

# 液态模锻 6061 铝合金轮毂的力学性能及静态承载能力的 Abaqus 仿真分析

叶晓<sup>1</sup>, 孙跃军<sup>1\*</sup>, 刘杰<sup>2</sup>, 薛明虎<sup>3</sup>, 仲丽<sup>1</sup>, 闫海<sup>1</sup>, 吴承格<sup>1</sup>

(1. 山东交通学院工程机械学院, 山东 济南 250357; 2. 天津那诺机械制造有限公司, 天津 300457; 3. 江苏嘉明碳素新材料有限公司, 江苏 连云港 222300)

**摘要:** 利用液态模锻方法制备了 6061 铝合金轮毂, 测试了热处理后轮毂不同部位的力学性能, 同时利用 Abaqus 仿真模拟软件对轮毂的静态承载能力进行了分析。结果表明: 轮毂不同部位的力学性能不同, 性能最高处为外轮缘, 抗拉强度为 375 MPa、屈服强度为 345 MPa; 性能最低处为轮辋, 抗拉强度为 343 MPa、屈服强度为 317 MPa; 轮毂不同部位的性能差异主要是由晶粒度所致, 外轮缘处的晶粒最细小、晶粒度达到 5.032, 轮辋处的晶粒最粗大、晶粒度为 4.350。Abaqus 仿真结果表明, 静载条件下, 所制备的轮毂性能达到了设计使用要求。

**关键词:** 液态模锻; 6061 铝合金; 轮毂; 静态承载; Abaqus 仿真

**中图分类号:** TG249.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9981(2023)04-0722-06

**引文格式:** 叶晓, 孙跃军, 刘杰, 等. 液态模锻 6061 铝合金轮毂的力学性能及静态承载能力的 Abaqus 仿真分析[J]. 材料研究与应用, 2023, 17(4): 722-727.

YE Xiao, SUN Yuejun, LIU Jie, et al. Mechanical Properties of Liquid Forging 6061 Aluminum Alloy Wheel Hub and Abaqus Simulation Analysis of Its Static Load-Bearing Capacity[J]. Materials Research and Application, 2023, 17(4): 722-727.

液态模锻是将液态金属注入金属模具型腔中, 随后降温, 当金属液处于半熔融糊状时, 对金属液进行加压而成型的一种新技术<sup>[1]</sup>。该技术由俄罗斯科学家发明, 随后在美国、欧洲和日本等国广泛推广, 我国近年来在对液态模锻的研究和应用也十分迅速<sup>[2]</sup>。从技术特点看, 液态模锻具有压铸和锻造的双重特性。同锻造相比, 液态模锻所需压力较小, 具有更好的充填性能; 同压铸相比, 液态模锻的致密度更高, 消除了气孔等缺陷, 力学性能更高<sup>[3-4]</sup>。因此, 液态模锻技术兼顾二者优点, 未来应用前景广阔。

6061 铝合金是一种可热处理强化的变形铝合金, 具有中等强度和优良耐蚀性能, 工业中应用广泛<sup>[5-6]</sup>。在汽车领域中, 6061 铝合金被用于制造轮毂等零部件, 但是由于 6061 铝合金的流动性较差、成型能力不足, 因此在制造轮毂时, 一般采用固态锻造的方法。近年来, 国内外研究者将液态模锻技术引入到 6061 轮毂的制备中, 并成功地制备了 6061 铝合金商用车轮<sup>[7-9]</sup>。

课题组与国内某公司合作, 利用液态模锻技术制备了 6061 铝合金重载卡车轮毂, 但是由于受液态模锻技术成型特点所限, 所制备的轮毂各个部位的力学性能不尽相同。本文对轮毂不同部位性能差异的原因进行了分析, 同时利用 Abaqus 软件进行仿真模拟, 分析了该轮毂的静态承载能力, 为后续该轮毂的结构改进及性能提高提供理论指导。

## 1 试验材料及方法

试验所用材料为 6061 铝合金, 合金的成分列于表 1。利用液态模锻机制备铝合金车轮, 车轮的形状见图 1。利用线切割对车轮进行取样, 取样部位见图 2。利用 SX2-8-10 箱式热处理炉, 对试样进行热处理。利用 WE-30 型万能拉伸试验机进行抗拉性能测试, 试样尺寸见图 3。利用 AXiover 40MAT 倒置金相显微镜, 对试样进行微观组织观察。利用 Abaqus 软件, 对轮毂静态承载能力进行仿真模拟。

**收稿日期:** 2023-03-06

**基金项目:** 山东省自然科学基金项目(ZR2020ME109); 山东交通学院攀登计划重点科研创新团队项目(sdjtc18005)

**作者简介:** 叶晓, 硕士研究生, 研究方向为铝合金成型仿真, E-mail: 1484221381@qq.com。

**通信作者:** 孙跃军, 博士, 教授, 研究方向为铝合金强化机理及其应用, E-mail: sunyuejun0001@163.com。

表1 6061铝合金的化学成分

元素	Si	Mg	Cu	Mn	Cr	Zn	Ti	Fe
含量 w/%	0.5	0.8	0.35	0.15	0.15	0.25	0.15	0.7



图1 液态模锻铝合金轮毂

Figure 1 Liquid forged aluminum alloy hub

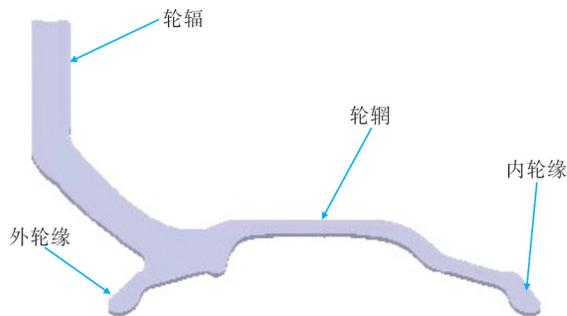


图2 轮毂取样部位示意图

Figure 2 Schematic diagram of sampling position of hub

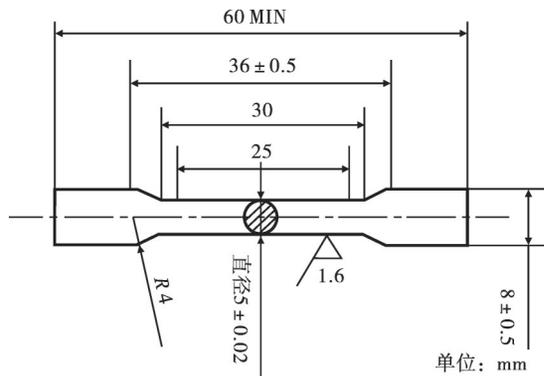


图3 拉伸试样尺寸图

Figure 3 Dimension of tensile specimen

## 2 结果与分析

### 2.1 液态模锻铝合金轮毂的制备

液态模锻铝合金轮毂制备工艺为合金熔炼—模

具预热—浇注—加压—保压—成型—取件—水淬等,具体制备工艺参数列于表2。铝合金轮毂的热处理工艺参数列于表3。铝合金轮毂的力学性能列于表4。由表4可知:经过固溶和时效处理后,轮毂不同部位的力学性能差异较大,其中外轮缘部位的综合力学性能最高,抗拉强度达到375 MPa、屈服强度达到345 MPa、延伸率达到17.7%;内轮缘部位的综合力学性能次之,抗拉强度为365 MPa、屈服强度为337 MPa、延伸率为14.3%;轮辐部位的抗拉强度为353 MPa,但是其屈服强度未发生明显的降低,与内轮缘部位相近;轮辋部位的综合力学性能最低,抗拉强度为343 MPa、屈服强度为317 MPa、延伸率为10.3%。

表2 铝合金轮毂的制备工艺

浇注温度/°C	上模温度/°C	下模温度/°C	比压/MPa	挤压速度/(mm·s <sup>-1</sup> )	保压时间/s
720	200	350	120	25	35

表3 轮毂合金的热处理工艺

固溶温度/°C	固溶时间/h	时效温度/°C	时效时间/h
560	5	185	3

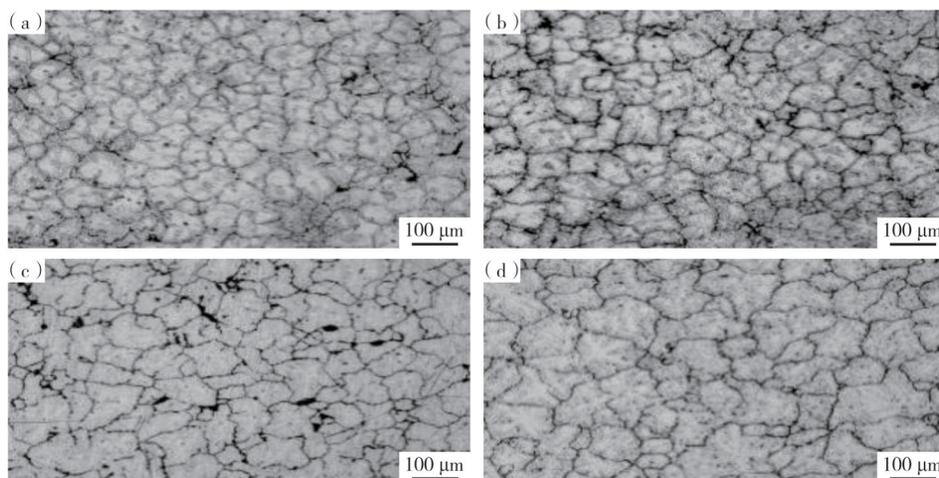
表4 铝合金轮毂不同部位的拉伸性能

检测部位	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	延伸率/%
外轮缘	375	345	17.7
内轮缘	365	337	14.3
轮辐	353	340	11.2
轮辋	343	317	10.3

图4为经过热处理后铝合金轮毂不同部位的微观组织。从图4可以看出,轮毂不同部位的晶粒大小不同,外轮缘处的晶粒较为细小,轮辋处的晶粒较为粗大。

为了更为清晰地比较不同部位的晶粒大小,采用截点法测量不同部位的平均晶粒度。图5为粒度测量示意图,测量结果列于表5。由表5可以看出:外轮缘部位的平均晶粒度为5.032,属于细晶级别;轮辐及轮辋部位的晶粒度分别为4.432和4.350,属于粗晶级别。说明,轮毂在凝固成型时不同部位金属结晶条件差异较大。

液态模锻过程中,糊状区内的枝晶受到流动金属的剪切作用而发生破断,破断后的枝晶又可以成为新的形核质点,进而细化合金晶粒<sup>[8]</sup>。根据Hall-



(a)—外轮缘;(b)—内轮缘;(c)—轮辐;(d)—轮辋。  
(a)—outer rim;(b)—inner rim;(c)—spoke;(d)—rim.

图4 轮毂不同部位的微观组织

Figure 4 Microstructure of different positions of the hub

参数	测量线段(或网格)长度	晶粒截距的平均值	测量网格上的截点数	平均晶粒度级别数
视场1	5 270.849	62.748	84	4.701

视场1

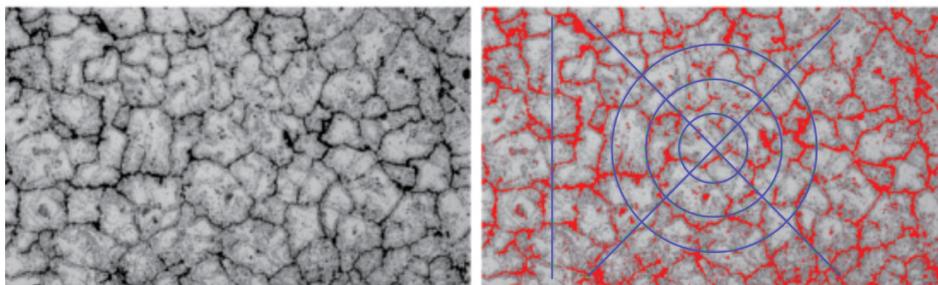


图5 截点法晶粒度测量图示

Figure 5 Diagram of grain size measurement by cutoff method

表5 不同部位微观组织的晶粒度  
Table 5 Grain size in different parts

试样部位	晶粒截距/ $\mu\text{m}$	截距平均值/ $\mu\text{m}$	晶粒度级别数	级别数平均值
外轮缘	51.675	56.220	5.261	5.032
	52.708		5.204	
	64.279		4.631	
内轮缘	62.748	64.403	4.701	4.630
	62.01		4.735	
	68.453		4.45	
轮辐	66.72	69.29	4.523	4.432
	79.861		4.005	
	61.289		4.768	
轮辋	76.389	70.957	4.133	4.350
	64.279		4.631	
	72.203		4.296	

Petch公式可知,晶粒越小合金的强度越高。轮毂成型时,晶粒的大小要受到比压、加压速率及冷却条件的影响。由于外轮缘尺寸较小,铝合金蓄热较少,该部位可以进行水冷,同时受到较大的比压,金属流动速度快,因此晶粒较为细小,合金强度较高;内轮缘尺寸同样较小,但该部位成型时受到的比压较小,因此晶粒相对较大,合金强度有所降低;轮辐是轮毂尺寸最大、最厚的部位,轮毂成型时该部位受到较大的比压和较强的冷却,但是该处铝合金蓄热量大,凝固冷却时过冷度较小,因此晶粒较为粗大,合金强度相对较低;轮辋处成型时,由于无法进行水冷,仅靠金属流动的剪切作用细化晶粒,因此该处的晶粒最为粗大,合金强度也最低。

## 2.2 轮毂的静态承载能力仿真分析

仿真技术在汽车零部件制造过程中应用广泛<sup>[10]</sup>,为了评价所制备的6061铝合金轮毂的静态承载能力,利用Abaqus软件进行仿真分析。

### 2.2.1 仿真模型的建立

图6为液态模锻6061轮毂的仿真模型。建立模型时,采用轮毂与地面接触,中间加载模式。



图6 轮毂静载仿真模型

Figure 6 Hub static load simulation model

有限元网格划分时,结构性网格模型的网格仅适用于相对规则图形<sup>[11]</sup>,所以本文采用非结构性网

$$\begin{pmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{33} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \\ \gamma_{23} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1/E & -\mu/E & -\mu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\mu/E & 1/E & -\mu/E & 0 & 0 & 0 \\ -\mu/E & -\mu/E & 1/E & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/G \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{13} \\ \sigma_{23} \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, $\epsilon$ 为线应变、 $\gamma$ 为角应变、 $\mu$ 为泊松比、 $E$ 为杨氏模量、 $G$ 为剪切模量、 $\sigma$ 为应力。

根据换算关系公式 $G = E/2(1 + \mu)$ ,计算轮毂切变模量。本文设置6061铝合金的杨氏模量为69 GPa、泊松比为0.33。

格对轮毂进行划分。由于非结构性网格各个节点处相邻的网格单元数目不同,对于计算结果重要的轮毂位置或复杂区域,网格划分应更加细致合理<sup>[12]</sup>。本文选用C3D4单元,其优点是模型覆盖密度大,模型单元划分细致。图7为C3D4单元示意图,图8为C3D4单元所划分的轮毂模型网格。

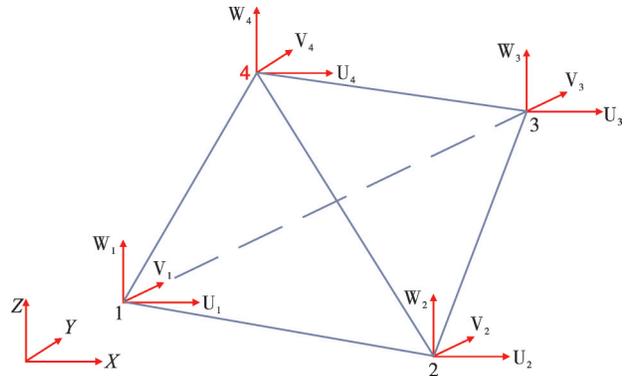


图7 C3D4单元示意图

Figure 7 Schematic diagram of C3D4 unit

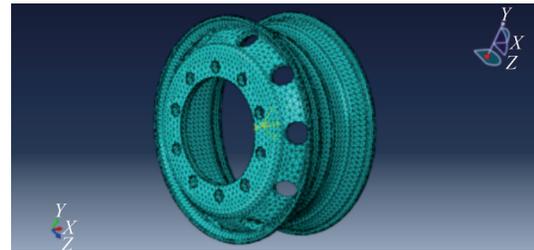


图8 轮毂模型网格

Figure 8 Hub model grid

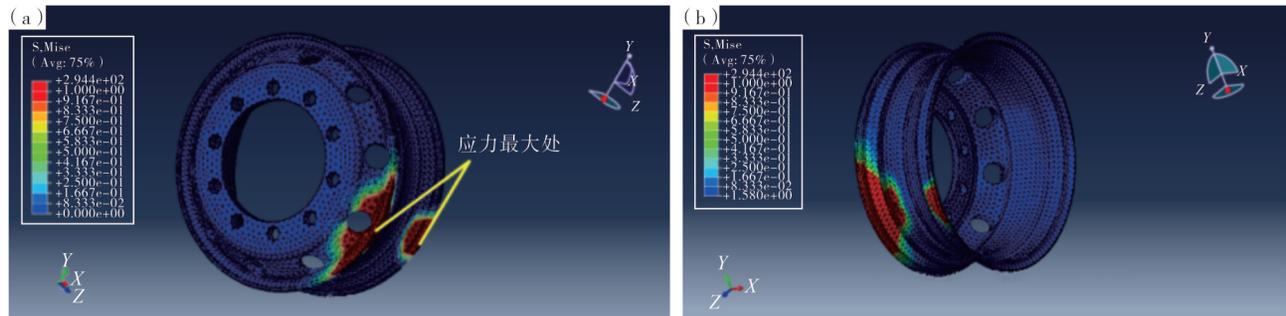
6061铝合金轮毂模型满足均匀性、小变形、各向同性及连续性假设。根据金属的各向同性表现特征,使用Isotropic材料本构,即通过柔度矩阵建立应变与应力之间的对应关系(见式1)。

### 2.2.2 轮毂承载能力仿真结果

按照重载卡车的设计要求,卡车的车轮数为10个,卡车承载要求55 t,将承载载荷平均分布到每个轮毂,轮毂承载时的受力应力云图如图9所示。从图9可见:轮毂受力最大处为外轮缘和内轮

缘,外轮缘最大受力为294 MPa,内轮缘最大受力为290 MPa;轮辐和轮辋的受力相对较小,轮辐部位最大受力为185 MPa,轮辋部位受力最大为238 MPa。根据轮毂设计要求,其安全系数为1.15。因此,静载时外轮缘最大承载338 MPa、内轮缘最大承载为333 MPa、轮辐部位最大承载为212 MPa、轮辋部位

最大承载为273 MPa。由此可以评定,液态模锻6061铝合金轮毂在承受55 t静载时,各部位的力学性能均达到设计要求。同时,轮辐部位的力学性能远超设计承载能力,还可以从结构上继续优化,减轻重量。



(a)—正面;(b)—侧面。

(a)—front view;(b)—side view.

图9 轮毂应力云图

Figure 9 Hub stress cloud chart

### 3 结论

(1)利用液态模锻制备6061铝合金轮毂,其不同部位的力学性能差异较大。外轮缘的性能最好,其抗拉强度为375 MPa、屈服强度为345 MPa。轮辋的性能最差,其抗拉强度为343 MPa、屈服强度为317 MPa。

(2)轮毂不同部位的性能差异,主要是由晶粒度所致。外轮缘处的晶粒最细小,晶粒度达到5.032;轮辋处的晶粒最粗大,晶粒度为4.350。

(3)Abaqus仿真结果表明,静载条件下所制备的轮毂性能达到了设计使用的要求。

### 参考文献:

- [1] 苗莉莉,王长顺,张新,等. 液态模锻复合成形技术研究进展和发展趋势[J]. 铸造技术,2015,36(4):989-991
- [2] HUANG Xina, ZHONG Zhiping, WANG Wei, et al. A review of liquid forging process, advanced materials research [J]. 2013, 690-693;2275-2279
- [3] 邢书明,邢若兰. 液态模锻(挤压铸造)技术研究与应用进展[J]. 常州大学学报(自然科学版),2021,33(5):1-7.
- [4] 黄正华,张银帅,宋东福,等. 压铸铝合金的应用及研究进展[J]. 材料研究与应用,2017,11(1):1-5.
- [5] MAISONNETTE D, SUERY M, NELIAS D. Effects

of heat treatments on the microstructure and mechanical properties of a 6061 aluminium alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2011, 528:2718-2724

- [6] 杨莉,陆冠华,康跃华,等. 时效工艺对Al-Mg-Si合金导线抗拉强度和导电率的影响[J]. 材料研究与应用,2018,12(1):32-35.
- [7] 袁晓光,孟凡博,林雪健,等. 液态模锻6061铝合金轮毂组织及性能[J]. 沈阳工业大学学报,2020,42(5):504-508.
- [8] KIM Y H, RYOU T K, CHOI H J, et al. An analysis of the forging processes for 6061 aluminum-alloy wheels [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 123:270-276.
- [9] TOCCI M, PLOA A, LA VECCHIA G M, et al. Characterization of a new aluminium alloy for the production of wheels by Hybrid aluminium forging [J]. Procedia Engineering, 2015, 109:303-311.
- [10] 秦新宇,朱锐祥. 汽车壳体零件压铸工艺的优化设计[J]. 材料研究与应用,2018,12(4):297-302.
- [11] YANG H T Y, SAIGAL S, MASUD A, et al. A survey of recent shell finite elements [J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2000, 47:1-3.
- [12] 单菊林. 自适应有限元网格生成算法研究与应用[D]. 大连:大连理工大学,2007.

## Mechanical Properties of Liquid Forging 6061 Aluminum Alloy Wheel Hub and Abaqus Simulation Analysis of Its Static Load-Bearing Capacity

YE Xiao<sup>1</sup>, SUN Yuejun<sup>1\*</sup>, LIU Jie<sup>2</sup>, XUE Minghu<sup>3</sup>, ZHONG Li<sup>1</sup>, YAN Hai<sup>1</sup>, WU Chengge<sup>1</sup>

(1. College of Construction Machinery, Shandong Jiaotong University, Ji'nan 250357, China; 2. Tianjin Nanuo Machinery Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300457, China; 3. Jiangsu Jiaming Carbon New Materials Co., Ltd., Lianyungang 222300, China)

**Abstract:** 6061 aluminum alloy wheel hub was prepared by liquid die forging, and the mechanical properties of different parts of the wheel hub after heat treatment were tested. Abaqus simulations were also used to analyze the static load bearing capacity of the wheel hub. The results show that the mechanical properties of different parts of the wheel hub are different. The highest performance position is the outer rim, where the tensile strength reaches 375 MPa and the yield strength is 345 MPa. The rim has the lowest performance, where the tensile strength is 343 MPa and the yield strength is 317 MPa. The performance difference of different parts of the hub is mainly due to the grain size. The grain size at the outer rim is the finest, reaching 5.032, while that at the rim is 4.350. Abaqus simulation results show that the performance of the prepared hub meets the design requirements under static load.

**Keywords:** liquid die forging; 6061 aluminum alloy; hub; static bearing; Abaqus simulation

(学术编辑:褚欣)