

热处理对铝合金低压铸造轮毂综合性能的影响

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]随着汽车轻量化趋势的发展, 铝合金低压铸造轮毂得到了广泛应用, 热处理对于轮毂的综合性能有着显著影响。热处理是以改变铝合金的组织结构来增强其性能的, 主要有退火、固溶以及时效处理。在固溶处理参数方面, 需要对温度、保温时间和冷却方式等参数进行精细调控; 时效处理时, 时效温度、时间以及多级时效工艺对于强化相析出以及性能优化非常重要。同时热处理配合低压铸造、表面处理及后续加工工艺的配合能够减少缺陷, 增强耐蚀性及耐磨性, 保证了加工质量和轮毂性能满足设计要求。

[关键词]热处理; 低压铸造; 轮毂; 综合性能

DOI: 10.33142/ec.v8i9.18011

中图分类号: TG249

文献标识码: A

The Effect of Heat Treatment on the Comprehensive Performance of Aluminum Alloy Low Pressure Casting Wheel Hubs

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: With the development of automotive lightweighting trend, aluminum alloy low-pressure casting wheels have been widely used, and heat treatment has a significant impact on the comprehensive performance of the wheels. Heat treatment is used to enhance the properties of aluminum alloys by changing their microstructure, mainly including annealing, solid solution treatment, and aging treatment. In terms of solid solution treatment parameters, it is necessary to finely control parameters such as temperature, holding time, and cooling method; During aging treatment, the aging temperature, time, and multi-stage aging process are crucial for strengthening phase precipitation and optimizing performance. Simultaneously, heat treatment combined with low-pressure casting, surface treatment, and subsequent processing techniques can reduce defects, enhance corrosion resistance and wear resistance, and ensure that processing quality and wheel hub performance meet design requirements.

Keywords: heat treatment; low pressure casting; hub; comprehensive performance

引言

汽车行业飞速发展的今天, 轻量化设计已经成为提高车辆性能和降低能耗的一个关键趋势。铝合金具有优良的轻质高特性而被广泛地应用于轮毂制造中。低压铸造是轮毂成型的先进工艺之一, 它能使铝合金溶液在模具中得到均匀充填, 从而制造出组织紧密、气孔小、强度好的轮毂。单纯采用低压铸造工艺还需要进一步提高铝合金轮毂性能, 热处理作为材料改性的有效方法, 对加热、保温及冷却工艺参数的准确调控可以显著改变铝合金组织结构进而增强综合性能。所以深入研究热处理对于铝合金低压铸造轮毂综合性能影响有一定理论意义与实际应用价值。

1 热处理工艺原理及其对轮毂性能的基础影响

1.1 热处理基本原理概述

热处理作为关键工艺方法之一, 通过仔细控制金属材料的升温、保温和后续冷却操作以改变金属材料内部组织结构进而得到符合具体应用要求的特性。铝合金加工中热

处理显得格外重要, 其主要由退火、固溶处理及时效等核心工序组成。退火处理主要是为了消除加工时材料内应力的影响, 经过这一环节, 能够显著改善材料塑性及后续加工性能, 从而更加容易成形及加工。固溶处理的目的是确保合金元素在铝基体中得到充分的溶解, 从而形成一个过饱和的固溶体, 这为之后的性能增强提供了坚实的基础^[1]。但时效处理发生于固溶处理后, 促进过饱和固溶体内弥散相析出, 这些微小弥散相可以有效地阻碍位错运动以进一步提高材料强度与硬度。

1.2 热处理对轮毂力学性能的基础作用

以力学性能为核心指标的轮毂质量涉及强度、硬度及韧性等诸多重点内容, 对轮毂实际应用可靠性与耐久性有直接影响。热处理作为材料改性的有效方法, 通过准确调节铝合金内部组织结构对铝合金力学性能具有深远影响。固溶处理是热处理过程中的第一步, 它的作用是使合金元素在铝基体中均匀而完全的溶解, 从而形成过饱和的稳定

固溶体并为以后时效处理打下坚实的基础。在后续时效处理过程中，弥散相在基体中逐步析出且分布均匀，这些微小弥散相粒子能有效地阻碍位错移动，进而显著增强材料强度与硬度。

1.3 热处理对轮毂微观组织结构的初步改变

微观组织结构是材料性能发挥的基石，在其宏观表现过程中起着决定作用。铝合金轮毂制造中热处理起着关键作用，可精准调控铝合金第二相粒子的行为并促进溶解、析出和再分布的一系列转变又深刻地改变了材料微观组织结构。固溶处理这一关键工序后，合金元素在铝基体上得到完全溶解和均匀分布，并以过饱和状态稳定下来，这时材料微观组织表现的比较均一。然后过饱和固溶体经时效处理后逐步分解，弥散相在基体中均匀分布并细化，生成大量细小强化相。这些强化相在有效地细化晶粒的同时也显著地改善了强度、硬度等力学性能。

2 固溶处理参数对铝合金低压铸造轮毂性能的深度影响

2.1 固溶温度对轮毂性能的精细调控

固溶温度是整个固溶处理环节的核心参数之一，在轮毂性能优化过程中起着精细而又至关重要的调节作用。固溶处理过程中，设定固溶温度较低时合金元素进入铝基体的溶解进程有限，不能完全溶解形成均一而稳定的过饱和固溶体。这种未完全溶解状态将使随后时效处理过程中析出相数量不足且分布不均匀，继而使强化效果大大降低，轮毂强度与硬度也难以获得理想^[2]。随着固溶温度的逐渐提高，铝基体上合金元素的溶解度显著增大，能更加完全溶解，生成过饱和固溶体。时效处理为析出相提供了大量来源，使时效处理析出强化相增多且分布更均匀，有效地改善了材料强度与硬度。但固溶温度并不是尽可能高，温度过高会引起晶粒异常生长，造成晶粒粗大化现象，严重降低了材料塑性与韧性，从而影响轮毂综合性能。因此准确地选择适宜的固溶温度是轮毂强度与韧性达到完美兼顾的关键。

2.2 保温时间对轮毂组织均匀性的影响

保温时间是固溶处理不可忽略的关键参数之一，它对于轮毂组织均匀性具有直接而深刻的影响。固溶处理阶段合金元素向铝基体扩散溶解过程与保温时间密切相关，只有给以合适的保温时间才能使合金元素得到充分的扩散和溶出，继而形成均一、稳定的过饱和固溶体状态，从而为以后时效处理打下良好的基础。如若保温时间太短，合金元素就不可能完全溶出，材料内部就形成了溶出程度不同的部位，从而使组织均匀性大大降低。该不均匀组织经随后时效处理后，析出相分布亦变得不均，极大地影响了时效处理效果，不能有效改善轮毂性能^[3]。相反，如果保温时间太长，不但会导致能源过度消耗、生产周期延长、生产成本提高，而且有可能诱发晶粒非正常长大、材料微

观结构损伤、综合性能下降等。因此需要根据铝合金具体组成及轮毂实际服役要求对保温时间进行准确控制，从而达到组织均匀化、性能最优化。

2.3 冷却方式对轮毂残余应力及性能的作用

冷却方式是固溶处理流程承前启后的关键环节，对于轮毂残余应力状态及最终性能表现具有重要影响。固溶处理结束时常用的冷却方式有水冷、油冷和空气冷却这些。水冷因冷却速度异常快而崭露头角，在高温时可快速“冻结”过饱和固溶体，有效地阻止合金元素过早沉淀，从而为高强度轮毂材料的获得创造良好的条件。但冷却速度过快就像一把双刃剑一样，可能诱发轮毂内产生巨大残余应力，使轮毂后续加工或者服役时，发生变形、开裂等现象的几率大大增加。油冷与空气冷却速度比较平缓，所引起的残余应力也比较低，有利于维持轮毂尺寸稳定。但是“慢工出来的细活”也造成了一定的成本，在两种冷却方式中物料的强度、硬度都可能比水冷处理稍差一些。所以实际生产中在选用冷却方式时，需要综合权衡轮毂的性能、形状尺寸特点和生产效率等方面的需求，争取达到性能和质量之间的最佳平衡。

3 时效处理工艺对铝合金低压铸造轮毂性能的优化作用

3.1 时效温度对轮毂强化相析出的影响

时效温度是时效处理工艺的关键因素，在轮毂强化相析出过程中起决定作用。在时效温度比较低的环境中，原子活动能力有限，扩散速度比较慢，直接造成强化相析出过程慢。在这种条件下要获得理想的强化效果必须延长时效处理时间，使强化相具有充分的逐步析出和分布时间。当时效温度逐渐升高时，原子能量增大，扩散速度明显加快，强化相析出速度增大。在合适的温度范围内能在较短时间内生成大量小而分散的强化相，它们就像无数个小“钉子”一样，有效地阻碍了位错移动，使材料强度与硬度显著增加。但时效温度并不是尽可能高，温度过高，强化相粗化严重，本来细小分散的强化相变粗，强化效果大减，甚至会诱发材料产生过时效，造成材料性能显著降低。因此准确地选择适宜的时效温度是优化轮毂性能的一个重要保证。

3.2 时效时间对轮毂性能稳定性的作用

时效时间是轮毂热处理工艺中影响轮毂性能稳定的一个关键环节，时效处理初期，过饱和固溶体内合金元素开始持续析出并生成细小弥散强化相。这些强化相就像“强化剂”一样，使材料强度、硬度在短期内快速提高，轮毂性能明显提高。当时效时间继续进行时，强化相析出量逐步达到动态平衡且析出量呈饱和状态，这时材料性能亦攀升到峰值状态并表现出优异的综合力学性能^[4]。但是如果再一味地延长时效，这种局面就会出现反转。强化相由于长期在高温环境下会出现粗化现象，使原来细小均匀的强化相粗大而且分布不均匀，大大减弱了它们对位错运

动产生的障碍，致使材料强度、硬度降低，破坏了性能稳定性。因此需要经过严格的试验才能确定最佳时效，使轮毂性能能够稳定地处于理想状态，既要考虑生产效率又要考虑成本以达到效益最大化。

3.3 多级时效处理对轮毂综合性能的提升

多级时效处理这一先进时效工艺为增强轮毂综合性能提供了一种新途径。本发明打破了常规单一时效处理方式的限制，把时效全过程巧妙分为若干阶段，在各种温度下进行有序时效处理。多级时效处理过程中，第一级时效通常是在比较低温度环境下完成。这时原子扩散速度相对较慢，可以为强化相的生成创造良好的条件，并促使铝基体上滋生出大量微小弥散强化相的核心，这些细小的核就像种子，为随后强化相的生长打下基础。然后执行的第二级时效被选择更高温执行，温度越高，原子扩散速度越快，从而使强化相充分生长并在铝基体上达到更均匀分布。通过该分级时效处理充分发掘强化相在不同温度条件下析出的潜能，最终得到组织更细小且分布更均匀的强化相结构，然后从各方面提高了材料强度、硬度及韧性等综合性能使轮毂能够在复杂使用环境下发挥优异性能。

4 热处理与其他工艺协同对铝合金低压铸造轮毂性能的综合影响

4.1 热处理与低压铸造工艺的协同优化

热处理和低压铸造工艺协同优化是高性能铝合金轮毂创建的核心，低压铸造工艺以其本身的优点为热处理打下高质量的基础。低压铸造时对工艺参数进行精准控制可以使轮毂得到致密内部结构且成分分布更加均匀，从而有效降低内部缺陷，并为后续热处理提供有利条件。热处理又使轮毂的性能得到了进一步升华，它具有深度调整轮毂微观结构的能力，从而明显增强了其机械性质。在对低压铸造过程中浇注温度，压力及冷却速度几个关键参数进行优化后，轮毂内气孔及缩松缺陷可以得到最大限度地降低，使组织变得更均匀、更细致。配合科学合理的热处理工艺可以充分发掘材料内在潜力，从而有效提升轮毂强度与硬度，达到两种工艺协同作用，达到高性能轮毂制造要求。

4.2 热处理与表面处理工艺的协同增强

热处理和表面处理工艺协同作用为轮毂性能的整体改善提供一种有效方法。表面处理工艺就像是为轮毂披上

“防护衣”，可以显著增强轮毂的耐腐蚀性，使得轮毂不容易生锈和腐蚀，也可以优化轮毂的外观质量使轮毂更美观鲜艳。但热处理重点是深度提升轮毂内部性能，通过精准调控组织结构来降低内部缺陷、提高材料强度、韧性及其他力学性能，把两种过程有机地结合起来可以达到性能协同强化的目的。如热处理之后进行阳极氧化处理可以使轮毂表面形成一层紧密而牢固的氧化膜像牢固的盾牌一样有效地阻隔腐蚀介质入侵。并且经过热处理优化的内部组织

为表面处理奠定了更为稳固的基础，从而使表面处理的效果更为持久。此外微弧氧化等新型表面处理工艺配合热处理，可进一步提高轮毂耐磨性、耐蚀性、延长使用寿命^[5]。

4.3 热处理与后续加工工艺的协同适配

整个轮毂生产链条上，热处理和后续加工工艺之间的配合适配是确保产品质量的关键一环。随后的加工工艺如机加工中的精细雕琢，旋压中的塑性变形处理等等均对轮毂组织结构及性能提出了具体的要求。热处理在这一工艺中起着“组织调教”作用，能准确地调节轮毂内部组织结构并使之具有优良加工性能。经适当热处理后的轮毂可有效地降低后续加工过程中的变形、裂纹及其他缺陷，确保加工精度及表面质量。但随后的加工工艺并不是被动地接受的，还会反作用于轮毂的性能。如在机加工过程中所引起的切削力会在轮毂内形成残余应力而影响尺寸稳定性及力学性能。因此需要根据后续加工工艺具体需求，对热处理工艺参数进行科学、合理选择，以达到二者协同适配的目的，进而保证轮毂最终性能能够完全达到设计标准并能够在多种使用场景中稳定、可靠工作。

5 结语

随着汽车轻量化趋势的发展，铝合金低压铸造轮毂得到了广泛应用，而热处理对于轮毂的综合性能有很大的影响。热处理以组织结构的变化来促进性能的提高，固溶、时效等处理参数的变化对轮毂的性能产生了深度的影响。另外热处理和低压铸造工艺的协同优化可以减少缺陷和增强性能；配合表面处理工艺可以提高耐蚀性及耐磨性；配合后续的加工工艺可以保证加工的质量。总之通过合理地应用热处理技术并与其他制造工艺进行协同，可以确保轮毂的性能满足设计规范。

【参考文献】

- [1] 莫兆敢,张冬寒,李小东.热处理工艺在模具制造中的应用——以铝合金轮毂低压铸造为例[J].汽车画刊,2023(3):45-56.
 - [2] 夏鹏.热处理对7046铝合金组织与性能的影响研究[J].材料工程,2023(4):56-57.
 - [3] 冯恩浪,罗礼营,卢叶,等.低压铸造铝合金轮毂在不同环境中的腐蚀分析及防护[J].全面腐蚀控制,2024,38(4):60-62.
 - [4] 王金业.金属材料热处理工艺与技术研究[J].新材料,2025,8(4):36-47.
 - [5] 童心.第二届智能工程与经济建设学术研讨会论文集[C].江西:中国建筑工业出版社,2025.
- 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。