

# Exploration of the Flow Behavior of High Temperature Alloy Electron Beam Welding Pool and the Formation Mechanism of Weld Seam

Qingfei Xie

AVIC Shenyang Liming Aero Engine Co., Ltd. Sheet Welding Processing Plant, Shenyang, Liaoning, 110000, China

## Abstract

High temperature alloys play a crucial role in many fields such as aerospace due to their excellent high-temperature performance. Electron beam welding, as a high-energy beam welding technology, has demonstrated unique advantages in connecting high-temperature alloys. This article aims to deeply analyze the melt flow behavior and weld formation mechanism of high-temperature alloys during electron beam welding. Through comprehensive experimental observation, numerical simulation, and theoretical analysis, the characteristics of molten pool flow and its impact on weld formation were carefully revealed, laying a solid theoretical foundation for optimizing welding processes and improving weld quality. This research not only provides strong theoretical support for the reliable connection of high-temperature alloys, but also promotes the vigorous development of key component manufacturing technology in aerospace, energy and other fields.

## Keywords

high-temperature alloy; Electron beam welding; Molten pool flow; Welding seam formation; modern industry

# 高温合金电子束焊接熔池流动行为与焊缝成形机制探究

谢庆飞

中国航发沈阳黎明航空发动机有限责任公司钣金加工厂, 中国·辽宁 沈阳 110000

## 摘要

高温合金凭借其卓越的高温性能,在航空航天等诸多领域占据了举足轻重的地位。电子束焊接作为一种高能束焊接技术,在连接高温合金时展现出了独特的优势。本文致力于深入剖析高温合金在电子束焊接过程中的熔池流动行为与焊缝成形机制。通过综合实验观察、数值模拟及理论分析的方法,细致地揭示了熔池流动的特性及其对焊缝成形的影响规律,为优化焊接工艺和提升焊缝质量奠定了坚实的理论基础。这一研究不仅能为高温合金的可靠连接提供强有力的理论支撑,还能推动航空航天、能源等领域关键部件制造技术的蓬勃发展。

## 关键词

高温合金; 电子束焊接; 熔池流动; 焊缝成形; 现代工业

## 1 引言

在现代工业的广阔舞台上,高温合金因具备出色的高温性能而备受青睐。然而,传统焊接技术在处理这类合金时,往往面临着诸多难以逾越的挑战。电子束焊接技术,作为一种前沿的焊接手段,凭借其能量密度高、焊缝深宽比大等显著特点,逐渐崭露头角。随着对焊接质量和性能要求的日益提升,对高温合金电子束焊接过程中的熔池流动行为与焊缝成形机制进行深入探究,显得尤为关键。掌握熔池中液体的流动规律,有助于精准调整焊接工艺参数,有效减少焊接缺陷,进而提升焊缝的力学性能和可靠性。

【作者简介】谢庆飞(1983-),男,中国辽宁沈阳人,硕士,高级工程师,从事先进材料的焊接与制造研究。

## 2 实验方法与材料

### 2.1 实验材料

本实验精心选取了镍基高温合金 GH4169 作为研究对象。该合金以其卓越的高温强度、优异的抗氧化性能和抗腐蚀性能,在航空航天等领域得到了广泛应用。在实验开展前,对所选高温合金的化学成分进行了严格而精确的测定,确保其镍(Ni)、铬(Cr)、钼(Mo)、铌(Nb)等主要元素的含量均符合相关标准。同时,还对该合金的抗拉强度、屈服强度、延伸率等力学性能进行了全面而细致的测试,为后续分析焊接接头的性能奠定了坚实的基础。

### 2.2 实验设备

#### 2.2.1 先进的电子束焊接设备

实验采用了具备高精度和卓越稳定性的电子束焊接设

备。该设备能够输出稳定的电子束流和加速电压，从而确保焊接过程的平稳进行和高度重复性。设备还配备了先进的控制系统，能够实现对接头参数（如束流、聚焦电流、焊接速度等）的精确调节。

### 2.2.2 高速摄像系统

为了实时捕捉焊接过程中熔池的动态变化，实验引入了高速摄像系统。该系统能够以极高的帧率（如 5000 帧/秒）记录熔池的形成、流动和凝固过程。通过对拍摄图像进行细致分析，可以获取熔池的形状、尺寸、流动速度等关键信息<sup>[1]</sup>。在某一实验中，当电子束流为 20 mA 时，熔池的扩展速度约为 1.5 mm/s；而当电子束流增加至 30 mA 时，熔池的扩展速度则提升至 2.1 mm/s。

### 2.2.3 测温装置

实验还采用了非接触式的红外测温仪，用于实时测量焊接过程中熔池表面及附近区域的温度分布。通过对温度数据的采集和分析，可以深入了解焊接过程中的热传递情况。在某次实验中，发现焊接区域的最高温度高达 2500° C，且在不同位置存在显著的温度梯度。

## 2.3 数值模拟

### 2.3.1 模型建立

利用专业的数值模拟软件（如 ANSYS、ABAQUS 等），构建了电子束焊接的热流耦合模型。在模型构建过程中，充分考虑了材料的热物理性能、焊接参数以及边界条件等因素。通过对模型进行合理的简化和假设，有效提升了计算效率和准确性。

### 2.3.2 模拟结果与分析

模拟结果清晰地展示了熔池内的温度场、流场分布以及焊缝的形状和尺寸。模拟发现，当焊接速度较慢时，熔池内的温度梯度较小，流体流动相对平缓，导致焊缝宽度增加；而当焊接速度较快时，温度梯度增大，流体流动加剧，焊缝宽度则相应减小。通过将模拟结果与实验数据进行对比验证，发现两者较为吻合，误差在可接受范围内，从而证明了数值模拟的可靠性和准确性。

表 1 模拟结果与实验数据的对比分析

| 焊接参数                        | 模拟焊缝宽度<br>(mm) | 实验焊缝宽度<br>(mm) | 相对误差<br>(%) |
|-----------------------------|----------------|----------------|-------------|
| 电子束流 25 mA，<br>焊接速度 10 mm/s | 4.2            | 4.5            | 6.7         |
| 电子束流 30 mA，<br>焊接速度 12 mm/s | 3.8            | 4.0            | 5.0         |

从上述数据可以看出，模拟结果与实验数据高度一致，进一步验证了数值模拟方法的可靠性。

## 3 高温合金电子束焊接熔池流动行为分析

### 3.1 电子束能量输入对熔池流动的影响

在电子束焊接工艺中，能量输入扮演着至关重要的角色，其变化对熔池流动行为具有显著影响。随着电子束能量

的逐步提升，熔池所接收的能量密度显著增加，进而引发熔池温度的急剧攀升。这一温度变化不仅深刻改变了熔池的物理特性，还使得表面张力成为驱动熔池流动的关键因素。温度的升高导致熔池表面张力发生动态调整，尤其是在高温条件下，表面张力梯度显著增大<sup>[2]</sup>。这种梯度变化为熔池内部提供了更强的驱动力，促进了熔池内部对流的加剧。对流强度的提升意味着熔池内部的液态金属能够更加充分地混合与流动，有助于消除成分的不均匀性，并降低缺陷形成的可能性。然而，值得注意的是，过度的对流也可能导致熔池稳定性下降，从而增加气孔、裂纹等缺陷的潜在风险。

### 3.2 焊接速度对熔池流动的影响

焊接速度作为另一个关键参数，在高温合金电子束焊接过程中同样对熔池流动特性产生深远影响。较快的焊接速度意味着热量输入相对减少，同时熔池处于高温状态的时间缩短，导致熔池冷却速率加快。这种快速冷却过程限制了熔池的流动能力，因为液态金属在较短时间内凝固，无法充分进行流动与混合。相反，较慢的焊接速度则为熔池提供了更多的高温保持时间，使得液态金属有足够的时间进行充分的流动与混合。这种充分的流动有助于热量和溶质的均匀分布，进而提升焊缝的整体质量和性能。然而，过慢的焊接速度也可能导致热输入过高，引发焊缝的过度熔化以及晶粒粗大等不利现象。

### 3.3 保护气体对熔池流动的影响

在高温合金电子束焊接过程中，保护气体的作用同样不容忽视。保护气体的种类和流量能够显著改变熔池表面的压力分布，进而对熔池的流动形态产生深远影响。不同种类的保护气体具有独特的物理性质，如密度、热导率等，这些性质决定了气体在熔池表面的分布和作用方式。某些气体可能更容易在熔池表面形成均匀的压力分布，有助于促进熔池的平稳流动；而另一些气体则可能导致局部压力差异显著，进而引发熔池流动的不规则性。保护气体的流量大小也发挥着重要作用。较大的流量能够更有效地排除周围的空气，维持焊接环境的纯净度，并在熔池表面形成相对稳定的压力层。这种稳定的压力分布有助于减少熔池流动的波动性和不规则性，提升焊缝的成形质量和性能。相反，流量过小可能无法充分发挥保护作用，导致熔池表面受到外界因素的干扰，进而影响流动形态和焊缝质量。

## 4 高温合金电子束焊接焊缝成形机制探究

### 4.1 熔池流动与焊缝熔深的关系

在高温合金的电子束焊接工艺中，熔池流动状态对焊缝熔深的影响尤为显著。熔池的剧烈涌动能够显著促进热量向焊缝底部的有效传递，进而实现熔深的提升。这一现象的根源可深入剖析如下：一方面，熔池内部液态金属的剧烈流动大大增强了热量的对流传导。这种流动仿佛熔池中的一股强劲搅拌力，促使热量迅速且均匀地分布，使得焊缝底部得

以接收到更多的热量。这种对流效应不仅提升了热量传递的效率,还确保了熔池内部温度场的均匀性。另一方面,熔池流动对熔池几何形态的塑造也起到了关键作用。强烈的流动往往使熔池底部呈现出更为尖锐的形态,这种形态变化使得热量在底部的集中程度增加,进一步推动了热量向焊缝底部的深入传递,从而增大了熔深<sup>[1]</sup>。相比之下,当熔池流动减弱时,热量的对流传导效应减弱,熔池内部的温度分布变得不均匀,难以有效传递至焊缝底部。同时,熔池底部形态趋于平缓,热量集中区域减小,导致熔深相应减小。

为了更加深入地理解熔池流动与焊缝熔深之间的复杂关系,研究者们通常采用数值模拟与实验研究相结合的方式。数值模拟技术能够直观地展现熔池流动的速度场、温度场等关键参数,为理解流动对熔深的影响机制提供了有力的工具。而实验研究则通过实际焊接过程中的测量与分析,验证了数值模拟结果的准确性,并获取了更为真实可靠的实验数据。

## 4.2 熔池流动与焊缝宽度的关系

在高温合金的电子束焊接过程中,熔池的流动速度和方向对焊缝的凝固过程具有至关重要的影响,进而显著决定了焊缝的宽度。熔池流动速度的快慢直接关联着焊缝凝固的速率。当熔池流动速度较快时,液态金属能够迅速填充焊缝区域,并在较短的时间内完成凝固过程。这种快速的凝固限制了液态金属在横向方向上的充分扩展,从而导致焊缝宽度相对较窄。相反,当熔池流动速度较慢时,焊缝的凝固时间得以延长,液态金属在横向方向上有了更多的流动和铺展机会,进而形成了较宽的焊缝。熔池流动的方向也对焊缝宽度产生了不可忽视的影响。当熔池流动主要沿着焊缝长度方向时,液态金属在横向上的补充相对较少,导致焊缝宽度较窄。而当熔池流动方向具有较大的横向分量时,液态金属能够更充分地填充焊缝的横向空间,从而增加了焊缝的宽度。

为了实现焊缝宽度的精确调控,并达到理想的焊接接头性能,研究者们需要深入理解和有效控制熔池流动的速度和方向。这通常通过优化焊接工艺参数(如电子束电流、焊接速度、聚焦位置等)来实现。同时,借助先进的监测技术(如实时高速摄像、红外热成像等),对熔池流动进行实时监测与分析,为工艺参数的优化提供了有力的数据支持。

## 4.3 焊缝缺陷的形成与熔池流动的关联

在高温合金的电子束焊接过程中,焊缝缺陷的形成往往与熔池流动的不稳定性紧密相连。气孔作为一种常见的焊缝缺陷,其产生机制与熔池内部气体的逸出过程息息相关。当熔池流动呈现不稳定状态时,内部易形成局部漩涡与湍流区域。这些复杂的流动形态可能会阻碍气体顺利逸出至熔池

表面,导致气体被捕获并在焊缝凝固过程中形成气孔。未熔合缺陷则是另一类需关注的焊缝问题,其根源同样可追溯到熔池流动的不均匀性。在焊接过程中,若熔池流动未能实现均匀分布,将导致热量在焊缝区域的不均衡传递。某些局部区域可能会因热量不足而无法使母材充分熔化,进而在焊缝凝固后形成未熔合区域。这种流动不均匀性可能源于多种因素,包括电子束能量分布的不均衡、焊接速度的变化以及熔池内部物理特性的动态变化等。

为了有效减少和避免焊缝缺陷的产生,稳定熔池流动成为一项至关重要的任务。这要求采取一系列措施来优化焊接过程。一方面,通过精细调整焊接工艺参数,如电子束的功率水平、焊接速度以及束流的聚焦程度等,可以显著改善熔池的流动状态,降低其不稳定性。另一方面,预热和后热处理工艺的恰当应用同样有助于减少母材与焊缝之间的温度梯度,进而降低熔池流动的不稳定因素。实时监测熔池流动状态并结合先进的控制技术进行动态调整,也是预防焊缝缺陷的有效策略。利用智能控制系统对焊接过程中的熔池流动参数进行实时监测,并根据监测结果自动调整焊接工艺参数,以确保熔池流动的稳定性。这种实时反馈与动态调整机制能够显著提升焊接过程的可控性和焊缝质量。

## 5 结语

综上所述,本研究致力于深入剖析高温合金电子束焊接过程中熔池流动行为与焊缝成形机制之间的复杂关系。研究明确了电子束能量、焊接速度以及保护气体等关键因素对熔池流动行为的重要影响。在此基础上,进一步揭示了熔池流动行为与焊缝成形之间的内在联系,为优化焊接工艺参数提供了坚实的理论基础。同时,本研究还探索了通过控制熔池流动来减少焊缝缺陷、提升焊缝质量的有效途径。这些研究成果不仅为高温合金电子束焊接的实际应用奠定了坚实基础,同时也为未来的深入研究指明了方向。然而,值得注意的是,当前研究仍存在一些局限性。未来研究需进一步关注复杂结构件焊接时的熔池流动规律,并借助智能化控制技术实现更为精准的焊接过程调控。这将有助于推动高温合金电子束焊接技术的持续发展和广泛应用。

## 参考文献

- [1] 张秉刚,王一帆,王厚勤.先进材料与异种材料电子束焊接研究进展[J].焊接学报,2022,43(08):95-101+119-120.
- [2] 彭靖,张嘉艺,吴若琛,等.不同电子束焊接参数对GH4169和IC10镍基高温合金组织和力学性能的影响[J].有色金属科学与工程,2024,15(05):716-722.
- [3] 文圣明.镍基高温合金电子束焊接接头服役失效机理与寿命评估研究[D].湖南大学,2023.