

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，常用于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，能获得均匀高质量焊缝，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]李韦,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.