

# 汽车发动机缸盖湿型砂铸造工艺优化

王洪磊, 纪飞飞, 郑爱权

(苏州健雄职业技术学院 智能制造学院, 江苏太仓 215411)

**摘要:** 气缸盖是发动机的核心组成部分, 其结构复杂, 工作中要承受很大的机械负荷和热负荷。针对湿型砂成形工艺下缸盖生产过程中出现的内部砂眼、气孔和变形等主要问题, 通过改善缸盖的制芯、造型、配砂、浇注、烘芯、退火、清理等工序中的工艺, 改进缸盖外模结构和芯盒工装, 降低了缸盖的报废率, 为缸盖的成形工艺提供了技术参考。

**关键词:** 缸盖; 湿型砂; 铸造工艺

中小型发动机灰铸铁缸盖的结构复杂、工作环境恶劣, 表面质量要求严格。工艺人员要提高缸盖的尺寸精度, 减少缸盖的壁厚, 提高缸盖的强度, 这是一个很难的技术问题, 需要对缸盖铸件的铸造生产工艺进行多方面的论证<sup>[1-2]</sup>。

中小型发动机灰铸铁缸盖多采用砂型铸造, 常用的砂型铸造工艺有湿型砂和化学硬化砂型造型, 常用的制芯工艺有油砂芯和树脂砂芯, 树脂砂芯的制造方法分热芯盒法、覆膜砂工艺、冷芯盒法、温芯盒法和树脂自硬砂法。湿型砂造型工业具有造型材料成本低及生产效率高等优点, 欧美工业化国家中铸件总产量的40%~55%是用湿型砂工艺所生产。以覆膜砂为原料的热芯盒工艺生产的铸件表面光滑、尺寸精确, 日本在缸体缸盖生产中, 重要的型芯广泛采用覆膜砂热芯盒工艺<sup>[3]</sup>。在20世纪50年代, 一汽铸造厂就能独立生产发动机缸体和缸盖。目前, 全国能够独立生产缸体和缸盖的企业不少于100家。国内汽车行业发展很快, 目前国内汽车缸体和缸盖的生产主要采用湿型砂、树脂自硬砂和三乙胺冷芯成形工艺<sup>[4]</sup>。

## 作者简介:

王洪磊(1979-), 男, 讲师, 工程师, 硕士, 主要研究方向为产品成形工艺和模具设计与制造。E-mail: 18424242@qq.com

中图分类号: TG24

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2021)

07-0866-06

## 基金项目:

江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB520053); 太仓市基础研究计划(面上)项目(TC2020JC13); 校自然科学基金项目(2019QNZK008)。

## 收稿日期:

2021-01-20 收到初稿,

2021-03-16 收到修订稿。

## 1 铸件要求

公司要求缸盖年产量达到5万件/年, 现有自硬砂线生产线年产能3万件/年, 达不到企业要求, 故决定在湿型生产线上生产缸盖铸件, 考虑到该生产线造型机的生产率, 决定在金属模气冲造型机ZXJ100100设备上生产湿型砂的砂芯和型砂, 采用气冲压实; 在GSR2型射芯机上注射生产覆膜砂的砂芯, 采用气冲压实; 在Z8640B型射芯机上注射生产呋喃树脂砂的砂芯, 采用气冲压实。

### 1.1 缸盖结构要求

缸盖主要结构壁厚5 mm; 加工余量要求: 顶面控制在3.8 mm, 底面控制在4.8 mm, 其余加工面控制在3 mm; 起模斜度不能大于1°; 产品要做光滑圆角处理; 砂芯安装过程中的偏芯不大于1 mm; 合箱的错箱控制在1 mm内。缸盖尺寸精度控制在CT7~CT8级, 缸盖结构图如图1所示。

### 1.2 组织成分要求

缸盖材料为HT250, 缸盖组织结构以A型石墨为主, 石墨长度控制在3.5~4.5, 要求其基体以珠光体为主, 其组织成分不低于94%, 减少组织中游离碳化物的成分比例, 使其低于2%。

### 1.3 表面质量要求

缸盖分散小孔洞深度不超过壁厚的20%，缸盖的气道应无夹砂、粘砂、披缝、凸起及其他杂物，局部区域可以进行焊接工艺处理。铸件表面粗糙度 $Ra$ 低于 $25\mu\text{m}$ 。

### 1.4 工艺方案及分析

原工艺方案：型砂采用树脂自硬砂，进气道采用冷芯盒砂，水套采用低氮呋喃树脂砂，排气道采用覆膜砂，浇注位置是缸盖顶面朝下而底面朝上。

现工艺方案：型砂采用粘土、煤粉湿型砂，进气道采用覆膜砂，水套采用低氮呋喃树脂砂，排气道采用覆膜砂，考虑到湿型砂生产线无法粘结、固定砂芯，缸盖的浇注位置是缸盖顶面朝上而底面朝下。

## 2 试生产遇到的问题

按照湿型砂生产线试生产六缸缸盖，把试生产中表面合格的铸件送到加工单位进行加工，发现缸盖的内部出现砂眼、气孔和变形等缺陷，缸盖综合报废率高达25%。据统计，国内自硬砂线产缸盖综废在10%左右，湿型线产综合报废率在15%左右，国外自硬砂线产缸盖综废在5%左右，湿型线产综合报废率在6%~8%左右。所以公司缸盖生产自硬砂线更改为湿型砂线的工艺有待进一步优化，同时考虑到砂型的起模，需要对局部的铸件砂芯进行更改。分析缸盖的报废因素，缸盖的报废主要是三个方面的因素：内部结构报废、缸盖底部变形和裂纹、加工后的微孔缺陷。

### 2.1 内废高

缸盖结构复杂，属薄壁高强度件，缸盖生产中的芯砂种类和砂芯数量多，砂芯加热后会释放气体，加之湿型砂的发气速率和发气量远大于自硬砂，而透气性和强度又远不及自硬砂，缸盖在生产过程中，其内部产生砂眼、断芯、气孔和掉砂等缺陷，导致内废率高达15%。

### 2.2 变形量大、裂纹多

因特定的铸件结构，铸件底面收缩量大于顶面，造成铸件底面中间凹，两边翘，特别是第六缸处有一突变。此种情况不但湿型缸盖存在，自硬砂缸盖及巴西、美国进口缸盖也存在，而湿型缸盖因具体的冷却环境表现得尤为突出，这不但造成加工过程中定位不准、加工余量改变，易产生黑皮、水套泄漏，甚至影响缸盖的装配和整机的性能，而且因内应力大加工后易产生裂纹。

### 2.3 加工后底面微孔缺陷

小批量供货时，缸盖底面，特别是阀座附近，加工后常出现微孔缺陷，如图2中A处所示，缸盖底面加工后的微孔缺陷在电子显微镜下放大100倍可看到小凹坑，凹坑最大处长约 $100\mu\text{m}$ ，如图3所示，这些微孔缺陷造成缸盖批量报废。

## 3 针对砂眼、气孔的工艺改进

### 3.1 砂眼缺陷的工艺改进

#### 3.1.1 砂眼产生原因分析

(1) 缸盖外形复杂，局部小吊胎多，对湿型而言，脱模较困难，易造成掉砂、砂胎松动，从而产生砂眼缺陷。

(2) 铸型分型面处常因合箱造成砂胎边缘挤裂。

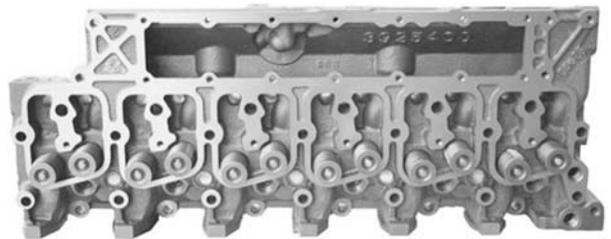


图1 缸盖结构图

Fig. 1 Structural drawing of cylinder head

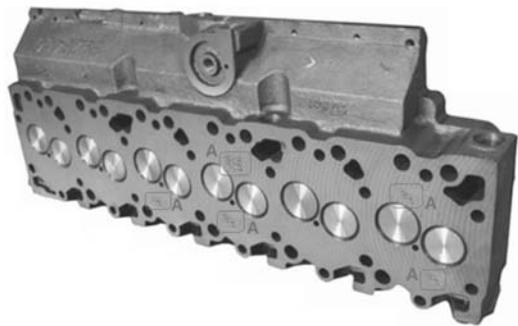


图2 缸盖底面微孔缺陷图

Fig. 2 Microporous defect of cylinder head bottom

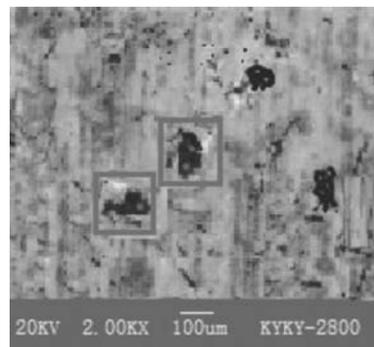


图3 微孔形貌

Fig. 3 Magnified microporous defect morphology

(3) 水套5个出砂孔芯头因较为细小, 打出的芯子该处往往不太规则, 修芯又不好控制, 造成合箱时对应的5处芯头处常有砂胎挤坏, 产生砂眼。

(4) 湿型缸盖采用正浇, 需采用芯撑来防止水套砂芯的上浮, 如图4中B处所示, 共有两排12个芯撑, 第一排、第二排对应的铸件壁厚分别为9 mm、10 mm, 而所用芯撑高度均为10 mm, 再加上水套芯涂料层的厚度, 最初水套芯上无任何窝座, 这样不但因芯撑高造成挤箱, 而且下芯撑很大的盲目性造成因位置不准而挤箱、断芯。

### 3.1.2 工艺改进

(1) 将缸盖外模凹进太深部分填高, 共有22处, 很大程度上解决了起型困难问题。

(2) 通过结构分析, 对局部易产生砂眼部位的对分型面增贴了厚0.8~1.2 mm、宽5 mm的防压环, 分散性的砂眼有大幅下降。

(3) 设计了专用修芯检具, 修芯既方便又实用, 既减少了因修芯不良而产生的砂眼, 又给造型处在对应处下封火石棉圈带来方便。

(4) 在水套芯芯撑的对应部位加窝座, 第一排处做出了深1.5 mm的窝座, 在第二排处做出了深0.6 mm的窝座, 但由于水套变形, 芯撑处常有挤箱、水套芯被压断等废品出现, 经过统计, 发现第一缸断芯、挤箱比例明显高于其他部位且所有芯撑均有突出缸盖顶面现象, 于是将第一缸的两窝座加至1.8 mm和0.8 mm, 其他窝座则分别加至1.7 mm和0.7 mm, 因芯撑而引起的断芯、挤箱问题基本得到解决, 通过对铸件解剖划检, 铸件壁厚也满足图纸要求。

## 3.2 气孔缺陷的工艺改进

### 3.2.1 铸件气孔产生的原因分析

(1) 产生裹挟气孔: 主要是浇注过程中, 金属液体冲击缸盖液面将空气带入, 生成的气泡。

(2) 产生侵入气孔: 各种砂芯和型砂产生的气体排不出去。

(3) 产生内反应式气孔: 金属液体本身和溶解于其的化合物及化合物之间反应产生气体。

(4) 外生式反应气孔: 金属液与砂型、砂芯等反应产生气体。

(5) 产生析出气孔: 氢、氮等气体溶入金属液, 随着温度降低, 其溶解度降低, 便以分子形态析出。

### 3.2.2 工艺改进

(1) 控制型砂。湿型砂的含水量、发气量、发气速度、透气性是影响气孔的重要因素, 但一味降低含水量、发气量、发气速度, 提高透气性又会使型砂强度大大降低, 使砂眼废品率升高<sup>[5]</sup>。在气候相仿和其他工艺控制没有改变的情况下, 分析原定的成形工艺参数要求, 控制型砂的水分、紧实率、湿压强度、苏打水浓度、粘度、煤粉、发气量和含泥量, 取规定的下限值, 控制透气性为上限值, 通过一个班次的生产, 发现气孔很低; 在此研究基础上, 调整原定工艺参数取中间参数, 经过一个班次的生产, 发现气孔适当增加; 当调整透气性为下限, 其他参数为上限时, 经过一个班次的生产, 气孔明显增加。

由表1所示可知, 控制气孔, 关键要控制住型砂参数中的水分、湿压强度、粘土含量、含泥量和透气性, 湿压强度和含泥量按原工艺的中下限控制, 水分

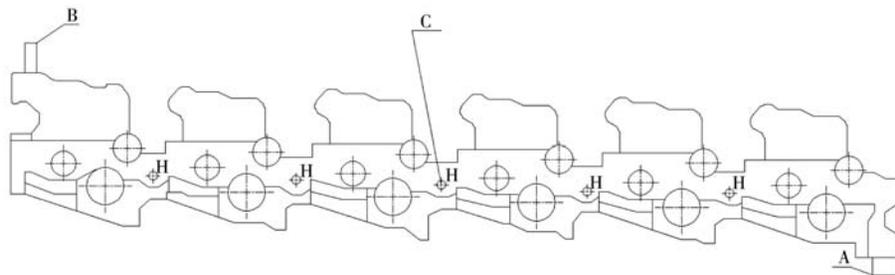


图4 缸盖水套芯

Fig. 4 Cylinder head water jacket core

表1 型砂参数优化

Table 1 Optimization of molding sand parameters

类别	水分/%	紧实率/%	透气性	湿压强度/MPa	苏打水浓度/%	粘土/%	煤粉/%	发气量/(mL·g <sup>-1</sup> )	含泥量/%
原定工艺	3.8~4.1	34~40	120~150	0.12~0.17	0.8~1.2	7.5~9	4~7	15~20	11~15
气孔很低	3.85	34.5	145	0.13	0.85	7.7	4.5	16.0	12.5
气孔较低	3.95	36.5	135	0.145	1.00	8.2	5.5	17.0	13.5
气孔异常班次	4.05	39.5	125	0.16	1.15	8.8	6.5	19.0	14.5

和粘土含量应尽量往下控制,透气性适当往上控制。

(2) 优化烘芯工序。该件需用进气道芯(冷芯砂)、水套芯(热芯砂)各一个,排气道芯(壳芯砂)六个,外加一个压块芯(壳芯砂),砂芯本身的发气量就较大,均大于12 mL/g,再者进气道芯、水套芯要浸涂FOSECO水基涂料,涂料后如烘不干,使砂芯发气量大大上升,造成铸件分散性大气孔。科技人员一般通过烘芯工序后的砂芯外观、气孔发生率、断芯发生率来判断烘芯工序的质量,而影响烘芯工序的主要因素为烘芯温度、烘芯时间和随炉冷却时间<sup>[6]</sup>,因此解决烘芯的主要问题,需要通过试验方式优化烘芯参数。

由表2和表3两种砂芯的烘芯工艺控制及对气孔影响效果的比较可知,两种砂芯烘芯工艺的方案三都比较理想。分析原因:方案四温度控制较低,达不到砂芯烘干的温度;方案二虽然烘干温度合适,但烘芯炉无通风循环设施,砂芯在炉内一直保温,使烘芯炉内达到一定湿度以后,砂芯内水分很难继续挥发;原方案除了烘芯时间恒定外还有烘芯温度太高,导致部分砂芯被烘糊,气孔发生率和断芯发生率也保持很高的概率。而方案三则较好地解决了其他几种方案的不

足。按方案三对烘芯控制了一段时间后,气孔下降明显且较为稳定,随之采用了该烘芯工艺。

(3) 改进砂芯排气孔。为保证进气道、水套芯的排气畅通,在砂芯厚大部分设计排气孔,具体如下。

(a) 进气道芯增设排气孔。在方芯头顶部向6个进气道方向的厚大部分斜45度设计4个 $\Phi 6$  mm深40 mm左右的排气孔,并划深5 mm、宽6 mm左右的槽连通4个排气孔,具体部位见图5所示。为保证其与外模对应处的位置相对应,配合方芯头尺寸设计修芯卡板,便于修整砂芯。

(b) 水套芯增设排气孔。在水套芯的芯头处设计排气孔,具体部分如图4所示:在水套芯前端 $\Phi 44.4$  mm芯头处(图1中A处)钻 $\Phi 6$  mm深30 mm左右的孔,在水套芯后端 $\Phi 18$ 芯头处(图4中B处)钻 $\Phi 3$  mm深20 mm左右的孔,在水套芯5个出砂孔芯头处(图4中C处)钻 $\Phi 3$  mm深40 mm左右的孔,钻孔位置与后面提到的扎针位置相对应。

(4) 砂芯采用封火气孔。在图6中A处挤封火泥条,C处下石棉封火圈,以保证排气畅通。封火后从浇注后的上箱扎针孔对应处的火苗看,排气得到了明显改善,铸件的气孔也有较明显下降。

表2 进气道芯烘芯参数优化  
Table 2 Optimization of drying parameters of inlet core

方案	烘芯温度/℃	烘芯时间/min	随炉冷却时间/min	烘芯后砂芯外观	气孔发生率	断芯发生率
原工艺	160~170	90	45~50	常烘糊	高	较高
方案二	150~160	90	45~50	无烘糊	高	较高
方案三	150~160	60/30	45~50	无烘糊	低	低
方案四	140~150	60/30	45~50	无烘糊	高	较高

表3 水套芯烘芯参数优化  
Table 3 Optimization of drying parameters of water jacket core

方案	烘芯温度/℃	烘芯时间/min	随炉冷却时间/min	烘芯后砂芯外观	气孔发生率	断芯发生率
原工艺	170~180	120	45~50	常烘糊	高	较高
方案二	160~170	120	45~50	无烘糊	高	较高
方案三	160~170	80/40	45~50	无烘糊	低	低
方案四	150~160	80/40	45~50	无烘糊	高	较高

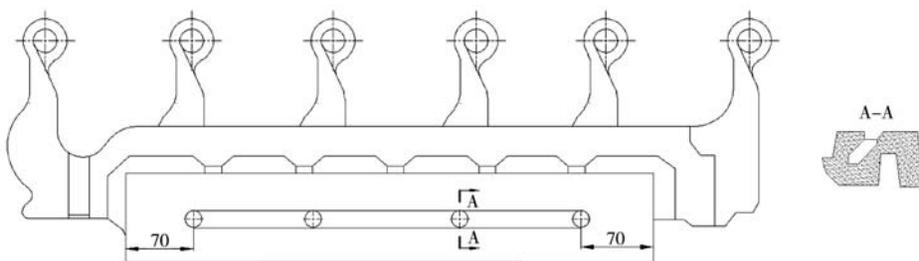


图5 进气道芯排气孔布置  
Fig. 5 Layout of inlet core vent

(5) 扎针板布置。布置扎针时要考虑多方面的因素,如加强芯头处的排气、均匀分配气孔位置、远离浇口杯位置、保持排气畅通的情况下尽量减少扎针。为了使砂胎达到良好的排气效果,先是在外模布置了44根预扎针,然后再借用曲轴的扎针板布置了扎针,通过试生产的情况分析,最后确定了如图7所示外模相对应的扎针布置方案:A处为 $\Phi 8$  mm共12根,B处为 $\Phi 6$  mm共17根,每型共29根,这样布置,砂胎扎坏、掀顶的很少,排气效果也很好。

## 4 针对缸盖变形量大、裂纹多的工艺改进

### 4.1 落砂、退火控制

(1) 先浇先落,避免因落砂过早造成落砂温度过高。

(2) 为了减小缸盖落砂后冷却阶段的变形,落砂处缸盖按照要求进行规则平放,确保大的平面在下,小平面在上。

(3) 退火工艺控制的好坏对缸盖的变形有直接影响。首先是退火时缸盖的摆放方式,通过对缸盖顶面朝上和顶面朝下退火后的变形量的对比分析,我们发现顶面朝上比顶面朝下的变形量小0.2~0.5 mm,故采用顶面朝上平放退火。退火时缸盖的入炉和出炉温度对缸盖的变形和内应力的消除起关键作用,退火工艺中在确定装炉温度和出炉温度外,还要确定缸盖的保温温度、保温时间、升温速度和降温速度<sup>[7]</sup>。结合研发缸盖的材料、形状和尺寸,参考公司以前缸体和缸盖的退火工艺对本缸盖的去应力退火工艺进行修正,图8为缸盖去应力退火工艺曲线。通过3个批次的试生产,确定缸盖的去应力退火最优工艺为:入炉温度在240℃,入炉后的升温速度80℃/h,保温温度为630℃,保温时间为6.5 h,保温后的降温速度为35℃/h,降到220℃出炉空冷。缸盖的入炉和出炉温度均应低于250℃,特别是出炉温度如果太高,则空气对其产生激冷作用,这不但使变形量增大,且内应力又会重新产生,相应的外加工过程中乃至装机后顶面薄壁及底面阀座处易产生裂纹<sup>[8]</sup>。

### 4.2 工艺修正

因变形量大,缸盖两端顶面、底面加工余量改变,顶面加工余量减小,底面加工余量增大,同时缸盖长度方向螺栓孔位置度改变<sup>[9]</sup>。余量增大处造成打刀,且加工后壁厚偏薄,易产生裂纹、水套泄漏、进气阀座高频淬火淬化等缺陷;余量减小处易产生加工黑皮,影响缸盖装配。为解决余量改变问题,采取了如下措施。

(1) 对外模,余量减小处作了修正,余量增大处作了修正。

(2) 参照进口缸盖加工后的壁厚,对水套加工后水套壁薄处芯盒对应部位进行了补贴,对第一、第五进气阀座定位凸台对应的芯盒部位进行了工艺修正,使铸件的定位点深度尺寸往下限靠以解决第一、第六进气阀座因加工余量大而造成高频淬火淬化的问题。

通过改善落砂和浇注的方式,缸盖冷却后的摆放方式,缸盖的退火工艺,缸盖毛坯的变形量在很大程度上得到改善,缸盖毛坯的裂纹缺陷基本得到控制;通过优化加工余量,缸盖在加工时的裂纹缺陷基本得到控制。

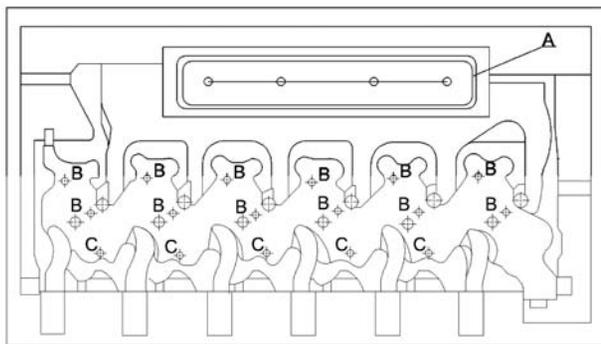


图6 砂芯封火排气孔布置

Fig. 6 Layout of vent for sand core sealing

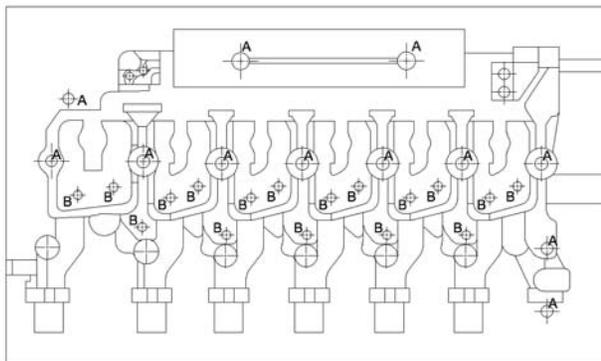


图7 扎针排布图

Fig. 7 Needle layout

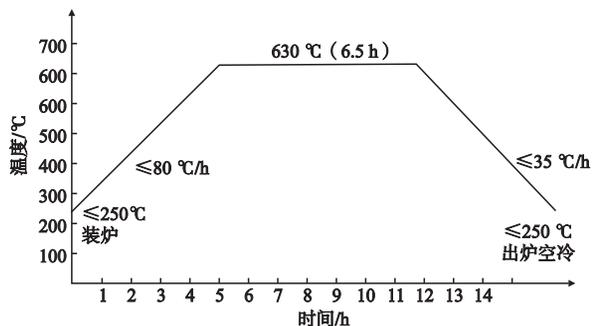


图8 缸盖退火工艺曲线

Fig. 8 Annealing process curve of cylinder head

## 5 针对加工后底面微孔缺陷的工艺改进

小批量供货时,缸盖底面特别是阀座附近,加工后常出现微孔缺陷,因此造成批量外废。通过解剖、分析金相,认定是碲粉涂料所致,随后采取了以下几个措施:①排气道砂芯涂料由碲粉涂料改为FOSECO涂料;②改进碲粉涂料的性能;③严格控制水套砂芯碲粉涂料的涂刷质量;④对水套砂芯,下芯后用风管进行吹型。通过以上控制,基本杜绝了微孔缺陷的发生。

### 参考文献:

- [1] 宋昌庆. 大缸径双火花塞天然气发动机缸内燃烧特性研究 [D]. 吉林大学, 2019.
- [2] 杨莹凤. GEVO16型柴油机动力组气缸盖压装机的改进设计研究 [D]. 上海交通大学, 2017.
- [3] 第十届中国铸造质量标准论坛部分报告回顾 [J]. 铸造, 2017, 66 (8): 898-903.
- [4] 王洪磊. 汽车缸体铸件铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2015 (7): 694-698.
- [5] 张进, 周恒湘. 用呋喃树脂砂生产大型铸铁件的工艺分析与质量控制 [J]. 铸造, 2009, 58 (12): 1260-1263.
- [6] 李梅. 降低康明斯6BT缸盖湿砂型铸造废品率 [J]. 铸造技术, 2005 (6): 530-531.
- [7] 李卡, 李红秀, 张红英. 柴油机缸体铸件去应力退火工艺实验 [J]. 铸造, 2016, 65 (6): 559-562.
- [8] 乔英杰. 工程材料 [M]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学出版社, 2011.
- [9] 谢庆. Z170柴油机机体加工工艺优化与实施 [D]. 山东大学, 2019.

## 6 结束语

通过分析湿型砂成形工艺下汽车缸盖的铸造工艺,解决了缸盖生产过程中出现的内废高、变形量大、裂纹多、加工后出现微孔缺陷,提出了湿型砂成形工艺下生产缸盖的铸造工艺方案,使湿型砂成形工艺下汽车缸盖的报废率由原来的25%降低到10%左右,降低了企业的生产成本,为以后的继续开发积累了丰富的铸造工艺经验。

---

# Optimization of Green Sand Casting Process for Automobile Engine Cylinder Head

WANG Hong-lei, JI Fei-fei, ZHENG Ai-quan

(Institute of Intelligent Manufacturing, Suzhou Chien-Shiung Institute of Technology, Taicang 215411, Jiangsu, China)

### Abstract:

Cylinder head is the core part of the engine. Its structure is complex. It has to bear a lot of mechanical load and thermal load. In the production process of cylinder head under the green sand forming process, some defects such as sand holes, air holes and deformation were found. By improving the processes of core making, molding, sand mixing, pouring, core drying, annealing, cleaning, etc, and by ameliorating the outer pattern structure and core box tooling of cylinder head, the scrap rate of cylinder head castings was reduced. This study will provide a technical reference for the casting production of cylinder head.

### Key words:

cylinder head; green sand; casting process