

高性能复杂柴油发动机缸盖铸造工艺研究

李泽华¹, 冯志军¹, 李宇飞¹, 辛世伟¹, 刘文龙¹, 刘丹¹, 马英博¹, 胡定云²

(1. 沈阳铸造研究所有限公司, 辽宁沈阳 110022; 2. 中国北方发动机研究所, 天津 300000)

摘要: 针对ZL702A复杂柴油发动机缸盖开展快速研制。通过缸盖铸件热分析, 设计砂型反重力铸造工艺, 并对铸件充型凝固过程温度场进行模拟, 采用3DP技术快速制备砂型、砂芯, 完成了缸盖毛坯快速试制。分析了铸件内腔孔隙形成原因, 提出了缸盖孔隙缺陷解决方案并通过实际浇注结果进行验证。对铸件本体组织、缺陷和性能进行了统计分析, 随着铸件本体二次枝晶臂距从21 μm 增加至56 μm , 本体抗拉强度降低25 MPa, 屈服强度降低6 MPa, 伸长率也从8%降低至4.5%。当二次枝晶臂距在40~45 μm 内, 针孔等级从0上升至5级时, 合金抗拉强度、屈服强度、伸长率均逐步降低, 最大降幅分别为25 MPa、29 MPa、3.5%。

关键词: 缸盖; 铸造工艺; 针孔缺陷; 二次枝晶臂距; 力学性能

随着全球汽车工业的快速发展, 轻量化和低油耗已经成了家用汽车的主要目标, 铝制发动机相比于铸铁具有诸多优势, 已经得到汽车工业市场的广泛认可^[1]。在高端武器装备领域, 战车机动性和作战半径指标的提升, 对于能够承受高爆发压力、具备高升功率和升扭矩的铝制柴油发动机提出迫切需求^[2]。战车用高端铝制柴油发动机与普通汽车用铝制发动机相比, 既要求发动机承受14 MPa以上的高爆发压力, 保证热负荷及机械负荷不超过铝制发动机所能承受的上限, 又需要承受热冲击和冲击载荷作用下的高频次振动, 满足700 h以上的使用寿命^[3]。因此, 战车用铝制柴油发动机整体结构尤为复杂, 内部质量、力学性能和疲劳性能等各方面要求相比于铝制汽车发动机更为严苛。

作为发动机的重要组成部分, 缸盖是发动机上的重要工作部件, 包含了油道、冷却水套、气道等关键的功能空间, 上部有凸轮轴, 下部与气缸体、活塞组成燃烧室, 工作条件恶劣, 对尺寸精度及力学性能要求较高, 且铸件结构复杂、壁厚不均, 属于典型的薄壁复杂铸件^[4]。相比于民用汽车发动机, 某型战车用铝制柴油发动机缸盖采用更为复杂的设计方案, 缸盖整体冶金质量要求满足I类铸件技术标准, 且铸件性能要求本体抗拉强度330 MPa以上, 伸长率3%以上, 气道壁抗拉强度250 MPa以上, 伸长率3%以上, 同时为了满足缸盖疲劳强度要求, 铸件气道壁和火力面针孔仅允许2级。本文针对ZL702A复杂柴油发动机缸盖开展快速研制。

1 工艺方案

1.1 高性能铝合金缸盖毛坯设计

战车用柴油发动机结构为V字型对称排布, 左右缸盖结构完全对称, 传统左/右缸盖毛坯、模具均为独立设计, 周期长、成本高, 为便于开展研制、加工和装机试验, 对左/右缸盖结构进行整合设计, 考虑到缸盖各缸中油道、冷却水套及进/排气道等结构特征均完全相同, 仅两端结构存在差异, 将左右缸盖零件集成设计为同一毛坯结构件, 实际加工时, 仅需要针对性的加工两端结构, 即可得到左/右缸盖零件, 集成设计后的缸盖毛坯数模如图1所示。

作者简介:

李泽华(1991-), 男, 硕士, 主要研究方向为铝镁合金材料开发及铸造工艺技术研究。E-mail: 407222678@qq.com

通讯作者:

冯志军, 男, 研究员, 博士生导师。电话: 024-25282725, E-mail: 13909816093@139.com

中图分类号: TG292

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2022)

10-1299-06

收稿日期:

2022-01-04 收到初稿,

2022-05-18 收到修订稿。



(a) 左缸盖零件图

(b) 右缸盖零件图

(c) 集成设计的缸盖毛坯

图1 缸盖毛坯集成设计

Fig. 1 Integrated design of the cylinder head blank

1.2 缸盖合金材料选择

当前国内外常用铝合金缸盖材料主要为Al-Si系合金，材质选择上常见的有ZL101A (A356、G-AlSi7Mg)、ZL104 (AC4B日)、ZL106 (328.0美)、ZL107、和A-S5U3 (法)合金等^[5]，此外，ZL111 (A354)合金是向传统Al-Si合金中加入Cu、Mg强化元素，经热处理后获得更高的强度，因此也被用作发动机缸盖材料之一^[6]。

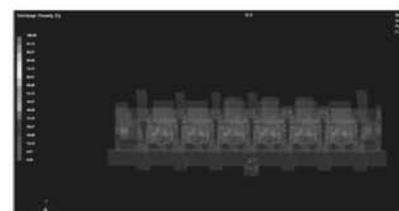
战车用柴油发动机缸盖不但要求更高的热强性，还应有良好的塑性。陈继森^[7]等在缸盖材料ZL111基础上进行成分优化，降低Si含量至6%~8%，调节Cu含量1.3%~1.8%，控制Mg含量0.3%~0.5%，加入Ti、B、Zr元素细化晶粒，利用Sr元素进行Si变质，最终获得了耐热性高、强韧性好的新型铸造铝合金ZL702A。将ZL702A应用于大马力柴油机缸盖，缸盖使用寿命比ZL101合金缸盖大幅延长。由此，本文柴油机缸盖选择ZL702A合金作为缸盖材料，ZL702A合金成分如表1所示，与其他缸盖材料性能对比如表2^[5, 7-8]所示。

1.3 铸造工艺设计和模拟分析

根据战车柴油机缸盖结构及使用时的工况，综合考虑铸件生产效率和出品率，选择反重力铸造成形工艺保证缸盖铸件内部质量和力学性能。利用PROCAST对缸盖毛坯进行热分析，从图2中可以看出，铸件热节集中于缸盖上下端面厚大区域。在铸件热节上方位置放置冒口进行补缩，侧向搭配冷铁以提高冒口周边冷

表1 ZL702A合金成分
Table 1 Composition of the ZL702A alloy w_B /%

Si	Cu	Mg	Mn	Ti	Al	杂质Fe
6~8	1.3~1.8	0.3~0.5	0.1~0.3	0.1~0.25	余量	≤0.35



(a) 低压反重力铸造凝固过程温度场分布图

(b) 低压反重力铸造合金凝固顺序

(c) 缩松判据下铸件低压铸造工艺内部收缩缺陷

图3 铸造工艺仿真模拟分析

Fig. 3 Simulation analysis of the casting process

表2 缸盖用不同材质铝合金室温典型性能
Table 2 Typical properties of Al alloys for the cylinder head at room temperature

序号	合金牌号	R_m (常温) /MPa	$R_{p0.2}$ /MPa	A /%	热处理状态	铸造方法
1	ZL101A、A356、G-AlSi7Mg	275	185	5.0	T6	金属型铸造
2	ZL106、328.0	265	160	2.0	T6	金属型铸造
3	ZL104、AC4B	255	195	4.0	T6	砂型铸造
4	ZL107	275	185	3.0	T6	金属型铸造
5	ZL111、A354	380	285	6.0	T6	金属型铸造
6	ZL702A	372		8.0	T6	金属型铸造

却速度，增大冒口补缩效果。在火力面进/排气道中心区域设置内浇道，调节凝固后期铸件整体凝固顺序，并利用浇口压力补缩。在铸件其他孤立热节位置侧向放置冷铁，使其与周围薄壁区域同时凝固。对上述工艺再次进行模拟，模拟结果如图3所示，铸件凝固过程温度场和凝固顺序分布合理，铸件本体并未出现任何收缩缺陷，最后凝固区域和收缩缺陷均位于浇、冒口区域，工艺设计较为合理。

2 砂型/芯设计及快速制备

缸盖冷却水道和进/排气道均为异形曲面结构，壁

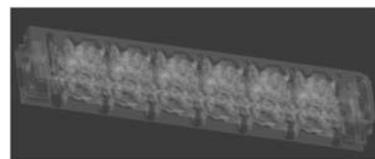


图2 铸件热节区域分析

Fig. 2 Analysis of hot spot area of the casting

厚变化大,拐角、扭曲区域众多。气道与上、下水道之间互不联通,最薄处3 mm,对砂芯尺寸和位置关系要求严格。传统方法需将缸盖内部上/下层水道及进/排气道分开(图4),并设计独立模具。模具加工难度大、时间长,不利于工艺改进。砂芯之间组型定位难度大,铸件生产成本低,研制周期长。本研究利用3D打印技术,直接生产砂型和砂芯。省略了制模环节,缩短产品生产周期,直接制作任意复杂形状的砂型,不受模具加工工艺限制,并且保证砂型精度。

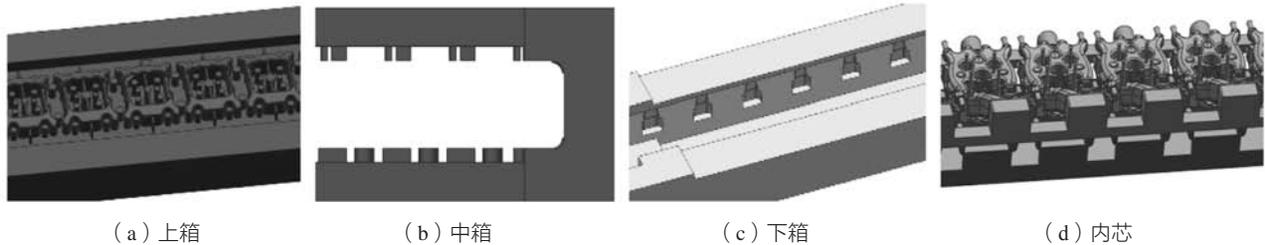
将缸盖外皮砂型划分为上、中、下三层,逐层采



(a) 缸盖单缸冷却水道 (b) 缸盖进/排气道

图4 传统方法生产的缸盖内腔砂芯

Fig. 4 Sand core of the cylinder head produced by traditional method



(a) 上箱

(b) 中箱

(c) 下箱

(d) 内芯

图5 铸型和砂芯设计方案

Fig. 5 Design of mold and sand core

表3 激光烧结和喷墨打印8字试样性能平均值对比
Table. 3 Comparison of average performance values of the laser sintering and inkjet printing 8-character samples

项目	激光烧结试块	喷墨打印试块
平均发气量/(mL·g ⁻¹)	11.3	9.8
抗拉强度/MPa	3.2	2.1

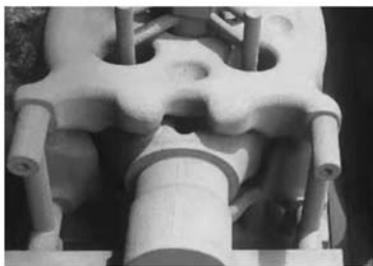


图6 采用激光烧结制备的缸盖砂芯

Fig. 6 Cylinder head sand core prepared by the laser sintering

用整体3D打印,将上/下水道和进/排气道砂芯端头外延整合为两侧芯头,并在进/排气道砂芯底部端面增设整体砂块,直接制备一体化内芯。提升整体缸盖砂芯尺寸精度和强度,避免组型和浇注过程折断,铸型和砂芯设计方案如图5所示。

内芯是缸盖铸件成形的关键,由于曲面结构复杂,存在多处细小薄弱区域,反重力铸造成形过程中受铝液冲刷及浮力作用,局部易折断。砂芯受热发气被高温铝液包裹难以及时排出,产生呛火缺陷。因此,砂芯的强度和发气量十分关键,本实验将3组激光烧结8字试样和喷墨打印8字试样分别进行拉伸和发气量检测,求取性能平均值(见表3)。并将两块8字试样压入装有710℃铝液的浇包底部,对比两试样发气量差异。

通过表3实际检测数据比较看出,激光烧结砂芯强度较喷墨打印高52%,发气量高15.3%。实际铝液浸泡中两种砂芯均会形成较大的气泡并上浮至液面。综上,采用激光烧结方式制备缸盖复杂砂芯(如图6),针对砂芯发气问题,需从砂芯结构设计方面和增强排气两方面进一步优化。

3 缸盖内腔孔隙缺陷及组织性能分析

3.1 缸盖内腔孔隙缺陷分析

对浇注的铸件进行解剖并探伤,未发现缩松、缩孔等缺陷,但气道壁和冷却水道侧壁均出现大量孔隙,根据ASTM E—155标准判定为针孔3~4级,如图7所示,箭头所指区域为铸件内部孔隙缺陷位置和范围。采用荧光检测(图8)也能够较好地观察到铸件孔隙缺陷情况,铸件内腔呈现出大面积荧光点状显示。

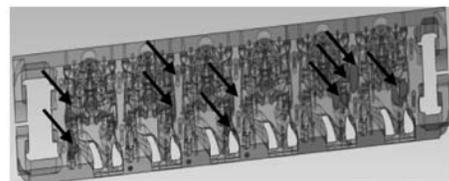


图7 铸件内腔针孔位置

Fig. 7 Position of the pinhole in inner cavity of the casting

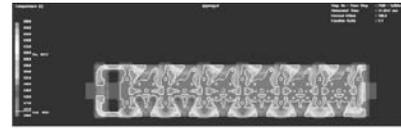


图8 气道壁荧光检测结果

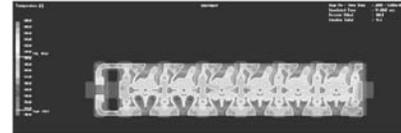
Fig. 8 Fluorescence detection results of the airway wall

汪紫亮等认为^[9], 缸盖铸件常出现析出性针孔, 主要形成原因是合金中杂质元素、氢含量高, 以及熔体浇注温度高, 凝固时固液前沿过饱和区域凝固时间长等。通过对铸件各缸凝固过程的温度场进行模拟仿真(图9), 发现除两端最外侧区域外, 各缸孔隙缺陷位置温度场分布基本相同, 均处于较晚凝固区域。但相比于孔隙缺陷位置, 铸件各缸相临厚大区域凝固时间更长, 该区域虽有点状显示, 却并未出现大面积荧光反应。上述现象表明, 铸件内腔孔隙除针孔外, 还可能存在其他缺陷。

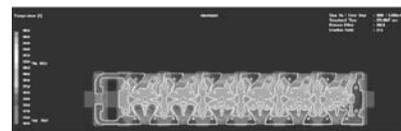
对孔隙区域取样, 采用分辨率 $35\ \mu\text{m}$ 的显微CT设备对肉眼可见的孔隙缺陷(如图10a)进行检测, 发现孔隙大小呈梯度分布(如图10b), 试样表层 $1\ \text{mm}$ 范围孔隙较大, 判断为皮下气孔; 距表层 $1\sim 5\ \text{mm}$ 左右区域孔隙直径 $0.2\sim 0.4\ \text{mm}$; 其他孔隙尺寸在 $0.1\sim 0.2\ \text{mm}$ 。试样中心区域孔隙分布密集(图10c), 外表面数量明显减少。从孔隙体积统计分布图(图11)看出, 孔隙体



(a) 铸件充型凝固过程41 s时温度场模拟结果



(b) 铸件充型凝固过程91 s时温度场模拟结果



(c) 铸件充型凝固过程191 s时温度场模拟结果

图9 缸盖针孔区域温度场模拟结果

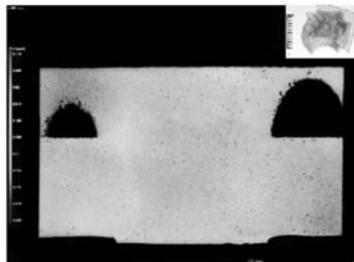
Fig. 9 Simulation results of the temperature field in the pinhole area of the cylinder head

积大小集中在 $0.002\ \text{mm}^3$ 附近, 孔隙总体积占总试样体积 0.19% 。根据CT检测结果, 将铸件内腔出现的孔隙缺陷分为两类: 一类为皮下气孔, 主要分布在表面及皮下 $5\ \text{mm}$ 以内; 另一类为分布在铸件内部的针孔缺陷。上述两种孔隙缺陷同时影响铸件探伤针孔缺陷评价等级。

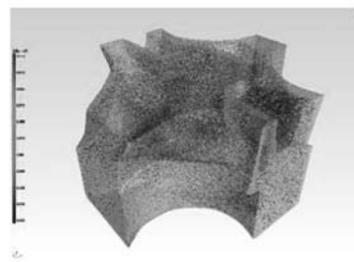
结合缸盖铸件生产经验, 孔隙的组成和分布规律与砂芯、涂料发气有一定关系。浇注过程中砂芯及涂料受热产生的气体在铝液表面张力作用下, 趋向于



(a) 试样形貌



(b) 孔隙2维平面分布图



(c) 孔隙三维空间分布图

图10 试样中2维及3维孔隙分布图

Fig. 10 Distributions of the 2D and 3D pores in the sample

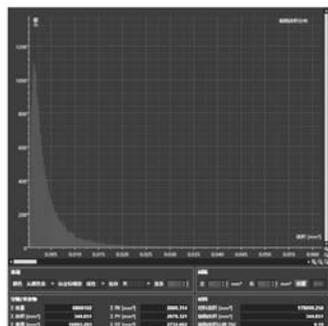


图11 孔隙体积统计分布图

Fig. 11 Statistical distribution of the pore volume

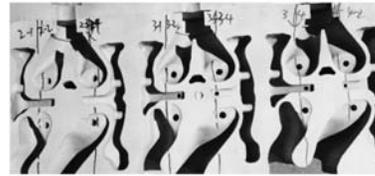
附着在砂芯表面形成气膜, 阻碍铝液和砂芯间的热传导, 延长过饱和固溶体区域凝固时间, 导致过饱和固溶体中富集的大量氢元素在杂质元素和共晶相区域析出, 在内部形成密集针孔。同时, 随着气体压力逐渐增大, 部分气体突破铝液表面张力进入内部, 在气道壁内形成皮下气孔。

3.2 铸造工艺改进

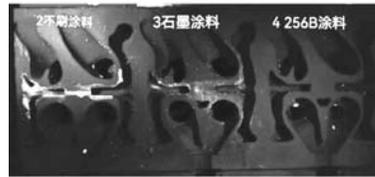
针对缸盖内腔孔隙形成原因, 对铸造工艺进行改进: ①采用熔体复合处理工艺, 在氩气旋转喷吹同

时，加入精炼变质一次处理剂，精炼完成后迅速降低铝液温度至690 ℃，并在20 min内完成反重力铸造，减少熔体含氢量；②砂芯内部设计排气通道，采用负压抽气方案，使砂芯受热分解后形成的气体基本全部排出，防止形成大面积气膜或进入合金内部形成皮下气孔；③优选砂芯涂料，减少涂料发气，加快冷却速率；④调节浇注工艺参数，降低浇注温度、充型速度，增加结壳时间，下调结壳、结晶压力，提升铸件凝固结壳强度，阻止气体侵入。工艺改进后铸件荧光检测结果见图12。对比看出，铸件气道壁表面孔隙有明显改善，表明上述工艺改进取得良好效果。

基于图9中模拟结果可知，各缸凝固温度和凝固速度无明显差异。在新工艺条件下，将不刷涂料、涂刷石墨涂料、醇基锆英粉涂料的3种砂芯成形情况进行比较，图12荧光结果表明，不刷涂料的内腔皮下气孔更少。对各缸相同区域进行取样进行低倍检测（图13），其中2#试块（不刷涂料气道壁试块）针孔等级为1级，3#试块（涂刷石墨涂料）和4#试块（醇基锆英粉涂料）针孔等级均评为2级，3#试块无皮下气孔存在，4#试块存在一处皮下气孔。上述现象表明：砂芯表面涂



(a) 第2件铸件解剖后内腔情况



(b) 第2件铸件内腔荧光检测结果

图12 第2件铸件浇注后解剖和荧光检测结果

Fig. 12 Anatomy and fluorescence test results of the second casting after pouring

料层对内腔孔隙形成有一定影响。原因是砂芯表面涂层会阻碍传热，且涂料本身也存在发气现象。

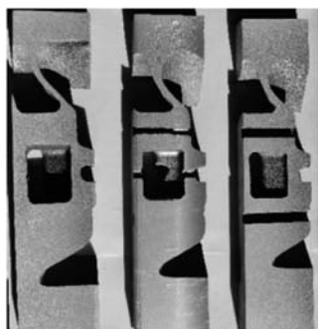
3.3 缸盖本体组织和性能分析

对不同工艺方案浇注的多件缸盖铸件相同区域进行解剖取样，取样位置与编号如图14所示，对试样分别进行高/低倍检测，然后采用相同的固溶时效处理制度进行热处理后，再进行拉伸试验，得出不同组织、针孔等级条件下铸件本体试样力学性能平均值，表5为不同组织和针孔等级情况下铸件本体性能平均值，在无针孔缺陷情况下，随着二次枝晶臂距从21 μm增加至56 μm，合金抗拉强度降低25 MPa，屈服强度降

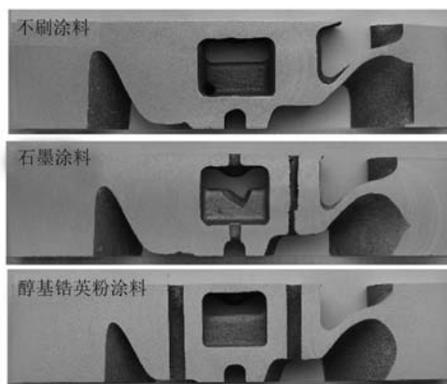
表4 浇注工艺参数调整

Table 4 Adjustment of the pouring process parameters

项目	浇注温度/℃	浇注速度/(mm·s ⁻¹)	结壳增压/kPa	结壳时间/s	结晶增压/kPa	保压时间/s
改进前工艺	710	60	5	20	10	600
改进后工艺	690	30	2	30	20	600



不刷涂料 石墨涂料 256B涂料



不刷涂料 石墨涂料 醇基锆英粉涂料

(a) 不同涂料涂刷获得试样剖面情况

图13 不同涂料涂刷获得试块低倍针孔检测结果

Fig. 13 Test results of low magnification pinhole of the test blocks under different coating conditions

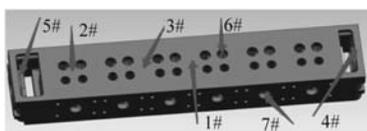


图14 铸件本体取样位置与编号

Fig. 14 Sampling position and number of the casting body

低6 MPa，伸长率也从8%降低至4.5%，二次枝晶臂距对合金抗拉强度和伸长率有较大影响。二次枝晶臂距40~45 μm时，当铸件针孔从0上升至5级时，合金抗拉强度、屈服强度、伸长率均逐步降低，最大降幅分别为25 MPa、29 MPa、3.5%。

表5 不同组织和针孔等级情况下铸件本体性能平均值
Table 5 Average properties of the casting bodies under different microstructures and pinhole grades

铸件名称	取样位置	二次枝晶臂距/ μm	针孔等级	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	伸长率/%
原工艺铸件	1 [#]	58	针孔5级	330	244	2.5
	2 [#]	44	针孔5级	341	250	3
	3 [#]	41	针孔3级	348	269	3.5
	4 [#]	21	无针孔缺陷	375	273	8
	5 [#]	29	无针孔缺陷	362	270	6.5
	6 [#]	52	针孔3级	334	248	4.5
	7 [#]	44	针孔4级	357	259	3
新工艺铸件	1 [#]	56	无针孔缺陷	350	264	4.5
	2 [#]	45	针孔1级	361	270	6.5
	3 [#]	41	无针孔缺陷	368	279	6.5
	4 [#]	23	无针孔缺陷	375	270	8
	5 [#]	28	无针孔缺陷	370	273	6
	6 [#]	49	针孔1级	354	258	5.5
	7 [#]	42	针孔2级	357	259	5

参考文献:

- [1] 刘阅, 潘红阳, 崔杰. 温度场对重力浇注铝制汽车发动机缸盖成型的影响 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (9): 1975-1978.
- [2] 张全中, 魏志明, 刘长振, 等. 高承载铝质缸盖优化设计研究 [J]. 机械强度, 2015, 37 (3): 116-120.
- [3] 刘韬. 缸盖在冲击载荷作用下的疲劳寿命预测 [D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [4] 周大伟, 欧平洋, 宦承俊, 等. 铝合金缸盖重力铸造生产中常见问题及解决措施 [C]// 2018重庆市铸造年会.
- [5] 刘福东, 苏勇, 秦春段. 发动机缸盖用铸造铝硅合金力学性能研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2011, 31 (1): 90-92.
- [6] 印小松, 刘宏庆, 史翔, 等. 变质和热处理对A354缸盖组织和性能的影响 [J]. 铸造技术, 2018, 39 (2): 171-174.
- [7] 戴圣龙. 铸造手册: 铸造非铁合金 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [8] 陈继森, 王草原, 白绿水. 高强度铸造铝合金ZL702A缸盖材料的研究 [J]. 材料工程, 1990 (4): 21-23.
- [9] 汪紫亮, 朱协彬, 王公显. A356缸盖铸件针孔缺陷分析及对策 [J]. 安徽工程大学学报, 2019 (4): 42-47.

Research on the Casting Process of High Performance Complex Diesel Engine Cylinder Head

LI Ze-hua¹, FENG Zhi-jun¹, LI Yu-fei¹, XIN Shi-wei¹, LIU Wen-long¹, LIU Dan¹, MA Ying-bo¹, HU Ding-yun²

(1. Shenyang Research Institute of Foundry Co., Ltd., Shenyang 110022, Liaoning, China; 2. China North Engine Research Institute, Tianjin 300000, China)

Abstract:

This article is aimed at the development of complex diesel engine cylinder head casting process. Through the thermal analysis of the cylinder head casting, the anti-gravity casting process of the sand mold was designed, and the temperature field of the casting filling and solidification process was simulated. The 3DP technology was used to quickly prepare the sand mold and sand core, and the rapid trial production of the cylinder head blank was completed. The causes of porosity formation in the inner cavity of the casting were analyzed, and the solutions to the porosity defects of the cylinder head were proposed and verified by the actual pouring results. As the secondary dendrite arm distance increased from 21 μm to 56 μm , the tensile strength of the casting body was reduced by 25 MPa, the yield strength was reduced by 6 MPa, and the elongation was also reduced from 8% to 4.5%. When the secondary dendrite arm distance was within 40-45 μm . When the pinhole grade increased from 0 to 5, the tensile strength, yield strength, and elongation of the alloy gradually decreased, and the maximum decrease was 25 MPa, 29 MPa, and 3.5% respectively.

Key words:

cylinder head; casting process; pinhole defect; secondary dendrite arm distance; mechanical properties

4 结论

(1) 结合数值模拟技术开展战车用柴油发动机缸盖铸造工艺设计, 采用3D打印快速制备缸盖毛坯, 在短时间内开发出复杂缸盖砂型反重力铸造技术, 为后期缸盖批产开发打下基础。

(2) 缸盖内腔孔隙受合金含气量、凝固冷却速度、砂芯发气及涂料涂刷等多方面影响, 通过优化砂芯结构、调整合金熔炼工艺、涂料涂刷方式及铸造工艺参数, 能够有效抑制孔隙形成, 使合金内部质量满足技术要求。

(3) 铸件本体性能受二次枝晶臂距和针孔等级的影响明显, 随着二次枝晶臂距从21 μm 增加至56 μm , 合金抗拉强度降低25 MPa, 屈服强度降低6 MPa, 伸长率也从8%降低至4.5%; 当二次枝晶臂距在40-45 μm 内时, 铸件针孔从0上升至5级时, 合金抗拉强度、屈服强度、伸长率均逐步降低, 最大降幅分别为25 MPa、29 MPa、3.5%。