

基于复杂柴油机机体特征的铸造工艺设计

汪朝志^{1, 3}, 黄 鹏^{1, 3}, 杨 刚², 尹管彬²

(1. 宜宾普什联动科技有限公司, 四川宜宾 645152; 2. 四川大学机械工程学院, 四川成都 610065;
3. 四川省动力零部件制造工程技术研究中心, 四川宜宾 644000)

摘要: 为了提高V型与L型系列复杂柴油机机体柔性化制造的工艺设计效率和铸件生产质量, 以典型的V型J320机体、V16机体及典型的L型K19机体、ZTD100机体为研究对象, 对比研究了V型系列与L型系列复杂柴油机机体的个性特征。研究发现, 两类柴油机机体在气缸排列与气缸盖数量、缸孔夹角与缸孔数量、壁连接与转角过渡等方面均有明显不同, 导致工艺设计时的浇注系统类型和浇注位置放置方式等方面也存在差异。基于V型系列和L型系列复杂柴油机机体的个性化特征进行机体的铸造工艺设计, 提高了机体整体铸造的工艺出品率 and 产品合格率。

关键词: 复杂柴油机机体; V型机体; L型机体; 个性特征; 铸造工艺设计

作者简介:

汪 朝 志 (1988-), 男, 工程师, 主要研究方向为铸造工艺设计。电话: 18283176876, E-mail: wcz@pushlinko.com

通讯作者:

黄 鹏, 男, 硕士, 高级工程师。电话: 15196964924, E-mail: huangpeng@pushlinko.com

中图分类号: TG24

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)

09-1298-06

基金项目:

四川省区域创新合作项目 (2022YFQ0038)。

收稿日期:

2023-09-21 收到初稿,
2023-11-08 收到修订稿。

柴油发动机可为汽车、轮船、工程机械等设备提供动力, 因此是现代工业的基石^[1], 而柴油机机体是柴油发动机气缸的重要支撑和核心骨架。按照气缸的排列方式不同, 柴油机机体可分为V型机体和L型机体。柴油机运行时, 机体要承受拉力、压力、弯曲和扭转等作用, 且一直处于高温环境中, 故机体的工作条件和运行环境非常恶劣, 从而对机体的综合性能要求很高^[2-3]。但是, 柴油机机体因铸件结构复杂、壁厚差异极大、性能要求很高, 因此机体铸造整体难度较大。

近年来, 虽然国内外部分企业已成功整体铸造出了部分型号、大小和结构不同的V型或L型复杂柴油机机体, 但基本上都是针对某一具体型号的机体开展工艺研究或过程控制研究^[4-7], 或是对某一类型柴油机机体的共性特征开展研究^[8-9], 缺乏对V型机体和L型机体的个性特征进行对比分析和对比研究。本项目对V型和L型柴油机机体的个性特征进行对比研究, 有助于提高不同系列机体铸造工艺的设计效率, 便于不同型号机体的柔性化工艺设计和不同类型机体的柔性化生产, 以获得高质量的机体铸件并有效降低机体的生产成本。

1 研究对象的选取

分别选择公司为国内外客户研发生产的两种典型V型柴油机机体和两种典型L型柴油机机体作为研究对象, V型机体为: 美国颜巴赫GE系列的J320机体、德国曼海姆M3016系列的V16机体; L型机体为: 美国康明斯K系列的K19机体、中国玉柴L型的ZTD100机体。其中, 颜巴赫GE系列的J320机体属于中大型柴油机机体, 是绿色发动机的代表性机体, 其燃料可以使用柴油或燃气, 常用于船舶动力和车载动力; 曼海姆M3016系列的V16机体效率高、运营成本低, 是M3016系列中体积和重量最大、气缸孔数量最多、整体铸造难度最大的机体; 康明斯K系列的K19机体结构紧凑、油耗低、经济性好、性能可靠, 广泛应用于工程机械、矿山机械等领域; ZTD100机体形状复杂、薄壁、壁厚差异大, 是玉柴系列机体中极为典型的L型机体。上述型号机体在结构设计、整铸工艺和市场应用方面具有V型和L型机体的典型特征, 故以上述四个型号机体为对象, 对比研究V型系列与L型系列柴油机机体的个性特征。上述四个型号机体的三维模型如图1所示。

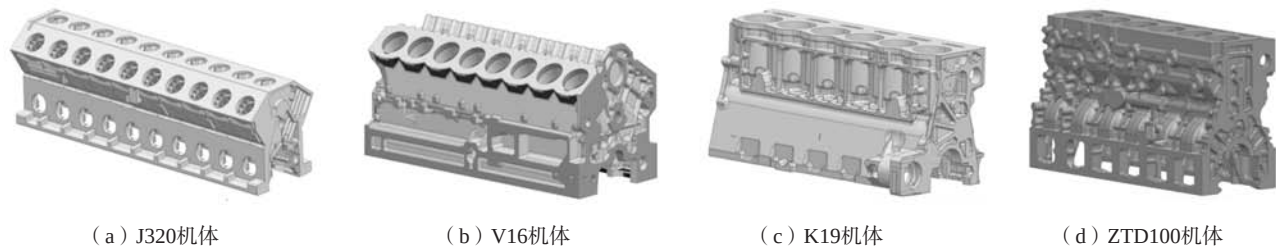


图1 四个型号柴油机机体的三维模型
Fig. 1 Three-dimensional models of four types of diesel engine bodies

2 V型与L型柴油机机体的个性特征对比研究

2.1 气缸排列与气缸盖数量的个性特征

图2为V型机体与L型机体气缸排列方式的剖面示意图。由图可见，V型机体的气缸排列有明显区别：V型机体的气缸排列分两组，每一组呈直线排列，两组气缸以一定夹角布置在一起，使两组气缸形成一个夹角的平面，从侧面看呈V字形，并且需要两个气缸盖；L型机体的气缸布局呈单一直列式，气缸均按同一角度并排成一个平面，并且只有一个气缸盖。

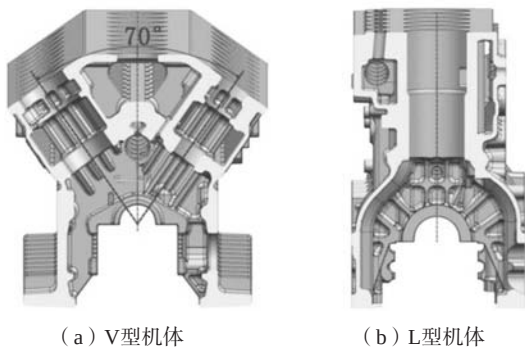


图2 V型机体与L型机体气缸排列示意图
Fig. 2 Schematic diagrams of cylinder arrangements for V-type and L-type engine bodies

机体中，气缸顶面是与气缸盖直接接触的工作面。由图2可见，因V型机体的气缸孔分列两侧，故需要两个气缸盖，两侧气缸孔呈一定角度，燃料在气缸内燃烧释放的作用力主要作用在垂直方向和水平方向。垂直方向的作用力推动活塞向外做功；水平方向的作用力会使机身抖动，但因气缸孔分列机体两侧，

水平方向的作用力几乎可以相互抵消，故工作过程较为平稳。装配时需将两个气缸盖分别装配到两侧的气缸顶面，因气缸分列机体两侧面，故缩短了机体长度、减小了柴油机体积，但其排列方式导致机体结构复杂，制造难度和生产成本都较高。L型机体的缸孔成一条直线排列，只需一个气缸盖，故机体的构造相对于V型机体更简单且生产成本较低，对燃料消耗较少，但因所有缸孔均沿一条直线排列，导致机体长度大大增加，机体所占体积也相应增加，且气缸内燃料燃烧释放的作用力在水平方向会对机身造成一定冲击，使得L型机体工作过程的平稳性较差。

2.2 缸孔夹角与缸孔数量的个性特征

上述四个型号机体的坯件尺寸、缸孔夹角、缸孔数量、缸孔内径等参数如表1所示。J320机体是四个型号机体中尺寸最大、缸孔数最多、质量最大的机体，与同为V型系列的V16机体相比，J320机体的缸孔夹角比V16机体大 10° ，缸孔数多4个，缸孔径大12 mm，机体重大约1倍。由此可见，虽然V16机体只比J320机体少4个缸孔，但是机体尺寸相差非常大，两个型号机体结构上存在较大差异，V16机体的结构更紧凑且缸孔间距较小；K19机体和ZTD100机体同为L型机体，机体尺寸相差不大，其缸孔数量与V型机体相比均要少很多，因其气缸排列在一条直线上，因此没有缸孔夹角，且缸孔数都为6个，但两个型号机体质量相差150 kg，可见ZTD100机体的结构更紧凑。

2.3 壁连接与转角过渡的个性特征

机体的壁连接状态会影响金属液在型腔内的流

表1 四个型号机体的相关参数
Table 1 Relevant parameters of four models of engine bodies

型号	坯件外形尺寸/mm	缸孔夹角/ $^{\circ}$	缸孔数/个	缸孔径/mm	机体质量/kg	浇注质量/kg
J320	2 374 × 700 × 670	70	20	150	1 672	2 550
V16	1 419 × 594 × 607	60	16	138	800	1 200
K19	1 227 × 559 × 599		6	170	460	650
ZTD100	1 213 × 427 × 673		6	162	640	800

动情况,转角处的过渡连接方式则直接影响金属液的流速和型腔冲刷力。直角过渡(包括锐角过渡)连接结构,容易对金属液的流动造成一定阻碍。若流速过大,易造成金属液飞溅,而飞溅的金属液易困气或裹气,从而在机体表面或内部产生气孔缺陷;圆弧角或大钝角过渡连接,可以平缓金属液流以避免金属液飞溅,且利于气体和浮渣的排出,可有效避免粘砂、夹渣、砂眼和气孔缺陷的产生。基于上述原因,本研究四个型号的柴油机机体均采用圆弧角或大钝角过渡

连接,但不同机体、不同区域所设计的圆弧角度或大钝角角度仍各有不同。

J320机体和V16机体的过渡连接示意如图3所示,图中红框中的位置分别是J320机体和V16机体的缸孔面和地脚板的过渡连接,两型号机体在这两个位置的过渡方式和过渡圆角角度不同;同样,机体其他区域的壁连接也存在差异。由于壁连接差异的存在,使得金属液在型腔中的流动情况和温度场必然不同,所以机体的铸造工艺参数设计也会不同。

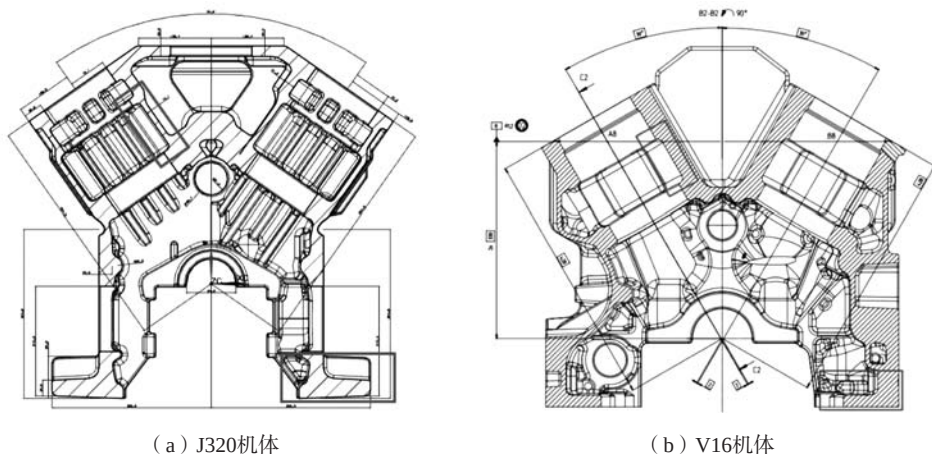


图3 两个型号V型机体的过渡连接示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of transitional connections for two model V-type engine bodies

L型机体的K19机体和ZTD100机体的壁连接示意如图4所示。可见, K19机体和ZTD100机体在轴瓦过渡连接处的过渡方式和过渡角度都不相同,其他部位的过渡连接也存在差异,故两个型号机体在铸造工艺设计时的相关参数也会有所不同。

3 基于个性特征的机体铸造工艺设计

3.1 铸造工艺设计总体分析

V型的J320机体,其主油道位于缸孔夹角之间,浇注时高温金属液对油道砂芯的烘烤时间长,容易产生气体而极易出现气孔缺陷。同时,该机体油道位置的壁厚大,汇聚于此处的金属液体积大,但因散热面积小而极易出现孤立热节,从而产生缩孔缩松缺陷。

此外,因温度场分布不均匀而存在高温与低温的过渡带,使得容易产生使机体发生变形的内应力,且不利于后续去应力操作而容易残留较大的应力。因此, J320机体在铸造工艺设计时,需要设计合理的浇注系统,并在不利于设置冒口补缩的位置通过设置冷铁以调节温度场。

V型的V16机体,其水道芯细长,在浇注过程中容易被流速过快的金属液冲击变形,导致水道内部产生穿皮缺陷或者引起壁厚尺寸改变。此外, V16机体的支油道与气缸孔之间的壁厚较薄,壁厚位置公差要求非常重要。

L型的K19机体,其龙门壁两侧结构多变,将机体龙门壁侧面向下放置进行浇注时,金属液从龙门架一

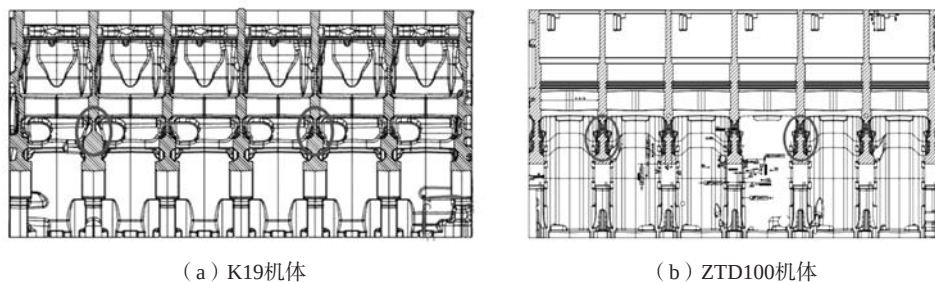


图4 两个型号L型机体的过渡连接示意图

Fig. 4 Schematic diagrams of transitional connections for two model L-type engine bodies

侧流向缸孔面一侧,因龙门壁侧面的特殊结构导致金属液在型腔底部充型时液面上升不够平稳,有轻微的紊流现象;而龙门壁另一侧面朝上放置,此侧面存在大壁厚区域,为防止缩孔缩松缺陷的产生,工艺设计时需在这几个大壁厚区域设置补缩冒口。

L型的ZTD100机体,其地脚板壁厚大,容易产生缩孔缩松缺陷,故铸造工艺设计时应考虑对地脚板的补缩。由于该机体两侧面结构复杂,放置于顶部的侧面容易排气不顺而导致困气,故工艺设计时需将机体侧放进型腔,根据置于顶部的侧面结构设置排气装置。

V型机体一般左右对称,故浇注系统设计时应充分利用对称性将金属液从机体两侧分散引入型腔,尽量避免液流紊乱,以保证金属液在型腔中平稳上升;L型机体总体上也是左右对称的,但因使用要求或吊装要求,机体两侧面的结构并不相同,浇注系统设计时应考虑如何引入金属液以获得良好的充型效果,故铸造工艺设计时应将内浇道设置在同一侧的不同高度,冒口及排气系统也应根据两侧的结构特性进行合适的设计。

根据以上分析,总结和构建V型与L型柴油机机体整体铸造的工艺思想和设计准则如下:

- 1) 机体造型浇注位置选取原则——为保证机体的重要加工面质量,造型时两种机体均应倒置于砂型中;
- 2) 凝固方式设计原则——整体顺序凝固、局部均衡凝固;
- 3) 铸型刚度保证原则——造型时型砂均选用呋喃树脂砂以保证铸型刚度;
- 4) 孤立热节调节原则——在缸孔面、出气腔、轴瓦面及油底壳安装面等易出现孤立热节附近,设置冷铁以调节温度场;
- 5) 平稳充型控制原则——通过设计合理的浇注温度、截面比、浇口个数、浇口位置和排气系统,以实现铁液的平稳充型和温度场的均匀分布。

3.2 具体铸造工艺设计

基于上述工艺思想和设计准则,以V型的V16机体和L型的ZTD100机体为例,进行V型与L型柴油机机体

整体铸造的工艺设计。

(1) 浇注位置和分型面选择。V16机体造型时,将机体的气缸顶面朝下、地脚板朝上倒置于型腔中进行造型,其分型面位置如图5a所示,采用上、中、下三箱造型。ZTD100机体造型时,将机体模型侧放于型腔中,分型面开设在机体中间,其分型面位置如图5b所示,采用两箱造型。

(2) 浇注系统设计。V16机体材质为HT350,选择中注式浇注系统;根据其尺寸和质量,设计浇道截面积比值关系为 $\sum A_{直} : \sum A_{横} : \sum A_{内} = 1 : 1.87 : 1.82$,机体的浇注时间为30 s、阻流截面积为3 848 mm²;为了分散引入金属液,在机体两侧各设置1条横浇道;为了使金属液分散流入型腔,在2条横浇道上各开设7条分散布置的内浇道;在直浇道上设置阻流截面,实现初步挡渣并将部分浮渣挡在内浇道之前,且在每条内浇道上均设置过滤网以实现更好的挡渣效果;为实现良好的补缩,在地脚板两侧各设置4个补缩冒口,冒口间补缩距离为343 mm;为了获得良好的排气效果,在两侧的地脚板均布10根排气棒,冒口和排气棒间距为172 mm。机体的部分铸造工艺参数如表2所示,机体的铸造工艺三维模型如图6a所示。

ZTD100机体材质为HT250,浇注系统选择带反直浇道的阶梯式浇注系统;根据机体的尺寸和浇注质量,设计机体浇注系统的浇道截面积比值为 $\sum A_{上直} : \sum A_{上横} : \sum A_{反内} : \sum A_{反直} : \sum A_{下直} : \sum A_{下横} : \sum A_{下内} = 1.69 : 1 : 1.25 : 1.16 : 1.15 : 1.34 : 1.52$;机体的上横浇道横截面积最小,故上横浇道的横截面是阻流截面,阻流截面积为4 173 mm²、浇注时间为25 s;为了获得良好的排气补缩效果,在侧放机体上方的龙门壁一侧的关键位置设置冒口和排气棒。机体的部分铸造工艺参数如表3所示,机体的铸造工艺三维模型如图6b所示。

(3) 工艺模拟分析。V16机体浇注过程中,型腔内不同高度的充型时间分布如图7a所示。由图可见,金属液在直浇道底部分散向两侧的横浇道流动,经过阻流截面阻流挡渣后依次流向各条内浇道。充型过程中金属液平稳上升,充型效果好。

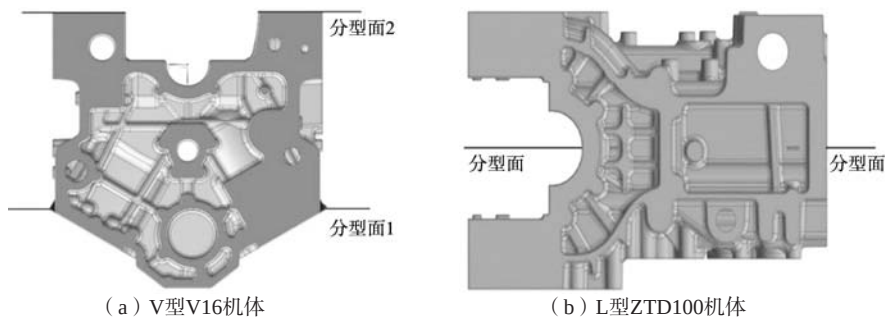


图5 两个型号机体的浇注位置和分型面设计

Fig. 5 Designs of pouring positions and parting lines of two model engine bodies

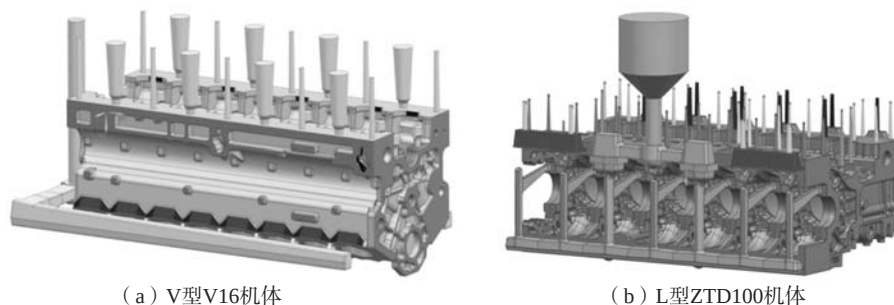


图6 两种机体的铸造工艺三维图
Fig. 6 Three-dimensional schematic diagrams of the casting process of two model bodies

表2 V16机体的部分铸造工艺参数
Table 2 Part parameters of the casting process of V16 body

名称	尺寸/mm	数目/个	截面积/mm ²
阻流截面	Φ70	1	3 848
直浇道	Φ70	1	3 848
横浇道	45 × 80	2	7 200
内浇道	50 × 10	14	7 000
明冒口	Φ80	8	
暗冒口	Φ80	18	
排气棒	Φ25	10	

表3 ZTD100机体的部分铸造工艺参数
Table 3 Part parameters of the casting process of ZTD100 body

名称	尺寸/mm	数目/个	截面积/mm ²
上直浇道	Φ60	1	2 826
下直浇道	Φ34	2	1 923.25
反直浇道	18.5 × 21	5	1 942.5
上横浇道	38.5 × 43.5	1	1 674.75
下横浇道	45 × 50	1	2 250
下内浇道	8 × 45.5	7	2 548
反内浇道	10 × 30	7	2 100

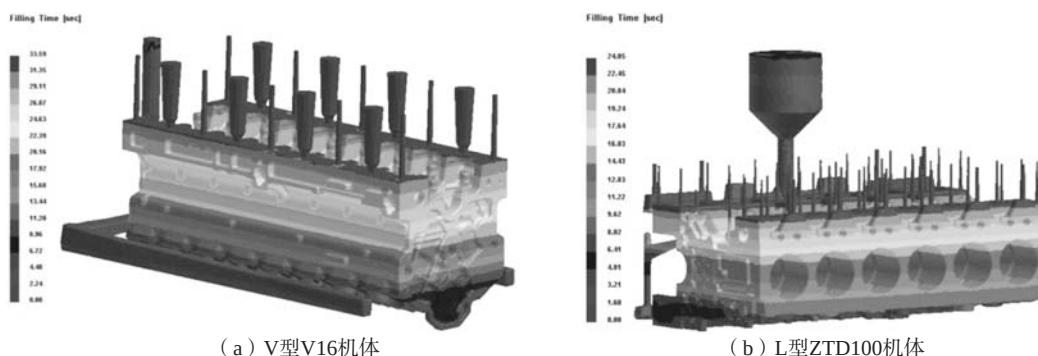


图7 两种机体的充型时间分布数值模拟
Fig. 7 Numerical simulation of the mold filling time distribution of two model bodies

ZTD100机体浇注过程中，充型时间分布如图7b所示。由图可见，同一充型时刻，金属液的液面高度基本保持一致，即液面上升平稳，未出现紊流现象，金属液在型腔内的充型状况良好，可见铸造工艺设计合理，工艺性好。

V16机体的缩孔缩松缺陷预测分布如图8a所示，由图可见，缩孔缩松缺陷全部分布在冒口和排气棒内，铸件内部质量良好，铸件内没有缩孔缩松缺陷出现。ZTD100机体的缩孔缩松缺陷预测分布如图8b所示，由图可见，铁液完全凝固后，铸件内部没有缩孔缩松缺陷产生。

将上述设计的铸造工艺应用于铸件的实际生产中，生产出的机体铸件质量优良，各项性能指标完全符合要求，机体整体铸造的工艺出品率达到80%、产品

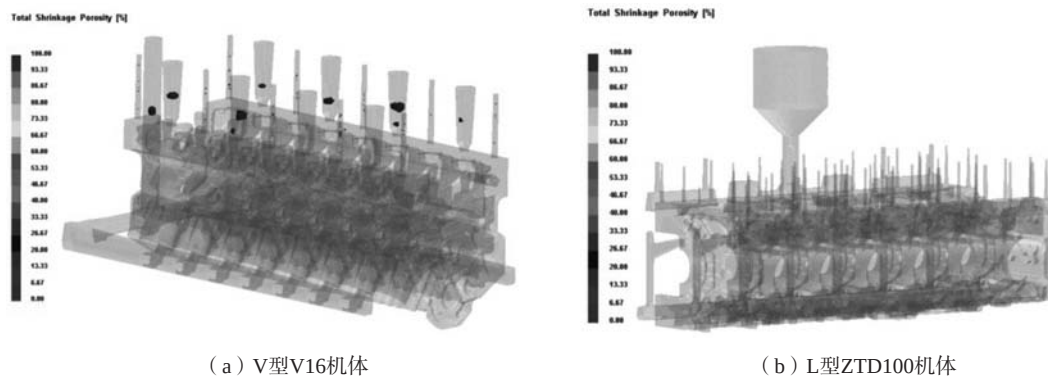
合格率达到98%。

4 结论

(1) V型与L型两类柴油机机体在气缸排列与气缸盖数量、缸孔夹角与缸孔数量、壁连接与转角过渡、缺陷形成与工艺要求等方面，均有明显不同的个性特征差异。

(2) 根据两类机体的结构不同，V型机体可选用中注式浇注系统，以保证充型的平稳性，避免对砂芯产生冲刷，可获得较为均匀的温度场；L型机体可采用带反直浇道的阶梯式浇注系统，以保证充型过程的平稳性并可避免冲砂和卷气。

(3) V型机体造型时，可将机体的重要加工面即



(a) V型V16机体

(b) L型ZTD100机体

图8 两种机体的缩孔缩松缺陷数值模拟

Fig. 8 Numerical simulation of the porosity and shrinkage of two model bodies

缸顶面朝下、油底壳安装面朝上置于型腔中，以保证缸顶面有充足的铁液充满型腔并充分补缩；L型机体造

型时，可将机体模型倒放于型腔中，并在机体侧面上分散安放排气棒以增加排气和补缩效果。

参考文献：

- [1] 张霞, 张博琦, 夏鸿文. 柴油机后处理技术发展现状 [J]. 交通节能与环保, 2014, 10 (5): 28–32.
- [2] TIWARI A K, MANDLOI R K. Impact of diesel engine technology advancement on particulate exhaust emission- a review [J]. International Journal of Vehicle Structures & Systems, 2019, 11 (5): 608–613.
- [3] DU Yu, QIAN Cheng, ZHAO Yue, et al. Numerical simulation of pressure fluctuation in high-pressure common-rail fuel injection system [J]. American Journal of Mechanical and Industrial Engineering, 2019, 4 (3): 45–51.
- [4] 贾万军. V型船用发动机气缸体铸件排气技术的应用 [J]. 铸造工程, 2021, 45 (3): 23–26.
- [5] 毛平安, 黄第云, 蓝宇翔, 等. 大功率V型柴油机主轴承座结构强度模拟分析 [J]. 柴油机, 2019, 41 (4): 30–34.
- [6] 张永青, 齐建, 秦鹏, 等. 大型直列柴油机机体气孔缺陷解决 [J]. 中国铸造装备与技术, 2019, 54 (4): 45–48.
- [7] 尹管彬, 贾建军, 杨刚, 等. TDV100柴油发动机缸体的铸造工艺设计 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (9): 780–783.
- [8] 鲁晨光, 任良敏, 高超, 等. 大型复杂V型系列柴油机机体的共性特征研究 [J]. 铸造, 2020, 69 (7): 692–697.
- [9] 尹管彬. V型与L型系列柴油机机体铸造工艺研究及规模化生产 [D]. 成都: 四川大学, 2022.

Casting Process Design Based on the Characteristics of Complex Diesel Engine Bodies

WANG Chao-zhi^{1,3}, HUANG Peng^{1,3}, YANG Gang², YIN Guan-bin²

(1. Yibin Pushi Linkage Technology Co., Ltd., Yibin 645152, Sichuan, China; 2. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 3. Sichuan Provincial Power Parts Manufacturing Engineering Technology Research Center, Yibin 645152, Sichuan, China)

Abstract:

In order to improve the process design efficiency and casting quality of the flexible manufacturing of V-type and L-type series complex diesel engine bodies, the typical V-type J320 body, V16 body, typical L-type K19 body and ZTD100 body were taken as the research objects, and the individual characteristics of V-type series and L-type series complex diesel engine bodies were investigated comparatively. It is found that the two types of diesel engine bodies are significantly different in terms of cylinder arrangement and the number of cylinder heads, cylinder bore angle and cylinder bore number, wall connection and corner transition, etc., resulting in differences in the types of gating systems and the placement of pouring position in process design. Based on the individual characteristics of the V-type series and the L-type series complex diesel engine bodies, the casting process design of the body was carried out, which improved the process yield rate and product qualification rate of the overall casting of the body.

Key words:

complex diesel engine body; V-type body; L-type body; individual characteristics; casting process design