

钛合金铸造缩孔热变形演变规律研究

王嘉阳 闻雅 逢聪卓 刘俊宝 董泽宁

航天海鹰(哈尔滨)钛业有限公司 黑龙江 哈尔滨 150029

摘要: 本文探讨了钛合金铸造过程中的缩孔形成及热变形理论基础,介绍了钛合金的特性、常用铸造工艺及其在工业生产中的重要性。分析了铸造缩孔形成机理、热变形基本理论以及两者间的相互作用和影响。提出了基于热变形演变规律的铸造工艺调整、铸造参数优化、热处理工艺改进等优化建议,以减少缩孔形成、促进缩孔愈合,并通过控制热变形过程改善钛合金材料性能。这些优化措施有助于提升钛合金铸件的质量和性能。

关键词: 钛合金; 铸造缩孔; 热变形; 演变规律

1 钛合金铸造缩孔形成及热变形理论基础

1.1 钛合金的特性与常用铸造工艺

钛合金具有密度小、比强度高、热膨胀系数小、耐腐蚀性好、相容性高、易焊接等特性,因此在航空航天、化工、医疗等领域得到广泛应用。在机械加工过程中,钛合金具有多晶型性,可以根据退火状态组成差异分为 α 型、 β 型以及 $\alpha+\beta$ 型。钛合金的微观组织通过热加工处理会产生相应变化,这为钛合金微观组织结构调控性奠定了良好基础。钛合金的加工方法多样,其中铸造工艺主要包括精密铸造、金属型重力铸造、离心铸造等;精密铸造工艺能够达到复杂薄壁钛合金铸件的生产标准,主要应用于生产质量要求较高的航空零件。金属型重力铸造则是使用冷凝壳或真空电弧熔炼将钛合金倒入可重复使用的近净成形模具中,以细化钛合金微观结构,消除硬化层,提高零件的稳定性。离心铸造则是通过模型旋转产生的离心力,将液态金属填充模具并固化,从而简化套筒及其他零件的制备过程。

1.2 铸造缩孔形成机理

钛合金铸件在铸造过程中,由于液态向固态转变体积收缩,当没有液体填充时,会形成缩松或者缩孔。缩孔是钛合金铸件表面或内部存在的一种表面粗糙的孔,轻微缩孔是许多分散的小缩孔,即缩松。缩孔或缩松处晶粒粗大,常发生在钛合金铸件内浇道附近、冒口根部、厚大部位,以及壁的厚薄交接处和具有大平面的厚薄处^[1]。铸造缩孔的形成原因主要包括模具工作温度控制未达到定向凝固要求、涂料选择不当、铸件在模具中的位置设计不当、浇冒口设计未能达到充分补缩的作用,以及浇注温度过低或过高。为了防止铸造缩孔,可以采取提高模具温度、调整涂料层厚度、对模具进行局部加热或用绝热材料局部保温、热节处镶铜块对局部进行激冷、模具上设计散热片加速局部地区冷却速度、用可拆

卸激冷块轮流安放在型腔内、模具冒口上设计加压装置以及选择适宜的浇注温度等措施。

1.3 热变形基本理论

钛合金在高温条件下可能发生热变形,这是由于高温下金属晶格结构的改变和原子热运动的增强导致的。热变形包括热蠕变、晶粒长大等现象。热蠕变是在高温和应力作用下,钛合金发生的渐进性塑性变形,主要由晶格内部的原子滑移导致。热蠕变的发生速率与应力、温度和合金的化学成分等因素密切相关。晶粒长大则是在高温条件下,钛合金的晶粒可能发生的长大现象,这可能导致材料的塑性降低和抗拉强度下降。为了减缓钛合金的热变形,可以采取合理的材料选择、设计和工艺控制。例如,通过调整合金的成分来改变其晶格结构和相变温度,从而提高其高温稳定性;对钛合金进行表面涂层,可以提高其耐高温氧化的能力;通过合适的热处理工艺,可以调整合金的晶粒结构,改善其高温性能。

2 介绍钛合金在工业生产中的重要性

钛合金在工业生产中扮演着举足轻重的角色,其重要性不容忽视。作为一种高性能的轻质金属材料,钛合金以其卓越的强度、耐腐蚀性和耐高温性能,在众多领域展现出了无可替代的优势。在航空航天领域,钛合金因其轻质高强度的特性,成为制造飞机和航天器关键部件的首选材料。它不仅能够显著减轻飞行器的重量,提高燃油效率,还能够在极端温度和高强度压力下保持结构的完整性和稳定性。在医疗领域,钛合金被广泛用于制造骨科植入物,如人工关节和牙科植入物。其良好的生物相容性和耐腐蚀性确保了植入物在人体内的长期稳定性和安全性。在化工、海洋工程、汽车制造和体育用品等领域,钛合金也发挥着重要作用,在化工行业,钛合金能够耐受各种腐蚀性介质的侵蚀,是制造化工设备和管道的理想材料。在海洋工程中,钛合金的耐腐蚀性

和高强度使其成为制造海洋平台和船舶结构的优选材料。在汽车制造中,钛合金的轻量化特性有助于降低汽车重量,提高燃油效率。而在体育用品领域,钛合金因其高强度和轻质特性,被用于制造高尔夫球杆、自行车车架等高端运动器材。

3 钛合金铸造缩孔热变形演变规律的理论分析

3.1 缩孔形成与热变形过程的相互作用

钛合金铸造过程中,缩孔的形成与随后的热变形过程之间存在着紧密的相互作用。缩孔的形成源于液态钛合金凝固时的体积收缩,若此时未得到足够的金属液补充,便会在铸件内部形成空洞。而热变形,则是在高温条件下,钛合金因外力作用或内部应力而发生的形状变化^[2]。缩孔的存在不仅影响铸件的力学性能,还可能成为热变形过程中的应力集中点,加剧变形程度,甚至导致铸件开裂,热变形过程中的塑性流动也可能对缩孔的形态和分布产生一定影响,使得缩孔在变形后呈现出更为复杂的形态。

3.2 热变形条件对缩孔演变的影响分析

3.2.1 温度、应力与应变对缩孔演变的作用

温度是影响钛合金热变形行为和缩孔演变的关键因素。随着温度的升高,钛合金的屈服强度和抗拉强度降低,塑性增加,使得热变形更容易发生,高温下的原子热运动增强,有利于缩孔周围的金属流动,可能促进缩孔的愈合或改变其形态。应力与应变则直接作用于钛合金的微观结构,影响缩孔的演变。在应力作用下,缩孔周围的金属可能发生塑性流动,导致缩孔被压缩或拉伸变形。而应变的大小和方向则决定了缩孔变形的程度和方向。

3.2.2 热变形速率与缩孔演变的关系

热变形速率对钛合金缩孔的演变也有显著影响。较快的变形速率可能导致金属流动不充分,使得缩孔难以愈合或变形不均匀。相反,较慢的变形速率有利于金属流动和缩孔的愈合,但也可能导致缩孔在长时间的高温作用下发生更复杂的形态变化,选择合适的热变形速率是控制钛合金铸件缩孔演变的关键。

3.2.3 热处理工艺对缩孔演变的影响

热处理工艺,如固溶处理、时效处理等,对钛合金的微观结构和性能有重要影响,进而间接影响缩孔的演变。固溶处理可以消除钛合金中的第二相,提高材料的均匀性和塑性,有利于缩孔的愈合^[3]。时效处理则通过析出强化相,提高材料的强度和硬度,但也可能导致缩孔周围的微观结构发生变化,影响缩孔的稳定性。

3.3 微观组织演变与缩孔行为的关联性分析

钛合金的微观组织演变与缩孔行为之间存在密切的关联性。微观组织的形态、大小和分布直接影响钛合金的力学性能和热变形行为,进而影响缩孔的演变。例如,细小的等轴晶组织有利于提高钛合金的塑性和韧性,有利于缩孔的愈合;而粗大的柱状晶组织则可能导致缩孔在热变形过程中更容易发生开裂,钛合金中的第二相、位错等微观缺陷也可能成为缩孔演变的诱因或阻碍因素。因此通过控制钛合金的微观组织演变,可以实现对缩孔行为的调控和优化。

4 钛合金铸造工艺优化建议

4.1 基于热变形演变规律的铸造工艺调整

钛合金因其轻质、高强度和良好的耐腐蚀性,在航空航天、医疗、化工等多个领域得到广泛应用。钛合金铸造过程中热变形和缩孔问题一直是影响铸件质量的关键因素。针对钛合金热变形的演变规律,对铸造工艺进行适当调整,是提升铸件质量的有效手段。首先,应深入理解钛合金在高温下的热变形行为,包括其屈服强度、抗拉强度、塑性等力学性能随温度的变化规律。基于这些规律,可以合理设定铸造过程中的加热温度、保温时间和冷却速率,以控制钛合金的热变形。例如,在钛合金开始发生明显热变形的温度之前完成铸造过程,可以有效避免铸件因热变形而产生的形状失真和内部缺陷^[4]。其次,针对钛合金在热变形过程中的应力集中和塑性流动特点,可以对铸造模具进行合理设计。模具的设计应考虑到钛合金在热变形过程中的应力分布和塑性流动方向,以优化铸件的形状和尺寸,减少因应力集中而导致的缩孔和裂纹等问题。还可以通过调整铸造过程中的工艺参数,如浇注温度、浇注速度和模具预热温度等,来进一步控制钛合金的热变形。这些参数的优化应基于钛合金的热变形演变规律,以确保铸件在铸造过程中能够保持稳定的形状和尺寸。

4.2 铸造参数优化以减少缩孔形成

钛合金铸造过程中,缩孔的形成是影响铸件质量的主要问题之一。为了有效减少缩孔的形成,需要对铸造参数进行优化。应合理设定浇注温度和浇注速度,浇注温度过高或过低都可能导致缩孔的形成。过高的浇注温度会使钛合金在凝固过程中产生较大的收缩量,从而增加缩孔的形成风险;而过低的浇注温度则可能导致钛合金在凝固过程中产生冷隔和夹渣等缺陷。应根据钛合金的材质特性和铸件的形状尺寸,合理设定浇注温度和浇注速度,以确保钛合金在凝固过程中能够均匀、稳定地收缩。模具预热温度过高或过低都可能导致钛合金在凝固过程中的热应力增大,从而增加缩孔的形成风险,在

铸造过程中,应根据钛合金的热物理性能和铸件的形状尺寸,合理设定模具预热温度,以减少热应力的产生。还可以通过优化铸造工艺参数,如增加补缩通道、调整冒口位置和尺寸等,来进一步减少缩孔的形成。补缩通道的增加可以使钛合金在凝固过程中得到更充分的补缩,从而减少缩孔的形成;而冒口位置和尺寸的调整则可以优化钛合金在凝固过程中的补缩路径和补缩量,进一步减少缩孔的形成。

4.3 热处理工艺改进以促进缩孔愈合

钛合金铸件中的缩孔问题不仅影响铸件的外观质量,还可能对铸件的力学性能和可靠性产生严重影响。为了促进缩孔愈合,提高铸件的质量,可以对热处理工艺进行改进。热处理温度过低或时间过短可能无法使钛合金中的缩孔得到有效愈合;而温度过高或时间过长则可能导致钛合金的晶粒长大和性能下降。因此,应根据钛合金的材质特性和铸件的形状尺寸,合理设定热处理温度和时间,以确保缩孔能够得到充分愈合。可以采用特殊的热处理工艺,如真空热处理或惰性气体保护热处理等,以减少钛合金在热处理过程中的氧化和污染,提高缩孔的愈合效果。这些特殊的热处理工艺可以提供更加纯净的热处理环境,有利于钛合金中缩孔的愈合^[5]。还可以通过调整热处理过程中的冷却速率和冷却方式等参数,来进一步优化缩孔的愈合效果。适当的冷却速率和冷却方式可以使钛合金在热处理过程中形成更加均匀、致密的微观结构,有利于缩孔的愈合和铸件性能的提升。

4.4 通过控制热变形过程改善材料性能

钛合金因其独特的物理和化学性质,在航空航天、医疗、化工等领域具有广泛的应用前景,钛合金在铸造过程中容易发生热变形,这不仅影响铸件的形状和尺寸精度,还可能对材料的性能产生不利影响。因此通过控制热变形过程来改善钛合金的材料性能具有重要意义。钛合金的热变形行为受到温度、应力、应变等多个因素的共同影响。通过深入研究这些因素对钛合金热变形行为的影响规律,可以制定出更加合理的铸造工艺参数和

热处理工艺,以控制钛合金的热变形过程。可以采用先进的铸造技术和设备来提高钛合金铸件的形状和尺寸精度。还可以采用先进的热处理技术和设备来控制钛合金的热变形过程,如采用快速加热和冷却技术、精确控制热处理温度和时间等措施,以进一步提高钛合金铸件的性能。还可以通过优化钛合金的合金成分和微观结构来改善其热变形行为。例如,通过调整钛合金中合金元素的含量和比例,可以改变其晶粒大小和形态,从而提高其抗热变形能力,还可以采用先进的微观结构调控技术,如定向凝固、快速凝固等,来进一步优化钛合金的微观结构,提高其热稳定性和抗热变形能力。

结束语

综上所述,本研究通过对钛合金铸造缩孔热变形演变规律的深入探索,不仅揭示了钛合金在铸造过程中的热变形行为及其对缩孔演变的影响机制,还提出一系列有效的铸造参数优化策略。这些研究成果不仅为钛合金铸造工艺的优化提供理论支撑,也为钛合金在航空航天、医疗等高端制造领域的应用奠定了坚实基础。未来,将进一步深化研究,以期在钛合金铸造领域取得更多突破性进展。

参考文献

- [1]吕俊芳,刘桂宏.高校在产学研协同创新平台建设中的重要作用[J].科技经济导报,2020,28(11):93-94.
- [2]姜丽华,田军强,张利军等.热处理对TC11钛合金室温力学性能的影响[J].材料开发与应用,2017,32(04):38-43.
- [3]王旭扬,权银洙,李菊,等.TC11钛合金线性摩擦焊接头组织及织构演变机制[J].稀有金属,2023,47(5):692-700.
- [4]王贤贤,张睿翔,张功学,等.钛合金热变形织构演变研究进展[J].塑性工程学报,2022,29(12):1-12.
- [5]谭海兵,赵子博,杨久旭,等.变形近 α 钛合金局部组织不均匀性与局部织构的关联性[J].稀有金属材料与工程,2022.DOI:10.12442/j.issn.1002-185X.20220454.