

大型复杂 V 型系列柴油机机体的共性特征研究

鲁晨光¹, 任良敏¹, 高超¹, 杨刚²

(1. 宜宾普什联动科技有限公司, 四川宜宾 644007; 2. 四川大学机械工程学院, 四川成都 610065)

摘要: 为了使整体铸造的铸造工艺规则在系列柴油机机体的铸造工艺设计和规模化生产中具有指导性、普适性和通用性, 以V12型俄罗斯机体、V16型美国机体、V20型德国机体为对象, 系统研究了上述三种大型复杂V型系列柴油机机体的共性特征。研究发现, 三种机体在功能特性、材料特性及结构特性等方面均具有共同特征; 三种机体的材料共性、功能共性、关键区一致性、关键模数相似性、孤立热节相似性等众多共性特征, 使得V型系列柴油机机体主要缺陷的类型和产生位置大致相同。这也决定了机体生产的铸造工艺思路和工艺原则趋同, 并由此制定了整体铸造V型系列柴油机机体的铸造工艺规则。且基于该规则实现了大型复杂V型系列柴油机机体的高品质规模化生产。

关键词: 柴油机机体; 共性特征; 功能特性; 材料特性; 结构特性; 铸造工艺规则

大功率柴油机及其配套设备是目前国家重大技术装备领域中重点支持的优先发展方向。柴油机机体是大功率柴油机中最大、最重要和最关键的主体部件, 是整个柴油机中最主要的支撑部件和骨架^[1-3], 其作用是支撑柴油机所有零部件, 决定着柴油机的整机质量和使用寿命, 也是柴油发动机中成本最高的部件^[4-5]。大型柴油机机体, 尤其是V型柴油机机体, 可比直排型机体多配置一倍的气缸, 既可节约成本也能大大提高发动机效率, 因此V型机体是目前国内外的一种发展方向。但是, V型机体结构复杂、壁厚差异大、性能要求高、重量较大, 因此采用整体铸造进行生产的技术难度极大, 故近年来国内关于V型机体的研究大都集中于结构设计、控制技术、后处理技术和数字模拟等方面^[6-8], 而对该型机体采用整体铸造进行生产的铸造工艺研究较少, 更未发现以系列机体为对象进行共性特征研究进而指导铸造工艺的设计和规模化生产的相关报道。

为了在实际生产中将整体铸造的关键工艺技术用于指导系列柴油机机体的铸造工艺设计和规模化生产, 实现铸造工艺规则对系列柴油机机体的铸造生产具有普适性和通用性, 本研究以俄罗斯研发的用于火车及重型机车的V12型机体(重量为2 850 kg)、美国研发的主要用于内燃机车的V16型机体(重量为6 884 kg)、德国研发的主要用于大型舰船的V20型机体(重量为1 800 kg)为例, 分析研究了上述三种V型系列柴油机机体的共性特征。上述三种V型柴油机应用范围广、市场适应性强, 无论是机体结构还是市场应用都具有典型性。

1 V型系列柴油机机体的共性特征研究

1.1 V型系列柴油机机体的功能共性

图1是V12、V16、V20三种V型柴油机机体的三维结构图。柴油机机体的功能特性, 即客户对柴油机机体的功能需求, 是柴油机机体结构设计的基础。分析研究发现, 柴油机机体V12、V16、V20的共同关键区域均为气缸孔、出气腔(即空气孔)、轴瓦面以及油底壳安装面, 它们的功能共性见表1。

机体的功能特性决定了机体的结构特性。由于V型系列柴油机机体关键区域的主

作者简介:

鲁晨光(1967-), 男, 高级工程师, 主要从事铸造工艺研究。电话: 19150683681, E-mail: zylcg@126.com

通讯作者:

杨刚, 男, 教授, 博士生导师。电话: 028-85466576, E-mail: yanggang@scu.edu.cn

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2020)

07-0692-06

收稿日期:

2019-02-10 收到初稿,
2020-05-11 收到修订稿。

要功能基本一致，也决定了其结构设计具有相似性。此外，机体其他重要部位及其功能共性见表2所示。

由表1和表2可见，柴油机机体主要区域的功能特性基本趋同，这决定了其结构设计具有相似性，即V型系列柴油机机体的各功能区域结构设计和这些区域所在机体位置大致相同，以实现作为动力机构的多种协同功能。

1.2 V型系列柴油机机体的材料共性

柴油机机体要求承受随工况不断变化的动载荷，机体铸件必须具备足够的强度、刚度和减震性能。同时，机体的内外结构都比较复杂，要求机体材料应具有良好的铸造性能和机械加工性能。

1.2.1 V型系列柴油机机体的使用材质选择

与铝合金相比，铸铁的刚度和强度较大且成本低廉，除了部分汽油发动机为了减轻重量而采用铝合金外，大多数柴油机机体铸件，尤其用于机车、海洋船舶及发电机组的机体，其制造材料大都选择铸铁。

铸铁含有较高质量分数的C、Si，其中C主要以石墨形式存在，与碳钢相比其流动性更好，可以铸造非常复杂且壁较薄的零件；石墨具有润滑作用，故具有良好的切削加工性；石墨对于基体相当于缺口，因此铸铁对表面缺陷的敏感性很低；铸铁具有优异的减震性能，非常适合制作具有一定振动效应的柴油机机体；铸铁件对原材料的限制要求不高且熔炼及生产工艺简单，故铸铁件的生产成本较低，产品的市场竞争力强。鉴于此，根据V12、V16、V20三种柴油机机体的力学性能要求，三种机体均采用灰铸铁HT250。

1.2.2 铸铁的材料特性

灰铸铁的凝固方式是逐层凝固，属于窄凝固范围结晶。灰铸铁凝固过程中析出片状石墨^[9]，石墨尖端与枝晶间铁液直接接触，石墨生长所产生的体积膨胀大部分作用于晶间铁液。铁液在铸件凝固过程中被迫通过枝晶间的通道补缩，可大大减轻灰铸铁产生缩松的倾向，从而提高铸件质量^[10]，故灰铸铁常用于制造发动机缸体、缸盖、缸套等铸件。

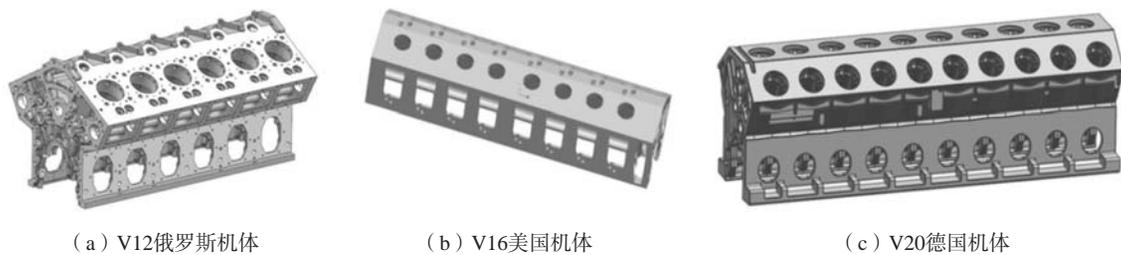


图1 V12、V16、V20三种柴油机机体的三维结构图

Fig. 1 Three-dimensional structure of V12、V16 and V20 diesel engine blocks

表1 三种柴油机机体的关键部位及其功能共性

Table 1 The key positions of three diesel engine blocks and their functional commonness

部件	功能
气缸孔	压缩混合气体产生动力
油底壳安装面	油底壳是曲轴箱的下半部，又称为下曲轴箱。作用是封闭曲轴箱作为贮油槽的外壳，防止杂质进入，并收集和储存由柴油机各摩擦表面流回的润滑油，散去部分热量，防止润滑油氧化
轴瓦面	安装轴瓦
空气孔	空气进出通道

表2 柴油机机体其他重要部位及其功能共性

Table 2 Other important positions of diesel engine blocks and their functional commonness

部件	功能
飞轮端	功率输出端
自由端	与飞轮端相对的另一端
主油道/副油道	机油泵往各个需要润滑的部件供油
凸轮轴孔	安装凸轮轴
水腔	为工况下的机体降温

本研究的V型系列柴油机机体均选用具有良好铸造性能和力学性能的灰铸铁材质，灰铸铁在凝固过程中都因石墨的析出具备一定的自补缩特性。灰铸铁的这种材料共性决定了机体在铸造工艺过程中的凝固特性具有相似性，凝固特性与工艺原则的选取紧密相关，因此决定了V型系列柴油机机体的工艺原则选取具有一定共同性。

1.3 V型系列柴油机机体的结构共性

1.3.1 V型系列机体的壁厚特征相似性

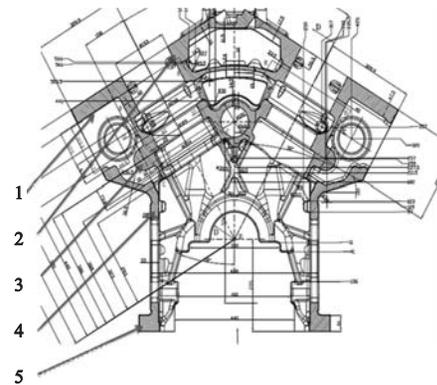
柴油机机体的热节分布主要由铸件的壁厚所决定，而一般在计算某个产品模数时是将产品分解。本研究选取多个典型截面附近5 mm高度区域进行计算。

由于机体的结构具有对称性，故选择机体的一半进行模数的计算分析。根据铸件设计和生产经验，在机体的二维尺寸图中选取机体的典型截面。典型截面是指所处位置的壁厚较其邻近区域壁厚大得多的部位，这些部位的蓄热量相对邻近区域大，导致凝固时间相对较长，更易产生凝固缺陷，具体位置如图2-图4所示。

对图2、3、4中标注的三种机体中1-5处典型截面5 mm高度区域模数计算结果如表3。

由表3可见，V12机体的M1区域模数最大，M4区域模数最小，两者相差接近1倍；其次，M2和M5区域模数也较大。因此V12的缸孔面、汽缸盖螺栓孔及油底壳安装面的壁厚特征较大，是凝固相对迟缓区域，而机体侧壁和支油道的模数相对较小，属于较早凝固区域。V16机体的典型截面M1-M4区域都主要集中于汽缸孔附近，可视为V16同一汽缸孔不同位置的先后凝固顺序，即缸孔面最先凝固，其次是缸顶面和左汽缸盖螺栓，右汽缸盖螺栓最后凝固；油底壳安装面的模数也较大，属于最后凝固部位。V20机体的M3、M5区域模数较大，M4区域模数最小，而M1和M2居中，同时结合机体浇注系统的设计分析可知，缸孔面和油底壳安装面的凝固滞后于汽缸盖螺栓孔及主油道，而支油道凝固相对最早。

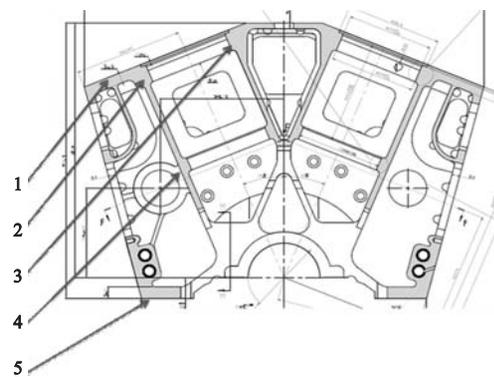
由此可见，三种机体的典型截面区域模数具有较多相似之处：最大模数和最小模数之间的差距较大，都基本接近1倍；汽缸盖螺栓孔、缸孔面和油底壳安装面模数在三种机体的典型截面模数中都相对较大，属凝固相对迟缓区，因此在设计铸造工艺时应重点考虑避免产生缩孔、缩松等缺陷；三种柴油机机体的典型截面大都包括汽缸盖螺栓孔、缸孔面及油底壳安装面等三处，与前期的有限元分析获得的应力集中区重合。同时，各机体对应自身的设计特点，如V12的机体侧壁和支油道、V16的缸孔面、V20的支油道分别在各机体中属于薄壁区域，故铸造工艺设计时应着重考虑避免这些区域产生冷隔、浇不足等缺陷。



1. 缸顶面 2. 汽缸盖螺栓孔 3. 支油道 4. 机体侧壁
5. 油底壳安装面

图2 V12俄罗斯机体的典型截面选取示意图

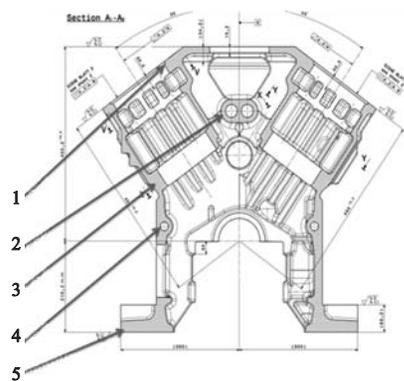
Fig. 2 Schematic diagram of typical cross section selection of V12 Russian engine block



1. 缸顶面 2. 汽缸盖螺栓孔 3. 汽缸盖螺栓孔 4. 缸孔壁
5. 油底壳安装面

图3 V16美国机体的典型截面选取示意图

Fig. 3 Schematic diagram of typical cross section selection of V16 American engine block



1. 汽缸盖螺栓孔 2. 主油道 3. 缸孔壁
4. 支油道 5. 油底壳安装面

图4 V20德国机体的典型截面选取示意图

Fig. 4 Schematic diagram of typical cross section selection of V20 Germany engine block

1.3.2 V型系列机体的孤立热节相似性

由典型截面模数计算分析可见,三种机体最易出现缩孔缩松缺陷的位置除了关键区域外,缸头螺栓孔也是其中之一。三种机体缸头螺栓孔及螺栓孔周边模数的计算结果见表4。

计算结果可见,缸头螺栓孔尺寸基本都大于附近壁厚尺寸,甚至到1倍以上,其蓄热量大而散热面积却远远小于周边壁厚,最易形成孤立热节而出现缩孔缩松等缺陷,且由于其位置结构很难设置补缩冒口,因此也是控制机体铸件质量的工艺设计重点和难点。

1.3.3 V型系列机体的宏观结构相似性

三种柴油机机体都自带凸轮轴孔,只是位置有差异,且自带气腔孔均分布于机体中间顶部的位置,如图5所示。

三种机体的结构分析见表5。由表5可知,三种机体均是V型错排设计,截面均呈八字形,机体结构具有对称性,典型截面模数相似,关键区域和孤立热节位置相似,材料凝固特性及功能使用特性都具有相似性,这些共性特征使得V型系列柴油机机体的铸造工艺原则制定具有共同性。

表3 三种柴油机机体的典型截面附近5 mm高度区域模数计算结果

Table 3 Calculation results of regional modulus of 5 mm height near typical cross sections of three diesel engines cm

典型截面区域	V12	V16	V20
M1	2.3	1.8	1.7
M2	2.0	1.8	1.8
M3	1.8	2.4	2.2
M4	1.2	1.4	1.3
M5	2.0	2.1	2.1

表4 三种柴油机机体的缸头螺栓孔及周边模数计算结果

Table 4 Calculation results of cylinder head bolt hole and peripheral modulus of three kinds of diesel engine blocks cm

机体部件	V12	V16	V20
缸头螺栓孔	2	1.7	1.7
周边板筋	1.28	0.75	0.75

2 整体铸造大型复杂V型系列柴油机机体的铸造工艺规则

在对上述三种大型复杂V型系列柴油机机体的共性特征进行研究的基础上,以机体生产的铸造工艺为基

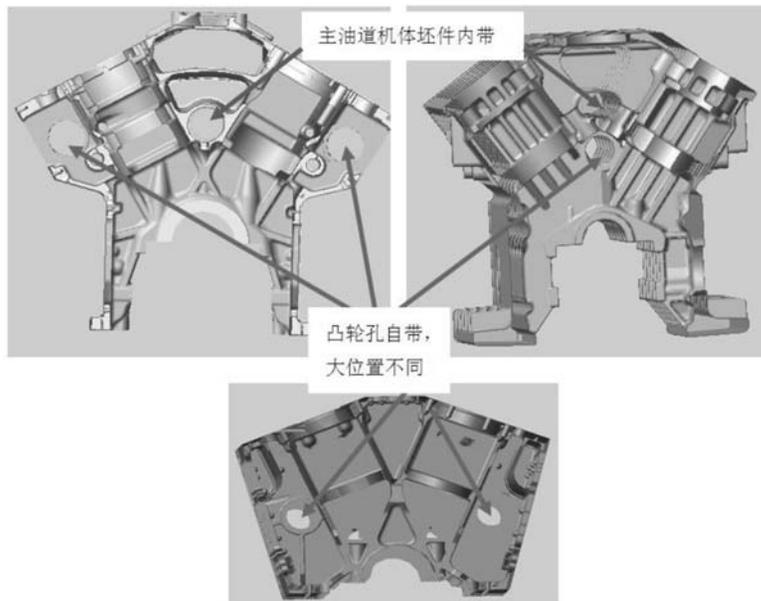


图5 三种柴油机机体的凸轮轴孔及气腔孔位置示意图

Fig. 5 Schematic diagram of camshaft hole and gas cavity hole position of three kinds of diesel engine blocks

表5 三种机体的结构对比
Table 5 The structure comparison of three kinds of engine blocks

机体	机体尺寸/mm	机体重量/kg	缸孔数	缸径/mm	缸孔夹角/(°)	缸排形式	最大壁厚/mm	最小壁厚/mm
V12	1 954 × 1 167 × 1 208	2 850	12	193	60	V型错排	51	12
V16	4 105.4 × 1 276.8 × 920.75	7 840	16	273	50	V型错排	80	13
V20	2 374 × 700 × 670	1 800	20	150	70	V型错排	50	10

础,制定了基于整体铸造V型系列柴油机机体的铸造工艺规则。

(1) V型系列柴油机机体均采用铸铁材质,该材质都具有一定的石墨化膨胀自补缩能力;凝固过程采取整体顺序凝固、局部均衡凝固的工艺原则,以保证机体内部的致密性要求。

(2) V型系列柴油机机体选用中注式和半封闭式浇注系统来保证充型的平稳性,以避免对砂芯产生冲刷,获得较为均匀的温度场;内浇口从机体两侧引入且对称分布,以保证机体实现顺序凝固。

(3) 因缸顶面为机体的重要加工面,故V型系列柴油机机体造型时须将缸顶面置于下方,以保证充型过程中缸顶面有充足的铁液充满型腔,充分补缩以增强致密性。

(4) 由于柴油机机体结构复杂,通常不采用暗冒口进行补缩,故V型系列柴油机机体在工艺设计时,应将冒口置于机体的油底壳安装面。

(5) V型系列柴油机机体的关键区域在气缸孔、轴瓦面、出气腔、油底壳安装等部位,孤立热节也易出现在这些结构附近,因这些部位设置冒口比较困难,故工艺设计时需要辅以随形冷铁以调节孤立热节处的温度场,避免出现缩孔和缩松缺陷。

(6) V型系列柴油机机体造型时,铸型均选用呋喃树脂砂以保证铸型刚度,并充分利用石墨化膨胀提高铸件质量;冒口、冷铁及呋喃树脂砂的选取,可保

证机体局部均衡凝固的实现。

在上述铸造工艺规则指导下,大型复杂V型柴油机机体的铸造工艺示意图如图6所示(以V20为例),浇注系统阻流截面设置在横浇道上,浇注系统典型的各截面积之比为:直浇道:阻流截面:横浇道:内浇道=1.3:1:2:2.5;在油底壳安装面放置冒口,对此处的液态及凝固收缩进行补充,防止缩松缺陷;在其余厚大部位安放冷铁,如图7所示(以V20为例),加快局部冷却速度,形成顺序凝固,防止缩松缺陷。

采用上述工艺规则,为俄罗斯、美国和德国生产出了完全符合性能要求的高品质柴油机机体铸件(如图8所示),且成功实现了大型复杂V型系列柴油机机体的规模化生产,创造了显著的经济效益和社会效益。

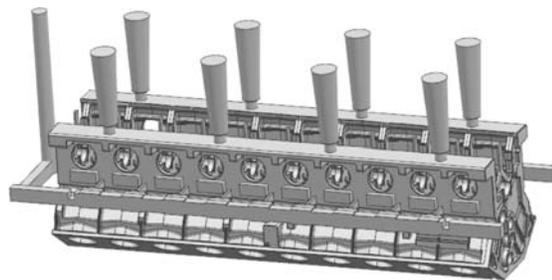


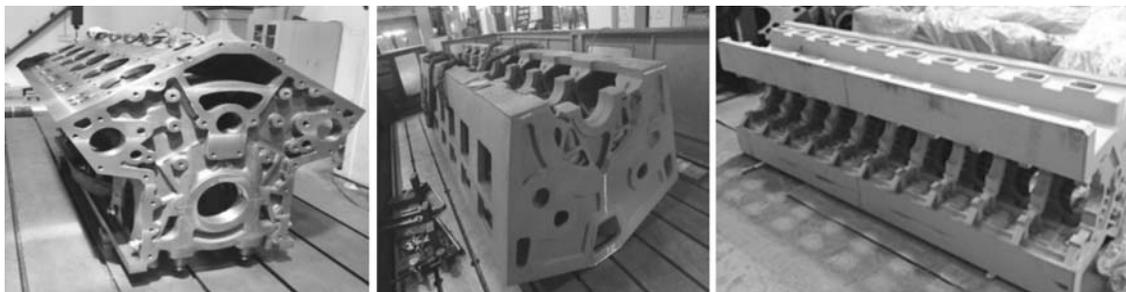
图6 V20柴油机机体的铸造工艺三维图

Fig. 6 Three-dimensional drawing of casting process of V20 engine block



图7 V20柴油机机体的冷铁放置示意图

Fig. 7 Schematic diagram of chill placement of V20 engine block



(a) V12俄罗斯机体

(b) V16美国机体

(c) V20德国机体

图8 三种V型柴油机机体铸件的上漆毛坯图

Fig. 8 Three kinds of V-type diesel engine block castings with the surfaces being covered with paint

3 结论

(1) V12、V16、V20三种大型复杂V型系列柴油机机体的共同关键区域均为气缸孔、空气孔、轴瓦面以及油底壳安装面，它们具有共同的功能特性，也决定了其结构设计具有相似性。

(2) V型系列柴油机机体均选用具有良好铸造性能和力学性能的灰铸铁材质，灰铸铁材料因石墨的析出具备一定的自补缩特性，此种材料共性决定了机体在凝固过程中有利于防止缩孔和缩松缺陷的产生。

(3) 三种机体典型截面区域的最大模数和最小模数间的差距基本都接近1倍；汽缸盖螺栓孔、缸孔面和油底壳安装面的模数在典型截面区域模数中都相对较大，属凝固相对迟缓区，故在铸造工艺设计时应重点考虑避免产生缩孔、缩松等缺陷。

(4) 三种机体的缸头螺栓孔尺寸都大于附近壁厚尺寸，其蓄热量大而散热面积却远小于周边壁厚，最易形成孤立热节而出现缩孔缩松等缺陷；三种机体均是V型错排设计，截面均呈八字形，机体结构具有对称性。

(5) 在大型复杂V型系列柴油机机体共性特征的研究基础上，以机体生产的铸造工艺为基础，制定了基于整体铸造V型系列柴油机机体的铸造工艺规则，并利用该规则实现了大型复杂V型系列柴油机机体的规模化生产。

参考文献:

- [1] 王敏刚, 郭敏, 李骥, 等. 某型船用柴油机机体型内去应力退火探索和实践 [J]. 铸造, 2015 (3): 279-281.
- [2] 王敏刚, 陈晓龙, 谷刚, 等. 消除某大型舰用柴油机机体二次渣缺陷的措施 [J]. 铸造, 2014 (11): 1178-1180.
- [3] 史恩来. 柴油机机体气孔缺陷的消除 [J]. 铸造, 1994 (10): 36-37.
- [4] 朱惠莲, 陆艳红. 车用柴油机特点及其技术发展趋势 [J]. 内燃机, 2006 (6): 1-3.
- [5] 张振生. 柴油机的性能优势与发展方向 [J]. 辽宁省交通高等专科学校学报, 2006 (3): 41-43.
- [6] 孙俊, 黄引平, 马敏团. 柴油机机身铸件数值模拟技术研究 [J]. 热加工工艺, 2012 (23): 61-63.
- [7] 张晓艳. 基于柴油机机体的疲劳应力幅计算方法的研究 [D]. 大连: 大连交通大学, 2010.
- [8] 梁燕成. YC485Q柴油机机体模态分析与结构改进研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [9] CAMPBELL J. A hypothesis for cast iron microstructures [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2009, 40: 786-801.
- [10] 袁森, 魏兵. 铸铁件的树枝晶凝固分析与补缩 [J]. 铸造, 1996 (8): 27-30.

Study on Common Characteristics of Large Complex V-Type Series Diesel Engine Blocks

LU Chen-guang¹, REN Liang-min¹, GAO Chao¹, YANG Gang²

(1. Yibin Push Liandong Technology Co., Ltd., Yibin 644007, Sichuan, China; 2. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract:

In order to make the casting process rules of monoblock casting have guidance, universality and generality in the casting process design and large-scale production of series diesel engine blocks, the common characteristics of three kinds of large and complex V series diesel engine blocks, i.e. V12 Russian engine block, V16 American engine block and V20 Germany engine block, were systematically studied. It is found that the three kinds of engine blocks have common characteristics in function characteristics, material characteristics and structure characteristics; due to the material commonness, function commonness, key area consistency, key modulus similarity, isolated hot spot similarity of the three engine blocks, the types and the producing positions of the main defects in these V-type series diesel engine blocks are the same, which also determine the casting process idea and the process principles of the engine block production to be in the same trend. Therefore, the casting process rules of the monoblock casting V-type series diesel engine blocks are established, and the high-quality large-scale production of the large, complex V-type series diesel engine blocks is realized based on the rule.

Key words:

diesel engine block; common characteristics; functional characteristics; material characteristics; structural characteristics; casting process rules