

高性能 QT600-10 的车桥支架铸造工艺研究与试制

马艳东^{1,2} 赵千一³ 汤 洋³ 葛茂忠⁴ 孙祥广² 周正寿²

(1. 广东工业大学机电工程学院, 广州 510006; 2. 江苏恒立液压股份有限公司, 常州 213167; 3. 常州工业职业技术学院, 常州 213164; 4. 江苏理工学院材料工程学院, 常州 213001)

摘 要 高性能 QT600-10 高硅固溶材质的车桥支架作为汽车底盘系统的核心承力部件, 其铸造质量直接关系到整车的安全性、可靠性及耐久性。通过对铸造工艺进行软件模拟及优化设计, 在实际生产中选用低稀土 REMgSiFe 球化线, 采用喂丝球化法结合多次复合孕育的处理工艺进行试制, 优化铸造工艺参数并对关键参数做重点管控, 对试制试样进行内部缺陷验证, 结果满足客户对高性能 QT600-10 车桥支架技术规范要求。

关键词 QT600-10; 高硅固溶; Magma 软件; 喂丝球化; 工艺优化

中图分类号 TG146; TP311

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250273

Research and Trial Production of Casting Process for High-performance QT600-10 Axle Bracket

MA Yandong^{1,2}, ZHAO Qianyi³, TANG Yang³, GE Maozhong⁴, SUN Xiangguang², ZHOU Zhengshou²

(1. School of Electro-mechanical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006;

2. Jiangsu Hengli Hydraulic Co., Ltd., Changzhou 213167; 3. Changzhou Institute of Industry Technology, Changzhou 213164; 4. School of Material Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001)

Abstract: As core load-bearing component of automotive chassis system, the casting quality of high-performance QT600-10 high-silicon solid solution bracket directly impacts the overall safety, reliability and durability of the vehicle. The casting process was simulated and optimized by Magma software, and low-rare-earth REMgSiFe spheroidizing wire was selected for actual production with a combination process of wire feeding spheroidizing and multiple inoculation. Casting production were optimized to strictly control key parameters, and internal defect verification of trial production results were verified, which meet the technical specifications for high-performance QT600-10 axle bracket.

Key Words: QT600-10, High-silicon Solid Solution, Magma Software, Feeding Spheroidizing, Process Optimization

某商用车桥支架用于连接车桥与车身/车架, 是车辆底盘系统的关键承载部件, 承受并传递各种动态载荷, 通常采用球墨铸铁作为主体材料进行生产。然而, 为了满足轻量化设计要求, 同时还要兼顾承载强度, 传统的球墨铸铁材质已无法满足车桥支架的应用需求。

为了使生产的铸件得到高抗拉强度、较高的屈服强度和伸长率等综合性能的 QT600-10 固溶强化材质^[1], 通过借助 CAE 软件可对设计方案进行铸造充型并对模拟凝固过程, 选择出最优的设计方案, 以缩短产品试制周期、降低生产成本及提高材料利用率^[2-9]。

基于铸造 CAE 技术, 采用数值模拟软件对原工艺方案的充型和凝固过程进行模拟, 分析原工艺方案中缺陷形成的原因并进行改进。采用优化工艺方案来改善铸件品质, 旨在为相关生产提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 产品结构

车桥支架是商用车悬架系统最为重要的支撑部件, 连接着空气弹簧、减震器、车桥及相关连杆等部件, 用于车辆行驶中的减震、支撑等, 保障行驶稳定性与舒适性。每个商用车悬架系统使用 4 件。车桥支架壁厚最小处为 7 mm, 最大处为 50 mm, 单件质量为 31.42 kg, 壁厚不均匀且结构较为复杂, 同时性能要求较高。由于需要同其他部件相连接, 零件上有许多连接孔, 但由于特殊都不予铸出, 形成独立热节, 对补缩要求较高。中间部件需要通过砂芯铸造成型。铸件的三视图见图 1。

收稿日期: 2025-07-05; 修订日期: 2025-07-14

基金项目: 江苏省工业和信息化厅产业转型升级资助项目(BA2019019); 江苏省产学研合作资助项目(BY2021173)

第一作者: 马艳东, 男, 1987 年出生, 高级工程师, E-mail: mayandong@hengli.net

引用格式: 马艳东, 赵千一, 汤洋, 等. 高性能 QT600-10 的车桥支架铸造工艺研究与试制[J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46(7): 1096-1100.

MA Y D, ZHAO Q Y, TANG Y, et al. Research and trial production of casting process for high performance QT600-10 axle bracket[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(7): 1096-1100.

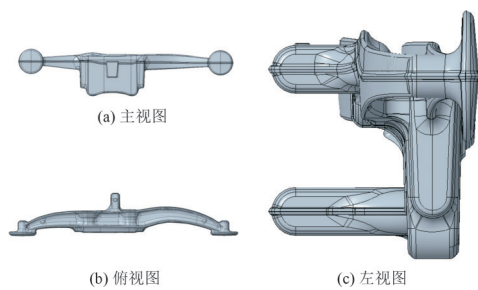


图1 车桥支架三视图
Fig.1 Three-view of axle bracket

1.2 技术条件

车桥支架是商用车的悬架系统关键部件,采用高强度、高伸长率固溶强化球墨铸铁材质,铸件的化学成分和力学性能分别见表1和表2。

表1 车桥支架铸件的化学成分

Tab.1 Chemical composition of axle bracket %								
w_B								
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mg	Fe
3.60~3.90	2.00~4.20	0.10~0.40	≤ 0.05	≤ 0.015	≤ 0.05	≤ 0.05	0.025~0.050	余量

表2 车桥支架技术要求

Tab.2 Technical requirements for axle bracket					
材质	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	布氏硬度(HBW)	微观组织
EN-GJS-600-10	>600	>470	>10	200~230	珠光体 $\leq 5\%$

1.3 试验条件

选用FS60 6T 4 250 KW 250 HZ ABP中频无芯感应试验电炉进行熔炼,喂丝球化使用ZORC Dual Track Injection Master双通道喂丝机,造型设备选用KW静压造型线,砂处理设备选用DW29/5混砂机。使用PUMP全自动浇注机进行浇注,待铸件冷却至室温后进行表面清理,然后对铸件进行检测。

2 车桥支架铸造工艺分析与讨论

2.1 分型面的选择及砂芯设计

分型面应尽量平直以减少合型误差,重要的加工面需置于同一砂型内。浇注系统布置应依托分型面以实现补缩效率最大化,厚大的部位应靠近分型面以便设置冒口,防止缩孔缺陷。尽管铸件本体并不是上下对称,但最大截面位于水平方向,且铸件本体两侧均有圆形特征结构。因此,采用水平分型方式进行起模,见图2。

图3为铸件与砂芯装配及砂芯结构示意图。车桥支架的砂芯均放置于铸件中间侧面的凸起区域,且全部位于下箱,见图3a。采用水平芯头,在芯头的两侧增

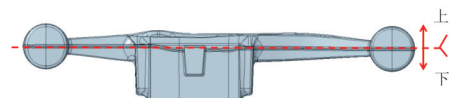


图2 分型面示意图

Fig.2 Schematic diagram of parting surface

加两个辅助定位,以防砂芯向前倾斜且便于定位,见图3b。此外,为了下芯方便,芯头设计了一定的斜度,芯头与芯座之间也要留有间隙。

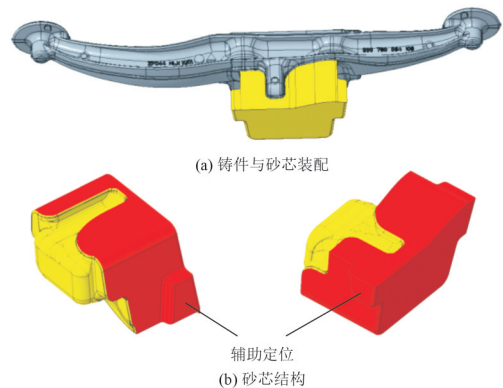


图3 铸件与砂芯装配及砂芯结构示意图

Fig.3 Schematic diagram of casting, sand core assembly and sand core structure

2.2 熔炼工艺

试验原料为高纯Q10生铁、FG-1废钢和低温球铁类回炉料,按一定配比加入FS60 6 T 4 250 kW 250 HZ TP ABP中频无芯感应试验电炉中进行熔炼,炉料配比见表3。低稀土REMgSiFe球化线,采用喂丝球化法结合多次复合孕育的处理工艺进行试制,采用PUMP全自动浇注机进行浇注,浇注温度为1 415 ℃,冷却到300 ℃后开箱。

表3 炉料配比方案

Tab.3 Furnace charge proportion %		
w_B		
高纯生铁	优质废钢	QT400回炉料
30	40	30

3 铸造工艺方案对比

3.1 模拟的初始条件

通过Magma网格划分功能,最终将整体模型网格划分为10 529 584个节点,447 573个单元,所有网格均为六面体网格。基于Magma软件中传热系数的分类,并结合实际经验,将砂型与铸件、砂芯与铸件间传热系数设置为“TempIron”,该组传热系数随浇注过程中温度变化而改变,见图4。通过查阅资料并结合实际生产经验,选取模拟浇注温度为1 405~1 425 ℃,一般优先采用中间浇注温度,因此将初始

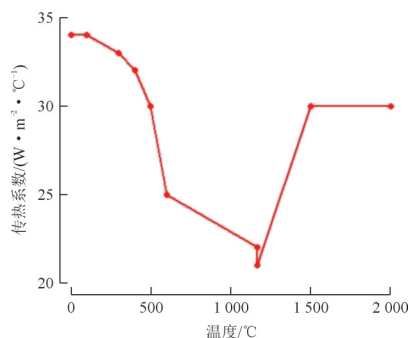


图4 传热系数随温度变化曲线

Fig.4 Variation curve of heat transfer coefficient with temperature

浇注温度设为 1 400 ℃。

3.2 初始方案模拟分析

初始方案采用水平浇注方式,从铸件的最大水平截面处分型;采用中间冒口入水和两个辅助内浇道分散引入铁水,确保快速均匀的充型,在内浇道前面放置过滤系统,以有效进行挡渣和避免紊流的产生;采用薄而宽的梯形内浇道与冒口相结合的补缩工艺;为保证型腔和砂芯内气体顺利排出,分型面和砂芯上增加排气。车桥支架铸造工艺方案整体布局三维模型见图5。

图6为充型不同时刻的温度场变化。从图6a可以看出,浇口附近温度较高,金属液前沿因与型壁热交换出现温度梯度,可能在拐角处因流速慢导致局部温度

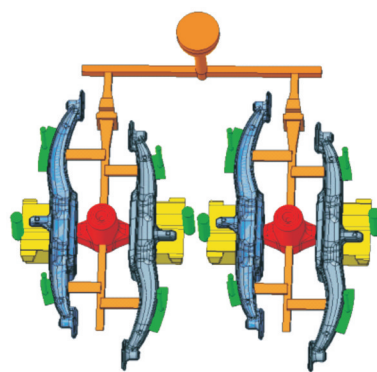


图5 铸造初始方案

Fig.5 Initial casting process scheme

下降更快。金属液刚流入铸型,前端接触型壁区域温度开始下降,从初始的 1 415 ℃降至 1 390 ℃左右,未充型区域仍为铸型初始温度。当充型 50% 时,铸型内部金属液温度出现明显差异,局部金属液热量损失较多。边缘接触型壁处降至 1 350 ℃以下,温度梯度更明显,需注意冷隔风险,见图6b。从图6c可以看出,液流末端因流动阻力大、散热时间长,温度下降明显,大部分区域被金属液填充,未充型部分温度约为 1 300 ℃,已充型区域靠近型壁处温度降至 1 250 ℃以下。从图6d可知,全铸型充满时,整个铸型平均温度约为 1 300 ℃,型壁附近温度最低(1 230 ℃),温度场呈现“中心高、边缘低”的梯度分布,且随充型进度推进,整体温度逐步下降而薄壁区域的温度骤降,易产生充型缺陷。

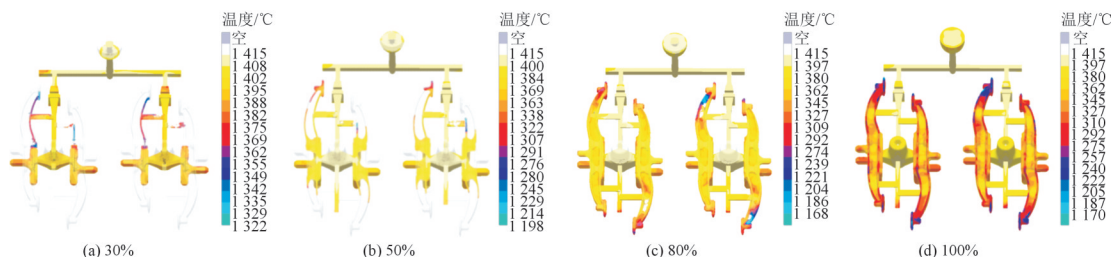


图6 不同时刻充型过程温度场模拟

Fig.6 Temperature field simulation of filling process at different moments

图7为不同时刻凝固场模拟结果。从图7a可知, $t=270$ s时,铸件的凝固率达到30%,因为铸件为长窄型形状,两端薄,所以两端优先凝固,但两端搭子因为比较厚,还存在独立液相未凝固,此处容易产生缩松。 $t=493$ s时,铸件的凝固率达到50%,两端厚大区域已经凝固完成,中间也逐渐开始凝固,此时冒口顶端已经凝固,但冒口颈处还是液相补缩状态,能有效对铸件进行补缩,见图7b。 $t=1\,063$ s时,铸件的凝固率达到80%,铸件内部还有局部未凝固完成,中间冒口也正处于逐渐凝固状态,补缩能力变弱,可能存在缩松、缩孔等铸造缺陷,见图7c。 $t=2\,580$ s时,铸件的凝固速率达到99%,铸件内部完全凝固,冒口还存在局部液态,见图7d。

图8为热节模拟示意图和凝固中后期铸件液相分布的剖切图。从图8a可知,在车桥支架的两端厚大部位还存在独立的热节,此厚大区域往往是铸件最后凝固的地方,易产生缩松和缩孔等缺陷。从图8b可以看出, $t=348$ s时,铸件大部分薄壁区域已经凝固,但此时两端还存在独立的液相区域,此处没有冒口进行补缩,补缩通道也已经关闭,表明铸件两端会产生铸造缺陷。

图9为补缩系统模拟缩松结果。可以看出,铸件存在4处缩松区域,缺陷数量较少,主要集中在两端和内浇道入水处。说明设计方案还存在铸造缺陷,需要进行进一步的优化改进。

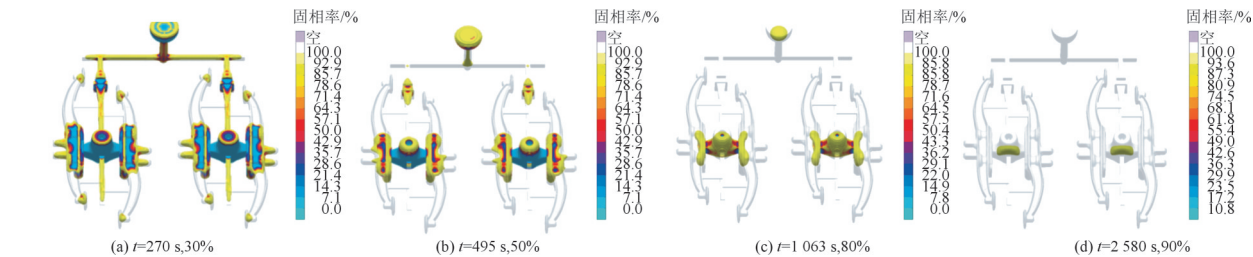


图 7 不同时刻凝固场模拟结果
Fig.7 Simulation of solidification process at different moments

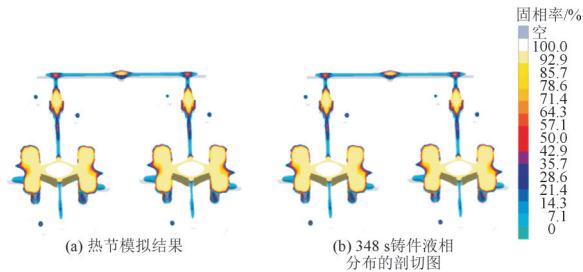


图 8 热节模拟以及凝固中后期铸件液相分布
Fig.8 Simulation results of hot spot and profile of liquid phase distribution in middle and later stage of solidification

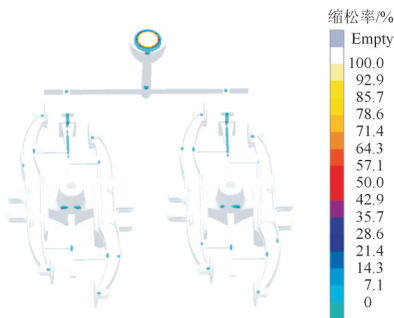


图 9 缩松模拟结果
Fig.9 Simulation results of shrinkage and porosities

3.3 优化设计后的方案分析

从缺陷分布分析,铸件两端铁水提前断流,靠铸件本身自补缩,还是存在缩松、缩孔的风险。中间区域铸件壁厚较厚,冷却慢,导致冒口补缩时间长,容易致使冒口提前凝固。在入水处,通过缩松模拟结果,看出铸件在内浇道处容易产生缩松,铸件反补缩浇道^[8-9]。

根据方案 1 的模拟,在缺陷处增加两个冒口。球墨

铸铁冒口设计采用两种方法:收缩模数法和比例法。在实际工程应用过程中,通常采用收缩模数法进行冒口设计。铸件模数示意图和优化方案见图 10。

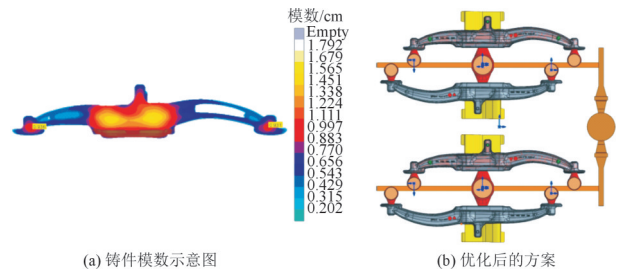


图 10 铸件模数示意图及优化后的方案
Fig.10 Schematic diagram of casting modulus and Optimized scheme

利用 MAGMA 软件计算出两端铸件模数约为 0.94 cm。为了保证冒口有足够能力补缩铸件,需要满足两端冒口铸件模数 $M_R \geq$ 铸件的模数 M_c ,冒口铸件模数计算公式^[7]为:

$$M_R = 1.2M_c$$

计算得到 $M_R = 1.13$ cm。

图 11 为优化工艺后不同时刻的凝固变化图。从图 11a 可以看出,凝固到 30% 时,主要还存在 3 处凝固位置,并且此时 3 个冒口还保留充足的液态来补缩铸件。增加冷铁位置,凝固速率比无冷铁时快,有利于增加冒口的补缩能力。从图 11b 可见两端小冒口开始发生凝固,但是内部还保留液体,以满足补缩铸件的能力。中间冒口仍然保留充足液态并且还没有开始凝固。从图 11c 可以看出,两端已经凝固完成,中间部位剩余部分未凝固,冒口颈表层也开始凝

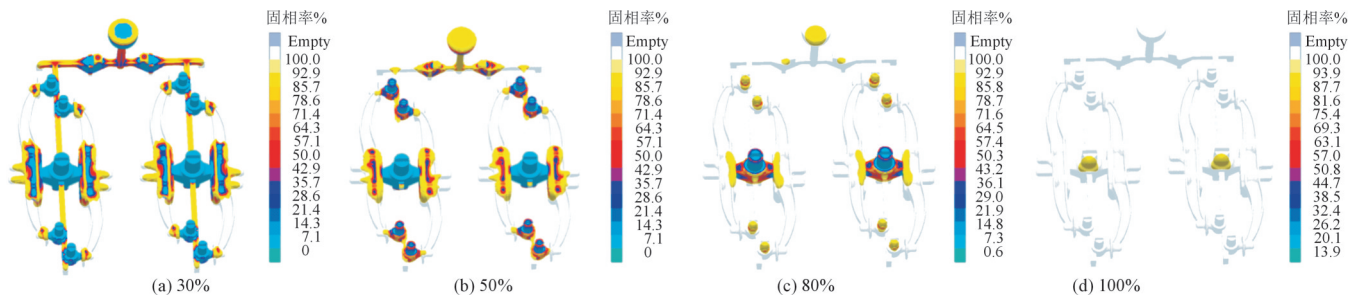


图 11 优化后凝固过程模拟
Fig.11 Simulation of solidification process after optimization

固。从图 11d 可以看出,最后凝固阶段,铸件先凝固完成,冒口最后凝固,实现顺序凝固,且没有出现断流现象。

图 12 为优化工艺方案的热节和缩松。由图 12a 可以看出,铸件两端的热节已经完全消失,两侧无独立的液相区域,热节均在冒口中,说明增加冒口后能有效解决缩松问题,而中间厚大位置,冒口补缩难度大。由于增加了两款冷铁,吸收了部分铸件表面的热量,有效保证冒口的补缩能力,从而降低了凝固后期铸件产生独立液相的可能性。从图 12b 也可以看出,铸件内部完全没有缩松。从缩松模拟可以看出铸件剩余液相部位未出现缩孔。缩孔部位都集中在冒口和浇注系统里,铸件质量满足要求,说明方案合理。

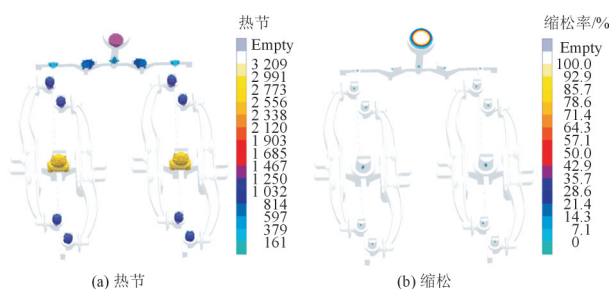


图 12 优化后缺陷模拟结果
Fig.12 Defect simulation results after optimization

3.4 铸件生产试制与品质分析

采用优化方案进行车桥支架试制,并经过液压钳分离浇注系统,抛丸、打磨得到毛坯成品,见图 13。



图 13 车桥支架的实物照片
Fig.13 Products of axle bracket

为了验证模拟结果缺陷部分和热结部分,铸件进行 DR(数字射线成像)检测,结果见图 14。结果显示无缩松,气孔等铸造缺陷。对模拟缩松缺陷的位置进行解剖 PT 着色探伤,见图 15,也未发现缩松、气孔等缺陷。

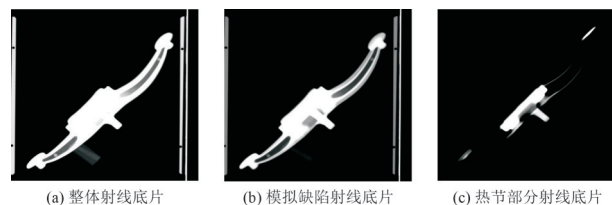


图 14 DR(数字射线成像)检测结果
Fig.14 DR detection results

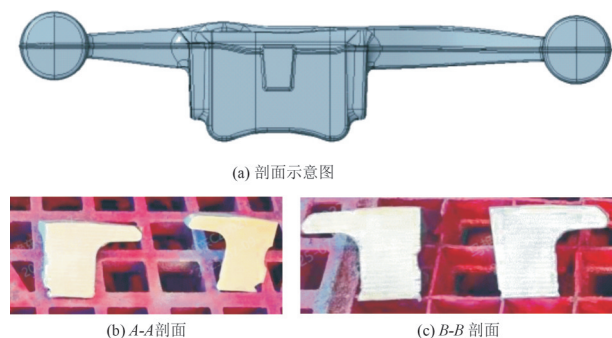


图 15 着色渗透检测结果
Fig.15 Color penetration detection results

4 结 论

针对初始工艺方案模拟中发现的缩松问题,依据模拟结果,针对性地对模拟显示缩松倾向大的区域,采用增设 2 个冒口的改进措施。通过 DR 数字精准定位内部缩松位置与着色探伤对产品进行质量验证,确认缺陷得到有效消除。

参 考 文 献

- [1] 吕乐华,张杰琼,范随长,等.高硅固溶强化球墨铸铁的试制[J].铸造技术,2021,42(9):777-779.
- [2] 张玉磊,张纬,张纯,等.轨道交通 K6 侧架铸件铸造工艺设计与试制[J].铸造,2022,71(2):210-214.
- [3] 闫亮亮,刘佳敏,薛帅,等.大型复杂齿轮箱壳体差压铸工艺的优化[J].热加工工艺,2022(17):63-65.
- [4] 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.
- [5] 郭平,李洪应.球墨铸铁支架铸件的铸造工艺改进[J].现代铸铁,2021,41(3):13-17.
- [6] 唐方艳,梅益,薛茂远,等.大型机床底座铸造工艺设计与优化[J].铸造,2022,71(1):103-108.
- [7] 孙逊,时坚,税国彦,等.高速列车铸钢制动盘铸造工艺研究[J].铸造,2020,69(12):1348-1355.
- [8] 马艳东,李松杰,周正寿,等.高压油缸球墨铸铁端盖的铸造工艺优化与试制[J].铸造,2022,71(11):1422-1426.
- [9] 周传龙,何强,周宏根,等.基于 ProCAST 的柴油机活塞铸造工艺模拟及优化[J].铸造,2022,71(5):632-636.

(编辑:张正贺)