

灰铸铁联体缸盖铸造缺陷控制研究

黄冠, 孙明虎, 孙欣良, 廉贞松, 穆星伟, 陈海东

(潍柴(潍坊)材料成型制造中心有限公司, 山东 潍坊 261000)

*通讯作者: 陈海东, 男, 工程师, 硕士研究生。E-mail: chenhd@weichai.com

摘要: 本文针对某系列联体缸盖这一高牌号灰铸铁件废品率较高, 尤其是气孔、缩陷类缺陷突出的问题展开研究。通过对缸盖生产流程中涵盖物料、工艺参数、工装等全方位的 57 个影响因子进行系统分析, 精准识别出 7 个关键因素, 并制定了针对性的改进举措。实施改进后, 气孔及缩陷废品率从初始的 5.0% 成功降至 1.52%, 取得了显著效果, 为铸造企业提高生产质量和效率提供了实践经验与理论支持。

关键词: 灰铸铁; 联体缸盖; 气孔; 缩陷

Research on the Control of Casting Defects of Gray Iron Integrated Cylinder Head

HUANG Guan, SUN Ming-hu, SUN Xin-liang, LIAN Zhen-song, MU Xing-wei, CHEN Hai-dong

(Weichai Material Forming and Manufacturing Center Co., Ltd, Weifang 261000, China)

Abstract: This paper conducts a study aiming at the problems of a certain series of integrated cylinder heads, which are high-grade gray cast iron parts with a relatively high rejection rate, especially the prominent defects such as gas holes and shrinkage depressions. Through a systematic analysis of 57 influencing factors in the production process of the cylinder heads, including materials, process parameters, tooling and other aspects, 7 key factors are accurately identified, and targeted improvement measures are formulated. After the implementation of the improvement measures, the scrap rate of air holes and shrinkage depressions has been successfully reduced from the initial 5.0% to 1.52%, achieving remarkable results. It provides practical experience and theoretical support for foundry enterprises to improve production quality and efficiency.

Key words: gray iron; combined cylinder head; air hole; shrinkage depression

1 前言

在现代工业制造中, 灰铁铸件凭借其高强度、良好的热稳定性以及出色的减震性等一系列优势, 在众多领域得到了广泛应用, 特别是在发动机市场上, 始终保持着极高的认可度^[1]。某系列缸盖, 作为潍柴首款集成进气管的高牌号灰铸铁联体缸盖, 尺寸幅面大, 材质要求高(本体要求达到 280 MPa 以上), 由此导致该铸件废品率较高, 特别是气孔、缩陷类等铸件缺陷多次出现^[2,3]。

经统计, 潍柴动力 2023 年 7 月-2024 年 2 月出产的该系列联体缸盖, 气孔及缩陷废品率达到了 5.0%; 约占总废品数量的 90% 以上。如此高的废品率不仅造成了原材料、人力和时间的大量浪费, 增

加了生产成本, 还严重影响了生产的连续性和企业的经济效益。在实际生产中, 为保障生产的顺利进行, 提高生产效率, 解决气孔和缩陷问题迫在眉睫。本研究旨在深入分析导致这些缺陷产生的原因, 并提出针对性的解决措施, 以期降低废品率, 提升产品质量。

2 缺陷产生原因

2.1 气孔和缩陷特征及产生原因

气孔是铸件中最常见的缺陷类型, 通常分布于铸件内部、表面或近表面区域; 其孔壁通常较为光滑, 形状多为大小各异的圆形、椭圆形以及不规则形, 如图 1.(a)。在铸造过程中, 原材料中的水分、油污以及砂型(芯)中的粘结剂等在高温下分解会产生

气体；另外，金属液在熔炼过程中也会溶解一定量的气体，如氢气、氮气等。当这些气体在铸件凝固过程中无法及时排出时，铸件内部聚集形成气孔^[4]。随着铸件的凝固进程，气体被包裹在固相和液相之间，由于气体的压力作用，便会在铸件内部撑开形成孔洞^[5]。

如图 1.(b)所示，缩陷表现为在铸件厚大部分或散热困难部位的表面出现平滑的凹陷。在灰铸铁件中，表面缩陷常出现在铸件表面最后凝固的部位^[6,7]。这是因为在铸件凝固过程中，存在着凝固收缩现象。当铸件的厚大部位或散热困难部位在凝固过程中得不到充分的补缩时，就会产生缩陷。铸件厚大截面

的上表面凹陷往往是由于转角凹部的“尖角效应”形成热节所引发的^[8]。热节处热量集中，凝固速度相对较慢，在凝固后期，周围的金属液已经凝固，无法为热节处提供足够的补缩金属液，导致该部位在收缩过程中形成凹陷^[7]。而且，铸件壁厚不均匀性会加剧凝固过程中的补缩困难，使得缩陷缺陷更容易产生。另一方面，灰铸铁在凝固过程中会发生石墨化反应，产生体积膨胀，若石墨化膨胀不充分，或者在铸件凝固后期，由于铸件外壳已经形成，内部液态金属受到阻碍无法自由流动，不能充分利用石墨化膨胀来补偿凝固收缩，也会导致缩陷的产生^[7,8]。

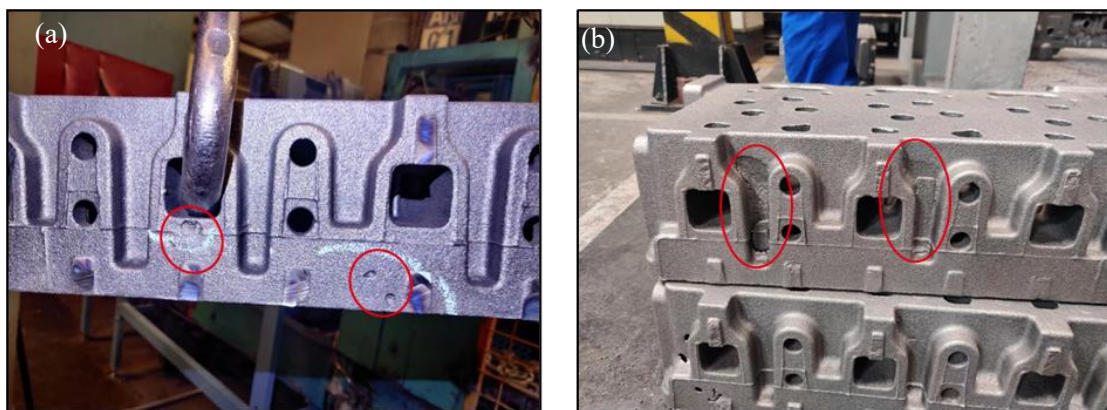


图 1 某系列缸盖铸件废品类型图
Fig.1 Diagram of Scrap Types of a certain series Cylinder Head Casting

2.2 在实际生产中影响气孔及缩陷的关键因子

在潍柴动力生产的某系列缸盖，涵盖了制芯、造型、熔炼、清理等一系列工序流程。为全面找出影响气孔和缩陷缺陷的因素，在整个工艺流程内对物料、工艺参数、工装等全范围进行细致筛选，共找出 57 个影响因子。如表 1 所示。

通过 C&E 矩阵与 FMEA 分析以及单因子方差分析、卡方检验等方法，最终筛选出 7 个关键因子，分别为排气冒口数量、铸件壁厚差异、操作者把螺栓数量、石棉垫规格、浇注温度、浇注时间、碳含量。针对这些关键因子，采取了一系列措施改进。

表 1 生产流程中气孔及缩陷的影响因子

Tab.1 Influencing Factors of Air Holes and Shrinkage Depressions in the Production Process

过程	影响因子	过程	影响因子	过程	影响因子
制芯	原砂性能指标	浸涂烘干	烘干温度	造型	出模状况
制芯	树脂种类	浸涂烘干	烘干时间	造型	砂型表面散落砂
制芯	树脂加入量	浸涂烘干	设备状况	造型	操作者技能
制芯	混砂时间	浸涂烘干	室内温度和湿度	下芯研箱	芯子质量
制芯	制芯参数	浸涂烘干	操作者技能	下芯研箱	砂芯与砂型配合
制芯	设备运行精度	砂处理	型砂水分	下芯研箱	浇口杯位置
制芯	脱模剂性能指标	砂处理	型砂温度	下芯研箱	扎气眼位置度
制芯	芯盒状况	砂处理	膨润土性能指标	下芯研箱	上砂型平整度
制芯	铸件壁厚差异	砂处理	煤粉性能指标	下芯研箱	操作者技能
制芯	操作者技能	砂处理	原砂性能指标	熔炼浇注	浇注温度
组芯	石棉垫规格	砂处理	混砂时间	熔炼浇注	浇注时间
组芯	杂质（粘结剂）	砂处理	操作者技能水平	熔炼浇注	浇注箱数
组芯	粘结剂质量	造型	型砂加入量	熔炼浇注	铁水质量
组芯	热熔胶质量	造型	型板几何形状	熔炼浇注	孕育剂

组芯	把螺栓数量	造型	设备运行精度	熔炼浇注	孕育剂加入量
浸涂烘干	涂料质量	造型	气流预紧实压力	熔炼浇注	浇包质量
浸涂烘干	涂料比重	造型	砂型表面硬度	熔炼浇注	含碳量
浸涂烘干	控涂料时间	造型	排气冒口数量	捅箱	铸件冷却时间
浸涂烘干	池内杂质	造型	脱模剂	捅箱	设备状况

3 改进措施

3.1 排气冒口数量与石棉垫规格改进

如图 2 所示，在笔者公司原有生产工艺中，砂芯 6 排气孔对应造型上箱 3 排气冒口，排气冒口数

量相对较少，在实际生产过程中容易出现堵气眼的情况，从而导致气体无法顺畅排出，增加了气孔缺陷产生的概率。为解决这一问题，对造型型板进行改进，将排气冒口数量增加至 6 个。这样一来，在浇注时排气效果得到显著提升，气体能够更顺利地排出，有效减小了气孔缺陷的出现几率。



图 2 某系列缸盖排气冒口改进前后示意图

Fig.2 Schematic Diagram of the Exhaust Riser of a certain series Cylinder Heads before and after Improvement

在原有的生产工艺中，采用 4mm 规格石棉垫时，缸盖砂上夹层与上盖芯间存在间隙，封火效果不佳。这会导致在浇注过程中，排气通道灌铁水从而堵塞排气，使得气体无法正常排出，进而增加了气孔缺陷的产生几率。改进后，如图 3 所示，使用 6mm 规格石棉垫，此时缸盖砂芯上夹层与上盖芯间

隙较小，封火效果良好，排气通道无铁水灌入。这一改进措施有效解决了因排气不畅导致的气孔问题。

经过改进后，验证了 5 个批次共 1500 台铸件，气孔导致的废品约 38 台，气孔废品率由 3% 降至 2.5%。

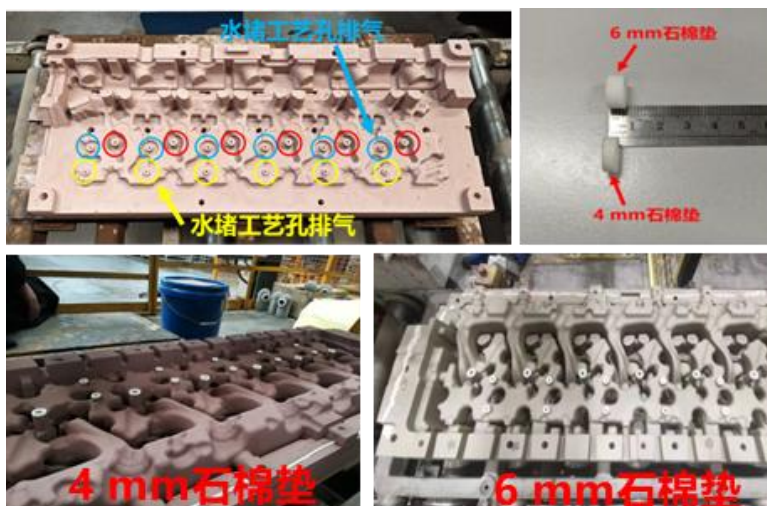


图 3 某系列缸盖石棉垫规格改进前后示意图

Fig.3 Comparison of the specifications of the asbestos gaskets of a certain series cylinder heads before and after the improvement

3.2 操作者把螺栓数量的优化

如图 4 所示，在原有的组芯工序中，采用 6 根

螺栓杆，缸盖砂芯存在把合不紧的情况，导致砂芯刚度不够。在铁液石墨化膨胀过程中，从缝隙中流出，使得铸件无法得到良好的自身补缩，进而容易产生较大缩陷等缺陷。经过改进，将螺栓杆数量增加至 8 根。增加螺栓杆数量后，缸盖砂芯的把合更

加紧密，砂芯刚度得到显著提高。在铁液石墨化膨胀时，铁液不易流出，有利于铸件实现自身补缩，有效减少了缩陷缺陷的发生。螺栓杆数量增加值 8 根后，验证了 6 个批次，共 1800 台铸件，缩陷废品为 33 台，缩陷率由 2% 降低至 1.8%。



改进前



改进后

图 4 某系列缸盖螺栓杆数量改进对比图

Fig.4 Comparison Diagram of the Quantity of Bolt Rods of a certain series Cylinder Heads before and after Improvement

3.3 铸件壁厚差异的处理

该系列缸盖采用平组立浇工艺，缸盖排气道侧为最后凝固部位，极易产生缩陷。为了降低缩陷缺陷的产生，对现场出现缩陷的缸盖进行了全面排查，结果发现缩陷大多集中分布在缸盖排气道侧的 2、4、6、8、10 等位置，如下图 5 所示。可看到铸件厚大截面的上表面的凹陷是由于转角凹部的“尖角效应”，

形成热节引起的，针对这一情况，在这些容易出现缩陷的底盘砂芯侧面钻孔，与砂型上箱补缩冒口连通。补缩冒口能够在铸件凝固过程中提供额外的补缩金属液，使铸件在凝固时得到充分的补缩，从而有效降低缩陷缺陷的产生。

实施自动钻孔处理后，验证了 5 个批次 1500 件铸件，缩陷率由 1.8% 降低至 1.3%，效果显著。

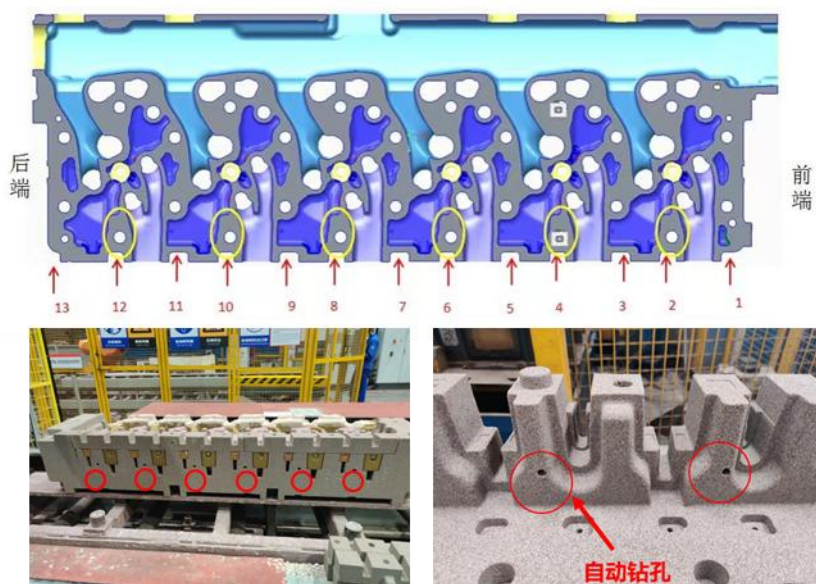


图 5 钻孔位置对应图

Fig.5 Corresponding Diagram of the Drilling Positions

3.4 选择最优的浇注温度、浇注时间、碳含量参数

依西韦茨定律，如果浇注温度过高，金属液中

的气体溶解度会增加，冷却时气体析出，易形成气孔。同时，过高的温度会使铸型中的水分蒸发加剧，产生大量水蒸气，若不能及时排出，也会侵入金属液形成气孔。相反，浇注温度过低，金属液流动性差，气体难以排出，同样会增加气孔形成的几率。

浇注时间过长，金属液与空气接触久，易卷入空气，铸型长时间受热，气体也易侵入。浇注时间过短，充型快产生紊流，金属液内压力不均，气体难排出。

铁水碳含量对灰铁铸件的凝固收缩倾向存在显著影响：凝固初期，过高的碳含量促使石墨化提前发生，阻碍液态金属的正常补缩通道，凝固结束后形成缩松；铁水碳含量过低会增大其凝固收缩倾向，

易使铸件出现缩松缺陷。

对于浇铸温度，浇注时间，碳含量三个因子实施 2^k 全阶乘 DOE 实验。

从等值线和曲面图可以看出，在碳含量为 3.34% 时，浇注时间处于低水平，浇注温度处于高水平，废品率最小。DOE 因子最佳值为浇注温度：1390-1410℃、浇注时间：25-35s、碳含量：3.28-3.40%。

在实施了上述所有改进措施后，统计了 2024 年 5 月至 10 月出产的该系列缸盖，其气孔及缩陷废品率平均值降至 1.52%，如图 7 所示。这一结果表明，通过对各个关键因素的针对性改进，有效地降低了某系列气缸盖的气孔和缩陷缺陷，提高了产品质量和生产效率，为企业带来了显著的经济效益。

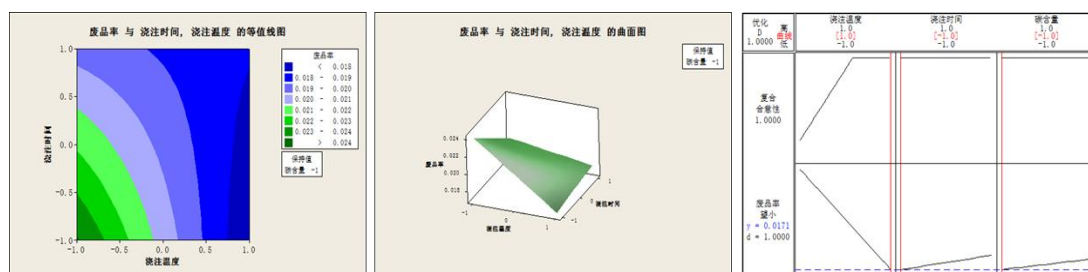


图 6 浇注温度、浇注时间、碳含量等值线和曲面图
Fig.6 Isoline and Surface Diagram of Pouring Temperature, Pouring Time and Carbon Content

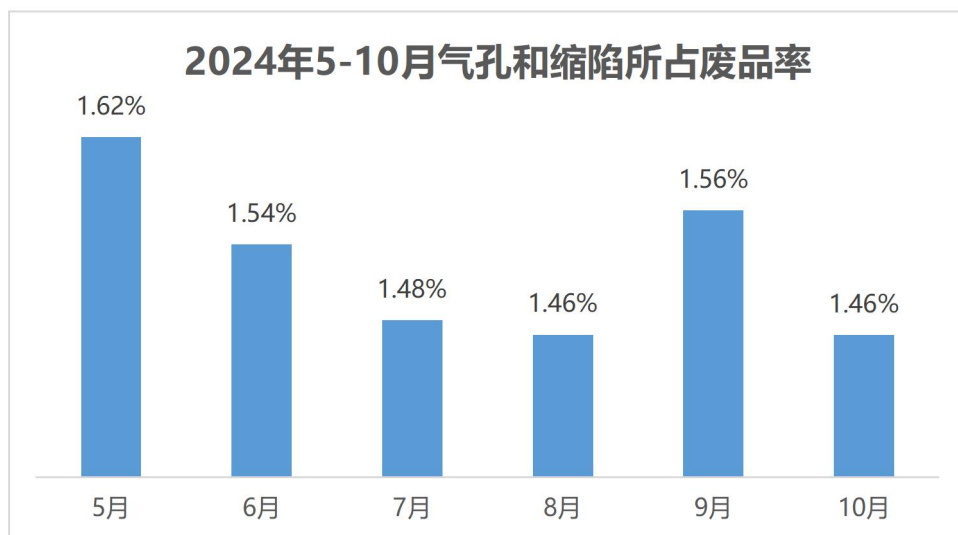


图 7 某系列联体缸盖 2024 年 5-10 月气孔和缩陷所占废品率

Fig.7 The scrap rates of porosity and shrinkage depression of a certain series of integrated cylinder heads from May to October 2024

4 结论

(1) 分析表明，排气冒口数量、铸件壁厚差异、操作者把螺栓数量、石棉垫规格、浇注温度、浇注时间、碳含量为影响笔者公司某系列立浇联体缸盖气孔与缩陷的关键因子。

(2) 灰铸铁立浇联体缸盖的浇注温度：1390-1410℃、浇注时间：25-35s、碳含量：3.28-3.40% 时，废品率最低。

(3) 工艺优化后，某系列立浇联体缸盖的气孔及缩陷废品率从原来的 5.0% 成功降至 1.52%。



参考文献:

- [1] 李克锐,李增利,崔宇,等.我国铸铁生产技术现状与发展趋势[J].铸造,2022,71(02):123-135.
- [2] 林在犁.发动机缸体铸铁件缺陷控制措施[J].铸造技术,2015,36(07):1900-1902+1906.
- [3] 林献辉,孙帆,孙长伟,等.柴油机灰铸铁铸件常见孔洞缺陷微观特征与形成机理[J].中国铸造装备与技术,2023,58(02):48-53.
- [4] 王新慧,刘云辉,廉贞松,等.气缸体铸造中气孔缺陷形成原因及去除措施[J].铸造设备与工艺,2024,(02):53-55.
- [5] 姜建光,厉运杰,孙志扬,等.气缸体铸件裂隙状气孔产生原因及对策[J].铸造设备与工艺,2021(06):55-57.
- [6] 毕海香,张敏之,于建忠,等.高牌号灰铸铁机体缩松缺陷探讨[J].铸造设备与工艺,2022,(04):41-42+62.
- [7] 王姗姗,程凯,靳宝,等.铸铁件缩松、缩孔、凹陷缺陷的原因分析与防止方法[J].金属加工(热加工),2019,(02):79-81.
- [8] 程凤军,罗广思,陈雷,等.高强度合金灰铸铁件缩松形成原因与防止措施[J].现代铸铁,2019,39(02):30-33.