

钛合金与高温合金的异种材料焊接性分析

杨磊 翟鹤 郭明坤
首都航天机械有限公司 北京 100071

摘要: 随着现代工业对高性能材料需求的日益增长,钛合金与高温合金因其独特的物理和化学特性而被广泛应用于航空、航天及能源等关键领域。然而,实现这两种材料之间的可靠焊接仍然是一个技术难题。本文旨在深入探讨钛合金与高温合金的异种材料焊接性,详细分析焊接过程中的关键问题,并系统综述相关的最新研究进展,以期对相关领域的研究和实践提供有益的参考。

关键词: 钛合金; 高温合金; 异种材料焊接; 焊接性; 研究进展

引言

钛合金以其轻质、高强度、良好的耐腐蚀性以及优异的低温性能,在航空航天、海洋工程等领域具有不可替代的地位。而高温合金则以其出色的高温强度、抗氧化性能和蠕变抗力,成为发动机、燃气轮机等高温部件的首选材料。实现钛合金与高温合金的异种材料焊接,不仅可以充分发挥二者的性能优势,还有助于提高整体结构的可靠性和耐久性。然而,由于这两种材料在化学成分、物理性质以及相变行为等方面存在显著差异,焊接过程中容易产生一系列问题。因此,深入研究钛合金与高温合金的异种材料焊接性,探索有效的焊接方法和工艺措施,具有重要的理论意义和实际应用价值。

1 钛合金与高温合金的焊接难点

1.1 热物理性质的差异

钛合金与高温合金的焊接难点首先体现在二者热物理性质的显著差异上。具体来说,钛合金通常具有较低的热导率,这意味着在焊接过程中,钛合金部件的热量传递速度相对较慢,容易造成局部高温区域的产生。相比之下,高温合金则往往具有较高的热导率,能够更快速地将热量分散到整个部件中。这种热导率的不匹配会导致焊接接头处产生显著的温度梯度,进而引发较大的热应力。此外,钛合金和高温合金在线膨胀系数方面也存在明显差异。线膨胀系数是材料在受热时长度变化的度量,不同材料之间的线膨胀系数差异会在焊接冷却过程中产生残余应力,增加接头开裂的风险。特别是在复杂的焊接结构中,这种应力可能会导致接头的早期失效,严重影响焊接结构的整体性能和可靠性。因此,在钛合金与高温合金的焊接过程中,必须充分考虑并应对这些热物理性质差异带来的挑战。

1.2 化学反应与金属间化合物的生成

钛合金与高温合金焊接时面临的另一大难点是化学

反应与金属间化合物的生成。在焊接的高温环境下,钛合金中的钛元素极为活跃,容易与高温合金中的镍、铬、铝等元素发生化学反应。这些反应往往生成脆性的金属间化合物,如Ti-Ni、Ti-Cr和Ti-Al系金属间化合物。这些化合物在焊接接头中的存在,会严重破坏接头的力学连续性,导致接头强度、塑性和韧性显著降低。更为严重的是,这些金属间化合物还可能降低焊接接头的耐腐蚀性。在恶劣的工作环境中,如高温、高湿或腐蚀性介质中,这些化合物可能成为腐蚀的起点,加速接头的腐蚀速率,从而缩短焊接结构的使用寿命^[1]。因此,在钛合金与高温合金的焊接过程中,必须采取有效措施抑制这些有害的化学反应和金属间化合物的生成,以确保焊接接头的力学性能和耐腐蚀性满足使用要求。

1.3 焊接接头的组织和性能不均匀性

钛合金与高温合金焊接时,焊接接头的组织和性能不均匀性是一个突出的问题。这主要是由于两种合金的化学成分和相变行为存在显著差异。在焊接过程中,熔池的快速冷却导致接头区域经历了复杂的热循环和相变过程。钛合金可能经历了从高温 β 相到低温 α 相的转变,而高温合金则可能经历了多种析出相的生成和溶解。这种组织和相变的不均匀性使得焊接接头在力学性能和耐腐蚀性上表现出明显的不均匀性。例如,接头某些区域可能过于硬化,导致脆性增加,而其他区域则可能过于软化,降低了接头的整体强度。这种性能的不均匀性不仅影响接头的即时性能,还可能在长期使用过程中引发不可预测的失效模式,从而大大降低了焊接结构的整体可靠性和耐久性。因此,在钛合金与高温合金的焊接中,如何控制和优化接头的组织和性能均匀性,是提升焊接质量的关键所在。

2 钛合金与高温合金焊接方法的研究进展

2.1 熔化焊技术

(1) 电子束焊接：电子束焊接是一种高能量密度的焊接方法，通过聚焦的电子束轰击材料表面实现快速熔化焊接。在钛合金与高温合金的异种材料焊接中，电子束焊接具有热输入小、焊接速度快、热影响区窄等优点。然而，由于两种材料的热物理性质差异和化学反应倾向，焊接过程中仍需精确控制电子束的功率和扫描速度，以避免金属间化合物的过度生成和接头的性能下降。(2) 激光焊接：激光焊接利用激光束的高能量密度实现材料的快速熔化焊接。与电子束焊接相比，激光焊接具有更高的灵活性和可达性，适用于复杂形状和结构的焊接。在钛合金与高温合金的焊接中，激光焊接同样面临金属间化合物生成和接头性能不均匀的问题。因此，研究者们致力于优化激光焊接的工艺参数，如激光功率、焊接速度、光斑直径等，以实现更可靠的焊接质量。

2.2 扩散焊技术

扩散焊技术主要依赖于在相对较低的温度条件下，

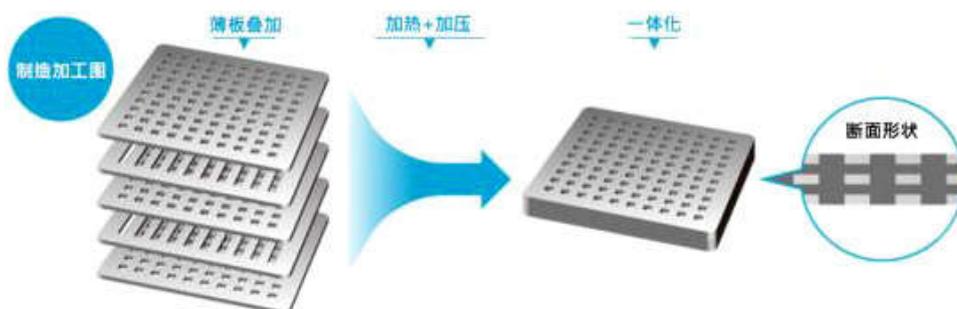


图1 扩散焊技术简要图示

2.3 搅拌摩擦焊技术

搅拌摩擦焊是一种固态连接技术，它利用高速旋转的搅拌头与工件接触，通过摩擦产生热量，使材料局部达到塑性状态，然后迅速移动搅拌头，实现材料的连接。在钛合金与高温合金的焊接中，搅拌摩擦焊展现出了其独特的优势。首先，FSW的焊接速度非常快，这大大提高了生产效率，并减少了焊接过程中材料的热暴露时间，有助于保持材料的原始性能。其次，FSW的热输入相对较小，这意味着焊接接头的热影响区较窄，从而降低了焊接残余应力和变形的风险。此外，FSW无需添加填充材料，这不仅简化了焊接过程，还避免了因填充材料与母材性能不匹配而引发的问题。然而，搅拌摩擦焊在钛合金与高温合金焊接中的应用也面临一些挑战。首先，搅拌头的设计和制造是一个关键问题（如图2）。搅拌头的形状、材料和转速等参数都会直接影响焊接过程中的热量产生和材料流动，进而影响焊接接头的质量。其次，FSW的工艺参数选择也十分重要。焊接速度、搅拌头下压量和旋转速度等参数都需要精确控制，

通过施加持续的压力和足够的时间，促使两种不同材料在接触界面处发生原子级别的扩散，从而实现牢固的连接（如图1）。在钛合金与高温合金的焊接过程中，扩散焊技术的优势尤为明显。由于焊接温度相对较低，这一技术能够有效抑制金属间化合物的生成。此外，扩散焊技术还能够减少焊接过程中接头的性能恶化。在高温下，材料的晶粒容易长大，导致接头的强度和韧性下降。而扩散焊技术由于焊接温度较低，能够减缓这一过程，从而保持接头的原始性能。然而，扩散焊技术也存在一些局限性。首先，它需要较长的焊接时间和较高的焊接压力，这可能会增加生产成本和工艺复杂性。其次，扩散焊技术对接头表面的准备要求较高，需要确保接触界面的清洁度和平整度，以获得良好的扩散效果^[2]。在实际应用中，我们需要综合考虑扩散焊技术的优缺点，根据具体需求和条件选择合适的工艺参数。

以确保焊接接头的性能和可靠性。

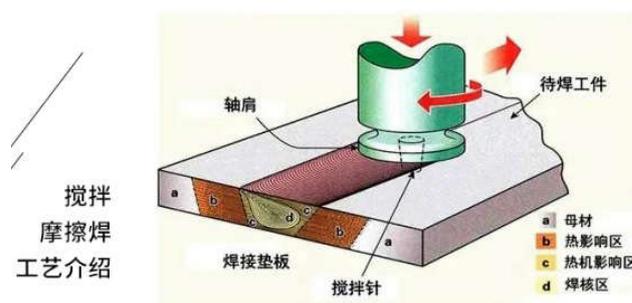


图2 搅拌摩擦焊工艺介绍

3 钛合金与高温合金焊接性的改善措施

3.1 选择合适的焊接材料和中间层

在钛合金与高温合金的焊接过程中，选择合适的焊接材料和中间层是改善焊接性的关键措施之一。这一选择不仅影响焊接接头的化学成分，还对其组织结构、力学性能和耐腐蚀性产生深远影响。焊接材料的选择至关重要。理想的焊接材料应与两种母材（钛合金和高温合金）具有良好的相容性。这意味着焊接材料在熔化后，

能够与母材形成均匀的熔池，避免产生过多的脆性金属间化合物。为了实现这一点，焊接材料可能需要包含与母材相似的合金元素，以确保化学成分的一致性。其次，中间层的添加可以进一步优化焊接接头的性能。中间层通常位于两种母材之间，起着过渡和缓冲的作用。通过精心选择中间层的合金元素，可以抑制金属间化合物的生成，从而改善接头的力学性能^[3]。

3.2 优化焊接工艺参数

优化焊接工艺参数在钛合金与高温合金的焊接过程中起着至关重要的作用。通过精确控制焊接速度、功率和温度等关键工艺参数，可以显著改善焊接接头的质量和可靠性。一方面，焊接速度是影响焊接过程热输入和冷却速度的重要因素之一。在钛合金与高温合金的焊接中，合适的焊接速度能够确保焊接接头充分熔化并形成均匀的熔池，同时避免热影响区的过度扩大。过快的焊接速度可能导致焊接接头未完全熔化，而过慢的速度则可能增加热输入，引发金属间化合物的过度生成。因此，根据具体的材料厚度、接头设计和焊接要求，选择恰当的焊接速度至关重要。另一方面，焊接功率的精确控制也是优化焊接过程的关键。功率过高可能导致焊接接头过热，增加热裂纹和内应力的风险，而功率过低则可能无法提供足够的热量来确保材料的充分熔化。因此，在钛合金与高温合金的焊接中，需要根据材料的热物理性质和焊接要求，精确调整焊接功率，以实现最佳的热输入和熔化效果。

3.3 采用先进的焊接技术和设备

采用先进的焊接技术和设备，不仅能够提升焊接过程的稳定性和可控性，还能确保焊接质量的稳定性和一致性，从而满足更为严苛的工程应用需求。高能量密度的激光或电子束焊接技术就是其中的佼佼者。这些技术利用高能束流对材料进行精确加热，实现了快速熔化和凝固过程，有效减少了热影响区，提高了焊接接头的性能。与传统的焊接方法相比，激光或电子束焊接技术具有更高的能量密度和更精确的控制能力，这使得它们在钛合金与高温合金的异种材料焊接中具有显著优势。除了焊接技术本身，先进的焊接设备也发挥着至关重要的作用。如今，许多焊接设备都配备了精确的焊接参数控制系统，如激光功率控制、焊接速度调节、光斑直径调整等。这些系统能够实时监测和调整焊接过程中的各项参数，确保焊接过程始终在最佳状态下进行。同时，这些设备还配备了各种实时监测设备，如红外测温仪、高速摄像机等，用于实时监测焊接接头的温度、熔池形态和焊接质量等关键指标。通过这些设备，焊接工程师可

以实时获取焊接过程的各项数据，及时发现并解决问题，从而确保焊接质量的稳定性和一致性。

3.4 后处理与热处理

后处理与热处理这两个环节对于提升焊接接头的综合性能、消除潜在缺陷、延长使用寿命具有至关重要的作用。热处理是一个关键步骤。在焊接过程中，由于快速加热和冷却，焊接接头往往会产生残余应力。这些应力若不及时消除，可能会导致接头在后续使用过程中出现开裂或变形等问题。热处理通过控制加热温度、保温时间和冷却速率，能够有效地消除这些残余应力，使焊接接头恢复到更为稳定的状态。同时，热处理还能改善接头的组织和性能^[4]。在适当的温度下，焊接接头中的金属元素会发生扩散和再结晶，从而优化接头的微观结构，提高其力学性能和抗疲劳性能。其次，后处理中的表面处理技术也不容忽视。钛合金和高温合金在焊接后，接头的表面往往会出现氧化层、污染物或其他缺陷。这些不良因素会降低接头的耐腐蚀性和耐磨性，影响其使用寿命。因此，采用合适的表面处理技术至关重要。例如，可以通过喷砂、抛光等方法去除接头表面的氧化层和污染物；也可以采用化学处理或电镀等方法在接头表面形成一层保护膜，增强其耐腐蚀性和耐磨性。这些表面处理技术能够显著提升焊接接头的外观质量和性能表现。

结语

钛合金与高温合金的异种材料焊接是一个具有挑战性的研究领域。尽管目前的研究已经取得了一定的进展，但仍存在许多亟待解决的问题和挑战。未来，随着新材料和新技术的不断涌现以及焊接工艺的不断优化和创新，相信钛合金与高温合金的异种材料焊接技术将会取得更大的突破和应用前景。同时，随着航空航天、能源等领域的快速发展以及对高性能材料需求的日益增长，钛合金与高温合金的异种材料焊接技术将在更广泛的领域得到应用和推广。

参考文献

- [1]程德彬,高福洋.钛合金激光焊接技术研究进展及应用情况[J].材料开发与应用,2020,35(2):87-93.
- [2]李海亮,贾德昌,杨治华,等.选区激光熔化3D打印钛合金及其复合材料研究进展[J].材料科学与工艺,2019,27(2):1-15.
- [3]陈阳.激光焊接技术特性及在工程材料上的应用[J].科技创新导报,2021,18(12):50-53.
- [4]毛艳蕾,赵国庆,陈泽龙.浅谈钛合金焊接结构在先进飞机中的应用及发展[J].科学与信息化,2021(2):118.