

手工氩弧焊在航天铝合金薄壁结构件焊接中的工艺参数优化研究

张 喜

首都航天机械有限公司 北京 100076

摘要: 随着我国航天事业的飞速发展,对飞行器结构轻量化、高可靠性的要求日益严苛。铝合金因其优异的比强度、良好的导热导电性及加工性能,成为制造航天器薄壁结构件(如燃料贮箱、仪器舱体、支架等)的首选材料。然而,铝合金固有的物理化学特性(如高热导率、低熔点、强氧化性)使其焊接过程极具挑战性,尤其是在厚度通常小于2mm的薄壁结构件上进行手工钨极氩弧焊(TIG)时,极易产生烧穿、变形、气孔、裂纹等缺陷。本文系统分析了影响手工氩弧焊焊接质量的关键工艺参数,包括焊接电流、电弧电压、焊接速度、保护气体流量与纯度、钨极几何参数及焊枪倾角等,并深入探讨了这些参数间的耦合交互作用。在此基础上,结合正交试验设计、响应面法(RSM)及基于有限元的数值模拟等现代优化方法,构建了一套针对航天铝合金薄壁结构件的手工氩弧焊工艺参数优化策略。

关键词: 手工氩弧焊; 航天铝合金; 薄壁结构件; 工艺参数; 优化方法; 焊接缺陷

引言

航天工业体现国家综合实力,飞行器结构轻量化设计成趋势。高强度铝合金因比强度高、低温韧性好、抗腐蚀性强、加工工艺成熟,广泛应用于火箭箭体等关键部位。这些部位大量结构件呈“薄壁”特征,对焊接接头要求苛刻,微小缺陷可能引发灾难性失效。手工钨极氩弧焊(TIG)因电弧稳定、热输入可控等优点,是高质量铝合金焊接的首选方法。但手工操作依赖焊工技能、经验,引入人为不确定性。且铝合金焊接窗口窄,热输入不当会引发熔穿、变形或熔深不足等问题。此外,其表面氧化膜熔点高,清理不净或能量不足会致夹渣和未熔合;液态铝易析氢形成气孔。因此,科学、系统优化手工氩弧焊工艺参数,找到“最佳参数组合”,是确保航天铝合金薄壁结构件焊接质量的核心。本文将梳理关键因素,剖析机理,提出工艺参数优化方法论。

1 航天铝合金薄壁结构件焊接的特殊性与挑战

1.1 材料特性带来的焊接难题

铝合金在焊接过程中所面临的诸多挑战,根植于其独特的物理化学性质。首先,其高热导率约为钢的三倍,这意味着焊接时热量会迅速从熔池向四周母材散失。为了维持一个稳定、流动的熔池,必须施加足够高的热输入。然而,这一需求与薄壁结构件的物理限制形成了尖锐矛盾——过高的热输入会瞬间使薄板局部过热,导致熔池失去支撑而烧穿。其次,铝在空气中会立即生成一层致密、坚硬且熔点极高的 Al_2O_3 氧化膜。这层膜不仅物理上阻碍了液态金属的良好润湿与熔合,一旦被卷入熔池,便会

成为难以去除的夹杂物,严重影响接头的力学性能。尽管交流TIG利用阴极雾化效应可以有效破碎这层氧化膜,但其效果高度依赖于电弧的稳定性,而在手工操作中,这种稳定性恰恰是最难保证的。再者,液态铝对氢具有极高的溶解能力,而凝固时氢的溶解度骤降两个数量级。如果熔池冷却不够迅速,过饱和的氢就会析出并聚集形成气孔,这是铝合金焊接中最常见且最难根除的缺陷之一^[1]。最后,铝合金较大的线膨胀系数(约为钢的两倍)使得焊接过程中因不均匀加热和冷却而产生的内应力和变形远大于钢铁材料,对于刚性本就不足的薄壁结构而言,这种变形往往是不可接受的,会严重损害产品的装配精度和结构完整性。

1.2 薄壁结构带来的工艺限制

薄壁结构本身为焊接工艺带来了额外的、严峻的限制。由于其自身热容量极小,对热输入的变化表现出极高的敏感性。即便是焊接电流或速度发生微小的波动,也可能导致熔深出现剧烈变化,从而在未焊透与烧穿这两个极端缺陷之间摇摆,给焊接过程的稳定性控制带来了巨大困难。与此同时,薄板的刚性差,抵抗焊接热应力的能力弱,在焊接热循环的作用下极易发生波浪变形、角变形等宏观失稳现象。这种变形不仅影响产品的外观,更会削弱其承载能力和疲劳寿命。此外,薄壁件在装配过程中难以做到绝对平整,常常存在微小的间隙或错边。在高能量密度的电弧作用下,这些微小的装配误差会被迅速放大,导致熔池金属在重力或表面张力作用下下塌,甚至直接烧穿,因此对工装夹具的设计精度和装配工艺提

出了极为苛刻的要求。

2 影响手工氩弧焊质量的关键工艺参数及其交互作用

手工TIG的最终焊接质量并非单一参数作用的结果,而是多个工艺参数相互耦合、共同作用的复杂产物。孤立地看待任何一个参数都是片面的,必须深入理解它们之间的动态交互关系。

2.1 核心热输入参数

焊接电流、电弧电压和焊接速度是构成热输入体系的三大支柱。焊接电流是决定电弧功率和熔深最直接的因素,对于1mm左右的薄壁铝合金,其值通常被严格限定在40~80A的狭窄区间内,稍有不慎便会导致烧穿或熔合不良。电弧电压主要由焊工手动控制的电弧长度决定,它直接影响熔宽和电弧的挺度。电压过高,电弧变长发散,不仅降低了能量集中度,削弱了阴极雾化效果,还会使保护气体覆盖范围扩大但浓度稀释,增加了焊缝被氧化和产生气孔的风险。焊接速度则决定了单位长度焊缝所接收的能量,即线能量。较快的焊接速度有助于减少总的热输入,从而抑制烧穿和变形,但过快的速度又会导致热输入不足,造成熔池冷却过快、流动性差,引发未熔合等缺陷^[2]。这三个参数共同决定了线能量($E=I \cdot U/v$),而优化的核心目标就是在确保熔池充分熔合、良好流动的前提下,将线能量精准地控制在满足要求的最小值,以实现对热影响区和焊接变形的有效抑制。

2.2 保护气体系统参数

氩气保护系统是手工TIG成功焊接铝合金的生命线。保护气体流量必须恰到好处,过小则无法有效驱赶焊接区域的空气,导致焊缝金属与氧气、氮气发生反应,形成氧化物、氮化物夹杂和气孔;流量过大则会在喷嘴出口处形成紊流,反而将周围空气卷吸进保护区,同样会污染熔池。通常,配合大直径气体保护罩,流量需稳定在8~15L/min的范围内。更为关键的是气体的纯度与干燥度,航天级焊接对此有着近乎苛刻的要求,必须使用纯度不低于99.999%(5N级)的高纯氩气,并配备高效的气体干燥过滤装置,以彻底去除水分和氧气,这是从源头上杜绝氢致气孔的根本保障。

2.3 电极与操作参数

钨极作为电弧的载体,其选择和状态对焊接过程至关重要。对于交流TIG焊接铝合金,普遍采用含铈或镧等稀土元素的钨极,因为它们具有更低的电子逸出功,能够提供更稳定的引弧和稳弧性能。钨极的直径必须与焊接电流相匹配,过细则易在高温下烧损蒸发,污染焊缝;过粗则会使电弧过于发散,难以集中能量。在交流焊接过程中,钨极端部会自然形成一个球冠,其大小直接影响

电弧的集中度和稳定性,理想的球冠直径约为钨极直径的1.5倍。此外,焊工的操作手法是手工焊区别于自动化焊接的核心变量。焊枪的倾角(通常前倾 10° ~ 15° 以利观察)、运条的匀速性、送丝的节奏以及对电弧长度的精细控制,都直接决定了热输入在时间和空间上的分布,进而深刻影响着熔池的形态、冶金反应和最终的焊缝成形质量。这种高度依赖人为主观能动性的特点,既是手工焊灵活性的体现,也是其质量波动的主要根源。

3 工艺参数优化方法体系

面对如此复杂的多参数、强耦合系统,传统的凭经验“试错法”不仅效率低下,而且成本高昂,难以满足航天产品对高可靠性和一致性的严苛要求。为此,亟需构建一个分层次、多方法融合的科学优化体系。

3.1 基于正交试验设计的初步筛选

正交试验设计是开启系统化优化之门的第一把钥匙。其核心思想在于利用正交表这一数学工具,从庞大的全因子试验空间中,高效地抽取一组具有“均匀分散、整齐可比”特性的代表性试验点。对于手工TIG这类涉及四到五个关键因素(如电流、电压、速度、气体流量、钨极伸出长度)且每个因素有三到四个水平的复杂问题,正交试验能将原本需要数百次的全面试验,精简至十几次甚至更少。通过执行这些精心设计的试验,并对焊缝的宏观形貌、微观组织及无损检测结果进行量化评价,工程师可以运用直观分析(如极差分析)快速锁定对焊接质量影响最为剧烈的“主控因素”,同时也能初步判断各因素间的交互作用强度。更重要的是,方差分析(ANOVA)能够为这种判断提供统计学上的置信度,区分出哪些因素的影响是显著的,哪些可以暂时忽略。这一阶段的成果,即一组初步的“较优参数组合”,为后续的精细化探索精准地划定了靶区,避免了在无效区域内的资源浪费。

3.2 基于响应面法(RSM)

当优化目标从“找到重要因素”转向“精确找到最优值”时,响应面法(RSM)便成为不可或缺的利器。它建立在正交试验的初步结论之上,聚焦于主控因素及其邻近区域。RSM通过中心复合设计(CCD)或Box-Behnken设计等二次回归设计方法,在局部空间内布设试验点,旨在拟合出一个能够精确描述工艺参数(自变量)与焊接质量指标(因变量,如抗拉强度、气孔率、角变形量)之间定量关系的连续数学模型,通常是一个包含一次项、二次项和交互项的多元二次多项式。该模型的价值不仅在于其预测能力——输入任意一组参数即可预知其对应的焊接质量,更在于其强大的寻优功能。借助成熟的优化算法,可以在模型定义域内求解全局或局部最

优解,从而获得理论上能使综合性能指标达到最佳的精确参数组合^[3]。此外,RSM生成的三维响应曲面图和二维等高线图,能够以极其直观的方式揭示参数间的复杂交互效应,例如,焊接速度对抗拉强度的影响如何随电流的变化而改变,这为工艺窗口的稳健性设计提供了深刻的理论依据。

3.3 基于有限元数值模拟的虚拟优化

物理试验固有的高成本、长周期和破坏性,是制约工艺开发速度的重要因素。基于有限元法(FEM)的焊接数值模拟技术为此提供了一条高效的“虚拟验证”路径。通过在计算机中构建一个集热传导、流体流动(熔池)、相变、热-力耦合乃至氢扩散行为于一体的多物理场耦合模型,工程师可以在实际焊接发生之前,对不同工艺方案下的整个物理过程进行全景式、高精度的仿真。这种虚拟优化能够清晰地可视化温度场的时空演变、熔池的动态形状、凝固前沿的推进以及残余应力与变形的最终分布。例如,通过模拟可以提前预判某组参数是否会导致熔池底部过热而烧穿,或者焊后变形是否会超出公差范围。这种“先算后焊”的模式,使得在物理世界中进行的试验更具针对性和成功率,极大地缩短了工艺开发周期,并降低了昂贵的试错成本。数值模拟与RSM模型相互印证、相互补充,共同构成了现代焊接工艺优化的数字孪生基础。

3.4 人因工程与标准化作业的融入

然而,无论数学模型多么精妙,数值模拟多么逼真,最终的焊接操作仍需由焊工在真实环境中完成。因此,一个完整的优化体系绝不能忽视“人”这一核心要素。手工焊的质量稳定性,从根本上取决于焊工技能的熟练度、操作的一致性以及对工艺规程的理解与执行力。为此,必须将优化成果有效地转化为可执行的标准。这首先体现在编制详尽、严谨的焊接工艺规程(WPS)上,该文件不仅要明确列出所有优化后的静态参数(如电流、电压、气体流量),还应包含对动态操作手法的具体指导,例如推荐

的焊枪角度、运条方式、送丝频率等。其次,必须建立严格的焊工资质认证与持续培训机制,确保每一位上岗焊工都具备稳定复现高质量焊缝的能力^[4]。最后,积极探索和应用智能化的过程监控技术,如基于电弧电信号分析的稳定性监测或基于机器视觉的熔池形态识别,对焊接过程进行实时反馈与预警,形成“标准工艺+熟练工人+智能监控”的闭环质量保障体系,从而将实验室里的最优参数,真正、稳定地转化为生产线上的卓越产品。

4 结语

本文研究得出:热输入精准控制是优化核心,要在保证熔合质量时将线能量降至最低,平衡烧穿、变形与熔合不足的矛盾;各工艺参数耦合效应显著,需系统性优化;采用正交试验、响应面法和数值模拟的“三步走”策略,可高效找到最优工艺窗口,提升焊接质量与效率;将优化成果固化成标准规程,并加强人员培训与过程监控,是确保效果稳定落地的关键。展望未来,智能制造与人工智能深度融合,手工钨弧焊优化将更智能化。开发能依据实时传感信息动态调整工艺参数的智能焊接系统成为可能,这种闭环控制系统可削弱对手工技能的依赖,实现自主决策优化,为航天产品制造提供更强技术支撑,推动我国航天制造水平再上新台阶。

参考文献

- [1]温斯涵,焦好军,李启军,等.2195铝锂合金钨弧焊接头组织分析及力学性能研究[J].宇航材料工艺,2024,54(02):125-129.
- [2]李常青,樊虎.5A06薄板铝合金的手工钨极钨弧焊工艺研究[J].中国军转民,2015,(10):46-48.
- [3]邓芝青,乔雷,王轶东,等.铝合金导管手工钨弧焊合格率提升探索[J].焊接技术,2025,54(07):113-117.
- [4]柏忠炼,李诗易,叶义海,等.手工钨极钨弧焊修复密封面不锈钢堆焊层工艺技术研究[J].电焊机,2025,55(07):106-111.