

铝合金发动机悬置支架挤压铸造工艺研究

陈云¹, 李杰¹, 罗继相¹, 杜娟², 夏望红³

(1. 武汉理工大学物流工程学院, 湖北武汉 430063; 2. 武汉交通职业学院, 湖北武汉 430065;
3. 广州金邦液态模锻技术有限公司, 广东广州 511300)

摘要: 发动机悬置支架是汽车悬置系统中重要的承力结构件, 通常采用球墨铸铁砂型铸造。为使汽车轻量化, 根据其结构和使用性能要求等特点, 研究了挤压铸造生产铝合金发动机悬置支架的工艺过程。结果表明, 当挤压比压为100 MPa, 挤压速度采用分段调速, 即第一段冲头速度设置为180 mm/s, 第二段冲头速度设置为80 mm/s, 第三段冲头速度设置为50 mm/s, 且浇注温度为700 ℃, 模具温度约为200 ℃, 保压时间约为75 s时, 被挤压铸造生产的铝合金发动机悬置支架其各项性能指标均能达到设计要求。

关键词: 发动机悬置支架; 挤压铸造; 模具设计

发动机悬置支架是汽车悬置系统中重要的零部件, 是发动机与车身间的连接件, 它不仅支撑发动机的重量, 而且传递作用于发动机的力和力矩, 因此, 悬置支架需要足够的强度、刚度和使用寿命^[1-2]。目前, 发动机悬置支架大多采用球墨铸铁砂型铸造。在汽车轻量化背景下, 能否在满足悬置支架力学性能要求的前提下, 采用重量更轻的铝合金来代替球墨铸铁生产悬置支架是本文研究的主要目的。挤压铸造是以较低的充填速度充型, 使金属液在高压下凝固获得可固溶时效处理的高致密度铸件, 是一种具有广泛应用前景的先进成形技术^[3]。本文主要针对铝合金发动机悬置支架的挤压铸造工艺及模具设计展开研究。

1 零件的结构特点及模具结构原理

1.1 零件的结构特点

发动机悬置支架作为汽车悬置系统中重要的承力结构件, 原产品采用砂型铸造球墨铸铁件, 重量达8.57 kg。根据该零件的结构特点和受力情况, 对原始铸件的部分结构进行优化, 以方便挤压铸造工艺的生产 and 后续机械加工、装配等要求。零件主要优化部分如图1所示, 图1中a所示部分需进行切除以利于抽芯, b与c所示部分需适当减小壁厚以利于脱模, 零件整体起模斜度控制在1°~2°。优化后的发动机悬置支架外形总体尺寸为189 mm×161 mm×331 mm, 平均壁厚为19 mm, 零件重为3.18 kg, 相比原来球墨铸铁件减重约62.9%。零件在多个方向存在通孔, 需采用侧向抽芯机构完成抽芯。优化后的发动机悬置支架零件图如图2所示。该零件热处理后本体取样的力学性能要求: 硬度(HB)≥100, 抗拉强度≥310 MPa, 屈服强度≥250 MPa, 断后伸长率≥8%, 且零件内部无气孔、缩孔、缩松、夹渣等缺陷。试验材料为铝合金A356.2, 合金成分见表1。

1.2 挤压工艺及模具结构

根据发动机悬置支架的结构特点, 采用间接式挤压铸造工艺开发该零件。图3为发动机悬置支架的挤压铸造工艺方案。考虑零件平均壁厚较厚, 且内部质量要求较高, 设计中采用一模一件, 且将浇道直接开设在铸件端部厚壁处, 便于保压补缩。

作者简介:

陈云(1981-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为有色金属挤压铸造工艺。
E-mail: chenynhbwh@whut.edu.cn

中图分类号: TG249.2⁺8
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2020)02-0167-07

收稿日期:

2019-08-29 收到初稿,
2019-10-28 收到修订稿。

试验中选用的铸造设备为日本宇部HVSC800PL卧式挤压铸造机，压射冲头直径为125 mm。模具结构见图4。模具的工作过程为：将熔炼好的铝合金液浇入压室中，压射冲头自下而上推动金属液经浇道进入模具型腔，充型完成后铸件在高压下凝固成形，并保压一段时间；保压完成后，两个侧抽芯油缸完成侧向抽芯，动模后移到指定位置，由推出机构将铸件从动模型腔中推出；取出铸件，喷刷涂剂便可进入下一个工作循环。

2 数值模拟

为了优化模具结构及减少试模次数，对悬置支架挤压铸造充型与凝固过程进行数值模拟^[4]。模拟中设定铸件材料为A356，模具材料为SKD61，浇注温度为700 ℃，

模具温度为200 ℃，空气与支架、空气与模具的传热系数均设置为 $41.87 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。支架与模具的传热系数设置为与合金温度相关的变量，其中合金处于固相线温度时界面传热系数设置为 $3\,000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ，合金处于液相线温度时界面传热系数设置为 $7000 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ 。挤压速度设置为分段调速，即从料饼到浇道中部为第一段，冲头速度设置为180 mm/s；浇道中部到铸件中部为第二段，冲头速度设置为80 mm/s；铸件后半部为第三段，冲头速度设置为50 mm/s。

2.1 充型过程模拟

铸件充型模拟过程如图5所示，完成整个充型过程所需时间为2.64 s。第一阶段金属液快速充满压室和料柄，在0.825 s时进入内浇道，由于在浇道中部与铸件中

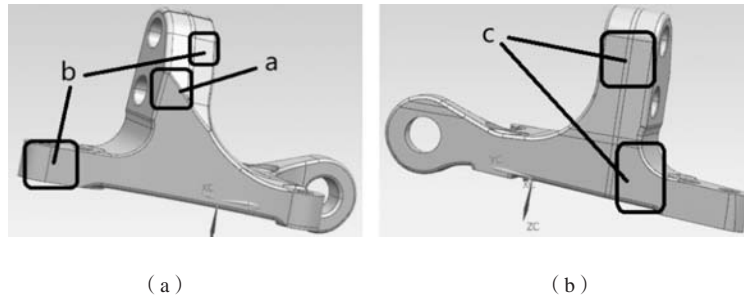


图1 砂型铸造发动机悬置支架结构及挤压铸造需要优化的部位

Fig. 1 Structure of engine mounting bracket for sand casting and several locations needing to improve for squeezing casting

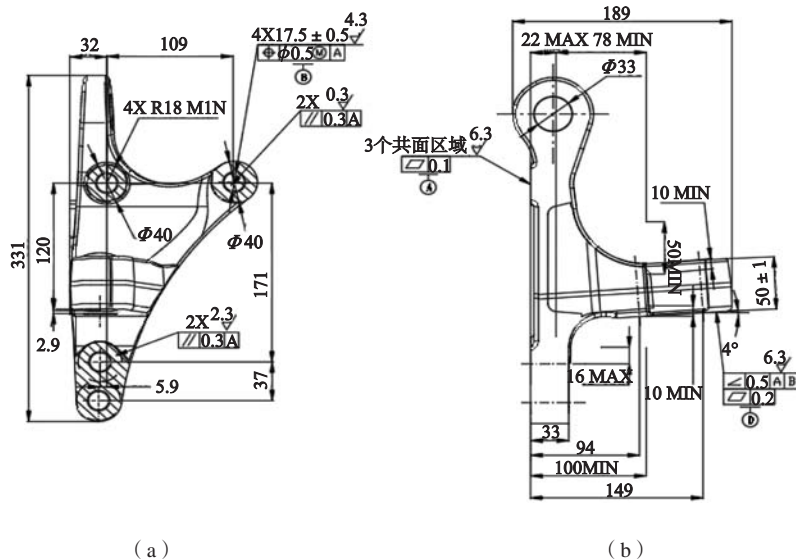


图2 优化后的发动机悬置支架零件图

Fig. 2 Structure drawing of improved engine mounting bracket for squeezing casting

表1 铝合金A356.2的化学成分

Table 1 Chemical composition of A356.2 alloy

项目	Si	Mg	Ti	Fe	Zn	Sr	Al
标准成分	6.5~7.5	0.3~0.45	≤0.2	≤0.12	≤0.05	-	余量
实测成分	7.06	0.356	0.126	0.094	0.03	0.016	余量

部时冲头速度由180 mm/s降到80 mm/s，金属液进入铸件型腔后作稳定的层流运动，向四周填充时没有产生涡流现象，整个充型过程非常平稳，直至充型结束。金属液以层流方式充型大大降低铸件中出现气孔缺陷的概率。

2.3 凝固过程模拟与分析

图6为铸件凝固过程的模拟结果。从图中可以看出，排气槽、溢流槽与支架边缘处，壁厚相对较薄，散热快，最先开始凝固；在18.93 s时，溢流槽、排气槽已经完全凝固完成，支架本体、浇道以及料饼边缘处依次开始凝固；内浇道处支架壁厚较大，散热相对较慢，凝固速度较慢，在131.46 s时铸件本体凝固完成；在242.41 s时，浇注系统及厚大料饼全部凝固。凝固模拟显示，金属液的凝固符合顺序凝固的原则，凝固收缩效果好。

采用Niyamal判据对铸件凝固过程中可能产生的缩孔、缩松缺陷进行预测。图7为发动机悬置支架组合缺陷分布图。由图7可知，除了溢流槽、排气槽以及浇道上可能会出现缩孔、缩松缺陷，铸件本体中出现缩孔、缩松缺陷概率较低。铸件本体中缩孔、缩松缺陷少是因为浇注系统尺寸较大，对铸件厚大部位能起到良好的补缩；而溢流槽、排气槽中缩孔、缩松缺陷较多是因为溢流口较薄，凝固快，没有后续金属液对其进行补缩。

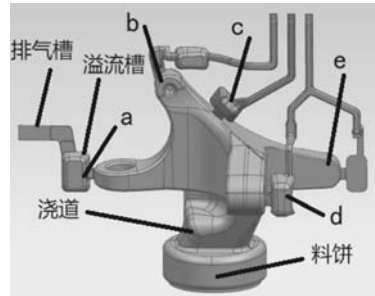
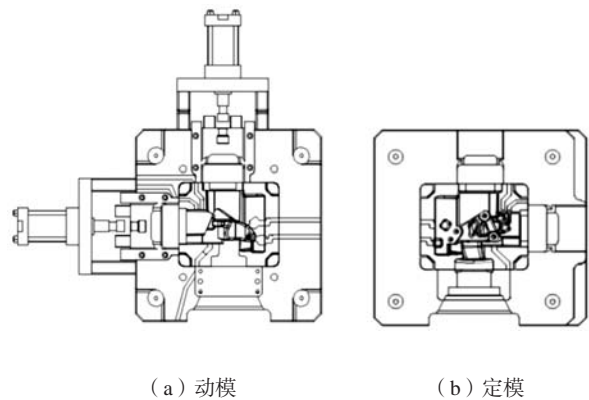


图3 发动机悬置支架挤压铸造工艺
Fig. 3 Squeeze casting process of engine mounting bracket



(a) 动模 (b) 定模
图4 发动机悬置支架挤压铸造模具
Fig. 4 Schematic diagram of movable and fixed molds for squeeze casting engine mounting brackets

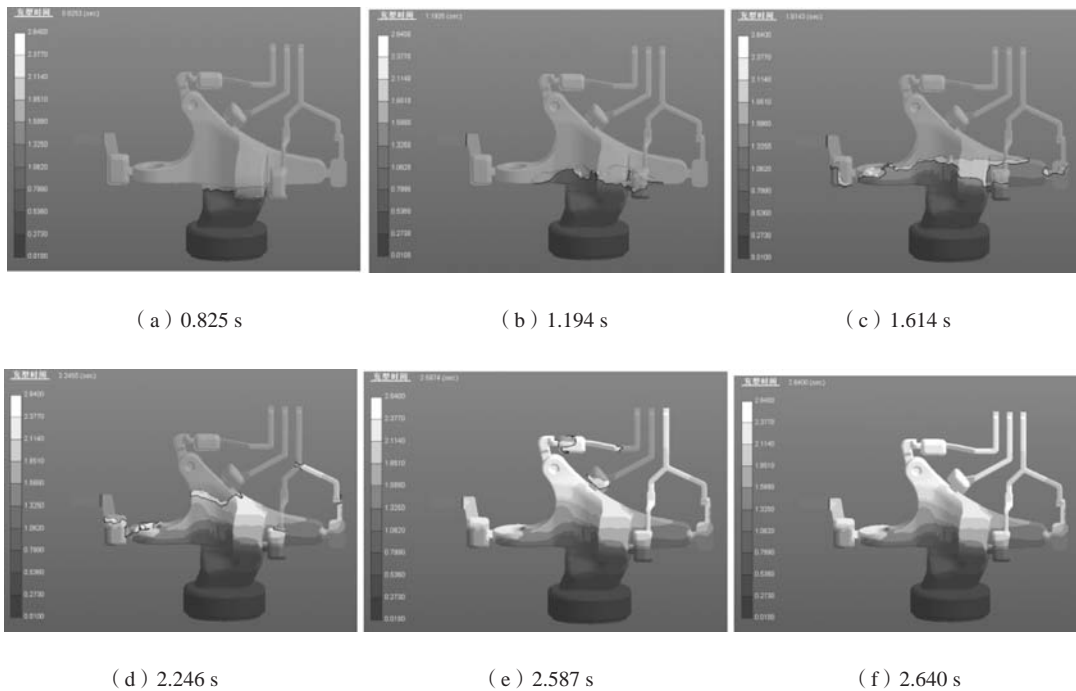


图5 铸件充型过程模拟
Fig. 5 Simulation of casting filling process

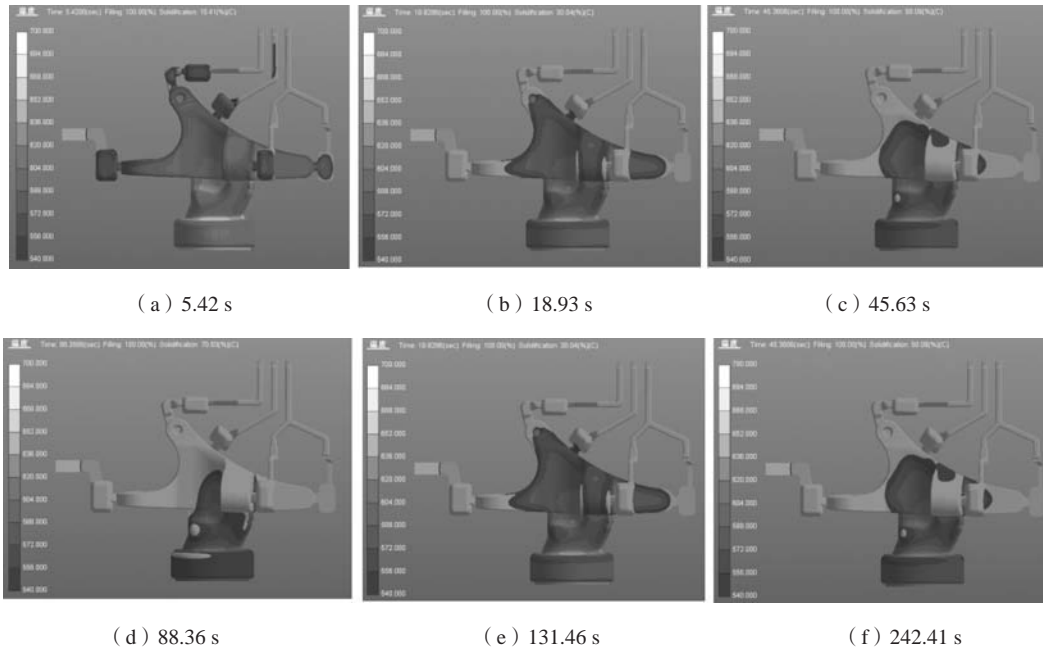


图6 铸件凝固过程模拟

Fig. 6 Simulation of casting solidification process

3 模具设计及成形工艺参数选择

3.1 模具设计

3.1.1 锁模力校核

为防止金属液充型时从分型面处飞溅，挤压铸造机必须具备足够大的锁模力。挤压铸造机所需要的锁模力 $F_{\text{锁}}$ 需满足如下要求：

$$F_{\text{锁}} \geq KF_{\text{胀}} \quad (1)$$

式中： $F_{\text{锁}}$ 为挤压铸造机具备的锁模力（kN）； K 为安全系数， $K=1.25$ ； $F_{\text{胀}}$ 为充型过程中全部的胀型力（kN）。

胀型力可按以下公式计算：

$$F_{\text{胀}} = AP \quad (2)$$

式中： A 为铸件在分型面上的投影面积（ mm^2 ）； P 为挤压比压（MPa）。计算得 $F_{\text{胀}} = 53\,000\text{ mm}^2 \times 100\text{ MPa} = 5\,300\text{ kN}$ 。

挤压铸造机所需要的最小锁模力为6 625 kN，而宇部HVSC800PL卧式挤压铸造机提供的锁模力为7 840 kN，符合锁模要求。

3.1.2 分型面选择

对于间接挤压铸造，其分型面的选择应综合考虑以下几个原则：①分型面应选在铸件外形轮廓尺寸最大截面处，以便取出铸件；②应尽可能使铸件在开模后留在动模部分，以方便推出机构将其推出；③应保证铸件的尺寸精度和表面质量；④应简化模具结构，便于模具加工；⑤应方便溢流、排气槽的布置^[5]。

本文研究的发动机悬置支架结构较复杂、曲面较多，且部分结构有形位公差要求，拟采用阶梯分型与曲面分型相结合的复合分型方案，如图8所示。选择支架的最大截面作为主分型面，并将支架大部分结构留在动模一侧，支架的侧孔采用侧抽芯油缸带动滑块的侧抽芯分型。采用复合分型方案可以保证铸件的尺寸精度以及外观要求，同时有利于浇注系统与溢流系统的布置。

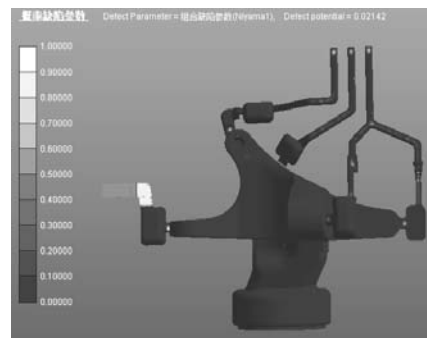


图7 发动机悬置支架组合缺陷分布图

Fig. 7 Simulation of defect distribution in engine mounting bracket

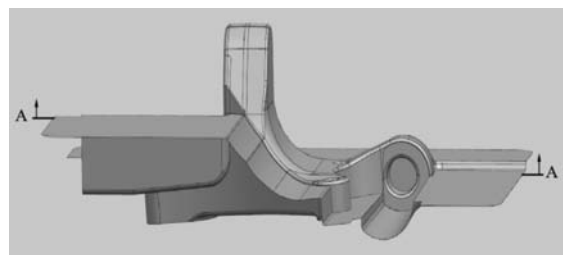


图8 发动机悬置支架分型方案

Fig. 8 Mold parting scheme of engine mounting bracket

3.1.3 浇注系统的设计

浇注系统是引导金属液以一定的方式进入模具型腔的通道。浇注系统对金属液的充型速度、流动方向、填充时间的长短、压力的传递等方面有较大影响^[6]。考虑压力的传递以及顺序凝固的原则,设计中将内浇道设置在发动机悬置支架壁厚最大的位置,使金属液在冲头作用下反重力充型,内浇道厚度取值为支架最大厚度的0.7倍,且截面形状与支架底部形状类似。料饼在压室中的直径为125 mm,为保证有足够的金属液用于补缩,料饼的整体厚度设置为50 mm,如图9所示。

3.1.4 溢流槽与排气槽的设计

溢流槽与排气槽设置部位如图10所示。通过数值模拟得出金属液可能产生冲击与汇流的部位(图10中c与d处),在此处设置溢流槽可以有效地减少铸件产生气泡与冷隔的缺陷;可能产生涡流的部位(图10中b处),在此处设置溢流槽可以减少气泡以及氧化夹杂缺陷的产生;在内浇道两侧的死角处(图10中a与e处)开设溢流槽可以消除死角部位浇不足缺陷。在溢流槽后端设置相应排气槽,确保型腔内的气体能够顺利排出。

溢流槽采用梯形结构形式(见图11),沿分型面分布于动、定模两侧,该结构较常规压铸用溢流槽容积更大,除了起溢流、排气等作用,还用于改善模具局部热平衡。

3.2 成形工艺参数选择

挤压铸造的成形工艺参数包括挤压比压、挤压速度、浇注温度、模具温度、保压时间等,成形工艺参数的合理选择对高品质铸件的生产有着重要影响^[7]。

增大挤压比压,可以使挤压铸件组织致密,力学性能提高;但挤压比压过大,会降低模具的使用寿命,同时也会增加设备动力消耗^[8]。在本试验中,综合考虑设备规格和压室直径,挤压比压选择为100 MPa。

挤压速度指压射冲头向上运动速度,当铸件内浇道尺寸确定后,金属液的充型速度就由挤压速度确定。挤压速度过高,会使金属液充型过程中产生卷气、粘模等缺陷;过低会使铸件轮廓不清,甚至出现浇不足缺陷。在本试验中,采用数值模拟中的分段调速充型,即从料饼到浇道中部为第一段,冲头速度设置为180 mm/s;浇道中部到铸件中部为第二段,冲头速度设置为80 mm/s;铸件后半部为第三段,冲头速度设置为50 mm/s。充型第一段需要快速充型,减少铸件总的充型时间;充型第二段、第三段适当降低挤压速度使金属液进入型腔后作稳定的层流运动。

浇注温度对铸件的成形有着非常重要的影响。过高的浇注温度会导致金属熔炼过程中吸气、氧化加

剧,铸件内易产生气孔、缩孔等缺陷;过低的浇注温度会使金属液流动性降低,不易充满型腔,产生冷隔、浇不足等缺陷^[9]。在本试验中,将铝合金熔液的浇注温度控制在700 ℃,允许存在 ± 5 ℃的偏差。

过高的模具温度会导致粘模严重,降低模具寿命,使铸件脱模困难;过低的模具温度则使金属液在充型过程中冷却加快、流动性降低,成形困难。在本试验中,采用模具温度控制系统,将模具的工作温度控制在200 ℃左右。

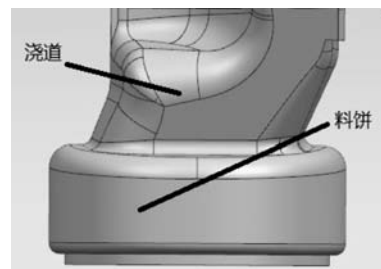


图9 料饼与浇道三维模型

Fig. 9 The 3D model of runner system

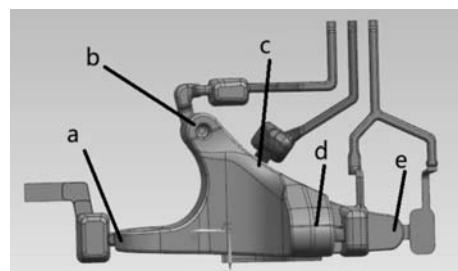


图10 溢流槽与排气槽的布置

Fig. 10 Layout of overflow channel and vent groove

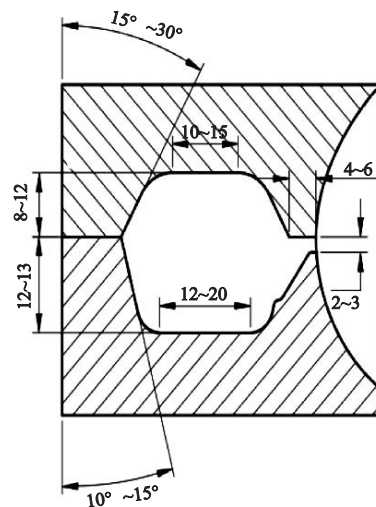


图11 溢流槽结构

Fig. 11 Structure of overflow channel

保压时间过长,既影响生产效率又会降低模具寿命;保压时间过短,则导致金属液还没有完全凝固,铸件内部可能出现组织疏松。凝固数值模拟显示,在88 s左右时铸件本体大部分都已凝固,88~240 s之间主要是厚大的浇注系统及料饼心部的凝固。由于数值模拟中未考虑凝固阶段高压对铸件与模具间换热能力的影响,所以凝固数值模拟的时间比实际生产过程中的凝固时间要长。在本试验中,保压时间控制在75 s左右,既保证了铸件主体部分的完全凝固与补缩,同时又不影响铸件的取出,提高了生产效率。

4 生产验证

用上述挤压铸造模具和工艺参数进行试验与批量生产,得到铸件毛坯见图12。对试样可能存在的缩孔、缩松以及气孔缺陷,采用X射线对支架整体进行无损探伤检测。从图13中可以看出,铸件内部未发现明显的黑点、显微缩孔以及树枝状的暗区,支架内部质量良好,缩孔、缩松 \leq ASTM(美国材料与试验协会)E115一级,满足要求。铸件经T6热处理后(535℃ \times 6 h固溶+170℃ \times 6 h时效+8 min水淬),本体取样力学性能为:抗拉强度340.5 MPa,屈服强度274.5 MPa,断后伸长率为10%,满足支架整体力学性能要求。

对热处理后的发动机悬置支架进行台架疲劳试验,通过特定的试验台模拟实际工况下发动机悬置支架装车后的抗疲劳特性。本试验在某测试中心完成,测试时在X、Y、Z三个方向对支架分别进行相应载荷的加载,当支架经过50万次循环后,未出现裂纹、断裂

等失效现象,则被判定为合格,否则判定为不合格。图14为发动机悬置支架台架试验示意图。测试结果显示支架在X、Y、Z三个方向上进行相应载荷的加载后,经过50万次循环,样品未出现断裂、裂纹等失效现象;后又增加到100万次循环实验,仍没有出现失效现象,表明该发动机悬置支架能完全满足使用性能的要求。

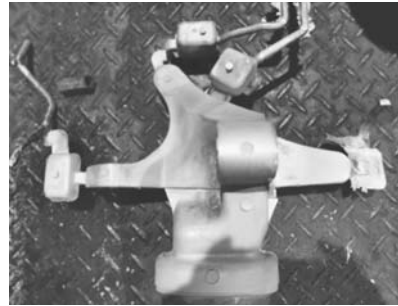


图12 发动机悬置支架铸件毛坯
Fig. 12 Squeeze cast engine mounting bracket



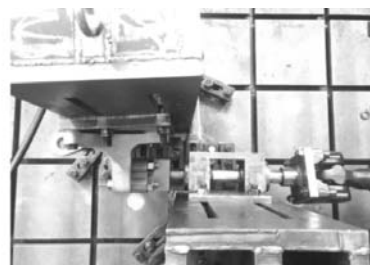
图13 X射线探伤检测
Fig. 13 X-ray flaw detection



(a) X方向加载



(b) Y方向加载



(c) Z方向加载

图14 发动机悬置支架台架试验示意图
Fig. 14 Bench test of engine mounting bracket

5 结论

(1) 完成了铝合金发动机悬置支架挤压铸造工艺和模具设计,包括锁模力核算,分型面选择,浇注系统、溢流槽与排气槽等的设计;数值模拟分析表明金属液充型平稳,符合顺序凝固原则,补缩效果好。

(2) 合理的铝合金发动机悬置支架挤压铸造成形

工艺参数为:挤压比压100 MPa;挤压速度采用分段调速,即第一段冲头速度设置为180 mm/s,第二段冲头速度设置为80 mm/s,第三段冲头速度设置为50 mm/s;浇注温度700℃;模具温度约200℃;保压时间约75 s。

(3) 对挤压铸造铝合金发动机悬置支架进行性能测试,各项性能指标均达到设计要求,目前,已通过台架疲劳试验。

参考文献:

- [1] 刘海军. 铝合金轮椅支架挤压铸造关键技术与工艺优化 [D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [2] 任俊成, 衡俐琼, 王泽忠, 等. 挤压铸造铝合金转向节开发 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (7): 735-738.
- [3] 张卫文, 齐丕骧, 朱德智, 等. 铸造技术路线图: 挤压铸造 [J]. 铸造, 2017, 66 (6): 535-540.
- [4] QIN XINYU, SU YONG, CHEN JIAN, et al. Finite element analysis for die casting parameters in high-pressure die casting process [J]. China Foundry, 16 (4): 272-276.
- [5] 陈云, 罗继相, 陈定方, 等. 摩托车刹车泵挤压铸造工艺研究及模具设计 [J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32 (8): 747-749.
- [6] 张鹏, 罗继相. A356.2铝合金螺簧座挤压铸造工艺的研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35 (1): 504-508.
- [7] 涂卫军, 王刚. 铝合金汽车转向节挤压铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2015, 64 (8): 740-743.
- [8] WANG CHUN-TAO, YAO JIE, ZHAO HAI-DONG, et al. Influence of intensification pressures on pores in die-cast ADC12 alloys [J]. China Foundry, 16 (3): 184-188.
- [9] 李宇飞, 余振龙, 石飞, 等. 挤压铸造工艺对汽车控制臂铸件组织及性能的影响 [J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38 (8): 864-866.

Forming Process of Squeeze Casting Aluminum Alloy Engine Mounting Bracket

CHEN Yun¹, LI Jie¹, LUO Ji-xiang¹, DU Juan², XIA Wang-hong³

(1. School of Logistics Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, Hubei, China; 2. Department of Mechanical Electronic Engineering, Wuhan Technical College of Communications, Wuhan 430065, Hubei, China; 3. Guangzhou Kinbon Liquid Mold Forging Technology Co., Ltd., Guangzhou 511300, Guangdong, China)

Abstract:

The engine mounting bracket is an important load-bearing structure part in automobile mounting system. It is usually made of nodular cast iron and manufactured by sand casting process. In the present study, light metal aluminum alloy are used for the reduction of auto-weight, and the forming process was investigated by using squeeze casting based on the structure and performance requirements of the engine mounting bracket. The results are in satisfactory and the performance indexes of squeeze cast engine mounting brackets all meet the design requirements when the extrusion specific pressure is 100 MPa, the extrusion speed is adjusted by sections, that is, the punch speed is set to 180 mm/s in the first section, to 80 mm/s in the second section, to 50 mm/s in the third section, and the pouring temperature, mold temperature and holding time are about 700 °C, 200 °C, 75 s, respectively.

Key words:

engine mounting bracket; squeeze casting; mold design