

大型中厚板铝合金框架氩弧焊焊接工艺分析

屈柯斌

陕西黄河集团有限公司 陕西 西安 710043

摘要: 大型中厚板铝合金框架氩弧焊以熔化极氩弧焊(MIG)为主流工艺,利用直流反接实现高效熔深,适用于6mm以上板材。脉冲MIG焊可精确控制熔滴过渡,提升焊缝成形质量。针对厚板需求,变极性氩弧焊(VP-TIG)融合交流与直流优势,强化阴极雾化效果,减少气孔与未熔合缺陷。工艺关键在于严格匹配焊丝成分、控制纯度 $\geq 99.99\%$ 的氩气或氩-氦混合气体保护,并优化电流密度、焊接速度等参数以控制热输入与变形。

关键词: 大型中厚板铝合金框架;氩弧焊;焊接工艺

引言:铝合金因密度低、比强度高及耐腐蚀性优良,广泛应用于航空航天、船舶制造及轨道交通等领域的大型框架结构。然而,中厚板铝合金焊接面临氧化膜清理、热输入控制导致的变形及气孔裂纹等缺陷挑战。氩弧焊凭借电弧稳定、保护效果优异的特点,成为主流焊接工艺。本文系统分析手工钨极氩弧焊(TIG)、熔化极氩弧焊(MIG)及变极性氩弧焊(VP-TIG)的适用性,并结合材料选择、参数优化及难点控制,提出工艺改进策略。

1 大型中厚板铝合金氩弧焊工艺基础

1.1 氩弧焊分类与适用性

(1) 手工钨极氩弧焊(TIG):虽更适用于厚度 $< 6\text{mm}$ 薄板,但在大型中厚板铝合金打底焊或薄壁接头焊接中仍可用。采用交流电源时,“阴极清理”作用能有效去除表面氧化膜,避免杂质影响焊缝质量;不过对较厚板材,单道焊效率低,常需配合多层多道焊。(2) 熔化极氩弧焊(MIG):是大型中厚板铝合金焊接主流工艺。直流反接大幅提高热输入效率,满足 $\geq 6\text{mm}$ 中厚板熔深要求;其中脉冲MIG焊通过精确控制熔滴过渡,减少飞溅、提升焊缝成形,尤其适合中厚板长焊缝连续焊接。(3) 变极性氩弧焊(VP-TIG):针对大型厚板需求,融合交直流优势。调节极性转换参数可增强阴极雾化效果,更彻底清理厚板氧化膜,同时优化电弧稳定性,减少气孔、未熔合等缺陷,适用于较厚铝合金结构件焊接。

1.2 焊接材料选择

(1) 焊丝匹配需严格遵循合金成分兼容性原则:ER4043焊丝因含硅元素,能有效改善6061铝合金焊接接头的流动性与抗裂性,适用于6061合金大型中厚板结构的焊接;ER5356焊丝含镁元素,与5083铝合金成分匹配度高,可保证5083合金中厚板焊接接头的强度与耐腐蚀

性,满足相关工程结构性能要求。(2) 保护气体纯度需达到 $\geq 99.99\%$ 的氩气标准,避免因气体杂质导致焊缝出现气孔、夹杂等缺陷,保障中厚板焊接质量稳定性。对于厚度较大的铝合金板材,采用氩气(Ar)与氦气(He)混合气体作为保护气,可提高电弧温度,增加熔深,解决厚板焊接时熔透不足的问题,同时改善焊缝金属力学性能^[1]。

1.3 关键工艺参数

(1) 电流密度控制在 $30\text{-}50\text{A}/\text{mm}^2$ 范围内,需根据中厚板具体厚度调整:较厚板材选择较高电流密度以确保熔深,较薄中厚板段则适当降低电流密度,防止烧穿;焊接速度设定为 $8\text{-}12\text{m}/\text{h}$,过快易导致熔合不良,过慢会增加热输入,引发板材变形;气体流量保持 $8\text{-}16\text{L}/\text{min}$,流量过低无法有效保护熔池,过高则会造流紊流,影响电弧稳定性。(2) 喷嘴直径选用 $12\text{-}20\text{mm}$,需结合焊接电流与保护范围匹配:大电流焊接时搭配大直径喷嘴,保证保护气体覆盖面积,小电流焊接则用小直径喷嘴,减少气体浪费;钨极伸出长度控制在 $4\text{-}6\text{mm}$,伸出过长会降低电弧稳定性,过短则可能导致喷嘴过热,影响焊接过程持续进行,确保大型中厚板铝合金焊接工艺稳定可靠。

2 大型中厚板铝合金焊接难点与解决方案

2.1 氧化膜处理

(1) 机械清理是基础手段,常用钢丝刷与角磨机打磨。钢丝刷需选专用不锈钢材质,避免碳钢残留铁锈引发夹杂;角磨机搭配 $80\text{-}120$ 目氧化铝砂轮片,打磨范围覆盖焊缝边缘 50mm 以上,按厚度控制打磨深度: $6\text{-}15\text{mm}$ 厚板材 $0.1\text{-}0.2\text{mm}$ 、 $15\text{-}30\text{mm}$ 厚 $0.2\text{-}0.3\text{mm}$ 、 $30\text{-}40\text{mm}$ 厚 $0.3\text{-}0.4\text{mm}$,同时避免过度打磨损伤板材。(2) 化学清洗适用于油污重或批量预处理,分两步:先用丙酮擦拭焊接区域(含拼接缝隙)去油污,防焊接时燃烧产生气

孔；再用5%-10%NaOH溶液碱洗，浸泡时间按厚度调整（6-15mm厚3分钟、15-30mm厚4分钟、30-40mm厚5分钟），碱洗后立即流动清水冲洗，再用10%硝酸中和（时长同碱洗），最后烘干或晾干确保焊接区干燥^[2]。（3）时效控制是防氧化膜二次生成关键。清理后需4小时内完成焊接，若无法及时焊接，用专用防锈纸覆盖或喷涂临时保护剂；再次焊接前需二次检查，若氧化膜再生需重新清理。

2.2 焊接变形控制

（1）焊接顺序优化是核心措施，含对称焊、跳焊与逐步退焊。对称焊按板材结构选中心轴线/对称基准线，两名焊工同步从对称位置向两端焊接；跳焊用于长焊缝，分段（每段150-200mm）间隔焊接；逐步退焊从焊缝终点向起点焊，每段100mm，待温度降至150℃以下再焊下一段，减少累计变形。（2）反变形法通过预设补偿量抵消收缩变形。按厚度计算收缩余量（6-15mm厚0.1%-0.15%、15-30mm厚0.15%-0.25%、30-40mm厚0.25%-0.3%），在工装夹具预留间隙；用螺栓压板、槽钢框架等刚性夹具固定，夹具间距按厚度设（6-15mm厚500mm、15-30mm厚400mm、30-40mm厚300mm），焊接后冷却至室温再拆夹具，防止二次变形。（3）层间温度与分段退焊管辅助减变形。层间温度 $\leq 150^{\circ}\text{C}$ ，用红外测温仪实时监测，超温则暂停冷却；分段退焊长度 $\leq 200\text{mm}$ （6-15mm厚200mm、15-30mm厚150mm、30-40mm厚100mm），每段焊后轻击焊缝释应力，避免热输入集中。

2.3 气孔与裂纹预防

（1）气孔预防针对氢析出问题，采用强规范工艺：6-15mm厚板材电流180-220A（提10%）、速度12-14m/h；15-30mm厚电流280-320A（提12%）、速度10-12m/h；30-40mm厚电流330-370A（提15%）、速度8-10m/h，缩短熔池凝固时间助氢逸出。同时控制保护气体纯度 $\geq 99.99\%$ ，检查气管密封性；焊丝烘干（ER4043焊丝120℃/1小时、ER5356焊丝150℃/2小时）去水分^[3]。

（2）裂纹预防从焊丝与预热入手。焊丝选“成分相近”类型（如5083铝合金配ER5356焊丝）降热裂纹倾向；厚度 $\geq 12\text{mm}$ 板材焊前预热，12-20mm厚100℃、20-30mm厚120℃、30-40mm厚150℃，用火焰/电加热板预热（范围焊缝边缘80-100mm），降温度梯度减应力。焊后缓冷，按厚度覆盖保温棉（6-15mm厚50mm、15-30mm厚65mm、30-40mm厚80mm），冷却至室温减裂纹风险。

2.4 焊后焊缝检测

（1）外观检测结合肉眼观察与量规测量。查焊缝表

面有无气孔、裂纹等缺陷，余高按厚度控制（6-15mm厚0-2mm、15-30mm厚0-3mm、30-40mm厚0-4mm，过高需打磨）；焊缝宽比坡口每侧宽1-2mm，凹陷 $\leq 0.5\text{mm}$ 。

（2）无损检测按厚度选方法：厚度 $< 20\text{mm}$ 用渗透检测（PT），先清理焊缝表面，涂渗透剂静置5-10分钟，经清洗、显像查表面缺陷；厚度 $\geq 20\text{mm}$ 用射线（RT）或超声波（UT）检测。RT按厚度调焦距（6-15mm厚300mm、15-30mm厚400mm、30-40mm厚500mm）；UT用2.5-5MHz纵波直探头（直径10-20mm），专用机油耦合， $\Phi 2\text{mm}$ 平底孔校准灵敏度，检测合格率 $\geq 98\%$ ^[4]。

（3）力学性能检测验证强度，从试板取拉伸、弯曲、冲击试样。拉伸试样宽20mm、标距100mm（6-15mm厚试样同板材厚， $> 15\text{mm}$ 厚试样10mm厚）；弯曲试样宽30mm、长150mm，180°弯曲（弯心直径3倍试样厚）；冲击试样为V型缺口（深2mm），-40℃下试验。要求拉伸强度 \geq 母材90%，弯曲无裂纹，冲击功 $\geq 27\text{J}$ 。

3 大型中厚板铝合金框架氩弧焊焊接工艺优化与创新

3.1 参数优化

（1）正交试验法是确定大型中厚板铝合金框架氩弧焊最佳工艺参数的高效手段。试验设计以电流（30-50A/mm²）、焊接速度（8-12m/h）、气体流量（8-16L/min）为核心变量，每个变量设置3-4个水平，通过正交表安排试验，避免全面试验的繁琐性。例如针对20-30mm厚6061铝合金框架，可设计L9(3⁴)正交表，以焊缝强度、变形量、气孔率为评价指标，经极差分析与方差分析，筛选出最优参数组合—电流40A/mm²、焊接速度10m/h、气体流量12L/min，焊丝选用直径1.6mm的ER4043，走丝速度400mm/min，相比传统经验参数，焊缝合格率可提升15%-20%。（2）数值模拟技术为工艺参数优化提供精准指导，常用SYSWELD等专业焊接模拟软件。针对大型铝合金框架复杂结构（如多接头、厚壁梁柱），通过建立三维有限元模型，输入母材性能、焊接材料参数及初步工艺方案，模拟焊接过程中的温度场、应力场与变形分布。例如模拟25mm厚5083铝合金框架角接头焊接时，采用ER5356焊丝（直径1.6mm），电流320A，走丝速度420mm/min，可预测不同电流下的熔池形态与残余应力峰值位置，据此调整电流密度与焊接顺序，将框架整体变形量控制在2mm以内，减少后续矫正工序成本。

3.2 新型工艺应用

（1）激光-电弧复合焊突破传统氩弧焊在厚板焊接中的局限，尤其适用于30mm以上大型铝合金框架。该工艺以高能量密度激光为先导，提前熔化部分母材，降低电弧焊接难度，同时电弧补充热量，扩大熔池范围，实

现“1+1 > 2”的协同效应。相比单一MIG焊，激光-电弧复合焊热输入可降低25%-30%，熔深增加40%以上，且焊缝晶粒更细小，接头抗拉强度提升10%-15%。例如焊接40mm厚6082铝合金框架主梁时，采用10kW光纤激光+MIG复合焊，单道焊可实现全熔透，焊接效率较传统多层焊提高2倍。（2）搅拌摩擦焊（FSW）为大型铝合金框架异种材料接头焊接提供创新解决方案。该工艺通过高速旋转的搅拌头与母材摩擦生热，使接头区域金属处于塑性状态并发生流动，无需熔化金属，从根本上避免气孔、裂纹等缺陷。在铝合金框架与不锈钢连接件的异种接头焊接中，FSW可有效控制界面金属间化合物生成，保证接头耐腐蚀性与力学性能。例如焊接5083铝合金框架与304不锈钢法兰时，采用搅拌头转速1200r/min、焊接速度300mm/min的参数，接头剪切强度可达180MPa以上，且无氧化变色问题。

3.3 自动化与智能化

（1）自动化焊接技术大幅提升大型铝合金框架焊接稳定性，核心是机器人路径规划与熔池监控。依托框架三维模型，用离线编程软件（如RobotStudio）规划路径，采用“分段连续焊接+姿态平滑过渡”策略，避免轨迹突变致焊缝成形差。焊枪搭载视觉与红外温度传感器，实时采集熔池尺寸、温度数据，闭环控制系统据此调参数：熔池变小时自动提电流5%-8%，温度超200℃时加快焊接速度，保障焊缝质量一致。（2）机器学习推动

工艺参数智能化优化。收集大量焊接数据（母材厚度、接头类型、参数、检测结果）构建数据集，训练神经网络模型。模型可自主学习参数与质量的映射关系，如针对15-40mm厚6061铝合金框架，输入结构尺寸与质量要求，10秒内输出最优电流、速度、气体流量组合，预测准确率超92%。同时，模型能通过实时数据反馈迭代优化，适应新材料、新结构焊接，降低人工试错成本。

结束语

大型中厚板铝合金框架氩弧焊工艺需兼顾效率与质量，通过科学选配焊丝、精准控制保护气体及优化电流、速度等参数，可有效解决氧化膜、变形及缺陷问题。未来，随着激光-电弧复合焊、搅拌摩擦焊等新技术与自动化、机器学习技术的深度融合，焊接工艺将向高效化、智能化方向加速发展，为高端装备制造提供更可靠的技术支撑。

参考文献

- [1]王顺锋.铝合金焊接加工工艺及焊接裂纹的防治措施[J].南方农机,2020,(14):161-162.
- [2]吴水龙.铝合金焊接加工工艺及焊接裂纹的防止措施[J].中国新技术新产品,2020,(18):191-192.
- [3]林淑媛.氩弧焊焊接工艺选择浅谈[J].科学技术哲学,2020,(07):74-75.
- [4]李洪.铝合金焊接工艺要点及焊接裂纹防治措施[J].建筑设计及理论,2025,(10):92-93.