

铝合金低压铸造轮毂组织与力学性能关系研究

郑艳银^{1,2}

1.秦皇岛戴卡兴龙轮毂有限公司, 河北 秦皇岛 066000

2.河北省轻合金车轮技术创新中心, 河北 秦皇岛 066000

[摘要]铝合金低压铸造轮毂的使用性能与其微观组织密切相关,铝合金的材料特性与低压铸造的工艺原理奠定了轮毂制造的基础,而工艺参数对轮毂的组织与性能有一定影响。在微观组织上,初晶硅和共晶硅的形貌、 α -Al 相的晶粒结构以及第二相粒子的存在和作用等都会对轮毂的性能产生影响。微观组织与轮毂的强度、塑性和韧性有密切的关系,其途径是影响晶界的强度和位错运动。通过采用优化合金成分设计、铸造工艺参数和改进热处理工艺的策略来改善轮毂的微观组织和增强轮毂的综合性能。

[关键词]铝合金; 低压铸造; 轮毂组织; 力学性能

DOI: 10.33142/ec.v8i8.17796

中图分类号: TG249

文献标识码: A

Research on the Relationship between Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum Alloy Low Pressure Casting Wheel Hub

ZHENG Yanyin^{1,2}

1. Qinhuangdao Daika Xinglong Wheel Hub Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

2. Hebei Province Light Alloy Wheel Technology Innovation Center, Qinhuangdao, Hebei, 066000, China

Abstract: The performance of aluminum alloy low-pressure casting wheels is closely related to their microstructure. The material properties of aluminum alloy and the process principle of low-pressure casting lay the foundation for wheel hub manufacturing, and process parameters have a certain impact on the microstructure and performance of wheel hubs. At the microstructure level, the morphology of primary and eutectic silicon, the grain structure, α -Al phase, and the presence and action of second phase particles all have an impact on the performance of the wheel hub. The microstructure is closely related to the strength, plasticity, and toughness of the wheel hub by affecting the strength of grain boundaries and dislocation motion. By adopting strategies of optimizing alloy composition design, casting process parameters, and improving heat treatment processes, the microstructure of the wheel hub is improved and the overall performance of the wheel hub is enhanced.

Keywords: aluminum alloy; low pressure casting; wheel hub organization; mechanical properties

引言

在汽车工业日益繁荣的今天,铝合金低压铸造轮毂以其轻量化和高强度的特点已成为汽车关键部件中的一个重要部件。它的性能好坏,直接关系到汽车行驶的安全性、可靠性和舒适性。而且轮毂的特性与微观组织密切相关,微观组织发生微小变化就能诱发力学性能发生明显变化。深入探究铝合金低压铸造轮毂组织和力学性能之间的关系不仅有利于揭示轮毂的性能本质,而且可以为轮毂的优化设计和制造工艺升级提供理论支持,对于促进汽车工业高质量发展有着十分重要的意义。

1 铝合金低压铸造轮毂的材料与工艺基础

1.1 铝合金材料特性

铝合金做为一种被广泛应用的金属材料是指以铝为基体元素加入一种或者几种合金元素复合而形成的合金体系。在汽车轮毂制造中,铝合金以其众多的优异性能而崭露头角。本实用新型流动性好,这样铸造时金属液可以顺利充满轮毂复杂型腔内,降低了充型不充分造成的瑕疵,

保证轮毂结构完整。优良的气密性能有效地阻止气体侵入并避免在轮毂内形成气孔及其他缺陷,确保轮毂运行可靠安全。同时铝合金收缩率较低,凝固冷却时尺寸变化相对平稳,有利于确保轮毂尺寸精度,并且其热裂倾向较小,大大减少了铸造过程中由于热应力而产生裂纹的可能性。在微观上,铝合金组织以 α -Al相及共晶硅为主^[1]。合金元素种类及含量在微观组织形态中起着至关重要的作用,从而显著影响其性能,添加像硅元素可以生成共晶硅并优化合金流动性及铸造性能;镁元素的加入能形成强化相,从而有效地提高合金强度、硬度等。

1.2 低压铸造工艺原理

低压铸造这一先进金属成型工艺在铝合金轮毂的生产过程中占有举足轻重的地位,它的基本操作就是把精心设计的铸型稳定地置于密封坩埚正上方,两者位置准确相对应,从而为以后工艺流程的设计打下基础。再将压缩空气缓慢地通入密封坩埚中,在压缩空气进入的同时,在坩埚中熔融金属的表面上形成了均匀而稳定的低压层。在高

压力与低压力巧妙配合下,金属液沿预置升液管顺利爬升,并逐渐充填轮毂繁复细腻的型腔。当金属液充型时,压力连续作用保证金属液流动平稳,有效地避免气孔和夹渣这类常见缺陷,确保轮毂内部结构密实。充型结束时,持续保持一定的压力,使铸件处于压力环境中慢慢固化,进一步提高了铸件致密性及力学性能。这种工艺以其材料利用率高、铸件质量好和生产效率卓越的突出优势被广泛地应用于铝合金轮毂的生产中。

1.3 工艺参数对组织和性能的初步影响

低压铸造铝合金轮毂时,工艺参数如浇注温度、模具温度、充型压力及保压时间就像精密乐章的音符,在轮毂组织与性能中起着关键的调节作用。浇注温度对金属液的状态有至关重要的影响。如果浇注温度过高,金属液将大量地吸收周围的环境气体,而随后的凝固过程又不能顺利地排尽,进而产生令人生厌的气孔缺陷并弱化轮毂内部质量;浇注温度较低,金属液黏度升高,流动性恶化,很难完全充填轮毂复杂细密的型腔内,造成充型不到位,使得轮毂结构残缺^[2]。模具温度也不可忽视,模具温度过高会使铸件冷却速度变缓,使晶粒得到充分长大时间,并最终导致粗大晶粒产生,使轮毂力学性能下降;模具温度过低,金属液接触模具瞬间快速降温,容易使铸件表面出现冷隔和裂纹缺陷,从而影响轮毂寿命。

2 铝合金低压铸造轮毂的微观组织特征

2.1 初晶硅与共晶硅的形态与分布

在铝合金低压铸造轮毂那个精密而又复杂的微观组织天地中,初晶硅、共晶硅等材料的形貌和分布犹如微观结构的“建筑基石”,对于轮毂力学性能起着决定而关键的作用。初晶硅从微观视野上看往往呈块状或板状,其尺寸大小及形状特征并不单纯,它直接关系到合金强度和塑性表现。如果初晶硅的体积过大、形状不规整,则犹如合金中埋着“隐患”,受力时易诱发应力集中而使合金提前破裂,强度下降,塑性变差。共晶硅则有着不同的“姿态”,它多呈纤维状或者颗粒状,均匀地分布在 α -Al相基体之上。这一合理分布状态犹如在基体上织入一层精细的“韧性网”,可有效地改善合金韧性及疲劳性能,使轮毂长时间服役更加耐折腾,并通过变质处理一系列巧妙的工艺手段可使初晶硅及共晶硅尺寸进一步细化,其形貌及分布得到优化,对提高轮毂力学性能带来显著作用。

2.2 α -Al 相的晶粒结构

铝合金微观世界中 α -Al相起着举足轻重的基体相作用,犹如高楼大厦中坚实的基础,晶粒结构对于轮毂性能具有深刻而关键的作用。当 α -Al相晶粒细而均匀分布时,它像无数个紧密排列而又有规律的小单元一起构筑了合金牢固的骨架。该结构可显著增加合金强度与硬度,使轮毂受外力作用时更具有抵抗力而不容易变形破坏。同时细小而均一的晶粒也提高了合金的塑性与韧性,使得轮毂受

冲击或者复杂应力时能较好地缓冲和分散能量,从而避免脆性断裂和提高使用寿命。在低压铸造这一精密制造工艺中,通过对冷却速度的巧妙调控,使金属液以合适的速度固化,有利于细小晶粒的生成。另外加入晶粒细化剂是行之有效的办法,可以使 α -Al相晶粒尺寸进一步细化,晶粒结构得到改善,轮毂综合力学性能得到全方面提高。

2.3 第二相粒子的存在与作用

铝合金丰富多采的微观组成中除起主导作用的 α -Al相和硅相之外,还有许多不可忽略的第二相粒子如 Mg_2Si 相和 $AlFeSi$ 相。这些第二相粒子就像是合金微观世界中的“特殊成员”,它们对于合金的特性有着复杂和深刻的影响。在正面,第二相粒子可以起到强化相作用。它们就像合金中布置的道道“障碍关卡”,位错运动企图穿过时会被这些颗粒所阻挡,使合金塑性变形更加困难,继而有效地提高了合金的强度与硬度,使铝合金轮毂面对多种外力更具有“抵抗力”。如果第二相粒子尺寸过大或其在合金内部分布不均,则可能成为潜在“危险源”和裂纹萌生起始点^[3]。裂纹一旦萌生与扩展将使合金塑性与韧性严重下降,从而影响轮毂服役安全与寿命,因此合理调控第二相粒子大小及分布成为增强轮毂性能的关键。

3 微观组织对铝合金低压铸造轮毂力学性能的影响机制

3.1 强度与微观组织的关系

铝合金低压铸造轮毂性能体系的关键指标为强度,但强度主要与其微观组织各相形貌、大小及分布密切相关。在微观世界中,微小而分布均匀的 α -Al相晶粒就像一张精密的“防护网”,能显著地增加晶界处的强度。晶界作为晶粒间的过渡区域,它的增强能有效地阻碍位错运动。位错在金属塑性变形过程中表现为原子排列上的缺陷,位错运动被阻碍后,合金需要较大外力才能够持续变形,从而使合金屈服强度与抗拉强度增加。微小的初晶硅、共晶硅颗粒、均匀分布的第二相粒子等还像“加强对小卫士的管理”一样对合金起到了显著的强化作用并进一步提高了合金强度。反之,若在微观组织上有粗大晶粒或者相时则完全不同。这些粗大组织易成为应力集中“危险区域”,受外力作用后裂纹优先从这些部位起裂并快速扩展,最终造成合金强度下降而影响轮毂使用性能与安全。

3.2 塑性与微观组织的关联

塑性作为材料性能评价的关键指标之一,对铝合金低压铸造轮毂服役具有重要意义,并与微观组织有着密不可分的密切联系。从微观上看,微小而分布均匀的晶粒结构犹如为材料构筑起巧妙的“变形协调网络等”,由于晶界上原子排列不规整,这一特殊结构可以巧妙地配合位错运动。轮毂受外力作用后,位错能在晶界上平稳转移并得到调节,使材料各段变形同步均匀,有效改善了材料塑性,使轮毂在复杂的受力环境中也能够保持较好的变形能力。同时初

晶硅以及共晶硅的合理形貌和分布也是必不可少的,如果初晶硅与共晶硅呈锐利形状或聚集分布时,则像一颗“定时炸弹”埋在物质中,这些尖锐部分或者聚集区域受力时易出现应力集中现象,继而诱发裂纹起裂,一旦裂纹扩展后材料塑性明显下降,极大地影响轮毂使用安全可靠。

3.3 韧性与微观组织的联系

韧性作为关键性能指标之一,是指该材料断裂之前的吸能能力,将强度与塑性两种性能巧妙地结合起来^[4]。韧性在铝合金低压铸造轮毂性能表现中具有决定性的地位,同时其与微观组织有着密切而细微的关系,具体表现为裂纹萌生及扩展行为。在微观组织上表现出微小而均一的晶粒结构后,犹如在材料上构筑起精细的“防护网”,硅相形态和分布的合理性和第二相粒子的均匀分布也就像给硅“网”加上一个牢固的“节点”。这些微观结构特征能有效地阻碍裂纹迅速扩展,并赋予轮毂受力过程中材料更大的几率以自身变形吸能,从而改善韧性。相反,若微观组织有粗大晶粒、形貌不尽合理的硅相或第二相粒子集聚分布时,则像“防护网”一样有漏洞与薄弱之处。裂纹易在上述部位萌生及快速扩展,造成材料对能量吸收能力显著降低,从而更易因脆性断裂而失效,极大地影响轮毂使用的安全可靠。

4 优化铝合金低压铸造轮毂组织与性能的策略

4.1 合金成分优化设计

铝合金低压铸造轮毂生产制造过程中合金成分的优化设计对增强轮毂性能至关重要,通过对铝合金各种合金元素含量的科学合理调节,可以准确改善其微观组织,继而显著提升轮毂力学性能。如硅元素对铝合金起着举足轻重的作用,适当提高硅元素含量犹如向金属液中注入一股“润滑剂”,可有效改善合金流动性及铸造性能,使得模具内金属液充型更加平稳,铸造缺陷发生率降低。如果硅的含量太高,会使初晶硅变得更粗,这些粗初晶硅犹如轮毂内的“定时炸弹”,受力时易诱发应力集中而使轮毂力学性能下降,因此需要经过大量的试验与研究来寻找硅元素含量的最佳值区间。另外加入适量镁和铜对人体有很大帮助,它们能与铝合金的其他元素生成强化相,就像轮毂内的“钢筋骨架”,进一步提高合金的强度、硬度,使轮毂更结实耐用。

4.2 铸造工艺参数优化

铝合金低压铸造轮毂生产中铸造工艺参数的优化是改善轮毂微观组织和增强轮毂综合性能的关键,由于轮毂质量及性能受工艺参数的影响较深,需借助于试验及数值模拟等科学手段准确地确定最优浇注温度、模具温度、充型压力及保压时间等重要工艺参数。如模具温度对于金属液充型及凝固过程有重要的影响,适当升高模具温度如同给金属液铺好“顺畅通道”,可以有效地提高金属液充型

性能,从而更好地将金属液充入模具型腔内,降低充型不足造成的缺陷。但模具温度并不是越高越好,模具温度过高会减慢金属液的冷却速度,造成晶粒粗大,粗大晶粒使轮毂强度、韧性及其他性能下降^[5]。因此有必要综合考虑模具温度对于轮毂微观组织及力学性能的影响规律,并经过反复实验及精确分析找出最优模具温度区间,以制造优质铝合金轮毂。

4.3 热处理工艺改进

铝合金低压铸造轮毂生产流程中热处理工艺起着重要作用,它是提高轮毂组织与性能的重要途径。合理的固溶处理、时效处理工艺,就像一位神乎其神的“组织塑造师”。在固溶处理环节,轮毂被加热至合适温度后保温一段时间,合金内第二相粒子完全溶解于基体,然后迅速降温形成过饱和固溶体。该工艺为以后时效处理打下基础,然后时效处理并于适当温度保温使过饱和固溶体分解并沉淀出细小而分布均匀的第二相粒子。这些微小的颗粒能在改善硅相及第二相颗粒形貌和分布的同时有效地阻碍位错运动和细化晶粒,继而显著提高合金强度及塑性。

5 结语

铝合金低压铸造轮毂的使用性能与其微观组织密切相关,铝合金特性与低压铸造工艺的建立、工艺参数对组织与性能有一定的影响。从微观组织上看,初晶硅和共晶硅的形貌、 α -Al 相的晶粒组织以及第二相粒子的分布都与轮毂的强度、塑性和韧性有着密切的关系。为了使轮毂性能达到最优,可以采取优化合金成分设计、准确调节铸造工艺参数和完善热处理工艺的策略来改善轮毂的微观组织和提高综合性能,为汽车工业的优质发展提供技术支持和实践指导。

【参考文献】

- [1]张东生,李世德,徐佐,等.A356 铝合金轮毂低压铸造数值模拟以及组织与力学性能[J].中国有色金属学报,2023,33(6):1720-1731.
- [2]荆晓元,杨国超,李向前.铝合金轮毂制造的关键技术与质量提升[J].机械与电子控制工程,2025(3):45-59.
- [3]杜婷,孟嘉楠,郝亮亮.时效工艺对低压铸造 A356 合金轮毂显微组织与力学性能的影响[J].热加工工艺,2023,52(16):115-118.
- [4]张旭东,赵富博,尹学康,等.铝合金轮毂低压铸造工艺研究[J].中国金属通报,2023(11):71-73.
- [5]申兵芹.铝合金轮毂低压铸造工艺途径探讨[J].科海故事博览,2024(15):12-17.

作者简介:郑艳银(1990.3—),男,毕业院校:河北科技大学,学历:硕士研究生,所学专业:材料工程,当前就职单位:秦皇岛戴卡兴龙轮毂有限公司、河北省轻合金车轮技术创新中心,职称级别:工程师。