

• 今日铸造 Today Foundry •

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2025.5036

高锰钢衬板的铸造工艺与数值模拟研究进展

宋海芬^{1,2}, 李向明^{1,2}, 杨智高^{1,2}, 郑必举^{1,2}, 杨天武^{1,2}, 王元爽³, 高炳臣³, 魏强³

(1. 昆明理工大学材料科学与工程学院, 云南昆明 650093; 2. 昆明理工大学金属先进凝固成形及装备技术国家地方联合工程研究中心, 云南昆明 650093; 3. 云南昆钢耐磨材料科技股份有限公司, 云南玉溪 653400)

摘要: 高锰钢衬板因其优异的耐磨性与冲击韧性, 广泛应用于矿山、建材等重载工况。其组织与性能高度依赖铸造过程中的热传输与凝固行为。综述了当前典型的高锰钢衬板铸造工艺, 包括砂型铸造、金属型铸造、消失模铸造与V法铸造, 同时阐述了数值模拟技术(离散元法、有限元法)在高锰钢衬板研究中的应用。探讨数值模拟在工艺优化中的辅助作用, 并分析各项铸造技术在成型机制、缺陷控制与组织调控方面的工艺特征与适用边界。研究认为, 将数值模拟技术与合理的铸造工艺有效结合是提升衬板质量的关键路径。最后, 指出了当前研究存在的问题, 并对未来研究工作做出了展望。

关键词: 高锰钢; 耐磨衬板; 数值模拟; 铸造工艺

中图分类号: TG2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)07-0702-14

Research Progress on Casting Technology and Simulation of High-manganese Steel Liner

SONG Haifen^{1,2}, LI Xiangming^{1,2}, YANG Zhigao^{1,2}, ZHENG Biju^{1,2}, YANG Tianwu^{1,2},
WANG Yuanshuang³, GAO Bingchen³, WEI Qiang³

(1. Faculty of Materials Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 2. National-local Joint Engineering Research Center for Technology of Advanced Metallic Solidification Forming and Equipment, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China; 3. Yunnan Kungang Wear Resistant Material Science Co., Ltd., Yuxi 653400, China)

Abstract: High-manganese steel liner plates are widely utilized in heavy-duty service conditions such as mining and building material industries because of their exceptional wear resistance and impact toughness. The microstructure and mechanical properties of these materials are highly dependent on heat transfer and solidification behavior during the casting process. This paper reviews current mainstream casting processes for high-manganese steel liner plates, including sand casting, metal mold casting, lost foam casting, and V-process casting, while elaborating on the application of numerical simulation techniques (discrete element method, DEM; finite element method, FEM) in their research. This work explores the auxiliary role of numerical simulations in process optimization and analyses the technical characteristics and applicability boundaries of these casting methods in terms of solidification mechanisms, defect control, and microstructure regulation. The study concludes that the effective integration of numerical simulation technologies with rational casting processes is a critical pathway for enhancing liner plate quality. Finally, existing research limitations are identified, and perspectives for future investigations are provided.

Key words: high-manganese steel; wear-resistant liner plate; numerical simulation; casting process

高锰钢于 1882 年由英国人 Hadfield 发明并取得专利, 随后迅速成为矿山等领域常用的铸件材

料。传统高锰钢的主要化学成分如表 1 所示, 其优异的耐磨性能和良好的冲击韧性使其成为制造各种耐

收稿日期: 2025-03-08

基金项目: 云南省重大科技专项(202402AG050009); 高功率柴油发动机球墨铸铁曲轴制备关键技术研究及产业化(202402AG050003)

作者简介: 宋海芬, 2000 年生, 硕士生。研究方向为金属凝固过程模拟仿真、V 法铸造工艺设计等。Email: 17893328980@qq.com

通信作者: 李向明, 1980 年生, 博士, 教授, 博导。研究方向为有色金属凝固成形技术、金属凝固过程模拟仿真、共晶生长理论等。

Email: lixm@kust.edu.cn

引用格式: 宋海芬, 李向明, 杨智高, 郑必举, 杨天武, 王元爽, 高炳臣, 魏强. 高锰钢衬板的铸造工艺与数值模拟研究进展[J]. 铸造技术, 2025, 46(7): 702-715.

SONG H F, LI X M, YANG Z G, ZHENG B J, YANG T W, WANG Y S, GAO B C, WEI Q. Research progress on casting technology and simulation of high-manganese steel liner[J]. Foundry Technology, 2025, 46(7): 702-715.

表1 传统高锰钢化学成分
Tab.1 Chemical composition of conventional high-manganese steels (mass fraction/%)

C	Si	Mn	S	P
0.9~1.5	0.3~1.0	10~15	≤0.05	≤0.10

磨衬板的理想材料^[1-3]。高锰钢衬板在破碎机、球磨机等设备中起着至关重要的作用,其性能直接影响设备的运行效率和使用寿命。随着工业生产对设备性能要求的不断提高,对高锰钢耐磨衬板的铸造工艺研究也日益受到重视。

高锰钢耐磨衬板的性能不仅关系到设备的运行效率和使用寿命,还直接影响企业的生产成本和经济效益。传统的高锰钢耐磨衬板在使用过程中会出现磨损过快、更换频繁等问题,导致设备停机时间增加,生产效率降低,同时也增加了企业的维护成本^[4-9]。通过改进铸造工艺,可以有效提高高锰钢耐磨衬板的性能,延长其使用寿命,减少更换次数,从而为企业带来显著的经济效益。因此,研究高锰钢耐磨衬板的铸造工艺具有重要的现实意义和广阔的应用前景。

本文阐述了国内外学者就高锰钢衬板铸造工艺和数值模拟技术的研究成果,重点介绍砂型、金属型、消失模、V法4种铸造工艺及离散元法、有限元法2种主流数值模拟方法,并对已有工作进行了总结与展望。

1 高锰钢衬板的铸造工艺研究进展

随着工业发展对衬板性能要求不断提升。然而,高锰钢衬板在铸造过程中易出现缩孔、缩松等缺陷,严重影响其性能和使用寿命。因此,优化铸造

工艺,提升衬板质量具有重要意义。近年来,为进一步提升高锰钢衬板的性能,研究人员在优化材料成分和热处理工艺的基础上,通过改进铸造工艺提高铸件质量^[10-11]。目前,衬板的铸造工艺主要有砂型铸造、消失模铸造、金属型铸造、V法铸造。

1.1 高锰钢衬板的砂型铸造工艺

砂型铸造作为历史悠久且应用广泛的金属铸造工艺,凭借其良好的工艺适应性、较低的生产成本及对多种合金体系的兼容性,在大型高锰钢衬板制造中占据重要地位。近年来,研究者围绕提升铸件精度、组织致密性与力学性能一致性,从冒口设计、浇注系统布置及浇注温度等方面对该工艺展开优化研究^[12-14]。

1.1.1 工艺优化

冒口是砂型铸造中的关键组成部分,其主要功能是通过提供额外的液态金属,补偿铸件在凝固过程中的体积收缩,从而减少或消除缩孔、缩松等缺陷。研究表明,合理的冒口设计需确保其凝固时序滞后于铸件本体^[15]。

庞国柱等^[16]研究了冒口设计对衬板质量的影响,发现原工艺采用多个小尺寸冒口配合冷铁浇注时,因无法实现顺序凝固,导致衬板内部出现严重缩孔缺陷。为此,其团队对原工艺进行改进,改进后的工艺如图1所示。通过减少冒口数量并提出浇冒口一体化新工艺,显著提升了补缩效率,消除了缩孔、缩松问题。张云辉等^[17]进一步优化该工艺,取消横浇道,采用单一较大内浇道并增大冒口尺寸,明确指出浇冒口一体化设计中,冒口尺寸需不小于热节圆的1.5倍,以保障有效补缩。

在补缩系统协同优化方面,冷铁与铸型材料的

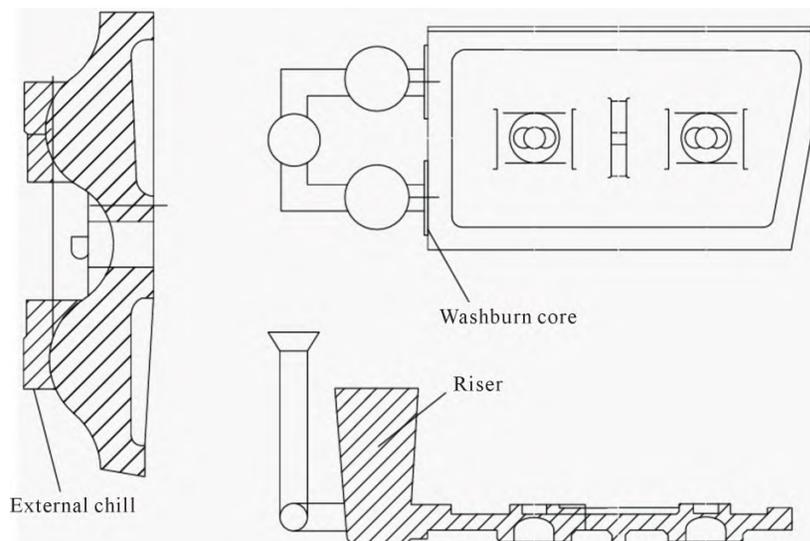


图1 工艺优化方案^[16]

Fig.1 Improved casting process^[16]

合理应用成为研究热点。张佳亮^[18]在对磨机衬板铸造工艺的研究中通过设置外冷铁进行对比实验,发现外冷铁不仅能提高铸件的致密度,还可细化晶粒结构。此外,通过选用碱性、耐火度高且具有一定激冷效果的镁橄榄砂作为铸型材料,进一步提升了铸件致密性与组织均匀性。然而,内冷铁的使用需谨慎,徐志宏等^[19]研究发现,在浇注温度较低时,内冷铁与钢液易出现融合不充分现象,在衬板内部形成缺陷,威胁铸件质量。

1.1.2 工艺参数与涂料优化

浇注温度是调控高锰钢衬板组织与性能的关键参数,其直接影响奥氏体晶界迁移、枝晶生长及碳化物析出行为。

包瑞斌^[20]对不同浇注温度下高锰钢晶粒度和力学性能进行了研究。结果表明,在不同浇注温度下,晶粒度和力学性能随浇注温度的升高呈下降趋势(图2)。Arapov等^[21]通过模拟与实验相结合,明确了晶粒尺寸与浇注温度的线性关系。如图3所示,铸件在1390~1410℃下,平均晶粒尺寸为113~116 μm,磨损率最小为1.74%~1.81%。

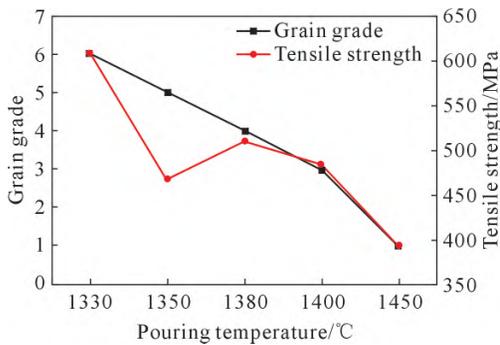


图2 浇注温度对晶粒度和力学性能的影响^[20]
Fig.2 Effects of the pouring temperature on the grain grade and mechanical properties^[20]

为获得高质量铸件,除严格控制浇注温度外,还需协同优化多项工艺参数。赵金山等^[22-23]用稀土(RE)变质处理改善碳化物形态,细化晶粒,配合呋喃

树脂砂制芯,遵循“高温出炉低温快浇”原则,将浇注温度控制在1400~1450℃,传统高锰钢与变质高锰钢的性能对比如表2所示。该方案显著提升钢液质量与铸件晶粒度,有效验证了多工艺协同优化的重要性。

表2 传统高锰钢与变质高锰钢性能对比^[22]
Tab.2 Comparative analysis of properties between conventional high-manganese steel and modified high-manganese steel^[22]

Alloy	σ_b /MPa	δ /%	α_k /(J·cm ²)	Hardness (HBS)
ZGMn13	608	13	112	210
Modified high-manganese steel	916	34	1187	224

高锰钢是一种奥氏体钢,含有较多碳化物,使其具有较高脆性和硬度,当冒口设置在铸件本体上时,切割冒口会导致材料产生局部应力集中,从而诱发衬板产生裂纹。尽管“浇冒口一体化”设计能有效解决这一问题,但该方案需配备尺寸更大的冒口,以确保冒口凝固时序滞后于铸件本体,实现有效补缩,使得出品率显著降低。因此,需通过进一步优化冒口设计和切割工艺等,降低切割引起的缺陷风险,提升铸件整体质量。此外,将浇注温度精准控制在1390~1410℃区间,有助于获得最优铸件性能。

随着工业领域对高锰钢衬板的精度、铸造砂回收率、表面质量及复杂结构成型需求日益严苛,传统砂型铸造的局限性逐渐成为技术发展瓶颈。为突破这一技术困境,铸造领域持续推进技术创新与迭代,金属型铸造凭借金属模具替代砂型的技术革新,率先弥补了砂型铸造在铸件精度与表面质量上的不足;而消失模铸造则以气化模具的创新理念,进一步打破传统铸造的技术壁垒,为复杂结构高锰钢衬板的高效生产开辟了新路径。

1.2 高锰钢衬板的金属型铸造工艺

在砂型铸造面临铸件表面质量与材料利用率瓶颈的背景下,金属型铸造凭借金属模具替代砂型的

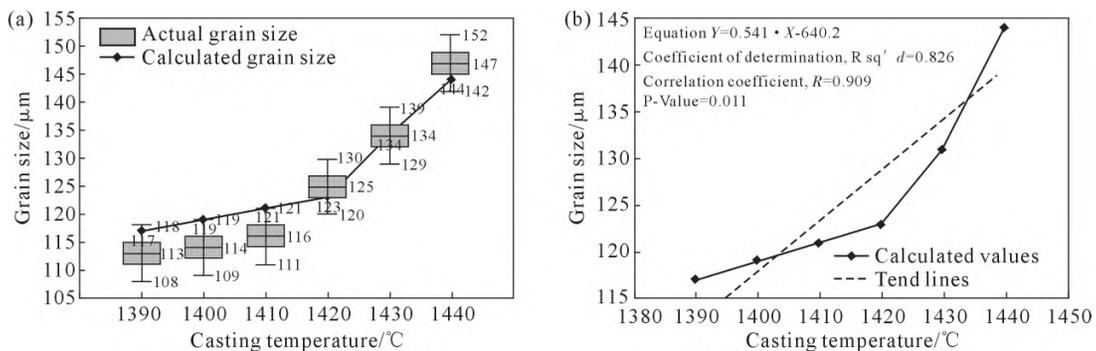


图3 晶粒尺寸随温度的变化:(a)奥氏体晶粒的计算尺寸与实际尺寸对比;(b)晶粒尺寸计算值的近似值^[21]
Fig.3 Grain size variation with temperature: (a) comparison between the calculated and actual sizes of austenite grains; (b) approximation of the actual calculated values of the grain size^[21]

技术革新,成为高锰钢衬板铸造工艺升级的重要方向。该工艺通过模具重复使用降低砂型消耗,在提升铸件精度与生产效率方面展现显著优势,近年来围绕其工艺优化与参数调控的研究取得诸多突破。

1.2.1 工艺优化

模具材料的导热性能是金属型铸造的技术核心。传统铸铁或钢制模具导热系数约为 $50 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,难以抑制高锰钢碳化物过度析出。日本学者提出铈镁铜合金模具,导热系数突破 $300 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,大幅加快铸件冷却速率,使后续水韧工艺得以省略,显著降低生产成本。尽管该材料在热疲劳强度方面仍有短板,但已成为提升工艺水平的关键突破^[24]。牛显明等^[25]进一步探索铜合金模具应用,通过设置壁厚 25 mm 并优化冷却系统,不仅提高了铸件尺寸精度与组织均匀性,还延长了模具使用寿命,减少热处理工序,实现工艺成本与质量的双重优化。

在此基础上发展的覆砂金属型铸造工艺,通过在金属型内表面增设砂层,进一步改善界面传热效率^[26]。钟敏等^[27]对比研究了普通砂型铸造和覆砂金属型铸造工艺。图4为覆砂金属型铸造工艺,显示了覆砂层与金属层的复合结构。图5为两种工艺下衬板金相组织对比,图5a中普通砂型铸造衬板铸态组织中存在粗大颗粒状碳化物;图5b中,经过后续热处理

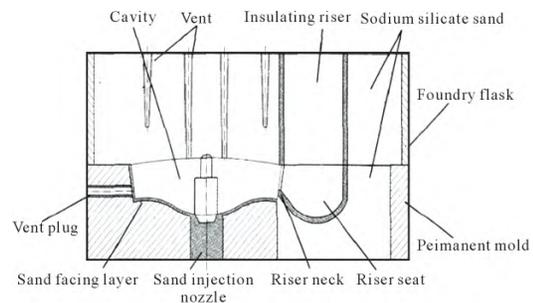


图4 高锰钢衬板膜砂金属型铸造工艺示意图^[27]

Fig.4 Schematic diagram of the resin and-lined metal mold for a high-Mn steel liner^[27]

后,合金获得单一奥氏体组织;而图5c中,覆砂金属型铸造由于具备强激冷作用,抑制了碳化物析出,使铸件在铸态下即可获得细小、致密组织。

1.2.2 工艺参数与涂料优化

工艺参数调控直接影响铸件质量。铸造过程中衬板性能高度依赖于模具与铸件之间的热交换效率。Ahmadein等^[28]指出,模具材料热物理性质显著影响界面传热系数,铜或石墨模具凭借高扩散率可有效加快铸件冷却。影响铸件与铸型间热传递的因素除了模具属性之外,还有工艺因素。刘桐旺^[29]进一步研究了在不同浇注温度条件下界面换热系数的变化。图6为浇注温度对界面换热系数影响的示意图。对比3条曲线可知,浇注温度越高,界面热交换系数

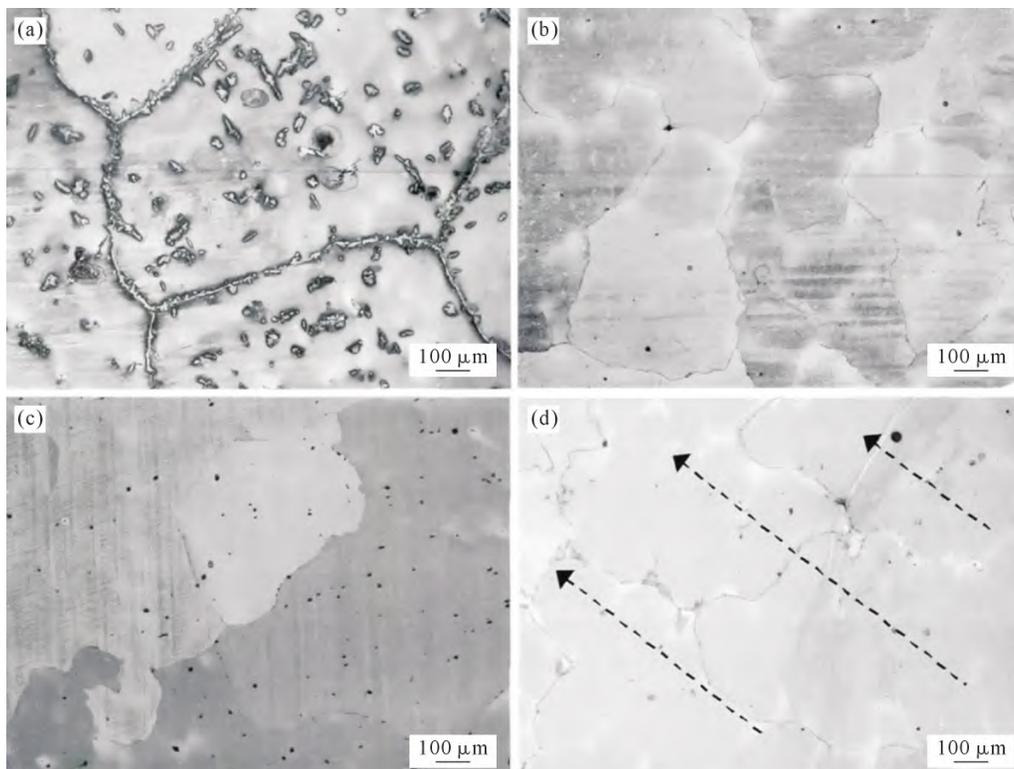


图5 两种工艺铸造下高锰钢衬板典型金相组织:(a)普通砂型铸态;(b)普通砂型热处理态;(c)覆砂金属型铸态;(d)覆砂金属型热处理态^[27]

Fig.5 Microstructures of high Mn steel liner produced by two technologies: (a) conventional sand mold, as-cast condition; (b) conventional sand mold, heat-treated condition; (c) sand-coated permanent mold, as-cast condition; (d) sand-coated permanent, heat-treated condition^[27]

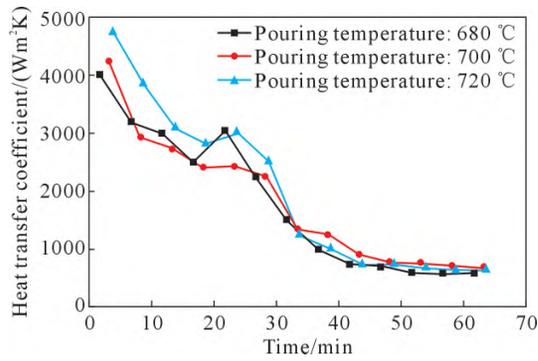


图6 不同浇注温度下界面换热系数对比^[29]
 Fig.6 Comparative analysis of the interfacial heat transfer coefficients at different pouring temperatures^[29]

峰值越大,冷却过程更剧烈。

为优化铸件质量,在金属模具表面喷涂涂料成为关键环节。涂料能使模具表面的温度分布更均匀,减少因局部过热或过冷产生缺陷。同时,涂层还能防止钢液直接与金属模具接触而产生沾模现象。张密兰^[30]研究表明,优质涂料可使模具温度均匀分布,减少局部过热风险,同时防止钢液沾模,显著改善模具服役条件,降低热疲劳失效概率。涂料设计中,耐火骨料的选择决定涂层性能。刘玉满等^[31]指出,云母粉常用于铜合金模具涂料,但新型材料研究持续推进。梁峰等^[32]提出以六方氮化硼(BN)复合材料替代石墨作为耐火骨料,表3为实验对比中3种涂料的耐火骨料成分,如图7所示,相较于石墨,该材料在抗热震性与抗氧化性方面表现优异,有望解决石墨粉尘污染与隔热性不足的问题。

表3 不同涂料的耐火骨料成分^[32]
 Tab.3 Refractory aggregate compositions of different coatings^[32]

Refractory coating	(mass fraction/%)		
	G1	G2	B
Flake graphite	10	3	3
Hexagonal boron nitride	0	0	3

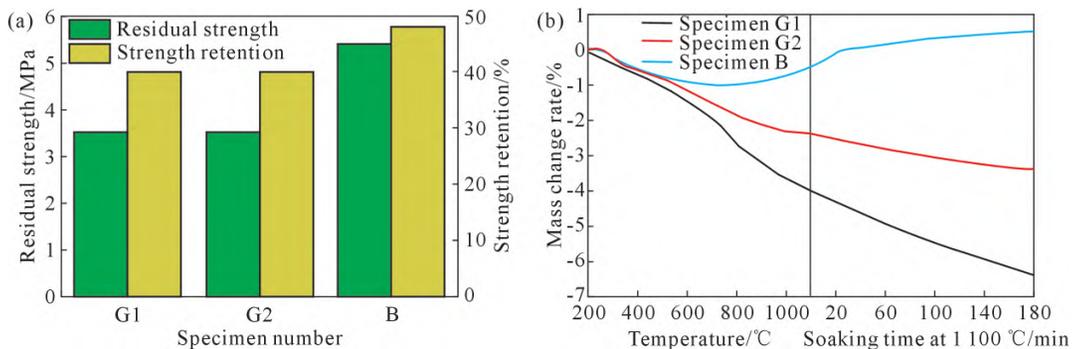


图7 3种涂料性能对比:(a)不同试样残余强度和强度保持率;(b)不同试样氧化过程中的氧化质量变化曲线^[32]
 Fig.7 Comparison of the properties of the three coatings: (a) residual strength and strength retention of different samples; (b) mass change curves during oxidation for various samples^[32]

相较于普通砂型铸造,覆砂金属型工艺展现出制备高性能免热处理衬板的潜力。不过,该工艺采用低压压缩空气充型,需严格控制砂中挥发物含量与排气设计,以避免气孔缺陷。工艺参数方面,模具材料的热物理性质和浇注温度均显著影响铸件与铸型间的热交换效率,高温浇注虽能提高界面热交换系数峰值,但也会加剧冷却过程。在涂料设计中,传统云母粉、石墨等材料正逐步被六方氮化硼复合材料等新型环保材料取代。未来针对石英粉、氮化硼和石墨粉等材料的合理配比与喷涂工艺优化,将成为提升金属型铸造质量与环保水平的核心研究方向。

采用金属型铸造技术生产高锰钢衬板,其铸件表面质量相对较高,组织致密,工艺流程较为缩短,可以不用进行后续的淬火工艺。但面对具有复杂内腔、曲面等异形结构的高锰钢衬板,其模具制造难度与成本问题逐渐凸显。在此背景下,消失模铸造凭借无需分型面、可成型复杂结构的独特优势,成为解决传统工艺局限性的创新方案。

1.3 高锰钢衬板的消失模铸造工艺

消失模铸造工艺以可发性聚苯乙烯(EPS)或共聚物(STMMA)泡沫为模具,经涂覆耐火涂料、造型压实后,在浇注过程中模型气化消失形成铸件,具备复杂结构成型能力强、成本低、流程简化等优势^[33],为高锰钢衬板的高效生产提供了新路径。

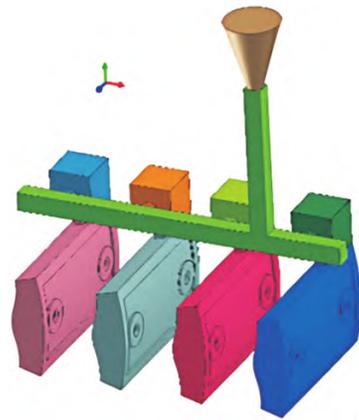
1.3.1 工艺优化

针对高锰钢衬板的成型特点,研究者在消失模铸造工艺优化上取得多项突破。卓荣明^[34]利用该工艺成功实现沟槽式高锰钢衬板多环形料垫底槽的一体化成型,所制铸件的冲击韧性(20~25 J/cm²)和硬度(HRC50~55)显著优于传统砂型铸造,充分验证了工艺在复杂结构件制造中的优势。

在消失模铸造衬板工艺改进方面,徐志宏^[35]对浇注系统的设计进行了研究,指出采用立浇底注式系统并优化内浇道结构可减少紊流,有效抑制塌砂

与气孔。王强等^[36]在对高锰钢衬板铸造工艺的研究中指出,通过对浇注系统采用半封闭式,设置多个扁平喇叭状的内浇道,可使金属液平缓流入型腔且不阻碍收缩;采用外冷铁与带割片的保温冒口,能使冒口对铸件达到更好的补缩并方便后续清理,且生产得到的铸件缩孔缺陷率降至 0.7%以下。2024 年,张彦超等^[37]采用 ProCAST 软件研究了 3 种不同消失模工艺(A:顶注无冒口;B:阶梯侧注无冒口;C:侧注有冒口)对衬板质量的影响。结果表明,工艺 A 和 B 的浇注系统设计不合理,在充型过程中出现明显紊流,无冒口设计导致铸件无法得到补缩,凝固后内部和表面均存在严重的缩孔、缩松缺陷,严重影响铸件质量。工艺 C 如图 8 所示,测注式的浇注系统使得金属液充型过程平稳,铸件凝固后,虽然在其心部存在缺陷,但表面质量显著提升,为浇注系统设计提供了量化依据。对工艺 C 进行试制生产,仿真结果与生产结果如图 9 所示,试制结果与仿真结果一致。

虽然冒口的设计能对高锰钢衬板进行有效补缩,但由于高锰钢导热性差、热膨胀系数大,故在切割冒口过程中易对衬板产生裂纹,且热处理后还会导致碳化物晶界偏聚,增大脆性。受真空铸造原理启发,路金川^[38]提出无冒口工艺方案,采用低温浇注减少液态收缩,配合真空度在 $-0.45\sim-0.50$ MPa 之间的砂箱,确保铸件能同时凝固,生产得到的铸件无质量问题。

图 8 铸造工艺 C^[37]Fig.8 Casting process diagram for type C^[37]

1.3.2 工艺参数与涂料优化

工艺参数的精准调控是消失模铸造的关键。由于 EPS 模型气化吸热,该工艺对浇注温度要求更高,但过高温易导致柱状晶生长、组织不均^[39-42]。张苍南^[43]研究了不同浇注温度对铸件充型过程的影响。在 1480°C 的浇注温度下,金属液充型速度最快,并且充型过程平稳有效避免了冷隔等缺陷的产生。侯晋梅^[44]进一步研究了不同浇注温度对消失模铸造质量的影响。图 10 为浇注温度和冲击韧性、晶粒度的关系, 1480°C 的浇注温度下,铸件晶粒细小均匀,综合力学性能达到最优。

在消失模铸造中,由于模型会发生气化,需在其表面涂上耐火保护层,以减少铸件粘砂,吸附模型气化产物,保证其表面精度,并防止造成冲砂。肖海

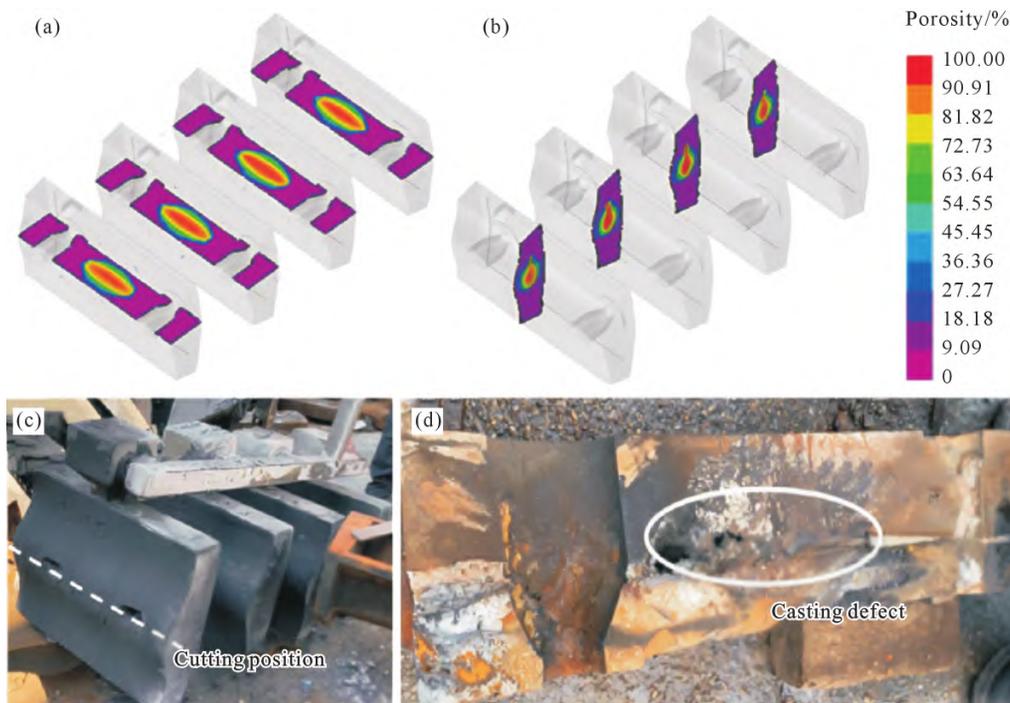


图 9 工艺 C 仿真与试制生产结果:(a) 缩孔缺陷预测,XY 截面;(b) 缩孔缺陷预测,XZ 截面;(c) 实际铸件;(d) 心部缺陷^[37]
Fig.9 Process C simulation results vs. trial production results: (a) shrinkage porosity prediction in the XY-section; (b) shrinkage cavity prediction in the XZ-section; (c) actual casting; (d) core zone defects^[37]

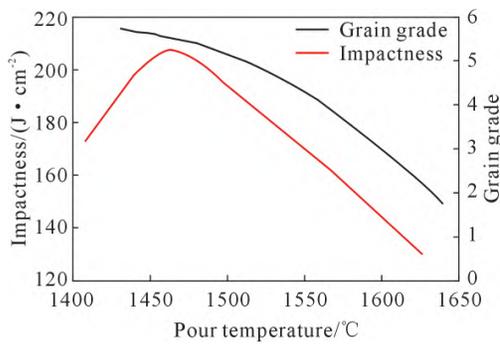


图 10 浇注温度和冲击韧性、晶粒度的关系^[44]

Fig.10 Relationships between pouring temperature and impact and grain grade^[44]

波^[45]对水基锆英涂料的不同涂刷方式(喷涂、刷涂、流涂)进行了研究。喷涂是在热壳状态下砂芯脱膜后直接施涂,刷涂和流涂均是在自然冷却后施涂。经过喷涂后的铸件虽改善了外观缺陷,但仍存在皱皮、脉纹、结疤等缺陷,而经刷涂和喷涂后的铸件外观良好。其研究指出,使用锆英粉涂料的最佳施涂方式为刷涂,最佳厚度为 0.2~0.4 mm。不同施涂方式适合不同结构的铸件,流涂适合复杂铸件,刷涂适合简单结构,最佳涂层厚度为刷涂 0.2~0.4 mm,流涂 0.13~0.18 mm。Aftab 等^[46]研究了在消失模铸造下,亚麻籽油、锆英石及菱镁矿涂层对高锰钢铸件表面的影响,指出采用锆英石涂层的铸件表面虽存在气孔,但表面光洁度显著优于亚麻籽油和菱镁矿涂层。

工艺优化方面,无冒口铸造工艺的提出成功解决了后续切割冒口时对衬板造成的危害,同时出品率提高超过 20%,在降低生产成本与保障铸件质量方面展现出显著优势,但该工艺需严格控制浇注过程中的真空度及浇注温度。工艺参数与涂料优化上,浇注温度对铸件充型与组织性能影响关键,1480 °C 为较优浇注温度,可确保充型平稳、晶粒均匀;并且配合锆英石涂层更有利于获得性能较好、表面光洁

度较高的铸件。

尽管消失模铸造工艺在高锰钢衬板的制造中展现出诸多优势,但在实际应用中仍面临一系列挑战。如模型的发泡倍率、涂料的均匀性与附着质量以及型砂的紧实度,均会显著影响铸件的成形精度与内部致密性。基于此,研究者提出采用 V 法铸造高锰钢衬板可以很好地解决型砂紧实度的难题。

1.4 高锰钢衬板的 V 法铸造工艺

在消失模铸造解决复杂结构成型难题后,铸造行业对高效、低耗及高质量铸件的追求促使 V 法铸造技术成为新的研究焦点。真空密封造型铸造(V 法铸造)自 1971 年由日本学者本堂昌雄和中田邦位提出后^[47-48],凭借 EVA 塑料薄膜密封型腔、真空负压吸附干砂成型的独特工艺,实现无黏结剂生产,大幅降低能耗。相较于传统砂型铸造,其真空吸附特性能够有效减少气孔和夹砂缺陷,铸件表面粗糙度(Ra)提升约 60%,成为高锰钢衬板绿色化、高质量铸造的重要发展方向。图 11 展示了 V 法铸造的基本流程。

1.4.1 工艺优化

在工业应用方面,日本在 V 法铸造自动化领域处于领先地位,其自动化生产线可实现浇注、冷却、清理与检测的全流程控制,显著提升了生产效率与铸件质量的稳定性。近年来,我国也加快推进 V 法自动化铸造的发展。浙江某耐磨材料企业通过引入全自动 V 法铸造生产线,用于高锰钢衬板等耐磨件制造,显著提升了产能与产品一致性^[49]。

在技术研发方面,笔者目前正在针对 T 形高锰钢衬板开展 V 法铸造工艺优化研究,基于 ProCAST 软件进行工艺模拟。图 12 为 T 形高锰钢衬板孔隙率分布云图,紫色高亮区域为孔隙率大于 0.1% 的潜在缩孔缩松区。潜在缩孔缩松区域控制良好,预测工艺出品率达 82.3%,并计划通过 X 射线探伤与金相

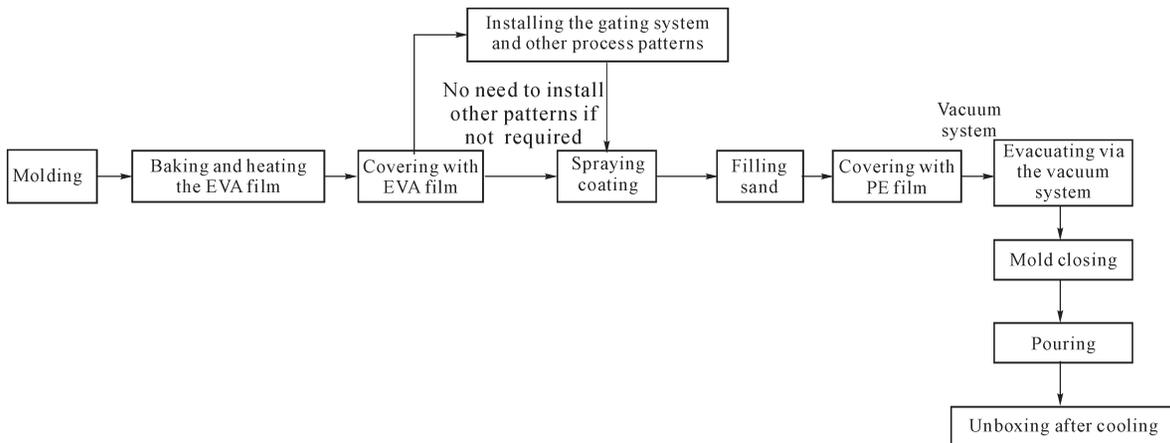


图 11 V 法铸造生产工艺基本流程

Fig.11 Basic production process of vacuum sealed molding (V-process) casting

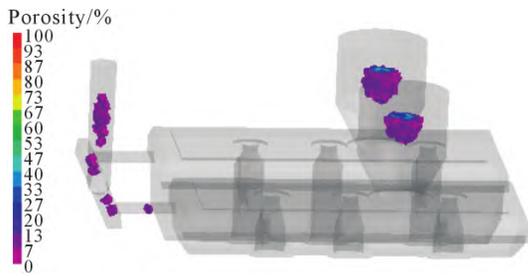


图 12 T形高锰钢衬板孔隙率分布云图

Fig.12 Contour map of the porosity distribution in the T-shaped high manganese steel liner

分析验证模拟结果,进一步完善工艺参数。

1.4.2 工艺参数与涂料优化

在采用 V 法铸造高锰钢衬板时,若浇注温度过高,型砂易烧结,铸件表面粘砂现象加剧;若温度过低,则不利于充型完整性^[50]。Liu 等^[51]研究了在真空铸造下不同铸造工艺对铸件耐磨性能的影响。经过反复实验,最终确定对铸件采用浇注温度为 1 600 ℃,并且浇注过程采用慢-快-慢的浇注方法。笔者结合高锰钢热物性分析,选取 1 510 ℃作为工艺浇注温度,有效避免温度过高导致的型砂烧结、粘砂问题,

以及温度过低引起的充型不完整缺陷。

金属液浇注后 EVA 薄膜烧失,涂料层需承担型腔密封重任,因此耐高温强度与快速干燥性成为涂料核心性能要求。肖莹^[52]分别研究了干燥温度、涂层厚度和耐火骨料组分等因素对涂料性能的影响。选取了 4 种具有代表性的铸钢涂料,主要骨料成分如表 4 所示,各影响关系如图 13 所示,当干燥温度增加、湿度降低时,涂料的干燥性、附着性和耐磨性变好;当涂层厚度增加,涂料的干燥性和附着性降低。杨帆等^[53]研究了耐火骨料粒径对涂料干燥性能的影响。不同耐火骨料粒径如表 5 所示,图 14 为不同粒径下涂料干燥性能的变化曲线,可以看出随着耐火骨料粒径的增大,涂料的干燥性变差。

在关键工艺参数控制方面,浇注温度应控制在 1 550 ℃左右,能够有效平衡粘砂与充型问题。此外,建议选择粒径较大的耐火骨料以提高干燥效率,并基于高锰钢碱性特性,应选用抗碱性熔渣的耐火骨料,如镁橄榄石粉和锆英粉,其中镁橄榄石粉耐火度高达 1 910 ℃,且可在高温下与钢液形成惰性界面,有效降低化学粘砂风险。

表 4 4 种涂料的主要耐火骨料^[52]Tab.4 The main refractory aggregates of the four types of coatings^[52]

Coating	01	02	03	04
Main aggregate	Quartz powder, bauxite powder	Quartz powder, flake graphite powder, iron oxide powder	Quartz powder, graphite powder, iron oxide powder	Quartz powder, bauxite powder, mullite powder

表 5 耐火骨料粒径分布^[53]Tab.5 Particle size distribution of refractory aggregates^[53] (mass fraction/%)

Material	250~320 mesh	320~400 mesh	>400 mesh
Zircon Powder	2	26	72
Quartz Powder	0	59	41

当前,V 法铸造在高锰钢衬板制造领域虽展现出较好表面质量与工艺简化优势,但在生产实践中仍面临诸多挑战,如 EVA 膜烧蚀后密封失效、涂料抗冲刷性能不足、真空系统控制精度低以及对复杂几何件适应性差等。因此,还需根据铸件几何形状与尺寸合理设计工艺参数。例如,需选用合适厚度与强度的 EVA 薄膜,并配合优化的涂料配方与抽真空参数,以确保充型过程的稳定性和透气性。

2 数值模拟技术在高锰钢衬板中的应用

传统高锰钢衬板设计依赖经验公式与反复实验,存在研发周期长、成本高及工况适应性差等弊端。随着技术的发展,数值模拟技术可对衬板铸造过程中的充型凝固行为,实际工况下的受力、磨损和疲劳过程等进行仿真模拟,为优化工艺参数、提升

衬板性能提供了新途径^[54]。近年来,离散元法(discrete element method, DEM) 和有限元法(finite element method, FEM)在该领域的应用取得显著进展。

2.1 离散元法

离散元法是一种非连续介质的数值模拟方法,能够从颗粒尺度出发,模拟衬板与矿石及研磨介质的动态交互作用。通过离散元法定量分析衬板表面的应力分布、磨损速率及磨损形态演变规律。在此基础上,调整衬板形状、提升条高度及角度等结构参数,对比优化前后衬板的性能指标,进而确定最佳结构参数组合,实现衬板结构的优化设计^[55-56]。

孙珊珊等^[57]利用 EDEM(engineering discrete element method) 软件与 ANSYS 有限元软件的耦合仿真技术对衬板的几何形状进行了改进研究。通过对原波形衬板的力进行分析,设计了一种新型波形衬板。如图 15 所示,在主提升条两侧添加高度为主提升条 1/3 的副提升条,仿真结果表明,其耐磨性能显著优于原设计,衬板磨损对比如图 16 所示。然而,该研究也指出,复杂的衬板形状(如波浪形)可能会在某些特定区域产生局部应力集中,导致局部磨损

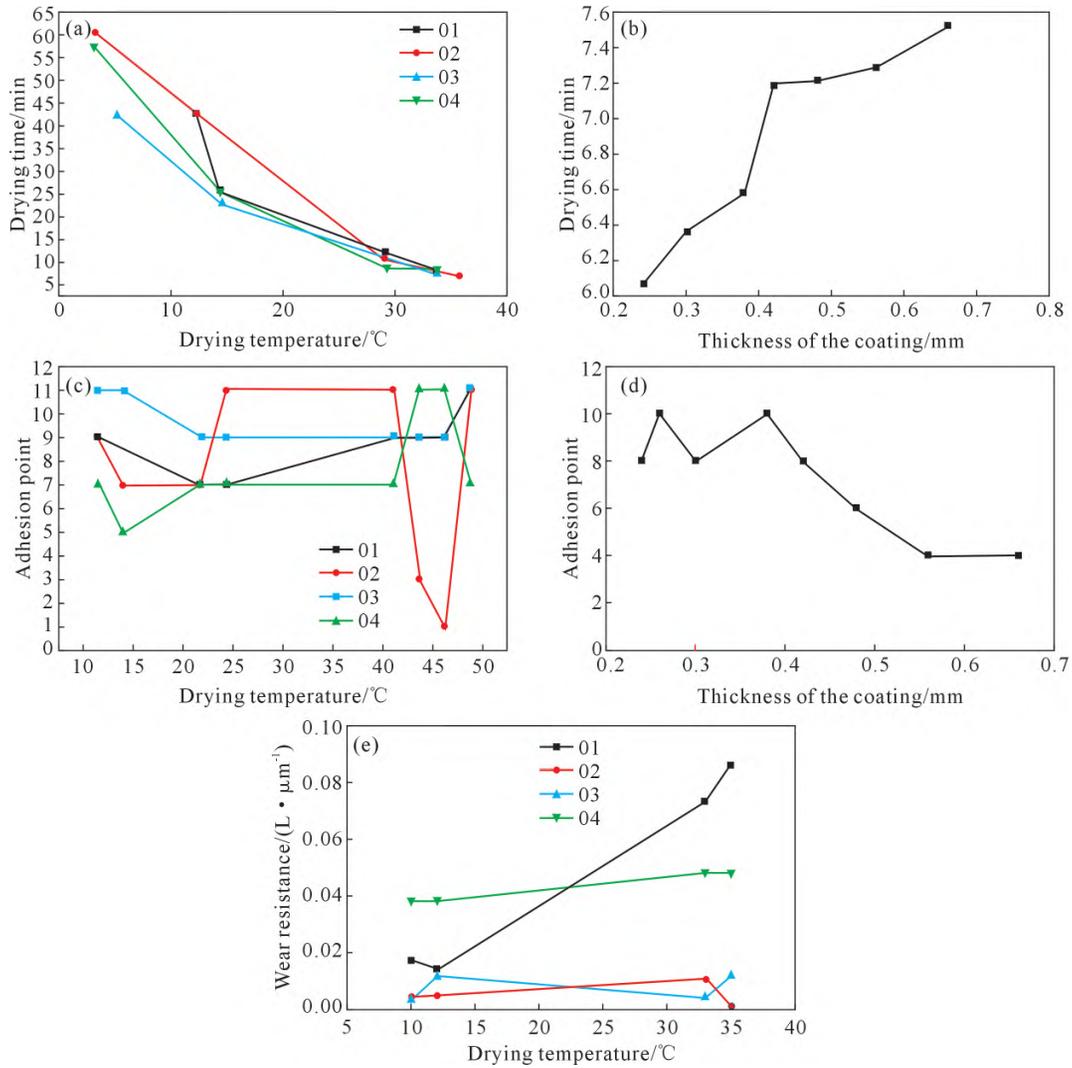


图 13 不同因素对涂料影响关系:(a) 不同干燥温度下涂料干燥时间;(b) 不同厚度下涂料干燥时间;(c) 不同干燥温度下涂料附着性点数;(d) 不同厚度下涂料附着性点数;(e) 不同干燥温度下涂料耐磨性^[52]
 Fig.13 Interrelationships between various factors and coatings: (a) drying time of coatings under different drying temperatures; (b) drying time of coatings at different coating thicknesses; (c) adhesion rating of coatings under different drying temperatures; (d) adhesion rating of coatings at different coating thicknesses; (e) wear resistance of coatings under different drying temperatures^[52]

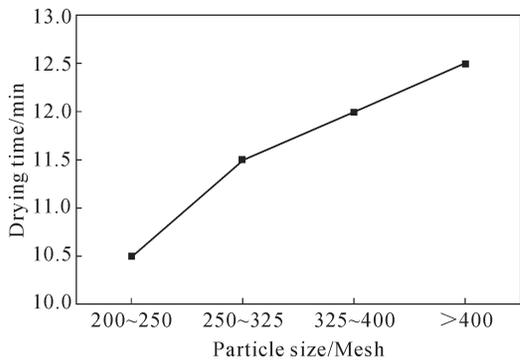


图 14 耐火骨料粒径对涂料干燥性能的影响^[53]
 Fig.14 Effect of refractory aggregate particle size on coating drying performance^[53]

加剧。因此,合理的结构设计必须在提升耐磨性的同时分散应力,避免局部失效。李云啸等^[58]基于离散元法对球磨机筒体衬板的结构及高度进行了系统优化分析。研究指出,衬板结构和高度显著影响磨机内颗

粒的运动状态和能量分布,不平滑型衬板(如筋波衬板和双筋衬板)在提升载荷方面虽优于平滑型衬板(如单波衬板和双波衬板),但会增加衬板的磨损,降低衬板的疲劳寿命。

此外,在平滑型衬板中,双波衬板的能量分布最为合理,能有效减少工作中的磨损;在不平滑型衬板中,不同结构形式的衬板适用于不同的研磨阶段。T形衬板采用非对称锥面设计,可优化冲击力分布,减少不对称磨损,适用于大颗粒、高硬度物料的粗碎工艺。L形衬板能够将研磨介质提升至更高位置,产生更强冲击力,适用于大块矿石的初碎阶段。由于其提升能力较强,通常需配合高韧性材料以抵抗频繁冲击。波形衬板通过波浪形表面在冲击与研磨之间取得平衡,可减少钢球的滑动摩擦,提升研磨接触频率,但由于耐高温性较差,不适用于干法磨矿工艺。

杜强^[59]基于离散元法对衬板表面颗粒运动进行

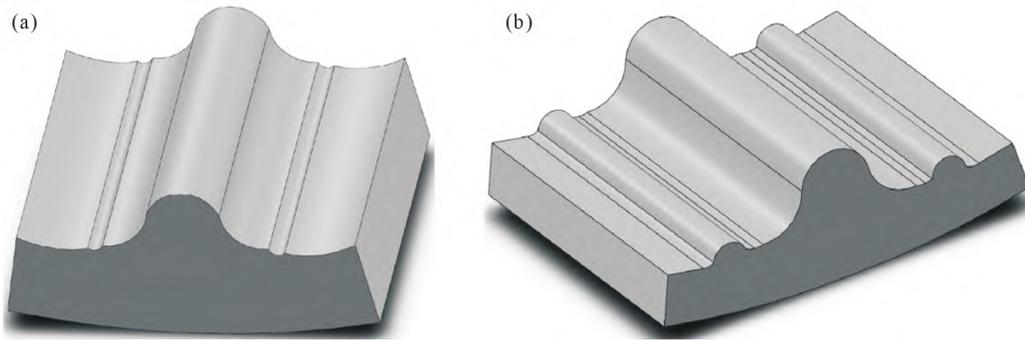


图 15 改进前后波形衬板形状:(a)原始波形衬板;(b)新型波形衬板^[57]

Fig.15 Shape of the wave-shaped liner plate before and after improvement: (a) diagram of the original wave-shaped liner plate; (b) diagram of the new wave-shaped liner plate^[57]

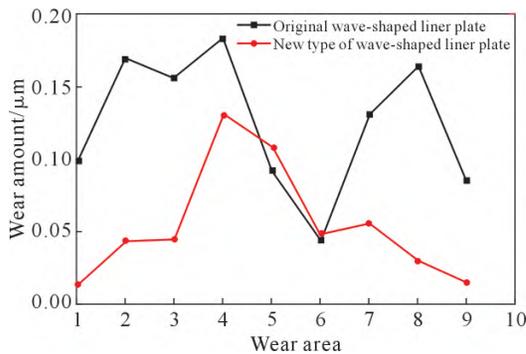


图 16 波形衬板磨损^[57]

Fig.16 Wear profile of the wave-shaped liner plate^[57]

了计算分析,深入探讨了衬板的磨损机制。提升条的磨损是影响衬板使用寿命的关键因素,其磨损过程可分为初期的冲击磨损和中后期的滑动磨损两个阶段,初期物料对提升条“趾部”的冲击切削因相对速度低,磨损缓慢;中后期钢球与物料滑动加剧,导致磨损加速。俞章法等^[60]进一步对衬板的提升条高度进行改进。将提升条的高度由 100 mm 提高至 120 mm,即增大了波峰与波谷之间的高度差,改进后的衬板使用寿命显著延长。他们指出,筒体衬板波峰和波谷的最优高度差应达到最大钢球直径的 60%,此时衬板对钢球才能具有足够的提升能力。肖贤煌^[61]采用离散元仿真方法,研究了不同提升条高度对衬板磨损的影响。结果显示,随着提升条高度的增加,物料的提升高度不断增加,抛落运动和泻落运动也更加地剧烈,对衬板的使用寿命也会造成影响,当设置在合理的高度时,衬板的使用寿命和磨矿性能才能达到最佳。

肖庆飞等^[62]采用 DEM 对喀拉通克铜镍矿选厂 $\phi 5.5 \text{ m} \times 1.8 \text{ m}$ 半自磨机筒体衬板的提升条面角进行优化研究。通过正交试验法,量化不同衬板结构参数下的磨矿效果,如图 17 所示,展示了在不同面角条件下磨机内部不同类型颗粒的累积碰撞能量分布,随着提升条面角的增大,(矿石+介质)-衬板累积碰撞能量均呈现先减小后增大的趋势,在面角为

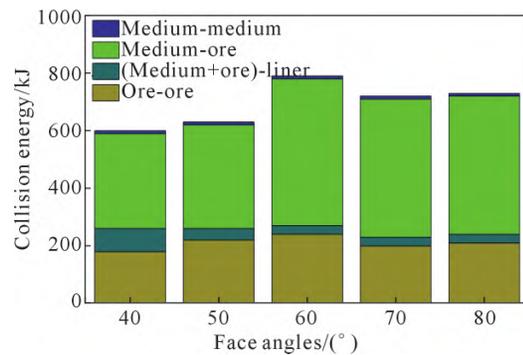


图 17 不同面角下磨机内不同类型累积碰撞能量^[62]

Fig.17 Cumulative collision energy of different types within the mill under varying contact angles^[62]

60°时为最小值;而介质-矿石的碰撞能量呈现先降低后升高的趋势,在 60°时为最大值,因此确定了最佳提升条面角为 60°。该优化设计使衬板磨损速率最低,延长了衬板使用寿命。

这些研究表明,离散元法能够从微观层面精准剖析衬板磨损机制,为衬板结构设计提供了科学依据。但在追求高耐磨性的同时,需兼顾应力分布,避免局部失效,未来研究可进一步结合多物理场耦合,深化对衬板服役行为的理解。

2.2 有限元法

有限元法作为数值模拟领域应用最为广泛的分析手段之一,其核心原理在于将复杂的几何结构离散成有限数量的单元体,在各单元上构建满足物理定律(如弹性力学、传热学等)的控制方程,从而求解整个结构的响应行为。通过精确模拟铸造过程中的充型动力学、凝固相变热力学,实现缩孔缩松缺陷的定量预测,这一过程同样紧密围绕其核心原理展开。在模拟铸造过程时,将铸件及铸型的几何结构离散为单元,在各单元上构建满足传热学、流体力学等物理定律的控制方程,以此求解整个铸造系统的温度场、流场及凝固过程。

刘秀华^[63]采用有限元法对衬板铸件铸造工艺参数开展优化研究。通过数值模拟 4 种充型速度下的

温度场与流场分布特征，发现衬板铸件温度变化并非沿浇口到冒口方向梯度变化，不同充型速度下温度场和流场变化各异，如 20 kg/s 时金属液呈规则层状流动，30 kg/s 时出现湍流特征。综合分析，20 kg/s 的充型速度较为合理。笔者课题组基于数值模拟对大型 L 型衬板进行工艺优化，通过集成热电偶实测数据与 ProCAST 逆向求解算法，求解出铸型-铸件界面的换热系数，并模拟多种铸造工艺方案^[64]。在这一过程中，利用有限元法将复杂的铸造系统离散化，通过建立并求解各单元的控制方程，模拟不同工艺方案下的温度场、流场变化，进而优化浇注系统设计，最终开发出全新铸造工艺方案，并通过试制生产，成功获得无缺陷铸件，工艺出品率从 65% 提升至 85% 以上。图 18 为优化后铸造工艺在数值模拟中的孔隙分布与试制生产后的铸件截面。这充分展示了有限元法的核心原理在实际工艺优化中的具体应用和显著成效。

在热处理领域，Wu 等^[65]运用有限元法对大型衬板淬火过程开展系统性模拟研究，通过耦合温度场、微观组织场和应力场，深度解析淬火过程中的物理变化机制。研究表明，受衬板复杂结构影响，淬火过程中各部位冷却速度呈现显著差异，进而导致组织和应力分布不均。其中，壁面流体流速差异是冷却效果不均的主导因素，壁面润湿过程则起到辅助作用，具体表现为复杂结构及厚壁区域冷却速率迟缓，薄壁区域冷却速度较快，这种冷却差异最终引发铸件性能的不均匀性。

有限元法凭借多物理场耦合模拟能力，在高锰钢衬板的工艺优化中发挥核心作用。但其模拟精度高度依赖模型构建与参数设定，复杂的衬板结构需精细划分网格，计算量随之大幅增加，导致计算效率降低、耗时增长。未来研究可进一步整合多尺度建模方法，结合实验验证提升模拟精度，同时探索其在新材料、新工艺研发中的应用潜力，推动高锰钢衬板制

造技术的创新发展。

3 总结与展望

综述了近年来高锰钢衬板铸造工艺的研究进展，分析了工艺设计和参数设置对高锰钢衬板性能的影响。冒口、浇注温度及涂料等诸多因素对高锰钢衬板的质量都有一定的影响。简单介绍了数值模拟在高锰钢衬板上的应用，利用数值模拟对高锰钢衬板的磨损行为和应力分布进行分析，改进衬板结构和铸造工艺。

数值模拟技术，尤其是离散元法和有限元法，在高锰钢衬板研究中取得显著进展。离散元法从颗粒尺度深入剖析衬板磨损机制，明确提升条磨损是关键因素，揭示颗粒形状、分布等对磨损的影响；在结构优化上，通过调整衬板形状、提升条高度和角度等参数，有效提升耐磨性能，但需注意复杂结构引发的应力集中问题。有限元法则聚焦于应力分布分析与工艺优化，通过多物理场耦合模拟，精准定位应力集中区域，优化铸造和热处理工艺，提高铸件质量和出品率。

目前，学者们对砂型铸造、金属型铸造、消失模铸造和 V 法种铸造的研究都取得了一些进展。砂型铸造历史悠久、应用广泛，通过优化冒口设计和浇注温度等，能在一定程度上提升铸件质量，但在铸件精度和表面质量上存在局限。金属型铸造以金属模具替代砂型，解决了砂子回收率低和铸件表面粗糙的问题，覆砂金属型工艺进一步强化铸件性能，但模具成本高和热疲劳问题仍待攻克。消失模铸造凭借独特的气化模具技术，实现复杂结构高锰钢衬板的一体化成型，在工艺改进和参数优化下，有效控制缺陷，但模型发泡、涂料质量等因素影响铸件质量稳定性。V 法铸造基于真空吸附成型，显著降低能耗，减少气孔和夹砂缺陷，在工业自动化应用中提升生产效率和产品一致性，不过对浇注温度和涂料性能要

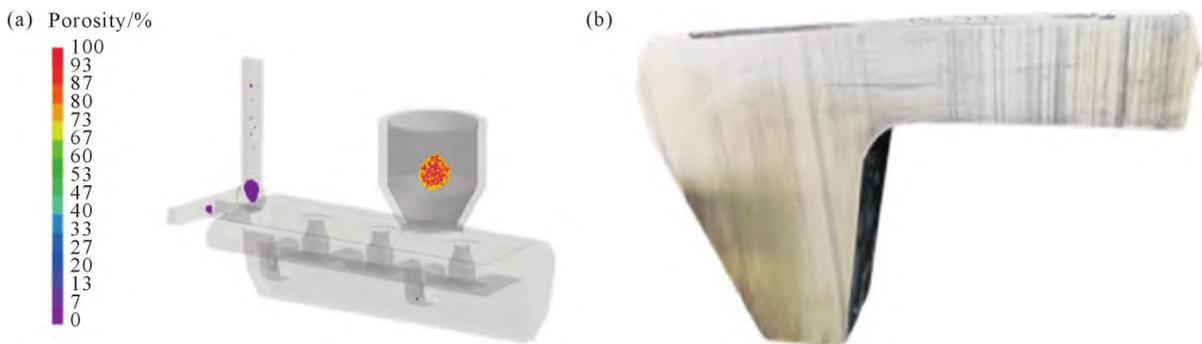


图 18 优化铸造工艺后孔隙分布与铸件截面:(a) 衬板孔隙分布;(b) 铸件截面^[64]
Fig.18 Pore distribution and cross section of the casting after the optimized casting process: (a) porosity distribution of the liner; (b) section of the casting^[64]

求苛刻。

未来高锰钢衬板研究可在以下方面深入:①技术融合,将数值模拟与铸造工艺深度结合,通过模拟不同工艺参数下的铸件成型过程,提前优化方案,提升铸件质量和生产效率;②参数精准化,进一步研究各工艺关键参数对衬板性能的影响,结合多物理场耦合,实现参数的精准调控;③绿色环保,开发无黏结剂、低能耗、可循环利用材料的铸造工艺,推动高锰钢衬板生产的可持续发展。

参考文献:

- [1] 宋仁伯,冯一帆,彭世广,蔡长宏,谭志东.高锰钢衬板的研究及应用[J].材料导报,2015,29(19):74-78.
SONG R B, FENG Y F, PENG S G, CAI C H, TAN Z D. Research and application of high manganese steel lining plate[J]. Materials Reports, 2015, 29(19): 74-78.
- [2] HADFIELD R A. Manganese steel[M]. Edinburgh: Oliver Boyd, 1956.
- [3] JACOB R, RAMAN SANKARANARAYANAN S, KUMARESH BABU S P. Recent advancements in manganese steels - A review [J]. Materials Today: Proceedings, 2020, 27: 2852-2858.
- [4] MAHLAMI C S, PAN X. An overview on high manganese steel casting[A]. Proceedings of the 71st World Foundry Congress: Advanced Sustainable Foundry[C]. Bilbao: World Foundry Organization Ltd., 2014. 420-428.
- [5] NAGAR R, AGRAWAL A P, KUMAR A, LAL S. Critical analysis of manufacturing of manganese steel liners used in crushing and mining sector for improved performance[M]//TYAGI R K, GUPTA P, DAS P, PRAKASH R. Advances in engineering materials. FLAME 2022. Lecture notes in mechanical engineering. Singapore: Springer, 2023: 275-293.
- [6] FRENCH J H, LISSNER O E. Rotary mill liner practice in the South African gold mining industry[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 1969, 69(9): 475-480.
- [7] DU X D, YANG X J, WANG Y F, WANG L. Impact corrosion wear properties and mechanism of lining board steels[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 2009, 223(4): 729-733.
- [8] HIRT C W, BARKHUDAROV M R. Predicting defects in lost foam castings[J]. Modern Casting, 2002, 92(12): 31-33.
- [9] MAŁYSZA M, ŻUCZEK R, WILK-KOŁODZIEJCZYK D, JAŚ-KOWIEC K, GŁOWACKI K, DŁUGOSZ P, DUDEK P. Technological optimization of the stirrup casting process with the use of computer simulations[J]. Materials, 2022, 15(19): 6781.
- [10] 唐婷,张頔,王立新,王赋煜,刘浩,徐凯,刘富初.基于数值模拟的灰铸铁上转盘砂型铸造工艺优化[J].金属加工(热加工),2024(11):119-123,127.
TANG T, ZHANG D, WANG L X, WANG F Y, LIU H, XU K, LIU F C. Optimization of sand casting process for gray iron upper rotary disc castings based on numerical simulation[J]. MW Metal Forming, 2024(11): 119-123, 127.
- [11] NAGAR R, AGRAWAL A P, KUMAR A. Importance of an effective heat treatment process for improved performance of manganese steel cone liners in mining segment[J]. Materials Explore, 2023, 1: 35-52.
- [12] BERGERMAN M G, KLEIN M B, VENEROSO T. Innovation in new materials for the construction of wear parts used in the comminution process of mine operations[A]. Copper 2022[C]. Santiago, Chile: Anyofagasta Minerals, 2023. 1-24.
- [13] ALLENDE-SECO R, ARTIGAS A, BRUNA H, CARVAJAL L, MONSALVE A, SKLATE-BOJA M F. Hardening by transformation and cold working in a Hadfield steel cone crusher liner[J]. Metals, 2021, 11(6): 961.
- [14] 李新亚.铸造手册第5卷:铸造工艺[M].北京:机械工业出版社,2011.
- [15] 牟相山.冒口位置对铸钢件质量的影响[J].金属加工(热加工),2012(23):65-66.
- [16] 庞国柱,刘海滨,赵东胜,王太宇. ZGMn13Cr2 衬板铸造工艺优化与质量改进[J].铸造,2019,68(3):303-306.
PANG G Z, LIU H B, ZHAO D S, WANG T Y. Casting process optimization and quality improvement of ZGMn13Cr2 lining plates[J]. Foundry, 2019, 68(3): 303-306.
- [17] 张云辉,罗琼.球磨机厚大衬板浇注工艺的设计与改进[J].中国金属通报,2020(24):185-186.
ZHANG Y H, LUO Q. Design and optimization of pouring process for thick liners in ball mills[J]. China Metal Bulletin, 2020(24): 185-186.
- [18] 张佳亮.提高磨机高锰钢衬板耐磨性的研究[J].冶金管理,2020(1):34,184.
- [19] 徐志宏.格子磨大端衬板的铸造工艺改进[J].铸造技术,2003(5):449-450.
XU Z H. Modified foundry technology of checker structure of large-scale linear board[J]. Foundry Technology, 2003(5): 449-450.
- [20] 包瑞斌.高锰钢浇注温度对性能的影响及其控制方法[J].铸造技术,2011,32(4):579-580.
BAO R B. Effect of pouring temperature on the mechanical properties of high Mn steel and the controlling methods[J]. Foundry Technology, 2011, 32(4): 579-580.
- [21] ARAPOV S L, BELYAEV S V, KOSOVICH A A, PARTYKO E G. An approach to calculating the casting temperature of high-manganese austenite steel[J]. CIS Iron and Steel Review, 2023, 26: 45-50.
- [22] 赵金山,党科鹏,许科敏.提高高锰钢衬板质量的探索及实践[J].中国铸造装备与技术,2009(3):38-39.
ZHAO J S, DANG J P, XU K M. Explore and practice in improving the quality of lining plate of high Mn steel [J]. China Foundry Machinery & Technology, 2009(3): 38-39.
- [23] 赵金山. ZGMn13Cr2RE 强韧性高锰钢衬板在球磨机上的应用[J].中国铸造装备与技术,2008(4):36-38.
ZHAO J S. Application of high Mn steel ZGMn13Cr2RE lining with high toughness on ball mill[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2008(4): 36-38.
- [24] 齐笑,刘子安,申泽骥,唐骥,李耀辉,杨立杰,朴东学,刘燕忠.铸铁件水冷金属型用铜合金的研究及应用[J].铸造,2002,51(2):112-114.

- QI X, LIU Z A, SHEN Z Y, TANG J, LI Y H, YANG L J, PIAO D X, LIU Y Z. Research and application of copper alloy used in water-cooling permanent mold for iron casting[J]. Foundry, 2002, 51(2): 112-114.
- [25] 牛显明,张新子,张海涛,王建卫. 用铜合金金属型铸造高锰钢衬板的研究[J]. 有色金属, 2008, 60(3): 18-21.
- NIU X M, ZHANG X Z, ZHANG H T, WANG J W. Research on as-cast high-manganese-steel backing block fabricated with copper alloy mould[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2008, 60(3): 18-21.
- [26] 姚烨华. 覆砂金属型工艺及设备发展状况[J]. 中国铸造装备与技术, 2007(1): 52-54.
- YAO Y H. Development of technology and equipment of sand coated permanent mold[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2007(1): 52-54.
- [27] 钟敏,张世胜,鲁新国,石磊,孙莹,韩福生. 覆砂金属型铸造高锰钢衬板的组织与性能[J]. 铸造, 2015, 64(9): 897-900.
- ZHONG M, ZHANG S S, LU X G, SHI L, SUN Y, HAN F S. Microstructures and properties of high manganese steel liner produced by sand-lined metal mold[J]. Foundry, 2015, 64(9): 897-900.
- [28] AHMADEIN M, ELSHEIKH A H, ALSALEH N A. Modeling of cooling and heat conduction in permanent mold casting process[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(2):1757-1768.
- [29] 刘桐旺. 金属型铸造凝固过程中界面热交换系数的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2016.
- LIU T W. Study on interface heat transfer coefficient during solidification of metal mold casting[D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [30] 张密兰. 合金熔体对金属模具的热-力作用行为研究[D]. 北京:北京交通大学, 2009.
- ZHANG M L. Thermal-force action of permanent die caused by alloy melt[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009.
- [31] 刘玉满,刘翔. 消失模铸造涂料理论的发展、创新和应用[A]. 2010 全国第 8 届消失模铸造技术专题研讨会[C]. 秦皇岛:中国铸造科工贸联谊活动组织委员会, 2010. 58-97.
- [32] 梁峰,薛正良,赵雷,方伟,叶林峰,雷中兴. 六方氮化硼复合氧化铝耐火材料的性能研究[J]. 耐火材料, 2014(6): 401-405.
- LIANG F, XUE Z L, ZHAO L, FANG W, YE L F, LEI Z X. Properties of hexagonal boron nitride composite alumina refractories[J]. Refractories, 2014, 48(6): 401-405.
- [33] LANDAGE M G, KUMBHAR S. Lost foam casting technology-Review paper[J]. International Journal of Innovations in Engineering Research and Technology, 2021: 128-133.
- [34] 卓荣明. 长寿命球磨机衬板的制造工艺[J]. 煤炭技术, 2015, 34(3): 237-238.
- ZHUO R M. Long-life ball mill liner manufacturing process[J]. Coal Technology, 2015, 34(3): 237-238.
- [35] 徐志宏,卫小伟. 负压消失模铸造原料磨衬板的浇注工艺设计[J]. 特种铸造及有色合金, 2003(6): 55-56.
- [36] 王强,杨辛东,王生保. 消失模铸造破碎机高锰钢衬板[J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35(4): 406-408.
- WANG Q, YANG X D, WANG S B. Manufacturing of high manganese steel alloy liner in crusher by full mold casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2015, 35(4): 406-408.
- [37] 张彦超,肖志霞,梁国欣,张花蕊,张亮,刘秀莲,冯建航. 基于有限元模拟的高锰钢衬板消失模铸造工艺评估[J]. 特种铸造及有色合金, 2024, 44(11): 1528-1535.
- ZHANG Y C, XIAO Z X, LIANG G X, ZHANG H R, ZHANG L, LIU X L, FENG J H. Optimization of lost foam casting process of high manganese steel liner based on finite element simulation[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2024, 44(11): 1528-1535.
- [38] 路金川. 高锰钢衬板的消失模无冒口铸造工艺[J]. 铸造设备与工艺, 2019(1): 27-28.
- [39] 贺全智,闫金顺,刘丽. 耐磨衬板消失模铸造质量控制的研究[J]. 吕梁学院学报, 2017, 7(2): 54-56.
- [40] 吴军. 高锰钢衬板消失模工艺生产改进[J]. 铸造设备与工艺, 2017(4): 21-23.
- WU J. Improvement of high manganese steel liner EPC process[J]. Foundry Equipment and Technology, 2017(4): 21-23.
- [41] 朱丽娟,张佳平,朱春熙,张新颖,董秀琦. 消失模铸造的合理浇注速度研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2005(4): 26-28.
- ZHU L J, ZHANG J P, ZHU C X, ZHANG X Y, DPNG X Q. The research on the logical pouring velocity in the process of evaporated pattern casting[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2005(4): 26-28.
- [42] OMIDIJI B V, ADEDAYO R, OLUWAJOBI A. Refractory coating technology: A review[J]. Ife Journal of Technology, 2024 29(1): 49-54.
- [43] 张苍南. 改性环锤制造工艺及消失模铸造数值模拟[D]. 山西:太原科技大学, 2013.
- ZHANG C N. Manufacturing process of modified ring hammers and numerical simulation of lost foam casting[D]. Shanxi: Taiyuan University of Science and Technology, 2013.
- [44] 侯晋梅. 新型高锰钢衬板制造工艺及性能分析[D]. 山西:太原科技大学, 2014.
- HOU J M. Manufacturing process and performance analysis of novel high manganese steel liners[D]. Shanxi: Taiyuan University of Science and Technology, 2014.
- [45] 肖海波. 涂料在覆膜砂壳型铸钢件生产中的试验与应用[J]. 铸造设备与工艺, 2018(4): 36-39.
- XIAO H B. Experiment and application of coating in the production of coated sand shell steel casting[J]. Foundry Equipment and Technology, 2018(4): 36-39.
- [46] AFTAB R, IQBAL QURESHI M, MUJAHID M, KHALID S. Effect of different coatings on the surface finish and hardness of manganese steel castings[EB/OL]. 2019. <https://pdf4pro.com/view/ef-fect-of-different-coatings-on-the-surface-finish-4f4eff.html>
- [47] 谢一华,谢东,谢田. V 法铸造技术及应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2021.
- [48] 孔亚南,李金玉,陶标,胡智菲,于凝. V 法铸造生产复杂件工艺研究[J]. 中国铸造装备与技术, 2023, 58(3): 79-82.
- KONG Y N, LI J Y, TAO B, HU Z F, YU N. Study on the production process of complex parts by V-method casting[J]. China Foundry Machinery & Technology, 2023, 58(3): 79-82.
- [49] 朱晓霞,张志强,宋仲荣. V 法铸造工艺铸钢件的自动化生产与管理[J]. 中国铸造装备与技术, 2020, 55(2): 14-17.
- ZHU X X, ZHANG Z Q, SONG Z R. Automatic production and management of steel castings by V method casting process[J]. Chi-

- na Foundry Machinery & Technology, 2020, 55(2): 14-17.
- [50] 于凝,孔亚南,谭涛. V 法铸造工艺参数的控制[J]. 现代铸铁, 2016, 36(3): 58-62.
- YU N, KONG Y N, TAN T. Control of vacuum-casting process parameters[J]. Modern Cast Iron, 2016, 36(3): 58-62.
- [51] LIU J X, LIU Y J, ZHENG M X, NING X K. Research on the wear-resisting material produced by vacuum evaporation pattern casting[M]/LUO J, MENG Y, SHAO T, ZHAO Q. Advanced Tribology. Berlin: Springer, 2009: 443-446.
- [52] 肖莹. V 法铸造涂料性能的研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2012.
- XIAO Y. Study on properties of V-cast coating[D]. Wuhan: Huazhong of Science and Technology, 2012.
- [53] 杨帆,李远才,肖莹,赵溶,杨严军. V 法铸造涂料干燥性能的研究[J]. 特种铸造及有色合金, 2013, 33(8): 759-762.
- YANG F, LI Y C, XIAO Y, ZHAO R, YANG Y J. Drying performance of coating for V-Casting[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2013, 33(8): 759-762.
- [54] 刘东戎,杨智鹏,王丽萍,郭二军. 铸造充型过程数值模拟技术的发展及现状评述[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(3): 96-100, 105.
- LIU D R, YANG Z P, WANG L P, GUO E J. Development of simulation of mould filling during casting: A review [J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2016, 21(3): 96-100, 105.
- [55] 谢卓宏,张岁庚. 半自磨机及球磨机衬板结构的改进[J]. 有色金属(选矿部分), 2019(1): 73-77.
- XIE Z H, ZHANG S G. The lining board redesign of SAG and ball mill[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2019(1): 73-77.
- [56] 陈天乐,肖庆飞,任英东,谢浩松,张志鹏. 半自磨机结构与筒体衬板研究进展及发展趋势[J]. 化工矿物与加工, 2022, 51(2): 35-40.
- CHEN T L, XIAO Q F, REN Y D, XIE H S, ZHANG Z P. Research progress and development trend of structure and shell liners of semi-autogenous mill[J]. Industrial Minerals & Processing, 2022, 51(2): 35-40.
- [57] 孙珊珊,董为民,汪滋润,张学东,周海燕. 基于 EDEM 和 ANSYS 耦合方法的半自磨机波形衬板的设计研究[J]. 矿冶, 2018, 27(1): 61-65.
- SUN S S, DONG W M, WANG Z R, ZHANG X D, ZHOU H Y. The design of wave liner for SAG mill based on EDEM and ANSYS coupling method[J]. Mining and Metallurgy, 2018, 27(1): 61-65.
- [58] 李云啸,肖庆飞,国宏臣,刘向阳,周强,王肖江. 基于离散元法的球磨机筒体衬板改造优化研究[J]. 矿产保护与利用, 2023, 43(4): 43-49.
- LI Y X, XIAO Q F, GUO H C, LIU X Y, ZHOU Q, WANG X J. Optimization of barrel liner modification of ball mill based on discrete element method[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2023, 43(4): 43-49.
- [59] 杜强. 基于离散元的大型半自磨机筒体衬板磨损分析[J]. 矿山机械, 2015, 43(1): 62-66.
- DU Q. Wearing analysis of shell liner in large SAG mill based on DEM [J]. Mining & Processing Equipment, 2015, 43(1): 62-66.
- [60] 俞章法,赵魏. 大型球磨机筒体衬板失效原因分析及改进[J]. 矿山机械, 2013, 41(11): 95-98.
- YU Z F, ZHAO W. Casual analysis on failure of shell liner in large-scale ball mill and improvement[J]. Mining & Processing Equipment, 2013, 41(11): 95-98.
- [61] 肖贤焯. 基于统计力学原理的半自磨机衬板结构优化设计[D]. 赣州:江西理工大学, 2017.
- XIAO X H. Optimization design of SAG mill lining structure base on statistical mechanics method [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2017.
- [62] 肖庆飞,邵云丰,周强,刘向阳,张谦,王庆凯. 基于离散元法的半自磨机筒体衬板改造研究及应用[J]. 有色金属(选矿部分), 2023(6): 63-70.
- XIAO Q F, SHAO Y F, ZHOU Q, LIU X Y, ZHANG Q, WANG Q K. Research and application on the modification of the liner of semi-autogenous mill based on discrete element method[J]. Nonferrous Metals (Mineral Processing Section), 2023(6): 63-70.
- [63] 刘秀华. 基于 ProCAST 有限元模拟对衬板铸造工艺参数的优化[J]. 铸造技术, 2019, 40(7): 675-678.
- LIU X H. Optimization of lining casting process parameters based on ProCAST finite element simulation [J]. Foundry Technology, 2019, 40(7): 675-678.
- [64] 周旭,鲁昱,李向明,李祖来,高炳臣,赵跃林. 半自磨机筒体衬板铸造工艺改进研究[J]. 铸造技术, 2024, 45(4): 376-387.
- ZHOU X, LU Y, LI X M, LI Z L, GAO B C, ZHAO Y L. Research on the improvement of the casting process of semi-autogenous mill cylinder liners[J]. Foundry Technology, 2024, 45(4): 376-387.
- [65] WU D, LI Z L, SHAN Q, ZHANG F, HAN S J, GOU H J, HUANG Q Y. A finite element model with multi-flow fields for the quenching process of mill liner component made of bainite and martensite: Simulation and experimental validation[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2024, 48: 102412.

(责任编辑:杨浩雪)