

基于 ProCAST 的 ZL205A 合金弹体传动件铸造工艺优化

党云鹏 曹 岩
(西安工业大学机电工程学院)

摘 要 为了解决某 ZL205A 合金弹体传动件金属型铸造工艺不成熟的问题,使用 ProCAST 软件模拟该铸件在阶梯式浇注系统下的充型、凝固过程,通过对温度场和固相率仿真结果进行分析,对浇注工艺参数进行优化,缩短了研发周期,降低优化工艺的前期成本。最终按照优化后的结果指导铸件试生产,得到充型完整、品质良好的铸件,验证了优化方案的合理性。

关键词 ZL205A 合金;弹体传动件;金属型铸造;ProCAST;仿真优化

中图分类号 TG146.21;TG249.3

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2022.02.006

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Casting Process Optimization of ZL205A Alloy Projectile Transmission Parts Based on ProCAST Software

Dang Yunpeng, Cao Yan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an Polytechnic University)

Abstract: In order to solve the problem of immature metal mold casting process of a ZL205A alloy projectile transmission part, ProCAST software was adopted to simulate the filling and solidification process of the casting in the stepped gating system. Through analyzing the simulation results of temperature field and solid ratio, the casting process parameters were optimized to shorten the research and development cycle, reducing the up-front cost of the optimized process. Finally, according to the optimized results, the casting trial production was carried out, and castings with complete filling and excellent quality was obtained, verifying the rationality of the optimization scheme.

Key Words: ZL205A Alloy, Projectile Transmission Parts, Metal Mold Casting, ProCAST, Simulation Optimization

在武器装备中,部件常处于高温、高载荷工作状态,其整体力学性能及内部品质要求非常严格,验收技术较为苛刻。随着工业技术的发展,对部件不仅追求更强的性能还提出了精密化、轻量化的要求^[1]。ZL205A 合金凭借良好的综合力学性能以及低密度,成为实现铸件轻量化的重要材料。ZL205A 合金由于掺杂了大量合金元素,凝固温度范围很宽,易形成粗大的树枝晶或等轴晶,呈糊状凝固^[2],易造成补缩不畅和部分溶质聚集,易产生裂纹、缩松及偏析等缺陷,导致成品率低。对于外形尺寸在 1 m 以下 ZL205A 合金铸件可以通过工艺调整,使偏析、裂纹和缩松等铸造缺陷得到控制,从而满足铸件技术指标要求^[3]。对于大型 ZL205A 合金铸件而言,铸件外形尺寸大,因而铝液分布面积大,导致影响铸件在凝固过程中的热平衡因素重要性凸显。目前,国内有关大型复杂 ZL205A 合金铸件的铸造工艺尚不成熟,

这已成为我国铝合金大型件向高品质发展的一个突出问题。

本课题以某弹体传动结构件为研究对象,该大型件采用铸造主体部分和机加工螺旋槽的组合方式生产,其铸坯通过金属型重力铸造。利用 UG 建立带有浇注系统的铸件三维模型,应用 ProCAST 软件对其铸造过程进行数值模拟,并预测铸件有可能产生的缩孔、缩松的位置及原因^[4]。根据模拟结果对铸造工艺进行改进,为同类产品的生产提供参考。

1 建立几何模型

弹体传动结构件材质为 ZL205A 铝合金,其成分见表 1。质量为 136 kg,铸件为回转体结构,其三维造型及内部结构见图 1,铸件高度为 800 mm,外径为 300

收稿日期:2021-07-14;修改稿收到日期:2021-08-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51705392);陕西省教育厅重点实验室科研计划资助项目(18JS043)

第一作者简介:党云鹏,男,1997 年出生,硕士研究生,西安(710021),E-mail:1969394820@qq.com

通信作者:曹岩,男,1970 年出生,教授,西安(710021),E-mail:caoyan@xatu.edu.cn

引用格式:党云鹏,曹岩.基于 ProCAST 的 ZL205A 合金弹体传动件铸造工艺优化[J].特种铸造及有色合金,2022,42(2):162-166.

DANG Y P, CAO Y. Casting process optimization of ZL205A alloy projectile transmission parts based on ProCAST software[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2022, 42(2):162-166.

mm,内腔壁厚为 65 mm,属于大型铸件。内腔上均匀分布 6 条加强筋,厚度为 20 mm,高度为 40 mm。技术要求零件外观不能有凹陷或突起,内部不允许有缩孔、缩松等铸造缺陷。

表 1 ZL205A 合金的化学成分

Tab.1 Chemical composition of ZL205A alloy %							
w_B							
Cu	Mn	Ti	B	Cd	Zr	V	Al
5.2	0.35	0.25	0.05	0.15	0.75	0.15	余量

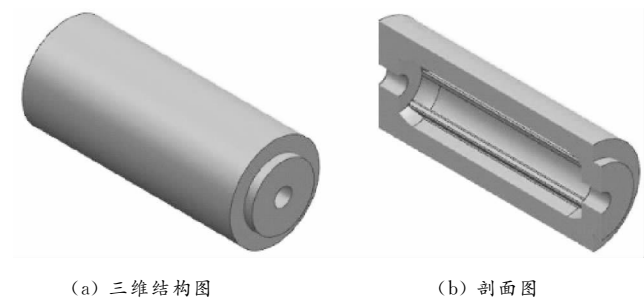


图 1 弹体传动结构件三维结构及内部视图
Fig.1 Schematic diagram of 3D profile and internal view of projectile transmission parts

铝合金铸件在实际过程中,常常会因为补缩不良而产生缩孔、缩松等缺陷,弹体传动铸件壁厚较大,冷却凝固不确定性因素较多。因此根据浇注系统的经验设计规则,充分考虑分型面和浇注位置的选择,结合该铸件的结构特点设计了侧注-阶梯式浇注方案^[5],取消了横浇道,并在蛇形浇道底部设置集渣筒。浇注时金属液自蛇形直浇道流经截面积较小的内浇道进入型腔,在重力作用下充型,浇注过程中金属液流平稳,防止产生卷气,降低出现气孔的可能性。通过顶部冒口对铸件进行补缩,浇注系统的具体结构见图 2。

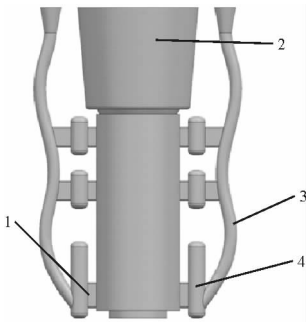


图 2 浇注系统几何模型
Fig.2 Geometric model of gating system
1.内浇道 2.冒口 3.蛇形浇道 4.集渣筒

2 数学模型的建立

2.1 充型过程模型

在铸件充型过程的数值模拟中,注入型腔的铝合金

熔液设定为不可压缩的牛顿流体,其整个流动过程遵从流体动力学规律,可以通过质量守恒以及能量守恒的基本控制方程描述,涉及连续性方程、质量方程、能量方程和动量方程等^[6~8]。

2.2 凝固过程模型

铝合金液凝固时,铸件的传热绝大部分通过热传导进行,因此忽略热对流和热辐射的作用,主要讨论热传导的影响。通过热传导微分方程、能量守恒定律和傅里叶公式,建立热传导微分方程^[7]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \tag{1}$$

式中, c_p 为材料的定压比热容, $J/(kg \cdot ^\circ C)$; t 为充型时间, s ; λ 为传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$; Q 为单位时间、单位体积内物体中热源的发热率; T 为温度, $^\circ C$ 。

2.3 缩松、缩孔判据

铸件形成缩松、缩孔主要是由于补缩机构设计不当,从而导致补缩不及时。通常在仿真软件中缩松、缩孔判据预测^[8]采用 Niyama 判据:

$$G/\sqrt{R} < C_{Niyama} \tag{2}$$

式中, G 为判断区域局部温度梯度; C_{Niyama} 为临界值,一般仅 1~1.1; $R = \frac{T_{i,j,k}^m - T_{i,j,k}^{m+1}}{\Delta t}$ 为冷却速度。

在判据中:

$$G = \max \left\{ \frac{T_{i,j,k} - T_{i+m_i,j+m_j,k+m_k}}{\sqrt{(m_i + \Delta x)^2 + (m_j + \Delta y)^2 + (m_k + \Delta z)^2}} \right\} \tag{3}$$

$m_i = 0, m_j = 1, m_k = -1$

式中, $\Delta x, \Delta y, \Delta z$ 为单元步长。

3 有限元仿真前处理

3.1 有限元网格划分

在 UG 软件中建立浇注系统模型,以.igs 的格式导入 ProCAST 软件的 Visual-Mesh 模块进行有限元网格划分。在面网格划分环节,为尽量减少模拟时间并同时保证能够得到较为精确的计算结果,需要同时考虑到网格数量、网格疏密程度对于计算效率和划分精度的影响,因此采用不同尺寸的网格单元对浇注系统进行划分,见图 3。铸件部位及浇注系统的网格单元尺寸设置为 3,金属铸型以及砂芯部分网格单元尺寸设置为 15,在面网格修复完成后,在面网格基础上进行体网格的划分,生成 36 019 个面网格和 6 657 422 个体网格。

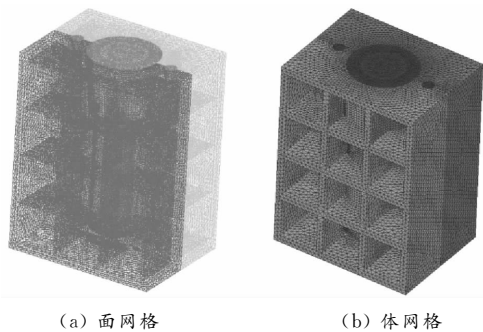


图 3 浇注系统的网格划分
Fig.3 Grid meshing of gating system

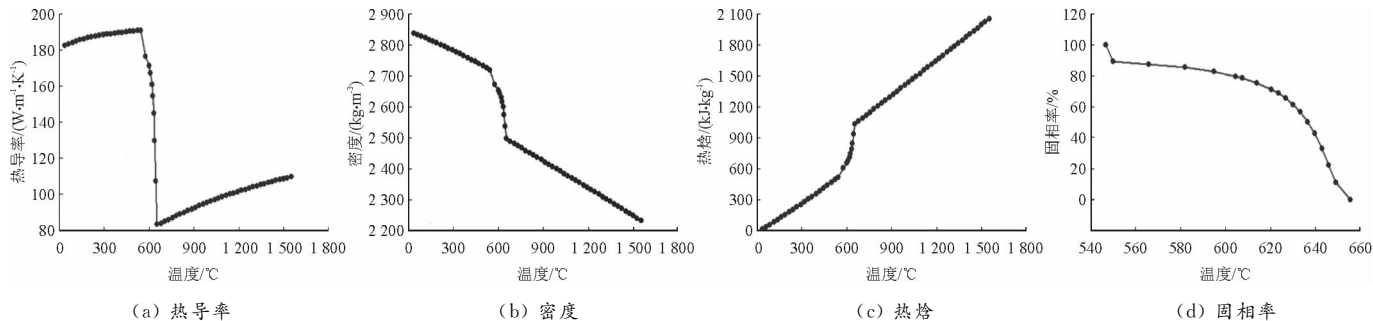


图 4 ZL205A 热物性参数
Fig.4 Thermophysical parameters of ZL205A

3.3 边界条件和运行参数设置

根据经验,参考实际生产数据,设置初始工艺参数:浇注温度为 710 ℃,铸型预热温度为 240 ℃,浇注速度为 5 kg/s。采用重力浇注,将重力设为 z 轴负方向,自然空冷。界面传热系数类别选择 COINC 类型,通过建立如下数学模型计算出具体数值^[10]。

$$Q = F_{Lux} + h(T - T_a) + \sigma \epsilon(T^4 - T_a^4) \quad (4)$$

式中, T_a 为环境温度; ϵ 为材料反射率; h 为对流传热系数; σ 为 Stefan Boltzman 常数。计算得出铝合金与金属铸型的界面传热系数为 2 000 W/(m² · K),与砂芯的界面传热系数为 600 W/(m² · K)。设置通用参数和温

3.2 材料选择和初始工艺参数确定

铸件材质为 ZL205A 合金,使用 ProCAST 计算出该材料的物理性能参数,见图 4。采用 Scheil 模型计算出的 ZL205A 相关热物性参数,与王晔^[9]通过差示扫描量热分析以及激光导热分析得到的 ZL205A 合金的固相率、热焓、热导率等数据能很好地吻合,因此可以运用到模拟计算中。其固相线温度为 546 ℃,液相线温度为 655 ℃。金属铸型材质为 QT600-3 球墨铸铁,砂芯材料选择树脂砂。

度模拟参数设置时,保持默认设置即可。

4 仿真结果分析及优化设计

4.1 充型凝固过程温度场模拟结果分析

通过 Viewcast 模块,观察铸件三维温度场的分布结果,浇注系统的充型凝固过程仿真结果见图 5。可以看出,浇注后,铝合金液随着蛇形直浇道流经内浇道,平缓流入型腔,金属液在型腔内缓慢上升,使得型腔内气体得以顺利排出。整个充型过程较平稳,可以完整充满型腔。充型结束后,金属液开始冷却凝固,凝固初期,型腔内金属液与周围材料温度差异大,热传递速度快,随

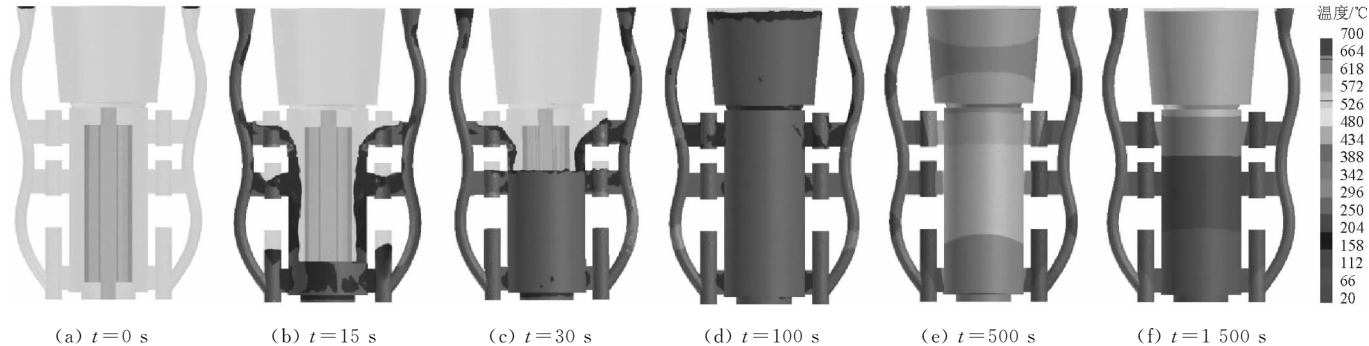


图 5 铸件充型凝固温度场模拟结果
Fig.5 Simulation results of temperature field during filling solidification

着铸件逐渐凝固,温度变化变缓。当铸件完全凝固后,铸件整体温度场变得均匀,温度相差不大,经 1 500 s 铸件冷却到 300 ℃,停止模拟计算。

4.2 凝固过程固相率模拟结果

整个浇注系统的凝固过程固相率见图 6。可以看出,凝固从浇注系统开始,此处的凝固最快。在 300 s

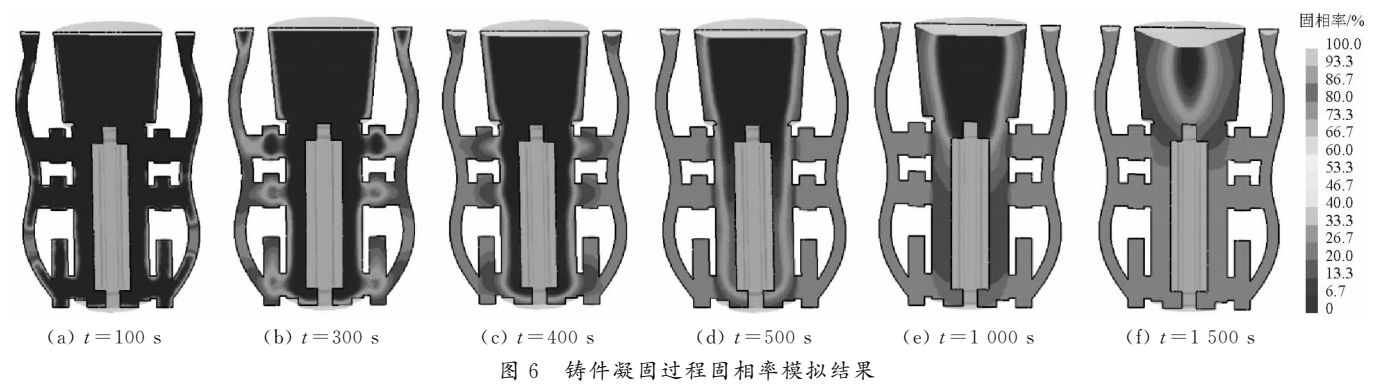


Fig.6 Simulation results of solid fraction during solidification

时,凝固基本在浇注系统部位,由蛇形浇道向内浇道进行,到 400 s 时,浇注系统已经完全凝固,500 s 时铸件下端逐渐凝固,凝固趋势呈扇形,由下至上顺序凝固,在 1 500 s 时整个铸件部位凝固完成,整个过程没有出现明显的孤立液相区。

4.3 铸件缩松、缩孔缺陷预测

弹体传动件强度要求较高,要保证内部组织致密,因此需要对其缩孔、缩松的倾向进行分析。ProCAST 软件采用 Niyama 判据^[11]进行定性判断,预测结果见图 7。可以看到,缺陷主要分布在蛇形浇道及冒口部位,仅有少量缺陷出现在铸件下端口与砂芯接触部位,通过增大冒口尺寸,增设多条内浇道、增加内浇道宽度等设计及优化是合理的,但还需要对浇注工艺参数进行进一步优化。

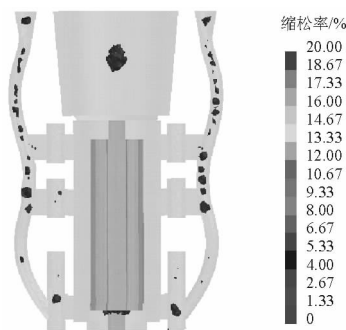


图 7 铸件缩松、缩孔预测结果

Fig.7 Prediction results of shrinkage porosity and cavity

5 工艺参数优化

为了保证铸件品质,对浇注温度、浇注速度以及铸型预热温度 3 个主要工艺参数进行优化,设计 3 因素 3 水平的正交试验,见表 2。

表 2 正交试验因素水平表

Tab.2 Factor level table of orthogonal experiment			
水平	浇注温度 (A)/℃	浇注速度 (B)/(kg·s ⁻¹)	铸型预热温度 (C)/℃
1	690	2	220
2	710	5	240
3	730	8	260

根据正交表设计 9 个试验,并依次进行铸造仿真试验,以最终模拟仿真的铸件缩孔缩松率作为评价标准,正交试验方案及模拟结果见表 3。由极差分析可知,铸造缺陷最小的试验参数组合为 A₂B₁C₃,即浇注温度为 710 ℃,浇注速度为 2 kg/s,铸型预热温度为 260 ℃时传动件的铸造结果最佳。得出各因素对铸件品质影响的大小为浇注温度>铸型预热温度>浇注速度。

表 3 正交试验方案及模拟结果

Tab.3 Orthogonal experimental scheme and simulation results				
组号	试样因素			模拟结果 θ/%
	A/℃	B/(kg·s ⁻¹)	C/℃	
L ₁	1	1	1	3.252
L ₂	1	2	2	3.487
L ₃	1	3	3	2.884
L ₄	2	1	2	2.690
L ₅	2	2	3	3.064
L ₆	2	3	1	3.123
L ₇	3	1	3	3.390
L ₈	3	2	1	2.965
L ₉	3	3	2	3.442
K ₁	3.208	3.111	3.124	
K ₂	2.959	3.172	3.206	
K ₃	3.266	3.150	3.113	
S ₁	1.069	1.037	1.041	
S ₂	0.986	1.057	1.069	
S ₃	1.089	1.050	1.038	
R	0.103	0.020	0.031	

使用优化后的工艺参数,再次进行仿真试验。图 8

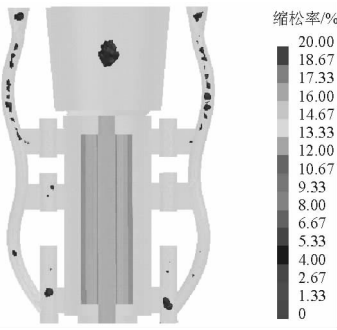


图 8 A₂B₁C₃方案的缩松、缩孔预测结果
Fig.8 Prediction results of shrinkage cavity and porosity in A₂B₁C₃ scheme

为优化后的工艺参数组合下的铸造仿真预测结果。由 Niyama 判据可知,此时 ZL205A 大型传动铸件缩松、缩孔问题显著改善,几乎为 0,整个浇注系统的铸造缺陷主要集中在冒口和蛇形浇道处,大型传动件的铸造效果良好。

6 生产验证及性能测试

按照阶梯浇注系统以及优化后的工艺参数进行了生产验证,得到的铸件见图 9。依据仿真结果对容易产生缩孔、缩松的铸件内壁部位采用 XXQ1605 型探伤机进行 X 射线探伤检测(见图 10),发现铸件与砂芯接触的部位成形良好,没有发现气孔、夹渣、缩松、缩孔等铸造缺陷。采用 DK 7750 线切割机在铸件下端口部位取样,利用 VHX-600E 金相显微镜对试样进行显微缩孔缩松检测,得到金相组织见图 11。经观察,铸件组织致密,晶粒分布均匀,铸件整体致密度达到 99.5% 以上,满足要求。



图 9 弹体传动铸件
Fig.9 Casting of projectile transmission parts

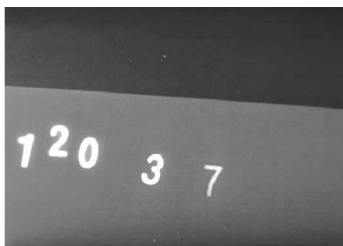


图 10 X 射线检验结果
Fig.10 Results of X-ray inspection

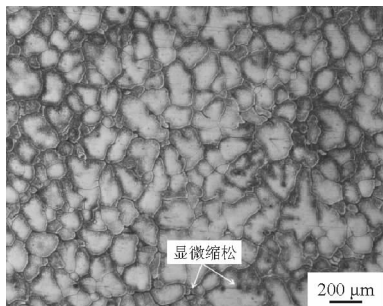


图 11 取样位置金相组织

Fig.11 Metallographic structure of the sampling castings

7 结 论

(1)仿真结果表明,ZL205A 大型传动铸件在多内浇道的侧注-阶梯式浇注系统下金属液充型平稳,铸件凝固过程中各部位存在合理的顺序凝固温度梯度。

(2)设计 3 因素 3 水平的正交试验,筛选出最优浇注工艺参数组合:浇注温度为 710 ℃,铸型预热温度为 260 ℃,浇注速度为 2 kg/s。各因素影响由大到小依次

为浇注温度、铸型预热温度、浇注速度。

(3)对试生产得到的铸件进行 X 射线探伤以及金相组织观察,铸件内部没有明显缩松、缩孔缺陷,致密度良好,符合要求。

参 考 文 献

- [1] 魏振洋.汽车轻量化技术的研究现状[J].汽车工程师,2020(11): 11-12.
- [2] 马福民,曲银辉,王涛,等.ZL205A 铝合金筒类铸件铸造工艺研究[J].铸造,2014,63(9): 938-941.
- [3] LI M,CAI L R,LIU P X. Study on the microstructure and properties of ZL205A alloy under partial remelting treatment[J]. Advanced Materials Research, 2012, 1 897: 1 183-1 186.
- [4] 洪涛,王东方,华逢志.铝合金轮毂挤压铸造工艺参数优化[J].铸造技术,2020,41(12): 1 160-1 164.
- [5] 江长,向思雨.基于 ProCAST 的主轴箱铸造工艺数值模拟及优化[J].铸造工程,2020,44(5): 40-43.
- [6] 白瑀,张浩,黄亮.基于 ProCAST 的叶轮熔模铸造数值模拟仿真及优化[J].热加工工艺,2021,50(11): 71-75.
- [7] 苏大为.铝合金汽车轮毂低压铸造过程的数值模拟及工艺优化[D].江苏镇江:江苏大学,2008.
- [8] 唐计龙.铝合金轮毂低压铸造工艺的数值模拟[D].长春:吉林大学,2009.
- [9] 王晔.ZL205A 筒形件低压铸造宏观偏析形成机制及补缩行为[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.
- [10] 曹岩,张浩,石亚茹,等.基于 ProCAST 的薄壁叶片熔模精铸过程模拟[J].特种铸造及有色合金,2018,38(11): 1 226-1 229.
- [11] 刘静,张建平,王小博.复杂铝合金铸件铸造工艺优化与设计[J].铸造技术,2020,41(3): 243-247.

(编辑:栗万仲)

广东鸿图举行 6800T 一体化结构件下线暨 12000T 压铸单元签约仪式

2022 年 1 月 22 日,“广东鸿图科技股份有限公司(简称“广东鸿图”)6 800T 底盘一体化结构件下线暨 12 000T 超级智能压铸单元合作签约仪式”,在广东肇庆市高要区广东鸿图科技园隆重举行。

广东鸿图 6 800T 压铸单元已于近日(1 月 17 日)成功试模。此次汽车底盘一体化结构件下线,标志着该超大型压铸单元正式投产。活动现场,广东鸿图、力劲集团、型腔模具、鸿劲铝业等四方,就 12 000T 超级压铸单元研发项目举行了签约仪式。本次活动还举行了战略合作(批量采购)签约仪式,广东鸿图与力劲集团签订了 8 台(套)包含 12 000T 吨位机型在内的大型压铸岛采购协议。

据了解,广东鸿图该汽车底盘一体化结构件产品,采用自主研发的高强韧热处理铝合金材料,铸件尺寸大小约 1 700 mm×1 500 mm×700 mm,浇注质量约为 100 kg,是目前最大的铝合金高强韧压铸件之一。

(摘自压铸周刊)