢框架的加强筋与主体框架的连接，通过贴角焊缝提升整体刚性，避免局部受力过大导致结构损坏。焊接过程中需根据构件形状和受力情况，合理规划焊缝位置和焊接顺序，确保复杂结构各部位受力均匀，满足设备长期安全运行的结构要求。

2.2 动载荷与疲劳性能要求

机电特种设备在运行过程中，多数构件会承受交变的动载荷，这对焊接接头的疲劳性能提出严格要求。焊接接头若存在应力集中问题，长期承受交变应力易出现裂纹，进而影响设备安全。需通过优化焊接工艺控制应力集中，比如合理设计焊缝外形，避免焊缝过渡处出现尖锐棱角，减少应力集中点的产生^[2]。对于设备关键部位，如起重机回转臂支撑板，这类部件在设备运转中反复承受载荷，需采用全熔透焊缝确保焊接接头的完整性和强度，从而延长部件的疲劳寿命。全熔透焊缝能使接头与母材形成整体受力结构，有效分散载荷，避免局部应力过大导致的疲劳损坏，保障设备在长期动载荷作用下的稳定运行。

2.3 材料兼容性要求

机电特种设备常涉及不同材质的金属连接，例如钢与铝的连接，由于两种金属的物理性能和化学性质差异较大，直接焊接易出现焊缝结合不良、脆性大等问题，需采用特种焊材或设计过渡层来改善焊接兼容性。特种焊材能调节焊缝金属的成分和性能，减少两种金属之间的性能差异，过渡层则可缓解两种金属在焊接过程中的热膨胀系数差异，降低焊接应力，避免焊缝开裂。对于高强度钢的焊接，这类材料本身硬度高、韧性较低，焊接过程中若温度控制不当，易产生冷裂纹。需严格控制预热温度，确保焊接区域温度均匀，减少温度梯度带来的应力，同时在焊接后进行适当的后热处理，消除焊接残余应力，改善焊缝及热影响区的组织性能，避免裂纹产生，保障高强度钢构件的焊接质量。

3 机电特种设备焊接现状分析

3.1 工艺应用现状

在工艺应用方面，自动化水平正持续提升。气保焊与埋弧焊凭借效率高、稳定性强的优势，在压力容器、大型钢结构等机电特种设备焊接场景中逐步替代手工

焊，尤其在批量生产环节应用频次显著增加。不过从整体行业来看，自动化率与国际先进水平相比仍有差距，部分中小型企业或复杂结构件焊接环节，手工焊仍占据一定比例。与此同时，特种焊接工艺的应用范围也在不断扩展。等离子焊与激光焊因具备热输入集中、焊接精度高的特点，在精密部件修复领域应用逐渐增多，例如在汽轮机叶片、液压阀芯等关键部件的磨损修复或缺陷修补中，能有效保证部件原有尺寸精度与性能，减少对部件整体结构的影响，为设备高效运转提供技术支持。

3.2 质量控制现状

人员资质管理是质量控制的重要环节，目前行业内要求焊工必须持证上岗，证书需对应具体焊接项目与材质类型。但在实际操作过程中，存在部分企业为追求效率，安排焊工从事超出证书允许范围的焊接工作，导致焊接质量难以得到有效保障。设备与工艺的匹配度同样影响焊接质量，部分中小企业受限于资金或技术更新节奏，仍在使用老化设备，这些设备的参数调节精度下降，无法精准适配不同材质、不同厚度工件的焊接工艺要求，进而影响焊缝成型的一致性与力学性能。无损检测已成为焊接质量检验的常规手段，射线检测与超声波检测在行业内应用广泛，能有效发现焊缝内部的裂纹、气孔、夹渣等缺陷。但不同企业在检测标准的执行上存在差异，部分企业为降低成本，简化检测流程或放宽判定标准，导致部分不合格焊缝流入后续环节。

3.3 行业痛点与挑战

设计与工艺的衔接问题是行业常见痛点，在设备设计阶段，设计人员往往更关注结构整体的完整性与承载能力，对焊接接头的细部设计重视不足，例如坡口形式选择未充分结合实际焊接工艺特点，可能导致焊接过程中出现熔合不良、焊透困难等问题，进一步增加后续质量风险。焊接变形控制是厚板焊接及复杂结构件焊接面临的主要挑战，厚板工件在焊接过程中受热不均，易产生角变形；复杂结构件因焊缝分布密集、拘束度差异大，容易出现波浪变形。目前行业内主要通过反变形法、刚性固定法等工艺手段控制变形，但这些方法对操作经验要求较高，且在部分复杂结构中效果有限，仍需进一步优化技术方案^[3]。材料与工艺的矛盾随着新材料应用愈发突出，高强钢、耐候钢等新材料在机电特种设备中的使用比例不断提升，这类材料对焊接热输入极为敏感，热输入过大易导致接头韧性下降，热输入过小则可能出现未焊透问题。如何根据材料特性优化焊接电流、电压、焊接速度等工艺参数，成为企业当前亟待解决的问题。

4 焊接工艺优化方向

4.1 智能化与自动化升级

在机电特种设备焊接领域,智能化与自动化升级是提升工艺水平的重要路径。焊接机器人凭借精准的动作控制和稳定的作业状态,能够应对复杂结构的焊接需求,尤其在多工位连续焊接场景中,可大幅减少人为操作误差。离线编程技术的推广应用,能在不影响生产进度的前提下,提前完成焊接路径规划与参数设置,进一步提升复杂结构焊接效率,比如针对起重机箱形梁等多焊缝构件,通过离线编程预设焊接顺序与角度,确保每道焊缝质量一致。智能监控系统的开发与应用同样关键。这类系统可实时采集焊接过程中的电流、电压、焊接速度等参数,通过数据分析判断焊接状态是否稳定,一旦发现参数偏离预设范围,能及时反馈并自动调整工艺参数,避免因参数波动导致焊缝缺陷。例如在电梯导轨焊接过程中,智能监控系统可实时监测电弧稳定性,当出现电流异常时迅速调节,保障导轨焊缝的平整度与强度,减少后续打磨与修复工作。

4.2 新材料与新工艺融合

面对高强钢、钛合金等新型材料在机电特种设备中的广泛应用,研发适配的低热输入焊接工艺成为重点。高强钢、钛合金对热输入较为敏感,过高热输入易导致材料性能下降,低热输入焊接工艺如脉冲MIG焊,通过脉冲电流控制电弧能量,减少焊接过程中对母材的热影响,降低焊缝及热影响区的软化、脆化风险,确保新材料构件焊接后仍能保持原有力学性能,适用于客运索道支架、游乐设施承重部件等对材料强度要求较高的场景。摩擦焊、搅拌摩擦焊等固态连接技术的探索应用,为特种设备焊接提供新方向。这类技术无需熔化金属,通过机械摩擦产生热量使材料达到塑性状态并实现连接,避免传统熔焊过程中可能出现的气孔、裂纹等缺陷,且焊接后构件变形量小、残余应力低。在异种金属连接场景中,如钢与铝的构件连接,搅拌摩擦焊能有效

改善两种材料的结合性能,提升接头可靠性,为特种设备轻量化设计提供工艺支持。

4.3 全生命周期质量管理

全生命周期质量管理的构建,需从数据贯通与工艺优化两方面入手。建立焊接工艺数据库是基础,数据库可整合设备设计阶段的结构参数、焊接工艺阶段的操作参数以及检测阶段的质量数据,实现设计-工艺-检测数据贯通。后续生产过程中,可通过数据库调取历史数据,为相似构件焊接提供工艺参考,便于追溯每道焊缝的生产信息,若出现质量问题,能快速定位原因并调整工艺。焊接残余应力对设备长期运行稳定性影响显著,推广焊接残余应力测试技术,可准确掌握不同焊接工艺下构件的应力分布情况。结合测试结果优化后热处理工艺,如调整保温温度与保温时间,能有效消除焊接残余应力,减少应力集中引发的裂纹风险。例如在大型游乐设施支撑柱焊接后,通过残余应力测试确定应力集中区域,针对性制定后热处理方案,提升支撑柱的抗疲劳性能,延长设备使用寿命。

结束语

机电特种设备焊接工艺复杂且关键,现有工艺在满足设备制造需求的同时,存在诸多有待解决的问题。智能化与自动化升级、新材料与新工艺融合以及全生命周期质量管理等优化方向,为提升焊接质量提供了可行路径。未来,随着技术不断进步,焊接工艺将更加完善,助力机电特种设备行业迈向更高水平。

参考文献

- [1]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.
- [2]李伟,胡学峰.特种设备压力容器焊接工艺分析[J].工程管理,2025,6(1):261-263.
- [3]赖春华.关于承压类特种设备焊接技术的分析[J].百科论坛电子杂志,2023(15):100-102.