

# 基于 DOE 优化的冷芯盒树脂砂铸件粘砂缺陷研究

宁显润<sup>1</sup>, 郑涛<sup>1</sup>, 黄鹏<sup>1</sup>, 梁迎鑫<sup>2</sup>, 王宣<sup>1</sup>, 杨注<sup>1</sup>, 魏勇<sup>1</sup>

(1. 宜宾普什联动科技有限公司, 四川宜宾 644007; 2. 济南圣泉集团股份有限公司, 山东济南 250204)

**摘要:** 针对冷芯盒树脂砂铸件在生产过程中普遍存在的粘砂缺陷, 本研究系统分析了其形成机理与关键影响因素。通过系统的机理分析和生产数据筛查, 在排除部分噪声变量后, 最终选定浇注温度、涂料涂层厚度及树脂加入量作为三个关键控制因子, 并基于试验设计 (DOE) 方法展开优化研究。通过对试验数据的统计分析, 明确各因素对粘砂的交互作用及影响, 并确定最佳工艺参数组合。试验结果表明, 优化方案显著改善了铸件粘砂问题, 为实际生产提供了可靠的工艺优化依据。

**关键词:** 冷芯盒树脂砂; 铸件; 粘砂缺陷; DOE试验设计

我司是国内发动机铸件的优质供应商, 为保障铸件品质与生产效率, 在实际铸造过程中, 采用了现代制造业中广泛应用的冷芯盒树脂砂铸造工艺。然而, 该工艺在生产过程中常出现粘砂缺陷, 影响铸件表面质量和尺寸精度, 增加后续清理及返工返修工作量, 导致生产效率降低、生产成本上升; 严重时还会引发铸件清洁度不达标、过渡打磨撞击出现裂纹等问题, 进而造成三包赔付。

## 1 粘砂机理及研究内容

粘砂是指铸件表面粘附一层难以清除的砂粒, 是树脂砂铸造中常见的表面缺陷。根据粘砂的形态和形成原因, 大致可分为机械粘砂和化学粘砂<sup>[1]</sup>。机械粘砂是金属液在高温下渗入型砂的孔隙中, 冷却凝固后与型砂机械地结合在一起形成的粘砂现象。当型砂的孔隙率较大、透气性过高且金属液的压力和流动性足够时, 金属液容易渗入型砂内部, 形成机械粘砂。化学粘砂是在高温下, 金属液与型砂中的某些成分发生化学反应, 生成低熔点化合物, 这些化合物填充在型砂颗粒之间, 使金属与型砂牢固结合。

为了解决铸件粘砂问题, 众多学者和工程师进行了大量的研究, 认为粘砂形成的主要因素包括砂子粒形分布不均匀、砂型强度低、涂料耐火度低、涂料涂覆厚度和浇注温度过高等<sup>[2]</sup>。而实际在解决粘砂问题时, 往往侧重于单一因素去分析调整, 而忽略了多个因素之间的交互作用, 问题通常很难得到很好地控制或解决。铸件粘砂是一个复杂的物理化学过程, 受到多种因素的综合影响。因此, 如何全面、系统地研究各因素对粘砂的影响, 并找到最佳的工艺参数组合, 成为了当前铸造领域解决粘砂的主要课题。

本文结合我司的实际状况, 选取了某N型缸体作为研究对象, 该缸体的水道孔、挺杆孔和牛角尖长期受粘砂的困扰, 通过对铸件解剖观察分析, 确认粘砂类型为化学粘砂。为此, 我们展开研究, 型砂选用我国河北某公司的擦洗砂, 其SiO<sub>2</sub>含量长期稳定在91%左右, 角形系数为1.3, pH值为5.6, 三筛集中度为93.1%, 灼烧减量 (LOI) ≤ 0.5%, 烧结点1 460 °C, 如图1所示。操作人员流失率较小, 处于稳定状态, 设备定期保养维护, 排除了天气等噪声变量的影响。因此, 经团队讨论选取浇

### 作者简介:

宁显润 (1985-), 男, 学士, 高级工程师, 主要研究方向为铸造工艺设计及质量管理。E-mail: ningxianrun@163.com

### 通信作者:

黄鹏, 男, 硕士, 高级工程师。E-mail: huangpeng@pushlinko.com

中图分类号: TG143

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977 (2025) 12-1616-04

### 收稿日期:

2025-07-08 收到初稿,  
2025-08-28 收到修订稿。

注温度（1 438 ℃、1 420 ℃和1 460 ℃）、涂料涂层湿态厚度（0.4 mm、0.5 mm和0.6 mm）、冷芯树脂加入量（占砂重的1.1%、1.2%和1.3%）三个变量作为研究对象，并运用DOE（试验设计）方法，构建多因素试验方案。通过对试验结果进行方差分析、交互作用分析等，确定各因素对粘砂的影响程度及最佳工艺参数组合，并进行验证试验，确保研究结果的可靠性和实用性。

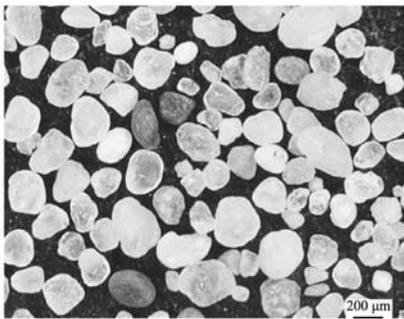


图1 50倍率的砂样图

Fig. 1 Sand sample image at 50 × magnification

## 2 试验设计与方案

### 2.1 试验材料与设备

试验所用型砂参数如上所述，符合铸造生产要求；GP-201GT/202GT冷芯树脂作为粘结剂；涂料为水基涂料。试验设备包括中频感应熔炼炉（用于控制浇注温度）、浸涂设备（控制涂料涂层厚度）、冷芯盒射芯机、波美计、测厚仪、测温仪和强度测试仪等。

### 2.2 因素水平的确定

浇注温度的选择基于铸造合金的特性和实际生产经验，温度为1 420 ℃时，金属液流动性较弱；温度为1 460 ℃时，可能加剧金属液与型砂的反应；为了提高结果的准确性，采用1包2件的方式浇注，并按照上述3种不同的温度，在达到要求温度的情况下浇注并取首件作为试验件。涂料采用桁架机械手浸涂工艺，涂层厚度为0.4 mm时，防护能力有限；涂层厚度为0.6 mm时，对铸件表面质量保护能力较高；冷芯树脂加入量的选取依据其在型砂中的粘结性能，加入量1.1%时型砂强度可能不足，经实际抗拉强度测量均值约为0.51 MPa；加入量为1.3%时，成本增加且影响透气性，实际抗拉强度测量均值约为0.71 MPa。具体因素水平见表1。

## 3 结果与讨论

### 3.1 DOE 试验方案制定

若按照三水平三因子试验，需要27次试验。本试

表1 试验因素水平表  
Tab. 1 Levels of experimental factors

因素	低水平	高水平
浇注温度/℃	1 420	1 460
涂层厚度/mm	0.4	0.6
树脂加入量/%	1.1	1.3

验借助统计学DOE二水平高低试验设计，为确保试验更加准确，增加了1个中心点和2个仿行，最终的总试验数为17次，计算其功效为86.9%，如图2所示。试验考察三个因素及其交互作用对铸件粘砂的影响，最终设计了正交试验方案，并对每组试验得到的铸件粘砂情况进行量化评估，采用粘砂面积占铸件总面积的百分比作为评价指标，结果见表2。

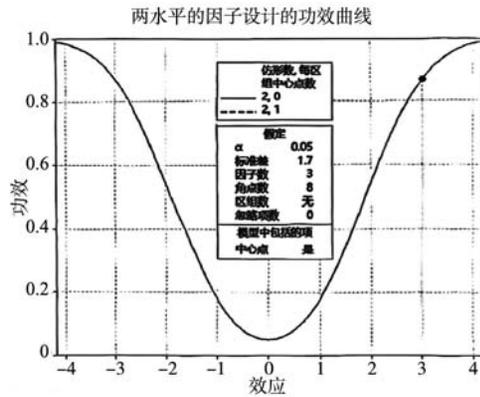


图2 DOE试验功效计算及试验次数

Fig. 2 Power estimation and number of runs for DOE test

表2 正交试验方案表  
Tab. 2 Orthogonal array design table

序号	浇注温度/℃	涂层厚度/mm	树脂加入量/%	粘砂面积百分比/%	粘砂位置
1	1 420	0.4	1.1	12	水套、牛角尖
2	1 460	0.4	1.1	15	水套、挺杆、牛角尖
3	1 420	0.6	1.1	9	水套
4	1 460	0.6	1.1	13	水套、挺杆、牛角尖
5	1 420	0.4	1.3	13	水套、牛角尖
6	1 460	0.4	1.3	14	水套、牛角尖
7	1 420	0.6	1.3	8	水道孔
8	1 460	0.6	1.3	12	水套、牛角尖
9	1 420	0.4	1.1	11	水套、牛角尖
10	1 460	0.4	1.1	16	水套、挺杆、牛角尖
11	1 420	0.6	1.1	10	水套
12	1 460	0.6	1.1	14	水套、牛角尖
13	1 420	0.4	1.3	13	水套、挺杆、牛角尖
14	1 460	0.4	1.3	13	水套、挺杆、牛角尖
15	1 420	0.6	1.3	9	水套
16	1 460	0.6	1.3	14	水套、挺杆、牛角尖
17	1 440	0.5	1.2	11	水套、牛角尖

### 3.2 数据统计与分析

运用方差分析对试验数据进行处理，分析各因素对粘砂面积的影响显著性及交互作用，经过三轮的模型缩减，R-sq之间的差距较小，预测值大于70%，其缩减前后的结果见图3。

由图3效应分析图可知，浇注温度和涂料涂层厚度对铸件粘砂有显著影响，而冷芯树脂加入量的影响不

显著。从而得知，随着浇注温度的升高，粘砂面积百分比呈上升趋势；涂料涂层厚度增加，粘砂面积百分比逐渐降低；冷芯树脂加入量的变化对粘砂面积百分比的影响相对较小。根据模型求解出其回归方程为：  
粘砂面积百分比=80.8-0.043 7×浇注温度-371×涂层厚度+0.250×浇注温度×涂层厚度。

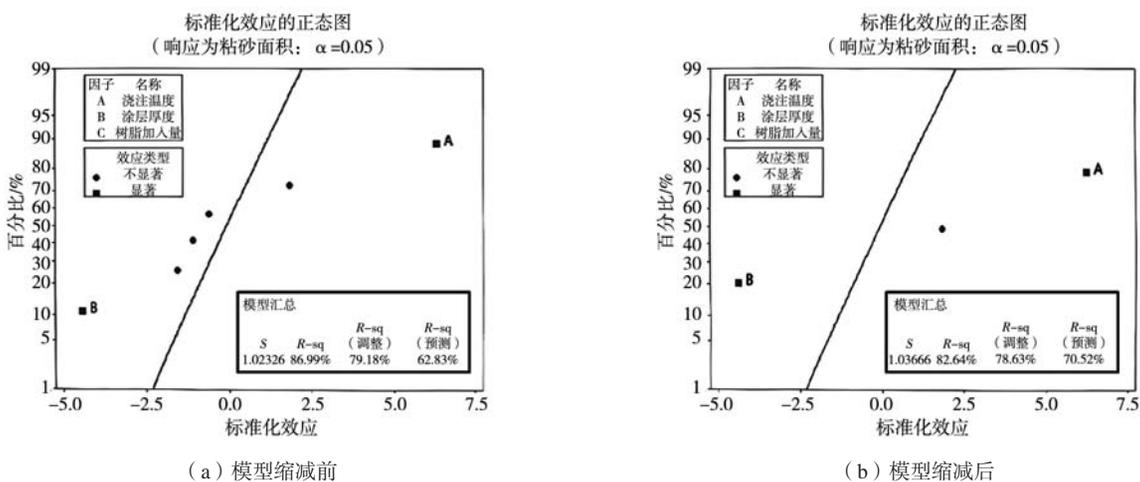


图3 模型优化前后对粘砂面积的影响效应分析图  
Fig. 3 Analysis chart of the influence effect on the area of adhered sand before and after model optimization

## 4 最佳方案确定与验证

### 4.1 最佳方案的确定

综合考虑各因素对粘砂的影响，为降低粘砂面积百分比，根据建立模型，将目标设定为最小值，规定上限为11%，超出11%将会降低生产效率，增加成本。使用优化响应求解，得出浇注温度为1 420 ℃和涂料涂层厚度为0.6 mm。从拟合值看出，有95%的粘砂面积百分比置信区间会在7.8%~10%，预测区间为6.4%~11.4%，如图4所示，随着温度的升高粘砂面积增大，随着涂料厚度增加，粘砂面积减少。

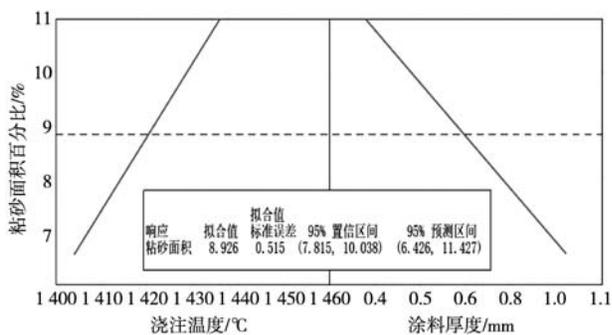


图4 优化响应预测模型  
Fig. 4 Optimized response prediction model

### 4.2 验证试验

按照最佳方案进行了3次共计120件产品验证试验，结果见表3。平均粘砂面积百分比为8.67%，实际粘砂情况前后对比如图5所示，比起改进前，改进后水套孔、挺杆孔和牛角尖粘砂面积百分比大幅度降低，在6%~9%之间，验证了最佳方案的有效性。

表3 验证试验结果  
Tab. 3 Results of verification tests

验证试验编号	浇注温度/℃	涂料涂层厚度/mm	树脂加入量/%	粘砂面积百分比/%
1	1 420	0.6	1.2	7
2	1 420	0.6	1.2	10
3	1 420	0.6	1.2	9
平均	1 420	0.6	1.2	8.67

## 5 结论

(1) 本研究通过DOE试验设计，系统分析了铸件粘砂的影响因素。结果表明，浇注温度和涂料涂层厚度对粘砂有显著影响，冷芯树脂加入量影响相对较小。确定的最佳工艺参数组合（浇注温度1 420 ℃、涂料涂层厚度0.6 mm、冷芯树脂加入量1.2%）能有效改

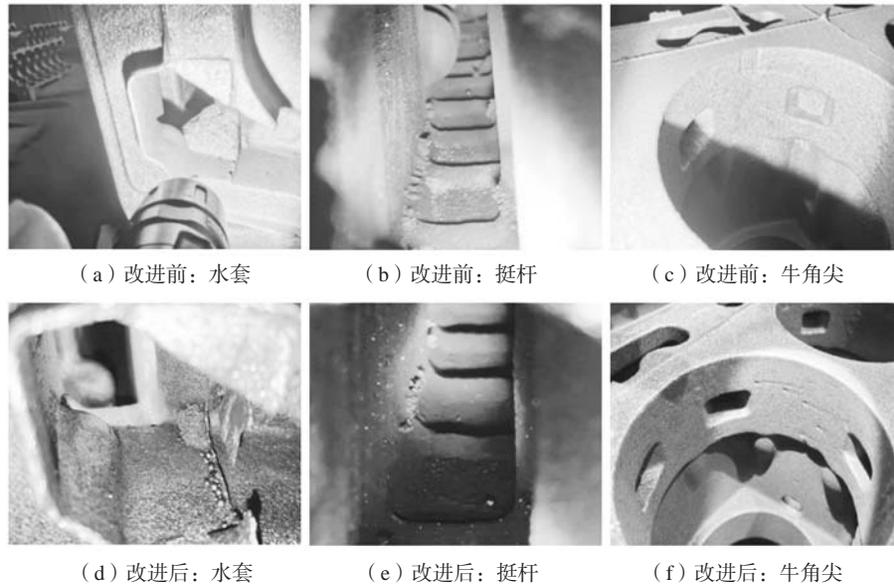


图5 铸件水套、挺杆、牛角尖改进前后粘砂情况图

Fig. 5 Burning-on comparison for water jacket, tappet, and horn tip castings before and after optimization

善铸件粘砂问题，粘砂面积百分比降低至8.67%。

(2) 本研究仅选取了三个主要因素进行研究，实际生产中铸件粘砂还受产品结构、浇注系统和砂型紧实率等多种因素影响。未来研究可进一步扩大因素范

围，采用更复杂的DOE试验设计方法，深入探究多因素交互作用，为铸造生产提供更全面、精准的工艺优化方案。

#### 参考文献:

- [1] 张学锋, 张方, 郭芳芳. 铸件粘砂机理及其质量控制浅析 [J]. 河北冶金, 2007 (2): 43-45.
- [2] 聂爽, 佟晶涛. 树脂砂铸件粘砂缺陷的分析与解决 [J]. 铸造工程, 2014 (2): 38-40.

## Study on Burning-on Defects of Cold Box Resin Sand Castings Optimized by Design of Experiments

NING Xian-run<sup>1</sup>, ZHENG Tao<sup>1</sup>, HUANG Peng<sup>1</sup>, LIANG Ying-xin<sup>2</sup>, WANG Xuan<sup>1</sup>, YANG Zhu<sup>1</sup>, WEI Yong<sup>1</sup>  
(1. Yibin Pushi Linko Technology Co., Ltd., Yibin 644007, Sichuan, China; 2. Jinan Shengquan Group Share-Holding Co., Ltd., Jinan 250204, Shandong, China)

#### Abstract:

This paper systematically investigated the formation mechanism and influencing factors of sand burning—a prevalent defect in resin sand castings during production. Through systematic mechanism analysis and production data screening, three key parameters were selected: pouring temperature, coating thickness, and phenolic urethane cold-box resin addition. Experiments were conducted using the Design of Experiments (DOE) methodology. Statistical analysis of experimental data enabled the identification and quantification of interaction effects among factors on burning-on defects, and determined the optimal process parameters. Verification tests demonstrated that this approach significantly mitigated the burning-on defects in the castings, providing a reliable basis for process optimization in actual production.

#### Key words:

cold-box resin sand; casting; burning-on defect; design of experiments