DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2020.05.012

大型船用柴油机球墨铸铁机身铸造工艺优化设计

尹彦普[1],陈　勇[2],任文光[1],翁　烨[1],陶卫生[1],毛林鑫[1]
(1. 中船海洋动力部件有限公司,上海 201306; 2. 沪东重机有限公司,上海 200129)

摘　要:分析了大型船用柴油机球墨铸铁机身铸造难点及可能出现的铸造缺陷,提出了铸造工艺优化设计的主要内容及方法,确定了浇注位置及造型方法,选择了铸造工艺参数,并进行了浇冒口系统设计计算及数值模拟优化,优化了球化孕育处理工艺等。结果表明,按照提出的设计思路和方法,稳定生产了符合图纸和技术文件要求的铸件,为同类铸件铸造工艺标准化、规范化设计积累了经验。

关键词:柴油机机身;球墨铸铁;浇冒口系统;球化孕育处理

中图分类号:TG255　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-8365(2020)05-0459-04

Optimization Design of Casting Process of Ductile Iron Cylinder Block of Large Marine Diesel Engine

YIN Yanpu[1], CHEN Yong[2], REN Wenguang[1], WENG Ye[1], TAO Weisheng[1], MAO Linxin[1]
(1. CSSC Marine Power Components Co., Ltd., Shanghai 201306, China; 2. Hudong Heavy Machinery Co., Ltd., Shanghai 200129, China)

Abstract: The casting difficulties and possible defects of nodular cast iron fuselage of large Marine diesel engine were analyzed. The main contents and methods of optimal casting process design were presented. The casting position and molding method were determined, casting process parameters were selected, and the sprue riser system design and numerical simulation were optimized. The spheroidization inoculation process was optimized. The results show that the castings conforming to the requirements of drawings and technical documents have been produced stably according to the proposed design ideas and methods, and the experience has been accumulated for the standardization and design of similar casting process.

Key words: cylinder block of diesel engine; ductile iron; gating and riser system; spheroidization inoculation treatment

目前,我国大型船用柴油机大多都采用许可证技术生产的国外品牌柴油机,如法国 SEMT Pielstick 公司 PA、PC 系列、德国 MTU 公司 956/1163 系列等中高速柴油机。这些柴油机结构紧凑,技术先进,性能优良,广泛应用于船用主机、船用辅机、陆用电站、核电站应急机组等领域。

机身作为柴油机中最关键的零部件之一,其质量对柴油机整体性能和安全性有直接影响。与焊接机身相比,球墨铸铁因具有高强度、高刚度、稳定性好、减震降噪等良好的综合性能,已成为大功率中高速柴油机机身首选。然而由于机身结构复杂,壁厚差大,在铸造过程中容易产生各种铸造缺陷。因此,对球墨铸铁机身铸造工艺进行优化设计,是保证铸件质量,提高铸件成品率的根本措施。

收稿日期:2020-03-19

作者简介:尹彦普(1985-),山东济宁人,工程师.主要从事铸造工艺研究及技术管理工作.电话:021-61185555-1035,E-mail:yinyp021@163.com

由于生产条件和工艺技术不同,机身铸造工艺设计的侧重点不尽相同[1-3]。本文根据公司 50 多年来在柴油机铸件生产方面的经验积累,以目前国内最大中速柴油机为研究对象,提出一套完整的球墨铸铁机身铸造工艺优化设计方法,在实际生产中取得了良好的效果。

1　机身结构及铸造难点分析

1.1　结构分析

某大型船用柴油机球墨铸铁机身外形尺寸 6 940 mm×2 488 mm×1 820 mm,双排缸孔"V"型布置,夹角 45°,缸孔直径 490 mm,缸孔中心距,740 mm,主要壁厚 30～70 mm,最大壁厚 175 mm。铸件材料 EN-GJS-400-15A,铸件重约 42 000 kg。

1.2　技术要求

铸件尺寸精度满足 DCTG11-ISO8062 之要求。

铸件内部不允许有缩孔、缩松、夹渣等缺陷,铸件表面不允许有裂纹、气孔、渣孔等缺陷。铸件高应

图 1 柴油机机身
Fig.1 Cylinder block of diesel engine

力区域须进行超声波探伤和射线探伤。超声波检查规定区域底部回波大于屏幕高度的 75%,缺陷波不超过屏幕高度的 20%，首件射线探伤检验符合 NF EN 12681 标准二级要求。

用附铸试样检验铸件化学成分,力学性能及金相组织,且满足：

P≤0.10%,S≤0.02%,Ti≤0.02%。

$Rm \geqslant 390$ MPa,$Rp0.2 \geqslant 250$ MPa,$E\% \geqslant 14\%$，130≤HB≤185。

石墨大小 4～6,石墨形态 VI,球化率≥90%,铁素体≥90%。

1.3 铸造难点

从机身结构特点和技术要求来看,铸造难点和重点主要在以下 3 个方面：

(1)大型框架类铸件在组芯造型条件下,如何合理分型、分芯,如何正确选择铸造收缩率、加工余量、反变形量等工艺参数,成为保证铸件尺寸精度的重点。

(2)铸件孤立热节多,如何设计合理的浇注系统和补缩系统成为防止铸件重要部位产生二次氧化夹杂和收缩缺陷的关键。

(3)优化熔炼工艺参数是防止铸件厚大部位出现石墨漂浮、碎块状石墨、球化不良、孕育衰退等冶金缺陷,保证铸件机械性能的重要措施。

2 铸造工艺方案设计

2.1 浇注位置

由于机身缸盖安装面及螺栓搭子、凸轮轴孔、曲轴孔及螺栓搭子、横向螺栓孔等部位长时间处于巨大的交变负荷作用下,必须具有足够的抗冲击能力,因此,这些部位不能有任何铸造缺陷。为保证铸件重要部位质量,通常选择图 2 所示的浇注位置。

2.2 造型方法

常用造型方法有组芯造型和劈模造型。组芯造型时,型、芯制作及铸型装配简单灵活,适合小批量生产。劈模造型适合批量生产,但砂箱等工装制造

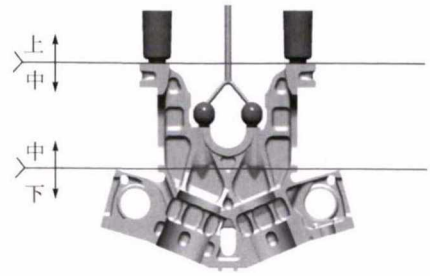

图 2 铸件浇注位置简图
Fig.2 Schematic pouring position of the casting

精度高,成本高。

近年来，随着大型冷芯盒射芯机和砂型 3D 打印技术的迅猛发展,一种“切片”造型工艺应运而生。具体来说，就是把铸型沿长度方向垂直“切成若干片”，使用射芯机或 3D 打印机片制成一片片铸型，然后再把每片组装起来形成完整的铸型。由于柴油机机身每缸或每组缸(A 列与 B 列)结构完全相同，所以非常适用这种造型方法，也是未来机身铸件造型方法的方向。

公司大型射芯机和铸型 3D 打印机项目已立项,目前正在进行“切片”造型工艺研究。图 3 是大型射芯机制成的一“片”铸型。

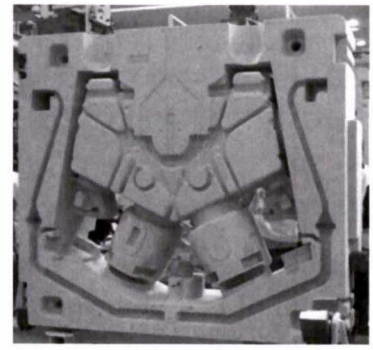

图 3 使用射芯机制成的一片铸型
Fig.3 A piece of sand core using a core-shooting mechanism

柴油机机身目前仍采用组芯造型方法，铸型装配过程如图 4～7 所示。

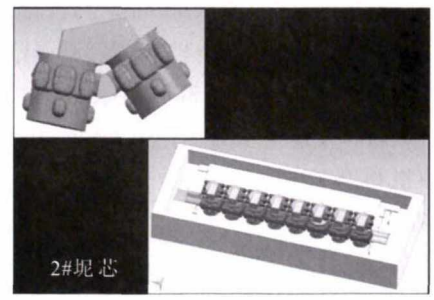

图 4 组芯过程(1)
Fig.4 Sand core assembly(1)

2.3 主要造型工艺参数确定

(1)铸造收缩率的确定。铸造收缩率与合金的种类及成分、铸件的大小和结构复杂程度、铸型种类、

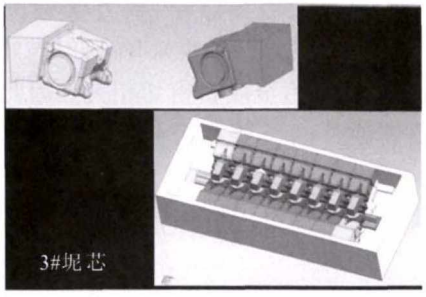

图 5 组芯过程(2)
Fig.5 Sand core assembly(2)

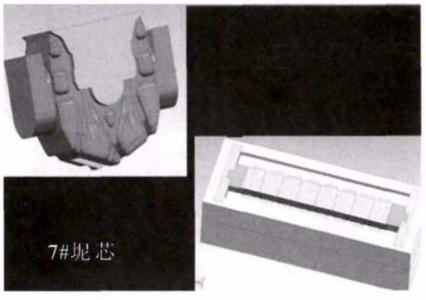

图 6 组芯过程(3)
Fig.6 Sand core assembly(3)

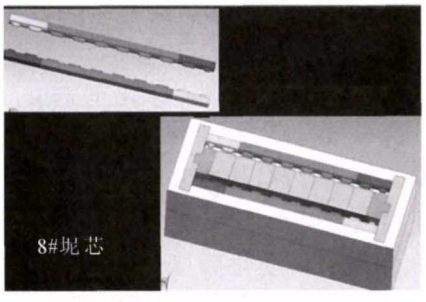

图 7 组芯过程(4)
Fig.7 Sand core assembly(4)

型砂和芯砂的强度、浇冒口系统的结构与分布、浇注温度等因素有关，因此，对某一铸件要准确地选定铸造收缩率是非常困难的。根据公司生产实践，机身铸件长度、宽度、高度方向的铸造收缩率取不同数值，为 0.6%～0.9%。

(2)预变形曲率(反挠度)的确定。对于壁厚不均的长形铸件或扁平类铸件，由于冷却速度不同而产生的内应力，一般使厚壁部分受拉应力而内凹，薄壁部分受压应力而外突。为此，制造模型时，在铸件可能产生变形的部位，预先做出相反方向的变形量，使铸件冷却后，变形的结果正好将其抵消，得到符合图纸要求的铸件。这种在制模时预先做出的变形量，叫做预变形曲率。由于影响铸件挠度大小的因素很多，如铸件的大小、结构、材质、造型方法、浇注温度、浇冒口系统的分布和开箱时间等，因此，预变形曲率一般根据生产经验确定。机身底脚板最大预变形曲率值按总长 2‰计。

3 浇冒口系统设计

3.1 浇注系统设计

为避免紊流和喷射，减少二次氧化杂，铁水从浇注位置底部引入铸型，浇注系统采用开放式，阻流截面为浇口杯出水口，内浇道处铁液流速要控制在 500 mm/s 左右。

浇注系统计算公式[4]如下：

$$F_{阻}=\frac{G}{0.31\mu+t\sqrt{Hp}} \tag{1}$$

式中：$F_{阻}$内浇道总截面积，cm^2；G 铸型中铁液总重量，即铸件重量和浇冒口重量之和，kg；t 浇注时间，s。

$$t=\sqrt[3]{\delta G} \tag{2}$$

式中，δ 铸件壁厚，mm；Hp 平均压力头，cm；μ 流速系数。

其各单元截面积比例按 $\Sigma F_{阻}:\Sigma F_{直}:\Sigma F_{横}:\Sigma F_{内}$ =1.0:1.1:1.5:2.0 设计，充型时间 110 s。

3.2 冒口设计

球墨铸铁件冒口设计方法主要有基于顺序凝固原理的卡赛控制压力冒口设计方法[5]和基于均衡凝固理论的有限补缩冒口设计方法[6]。

控制压力冒口原理是利用部分共晶膨胀在铸件内部建立一定的内压力以抵消二次收缩、避免缩孔、缩松缺陷的产生，同时又可以减少型腔的扩大量，避免胀大变形，从而获得组织致密的高质量铸件。

按照控制压力冒口计算方法，机身底脚板设置 2 排共 16 个圆柱形冒口，轴承档设置 2 排 18 个球形冒口，如图 8。

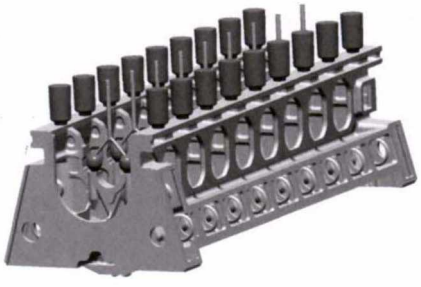

图 8 冒口布置图
Fig.8 Riser layout

3.3 冷铁设计

由于结构复杂，壁厚差大，机身中有许多分散的孤立热节，如缸盖螺栓孔搭子、横向螺栓孔搭子等，这些部位质量要求高，但却难以设置补缩冒口。为此，在机身的孤立热节部位设置了大量的冷铁，调节凝固冷却速度，防止这些重要部位出现缩孔和缩松缺陷。

冷铁不仅能防止铸件产生收缩缺陷，也是防止厚大断面球墨铸铁件出现石墨畸变、碎块状石墨以及石墨漂浮等缺陷的有效措施。因为这些缺陷与铸件冷却缓慢，凝固时间太长直接有关，只要加大冷却速度，缩短凝固时间，特别是缩短共晶阶段的凝固时间，都可有效地阻止这类缺陷的出现。

常用冷铁分为铸铁冷铁和石墨冷铁，铸铁冷铁的导热率大，蓄热能力强，被广泛应用。石墨冷铁的导热率高于挂砂铸铁冷铁，但它的蓄热能力比铸铁冷铁小。

铸铁冷铁厚度按下式计算。

$$\text{单面冷铁}: B=(0.6\sim1.0)T \quad (3)$$

$$\text{双面冷铁}: B=(0.4\sim0.6)T \quad (4)$$

式中，B 外冷铁厚度，mm；T 铸件被冷却部位的厚度，mm。

机身冷铁布置如图 9。

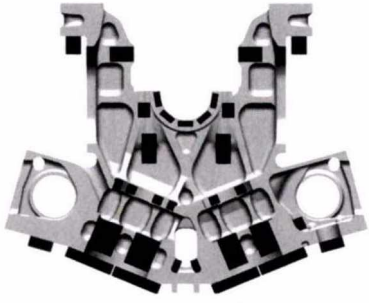

图 9 冷铁布置图
Fig.9 Chill layout

4 模拟计算

按照上述方法设计出初步铸造工艺后，采用 MAGMA 软件模拟机身充型过程和凝固过程。凝固过程模拟发现，铸件收缩缺陷除与冒口、冷铁尺寸大小和位置有关外，也与铁液冶金质量、铸型刚度、浇注温度关系密切，其中冶金质量好坏影响最大。

先后进行了 4 次模拟，图 10 是第 4 次模拟结果，与实际生产吻合较好。

5 铁液质量控制

对厚大断面球墨铸铁件来说，由于铸铁件壁厚大，重量大，冷却速度慢，凝固时间长，在厚壁中心或热节处常常会产生一些铸造缺陷：缩孔缩松，石墨球数量少、球径大，石墨畸变，碎块状石墨(Chunky Graphite)，石墨漂浮，成分偏析，以及晶间碳化物等。现已发现，这些缺陷不仅与冷却速度有关，也与铁液的冶金质量密切相关。因此，在生产大型球墨铸铁件时，要高度重视熔炼工艺的优化设计。

图 10 机身凝固过程模拟图
Fig.10 Simulation of cylinder block solidification process

5.1 原材料选择及化学成分设计

炉料选择高纯生铁和优质废钢，CE 控制在 4.2%～4.3%，w(Mn)<0.3%，w(P)≤0.03%，w(S)≤0.015%，$Mg_{残}$ 0.03%～0.05%，其它干扰元素应尽可能低。

5.2 球化孕育处理

球化处理采用冲入法，球化剂选 w(Mg)6%，w(RE)0.5%～1.0%，一次孕育采用硅钡孕育剂，瞬时孕育采用硫氧孕育剂，孕育要滞后，要瞬时。

浇注温度控制在 1 340～1 380 ℃，采用高刚度铸型以充分利用石墨化膨胀进行球墨铸铁的自补缩，减轻冒口负担，确保铸件内部致密。

6 生产验证

依据以上铸造工艺方案进行首件浇注，附铸试样检测结果见表 1，金相组织见图 11，铸件尺寸检验、无损探伤检验均符合图纸和技术文件要求。目前

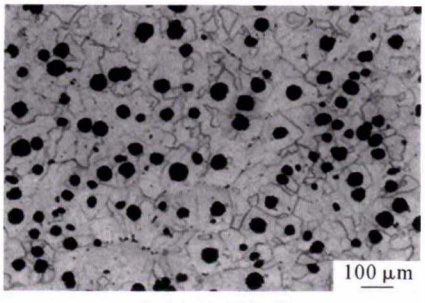

图 11 金相组织
Fig.11 Metallographic structure

表1 材料检测汇总表
Tab.1 Test results of material properties

项目	抗拉 /MPa	屈服 /MPa	伸长率(%)	硬度 HB	基体	石墨大小	球化率(%)
标准值	≥390	≥250	≥14	130~185	F≥90%	4～6	≥90
实测值	402	265	25	151	95%	6	90

已连续生产 8 件合格铸件，质量稳定。

7 结语

(1)在进行大型复杂球墨铸铁件铸造工艺设计时，要对铸件结构特点，铸造难点以及可能出现的铸造缺陷进行充分分析，在此基础上确定合理的浇注位置，设计布局合理、尺寸正确的浇冒口系统。

(2)要重视球墨铸铁铁液质量的控制，这方面要从炉料选择、化学成分设计及球化孕育处理工艺优化入手。

(3)铸件凝固过程数值模拟是预测铸件产生收缩缺陷的有效手段，通过模拟，不断优化浇注系统、冒口、冷铁等工艺参数，也为其它同类铸件浇冒口系统初始设计积累经验。

参考文献：

[1] 查浩. 大型整铸柴油机机体树脂砂工部设计、工艺研究与设计[D]. 南京：南京理工大学, 2004.

[2] 翟琳阳. 论 V 型柴油机整铸机体的生产工艺 [J]. 中国铸造装备与技术, 2014(2): 16-19.

[3] 张聚涛. 柴油机机体铸造工艺设计研究 [J]. 中国铸造装备与技术, 2016(6): 33-36.

[4] 中国机械工程学会铸造专业学会. 铸造手册第 5 卷铸造工艺[M]. 北京:机械工业出版社,2003.

[5] 卡塞博士. 球墨铸铁浇口和冒口 [M]. 北京: 清华大学出版社, 1983.

[6] 魏兵.铸件均衡凝固技术及其应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.

招贤纳士

襄阳聚力新材料科技有限公司

一、招聘销售工程师

任职要求：

1. 本科及以上学历，铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业，熟悉二维、三维绘图软件者优先考虑。
2. 2 年以上铸造行业耐火材料销售或铸造涂料销售经验者。
3. 2 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 2 年以上铸造行业铁合金生产或销售经验者。
5. 2 年以上耐火材料技术研发或产品应用经验者。
6. 2 年以上铸造涂料技术研发或产品应用经验者。
7. 2 年以上有在铸造厂工作经验，对中频炉熔炼或造型工艺熟悉者。
8. 在压铸厂或铝厂工作 2 年以上，对有色金属铜铝熔炼工艺流程熟悉者。

二、招聘销售经理

任职要求：

1. 大专及以上学历，铸造、耐火材料、冶金、有色金属专业，熟练掌握办公软件，懂产品市场宣传，营销策划者优先考虑。
2. 5 年以上铸造行业耐火材料销售、铸造涂料或类似工业品销售经验者。
3. 5 年以上铸造行业用中频炉或压铸行业工业炉销售经验者。
4. 性格外向，诚信可靠，乐观向上，抗压力强。
5. 逻辑思维清晰，做事干净利落，工作效率高。
6. 善于多部门或多层次沟通协调。

三、销售助理

任职要求：

1. 男性，30 岁以下，本科学历，身体健康，适合经常出差。
2. 性格外向，诚信可靠，乐观向上，抗压力强。
3. 逻辑思维清晰，做事干净利落，工作效率高。
4. 善于多部门或多层次沟通协调。

有意向者请将简历发送至邮箱 wuhaiyan@xyjllc.com