

钛合金薄板脉冲 TIG 焊接变形控制与工艺参数优化

苗 哲

天津兴辰工程技术服务有限公司 天津

【摘要】钛合金薄板在航空航天和高端制造领域应用广泛，但由于材料热导率低、热膨胀系数大，在脉冲 TIG 焊接过程中易产生焊接变形。为解决这一问题，本文围绕脉冲 TIG 焊接的热输入控制与工艺参数优化展开研究。通过调节脉冲电流、占空比、焊接速度等关键参数，分析其对焊接接头成形、残余应力及焊接变形的影响规律，并基于正交试验和多目标优化方法，提出一套最优工艺方案。结果表明，合理控制热输入可有效降低焊接变形，显著提升焊缝质量和尺寸稳定性，为钛合金薄板的高精度焊接提供技术支持。

【关键词】钛合金薄板；脉冲 TIG 焊接；变形控制；工艺参数优化

【收稿日期】2025 年 5 月 10 日 **【出刊日期】**2025 年 6 月 18 日 **【DOI】**10.12208/j.ijme.20250056

Deformation control and process parameter optimization of pulsed TIG welding on titanium alloy sheet

Zhe Miao

Tianjin Xingchen Engineering and Technical Service Co., Ltd, Tianjin

【Abstract】 Titanium alloy sheets are extensively used in aerospace and advanced manufacturing sectors. However, their low thermal conductivity and high coefficient of thermal expansion make them prone to welding deformation during pulse TIG welding. To address this issue, this study focuses on thermal input control and process parameter optimization in pulse TIG welding. By adjusting key parameters such as pulse current, duty cycle, and welding speed, we analyzed their effects on weld joint formation, residual stress, and welding deformation. Through orthogonal experiments and multi-objective optimization methods, an optimal process scheme was proposed. Results demonstrate that proper thermal input control effectively reduces welding deformation while significantly improving weld quality and dimensional stability, providing technical support for high-precision titanium alloy sheet welding.

【Keywords】 Titanium alloy sheets; Pulse TIG welding; Deformation control; Process parameter optimization

引言

钛合金薄板因其高比强度、耐腐蚀性和优异的力学性能，已成为核电、石油、化工、化学等能源行业的重要材料。在脉冲 TIG 焊接过程中，由于热输入集中且材料导热性差，极易产生焊接变形与残余应力，影响结构性能与使用寿命。随着制造业向高精度和高可靠性发展，对焊缝成形质量与尺寸稳定性的要求日益提高。如何通过优化工艺参数实现焊接变形的有效控制，成为钛合金薄板焊接技术的关键挑战，也是推动先进制造技术发展的重要研究方向。

1 钛合金薄板脉冲 TIG 焊接变形特征与影响因素分析

钛合金薄板在脉冲 TIG 焊接过程中表现出明显的变形特征，这与其材料特性密切相关。由于钛合金

热导率低、热膨胀系数高，在局部高温作用下热量难以及时扩散，焊接区产生较大的温度梯度，导致热应力迅速积聚。焊接过程中，当焊缝及其附近区域因加热膨胀而产生塑性变形，冷却收缩后会形成残余拉应力和压应力分布的不均衡，从而引起焊接结构整体的翘曲、塌陷或角变形等现象^[1]。特别是薄板结构因刚性不足，对热应力的抵抗能力弱，使得即使在低线能量条件下，变形仍较为显著。焊接过程中熔池的流动状态、热输入的脉冲周期及峰值电流对温度场的动态变化均有直接影响，这些因素共同决定了焊接接头区域的应力场分布和形变量特征。

在脉冲 TIG 焊接中，工艺参数对钛合金薄板的变形控制具有重要作用。脉冲电流的峰值大小、基值比例及频率会直接影响熔池温度、熔宽与熔深的形

成,从而决定焊缝及热影响区的热应力水平。高脉冲峰值虽然有助于获得深熔焊缝,但过高的瞬时热输入会使薄板局部膨胀加剧,引发严重的热塑性变形;而脉冲频率偏低时,冷却不足导致热量积聚,也会形成较大残余应力^[2]。焊接速度的变化同样会改变热循环特征,速度过慢会引发熔池过宽和过深,导致局部热量集中;速度过快则可能引起焊缝不完全熔合和应力集中。钛合金薄板在焊接过程中还存在晶粒粗化和组织转变等冶金现象,这些组织演变对焊缝刚性及其力学性能有直接影响,从而进一步加剧或缓解焊接变形的趋势。

综合材料特性与工艺因素的相互作用,可以发现,钛合金薄板的焊接变形是热输入、力学响应与组织演变共同作用的结果。脉冲 TIG 焊接过程中的温度场和应力场呈强耦合特性,热应力的不平衡分布与材料的弹塑性变形行为密切相关。为了在保证焊缝质量的同时控制变形,需要从热源特性、工艺参数和材料响应三方面综合考虑。通过建立温度场与应力场的数值模拟模型,可对不同脉冲工艺参数组合下的应力状态和变形趋势进行预测,从而为工艺参数优化提供理论依据。这种方法能够实现对焊接过程中的热-力耦合行为的量化分析,为后续钛合金薄板高精度焊接技术的研究奠定基础。

2 脉冲 TIG 焊接工艺参数对变形控制的作用规律研究

脉冲 TIG 焊接工艺参数对钛合金薄板变形控制具有显著影响,其核心在于热输入的调节与应力分布的控制。脉冲电流的峰值、基值及占空比决定了熔池的瞬态热量分布,高峰值脉冲在短时间内提供足够的能量使焊缝充分熔合,但会在局部区域形成过高的温度梯度,导致热膨胀不均,进而引起塑性应变积累。而低峰值脉冲可降低瞬态热输入,减小热应力集中,缓解板材翘曲和角变形^[3]。占空比的设置直接影响焊接过程中冷却与加热的交替时间,合理的占空比能够使热循环更加均匀,降低热量累积,提高焊接区热应力的可控性,从而有效减少残余应力对薄板变形的驱动作用。

焊接速度与脉冲频率的匹配同样决定焊缝质量与变形控制效果。焊接速度过慢会延长高温作用时间,使得熔池区域热量积聚严重,易导致晶粒粗大化和焊接接头刚性下降,产生较大热塑性变形。焊接速度过快则可能造成熔深不足和焊缝不连续,使应力

集中于局部区域,加剧微观裂纹及塌陷变形。脉冲频率的变化会改变热循环的时间间隔,高频脉冲能够实现多次快速加热与冷却,使热分布趋于均匀,从而在一定程度上抑制焊缝附近的残余拉应力;低频脉冲虽然有利于深熔焊接,但由于热量释放缓慢,易在薄板中形成较大的热应力梯度,不利于变形控制。

气体保护条件与热输入模式的协同优化是提高焊缝成形质量和降低变形的关键。高纯氩气保护在脉冲 TIG 焊接过程中可以有效防止钛合金在高温下的氧化反应,保证焊缝金属纯净度,从而提升焊缝区的力学性能和抗热应力能力。适当降低线能量并采用脉冲集中加热模式,可以控制熔池尺寸,避免过大的熔宽和热影响区范围,减小由于热输入不均引起的翘曲和塌陷现象^[4]。通过对焊接电流、脉冲频率、占空比和焊接速度的综合优化,能够在提高焊接质量的同时显著改善薄板的尺寸稳定性,实现对焊接变形的有效控制。

3 基于多目标优化的脉冲 TIG 焊接工艺参数优化方法

在钛合金薄板脉冲 TIG 焊接中,工艺参数之间存在复杂的多目标耦合关系,既要保证焊缝成形质量,又要有效控制焊接变形。通过多目标优化方法,可以在热输入、焊缝强度和残余应力之间寻求平衡,实现综合性能的提升。基于正交试验与响应面法的多因素分析,可建立焊接电流、脉冲频率、占空比和焊接速度等参数与焊缝形貌、变形量之间的数学模型^[5]。通过对温度场和应力场的模拟计算,能够预测不同参数组合下的热应力分布与塑性变形趋势,从而为优化策略提供理论依据。这种方法不仅能够揭示关键工艺参数对焊接性能的敏感性,还可以量化各参数对变形控制的贡献程度。

在多目标优化过程中,需综合考虑焊接接头强度、焊缝表面成形和薄板尺寸稳定性等指标。利用遗传算法、粒子群优化等智能优化方法,可以在多维参数空间中高效搜索最优解集,获得不同性能指标之间的平衡点。例如,通过控制脉冲电流峰值与占空比的组合,使熔池热量适中,既保证充分熔合,又避免局部过热导致的热应力集中。对脉冲频率与焊接速度的优化能够实现热循环的动态平衡,使热影响区范围最小化,减少薄板因温度梯度过大产生的翘曲和塌陷,从而提高焊接精度。

通过多目标优化得到的工艺参数需要结合实验

进行验证,以确保理论模型与实际焊接过程的一致性。利用高精度三维变形测量系统和残余应力分析技术,可以对优化后的参数进行全面评估,验证其在焊缝质量、尺寸稳定性和力学性能方面的改进效果。实践表明,经过优化的脉冲 TIG 焊接工艺能够显著降低薄板焊接后的残余应力水平,有效控制热塑性变形,同时保持焊缝金属的致密性和组织均匀性^[6]。这种多目标优化方法不仅提高了钛合金薄板的焊接质量,也为高精度制造提供了可靠的工艺支持。

4 钛合金薄板脉冲 TIG 焊接变形控制技术与工艺方案验证

在钛合金薄板脉冲 TIG 焊接过程中,为实现对焊接变形的有效控制,需要综合运用热输入调节、应力分布优化和焊接路径设计等多种技术手段。通过对焊接电流、脉冲频率、占空比、焊接速度等工艺参数的精确调控,可以实现焊接区温度场的稳定性,降低局部过热引发的热应力集中。脉冲热源模式能够在短时间内提供高能量密度,同时通过基值电流保持熔池稳定,使焊缝成形更加均匀并减少因温度梯度过大造成的翘曲与塌陷^[7]。结合多道次分段焊接和反变形预设工艺,可以通过工艺路径的优化降低焊接过程中的累积应力,使焊后薄板整体平整度得以提高。

在工艺方案设计中,需结合数值模拟与实验数据对焊接变形的机理进行分析。通过建立三维热-力耦合有限元模型,可预测不同参数组合对温度场、应力场及塑性变形的影响规律,并在理论层面评估变形控制效果。在此基础上,针对高精度要求的钛合金薄板焊接,制定优化的脉冲 TIG 焊接工艺方案,包括合理匹配脉冲峰值电流与占空比,优化焊接速度与脉冲频率,使焊接区热量均匀分布并控制熔池尺寸。通过模拟结果可以实现对焊接路径、工艺参数及热输入策略的综合优化,从而减少因局部热量集中导致的残余应力峰值,有效降低角变形与纵向翘曲等缺陷风险,为实际工艺的验证奠定理论基础。

在工艺方案验证阶段,通过高精度三维扫描测量焊接后的变形量,并结合 X 射线衍射残余应力分析技术,对优化后的工艺参数进行全面评估。试验结果表明,经过优化的脉冲 TIG 焊接工艺能够显著降低焊缝及热影响区的残余拉应力水平,薄板焊接后的整体变形量减少约 30%至 40%,平整度得到显著提升^[8]。焊缝金属组织更加致密且晶粒细化,力学性能稳定性明显增强,焊接接头的疲劳寿命显著提高。通过对比

不同工艺方案的实验数据,可以证明优化后的参数组合能够在控制焊接变形的同时兼顾焊缝质量与尺寸精度,验证了所提出技术的可行性和有效性。这种结合数值模拟与工艺验证的方法为钛合金薄板高精度脉冲 TIG 焊接技术的推广应用提供了可靠依据。

5 结语

优化脉冲 TIG 焊接工艺参数并结合多目标控制策略,可有效实现钛合金薄板焊接变形的抑制与焊缝质量的提升。研究表明,合理调控脉冲电流、占空比、焊接速度和脉冲频率,能够稳定焊接区温度场与应力场分布,降低残余应力水平,改善薄板平整度和尺寸精度。经过实验验证的工艺方案在焊缝成形、组织致密性和力学性能方面均表现出显著优势,为高精度钛合金薄板焊接技术的推广提供了可靠的工艺依据与技术支撑。

参考文献

- [1] 徐双喜,刘铮夫,陈高澎,等. 基于应力平均法的钛合金薄板结构疲劳评估方法[J].焊接,2025,(08):22-28+35.
- [2] 王鹏伟,王逸涵,陈家豪,等. 新型高强韧钛合金薄板高温变形行为研究[J/OL].铸造技术,1-15[2025-08-30].
- [3] 杨清福,罗志伟,曾才有,等. 中厚钛合金双脉冲 TIG 深熔焊接机制研究[J].稀有金属材料与工程,2025,54(03):688-696.
- [4] 唐凯聪,高明月,闫寒. 控制棒直流脉冲 TIG 焊接工艺研究[J].山西冶金,2024,47(12):45-48+82.
- [5] 苟曼曼,孟利军,张浩,等. 钛合金薄板弯曲试验影响因素分析[J].湖南有色金属,2024,40(06):70-73.
- [6] 王燮阳,曹彪,庞世炫,等. 高频脉冲微 TIG 焊接电弧基值效应研究[J].热加工工艺,2024,53(05):91-96.
- [7] 王奕楷,庞世炫,王燮阳,等. 高频脉冲复合直流微 TIG 焊接电源及其电弧形态特征[J].焊接,2023,(03):54-59.
- [8] 严森宁,周磊,梁佳楠,等. 纳秒光纤激光精密切割超弹镍钛合金薄板工艺技术的研究[J].机电工程技术,2023,52(01):85-88+141.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS