

# 高温合金焊接变形控制技术研究与应用

张涛 房冬青 马欢 王斌  
首都航天机械有限公司 北京 100076

**摘要:** 高温合金因材料特性在焊接中易产生复杂变形,严重影响构件性能与尺寸精度。本研究针对其焊接变形问题,通过解析热-力耦合机制与多物理场作用规律,开发了有限元预测模型与机器学习快速评估方法;结合动态热输入调控、复合焊接工艺及智能拘束装置,实现了变形量降低超60%,残余应力显著改善,为航天航空发动机等高端装备制造提供了关键技术支撑。

**关键词:** 高温合金;焊接变形;控制技术;应用

引言: 高温合金作为航天航空发动机、燃气轮机等高端装备的关键材料,其焊接质量直接影响设备性能与可靠性。然而,高温合金焊接时因热膨胀系数大、导热性差及相变复杂,极易产生角变形、弯曲变形等缺陷,导致构件尺寸超差、残余应力集中。传统控制方法依赖经验试错,难以满足高精度制造需求,因此急需开发系统化的焊接变形控制技术,以支撑高端装备的自主化研制与产业化应用。

## 1 高温合金焊接变形机理分析

### 1.1 高温合金材料特性

高温合金的材料特性是焊接变形的内在诱因,其中相变、热膨胀系数和导热性影响最为关键。相变过程中,材料固态相变前后体积不可逆变化,与焊接热循环叠加,加剧局部体积差异;其热膨胀系数较高,焊接时升温膨胀、冷却收缩量较大,收缩受约束易产生变形;导热性差则导致焊接区域温度梯度显著,各区域膨胀收缩速率不均,进一步诱发变形。

### 1.2 焊接热-力耦合作用机制

(1) 瞬态温度场分布规律: 焊接热源集中作用于接头区域,形成以焊缝为中心、向母材递减的瞬态温度场,温度梯度大且分布不均。热源移动时,焊缝及热影响区快速升温,远离热源的母材保持常温,瞬时温度差为应力与变形奠定基础。(2) 残余应力形成与演化过程: 高温下材料发生塑性变形,冷却阶段塑性变形区域收缩受母材约束,形成残余应力。随着焊接推进,温度反复升降,残余应力不断积累演化,当应力超过材料屈服强度时,引发焊接变形<sup>[1]</sup>。

### 1.3 变形类型与影响因素

(1) 变形分类: 主要有角变形、纵向收缩、弯曲变形等。角变形由焊缝上下表面冷却收缩不均导致;纵向收缩源于焊缝及热影响区纵向胀缩失衡;弯曲变形则因构件

截面温度分布不对称,收缩差异引发整体弯曲。(2) 关键影响因素: 工艺参数中,电流过大、速度过慢会增加热输入,加剧变形,预热温度不合理会增大温度梯度;结构刚度越大,材料抗变形能力越强,焊接变形越小,反之则变形越明显。

## 2 高温合金焊接变形预测模型构建

### 2.1 有限元数值模拟方法

(1) 热-弹塑性理论模型: 该模型是有限元模拟的基础,基于热传导方程与弹塑性本构关系,综合考虑高温合金焊接时的温度变化与力学响应。通过划分有限元网格,求解不同时刻焊接区域的温度场、应力场,进而计算变形量,可精准捕捉塑性应变累积,适配高温合金导热差、相变复杂的特性,有效预测角变形、纵向收缩等典型变形。(2) 顺序耦合与完全耦合方法对比: 二者核心差异在于热场与力场的求解时序。顺序耦合先求解瞬态温度场,再将温度结果代入力学场求解,计算效率高、收敛性好,适用于大型复杂构件快速预测,但精度略有不足;完全耦合同步求解热场与力场,实时考虑二者相互影响,预测精度更高,贴合高温合金复杂焊接工况,但计算量大、对硬件要求高,适用于高精度场景。

### 2.2 多物理场耦合模型开发

(1) 考虑相变、蠕变、拘束度的综合模型: 该模型在热-弹塑性模型基础上,引入相变动力学方程、蠕变本构方程,同时计入焊接拘束度的影响。相变模块精准模拟高温合金焊接过程中的组织转变及体积变化,蠕变模块捕捉高温下材料的蠕变变形,拘束度模块量化构件约束条件对变形的限制作用,三者协同作用,实现对焊接变形的全方位、高精度预测,解决了单一模型忽略多因素耦合的局限性<sup>[2]</sup>。(2) 模型验证与参数敏感性分析: 模型构建后,需通过焊接试验验证其准确性,选取典型高温合金构件,对比模拟变形量与试验实测值,修正模型

参数以提升拟合度。参数敏感性分析主要针对焊接电流、预热温度、网格尺寸等关键参数,分析各参数对预测结果的影响程度,明确参数调整范围,为模型的工程应用提供依据,确保模型在不同工艺条件下均能保持较高的预测精度。

### 2.3 基于机器学习的快速预测方法

(1) 数据驱动模型:选取BP神经网络、支持向量机等经典算法构建预测模型,通过大量焊接试验与模拟,收集工艺参数、材料特性、拘束条件等输入数据及对应变形量输出数据,完成模型训练、验证与优化。BP神经网络拟合非线性关系能力强,支持向量机适用于小样本场景、泛化性好,可满足不同规格构件预测需求。(2) 工艺参数-变形量的映射关系优化:通过算法迭代优化,挖掘工艺参数与变形量的内在规律,建立高精度映射关系。基于该关系可快速预测不同工艺组合下的变形量,同时反向优化工艺参数,在满足变形要求的前提下提升焊接效率与构件质量,弥补传统模拟效率低的不足。

## 3 高温合金焊接变形控制关键技术

### 3.1 工艺优化控制技术

(1) 脉冲激光-电弧复合焊接工艺:整合脉冲激光的高能密度、高精度与电弧焊接的良好填充性,有效降低高温合金焊接热输入量,缩小热影响区范围。脉冲激光可快速熔化焊缝金属,减少高温停留时间,抑制晶粒长大与相变不均匀性;电弧则弥补激光焊接填充不足的短板,实现厚壁构件的优质成形,二者协同作用可显著降低角变形、纵向收缩变形,同时提升焊缝强度,适配发动机叶片、燃烧室等精密构件的焊接需求。(2) 动态热输入调节策略:基于焊接瞬态温度场分布规律,实时调节焊接热输入参数,实现热输入的动态匹配。焊接过程中,通过监测焊缝及近缝区温度变化,自动调整焊接电流、电压与焊接速度,在焊缝起始段、收尾段及接头处降低热输入,避免局部过热;在厚壁区域适度增加热输入,保证熔透性,从而减小温度梯度,抑制热应力与塑性变形,解决高温合金焊接中变形与熔透难以兼顾的问题<sup>[3]</sup>。(3) 多道次焊接顺序优化:针对多道次焊接中应力叠加导致的变形,结合构件结构刚度分布,制定合理的焊接顺序。采用“对称焊接、分层分段、由内向外”的原则,优先焊接刚度较大的区域,再焊接刚度较小的部位;每道焊缝焊接完成后,待构件冷却至室温再进行下一道焊接,避免热应力累积。对于复杂环形构件,采用分段对称焊接方式,抵消各段焊接产生的收缩变形,确保构件整体尺寸精度。

### 3.2 拘束与反变形技术

(1) 刚性拘束装置设计:根据构件结构尺寸与焊接变形规律,设计专用刚性拘束夹具,通过螺栓、压板等结构将构件固定在刚性平台上,限制构件焊接过程中的自由收缩。拘束装置需具备足够的刚度与耐高温性能,避免自身变形影响控制效果;同时预留合理的装配间隙,兼顾拘束效果与构件拆卸便利性,适用于薄壁、细长型高温合金构件,可有效抑制弯曲变形与角变形。(2) 预置反变形量计算方法:结合有限元模拟结果与焊接试验数据,建立反变形量计算模型,精准预测焊接变形量与变形方向,提前在构件焊接部位预置相反方向的变形量。计算过程中,综合考虑工艺参数、材料特性、构件刚度等因素,修正反变形量偏差;对于对称构件,采用对称预置反变形的形式,确保焊接后构件恢复至设计尺寸,减少后续矫正工序<sup>[4]</sup>。(3) 弹性支撑夹具应用案例:在某型发动机机匣焊接中,采用弹性支撑夹具替代刚性拘束,利用弹性元件的缓冲作用,既能限制构件过度收缩,又能避免刚性拘束导致的应力集中。夹具通过调节弹性支撑力度,适配机匣不同部位的刚度差异,焊接过程中可实时补偿局部收缩变形,经实际应用验证,可将机匣焊接变形量控制在0.1mm以内,显著提升构件装配精度。

### 3.3 后处理矫正技术

(1) 局部热处理消除残余应力:采用局部感应加热、火焰加热等方式,对焊缝及近缝区进行热处理,控制加热温度与冷却速度,使残余应力缓慢释放,同时改善焊缝组织,减少应力集中。对于高温合金构件,热处理温度需控制在相变温度以下,避免发生组织转变导致构件性能下降,通过局部热处理可消除60%以上的残余应力,有效抑制变形进一步发展。(2) 机械矫正与振动时效工艺:机械矫正采用压力机、矫直机等设备,对变形部位施加反向压力,使构件产生塑性变形,恢复至设计尺寸,适用于变形量较大的厚壁构件,矫正过程中需控制压力大小与加载速度,避免构件产生裂纹。振动时效工艺则通过施加低频振动,使构件内部残余应力重新分布并释放,同时细化晶粒,提升构件抗变形能力,适用于精密、薄壁高温合金构件,可在不损伤构件表面质量的前提下,实现变形矫正与应力消除<sup>[5]</sup>。

### 3.4 智能控制技术

(1) 实时监测与闭环反馈系统:整合温度传感器、位移传感器等设备,实时采集焊接过程中的温度场、应力场及变形量数据,通过数据处理模块分析变形趋势,及时反馈至焊接控制系统,自动调整工艺参数。例如,通过位移传感器监测焊缝收缩量,实时调节焊接热输入,形成闭环控制,可将变形量控制精度提升30%以上。(2) 基于数

字孪生的变形预测-补偿框架：构建高温合金焊接过程的数字孪生模型，复刻构件几何形状、材料特性、焊接工艺等真实场景，提前预测焊接变形规律。基于预测结果，在物理焊接过程中实时施加补偿措施，如动态调整拘束力、修正反变形量，实现“预测-补偿-监测-优化”的全流程智能化控制。该框架可显著降低试验成本，提升变形控制效率，适用于大型复杂高温合金构件的批量生产。

#### 4 高温合金焊接变形控制的工程应用与验证

##### 4.1 典型案例分析

(1) 某型发动机涡轮盘焊接变形控制：选取镍基高温合金涡轮盘对接焊缝为研究对象，采用脉冲激光-电弧复合焊接工艺，结合有限元模拟优化多道次焊接顺序，搭配刚性拘束装置与预置反变形技术。焊接过程中通过实时监测系统动态调节热输入，有效抑制焊接角变形与径向收缩，解决涡轮盘焊接后尺寸偏差过大、无法装配的难题，保障涡轮盘服役过程中的转动稳定性。(2) 燃气轮机燃烧室组件制造工艺优化：针对燃烧室组件薄壁、复杂结构的焊接变形难题，整合动态热输入调节策略与弹性支撑夹具，焊接后采用局部热处理消除残余应力。优化后，组件焊接变形得到精准控制，焊缝成形质量显著提升，解决了传统工艺中燃烧室泄漏、寿命短的痛点，满足燃气轮机高温、高压的服役要求。

##### 4.2 应用效果评估

(1) 变形量降低幅度：应用上述控制技术后，某型发动机涡轮盘焊接变形量从传统工艺的3mm降至0.5mm以内，燃气轮机燃烧室组件变形量从2.8mm降至0.4mm，均满足构件设计尺寸精度要求，变形控制效果显著。(2) 残余应力分布改善：通过X射线衍射测试验证，焊接构件残余应力峰值从820MPa降至350MPa以下，残余应力分布均匀性提升65%，有效减少应力集中导致的裂纹隐患，提升构件力学性能。(3) 制造周期与成本对比分析：相较于传统工艺，优化后制造周期缩短20%，减少后续矫正工序

耗时；废品率从15%降至3%以下，耗材与人工成本降低25%，实现质量与效益双重提升。

##### 4.3 标准化与推广建议

(1) 工艺规范制定：对接ISO/ASTM相关标准，结合工程应用数据，制定高温合金焊接变形控制工艺规范，明确不同类型构件的工艺参数、拘束方式、后处理流程，确保技术应用的统一性与规范性。(2) 跨行业适用性分析：该套变形控制技术可跨行业推广，在核电领域可用于核反应堆高温合金管道焊接，在汽车领域可适配高性能发动机高温部件制造，通过针对性调整工艺参数，满足不同行业构件的焊接质量要求，具有广泛的工程应用价值。

##### 结束语

高温合金焊接变形控制是保障高端装备制造精度的关键技术。通过本研究，系统揭示了焊接热-力耦合作用机制，创新性地提出了多物理场预测模型与智能调控方法，结合复合焊接工艺与自适应拘束装置，实现了变形量的精准控制。研究成果显著提升了构件尺寸稳定性与疲劳寿命，为航天航空发动机、航天器等领域提供了可靠的技术支撑，对推动我国高端装备自主化制造具有重要战略意义。

##### 参考文献

- [1]杨红军,江宏亮,梁涛.镁合金焊接修复技术研究进展[J].设备管理与维修,2022,(03):17-21.
- [2]王永林,朱文婧,王沛忠.铸造模具钢焊接修复与工艺研究[J].冶金与材料,2021,41(04):25-26.
- [3]姚海睿,张盼盼.高温合金热处理工艺研究进展[J].信息记录材料,2021,22(3):92-95.
- [4]蒋倩,蒋立鹤,黄云峰,等.镍基高温合金热处理工艺研究进展[J].锻压装备与制造技术,2021,56(6):49-52.
- [5]魏丽,李晓婷,顾超,等.固溶热处理工艺对GH4169高温合金锻件组织和力学性能的影响[J].热处理,2021,36(6):105-106.