

重卡用铝合金接线盒重力铸造工艺改进与性能提升

李泽芝¹ 李兴华² 刘春伟² 蒋永浩² 周仕勇² 孙震兆¹ 赵平¹

(1. 青岛科技大学材料科学与工程学院, 青岛 266042; 2. 山东鸿源新材料有限公司, 淄博 256102)

摘要 利用UG-NX软件建模并通过AnyCasting软件进行重力铸造过程模拟,研究了铸件内部缩松、气孔等缺陷的分布情况,提出增加浇注通道、复合使用细化剂的改进方案,并对工艺改进前后得到的铸件进行无损检测、微观组织、力学性能测试与分析。结果表明,增加浇注通道并复合使用细化剂的铸件缩松、气孔缺陷消除,力学性能提高,伸长率达5.2%,共晶Si偏析现象消失, α -Al晶粒更加细化。

关键词 重力铸造; 铝合金; 数值模拟; 力学性能

中图分类号 TG146.21; TG249.3

文献标志码 A

DOI: 10.15980/j.tzzz.T20240377

Process and Performance Enhancement of Gravity Casting Aluminum Alloy Junction for Heavy Truck

LI Zezhi¹, LI Xinghua², LIU Chunwei², JIANG Yonghao², ZHOU Shiyong², SUN Zhenzhao¹, ZHAO Ping¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266044; 2. Shandong Hongyuan New Material Co., Ltd., Zibo 256102)

Abstract: The gravity casting process was modeled using UG-NX software and simulated via AnyCasting software to analyze the defect distribution of shrinkage porosities and gas holes. Schemes of adding gating channels and combined use of grain refiners were proposed, and non-destructive testing, microstructure analysis, and mechanical performance evaluations were conducted on the castings before and after process optimization. The results indicate that the introduction of gating channels and the combined use of grain refiners can effectively eliminate shrinkage porosity and gas holes, significantly improving mechanical properties, where the elongation reaches up to 5.2%. The segregation of eutectic silicon is eliminated, and α -Al grains are further refined.

Key Words: Gravity Casting, Aluminium Alloy, Numerical Simulation, Mechanical Properties

接线盒是一种用于汽车电路中的重要组件,主要用于保护和管理汽车内部的电线连接,接线盒质量、性能的优劣对汽车整体安全性有着重要的影响。重卡的工作环境恶劣^[1],要求接线盒具有优异的力学性能、耐腐蚀及耐高温性能,以确保其在各种恶劣环境下保障重卡电路系统正常工作。因此,材料的选择对接线盒的性能影响很大。随着我国汽车产业的蓬勃发展,汽车轻量化设计成为重点^[2-4],铝合金由于密度小、流动性好、力学性能和耐蚀性能优异^[5-8],已被广泛应用于接线盒的生产制造中。

重力铸造是一种在重力作用下将熔融金属浇入模具中从而获得铸件的铸造方法^[9]。特别是对于壁厚大

的铝合金铸件,使用重力铸造工艺能够更好地避免孔隙和二次加工。目前,接线盒主要采用重力铸造工艺进行生产,虽然接线盒结构较为简单,但壁厚不均匀,若采取的工艺不恰当,在生产中容易出现针孔、缩松和裂纹等缺陷^[10-11]。同时,晶粒细化能够改善铸件的强度、韧性等力学性能,减少偏析和气孔等缺陷的产生^[12-14],而在熔炼的铝液中加入不同种类的细化剂会对铝合金的性能有较大的影响。张将等^[12]研究了Al-Ti-C-B细化剂中微量元素Ti、C、B对A356铝合金性能的影响,发现随着微量元素含量增多,合金性能也逐渐提高。陈学文等^[15]发现新型晶粒细化剂Al-4Ti-1Ni-0.8C合金添加量为0.3%时,与未添加细化剂相比,铝

收稿日期: 2024-09-19; 修訂日期: 2024-12-21

基金项目: 山东省淄博市重点研发计划资助项目(2021XCYP0010); 山东省科技型中小企业创新能力提升工程资助项目(2022TSGC2246, 2024TSGC0319)

第一作者简介: 李泽芝,男,1999年出生,硕士研究生, E-mail: 1448205319@qq.com

通信作者: 赵平,男,1983年出生,副教授, E-mail: zhaoping@qust.edu.cn

引用格式: 李泽芝,李兴华,刘春伟,等. 重卡用铝合金接线盒重力铸造工艺改进与性能提升[J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45(9): 1400-1404.

LI Z Z, LI X H, LIU C W, et al. Process and performance enhancement of gravity casting aluminum alloy junction for heavy truck[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2025, 45(9): 1400-1404.

合金的抗拉强度提高了15.3%;陈旭等^[16]制备了Al-25Al₆₇Cu₈Ti₂₅复合细化剂,发现加入质量分数为0.25%的复合细化剂后,纯铝及Al-5Cu-Mn合金的晶粒尺寸分别细化至224 μm和137 μm。在众多研究中,有关复合使用不同种类细化剂的研究报道较少。因此,本研究在提出接线盒铸件重力铸造工艺优化方案的基础上,研究复合使用细化剂对铸件力学性能的影响,旨在为相关铝合金铸件工艺的改进与性能的提升提供思路与参考。

1 试验材料与方法

重卡用接线盒材质为A356铝合金,其成分要求见表1。

表1 A356铝合金的化学成分
Tab.1 Chemical composition of A356 aluminum alloy %

w _B									
Si	Mg	Ti	Sr	Fe	Cu	Zn	Mn	Al	
6.5~	0.35~	0.16~	0.035~	≤	≤	≤	≤		
7.0	0.45	0.2	0.045	0.15	0.1	0.1	0.1	余量	

重卡用接线盒结构见图1。接线盒属于大壁厚类铝合金件,其壁厚最厚处约为27 mm,最薄处约为6 mm,壁厚十分不均匀,在铸造过程中极易出现缩松、缩孔或裂纹等缺陷^[17]。在某批接线盒铸件生产时,大量铸件出现了缩松、气孔缺陷,严重降低了铸件质量。为消除重力铸造阶段出现的铸造缺陷,利用UG-NX软件建模并通过AnyCasting软件对铸件的成形过程进行数值模拟,根据模拟结果重新设计铸造工艺。同时,为细化铸件组织并提高产品力学性能,减少铸造缺陷概率,改进工艺中在添加Al-Ti-B细化剂基础上再次添加颗粒状细化剂活性Ti。



图1 接线盒结构形状

Fig.1 Structure of junction box

对铸造工艺改进前后的铸件利用UNC225型X射线实时成像检测系统进行无损检测;借助DK7735型线切割机切割出截面为10 mm×10 mm的金相试样与硬度试样,利用Zeiss Axio Lab.A1型金相显微镜(OM)进行微观组织分析;将不同工艺生产的铸件取样加工成标

准拉伸试样,根据GB/T228.1-2021,借助GNT300型电子万能试验机(拉伸速度为2 mm/min)和210HBS-3000型布氏硬度计进行力学性能检测与分析(载荷为1 837.5 N、保持时间为10 s。)

2 试验结果与分析

2.1 初始工艺模拟与分析

根据接线盒铸件的结构特点及产品技术要求,结合重力铸造工艺特点和企业实际生产条件,对该铸件进行了初始工艺设计:在模具型壁涂制传统保温涂料(控制涂料厚度为0.05~0.07 mm),在铸件厚大处设置浇道,上、下模具预热温度分别为420、370 ℃,浇注温度为730~740 ℃,预期使铝液能够快速、顺利流入模具中进行充型。浇注后3~6 min开模,确保铸件完全凝固。使用UG-NX软件对初始重力铸造工艺模型进行三维建模,见图2。

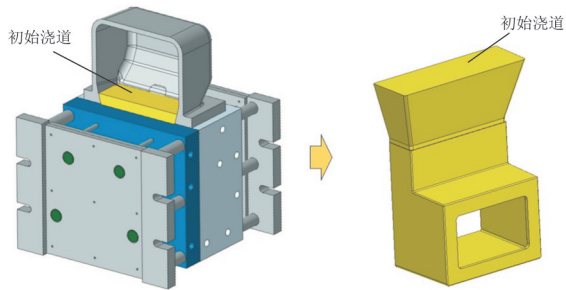


图2 初始重力铸造工艺模型组合图

Fig.2 Combined models of primary gravity casting process

将初始工艺的铸件模型导入AnyCasting软件进行数值模拟,设置初始浇注温度为740 ℃。图3为初始工艺铸件充型速度的模拟结果。当接线盒铸件充型35%和65%时,用时分别为0.273和0.688 s,铝液流速较高。由图3a可以看出,铝液沿初始浇道迅速流入型腔内,无飞溅现象,但铝液未沿铸件内壁顺序流入型腔当中,在铸件内壁死角处形成涡流卷气,说明初始工艺中充型速度过快,极易导致气孔、缩松等缺陷。

图4为初始工艺铸件凝固顺序与缺陷模拟结果。

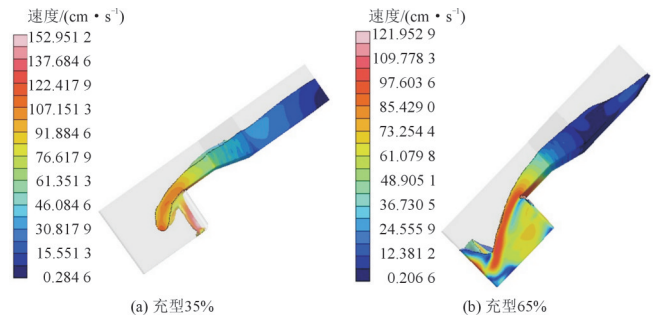


图3 初始工艺铸件充型速度

Fig.3 Filling velocity of castings in primary process

从图 4a 可以看出,当铝液流入模具中后,主要通过模具型壁与涂抹的涂料进行热交换来散热^[18],所以铸件外壁先开始凝固,随后靠近浇道的一端开始凝固,后续沿外壁向内逐层凝固,铸件远离浇道的内壁死角处凝固速率最慢,推断铸件凝固顺序为由上而下、由外到内。由于铸件内壁死角处为最后凝固部位,推测该处极易形成热节,利用 AnyCasting 软件继续对铸件缺陷概率进行模拟,缺陷模拟结果见图 4b。模拟结果印证了铸件内壁死角为热节的推测,此处容易形成缩松、气孔等缺陷。根据铸件结构与缺陷模拟结果进行分析,认为产生缺陷的原因为该处壁厚较大,散热条件差,导致冷却速度较慢。在凝固最后阶段铸件体积收缩,并且由于铸件补缩通道逐渐关闭,没有足够的铝液对该处进行补缩,所以导致铸件内壁死角处产生缩松、气孔等铸造缺陷。

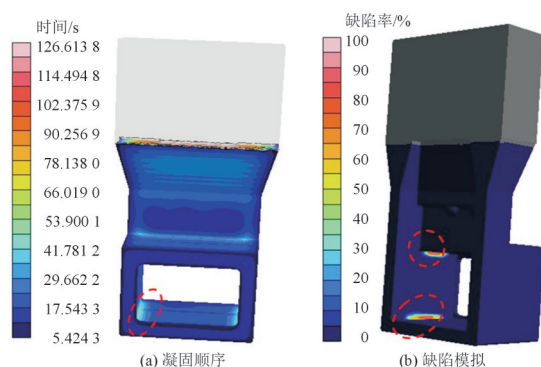


图 4 初始工艺铸件凝固顺序与缺陷模拟

Fig.4 Solidification sequence and defect simulation of castings in primary process

2.2 改进工艺模拟与分析

根据实际生产时遇到的接线盒铸件缺陷问题,为避免缺陷产生并提高产品良品率,结合接线盒铸件结构特点,对重力铸造工艺进行了改进。相对于在原先浇注通道下方预设再增加一处浇道,并在浇道处涂刷保温涂料(厚度为 0.3~0.5 mm),以对铸件进行足够的补缩。对改进后的重力铸造工艺模型进行三维建模,见图 5。

为验证改进工艺的有效性,将改进工艺模型导入

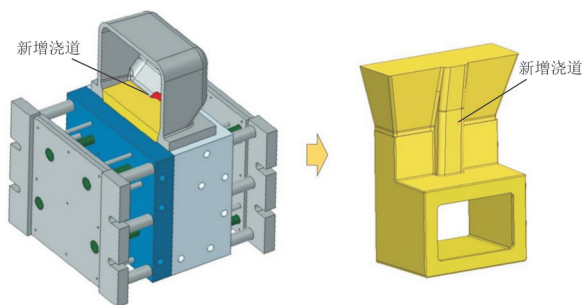


图 5 改进重力铸造工艺模型组合图

Fig.5 Combined models of modified gravity casting process

AnyCasting 软件进行数值模拟,由于浇注温度高会导致铸件冷却凝固速率慢,改进工艺设置浇注温度为 720 ℃。图 6 为改进工艺铸件充型速度的模拟结果。可以看出当接线盒铸件充型 35% 和 65% 时,用时分别为 1.227 s 和 1.681 s,铝液流速较初始工艺减缓。对比工艺改进前后的模拟结果,发现当铸件充型为 35% 时,改进工艺中铝液沿改进后的浇道顺序流入型腔内,铝液未形成涡流卷气现象,说明增添新浇道后充型平稳,铝液对铸件内壁死角进行了充分补缩;由图 6b 也可看出改进工艺中铝液充型效果优于初始工艺。

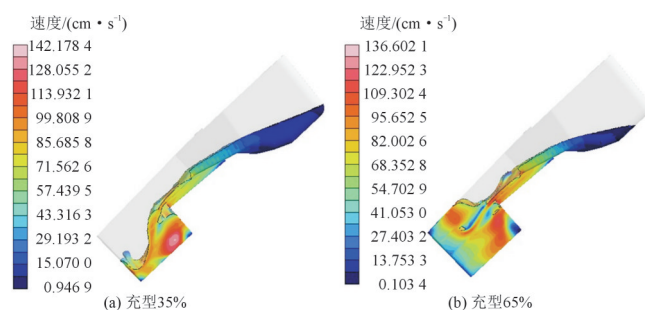


图 6 改进工艺铸件的充型速度

Fig.6 Filling velocity of castings in modified process

图 7 为改进工艺铸件凝固顺序与缺陷模拟结果。由图 7a 可知,铸件内壁热节处面积减小,改进工艺凝固顺序与初始工艺相同。在初始浇道与新添浇道交汇处的凝固速率变慢,但其存在不损害铸件性能,可忽略其影响。结合图 4b 可以看出,铸件内壁死角处热节消失,无缩松、气孔等缺陷,说明添加新浇道后充型效果较好,铝液对铸件内部进行了足够的补缩,消除了热节带来的不利影响。

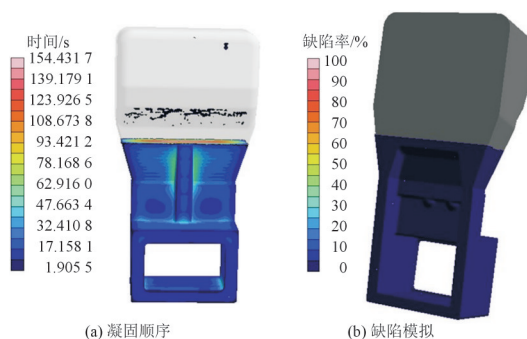


图 7 改进工艺铸件凝固顺序与缺陷模拟

Fig.7 Solidification sequence and defect simulation of castings in modified process

3 生产验证与分析

通过对初始工艺与改进工艺的模拟,显示改进工艺可较好地解决初始工艺中存在的铸造缺陷问题。为验证改进工艺的有效性,对铸件进行了小批量生产验

证。同时,为更好地提高铸件性能,减少气孔和偏析等缺陷,在改进工艺生产验证中,在添加传统的 Al-Ti-B 细化剂基础上再添加活性 Ti 细化剂。

生产试验时保持与初始工艺相同的铸造流程,其中熔炼用中频电炉熔量为 800 kg。当熔炼完成的铝液转运至周转包内进行除气时,转子旋转带动铝液旋转时沿周转包外壁缓慢加入 0.1 kg 活性 Ti 细化剂,除气约 12 min 后进行扒渣;使用倾转式重力浇注机将合金液浇入模具内,重力铸造全程时间约为 7 min。工艺改进前后的铸件皆进行了相同工艺的 T6 热处理。

3.1 无损检测与分析

对初始工艺与改进工艺生产的接线盒铸件进行宏

观形貌检查,未发现铸件表面存在明显铸造缺陷。为进一步对比两种工艺优劣,随机抽取铸件进行了无损检测,检测结果见图 8。可以看出,按照初始工艺生产的铸件,在其内壁死角与铸件壳体内部存在数量较多的气孔与面积较大的缩松缺陷。气孔与缩松缺陷的存在可以看作是铸件内部的微观孔洞,其存在减少了铸件的承载截面与铸件密度,使得铸件抗拉、抗压强度以及耐腐蚀性能降低。同时,铸件在受到外来应力作用时,缺陷处容易形成应力集中成为裂纹源,造成铸件的断裂。由图 8c 和图 8d 可以看出,采用改进工艺生产的铸件,在铸件内部同一部位未发现气孔、缩松缺陷,铸件内部形貌整体较为致密、均匀。

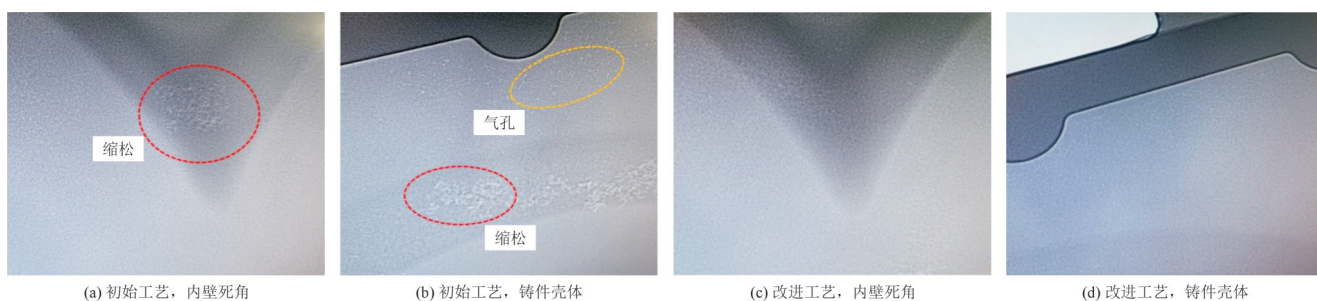


图 8 铸件无损检测图

Fig.8 Non-destructive testing of castings

3.2 铸件力学性能与微观组织分析

力学性能检测结果见表 2。由表 2 可知,较于初始工艺,采取改进工艺生产的铸件,力学性能得到提升,其中抗拉强度提高了 8.9%;伸长率提升了 2 倍以上,说明改进工艺生产的铸件塑性得到提高,抗冲击能力增强。

表 2 铸件的力学性能

Tab.2 Mechanical properties of castings

工艺编号	抗拉强度/ MPa	屈服强度/ MPa	伸长率/%	平均硬度 (HBW)
初始工艺	281	259	1.6	88.6
改进工艺	304	263	5.2	96.2

图 9 为两种工艺生产铸件的微观组织。由图 9a 可知,铸件微观组织较为均匀,共晶 Si 形貌呈短棒状,在晶界处有一定偏析现象;在铸件基体上存在大小不一的微观孔洞,尺寸为 12~25 μm ,部分孔洞分布在晶界处,其存在破坏了材料基体的连续性,结合无损检测结果,判断为气孔缺陷。由图 9b 可以看出,重力铸造工艺优化后,铸件组织内未发现气孔、缩松等缺陷,微观形貌整体整洁、均匀;在使用细化剂 Al-Ti-B-活性 Ti 复合添加的条件下,对比初始工艺,铸件中 α -Al 晶粒明显细化,共晶 Si 形貌呈细小的颗粒状或蠕虫状。这是由于添加活性 Ti 细化剂后,增加了 TiB_2 、 TiAl_3 、 TiC 等颗粒

数量,TiC 等颗粒弥散分布在铝液中且不会发生溶解,在铸件凝固过程中可成为 α -Al 晶粒异质形核的核心,促进晶粒细化。大量的 α -Al 晶粒细化后,晶界面积变大,晶界对晶粒内部滑移的钉扎作用增强,较好地阻碍了位错运动,提高了铸件的力学性能。

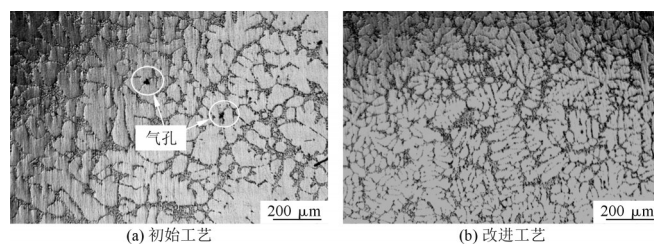


图 9 两种工艺生产铸件的微观组织

Fig.9 Microstructure of castings produced by different methods

4 结 论

(1)对重卡 A356 合金接线盒铸件初始工艺进行了数值模拟,预测并分析了缺陷产生的部位与原因,针对可能出现的铸件缺陷进行了工艺优化,提出在初始浇道下方再增加一处浇道,以对铸件进行充分的补缩。

(2)对两种工艺进行生产验证,其中改进工艺复合使用 Al-Ti-B-活性 Ti 细化剂。结果表明,改进工艺生产的铸件无气孔、缩松等缺陷, α -Al 晶粒更加细化,共

晶Si偏析现象得到改善,铸件力学性能得到提高。

参 考 文 献

- [1] 陈文博,牛润泽,潘星,等.铝合金在汽车轻量化中的应用及重卡轻量化实例[J].汽车实用技术,2020,45(16):49-51.
- [2] 罗强.新能源汽车轻量化设计与材料选择研究[J].汽车测试报告,2023(16):65-67.
- [3] 王禹琪,刘昕晖,陈晋市,等.钢制组装式车轮的轻量化设计及多目标优化[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(7):170-178.
- [4] 王国军.轻量化汽车用铝合金板材结构设计及应用技术研究进展[J].轻合金加工技术,2022,50(4):1-13.
- [5] 毕江,刘雷,张东生,等.铸造、快凝及增材耐热铝合金的研究进展[J].中国有色金属学报,2023,33(4):969-996.
- [6] 刘佳佳,苏小平,叶四扬.铝合金缸盖重力铸造的数值模拟及工艺优化[J].铸造技术,2016,37(8):1765-1768.
- [7] 张东生,李世德,徐佐,等.A356铝合金轮毂低压铸造数值模拟以及组织与力学性能[J].中国有色金属学报,2023,33(6):1720-1731.
- [8] 何芳,庄林忠,何国元,等.汽车轮毂用A356铝合金合金化的研究进展[J].铸造,2021,70(4):431-437.
- [9] 罗永峰,黄飞宇.优化铝合金铸造工艺的策略研究[J].世界有色金属,2023(18):134-136.
- [10] 罗传彪,杜旭初,樊振中,等.铸造工艺对ZL114A铝合金铸件性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2015,35(6):652-656.
- [11] 张云峰,丛培军,张鹏,等.重力倾转铸造工艺在铝合金底盘结构件上的应用[J].铸造,2021,70(8):980-985.
- [12] 张将,彭银江,朱鸿磊,等.A1-Ti-C-B细化剂对A356铝合金组织和性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2021,41(11):1416-1419.
- [13] 杨光,文胜平,雷志国,等.铝合金细化剂细化行为研究现状与展望[J].铸造,2024,73(4):445-452.
- [14] 孙晓斌,张乐,陈彦孜,等.稀土Y及Al-5Ti-B细化剂复合添加对A356铝合金组织和力学性能的影响[J].内蒙古科技大学学报,2024,43(2):119-122.
- [15] 陈学文,钟陈石,付亚城,等.新型晶粒细化剂对再生A356铝合金组织性能的影响[J].工程技术研究,2023(8):101-103.
- [16] 陈旭,席卫国,陈吉,等.L12型 $Al_{67}Cu_8Ti_{25}$ 细化剂的制备及其对铝合金组织的影响[J].特种铸造及有色合金,2024,44(7):940-946.
- [17] 黄朝慧,郭春洁.汽车缸盖用新型铝合金的重力铸造工艺优化[J].热加工工艺,2019,48(7):94-97.
- [18] 陈玉平,史开旺.铝合金铸件金属型重力铸造生产工艺[J].铸造技术,2010,31(10):1364-1366.

(编辑:栗万仲)

《特种铸造及有色合金》征订启事

《特种铸造及有色合金》杂志是中国科学技术协会主管、中国机械工程学会铸造分会和武汉机械工艺研究所共同主办的全国性科技期刊,是对国内外公开发行的中文核心期刊,中国科技论文统计与分析用刊,INSPEC、CA、MA、AJ、JST、Scopus等国内外权威数据库及检索系统收录期刊,并获得全国优秀科技期刊一等奖、国家期刊奖、新中国60年有影响力的期刊、湖北省十大有影响力的自然学术期刊等。

本刊主要报道各种(黑色和有色合金)特种铸造方法、各种有色合金及复合材料成形的理论、工艺、设备、材料、测试与控制、计算机应用等方面的科技成果、生产技术和现场经验,并报道各相关学科和交叉学科,如挤压铸造(液态模锻)、半固态加工、电子封装、高熵合金、非晶合金(金属玻璃)、焊接、粉末冶金、合金化、热处理、表面处理等方面的学术研究和技術信息以及上述内容的国内外发展动向、行业活动、学术会议、消息动态等。

本刊诚征国内外广告,业务范围:铸造及有色合金材料、辅助材料、铸造及相关设备、铸造生产线、测控与控制设备、仪器仪表、计算机应用软件、铸造展会等。

本刊为月刊,标准(大)16开,邮发代号38-109。邮发订价每期20元,全年240元。全国各地邮局均可订阅,也可直接向本刊编辑部邮购,本刊还提供过刊、压铸宝典和年会专刊邮购服务。

特种铸造及有色合金杂志社(武汉)有限公司

地址:武汉市江岸区建设大道融玺1001大厦10楼

邮编:430015

电话:027-85358206,85486024,85358127

投稿网址:www.special-cast.com

邮箱:tzzz@special-cast.com

