

云平台具备大数据存储、任务调度与智能分析功能,可实时记录各路段病害特征、施工进度及材料消耗信息,为养护部门提供数据可视化决策支持。管理人员可通过移动终端远程查看路况信息、修复质量与设备运行状态,实现作业过程的实时监控与智能调度。云端算法模块依据实时反馈数据动态优化修复参数,实现设备自学习与性能提升,使系统具有自适应与迭代进化能力。此外,云平台可与公路运维管理系统互联,形成多部门协同机制,提升应急响应速度与资源配置效率。该协同模式显著增强了公路养护的智能化与信息化水平,为现代交通基础设施的数字化管理提供了新的思路与范式[4]。

## 5 裂缝自动检测与修复技术的优化路径

### 5.1 算法精度与模型泛化能力的提升方向

深度学习在裂缝识别中展现出显著优势,但其识别精度与泛化能力仍受到数据规模、样本多样性及标注质量的制约。由于公路环境光照差异大、污染程度高、裂缝形态复杂,模型在不同区域和季节的适应性存在不足。为提升模型的鲁棒性与普适性,应构建多源异构数据集,涵盖不同气候、材质与光照条件下的路面图像,增强模型的学习广度。同时引入自监督学习与迁移学习策略,减少人工标注成本并提升模型自适应能力。针对设备部署端的实时检测需求,可通过模型剪枝、知识蒸馏及边缘计算技术实现轻量化部署,在保证检测精度的同时降低计算延迟与能耗。未来研究方向还需加强算法在复杂背景干扰、污染遮挡与裂缝重叠等极端工况下的稳定性测试,实现从实验室模型向工程级系统的可靠转化[5]。

### 5.2 装备集成与模块化升级路径

自动化修复装备的发展趋势正由单机作业向系统化协同演进,其集成度与模块化水平直接影响作业效率与维护成本。为提升设备的灵活性与适应性,应实现检测、分析与修复模块的标准化设计,使系统具备快速组装与替换能力。通过多机协同控制技术,可在大面积路段实现并行修复作业,显著提升施工效率。针对不同类型裂缝与路面结构,修复装置应具备喷补模块与材料配方的快速切换功能,提升技术适应范围。引入数字孪生技术,可实现设备运行状态的虚拟仿真与预测性维护,通过实时监测数据构建设备健康模型,优化参数设置与能耗管理。模块化、智能化升级路径的实现,不仅提升了设备运维效率,还为构建全自动、多任务协同的

智慧化修复系统提供了技术基础。

### 5.3 智能管理体系与全寿命周期养护模式

公路裂缝检测与修复的智能化转型不仅是技术创新,更是管理体系的系统重构。应建立基于全寿命周期的道路养护管理模式,通过数据驱动实现决策科学化与过程闭环化。利用物联网技术采集实时检测与修复数据,结合大数据分析云计算平台,实现病害识别、任务派发、进度监控与质量评估的自动化管理。系统可根据历史数据与环境因素预测裂缝演化趋势,提前制定维护计划,实现从“被动抢修”向“主动预防”的转变。通过构建路面健康评估模型,将检测结果、修复质量与道路寿命关联分析,为养护投资与资源配置提供量化依据。该模式推动公路管理从经验决策向数据决策转型,形成“检测—修复—评估—反馈”全链条闭环,实现养护全过程的可视化、可追溯与可优化,助力智慧公路的可持续发展。

## 6 结语

公路路面裂缝自动化检测与靶向修复技术是智慧公路养护体系的重要组成部分。本文系统研究了裂缝检测的关键算法、靶向修复的装备体系及工程实践效果,验证了自动化养护系统在提高效率、降低成本与保障安全方面的显著优势。研究表明,利用深度学习、激光测量与智能控制等技术,可实现裂缝病害从识别到修复的全流程自动化,显著提升公路养护的科学性与时效性。未来,应在算法优化、装备协同与数据管理等方面持续深化研究,完善标准体系与行业规范,推动公路养护由“经验管理”向“数据驱动”的智能化、精细化转型,为我国智慧交通建设提供坚实支撑。

### 参考文献

- [1] 宋雨峰.路面裂缝自动化检测数据应用研究[J].运输经理世界,2024,(13):151-153.
- [2] 张海伦.路面裂缝自动化检测数据应用及其可靠性分析[J].北方交通,2023,(11):59-61+65.
- [3] 傅幼华,罗文婷,李林,等.基于数据微观精分的沥青路面裂缝自动化检测[J].交通科技与经济,2022,24(06):45-52.
- [4] 刘文豪.基于图像处理与深度学习的车载式隧道衬砌裂缝检测系统及方法研究[D].长安大学,2021.
- [5] 赵文.基于无人机影像的道路裂缝自动化检测研究[D].华北理工大学,2024.

# Process Design and Optimization of Lost Foam Casting for Machine Tool Crossbeam

Lei Yu Dashun Feng Xianzhu Wang

Wuhu Honghu Materials Technology Co., Ltd., Wuhu, Anhui, 241009, China

## Abstract

Large machine tool crossbeam castings (made of HT300 gray iron, dimensions: 7500 × 2000 × 1350 mm, weight: 24 t) are prone to defects such as uneven mold filling, large thermal gradients, and severe distortion during lost foam casting (LFC). In this study, the initial step-gate pouring system was analyzed using Huazhu CAE simulation software, revealing issues including low utilization of ingates, excessive molten iron impact, and significantly lower temperatures in the central region. To address these problems, an optimized gating system was developed: a composite paper-plastic pouring channel was adopted, featuring a two-tier layout with 24 ingates, and the cross-sectional area ratio of sprue to ingates was adjusted to  $\Sigma A_{\text{sprue}} : \Sigma A_{\text{ingate}} \approx 1 : 1.02$ . Simulation results showed that the optimized design achieved smooth mold filling, uniform temperature distribution, and significantly improved solidification synchronicity. Production trials confirmed that the casting met all quality requirements: the guide rail surface hardness reached 200 HB (exceeding the minimum requirement of 180 HB), maximum deformation was only 5.7 mm, and no shrinkage porosity, cold shuts, or surface defects were observed—demonstrating successful first-time casting. This work provides an efficient and reliable process design methodology for large, complex gray iron castings produced via lost foam casting.

## Keywords

Solid casting; Machine tool crossbeam; Optimization of pouring system; Huazhu CAE; Temperature field; deformation control

## 实型铸造机床横梁的工艺设计及优化

喻磊 丰大顺 王咸珠

芜湖泓鹤材料技术有限公司, 中国·安徽 芜湖 241009

## 摘 要

针对大型机床横梁铸件 (HT300 材质, 尺寸 7500 × 2000 × 1350 mm, 重 24 t) 在实型铸造 (实型铸造) 过程中易出现充型不均、温差大、变形严重等缺陷的问题, 本文基于华铸 CAE 模拟技术对初始阶梯式浇注系统进行分析, 发现其存在内浇口利用率低、铁水冲击强烈及中部区域温度偏低等问题。据此提出优化方案: 采用纸塑管组合浇道, 重构为双阶 24 组内浇口布局, 并调整浇道截面积比例至  $\Sigma A_{\text{直}} : \Sigma A_{\text{内}} \approx 1 : 1.02$ 。模拟结果表明, 优化后充型平稳、温度场均匀、凝固同步性显著提升。实际生产验证显示, 铸件导轨面硬度达 200HB, 最大变形量 5.7 mm, 无缩松、冷隔等缺陷, 实现一次性成功浇注。本研究为大型复杂灰铸铁件的实型铸造提供了高效、可靠的工艺设计路径。

## 关键词

实型铸造; 机床横梁; 浇注系统优化; 华铸 CAE; 温度场; 变形控制

## 1 引言

在现代制造业体系中, 机床作为核心加工装备, 其精度稳定性直接决定了终端产品的加工质量与精度等级。机床横梁作为机床的关键承载部件, 不仅需承受巨大的切削载荷与运动部件重量, 还必须在长期服役过程中保持极高的几何精度。对于大型机床而言, 横梁的尺寸与重量通常较大, 这对铸造工艺的可靠性、稳定性提出了严苛要求。实型铸造作为一种先进的铸造技术, 近年来在大型复杂铸件生产中得

到广泛应用。该工艺采用泡沫塑料模型替代传统木模或金属模, 造型后无需取出模型, 直接浇注液态金属, 泡沫塑料模型在高温金属液作用下气化消失, 金属液填充模型空间形成铸件。其具备生产成本低、生产周期短、可制造复杂形状铸件等显著优势。然而, 对于大尺寸机床横梁铸件 (本研究中铸件长度 7500mm、重量 24 吨), 实型铸造仍面临诸多技术挑战。传统试生产模式的试错成本极高, 因此借助华铸 CAE 软件对机床横梁铸造工艺进行仿真优化, 成为保障铸件一次性成功生产的关键技术手段。

## 2 横梁的结构特点及技术要求分析

机床横梁三维模型如图 1 所示, 其轮廓尺寸为 7500mm × 2000mm × 1350mm, 外轮廓壁厚 40mm, 导轨

【作者简介】喻磊 (1985—), 男, 中国安徽芜湖人, 铸造工程师, 初级工程师, 从事汽车冲压模具类铸件、机床件的工艺设计、实型、消失模铸造工艺研究。

面厚度约 80mm，内部加强筋壁厚 20mm，内部筋板结构如图 2 所示。铸件材质为 HT300 灰铸铁，导轨面硬度要求  $\geq$ HB180，且导轨面需进行机加工，其余各面为非加工面。该铸件呈长条状，长度尺寸大，如何有效控制铸造过程中的变形，是决定铸件生产成败的核心关键<sup>[1]</sup>。

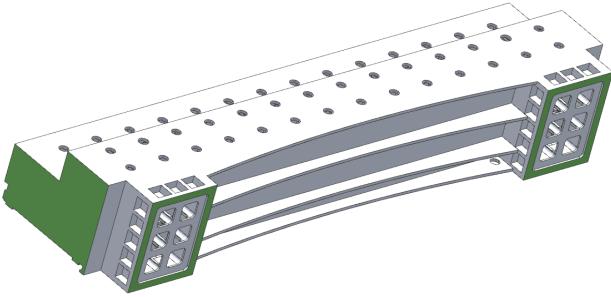


图 1 机床横梁三维模型

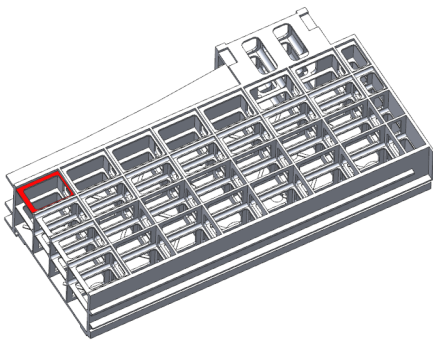


图 2 内部筋板结构示意图

### 3 铸造工艺设计

#### 3.1 铸造工艺方案

结合铸件长度、高度尺寸及公司现有生产条件，采用普通 EPS 泡沫板制作铸件模型。基于铸件结构特征，确定采用阶梯浇注工艺，两个直浇道分别布置在铸件长度方向两端，沿长度方向均匀布置内浇口，以实现金属液的平稳充型。

#### 3.2 浇注系统设计

根据铸件重量与结构特点，初始工艺的浇注系统计划采用泡沫浇道与陶瓷管组合形式，构建阶梯浇注系统（示意图见图 3）。设计参数如下：两直浇道直径 140mm，横浇道尺寸 100mm × 100mm，设置 32 个直径 50mm 的内浇口，浇道截面积比例为  $\Sigma A_{直} : \Sigma A_{横} : \Sigma A_{内} = 1 : 1.3 : 1.8$ 。设计初衷是使铁水从两端及长度方向同时进入型腔，保证铸件沿长度方向温度分布均匀，避免凝固过程中因温度梯度过大产生应力变形。

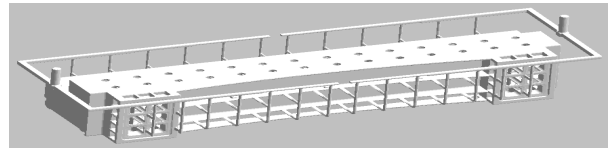


图 3 初始浇注系统示意图

### 4 初始设计方案的模拟与分析

将初始铸造工艺方案导入华铸 CAE 软件，对铁水充型及凝固过程进行数值模拟分析。模拟参数设置如下：采用均匀网格划分，网格棱长 13mm，总网格数量约 900 万；浇注材质为 HT300，浇注温度 1400℃，砂型初始温度约 20℃，采用倾包重力浇注方式，浇注速度 72cm/s。

图 4 为初始工艺充型过程模拟结果。从模拟结果可见，铁水经直浇道、横浇道后，仅通过距离直浇道最近的 3 个内浇口进入型腔，且上下两阶浇口同时进铁，其余内浇口均无铁水流入，完全未达到阶梯浇注的设计预期。此外，铁水从上层浇口高速进入型腔，对型腔冲击强烈，极易引发冲砂、夹杂等缺陷。充型完成后，铸件呈现明显的温度分布不均现象，中间区域温度低、两端温度高，温差超过 200℃。这种温差会导致中间区域凝固速度远快于两端，进而引发铸件中间区域下凹、两端上拱的变形，严重时可能导致导轨面无法加工而使铸件报废<sup>[2]</sup>。

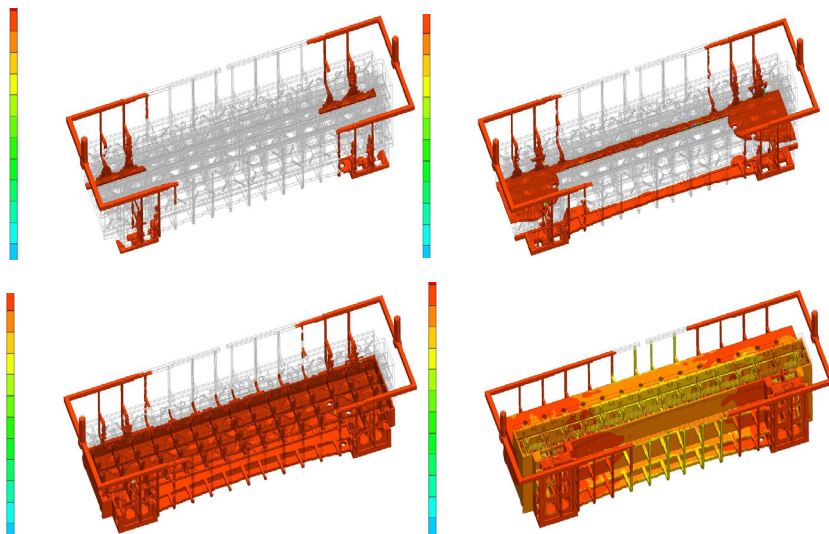


图 4 初始工艺充型过程模拟结果

## 5 优化设计方案的模拟与分析

### 5.1 工艺优化思路与方案

通过对初始工艺的模拟分析,明确其存在两大核心缺陷:(1)阶梯浇注的设计意图未能实现,靠近直浇道的六处内浇口两阶同时进铁,导致铁水冲击强烈,极易引发冲砂、夹渣缺陷;(2)浇注过程中中间12处内浇口未参与充型,导致铸件沿长度方向温度梯度过大,产生较大内应力,进而引发严重变形<sup>[3]</sup>。

为解决上述问题,对浇注系统进行全面优化:将传统泡沫浇道加陶瓷管的结构改为纸塑管组合浇注系统(优化后示意图见图5)。具体优化参数如下:设置12个 $\phi 70$ 直浇道,每个直浇道通过 $\phi 70$ 转 $\phi 50$ 变径纸管连接两组 $\phi 50$ 阶梯式内浇口,总计24组内浇口;调整浇道截面积比例至 $\Sigma A_{直}:\Sigma A_{内}=1:1.02$ ;第一阶内浇口距离模型底面约280mm,两阶内浇口间距约500mm,第二阶内浇口距离模型上表面约520mm;阶梯内浇口沿模型长度方向均匀布置。

优化后的浇注系统实现双重保障:在长度方向上,第一阶内浇口同步进铁,有效减小沿长度方向的温度梯度;在高度方向上,初始阶段由第一阶内浇口充型,随着液面上升至第二阶内浇口高度后,两阶内浇口同时进铁,可降低上层铁水温度损失,避免铸件顶面因铁水温度不足而出现气化不良、冷隔等缺陷。

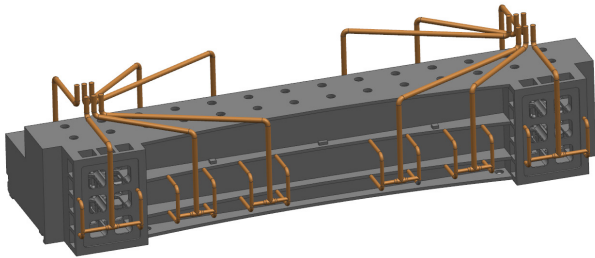


图5 优化后浇注系统示意图

### 5.2 优化后工艺方案的模拟与分析

将优化后工艺方案导入华铸CAE软件进行铁水的充型和凝固过程模拟分析,划分网格棱长、浇注材质、浇注温度、浇注速度、砂型的初始温度等各种工艺参数与初始方案保持一致,以确保对比的有效性。

图6为优化后铁水充型过程模拟结果。从图中可见,充型初期铁水经直浇道平稳流入各第一阶内浇口,充型过程平稳有序,有效避免了铁水冲击导致的冲砂、夹杂缺陷;当铁水液面上升至第二阶内浇口高度后,两阶内浇口同步充型,有效减少了铁水温度损失,可彻底避免铸件顶面气化不良、冷隔等缺陷。

图7为优化后铸件凝固过程模拟结果。浇注结束后,铸件沿长度方向温度分布均匀,凝固过程呈现由表及里的规律,且沿长度方向基本实现同步凝固,有效降低了凝固过程中产生的内应力,从根本上控制了铸件变形<sup>[4]</sup>。

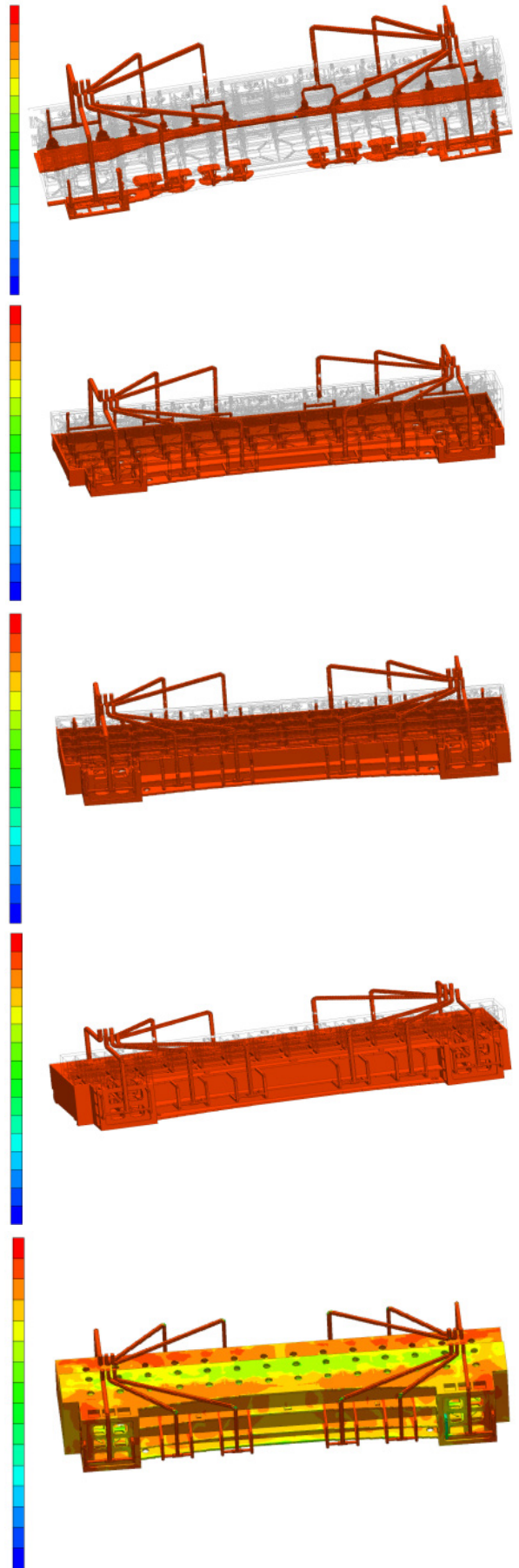


图6 优化后工艺充型过程模拟结果