

# 球墨铸铁水套排气歧管铸造工艺

李党育<sup>1</sup>, 李小娟<sup>2</sup>

(1. 南阳理工学院智能制造学院, 河南南阳 473000; 2. 西峡县内燃机进排气管有限责任公司, 河南西峡 474500)

**摘要:** 针对水套排气歧管的结构特点和性能要求, 采用湿砂型工艺生产, 应用均衡凝固技术设计了补缩和浇注系统。通过砂芯定位与排气结构合理设计, 并使用高强度、粗粒度覆膜砂制芯, 提高了铸件尺寸精度和砂芯的透气性和排气性。详细介绍了熔炼、制芯、造型、浇注、清理等关键生产环节的控制要点, 成功研发了球墨铸铁水套排气歧管。

**关键词:** 水套排气歧管; 铸造工艺; 球墨铸铁; 热芯盒法制芯

水套排气歧管由气腔和水腔组成, 气腔(排气歧管)汇集发动机各缸排出的废气, 温度高, 工况恶劣; 水腔(水套)包裹在气腔外围, 通过冷却水循环降低气腔壁的温度、水套壁的温度以及对外的热辐射, 从而降低发动机的排放温度和机舱的环境温度, 同时可以延长排气歧管的使用寿命。水套排气歧管广泛应用于船用柴油机以及要求防爆性能的发动机。

水套排气歧管材料一般选用球墨铸铁, 采用铸造工艺成形毛坯。由于采用双层结构, 结构复杂, 气腔、水腔壁厚一般5~6 mm, 同时孤立热节多, 铸造时不容易做到均衡凝固, 铸造工艺难度大, 容易产生缩孔、缩松缺陷; 芯子成型气腔、水腔, 水腔芯子薄、长度长, 连接部位少, 强度低, 易变形, 不易制作, 浇注时容易断芯或引起壁厚减薄; 同时芯子多, 浇注时发气量大, 排气不畅, 容易产生浇不足、起皮和呛火等铸造缺陷, 因此水套排气歧管属于铸造工艺高难度复杂产品。

## 1 产品介绍

某船用柴油机六缸水套排气歧管产品外观结构见图1, 剖视结构见图2, 局部结构剖视图见图3。产品外廓尺寸为1 135 mm × 186 mm × 178 mm, 材质QT400-15, 产

作者简介:

李党育(1969-), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为机械设计与制造、铸造工艺。电话: 13503878785, E-mail: lidangyu@126.com

中图分类号: TG255

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2025)01-0124-05

基金项目:

河南省科技计划自主创新产品专项(172205211035)。

收稿日期:

2023-10-11 收到初稿,  
2023-12-20 收到修订稿。

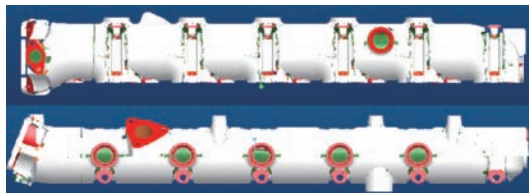


图1 产品外观结构图

Fig. 1 Product appearance structure

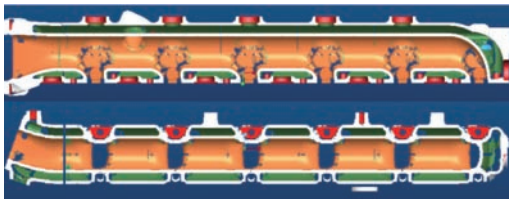


图2 产品剖视结构图

Fig. 2 Product section structure diagram



图3 产品局部结构剖视图  
Fig. 3 Section view of product local structure

品重量24.6 kg。由结构图可以看出产品由水腔、气腔组成，水腔、气腔壁厚6 mm，产品上分布有6个进气法兰、1个出气法兰、1个进水口、1个出水口、1个EGR法兰、6个工艺孔以及6个螺栓桩。

工艺孔在水套排气歧管工作时需要采用碗形塞密封，但是工艺孔的数量和分布位置对于保证产品的铸造质量至关重要。首先，采用工艺孔对水腔芯子进行定位，可以减少断芯、变形、壁薄和水腔分型面处中隔毛刺等产品缺陷；其次，工艺孔有排气作用，水腔芯子浇注时产生的气体通过芯头由工艺孔向外排出，可以减少产品浇不足、起皮和呛火等缺陷；第三，工艺孔是水腔清理的必要条件，清理时水腔砂芯溃散从工艺孔流出，同时在抛丸时钢丸通过工艺孔进入水腔内部将水腔抛净。

## 2 铸造工艺设计

产品采用砂型铸造工艺，两箱造型，进气法兰垂直放置、气腔中间水平分型，方便芯子定位。由于产品的外廓尺寸较大、小批量供货要求，采用148震击式造型机生产，湿砂造型，每箱一件，砂箱尺寸为1 500 mm × 800 mm × 300 mm。为了预防水套排气管的中隔毛刺问题，下箱采用壳芯成型，型腔由上下砂型、下壳芯、气腔芯和上下水腔芯组成。下壳芯、气腔芯和上下水腔芯设计分别见图4、图5、图6和图7。

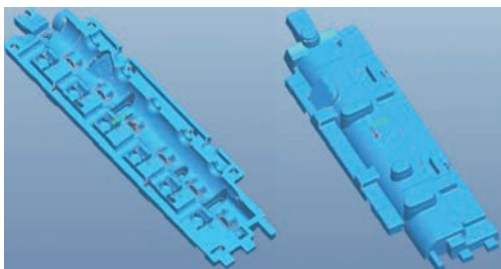


图4 下壳芯  
Fig. 4 Lower shell core

水腔芯子的芯头位置一端成型进气法兰孔，另一端成型工艺孔，两端芯头用横肋连为整体，可以减小芯子变形，提高芯子整体强度及定位的可靠性。下芯

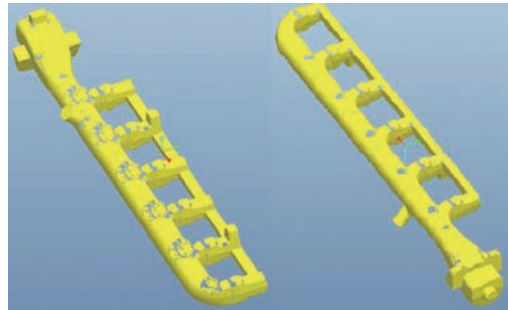


图5 气腔芯  
Fig. 5 Air chamber core

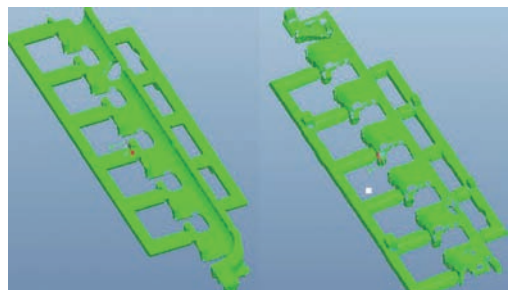


图6 水腔下芯  
Fig. 6 Lower core of water chamber

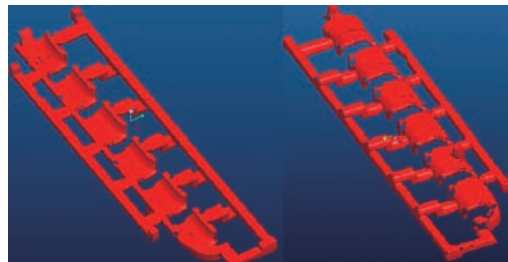


图7 水腔上芯  
Fig. 7 Upper core of water chamber

的顺序为：下壳芯—水腔下芯—气腔芯—水腔上芯。设计时注意四个砂芯的芯子定位、间隙配合、工艺补正量及分型负数的设置，各芯子与砂型、下壳芯的配合间隙为0.3~0.5 mm、拔模斜度为3°~5°、工艺负数为0.3~0.5 mm，分型负数0.5 mm。芯子制成后，在专用工装上组芯，芯子组合后整体下到下砂型中，见图8。

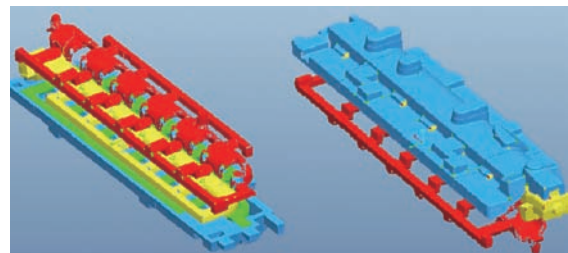


图8 芯子组合设计图  
Fig. 8 Design diagram of core assembling

采用中间注入式浇注系统,利用Osann公式计算阻流面积,铸件浇口比选用半封闭式,  $S_{直}:S_{横}:\sum S_{内}=1.2:1.4:1^{[1]}$ 。尽量拉大浇注距离,选用较大的横浇道面积,使铁液平稳上升,铁液中的夹杂物有充足的时间上浮到横浇道顶部,起到良好的挡渣作用,避免铸件夹渣缺陷,同时使铸件的温度场趋于均匀,满足铸件必要的液态补缩;内浇道设计短、薄、宽,可以在铁液石墨化膨胀开始前封闭,防止铁液回流,充分利用铁液的自补缩效果。应用均衡凝固技术,在进气法兰、螺栓桩及出气法兰处布置热侧冒口补缩,铁液经冒口进入铸件。冒口颈形式“薄、宽、短、斜”,薄为保证冒口颈在补缩终止时能够及时凝固,宽为保证冒口颈有一定的截面积,短为保证补缩金属液流动畅通,斜为保证冒口补缩效果良好<sup>[2]</sup>。为保证铸件温度场均衡及对热节处补缩,在热冒口对面布置2个冷冒口。在局部不易补缩的部位使用成型冷铁,减少铸件缺陷。上、下模板见图9、图10,图10中①、②的凸台处放置成型冷铁。

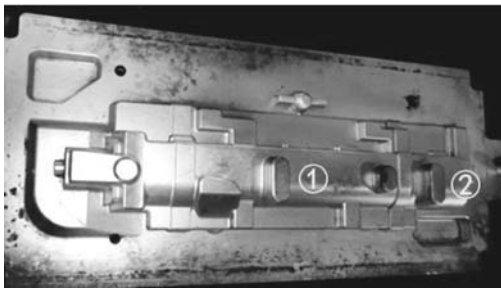


图9 上模板  
Fig. 9 Upper pattern



图10 下模板  
Fig. 10 Lower pattern

## 3 产品试制

### 3.1 熔炼

产品材料要求为QT400-15,球化率 $\geq 80\%$ ,基体铁素体 $\geq 90\%$ 。采用中频电炉熔炼,球化剂采用1.0%~1.2%的重稀土镁硅铁合金 $FeSiMg_7Re_3$ ;炉前孕育采用0.3%~0.5%的硅铁 $FeSi75-C$ 。球化处理的过程:将球化剂加入包坑内,并将部分孕育剂覆盖在球化剂上面,用平冲拍实,覆盖干燥的球铁铁屑,撒上珍珠岩;铁液出炉温度 $\geq 1540\text{ }^\circ\text{C}$ ,出铁液时防止铁液直接冲到球化剂上,当铁液出到2/3时,停止出铁液,在球化反应的中后期加入二次孕育剂,并补加铁液到要求的质量。处理过程中,球化反应时间以45~100 s为宜。球化反应结束后,加入除渣剂,扒渣,然后在铁液表面覆盖除渣剂,准备浇注<sup>[3-4]</sup>。球化处理前后的铁液化学成分见表1。

表1 球化处理前后QT400-15化学成分  
Tab. 1 Chemical composition of QT400-15 before and after spheroidization  $w_B/\%$

项目	C	Si	Mn	P	S	Re	Mg
原铁液	3.79	1.92	0.192	0.029	0.011	-	-
球化后	3.61	2.84	0.187	0.029	0.007	0.013	0.038

### 3.2 制芯

水套排气歧管制芯工序对产品质量至关重要。由于芯子多,空间狭小,浇注时芯子发气量大而且排气不畅,极易引起起皮和呛火问题,甚至造成充型不足。制芯工序采用热芯盒法制芯,使用50/70目高强度、低发气量覆膜砂制作,覆膜砂原砂采用硅砂, $SiO_2$ 含量不小于85%,覆膜砂性能见表2,以此提高砂芯的透气性和排气性<sup>[5]</sup>,降低浇注时的发气量,同时芯子强度高,可有效解决水腔芯子断芯以及由于变形而导致的水腔壁薄问题。

为了避免因局部壁薄及芯子变形而造成下芯时干涉掉砂,下壳芯与下箱砂型的间隙加大为1 mm;气腔芯盒设置气眼针,芯子中空,排气顺畅,芯头直接固定在下壳芯上,连接强度高,不易变形;水腔芯子在上下芯子分型面处开排气槽,解决水腔芯子的排气问题,芯子通过芯头和横肋在下壳芯中定位,定位牢固,可以预防芯子变形及断裂的可能,同时结合部位的间隙加大到1.5 mm,防止上下水腔芯由于制芯变形

表2 芯子用覆膜砂性能  
Tab. 2 Performance of core coated sand

粒度/目	热态抗拉强度/MPa	常温抗拉强度/MPa	热态抗弯强度/MPa	常温抗弯强度/MPa	发气量/( $mL \cdot g^{-1}$ )	灼烧减量/%
50~70	2.2~2.3	4.8~5.2	$\geq 2.5$	7.0~8.0	$\leq 13$	$\leq 3.0$



而造成在合型时被压断，同时预留涂粘接剂的间隙。

由于采用50/70目覆膜砂制芯，砂芯表面粗糙，影响排气歧管内腔表面粗糙度，因此砂芯表面需要刷涂料。刷涂料时将芯子垂直放置，利用涂料的流淌速度将涂料的浸润厚度（渗入深度）控制在1 mm以内，避免浇注时因为涂料的浸润厚度大而引起的起皮、呛火问题。

芯子制作完成之后在专门工装上组装芯子，芯子结合处涂粘接剂，并完成固化，组合好的芯子见图11。为了预防水腔分型面处产生中隔毛刺，影响后续清理及使用过程中造成水循环不畅，在上下水腔芯子分型面处粘封火垫，浇注时封火垫可以阻挡铁液的进入，防止中隔毛刺的形成。



图11 芯子组合实物图

Fig. 11 Real picture of core assembling

### 3.3 造型

采用148造型机生产，煤粉砂湿型，混砂设备采用迪砂线，煤粉及膨润土使用优质材料，所得型砂性能见表3。在造型过程中，为了提高上型的透气性，上型硬度控制在80左右（C型硬度计），同时在上型所有的芯头位置钻排气孔，保证浇注时产生的气体能够及时排出。造型完成后，将组合芯子整体放入下箱中，由于组合芯子质量重、尺寸大，下芯时容易引起掉砂，为防止砂眼的产生，应彻底清理砂型中的游离砂粒。合箱后用箱卡子将上下箱紧固，等待浇注。

表3 型砂性能  
Tab. 3 Properties of molding sand

湿压强度/MPa	透气性	水分/%	紧实率/%	含泥量/%
≥0.1	≥90	4.5~5.0	40~50	16~18

### 3.4 浇注

浇注温度 $\geq 1380\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，从炉前铁液开始处理到最后一箱铁液浇注完毕整个过程不超过15 min，浇注时间不超过10 min。浇注时铁液始终充满直浇道，随流孕育采用0.1%~0.15%的长效孕育剂FYJ-1a，保证在浇注过程中不断流。

### 3.5 清理

落砂后的产品见图12。水套排气管的清理难度主要在水腔清理，水腔空间小，水道内部的毛刺、粘

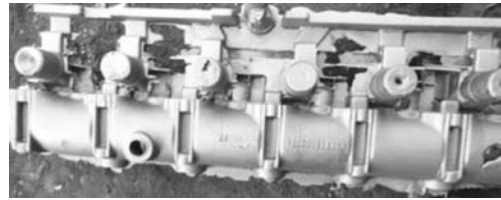


图12 清理前的铸件

Fig. 12 Casting before cleaning

砂清理困难。气腔、水腔的清理使用内窥镜检测。常规的水腔清理，采用喷头对水腔进行内腔抛丸，抛丸后使用气枪将水腔内部的钢丸吹出来；局部死角位置不容易清理的毛刺、粘砂，使用高压水枪进行定点清理。对于抛丸不能去掉的毛刺、粘砂，可以将铸件加热到 $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 保温1 h，出炉空冷后在落砂机上振动10 min，基本就能去除<sup>[6]</sup>。

根据技术方案组织生产，取管壁进行金相检测，用附注试块进行力学性能检测，球化率见图13，基体组织见图14，力学性能试验结果见表4。球化级别

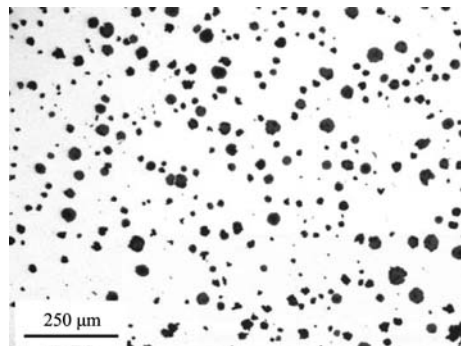


图13 管壁球化率

Fig. 13 Spheroidization rate of manifold wall

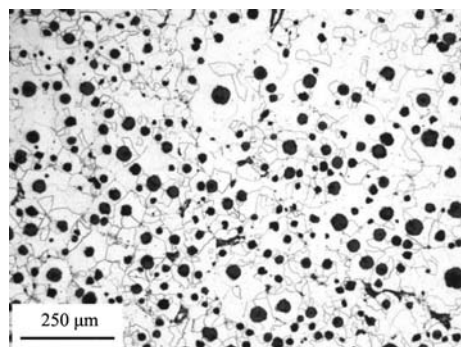


图14 管壁基体组织

Fig. 14 Matrix structure of manifold wall

表4 附铸试块的力学性能  
Tab. 4 Mechanical properties of attached cast test block

抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%	硬度HB
475	357	21	168

2级，球化率92%，石墨大小7级；铁素体总体含量 $\geq 94\%$ ，抗拉强度475 MPa，屈服强度357 MPa，伸长率21%，满足产品技术要求。

试制过程中，水套排气歧管存在不同程度的壁薄、砂眼、夹杂物、呛火、起皮、缩松和中隔毛等常见的铸造缺陷，主要原因是生产环节控制不到位，通过采取上述措施，并严格按照工艺生产，铸造缺陷可以大幅度降低，成品率稳定控制在90%以上。经过主机厂检测以及试验验证，符合相关技术要求，满足装车使用条件，目前已批量生产，水套排气歧管成品如图15所示。

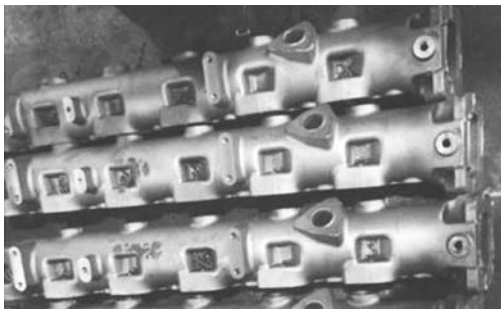


图15 成品产品

Fig. 15 Finished product

#### 参考文献:

- [1] 王文清, 李魁盛. 铸造工艺学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 魏兵, 袁森, 张卫. 铸件均衡凝固技术及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [3] 刘沙, 刘建策, 刘晓亮. 球墨铸铁吸沙泵泵体铸造工艺探究 [J]. 铸造, 2021, 70 (7): 872-875.
- [4] 马艳东, 李松杰, 杨林, 等. 发动机缸套用球墨铸铁的组织与铸造工艺研究 [J]. 铸造, 2022, 71 (12): 1505-1510.
- [5] 聂越, 刘兴隆. S415蠕墨铸铁曲轴箱体型芯设计 [J]. 铸造, 2023, 72 (7): 897-903.
- [6] 靳宝, 袁彬. 内燃机水套排气歧管常见铸造缺陷及解决方法 [J]. 铸造, 2018, 67 (1): 72-74.

## 4 结论

(1) 应用均衡凝固技术设计补缩和浇注系统，采用热侧冒口补缩，铁液经冒口进入铸件，减少冒口的使用数量和冒口体积，局部使用成形冷铁，减少了铸件缩孔、缩松缺陷。

(2) 确定了合理的砂芯定位间隙、工艺补正量及工艺负数，芯子定位设计合理、可靠；在专用工装上组芯，芯子组合后整体下入下型中，提高了芯子整体强度及定位的可靠性。

(3) 采用高强度、粗粒度和低发气量覆膜砂，提高砂芯的透气性，同时注重芯子自身排气结构，控制涂料层浸润深度，解决了浇注时芯子变形、发气量大、排气不畅而造成的产品壁薄、起皮和呛火等铸件缺陷。

(4) 严格熔炼、造型、制芯、浇注和清理等生产工艺，注重技术细节，针对生产过程中产生的铸件缺陷，在过程中查找原因，寻找解决办法，提高了水套产品的成品率，满足了客户需求。

## Ductile Iron Water-Jacket Exhaust Manifold Casting Process

LI Dang-yu<sup>1</sup>, LI Xiao-juan<sup>2</sup>

(1. School of Intelligent Manufacturing, Nanyang Institute of Technology, Nanyang473000, Henan, China; 2.Xixia Internal Combustion Engine Intake & Exhaust Manifold Co., Ltd., Xixia 474500, Henan, China)

#### Abstract:

According to the structural characteristics and performance requirements of the water jacket exhaust manifold, applying the production process of green sand mold, the feeding and gating systems have been designed based on the balanced solidification technology. Through reasonable designs of the sand core location and exhaust structure, and making the cores by using of high strength and coarse-grained precoated sand, the casting size accuracy and the permeability and exhaust property of the sand cores are improved. The control points of smelting, core making, molding, pouring, cleaning and other key production links are introduced in details, and the ductile iron water jacket exhaust manifolds are successfully developed.

#### Key words:

water-jacket exhaust manifold; casting process; ductile iron; core making process of hot box