基于正交试验及数值模拟的下缸体压铸工艺优化

朱洪军

(大连科技学院,辽宁大连 116036)

摘要:分析了某发动机下缸体压铸件结构特点、技术难点,进行了铸造工艺设计、试生产及 缺陷分析。依据有关铝合金凝固理论,借助正交试验以及数值模拟分析方法,优化了浇注工 艺参数,解决了该铸件泄漏缺陷。结果表明,浇注温度665 ℃、模具温度195 ℃、冷却水流量 3 L/min为最优工艺参数。

关键词:正交试验;缩孔;数值模拟;下缸体;压铸

近年来,汽车轻量化已成为时代的风潮,因压铸工艺的高效率与高精度,借助 压铸成形的汽车零部件越来越多,发动机缸体作为汽车的核心部件之一,采用压铸 工艺批量生产越来越得到各大公司认可^[1-2]。

本课题研究的下缸体为某发动机缸体底部装配曲轴核心零件(图1)。该项目压铸铝合金材料执行标准DIN EN 1706,材料牌号为EN AC-AlSi9Cu3Fe,其固相线540℃,液相线590℃。铸件外形轮廓尺寸475 mm×349 mm×102 mm,投影面积为994 cm²,质量10.36 kg,计划批量8万件/年。为适应发动机工况需求,该产品需要密封检测,高压油道区域检测压力0.15 MPa,泄漏量40 mm³/s,腔体区域检测压力0.1 MPa,泄漏量小于500 mm³/s。作为发动机核心零件之一,该项目存在以下技术难点。

(1) 缩孔、缩松缺陷:铸件壁厚最薄2 mm,最厚部位28.5 mm,平均壁厚 7.2 mm,壁厚分布不均匀,铝液填充多次由狭缝喷射流入开放型腔,再卷入狭小 的缝隙,极易涡流卷气,同时厚壁处凝固收缩时间差异大,容易发生缩孔、缩松缺 陷,导致泄漏。

(2)多镶件整体铸造:本课题5个发动机档位轴承座位置镶嵌入铸铁件,其材料QT600,要求其在压铸模具上精确定位并且预热稳定可靠,确保镶嵌件与铝合金铸件本体结合牢固。同时,镶嵌件侧向铝合金最薄处2 mm,铝液充型凝固过程中容易产生冷隔缺陷。

1 铸件工艺设计及缺陷分析

基于轴承座镶嵌件上下两表面分别与压铸模具动、定模贴合,阻断铝液填充, 因而排除常规单侧梳妆流道浇注方案,经过方案论证分析,确定双侧浇注系统(图 2),铝液由左右两侧同时浇注,含有浇排系统铸件质量16.1 kg。充型过程中,铝液 交汇于铸件中间部位。为有效地排气排渣以及平衡局部模具温度,在5个档位之间 的空白区域增设多个较大的梯形截面渣包(图2)。该模具设计总浇道截面积1 050 mm²,内浇道平均厚度3.6 mm,锤头直径120 mm,料缸充满度47%。

试生产选用力劲集团DCC1800卧式冷室压铸机,锁模力18 000 kN,抽真空系统 选用海望公司HVY800-100SM V5抽真空机,其设计抽气能力100 m³/h,配备机械式 真空阀。为提高密封效果,模具型腔及滑块使用密封橡胶条密封,生产过程中真空 表显示为120 mbar。

作者简介: 朱 洪 军(1973-), 男, 工程硕士,高级工程师, 主要研究方向为压铸工艺 及压铸模具领域。电话 0411-86245040, E-mail: 2410400497@qq.com

中图分类号:TG249.2 文献标识码:B 文章编号:1001-4977(2021) 06-0670-05

收稿日期: 2021-03-10 收到初稿, 2021-04-23 收到修订稿。 试生产压铸、加工,然后100%气体密封测试,产 品合格率低于70%,通过水密测试以及利用网格图质量 工具查找漏点,发现所有泄漏均为高压油道泄漏,且 漏点位置集中于图2中B1区域,该高压泄漏区域局部厚 度24 mm。为求证区域气孔特性,使用线切割设备剖切 泄漏部位,剖面显示该部位存在类似海绵状组织缩松 以及多个孔径大于2 mm的孔洞(图3),放大200倍观 察该孔,孔洞颜色灰暗,内壁粗糙,且呈现树枝状结 晶铸造凸起,该缺陷集中于壁厚急剧变化热节处,确 定该缺陷类型为缩孔与缩松^[3]。产生该缺陷的原因在于 铸件凝固过程中由于金属液补缩不足产生形状不规则 的孔洞和熔池区,熔体越集中,越容易出现缩孔缺 陷^[4]。

2 凝固数值模拟分析

在铸造成形方法中,缩孔、缩松的缺陷可以通 过铸件的凝固规律预测,凝固过程是指高温液态金 属由液相转变固相的过程。在这一过程中,高温液 态铝合金所含有的热量必须通过各种途径向模具和 周边环境传递,并逐步冷却凝固,形成产品。在此 过程中热量的传递包括:金属以及模具内部的热传 导,金属与大气间的辐射和对流传热等^[5-6]。

缩孔、缩松是铸造生产过程中常见的缺陷,也 是产生铸件泄漏的主要原因之一。铸件凝固数值模 拟的任务是建立铸件凝固过程中传热的数学模型, 并采用数值方法进行求解,得到铸件凝固过程的规 律,预测铸件缺陷(缩孔、缩松)产生的可能性和 位置^[7-8]。压力条件下缩松判据为公式(1),此法 是一种基于液态金属冷却产生枝晶间显微缩松的预 测判据,其数值大小应用于判断产生显微缩松的倾 向性,可以较准确地预测显微缩松产生的位置及产 生的概率^[5]。

$$G_{\rm SC}/\sqrt{R_{\rm SC}/P_{\rm SC}} < K_{\rm C}$$
 (1)

式中: *G*_{sc}为温度梯度, *R*_{sc}为冷却速度, *P*_{sc}为实际压力, *R*_{sc}为由液相线温度、固相线温度、收缩率和粘度等因素决定的定值^[9]。

本课题采用的AnyCasting模拟分析软件,在模拟温 度场的基础上,根据各个单元每个时刻液-固状态,计 算各个单元每个时间的状态,进而综合预测缩孔的大 小。缺陷预测采用概率性缺陷模块中残余熔体模数判 据(Retained Melt Modulus, RMM),该模式不仅考虑 了温度梯度和冷却速度两个参数,同时能充分地考虑 铸件的形状和尺寸的影响。残余熔体模数越大,组织 致密度也越差,越易产生缩松缺陷及增大泄漏风险。

具体分析设置过程中,划分可变网格总数量1 243 万,设定求解目标为热传导和凝固,采用混合型求解 器,SOR迭代方法,松弛因子1.6。

通过鱼骨图质量工具分析可知,影响缩孔因素 有浇注温度、模具初始温度、模具内部水冷却条件、 铸造压力、模具材料特性、铝合金本身的物理性质、 浇注系统等等。通过试生产,浇注系统及铸造压力基 本锁定,并且模具材料与铸造铝合金都不可变更, 课题的任务聚焦于优化浇注温度、模具初始温度和 模具内部水冷却条件,选择最为合理的工艺参数达 到最小缩松效果。本材料压铸合金浇注温度控制范 围是(665±15)℃;压铸模具初始温度由循环水和导 热油共同控制,泄漏区域模具初始温度控制范围为 (200±10)℃;冷却水流量通过阀门的开口率控制,设



图1 发动机下缸体 Fig. 1 Lower cylinder block



图2 带有浇排系统的铸件图 Fig. 2 Casting diagram with pouring system



图3 泄漏部位剖切断面 Fig. 3 Leakage section

计变更范围1~3 L/min。

3 正交试验

本课题重点研究下缸体发生缩孔局部区域为图2 中B1区域,该区域X方向取网格第65~105层,Y方向取 160-220层,Z方向取1~110层,研究区域总网格数为 15.9万个。设定该合金的凝固收缩率7.1%,结果分析 时,通过Quantity Analysis 计算缺陷可能为0.6~1.0的网 格体积D,D与该局部区域的总体积网格数V的比值即为 缩松百分含量。

选取铝液浇注温度、模具温度、高压点冷却水 流量3个因素为研究对象,由上述分析可得,浇注温 度分别取660℃、670℃、680℃;模具温度取190℃、 200℃、210℃;冷却水流量则分别取1 L/min、2 L/min、 3 L/min,列出3因素3水平正交试验方案见表1^[9]。

根据水平因素表列出统计分析表,并进行模拟分 析试验,对比9组正交试验结果,采用均值极差与主效 应图分析不同试验因子对铸件缺陷的影响,采用极差 法分析各个参数对目标的影响。极差是指正交试验因 子各个水平均值的最大值与最小值之差,极差越大, 则改变该因子水平对指标造成的影响也越大,反之, 影响就越小。浇注温度、模具温度、冷却水流量的三 水平的缩孔含量均值分别对应均值1、均值2和均值3, 统计分析如表2。

使用minitab软件对试验结果描绘因素均值与缩孔 缺陷率主效应见图4。

分析结果表明: 铝液浇注温度、高压点冷却水 流量、模具初始温度对于缩松含量极差分别为1.99、 0.41、0.17,即铝液浇注温度对于缩松缺陷的影响最 大,其次为冷却水流量,影响最小的为模具初始温 度。从图4a可知,随着浇注温度的提高,缩孔含量迅 速增大,在670 ℃到680 ℃表现尤为明显,泄漏的概率 亦随之迅速上升,这是由于高浇注温度导入更多热量 形成较大热节,最优浇注温度为660℃;从图4b可知, 模具温度提高将增大缩松概率,但增加速率缓慢,主 要因为模具温度远低于铝合金的固相线温度,对缩松 影响效果不显著,最优模具温度为190℃;由图4c可

表1 L9(3³)水平因素表 Table 1 Orthogonal factor level table

水平	因素			
	浇注温度/℃	模具温度/℃	高压水流量/(L・min ⁻¹)	
1	660	190	1	
2	670	200	2	
3	680	210	3	

表2 正交试验缩松含量统计分析表 Table 2 Orthogonal experiment statistical analysis table

	-	-		
序	浇注	模具	冷却水	缩孔
号	温度/℃	温度/℃	流量/(L·min ⁻¹)	含量/%
1	660	190	1	4.21
2	660	200	2	4.42
3	660	210	3	4.02
4	670	190	2	4.32
5	670	200	3	4.16
6	670	210	1	4.82
7	680	190	3	6.01
8	680	200	1	6.40
9	680	210	2	6.22
均值1	4.21	4.84	5.14	
均值2	4.43	4.99	4.98	
均值3	6.21	5.02	4.7	
极值	1.99	0.17	0.41	
因素级别		浇注温度>冷却水流量>模具温度		



Fig.4 Variations of shrinkage porosity rate with pouring temperature, mold temperature and cooling water flow rate

知,随着冷却水流量的提高,缩松缺陷持续减小,这 是由于通入水流量增大能带走更多的热量,最好的水 流量参数为3 L/min。

然而过低的浇注温度和增大冷却水流量将增大该 部位冷隔、欠铸的风险。在平衡其他质量问题后确定 该项目的工艺参数为浇注温度665 ℃、模具温度为195 ℃、 控制该部位局部冷却水流量为3 L/min,并依据此参数 进行模拟分析,结果分别见图5、图6、图7。

模拟分析可知,该铸件残余熔体模数最大0.92 cm, 泄漏区域的残余熔体模数数值均值0.4 cm左右,最大的 空气压力多数存在于渣包和排气道部位,有利于减少 气孔的形成,填充时间为0.164 s,内浇道速度均值 32 m/s。

4 生产验证分析

依据上述的分析结果和模拟数据,在原力劲 DCC1800压铸机试生产,压铸工艺参数如表3。得到带



图5 残余熔体模数图 Fig. 5 Residual melt modulus





Fig. 6 Air pressure simulation

有浇注系统的铸件实物见图8。

试生产100件并加工,改进后铸件在该区域密封检测全部合格。X光检验铸件内部质量符合ASTM E505要求;B1区域沿3个方向线切割剖切检验(图9),切面质量满足要求(图10);借助AX10蔡司金相显微镜孔隙度放大25倍检验,剖面孔隙度2.51%(图11),满足



图7 填充时间模拟 Fig. 7 Filling time simulation



图8 实际生产的铸件 Fig. 8 Casting produced using die casting process parameters in Table 3



图9 优化后铸件剖切位置 Fig. 9 Schematic diagram showing dissection positions of casting

表3 压铸工艺参数 Table 3 Die casting process parameters

料缸直径/mm	二级速度/ (m⋅s⁻¹)	铸造压力/MPa	料柄厚度/mm	增压时间/s	冷却时间/s	模具温度/℃
120	3.7	75	35	10	12	195

674 存进 FOUNDRY 压力铸造



 (a) A-A剖切图
(b) B-B剖切图
(c) C-C剖切图
图10 在A-A、B-B和C-C位置被剖切的铸件
Fig. 10 Dissected casting in section A-A, ection B-B and section C-C, respectively

(1)下缸体主要缺陷缩孔、缩松导致泄漏,该缺



图11 C-C截面孔隙度 2.51% Fig. 11 Porosity 2.51% in section C-C

(2)通过正交试验与数值模拟分析可以快速地确 定较为合理的生产工艺参数。

(3)对于缩孔缺陷,影响最大的因素是模具初始 温度,其次为冷却水流量,影响最小的为铝液温度, 其最佳的压铸工艺参数为铝液温度665 ℃,冷却水流量 3 L/min,模具初始温度195℃。

陷根本原因为局部热节过大,凝固过程产生缩松及 缩孔。

5

项目规定需求。

结论

参考文献:

- LUO A A, SACHDEV A K, POWELL B R. Advanced casting technologies for lightweight automotive applications [J]. China Foundry, 2010, 7 (4): 463–469.
- [2] CHOI J, HWANG H, KANG S. Effect of ladle outlet geometry on internal porosity in gravity casting automotive brackets: An experimental investigation [J]. China Foundry, 2020, 17 (1): 56–60.
- [3] 罗守靖. 压铸、挤压铸造(液态模锻)及半固态加工的适应性分析 [J]. 特种铸造及有色合金, 2007(8): 570-571, 600-602.
- [4] WANG Qigui. Best practices for making high integrity lightweight metal castings-molten metal composition and cleanliness control [J]. China Foundry, 2014, 11 (4): 365–374.
- [5] 车家宝,廖敦明,孙飞,等.铝合金铸件凝固过程二次枝晶臂间距模拟计算[J].铸造,2020,69(4):382-387.
- [6] 杨曼云,迟毅林.有限元法铸造凝固过程温度场模拟及缺陷预测 [J].铸造,2017,66 (1):44-49.
- [7] 熊守美.铸造过程模拟仿真技术 [M].北京:机械工业出版社, 2004.
- [8] 杨曼云,迟毅林.温度场模拟及缩孔缩松预测算法研究与实现 [J].特种铸造及有色合金,2016,36(8):803-806.
- [9] 柳百成. 中国材料工程大典第19卷(下) [M]. 北京:化学工业出版社,2006.

Optimization of Die-Casting Process for Lower Cylinder Block Based on Orthogonal Test and Numerical Simulation

ZHU Hong-jun

(Dalian University of Science and Technology, Dalian 116036, Liaoning, China)

Abstract:

The structural characteristics of the die cast lower cylinder block and its technical difficulties were analyzed. Casting process design, trial production and defects analysis were carried out. According to the solidification theory of aluminum alloy, the process parameters were optimized by means of orthogonal test and numerical simulation, and the leakage defects of the casting were eliminated. The results show that the optimum pouring process parameters are the pouring temperature 665 $^{\circ}$ C, the mold temperature 195 $^{\circ}$ C and the cooling water flow 3 L/min.

Key words:

orthogonal test; shrinkage; numerical simulation; cylinder block; die casting