DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2023.1489

机器人手臂铸件铁型覆砂铸造工艺生产实践

朱　国，夏小江，张　陈
(浙江省机电设计研究院有限公司，浙江 杭州 310051)

摘　要：目前，工业机器人在各个领域应用广泛，对机器人手臂铸件的质量要求也随之提高。本文根据机器人手臂的结构特征及技术要求，结合铁型覆砂铸造工艺特点，设计了机器人手臂铸件的铁型覆砂铸造工艺方案，并通过凝固模拟软件对工艺方案进行了优化。结果表明，机器人手臂铸件的铁型覆砂铸造工艺优化方案可行，实现了铸件的稳定高效清洁生产，铸件产品质量稳定，合格率达 95%以上，表面粗糙度 Ra 达到 12.5~25.0 μm、尺寸精度为 CT7 级，降低了生产成本，可推广应用。

关键词：机器人手臂；铁型覆砂铸造；计算机模拟优化

中图分类号：TG243　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2023)09-0861-06

Production Practice of Iron Mold Sand-covered Casting Process for Robot Arm Castings

ZHU Guo, XIA Xiaojiang, ZHANG Chen
(Zhejiang Institute of Mechanical & Electrical Engineering Co., Ltd., Hangzhou 310051, China)

Abstract: Currently, industrial robots are widely used in various fields, and the quality requirements of robot arm castings are also increasing. Based on the structural characteristics and technical requirements of the robot arm and combined with the characteristics of the iron mold sand covering casting process, the iron mold sand covering casting process scheme of the robot arm casting was designed, which was then optimized by solidification simulation software. The results show that the optimization scheme of the iron mold sand covering casting process for robot arm castings is feasible, which allows stable, efficient and clean production of castings to be achieved. The quality of the casting product is stable, with the qualification rate reaching over 95%, the surface roughness reaching Ra 12.5~25.0 μm and the dimensional accuracy reaching CT7, which reduces the production cost and can be popularized and applied.

Key words: robot arm; iron mould sand-coated casting; computer simulation optimization

工业机器人是具有多关节机械手或多自由度的机器，它可以通过自身的动力和控制系统，实现复杂的功能任务，并且可以在不同的环境中运行，如电子、物流、化工、机械等，为工业生产提供了更加高效、精准的服务。机器人手臂是工业机器人的主要运动部件，用来支承其手腕和手部，并调整手部在空间的位置，这种机械结构既承担机器人抓取物体的负担，也承担机器人的整体质量。当前，工业机器人手臂大多采用球墨铸铁制作，其结构复杂，对尺寸精确性的要求也极其严格；由于砂型铸造的铸件质量不够稳定，内部结构不致密，外表质量欠佳，综合废品率极高，使得采用这种方法进行制作变得困难，同时也降低了整体的综合经济效益[1]。

近 20 年来，铁型覆砂铸造工艺因其具有节能、节材、显著改善铸件内外质量等优势，被列入国家重点新技术推广项目，尤其是在球铁铸件的生产中，其优势更加突出，并被普遍采用。20 世纪 60 年代，发达国家就开始采用铁型覆砂铸造技术，这种技术被广泛应用于制造各种铸件，如曲轴、连杆、凸轮轴、刹车毂和汽缸套，并且为企业带来了可观的经济效益。随着科技的飞速发展，我国在铁型覆砂装备的应用上取得了显著的成就，特别是近几年，已被广泛应用于汽车、摩托车、压缩机小曲轴、凸轮轴、缸套、轮毂、制动鼓、缸体、缸盖、电梯曳引轮、电梯机座以及各种

收稿日期：2021-12-30
基金项目：浙江省科技计划(2021C01157)
作者简介：朱　国，1989 年生，硕士，工程师. 主要从事铁型覆砂铸造工艺及生产线设计. Email: 274649530@qq.com
引用格式：朱国，夏小江，张陈. 机器人手臂铸件铁型覆砂铸造工艺生产实践[J]. 铸造技术，2023, 44(9): 861-866.
ZHU G, XIA X J, ZHANG C, et al. Production practice of iron mold sand-covered casting process for robot arm castings[J]. Foundry Technology, 2023, 44(9): 861-866.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

精密的球铁件等，为行业提供了极大的便利和效率。采用这种工艺制造的铸件，其工艺出品率得到提升，内、外部质量及机械特性也有了显著改善，还能够更好地满足不同类型的球铁牌号需求[2-3]。通过引入铁型覆砂铸造技术，能够更好地满足机器人手臂铸件的制造需求，这种新的工艺既能发挥其先天优势，又能够克服砂型铸造的缺陷，从而大幅提升了产品的整体质量，同时也为企业节省了大量的生产成本[4-5]。

1 铁型覆砂铸造工艺设计

1.1 铸件的技术要求

机器人手臂铸件的三维造型如图 1 所示。三维模型测量铸件的外形尺寸约为 797 mm×175 mm×104 mm。该铸件的壁厚整体较为均匀，约为 8 mm，但局部仍有厚壁处存在，易产生热节。铸件的材质为 QT450-10，单件质量约为 22 kg，力学性能的试棒需经本体指定位置取样，抗拉强度≥450 MPa，伸长率≥10%，硬度为 160~210 HBW，渗碳体含量应小于或等于 3%(体积分数)，不允许存在网状渗碳体。此外，铸件表面需光滑，铸件内部不允许存在缩孔、裂纹、气孔或夹砂等缺陷。

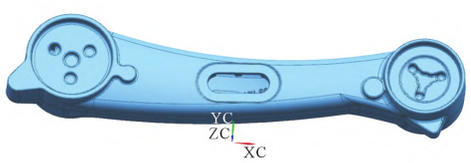


图 1 机器人手臂铸件三维图
Fig.1 3D drawing of robot arm casting

1.2 铁型覆砂铸造

铁型覆砂铸造是在粗成形的金属型(称为铁型)内腔覆上薄薄的一层型砂而形成铸型。通过对铁型质量、壁厚与覆砂层厚度的合理控制，使铸件充型、凝固和冷却过程在比较理想的条件下完成，并利用铁液凝固过程中的石墨化膨胀来抵消铁液冷却凝固产生的收缩，最大限度地消除产生铸造缺陷的因素，从而提高铸件质量，降低废品率；且铸件的金相组织结构稳定、一致性好。另外，铁型覆砂铸造采用覆膜砂压缩空气射砂造型，覆砂层致密紧实，生产的铸件尺寸精度高，表面质量好[3,6-7]。

本文机器人手臂铸件的铁型覆砂铸造工艺设计方案为一型两件，采用水平分型和水平浇注方式生产。由于铸件整体较长且壁厚较薄，属于薄壁铸件，为解决薄壁铸件的浇不足和冷隔问题，其浇注系统设计采取 4 个内浇口从中间同时进浇的方式，

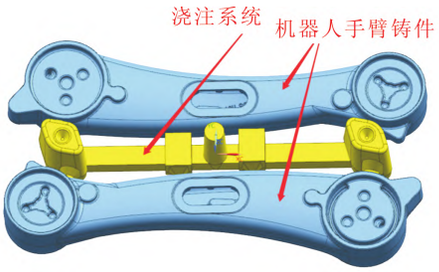


图 2 机器人手臂铸件工艺布置图
Fig.2 Schematic of the casting process of the robot arm

并根据图 2 的工艺布置，将浇注系统的断面比设定为 $F_{直}:F_{横}:F_{内}=1.0:1.7:1.8$。经过改进的铸件工艺方案，其出品率达到 71%，浇注系统的挡渣能力更优。但为避免铁液中的杂质继续流入铸型，在铁液流入铸型之前还需对其进行过滤，可在浇口杯处设置铁液过滤装置。

在铁型覆砂铸造模具工装设计中，铁型壁厚越大，其对铸件的冷却速度越快；反之，覆砂层厚度越大，铸件的冷却速度越慢。相比之下，覆砂层厚度大小对铸件冷却速度的影响更大[8]。为了确保铁型覆砂造型的质量，在进行生产时，应该综合考虑铸件的组织特征、生产流程节奏、浇注后的余热利用效率、材料的质量、模具的耐久性、质量、壁厚等多个因素，从而确定最佳的铁型壁厚，并且可以调整覆砂层的厚度，以达到最佳的凝固冷却条件，从而满足客户的需求。充分利用球铁石墨化膨胀的优势，可以有效地改善铸件的凝固和冷却性能，获得组织致密的铸件及所需的金相组织[9-10]。为了满足机器人手臂铸件的生产要求，在铸型型腔中必须安装一个较大且较长的泥芯，此外，在设计覆砂层的过程中，必须充分考虑泥芯对铸件的冷却情况，以确保凝固冷却的合理性。铁型设计所采用铁型材质为 HT200，型腔壁厚为 30 mm。在铸型的大多数区域，覆砂层厚度被设定为 8 mm，而在壁厚较厚的区域，覆砂层厚度被设定为 3~5 mm。为了确保铁液流动平稳，浇注系统的覆砂层厚度设定为 12~15 mm。

2 铁型覆砂工艺充型凝固过程数值模拟分析及优化

由于铁型覆砂铸造的工装模具制作成本昂贵，所以一旦出现工艺设计错误，就会使模具的修改变得非常困难，给企业带来较大的经济损失和时间成本。利用计算机凝固模拟技术，能够更加高效地优化铁型覆砂铸造工艺和工装设计，并且准确地预测出缩孔、缩松等缺陷，不仅缩短设计周期，还提高了设计质量，并且能够降低由此产生的经济损失[11-12]。利

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

用浙江省某公司研究开发的计算机凝固模拟软件，可精确地模拟铸件的工艺方案全流程，以及预测可能存在的缩孔、缩松等缺陷位置及程度，有助于提高设计质量。

2.1　数值模拟结果分析

首先建立机器人手臂铸件、浇注系统、泥芯、覆砂层及铁型的三维模型，并导入到铁型覆砂铸造计算机充型凝固模拟软件中[13-14]。设置输入各类参数，即自由网格总单元数为 5 000 000，铸件材质为QT450，浇注温度为 1 400 ℃，充型时间为 15 s，球化等级及铸型退让性等。模拟运算后通过后处理单元查看铸件整个凝固过程的模拟结果，可以通过后处理来获得铸件凝固的完整过程，从而更好地了解其特性。

图 3 为铸件凝固模拟结果输出的缩孔缩松预测图，图 4 为铸件热节分布图。从图 3 可以看出，铸件凝固后两端进浇口处存在部分缩孔的倾向，结合图 4 分析，缩孔倾向的位置基本上就是热节存在的位置，中间部位的缩孔倾向和热节均较小，可通过减少这些部位的覆砂层厚度来减少热节的程度，从

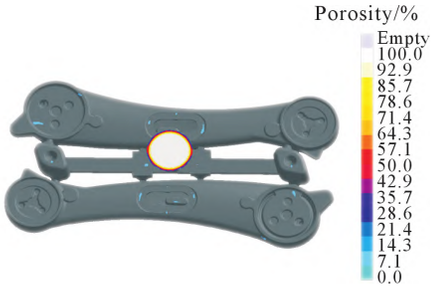


图 3　缩孔缩松预测

Fig.3　Prediction of shrinkage cavity and porosity

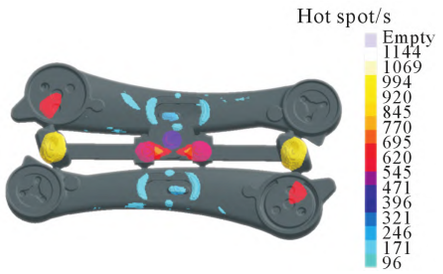


图 4　热节分布图

Fig.4　Distribution of the hot spot

而消除缩孔；而两端热节较大处，可通过增加冒口大小，增大内浇道的面积及对铸件适当增加工艺补贴来增大铸件凝固时候的补缩通道，从而消除此处的缩孔缺陷。

2.2　工艺优化

根据上述的模拟结果及分析，对原先的工艺设计方案进行了相应的优化处理，图 5(a)所示为原方案内浇道处的截面图，由于此处壁厚较薄，无论冒口是否加大，此通道在铸件凝固过程中冷却较快，都无法对铸件起到补缩作用。因此对铸件做出增加一块工艺补贴的优化方案，如图 5(b)所示，做出该调整后，此处的补缩通道增加，可充分利用冒口将铸件内部的热节引出，以达到冒口对铸件产生充分的补缩效果[15-17]。

如图 6 所示，优化设计方案如下：将两端的冒口适当加大(两端冒口尺寸从原来的 60 mm×75 mm×100 mm，增大至 70 mm×95 mm×100 mm)，并在铸件上增加一块工艺补贴(靠近内浇道处)，该方案可充分利用冒口的作用，对铸件充分补缩。

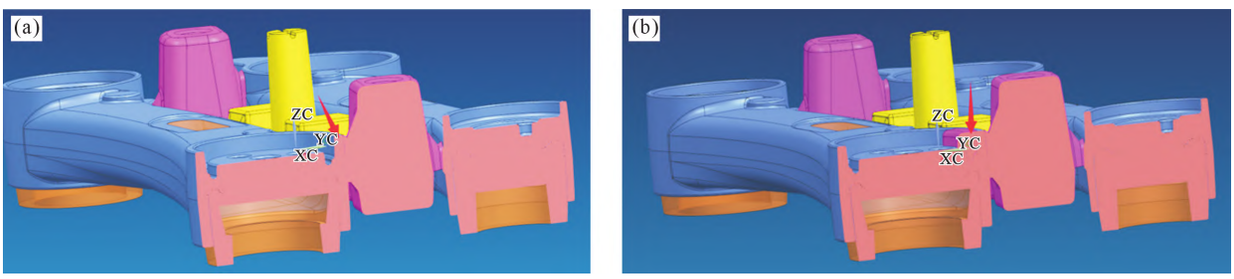


图 5　内浇道截面图：(a) 原方案，(b) 工艺优化方案

Fig.5　Section diagram of the inner gate: (a) original process scheme, (b) optimized process scheme

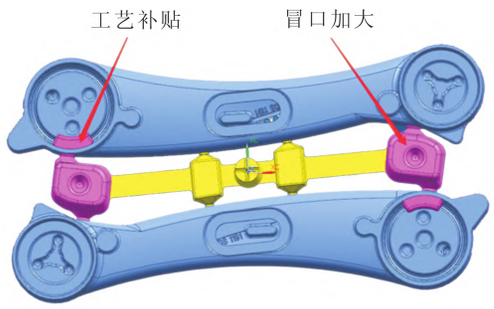


图 6　工艺优化方案

Fig.6　Optimized process scheme

2.3　优化后充型凝固模拟结果分析

通过对机器人手臂铸件、浇注系统、泥芯、覆砂层和铁型的全面优化，构建出一个新的、完整的三维模型，将其输入到铁型覆砂铸造计算机充型凝固模拟软件中，通过调整各项参数，在保持其他参数不变的情况下，重新对优化后的方案进行模拟计算，可以获得更准确的铸件充型和凝固过程的模拟结果。

图 7(a~d)分别为充型 2、8、12、15 s 时的温度分布及充型状态，从整个充型过程来看，铁液首先通过

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

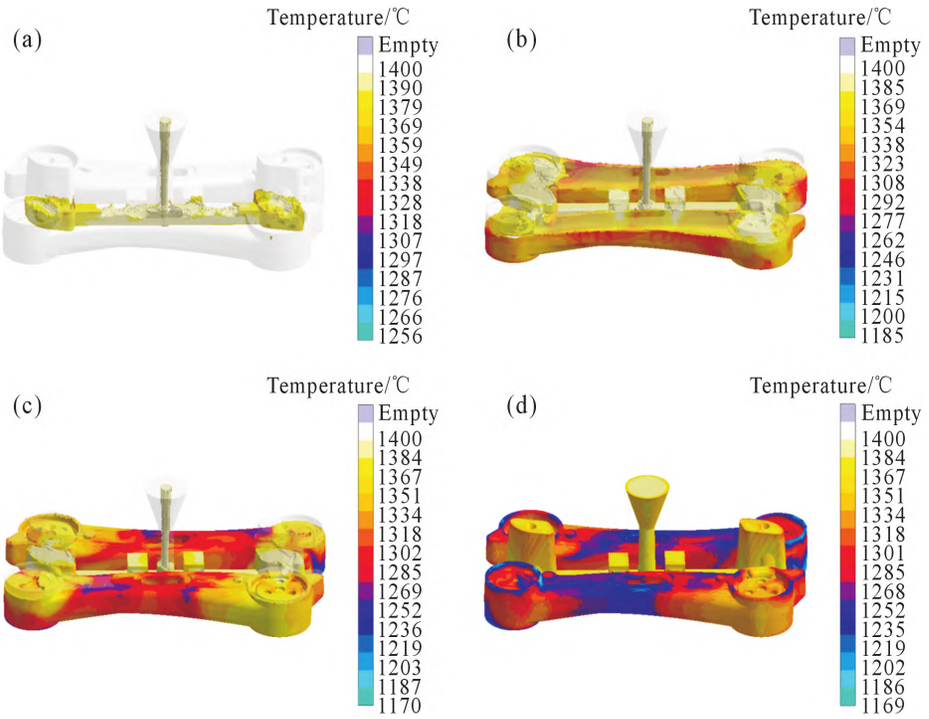


图 7 凝固模拟充型过程温度场分布:(a) 2 s, (b) 8 s, (c) 12 s, (d) 15 s

Fig.7 Temperature field distribution in the solidification simulation mold filling process: (a) 2 s, (b) 8 s, (c) 12 s, (d) 15 s

横浇道往两边的冒口处流动,并从内浇道进入铸件,从铸件底部逐步缓慢上升充满整个型腔,流动平稳,未见明显铁液飞溅等现象,充型过程平稳有序不会产生充型卷气、夹渣等缺陷。从充型温度场分布来看,铸件两端温度最高,且逐步向外降低,铸件整体温度较为均匀,不会产生冷隔等现象。

通过热节模拟分析,图 8 显示了机器人手臂铸件凝固过程中的热节分布情况。由于该铸件的外形轮廓尺寸较长,铸件厚大部位存在部分热节,但是经过优化后,这些热节已被完全消除,从而使得它的性能得到了显著改善。经过优化后的方案,铸件两端的热节已消除,在两端冒口中有热节存在;这说明冒口在凝固过程中可为铸件提供充分的液态补缩,增大后的冒口可有效地将原先铸件中的热节引出,对这个区域的铸件提供有效的补缩作用。基于计算机模拟结果分析,在设计覆砂层厚度时,将其减少至 4~5 mm,以此来提高冷却速度,减轻热节程度,从而达到满意的效果。

图 9 为凝固模拟分析的缩孔缺陷预测图。从图中看出,铸件凝固后缩孔倾向的位置基本与热节的位置一致,在覆砂层的设计上我们已将这些部位的覆砂层减薄来减轻热节的倾向,实际生产中应当不会出现缩孔的现象。综上所述,此机器人手臂铸件的铁型覆砂铸造工艺设计是较为合理的。

3 生产应用

通过引入先进的铁型覆砂铸造生产线,生产效率约为 25 箱 /h,大大提高了生产效率。根据表 1 的化学组成,适当调整碳当量有助于改善铁液的流动

表 1 铸件的化学成分

Tab.1 Chemical composition of castings

(mass fraction/%)

C	Si	Mn	P	S
3.70~3.90	2.40 ~2.60	0.10 ~0.20	≤0.03	≤0.03

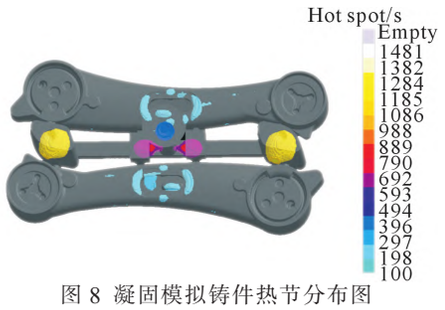


图 8 凝固模拟铸件热节分布图

Fig.8 Hot spot distribution of solidification simulation of the casting

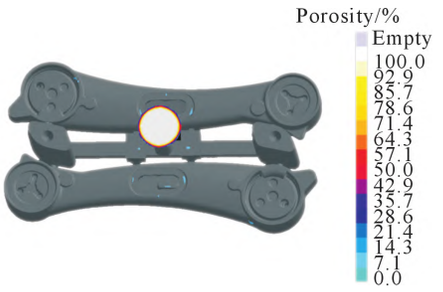


图 9 缩孔缩松预测

Fig.9 Prediction of shrinkage cavity and porosity

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

特性,并且增强其石墨化膨胀的自补缩能力;通过降低锰含量,可以获得铸态铁素体基体组织。

铁液球化处理采用传统的冲入法球化技术,将出炉温度精确控制在 1 520~1 530 ℃,经过炉前球化和多次孕育处理后,采用 1 t 球化处理浇包直接浇注,每包铁液首箱和末箱铁型的浇注温度将严格控制在 1 380~1 420 ℃,每箱的浇注时间实际控制在 14~17 s,以确保铁液的质量和性能。因为铸件壁厚较薄且较长,所以浇注速度应当严格控制。为了适应铁型覆砂铸造的快速冷却特性,球化剂采用低稀土的铁素体基体球化剂,以获得理想的铸态铁素体基体,其加入量应为铁液量的 1.0%~1.2%之间,以达到最佳的球化效果;采用多次孕育处理的方式,选用复合孕育剂中加入少量微量元素的方式,孕育剂总加入量为铁液量的 0.6%~0.8%,以达到最佳的孕育效果。在浇注过程中,应采用粉末状的 Si-Ba 长效孕育剂,其添加量在 0.10%~0.15%之间,以确保铸件的基体组织为铁素体,从而提高其综合力学性能,达到 QT450-10 标准。

经过系统的理论分析和实践测试,结果证明所得凝固模拟结果可靠可信。在试生产后,对铸件各部位进行了解剖查看分析,观察铸件的各个加工部位与关键部位,没有发现任何气孔、缩孔、缩松或者冷隔等铸造缺陷,而且它们的内部结构致密,微观金相组织、力学性能测试结果均符合图纸技术要求。在投入大批量生产后,机器人手臂铸件产品的质量稳定,其合格率超过了 95%。通过采用先进的铁型覆砂铸造技术生产出的铸件(图 10),其表面粗糙度 Ra 达到 12.5~25.0 μm、尺寸精度为 CT7 级,且相对于传统的砂型铸造技术,机械加工余量减少 30%以上,不仅提高了产品的附加值,还改善了产品的质量,为企业带来了较大的经济效益。



图 10 铸件正反面实样

Fig.10 The front and back sides of the morphology of the actual casting

4 结语

铸态铁素体基体球铁机器人手臂铸件采用铁型覆砂铸造工艺生产,其尺寸精度、表面粗糙度及内部组织较砂型铸造相比,均有显著提升。采用铁型覆砂铸造技术制作 QT450-10 机器人手臂铸件,不仅能够获得更高的内部和外部质量,而且还能够显著提高铸件的综合性能。通过采用计算机凝固模拟技术对铁型覆砂铸造工艺进行优化设计,可以有效地提高生产效率,降低试错成本,缩短产品开发周期,提高产品质量,指导和优化生产流程,从而提升企业的竞争力。铁型覆砂铸造机器人手臂铸件,其产品质量稳定、废品率低、生产效率高;与传统砂型铸造相比,可节约生产成本约 20%,节约能源 20%以上,具有良好的经济效益和市场竞争优势。

参考文献:

[1] 刘丰,单忠德,李柳,等. 机器人手臂数字化制造技术研究[J]. 铸造技术,2014, 35(5): 1092-1094.
LIU F, SHAN Z D, LI L, et al. Research on digitized manufacturing technology for robot arm[J]. Foundry Technology, 2014, 35(5): 1092-1094.

[2] 黄列群,潘东杰,何芝梅,等. 铁型覆砂铸造及其发展[J]. 现代铸铁,2006, 26(3): 12-20.
HUANG L Q, PAN D J, HE Z M, et al. Sand-faced metal mould casting process and its development[J]. Modern Cast Iron, 2006, 26(3): 12-20.

[3] 潘东杰,黄列群. 铁型覆砂铸造工艺及其应用[J]. 新技术新工艺,2000(7): 25-26.
PAN D J, HUANG L Q. Application and technology of foundry method in permanent mould with sand facing[J]. New Technology & New Process, 2000(7): 25-26.

[4] 潘东杰,夏小江,汤瑶,等. 铁型覆砂铸造技术在泵阀铸件生产上的应用[J]. 铸造技术,2015, 36(3): 701-705.
PAN D J, XIA X J, TANG Y, et al. Application of sand-faced metal mould casting technology in production of pump valve castings [J]. Foundry Technology, 2015, 36(3): 701-705.

[5] 潘东杰,朱国,夏小江,等. 铁型覆砂铸造电梯球铁制动轮的生产应用[J].铸造技术,2019, 40(9): 961-964.
PAN D J, ZHU G, XIA X J, et al. Production and application of iron mould sand-coated casting in ductile iron brake wheel of elevator[J]. Foundry Technology, 2019, 40(9): 961-964.

[6] 黄列群. 铁型覆砂铸造及其应用[J]. 机电工程,1999, 16(3): 55-57.
HUANG L Q. Casting technique of sand-lined iron-mold and its application[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 1999, 16(3): 55-57.

[7] 马益诚,潘东杰,黄列群. 铁型覆砂铸造球铁斜楔[J]. 现代铸铁,2002(1): 43-45.
MA Y C, PAN D J, HUANG L Q. Ductile iron wedge cast in per-

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

manent mould with resin- coated sand facing[J]. Modern Cast Iron, 2002(1): 43-45.

[8] 马益诚,黄列群,潘东杰,等. 铁型覆砂铸造行星架的凝固模拟及工艺优化[J]. 机电工程,2013, 30(6): 714-716.
MA Y C, HUANG L Q, PAN D J, et al. Solidification simulation and process optimization of carrier with iron mould coated sand casting[J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2013, 30(6): 714-716.

[9] 肖荣振,王智平,刘致远,等. 基于 MAGMAsoft 的泵体铸钢件铸造工艺设计[J]. 铸造技术,2008, 29(12): 1696-1698.
XIAO R Z, WANG Z P, LIU Z Y, et al. Design of casting process for steel pump body based on MAGMAsoft[J]. Foundry Technology, 2008, 29(12): 1696-1698.

[10] 李晓东,马鸣图. 数值模拟在铁型覆砂铸造中的应用[J]. 汽车工艺与材料,2002(8): 69-71.
LI X D, MA M T. The application of computer simulation in iron model with sand liner [J] Automobile Technology & Material, 2002(8): 69-71.

[11] 赵建华, 宋刚, 田军. 汽车发动机缸体的铁型覆砂铸造工艺[J]. 热加工工艺,2012, 41(1): 38-40.
ZHAO J H, SONG G, TIAN J. Iron mould coated sand casting process for auto engine cylinder [J]. Hot Working Technology, 2012, 41(1): 38-40.

[12] 张亮,黄怀忠. 铁型覆砂铸造灰铸铁制动鼓的生产控制[J]. 铸造, 2011, 60(7): 707-709.
ZHANG L, HAUNG H Z. Production control of gray cast iron brake drum with sand-lined iron mold casting process[J]. Foundry, 2011, 60(7): 707-709.

[13] 陈勇. 基于 CAE 技术的铸件的浇注系统设计及工艺优化[D]. 南昌:南昌大学,2009.
CHEN Y. Casting gating system design and process optimization based on CAE technology [D]. Nanchang: Nanchang University, 2009.

[14] 黄列群,董凌云,潘东杰,等. 铁型及覆砂层厚度对铸件凝固的影响[J]. 机电工程,2012, 29(2): 163-166.
HUANG L Q, DONG L Y, PAN D J, et al. Effect of thickness of iron mould and coated sand on solidification [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2012, 29(2): 163-166.

[15] 林国荣. 铸件形成过程计算机数值模拟的发展及应用[J]. 现代铸铁,2001(2): 8-13.
LIU G R. Development of computer simulation of casting-formation process and its application [J]. Modern Cast Iron, 2001 (2): 8-13.

[16] 刘瑞祥,陈立亮,魏华胜,等. 铸件凝固过程数值模拟的生产应用[J]. 现代铸铁,2003(4):34-36.
LIU R X, CHEN L L, WEI H S, et al. Production application of casting solidification numerical simulation [J]. Modern Cast Iron, 2003(4): 34-36.

[17] 熊守美,柳百成,许庆彦,等. 铸件充型凝固过程数值模拟研究[J]. 现代铸铁,2002(1): 16-20.
XIONG S M, LIU B C, XU Q Y, et al. Progress on numerical simulation of mold filling and solidification processes of shaped castings[J]. Modern Cast Iron, 2002(1): 16-20.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net