

微弧氧化对活塞顶部耐热性能的影响

洪晓露 彭银江 张 将 朱鸿磊 刘永强 周沛瑜 陈大辉 侯林冲
(中国兵器科学研究院宁波分院)

摘 要 在工业生产条件下,采用微弧氧化技术对活塞顶部进行表面强化,分析微弧氧化对活塞顶部耐热性能的影响。结果表明,微弧氧化膜层表面区域有较多的凹坑,膜层中存在 Al 和 Si 复合氧化物;微弧氧化层有着良好的隔热效果,有效隔热温度为 20~30 ℃;未微弧氧化活塞极限耐热温度为 490~500 ℃,微弧氧化后活塞极限耐热温度为 520~530 ℃,耐热能力提高了 30 ℃ 左右。

关键词 微弧氧化;活塞;耐热性能

中图分类号 TG156.98 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.07.029 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



Effects of Micro Arc Oxidation on Heat Resistance of the Piston Top

Hong Xiaolu, Peng Yinjiang, Zhang Jiang, Zhu Honglei, Liu Yongqiang, Zhou Peiyu,
Chen Dahui, Hou Linchong
(Ningbo Branch of China Ordnance Academy)

Abstract: Under the condition of industrial production, the surface of the piston top was strengthened by micro arc oxidation technology, and the influence of micro arc oxidation on the heat resistance of the piston top was analyzed. The results reveal that there are many pits on the surface of the micro arc oxidation film, and there are Al and Si composite oxides in the film. The micro arc oxidation layer has good heat insulation effect, and the effective heat insulation temperature is 20~30 ℃. The ultimate heat-resistant temperature of the piston without micro arc oxidation is 490~500 ℃, and the ultimate heat-resistant temperature of the piston after micro arc oxidation is 520~530 ℃. The heat-resistant capacity is increased by about 30 ℃.

Key Words: Micro Arc Oxidation, Piston, Heat Resistance

活塞是发动机部件中工作环境最恶劣、结构最复杂的部件之一。发动机在高速运转过程中,活塞在燃气爆发压力和往复惯性力的作用下,承受着高载荷和持续的交变热负荷,尤其是活塞顶,直接与瞬时温度约为 2 300 ℃ 的高温气体接触,工作温度可达 350~400 ℃,局部温度将会在 420 ℃ 以上。因此,活塞顶部极易出现熔顶、烧蚀、热开裂等失效问题,严重时甚至会由于热应力造成活塞变形而引起拉缸^[1-4]。

传统的活塞材料设计优化及工艺优化已满足不了当前恶劣工况的要求。目前,活塞顶部的强化主要有微弧氧化^[5]、阳极氧化^[6]、激光重熔^[7]、等离子喷涂^[8]、复合材料增强^[9]等。其中,微弧氧化是在阳极氧化基础上发展而来的一种表面处理技术,操作简单、成本低、生产效率高。它是通过合金材料表面上的等离子体放电,发生复杂的反应而原位生长出具有陶瓷性质的氧化膜。该膜层与基体形成冶金结合,能提高材料表面的耐磨、

收稿日期:2022-10-23;修改稿收到日期:2022-11-26
基金项目:进口替代专项资助项目(TDZX-17-027-2)
第一作者简介:洪晓露,女,1988 年出生,副研究员,浙江宁波(315103),E-mail:hxl614517@163.com
引用格式:洪晓露,彭银江,张将,等.微弧氧化对活塞顶部耐热性能的影响[J].特种铸造及有色合金,2023,43(7):998-1 001.
HONG X L, PENG Y J, ZHANG J, et al. Effects of micro arc oxidation on heat resistance of the piston top[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(7):998-1 001.

耐腐蚀、耐高温等性能^[11-12]。微弧氧化技术相较于其他传统的表面处理技术具有相当大的优势,因此得到了研究者的广泛关注^[13-15]。

本研究在工业生产条件下,采用微弧氧化技术,对活塞顶部进行表面强化,分析微弧氧化对活塞顶部耐热性能的影响,为提高铝合金活塞使用寿命、拓宽顶部极限工作温度提供参考。

1 试验材料及方法

1.1 微弧氧化

活塞基体材料为 AlSi12Cu3Ni2Mg 合金,微弧氧化后的成品活塞见图 1。电解液配比为 2 g/L 的 NaOH + 12 g/L 的 Na₂SiO₃ · 9H₂O + 2 g/LN 的 Na₂WO₄ + 2 g/L 的 Na₃C₆H₅O₇ + 4 g/L 的 C₃H₈O₃。微弧氧化工艺参数:频率为 800 Hz、占空比为 30%、电流密度为 16.6 A/dm²,氧化时间为 40 min。



图1 微弧氧化后的活塞照片

Fig.1 Piston after micro-arc oxidation

1.2 性能表征

采用 ZEISS LSM 800 激光共聚焦显微镜对微弧氧化层表面形貌进行观察;取活塞顶面微弧氧化层截面区域进行镶嵌、粗磨、细磨、抛光,制成标准金相试样,在抛光态时,用 ZEISS Axio observer 金相显微镜进行观察和测量;采用 QUANTA FEG 250 扫描电镜对截面组织进行 SEM 观察,用 OXFORD 进行 EDS 能谱分析。

1.3 耐热性能对比

通过自行设计的活塞热冲击试验台(见图 2)对未微弧氧化和微弧氧化的活塞进行耐热性能对比试验。在活塞燃烧室顶部选取 3 个温度测量点通过红外直读测温仪测量其表面温度,见图 3。其中,“1”为顶部中心位置,“2”为喉口位置,“3”为顶部边缘位置。此外,在距活塞燃烧室顶部中心“1”位置 3~4 mm 处,从活塞底部通入 K 型热电偶,设热电偶测量点。加热方式采用液化石油气加热,冷却方式采用自来水冷却。

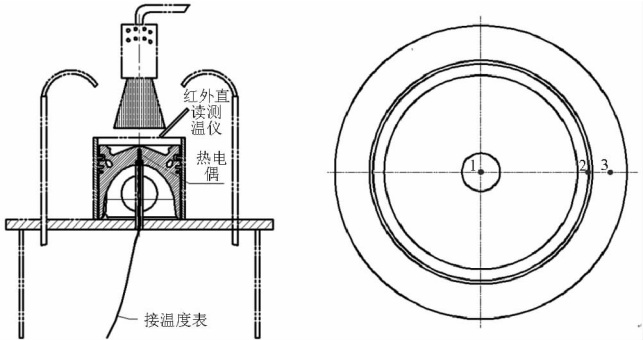


图2 活塞热冲击试验台示意图 图3 温度测量点示意图

Fig.2 Thermal impact station for the piston Fig.3 Schematic diagram of temperature measuring points

1.3.1 隔热效果试验

分别对未微弧氧化和微弧氧化的活塞燃烧室部位采用液化石油气加热 5 min(最大加热功率为 5 kW),对加热过程中的 1、2、3、4 和 5 min 5 个时间节点的温度进行测量。

1.3.2 极限耐热温度试验

分别对未微弧氧化和微弧氧化的两种活塞进行极

限耐热温度试验,见图 4。以 420 ℃为开始试验温度,160 ℃为冷却温度,热冲击循环次数以 10 次为基准,即从 160~420 ℃温度段开始试验,通过 10 次热循环冲击,则进行下一个温度段试验,直至两种活塞顶部燃烧室或喉口等部位出现异常现象后试验终止。



(a) 活塞加热 (b) 活塞冷却

图4 活塞热冲击试验照片

Fig.4 Images of thermal impactation testing for piston

2 试验结果及分析

图 5 为活塞顶部微弧氧化层的表面形貌。可以看出,膜层表面区域有较多的凹坑,且部分凹坑较大。活塞顶部微弧氧化层区域截取金相试样,进行膜层显微组织观察,见图 6。微弧氧化膜层厚度为 47 μm,且存在一定的孔洞。

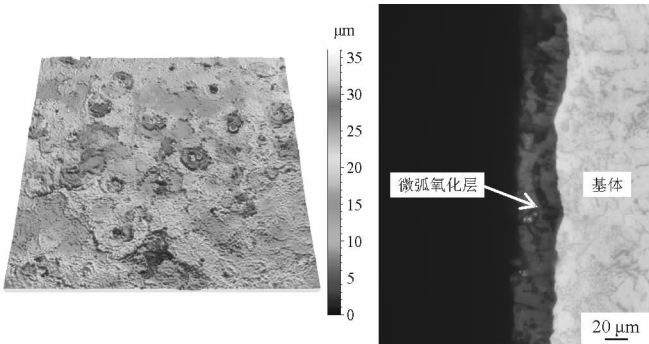


图5 微弧氧化层表面形貌

Fig.5 Surface morphology of micro-arc oxidation layer

图6 微弧氧化层显微结构图

Fig.6 Microstructure of micro-arc oxidation alyer

对微弧氧化膜层截面进行 SEM 和 EDS 面扫描分析,结果见图 7。可以看出,Si 的分布较为均匀,且与膜层中 Al 分布区域的边界清晰,部分 Al 分布区有 Si 重叠,从 O 分布图可以看出,除氧化膜表层有块状 Si 未被氧化外,膜层中其余的 Al 和 Si 均被氧化,Al、Si 分布重叠的部分生成 Al 和 Si 复合氧化物。

未微弧氧化活塞顶面温度随加热时间变化见表 1,微弧氧化活塞顶面温度随加热时间变化见表 2。

从表 1 可以看出,未微弧氧化的活塞表面温度采用红外直读测温仪测量,顶部采用热电偶测量,未加热时

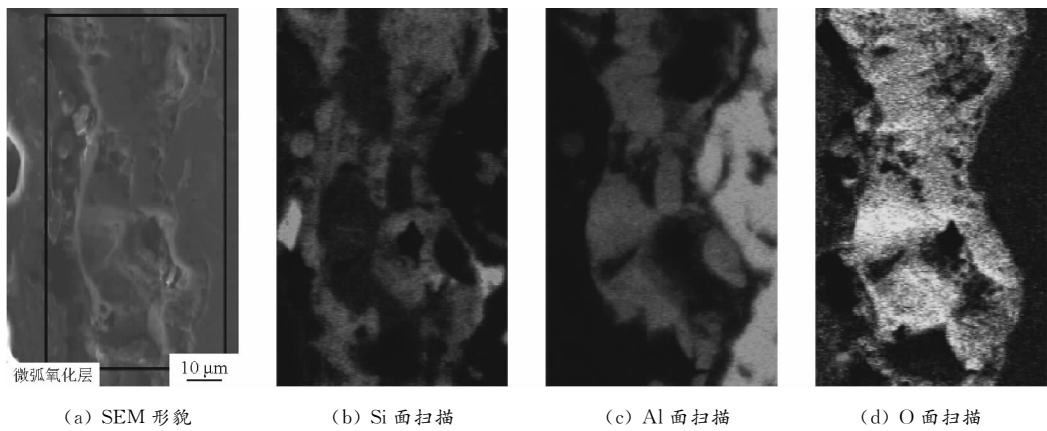


图 7 微弧氧化膜层截面 SEM 及 EDS 元素成分分布图

Fig.7 SEM images of micro-arc oxidation layer section and EDS element distribution

表 1 未微弧氧化活塞温度随加热时间的变化表

Tab.1 Variation of temperature with heating time of piston

without micro-arc oxidation

加热时间/ min	红外直读 测温仪读数/℃	热电偶 读数/℃	温度差/ ℃
0	20.5	20	0.5
1	115.2	108	7.2
2	156.3	153	3.3
3	256.7	254	2.7
4	362.1	361	1.1
5	462.8	461	1.8

注:红外直读测温仪读数表示 1~3 位置活塞顶部表面温度的平均值,热电偶读数表示 1 位置活塞顶部内腔的温度。

表 2 微弧氧化活塞温度随加热时间变化表

Tab.2 Variation of temperature with heating time of piston

with micro-arc oxidation

加热时间/ min	红外直读 测温仪读数/℃	热电偶 读数/℃	温度差/ ℃
0	20.3	20	0.3
1	108.3	86	22.3
2	165.6	144	21.6
3	267.8	240	27.8
4	369.8	346	23.8
5	444.2	421	23.2

注:红外直读测温仪读数表示 1~3 位置活塞顶部表面温度的平均值,热电偶读数表示 1 位置活塞顶部内腔的温度。

两者温度相差 0.5 ℃,基本一致。随着加热温度上升,刚开始温度差较大,随着加热时间延长,温度差逐渐缩小,1 min 测量的温度差达到最大值,4 min 以后趋于基本一致,温差在 1~2 ℃。

从表 2 可以看出,对于微弧氧化后的活塞,未加热时红外直读测温仪测量的活塞表面温度与热电偶测量的温度一致,随着对微弧氧化活塞顶面燃烧室部位进行加热,对加热过程中的 1、2、3、4 和 5 min 5 个时间节点的温度进行测量,两者均存在 21~28 ℃ 的温度差,计算平均值为 23.74 ℃。

可见,未微弧氧化的活塞没有隔热的效果,而在活

塞顶面微弧氧化后,微弧氧化膜层能够有效降低铝合金活塞的导热性能,起到一定的隔热效果,有效隔热温度为 20~30 ℃。

未微弧氧化和微弧氧化的活塞极限耐热温度试验情况具体见表 3 和表 4。

表 3 未微弧氧化活塞耐极限温度试验情况表

Tab.3 Limit temperature resistance of piston without

micro-arc oxidation

序号	最高温度/℃(加热)		低温/℃(水冷)		循环 次数/N	活塞顶 部状态
	设计	实测	设计	实测		
1	420	418~421	160	159~161	10	完好✓
2	440	438~442	160	159~161	10	完好✓
3	460	458~462	160	159~161	10	完好✓
4	480	478~483	160	159~161	10	完好✓
5	490	488~492	160	159~161	10	完好✓
6	500	499~501	160	159~161	2	局部流汗×

注:实测温度为 1 位置的红外直读测温仪测量值。

表 4 微弧氧化活塞耐极限温度试验情况表

Tab.4 Limit temperature resistance of piston with

micro-arc oxidation

序号	最高温度/℃(加热)		低温/℃(水冷)		循环 次数/N	活塞顶 部状态
	设计	实测	设计	实测		
1	420	418~421	160	159~161	10	完好✓
2	440	438~442	160	159~161	10	完好✓
3	460	458~462	160	159~161	10	完好✓
4	480	478~482	160	159~161	10	完好✓
5	500	488~492	160	159~161	10	完好✓
6	510	499~502	160	159~161	10	完好✓
7	520	520~522	160	159~161	10	完好✓
8	530	530~532	160	159~161	3	局部流汗×

注:实测温度为 1 位置的红外直读测温仪测量值。

从表 1 可以看出,未微弧氧化活塞经过 160~420 ℃、160~440 ℃、160~460 ℃、160~480 ℃和 160~490 ℃ 5 个温度段,每个温度段各 10 次循环热冲击后,活塞顶面完好,未发现异常现象。当试验到 160~500 ℃第二个循环时,出现异常“流汗”现象,随后未微弧氧化活塞的热冲击试验终止,见图 8。可见,未微弧氧化

活塞其顶部燃烧室的极限耐热温度为 490~500 ℃。



(a) 160~490 ℃热冲击
10 次后完好活塞
(b) 160~500 ℃热冲击
2 次后“流汗”活塞

图 8 热冲击试验后未微弧氧化活塞

Fig.8 Images of thermal impacted piston without micro-arc oxidation

从表 2 可以看出,微弧氧化活塞经过 160~420 ℃、160~440 ℃、160~460 ℃、160~480 ℃、160~500 ℃、160~510 ℃和 160~520 ℃ 7 个温度段,每个温度段各 10 次循环热冲击后,活塞顶面完好,未发现异常现象。当试验到 160~530 ℃时第 3 个循环时,出现“流汗”现象,随后微弧氧化活塞的热冲击试验终止,见图 9。可见,微弧氧化活塞其顶部燃烧室的极限耐热温度为 520~530 ℃。



(a) 160~520 ℃热冲击
10 次后完好活塞
(b) 160~530 ℃热冲击
3 次后“流汗”活塞

图 9 微弧氧化活塞热冲击试验后照片

Fig.9 Images of thermal impacted piston with micro-arc oxidation

由于微弧氧化活塞顶面比普通活塞增加了微弧氧化陶瓷层,起到了一定的隔热作用,因此提高了活塞燃烧室部位的极限耐热能力,比未进行微弧氧化的活塞耐热能力提高了约 30 ℃。

对于微弧氧化活塞,虽然由红外直读测温仪测量的表面温度已到达 530 ℃,但由于存在 20~30 ℃的有效隔热温度,活塞本体仅在 500 ℃左右。有研究发现,基体材料 AlSi12Cu3Ni2Mg 活塞合金在 503 ℃以上可发生包晶反应,由液相可析出 $\text{CuAl}_2\text{M-Mg}_2\text{Si}$ 、 $\text{Cu}_2\text{Mg}_8\text{Si}_6\text{Al}_5$ 、 Al_7CuNi 等低熔点共晶体^[10]。当活塞材料温度达到 500 ℃左右时,材料中的低熔点相发生相变,形成小液滴析出表面,即所谓的“流汗”现象^[16-17]。微弧氧化层提高了活塞本体的耐热极限,相当于间接提

高了材料的相变反应温度,低熔点相在表面温度达到 520~530 ℃时,才通过微弧氧化膜层间的孔洞析出,形成局部“流汗”。

3 结 论

(1)对活塞顶部进行微弧氧化处理,微弧氧化膜层表面区域有较多的凹坑,膜层中存在 Al 和 Si 复合氧化物。

(2)微弧氧化层有着良好的隔热效果,有效隔热温度为 20~30 ℃。

(3)未微弧氧化活塞极限耐热温度为 490~500 ℃,微弧氧化后活塞极限耐热温度为 520~530 ℃,耐热能力提高了 30 ℃左右。

参 考 文 献

- [1] 许春光,王国莹,梁惠杰,等. 高强度柴油机铝合金活塞承载特性研究[J]. 车用发动机, 2020, 4(2): 35-41.
- [2] 文均,雷基林,于跃,等. 柴油机活塞顶面热状态变化规律试验研究[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(4): 171-175.
- [3] 宋元强,鲍帅华,邹明恩,等. 某汽油发动机活塞头部烧蚀的分析[J]. 小型内燃机与车辆技术, 2021, 50(4): 47-49.
- [4] 秦朝举. 柴油机活塞铝合金材料烧蚀规律研究[D]. 北京:北京理工大学, 2015.
- [5] 孙长飞,李更天,马春生. 电参数和反应时间对微弧氧化热障陶瓷层制备的影响[J]. 大连海事大学学报, 2021, 47(1): 119-125.
- [6] 魏睿,张通,向静,等. 关于阳极氧化工艺在发动机铝合金活塞上应用的介绍[A]. 2021 重庆市铸造年会论文集[C]. 重庆, 2021.
- [7] 李俊鹏,杨忠,李建平. 铝活塞合金激光重熔组织与性能研究[J]. 热加工工艺, 2013, 42(2): 119-121.
- [8] 胡艳娇,李敏,刘宇平,等. 高强度活塞等离子喷涂涂层隔热性能研究[J]. 热加工工艺, 2019, 48(6): 141-145.
- [9] 秦朝举,张卫正,原彦鹏,等. 硼酸铝晶须增强铝硅基复合材料活塞烧蚀研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2018, 39(1): 143-148.
- [10] 关长辉. 微弧氧化技术在 ZL109 铸造铝合金活塞头表面优化处理中的应用研究[J]. 企业科技与发展, 2021(7): 72-74.
- [11] 卢立红. 微弧氧化技术在消防车发动机活塞上的应用[J]. 表面技术, 2006, 35(1): 83-84.
- [12] 刘雁玲. 活塞铝合金微弧氧化热障涂层生长及组织性能[D]. 西安:西安工业大学, 2012.
- [13] 彭俊杰. 微弧氧化在船用柴油机铝合金活塞上的应用[D]. 辽宁大连:大连海事大学, 2010.
- [14] 蒲俊. Y_2O_3 掺杂对铸铝活塞材料微弧氧化膜特性影响及机理研究[D]. 成都:西南石油大学, 2019.
- [15] 王树棋,王亚明,邹永纯,等. 微弧氧化涂层微纳米孔调控及功能化应用研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 1-22.
- [16] 童洪辉,金凡亚. 微弧氧化与磁控溅射复合处理的钛合金表面耐磨性研究[J]. 材料保护, 2005, 38(7): 18-20.
- [17] BELOV N A, ESKIN D G, AVXENTIEVA N N. Constituent phase diagrams of the Al-Cu-Fe-Mg-Ni-Si system and their application to the analysis of aluminium piston alloys[J]. Acta Materialia, 2005(53): 4 709-4 722.

(编辑:张正贺)