

QT700-3 球墨铸铁凸轮轴壳型铸造工艺研究

陈忠士¹, 邹泽昌¹, 蓝敏俐¹, 杨启明²

(1. 福建船政交通职业学院, 福建福州 350007; 2. 江西同欣机械制造有限公司, 江西广丰 334600)

摘要: 利用铸造CAE数值模拟, 合理设计了高强度、高韧性球墨铸铁的壳型铸造工艺, 实现了QT700-3球铁凸轮轴的壳型铸造。结果表明: 采用一型两件与半封闭式浇注系统, 粗段基轴处壳型厚度为14 mm, 其余部位为18 mm, 可最大限度地避免和克服凸轮轴中心轴线位置的缩孔和缩松; 通过提高铜的加入量和加强球化和孕育处理, 可有效地保证QT700-3球铁凸轮轴的力学性能与金相组织。

关键词: QT700-3; 壳型铸造; 组织; 性能

球墨铸铁凸轮轴以其优良的性能和低廉的价格早已成为各大凸轮轴生产厂家和汽车主机厂共同关注的焦点。但是球墨铸铁呈“粥状凝固”, 决定了凸轮轴沿轴线中心部位容易出现缩孔、缩松等缺陷, 影响了凸轮轴的使用性能^[1]。采用高刚度的铁型覆砂铸造被认为是球铁凸轮轴的最佳生产工艺。但铁型覆砂铸造的铁型用量大, 不同型号的凸轮轴铁型无法互换, 一次性投资成本高, 且铁型在高温交变作用下容易出现变形。江西同欣机械制造有限公司在成功应用铁型覆砂生产工艺的基础上, 开展球铁凸轮轴壳型铸造工艺的研究, 旨在进一步扩大球铁凸轮轴的生产工艺方法, 避免采用铁型覆砂工艺因铁型变形报废而带来的成本投入。本试验用球铁凸轮的材质为QT700-3, 技术要求为: 抗拉强度 ≥ 700 MPa, 伸长率 $\geq 3\%$; 金相组织要求球化率 $\geq 95\%$, 石墨球数 ≥ 150 个/ mm^2 , 石墨大小分级为5-7级; 珠光体量 $\geq 80\%$, 铁素体量 $\leq 15\%$ 、渗碳体量 $\leq 5\%$ 。

1 试验方案与方法

1.1 试样制备与测试方法

浇注单铸Y形试块, 试块与拉伸试棒的形状尺寸如图1和图2所示, 金相试样直接从凸轮轴本体中取样。拉伸试验采用WEW型30吨拉伸试验机, 拉伸试样为圆柱状, 试验要求按GB/T 228的规定执行, 评定标准依据GB/T 1348—2009《球墨铸铁件》标准执行; 金相检验采用C2030A型金相显微镜, 金相检验依据GB/T9441—2009《球墨铸铁金相检验》标准执行, 抛光状态下检查石墨球直径, 选择有代表性的三个视场, 求其平均值作为石墨球的直径, 进行石墨球大小评级。

作者简介:

陈忠士(1966-), 男, 教授, 高级工程师, 主要研究方向为高强韧性球铁的研制与开发。E-mail: 397273769@qq.com

通讯作者:

邹泽昌, 男, 副教授。电话: 0591-83512845, E-mail: 891037036@qq.com

中图分类号: TG255

文献标识码: B

文章编号: 1001-4977(2022)

03-0367-05

收稿日期:

2021-08-12 收到初稿,

2021-09-12 收到修订稿。

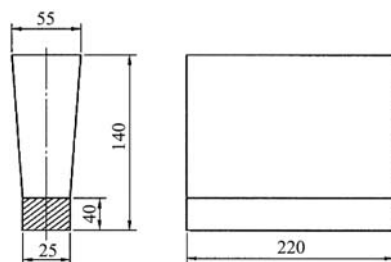


图1 Y形单铸试块

Fig. 1 Schematic of the Y-shaped sample

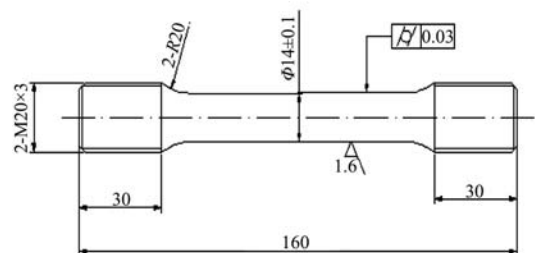


图2 拉伸试样的形状与尺寸

Fig. 2 Schematic of the tensile specimen

1.2 铸造工艺设计与壳型制备

1.2.1 壳型中铸件数量的确定

图3为试验时壳型中的铸件布局与壳型檢視图。试验用凸轮轴长度为376 mm，凸轮轴大端直径为 $\Phi 46$ mm，基轴直径为 $\Phi 22$ mm。为了保证凸轮轴性能的一致性，壳型中铸件数量为一型两件，采用阻流截面为内浇道、横浇道截面面积最大的半封闭式浇注系统^[2]，内浇道在凸轮轴大端头，冒口开设在横浇道上，在每根轴腔末端设置排气、集渣冒口。

1.2.2 FLOW-3D CAST铸造CAE数值模拟

采用六面体网格单元，将一型二件的铸件分为两个网格块：铸型网格和浇注口网格。网格单元尺寸为1.5 mm，网格总数约430万。通过网格检测的铸型和铸件可以看出，网格划分的铸件结构完整，从浇道到冒口及铸件不存在未连通的问题。主要模拟参数设置为：

(1) 铸件材料物性参数：铸件材质为QT700（软

件数据库自带），密度： 6.459 g/cm^3 （液态）， 7.240 g/cm^3 （固态），比热： $780 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ ，热导率： $38 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ，浇注温度： $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

(2) 铸型材料物性参数：铸型材质为覆膜砂，密度 \times 比热： $1.7 \times 10^6 \text{ J/(m}^3 \cdot \text{ }^\circ\text{C)}$ ；热导率： $0.6 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ ，初始温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

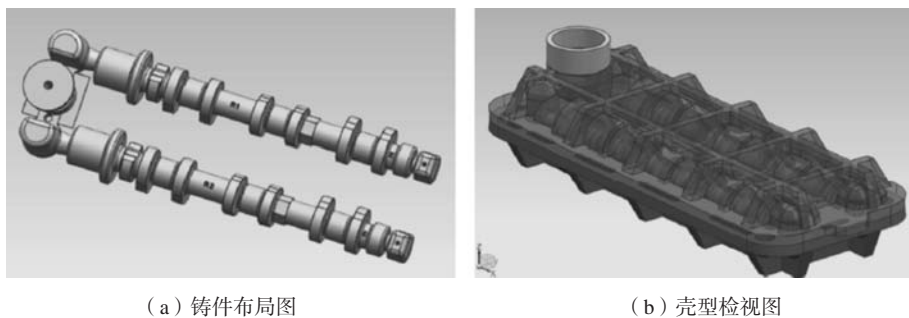
(3) 边界条件：金属液与铸型的对流换热系数： $1000 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ ，金属液与空气： $300 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ 。

其数值模拟结果如下：

(a) 卷气与表面缺陷。图4为铁液充填结束时的铸件缺陷分布。可以看出，铸件的末端表面有轻微卷气和氧化夹杂物聚集，铸件心部情况良好。

(b) 模拟结果。从凸轮轴铸件固相形成过程的模拟中可以看出，凝固过程从表面到中心依次凝固，但在凝固后期出现铸件厚壁处形成孤立的液相，与冒口的连接通道中断，在凸轮轴粗段基轴内产生缩孔（图5）。

综合以上模拟结果，为避免充型过程中产生卷气



(a) 铸件布局图

(b) 壳型检视图

图3 铸件布局与壳型结构检视图

Fig. 3 Views of the casting layout and shell structure

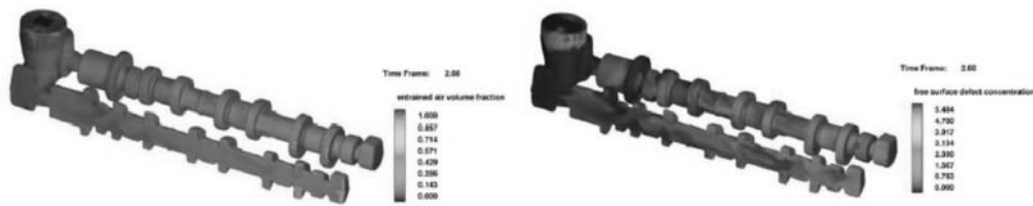


图4 充填结束时的铸件缺陷分布

Fig. 4 Distribution of the casting defects at the end of the filling

和夹渣，应在壳型凸轮末端设置排气孔与集渣槽；凸轮轴粗段基轴上出现的缩孔和缩松缺陷，其原因为这些部位的冷却速度缓慢，凝固后期与冒口连接的补缩通道被隔断，凝固时无法得到及时补缩所致。为了避免缩孔和缩松缺陷，可减小相应部位的壳型厚度或喷涂，这可改善传热的涂料，以提高冷却速度。

1.2.3 壳型制备工艺

壳型制备工艺设计应综合考虑铸件材质、结构形



图5 凝固后缩孔位置分布

Fig. 5 Position distribution of the shrinkage after solidification

状、浇注系统设计和铸造CAE数值模拟结果等多方面因素，合理选用覆膜砂并确定壳型厚度^[3]。

(1) 覆膜砂性能。壳型腔砂层与高温金属液直接接触，因此，覆膜砂强度、发气量等性能对铸件质量有着很大影响^[4]，本试验用覆膜砂性能值见表1。

(2) 壳型厚度与制备工艺。模拟结果显示，在凸轮轴粗段基轴中心线上，容易出现缩孔和缩松缺陷。一般壳型铸造用壳型厚度在18~22 mm，为了增大粗段部位的冷却速度，设计时将有针对性地减小相应部位的壳型厚度，粗段基轴位置的厚度设计为14 mm，其余部位为18 mm。模拟结果显示，在此厚度条件下凸轮轴粗段基轴中心线上无缩孔和缩松缺陷存在。壳型生产的具体参数如表2所示。

1.3 熔炼与浇注工艺

(1) 主要原材料。以低Mn优质碳钢为主要原材料，选用低S、低N的石墨型增碳剂来调节碳量。

(2) 化学成分设计。本试验用球铁凸轮材质为QT700-3，该牌号球铁的基体组织以珠光体为主，并具备一定的铁素体量。因此，化学成分设计应综合考虑碳当量、合金元素以及铸型的冷却条件等各方面的影响因素，使凸轮轴铸件中的珠光体和铁素体具有恰当

的比例关系，从而保证凸轮轴在具有高强度的同时，具有较高的断后伸长率。表3为试验时化学成分的控制范围。

(3) 球化与孕育处理。采用中频感应电炉熔炼，出铁液量为500 kg，球化处理温度控制在1 520~1 560 ℃，采用传统的冲入法球化，球化剂为稀土镁硅铁，用量为1.3%~1.5%；孕育剂为硅-钙-钡合金，加入量1.0%~1.3%，分3次孕育：即包内孕育（40%孕育剂）、炉前随流孕育（出铁液时将孕育剂均匀地撒在铁液流上，占50%孕育剂）和浇注随流孕育（10%孕育剂）；浇注温度控制在1 380~1 420 ℃。

2 试验结果与分析

2.1 球铁凸轮轴壳型铸造的金相组织特征

2.1.1 石墨大小与分布

图6是壳型铸造QT700-3球铁凸轮轴的凸轮与基轴的石墨球大小与分布图。凸轮部位（图6a）的球化等级为2-1级，石墨数量在656个/mm²左右，石墨大小为6-7级；而基轴部位（图6b）的球化等级为2-1级，石墨数量在300个/mm²左右，石墨大小为5-7级。凸轮部位的石墨数量高于基轴部位，这是因为凸轮壁厚小，冷却速度快，过冷度大，易于石墨形核质点产生的缘故^[5]。整体来看，凸轮与基轴的石墨球数多，细小、圆整、且分布均匀，符合QT700-3技术要求中的金相组织规定。

2.1.2 基体组织

图7为相同位置的凸轮与基轴的基体组织。可以看出，凸轮与基轴的珠光体量和铁素量均符合QT700-3

表1 覆膜砂性能
Table 1 Performances of the precoated sand

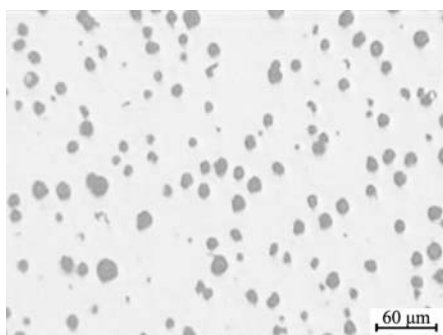
粒度	常温抗拉 强度/MPa	热抗拉强 度/MPa	常温抗弯 强度/MPa	发气量850 ℃ /(mL·g ⁻¹)
70/140	5.0	≥2.5	≥10	≤16.5

表2 壳型制备工艺参数
Table 2 Preparation process parameters of the shell mold

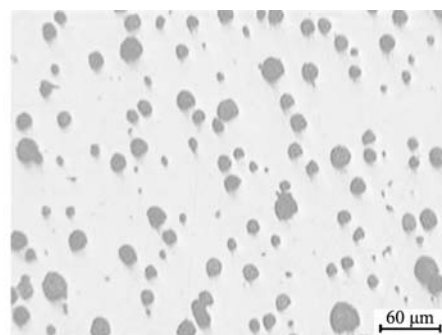
射砂压 力/MPa	射砂 时间/s	排气 时间/s	固化 温度/℃	固化 时间/s
0.06	4	6	190~210	100~120

表3 QT700-3的化学成分
Table 3 Chemical composition of the QT700-3 w_B/%

C	Si	P	S	Mn	Cu
3.7~3.9	2.2~2.6	≤0.06	≤0.05	0.5~0.7	0.8~0.9



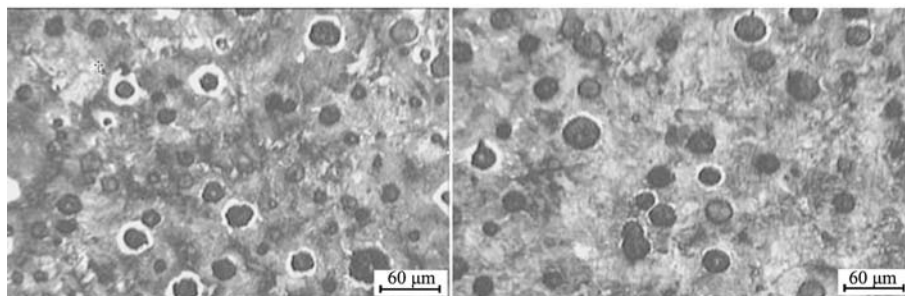
(a) 凸轮



(b) 基轴

图6 壳型铸造QT700-3球铁凸轮轴的石墨形态与分布

Fig. 6 Morphology and distribution of the graphite of the shell casting ductile iron QT700-3



(a) 凸轮

(b) 基轴

图7 壳型铸造QT700-3球铁凸轮轴的基体组织

Fig. 7 Matrix microstructure of the shell casting qt700-3 ductile iron camshaft

表4 QT700-3壳型铸造条件下的组织与力学性能

Table 4 Microstructure and mechanical properties of the shell mold casting QT700-3

试样编号	抗拉强度/MPa	伸长率/%	球光体/%	铁素体/%	渗碳体/%	石墨球数/(个·mm ²)	石墨大小等级	球化率/%
1	750	3.1	90	10	0	528	6~7	95
2	715	3.2	90	10	0	687	6~7	95
3	720	3.4	85	10	0	752	6~7	95
4	735	3.3	85	10	0	670	6~7	95
5	795	3.2	95	5	0	425	5~7	95
6	813	3.15	95	5	0	455	5~7	95

的技术要求,无自由渗碳体和磷共晶存在。但是,凸轮的珠光体量(85%左右)低于基轴的珠光体量(约95%),而铁素体量(约15%)高于基轴的铁素体量(5%)。这是因为:凸轮部位的石墨数量多,在一次结晶时,随着石墨球的生长,周围铁液发生贫碳,逐渐形成一个环绕石墨球的奥氏体外壳,在二次结晶时,转变为铁素体组织。一次结晶时所形成的石墨球数越多,铁素体量也越多。而在奥氏体的晶界处,由于硅、锰、磷等元素的偏析,即使在缓慢的冷却条件下也会转变为珠光体^[6]。

2.2 球铁凸轮轴壳型铸造的力学性能

表4为QT700-3壳型铸造条件下测得的抗拉强度、断后伸长率、珠光体、铁素体、石墨球数、石墨大小等级。试验时,拉伸试棒为单铸试块,金相取样位置为与单铸试块同一包铁液浇注的凸轮轴的第一个凸轮。

试验结果表明,采用壳型铸造时,抗拉强度大于700 MPa,伸长率大于3%;金相组织中,石墨大小等级为5-7级,石墨球数超出150个/mm²,珠光体量在85%~95%,铁素体量在5%~10%,无自由渗碳体和磷共晶存在,完全符合QT700-3球铁凸轮轴的技术要求。

壳型铸造生产时,铸件冷却速度较铁型覆砂工艺缓慢得多^[7]。为了保证铸件本体的力学性能与金相组织,需增加铜的加入量,加强球化和孕育处理,以强

化和稳定珠光体量。

2.3 主要缺陷与防止措施

QT700-3球铁凸轮轴壳型铸造的主要缺陷有:缩孔、砂眼与气孔、缩陷与褶皱(波纹)等。

2.3.1 缩孔

(1) 产生原因。缩孔主要出现在凸轮轴的粗轴段轴线处。主要原因是由于凝固后期在粗段基轴中形成了孤立的液相,与冒口连接的补缩通道被隔断,无法得到补缩而产生缩孔。

(2) 防止措施。减小粗轴段部位的壳型厚度或喷涂可改善传热的涂料,提高该轴段的冷却速度。

2.3.2 砂眼与气孔

(1) 产生原因。覆膜砂发气量高,壳型固化不充分,壳型制备操作不当等^[8]。

(2) 防止措施。采用低发气量的覆膜砂;合适的固化温度与固化时间,保证壳型充分固化,壳型固化以表面呈褐红色为准(图8);加强制壳过程的浮砂清理,做到轻拿轻放;加强挡渣与过滤,减少铁液中的氧化夹杂物。

2.3.3 缩陷与褶皱(波纹)

(1) 产生原因。铁液粘度大,流动性差;充型压



图8 固化后的壳型

Fig. 8 Shell mold after curing

力低。

(2) 防止措施。适当提高碳当量, 加强充型过程中的挡渣与过滤, 以提高铁液的纯净度, 提高浇注温度, 以提高铁液的充型能力^[9]; 在型腔末端开设排气通道, 降低铁液充型阻力^[9]。

参考文献:

- [1] 蓝敏俐, 陈忠士. 铁模覆砂铸造合成球铁 (QT600-3) 凸轮轴本体性能分析 [J]. 重庆科技学院学报 (自然科学版), 2015, 17 (6): 80-83.
- [2] 陈海军, 杨伟, 成江, 等. 壳型精铸工艺设计研究与应用 [J]. 汽车工艺与材料, 2019 (7): 59-62.
- [3] 陈忠士, 杨开怀, 邹泽昌, 等. 球铁凸轮轴铁型覆砂铸造工艺的研究 [J]. 铸造技术, 2016, 37 (4): 809-812.
- [4] 王荣发. 原砂性能在覆膜砂强度中的作用 [C]//重庆市机械工程学会铸造分会, 重庆铸造行业协会. 2008重庆市铸造年会论文集.
- [5] 满达虎, 王丽芳. 铸件壁厚对不同硅含量灰铸铁组织和力学性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2016, 45 (19): 94-96.
- [6] 刘宗昌, 计云萍. 珠光体转变新机制——珠光体转变研究之二 [J]. 热处理, 2017, 32 (2): 1-9.
- [7] 薛存球, 黄列群. 铁型覆砂铸造N385球铁曲轴 [J]. 铸造, 1996 (5): 37-39.
- [8] 巩建强, 曹峤. 覆膜砂铸件气孔问题的成因与防治 [J]. 铸造, 2021 (1): 90-93.
- [9] 王晓江. 铸造合金及其熔炼 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.

3 结论

(1) 采用一型两件与半封闭式浇注系统, 内浇道在凸轮轴大端头, 冒口开设在浇注系统横浇道上, 在每根轴末端设置排气、集渣冒口的工艺方法, 实现了QT700-3球铁凸轮轴的壳型铸造, 其力学性能与金相组织均符合QT700-3球铁凸轮轴的技术要求。

(2) 通过减小凸轮轴粗轴段部位的壳型厚度或喷涂可改善传热的涂料, 改变该轴段的冷却速度, 可有效避免或减少凸轮轴轴线部位的缩孔和缩松缺陷。

(3) 与铁型覆砂工艺相比, 壳型铸造时需加入更高含量的铜, 以强化和稳定珠光体量, 保证铸件本体的力学性能与金相组织。

(4) 采用低发气量的覆膜砂, 保证壳型充分固化, 加强充型过程中的挡渣与过滤, 适当提高浇注温度, 可有效避免缩孔、砂眼与气孔、缩陷与褶皱 (波纹) 等铸造缺陷的产生。

Study on Shell Mold Casting Process of QT700-3 Ductile Iron Camshaft

CHEN Zhong-shi¹, ZOU Ze-chang¹, LAN Min-li¹, YANG Qi-ming²

(1. Fujian Chuanzheng Communication College, Fuzhou 350007, Fujian, China; 2. Jiangxi Tongxin Machinery Manufacturing Co., Ltd., Guangfeng 334600, Jiangxi, China)

Abstract:

The shell mold casting of QT700-3 nodular iron camshaft was successfully realized by using casting CAE numerical simulation to reasonably design the shell mold thickness of the base shaft of camshaft coarse section. The test results showed that the shell thickness at the thick section of the base shaft was 14 mm and the rest was 18 mm, which can avoid and overcome the shrinkage and porosity at the central axis of the camshaft to the greatest extent. The mechanical properties and microstructure of the QT700-3 ductile iron camshaft can be effectively guaranteed by increasing the amount of copper and strengthening spheroidization and inoculation treatment.

Key words:

QT700-3; shell mold casting; microstructure; properites