

AlSi7MgCu0.5 铸造发动机缸体试制

梁宝乙, 杨友坤, 赵梓淳, 温春岩, 刘吉东

华晨宝马汽车有限公司, 辽宁 沈阳 110000

摘要:为提升汽车产品的市场竞争力,分析和制订缸体试制工艺,对某款全新设计的 AlSi7MgCu0.5 铸造发动机缸体进行批量化试制,测试缸体的化学成分、金相组织、硬度、变形和机械性能。结果表明:通过强化流程管控、优化加工工艺和严格执行质量检查,试制缸体的化学成分、金相组织、内外部缺陷、热处理变形和机械性能均满足要求;严格的外观检查可以降低报废率和批量制造缺陷,提高铸件的合格率。该试制工艺可以为汽车发动机缸体批量生产提供参考。

关键词:AlSi7MgCu0.5; 发动机; 缸体; 铸造

中图分类号:TK422

文献标志码:A

文章编号:1673-6397(2022)02-0035-05

引用格式:梁宝乙, 杨友坤, 赵梓淳, 等. AlSi7MgCu0.5 铸造发动机缸体试制[J]. 内燃机与动力装置, 2022, 39(2):35-39.

LIANG Baoyi, YANG Youkun, ZHAO Zichun, et al. Trial-manufacture of AlSi7MgCu0.5 casting engine cylinder block[J]. Internal Combustion Engine & Powerplant, 2022, 39(2):35-39.

0 引言

发动机是车辆的关键部件,缸体作为发动机的核心,其生产制造是整个汽车生产过程中的重要环节。人们对可持续发展战略的关注度越来越高,缸体研发向低成本和轻量化方向发展^[1]。某公司采用全新的发动机模块化开发模式,即每个气缸的排量为 0.5 L,通过调整气缸数实现发动机不同的排量,该模式可以大大减少发动机核心系统的开发工作,方便不同类型发动机生产线的共线生产,降低制造成本。为了提高发动机的燃油经济性和低速转矩,新一代发动机对缸筒长径比进行了科学优化。全新的发动机单件试制已经在实验室成功完成,本次测试过程为批量化的生产线试制,首批试制产量大于 100 件,相关质量要求与单件试制要求一致。

1 试制工艺

1.1 铸造

对某款全新设计的 AlSi7MgCu0.5 铸造发动机缸体进行批量化试制,AlSi7MgCu0.5 材料是在 ZL101A 材料基础上添加质量分数为 0.5% 的 Cu,以提高材料的强度和机械加工性能,但添加 Cu 后不利于材料的可铸造性和韧性,因此应严格控制材料中 Cu 的质量分数。铸造砂芯采用无危害的有机黏结剂及催化剂成型,通过机械热再生工艺,90% 铸造后的废砂可以实现重复利用,其余废砂装送水泥厂进行废物利用,做到环境友好。砂芯成型后采用机器人全自动去毛刺工艺,确保无残留毛刺。砂芯含水率直接影响铸造的气孔率及铸件黏砂^[2],在砂芯储存车间布置除湿机,采用全自动湿度控制,确保储存车间相对湿度低于 40%。采用中央新风温控系统,确保全年温度为 15~40 ℃。为缩短砂芯转移时间,采用智能搬运机器人

收稿日期:2021-12-06

第一作者简介:梁宝乙(1984—),男,满族,辽宁本溪人,工学硕士,工程师,主要研究方向为铝合金、模具钢及大型铸锻件热处理,E-mail:baoyi_liang@163.com。

将砂芯转移至铸造机旁;在铸造机旁放置期间,使用烘烤设备确保砂芯含水率在规定范围内。采用低压浇铸工艺进行铸造,浇铸压力为 360~380 kPa,浇铸温度为 720~740 ℃;浇铸过程中精确控制模具的预热和模具冷却水压力,确保浇铸质量。

1.2 预处理

铸造完毕后,为确保每个缸体的全加工生命周期均可追溯,对缸体进行激光打码;然后进行砂芯去除和锯切,检查缸体外观和重要尺寸;为确保能够有效去除残砂且无裂纹产生,自动重点监控适当的锤击力和缸体温度;进行人工荧光裂纹探伤抽查,对缸体部件全部进行全自动 x 射线检查及外观检查,确保产品内、外部质量合格且无表面裂纹。

1.3 热处理

为保证产能,采用全自动连续式燃气热处理炉进行热处理,试制前采用 9 点法对热处理设备进行炉温均匀性测试^[3-4]。保温区的温度误差为 ± 5 ℃,确保炉温均匀性和设备的可靠性;缸体采用 T6 热处理工艺^[5],固溶温度和保温时间分别为 540 ℃ 和 6 h,时效温度和保温时间分别为 180 ℃ 和 4 h;淬火转移时间不超过 25 s,以确保转移过程中无 Mg 和 Si 的强化相脱溶;淬火介质选用水溶性淬火液,为避免钙离子等影响水溶性淬火液的冷却特性^[6-7],采用软水与水溶性淬火液混合,水溶性淬火液的质量分数和温度分别为 12%~16% 和 (50 ± 5) ℃ (全自动控温);每次补充冷却液后均进行水溶性淬火液的质量分数检测,以确保冷却液始终合格;时效处理后,进行鼓风空冷,使用红外测温传感器对缸体进行实时测温,当缸体表面温度低于 40 ℃ 才可以转入硬度测试工位;采用布氏硬度机测试硬度。所有热处理过程数据及硬度测试结果均自动上传至生产系统,系统中可以追溯每个工件热处理过程的所有信息。

1.4 粗加工及电弧丝喷涂

产品热处理后进行抛丸处理,清除缸体表面残留的淬火液和残砂,使缸体呈现金属本色,然后进行粗加工及高压水试漏,最后进行缸筒电弧丝喷涂工艺。其工作过程为:在 2 根带电的丝材之间点燃高能电弧,并使丝材材料熔化;以氮气作为工艺气体,使熔化材料均匀喷涂在缸筒表面形成铁碳合金涂层;涂层厚度为 300~450 μm ,表面 HV0.025 硬度为 720~850。这种涂层可以替代传统的笨重铁缸套,减轻缸体质量,降低摩擦,改善散热,提高燃料利用率,降低油耗及排放。喷涂前,需加工待喷涂表面,使其达到一定的粗糙度,确保铁碳合金涂层与铝制基体之间有牢固的结合力。上一代发动机采用的加工工艺为高压水加工,耗水量很大,而且加工后的水体含有铝粉,增加了污水处理成本。本次试制的缸筒加工首次采用 D_{μ} -Cap 工艺,工艺示意如图 1 所示。首先使用精密锯片在缸筒壁处加工出矩形凸台,然后使用滚压刀具将矩形凸台压成燕尾形,作为关键参数, α 、 β 和加工深度全部采用全自动光学检查,确保铁碳合金涂层与缸体本体高强度结合并在随后的使用过程中不脱落。将高压水加工设备的水压调低后,可以用于电弧丝喷涂工艺前的清洗,避免设备的闲置浪费。喷涂工艺结束后,再次进行缸体外观检查,确保缸体无任何超差的表面缺陷。

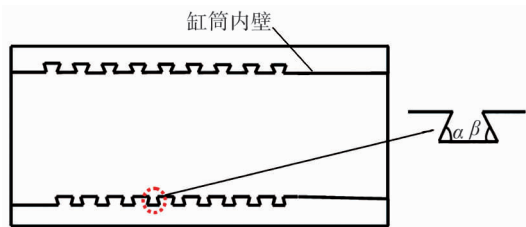


图 1 喷涂前缸筒预加工工艺示意

2 缸体检查

2.1 化学成分分析及组织检验

缸体材料的化学成分及其质量分数如表 1 所示。

表 1 试制缸体的化学成分及其质量分数

化学成分	Si	Mn	Cu	Fe	Ti	Mg	Ca	P	Zn	Al
质量分数/%	6.820	0.090	0.520	0.090	0.080	0.380	0.001	0.001	0.010	剩余

热处理后,在5个轴承座位置进行金相取样,每个取样位置取10个测试点,测量二次枝晶间距,结果如表2所示。由表2可知:二次枝晶间距均小于35 μm ,符合要求。

表2 二次枝晶间距检测结果

轴承座	μm									
	测点1	测点2	测点3	测点4	测点5	测点6	测点7	测点8	测点9	测点10
1	24	19	24	27	23	22	26	19	24	26
2	16	17	17	19	20	22	27	28	28	22
3	20	22	20	19	28	28	21	24	22	17
4	19	23	27	18	21	26	28	21	18	17
5	17	18	15	23	21	19	17	21	18	26

金相组织如图2所示。由图2可知:无共晶组织和片层组织,符合要求。

2.2 机械性能及变形检查

缸体热处理后进行布氏硬度测试^[8],测试位置(图中蓝色的点)如图3所示,该位置的HBW硬度为106,符合要求。在缸体的轴承座及缸筒壁处取样加工并进行室温拉伸测试^[9-10],其中轴承座处拉伸试样为M12试样,缸筒壁处拉伸试样为M6试样。抗拉强度 R_m 、屈服强度 $R_{p0.2}$ 及延伸率 A 等缸体机械性能检验结果如表3所示。由表3可知:缸体各项机械性能指标均完全满足要求。

采用Wenzel三坐标测量设备,选取缸体截面厚度变化较大、应力集中位置附近以及加工精度要求较高处等9个易发生变形或对变形敏感的位置,进行热处理前、后的空间位置测量,热处理前、后的变形测量结果如表4所示。由表4可知:9个位置的最大变形为0.236 mm,满足变形不超过 ± 0.8 mm的要求。采用显微维氏硬度机测试铁碳金属涂层硬度^[11],该涂层HV0.025硬度为765,符合要求。

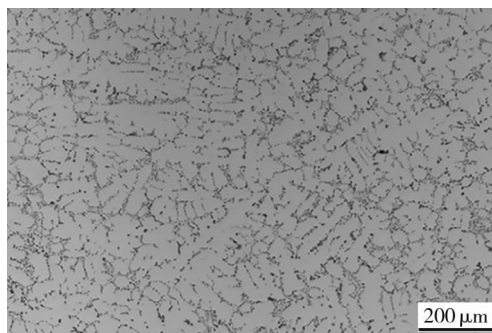


图2 热处理后金相组织

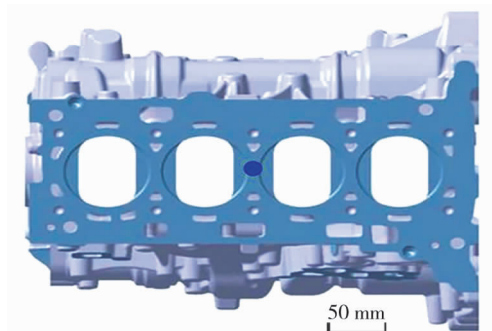


图3 缸体硬度测试位置

表3 试制缸体的机械性能检测结果

取样部位	R_m/MPa		$R_{p0.2}/\text{MPa}$		$A/\%$	
	要求	实测	要求	实测	要求	实测
轴承座	≥ 280	301	≥ 220	231	≥ 2	4.2
缸筒壁	≥ 240	273	≥ 210	225	≥ 3	5.1

表4 热处理前后变形测量结果

测量位置	mm				
	热处理前	热处理后	变形	上偏差	下偏差
1	+0.322	+0.284	-0.038	+0.8	-0.8
2	+0.392	+0.363	-0.029	+0.8	-0.8
3	-0.385	-0.149	+0.236	+0.8	-0.8
4	-0.558	-0.453	+0.105	+0.8	-0.8
5	+0.033	+0.022	-0.011	+0.8	-0.8
6	+0.614	+0.587	-0.027	+0.8	-0.8
7	-0.340	-0.477	-0.137	+0.8	-0.8
8	-0.052	+0.037	+0.015	+0.8	-0.8
9	-0.291	-0.199	+0.092	+0.8	-0.8

2.3 分析讨论

严格控制砂芯的含水率($<0.3\%$)并设定严格的砂芯使用寿命($<80\text{ h}$),可以减少砂芯造成的铸造缺陷;有效控制铸造过程中的强制冷却能够获得较小的二次枝晶间距;在截面较厚的轴承座位置设置强制水冷,有助于获得优异的力学性能^[12];在热处理过程中,淬火冷却速率的控制非常关键,如果冷却速率过慢, Mg_2Si 和共晶 Si 就会在晶界或位错处析出,降低 Mg 和 Si 在基体内的过饱和度,导致力学性能降低^[13],尤其在温度由 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 降低为 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 时,由于合金元素的过饱和度很大,原子扩散速率较高,强化相非常容易析出^[14];如果冷却速率过快,特别是低温段冷速过快时,会造成缸体不可逆的永久变形。针对这种情况,选用 AlSi7MgCu0.5 合金专用的水溶性淬火液,通过调整冷却液中水溶性淬火液的质量分数和温度,降低缸体由 $450\text{ }^\circ\text{C}$ 冷却到 $200\text{ }^\circ\text{C}$ 的冷却速率,避免过饱和固溶体的强化相提前析出,确保时效处理后材料的力学性能满足要求。水溶性淬火液中的大分子在低温时会脱溶出来,由于淬火液在低温时的冷却速率较小,减小了热应力^[15],缸体的变形远低于要求的 $\pm 0.8\text{ mm}$ 。另外,在整个试制过程中设置2次100%外观检查,在热处理前进行的100%外观检查可以尽量避免不合格工件进入后续昂贵的加工工序,避免后续的加工浪费,降低报废率;发现的连续同类型铸造缺陷可以很快地反馈给铸造工序,以便其进行调整,降低批量缺陷,提高铸件的合格率,降低成本。

3 结论

- 1) 加强砂芯含水率及铸造过程中的温度管控,有助于获得优良的铸造组织。
- 2) 通过控制水溶性淬火液的使用,可以获得优异机械性能和较低的热处理变形。
- 3) 对整个制造过程的合理规划和有效管控是完成试制的关键,严密的过程控制是产品稳定且持续生产的基础。

参考文献:

- [1] 刘丹丹. 发动机轻量化技术解析[J]. 汽车实用技术, 2017(17): 28-30.
- [2] 戴威然, 胥福顺, 李恒. 铸造铝合金气孔产生的原因与预防措施[J]. 铸造技术, 2018(10): 2273-2274.
- [3] 全国热处理技术标准委员会. 燃气热处理炉温度均匀性测试方法: GB/T 30824—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [4] 时晓, 韩强, 李文锋, 等. 大型灰铸铁件机体热处理工艺探讨[J]. 铸造设备与工艺, 2021(1): 1-3.
- [5] 毕媛. Mg-4Y-3Ho/Dy/Gd 基高强铸造镁合金的显微组织和力学性能研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2018.
- [6] 孟祥冰, 张玉彪, 王忠贺, 等. 水基淬火剂所面临问题的综合性分析[J]. 金属加工(热加工), 2018(12): 71-74.
- [7] 陈春怀, 周敬恩. 使用聚合物淬火剂出现变形和开裂倾向的原因和对策[J]. 兵器材料科学与工程, 2001(5): 69-72.
- [8] DIN. Metallic materials-brinell hardness test; Part 1: test method; DIN EN ISO 6506-1—2015[S]. Berlin, Germany: DIN, 2015.
- [9] DIN. Tensile testing; Part 1: method of test at room temperature; DIN EN ISO 6892-1—2017[S]. Berlin, Germany: DIN, 2017.
- [10] DIN. Testing of metallic materials-tensile test pieces; DIN 50125—2016[S]. Berlin, Germany: DIN, 2016.
- [11] DIN. Metallic materials-vickers hardness test; Part 1: test method; DIN EN ISO 6507-1—2006[S]. Berlin, Germany: DIN, 2006.
- [12] 张炳荣, 田身军, 王宏远. 二次枝晶间距和热处理工艺对铝合金发动机缸盖力学性能的综合影响[J]. 铸造技术, 2009, 30(10): 1367-1370.
- [13] 刘如学. 车用压铸 Al-10Si-0.3Mg 合金组织、缺陷与力学性能研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [14] TIRYAKIOLU M, SHUEY R T. Quench sensitivity of an $\text{Al-7 Pct Si-0.6 PCT Mg}$ alloy: characterization and modeling[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2007, 38(4): 575-582.
- [15] 王于林, 王孝军, 范勇强. PQA 新型聚合物淬火剂在铝合金淬火中的应用[J]. 热加工工艺, 2009, 38(4): 150-151.

Trial-manufacture of AlSi7MgCu0.5 casting engine cylinder block

LIANG Baoyi, YANG Youkun, ZHAO Zichun, WEN Chunyan, LIU Jidong

BMW Brilliance Automotive Co., Ltd., Shenyang 110000, China

Abstract: In order to increase the competition of the automobile, the trial production process of cylinder block are analyzed and formulated. A newly designed AlSi7MgCu0.5 material casting engine cylinder block is trial produced in batch. Chemical composition, metallograph, hardness, distortion and mechanical properties are tested. The results show that by strengthening production quality control, optimizing machining process and strictly quality check, a series of severe requirement about chemical composition, metallograph, internal and external defect, distortion and mechanical properties are fulfilled. Strict visual inspection could decrease scrap rate and avoid batch defects, also could improve qualification rate. This trial can provide a reference for vehicle engine cylinder block batch production.

Keywords: AlSi7MgCu0.5; engine; cylinder block; casting

(责任编辑:刘丽君)

.....
(上接第13页)

The effect of wall surface roughness on cavitation flow characteristics in nozzle

ZHOU Hongxiu¹, ZHANG Ao¹, LIU Yuewen², WU Yujing¹

1. School of Energy and Power Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. FAW Car CO., Ltd., Changchun 130012, China

Abstract: In order to study the effect of diesel engine nozzle surface roughness on cavitation flow in small diameter nozzle, Fluent are used to analyze the internal cavitation flow characteristics of nozzle with diameter of 0.1 mm under different injection pressures and different hole wall roughness. The results show that smooth wall under the condition of the higher injection pressure, the higher the pressure difference, the stronger the cavitation level, and the lower orifice discharge coefficient. For the rough wall condition, gas volume fraction of the flow will be decreased with the increase of roughness. The increasing of the roughness increases wall turbulent kinetic energy, and reduces wall speed at the same time, which makes the orifice discharge coefficient firstly increase and then decrease with the increase of the roughness. The higher the injection pressure, the larger the roughness of the highest point of flow coefficient. Therefore, the increasing of wall roughness height will enhance the interference to the flow field near the wall and have a certain inhibition effect on the fluid cavitation near the wall, which is more obvious under the condition of full cavitation pressure and low wall roughness.

Keywords: diesel engine; micro nozzle; cavitation; wall surface roughness; flow characteristic

(责任编辑:张啸虎)