

薄板焊接工艺优化及焊接变形控制

王海美

宁夏西北骏马电机制造股份有限公司 宁夏 石嘴山 753000

摘要: 薄板结构因其重量轻、材料利用率高和设计灵活性强等优点,在航空航天、汽车制造、精密仪器及电子设备等领域得到广泛应用。然而,由于其厚度小、刚性差、热容量低的特点,薄板在焊接过程中极易产生显著的焊接变形与残余应力,这不仅严重影响构件的尺寸精度和装配性能,还可能诱发裂纹、降低疲劳强度,最终危及产品的整体质量和服役安全。因此,如何有效优化焊接工艺并精准控制焊接变形,已成为薄板焊接领域的核心挑战。本文系统阐述了薄板焊接变形的形成机理与主要影响因素,深入探讨了基于焊接热输入控制、先进焊接方法应用、焊接顺序优化、夹具约束设计以及焊后矫形技术等多维度的综合控制策略。旨在为相关工程实践提供理论参考和技术支撑。

关键词: 薄板焊接; 焊接变形; 工艺优化; 热-力耦合; 智能控制

引言

随着现代工业对产品轻量化、高效率和高性能要求的不断提升,厚度通常小于3mm的金属薄板结构在高端制造业中的应用日益广泛。然而,薄板焊接过程伴随着剧烈的、不均匀的热循环,导致材料经历复杂的热膨胀、塑性变形和相变过程,从而不可避免地产生焊接残余应力和变形。焊接变形不仅会破坏工件的几何形状和尺寸公差,增加后续校正和装配的难度与成本,更严重的是,过大的残余拉应力会成为疲劳裂纹的萌生源,并显著降低结构的承载能力和抗腐蚀性能。对于高精度、高可靠性要求的领域,如航空航天器,微米级的变形都可能导致整个部件的报废。因此,深入理解薄板焊接变形的本质,并发展一套行之有效的工艺优化与变形控制体系,具有极其重要的理论价值和迫切的工程需求。传统的试错法在应对复杂的薄板焊接问题时,成本高昂且效率低下。本文将围绕薄板焊接这一核心主题,首先剖析其变形产生的物理根源,继而系统梳理并评述当前主流的工艺优化与变形控制技术,并对未来的发展方向进行展望。

1 薄板焊接变形的形成机理与影响因素

1.1 热-力耦合作用下的变形机理

薄板焊接变形的根本原因在于焊接热源作用下产生的不均匀温度场及其引发的非协调热应变。整个过程始于高能量密度的热源快速加热焊缝及附近区域,使其温度急剧升高至熔点以上形成熔池,而远离焊缝的母材区域则保持相对低温。这种剧烈的温度梯度导致材料发生不均匀的热膨胀,高温区试图膨胀却受到周围低温区的强力约束,从而在高温区产生压应力。当该压应力超过材料在该高温下的屈服强度时,材料便会发生不可逆的压缩塑性变形。随着热源的移开,熔池开始凝固并向周

围散热,高温区在冷却过程中收缩,但由于先前已被压缩,其收缩量不足以恢复到原始尺寸^[1]。同时,这种冷却收缩再次受到周围已冷却材料的约束,在焊缝及热影响区产生拉应力。当整个构件最终冷却至室温后,内部便形成了一个自平衡的残余应力场,焊缝中心通常为纵向和横向的残余拉应力,而远离焊缝的区域则为压应力。正是这种内应力的不平衡分布,驱动了宏观的焊接变形。对于薄板而言,其厚度方向的热传导能力弱,热量极易在板面内积聚和扩散,导致整个板厚方向几乎处于相同的高温状态,从而丧失了抵抗面外弯曲的能力,因此最常见的变形模式是角变形和波浪变形,而非厚板中常见的纵向或横向收缩。

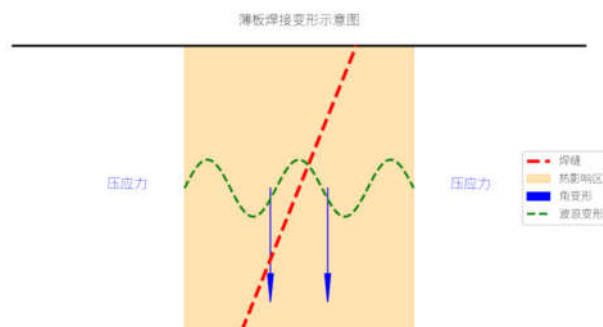


图1: 薄板焊接变形示意图

1.2 主要影响因素分析(以铝合金材质为例)

1.2.1 热输入(Heat Input, Q)

热输入 $Q = \frac{\eta UI}{v}$ 是控制焊接变形的核心变量。其中, η 为热效率, U 为电弧电压, I 为焊接电流, v 为焊接速度。对于高热导率 ($k \approx 150\sim 200\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) 和高线膨胀系数 ($\alpha \approx 23 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$) 的铝合金(如5083、6061),较大的热输入会显著扩大横向温度梯度,从而加剧不均匀

热膨胀与冷却收缩。由此引起的角变形 θ 可近似表达为 $\theta \propto \frac{Q \cdot \alpha}{t \cdot k}$ ，表明在相同热输入条件下，板厚 t 越小，变形越显著。这一关系凸显了薄板结构对热输入的高度敏感性。

1.2.2 焊接方法对热输入与能量密度的影响

不同焊接方法的能量密度 q (W/mm^2) 和热输入差异显著：

表1：不同焊接方法分析

焊接方法	能量密度 $q(W/mm^2)$	典型热输入 $Q(J/mm)$	热影响区宽度 (HAZ)
焊条电弧焊 (SMAW)	$10^2 \sim 10^3$	800-2000	宽 (> 5mm)
MIG焊	$10^3 \sim 10^4$	500-1500	中 (2-5mm)
TIG焊	10^3	300-800	较窄 (1-3mm)
激光焊 (LBW)	$10^5 \sim 10^6$	50-200	极窄 (< 1mm)

对于铝合金薄板 (如 $t = 1 \sim 3 mm$)，推荐采用激光焊或脉冲MIG焊，因其低 Q 和高 q ，可将峰值温度区域限制在极小范围，从而减小塑性应变区体积 V_p ，而总焊接变形 δ 与 V_p 成正比： $\delta \propto V_p \cdot \alpha \cdot \Delta T$ ，其中 ΔT 为热循环温差 (通常取熔点 $T_m \approx 600^\circ C$ 至室温)。

1.2.3 铝合金材料物理性能的影响

铝合金自身的物理性能对焊接热-力响应具有决定性作用。以6061-T6为例，其热导率 $k = 167 W/(m \cdot K)$ 、线膨胀系数 $\alpha = 23.6 \times 10^{-6}/^\circ C$ 、比热容 $c_p = 896 J/(kg \cdot K)$ 、密度 $\rho = 2700 kg/m^3$ ，共同决定了热扩散系数 $a = \frac{k}{\rho c_p} \approx 6.9 \times 10^{-5} m^2/s$ 。较高的 α 值虽有利于热量快速散失，但若热输入控制不当，反而会扩大整体温度场范围，加剧变形。此外，屈服强度随温度急剧下降 (室温约240 MPa， $600^\circ C$ 时低于20 MPa)，使得高温区极易发生塑性流动。焊接残余应力 $\sigma_r \approx E(T) \cdot \alpha \cdot \Delta T_{eff}$ 在超过瞬时屈服强度 $\sigma_y(T)$ 时，将引发不可逆塑性变形，成为最终变形的主导机制。

1.2.4 焊接顺序与路径对多焊缝结构的影响

在多焊缝结构中，焊接顺序与路径通过调控残余应力的空间叠加方式，显著影响整体变形。设第 i 条焊缝引起的局部角变形为 θ_i ，则总角变形可表示为 $\Theta = \sum_{i=1}^n \theta_i \cdot f(sequence, distance)$ ，其中函数 f 表征焊缝间相互作用。采用对称焊接、分段退焊或“先后外、先短后长、对称跳焊”等策略，可使相邻焊缝的收缩效应部分抵消。工程实践表明，双面对称焊缝布置可使角变形降低，充分体现了工艺路径设计在变形控制中的关键作用。

2 薄板焊接工艺优化策略

2.1 低热输入焊接方法的应用

为了从根本上抑制薄板焊接变形，采用低热输入的先进焊接方法已成为行业共识。激光焊接凭借其极高的能量密度和极快的焊接速度，能够实现深宽比大、热影响区极窄的焊缝，从而将变形控制在极小范围内，特别

适合自动化生产线上的薄板对接和搭接^[2]。冷金属过渡 (CMT) 技术则代表了电弧焊领域的重大突破，它通过独特的“回抽”机制，将焊接过程分解为“燃弧加热”和“短路回抽冷却”两个阶段，实现了对热输入的精确、脉冲式控制，使得热输入可以降至传统MIG焊的十分之一，成为焊接镀锌板、铝镁合金等热敏感超薄板材料的革命性技术。搅拌摩擦焊作为一种固相连接技术，其过程无熔化、无弧光、无烟尘，热输入极低，几乎不产生焊接变形和残余应力，接头性能优异，尽管在复杂三维曲面的应用上仍有局限，但在平板、筒体等规则结构的薄板焊接中展现出巨大潜力。

2.2 关键工艺参数的精细调控

即使在同一焊接方法下，对具体工艺参数的精细调控也是优化效果的关键所在。在保证电弧稳定和熔透的前提下，应尽可能采用小电流、低电压以降低热输入。提高焊接速度是降低热输入最直接有效的方法，但必须兼顾熔池的稳定性与成形质量，避免因速度过快导致未熔合或气孔等缺陷。对于脉冲MIG/TIG焊，在 $1 \sim 4 mm$ 厚的铝合金薄板 (如5083、6061等) 焊接中，脉冲MIG/TIG焊通过精细调控关键参数可有效抑制变形并保障成形质量：峰值电流 (MIG 180-250 A，TIG 120-180 A) 确保熔透与熔滴过渡，基值电流 (MIG 40-70 A，TIG 20-50 A) 维持电弧稳定并控制冷却；脉冲频率 (MIG 80-200 Hz，TIG 1-20 Hz) 和占空比 (20%-40%) 协同调节平均热输入，使其控制在MIG 300-800 J/mm、TIG 200-500 J/mm范围内；配合Ar+(20%-30%)He保护气体，不仅提升熔池流动性与润湿性，还能优化热分布。该工艺特别适用于对变形敏感的薄板结构，在保证熔透和冶金质量的同时显著减小热影响区与焊接残余变形。此外，保护气体的选择也不容忽视，合适的保护气体不仅能改善焊缝成形和冶金质量，还能通过改变电弧形态间接影响热输入的分布，例如在焊接铝合金时采用Ar+He混合气，可以利用氦气更高的热导率来获得更宽的熔池，改善焊缝润湿性。

3 焊接变形的综合控制技术

3.1 焊接顺序与路径优化

焊接顺序与路径的优化是一种成本效益极高的变形控制策略。其核心思想是通过合理安排焊缝的施焊次序,使各部分的收缩变形能够相互抵消或达到全局最优。对于对称结构,采用对称的焊接顺序是最基本的原则,可以有效防止构件向一侧弯曲。面对长直焊缝,将其分割成若干小段,并采用分段退焊或跳焊的方式,能够有效打断热量和应力的单向累积趋势。更进一步,可以采用逆向分段法,即优先焊接收缩量最大的焊缝,利用其强大的收缩力来预先拉直结构,从而为后续焊缝创造一个更有利的初始状态^[3]。如今,借助有限元软件对不同焊接方案进行虚拟仿真,定量比较其变形结果,已成为制定最优焊接顺序与路径的科学依据。

3.2 刚性固定与反变形法

刚性固定法是通过使用专用夹具、压板或胎具等装置,将焊件牢固地约束在刚性平台上,强制限制其在焊接过程中的自由变形。这种方法操作简单、效果直观,被广泛应用于生产实践中。然而,其弊端在于会将原本可能以变形形式释放的能量转化为更高的残余应力,对于有应力腐蚀开裂倾向的材料,如奥氏体不锈钢,这种高残余应力状态可能带来严重的安全隐患。与之相对,反变形法则是一种更为巧妙的预控方法。它要求在焊接前,根据经验和计算预估焊接后可能产生的变形量和方向,然后预先将工件向相反方向进行机械弯曲或装配。当焊接完成后,焊接产生的变形与预置的反变形相互抵消,从而获得平直的构件。此法成功应用依赖于对特定结构焊接变形规律的准确把握,否则可能适得其反。

3.3 热处理与机械矫形

当焊接完成后,若变形仍超出公差范围,则需采用焊后处理手段进行矫正。焊后热处理(PWHT)通过整体或局部加热,使材料在高温下屈服强度降低,利用材料的蠕变或应力松弛效应来释放部分残余应力,从而减小变形。其中,局部加热矫正是车间常用的手工方法,通

过火焰或感应线圈对变形区域的特定部位(如点状或线状)进行加热,利用不均匀的热胀冷缩原理来实现矫正。另一种常用的手段是机械矫形,即利用压力机、辊床或锤击等方式,对焊后变形部位施加外力进行强制矫正。这种方法虽然见效快,但可能会在材料表层引入新的残余应力,且对操作者的技能和经验有较高要求,过度矫形甚至可能损伤工件。

5 结语

本文综述了薄板焊接变形的热-力耦合机理,强调了低热输入的核心地位,并系统介绍了以激光焊、CMT、FSW为代表的先进焊接方法,以及焊接顺序优化、刚性固定、反变形等综合控制技术。特别是,基于有限元模拟和智能算法的现代研究手段,为实现焊接变形的精准预测和工艺参数的智能优化开辟了新途径。展望未来,薄板焊接变形控制的研究将朝着以下几个方向深入发展:多尺度、多物理场耦合模拟将进一步深化,将微观组织演变与宏观力学行为更紧密地耦合,以建立更精确的本构模型;数字孪生与闭环控制技术将得到广泛应用,通过传感器实时采集焊接过程信息并与虚拟模型比对,动态调整工艺参数,实现真正的自适应控制;新材料如高强度钢、钛合金、复合材料在薄板结构中的应用,将对其特殊的物理冶金行为下的变形控制提出新的课题;同时,在追求变形控制的同时,进一步降低能耗、减少排放,实现焊接制造的绿色与高效,也将成为重要的发展方向。

参考文献

- [1]吴宪,丁成钢.Q345E钢薄板小变形焊接工艺[J].电焊机,2021,51(09):50-54+117-118.
- [2]易斌.动态热拉伸工艺控制薄板焊接失稳变形的研究[D].华中科技大学,2023.DOI:10.27157/d.cnki.ghzku.2023.005179.
- [3]郑昌鸿,张颖云,朱胜利,等.工艺因素对钛合金薄板激光焊接面外变形的影响[J].热加工工艺,2021,50(09):125-129.
- [4]吴宪.Q345E薄板小变形MAG焊焊接工艺[D].大连交通大学,2021.DOI:10.26990/d.cnki.gsltc.2021.000185.