

DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2026.5225

基于 3D 打印的高压开关铝合金壳体铸造成型工艺

杨兴翔¹, 夏永喜¹, 李沛根²

(1. 西安西电开关电气有限公司 陕西 西安 710077 2. 西安西开精密铸造有限责任公司 陕西 西安 712000)

摘要:介绍了高压开关用某型号复杂铝合金壳体采用 3D 打印砂型技术的铸造成型过程。结合 3D 打印砂型技术设计灵活性、制造快捷性的优势,进行了针对性的铸造工艺设计,包括浇注系统设计、冷铁设计以及砂型(芯)打印方案设计等,并通过模拟仿真技术验证优化工艺设计。经铸件制备与检验验证,最终获得符合高压开关行业技术要求的合格产品。相较于传统模具方案,该工艺将产品研制全周期缩短 50%以上,无需高成本模具投入,实现了产品快速响应、快速制备与快速迭代,显著提升研制效率,并为铸件定制化、差异化、复杂化设计提供了便捷路径。

关键词:3D 打印;铝合金铸件;铸造工艺设计

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)01-0108-06

Casting Forming Process of a Certain Type of High-voltage Switchgear Cast Aluminium Alloy Shell Based on 3D Printing

YANG Xingxiang¹, XIA Yongxi¹, LI Peigen²

(1. Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China; 2. Xi'an XK Precision Founding Co., Ltd., Xi'an 712000, China)

Abstract: A process of casting a complex aluminium alloy shell for high-voltage switches via 3D printing sand mold technology was introduced. Leveraging the advantages of 3D printing sand mold technology in design flexibility and rapid manufacturing, a targeted casting process design was conducted, including a gating system design, chill design, and sand mold (core) printing scheme. The optimized process design was verified via simulation technology, and the qualified products meeting the technical requirements of the high-voltage switch industry were finally obtained by casting preparation and inspection verification. Compared with the traditional mold scheme, the process will research the product. The whole production cycle is shortened by more than 50% without high-cost mold investment, which results in a rapid response, rapid preparation and rapid iteration of products, significantly improves development efficiency, and provides a convenient path for customized, differentiated and complex designs of castings.

Key words: 3D printing; aluminium alloy casting; casting process design

目前,铸造生产中适合 3D 打印的材料发展已经比较全面,其中金属、塑料、砂是最为常用的增材制造材料^[1-2]。3D 打印技术不仅可直接制备铸件,更在铸造用型芯的无模化 3D 打印领域形成了成熟且广泛的应用,即型芯快速成型技术。该技术的原材料为硅砂、树脂、固化剂,价格相对较低;成型方法亦相对简单,仅需喷射黏结剂,无需额外烧结处理。当前技术已日趋成熟,几乎可间接制备任何复杂形

状的铸件,能够有效解决单件、小批量生产场景下模具投入成本高、试制周期长的弊端^[3-9]。且计算机技术在铸造行业的快速发展与广泛应用,借助专业铸造软件可模拟能够模拟铸件的充型过程、温度梯度演变过程及凝固过程^[10-13],进而通过分析模拟结果优化铸造工艺参数^[14-20],可以缩短产品试制周期,降低生产成本^[21]。

本文采用砂型 3D 打印技术实现高压开关行业

收稿日期: 2025-10-17

作者简介: 杨兴翔,1977 年生,本科,工程师。主要从事金属材料成型、机械设计及制造。Email: yangxx96@sohu.com

通信作者: 李沛根,1996 年生,本科,助理工程师。主要从事金属材料成型。Email: 1161630811@qq.com

夏永喜,1981 年生,本科,高级工程师。主要从事金属材料成型。Email: rat-2008@163.com

引用格式: 杨兴翔,夏永喜,李沛根. 基于 3D 打印的高压开关铝合金壳体铸造成型工艺[J]. 铸造技术, 2026, 47(1): 108-113.

YANG X X, XIA Y X, LI P G. Casting forming process of a certain type of high-voltage switchgear cast aluminium alloy shell based on 3D printing[J]. Foundry Technology, 2026, 47(1): 108-113.

用某型号复杂铝合金壳体铸件的高效制备。详细介绍了基于砂型 3D 打印技术而进行的浇注工艺的设计与优化,以及整体砂型的设计与制备,最终通过铸件浇注验证,确保产品满足相关技术指标,有效解决目前行业内复杂铝合金壳体铸件试品研制周期长,费用投入大的问题,实现复杂铝合金铸件的快速高效制备。

1 铸件结构及工艺简介

高压开关用某型号铝合金壳体多具备复杂结构特征,集成了用于固定与连接其他部件的安装孔、凸台等功能结构,此类结构主要承担电气元件安装、气体密封保障及机械支撑等核心功能。其结构复杂性对铸造工艺的成型精度、稳定性及可行性提出了严苛要求。

以某复杂铝合金壳体铸件为对象,如图 1 所示,其轮廓尺寸为 $1\ 190\text{ mm}\times 950\text{ mm}\times \phi 790\text{ mm}$,典型壁厚为 15 mm,材质为 ZL101A,例行工作压力 0.5 MPa,例行水压试验 1.3 MPa,是典型的隔离开关壳体,带有复杂密封面设计结构。

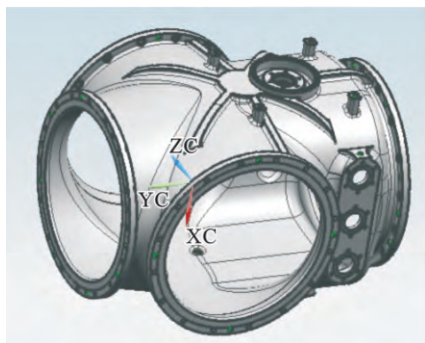


图 1 某复杂铝合金壳体铸件三维模型
Fig.1 3D model of complex aluminium alloy casting

针对该铸件结构特点,拟采用低压浇注方式。同时,为了实现更好地充型与补缩效果,浇道设计遵循随铸件结构变化的原则,选用底注式浇注系统,浇道整体呈十字状分布。通过铸造工艺模拟仿真对浇注工艺进行优化,以确定最佳的铸造工艺。

2 砂型设计

采用 3D 打印砂型技术,可将多个复杂型芯整体化,一次成型大尺寸砂芯与砂型,减小分体芯组合过程中产生的尺寸累积误差。因此,在不影响浇注系统设计的基础上,设计整体式的砂型/型芯结构。该铸件选择卧式低压浇注工艺,铸件砂型依据零件结构与操作需求分为上中下 3 层,下层砂型包含浇注系统横浇道与低压铸造浇口,中层包含铸件下半型与浇注系统直浇口,上层为铸件上半型。

2.1 浇注系统及冷铁设计

浇口设置在法兰及凸块位置。冷铁设置在法兰、凸块等厚实结构加工面,冷铁为使用随铸件同步打印的冷铁砂型,随即浇注铝液后得到的铝质冷铁,铝质冷铁厚度为放置位置结构厚度的 2~4 倍^[22]。3D 打印技术可实现冷铁之间 1~2 mm 的间隙控制,且砂型强度仍能满足使用需求,结合实际需求并简化冷铁形状,最终考虑将冷铁间隙定为 5 mm,冷铁均布,每处法兰冷铁 12 块。

浇注系统横浇道截面为 $90\text{ mm}\times 60\text{ mm}$ 矩形,法兰处浇口直径 80 mm,并带有 35 mm 高的收缩颈,直浇口高度依据中层砂型厚度减去法兰半径而定。冷铁浇注方式为上下型,上型设计冒口,根据冷铁结构选为卧式浇注。设计的浇注系统与冷铁如图 2 所示。

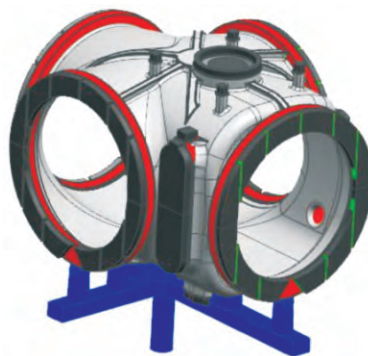


图 2 铸件浇注系统与冷铁
Fig.2 Casting gating system and chill

2.2 砂芯设计

根据毛坯+浇注系统+冷铁图完成砂芯及砂型设计,通过实体组合完成,芯头长度 30 mm,芯头圆周间隙 0.3 mm^[23],结合生产操作情况将轴向芯头间隙扩大至 1 mm,减少合箱时因碰撞产生的砂芯端头掉砂情况。

根据产品结构内部设计加强筋,在保证砂芯强度的前提下,对砂芯进行适当减重,内腔掏空,保证砂芯壁厚强度足够。砂芯在浇注前使用堵头进行封堵。考虑起吊结构及起吊位置。铸件砂芯设计如图 3 所示。

2.3 砂箱设计

为保证砂型低压铸造过程的安全性、可靠性,并结合生产经验将砂型最小吃砂量定为 100 mm。采用凹凸止口进行定位,并对砂型外轮廓两个相邻竖边进行倒角,防止合模过程中左右颠倒,倒角 $R40$ 。止口高度 30 mm、宽度 20 mm,凹凸止口斜面间隙 0.4 mm,拔模斜度 10° ,止口顶部倒圆角 $R5$ 。砂箱设计如图 4 所示。在砂型长度方向两侧设置起吊用吊耳,最小直径 240 mm,厚度 100 mm。

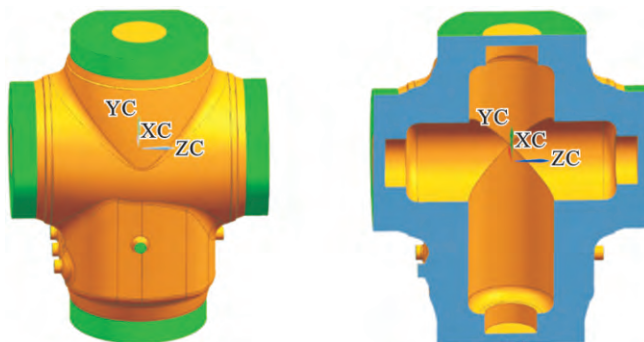


图3 铸件砂芯
Fig.3 Sand core for casting

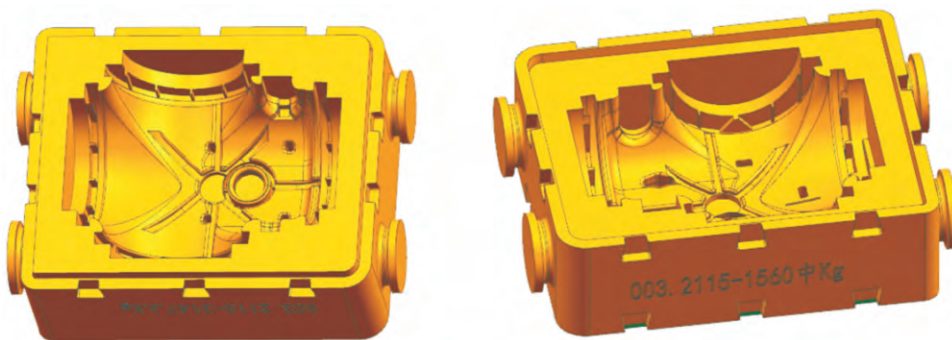


图4 铸件砂箱
Fig.4 Sand flask for casting

2.4 锁箱块

在砂型分型面处设计“蝶形”锁箱块和“蝶形”凹槽,通过“蝶形”锁箱块对相邻两型进行固定,“蝶形”锁箱块厚度为 50 mm,对应凹槽厚度,冷铁锁箱块对应凹槽为 30 mm,低压浇注用锁箱块对应凹槽厚度 60 mm。

3 工艺仿真模拟

设计铸件低压铸造工艺参数,进行仿真模拟计算。采用 AnyCasting 铸造模拟仿真软件进行仿真计算,将使用 UG NX 10.0 绘制好的三维模型使用 stl 格式导入到 AnyCasting 模流分析软件中,完成对模流分析前置参数设定。模型划分均匀网格,网格数约为 1 200 万。本次使用铝合金牌号为 ZL101A,其材料液相线温度为 614 ℃,固相线温度为 556 ℃。铸件与砂型之间的换热系数采用 AnyCasting 软件数据库中 ZL101A 与呋喃树脂砂之间的换热系数,材料选用软件数据库中对应组合,并按照实践经验设置初始温度与浇注温度,初始条件参数设置见表 1。

本研究首先开展充型过程的耦合计算,进而对凝固过程进行数值模拟,并对铸件的浇注过程进行模拟验证。实际生产中,同类型壳体升压参数选择如表 2 所示,基于该参数的充型过程模拟结果如图 5 呈现,铸件各部位的凝固过程模拟结果如图 6 所

表 1 仿真初始条件

Tab.1 Initial conditions for simulation

Metal material	Sand molding material	Pouring temperature/℃	Shell temperature/℃
ZL101A-T6	Furan resin sand	700	80

表 2 低压铸造加压参数

Tab.2 Pressure parameters in low-pressure casting

Phases	Rising	Mold filling	Shell formation	Pressurization	Pressure holding
Pressure/mbar	230	630	630	1 000	1 000
Time/s	25	40	5	2	1 000

示。采用 AnyCasting 概率缺陷参数模块中的残余熔体模数来预测缺陷的产生^[24-25],疏松缺陷的预测结果如图 7 所示。

模拟结果显示铝液充型过程约 24 s,液面波动幅度≤2 mm,铝液流动整体平稳,未出现紊流、卷气等现象,可全部充满型腔。铸件凝固过程温度梯度分布合理,收缩过程由浇道补缩通道持续补给,未出现收缩受阻现象,有利于实现铸件顺序凝固。通过残余熔体模数的结果来看,疏松缺陷的分布主要位于浇道位置与顶部非关键位置,铸件本体部位无疏松缺陷,不影响产品力学性能与密封性能。

此次设计的浇注系统能够保证金属液平稳充型,通过低压铸造浇道补缩作用,基本可以实现铸件的顺序凝固,残留的孤立金属液体由冷铁进行激冷,保证铸件本体部位组织致密,无疏松缺陷。

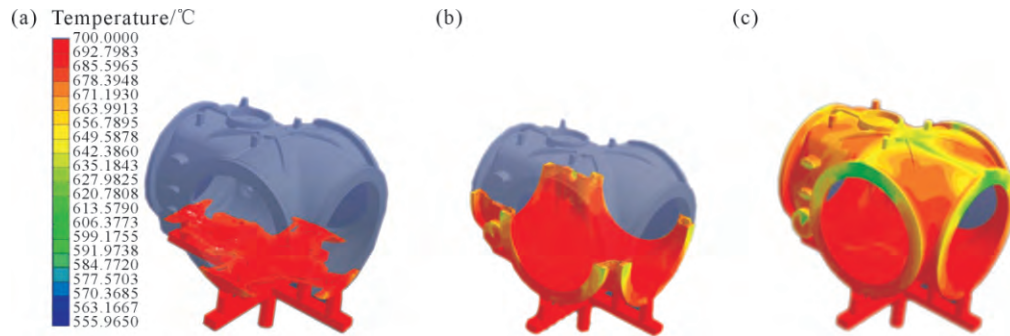


图 5 充型过程的仿真结果:(a) 充型 30%;(b) 充型 60%;(c) 充型 100%

Fig.5 Simulation results of the filling process: (a) filling 30%; (b) filling 60%; (c) filling 100%

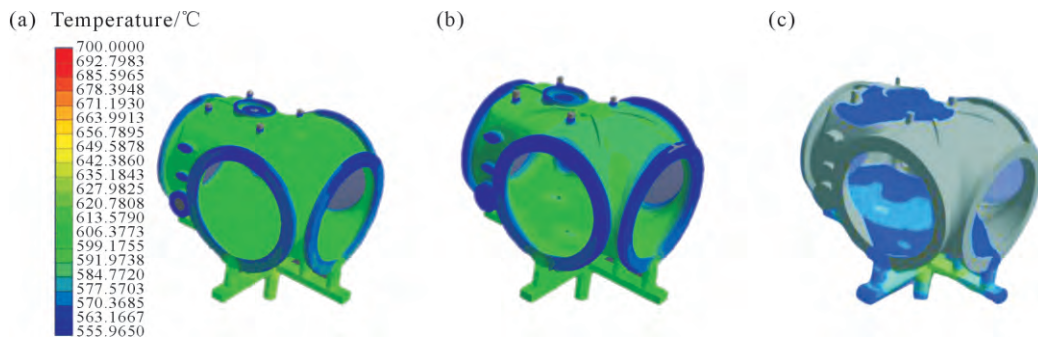


图 6 凝固过程的仿真结果:(a) 凝固 30%;(b) 凝固 60%;(c) 凝固 90%

Fig.6 Simulation results of the solidification process: (a) 30% solidified; (b) 60% solidified; (c) 90% solidified

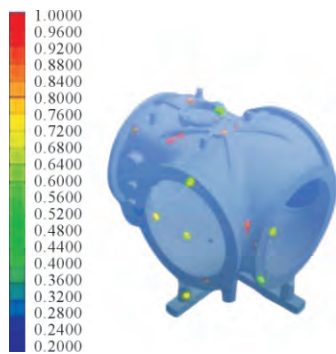


图 7 疏松缺陷的仿真预测结果

Fig.7 Simulation prediction results for porosity defects

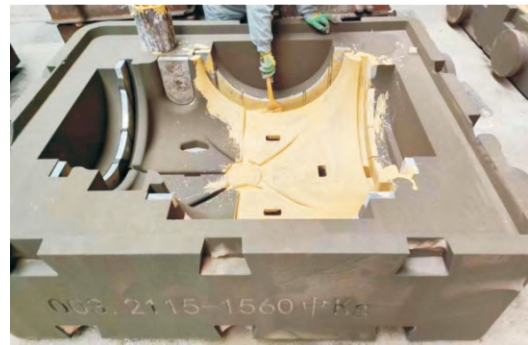


图 8 砂型制备

Fig.8 Sand mold preparation

4 试制过程

使用国产 3D 打印技术及设备进行砂芯、砂型打印。将砂型所需冷铁同样采用 3D 打印设备制作,提前浇注冷铁,使用黏结剂将冷铁黏结在对应位置上,按照工艺要求对砂型及砂芯表面涂刷防粘砂涂料,将刷涂后的砂型放入烘窑内 120℃ 烘烤 1 h,最后进行铸件浇注。砂型制备如图 8 所示。

采用合格的成品铝锭进行了铝液熔化,变质处

理及精炼除气后进行检验,试样化学成分及氢含量均满足生产要求,试样化学成分合格后测量低压铸造炉内金属液温度 698℃。试样化学成分见表 3。

浇注后 8 h 打箱,对铸件进行清砂及表面清理后,铸件表面无可见气孔、缩松等缺陷。对铸件及同炉浇注试棒进行同炉次 T6 热处理,对同炉试棒铸件进行了力学性能检查,结果见表 4,表明力学性能满足相关标准要求。铸件外观检查并合格后入库,铸件实物如图 9 所示。铸件加工并进行成品检验后,所

表3 化学成分要求及检测结果

Tab.3 Chemical composition requirements and test results

(mass fraction/%)							
Element	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
GB/T 1173-2013	6.5~7.5	≤0.2	≤0.1	≤0.1	0.25~0.45	≤0.1	0.08~0.20
Test result	7.37	0.13	0.001 0	0.002 3	0.41	0.005 8	0.110 0

表 4 力学性能
Tab.4 Mechanical properties

Test items	Tensile strength/MPa	Elongation /%	Hardness (HB)	Yield strength /MPa
Test criteria	≥295	≥3.00	≥90	-
1#	310.3	6.00	101.0	236.1
2#	314.7	6.60	98.0	238.4

有尺寸均满足图纸要求,对首件产品进行例行水压检测和气密性检查,检查结果均合格,气密性试验检测情况见表 5。

表 5 气密性试验
Tab.5 Pressure test

Test item	Gas measured concentration(He)	Gas pressure /MPa	Holding time/s	Test result
Test criteria	≥90%	0.65	60	Annual leakage rate≤0.1%
Test result	99%	0.65	60	Annual leakage rate≤0.1%



图 9 铸件实物
Fig.9 Prototype casting

5 结论

(1)研究了某复杂铝合金壳体铸件采用砂型 3D 打印技术,从铸造工艺设计、砂型设计与分型到铸件制备与检验,最终获得符合技术要求的铸件,研制全周期比传统模具方案缩短了 50%以上,实现了产品制造的快速响应、快速制备、快速迭代,显著提高了研制效率。

(2)采用砂型 3D 打印不需要模具,可节省高成本的模具投入,快速应对铸件结构改动要求,为铸件定制化、差异化、复杂化的设计提供便捷条件。

参考文献:

- [1] 耿佩. 浅析 3D 打印技术在铸造成形中的应用[J]. 中国铸造装备与技术,2016(1): 8-9.
GENG P. Analyses of the application of 3D printing in teaching

- practice[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2016(1): 8-9.
- [2] 陈琛,许新凯,程雪琪. 智能制造背景下增材制造(3D 打印)技术的创新发展与应用探索[J]. 上海轻工业,2025(3): 118-120.
- [3] 李天才,刘铁,曹继伟,罗凯,刘秀秀,刘于青,王勇,何玉玉,张芸芸. 砂型 3D 打印技术在铸造铝合金领域的研究与应用[J]. 材料导报,2024, 38(S2): 372-376.
LI T C, LIU Y, CAO J W, LUO K, YAN X X, LIU Y Q, WANG Y, HE Y Y, ZHANG Y Y. Research and applications of sand mold 3D printing technology in the field of casting aluminum alloy[J]. Materials Reports, 2024, 38(S2): 372-376.
- [4] 陈耀波,孔德飞,林晓春,袁浩锋,彭昌旺,李家宁. 应用 3D 打印砂型技术实现一体化铸造大型汽车铝合金底盘[J]. 铸造, 2025, 74(3): 298-303.
CHEN Y B, KONG D F, LIN X C, YUAN H F, PENG C W, LI J N. Application of 3D printing sand mold technology to achieve integrated casting of large automotive aluminum alloy chassis[J]. Foundry, 2025, 74(3): 298-303.
- [5] 张金雨,周绍雷. 3D 打印技术在驱动桥壳铸件开发中的应用[J]. 中国铸造装备与技术,2024, 59(6): 64-67.
ZHANG J Y, ZHOU S L. Application of 3D printing technology in the development of drive axle housing castings [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2024, 59(6): 64-67.
- [6] 黄耀光. 基于砂型 3D 打印技术的铝合金异形联通管铸造实践[J]. 特种铸造及有色合金, 2021, 41(5): 611-613.
HUANG Y G. Casting practice of aluminum alloy special-shaped connected tube based on sand mold 3D printing technology [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2021, 41(5): 611-613.
- [7] 古良,马亮,赵磊,吴昊,李鑫. 应用 3D 打印技术优化砂型铝合金低压铸造工艺[J]. 金属加工(热加工),2023(7): 103-105.
- [8] 马丽斌. 基于砂型 3D 打印的汽车缸盖铸造工艺研发[J]. 机械研究与应用,2024, 37(5): 169-171.
MA L B. Research and development of casting process for automotive cylinder head based on sand 3D printing[J]. Mechanical Research & Application, 2024, 37(5): 169-171.
- [9] 董云菊. 3D 打印技术在阀体铸件研发中的应用[J]. 中国铸造装备与技术,2025, 60(2): 76-84.
DONG Y J. Application of 3D printing technology in the development of valve casting[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2025, 60(2): 76-84.
- [10] 夏永喜,尹珍珍,阴瑜娟,刘楠. 仿真计算在 GIS 产品铸件工艺设计中的应用[J]. 铸造技术,2020, 41(8): 764-766.
XIA Y X, YIN Z Z, YIN Y J, LIU N. Application of simulation calculation in process design of GIS castings[J]. Foundry Technology, 2020, 41(8): 764-766.
- [11] 高世阳,朱立华. 商用车铝合金轮毂模拟分析及工艺优化[J]. 铸造技术,2022, 43(1): 62-65.
GAO S Y, ZHU L H. Solidification simulation and process optimization of commercial vehicle aluminum alloy hub[J]. Foundry Technology, 2022, 43(1): 62-65.
- [12] 李梅,彭银利. 低压铸造铝合金轮毂的数值仿真[J]. 中国机械, 2023(19): 52-55.
- [13] DONG G J, LI S D, MA S Z, ZHANG D S, BI J, WANG J, STAROSTENKOV M D, XU Z. Process optimization of A356 aluminum alloy wheel hub fabricated by low-pressure die casting

- with simulation and experimental coupling methods[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2023, 24: 3118-3132
- [14] 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.
- LIU J, ZHANG J P, WANG X B. Optimization and design of complex aluminum alloy casting process[J]. Foundry Technology, 2020, 41(3): 243-247.
- [15] 邓宏强,李明杰,邓梅梅,杨小林,张晓兵. 铝合金舱体低压铸造工艺[J]. 铸造技术, 2023, 44(12): 1163-1167.
- DENG H Q, LI M J, DENG M M, YANG X L, ZHANG X B. Low pressure casting process of an aluminum alloy cabin[J]. Foundry Technology, 2023, 44(12): 1163-1167.
- [16] 金延竹,吴景波,崔伟,冯海舟,康建华. 铝合金电机壳铸造工艺开发[J]. 铸造工程, 2023, 47(S1): 6-12.
- JIN Y Z, WU J B, CUI W, FENG H Z, KANG J H. Development of casting process for aluminum alloy motor housing[J]. Foundry Engineering, 2023, 47(S1): 6-12.
- [17] 马俊成,李向平,查明晖,龚家林,黄宜俊,孙亚晓,毛恒杰,李俊熹. CR400AF 齿轮箱铸造工艺开发及优化[J]. 金属加工(热加工), 2024(8): 129-131, 136.
- MA J C, LI X P, ZHA M H, GONG J L, HUANG Y J, SUN Y X, MAO H J, LI J X. Development and optimization of casting process for CR400AF gearbox[J]. MW Metal Forming, 2024(8): 129-131, 136.
- [18] 周振,卢德宏,何宇航,李向明,逯东辉,李贞明,刘建高. 大尺寸铝合金轮毂双边浇注低压铸造工艺的模拟及优化[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(4): 484-489.
- ZHOU Z, LU D H, HE Y H, LI X M, LU D H, LI Z M, LIU J G. Simulation and optimization of two-sided pouring low pressure casting process for a large size aluminum alloy wheel[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024, 44(4): 484-489.
- [19] 谭云骥,马聚怀,许庆彦. 铝合金低压铸造过程数值模拟[J]. 铸造, 2024, 73(3): 270-281.
- TAN Y X, MA J H, XU Q Y. Numerical simulation of low pressure die casting process of aluminum alloy[J]. Foundry, 2024, 73(3): 270-281.
- [20] WANG Y L, WANG F X. Key analysis of design and numerical simulation for aluminum alloy Impeller low-pressure casting mold[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2338: 012070.
- [21] 严仁杰,杨小林,顾祥东. 圆筒状铝合金铸件低压铸造浇注系统设计及工艺参数模拟仿真[J]. 铸造设备与工艺, 2025(1): 4-9.
- YAN R J, YANG X L, GU X D. Design and process parameter simulation of low-pressure casting system of cylindrical aluminum alloy castings[J]. Foundry Equipment and Technology, 2025(1): 4-9.
- [22] 董海阔,董方涛,郝旻,张强,张开望,王玉. ZL107 某基座铸件工艺模拟及优化[J]. 铸造技术, 2021, 42(8): 699-703.
- DONG H K, DONG F T, XI Y, ZHANG Q, ZHANG K W, WANG Y. Process simulation and optimization of a ZL107 base casting[J]. Foundry Technology, 2021, 42(8): 699-703.
- [23] 洪润洲,周永江,左强,范学焱,张喆,王万成. 基于仿真与3D打印砂型的复杂铝合金壳体制造[J]. 特种铸造及有色合金, 2019, 39(11): 1192-1194.
- HONG R Z, ZHOU Y J, ZUO Q, FAN X Y, ZHANG Z, WANG W C. Manufacturing of integrated complex aluminium shell based on simulation and 3D printed sand mold[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2019, 39(11): 1192-1194.
- [24] 彭曼琦,程凯,李成信,曾华成,陈曦,陈颖琳,朱春明,谷成渝,袁林,谢洪权,周志明. 基于AnyCasting的铝合金弹底转座压铸工艺参数优化[J]. 铸造技术, 2020, 41(2): 153-156.
- PENG M Q, CHEN K, LI C X, ZENG H C, CHEN X, CHEN Y L, ZHU C M, GU C Y, YUAN L, XIE H Q, ZHOU Z M. Technological parameters optimization of die casting of aluminum alloy projectile base rotor based on the AnyCasting[J]. Foundry Technology, 2020, 41(2): 153-156.
- [25] 李璐,马志敏. 电机壳体铝合金铸件工艺CAE分析[J]. 中国铸造装备与技术, 2020, 55(6): 95-98.
- LI L, MA Z M. CAE analysis of aluminum alloy casting process for motor shell[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2020, 55(6): 95-98.

(责任编辑:杨浩雪)