

● 特种铸造 Special Casting ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2021.06.016

压铸铝合金缸体与喷铝缸套的结合性能分析

付喜龙¹, 钱高杰¹, 金容¹, 李凯¹, 沈思雨¹, 童身亮², 葛乃进²

(1. 华域皮尔博格有色零部件(上海)有限公司, 上海 201815 2. 安庆帝伯格茨缸套有限公司, 安徽 安庆 246000)

摘要: 发动机铝合金缸体和铸铁缸套的结合性能直接影响热传导性, 需要对铝材和缸套之间的间隙及结合强度进行质量控制。采用模拟分析软件 FLOW-3D 对不同的缸体压铸工艺方案进行了分析, 选取最优工艺方案进行生产; 抽取工艺稳定的铸件, 分析了铝合金本体和缸套(喷铝)喷铝层的结合情况和抗拉强度, 并与目前主机厂常用的蘑菇头缸套的结合性能进行了对标。结果表明, 缸套(喷铝)和铝缸体的结合间隙优于蘑菇头缸套, 结合强度满足性能要求标准。

关键词: 喷铝缸套; 压铸工艺; 数值模拟; 缸套结合性能

中图分类号: TG146.2; TG113

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2021)06-0506-04

Analysis of Bonding Performance of Die-cast Aluminum Engine Block and Aluminum Sprayed Liner

FU Xilong¹, QIAN Gaojie¹, JIN Rong¹, LI Kai¹, SHEN Siyu¹, TONG Shenliang², GE Naijin²

(1. HASCO KSPG Nonferrous Components (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201815, China; 2. Anqing TPGOETZE Liner Co., Ltd., Anqing 246000, China)

Abstract: The bonding performance of aluminum alloy cylinder block and cast iron cylinder liner has a direct impact on the thermal conductivity, so it is necessary to control the quality of the gap between aluminum and cylinder liner and the bonding strength. The simulation software Flow-3D was used to analyze different cylinder die-casting process schemes, and the optimal process scheme was selected for production. The casting with stable process was extracted, and the bonding and tensile strength of the aluminum alloy body and the cylinder liner (aluminum spray) aluminum spray layer were analyzed. The results show that the bonding gap between the cylinder liner (sprayed aluminum) and the aluminum cylinder block is better than that of the mushroom head cylinder liner, and the bonding strength meets the performance requirements.

Key words: spray aluminum cylinder liner; die casting; numerical simulation; cylinder liner combination performance

汽车轻量化是汽车行业内一直研究的课题, 从传统铸铁到铝合金的发动机集成, 铝合金材料替代铸铁的广泛引用已经成为一种潮流, 是降油耗、提高输出功率的有效措施^[1-3]。但铝合金缸体缸壁和铸件活塞环之间的摩擦系数非常大^[4-5]; 铝合金的耐热性、抗磨损性能差, 所以目前汽车行业内的铝合金发动机缸体普遍采用镶嵌式灰铸铁缸套来满足发动机的工作要求^[6], 但是压力、浇注温度、缸套工艺等铸造过程参数都会影响铝合金缸体和缸套的结合性能^[7]。因此在稳定的工艺环境下研究缸套结合性能, 对于提高发动机热传导性、轻量化有着积极的意义。

收稿日期: 2020-12-25

作者简介: 付喜龙(1991—), 江苏太仓人, 学士, 工程师。主要从事汽车压铸产品开发及模具设计方面的工作。
电话: 021-67071888, Email: kspnc12069@163.com

1 压铸工艺模拟

1.1 工艺方案

采用涂铝缸套和铝合金缸体在不同的压力和充型速度以及不同的铝合金温度下进行充型、凝固实验; 通过模拟分析软件 FLOW-3D 对不同工艺进行模拟分析, 对比不同工艺下的流态、凝固状态, 选取最优的方案进行铸造生产。

影响缸套结合性能的因素有铸造工艺方式、充型速度、压力、铝液温度等因素, 结合产品结构特点采用压铸工艺, 根据压铸工艺的设计原则特点并结合产品本身结构, 实验规避掉压铸工艺中常规的工艺内容, 针对几个影响缸套结合性能比较明显的参数进行设计^[8-9], 制定出表 1 所示的工艺方案。

1.2 模拟分析

采用 FLOW-3D 软件对以上工艺方案进行充型、凝固分析^[10]。通过对比几种方案的模拟结果, 分

表1 样件压铸工艺方案
Tab.1 Technological plan of pressure casting process

方案编号	浇注温度 /°C	充型压力 /MPa	充型速度 /m·s ⁻¹	保压时间 /s
1	660	85	4.0	20
2	660	90	5.0	20
3	660	95	4.5	20
4	670	85	5.0	20
5	670	90	4.5	20
6	670	95	4.0	20
7	680	85	4.5	20
8	680	90	4.0	20
9	680	95	5.0	20

析充型过程流态的优良性及凝固后整个铸件及缸套集合区域的疏松分布区域大小,作为工艺结果的判定,为实际生产验证提供工艺信息的输入。方案1的充型、凝固模拟分析过程分别如图1、图2所示。

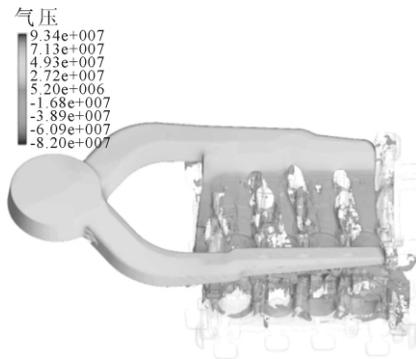


图1 充型分析图
Fig.1 Filling analysis diagram

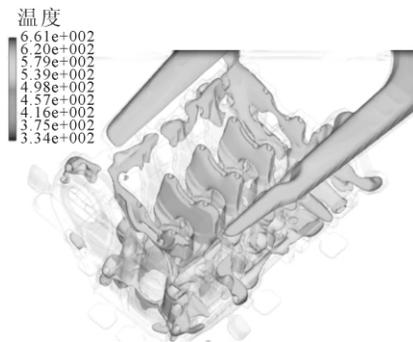


图2 凝固分析图
Fig.2 Solidification analysis diagram

图1的充型分析通过气压判定风险,图2的凝

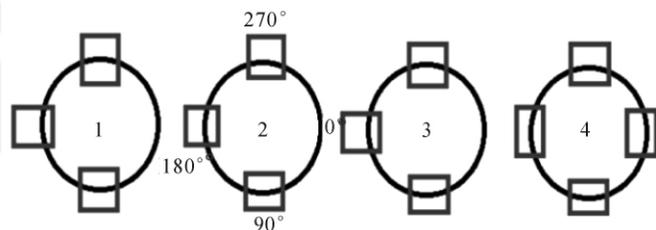
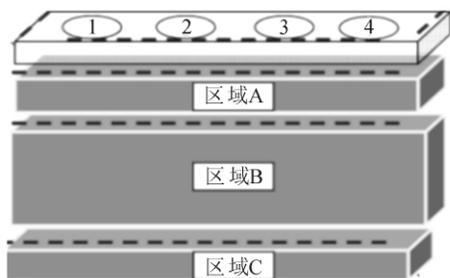


图4 取样位置示意图
Fig.4 Schematic sampling locations

固过程分析通过凝固温度分析凝固顺序。通过综合对比各种工艺方案下的模拟结果,发现方案5的模拟结果最佳,整个充型过程的流态最优,特别是靠近缸套区域的流态。凝固模拟分析表明缸套区域按照顺序凝固进行,压力传递到位,补充疏松效果良好;同时整个缸套区域疏松面积最小,符合最优参数设计原则。图3所示为方案5的疏松模拟结果。图示标尺表示缺陷出现的区域比例及大小。

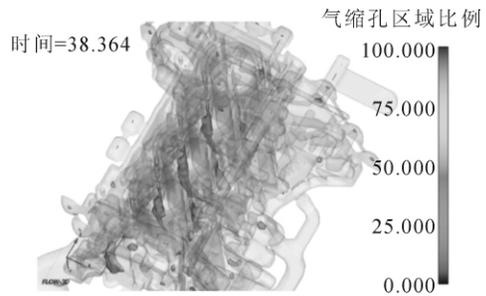


图3 疏松分析图
Fig.3 The picture of porosity analysis

2 缸套结合实验分析及对比

选取工艺方案5进行压铸生产,连续生产30件;辅助设备、模具、工艺等相对处于稳定状态下的样件,通过X-Ray、CT等检测设备进行内部质量判定,通过确认和模拟结果一致。

2.1 实验取样

连续生产的缸体完成热处理后,在10、20、75 mm高度处对缸体切割10 mm厚度的3层切片(图4中的A、B、C3层),再对每层切片的缸套与缸体结合处进行切割取样,取样位置如图4中的标记框所示,分别对应0°、90°、180°、270°位置处(其中两缸孔相邻处因切割限制只取其中一侧)。

2.2 实验分析

缸套(喷铝)和铝缸体结合性能的试验分析分两部分完成:一是对各区域取样的小样打磨抛光后通过金相显微镜观察样块中缸套和铝缸体的结合间隙并对其分析说明;二是使用专用工装及胶水粘结缸套和铝缸体的小样两侧,通过拉伸试验机对小样进行抗拉实验,分析其受力情况。

2.2.1 拉力试验分析

对 A、B、C 3 个区域编号的小样通过拉力试验机进行抗拉强度测试,共有试样 39 块,其中失效 2 块,符合试验有效性。测试结果如表 2 所示:

对 2 号除外的 36 组实验数据进行分析,全部试样的抗拉强度均值为 30.7 MPa,抗拉强度标准差 5.1 MPa;而蘑菇头缸套抗拉试验的抗拉强度均值为 26.8 MPa;两者对比分析,缸套(喷铝)缸体结合性能的实验数据占优。同时对 A、B、C 3 个区域的实验数据分组分析,发现靠近 C 区域的抗拉强度均值最优,说明越靠近浇道侧的结合性能越好。

2.2.2 结合间隙分析

A、B、C 3 个区域按照图 4 所示 0°、90°、180°、270°四个位置处取小样,并在显微镜下对比分析,结果如图 5 所示。通过对比分析发现,缸套(喷铝)和铝合金结合处形成 3 层组织,分别是灰铸铁层、喷铝层和铝合金缸体层;缸体的本体材料在熔融状态下,熔化缸套(喷铝)外表面的铝层,凝固后整个缸

表2 不同区域抗拉强度性能测试/MPa

Tab.2 Tensile strength test in different zones

序号	区域 A	区域 B	区域 C
1	26.87	39.41	32.15
2	30.52	失效	失效
3	35.42	36.78	36.78
4	25.12	26.30	26.30
5	23.66	25.40	28.85
6	29.03	35.30	30.41
7	27.15	36.21	36.16
8	33.12	32.34	24.58
9	26.07	32.37	36.13
10	39.85	21.64	30.03
11	32.00	36.78	40.97
12	21.67	26.30	28.05
13	30.45	28.42	28.88
强度均值	29.20	30.83	31.61
强度标准差	4.82	5.43	4.69

套喷铝层和铝合金结合紧密。

从图 6 中可以看出铝合金和缸套喷铝层完美结

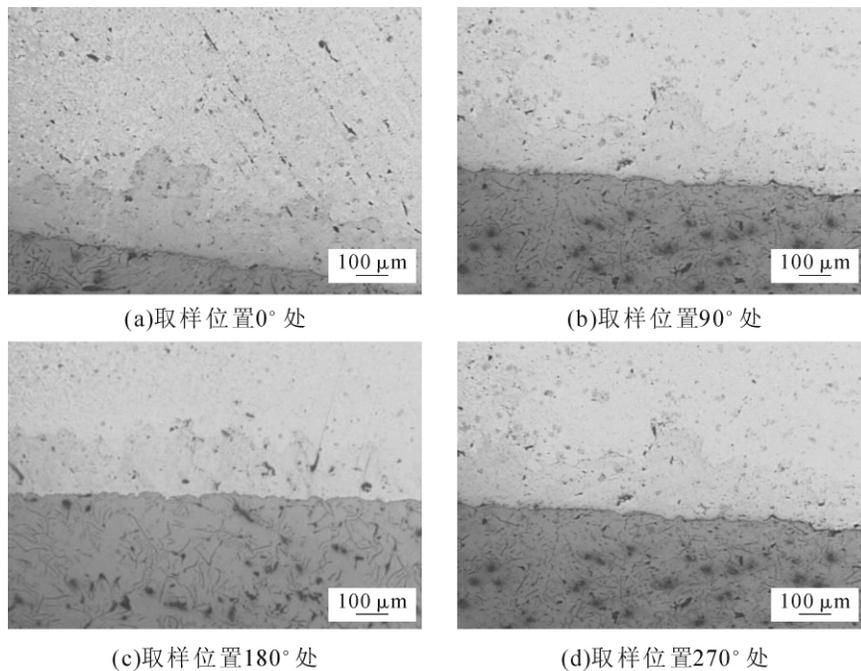


图 5 不同取样位置出的缸套结合处微观组织

Fig.5 Microstructure of bonding interface at different locations

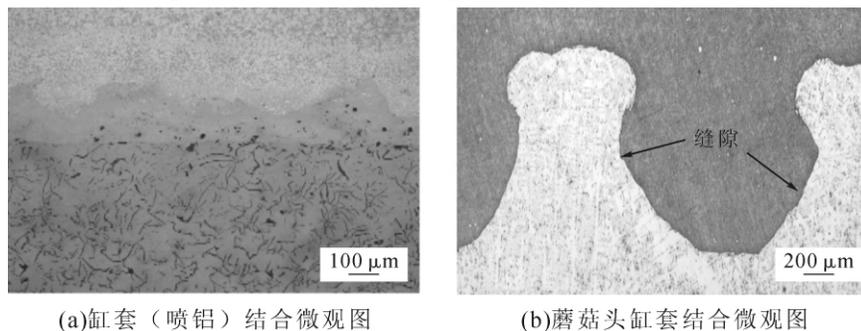


图 6 缸套结合对比示意图

Fig.6 The picture of bonding compare

(下转第 512 页)

余奥氏体(白色)组成,组织的分布状态主要有板条状及粒状。板条贝氏体铁素体之间分布有残余奥氏体组织,粒状贝氏体在贝氏体铁素体之上分布有岛状的马氏体和奥氏体(M-A岛)。30 s 水冷-空冷、250 °C 回火的组织也是由贝氏体铁素体和少量残余奥氏体组成,和热处理空冷的组织相比,30 s 水冷-空冷组织中贝氏体板条束有所细化,板条的比例增加,较细的板条贝氏体铁素体之间分布有残余奥氏体组织。水冷、200 °C 回火不同部位组织均为板条状回火马氏体和少量奥氏体组成,板条回火马氏体之间分布有较细的奥氏体膜。

3 实验结论

(1) $\phi 53$ mm 贝氏体钢棒料,920 °C 加热水冷 200 °C 回火 R/2 处取样的抗拉强度为 1 654 MPa, A_{KV} 为 55.1 J,具有高强度和较低的冲击值,水冷 30 s-空冷 250 °C 回火 R/2 处取样的强度为 1 379 MPa, A_{KV} 为 74 J,空冷 250 °C 回火 R/2 处取样的强度为 1 314 MPa, A_{KV} 为 71.7 J。空冷及水冷 30 s-空冷棒料具有较高的强度和高韧性,贝氏体钢棒料热处理时进行 30 s 水冷-空冷的冷却工艺,可以提高棒料的强度和冲击值。

(2) $\phi 53$ mm 贝氏体钢 920 °C 加热空冷、水冷 30 s-空冷 250 °C 回火棒料不同位置的组织均为贝氏体铁素体和奥氏体,空冷前增加 30 s 水冷可以细化贝氏体组织板条及增加板条比例。水冷组织为板条回火马氏体和少量的残余奥氏体。

参考文献:

- [1] 程巨强,康沫狂. 新型准贝氏体钢及工程应用[J]. 西安工业学院学报,2000(1):43-48.
- [2] 孙德勤,吴春京,谢建新. 贝氏体钢的研究开发现状与发展前景探讨[J]. 机械工程材料,2003(6):4-7.
- [3] 乔志霞,刘永长. 低合金超高强度钢中的相变及组织控制[J]. 金属热处理,2015,40(1):12-22.
- [4] 李洪波,刘向东,金宝士,等. 一种新型低碳贝氏体钢的研制[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版),2006(1):19-21.
- [5] 康永林,陈庆军,王克鲁,等. 700 MPa 级低碳贝氏体钢的热处理工艺研究[J]. 材料热处理学报,2005(3):96-99,109.
- [6] 王六定,朱明,陈景东,等. 低碳超高强度贝氏体钢的组织细化[J]. 材料热处理学报,2007(5):42-45.
- [7] 方鸿生,刘东雨,徐平光,等. 贝氏体钢的强韧化途径[J]. 机械工程材料,2001(6):1-5,41.
- [8] 聂隼,董文龙,赵运堂,等. 高强度低碳贝氏体钢工艺和组织对性能的影响[J]. 北京科技大学学报,2006(8):733-738.
- [9] 郭建良,程巨强,麻以林. 水-空冷热处理贝氏体钢液冷时间对其组织性能的影响[J]. 铸造技术,2021,42(3):216-219.

(上接第 508 页)

合,中间无缝隙夹层现象;随机抽取蘑菇头缸套的缸体,进行解剖取小样分析,发现蘑菇头和铝合金融合有明显的缝隙,缸套(喷铝)相对于蘑菇头缸套,其微观的结合状态更好。

3 结论

(1) 利用 FLOW-3D 可优化铝合金缸体压铸工艺方案,铝合金充型温度以 670 °C 以上为宜。

(2) 缸套(喷铝)表面的铝合金涂层和铝合金缸体的本体能够完整熔合,不会因为高压高速的压铸工艺等导致镀铝层脱落而出现较大间隙,结合间隙比蘑菇头缸套的间隙要小。

(3) 铝合金和缸套(喷铝)之间的结合强度均值可以达到 30.7 MPa;越靠近浇口侧,铝合金和缸套(喷铝)的结合强度越高。

参考文献:

- [1] 王小兰. 近 5 年中国汽车轻量化进展探究 [J]. 汽车文摘,2021(2):30-34.
- [2] 张楠. 浅谈中国商用汽车节能与轻量化的意义与愿景 [J]. 汽车

文摘,2020(10):7-15.

- [3] 屈光洪,尚珍. 汽车轻量化技术的应用[J]. 汽车实用技术,2020(10):64-66.
- [4] VENCL A, MRDAK M, CVIJOVIC I. Microstructure and tribological properties of ferrous coating deposited by APS on AL-alloy substrate [J]. FME Transaction, 2006, 34:151-157.
- [5] EDRISY A, PERRY T, ALPAS A T. Investigation of scuffing damage in aluminum engines with thermal spray coatings [J]. Wear, 2005, 259:1056-1062.
- [6] RABIEI A, MUMM D R, HUTCHINSON J W, et al. Microstructure, deformation and cracking characteristics of thermal spray ferrous coatings [J]. Materials Science and Engineering, 1999, A269: 152-169.
- [7] 张翼,王宏远,魏柳林,等. 影响铝合金缸体与铸铁缸套结合性能因素的分析[J]. 铸造,2010,59(2):178-181.
- [8] 韩雄伟,冷真龙,杨金凤. 铝合金压铸模浇注系统设计及充型凝固数值模拟[J]. 铸造技术. 2010,31(4):465-467.
- [9] 梁民航,胡艺腾,潘家敬,等. 铝合金压力铸造过程的优化仿真[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版),2020,41(5):95-100.
- [10] 李小华,谭家明. 基于 FLOW-3D 的压铸填充分析及模具设计 //2011 重庆市铸造年会论文集[C]. 重庆:机械工程学会铸造分会,2011:321-323.