

汽车铸造铝合金缸盖失效分析

余祖新^{1,2}, 张凯^{1,2}, 王长朋^{1,2}, 牟献良^{1,2}

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.重庆市环境腐蚀与防腐工程技术研究中心, 重庆 400039)

摘要: **目的** 某汽车公司的铸造铝合金缸盖在使用过程中发生开裂, 需寻找缸盖发生失效的原因。**方法** 通过应用环境扫描电镜观察缸盖断口形貌、金相显微镜观察断口金相组织、纤维硬度仪检测缸盖芯部硬度、化学成分分析和低倍针孔度测试方法, 对铝合金缸盖的失效原因进行全面分析。**结果** 铝合金缸盖样品化学成分和硬度满足技术要求, 金相组织未发现异常, 低倍针孔度控制良好。分型线凹槽过深造成应力集中较大, 是缸盖失效的主要原因。**结论** 建议在缸盖的生产过程中需进一步控制分型线凹槽深度, 以避免失效。

关键词: 铝合金; 缸盖; 失效分析

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.03.017

中图分类号: TM315 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2018)03-0081-05

Failure Analysis of Cast Aluminum Alloy Cylinder Head for Vehicle

SHE Zu-xin^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, WANG Chang-peng^{1,2}, MOU Xian-liang^{1,2}

(1.Southwest Research Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039;
2.Chongqing Engineering Research Center for Environmental Corrosion and Protection, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: Objective To find the cause for cracking of cast aluminum alloy cylinder head supplied by a certain motor corporation during using. **Methods** The failure cause for the cylinder head was analyzed by observing appearance of fracture with SEM, observing metallographic structure of fracture with metallographic microscope, testing the core hardness of cylinder head with fiber hardness tester, analyzing chemical component and testing macrostructure pinhole degree, et.al. **Results** Chemical component and harness of sample for aluminum alloy cylinder head met the technical requirements. There was no abnormality on metallographic structure. The macrostructure pinhole degree was controlled properly. The larger depth of parting line groove was the main cause for the failure of cylinder head. **Conclusion** It is suggested to further control the depth of parting line groove in production of cylinder head to avoid failure.

KEY WORDS: aluminum alloy; cylinder head; failure analysis

铝合金气缸盖是汽车发动机的重要部件, 当发动机工作时, 缸盖会强烈受热并承受较大的热冲击作用, 产生应力集中, 工作环境十分苛刻。从铸件结构工艺方面分析, 汽车铝合金缸盖是典型的薄壁复杂铸件, 其壁厚一般为 3.0 ~ 5.0 mm, 对尺寸精度和力学性能要求高^[1-4]。在铝合金选择方面, 通常采用 Al-Si7-Mg (A356) 系铸造铝合金来制备汽车发动机的气缸盖

和滑块构件^[5]。

某汽车公司送检的发动机铝合金缸盖在使用过程中出现开裂失效, 检查后发现在缸盖壁部存在裂纹。缸盖材料为 A356.2 铸造铝合金。为了研究汽车铝合金缸盖发生开裂失效的原因, 文中采用多种理化检验方法进行了系统的试验与分析, 并提出了改进建议以避免类似失效事件再次发生。

收稿日期: 2017-10-29; 修订日期: 2017-11-25

作者简介: 余祖新 (1988—), 女, 贵州人, 硕士, 工程师, 主要从事装备环境试验研究工作。

通讯作者: 王长朋 (1985—), 男, 重庆人, 硕士, 工程师, 主要研究方向为材料失效与分析。

1 试验方法

采用 Quanta200 环境扫描电镜对铝合金缸盖断口进行微观形貌分析, 采用 Observer.A1m 型倒置式金相显微镜按照 JB/T 6289—2005《内燃机 铸造铝活塞 金相检验》和 JB/T 7946.1—1999《铸造铝合金金相 铸造铝硅合金变质》进行金相组织分析。利用 ICP 分析仪按照 GB/T 20975.25—2008《铝及铝合金化学分析方法 第 25 部分 电感耦合等离子体原子发射光谱法》对铝合金缸盖进行化学成分分析, 采用显微硬度仪按照 GB/T 231.1—2002《金属布氏硬度试验 第 1 部分 试验方法》进行布氏硬度分析, 采用金相显微镜按照 JB/T 7946.3—1999《铸造铝合金金相 铸造铝合金针孔》进行低倍针孔度分析。

2 试验结果与分析

2.1 宏观分析

断口是断裂失效分析的最主要物证, 是残骸分析

中断裂信息的重要来源之一^[6-7]。对失效缸盖进行全面仔细的检查后, 发现气缸外表面不存在如夹砂、气孔、积瘤等铸造缺陷, 仅在缸盖壁部存在裂纹, 在裂纹位置将缸盖解剖开成为 1#样块和 2#样块, 并对其进行拍照, 1#、2#样块的宏观形貌如图 1a 和 b 所示。在图 1a 和 b 中标注的位置均可明显地看到一条裂纹, 该裂纹贯穿缸盖水道和进气道之间的薄壁。为进一步确定裂纹源的位置, 对裂纹处进行了解剖分析, 解剖后的断口宏观形貌如图 1c 所示, 从图 1c 可以发现, 裂纹源存在于 2#样块断口上。

2.2 断口分析

为了更好地对断口特征进行分析, 文中采用环境扫描电镜对断口进行微观形貌观察^[8-9], 2#样块的断口形貌如图 2 所示。从图 2a 和 b 可以看出, 裂纹起始于水道分型面表面, 裂纹源存在裂纹扩展形成的台阶纹, 说明裂纹源处存在应力集中现象。断口为撕裂和准解理的断口特征, 未发现原始裂纹、缩孔、分层等原始铸造缺陷。对裂纹源附近的微观形貌进行观

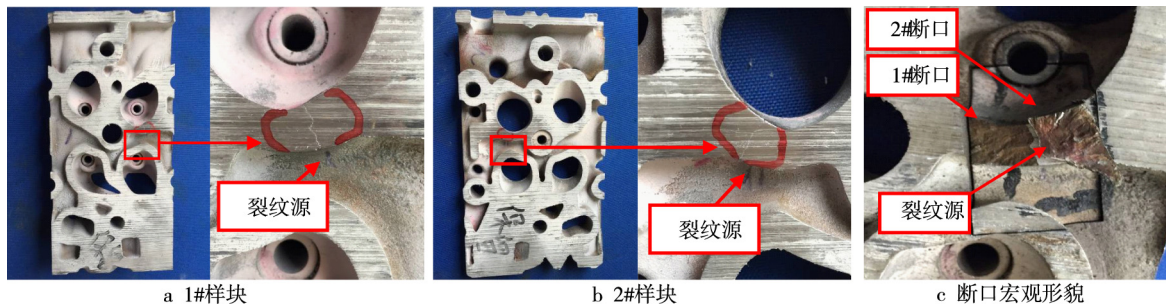


图 1 样品及断口宏观形貌

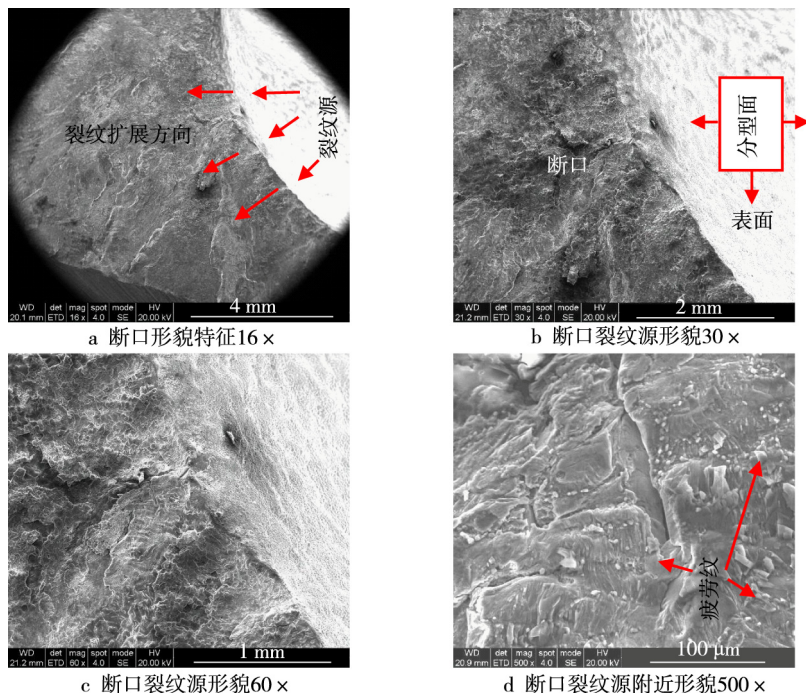


图 2 断口微观形貌

察，发现裂纹源附近的次表层断口为准解理断口特征，断面存在典型疲劳纹理^[7,9]，如图 2d 所示。

气缸盖作为汽车发动机的重要部件，其上部安装有凸轮轴，下部与气缸体、活塞组成燃烧室。当燃气在燃烧室内爆燃时，室内气体温度瞬间高达 1100 ℃ 以上，这种高温循环热冲击反复作用于燃烧室内壁，且在燃烧室内产生高达 7 MPa 的压力峰值，这个压力直接作用于气缸盖的燃烧室部位。此外，由于冷却水的作用，气缸盖各部分温度分布很不均匀，产生很大的热应力。因此，气缸盖在高温状态下还需承受较大的热冲击作用和产生应力集中，使得气缸盖存在较大的开裂风险。

在对芯部断口进行微观形貌的观察过程中，发现芯部断口表面存在严重氧化现象，表面被氧化产物所覆盖，局部表面存在鳞片状氧化起层，看不到断口的真实特征，同时腐蚀产物在电镜扫描过程中存在放电现象，呈白亮色，检测结果如图 3 所示。

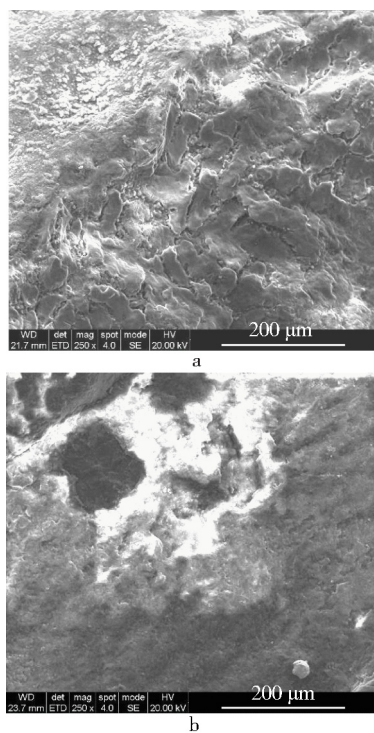


图 3 芯部断口形貌 (250×)

2.3 金相组织分析

在 2# 样块的裂纹源附近位置处取样进行金相组织观察^[10-11]，并对检测结果进行评定。样品的金相组织如图 4 所示。由图 4 可见，缸盖基体金相组织为： α (Al)枝晶 + 点状或蠕虫状共晶硅，组织均匀致密。评定依据采用 JB/T 6289—2005《内燃机铸造铝活塞金相检验》，评定结果：鱼骨状铁相夹杂级别为 1 级（鱼骨状铁相夹杂不明显）；针状铁相夹杂级别为 1 级（针状铁相夹杂不明显）。裂纹源处无明显铸造孔

洞、裂纹等原始缺陷，无明显树枝状枝晶组织存在，基体组织及夹杂物均达到技术要求。

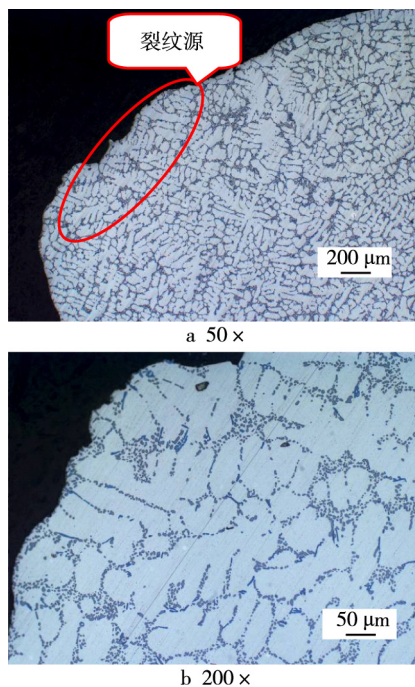


图 4 裂纹源处金相组织

对水道分型面表层组织及断口组织进行金相组织观察，发现水道分型面表层组织及断口组织同裂纹源组织，组织无明显平行水道分型面表面及断口表面的树枝状枝晶组织存在，铸造组织良好，测试结果如图 5a 和 b 所示。对于芯部，其金相组织同裂纹源处组织，铸造组织良好，其金相组织如图 5c 所示。金相组织测试结果表明，铝合金气缸盖的铸造质量良好，无明显的铸造缺陷。

分型线凹槽深度如图 6 所示，裂纹源附近分型线凹槽深度约为 0.92 mm，底部尖锐，距离裂纹源较远处分型线凹槽深度约为 0.37 mm，底部圆钝。结合图 1 所示的缸盖及其断口宏观形貌，分析可得裂纹贯穿于缸盖水道和进气道之间的薄壁。由于裂纹源所处位置为缸盖凹槽薄壁，且形状上也不易于散热，在持续受热的条件下，气缸盖水道内表面受热膨胀，形成拉应力。该处薄壁属于抗拉强度低的部位，当拉应力大于材料抗拉强度时，发生开裂^[12]。同时，裂纹源附近处凹槽底部尖锐，也易产生较大的应力，在拉应力 and 自身应力的共同作用下，使得缸盖发生开裂。

2.4 化学成分分析

在失效缸盖上随机截取试样进行样品化学成分分析^[13-14]，分析结果见表 1。铝合金缸盖样品化学成分中 Cu 元素含量高于技术要求（对本次失效影响不大），其他化学成分含量均满足技术要求。

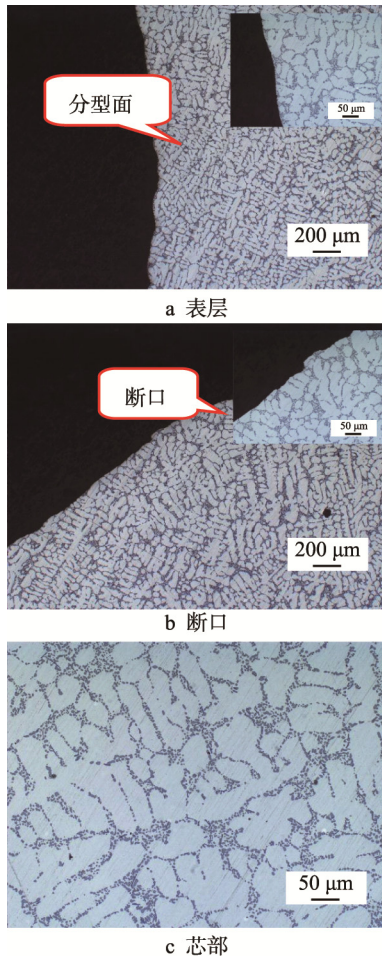


图5 水道分型面金相组织

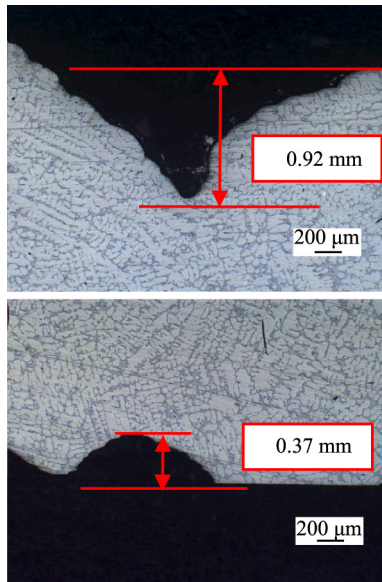


图6 分型线凹槽深度(50×)

表1 缸盖化学成分分析结果

元素	Si	Mg	Cu	Fe	Mn	Zn	Ti	%
技术要求	6.50 ~ 7.50	0.60 ~ 0.80	≤0.20	≤0.20	≤0.10	≤0.10	0.10 ~ 0.20	
实测值	6.97	0.70	0.38	0.15	<0.01	0.028	0.13	

2.5 硬度测试

按 GB/T 231.1—2002《金属布氏硬度试验 第1部分 试验方法》标准对样品芯部进行硬度测试^[15], 芯部硬度(HB)测试结果为 114.0, 115.0, 114.0, 满足技术要求(HB) 80~120。

2.6 低倍针孔度测试

针孔是铝合金铸件常见的缺陷之一, 不仅降低铸件力学性能、致密性以及抗腐蚀性能等, 还会增大铸件的表面粗糙度^[16]。铝合金缸盖结构和工艺都很复杂, 且质量要求非常高, 尤其是致密性要求非常高, 不能渗漏。通过对铝合金缸盖的解剖, 按照 JB/T 7946.3—1999《铸造铝合金金相 铸造铝合金针孔》, 在断口附近取样进行低倍针孔度观察, 腐蚀溶液为 10%的 NaOH 水溶液, 如图 7 所示。样品低倍针孔度级别为 1 级, 表明样品的低倍针孔度控制良好。

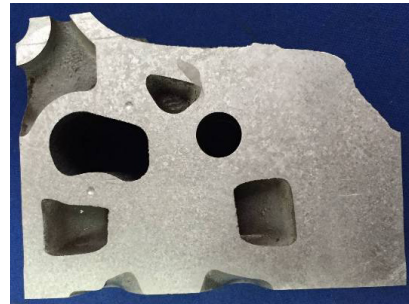


图7 样品低倍针孔度

3 结论

铝合金缸盖样品化学成分中 Cu 元素高于技术要求(对本次失效影响不大), 其余元素满足技术要求, 硬度满足技术要求, 金相组织未发现异常, 低倍针孔度控制良好。从缸盖样品的宏观分析可见, 裂纹起始于水道分型面表面凹槽处, 凹槽处为形状突变区, 易产生应力集中。结合样品断口微观形貌分析, 裂纹源处存在明显台阶纹, 表明裂纹源处应力集中现象明显。综合分析推断, 样品主要是在水道分型面凹槽处存在应力集中现象, 较大的应力对裂纹的产生和扩展起促进作用, 造成早期裂纹在水道分型面凹槽处萌生并发生疲劳开裂。

4 结语

通过对某型汽车铝合金缸盖的失效分析, 裂纹起始于分型线凹槽位置, 分型线凹槽过深造成应力集中较大, 外力作用下裂纹易在此位置萌生, 建议在缸盖的生产过程中需进一步控制分型线凹槽深度, 避免类似失效事件的发生。

参考文献:

- [1] 余录. 4GD1 铝合金缸盖铸件缺陷分析及控制[C]//2013 中国铸造活动周论文集. 济南: 中国机械工程学会, 2013: 1-6.
- [2] 赖华清, 范宏训. 汽车铝缸盖铸造工艺方法[J]. 中国铸造制备与技术, 2003(5): 29-31.
- [3] 刘广超, 王英杰, 许世龙. 汽车铝合金缸体缸盖铸造工艺研究现状[J]. 黑龙江科技信息, 2017(3): 18.
- [4] 江河, 杨国斌, 张先锋, 等. 汽车发动机气缸盖开裂原因分析[J]. 物理测试, 2015, 33(1): 45-47.
- [5] Caton M J et al. *Met Mater Trans A*. 1999, 30A: 3055.
- [6] 钟群鹏, 赵子华, 张崢. 断口学的发展及微观断裂机理研究[J]. 机械强度, 2005(3): 358-370.
- [7] 钟群鹏, 田永江. 失效分析基础知识[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [8] 石祝竹, 莫煜. 扫描电镜(SEM)在失效分析中的应用[J]. 装备制造技术, 2011(11): 142-144.
- [9] 曾祥华, 田继丰, 柯伟, 等. 宏观断口学与显微断口学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [10] 梅华生, 肖勇, 李荣强, 等. 内燃机铸造铝合金活塞失效分析[J]. 精密成形工程, 2013, 5(4): 60-63.
- [11] 王辉, 梅华生. 45 钢汽车稳定杆断裂失效分析[J]. 精密成形工程, 2010, 2(4): 64-67.
- [12] 胡友安, 李晓东. 涡轮增压器蜗壳热裂纹的试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2008, 36(6): 846-849.
- [13] 杨晓, 陈政龙, 潘恒沛, 等. 40Cr 钢紧固螺栓断裂原因分析[J]. 理化检验—物理分册, 2016, 52(12): 903-905.
- [14] 李迪凡, 王晓晖, 符朝旭, 等. 20CrMo 齿轮失效分析[J]. 精密成形工程, 2015, 7(1): 78-81.
- [15] 渠清团. 40Cr 钢内齿轮齿圈断裂失效分析[J]. 河南科技, 2013(8): 115-116.
- [16] 王丽萍. 铝合金针孔的形成与防止[J]. 电力金具, 1995(2): 17-19.