

内燃机铸造铝合金活塞失效分析

梅华生, 肖勇, 李荣强, 张秀蓉, 王长朋
(西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 通过化学成分分析、断口扫描分析及金相组织分析等手段, 对内燃机铸造铝合金活塞顶部破裂失效原因进行了分析。结果表明, 材料内部存在的组织缺陷及大量的铁相夹杂是导致构件早期失效断裂的主要原因。

关键词: 活塞; 失效分析; 组织缺陷

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2013.04.016

中图分类号: TG115.2

文献标识码: A

文章编号: 1674-6457(2013)04-0060-03

Failure Analysis of the Casting Aluminum Pistons of Internal Combustion Engines

MEI Hua-sheng, XIAO Yong, LI Rong-qiang, ZHANG Xiu-rong, WANG Chang-peng
(Southwest Technology and Engineering Research Institute, Chongqing 400039, China)

Abstract: The fracture failure reason of the casting aluminum pistons of internal combustion engines was analyzed by means of chemical composition analysis, SEM analysis and metallographic examination. The results showed that the microstructure defects and lots of Fe-phase inclusions in material were the main reasons which led to earlier failure of the workpiece.

Key words: piston; failure analysis; microstructure defect

活塞被称为内燃机的“心脏”, 它是发动机内的重要零件。为了降低惯性载荷, 内燃机活塞一般用铸造或锻造铝合金制造。由于活塞在工作过程中受高温、高压燃气作用, 承受了很高的机械负荷和热负荷, 因此活塞也较容易发生故障^[1]。

某汽车公司送检的一批内燃机活塞在服役 8 万公里后出现批量失效, 检查后发现均在活塞顶部出现穿孔裂纹。活塞型号为 NQ210N, 样品材料为 ZL109, 活塞用于大马力货车。为了评定铸造铝活塞内部质量, 找到活塞开裂的原因, 从宏观到微观进行了系统的试验与分析。

1 理化检验

1.1 宏观分析

断口是断裂失效分析的重要证据, 它是残骸分析中断裂信息的重要来源之一。失效活塞的宏观外貌如图 1 所示, 其中 1#样品为失效断开件, 2#样品为失效未断开件。由图 1 可以看到, 在活塞燃烧室顶部靠边缘处均存在穿孔, 连接穿孔端有一条贯穿整个活塞燃烧室顶部的裂纹, 裂纹长度与活塞顶圆直径相等。活塞顶及燃烧室表面覆盖了大量黑色物

质,这些物质是柴油在燃烧室内燃烧后产生的。由图 2 可见,活塞断裂面在销孔正上方,裂纹开裂方向与销孔轴线方向平行。样品大部分断裂面已由于高温氧化而发黑,但是根据断口颜色深浅程度及裂纹扩展方向,仍可见裂纹起始于穿孔位置,呈放射状向外扩展。另外由图 2 可见,穿孔孔洞呈纺锤形,穿孔边缘不太光滑,有部分崩裂痕迹,说明活塞顶部此处先开裂,随后油嘴喷射的燃油将裂纹两侧烧蚀并在高压下形成纺锤形穿孔。若是先烧蚀再开裂,则纺锤形孔洞边缘应较圆滑。由此推断,燃烧室顶部先开裂后造成烧蚀,穿孔方向由燃烧室内向外。

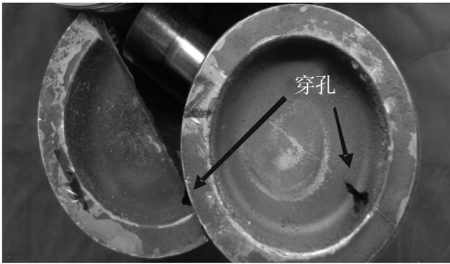


图 1 2 件活塞样品宏观形貌

Fig. 1 Macro-appearance of two piston samples

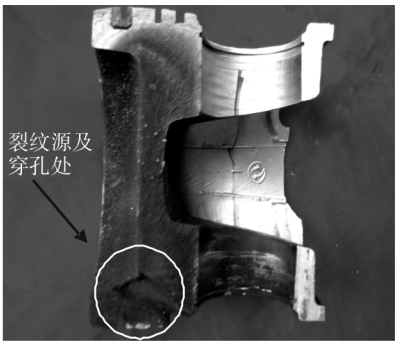


图 2 1#样品断裂面宏观形貌

Fig. 2 Fracture surface macro-appearance of 1# sample

1.2 化学成分

在失效活塞上截取试样进行化学成分分析,结果见表 1。失效活塞化学成分中 Fe 含量偏高,其它成分符合 S04 合金标准。

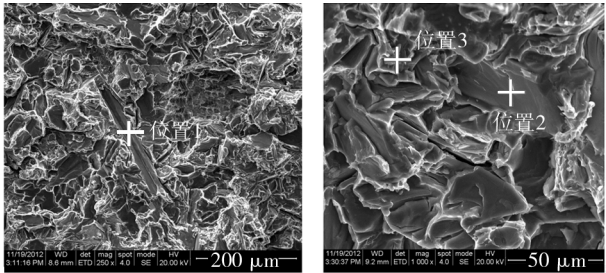
表 1 活塞化学成分(质量分数)

Table 1 Chemical composition of piston %

	Si	Cu	Fe	Mg	Ni
技术要求	11.0 ~ 13.0	0.50 ~ 1.50	≤0.70	0.80 ~ 1.50	0.50 ~ 1.50
实测值	12.51	1.33	0.79	1.06	1.17

1.3 断口分析

由于 1#样品断面严重氧化,已看不清断口形貌。2#样品尚未发生整体断裂,故在不破坏断口的前提下,采用人工方式将 2#样品断口打开,观察断口形貌。发现断口靠近燃烧室表面穿孔位置的原始断口部分也已被黑色物质严重污染,与活塞燃烧室表面的颜色相似,可以得知污染物深度最大的方向指向裂纹源区,故得知裂纹起源于燃烧室的边缘部分。现选取断口特征较明显的位置进行观察,如图 3 所示,可见样品断口较平齐,主要为河流状解理花样,属典型的脆性断裂特征。



a 250 ×

b 1000 ×

图 3 断口微观形貌

Fig. 3 Micro-appearance of fracture

取断口的 3 个不同位置进行能谱分析,结果见表 2。位置 1 处 Si 含量较高,此处断口沿较粗长的针状共晶硅面断开。位置 2 处断面较平整,此处 Si 含量也较高,此处是沿大块状初晶硅面断开。位置 3 处 Si 含量较低,主要为 Al 元素,微观形貌为撕裂棱,为后续撕开断口。由断口形貌及能谱结果可知,裂纹较易沿针状共晶硅及大块状初晶硅的解理面扩展。

表 2 能谱成分分析(质量分数)

Table 2 Analysis results of energy spectrum %

位置	Ni	Al	Si	Fe	Mg
1	2.31	3.03	94.66	—	—
2	1.00	5.80	92.18	1.02	—
3	10.76	77.52	8.61	3.70	2.41

1.4 金相组织分析

在裂纹源附近位置取样进行金相组织观察,并对其进行评定。由图 4 可见,活塞基体金相组织为典型的过共晶组织,主要为:α(Al)相 + 块状及针状共晶硅 + 大块状初晶硅 + 铁相夹杂。依据 JB/T

6289—2005《内燃机铸造铝活基金相检验》标准进行评级。其中,基体显微组织级别为4级;鱼骨状铁相夹杂级别为5级;针状铁相夹杂级别为5级。基体组织及夹杂物均未达到技术要求。

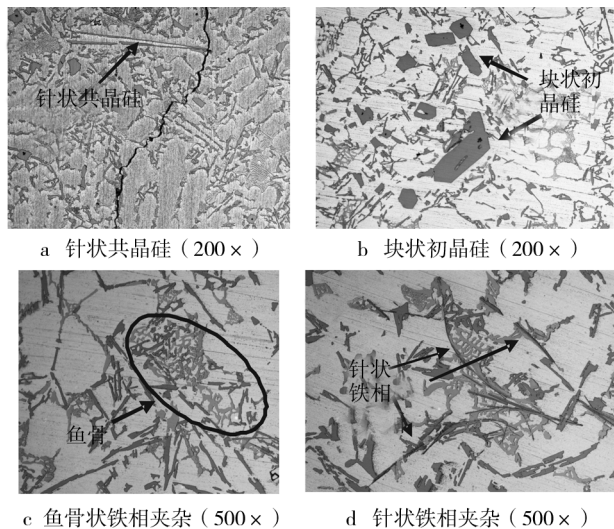


图4 基体金相组织

Fig.4 Metallographic structure of piston body

对裂纹的横截面进行观察,如图5所示。裂纹在基体中扩展时会受到初晶硅及其他第二相的阻碍作用,当裂纹在扩展过程中遇到硬质相时,裂纹会沿着硬质颗粒与基体的界面处扩展或直接穿透硬质颗粒,图5显示了裂纹沿块状初晶硅的扩展形态。

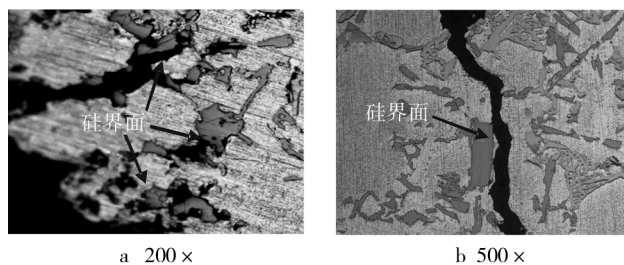


图5 裂纹源处金相组织

Fig.5 Metallographic structure in crack source zone

由图6可见,基体局部组织共晶硅含量不均匀,存在组织偏析现象。

1.5 低倍金相分析

对2件活塞样品沿活塞中心线并经销孔中心线剖开,取每件样品的1/2剖面观察低倍金相组织,如图7所示。依据JB/T 6289—2005《内燃机铸造铝活基金相检验》标准进行评级。2件样品分散性孔洞

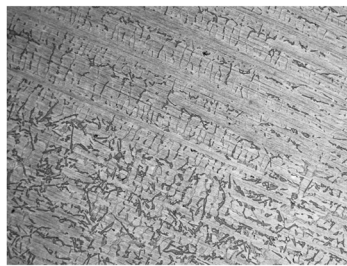


图6 裂纹源处金相组织 (100×)

Fig.6 Metallographic structure in crack source zone

级别为1级,集中性孔洞级别为1级。由结果可知,活塞样件铸造状态良好。

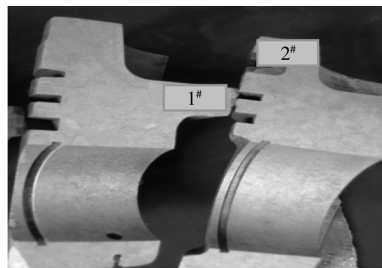


图7 2件样品低倍数金相组织

Fig.7 Macroscopic metallographic structure of two piston samples

2 分析与讨论

通过以上检验,2件内燃机活塞无明显的铸造组织缺陷,但活塞基体金相组织为4级,存在较长针状共晶硅及大块状初晶硅,裂纹易沿其与基体的界面作为解理面断裂扩展。针状及块状硅的尖端及棱角处易引起应力集中^[2],产生微裂纹,无论是SEM观察(图3)或金相观察(图5)都发现了这些微裂纹的存在。从基体组织中的初生 α -相固溶体分析,该铝合金已进行了变质处理(钠变质),但变质处理进行得不够充分,组织中还分布有大量针状共晶硅及大块状初晶硅,容易形成裂纹,显著降低铝合金的力学性能。

组织中的针状及鱼骨状铁相夹杂高达5级,与技术要求相距太远。由化学成分分析结果可知,材料中Fe含量偏高,Fe与Al, Si形成 $Al_9Fe_2Si_2$ 针状或鱼骨状共晶组织,极大降低了合金的伸长率和强度^[3]。铁相是脆性相,其特点是硬脆、粗大、分布集中,大大损害了材料塑性。超长的针状铁相,会严重割裂材料机体组织的连续性,两端是应力集中区,在活塞受负荷动态运行中,这些针状铁相会首先失稳扩展,最终导致活塞出现早期失效^[4]。另外,铝合金活塞还存在着

组织和成分偏析现象,材料力学性能降低。

失效部位与活塞上的应力分布及温度分布密切相关。经研究发现^[5],燃烧室靠近活塞顶部的边缘温度最高且销孔顶部方向的应力集中现象最严重,因此在高温疲劳载荷作用下,在销孔正上方的活塞顶部边缘由于受到高温的影响其强度及疲劳抗力显著下降,成为容易发生失效的危险区域,这也是此批零件在同一位置失效的原因。

3 改进措施

热疲劳微裂纹的产生与初晶硅密切相关,大块状的初晶硅会显著降低活塞的力学性能,材料基体组织中存在较多大块状初晶硅,说明变质处理不充分,建议用铝锆中间合金变质法代替钠变质,其变质效果比钠盐好,氧化烧损也比钠盐小,有效变质持续时间长。

4 结语

材料存在组织缺陷及大量铁相夹杂,严重损害

了材料的综合力学性能。在较大高温疲劳载荷作用下,垂直销孔上方的活塞顶部边缘处因受到高温高应力作用而较易萌生裂纹,继而引发烧蚀穿孔,导致最终失效。厂家采用铝锆中间合金变质法代替钠变质后,内燃机铸造铝合金活塞的质量问题得到了很好的解决。

参考文献:

- [1] 王会强,蒋辉,赵建国,等. 内燃机铸造铝活塞顶部裂损失效分析[J]. 农机化研究,2007(11):211-213.
- [2] 侯林冲,段莉萍,王有祁,等. 大功率柴油机活塞裂纹失效分析[J]. 金属热处理,2007,32(S1):286-289.
- [3] 迟绍宁,张水利,吴琴,等. 286L型船用柴油机活塞失效分析研究[J]. 内燃机与动力装置,2012(1):51-54.
- [4] 陈峰,纪琳,郭永平,等. DW-34.7/(11.5-53)X型压缩机活塞与十字头断裂失效分析[J]. 理化检验-物理分册,2010,46(7):450-455.
- [5] 陈文旗,胡树兵,胡晨晨. 柴油机活塞开裂失效分析[J]. 金属热处理,2011,36(Z1):116-121.

(上接第53页)

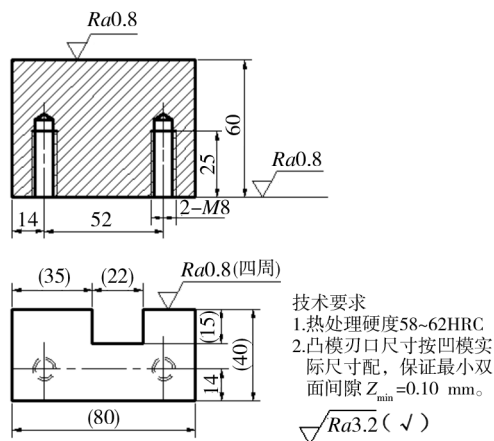


图7 凸模(材料:Cr12MoV)

Fig. 7 Punch (material: Cr12MoV)

4 结语

通过比较以上2种设计方法,可以看出传统的设计方法计算过程繁琐,并且需要查找大量的表格数据。当零件轮廓形状复杂时,计算更为复杂,设计

难度会大幅度增加,设计周期更长。同时,由于目前市面上的冲压模具设计手册以及参考书都是很多年前出版的,按上面数据计算出来的结果,在精度、强度和模具寿命等方面已很难适应目前年产量数十万件的要求。经验设计所采用的数据及企业标准,是工程技术人员多年来企业实践经验的宝贵总结,并且是与目前企业的实际要求相适应的。经验设计方法减少了大量的理论计算环节,简便实用,设计周期短,设计出来的数据结果更符合现代企业生产的实际要求。

参考文献:

- [1] 杨艳洲,李泂,黄翔,等. 基于知识的钣金冲模凸模与凹模快速设计与开发[J]. 模具工业,2011(7):6-9.
- [2] 余席同. 冲裁口尺寸及制造工差的确定[J]. 金属加工(冷加工),2008(6):58-59.
- [3] 徐芝化,马国亭. 冲模凸模设计技巧[J]. 模具制造,2011(4):27.