

挤压铸造铝合金控制臂的开发与生产

徐世文¹ 崔晓鹏² 刘海峰¹ 李鑫磊¹ 韩 星¹

(1.中信戴卡股份有限公司工程技术研究院; 2.长春工业大学材料科学与工程学院)

摘 要 以某量产车型的钢制下控制臂为研究对象,通过轻量化设计,开发了以铝合金铸件为核心的钢铝混合结构控制臂,通过挤压铸造得到铝合金铸件,实现了减重 25% 的设定目标。设计和试验结果表明,以铝合金铸件为核心的钢铝混合结构控制臂能够满足控制臂的使用需求,满足整车轻量化的需求。

关键词 控制臂; 铝合金; 挤压铸造; 钢铝混合结构

中图分类号 TG249.2; TG146.21 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.025

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development and Production of Squeezing Casting Aluminum Alloy Control Arm

Xu Shiwen¹, Cui Xiaopeng², Liu Haifeng¹, Li Xinlei¹, Han Xing¹

(1.Engineering Technology Research Institute of CITIC Dicastal Co., Ltd.;

2.School of Materials Science and Engineering, Changchun University of Technology)

Abstract: A control arm in mass production produced by steel stamping and welding was selected as the light-weight example. The target of 25% weight reduction was achieved by light weight design with Al casting concentrated steel aluminum mixed structure control arm. The Al castings were fabricated by squeeze casting process. The design and experiment process show that the aluminum-steel mixed structure control arm with Al casting centralization can meet the requirement, and has potential to great weight reduction.

Key Words: Control Arm, Aluminum Alloy, Squeeze Casting, Aluminum-Steel Mixed Structure

随着汽车多功能性需求的上升,电子设备和高品质安全系统等设备不断增加,导致乘用车重不断增加^[1]。与此同时,在全球范围内,对于提高燃油效率的要求和排放的法规日益严格^[2]。车身小型化以及减轻车身质量都可以实现提高燃油效率和减少排放的目标^[3,4]。基于降低整车质量以实现燃油效率和排放目标是目前最容易实现的技术手段。因而如何降低整车质量成为目前工程开发的热点之一^[5,6]。铝合金具有轻量化、比强度高以及耐腐蚀性好等一系列特点,已经被广泛地应用于前轴和横梁部件的制造^[7~9]。出于轻量化设计方面的考虑,为减轻质量,通常会改变零件的形状和尺寸,而这些变化会导致零件的强度和韧性变化,并可能导致零件失效^[10]。因此,作为全新设计的轻合金悬挂部件,将合适的材料赋予恰当的功能,并经过多轮次的结构拓扑优化分析和成形过程模拟十分重要。

本课题以某量产车型的钢板冲焊下控制臂为轻量化目标,基于铝合金及铸造工艺,通过集成化设计,来实

现轻量化控制臂的开发,以满足整车轻量化的需求。

1 目标的选取与分析

某型钢板冲焊下控制臂见图 1。以铝合金铸件取代原有部件主要要求如下:①铝合金控制臂的冲击性能与基准部件相当,铝合金的绝对强度低于钢板,但是可以通过结构优化,设置肋板和加强筋来保证结构满足冲击性能要求;②与取代部件相比,更改材料后自重降低 20% 以上;③满足 OEM 的耐蚀性要求,与原有钢制部件的耐蚀性能相当;④满足原有的安装条件,可实现直接替换。在局部结构更改过程中不涉及与其他部件有装配关系的部分,结构调整后,部件原有装配关系不变,可实现直接替换装配;⑤成本增加不超过 20%。

随着整车轻量化的要求,已经有多种铝合金控制臂投入了批量生产,主要采用铸造和锻造两种工艺^[11]。尽管锻件力学性能高,但是其生产成本也高。而铸造相对较为经济的成形方法。用于控制臂生产的铸造方法

收稿日期:2020-11-02;修改稿收到日期:2020-12-24
基金项目:稀土资源利用国家重点实验室开放课题资助项目(RERU2016001,RERU2018001)
第一作者简介:徐世文,男,1968 年出生,高级工程师,河北秦皇岛(066011),E-mail:xushiwen@dicastal.com
通信作者:崔晓鹏,女,1972 年出生,教授,长春(130010),E-mail:cuixiaopeng2004@126.com
引用格式:徐世文,崔晓鹏,刘海峰,等. 挤压铸造铝合金控制臂的开发与生产[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(8):1 044-1 048.
XU S W, CUI X P, LIU H F, et al. Development and production of squeezing casting aluminum alloy control arm[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):1 044-1 048.

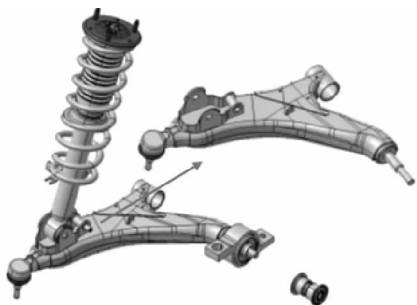


图1 钢板冲焊下控制臂

Fig.1 Lower control arm with steel plate by punching welding

主要有重力铸造、低压铸造、差压铸造、挤压铸造和半固态铸造等^[12~14]。综合考虑生产投资、产品性能及生产效率等因素,选取了与锻造性能较为接近、工艺稳定性较好的挤压铸造工艺生产。

2 产品的设计与分析

2.1 产品的概念设计

图2为AlSi7Mg铝合金控制臂的设计方案。考虑到挤压铸造工艺特点,无法应用砂芯形成空腔结构。决定将原有的空腔结构的钢板冲焊控制臂改为“H”型结构铝合金铸件,通过增加肋板和加强筋来提高铸件的整体刚度,实现铸造一次成形,并对不适于铸造的结构进行更改。

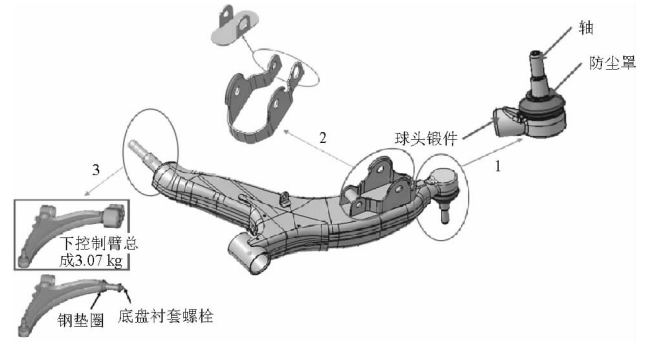


图2 铝合金控制臂的概念设计方案

Fig.2 Conceptual design of aluminum alloy control arm

图2中1处,将控制臂改为铝合金铸件后,球头组件与控制臂的连接方式将由原有的焊接方式改为螺栓连接。为满足更改后的连接方式,球头锻件的结构必须重新进行设计,并通过机械加工完成样件制作。只允许更改连接部分与球头相关的部件包括轴、防尘、球碗、卡环、球头销,夹子和球套结构则不允许更改。

为保证铸件的结构完整性、铸造工艺性能以及铸件的整体性能,将原有冲焊的减震器支座分为两体设计。减震器主支座改为铝合金,并与控制臂主体完成集成设计。减震器副支座仍为冲焊结构,在对原有部件切割的基础上增加底座,通过焊接形成组件,再通过螺栓与铝

合金控制臂连接,见图2中2处。在铝合金控制臂上要设计副支座的安装限位,保证安装到位。

图2中的3处在原有设计中所有部件均为钢制部件,更改为铝合金后,轴部材料为铝合金,与之配合的是钢制部件,在通常情况下铝合金部件不能够与其发生直接的摩擦配合。考虑有两种解决方案,其一是采用增加钢制垫片解决铝制部件与钢制部件的配合问题。增加钢制垫片后,原有设计中轴的尺寸将发生改变,需要重新设计;其二是借用原有的钢制部件,重新设计连接部分结构,通过螺栓连接实现部件的装配。

2.2 产品的设计方案

图3为铝合金控制臂的设计方案。基于原有冲焊部件设计,无法对原有周边的装配环境进行更改,必须仔细考虑原有部件的结构与装配。总体设计方案是采用集成设计“H”型的铝合金挤压控制臂取代原有的上板、下板、连接上板、连接下板、衬套套管和减震器支架,形成一个整体控制臂。

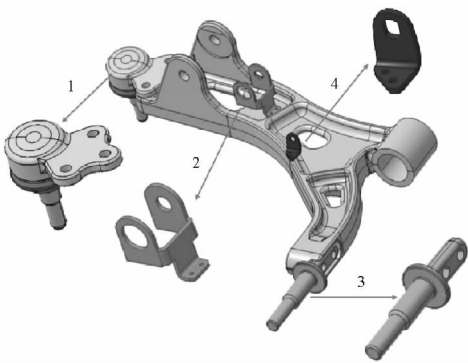


图3 铝合金控制臂设计方案

Fig.3 Design scheme of aluminum alloy control arm

图3中1处,球头组件采用原有结构,但取消焊接连接方式,在球头锻件上增加连接平面设计,通过螺栓与控制臂主体连接,在控制臂主体上也相应的设计出连接平面和连接螺栓孔。2处将冲焊结构中控制臂主体中的减震器之间分为两个部分,主体部分与控制臂为铸件,其余部分设计为一个钢板部件,通过螺钉与控制臂主体连接。3处在概念设计中试图将该部分集成至铝合金铸件中,但是在模拟分析中发现,该部分的载荷较大,加之无法对结构进行更改,因而决定保留此部分的钢制部件,在钢制部件和控制臂主体上设计出连接结构,然后通过螺栓与控制臂主体连接。4处在原有设计中的高度传感器支架无法集成入铝合金铸件中,所以需要维持钢板部件设计,通过螺钉与控制臂主体连接。

2.3 产品的结构分析

原有控制臂由15个不同材料的钢板部件通过焊接

构成。通过相关钢板标准的查询,获取了用于冲焊控制臂制造的不同钢板材料的屈服强度、断裂强度、伸长率和杨氏模量,用于 CAE 对比分析。控制臂共有 VERTICAL_BUMP, CORNERING, BRAKING_REARWARD, MAX_BRAKING, MAX_ACCELERATION, LATERAL_SHOCK, CURB_PUSH 等 7 种工况条件。考虑到挤压铸造 AlSi7Mg-T6 铝合金的断裂强度为 220 MPa,在分析过程中,要求任何区域内的应力分布都要小于 200 MPa。对于局部应力集中区域,可参考原有钢板冲焊设计中的对比应力,确保全新设计结构与原

有结构进行 CAE 对比分析时,相同部位铝合金部件的应力不得超过钢制部件的 1/3。

图 4 为 6 种工况条件的应力分析结果,发现其应力水平能够满足部件的使用需求。图 4 中 VERTICAL_BUMP, MAX_BRAKING 和 CONERING 工况为非破坏工况,其最大应力都未超过 200 MPa,经过对高应力部位的分析,发现主要为应力集中,且位于螺栓孔和减振器支座根部,同时对比了原有钢制部件同样位置的应力,其数值未超过钢制部件同样位置应力的 1/3,故而判定合格。为安全考虑,加大了减振器支座根部的圆

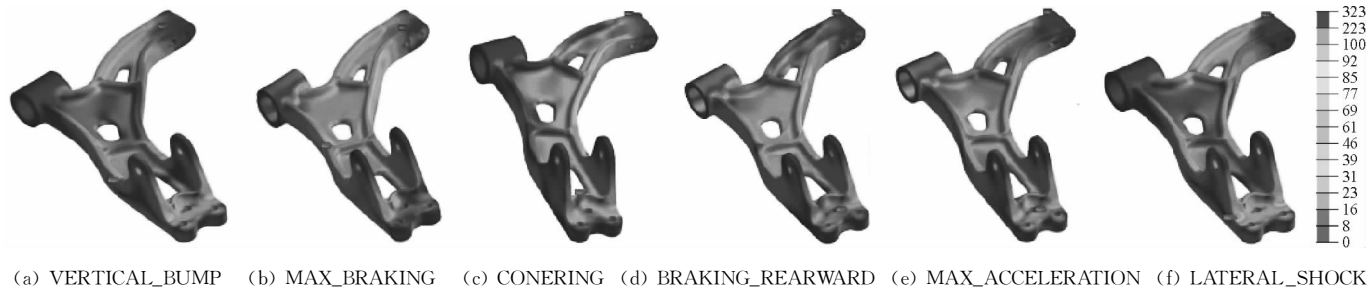


图 4 6 种工况条件下的 CAE 应力分析结果

Fig.4 CAE stress analysis results under six working conditions

角,以便于降低应力集中。

装配检查表明,全新设计结构没有超出原有结构包络面内,能够满足安装条件。部件在局部结构更改过程中,没有涉及与其他部件有装配关系的部分,结构调整后,部件的装配关系不变,可实现直接替换装配。

2.4 产品设计总结

表 1 为原有结构与全新设计结构部件质量对比。通过采用集成控制臂铸件取代了原有的上板、下板及连接上板等 6 个部件,并借用原有的连接套管。由表 1 可见,采用铝合金集成铸件后,质量下降 31%。球头总成和轴借用了原有结构,但重新设计了连接部分的结构,并采用了螺栓连接方案。

表 1 原有结构与全新设计结构部件质量对比

Tab.1 Weight comparison between original and new design structure

序号	部件名称	质量/kg		减重/kg	减重率/%
		钢板冲焊结构	挤压铝合金		
1	控制臂主体	上板	1.227	2.282	1.032
		下板	1.098		
		连接上板	0.270		
		连接下板	0.238		
		衬套套管	0.259		
		减振器支架	0.221		
		连接管套管	0.055	连接管套管	0.055
2	球头总成	0.545	0.549	-0.004	-0.7
3	轴	0.444	0.382	0.062	14.0
合计		4.358	3.268	1.090	25.0

质量为 3.268 kg。可见通过应用铝合金集成铸件并借用部分原有结构设计形成的钢铝混合结构可以实现部件总成减重 25% 的效果,实现了预定的减重目标。

3 工艺开发与试制

铝合金控制臂铸造工艺的基本设计见图 5。采用立式挤压机进行挤压,浇注系统由料饼和“Y”字型的浇道组成,在铸件上方设置溢流槽。通过左侧的抽芯形成铸件上与原有结构轴的安装孔。通过设置抽芯形成在铸件上部的连接孔,可以通过设置油缸的动作,在开模前插入,或是在充填过程中插入,当作挤压针,消除铸造缺陷。控制臂铸件质量为 2.282 kg,控制臂料饼及浇注系统质量为 4.250 kg,溢流槽及排气通道质量为 0.660 kg,总质量为 7.192 kg,工艺出品率为 31.7%,工艺出品率偏低。考虑到为试制开发部件,未对工艺出品率进行优化,在实际生产时可以考虑采用一模两件的方式提高工艺出品率。

采用 ProCAST 对铸造过程进行模拟分析,图 6 为不应用局部挤压和应用局部挤压两种方式铸件缺陷的模拟结果。由图 6a 可知,当不用局部挤压时,远离浇口部位以及加强筋部位还存在一定数量的缺陷。由于铸件凝固顺序的原因,无法通过增加保压时间和增压压力的方式消除此类缺陷。通过局部挤压,可以有效地消除通过增加保压时间和增压压力无法消除的缺陷,见图 6b。

原有设计结构的总质量为 4.358 kg,全新设计结构

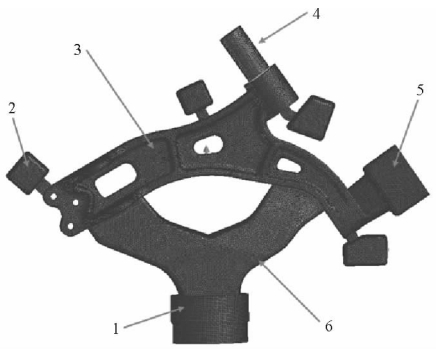


图 5 铝合金控制臂铸造工艺示意图

Fig.5 Schematic diagram of casting process of aluminum alloy control arm

1.料饼 2.溢流槽 3.控制臂铸件 4.局部挤压 5.抽芯 6.浇道



图 6 铸造过程的缺陷模拟分析结果

Fig.6 Simulation analysis results of casting process

在卧式挤压铸造机(SCH-1000A)上进行铝合金控制臂生产。在完成料杯充填以后,活塞自下向上运动,完成金属熔体的充填。在动模部分通过一个抽芯、一个局部挤压和抽芯两用的结构分别形成连接孔和连接轴安装面处的结构。采用两种方式进行铸造生产,其一是无局部挤压,其二是采用局部挤压,图 7 为挤压铸造的铝合金控制臂铸件。

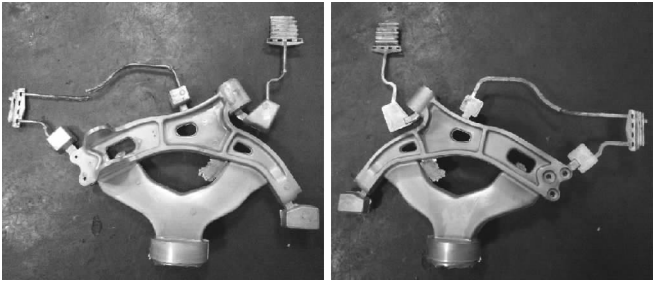


图 7 挤压铸造生产的铝合金控制臂铸件

Fig.7 Aluminum alloy control arm by squeeze casting

受铸件尺寸和结构限制,本体取样时按客户要求,在多个铸件上指定位置分别取若干非标试样(基于 GB/T 228.1-2010),拉伸试验结果见图 8。抗拉强度为 293.2 MPa、屈服强度为 226.48 MPa、伸长率为 9.01%,且全部高于设定值。后期在主机厂进行的台架试验、

NVH 测试、装车试验、碰撞试验、耐久性试验等多项检测,全部通过,由此可见挤压铸造铝合金控制臂的性能不低于钢板冲焊下控制臂,由于涉及关键技术,主机厂并未透露相关试验的具体数据和照片。

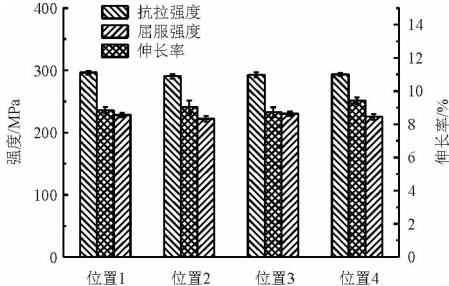


图 8 挤压铸造控制臂力学性能

Fig.8 Mechanical properties of squeeze casting control arm

图 9 为无和有局部挤压铸造铸件的 CT 照片。由图 9a 可见,在无局部挤压时,铸件的安装孔处出现了明显的缩松缺陷,通过应用局部挤压可以消除此类缺陷,见图 9b。需要注意的是,在局部挤压过程中挤压针的插入深度不仅取决于局部挤压油缸的压力,还取决于插入的时间和铸件的凝固情况。尽管在通过局部增压消除了铸造缺陷,但是挤压针插入的深度不够,对于安装孔的形成影响不大,后续还要通过机械加工才能够完成。

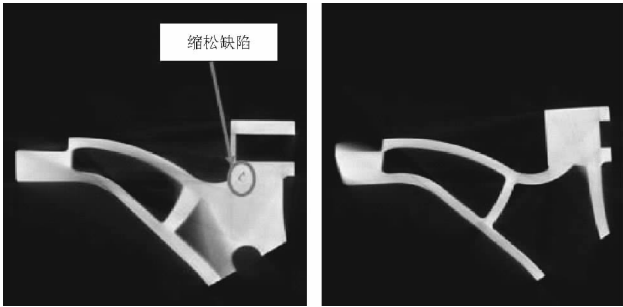


图 9 局部挤压铸造对铸件质量的影响

Fig.9 Effect of partial squeeze casting on casting quality

4 结 论

- (1)通过结构拓扑优化设计,在原有钢制控制臂的基础上开发了轻量化铸造铝合金控制臂,实现了减重 25% 的设定目标,且通过主机厂测试,其他性能未降低。
- (2)采用挤压铸造工艺完成了铸件的开发,并引入了局部挤压技术,有效消除了通过增加保压时间和增压压力无法消除的缺陷,抗拉强度为 293.2 MPa、屈服强度为 226.48 MPa、伸长率为 9.01%。
- (3)设计和试验表明,铝合金铸件为核心的钢铝混合结构控制臂能够满足下控制臂的使用需求,并大幅度降低自重,满足整车轻量化的需求。

K4169 合金-陶瓷型壳间界面传热系数研究

马岚波 税国彦 关 洋 孙 逊 苗治全 成京昌
(沈阳铸造研究所有限公司)

摘 要 界面传热系数(IHTC)是铸造数值模拟前处理时需要设置的边界条件之一,对铸件凝固过程温度场计算精度有重要影响。采用 ProCAST 软件反算模块和试样不同壁厚处实测温度数据反算求得 K4169 高温合金熔模铸造试样-陶瓷型壳间的界面传热系数,并分别用于试样熔模铸造数值模拟,结果表明,计算温度与实测温度误差均在 3% 以内。

关键词 K4169 高温合金;熔模铸造;界面传热系数;ProCAST 软件;反算

中图分类号 TG249.5;TG146.1⁺5;TG21⁺4 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2021.08.026 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Interfacial Heat Transfer Coefficient between the K4169 Alloy and Ceramic Mold Shell

Ma Lanbo, Shui Guoyan, Guan Yang, Sun Xun, Miao Zhiquan, Cheng Jingchang
(Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd.)

Abstract: The interfacial heat transfer coefficient (IHTC) is one of the boundary condition for the preprocess of casting numerical simulation, which has an important effect on the calculation accuracy of the temperature field during solidification process. The IHTCs between the K4169 alloy and ceramic shell mold were obtained through ProCAST inverse module and the temperature measured from various positions with different thicknesses of the specimens, which was applied to the numerical simulation. The results indicate that the error between calculated and measured temperature is within 3%.

Key Words: K4169 Superalloy, Investment Casting, Interface Heat Transfer Coefficient, ProCAST Software, Inverse Method

应用于航天航空等领域的高温合金铸件结构复杂 且薄壁化,壁厚差异较大。由于高温合金价格昂贵,熔

收稿日期: 2021-03-16; **修改稿收到日期:** 2021-04-15
第一作者简介: 马岚波,男,1994 年出生,硕士研究生,沈阳(110022),E-mail: malanbo1@foxmail.com
引用格式: 马岚波,税国彦,关洋,等. K4169 合金-陶瓷型壳间界面传热系数研究[J]. 特种铸造及有色合金,2021,41(8):1 048-1 052.
MA L B, SHUI G Y, GUAN Y, et al. Interfacial heat transfer coefficient between the K4169 alloy and ceramic mold shell[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(8):1 048-1 052.

参 考 文 献

[1] 陈龙,李仲明. 提高发动机机械效率减小燃油消耗[J]. 汽车实用技术, 2016(9): 251-253.

[2] 庄晓东. 基于高精度气动阻力计算的汽车尾部减阻研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.

[3] 赵立信. 汽车业与特种铸造[J]. 特种铸造及有色合金, 2000(6): 4-14.

[4] 王吉,徐世文,田政,等. 钕铈混合稀土对 AlSi10MgMn 合金组织及性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(8): 906-910.

[5] 马鸣图,易红亮,路洪洲,等. 论汽车轻量化[J]. 中国工程科学, 2009(90): 20-27.

[6] CUI X P, LIU H F, MENG J, et al. Microstructure and mechanical properties of die-cast AZ91D magnesium alloy by Pr additions [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010 (S2): 435-438.

[7] 刘洲,胡玉洁,付丹,等. 浅谈乘用车仪表板横梁轻量化技术[J]. 汽

车零部件, 2020(1): 92-95.

[8] 陈云,汪锐,邓森,等. 挤压铸造 A356.2 铝合金发动机悬置支架的组织与性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(2): 175-178.

[9] 单柯日,黄长明,刘建平. 铝合金控制臂的轻量化设计及挤压铸造工艺[J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36(5): 484-487.

[10] 蔡柯芳. 混合材料白车身轻量化多目标协同优化设计[D]. 长春: 吉林大学, 2020.

[11] 陆大兴,刘林,姚造成,等. 汽车底盘铝合金轻量化的成型工艺及趋势[J]. 大众科技, 2019(5): 66-68.

[12] 崔晓鹏,刘海峰,刘勇兵. 镁合金半固态触变注射成形过程中固相形成机制[J]. 铸造, 2007, 56(1): 1 147-1 150.

[13] 李宇飞,于振龙,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): 846-866.

[14] 何毅,杨湘杰,方立高. A356 半固态挤压铸造数值模拟及模具优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2018, 38(2): 160-162.

(编辑:张正贺)