

铝合金发动机缸盖的再制造技术研究

Research on Remanufacturing Process of a Typical Aluminum Alloy Engine Cylinder Head

陈永雄¹, 魏世丞¹, 梁秀兵², 董世运¹, 徐滨士¹

(1 装甲兵工程学院 再制造技术重点实验室, 北京 100072;

2 装甲兵工程学院 科研部, 北京 100072)

CHEN Yong-xiong¹, WEI Shi-cheng¹, LIANG Xiu-bing²,

DONG Shi-yun¹, XU Bin-shi¹

(1 Science and Technology on Remanufacturing Laboratory,
Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China;

2 Department of Science and Research, Academy of Armored
Forces Engineering, Beijing 100072, China)

摘要: 针对废旧汽车铝合金发动机缸盖的再制造需求, 对发动机缸盖进行了失效分析, 并研究了高速电弧喷涂 Al-RE 涂层的再制造工艺。实验结果显示, 缸盖的失效主要表现为表面环形压痕和平面度超差, 压痕区附近出现较多白色条状的 Si 相, 硬度有所升高; 高速电弧喷涂 Al-RE 涂层的组织致密, 硬度略低于 LM25 TF 铝合金基体, 热压变形实验后涂层与铝合金基体结合良好, 未出现裂纹和剥离。综合实验结果和典型零件的应用情况表明, 高速电弧喷涂 Al-RE 涂层技术可实现铝合金缸盖的再制造。

关键词: 再制造; 高速电弧喷涂; 汽车发动机; 铝合金缸盖

中图分类号: TG174 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2012)06-0016-05

Abstract: Considering the requirement of remanufacturing a type of disused automobile engine aluminum cylinder head, the invalidation characteristics of the engine cylinder was analyzed, and the remanufacturing process of high velocity arc spraying Al-RE coating was put forward and investigated. The experiment results show that, ring type impress and out-of-tolerance flatness on the cylinder head surface are the main invalidation behaviors. Near the impress zone, some white strip-like Si phase was found, and the hardness increased. The high velocity arc sprayed Al-RE coating has a dense structure and the hardness is slightly lower than that of the LM25 TF aluminum alloy substrate. After the heat impressing experiment, the coating is adhered well with the substrate, no cracks or breakaway are found. Combining the experimental and case-study results, it can be concluded that the high velocity arc spraying Al-RE coating technology is available for remanufacturing aluminum alloy cylinder heads.

Key words: remanufacturing; high velocity arc spraying; automobile engine; aluminum alloy cylinder head

报废汽车零部件的再制造是研究最早的领域, 其中, 发动机的再制造在国外已有 50 多年历史, 已形成完整的体系和足够的规模^[1], 例如, 德国大众公司已再制造 720 余万台发动机^[2]; 在北美有将近 10,000 家工厂以不同形式生产再制造发动机, 每年的产量超过 300 万台^[3]。在国内, 发动机的再制造研究与应用在最近十几年发展很迅速, 如中国重汽集团自 1996 年成立济南复强动力有限公司后, 致力于斯太尔、康明斯等系列发动机的再制造研发生产, 将再制造发动机直销

欧洲和中国周边国家, 同时开拓国内市场, 该公司目前生产能力达 15000 台/年, 规模达 7000 台/年^[4-6]。

缸盖、箱体、曲轴、连杆等都是发动机的关键零部件, 再制造附加值非常高。针对这些零部件的失效形式, 人们采取了多种表面工程技术对其进行修复和再制造^[7,8], 其中, 高速电弧喷涂技术也得到了初步的应用。目前, 该技术的应用主要集中在铁基重载发动机缸体和曲轴的再制造领域^[9,10]。铝合金发动机在汽车行业中占有重要的份额, 尤其是在当今车辆轻量化的

发展趋势下比重会越来越高。但是,关于铝质汽车发动机的再制造技术研究报道却很少。为此,本工作立足汽车发动机再制造领域的研究前沿,以及对关键再制造技术的紧迫需求,以国外某型汽车铝质发动机缸盖为具体研究案例,从零部件的失效分析,到再制造工艺方案的制订与性能实验的设计,再到具体零部件的应用考核,展开了深入的研究,旨在为开展铝合金机械零部件的再制造提供技术支持与理论指导。

1 废旧铝合金汽车发动机缸盖的失效形式

国外某型汽车上使用的四缸发动机缸盖,其材质为 LM25 TF 铸造铝合金,与国产 ZA101A 比较接近^[11],表 1 为这两种合金的化学成分,表 2 为 LM25

TF 合金的力学性能。这种发动机缸盖和缸体之间装有不锈钢材质的缸垫(带密封压环),起到密封(密封缸盖和缸体配合间隙,密封燃烧室)和阻隔(阻隔缸套中冷却水和燃烧室中高温混合气)作用。由于缸垫为不锈钢制作,其硬度高、韧性好、耐蚀性好,而由铸造铝合金制成的缸盖硬度相对较低,为了达到良好的密封效果,在装配压力、服役温度和长时间服役作用下,不锈钢密封压环使得铝合金缸盖表面发生塑性变形,压入缸盖表面,形成四个环形压痕。缸盖表面形成压痕后,缸盖和缸体之间具有良好的密封效果。但是,一旦拆卸后,若再重新装配,难以保证配合面及密封环的密封效果。因此,为了再利用或再制造该缸盖,必须对环形压痕进行修复,恢复缸盖配合表面的完整性和平整度。

表 1 国内外发动机缸盖的材质(质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of the homemade and overseas automobile engine cylinder heads (mass fraction/%)										
Alloy	Si	Mg	Fe	Cu	Mn	Ni	Zn	Sn	Ti	Pb
LM25 TF	6.5-7.5	0.2-0.45	≤0.5	≤0.1	≤0.3	≤0.1	≤0.1	≤0.05	≤0.2	≤0.1
ZL101A	6.5-7.5	0.25-0.45	≤0.2	≤0.1	≤0.1	—	≤0.1	≤0.01	0.08-0.2	≤0.03

表 2 LM25 TF 合金的力学性能

Table 2 Mechanical properties of the LM25 TF alloy				
Alloy	0.2% proof stress/MPa	Tensile strength/MPa	Elongation /%	HB
Sand cast	200-250	230-280	0-2	90-110
Chill cast	220-260	280-320	2	—

如图 1 所示,发动机缸盖配合面每个缸口表面有一个环形压痕,直径约 $\phi 60\text{mm}$ 、深度 0.05 ~

0.8mm,压痕痕迹宽度约 0.8~2mm。针对每一个环形压痕而言,其一周的深度和宽度并不均匀,即水冷条件好的部位压痕浅而窄,反之则深而宽。发动机缸盖在与不锈钢缸垫密封环接触的区域工作时温度在 100~200℃ 范围内,且水冷条件好的部位温度较低,反之则较高;同时,缸盖表面还承受一定的装配压应力,应力值会随工作状态的不断变化而有一定的浮动。

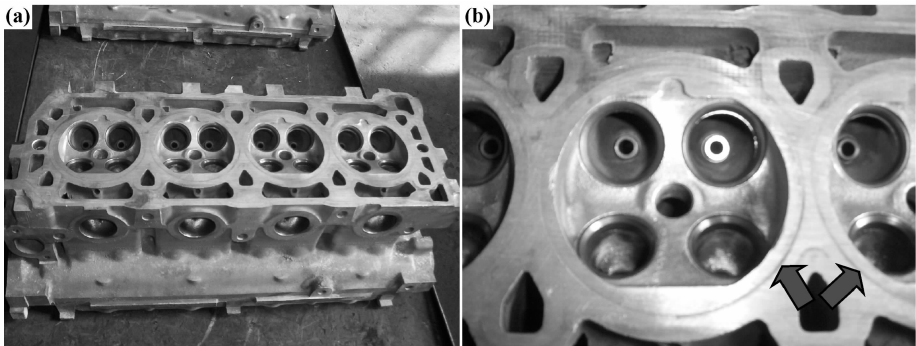


图 1 铝合金发动机缸盖(a)及其表面环形压痕形貌(b)

Fig. 1 Aluminum engine cylinder head (a) and its ring-type impress on the cylinder head surface (b)

图 2 为合金压痕表面的 SEM 形貌,可以看出,合金表面发生了塑性变形,表面的微凸起被压扁。为了分析服役状态对缸盖的影响,对废旧缸盖进行剖切,观

察了压痕区域及其远离压痕区域的显微组织特征,如图 3 所示。可以看出,LM25 TF 合金组织主要由 Si 相(白色条状)、 α 相(深色条状)及基体相构成;同时,

合金中存在一些气孔和夹杂,这是在铸造过程中形成的。组织中 Si 相和 α 相在压痕附近的分布及取向与远离压痕区有明显不同。图 4 为沿压痕变形区截面的硬度分布曲线,在压痕区附近硬度较高,当离压痕表面的距离大于 0.1mm 以后,硬度在 HV40~60 的范围内波动。基于上述结果可以说明,压痕处的合金组织在受热应力和压应力的双重作用下发生了变形和硬化。变形层的存在,将不利于修复层与基体的结合,易导致修复层的脱落。因此,在选用和设计缸盖再制造技术方案时,应考虑该变形层的存在,消除其不利影响。

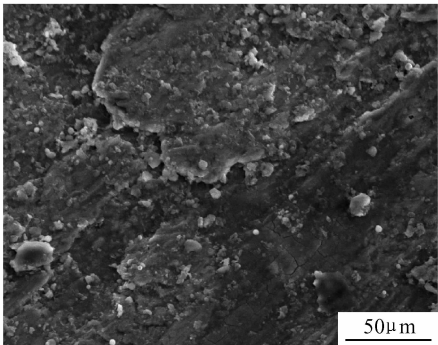


图 2 铝合金缸盖压痕表面 SEM 形貌
Fig. 2 SEM photograph of the aluminum alloy cylinder head impress surface

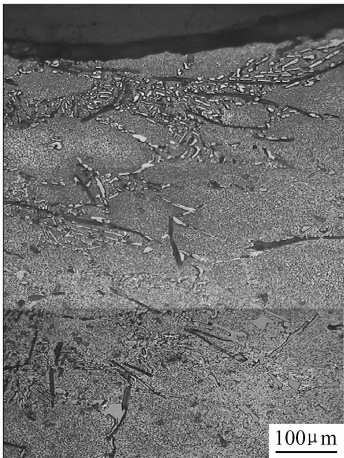


图 3 缸盖压痕区横断面金相组织(混合酸腐蚀)
Fig. 3 Cross-section metallograph near the cylinder head impress region (etched with mixed acid)

除了分析缸盖表面压痕区域的特征外,还要对缸盖整个表面的平面度进行测试,因为缸盖在服役过程中,因受热和力的作用而发生变形^[12]。如果变形程度不是太大,可以用铣削的办法进行修正而不会影响其再次使用,但变形程度过大,需要铣削的量

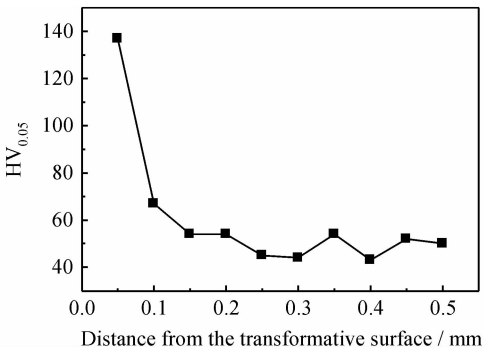


图 4 铝合金缸盖压痕变形区硬度分布曲线
Fig. 4 Hardness distribution curve near the impress deformation region of the aluminum alloy cylinder head

过多,则会影响到缸盖及其他部件的装配使用,无法再次利用。

2 高速电弧喷涂再制造铝合金缸盖的工艺研究

2.1 高速电弧喷涂 Al-RE 涂层的制备

针对发动机缸盖再制造毛坯件的失效特点,再制造表面处理工艺应具有如下基本要求:

- (1)通过一种或几种表面工程技术制备的修复层应与铝合金基体结合牢靠,在结合区或修复层内无裂纹产生;
- (2)所采取的表面修复工艺不会使缸盖的其他部位的尺寸发生改变,产生变形;
- (3)修复层的硬度应接近铝合金缸盖表面的硬度,且具有相近似的热膨胀系数;
- (4)修复层和铝合金缸盖之间在工作过程中不存在腐蚀问题;
- (5)带有修复层的再制造缸盖产品和缸体装配后,其密封性能和阻隔效果同于新品。

一些常规的表面处理方法(如堆焊、刷镀、粘涂等表面处理工艺)很难符合上述要求,使得对汽车发动机铝质缸盖的再制造成为一大难题。本研究通过综合考虑,决定展开高速电弧喷涂再制造的工艺研究。采取高速电弧喷涂修复时,选择合适的喷涂材料是该技术能成功实现再制造的关键因素之一。所形成的喷涂层要具有较高的结合强度,使其在后续加工以及服役中不会脱落;其次是保证缸盖在 100~200℃ 的工作温度下不会因残余应力过大而发生脱层;再次是喷涂层的硬度,能保证在装配后,缸垫上的密封压环应能压入缸盖表面(被修复部位),达到可靠的密封和阻隔效果。为此,决定选用 Al-RE 丝材作为喷涂材料,而且,在对发动机缸盖表面环形压痕进行尺寸恢复之前,先在实验室条件下研究该种涂层的制备及其性能情况。

由于缸盖为铝合金材料,硬度相对较低,因此在预处理时要选择合适的喷砂工艺参数,尤其是空气压力。压力过大,喷砂速度和冲击力过大,不但不能保证较高的粗糙度要求,还会使合金表面因喷丸强化和塑性变形再次产生硬化层;压力过低,喷砂时间过长,不能很好地去掉缸盖表面的氧化夹杂和变形层。在综合分析和多次实验基础上,最后确定以下喷砂工艺参数,如表 3 所示。

表 3 喷砂工艺参数
Table 3 Sand blasting parameters

Sand size	Air pressure /MPa	Blasting distance/mm	Blasting angle/(°)
No. 16-22	0.4	100	70-90

选用自行研制的 HAS-2 型喷涂枪和 AMD-1620 型喷涂设备,喷涂 Al-RE 丝材制备涂层。表 4 为喷涂工艺参数。涂层制备过程中,控制涂层的厚度在 0.8mm 左右。

表 4 高速电弧喷涂 Al-RE 涂层工艺参数
Table 4 High velocity arc spraying parameters of Al-RE coating

Wire diameter /mm	Voltage/V	Current/A	Spray distance/mm	Air Pressure /MPa
2	32	120-140	200	0.6

2.2 Al-RE 涂层的组织与性能分析

图 5 为经混合酸腐蚀后 Al-RE 涂层的截面形貌。可以看出,涂层呈现出层状结构特征,主要由 Al 合金相及其氧化物组成。图 6 为涂层的显微硬度沿界面的变化情况,从曲线可知,涂层的硬度略低于铝合金基体的硬度,二者过渡良好。



图 5 高速电弧喷涂 Al-RE 涂层的截面形貌(混合酸腐蚀)
Fig. 5 Cross-section metallograph of the high velocity arc sprayed Al-RE coating (etched with mixed acid)

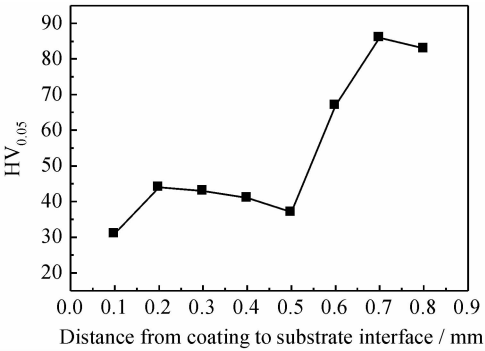


图 6 涂层界面硬度变化曲线
Fig. 6 Coating hardness curve along the interface

为了检验涂层与基体的结合以及密封性能。还进行了涂层的热压模拟实验。在 Gleeble 1500D 型数控式动态热-力学物理模拟实验机上对带有喷涂层的部位压出 $\phi 60\text{mm} \times 2\text{mm}$ 的环形压痕,实验加热温度 200°C ,持续时间 1000s,记录实验过程的载荷-位移曲线,并和不带涂层的 LM25 TF 铝合金试样作对比。测试结果如图 7 所示,可以看出,在相同实验条件下,Al-RE 涂层试样和 LM25 TF 基体的位移及变化规律比较接近。热压模拟的实验条件和发动机的实际工况相接近,两种材料表现出相近的规律,进一步说明高速电弧喷涂 Al-RE 涂层可满足再制造的要求。而且,还使用了光学显微镜对实验后的涂层试样的压痕特征进行观察,发现涂层并没有产生裂纹,与基体结合较好,无剥层产生。因此,涂层的硬度虽略低于基体,却具备了较好的塑性,使其在变形条件下不会剥落和产生裂纹,达到良好的密封效果。

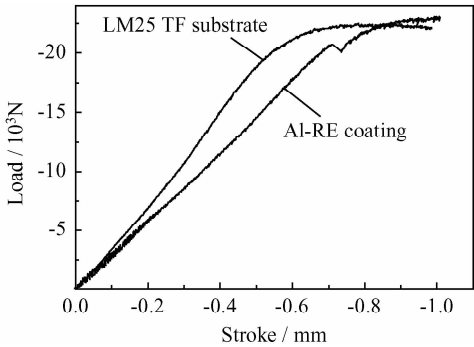


图 7 铝合金涂层及基体的热压载荷-位移曲线(200°C , 1000s)
Fig. 7 Thermal impress load-stroke curves of the aluminum alloy coating and substrate (200°C , 1000s)

2.3 高速电弧喷涂再制造发动机缸盖的应用

针对具体的铝合金发动机缸盖零件,制定了专门的高速电弧喷涂再制造工艺流程,并进行试验考

核。由于缸盖表面有许多的槽和孔,在喷砂预处理和喷涂前,设计专门的护具进行遮蔽防护。图 8(a)为环形压痕处的涂层特征照片,涂层的厚度约 1.5mm,略高于缸盖表面。制备好涂层后,使用平面铣床对涂层进行铣削加工,并基于平面度测试仪的

测量结果确定缸盖表面的铣削进刀深度,铣平涂层的同时对缸盖表面的平面度进行了修正。铣削后的结果如图 8(b)所示。完成应用试验后,对再制造的发动机缸盖进行了台架和装车考核,运行效果良好,未见异常。

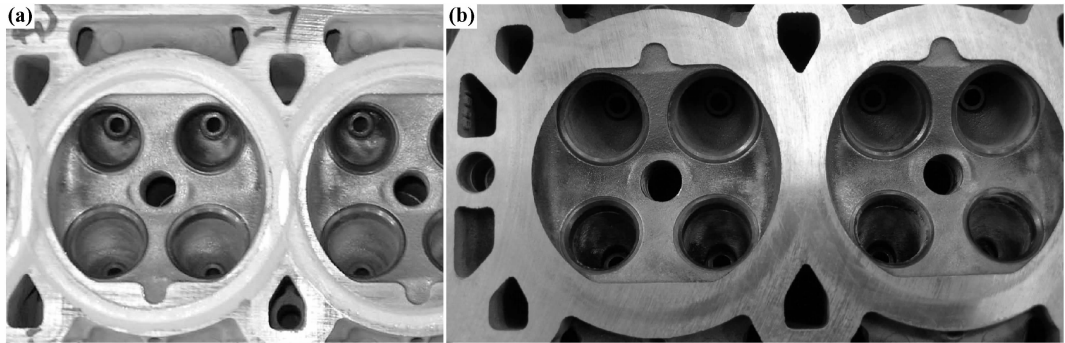


图 8 高速电弧喷涂 Al-RE 涂层在发动机缸盖上的应用照片

(a)喷涂后的涂层;(b)铣削加工后的再制造缸盖

Fig. 8 Photographs of applying the high velocity arc sprayed Al-RE coating on the automobile engine cylinder head

(a) the as-sprayed coating; (b) the remanufactured cylinder head after milling processing

3 结论

(1)废旧汽车发动机铝合金缸盖的失效形式,主要表现为缸盖表面的环形压痕和因变形造成表面平面度超差,压痕区附近的组织和性能发生了一定程度的变化,出现较多白色条状的 Si 相,硬度增大。

(2)采用高速电弧喷涂工艺制备的 Al-RE 涂层,呈现出典型层状结构的组织特征,涂层的硬度略低于 LM25 TF 铝合金基体,在热压条件下的载荷位移变形规律和 LM25 TF 铝合金基体比较接近,且热压变形实验后涂层与基体结合良好,未出现裂纹和剥离。

(3)基于实验分析和典型零件的应用考核结果,表明高速电弧喷涂 Al-RE 涂层技术可满足铝合金缸盖的再制造要求,实现了该部件的循环利用。

参考文献

- [1] 梁志杰,姚巨坤. 发动机再制造综述[J]. 新技术新工艺, 2004, (10): 35-37.
- [2] 徐滨士,马世宁,刘世参,等. 21 世纪的再制造工程[J]. 中国机械工程, 2000, (S1): 36-39.
- [3] 张国庆. 零件剩余疲劳寿命预测方法与产品可再制造性评估研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [4] 邢忠,姜爱良,谢建军,等. 汽车发动机再制造效益分析及表面工程技术的应用[J]. 中国表面工程, 2004, 17(4): 1-5, 9.

- [5] 刘谦,戴庆荣. 汽车发动机再制造发展现状及其关键技术[J]. 设备管理与维修, 2003, (2): 9-10.
- [6] XING Z, WANG D Q, XIE J J, et al. Benefit analysis and contribution prediction of engine remanufacturing to cycle economy[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12 (S2): 25-29.
- [7] YANG M, CHEN M. Life cycle of remanufactured engines[J]. Journal of Central South University of Technology, 2005, 12 (S2): 81-85.
- [8] 郭海伟. 报废汽车零部件绿色回收与再制造关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
- [9] 陈永雄,梁秀兵,刘燕,等. 电弧喷涂快速成形技术研究现状[J]. 材料工程, 2010, (2): 91-96.
- [10] 梁秀兵,陈永雄,白金元,等. 自动化高速电弧喷涂技术再制造发动机曲轴[J]. 中国表面工程, 2010, 23 (2): 112-116.
- [11] 金庆生,王峰. FZL-1 铸态铝合金性能及在汽车发动机上的应用[J]. 机械工程材料, 2005, 29 (12): 53-55.
- [12] 李新德,胡卫东,申超英. 影响发动机气缸盖密封质量的因素分析[J]. 建筑机械化, 2004, (10): 55-56.

基金项目: 国家自然科学基金(51105377); 国家 973 项目(2011CB013403)

收稿日期: 2011-07-12; 修订日期: 2011-12-05

作者简介: 陈永雄(1978—),男,讲师,博士,主要从事热喷涂技术研究,联系地址:北京市丰台区杜家坎 21 号装甲兵工程学院再制造技术重点实验室(100072),E-mail: yongxiongchen@yahoo.cn