

基于 ProCAST 的高锰钢斗齿的铸造工艺优化

李绪乾¹, 蔡志辉¹, 马立峰¹, 董佳怡², 宋 达²

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西太原 030024;

2. 中煤平朔集团有限公司 宇辰铸造厂, 山西朔州 036000)

摘要: 以大型矿用挖掘机P&H2800斗齿为研究对象, 采用ZGMn13Mo高锰钢为铸造材料, 借助ProCAST铸造仿真软件对原底注式浇注工艺的充型与凝固过程开展数值模拟, 基于Niyama判据预测缩松、缩孔缺陷分布。结果表明: 原工艺存在充型时间长、浇注温度偏高、铸型预热不足等问题, 导致斗齿厚大部位出现集中缩松缩孔, 严重影响铸件力学性能与使用寿命。通过三因素三水平正交试验优化浇注温度、浇注速度和铸型预热温度, 确定最优参数组合为1 450 ℃、16 kg · s⁻¹和600 ℃; 同时优化浇注系统, 增大直浇道直径、增设内浇道与浇道窝。优化后模拟显示铸件本体无缩松缩孔缺陷, 缺陷集中于冒口与浇注系统, 经实际生产验证, 斗齿表面质量显著提升, 内部组织致密, 废品率大幅降低, 为大型高锰钢斗齿高效铸造提供技术参考。

关键词: ZGMn13Mo; ProCAST; 充型时间; 数值模拟; 高锰钢斗齿; 缩松缩孔; 浇注系统优化; 正交试验

中图分类号: TG269; TG244 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 07-0822-05

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0105

Optimization of Casting Process for High Manganese Steel Bucket Teeth Based on ProCAST

LI Xu-qian¹, CAI Zhi-hui¹, MA Li-feng¹, DONG Jia-yi², SONG Da²

(1. School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China;

2. Yuchen Foundry, ChinaCoal Pingshuo Coal Co., Ltd., Shuozhou 036000, Shanxi, China)

Abstract: Taking P&H2800 bucket teeth of large mining excavator as the research object, ZGMn13Mo high manganese steel was used as casting material. The mold filling and solidification processes of the original bottom gating system were numerically simulated by ProCAST casting simulation software, and the distribution of shrinkage and porosity defects was predicted based on Niyama criterion. The results show that the original process has problems such as long filling time, high pouring temperature and insufficient mold preheating, which lead to concentrated shrinkage and porosity in the thick section of bucket teeth, seriously affecting the mechanical properties and service life of castings. The pouring temperature, pouring speed and mold preheating temperature were optimized by three-factor and three-level orthogonal test, and the optimal parameter combination was determined as 1 450 ℃, 16 kg · s⁻¹ and 600 ℃. Meanwhile, the gating system was optimized by increasing the diameter of sprue, adding inner gates and sprue basins. The simulation after optimization shows that there are no shrinkage and porosity defects in the casting body, and the defects are concentrated in the riser and gating system. Verified by actual production, the surface quality of bucket teeth is significantly improved, the internal structure is compact, and the rejection rate is greatly reduced, which provides a technical reference for efficient casting of large high manganese steel bucket teeth.

Key words: ZGMn13Mo; ProCAST; filling time; numerical simulation; high manganese steel bucket teeth; shrinkage and porosity; gating system optimization; orthogonal experiment

挖掘机斗齿是挖掘机上的重要安全零件, 挖掘机进行挖掘工作时, 斗齿会发生比较严重的磨粒磨损, 同时还会受到较大的冲击载荷^[1], 所以大部分的斗齿

产品能够使用的时间并不长, 需求量巨大。在我国, 斗齿磨损会导致很大的经济损失, 每年3 000万元左右^[2]。除此之外, 由于斗齿受到剧烈冲击断裂导致的安全事

基金项目: 重庆市自然科学基金面上项目 (CSTB2023NSCQ-MSX0790)。

收稿日期: 2026-03-13 收到初稿, 2026-05-09 收到修订稿。

作者简介: 李绪乾 (1999-), 男, 硕士, 主要研究方向为高锰钢铸件的铸造工艺优化。E-mail: 1668460599@qq.com

通信作者: 蔡志辉, 男, 教授, 博士生导师。E-mail: tsazhihui@163.com

引用格式: 李绪乾, 蔡志辉, 马立峰, 等. 基于 ProCAST 的高锰钢斗齿的铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2026, 75 (7): 822-826.

Li Xuqian, Cai Zhihui, Ma Lifeng, et al. Optimization of casting process for high manganese steel bucket teeth based on ProCAST [J]. Foundry, 2026, 75 (7): 822-826.

故每年也频频发生,由此造成的损失更为巨大。斗齿主要有两大类,锻造斗齿和铸造斗齿^[3],铸造成形工艺成本低,流程简单,容易大批量生产,目前市场中仍然占据主导地位,但是铸造斗齿的组织粗大^[4],很难通过热处理工艺消除。此外,铸造工艺生产的斗齿不可避免地会有一些表面缺陷,甚至会产生更为严重的缩松、缩孔缺陷。废品率较高,是一直以来困扰企业的难题。将斗齿的充型和凝固过程通过计算机模拟软件进行模拟,可以显示金属液在型腔里的动态过程,对实际生产提供指导^[5]。

本文以P&H2800斗齿作为研究对象,该铸件采用砂型铸造方式生产,利用ProCAST软件对其铸造过程进行铸造模拟,对铸件内部的缩松、缩孔位置以及大小进行预测^[6]。根据模拟结果分析导致缺陷产生的原因,对铸造工艺加以改进,提高铸造质量,降低废品率,提升经济收益。

1 建立几何模型

斗齿材料为ZGMn13Mo,其成分见表1,铸件质量为385 kg,结构如图1所示,斗齿铸件最大轮廓尺寸为1 340 mm×425 mm×255 mm,属于大型铸件^[7],由于斗齿工作环境恶劣,对强度要求较高,铸件表面不能有气孔等表面缺陷,内部不能有缩松、缩孔。

表1 ZGMn13Mo化学成分
Tab. 1 Chemical composition of ZGMn13Mo alloy

C	Cr	Mn	Mo	Si	V	Fe
1.1	0.45	12.6	1.1	0.5	0.015	余量



图1 斗齿三维结构图

Fig. 1 Three dimensional structure diagram of bucket tooth

高锰钢铸件在实际生产过程中,常常会因为补缩不足而产生缩松缩孔等铸造缺陷^[8],P&H2800斗齿作为大尺寸铸件,金属液在凝固过程中会受到多个因素的影响,因此根据浇注系统的经验设计规则,充分考虑了分型面和浇注位置的选择,结合该铸件的结构特点^[9],设计出了底注式浇注方案(图2),在齿尖部位设置气孔便于排气,在斗齿中心最厚的地方设置冒口,便于补缩,浇口设置在斗齿末端。



图2 浇注系统三维模型

Fig. 2 Three dimensional model of pouring system

2 有限元仿真前处理

2.1 有限元网格划分

利用UG软件完成斗齿铸件及浇注系统三维模型的绘制,以x-t格式导入ProCAST中,利用Visual-Mesh模块对斗齿及浇注系统进行网格划分,由于铸件尺寸过大,为了模拟顺利进行,网格尺寸设置为15,并对面网格进行纠错修复,然后在面网格基础上进行体网格的绘制,生成112 245个面网格和1 682 550个体网格。

2.2 边界条件和运行参数设置

进入ProCAST的Visual-Cast模块后,在材料库中对材料进行选择编辑,使用ProCAST计算出该材料的物理性能参数^[5],其液相线为1 389 ℃,固相线为1 263 ℃,铸型部分材质选择为橄榄石砂。

P&H2800斗齿初始工艺方案的浇注温度为1 600 ℃,浇注之前需要对砂型进行高温烘烤,对砂型进行预热能够有效防止因金属型导热过快导致的浇不足、冷隔等问题,同时还能够避免砂型中的水分蒸发导致铸件表面产生气孔缺陷以及急冷急热对砂型造成破坏,砂型预热温度为400 ℃(结合宇辰铸造厂对预热温度进行摸索,预热温度低于400 ℃时,铸件表面气孔缺陷较为严重),烘烤之后静置一段时间开始浇注,选择重力浇注,重力为z轴负方向,自然空冷。界面传热系数类别选择COINC类型,将高锰钢铸件与铸型的界面换热系数设置为500 W/(m²·K),充型时间为45 s,模具尺寸1 800 mm×700 mm×800 mm,整个工艺较为简单。最终步数为50 000。

3 仿真结果分析

3.1 充型过程温度场模拟结果分析

利用ProCAST对初始铸造工艺进行仿真模拟,并对充型结果进行分析,结果如图3所示,根据ProCAST中的Visual-Viewer模块显示,在充型过程中,金属液由浇口杯进入了型腔,液面缓缓升高^[10],型腔内的气体可以通过齿尖的气孔顺利排出,整个型腔在45 s完成充

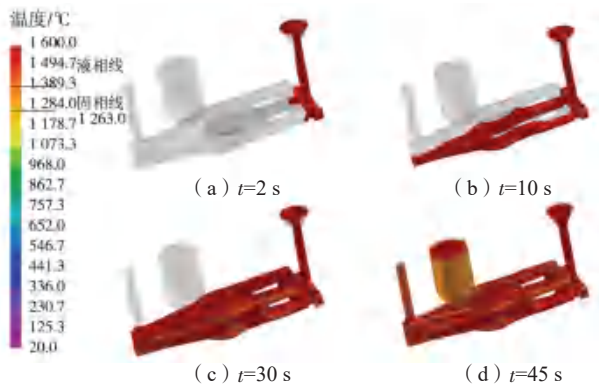


图3 铸件充型过程
Fig. 3 Casting filling process

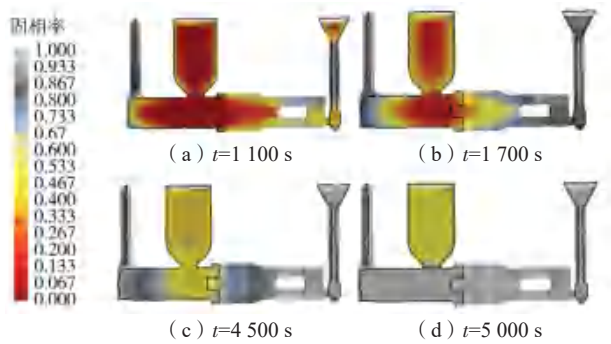


图4 凝固过程固相率模拟结果
Fig. 4 Simulation results of solid fraction during solidification process

型, 金属液流动过程较为平缓, 可以顺利完成形腔充型, 充型过程中金属液温度在液相线以上, 流动性较好, 没有出现大规模的金属液飞溅或者湍流现象。

3.2 凝固过程固相率模拟结果分析

对整个凝固过程进行分析, 固相率变化如图4所示, 可以看出, 凝固最快的部位是排气孔以及浇注系统, 在1 100 s时, 凝固基本发生在浇注系统, 由直浇道向横浇道进行; 在1 700 s时, 浇注系统已经完全凝固, 铸件的凝固呈现从左向右, 由下往上的趋势; 在4 500 s时, 斗齿中心部位的固相率明显低于周围, 可能会发生补缩不足^[11]。

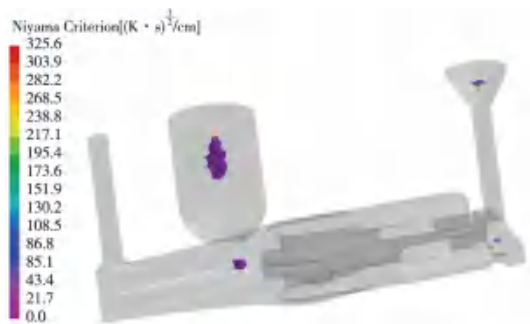


图5 铸件缩松、缩孔预测结果
Fig. 5 Prediction results of casting shrinkage and dispersed shrinkage

3.3 铸件缩松、缩孔缺陷预测

斗齿铸件在工作时会受到强烈的冲击磨损, 还会受到一定程度的弯矩作用, 强度要求较高, 为了保证斗齿铸件能够正常使用, 所以需要对其缩松、缩孔铸造缺陷进行分析。ProCAST软件采用Niyama判据进行定性判断^[12-13], 预测结果如图5所示, 结果显示缺陷主要出现在浇口杯、横浇道、冒口以及斗齿中部。斗齿中部的缩松会严重影响铸件的性能, 会导致斗齿在受到冲击载荷时发生断裂, 使斗齿寿命降低, 存在安全隐患。

4 工艺参数优化及浇注系统优化

根据模拟结果得知, 上述浇注工艺的设计对于斗齿铸件的最终质量和性能并未达到理想的预期效果, 分析其原因主要有三点: ①充型速度较慢, 金属液在充型过程中损失热量较多; ②浇注温度过高, 导致斗齿内部发生缩松缩孔; ③铸型预热温度较低, 导致金属液凝固过程不均匀。

为了减少铸件的铸造缺陷, 对浇注温度、浇注速度以及铸型预热温度3个重要工艺参数加以优选, 设计3因素3水平的正交试验^[14], 如表2所示。

根据表2制定了9个试验对照组^[15], 并以此开展铸造仿真模拟, 以最终模拟仿真的铸件缩松缩孔率作为评价标准, 具体的参数组合以及模拟结果见表3。

表2 正交试验因素水平表
Tab. 2 Orthogonal experimental factor level table

水平	浇注温度	浇注速度	铸型预热温度
	(A)/℃	(B)/(kg · s ⁻¹)	(C)/℃
1	1 550	16	600
2	1 500	15	400
3	1 450	14	200

表3 正交试验方案及模拟结果
Tab. 3 Orthogonal experimental scheme and simulation results

组号	试验因素			模拟结果 φ/%
	A/℃	B/(kg · s ⁻¹)	C/℃	
L1	1	1	1	28.362 3
L2	1	2	2	29.456 3
L3	1	3	3	30.862 7
L4	2	1	2	28.235 6
L5	2	2	3	28.124 6
L6	2	3	1	27.854 6
L7	3	1	1	27.084 6
L8	3	2	1	27.286 5
L9	3	3	2	27.756 4

根据表3的模拟结果分析, 工艺参数组合的最优选^[16]是 $A_3B_1C_1$, 既浇注温度为 $1\,450\text{ }^{\circ}\text{C}$, 浇注速度为 $16\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 铸型预热温度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于充型速度由原先的 $14\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 提升到了 $16\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 为了防止金属液充型速度加快导致充型过程中发生冲砂现象, 对初始斗齿铸件浇注系统进行优化设计: ①增大直浇道直径; ②从横浇道左右两端延伸, 增设两条内浇道, 并设置高度差, 这样可以利用压力差加快金属液充型; ③在增设的两条内浇道底部分别设置两个浇道窝, 在金属液充型过程中可以有较好的挡渣、缓冲效果^[17], 改善内浇道的流量分布, 使充型过程更加平缓。改进后的浇注系统结构如图6所示。

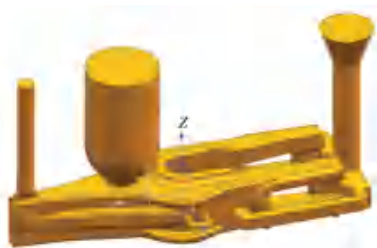


图6 改进的浇注系统
Fig. 6 Improved pouring system

5 优化后工艺模拟分析及生产验证

5.1 优化后工艺模拟分析

将改进后的浇注系统三维模型转换为x-t格式导入

ProCAST中, 使用最优的工艺参数组合^[18], 再次进行铸造仿真模拟, 优化后的工艺参数及浇注系统组合下的铸造仿真模拟预测结果如图7所示。由Niyama判据可知, 此时斗齿铸件内部已经不再发生缩松、缩孔缺陷, 铸造缺陷很大部分形成在冒口内, 还有一部分形成在浇口杯和横浇道内, 不会对斗齿铸件质量产生影响, 斗齿铸件的质量得到了很大的提升。

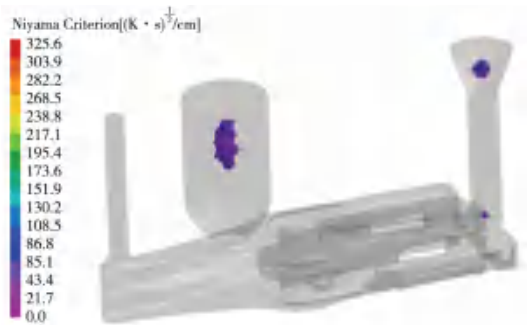


图7 优化后工艺缺陷预测
Fig. 7 Prediction of process defects after optimization

5.2 生产验证

将改进后的浇注系统进行生产, 使用优化后的工艺参数, 进行试生产, 铸造生产的斗齿产品如图8(b)所示。初始工艺生产的斗齿产品如图8(a)所示, 工艺优化后生产的斗齿表面质量大大提升, 且没有缩松、缩孔等缺陷^[19]。



(a) 优化前产品



(b) 优化后产品

图8 优化前后产品对比

Fig. 8 Comparison of products before and after optimization

6 结论

(1) 使用铸造模拟软件ProCAST对P&H2800斗齿铸件的初始浇注工艺进行铸造仿真模拟, 结果显示斗齿铸件内部会发生较大的缩松、缩孔缺陷, 严重影响斗齿铸件的质量。

(2) 根据影响铸件质量的3个主要因素设计正交

试验, 筛选出最优工艺参数组合: 浇注温度为 $1\,450\text{ }^{\circ}\text{C}$, 浇注速度为 $16\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 铸型预热温度为 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。并对浇注系统进行优化, 保证充型过程中不发生冲砂。

(3) 对优化后的工艺参数及浇注系统进行模拟分析, 结果表明, 工艺参数及浇注系统优化后, 斗齿铸件内部不再发生缩松、缩孔, 实际生产得到的斗齿铸件与模拟结果相符。

参考文献:

- [1] 张永明, 刘吉亮. 大型正铲式挖掘机的发展与进步 [J]. 机械管理开发, 2009, 24 (6): 38-39.
- [2] 王晓明. 矿用机械式挖掘机技术概论 [J]. 科技创新与生产力, 2010 (12): 70-72.
- [3] 周志丹, 陈烜, 刘金龙. 提高挖掘机斗齿寿命的研究现状和发展 [J]. 煤矿机械, 2011, 32 (3): 7-9.
- [4] 张冠峰, 任凤章, 陈静静, 等. 30CrMnSi钢斗齿锻造组织和性能研究 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (3): 183-186.
- [5] 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.
- [6] 洪涛, 王东方, 华逢志. 铝合金轮毂挤压铸造工艺参数优化 [J]. 铸造技术, 2020, 41 (12): 1160-1164.
- [7] 朱嘉伟, 张文达, 刘云, 等. 基于ProCAST的一模多腔YL112铝合金压铸件数值模拟及工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2024, 53 (8): 113-117.
- [8] 秦鹏程, 张希俊. Procast在压力铸造数值模拟的应用现状 [J]. 热加工工艺, 2010, 39 (23): 75-77.
- [9] 张振波, 盛文斌, 孙策, 等. 大型球墨铸铁下箱体铸造过程数值模拟及工艺优化 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (7): 113-116.
- [10] 杨行, 郭莹, 林相, 等. 机床底座ProCAST数值模拟及铸造工艺优化 [J]. 兵器材料科学与工程, 2021, 44 (6): 6-9.
- [11] 李欣然, 苏彦庆, 王亮, 等. 基于数值模拟的铸钢凸圈消失模铸造工艺方案设计 [J]. 铸造, 2023, 72 (3): 305-309.
- [12] 陈守东, 王银. 离心和重力铸造复合高速钢轧辊充型及凝固数值模拟 [J]. 铸造, 2022, 71 (6): 771-778.
- [13] 朱洪军. 基于正交试验及数值模拟的下缸体压铸工艺优化 [J]. 铸造, 2021, 70 (6): 670-674.
- [14] 吉晓霞, 常军委, 韩兴, 等. 数值模拟参数对铸钢件缩孔缩松预测精度的影响 [J]. 铸造, 2019, 68 (12): 1355-1361.
- [15] Qiu G X, Li J N, Chen K, et al. Research status of high-manganese high-aluminum steel and key points of continuous casting [J]. JOM, 2024, 76 (12): 7011-7022.
- [16] Yang L, Winkler J, Presoly P, et al. Crack sensitivity of high-manganese cryogenic steels in initial solidification during continuous casting [J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2025, 32 (3): 682-694.
- [17] Lee Seunghee, Park Jiwon, Kim Yongrai, et al. Microstructural homogenization and mechanical property enhancement of high-manganese cast steel through a hot forging process [J]. Korean Journal of Metals and Materials, 2025, 63 (7): 483-493.
- [18] Zeng Y P, Ji H C, Song C Z, et al. Numerical simulation and experiment on hot forging of high-Mn steel turnout core [J]. Materials Today Communications, 2024, 40: 109588.
- [19] Salem I, Elfawkhry M K, El-Salam H M A, et al. Enhancing manganese steel castings: the role of magnesium, calcium, and surface-active elements in reinforcing ceramic-metal composite structures [J]. International Journal of Metalcasting, 2026, 20 (2): 1289-1298.