

A357 铝合金支撑桥式一体轮毂（轴头）产品技术研究

吴寿元 刘振鹏

(辽宁忠相铝业有限公司 辽宁 辽阳 111000)

摘要: 本文以改进元素成分后的 A357 铝合金为原材料, 利用液态模锻工艺制造包含轴头在内的支撑桥式一体轮毂产品, 该产品将车桥上的轮毂和轴头一体化液锻成型, 然后通过机加工、热处理和表面处理等工序制作成品。一体轮毂极大的减轻了车桥的重量, 在节省了机加工工艺和装配工艺的同时, 提高了产品的生产效率。通过相应热处理条件后, 一体化轮毂具有优良的力学性能, 一体化轮毂不同部位显微硬度平均值在 100HB 以上, 屈服强度平均值在 260MPa 以上, 抗拉强度平均值超过 340MPa, 同时伸长率平均值在 5.5% 以上, 均达到国家标准要求。

关键词: A357 铝合金; 一体式轮毂; 液态模锻; 力学性能

0 引言

目前我国各类车用支撑桥式轴头多数为球墨铸铁材质, 如图 1a) 所示, 球磨铸铁分量重, 密度高达 7.35g/cm³, 接近常规铝合金密度的 3 倍; 且铸铁能源消耗大, 不环保; 而国外如美国及欧洲等发达国家, 车用轴头已逐渐被替代为铝合金材质的产品, 如图 1b) 所示, 尤其是近二十年来, 铝合金的合金化取得了飞速的进展, 各类新型铝合金逐渐问世, 新型铝合金改变了传统铝合金强度低的特性, 甚至一些高强度铝合金的强度可以与合金钢相媲美并且同时具有优良的塑性。

当今铝合金轴头在车上的普及率将近 50%, 各国正紧锣密鼓地研发新型高性能铝合金和加大力度推广铝合金轴头产品。我国更是全力推进和鼓励各行业节能环保新技术的提升, 作为工业大国, 汽车制造业面对大势所趋, 更应该义不容辞地加速推进节能环保的更新革命。以 22.5×9.0 规格 (PCD335mm) 钢制车轮和球铁轴头装配为例, 其重量约为 81kg, 改为铝合金车轮和球铁轴头装配, 其总重量约为 57kg (含螺钉为 61kg), 即使采用铝合金轮毂和铝合金轴头装配, 其重量也只能降为 42kg (含螺钉 46kg), 而这种一体轮毂的整体重量为 35kg, 相比于钢制轮毂和球铁轴头减重 57%, 极大地减轻了车桥的重量, 符合国家轻量化的标准趋势。铝合金轮毂和轴头优点已是公认的, 同时符合汽车轻量化趋势, 铝合金轴头的优势主要体现在如下几个方面:

(1) 铝合金轴头产品重量低, 同体积下铝合金轴头的重量是球磨铸铁的 35%, 尤其在应用于卡车、拖车等重卡时轻量化效果更为显著;

(2) 节能降耗: 由于铝合金轴头重量较小, 空载时车身轻, 大幅度降低空载状态下的油耗, 并且在运输装货状态下, 铝合金由于其物理特性可以延长轮胎使用寿命;

(3) 绿色环保: 铝合金具有很高的回收再利用价值, 并且减少生产过程中三废的排放量, 整体车辆减重减少二

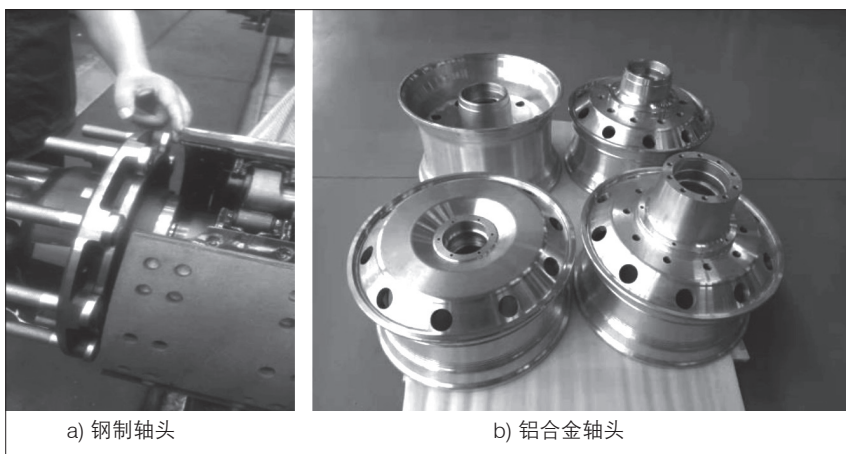


图 1 轴头

氧化碳排放量。

液态模锻是结合了液态铸造和压力锻造于一体的工艺方法。它是将融化的液态金属倒入下模腔内, 然后上模与下模合模并施加上模一定的压力, 使其在模腔内通过压力冷却成型。液态模锻成型后的毛坯内部组织均匀致密, 基本无常规铸造缺陷, 热处理后其力学性能可以接近同种合金锻造产品水平。

轮毂产品和轴头产品在常规使用过程中需要装配来使用, 装配过程中既需要精准的配合尺寸, 还需要螺钉相互联结紧固, 同时在机加工时需要车出螺栓孔。这样, 多道工序增加了机加工的时长、机加难度和装配难度, 并且由于存在着人工和机床误差, 最后的装配成品的合格率也难以保证。因此这种 A357 支撑桥式一体轮毂 (轴头) 产品在轻量化趋势中可以发挥极大的作用, 也将启迪开创轮毂、车桥行业的设计新思维。在此背景下, 本文提出了一种一体化的轮毂方案, 将轮毂与轴头通过液态模锻的方式一体化生产加工, 以期达到解决上述问题的目的。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

A357 铝合金属于铸造铝合金, 其对应的国产编号为 ZL114A, 其化学成分见表 2。A357 铝合金的力学性能与

传统的铸造铝合金 A356 和变形铝合金 6061 的比较如表 1 所示。由表可知，A357 铝合金的力学性能高于传统的 A356 铝合金，其性能接近于 6061 铝合金。

表 1 力学性能对比

材质	抗拉强度	屈服强度	延伸率	表面硬度
A356	≥ 260MPa	≥ 220MPa	≥ 4%	≥ 95HB
A357	≥ 320MPa	≥ 260MPa	≥ 5.5%	≥ 100HB
6061	≥ 330MPa	≥ 295MPa	≥ 10%	≥ 110HB

A357 是 A356 的派生型号，它在 A356 的基础上增加了 0.2%Mg 的含量，Mg 的作用是提高合金的强度和韧性；在铸件状态时，由于 Mg 在 Al 中的溶解度低，除少量 Mg 固溶在 α-Al 基体外，大量的 Mg 元素主要是以大尺寸的 Mg₂Si 相存在，因此，Mg 对合金在铸件状态下力学性能影响不显著。Mg 在合金中的主要作用通过相应的热处理来实现，在固溶处理时，Mg 溶入 α-Al 基体中，时效时 Mg₂Si 相弥散析出，以第二相的形式钉扎在 α-Al 基体上，是其位错和滑移的阻力增大，从而使得合金强化。

同时，A357 铝合金中添加了 0.02% ~ 0.07% 的 Be 元素，微量的 Be 对提高 A357 合金的力学性能有着多项的重要作用，其作用机制为：Be 可以使合金中含有 Fe 的相其组织由针状改变为方形状和球状，极大地削弱了含 Fe 相对组织的潜在危险作用，使合金塑性得以一定程度的提高；同时 Be 能减少 Fe 相中 Mg 元素的含量，使 Mg 元素在基体中得以最大限度的与 Si 形成 Mg₂Si 强化相进而提高合金热处理后的强度；此外 Be 还能增强合金在时效时 Mg₂Si 的析出动力，促使 Mg₂Si 最大限度的从固溶体中析出，使合金强化相的数量增加，从而提高合金的强度；最后 Be 还可以促进热处理过程中共晶 Si 的球状化；同时减少合金中 Mg 的烧损，从而保证合金的含 Mg 量，而最重要的是可以减轻因烧损形成氧化夹杂的倾向，提高了合金的熔体质量，减少了铸造缺陷。

1.2 试验方法

试验中 A357 铝合金一体化轮毂的加工工艺流程为：铝锭熔炼→GBF 除气→液态模锻→去中心孔→X 光检查→热处理→数控机加工→气密检查→表面处理→最终检查→成品包装。

本文试验所使用的液锻模具见图 2，铸件毛坯见图 3，包括上模板 1、下模板 2、上模 3、下模 5，其中上模 3 安装在上模板 1 上，下模 5 安装在下模板 2 上，还包括边模 4、边模板 8；边模 4 套安装在边模板 8 内；上模 3、下模 5 均安装在边模 4 内，边模 4 与边模板 8 之间设置有边模冷却腔 10，边模板 8 上安装有边模冷却管 9，边模冷却管 9 与边模冷却腔 10 相通；轮毂毛坯 7 位于上模 3、下模 5、

边模 4 之间，轮毂毛坯 7 由轴头 71、轮辐 72、轮辋 73 构成；其中上模 3 设有上模冷却管 12、下模 5 设有下模冷却管 11，上模冷却管 12 上安装有上模冷却喷嘴 13，下模冷却管 11 上安装有下模冷却喷嘴 14，上模 3 上还安装有退料环 6。

A357 铝合金支撑桥式一体轮毂（轴头）产品重量可以做到 35kg，甚至更低，不需要螺钉紧固。同时这种一体式结构增强机械性能，减少装配环节，其安全性、稳定性要优于前两种情景。当前行业趋势就是高端、轻量化，在成本、环保、维护、安全等方面，这种 A357 铝合金支撑桥式一体轮毂（轴头）产品优势非常明显。

为此，我们创新开发了 A357 铝合金支撑桥式一体轮毂（轴头）技术方法。具体创新如下：

(1) 结合轮毂产品和支撑桥式轴头产品的功能特性、

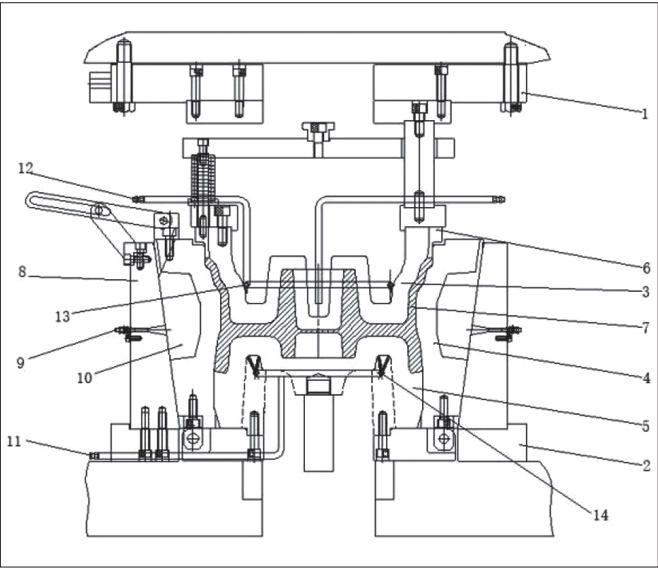


图 2 液态模锻模具结构图

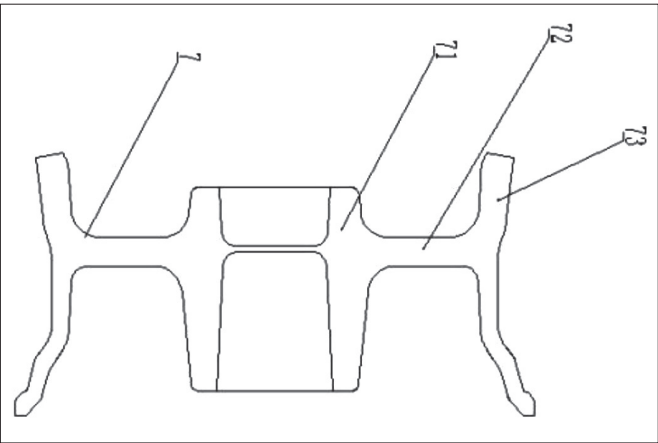


图 3 铝合金轮毂毛坯图

表 2 A357 铝合金化学成份（优化后）wt%

元素	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Be	Ti	Sr	Al
含量	6.8 ~ 7.3	≤ 0.15	≤ 0.10	≤ 0.05	0.45 ~ 0.65	0.04 ~ 0.07	0.10 ~ 0.20	0.012 ~ 0.024	余

装配特性，将两者结合设计成一体式产品，结构紧凑，克服了铝合金轴头螺钉联结等缺陷；

(2) 一步设计，缩锻产品开发周期；

(3) 采用成熟的 A357 液态模锻成型工艺可实现大批量生产；

(4) 降低了加工成本（一套模具、一套夹具、一次热处理等）和装配成本；

(5) 减轻材料及重量，提高整体产品机械性能和可靠性。

利用液态模锻方法制备 A357 铝合金一体化轮毂，在产品热处理之后采用线切割设备从一体轮毂的不同部位分别切取试验试样，轮辋、轮辐、内轮缘和轴头处分别切取试样。轮毂的不同部位分布如图 4 所示。力学试样的拉伸尺寸如图 5 所示，采用万能力学试验机进行测试产品的屈服强度、抗拉强度和伸长率；采用布氏硬度计针对产品进行布氏硬度测量。

2 结果与分析

2.1 力学性能

采用液态模锻方法制备的 A357 一体化铝合金轮毂针对其不同部位进行力学性能测试，其结果如表 3 所示。

2.2 结果分析

由表 3 可知，轮毂在不同部位均有着优良的力学性能。相比之下，轮辐部位的屈服强度为 261MPa，相对较低；内轮缘处的强度和硬度较高，屈服强度达到 288MPa，塑性也较好，延伸率达到 9.5%。从轮缘、轮辋到轮辐的强度和塑性逐渐降低，在轮辐部位的强度最低，但达到国家标准要求的 210MPa 以上，延伸率仅为 5.5%。

由于液态模锻工艺是在大压力作用下使得液态金属凝固固缩成型，轮辐部位处于模具上模压头的正下方，在液态模锻时处于直接受压的区域，因而该区域处于压力快速结晶部分，在受压前部分组织结晶形成树枝晶，受压开始后结晶迅速完成，这导致轮辐部位的熔体来不及进行元素均匀化就已经结晶完成，虽然组织相对致密，但导致该区域元素配比不均匀，即 Si 含量较少，从而导致热处理后 Mg₂Si 强化相较少，沉淀强化效果较弱，力学性能较低；而轮毂其他部位 Si 含量较高，易产生成分偏析。

3 结语

本文提出了一种新型的一体化轮毂创新结构，将车桥上的轮毂和轴头合二为一，并且选用 A357 铝合金作为原材料，工艺上采用液态模锻成型方法，便于大批量生产。不仅大幅度降低产品重量，简化装配提高效率，而且使产品安全及可靠性显著提高。

A357 铝合金在 A356 的基础上增加了 0.2%Mg 的含量，增加了热处理后合金强化相的析出，增加了强度；同时 A357 铝合金中添加了 0.02% ~ 0.07% 的 Be 元素，微量的 Be 对提高 A357 合金的力学性能有着多项的重要作用，使合金的强度塑性得以一定程度的提高；

A357 铝合金支撑桥式一体轮毂（轴头）产品重量较轻，

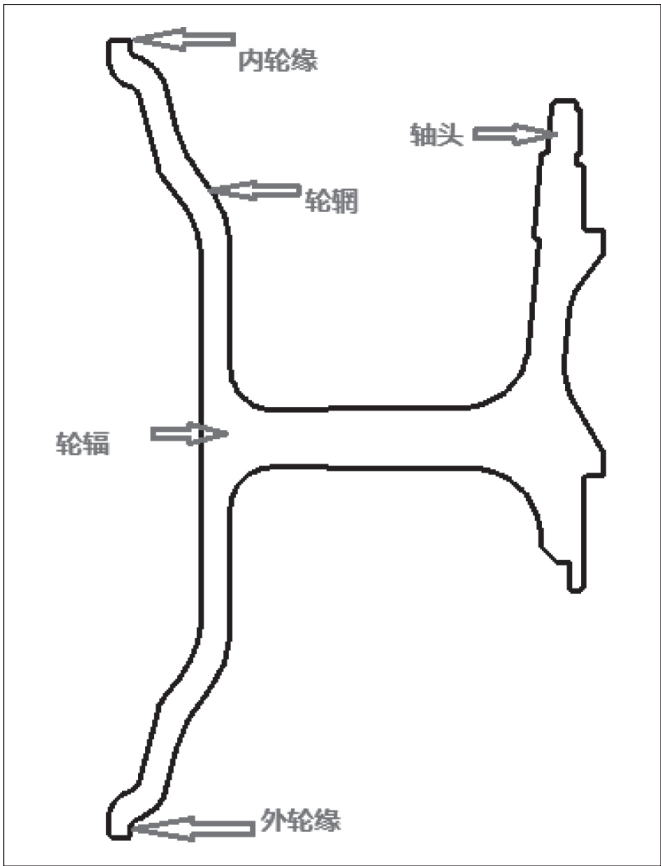


图 4 一体化轮毂取样部位示意图

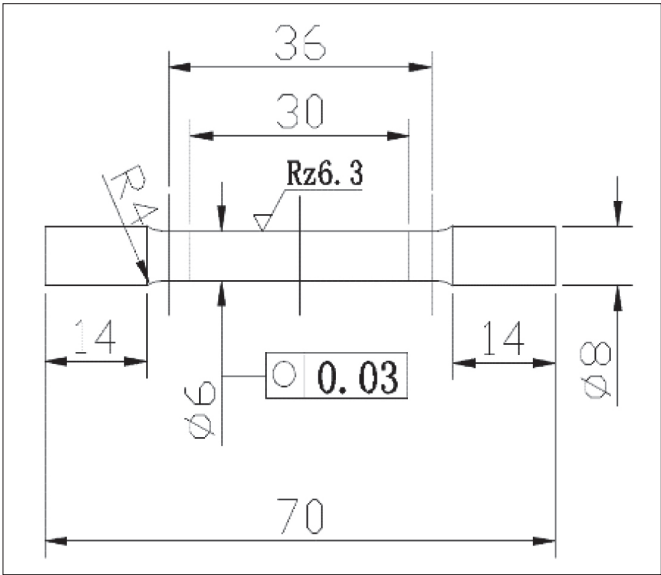


图 5 力学性能试样示意图

表 3 一体化轮毂不同部位的力学性能

部位	屈服强度 / MPa	抗拉强度 / MPa	延伸率	硬度
轮辐	261	324	5.5%	HB103
内轮缘	288	344	9.5%	HB113
外轮缘	286	349	9.2%	HB111
轮辋	282	346	8.6%	HB112
轴头	280	348	8.5%	HB115

不需要螺钉紧固。同时这种一体式结构增强机械性能,减少装配环节,其安全性、稳定性要优于前两种情景。当前行业趋势就是高端、轻量化,在成本、环保、维护、安全等方面,这种 A357 铝合金支撑桥式一体轮毂(轴头)产品优势非常明显。

一体化轮毂的力学性能优良,表面显微硬度平均值为 100HB 以上,屈服强度达到 260MPa,抗拉强度达到 340MPa,同时伸长率为 5.5%。轮毂的轮辐部位处于直接受压状态,属于压力快速结晶,导致轮辐部位的液态金属来不及进行元素均匀化就已经结晶,使得该区域元素配比不均匀, Si 元素较少,以至于热处理后 Mg_2Si 强化相较少,沉淀强化效果较弱,力学性能较低。

参考文献:

- [1] 汽车轴头用低合金高强度钢 Q460D 的开发和性能 [J]. 特殊钢, 2018, 39(3): 66-69.
- [2] 刘忠锁. 6061 材料商用车铝合金轴头液态模锻工艺法, CN201610931776.4[P], 2016.
- [3] 卢文正. 铝合金半挂车车轴, CN205615270U[P], 2016.
- [4] 鹿云, 曹正, 蒋海浪, 等. 汽车轴头用微合金化非调质钢的开发及应用研究 [C]. 一汽科协金属材料, 热处理学会 2007 首届学术交流年会. 2007.
- [5] 刘文鑫. 液态模锻 A356 轮毂不均质性研究 [D]. 2015.
- [6] 刘忠锁. 6061 材料商用车铝合金轮毂液态模锻工艺法, 2018.
- [7] 祝汉良, 杨秀玲. 高强韧 A357 合金凝固组织及热处理工艺的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 1997(1): 22-24.
- [8] 陈忠伟, 何志, 介万奇. Al-5Ti 细化剂和 Al-10Sr 变质剂对 A357 合金微观组织和力学性能的影响 [J]. 铸造, 2005, 54(002): 129-133.
- [9] Kang Y L, Yang L Q, Song R B, et al. Study on Microstructure-Processing Relationship of a Semisolid Rheocasting A357 Aluminum Alloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2009, 141-143: 157-162.
- [10] 武冬, 王俊义, 刘洪军. A356 铝合金液态模锻过程的组织偏析 [J]. 热加工工艺, 2015(09): 108-110.
- [11] 郭莉军. 铝合金液态模锻件偏析行为的研究 [D]. 北京交通大学, 2016.
- [12] 李东南, 范新风, 翁瑞珠. AZ91D 镁合金挤压铸造组织与性能的研究 [J]. 铸造技术, 2006, 27(003): 273-275.

