

# 自动化联体缸盖组芯线的设计及应用

刘超, 刘继波, 李明, 陈海东, 王文强, 刘志豪, 王圆圆

(潍柴(潍坊)材料成型制造中心有限公司, 山东潍坊 261199)

**摘要:** 为解决传统发动机缸盖铸造生产流程长、成本高、效率低及质量稳定性差等问题, 设计了一条自动化联体缸盖组芯生产线并成功应用。该生产线通过设备集成与工艺优化, 实现了砂芯从制备、转运、修芯、组芯、涂胶、检测、浸涂、烘干、合箱到仓储物流的全流程自动化作业。实际应用数据显示, 该生产线自动化率达90%, 相较于传统热芯盒生产线, 制芯生产效率提升45%, 制芯能耗降低60%, 生产工序人员减少70%, 有效解决了传统生产模式的弊端。该生产线的成功应用, 实现了发动机联体缸盖铸造生产模式与工艺流程的变革, 可供铸造行业自动化升级参考借鉴。

**关键词:** 联体缸盖; 自动化组芯线; 冷芯盒工艺; 生产效率; 能耗优化

**中图分类号:** TG248; TP2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 06-0690-05

**DOI:** 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0089

## Design and Application of Automated Integrated Cylinder Head Core Assembly Lines

LIU Chao, LIU Ji-bo, LI Ming, CHEN Hai-dong, WANG Wen-qiang, LIU Zhi-hao, WANG Yuan-yuan  
(Weichai (Weifang) Material Forming Manufacturing Center Co., Ltd., Weifang 261199, Shandong, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of long process flow, high cost, low efficiency and unstable quality in traditional engine cylinder head casting production, an automated integrated cylinder head core assembly production line was designed and successfully applied. Through equipment integration and process optimization, this production line achieves full process automation for the entire core production, including manufacturing, transportation, core trimming and assembly, glue application, inspection, impregnation, drying, mould assembly, and warehouse logistics. The actual application data indicates that the production line achieves an automation rate of 90%. Compared to conventional hot core box production line, the production efficiency of core making is improved by 45%, the core production energy consumption is reduced by 60%, and the production process personnel is decreased by 70%, effectively resolving the shortcomings of traditional production model. The successful application of this production line achieves transformation of the casting production model and process flow for engine integrated cylinder head, which can be used as a reference for the automatic upgrading of the casting industry.

**Key words:** integrated cylinder head; automated core assembly line; cold core box process; production efficiency; energy consumption optimization

长期以来, 传统铸造企业受限于高人工依赖、高劳动强度及差作业环境的生产模式, 随着人口结构变化与人口红利消退, 传统生产模式已难以满足行业高质量发展需求<sup>[1-5]</sup>。工业4.0趋势下, 铸造行业亟需通过自动化改造、工艺革新与流程优化, 实现少人化、高效化、低能耗化转型<sup>[6-15]</sup>。针对发动机联体缸盖铸造生产的复杂性, 本项目设计了一条联体缸盖全流程自动化组芯生产线, 实现了砂芯制备、转运、修芯、组芯、涂胶、检测、浸涂、烘干、合箱、整体芯组合、物料转运和仓储物流等的全流程自动化。通过设备与

工艺的深度融合, 突破传统生产瓶颈, 为铸造行业自动化升级提供了可借鉴的实践方案, 具备显著的实际应用价值与行业推广意义。

## 1 自动化组芯生产线整体设计

为实现砂芯全流程自动化作业, 生产线采用“功能模块+机器人+智能转运”的集成设计, 共包含7个功能模块(OP10-OP70), 配置专机12套、工业机器人34台、自动搬运车(AGV)3台, 形成覆盖砂芯生产全环节的自动化作业体系。其中, 工业机器人承担取

**收稿日期:** 2025-05-12 收到初稿, 2025-11-07 收到修订稿。

**作者简介:** 刘超(1987-), 男, 高级工程师, 主要从事发动机核心零部件铸造工艺及数智化转型工作。E-mail: liuchao2006sdu@126.com

**引用格式:** 刘超, 刘继波, 李明, 等. 自动化联体缸盖组芯线的设计及应用[J]. 铸造, 2026, 75(6): 690-694.

LIU Chao, LIU Ji-bo, LI Ming, et al. Design and application of automated integrated cylinder head core assembly lines [J]. Foundry, 2026, 75(6): 690-694.

芯、修芯、涂胶、组芯、浸涂、合箱及入库等核心作业，自动搬运车负责跨区域砂芯转运，专机设备涵盖制芯、烘干、检测等专用功能，各设备通过工业以太网实现通信联动，保障生产节拍稳定，形成一套全自动、柔性化气缸盖砂芯生产线，如图1所示。



图1 联体缸盖智能化组芯线

Fig. 1 Intelligent sand core assembly line for integral cylinder heads

## 2 生产线四大核心功能模块

基于工艺流程逻辑，将生产线划分为四大核心功能模块，各模块协同实现自动化作业。

### 2.1 砂芯生产与预处理模块

砂芯生产与预处理模块配置3台制芯机，分别负责上盖底盘芯、进排气道砂芯、上夹层/齿轮室/短边芯的制备；配套自动修芯装置与工业机器人，实现砂芯制备后的自动抓取、精准修芯与辊道输送，为后续组芯工序奠定精度基础。

### 2.2 自动化组芯与涂胶模块

自动化组芯与涂胶模块集成6轴铸造专用机器人、双枪涂胶系统与木螺钉自动拧紧装置。机器人通过视觉引导与机械粗定位技术，实现砂芯精准组芯；双枪涂胶系统采用伺服调距设计，涂胶轨迹覆盖点、线、圆、椭圆及不规则图形，涂胶截面尺寸控制在 $\Phi$  (3~5) mm，避免人工涂胶的溢胶、缺胶问题，如图2所示；木螺钉自动拧紧装置保障进排气道砂芯和上夹



图2 涂胶系统作业

Fig. 2 Gluing system operation

层等组件的连接稳定性，组芯精度误差控制在0.2 mm以内，见图3。

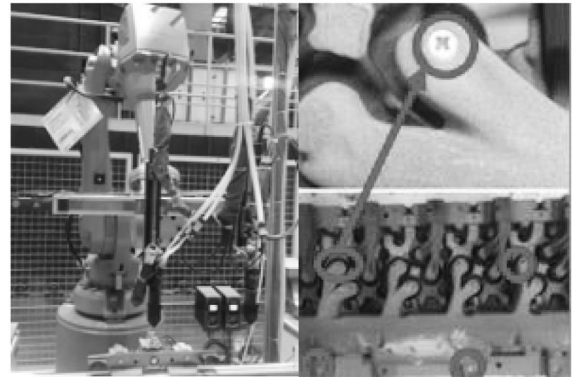


图3 木螺钉自动拧紧系统及拧紧效果

Fig. 3 Automatic tightening system and tightening effect for wood screws

### 2.3 砂芯后处理与合箱模块

砂芯后处理与合箱模块包含自动浸涂、烘干、人工辅助与自动合箱功能。如图4所示，机器人抓取芯组并完成浸涂后，将其放置于烘干托盘进入烘干窑，烘干后人工放置高温耐火垫；随后由专用机器人抓取上盖芯完成自动合箱，再通过人工进行组芯螺栓二次固定，确保芯组合箱稳定性，降低后续浇注过程中的砂芯移位风险。



图4 机器人自动合箱系统

Fig. 4 Robotic automatic mold assembling system

### 2.4 智能物流与仓储模块

智能物流与仓储模块采用“辊道输送线+AGV转运+立库存储”的组合模式。自动搬运车将合箱后的芯组从缓存辊道线转运至入库缓存辊道线，工业机器人完成芯组入库摆放；立库系统对砂芯进行二维码激光刻印，实现砂芯件号、版本与制芯时间等信息的全生命周期追溯，同时该系统具备库存在线预警、远程监控与出入库策略优化功能，进一步保障多品种砂芯混线生产的有序性。

### 3 关键工艺创新与应用效果

#### 3.1 冷芯盒工艺革新：突破效率与能耗瓶颈

针对传统热芯盒生产线效率低、能耗高、复杂砂芯成形难的问题，本生产线围绕联体缸盖砂芯特性，开发了全新冷芯盒工艺体系，实现95%砂芯的冷芯化生产，核心突破与应用效果如下：

首先进行了原材料配比优化，采用特种砂+再生砂+特殊粘结剂方案，提升砂芯瞬时强度与耐高温性能，砂芯强度达到传统热芯盒工艺水平，满足机器人自动化取芯、修芯的强度需求，解决了复杂水夹层与进气道砂芯的冷芯盒工艺技术瓶颈。

在此基础上，设计L型特殊浇注系统（图5），改变冷芯盒砂芯与金属液的接触界面反应过程，结合新型芯砂材料的低发气特性，有效降低了冷芯盒工艺常见的铸件内腔粘砂（缺陷率从18%降至2%以下）和脉纹缺陷（缺陷率从12%降至1%以下）<sup>[16-17]</sup>。同时，该浇注系统下工艺出品率提升至83%，较传统直线浇注系统出品率（约75%）有所提升，减少了金属液浪费。

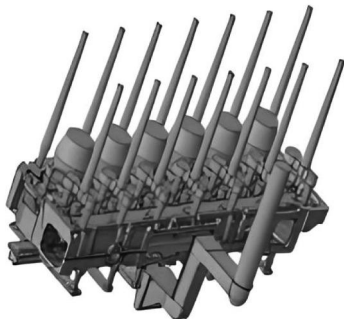


图5 L型浇注系统  
Fig. 5 L-shaped gating system

与传统热芯盒生产线相比，冷芯盒工艺的制芯生产效率提升45%（传统热芯盒单班制芯量约200件，本生产线单班制芯量达290件），制芯能耗降低约60%（传统热芯盒生产单吨砂芯能耗约800 kW·h，本生产线能耗约320 kW·h），显著提升了生产经济性。

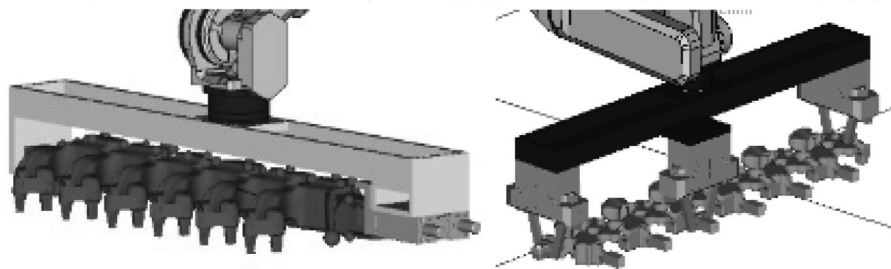


图6 砂芯夹具示意图  
Fig. 6 Schematic diagram of sand core fixture

#### 3.2 自动化技术应用：降低人工依赖与提升稳定性

生产线实现了多环节（修芯、组芯、涂胶、转运等）全自动化技术替代人工操作，核心技术与应用数据如下：

开发了基于砂芯三维模型的智能化贴合修芯系统，机器人搭载定制修芯刀具，根据砂芯表面结构自动调整修芯路径，修芯重复定位精度达 $\pm 0.02$  mm，残余毛刺高度 $\leq 0.1$  mm，相比人工修芯（定位精度 $\pm 0.5$  mm，残余毛刺高度 $\leq 0.8$  mm），精度提升约25倍，且单组砂芯修芯时间从120 s缩短至45 s，效率提升62.5%；同时，避免了人工修芯的漏修和过修问题，修芯合格率达82%提升至99.5%。

配置有铸造专用6轴机器人（负载50 kg，重复定位精度 $\pm 0.05$  mm），配合辊道输送线的机械粗定位（定位误差 $\leq 0.5$  mm）与视觉引导精准定位（定位误差 $\leq 0.03$  mm）技术，实现组芯线打热熔胶、涂粘结剂和组芯的全自动化作业。涂胶系统（图2）创新采用双枪结构+伺服调距设计，胶枪间距可根据砂芯尺寸自动调整，调整范围为50~300 mm，涂胶轨迹覆盖多元图形，涂胶截面控制精准，与人工涂胶相比，涂胶溢出率从15%降至1%以下，涂胶缺失率从10%降至0.5%以下，组芯粘结强度提升15%，粘结强度 $\geq 3.0$  MPa。针对热熔胶、粘结剂易硬化堵塞的问题，采用普通粘结剂替代微波胶+惰性气体保护方案，普通粘结剂成本仅为微波胶的10%，单组砂芯涂胶成本从2.8元降至0.28元，年节省成本约25.2万元；同时，以氮气作为压力介质隔绝二氧化碳，避免粘结剂在管路内反应固化，胶阀使用寿命从1 500次提升至8 000次，减少了设备维护频次与成本。

基于砂芯特征独创无损夹取方式，设计了多自由度砂芯夹具，见图6和图7。通过柔性夹具与真空吸附结合的方式，避免砂芯抓取过程中的磕碰损伤，砂芯转运报废率从传统人工转运的5%降至0.8%。开发了全新机器人合箱定位算法，结合砂芯表面的定位基准点，自动补偿合箱误差（ $\leq 0.2$  mm），解决传统人工

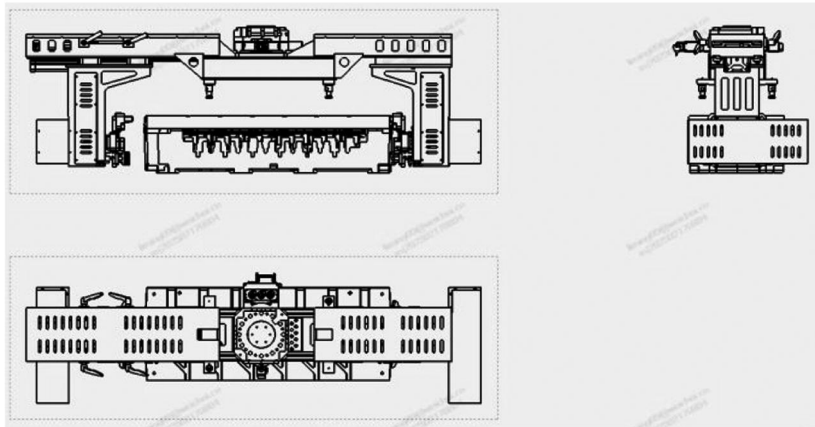


图7 夹具设计图

Fig. 7 Fixture design drawing

合箱易出现的错箱、偏芯问题，合箱合格率从85%提升至99%。同时，单组合箱时间从人工操作的180 s缩短至60 s，效率提升66.7%。

### 3.3 智能物流与仓储：保障生产连续性与可追溯性

如图8所示，采用“辊道输送线+AGV转运”的组合模式，实现砂芯全流程无人搬运，合箱后的芯组经缓存辊道线暂存后，自动搬运车（载重500 kg，定位精度 $\pm 10$  mm）自动接收调度指令，将芯组从生产区转运至入库缓存辊道线（转运时间从人工搬运的15 min缩短至5 min），再由机器人抓取芯组放置于入库辊道线，物流转运效率提升66.7%。同时，AGV系统通过工业以太网与生产系统联动，实现多台自动搬运车的路径优化与避障，转运故障率 $\leq 0.5\%$ 。



图8 自动搬运车 (AGV)

Fig. 8 Automatic guided vehicle

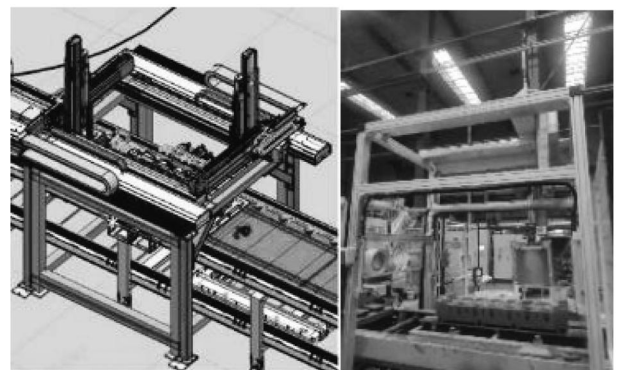
此外，对砂芯立库系统进行升级，引入二维码激光刻印技术——每组合箱芯组在入库前，由机器人完成二维码刻印，包含砂芯件号、版本、制芯时间、操作人员等12项信息，实现全生命周期追溯。立库系统具备库存在线预警（当某类砂芯库存低于安全阈值50组时自动报警）、出入库策略优化（根据生产计划自动优先出库近期生产的砂芯）、实时可视化（通过车间大屏可查看各库位砂芯数量与状态）等功能，多品种砂芯混线生产的仓储管理效率提升40%，砂芯过期报

废率从3%降至0.5%。

### 3.4 工艺优化与检测升级：进一步降本增效

传统工艺流程中，砂芯烘干后需2名/班工人手工粘贴石棉垫（每班次需粘贴220片，单片粘贴时间约30 s）；通过工艺优化验证，将粘贴工序移至烘干前、浸涂后，以有效利用浸涂后涂料的粘性（涂料粘度为150~200 mPa·s），由浸涂机器人在砂芯浸涂后立即抓取石棉垫粘贴，再进入烘干窑（120 °C/30 min）固化，实现石棉垫自动粘贴。该优化预计年节省人工成本14.4万元；同时，自动粘贴的石棉垫位置偏差 $\leq 0.5$  mm，相比人工粘贴（偏差 $\leq 3$  mm），精度提升6倍，能够避免因石棉垫偏移导致的浇注漏液问题<sup>[18]</sup>。

开发了进排气道砂芯全自动检测系统，如图9所示，采用激光位移传感器对砂芯进气道、排气道及底盘芯的30个关键点位（每缸5个点位）进行尺寸检测，检测精度达0.1 mm，公差范围可根据产品要求在 $\pm 0.3$  mm至 $\pm 0.5$  mm之间调整；检测数据实时上传MES（manufacturing execution system）系统，当某点位尺



(a) 模拟图

(b) 实物图

图9 气道砂芯检测系统

Fig. 9 Inspection system of airway sand core

寸超差时,系统立即报警并锁定不合格砂芯,避免流入后续工序。该系统使砂芯检测时间从人工检测的300 s/组缩短至60 s/组,效率提升80%,同时检测覆盖率从人工抽检的30%提升至100%,提前拦截不合格砂芯,减少后续浇注废品损失,年减少废品损失约18万元。

### 3.5 信息集成与质量管控

设计了覆盖“制芯-修芯-组芯-合箱-入库”全流程的数据管理系统,通过工业以太网采集各设备实时数据,如制芯机射砂压力、机器人运行参数和砂芯检测尺寸等,共设置128个数据采集点,数据采集频率达1次/s;系统具备数据追溯(可查询任意一组砂芯的生产全过程数据)、趋势分析(自动生成砂芯尺寸波动趋势图)、异常预警(当参数超出设定范围时,通过车间大屏、手机APP双重报警)功能,解决传统铸造生产“数据断层、质量追溯难”的问题。

利用 PLC 控制系统实现总控单元与各机器人、制芯机和自动搬运车的即时通讯(通信延迟 $\leq 100$  ms),可根据生产计划自动切换多品种砂芯的工艺参数,如换型时机器人修芯路径、涂胶参数、组芯位置等可在5 min内完成切换,保障多品种混线生产的质量一致性;同时,采用伺服控制系统实现砂芯放置精确定位,杜绝砂芯位置放偏(偏差 $\leq 0.1$  mm)、下不到

底、漂移等问题,组芯废芯率从传统生产的8%降至1.5%。

## 4 结束语

所设计的自动化联体缸盖组芯生产线通过工艺革新与设备集成,实现了砂芯从生产到仓储的全流程自动化作业,核心成果如下:

生产效率与能耗显著优化:生产线自动化率达90%,制芯生产效率较传统热芯盒生产线提升45%,制芯能耗降低60%,年节约成本合计约48万元。生产工序与质量持续改善:生产人员从传统生产线的25人/班降至7人/班,减少70%;砂芯组芯合格率从85%提升至99%,铸件内腔缺陷率从30%降至3%以下,产品质量稳定性达到行业领先水平。柔性兼容提升:可实现H平台多品种联体缸盖的快速切换生产,换型时间不高于5 min,同时兼容缸体、缸盖的同步生产,满足企业多品种、小批量的生产需求。

该生产线已成功应用,解决了传统发动机缸盖生产流程长、成本高、效率低、不良率高的缺点,实现了发动机联体缸盖铸造生产模式与工艺流程的行业性变革,为铸造行业自动化升级提供了可复制的实践方案,对推动行业向高效、低耗、优质方向发展具有重要的示范意义。

### 参考文献:

- [1] 陈建华. 工业4.0下的现代铸造工厂 [J]. 中国铸造装备与技术, 2022, 57(4): 102-106.
- [2] 刘金城. 造型现代化 [J]. 铸造, 2024, 73(5): 725-726.
- [3] KANG J W, LIU B L, JING T, et al. Intelligent casting: empowering the future foundry industry [J]. China Foundry, 2024, 21(5): 409-426.
- [4] 袁显华. 绿色铸造与智能化生产研究 [J]. 中国高新技术, 2022(8): 44-45.
- [5] 杜彰展. 铸造企业的智能化发展 [C]// 第十八届中国铸造协会年会论文集, 2022: 587-589.
- [6] 靳鹏. A铸造公司制芯流程优化研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.
- [7] 陈勇, 于斌, 李琰芬. 自动化物流系统在铸造企业中的创新应用: 评《物流机械设备运用与管理》[J]. 铸造, 2021, 70(3): 397-398.
- [8] KORI S M, KORI M A, SHEELI N G, et al. Implementing automation in foundry industries through the integration of IoT and AIML [J]. Lecture Notes in Networks and Systems, 2024: 339-346.
- [9] LAGRANT J. Process and data automation for the mid-sized foundry [J]. Modern Casting, 2020, 110(4): 28-31.
- [10] NODA Y. Applications of robotics technologies in foundry [J]. Journal of Japan Foundry Engineering Society, 2021, 93(12): 770-775.
- [11] MUHAMMAD S, SAADIA M, JOHANNES G, et al. Intelligent process control in foundry manufacturing [J]. International Foundry Research, 2014, 66(2): 10-23.
- [12] LEHMUS D. Advances in metal casting technology: a review of state of the art, challenges and trends—Part I: changing markets, changing products [J]. Metals, 2022, 12(11): 1959.
- [13] 史国飞. 基于PLC的铝合金轮毂低压铸造智能控制探究 [J]. 世界有色金属, 2019, (11): 279-280.
- [14] 蔡咏梅, 赵玮, 边晓颖, 等. 数智化对制造业企业绿色发展的影响研究 [J]. 金融理论与教学, 2025, 43(5): 53-63.
- [15] ZHOU J, LI P G, ZHOU Y H, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing [J]. Engineering, 2018, 4: 11-20.
- [16] 周强, 任怀喜, 王超, 等. 铸造用冷芯盒射砂系统结构优化 [J]. 中国铸造装备与技术, 2023, 58(6): 13-15.
- [17] 徐生龙, 崔玉萍. 基于计算机辅助设计的柴油机气缸盖铸造工艺优化 [J]. 铸造, 2020, 69(10): 1114-1116.
- [18] 孙晓敏, 臧加伦, 王勇. 联体气缸盖铸造工艺设计探讨 [J]. 中国铸造装备与技术, 2016(5): 23-26.