

VAR熔炼工艺参数对钛合金铸锭偏析现象的影响分析

彭 强 刘 钊 周兵兵 毛玲玲 朱建军
宝鸡钛业股份有限公司 陕西 宝鸡 721014

摘 要: 本文深入分析了VAR工艺参数对钛合金铸锭偏析现象的影响。通过系统研究熔炼电流、电压、熔炼速度、冷却条件等关键参数的变化对钛合金铸锭中元素分布的影响,揭示了偏析现象的形成机制。研究采用数值模拟与实验验证相结合的方法,发现工艺参数的优化能够显著降低铸锭中的偏析程度,提高钛合金的组织均匀性和力学性能。本研究为优化VAR熔炼工艺、制备高质量钛合金铸锭提供了理论依据和技术支撑。

关键词: VAR熔炼工艺; 钛合金铸锭偏析现象; 影响分析

1 VAR 熔炼工艺原理与特点

1.1 VAR熔炼工艺基本原理

VAR, 即真空自耗电弧熔炼 (Vacuum Arc Remelting), 是一种在真空状态下进行的熔炼技术。其基本原理是利用直流电源在电极与放置于水套中的铜坩埚底板之间产生电弧, 电弧加热产生高热, 熔化电极。电极在此过程中不断下降并继续熔化, 最终在水冷铜坩埚内形成熔池。熔化的金属在熔池中完成速凝、结晶、凝固的过程, 最终形成金属锭。

1.2 VAR熔炼工艺特点

第一, 能耗低、熔化速度快。VAR工艺利用电弧加热, 具有较高的熔化效率, 能够快速熔化金属电极, 形成熔池。第二, 质量重现性好。VAR工艺在真空状态下进行, 避免了熔液与大气中的氢、氧、氮等元素的接触, 减少了夹杂物和污染物的产生, 使得铸锭的质量重现性好。第三, 组织均匀、无缩孔。VAR工艺生产的金属锭组织均匀, 无缩孔, 且由于熔炼过程中夹杂物上浮, 锭子端部可能会集中一些夹杂物, 但整体质量仍然较高。第四, 提高铸锭的洁净度、均匀度和力学性能。VAR工艺显著提高了铸锭的洁净度、均匀度和抗疲劳、断裂韧性等力学性能, 使得铸锭更加适用于高性能材料的需求。

1.3 在钛合金铸锭生产中的应用现状

在钛合金铸锭生产中, VAR熔炼工艺得到了广泛应用。对于复杂组元的航空级和转子级钛合金, 一般采用多次VAR工艺以提高铸锭的成分均匀性, 减少夹杂和偏析等缺陷, 并提高批次质量一致性^[1]。VAR工艺能够生产高品质、高性能的钛合金铸锭, 这些铸锭被广泛应用于航空、航天等领域。为了提高钛合金的性能和质量, 国内外大多数高品质钛合金采用双联或三联熔炼工艺进行生产。为了提高VAR熔炼工艺的稳定性和可控性, 发展了

新的监控手段和熔炼模拟软件。这些技术能够实时监测熔炼过程, 模拟熔炼结果, 为优化工艺参数和提高铸锭质量提供了有力支持。

2 钛合金铸锭偏析现象概述

2.1 偏析类型

钛合金铸锭中的偏析现象可以根据其表现形式和产生原因分为多种类型。宏观偏析是指铸锭中较大范围内化学成分的不均匀分布。这种偏析通常与熔炼和凝固过程中的温度梯度、熔池形状、熔炼速度等因素有关。在钛合金铸锭中, 宏观偏析可能导致铸锭不同部位的性能差异显著, 影响整体使用效果。微观偏析是指铸锭中微小区域内化学成分的不均匀分布。这种偏析通常发生在晶界、枝晶间或相界等微观结构中。微观偏析可能导致材料的力学性能、耐腐蚀性、抗疲劳性能等下降。根据钛合金中主要相的不同, 偏析可以分为 α 偏析和 β 偏析。 α 偏析主要发生在 α 相或 $\alpha+\beta$ 两相钛合金中, 表现为 α 稳定元素 (如铝、钒等) 的局部富集。 β 偏析则主要发生在 β 钛合金中, 表现为 β 稳定元素 (如钼、铬等) 的局部富集。这两种偏析都可能严重影响钛合金的性能。钛合金中某些特定元素 (如镧系元素、氮、碳、氧等) 的偏析也是常见的偏析类型。这些元素的偏析可能导致晶界脆化、形成脆性相或降低材料的韧性。

2.2 偏析对钛合金铸锭性能的影响

偏析对钛合金铸锭性能的影响是多方面的, 偏析可能导致铸锭内部出现软区或硬区, 使得整体力学性能不均匀, 偏析还可能引起材料的脆性增加、韧性降低等问题。偏析区域中合金元素的富集或贫化可能导致材料的耐腐蚀性下降。例如, 铝元素的富集可能增加材料的阳极溶解倾向, 从而降低耐腐蚀性。偏析可能导致铸锭内部出现应力集中点, 从而降低材料的抗疲劳性能。在循环载荷作用下, 这些应力集中点容易成为裂纹萌生的起

点,导致材料早期失效。偏析还可能影响钛合金的加工性能。例如,在切削加工过程中,偏析区域可能出现刀具磨损加剧、切削力增大等问题。

2.3 偏析形成的基本机制

钛合金铸锭偏析现象的形成机制涉及多个方面,主要包括几个方面;(1)溶质分配系数差异:在钛合金熔炼和凝固过程中,不同合金元素在固相和液相之间的分配系数存在差异。这种差异导致合金元素在凝固过程中容易在晶界、枝晶间或相界等区域富集或贫化,从而形成偏析^[2]。(2)凝固过程中的扩散限制:在凝固过程中,由于溶质原子的扩散速度有限,可能导致溶质原子在固相中的分布不均匀。特别是在快速凝固条件下,溶质原子的扩散受到严重限制,更容易形成偏析。(3)熔池形状和温度梯度:熔池形状和温度梯度对钛合金铸锭偏析现象的形成也有重要影响。熔池形状的变化可能导致熔体中合金元素的分布不均匀;而温度梯度的存在则可能导致溶质原子在凝固前沿的富集或贫化。(4)熔炼工艺参数:熔炼工艺参数(如熔炼速度、熔炼温度、冷却速度等)对钛合金铸锭偏析现象的形成也有显著影响。这些参数的变化可能导致熔体中合金元素的分布和凝固过程中的扩散行为发生变化,从而影响偏析的形成。

3 VAR 熔炼工艺参数对偏析现象的影响分析

VAR(真空自耗电弧炉)熔炼工艺是钛合金等金属材料制备中的重要技术,其工艺参数的调整对铸锭的微观结构和宏观性能有着显著影响,尤其是偏析现象。偏析是指铸锭中不同部位合金元素含量波动范围大、成规律分布、局部含量超标的现象,又称区域偏析,严重影响铸锭的组织 and 性能。

3.1 熔炼电流与电压

熔炼电流与电压是影响VAR熔炼过程中电弧稳定性、熔池温度分布及熔体流动的关键因素。在VAR熔炼中,熔炼电流的增加意味着VAR炉的功率增加,单位时间内进入熔池的熔体增多,从而带入熔池的热量也增多。这导致熔池内高温熔体的体积逐渐增加,熔池与坩埚壁接触位置的温度梯度逐渐减小。随着熔炼电流的增大,熔池内熔体流动速率增加,流动更加剧烈。熔池内熔体流动分为上下两部分,熔池内上部熔体逆时针流动,下部熔体顺时针流动。这种流动模式会加剧熔池中溶质的再分配过程,使得易偏析元素有更多时间向铸锭中心或特定区域富集,从而加剧宏观偏析。例如,在Ti60合金的VAR熔炼过程中,随着熔炼电流从15kA增大至30kA,铸锭中Zr元素的最大含量从3.88%增加至4.94%(质量分数),增加了27.3%,表明熔炼电流的增大显著

加剧了铸锭的宏观偏析。电压的变化也会影响电弧的稳定性和熔池的温度分布,进而影响偏析现象,与熔炼电流相比,电压对偏析的影响通常较为次要,且往往通过调整电流来间接控制电压。

3.2 熔炼速度

熔炼速度是指单位时间内熔炼完成的铸锭质量或长度。在VAR熔炼中,熔炼速度的快慢直接影响熔池的冷却速率和凝固过程,从而对偏析现象产生重要影响。较快的熔炼速度意味着熔池中的熔体在短时间内完成凝固,这有助于减少溶质在凝固过程中的再分配时间,从而降低宏观偏析的程度,过快的熔炼速度可能导致熔池温度分布不均,增加凝固缺陷的风险。相反,较慢的熔炼速度虽然有助于熔池温度的均匀分布和熔体的充分流动,但会延长熔体的凝固时间,使得易偏析元素有更多时间向铸锭中心或特定区域富集,从而加剧宏观偏析。

3.3 冷却条件

冷却条件是影响VAR熔炼过程中铸锭凝固速率和凝固组织的关键因素之一。冷却速率的快慢直接影响铸锭中溶质的再分配过程和偏析现象。较快的冷却速率有助于减少溶质在凝固过程中的扩散时间,从而降低宏观偏析的程度,过快的冷却速率可能导致铸锭内部产生热应力和裂纹等缺陷^[3]。相反,较慢的冷却速率虽然有助于熔池温度的均匀分布和熔体的充分凝固,但会延长溶质的再分配时间,使得易偏析元素有更多时间向铸锭中心或特定区域富集,从而加剧宏观偏析。冷却方式的选择也对偏析现象有重要影响。

3.4 电极质量与初始条件

电极质量是影响VAR熔炼过程中电弧稳定性和熔池温度分布的重要因素之一。电极的材质、尺寸和形状等参数都会影响电弧的燃烧状态和熔池的流动行为。高质量的电极能够确保电弧的稳定燃烧和熔池的均匀加热,从而减少熔炼过程中的波动和不确定性因素,有助于降低宏观偏析的程度。相反,质量较差的电极可能导致电弧不稳定、熔池温度分布不均等问题,从而加剧宏观偏析。初始条件包括熔炼前的准备工作、熔炼环境的清洁度以及熔炼设备的状态等。这些条件都会影响熔炼过程的稳定性和铸锭的质量。例如,熔炼前的清洁工作不彻底可能导致熔池中混入杂质元素,从而影响铸锭的化学成分和微观结构;熔炼设备的状态不佳可能导致电弧不稳定或熔池温度分布不均等问题,进而加剧宏观偏析。

4 基于数值模拟的 VAR 熔炼过程与偏析研究

4.1 数值模拟模型建立

数值模拟模型旨在准确反映VAR熔炼过程中的物理

现象,包括电弧的热效应、熔池的流动行为、温度场的分布以及溶质的扩散与再分配等。为此,研究者需根据VAR熔炼的实际工艺条件,构建包含熔池、坩埚、电极以及周围环境的三维数学模型。在模型建立过程中,要确保模型能够准确描述电弧的热输入,这通常通过求解电磁方程和热传导方程来实现;要模拟熔池的流动行为,需考虑熔体的重力、表面张力、电磁力以及熔池形状变化等因素对流动的影响;温度场的模拟需考虑熔池与坩埚、电极之间的热交换,以及熔体内部的热传导;最后,还需建立溶质扩散与再分配的数学模型,以描述偏析现象的发生和发展。为了实现上述目标,研究者通常采用计算流体动力学(CFD)和有限元分析(FEA)等数值方法,结合适当的边界条件和初始条件,构建完整的数值模拟模型。

4.2 模拟参数设置与验证

在数值模拟过程中,参数的设置对模拟结果的准确性具有重要影响。对于VAR熔炼过程与偏析研究而言,模拟参数主要包括电弧电流、电压、熔炼速度、冷却条件以及合金成分等。这些参数的取值需根据实际的VAR熔炼工艺条件进行合理设定。在设置完模拟参数后,还需对模型进行验证。验证过程通常包括两个方面:一是通过与实验结果进行对比,检验模型在描述VAR熔炼过程和偏析现象方面的准确性;二是通过敏感性分析,评估不同参数对模拟结果的影响程度,以确保模型的稳定性和可靠性。在验证过程中,研究者需关注模拟结果与实验结果的一致性,包括熔池的形状、温度场的分布、溶质的扩散与再分配等方面。若出现较大差异,需对模型进行调整和优化,直至模拟结果与实验结果相吻合。另外,还需注意模拟参数的取值范围需合理,以避免因参数设置不当而导致的模拟结果失真。通过验证后的数值模拟模型,能够更准确地反映VAR熔炼过程中的物理现象和偏析现象的发生机制,为后续的分析 and 讨论提供了可靠的数据支持。

4.3 模拟结果分析与讨论

在完成数值模拟并验证模型准确性后,需对模拟结果进行深入的分析 and 讨论。对于VAR熔炼过程与偏析研

究而言,首先,分析熔池的形状和温度场的分布,熔池的形状和温度场是影响偏析现象的关键因素之一。通过模拟结果,可以直观地观察到熔池在VAR熔炼过程中的动态变化,以及温度场的分布情况。这有助于理解偏析现象的发生机制,并为优化VAR熔炼工艺提供指导^[4]。其次,讨论溶质的扩散与再分配过程,溶质的扩散与再分配是导致偏析现象的根本原因。通过模拟结果,可以分析不同合金元素在熔池中的扩散行为和再分配规律,从而揭示偏析现象的形成机制。另外,评估不同工艺参数对偏析现象的影响,通过敏感性分析,可以评估电弧电流、电压、熔炼速度、冷却条件等工艺参数对偏析程度的影响程度。这有助于优化VAR熔炼工艺参数,以降低偏析程度并提高铸锭质量。最后,结合实验结果对模拟结果进行验证和讨论,通过与实验结果的对比和分析,可以进一步验证数值模拟模型的准确性和可靠性,并揭示VAR熔炼过程中偏析现象的复杂性和多样性。这有助于深入理解偏析现象的本质,并为后续的研究提供有益的参考和借鉴。

结束语

综上所述,VAR熔炼工艺参数对钛合金铸锭偏析现象具有显著影响。通过精细调控熔炼电流、电压、熔炼速度和冷却条件等参数,可以有效控制钛合金铸锭中的元素分布,减少偏析现象的发生。本研究不仅加深对VAR熔炼过程中偏析机制的理解,还为钛合金等高性能金属材料的制备提供重要的工艺优化方向。未来,随着技术的不断进步,VAR熔炼工艺在制备高质量金属材料方面将发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1]王磊.张伟.保护气氛对钛合金微观结构及力学性能的调控作用[J].金属学报,2020,56(2):
- [2]张鹏.钛合金在不同保护气氛下的相变行为研究[J].稀有金属材料与工程,2021,30(3):215-220.
- [3]陈明.铝合金熔炼工艺参数对性能影响研究[J].金属材料与冶金工程,2020,50(3):50-56.
- [4]杨阳.赵光.铝合金熔炼浇铸工艺参数对成分与力学性能的影响分析[J].材料研究与应用,2021,10(2):145-150.