

大规格钛合金铸锭真空自耗电弧熔炼过程中成分均匀性研究

彭 强 刘 钊 周兵兵 史莹莹 史建凯
宝鸡钛业股份有限公司 陕西 宝鸡 721014

摘 要：大规格钛合金铸锭在航空航天、医疗植入物等高新技术领域有着广泛应用，其成分均匀性直接影响材料性能与使用寿命。本文聚焦于真空自耗电弧熔炼（VAR）过程中大规格钛合金铸锭的成分均匀性研究，通过优化原材料选择、调整熔炼工艺参数、改进电极制备与焊接技术，并结合熔池搅拌策略，有效提升了铸锭内部合金元素的均匀分布。研究结果显示，采取综合优化措施后，铸锭成分偏析显著减少，成分均匀性得到显著改善，为生产高性能、大尺寸钛合金铸锭提供了可靠的技术路径。

关键词：大规格钛合金铸锭；真空自耗电弧熔炼；成分均匀性

1 真空自耗电弧熔炼技术原理与特点

1.1 真空自耗电弧熔炼的基本原理

真空自耗电弧熔炼（VAR, Vacuum Arc Remelting）技术是一种先进的金属熔炼方法，特别适用于钛及钛合金等高活性、高熔点材料的制备。该技术的基本原理是在真空或惰性气体环境下，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。电弧的高温作用使电极迅速熔化，熔化的金属液滴不断滴入水冷铜坩埚内形成熔池，随后凝固成锭。具体过程如下：首先，将精心制备的自耗电弧电极作为负极，而铜坩埚则作为正极。在真空或惰性气体保护下，当直流电源接通时，电极与坩埚之间产生强烈的电弧放电。电弧的高温使电极迅速熔化，熔化的金属液滴在重力作用下滴入铜坩埚内，形成熔池。在熔池内，金属液经历速凝、结晶和凝固过程，最终凝固成致密的金属锭。另外，真空自耗电弧熔炼过程中，电弧的稳定性至关重要。为了确保电弧的稳定燃烧，通常采用直流低电压、大电流的操作条件。通过精确控制电极与坩埚之间的距离以及电极的下降速度，可以进一步优化熔炼过程，提高铸锭的质量。

1.2 技术特点分析

真空自耗电弧熔炼技术具有一系列显著的技术特点，这些特点使其在金属熔炼领域具有广泛的应用前景。第一，高效熔炼与自动化生产。真空自耗电弧熔炼技术能够实现快速熔炼，大大提高了生产效率。随着自动化技术的不断发展，现代真空自耗电弧熔炼炉已实现全自动化操作。通过电脑控制系统，可以精确控制熔炼过程中的各项参数，如电极间隙、熔炼速度等，从而确保铸锭成分的稳定性和均匀性^[1]。第二，优异的杂质去

除能力。在真空或惰性气体环境下进行熔炼，可以有效地去除金属中的气体杂质和非金属夹杂物。由于电弧的高温作用，金属液中的低熔点有害杂质也会被迅速蒸发和去除，从而进一步提高铸锭的纯净度和冶金质量。第三，灵活的合金化过程。真空自耗电弧熔炼技术允许在熔炼过程中灵活加入各种合金元素，以形成多元中间合金或块、棒、条等形式。这种灵活的合金化过程使得该技术能够制备出具有复杂成分和高性能要求的钛合金材料。第四，良好的工作环境与环保性能。由于整个熔炼过程在真空或惰性气体环境下进行，因此大大减少有害气体的排放和环境污染，密闭的熔炼容器也确保了操作人员的工作环境安全。

1.3 在钛合金铸锭生产中的应用现状

真空自耗电弧熔炼技术在钛合金铸锭生产中具有广泛的应用前景和重要的战略意义。随着航空航天、医疗、化工等领域的快速发展，对钛合金材料的需求日益增长。而真空自耗电弧熔炼技术正是制备高质量钛合金铸锭的关键技术之一。随着工业对大型钛合金产品的需求不断增加，真空自耗电弧熔炼技术已能够实现大型化生产。通过优化电极质量和熔炼工艺，进一步提高了生产效率，降低了生产成本。这使得真空自耗电弧熔炼技术在钛合金铸锭生产中具有更强的竞争力。真空自耗电弧熔炼技术能够制备出具有高纯净度、高均匀性和高性能的钛合金材料。这些材料在航空航天、医疗等领域具有广泛的应用前景。例如，在航空航天领域，高品质的钛合金材料可以用于制造飞机发动机叶片、机体结构等关键部件；在医疗领域，则可以用于制造人工关节、牙科植入物等高端医疗器械。为了提高钛合金铸锭的质量

和性能,通常需要将真空自耗电弧熔炼技术与其他熔炼技术相结合。例如,可以采用“真空感应熔炼+真空自耗电弧熔炼”的双联工艺或“真空感应熔炼+电渣重熔+真空自耗电弧熔炼”的三联工艺来进一步精炼钛合金材料。这些组合工艺能够更有效地去除金属中的杂质和夹杂物,提高铸锭的纯净度和冶金质量。随着科技的不断发展,真空自耗电弧熔炼技术也在不断创新和改进中。这些技术创新和持续改进使得真空自耗电弧熔炼技术在钛合金铸锭生产中始终保持领先地位。

2 大规格钛合金铸锭成分均匀性的影响因素分析

2.1 原材料因素

在大规格钛合金铸锭的生产过程中,原材料的选择与处理对铸锭成分均匀性具有至关重要的影响。钛合金铸锭的主要原材料包括海绵钛及中间合金,这些材料的化学成分、杂质含量以及颗粒度大小等因素都会直接影响到铸锭的最终质量。原材料中的化学成分必须严格控制,以确保铸锭中各合金元素含量不仅达到标准要求,而且要稳定地控制在一个最佳的含量水平。同时主要杂质如铁(Fe)、氧(O)等的含量也需要控制在适当范围内,以避免对铸锭性能产生不良影响。海绵钛作为钛合金的主要原料,其杂质含量会直接影响铸锭的化学成分含量要求。在生产过程中,需要人工筛选出有缺陷的海绵钛,如过烧的海绵钛块、带有氧化和富氮痕迹的海绵钛块、带有明显氯化物残余或残渣的海绵钛块,以及高铁及其伴生元素的海绵钛块等。这些有缺陷的海绵钛块如果用于生产,将会导致铸锭成分的不均匀性。除了化学成分与杂质含量外,海绵钛的颗粒度大小也是影响铸锭成分均匀性的重要因素。颗粒度大小不均匀的海绵钛容易造成铸锭内部的I类区域偏析。

2.2 熔炼工艺参数因素

熔炼工艺参数是影响大规格钛合金铸锭成分均匀性的另一个关键因素。熔炼过程中涉及的工艺参数众多,包括电流、电压、稳弧电流大小、稳弧搅拌时间以及真空度等。这些参数的合理设置与优化对于提高铸锭成分均匀性具有重要意义。电流与电压是影响熔池深度和温度的关键因素,电流过低会导致熔池太浅,熔池温度较低,使得自耗电电极中的海绵钛及合金添加剂熔化不充分。在稳弧电流磁场力作用下,这些未熔化的部分会快速移向熔池边缘或漂浮于熔融钛液表面,最终在熔炼结束后埋于铸锭端部形成缩孔或夹杂^[2]。稳弧电流的大小和搅拌时间直接影响熔池中金属的混合均匀性,通过调节稳弧电流的大小和搅拌时间,可以使两相的熔融金属在稳弧电流的搅拌下充分混合均匀。这对于消除铸锭内部

的偏析现象和提高成分均匀性具有重要意义,过长的搅拌时间也可能导致铸锭内部的组织粗化,因此需要在保证成分均匀性的前提下合理控制搅拌时间。真空度是影响熔炼过程中气体杂质去除效果的关键因素,在真空环境下进行熔炼可以有效地去除金属中的气体杂质和非金属夹杂物。如果真空度不足或漏气率偏大,将会导致气体杂质无法充分去除,从而影响铸锭的纯净度和成分均匀性。

2.3 熔炼过程物理现象因素

除了原材料和熔炼工艺参数外,熔炼过程中的一些物理现象也会大规格钛合金铸锭成分均匀性产生影响。熔池的流动状态是影响铸锭成分均匀性的重要因素之一,在熔炼过程中,熔池内的金属液会受到电弧热和稳弧电流磁场力的作用而发生流动。合理的熔池流动状态有助于金属液的均匀混合和气体杂质的去除。如果熔池流动状态不佳,如存在涡流或死区等现象,将会导致金属液混合不均匀和气体杂质无法充分去除,从而影响铸锭的成分均匀性。金属的凝固过程是影响铸锭微观组织和成分均匀性的关键环节,在凝固过程中,金属液中的溶质元素会发生偏析现象,导致铸锭内部成分的不均匀性。在凝固过程中还需要注意避免产生冷隔、缩孔等缺陷,这些缺陷也会对铸锭的成分均匀性产生不良影响。电磁场的分布对熔炼过程中的金属液流动和凝固过程具有重要影响,合理的电磁场分布可以促进金属液的均匀混合和气体杂质的去除,从而提高铸锭的成分均匀性。如果电磁场分布不均或存在异常现象,将会导致金属液流动状态不佳和凝固过程不均匀,从而影响铸锭的质量。

3 规格钛合金铸锭 VAR 熔炼过程中成分均匀性优化技术研究

在钛合金材料的制备过程中,VAR(真空自耗电弧熔炼)技术因其能够生产高纯度、成分均匀的钛合金铸锭而被广泛应用。特别是对于规格较大的钛合金铸锭,VAR熔炼过程中的成分均匀性优化显得尤为重要。

3.1 原材料优化选择与预处理

3.1.1 原材料选择

钛合金铸锭的成分均匀性首先取决于原材料的纯净度和化学成分的稳定性。因此在VAR熔炼前,必须对原材料进行优化选择和预处理。对于制备TC4 ELI(Ti-6Al-4V ELI)等高端钛合金铸锭,原材料的纯净度是首要考虑因素。海绵钛作为钛合金的主要原料,其等级直接决定了铸锭的初始质量。通常,选择0级或更高等级的海绵钛,以确保其杂质元素含量极低。中间合金的选择也至

关重要,如铝钒合金(AlV55)、铝豆(Al 99.8%)、钛铁合金(Ti-32Fe)及TiO₂等,这些中间合金的纯度和成分比例需严格控制,以保证最终铸锭的合金元素含量准确且分布均匀^[3]。

3.1.2 预处理

原材料预处理主要包括清洗、干燥和混合。清洗可以去除海绵钛和中间合金表面的氧化物、油污等杂质,提高熔炼过程中的纯净度。干燥则是为了防止熔炼过程中水分蒸发导致的气孔和夹杂物形成。混合则是将海绵钛和中间合金按照预定的比例进行均匀混合,以确保熔炼过程中合金元素的均匀分布。

3.2 熔炼工艺参数优化

VAR熔炼工艺参数的优化是控制铸锭成分均匀性的关键。利用MeltFlow-VAR等熔炼模拟软件,可以对钛合金VAR熔炼过程进行数值模拟。通过建立轴对称数学模型并采用有限体积法进行计算,可以模拟熔炼过程中铸锭的连续上升行为,以及熔池的温度场分布和合金元素的扩散情况。这些模拟结果可以为实际熔炼过程中的工艺参数优化提供指导。根据数值模拟结果,可以调整熔炼工艺参数以优化铸锭的成分均匀性。例如,在熔炼超大规模TC4 ELI钛合金铸锭时,通过降低熔炼电流、增大稳弧电流和稳弧周期,有助于得到“扁平状”熔池,改善熔池的到边情况,从而提高铸锭的表面质量和内部成分均匀性。合理的熔炼参数还可以减少夹杂物的形成,提高铸锭的纯净度。

3.3 电极制备与焊接技术改进

电极的制备和焊接技术是VAR熔炼过程中的重要环节,对铸锭的成分均匀性也有显著影响。电极的制备包括混布料、压制和焊接等步骤。混布料时需要确保海绵钛和中间合金的均匀混合,以避免熔炼过程中出现合金元素的局部偏析。压制过程中需要控制电极的密度和形状,以保证熔炼过程中的稳定性和均匀性。焊接则是将多个电极连接成一个整体,以确保熔炼过程的连续性。为了提高电极的焊接质量和稳定性,可以采用先进的焊接技术和设备。例如,采用激光焊接或电子束焊接等高精度焊接方法,可以减少焊接过程中的热影响区和夹杂物形成,提高电极的强度和均匀性,还可以对焊接接头进行

热处理,以消除焊接应力、提高接头的强度和韧性。

3.4 熔池搅拌与合金元素均匀化技术

熔池搅拌是VAR熔炼过程中促进合金元素均匀分布的有效手段。熔池搅拌可以通过改变熔炼电流、稳弧电流和稳弧周期等参数来实现。这些参数的变化会导致熔池中电流和磁场的分布发生变化,从而产生搅拌效果。还可以采用机械搅拌或气体搅拌等方式来增强熔池的搅拌效果^[4]。除了熔池搅拌外,还可以采用其他合金元素均匀化技术来提高铸锭的成分均匀性。例如,在熔炼过程中添加适量的合金元素粉末或颗粒,这些粉末或颗粒会在熔池中迅速溶解并扩散,从而提高合金元素的均匀性。还可以采用多次熔炼和精炼的方法,通过反复熔化和凝固过程来消除合金元素的偏析和夹杂物。在实际应用中,可以通过对铸锭进行成分分析和性能测试来评估熔炼工艺和合金元素均匀化技术的效果。例如,在熔炼超大规模TC4 ELI钛合金铸锭时,通过优化熔炼工艺参数和采用合理的熔池搅拌方式,可以得到成分均匀、无皮下气孔和夹渣等缺陷的高质量铸锭。这些铸锭在后续的加工和性能测试中表现出优异的力学性能和持久性能。

结束语

综上所述,大规模钛合金铸锭真空自耗电弧熔炼过程中的成分均匀性研究是一项系统工程,涉及原材料、熔炼工艺、电极制备及熔池搅拌等多个环节。通过本文的研究,不仅深入理解了影响铸锭成分均匀性的关键因素,还提出一系列有效的优化措施。未来,随着材料科学与制备技术的不断进步,有理由相信,大规模钛合金铸锭的成分均匀性将得到进一步提升,为高端装备制造提供更加优质的材料支撑。

参考文献

- [1]李明.钛合金熔炼温度对材料性能的影响研究[J].材料科学与工程,2019,37(4):23-27.
- [2]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):145-150.
- [3]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.
- [4]裴桢.自动化技术在铝合金熔铸生产工艺中的应用及发展现状[J].山西冶金,2022,000(3):45-46.