

汽车发动机缸体内腔质量影响因素分析及工艺控制

李帅平¹, 杜利峰¹, 刘忠强¹, 孙继华¹, 马俊杰¹, 冯相灿¹, 张宏奎², 马林³

(1. 一汽铸造有限公司铸造一厂, 吉林长春 130011; 2. 一汽铸造有限公司铸造研究所, 吉林长春 130011; 3. 一汽铸造有限公司铸造模具设备厂, 吉林长春 130011)

摘要: 随着汽车轻量化发展, 发动机缸体壁厚要求越来越薄。针对水套内腔质量的影响因素进行了分析和工艺改善; 介绍了烧结陶瓷砂、纤维素和铬尖晶石用于硅砂制芯添加对砂芯高温和常温特性以及产品质量的影响; 指出涂料的热暴、热膨胀和烧结性对产品内腔质量影响以及涂料粉料的作用机理; 运用射砂模拟技术对砂芯致密性进行了分析和质量改善。

关键词: 汽车缸体; 水套内腔; 芯砂; 涂料; 射砂模拟

随着环保要求逐渐加严以及汽车轻量化发展, 对商用车发动机缸体壁厚要求越来越薄, 内腔质量要求越来越高^[1]。缸体水套内腔作为发动机冷却水循环位置, 其内腔质量对发动机散热效果起至关重要的作用。商用车缸体浇注铁液重量大、铁液温度高, 水腔结构复杂、容积大、壁薄, 缸体内腔经常出现脉纹、粘砂等缺陷, 这就对水套砂芯的热稳定性、成形性和表面质量等要求提高。随着国六发动机的上市, 国七发动机技术储备, 客户要求缸体内腔无脉纹和粘砂等缺陷。本文针对芯砂材料、涂料以及射砂模拟技术对汽车发动机缸体内腔质量的控制进行了介绍。

1 芯砂材料对缸体内腔质量的影响及改善措施

原砂是砂芯的主要骨架材料, 其性能特征对砂芯使用性能具有至关重要的影响; 原砂热膨胀率、热稳定性和比热容等高温性能指标直接影响到砂芯在金属液作用下的状态, 进而影响到铸件内腔质量。另外, 因砂芯结构复杂, 制芯过程中经常由于原砂流动性、密度、球形度等影响, 在砂芯薄壁处出现射不实和疏松问题, 导致产品内腔粘砂缺陷。

1.1 添加材料对缸体内腔质量的控制

硅砂由于价格和耐火度等优势经常用于铸造砂芯生产, 其主要成分为 SiO_2 , 在 $573\text{ }^\circ\text{C}$ 下发生晶型转变, 应用中产生砂芯开裂, 进而形成脉纹等缺陷。通过在硅砂中添加 $0.5\% \sim 0.7\%$ 挥发性纤维素和 35% 左右铬尖晶石材料, 用于 3 mm 薄壁六缸缸体水套冷芯制备, 生产产品对应内腔如图1所示, 无脉纹、粘砂等问题。除材料组成种类和对比对砂芯性能影响外, 其物理特征也至关重要; 首先根据合理镶嵌原则, 选择 $50/70/100$ 目三筛大于 80% , $30/40/50/70/100/140/200$ 目七筛分布的主材硅砂粒度, 为满足耐火度和砂芯常规性能需要, 要求 $\text{SiO}_2 \geq 91\%$, 碱金属 $\leq 3.6\%$; 按表1所示规范酸耗值、灼减、水分、含泥和电导率指标。铬尖晶石作为添加材料, 其粒度选择也会影响到砂芯强度, 同样基于合理镶嵌考虑, 选择 $40/50/70$ 目三筛大于 70% , $30/40/50/70/100$ 目五筛分布的粒度组成, 并要求 $\text{Cr}_2\text{O}_3 \geq 46\%$,

作者简介:

李帅平(1990-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事铸造材料的研究、开发应用及生产过程质量控制等工作。电话: 15590558372, E-mail: lishuaiping@faw.com.cn

中图分类号: TG221+.1

文献标识码: B

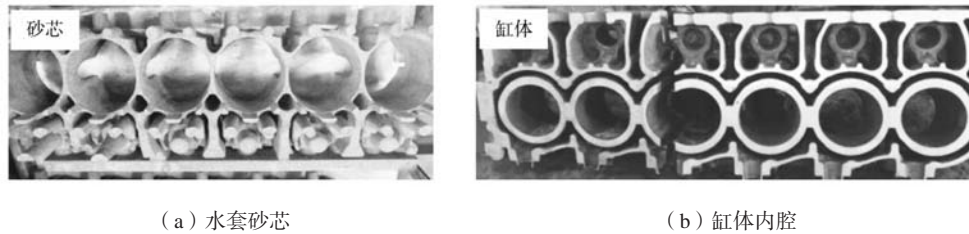
文章编号: 1001-4977(2024)04-0560-05

基金项目:

国家重点研发计划项目(2020YFB1710100)。

收稿日期:

2023-06-13 收到初稿,
2023-11-17 收到修订稿。



(a) 水套砂芯

(b) 缸体内腔

图1 薄壁六缸缸体内腔

Fig. 1 Inner cavity morphology of six cylinder body water sleeve

表1 硅砂和铬尖晶石性能指标

Table 1 Performance indexes of the silica sand and chrome spinel

材料种类	灼烧减量/%	酸耗值/mL	水分/%	含泥量/%	电导率/ $(\mu\text{s}\cdot\text{cm}^{-1})$	AFS
硅砂	≤ 0.3	≤ 5.0	≤ 0.25	≤ 0.2	≤ 100	49~53
铬尖晶石					-	

$\text{Fe}_2\text{O}_3 \leq 25\%$, $\text{SiO}_2 \leq 1.5\%$; 表1为硅砂和铬尖晶石的物理指标参数。

硅砂中添加的纤维素在高温下燃烧灰化产生的空隙可为砂粒膨胀提供空间,避免砂芯表面膨胀开裂渗入金属液形成脉纹等缺陷。铬尖晶石一方面可起到激冷作用,降低砂芯表面金属液流动性,减轻烧结倾向;另一方面在金属液作用下铬尖晶石发生固相烧结,使砂芯表面形成致密烧结层,避免金属液渗入^[2]。

1.2 烧结陶瓷砂对缸体内腔质量的控制

为降低砂芯的高温膨胀率,提高砂芯致密度,选择热膨胀率低、流动性好且耐高温的烧结陶瓷砂与硅砂原砂按质量比5:3混配使用;其中烧结陶瓷砂的物理和化学指标按表2中的项目和参数范围控制。用于

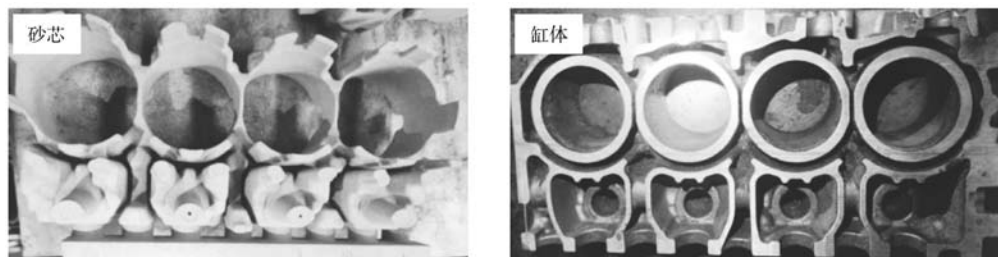
3 mm薄壁四缸缸体水套芯制备,对应砂芯和铸件内腔质量均满足生产要求,如图2所示;对应砂芯透气性较纯硅砂制芯高18.6%,更有利于气体排出。相比同样质量性能的宝珠砂砂芯,单位体积的芯砂材料成本降低约23.5%。

铸造烧结陶瓷砂以焦宝石矿物为原料,经过制粉、造粒、煅烧和级配步骤获得;主要物相为莫兰(来)石^[3],具有高温膨胀性低和耐火度高等一系列高温优势。通过造粒工艺控制所制备砂粒圆整度高,流动性及填充性好,制芯时易紧实,具有良好的透气性和致密性。另外,由于砂粒是通过粉状物造粒煅烧而成,并未经过熔融,内部存在较多孔隙,堆积密度与硅砂相近,在与硅砂混合中可避免成分偏析问题。

表2 烧结陶瓷砂性能指标

Table 2 Performance indexes of the sintered ceramic sand

物理指标	灼烧减量/%	水分/%	含泥量/%	酸耗值/mL	1000℃热膨胀率/%	耐火度/℃	角形系数	平均细度AFS
标准范围	≤ 0.2	≤ 0.25	≤ 0.1	≤ 5	≤ 0.2	≥ 1760	≤ 1.15	38~44



(a) 水套砂芯

(b) 缸体内腔

图2 薄壁四缸缸体内腔

Fig. 2 Inner cavity morphology of four cylinder body water sleeve

2 涂料对缸体内腔质量的影响及控制

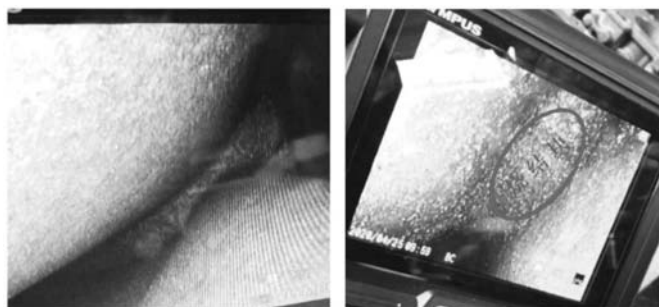
铸造生产中，金属液与型芯表面之间的界面会发生一系列物理和化学作用，经常会导致产品表面粘砂、脉纹和砂眼等缺陷，涂料的主要作用就是弥补型芯在金属液作用下的不足，减少或避免铸件表面缺陷^[4]。铸造涂料提升内腔光洁度的作用机理主要有：①选择耐火度和热化学稳定性高的细耐火骨料，封闭型芯表面孔隙，避免金属液渗入；②通过导热性好和耐火度高的粉料搭配，降低型芯表面金属液流动性；③选择隔热效果好和易烧结性粉料搭配，既可减轻型芯受热，又能形成致密的屏障。

A、B涂料分别用于薄壁缸体水套砂芯浸涂，控制相同涂层厚度，将烘干后砂芯在相同金属液和温度条件下进行浇注，图3为产品内腔质量对比，B涂料对应

产品内腔存在明显粘砂，A涂料对应产品内腔光洁。对两种涂料的高温性能指标进行检测，膨胀性检测设备为JT-SJZ-2型芯砂检测工作站，结果如表3所示，A涂料的热暴性优于B涂料，最大膨胀率小于B涂料。将两种涂料粉料在1 000 °C下保温5 min，B涂料粉料出现喷溅和炸裂情况，未能粘结到一起，而A涂料粉料由散状粘结在一起形成致密层，如图4所示。

表3 涂料高温性能检测结果
Table 3 High temperature performance test results of the coating

材料名称	热暴等级	1 000 °C热膨胀率/%
A涂料	I	1.605
B涂料	III	1.848

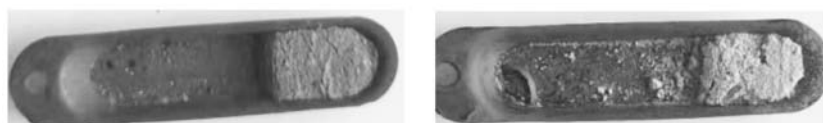


(a) A涂料

(b) B涂料

图3 不同涂料对应铸件质量

Fig. 3 Different coatings corresponding to the casting quality



(a) A涂料

(b) B涂料

图4 涂料粉料高温状态

Fig. 4 High temperature state of the coating powder

B涂料引起产品内腔粘砂问题，是由于其在金属液作用下涂层开裂，浇注过程中涂料被冲掉，未能发挥应有的隔离和屏蔽作用，导致铸件粘砂。A涂料粉料主要由叶腊石、高纯石墨和锂辉石组成；叶腊石粉在热作用过程中会逐步分解出熔融混合物，在试样表面形成有效的物理屏障，它也是一种可陶瓷化填料，高温下叶蜡石粉可促进涂层形成连续致密的炭层结构^[5]；石墨粉耐火度高、激冷能力强，不被金属液所润湿，且在浇注中产生的还原性气氛，有利于抗粘砂；锂辉石有较强的助熔作用，可提高涂层韧性，另外锂辉石热膨胀系数极低，甚至略呈负膨胀，可缓解涂料中其他

粉料的膨胀^[6]。B涂料粉料主要由高铝矾土粉、石英粉和少量石墨粉组成；高铝矾土粉的工艺控制对使用性能有较大影响，如在磨粉前未经过高温煅烧将其中水分彻底去除，浇注中易导致涂层开裂乃至剥落；且石英粉热膨胀系数大，在573 °C下急速膨胀，容易导致涂层开裂和剥落^[7]。

3 射砂模拟技术用于砂芯质量提升

除芯砂材料及涂料外，砂芯致密性对产品质量同样具有重要影响。砂芯制备过程是一个复杂的多相混

合的物理过程, 不仅涉及到气体和粒子流动, 还涉及到混合物在填充过程中的多种物理变化^[8]。芯砂在压缩空气作用下从芯盒射砂嘴高速喷出, 很短时间内要将整个型腔填满, 过程参数和芯盒设计是质量控制的关键。

通过射砂模拟分别对比不同射砂头高度、射砂压力对射砂速度和砂芯致密性的影响, 如表4所示, 射砂头高度500 mm的射砂速度较800 mm的更快, 对应砂芯密度也大; 射砂压力5 bar的射砂速度较3 bar的更快, 但对应砂芯密度略小。这是因为射砂头越高, 砂粒对气体的阻碍作用越明显, 导致气体穿过砂粒间隙到达射砂头底部的动能损失就越大, 进而降低砂粒从射砂

孔射入芯盒的初始速度; 但过大的射砂压力会影响砂粒的平稳充型, 如图5所示, 易产生卷气问题, 进而影响到砂芯的填充性和致密性。



图5 射砂过程状态

Fig. 5 State of the sand shooting process

表4 不同射砂参数对应射砂速度和砂芯密度
Table 4 Sand speed and sand core density of different sand shooting parameters

射砂参数	射砂头高 800 mm	射砂头高 500 mm	射砂压力 5 bar	射砂压力 3 bar
射砂速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	3.698	3.773	5.937	3.769
砂芯密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	1.446	1.452	1.434	1.445

针对目前2.5升4缸缸体油道芯疏松问题, 对砂芯进行模拟分析, 发现射砂充型过程中存在卷气现象, 砂芯疏松位置密度偏低。针对存在问题, 对芯盒进行改进, 改进后原疏松位置对应砂芯密度由 1.373 g/cm^3 增加至 1.436 g/cm^3 , 砂芯疏松问题得到解决, 如图6所示。



(a) 改进前射砂模拟

(b) 改进前砂芯实物

(c) 改进后射砂模拟

(d) 改进后砂芯实物

图6 模拟结果及砂芯质量对比

Fig. 6 Comparison of the simulation results and sand core quality

4 结论

(1) 硅砂中添加适量纤维素和铬尖晶石用于3 mm薄壁缸体水套冷芯的制备, 高温下可缓冲硅砂膨胀并具有适宜的烧结性, 对应产品内腔光洁。

(2) 烧结陶瓷砂具有低膨胀性、填充性好和低密度等特征, 与硅砂原砂按质量比5:3混配用于3 mm薄

壁水套冷芯生产, 满足内腔质量要求, 且砂芯透气性较纯硅砂的高18.6%。

(3) 影响铸造涂料使用效果的主要高温指标有热暴、热膨胀和烧结性, 粉料种类的选择和搭配是影响涂料高温性能的主要因素。

(4) 砂芯致密性对产品内腔质量有直接影响, 运用射砂模拟技术可提升砂芯质量。

参考文献:

- [1] 王瑞平, 邹卫, 万修根, 等. 铸铁缸体多品种全自动内腔喷丸工艺设计 [J]. 铸造, 2019, 68 (1): 75-78.
- [2] 李健. 铬铁矿砂在铸件生产中的应用 [J]. 金属加工 (热加工), 2016 (9): 6-7.
- [3] 张宏奎, 张玉林. 煅烧焦宝石砂作为铸造用砂的应用分析 [C]// 2019中国铸造活动周论文集, 中国机械工程学会铸造分会, 2019: 830-833.
- [4] 李远才. 铸造涂料及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 77-97.
- [5] 李依诺, 赵江平, 王亚超, 等. 叶蜡石改性膨胀型涂料阻燃性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (1): 323-331.
- [6] 宋述同, 章禄文, 马艳霞, 等. 防脉纹添加剂对砂芯性能的影响 [C]// 第十六届中国铸造协会年会暨第五届全国铸造行业创新发展论坛论文集, 中国铸造协会. 2020: 578-582.
- [7] 宋会宗. 铸造涂料的传热与传质 [C]// 2020中国铸造活动周论文集, 中国机械工程学会铸造分会. 2020: 333-337.
- [8] 张影. 覆膜砂射砂充型过程的实验和数值模拟研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

Analysis of Influencing Factors and Process Control of Inner Cavity Quality of Automobile Engine Cylinder Block

LI Shuai-ping¹, DU Li-feng¹, LIU Zhong-qiang¹, SUN Ji-hua¹, MA Jun-jie¹, FENG Xiang-can¹, ZHANG Hong-kui², MA Lin³

(1. No.1 Foundry, FAW Foundry Co., Ltd., Changchun 130011, Jilin, China; 2. Foundry Research Institute, FAW Foundry Co., Ltd., Changchun 130011, Jilin, China; 3. Foundry Mould& Tooling Plant, FAW Foundry Co., Ltd., Changchun 130011, Jilin, China)

Abstract:

With the development of automobile lightweight, the wall thickness requirement of engine inner cavity is getting smaller and smaller. The influencing factors of inner cavity quality were analyzed and the process was improved. The effects of adding sintered ceramic sand, cellulose and chromium spinel to silica sand core on the high temperature and normal temperature characteristics of sand core and product quality were introduced. The effects of thermal explosion, thermal expansion and sintering properties of the coating on the quality of the inner cavity and the mechanism of powder action were pointed out. The sand shooting simulation technology was used to analyze the density of the sand core and improve the quality of the inner cavity.

Key words:

automobile cylinder block; inner cavity; core sand; casting coatings; sand shot simulation