

A357 铝合金轮毂轮辐力学性能提高方法研究

吴寿元 刘振鹏

(辽宁忠相铝业有限公司 辽宁 辽阳 111000)

摘要: 本文针对 A357 铝合金液态模锻轮毂产品, 提出了一种轮辐部位力学性能提高的方法。A357 铝合金在液态模锻工艺生产毛坯之后, 在去中心孔工艺时通过压力机对轮辐进行冲压去中心孔和压锻轮辐的新工艺。轮辐通过冲压模具冲压成型, 在与轮辐直接接触的压板区域冲压为凹凸面, 加大了对轮辐区域的压力并且减小了冲压时的轮毂变形量, 使得轮辐区域的致密性提高且晶粒得以一定程度的细化, 改善了由于原有液态模锻工艺导致的轮辐部位力学性能低于轮缘和轮辋部位的缺陷。冲压时大压力下的轮辐产生形变强化和晶粒细化, 是提高轮辐区域力学性能的主要原因。

关键词: A357 铝合金; 冲压模具; 力学性能; 形变强化

0 引言

铝合金轮毂是商用汽车上重要的安全零件之一, 目前在商用汽车上铝合金轮毂的应用率达到了 90%

以上, 在货车汽车上铝合金的轮毂应用率也达到了 20%, 多为车头处车桥上使用。由于车轮的主要作用是承受来自于车体和货物的压力, 并且在不同的承压状态下行驶。因此, 要求车轮应具有较高的强度、延伸性和抗疲劳性能, 其力学性能直接影响着轮毂的使用寿命和行驶安全性。目前, 铝合金轮毂的主要制造方式分为锻造法、铸造法以及新型的液态模锻方法。根据所选用材料和成型工艺不同, 制造工艺主要分为 A356/A357 铝合金低压铸造、液态模锻和 6061/6082 铝合金锻旋工艺。不同的制造加工工艺, 同样影响这产品的机械和力学性能。

液态模锻成形工艺是指在成形时将定量的金属熔融液浇注入模腔内, 然后在较高压力下合模进行凝固、压力成形, 从而在压力作用下获得基本无铸造缺陷的液态模锻毛坯制件。该工艺综合了铸造的高效率与锻造成形技术高压力的优点, 成形件兼具铸造件的结构均匀和锻造件力学性能优良的特点, 同时该工艺还具有省力、节能、材料利用率高等优点。对 A357 铝合金采用液锻工艺制造铝合金轮毂, 其性能虽然满足市场要求和国家标准, 但轮辐部位由于其工艺特性导致力学性能低于轮缘、轮辋部位。为此, 本文提出一种新型 A357 铝合金液态模锻轮毂产品轮辐性能的提高方法, 为商用车 A357 铝合金液态模锻轮毂产品轮辐性能提高提供了理论基础和工艺解决方案。

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, 化学成分见表 1。在 A357 中, Si 元素的作用是改善合金的铸造性能, 加强合金的液态流动性, 以减少在液态金属凝固时产生的疏松等缺陷; Mg 元素的作用是加强合金在热处理后的力学性能, 在常态下 Mg 只有极少量固溶于 α -Al 基体之外, 其余的 Mg 元素主要是以热处理后产生的 Mg₂Si 强化相存在, 固溶处理时 Mg 溶入 α -Al 基体, 时效

表 1 A357 铝合金化学成份 (wt%)

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

时 Mg₂Si 强化相弥散析出, 使得合金的位错阻力增大, 从而使合金强化。一般情况下, 合金的强度随 Si 元素含量的增加而下降, 随 Mg 含量的增加合金的强度稍有增加, 但伸长率明显下降。其伸长率随 Si、Mg 含量增加都明显下降。

1.2 试验方法

1.2.1 工艺及模具分析

试验中, A357 铝合金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、压锻轮辐 → 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。去中心孔和压锻轮辐的具体工艺步骤如下:

液态模锻成型毛坯在加热炉内加热至 380 ± 10 °C, 采用 5000t 压力机通过模具对 A357 铝合金液锻毛坯轮辐进行冲压, 冲中心孔和压锻轮辐。

去中心孔和压锻轮辐: 将液态模锻后的轮毂毛坯放入冲床中, 然后通过改进的冲压模具对毛坯进行去中心孔和压锻轮辐。E160600 轮辐冲压模具结构图如图 1 和图 2 所示。模具的工作原理如下:

第一阶段, 成型压料板接触毛坯, 在弹簧作用下随合模深度加深压住毛坯并开始冲中心孔;

第二阶段, 合模继续深入, 成型压料板与上模压板接触并在下模之间将毛坯高压产生热塑性变形。成型压料板、凹模、下模与轮辐接触的表面均设置为凹凸状, 凹凸状的表面能使挤压时多余的材料流向凹槽中, 减小挤压造成的轮毂变形量, 同时能够使得轮辐组织被挤压得更加紧实, 使得轮辐内部材料更密实, 晶粒晶界微观缩小, 得到组织致密的轮辐。

本试验实现先冲孔, 再挤压轮辐, 提升生产效率, 同时避免冲孔使轮辐变形; 坯件轮辐发生热锻变形, 提高了强度和延伸率。

然后对去中心孔后的毛坯进行热处理, 热处理后通过线切割从轮毂的轮辐部位采样, 切取轮辐试样做金相组织分

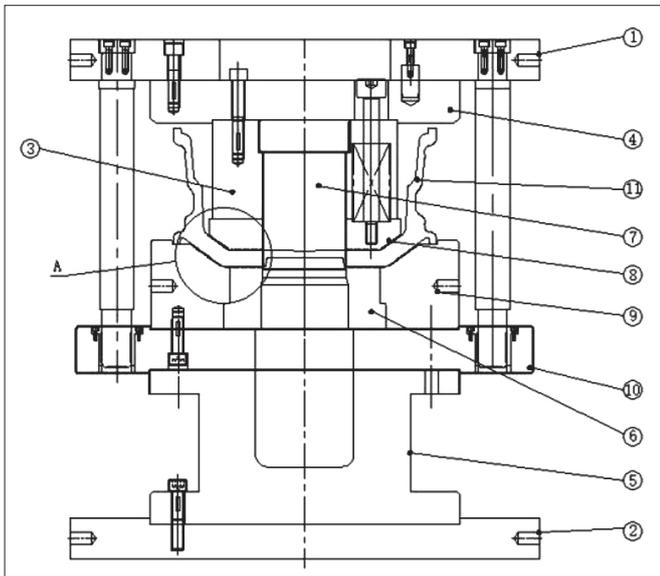


图1 冲压模具结构图

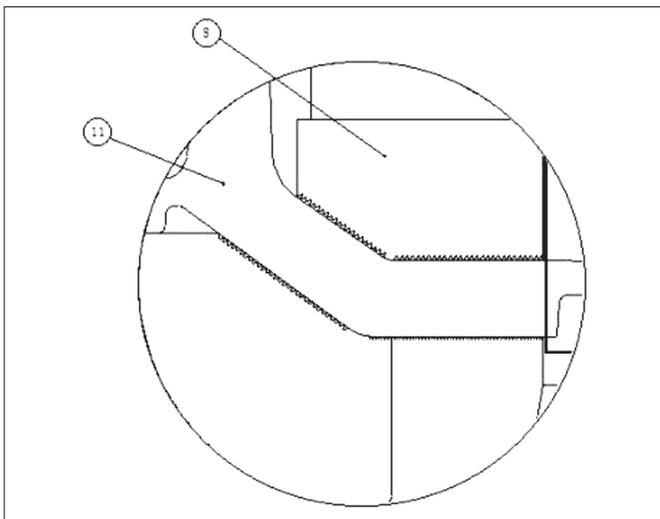


图2 冲压模具局部放大图

表2 热处理工艺

固溶温度	固溶时间	淬火水温	淬火时间	时效温度	时效时间
535±5℃	360±20min	55±5℃	15s 内入水， 60s 以上离水	160±5℃	300±20min

析和力学性能测试。具体热处理工艺见表2。

金相试样采用0.5%HF水溶液作为腐蚀剂，腐蚀时间为10~15s，然后采用德国蔡司AxioVert.X10金相显微镜对微观组织进行观察。力学试样的拉伸尺寸如图3所示，采用万能力学试验机测试产品的屈服强度、抗拉强度和伸长率。

2 结果与分析

2.1 金相组织

分别对热处理后普通的A357液态模锻制造的轮毂和本文通过冲压工艺后的A357液态模锻样品轮毂切取轮辐部位试样进行金相组织试验，金相组织如图4所示。

由图4可见，铝合金液态模锻和相应热处理后轮辐部位的显微组织呈现出典型的铸造非均匀结晶状态下局部树

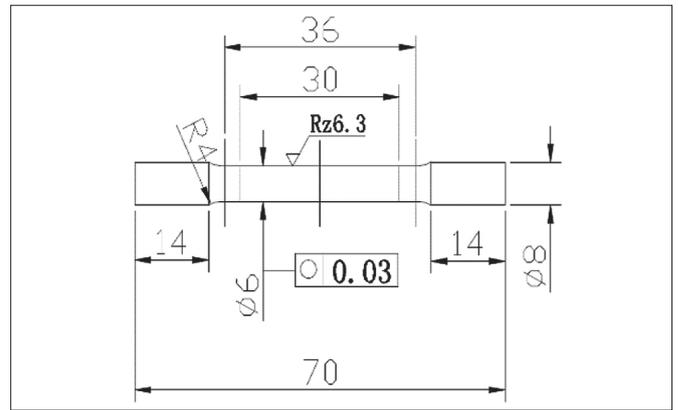


图3 力学性能试样示意图

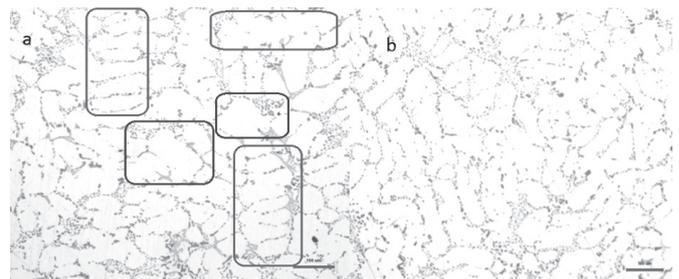


图4 轮辐不同金相组织图 (a 改良后组织, b 改良前组织)

枝晶与等轴晶混合存在的形貌，铝合金熔体温度下降到液相线以下后，熔体开始结晶生成 α -Al初生相，同时由于下压力的存在，初生相部分发生破碎和组织重组，生成新相和树枝晶组织，使得轮辐区域组织等轴晶和树枝晶混合存在。

由于液态模锻工艺是在大压力作用下使得液态金属凝固补缩成型，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，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。

既然由于工艺条件导致轮辐部位力学性能较低，从成分强化角度已经无法改善其力学性能，于是从产品的外部入手，尝试以形变强化（加工硬化）的方式提高轮辐的力学性能。如图4a所示，改良前的轮辐部位组织存在较多的树枝晶，如图红色圈内的组织，其晶粒长径比达到5:1，长度为50~70 μ m；蓝色圈内约为80 μ m×80 μ m大晶粒组织；粗大的和不规则的晶粒严重影响着该区域的力学性能，使得延伸率下降并且易在晶界处产生疲劳裂纹，影响着轮毂的使用寿命。在图4b中，改良后的轮辐组织树枝晶和大晶粒组织大幅度减少，长径比最大的为3:1，且无大晶粒组织存在，因此力学性能得到一定的改善。

2.2 力学性能

分别对普通的A357液态模锻制造的轮毂和本文经过冲压工艺后的A357液态模锻样品轮毂切取轮辐部位试样进行

表3 改良前后轮辐处力学性能

部位	抗拉强度	屈服强度	延伸率	表面硬度
轮辐(前)	282MPa	221MPa	4%	92HB
轮辐(后)	305MPa	242MPa	6%	95HB

力学性能试验,其结果如表3所示。

2.3 结果分析

由表3可知,轮辐在改良前后力学性能存在着差异。改良前轮辐处的屈服强度为221MPa,延伸率为4%;改良后轮辐处的屈服强度为238MPa,延伸率为6%,相比较与改良前,屈服强度和延伸率分别提高了7.7%和50%。改良后的轮辐部位延伸率得到了极大改善。

轮辐在改良后其力学性能提升的主要原因就是轮辐部位的显微组织发生了变化。改良后的轮辐由于受到了模具压板凹凸面的形变作用,在组织内部产生了一定程度的加工硬化。金属在塑性变形时,晶粒发生相对滑移,同时位错出现缠结。缠结的位错使得晶粒运动的阻力增大,导致金属内部产生了残余应力,使其强度提高。同时,由于冲压模具作用力增大,使得内部晶粒进一步细化,细小的晶粒使得晶粒度增大。晶粒度实质反映的是晶界面积的大小,晶粒越细小,同面积下晶粒越多,因此晶界面积越大,则对性能的影响也越大。对于金属的常温力学性能来说,一般是晶粒越细小,强度和硬度越高,同时塑性和韧性也越好,这也符合Hall-Petch效应。因此,由于冲压模具的改进,轮辐部位产生了形变强化和细晶强化的双重作用,使得轮辐部位的强度和延伸率均有一定的提高。

3 结语

本文针对A357铝合金的力学性能改善,从改进冲压模具的结构入手,在冲压模具与毛坯轮辐位置的接触处设计了凹凸面结构,且通过后续的金相试验和力学性能试验表明,该改动改善了轮辐处的力学性能,提高了其屈服强度和延伸率。结论如下:

(1) 新设计的轮辐冲孔和压锻轮辐工艺改善了轮辐位置的组织,改进的模具结构增加了轮辐位置的压力,使轮辐部位产生了形变强化和细晶强化的双重作用,提高了轮辐的力学性能。

(2) 在液态模锻工艺下,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Mg₂Si强化相较少,沉淀强化效果较弱,力学性能较低。

(3) 经过冲压工艺后的轮辐由于受到了模具压板凹凸面的形变压力作用,在组织内部产生了一定程度的加工硬化和细晶强化,内部组织中晶粒发生相对滑移,位错出现缠结。使得轮辐同时受到形变强化和细晶强化的双重作用,强度和延伸率得以提升。

参考文献:

- [1] 王祝堂. 铝合金轮毂工业的发展[J]. 轻合金加工技术,1994(03):17-22.
- [2] 周洁,白杉. 铝合金轮毂的市场、特点和制造工艺[J]. 铝加工,2006(3):43-44.
- [3] 郑祥健,金龙兵,王国军,等. 铝合金轮毂的生产和市场现状[J]. 轻合金加工技术,2004,032(007):8-11.
- [4] 李天生,徐慧. 铝合金液态模锻的发展现状[J]. 机械工程师,2006.
- [5] 刘文鑫. 液态模锻A356轮毂不均质性研究[D].2015.
- [6] 辽宁忠相铝业有限公司. 6061材料商用车铝合金轮毂液态模锻工艺法,CN201610932179.3 [P].2018-05-15.
- [7] Guo-Fa M I,Kong L A,Zhu Z J,et al.Composition Optimization of the High-strength and Ductility Al-Si Alloy A357[J].Light Alloy Fabrication Technology,2005.
- [8] 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.
- [9] Mousavi G S,Emamy M,Rassizadehghani J.The effect of mischmetal and heat treatment on the microstructure and tensile properties of A357 Al-Si casting alloy[J]. Materials Science & Engineering A,2012, 556(OCT.30):573-581.
- [10] 刘文鑫,邢书明,葛素静,等. A356铝合金轮毂挤压铸造的不均质性模拟及验证[J]. 特种铸造及有色合金,2015(07):726-729.
- [11] 李峰,刘向东,王文印,等. 挤压铸造对A356铝合金组织的影响[J]. 铸造,2008(04):010.
- [12] 侯立群,邢志媛,李素梅,等. 常用铝合金挤压铸造状态下的组织和性能[J]. 特种铸造及有色合金,2013,33(011):1021-1023.
- [13] Al-Cu-Mg-Mn合金形变热处理强化过程的研究[J]. 材料热处理学报,1983(02):14-21.
- [14] 徐红星,程晓农,许晓静,等. 超细亚晶粒铝合金的强化机理[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2011,032(001):51-55.
- [15] 刘文辉. 基于位错滑移的铝合金断裂行为的研究[D]. 中南大学,2008.