

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2021.06.002

## 液态模锻 2A50 铝合金轮毂宏观缺陷、微观组织和力学性能研究

武 彤, 邢书明, 刘 鑫

(北京交通大学 机械与电子控制工程学院, 北京 100044)

**摘要:**使用液态模锻工艺生产 2A50 铝合金轮毂。采用光学金相显微镜, 电子拉伸试验机等手段, 对不同液锻机压力下的 2A50 轮毂宏观缺陷、微观组织及力学性能进行了研究。结果表明: 随着压力的增大, 轮毂直臂上沿冷隔白层厚度与拐角处鼓泡直径均有所减小; 2A50 合金微观组织以初生  $\alpha$ -Al 为基体, 铸态组织有着典型的细小树枝晶状组织形貌, 并伴随有较为粗大的等轴树枝晶组织形貌, 热处理组织主要呈等轴晶形貌。当压力由 80 MPa 增至 118 MPa 时, 底部与直壁处的铸态与热处理组织中初生  $\alpha$ -Al 等轴晶平均尺寸减小幅度 37~52  $\mu\text{m}$ ; 轮毂底部铸态拉伸试棒抗拉强度、断后伸长率与压力无明显相关性, 当压力由 80 MPa 增至 118 MPa 时, 底部与直壁处热处理拉伸试棒抗拉强度分别提升 13.3 MPa 与 18 MPa, 断后延伸率分别提升 1.43% 与 2%。

**关键词:**液态模锻; 2A50 铝合金; 负重轮轮毂; 宏观缺陷; 微观组织; 力学性能

**中图分类号:** TG 316.3

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2095-0411(2021)06-0008-09

## Study on Macroscopic Defects, Microstructure and Mechanical Properties of 2A50 Aluminum Alloy Wheel Hub by Molten Metals Die Forging

WU Tong, XING Shuming, LIU Xin

(School of Mechanical, Electronic and Control Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract:** 2A50 aluminum alloy wheel hub was produced by molten metals die forging (MMDF for short). The macroscopic defects, microstructure and mechanical properties of 2A50 wheel hub under different forging pressure were studied by means of optical microscope and electronic tensile testing machine. The results show that the white layer thickness of the cold barrier along the straight arm and the diameter of the bubble at the corner of the hub decreased with the increase of the pressure. The microstructure of 2A50 alloy is composed of primary  $\alpha$ -Al matrix. The as-cast microstructure has typi-

**收稿日期:** 2021-06-13。

**作者简介:** 武彤(1995—), 男, 辽宁本溪人, 博士生。通信联系人: 邢书明(1962—), E-mail: smxing@bjtu.edu.cn

**引用本文:** 武彤, 邢书明, 刘鑫. 液态模锻 2A50 铝合金轮毂宏观缺陷、微观组织和力学性能研究[J]. 常州大学学报(自然科学版), 2021, 33(6): 8-16.

cal fine dendritic morphology, accompanied by coarse equiaxed dendritic morphology. The heat-treated microstructure mainly presents equiaxed crystal morphology. After the pressure increased from 80 MPa to 118 MPa, the average size of primary  $\alpha$ -Al equiaxed grains at the bottom and straight arm decreased by 37—52  $\mu\text{m}$ . There is no obvious correlation between the tensile strength and the elongation after fracture of the as-cast tensile test bar at the bottom of hub and the pressure. After the pressure increased from 80 MPa to 118 MPa, the tensile strength of the heat-treated tensile test bars at the bottom and straight arm increased by 13.3 MPa and 18 MPa respectively, the elongation after fracture increases by 1.43% and 2% respectively.

**Key words:** molten metals die forging; 2A50 aluminum alloy; wheel hub; macroscopic defects; microstructure; mechanical property

液态模锻作为一种先进成型工艺,能够形成致密、表面光洁、力学性能优良的铸件,起到细化晶粒、改善脆性相形貌、减轻宏观偏析与消除缩松等作用,被广泛应用于航空航天、交通运输等领域<sup>[1-3]</sup>。在液态模锻过程中,铸件各部位均处于压应力状态,有利于铸件补缩并且抑制铸造裂纹的产生,目前军工企业常用液态模锻工艺生产 2A50 变形铝合金坦克负重轮轮毂,但 2A50 此类 Al-Cu-Si-Mg 系变形铝合金由于其合金元素特点,结晶温度范围宽、偏析与热裂倾向大、流动性差,导致生产的轮毂宏观层面上存在裂纹、冷隔缺陷、热处理后鼓泡,微观层面上存在偏析、组织粗大等问题,进而影响其力学性能<sup>[4-6]</sup>。侯立群等<sup>[7]</sup>通过调整热处理工艺研究 2A50 铝合金轮毂的显微组织变化和偏析缺陷情况,提出挤压铸造 2A50 铝合金容易产生挤压铸造异常偏析,降低浇注温度或模具温度,或添加微量元素 Ti, B, 可减缓或消除此种“挤压铸造异常偏析”。王健等<sup>[8]</sup>主要针对调整热处理中的时效环节对 2A50 铝合金轮毂的硬度进行了研究,结果表明 2A50 铝合金时效温度和硬度的关系为时效温度越高到达硬度峰值的时间越短,但硬度峰值有所下降。CHEN 等<sup>[9]</sup>研究了液锻条件下触变成形 Al-Cu-Si-Mg 合金铸件不同位置的微观组织,结果表明铸件承压大的位置微观孔隙与裂纹减少,并且承压越大,晶界处网状共晶组织越少,通过取样位置的不同来表述压力的改变下合金微观组织的变化情况。课题组通过增大液态模锻压力,借助金相组织分析、力学性能检测等手段揭示压力对于轮毂不同位置宏观缺陷、微观组织、力学性能的影响规律,为获得组织致密均匀、力学性能优良稳定的铝合金轮毂提供参考。

# 1 实验方法与过程

## 1.1 实验过程

实验材料在 2A50 变形铝合金(中国标准)基础上,铜元素含量取上限,并小幅度调整其他合金元素含量。在熔炼炉中熔炼,熔炼温度 760  $^{\circ}\text{C}$ ,全部熔化后导入浇包内加入 2% 稀土中间合金 Al-10La/Ce 进行变质处理,用钟罩压入 0.1% 的铝钛硼细化剂并通氩气除气 12 min,均匀搅拌后捞渣,将精炼后的 2A50 铝合金液转入定量浇注机内准备浇注,浇注温度为 739  $^{\circ}\text{C}$ 。取少量铝合金液检测化学成分见表 1。

表 1 2A50 铝合金化学成分

Table 1 Composition of 2A50 aluminum alloy								%
元素	Cu	Si	Mg	Mn	Ti	Fe	La/Ce	Al
质量分数	2.40	0.80	0.56	0.50	0.07	0.10	0.15	Bal.

采用直接液态模锻对 2A50 轮毂进行加压凝固试验。将轮毂模具安装到 THP16-3000 液态模锻液压机上,液压机及模具结构如图 1(a)所示,模具选用凹凸模结构,上下模腔喷涂石墨润滑剂以便铸件与模腔分离,模具预热温度 220 ℃,采用 72.3,74.8,80,92.3,102.6,118 MPa 6 个不同水平比压进行压制,保压时间 27 s,得到如图 1(b)所示轮毂。

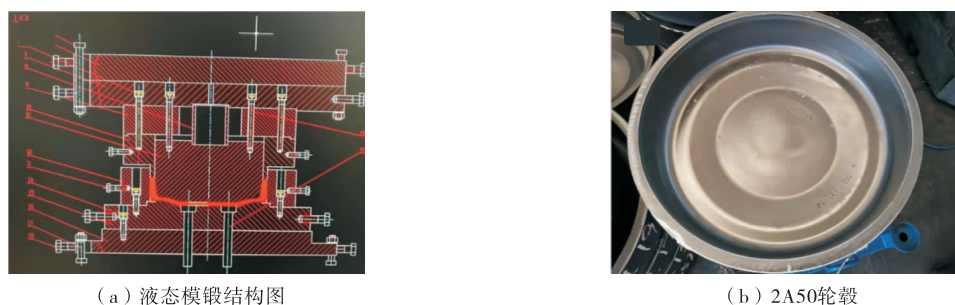


图 1 液态模锻及 2A50 轮毂结构图

Fig.1 Structure drawing of molten metals die forging and 2A50 wheel hub

取 80,92.3,102.6,118 MPa 4 种压力下轮毂的 1/4 作为铸态试块。对剩余每种压力下 3/4 轮毂进行热处理,将轮毂装入型号 TKCL-2-180 铝合金快速淬火炉内由 125 ℃ 升温至 490 ℃,升温时间 55 min;于 490 ℃ 保温 3 h 后,升温至 508 ℃,升温时间 15 min;于 508 ℃ 保温 2 h 后出炉;出炉后立即淬火,水温 49 ℃,淬火时间 4 min 后取出;将淬火后的轮盘置于室内 2 h 后装入型号 TXSL-2-96 的铝合金时效炉;将轮盘由 25 ℃ 升温至 150 ℃,升温时间 38 min;于 150 ℃ 保温 7 h 后出炉;出炉后空冷至室温 25 ℃。

## 1.2 取样和检验

取 4 种压力下的直壁处与底部试样,依据 GB/T 3246.2—2012 经磨抛和腐蚀处理,取样位置均为标记处中心位置,显微组织试样经过磨抛, keller 试剂腐蚀 15 s 后,采用 DM2000 金相显微镜,各选取 10 个视场进行观察,采用截线法测量晶粒尺寸。直壁与底部金相取样位置如图 2 所示。

对 4 种不同压力压制的轮毂进行取样,分别取每种压力下轮毂不同位置的铸态与热处理试块做拉伸试棒,铸态轮毂底部取 1 个铸态拉伸试棒,热处理后轮毂直壁处与底部分别取 3 个热处理拉伸试棒,取样位置如图 3 所示。直壁处与底部拉伸试棒尺寸依据 GB/T 228—2002 进行加工,如图 4 所示(单位:mm)。采用 WDW-100A 电子万能材料试验机对拉伸试棒进行力学性能测试。



图 2 金相试样取样位置:直壁处 I ;底部 II

Fig.2 Sampling location of metallographic specimen: straight arm I ;bottom II

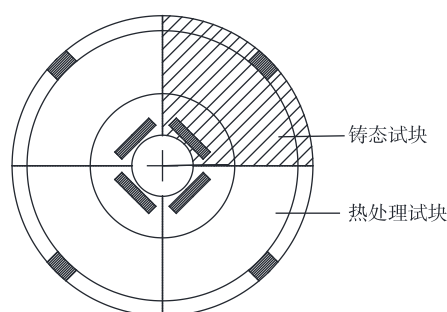


图 3 拉伸试棒取样位置

Fig.3 Sampling position of tensile test bar

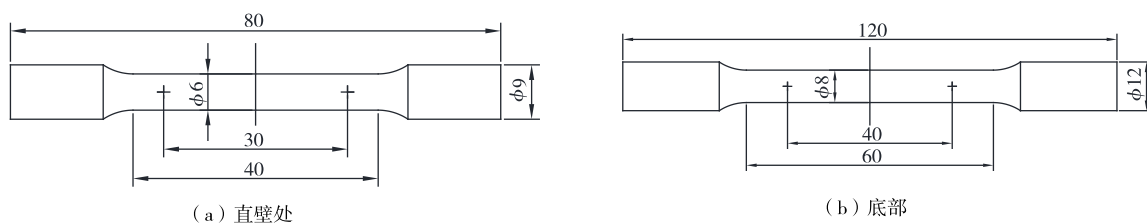


图 4 直壁处和底部拉伸试棒尺寸

Fig.4 Tensile test bar size at the straight arm and the bottom

## 2 实验结果

### 2.1 2A50 轮毂宏观缺陷随压力变化情况

轮毂直臂上沿内外侧发现冷隔白层现象,72.3 MPa 与 118 MPa 压力下轮毂直壁处上沿冷隔宏观形貌如图 5(a)~图 5(b)所示。这是由于加压前铝液面高度小于模腔总高度,铝液表面形成氧化皮与凝固壳,加压后表面氧化皮和凝固壳被破坏,内部的金属熔体冲破表面层,破碎的低密度氧化膜于直壁上沿处形成白层。稀疏氧化层的存在起到阻隔作用,导致直臂上沿处金属液于凝固末期形成冷隔,最小压力 72.3 MPa 时,由图 5(a)箭头处可以明显看到冷隔现象产生的凹陷,最大压力 118 MPa 时几乎看不到冷隔现象。白层部分厚度随压力变化如图 5(c)所示,可以看到随着压力的增大,轮毂直壁处上沿的白层厚度呈较小趋势,并于液锻压力为 102.6 MPa 时达到极限 6~10 mm。

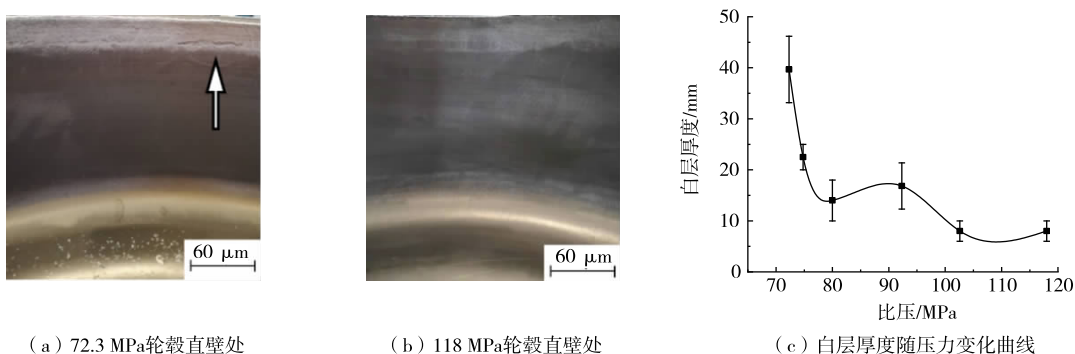


图 5 轮毂直壁处上沿冷隔宏观形貌及白层厚度随压力变化曲线

Fig.5 Macroscopic morphology of the cold shuts at the straight arm and the variation curve of white layer thickness with pressure

轮毂直壁处与底部内侧拐角部分存在鼓泡现象,图 6(a)和图 6(b)分别为 72.3,118 MPa 压力下轮毂鼓泡宏观形貌,这是由于浇注过程中卷气引起,或除气过程不充分,导致金属中溶解的气体原子析出长大成泡。随着压力的增大,鼓泡尺寸有着减小的趋势,鼓泡直径尺寸随压力变化如图 6(c)所示,可以发现当压力增大到 80 MPa 以后,鼓泡直径减小缓慢,稳定在 1~3 mm。

### 2.2 2A50 轮毂凝固组织随压力变化情况

2A50 轮毂铸态微观组织以初生  $\alpha$ -Al 相为基体。图 7 为压力 118 MPa 下 2A50 铝合金轮毂直壁处微观组织部分光镜照片,由图 7(a)可知第二相主要由 2~3  $\mu\text{m}$  白色球状颗粒  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ ,  $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$  组成;图 7(b)于晶界处发现白色多边形  $\text{AlTiCeCu}$  相,边长约 15~30  $\mu\text{m}$ ,图 7(c)于晶界处发现白色离异共晶组织,为  $(\alpha + \text{Al}_2\text{Cu})$  中呈现单独分布的  $\text{Al}_2\text{Cu}$  相,无典型共晶组织形貌,依附初生  $\alpha$ -Al 晶粒边缘生长。

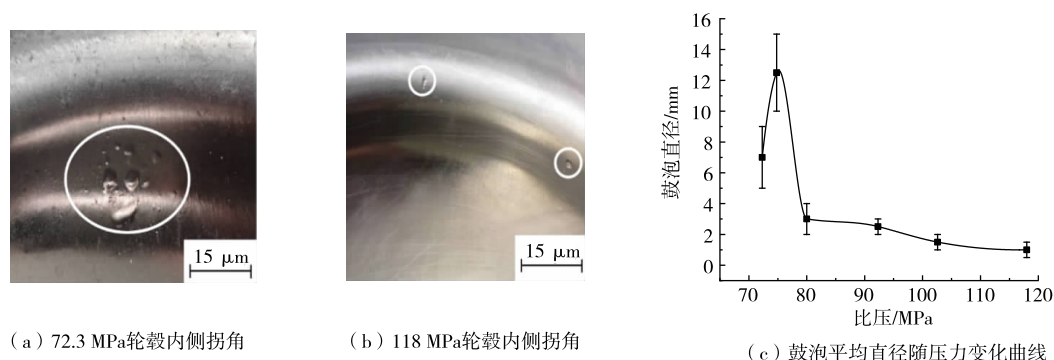


图 6 轮毂内侧拐角处鼓泡宏观形貌及鼓泡平均直径随压力变化曲线

Fig.6 Macroscopic morphology of bubbling at the inner corner of wheel hub and the average diameter of bubbling varies with the pressure

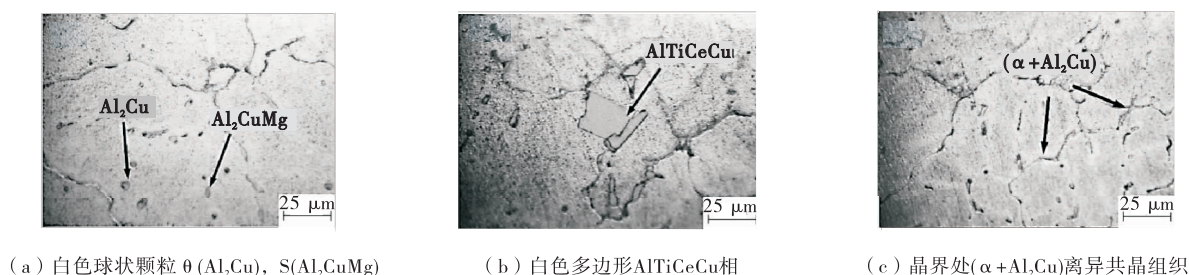


图 7 118 MPa 下 2A50 铝合金轮毂直壁处微观组织光镜照片

Fig.7 Optical microphotograph photograph of microstructure at the straight arm of 2A50 aluminum alloy wheel hub under 118 MPa

图 8、图 9 分别为 2A50 轮毂直壁处与底部铸态微观组织随比压的变化情况,可以看到 2A50 合金铸态组织有着典型的细小树枝晶状组织形貌,并伴随有较为粗大的等轴树枝晶组织形貌,并且随着压力的增大,直壁处与底部初生  $\alpha$ -Al 等轴晶晶粒尺寸均有减小的趋势,当比压由 80 MPa 增至 118 MPa 时,直壁处初生  $\alpha$ -Al 等轴晶晶粒平均尺寸由 156 μm 减小至 104 μm;底部初生  $\alpha$ -Al 等轴晶晶粒平均尺寸由 190 μm 减小至 146 μm。由图 8、图 9 对比可知,初生  $\alpha$ -Al 晶粒度直壁处小于底部。

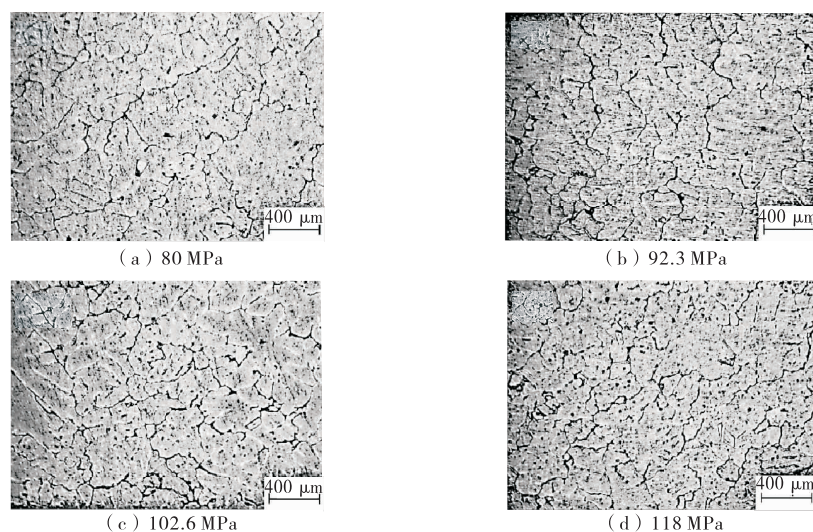


图 8 2A50 轮毂直壁处铸态微观组织随比压的变化情况

Fig.8 Variation of the as-cast microstructure at the straight arm of 2A50 wheel hub with pressure



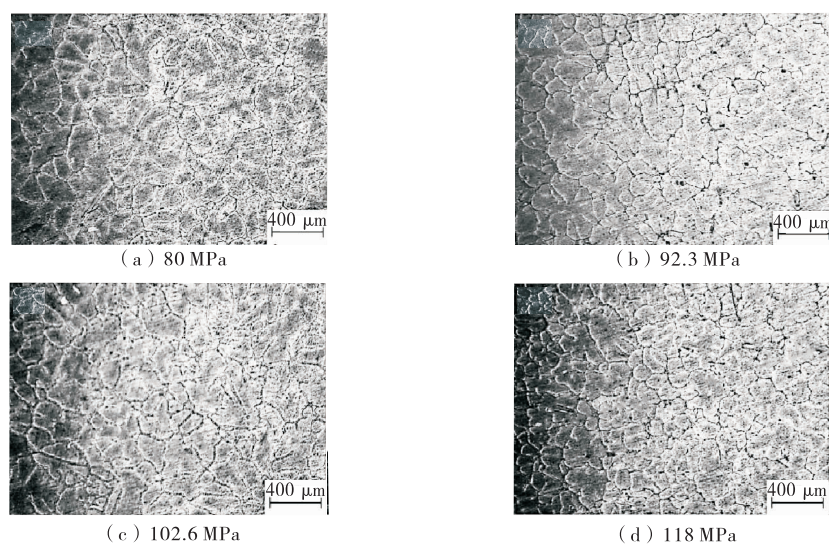


图 9 2A50 轮毂底部铸态微观组织随比压的变化情况

Fig.9 Variation of the as-cast microstructure at the bottom of 2A50 wheel hub with pressure

图 10、图 11 分别为 2A50 轮毂直壁处与底部热处理微观组织随比压的变化情况,可以看到 2A50 合金经过热处理后,微观组织中初生  $\alpha$ -Al 构成的典型的细小树枝晶状组织形貌明显减少,基体晶粒大部分呈等轴晶状形貌。随着压力的增大,直壁处与底部初生  $\alpha$ -Al 等轴晶晶粒尺寸同样有减小的趋势,当比压由 80 MPa 增至 118 MPa 时,直壁处初生  $\alpha$ -Al 等轴晶晶粒平均尺寸由  $167\ \mu\text{m}$  减小至  $123\ \mu\text{m}$ ;底部初生  $\alpha$ -Al 等轴晶晶粒平均尺寸由  $201\ \mu\text{m}$  减小至  $164\ \mu\text{m}$ 。

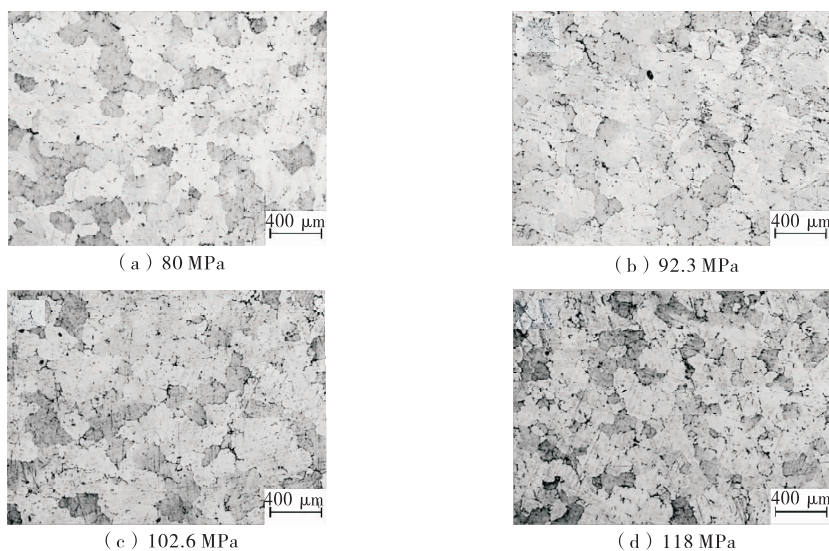


图 10 2A50 轮毂直壁处热处理后微观组织随比压的变化情况

Fig.10 Variation of microstructure at the straight arm of 2A50 hub with pressure after heat treatment

### 2.3 2A50 轮毂力学性能随压力变化情况

轮毂底部铸态拉伸试棒力学性能如图 12 所示。虽然底部铸态试棒抗拉强度与断后伸长率在比压 118 MPa 时达到最大,分别为 186 MPa 与 7.5%,但施加压力在 80~102.6 MPa 时可以发现随着压力的增大,抗拉强度与断后伸长率无明显相关性。

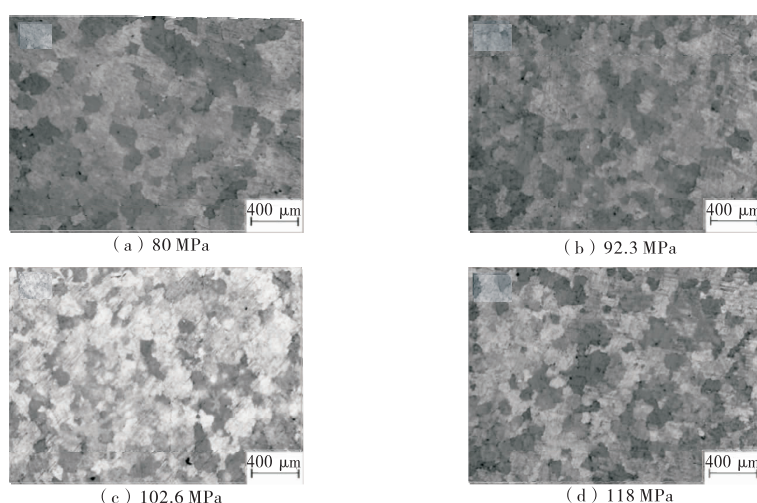


图 11 2A50 轮毂底部热处理后微观组织随比压的变化情况

Fig.11 Variation of microstructure at the bottom of 2A50 hub with pressure after heat treatment

轮毂底部与直壁处热处理拉伸试棒力学性能如图 13 所示。可以发现随着压力的增大,2A50 轮毂底部与直壁处热处理拉伸试棒的抗拉强度与断后伸长率均有增长。当压力由 80 MPa 增至 118 MPa 时,轮毂底部拉伸试棒的抗拉强度由 317.7 MPa 增大至 331 MPa,断后伸长率由 6% 增大至 7.43%;轮毂直壁处拉伸试棒的抗拉强度由 312 MPa 增大至 330 MPa,断后伸长率由 5% 增大至 7%。在相同压力条件下,直壁处拉伸试棒的抗拉强度与延伸率均值小于底部拉伸试棒。

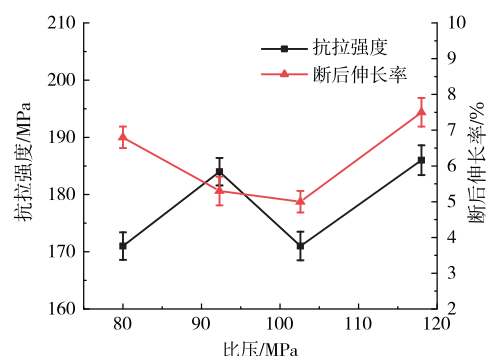


图 12 2A50 轮毂底部铸态拉伸试棒力学性能

Fig.12 Mechanical properties of as-cast tensile test bar at the bottom of 2A50 wheel hub

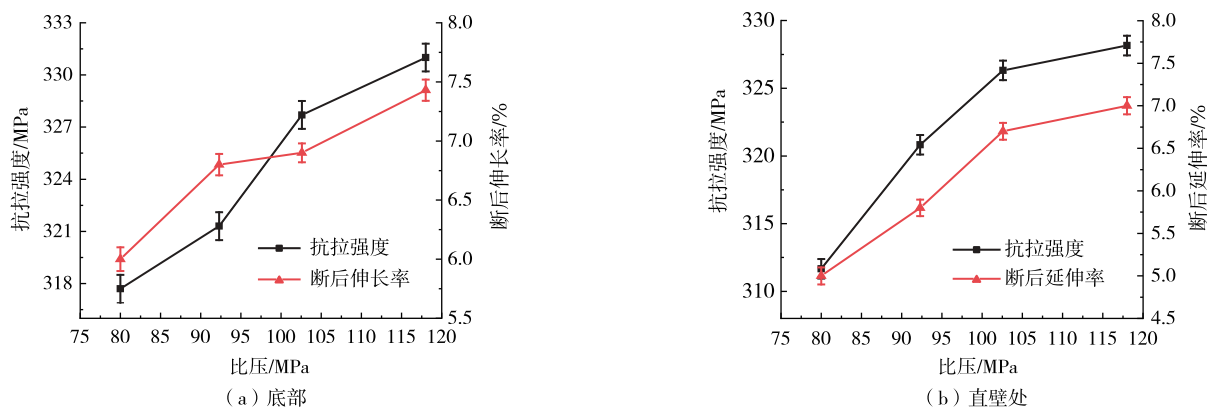


图 13 2A50 轮毂底部与直壁处热处理拉伸试棒力学性能

Fig.13 Mechanical properties of heat-treated tensile test bars at the bottom and straight arm of 2A50 wheel hub

### 3 分析和讨论

#### 3.1 不同压力下 2A50 轮毂宏观缺陷分析

由于在液锻机上压头施加压力前铝液面高度小于模腔总高度,刚浇注的铝液表面与空气接触温度

下降较快,于表面形成氧化皮与凝固壳。当上压头接触铝液表面后,氧化皮和凝固壳被破坏,内部的金  
属熔体冲破表面层,破碎的低密度氧化膜富集于下模腔内表面,随着压头向下运动,铝合金液逐渐凝固  
成型,低密度氧化膜随剩余未凝固金属液于直壁上沿形成白层。氧化膜的存在使得剩余未凝固金属液  
流动受阻,形成冷隔<sup>[10-11]</sup>。随着液锻机压力的增大,剩余未凝固铝液得到充分补缩,促使氧化白层部分  
致密变窄,减轻冷隔缺陷,当施加压力大于 102.6 MPa 时,压力对于冷隔缺陷的抑制达到极限。

直壁与底部内侧拐角部分存在鼓泡现象,是由于浇注过程中卷气引起与除气过程不够充分导致,金  
属中溶解的气体原子析出长大成泡。随着压力增大,气体分子密度增大,与合金液碰撞的机会增加,使  
得气体分子更容易被合金液原子俘获,导致合金液中气体溶解度增大,在相同温度条件下凝固至室温  
后,相比于承压小的铸件,承压大的铸件中溶解气体分子多。比压的增大可以抑制鼓泡的形成,致使鼓  
泡直径尺寸减小。

### 3.2 不同压力下 2A50 轮毂直壁处与底部微观组织分析

2A50 合金中最主要的合金元素为 Cu 元素,质量分数为 2.4%,其质量分数低于铝铜合金可以形成  
共晶组织的共晶点铜的质量分数(5.7%)<sup>[12]</sup>,在液态模锻此类非平衡凝固条件下,由于溶质再分配的  
原因,凝固末期剩余金属液合金元素质量分数增大,使得剩余金属液中 Cu 元素质量分数高于 5.7%,从而  
于晶界处形成离异共晶组织,此共晶组织中与初生  $\alpha$ -Al 成分相近的一相即共晶  $\alpha$  会依附于初生  $\alpha$ -Al  
长大,而另一相共晶  $\text{Al}_2\text{Cu}$  单独依附共晶  $\alpha$  相生长于晶界最后凝固处。白色多边形相  $\text{AlTiCeCu}$  为稀  
土元素与钛元素的加入在凝固初期反应形成,此类含稀土金属间化合物一般熔点较高,由于金属液凝  
固早期形成,大部分富集于晶界处。球状颗粒相  $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$  与  $\text{S}(\text{Al}_2\text{CuMg})$  为当温度降至共晶线以下  
时,金属液完全凝固后,由初生  $\alpha$ -Al 固溶体析出的二次相。

2A50 合金轮毂底部组织较直壁处粗化,这是因为在液锻机压力的作用下,轮毂底部未经压力作用  
而形成的粗大树枝晶在凝固过程中受到压力作用而破碎,这些破碎的枝晶随未凝固的金属液反充至轮  
毂直壁处,使晶核数目明显增加,从而细化直壁处基体组织,形成更加细小的枝晶。相比于铸态微观  
组织存在部分细小树枝晶状形貌,热处理微观组织中初生  $\alpha$ -Al 均为等轴树枝晶形貌,热处理工艺中的固  
溶时效过程导致细小树枝晶重新熔化再结晶形成等轴晶树枝晶。

根据克劳修斯方程<sup>[13]</sup>可知,随着液锻机压力的增加,铝合金熔体的过冷度也随之增加,提高凝固初  
始冷却速率,进而提高初生  $\alpha$ -Al 的形核率,同时合金的凝固潜热释放较快,引发合金熔体中的原子扩散  
受阻,从而细化了合金中的初生  $\alpha$ -Al 基体,使得随着压力的增加,初生  $\alpha$ -Al 树枝晶枝晶臂间距与等轴  
晶尺寸均有减小趋势。另一方面,金属液在挤压充型过程中,已凝固的外壳层也会在压力下产生塑性变  
形,发生强烈的金属补缩流动,造成凝固前沿的晶粒破碎形成新的核心,同样起到细化晶粒的作用。因  
此,压力下凝固成形更易获得细小均匀的组织。

### 3.3 不同压力下 2A50 轮毂直壁处与底部力学性能分析

轮毂底部铸态拉伸试棒抗拉强度、断后伸长率与压力无明显相关性,系未经热处理的轮毂各部分宏  
观偏析严重导致的力学性能不均所致。随着压力的增大,轮毂直壁处与底部热处理拉伸试棒抗拉强度  
与断后伸长率均有不同程度提升,由图 10~图 11 可以看到轮毂的直壁与底部金相组织中初生  $\alpha$ -Al 晶  
粒尺寸随液锻压力的增大而变细密,晶粒尺寸的减小导致晶界与位错密度增大,晶界和亚晶界越多,其  
抗拉强度越高。根据经典断裂强度理论<sup>[14]</sup>

$$\sigma_c = \sigma_i + K_c d^{-1/2} \quad (1)$$

式中: $\sigma_c$  为抗拉强度; $\sigma_i$  为单晶的抗拉强度; $d$  为晶粒大小; $K_c$  为相邻晶粒位向对晶粒位错及分离的影  
响系数。可知,晶粒越细,金属材料的抗拉强度越大。拟合晶粒度与抗拉强度关系得到  $\sigma_i = 260.6 \text{ MPa}$ ,  
 $K_c = 782$ ,拟合曲线  $\sigma_c = 260.6 + 782d^{-1/2}$ 。晶粒与晶界密度的增加虽然阻碍了位错,但随着晶粒尺寸的



减小,越有利于金属的变形,提高了材料的延伸率,程度高于位错阻碍产生的影响,故随着压力的增大可使轮毂直壁处与底部的抗拉强度与延伸率均有不同程度提高。

## 4 结 论

1)轮毂直臂上沿冷隔现象随着压力的增大呈减轻趋势,白层厚度明显减小,当压力增大到 102.6 MPa 后,白层厚度达到极限值;轮毂内侧拐角处鼓泡直径随着压力的增大而减小,当压力增大到 80 MPa 后,鼓泡直径达到极限值。液锻压力的增大对轮毂宏观缺陷有着明显的改善作用。

2)2A50 合金微观组织以初生  $\alpha$ -Al 为基体,铸态组织有着典型的细小树枝晶状组织形貌,并伴随有较为粗大的等轴树枝晶组织形貌,热处理组织主要为等轴晶形貌。随着压力的增大,2A50 轮毂微观组织中的等轴晶均有细化,当压力由 80 MPa 增至 118 MPa 时,底部与直壁处的铸态与热处理组织中初生  $\alpha$ -Al 等轴晶平均尺寸减小幅度 37~52  $\mu\text{m}$ 。

3)轮毂底部铸态拉伸试棒抗拉强度、断后伸长率与压力无明显相关性,系未经热处理的轮毂各部分宏观偏析严重导致的力学性能不均所致;随着压力的增大,轮毂直壁处与底部热处理拉伸试棒抗拉强度与断后伸长率均有不同程度提升,当压力由 80 MPa 增至 118 MPa 时,底部与直壁处热处理拉伸试棒抗拉强度分别提升 13.3 MPa 与 18 MPa,断后延伸率分别提升 1.43% 与 2%。

## 参考文献:

- [1] 宾仕博, 邢书明, 田龙梅, 等. 液态模锻工艺参数对 AlSi<sub>9</sub>Cu<sub>3</sub> 强度和塑性的影响[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23(4): 977-982.
- [2] 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, 44(9): 100-102.
- [3] ZHANG Y, WU G H, LIU W C, et al. Effects of processing parameters and Ca content on microstructure and mechanical properties of squeeze casting AZ91-Ca alloys[J]. Materials Science and Engineering: A, 2014, 595: 109-117.
- [4] 魏静. 2A50 铝合金负重轮挤压铸造数值模拟优化及试验研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 8-9.
- [5] ZHANG C, DU Y, LIU S H, et al. Microstructure and thermal conductivity of the as-cast and annealed Al-Cu-Mg-Si alloys in the temperature range from 25 °C to 400 °C[J]. International Journal of Thermophysics, 2015, 36(10/11): 2869-2880.
- [6] 英卫东, 王贵福, 刘洋, 等. 提高 2A50 铝合金轮毂模锻件力学性能的热处理工艺研究[J]. 轻合金加工技术, 2006, 34(4): 48-51.
- [7] 侯立群, 乔小蒙, 李素梅, 等. 挤压铸造 2A50 合金不同固溶处理状态的显微组织和偏析缺陷[J]. 兵器材料科学与工程, 2014, 37(6): 46-50.
- [8] 王健, 侯立群, 齐志望, 等. 挤压铸造 2A50 铝合金的热处理工艺[J]. 特种铸造及有色合金, 2010, 30(4): 339-341, 288.
- [9] CHEN G, DUZ M, CHENG Y S. Effect of mechanical conditions on the microstructures and mechanical properties of thixoformed Al-Cu-Si-Mg alloy[J]. Materials & Design, 2012, 35: 774-781.
- [10] 余国红, 熊伟. 薄壁件铸造过程中的缺陷及控制方法[J]. 世界有色金属, 2019(20): 253-254.
- [11] 王荣, 王维昌. 铸件浇不足和冷隔缺陷的成因及防止措施[J]. 金属加工(热加工), 2008(17): 60-62.
- [12] 章立钢. Al-Cu-RE 合金相图及其微观组织演化研究[D]. 长沙: 中南大学, 2010: 24-25.
- [13] 胡汉起. 金属凝固原理[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2000: 59-60.
- [14] 钟群鹏, 赵子华. 断口学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 179-180.

(责任编辑:李艳)