

半固态流变压铸铝合金主轴承盖

任俊成<sup>1</sup> 陈 颂<sup>2</sup> 李 涛<sup>1</sup> 王泽忠<sup>1</sup> 唐元媛<sup>1</sup> 李大全<sup>2</sup> 梁小康<sup>3</sup> 李欣<sup>1</sup>

(1.东风汽车集团有限公司技术中心; 2.有研工程技术研究院有限公司; 3.爱柯迪股份有限公司)

**摘 要** 某发动机主轴承盖采用半固态铝合金流变压铸工艺制造,相比原 QT500-7 球墨铸铁件减重 45%,轻量化效果显著,零件性能满足设计要求。根据半固态铝合金 319S 的材料性能和半固态压铸工艺特点,对主轴承盖进行了结构重新设计和工艺仿真优化,采用三级固溶热处理,得到的零件组织细密,力学性能高,内部无气孔、缩松等缺陷。零件通过 10<sup>7</sup> 次单体台架疲劳试验验证,具有良好的应用前景。

**关键词** 半固态流变压铸;主轴承盖;铝合金;轻量化  
**中图分类号** TG2149.2;TG146.21 **文献标志码** A  
**DOI**:10.15980/j.tzzz.2022.07.026

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Semi-solid Die Casting for Aluminum Alloy Main Bearing Cap

Ren Juncheng<sup>1</sup>, Chen Song<sup>2</sup>, Li Tao<sup>1</sup>, Wang Zezhong<sup>1</sup>, Tang Yuanyuan<sup>1</sup>, Li Daquan<sup>2</sup>,  
Liang Xiaokang<sup>3</sup>, Li Xin<sup>1</sup>

(1.Dongfeng Motor Coporation Technical Center; 2.GRIMAT Engineering Institute Co., Ltd.;  
3.IKD Co., Ltd.)

**Abstract:** Aluminum alloy main bearing cap of engine block was produced by semi-solid rheological die casting. Compared with QT500-7 products, weight is reduced by 45%, presenting the remarkable lightweight effect, and the performance of the parts meets the design requirements. The main bearing cap was redesigned and optimized according to the properties of the semi-solid aluminum alloy 319S and the characteristics of the SSM. After the three-stage heat treatment, the metallographic structure is fine with high mechanical properties and absence of defects such as gas hole and shrinkage porosity. The aluminum alloy parts have passed 10 million single-frame fatigue tests, showing good application prospects.

**Key Words:** Semi-solid Die Casting, Main Bearing Cap, Aluminum Alloy, Lightweight

铝合金已在缸体、缸盖、正时链轮壳、凸轮轴支座等壳体、支座类零件上使用。主轴承盖是发动机中的重要零件,通过螺栓将曲轴安装在龙门式缸体上,对曲轴起导向与固定作用,需要承担燃烧室爆发产生的压力和曲轴运动产生的往复惯性力,对强度和刚度要求较高,一般的铝合金铸件难以满足零件要求。半固态流变压铸技术,结合了半固态铸造和传统压铸的特点,生产效率高、尺寸精度高、力学性能优良,可有效控制铸件内部缩孔、气孔缺陷,并可经过热处理提高强度<sup>[1~3]</sup>,已部分应用于汽车行业,但半固态铝合金发动机主轴承盖的开发在国内尚未见报道。

1 铝合金主轴承盖零件结构设计优化

选用高固相半固态流变压铸工艺制造主轴承盖,半

固态浆料固相率约为 45%。主轴承盖原型为某三缸涡轮增压发动机,材质为 QT500-7 球墨铸铁,单件质量为 289 g,每台发动机搭载 4 件,改为半固态铝合金铸件后,采用了 Al-Si-(Cu)-Mg 系 319S 半固态铝合金,并通过固溶和时效处理以提高性能。合金化学成分见表 1。

表 1 319S 铝合金的化学成分

| Tab.1 Chemical composition of 319S aluminum alloy |      | %              |      |       |      |      |      |       |       |    |    |
|---------------------------------------------------|------|----------------|------|-------|------|------|------|-------|-------|----|----|
|                                                   |      | w <sub>B</sub> |      |       |      |      |      |       |       |    |    |
|                                                   |      | Si             | Fe   | Cu    | Mg   | Ni   | Zn   | Pb+Sn | Ti    | Sr | Al |
| 标准                                                | 5.5~ | ≤              | 2.5~ | 0.30~ | ≤    | ≤    | ≤    | ≤     | 0.01~ |    |    |
| 值 <sup>[3]</sup>                                  | 6.5  | 0.15           | 3.5  | 0.40  | 0.03 | 0.05 | 0.03 | 0.20  | 0.05  | 余量 |    |
| 实测值                                               | 6.48 | 0.14           | 3.2  | 0.37  | 0.01 | 0.01 | 0.01 | 0.003 | 0.02  | 余量 |    |

结合 319S 半固态铝合金的性能典型值<sup>[3,4]</sup>,要求抗拉强度≥390 MPa,屈服强度≥305 MPa,疲劳强度≥164 MPa。由于 319S 的弹性模量、拉伸性能、疲劳性能都低于原球墨铸铁,需开展相关结构强度与刚度的

收稿日期:2021-09-20;修改稿收到日期:2022-01-08

第一作者简介:任俊成,男,1986 年出生,高级工程师,武汉(430058),E-mail:renjc@dfmc.com.cn

引用格式:任俊成,陈颂,李涛,等. 半固态流变压铸铝合金主轴承盖[J]. 特种铸造及有色合金,2022,42(7):917-920.  
REN J C, CHEN S, LI T, et al. Semi-solid die casting for aluminum alloy main bearing cap[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(7):917-920.

优化设计, 以使其性能指标满足要求。

对半固态铝合金主轴承盖开展结构强度仿真分析, 主要包括静强度分析、疲劳安全系数、接触压力、相对/绝对滑移量分析等。根据分析结果中的薄弱点不断优化零件结构, 零件结构优化过程见图 1。

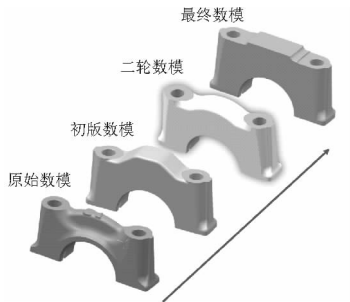


图 1 半固态铝合金主轴承盖设计优化过程  
Fig.1 The optimized design process of semi-solid aluminum alloy main bearing cap

通过扩大排气侧的加强筋, 并在进气侧增加加强筋, 解决了铝合金主轴承盖静强度不足的问题, 结构特征见图 2。增高主轴承盖的螺栓孔周围的实体, 增高量为 5 mm, 使铝合金主轴承盖相对滑移量达到设计要求。将两螺栓孔之间填满实体, 见图 3, 以提高零件刚度及疲劳性能, 同时保证充型过程中浆料平稳顺序地由厚壁充型至薄壁区域, 增强凝固时的高压补缩效果。

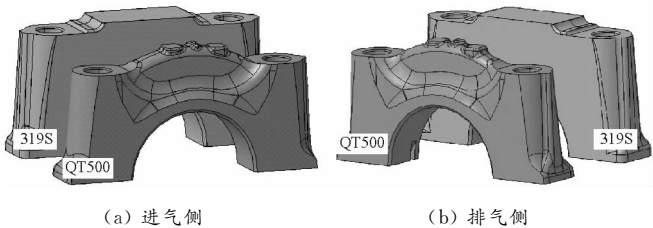


图 2 QT500 主轴承盖和 319S 主轴承盖的结构对比  
Fig.2 Structure comparison of QT500 and 319S main bearing cap

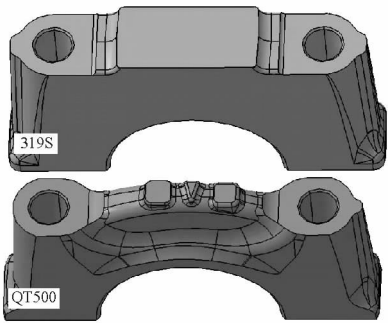


图 3 319S 铝合金主轴承盖与 QT500 铸铁主轴承盖  
Fig.3 319S alloy main bearing cap and QT500 main bearing cap

对优化后的最终数模采用 ABAQUS 软件进行静强度、接触压力、绝对滑移与相对滑移仿真计算。采用

FEMFAT 软件 MAX 模块进行疲劳安全系数仿真计算, 结果见表 2, 发现均满足设计要求。其中, 静强度应力最大值小于材料屈服强度 (见图 4), 疲劳安全系数大于 1.1 (见图 5), 滑移量小于限值。

表 2 319S 铝合金主轴承盖结构分析结果  
Tab.2 Structure analysis results of 319S aluminum alloy main bearing cap

| 分析项目   | 分析结果               | 设计要求                 |
|--------|--------------------|----------------------|
| 静强度    | 最大应力为 260.1 MPa    | 小于材料屈服强度 305 MPa     |
| 疲劳安全系数 | $\geq 1.14$        | 大于 1.1               |
| 接触压力   | 250 MPa            | 小于缸体材料限值 290 MPa     |
| 绝对滑移   | 5.84 $\mu\text{m}$ | 小于 100 $\mu\text{m}$ |
| 相对滑移   | 6.18 $\mu\text{m}$ | 小于 10 $\mu\text{m}$  |

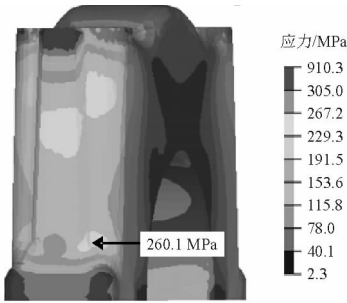


图 4 主轴承盖静强度分析最大应力值  
Fig.4 Maximum stress value of static strength analysis of main bearing cap

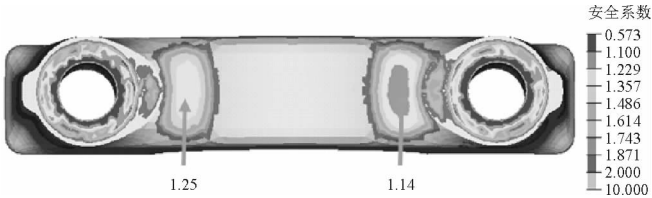


图 5 主轴承盖疲劳安全系数(最薄弱处)  
Fig.5 Fatigue safety coefficient of main bearing cap

## 2 主轴承盖铸造工艺仿真分析及优化

为保证半固态压铸件顺利成形, 需要综合考虑半固态金属充型、凝固和脱模等问题。半固态浆料流动特性和凝固特性与常规压铸浆料不同, 具有剪切变稀的特性。为获得良好的半固态压铸件, 充型过程中浆料前沿应保持平稳顺序充型, 浆料内部应为层流充型, 凝固过程中应保证良好补缩, 避免出现热节。

对铸件开展铸造工艺 CAE 仿真分析。铸件为一模两件, 模具材料为 H13 钢, 铸件材质设置为自定义数据库的半固态 319S 合金, 主要物理性质包括密度、热膨胀系数、固相率、粘度等, 均是温度变化的函数。主要模拟参数见表 3。

针对半固态铝合金浆料充型温度区间较窄、充型温度较低的特点, 浇口位置应选取在铸件的中心位置, 以

表 3 半固态主轴承盖铸造 CAE 模拟参数  
Tab.3 Simulated parameters of semi-solid main bearing cap by CAE

| 浆料初始<br>温度/℃ | 模具温<br>度/℃ | 模具<br>材质 | 铸件<br>材质 | 冲头直<br>径/mm | 模具与铸件传热系<br>数/(W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> ) |
|--------------|------------|----------|----------|-------------|-----------------------------------------------------|
| 580~582      | 240~260    | H13      | 319S     | φ94         | 3 000                                               |

避免充型过程中浆料流动距离过长造成冷隔、浇不足等缺陷,有利于实现半固态压铸平稳充型。铸件中心位置

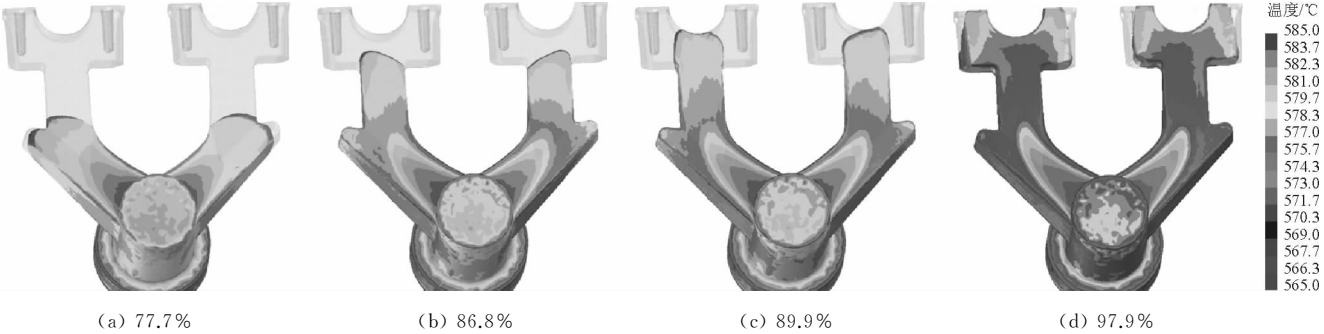


图 6 充型仿真结果  
Fig.6 Filling simulation results

固态浆料的流速,保证浆料进入内浇口时前沿为平面。  
经结构优化及浇注系统优化设计,保证该零件在半固态压铸充型之后实现顺序凝固,即最后充型位置、零件、浇注系统依次凝固,有利于实现充型之后的高压补缩,提高铝铸件致密度,消除缩孔、疏松缺陷,温度场分布仿真结果见图 7。

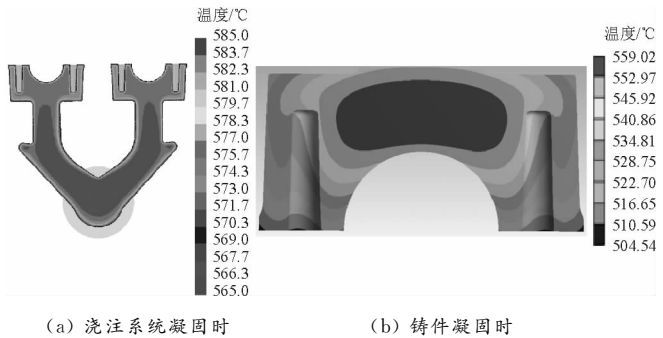


图 7 温度场分布结果  
Fig.7 Temperature field distribution

3 铝合金主轴承盖铸件试制

319S 铝合金浆料通过旋转热焓平衡法(SEED 法)制备,通过调整金属熔体的浇注温度、金属坩埚旋转速度和旋转时间等制备固相率约 45% 的半固态坯料。产品在 BUHLER 840T 压铸机上试制,模具材质为 H13 钢。铸件要求无裂纹、浇不足、疏松、气泡和任何穿透性缺陷,热处理后不允许出现过烧组织。

结合铸造工艺 CAE 模拟和现场压铸试验,优化工艺参数:慢压射速度为 0.15~0.25 m/s,快压射速度为 0.3~0.5 m/s,开始压力为 24~36 MPa,建压时间为

的壁厚要和内浇口配合,保证补缩通道连续性。铝合金主轴承盖的内浇口开设在顶部中心位置,壁厚在装配空间允许范围内增至最大。

主轴承盖充型仿真结果见图 6,可见充型前沿的半固态铝熔体保持了“层流”流动,避免了湍流,平稳均匀地充满型腔,最后充型的位置设置渣包及时排渣。在横浇道中部拐弯处设计一处角状缓冲区,以改变浇道中半

0.02 s,工作压力为 90~105 MPa,保压时间为 30 s。试制样件见图 8,主轴承盖毛坯质量为 180 g,机加后成品质量为 159 g,相比原铸铁件减重 45%。

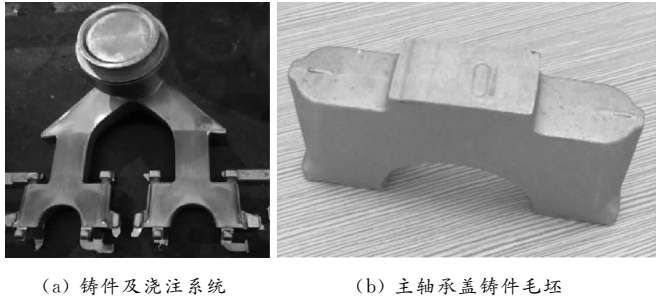


图 8 主轴承盖试制样件  
Fig.8 Trial-produced main bearing cap

采取三级固溶处理,结合有关研究<sup>[4]</sup>,选择(470℃×4 h)+(500℃×160 min)+(510℃×160 min)的三级固溶处理,然后自然时效 12 h,人工时效 170℃×10 h 的热处理方案。由于 319S 铝合金在高温固溶时,可能因工艺不当或炉温控制精度不够,在晶界处出现过烧孔洞类缺陷,所以在热处理过程中应严格按照热处理工艺参数执行。

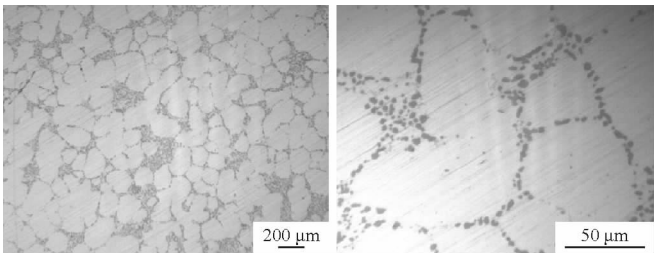
4 铝合金主轴承盖铸件品质检测

从主轴承盖毛坯上取样进行拉伸性能试验,结果见表 4。从主轴承盖上取样,热处理后金相组织见图 9,可以看出,α-Al 相呈球状,变质正常,分布均匀,通过截线法计算晶粒大小为 109.8 μm。共晶 Si 颗粒较为圆整,并均匀分布在初生 α-Al 晶界处,无针状或大块 Si 颗粒;平均 Si 颗粒尺寸小于 8.0 μm,最大 Si 颗粒尺寸小

于 10.0 μm。

表 4 铸件取样拉伸力学性能

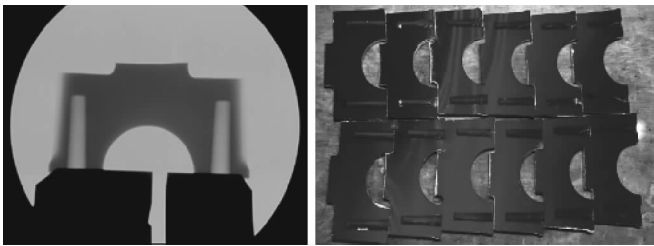
| Tab.4 Mechanical properties of the main bearing cap |          |          |       |
|-----------------------------------------------------|----------|----------|-------|
| 指标                                                  | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 伸长率/% |
| 要求                                                  | ≥360     | ≥305     | ≥5    |
| 实测                                                  | 414      | 372      | 5.5   |



(a) 低倍 (b) 高倍

图 9 半固态铝合金主轴承盖热处理后的金相组织  
Fig.9 Microstructure of semi-solid aluminum alloy main bearing cap after heat treatment

对铸件进行 X 光探伤和荧光探伤检验,结果显示铸件无气孔、缩松等缺陷,符合要求,见图 10。



(a) X 光探伤 (b) 荧光探伤

图 10 铸件 X 光探伤和荧光探伤结果

Fig.10 X-ray detection and fluorescent inspection

5 铝合金主轴承盖台架试验

参考 JB/T 13203<sup>[5]</sup>,对半固态铝合金主轴承盖进行台架试验验证,试验在六路液压油加载管路试验台上运行,设计试验工装示意图见 11。将主轴承盖、螺栓、定位环和主轴承瓦按实际工况装配在缸体上,并通过模拟活塞、连杆及曲轴与试验台装配。

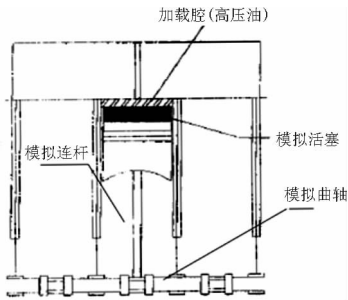


图 11 铝合金主轴承盖台架试验

Fig.11 Testing of aluminum alloy main bearing cap

试验循环次数基数为 10<sup>7</sup> 次,失效判据为样件在试

验载荷作用下明显破坏,如产生局部断裂或有裂纹产生。加载顺序为 1-2-3 缸顺序加载,加载相位间隔 120°,加载波形为正弦波,加载频率为 10 Hz,加载幅值为 1.5 倍缸压,即 15.75 MPa,加载压力峰值为(15.75±0.1) MPa,加载压力谷值不大于 0.63 MPa。载荷最终作用到主轴承座轴瓦面上,通过对连杆等贴应变片测量确认载荷传递是否有损失。经测量,连杆应力为 78.8 MPa,判断液压加载腔内脉动载荷基本无损失地传递到模拟加载轴,最终加载至主轴承盖。完成 10<sup>7</sup> 次加载后,主轴承盖外观完好,无可见裂纹、破损或变形,通过验证。

6 结 语

发动机主轴承盖生产工艺由球墨铸铁砂型铸造工艺改为半固态铝合金流变压铸工艺,结合结构和工艺优化,铸件质量为 159 g,相比铸铁件减重 45%,单台发动机减重 520 g,轻量化效果显著。

对主轴承盖进行了重新设计以满足零件各项性能指标要求,对浇道结构、浇口位置及尺寸等开展了设计优化,经过三级固溶、自然时效、人工时效热处理,得到的零件金相组织致密,力学性能好,内部无气孔、缩松等缺陷。

参 考 文 献

[1] 卢宏兴.铝硅合金半固态压铸成形产品缺陷的形成机理及控制研究[D].北京:北京有色金属研究总院,2017.  
[2] SHAHROOZ N, REZA G. Semi-solid Processing of Aluminum Alloys[M]. Switzerland: Springer International Publishing, 2016.  
[3] NADCA. Product Specification Standards for Die Castings Produced by the Semi-solid and Squeeze Process[M]. Wheeling, Illinois, USA:North American Die Casting Association, 2009.  
[4] 杜康.半固态铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金热处理工艺及强化机理研究[D].北京:北京有色金属研究总院,2017.  
[5] JB/T 13203-2017.柴油机气缸体疲劳试验方法[S].

(编辑:张正贺)

欢迎使用在线稿件处理系统

投稿、查稿、审稿

敬请登录 [www.special-cast.com](http://www.special-cast.com)