

轻量化材料焊接工艺在机械焊装中的应用实践研究

吕传涛 姜良忠

山东唐骏欧铃汽车制造有限公司 山东 淄博 255000

摘要: 为了适应机械制造轻量化发展需求,选了高强度钢、铝镁合金、纤维增强复合材料这几类材料,梳理了它们的焊接难点和工况要求。重点看了激光焊、搅拌摩擦焊、等离子弧焊的技术优势和应用情况,对比了不同工艺的质量、效率和适配差异。针对生产中工艺适配不够、焊接变形、质量控制薄弱等问题,给出了优化方案和全流程质控策略。工程验证表明,优化后的工艺能提高焊接质量和生产效益,给机械轻量化焊装生产做个参考。

关键词: 轻量化材料;焊接工艺;机械焊装;应用实践

引言:机械制造行业轻量化、精密化升级的趋势很明显,轻量化材料已经大量用在机械焊装领域。但轻量化材料的物理、热学性能跟传统钢材差别大,用传统焊接工艺容易导致构件变形、气孔、裂纹等缺陷,接头性能下降,产品良品率低,拖住了轻量化构件规模化应用的步伐。结合机械焊装的实际生产情况,分析了主流焊接工艺的应用特点,优化工艺参数和质量控制体系,给轻量化焊接生产中的实际问题找找解决办法。

1 机械焊装常用轻量化材料及焊接核心难点

1.1 机械焊装主流轻量化材料类型及性能

(1) 高强度钢材料。这种材料强度高、韧性好、成本低,是机械承重构件里主要的轻量化用材。因为可以做得很薄又有高强度,所以能在降低构件自重的同时,保证机械结构的整体稳定性,适合各种承重核心部件的焊装。(2) 铝、镁合金轻金属材料。密度低、导热好、耐腐蚀,减重效果很明显。整体力学性能满足不了重载要求,主要用在机械外壳、辅助支撑等非承重轻量化构件上,是常规机械轻量化改造常用的材料。(3) 纤维增强复合材料。轻量化效果在三种材料里是最好的,绝缘性和耐疲劳性也很出色。适合高端精密机械焊装,能应对特种复杂工况,通常用在高精度、高稳定性要求的特种机械构件上。

1.2 不同轻量化材料焊接共性与个性难点

(1) 共性焊接难点。各类轻量化材料热稳定性不太好,焊接时热输入容易引起构件变形、翘曲。它们的熔点、导热系数跟传统钢材差别大,传统焊接工艺不太跟得上,容易产生未焊透、气孔、裂纹等缺陷,而且焊接接头力学性能会下降,影响整体结构强度。(2) 高强度钢焊接难点。焊接过程中容易形成淬硬组织,带来冷裂纹、材质变脆的问题,同时会产生集中的焊接残余应力,长期用下来构件容易出现疲劳损伤,影响设备寿

命。(3) 铝镁合金焊接难点。材料表面容易形成致密氧化膜,焊接时容易产生夹渣、气孔;热膨胀系数大,焊接变形不好控制,直接导致焊接接头强度明显下降。

(4) 复合材料焊接难点。耐高温性能差,高温熔焊时容易出现基体烧蚀、纤维断裂,没法用常规熔焊工艺,焊接接头结合稳定性弱,成型质量不好保证^[1]。

1.3 机械焊装工况对焊接工艺的核心要求

(1) 质量要求。焊接接头的强度和刚度要跟构件服役工况对得上,不能有超标缺陷,焊接变形和残余应力也要控制好,保证焊装构件的尺寸精度和结构稳定性,让机械设备能长期稳定运行。(2) 效率要求。焊接工艺得适应工业批量焊装生产,自动化程度高一些,操作简单、成型快,加工和返修周期短,整体生产效率才能上去,跟上规模化生产的节奏。(3) 经济与环保要求。焊接工艺能耗要低,耗材成本能控制住,设备好维护,同时焊接烟尘、废料排放少,符合绿色生产的标准,生产效益和环保两头都得顾。

2 轻量化材料核心焊接工艺及在机械焊装中的应用实践

2.1 激光焊接工艺及应用实践

(1) 工艺原理与技术优势。激光焊接用高能量密度的激光束做热源,光束聚焦好,能定点集中加热。这个工艺热输入小、焊接速度快,工件受热范围好控制,热影响区宽度比传统焊接窄很多,能改善轻量化材料容易变形、翘曲的问题,适合各类高精度、小形变要求的机械焊装构件加工,很对轻量化薄壁构件焊接生产的路子。(2) 核心工艺参数控制。实际生产中要重点管好四个参数:激光功率、焊接速度、离焦量、保护气体流量。激光功率决定热输入大小和熔深效果,焊接速度影响焊缝成型是否均匀以及焊接效率,离焦量改变光束聚焦效果和受热范围,保护气体能隔绝空气、防止焊缝氧

化、减少焊接缺陷。这几个参数相互匹配、精准调整,是保证焊缝平整、提高接头力学性能的关键^[2]。(3)机械焊装应用案例。这个工艺已经用在高强度机械机架、铝合金精密机械壳体等核心构件的焊装生产上。跟传统弧焊比,激光焊接能大大减少薄壁轻量化构件的焊接变形量,焊缝更密实,基本没有气孔、未焊透、夹渣等常见缺陷,构件焊接良品率提高不少,精密机械构件的装配尺寸精度和长期服役结构稳定性更有保障。

2.2 搅拌摩擦焊接工艺及应用实践

(1) 工艺原理与技术优势。搅拌摩擦焊是一种固相焊接工艺,焊接时没有高温熔化环节,靠搅拌头高速旋转摩擦生热,让材料变软并完成连接。这个工艺从根上避开了铝镁合金、纤维复合材料焊接时容易产生气孔、裂纹、基体烧蚀、纤维断裂等问题,焊接接头组织均匀、性能稳定,整体可靠性比传统熔焊好不少。(2) 核心工艺参数控制。这个工艺的质量主要靠四个参数:搅拌针转速、焊接行进速度、轴肩下压量、搅拌头倾斜角度。转速合适了,焊接区域材料才能充分均匀地塑化;行进速度跟得上,能避免焊缝出现咬边、未焊透、成型不均等缺陷;下压量和倾斜角度控制得准,焊接塑性材料就能流动充分、有序,消除焊接盲区,最后实现无缺陷、高强度、高稳定性的焊接连接^[3]。(3) 机械焊装应用案例。目前这个工艺已经广泛用在工程机械轻量化构件的焊装上,比如铝合金油箱、轻量化支撑臂、轻金属机架等核心承重构件。它解决了铝镁合金焊接变形大、接头强度不够、容易失效这些老问题,焊出来的接头抗疲劳、抗冲击性能好,能适应重载机械高强度、高负荷的复杂工况,设备故障少了,使用寿命也长了不少。

2.3 等离子弧焊工艺及应用实践

(1) 工艺原理与技术优势。等离子弧焊用压缩等离子弧做热源,电弧能量集中、穿透力强、加热均匀,焊缝成型平整规整。跟常规焊接比,这个工艺能焊中厚板轻量化材料,熔深大、接头承载能力强,可以满足机械承重、受力构件的高强度要求,适合中厚板轻量化构件批量生产。(2) 核心工艺参数控制。要控制好焊接电流、等离子气流量、喷嘴高度和焊接速度。焊接电流决定电弧能量和熔深,等离子气流量影响电弧稳定性,喷嘴高度跟焊接精度关系大。这几个参数配合好了,能避免未熔合、咬边、焊缝不均匀等常见缺陷,保证焊接质量稳定。(3) 机械焊装应用案例。这个工艺主要用在焊高强度中厚板机械底座、轻量化承重支架等核心构件,既顾得上焊接效率,也顾得上接头承载性能,既能保证重型机械构件的结构强度,又能满足工业批量生产的效

率要求,是中厚板轻量化承重构件的主流焊接工艺。

2.4 不同焊接工艺在机械焊装中的应用对比分析

(1) 质量对比。三种工艺的焊接质量差别不小。搅拌摩擦焊没有高温熔焊带来的那些缺陷,焊缝质量最好、接头最稳;激光焊热变形极小、精度最高,适合薄壁精密构件;等离子弧焊熔深大、承载性能好,更适合中厚板承重构件。每种工艺的质量优势对应不同的应用场合^[4]。(2) 效率与成本对比。激光焊自动化程度高、焊接速度快,生产效率最高,但设备和运维成本也高;等离子弧焊工艺成熟、操作方便、价格适中,综合生产成本低;搅拌摩擦焊专用设备投入不小,但焊接缺陷少、返修率低,后期运维成本更低,长期批量生产更划算。(3) 工况适配对比。结合各类工艺的特点,可以按工况来选:薄壁精密轻量化构件优先选激光焊;铝镁合金、复合材料等容易出缺陷的材料,优先用搅拌摩擦焊;中厚板高强度承重构件适合等离子弧焊。这个选型标准能指导工程实践,为不同的机械焊装工况提供合理的工艺适配方案。

3 机械焊装轻量化焊接工艺优化与质量控制策略

3.1 焊接工艺现存典型问题

(1) 工艺参数适配性不足。目前机械焊装生产中,多数企业用通用化焊接参数干活,没有针对高强度、铝镁合金等不同轻量化材料的特性,以及板厚、结构差异来做参数定制。固定的通用参数适应不了多变的生产工况,容易引起气孔、未焊透、裂纹等缺陷,焊接接头性能达不到要求。(2) 变形与残余应力管控缺失。轻量化材料热敏感性强,焊接受热后容易产生不均匀变形。现有生产流程缺少系统、精准的变形管控措施,也没有配套的残余应力消除工艺,构件焊后容易出现翘曲、尺寸偏差等问题,影响机械构件的装配精度和结构稳定性,留下质量隐患。(3) 全流程质量管控体系不完善。现阶段质量检测大多靠人工肉眼检查,只能看出焊缝表面成型好不好,对构件内部的微裂纹、隐蔽气孔等缺陷检出率很低。同时缺少焊前、焊中、焊后的全链条管控机制,生产过程中的工艺波动没法及时掌握,批量生产的质量稳定性比较差。

3.2 基于生产实践的焊接工艺优化方案

(1) 参数精细化优化。以质量稳定为目标,用大量焊接试验数据,针对不同轻量化材质、不同板厚的机械构件,找出最优焊接参数,建立标准化的工艺数据库。生产时根据构件工况直接调取参数,避免通用参数不合适的问题,从源头把好焊接基础质量。(2) 焊接顺序与工装优化。为了控制焊接变形,调整传统焊接顺序,用

对称、分段交错的焊法,分散焊接热输入。同时配上专用工装夹具,把构件固定住,限制焊接过程中的变形位移,提高焊后构件的尺寸精度和成型一致性。(3)复合工艺适配优化。针对异形、复杂结构轻量化构件的焊接质量难点,用激光焊加搅拌摩擦焊的复合工艺。激光焊精度高,用来保证构件精密部位的焊接质量;搅拌摩擦焊没有缺陷、强度高,用来强化核心接头性能。这样两边都能顾上,整体精度和结构强度都有了,解决复杂构件的质量短板^[5]。

3.3 全流程焊接质量控制体系构建

(1)焊前质量控制。把好轻量化原材料进厂检验关,挑材质合格、没瑕疵的母材;定期校准焊接设备、检测保护气体纯度,让设备运行精度有保证。结合构件工况提前定好专属工艺方案,对焊接区域做好打磨、除氧化膜等预处理,从根上避开基础性的焊接缺陷。(2)焊中过程控制。建立焊接实时监控体系,全程盯着焊接温度、行进速度、气体流量、压力等关键指标,动态微调工艺参数,让焊接过程稳定可控。电弧波动、热输入异常等问题一出现就及时处理,防止批量出现焊接质量问题。(3)焊后检测与矫正。改掉传统人工检测的老办法,用超声波、射线无损检测技术,全面排查焊缝内部的微观缺陷。对焊后变形的构件,用机械矫正、低温热处理等方式校正尺寸、消除残余应力,保证焊装构件的尺寸精度和结构可靠性。

3.4 工程应用效果验证

(1)焊接质量验证。对比工艺优化前后的生产数据,看焊缝缺陷率、焊接接头抗拉强度、硬度以及构件尺寸偏差等核心指标,判断优化工艺对消除缺陷、提升

接头性能、控制变形的效果,保证焊接质量达标。(2)生产效益验证。统计优化工艺后的生产数据,对比分析生产周期、产品良品率、耗材及运维成本的变化。优化后的标准化工艺能降低返修率,提高生产自动化水平,缩短生产周期,生产线整体经济效益上去了。(3)服役性能验证。用模拟实际复杂工况做耐久性试验,检测轻量化焊装构件的耐疲劳、耐腐蚀、抗变形性能,看优化后焊接接头的长期稳定性,确保构件能顶住机械设备长期重载、高频次的使用要求。

结束语

梳理了三类轻量化材料的焊接难点,分析了三种主流焊接工艺的适用场景和应用效果,针对现场生产中的问题制定了工艺优化和全流程质量管控方案。实际生产证明,优化策略能控制焊接变形、减少焊接缺陷,提高构件结构稳定性和量产效率。后续可以继续优化复合焊接工艺,让它适应复杂异形构件和极端工况,把轻量化材料在高端机械焊装领域的产业化应用再往前推一推。

参考文献

- [1]张越,卢岩,彭锐涛.轻量化材料新型连接工艺与应用现状[J].机械工程学报,2024,60(4):259-265.
- [2]李雨,周利.搅拌摩擦焊技术在轻量化材料焊装中的应用、发展与挑战[J].电焊机,2025,55(8):45-52.
- [3]刘凯,赵阳.汽车机械焊装中铝合金薄板机器人焊接工艺及缺陷控制[J].轻工机械,2022,40(3):76-80.
- [4]薛飞,何迪秋,周海波.磁场辅助镁铝异种轻量化材料机器人激光焊工艺研究[J].焊接学报,2025,46(2):88-94.
- [5]王浩宇.机械焊装生产线中轻量化材料焊接工艺优化研究[J].机械制造与自动化,2023,52(5):162-165.