

某型航空活塞发动机排气门烧蚀机理

张洪涛¹, 孟现召¹, 冯岩鹏²

(1. 中国民用航空飞行学院 洛阳分院, 河南 洛阳 471000;

2. 中国民航科学技术研究院 航空安全技术实验室, 北京 100028)

摘 要: 针对某型航空活塞发动机在运行中因使用国产高铅燃油而时常发生较严重的排气门烧蚀故障的问题, 通过对该型发动机上全新、使用过以及已烧蚀排气门的微观金相分析, 结合该型发动机的结构设计和实际运行环境分析这种排气门烧蚀故障的发生机理, 认为排气门运行温度过高导致排气门密封面上的抗腐蚀保护层被破坏掉是导致排气门烧蚀的根本原因, 而高铅燃油中的铅沉积在排气门密封面上导致排气门散热不良是排气门过热的主要原因。据此提出改用低铅燃油减少铅沉积以改善排气门散热条件、降低排气门运行温度的解决方案, 经实际运行测试证明排气门密封面上的抗腐蚀保护层得到了有效保护, 解决了该型发动机的排气门烧蚀故障。

关 键 词: 活塞发动机; 排气门烧蚀; 高铅燃油; 铅沉积; 金相分析

中图分类号: V234⁺1

文献标志码: A

Principle of exhaust valve ablation at an aero piston engine

ZHANG Hong-tao¹, MENG Xian-zhao¹, FENG Yan-peng²

(1. Luoyang College,

Civil Aviation Flight University of China, Luoyang Henan 471000, China;

2. Laboratory of Aviation Safety Technology,

China Academy of Civil Aviation Science and Technology, Beijing 100028, China)

Abstract: Serious exhaust valve ablation occurred at an aero piston engine during operating process due to the domestic high lead content fuel. Through micro metallographic analysis about the new, served and ablated exhaust valves from these engines, and based on the engine structural design and actual operating environment, a conclusion was drawn. Too high operating temperature making damage to the anti-corrosion protection layer on the exhaust valve's sealing area is the primary cause of the exhaust valve ablation, and the lead from the high lead content fuel deposited on the sealing area making the exhaust valves in poor-cooling condition is the predominant cause of hotter exhaust valves. The corresponding solution could improve the exhaust valve's cooling condition and decrease their operating temperature by running these engines with low lead content fuel to reduce the lead deposition. The practice shows that the anti-corrosion layer has been well protected and the fault of exhaust valve ablation is fixed in these engines.

Key words: piston engine; exhaust valve ablation; high lead content fuel; lead deposit; metallographic analysis

收稿日期: 2015-01-20

基金项目: 中国民用航空飞行学院科学研究基金重点项目(ZJ2014-05)

作者简介: 张洪涛(1968—), 男, 河南郾城人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为航空维修管理和航材管理。

在航空活塞发动机(下文简称发动机)上,由于排气门的工作环境较为恶劣^[1],为延长排气门的使用寿命,除采用特殊的合金材料制造外^[2],各发动机制造商均对其进行了特殊的结构设计,主要有以 Lycoming 为代表的中空钠冷气门和以 Continental 为代表的实心气门两种类型^[3]. 这两种排气门在散热渠道和运行温度等方面存在较大差异. 中空钠冷气门主要依靠金属钠将排气门头部的热量导向气门杆后经气门导套传向气缸头;实心气门则在正常情况下约有 75% 的热量通过排气门-座间接触面从排气门头部传向气缸头,所以实心气门的实际运行温度更大程度地受排气门-座间接触状况的影响. 而得益于金属钠高效的相变导热,中空钠冷气门的实际运行温度比实心气门低约 120 °C^[3].

中国民航飞行学院新引进的教练机的发动机采用了实心气门设计,运行中在使用国产 RH100 号航空汽油的条件下发生了较严重的排气门烧蚀故障,而该型教练机作为一种成熟机型在国内外的保有量已达数千架,其发动机在使用国外 100LL 航空汽油的条件下并没有出现这种大量的排气门烧蚀故障. 同时中国民航飞行学院曾长期在其数百架采用中空钠冷气门设计的发动机上使用国产 RH100 号航空汽油也没有出现这种大量的排气门烧蚀故障.

根据航空燃油技术规范^[4-5],国产 RH100 号航空汽油中铅质量浓度约为国外 100LL 航空汽油中铅质量浓度的 2 倍. 相关领域关于高铅燃油对发动机影响方面的研究也多限于发动机抖动^[6]、火花塞积铅^[7]等,基于高铅燃油条件下的发动机排气门烧蚀机理研究鲜见报道^[1].

研究显示,发动机排气门的烧蚀都是由于排气门与气门座之间密封不严,高温燃气从排气门与气门座之间逸出的过程中对密封面金属组织进行高速冲刷加温所致^[8],因此排气门烧蚀应始于排气门密封不严.

本文通过对该新型教练机的发动机排气门密封面进行金相和能谱分析,从材料的高温腐蚀与防护角度讨论在高铅燃油条件下该型发动机排气门关闭不严的原因和烧蚀的机理,为最终提出有效的解决方案提供理论支撑.

1 检测方法

发动机排气门一般都由多种不同的高温合金制成^[2]. 高温合金的种类较多^[9-10],欲正确分析该

型发动机排气门的高温腐蚀行为,需先弄清楚该型发动机排气门密封面的材料种类.

分别选用该型教练机的发动机上全新未使用、使用时间较短、使用时间略长以及已烧蚀的排气门作为样本,其中已使用排气门的使用时间分别为 98 h23 min 和 522 h36 min,已烧蚀排气门的使用时间为 1 044 h54 min. 使用 ZEISS Discovery V20 型体视显微镜观察样本排气门及其密封面的宏观形貌,使用 TESCAN VEGA TS 5136 XM 型扫描电子显微镜观察排气门及密封面的显微形貌,使用 Leica DM-4000M 型金相显微镜分析排气门及密封面的微观金相组织,并使用 EDAX 能谱仪分析材料的主要元素成分.

2 检测结果

2.1 全新排气门密封面的微观金相分析

将全新未经使用的排气门纵向切开,其纵切面金相显微组织如图 1 所示. 图中红色虚线处为排气门与气门座相接触位置的密封面,这是一种耐磨堆焊层的外表面,全新排气门的密封面平直光滑. 在全新排气门上耐磨堆焊层的厚度约为 0.9 mm,耐磨堆焊层左上方为基体组织,其晶粒尺寸随其与耐磨堆焊层之间距离的增加而迅速减小,表现出焊接组织中热影响区的典型特征.



图1 全新排气门密封面区域的金相组织
Fig. 1 Metallography of sealing area of a new exhaust valve

进一步观察耐磨堆焊层的内部组织,可发现耐磨堆焊层由两相组成,其中一相的颜色较亮,呈灰白色;另一相颜色较暗,呈灰黑色;灰黑色相的晶粒分布方向基本与密封面相垂直. 如图 2.

对耐磨堆焊层内灰白色、灰黑色两相组织的成分进行能谱分析,结果如图 3.

对灰白色、灰黑色两相组织内元素的含量进行测定,结果如表 1. 两相组织中元素镍(Ni)和铬(Cr)均占主要地位,表明该耐磨堆焊层的材料为镍铬(Ni-Cr)合金.

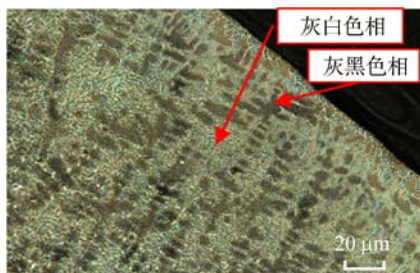
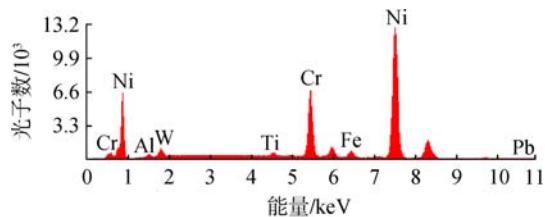


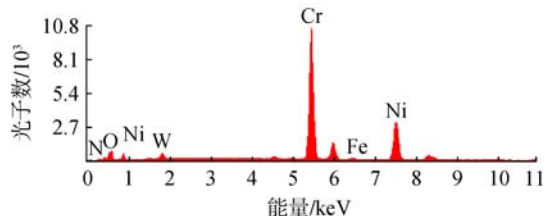
图 2 全新排气门耐磨堆焊层内的金相组织
Fig. 2 Metallography of wear-resistant layer of a new exhaust valve

2.2 已使用排气门的密封面微观金相分析

在体视显微镜下观察使用时间较少的排气门密封面的外部形貌,可以看到密封面外部形状完整,沿密封面外表面整体覆盖了一层红黄相间的沉积物,能谱分析显示该沉积物的主要元素为铅(Pb),如图 4 所示。



(a) 灰白色相能谱曲线



(b) 灰黑色相能谱曲线

图 3 耐磨堆焊层内两相组织的能谱曲线
Fig. 3 Energy curves of the two phases in wear-resistant layer

表 1 耐磨堆焊层内两相组织的成分

Table 1 Composition of the two phases in wear-resistant layer

两相组织	参数	C	W	Al	Ti	V	Cr	Fe	Ni
灰白色相	质量分数/%			1.85	2.39	0.12	20.50	1.15	73.99
	摩尔分数/%			3.81	2.77	0.13	21.97	1.15	70.17
灰黑色相	质量分数/%	1.88	9.43		0.47	0.10	29.79	2.18	56.15
	摩尔分数/%	8.76	2.87		0.55	0.11	32.04	2.19	53.48

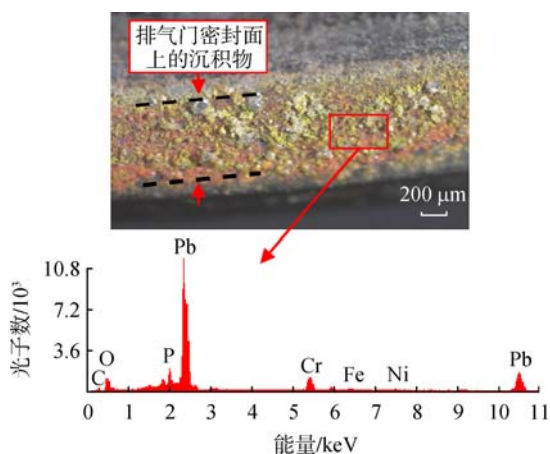


图 4 使用时间较少的排气门密封面上沉积层和能谱曲线
Fig. 4 Deposited layer on sealing face and its energy curves of an exhaust valve with little served time

将使用时间略长的排气门纵向切开,其纵切

面金相显微组织如图 5。图中红色虚线围框处为排气门与气门座相接触位置的密封面,呈现明显的凹陷形貌。

对密封面凹陷区金相组织进行局部放大,可发现从密封面开始向内约 50 μm 范围内灰黑色相几乎被完全侵蚀掉,只剩下灰白色相,呈多孔结构,如图 6。

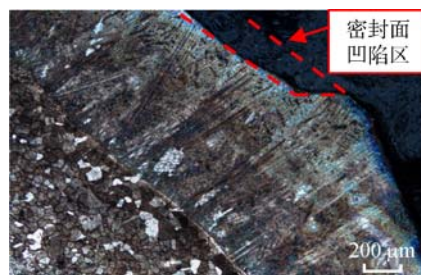


图 5 使用时间略长的排气门密封区域金相组织
Fig. 5 Metallography of sealing area of an exhaust valve with some served time

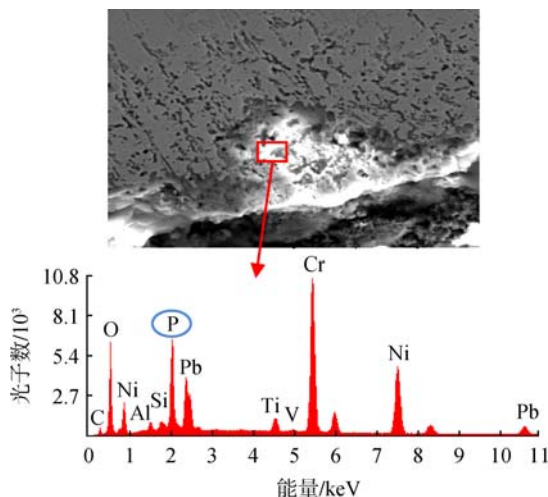


图6 排气门密封面上沉积层的能谱曲线

Fig. 6 Energy curves of deposited layer on sealing face of an exhaust valve

在两相材料均被侵蚀掉的位置出现凹坑,使密封面表面变得凸凹不平;紧贴密封面外表面有一层白色的沉积物,对沉积物进行能谱分析,显示其主要元素为镍、铬、铅、氧等,同时发现沉积物中元素磷(P)的谱峰较明显。

2.3 已烧蚀排气门的密封面微观金相分析

在体视显微镜下对已烧蚀排气门密封面上的过热区域进行观察,其整体形貌如图7。图中两红色虚线之间的凹陷区为密封面,密封面的外表面较为粗糙,在密封面上有许多微裂纹,微裂纹的走向为沿排气门头圆形端面的半径方向;较大的裂纹长度贯穿整个密封面凹陷区域,深度贯穿排气门端面边缘区。

将该已烧蚀的排气门纵向切开,可观察到密封面微裂纹附近更严重的氧化侵蚀特征,如图8。对烧蚀侵蚀区沉积物的能谱分析表明其主要元素为镍、氧、铬、铁、铅和铝等,其中铬的谱峰强度相对较低。

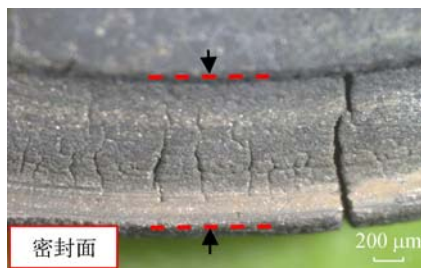


图7 已烧蚀排气门密封面过热区域的微裂纹
Fig. 7 Micro-cracks in overheated sealing area of an ablated exhaust valve

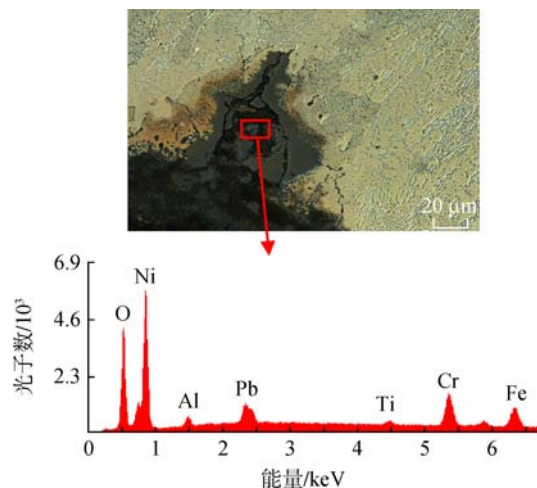


图8 已烧蚀排气门密封面上微裂纹附近的氧化侵蚀特征

Fig. 8 Corrosion characteristics near the macro-cracks in sealing area of an ablated exhaust valve

3 结果讨论

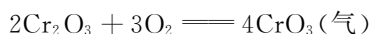
镍基合金的高温氧化和热腐蚀行为同时发生^[11]。由相关资料可知,镍铬合金具有优良的高温抗腐蚀能力的机理在于高温下镍铬合金表面有 Cr_2O_3 氧化膜生成^[12-13],而 Cr_2O_3 是高温下热力学唯一稳定的氧化物^[13],致密的 Cr_2O_3 氧化膜在高温下可以防止氧化膜下的金属进一步氧化失效^[12-13],因此镍铬合金主要在氧化性介质条件下使用,能够抗高温氧化和含硫(S)、钒(V)等气体的腐蚀^[9,13]。在实际运行的高温环境中,采用镍铬合金制造的排气门密封面上应能够生成一层 Cr_2O_3 氧化膜,但对已使用(图6)和已烧蚀(图7)排气门的密封面的检测结果显示在这些表面上并没有观察到平滑的保护层形貌,而是凸凹不平的氧化侵蚀后的多孔结构和裂纹沟槽。显然,在这些已使用和已烧蚀排气门的密封面外表面上并没有理论上的 Cr_2O_3 氧化膜存在,这与通常的镍铬合金高温抗腐蚀机理不符。

3.1 排气门密封面表面没有 Cr_2O_3 氧化膜的原因

文献[13]表明,镍铬合金的抗腐蚀能力与镍铬合金表面 Cr_2O_3 氧化膜的纯度有关。当镍铬合金中铬质量分数小于5%时,镍铬合金氧化速度随铬质量分数增加而升高;当铬质量分数在5%~10%时,镍铬合金氧化速度随铬质量分数增加而降低;当铬质量分数大于15%后,镍铬合金表面的氧化膜是由连续的 Cr_2O_3 单相组成,镍铬合金氧化速度开始显著降低且不随铬质量分数的进一步增加而再次降低^[13]。为了使 Cr_2O_3 氧化膜

出现局部破损时镍铬合金具有保护性 Cr_2O_3 的再生修复能力,工业实际应用中把铬质量分数量提高到 20%^[13].

但在另一方面,高温下 Cr_2O_3 能够进一步被氧化生成挥发性的 CrO_3 ^[13],反应式为



这种反应在 950℃ 以上进行得很快,因此要求 Cr_2O_3 氧化膜的使用温度不宜超过 1000℃^[13]. 如果短时的超温 Cr_2O_3 氧化膜尚能自我修复的话,长时间的超温将引起 Cr_2O_3 氧化膜不断生成和不断被氧化为挥发性的 CrO_3 ,随着镍铬合金中铬质量分数的不断减少最终将导致镍铬合金材料贫铬, Cr_2O_3 氧化膜难以自我修复,材料表面就失去了 Cr_2O_3 氧化膜的保护.

对比图 8 与图 6 两种沉积物的能谱分析结果,在烧蚀排气门沉积物中铬的谱峰强度相对较低,表明烧蚀排气门的沉积物相对贫铬,其原因正是由于在更高温度下有更多的铬被氧化为 CrO_3 后挥发掉了.

由此可见,排气门密封面上没有发现 Cr_2O_3 氧化膜并非不符合镍铬合金的高温抗腐蚀机理,而是由于排气门在过高温下长时间运行导致材料贫铬化,使 Cr_2O_3 氧化膜难以生成和维持.

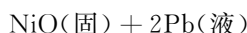
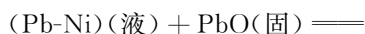
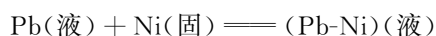
3.2 失去 Cr_2O_3 氧化膜后排气门密封面材料的腐蚀行为

对全新排气门密封面耐磨堆焊层内灰黑色相的能谱分析显示其含有元素铬、铁和碳(如表 1),图 2 中灰黑色相的晶粒分布方向也符合耐磨堆焊层合金中碳化物的生长规律,根据相关资料可推断出在灰黑色相中有铬碳化化合物的存在^[14]. 铬碳化化合物具有很高的硬度^[14],这是耐磨堆焊层具有优良耐磨性的主要原因.但在 850℃ 以上高温条件下,铬碳化化合物将向 M_{23}C_6 型转化并沿晶界析出,且温度越高析出越明显^[15]. 由于晶粒内固溶体中的铬不能及时扩散补充到晶粒边界,造成晶界区贫铬;贫铬区电势与晶粒内部不同,当遇到腐蚀介质时就发生短路电池效应,贫铬区被迅速侵蚀^[16]. 文献^[17]指出高温下如果晶界偏聚的碳化物暴露于合金表面将诱发深入合金内部的“内腐蚀”.或许“内腐蚀”仍属晶界贫铬所引起的晶界电化腐蚀,但在过高温下失去 Cr_2O_3 氧化膜后耐磨堆焊层中灰黑色相先于灰白色相被侵蚀掉(如图 6)的结果是确定的.

燃油中的四乙基铅被氧化后生成 PbO . 根据

相关资料,低熔点氧化物能够与金属形成熔点更低的共晶,使金属材料加速氧化^[13]. 共晶温度是金属开始加速氧化的起始温度, PbO 对镍的共晶温度约为 850℃^[13],低于 Cr_2O_3 能够被破坏掉的临界温度,因此在高铅燃油条件下一旦失去了 Cr_2O_3 氧化膜的保护,排气门密封面材料中的镍就处于 PbO 的直接侵蚀之下.

值得提出的是,镍被 PbO 氧化,生成物中有液态铅,液态铅溶解于镍中形成液态 Pb-Ni 低熔点合金, Pb-Ni 低熔点合金中的镍再进一步被 PbO 氧化又生成液态铅^[13],如下式:



这就形成了一个循环,整体来讲镍在液态铅中溶解是其特点.

综上,尽管密封面耐磨堆焊层中灰黑色、灰白色两相被侵蚀的机理不同,但在这种特定的高温和高铅环境中一旦失去 Cr_2O_3 氧化膜的保护两相材料均会被快速侵蚀掉.

3.3 排气门密封面温度过高的原因

实心气门的实际运行温度受排气门-气门座间接接触状况的影响很大. 研究资料表明,排气门上的黄色铅氧化物沉积指示出排气门温度过高,在更高的排气门温度时则出现红褐色的铅氧化物沉积^[3]. 图 4 观察到排气门密封面上覆盖有一层红黄相间的铅沉积层,指示出高铅燃油条件下使用时间很短的排气门已经出现了排气门密封面超温现象.

对实心气门而言,正常情况下排气门头温度最低的部分是与气门座相接触的密封面位置,温度最高的部分是排气门的中心^[3];但如果排气门-气门座间接接触面出现接触不良,大量的热量不能通过排气门密封面有效导向气门座的时候,这些热量只能流向排气门头中心由气门杆通过气门导套传向气缸头;在温度梯度的作用下,排气门头上的温度分布将出现逆转,排气门头边缘位置将成为整个排气门体温度的最高点,而排气门密封面正位于排气门头边缘位置^[18-19];同时,在排气门-气门座间有沉积物时引起排气门关闭不严,燃气泄漏也降低了排气门密封面的导热能力^[3]. 可见排气门密封面上铅沉积引起排气门散热不良是导致排气门密封面温度过高的直接原因.

3.4 排气门烧蚀的机理分析

相关研究指出,燃油中元素硫质量浓度过高时可引起排气门烧蚀^[20],而磷元素能够加剧硫的腐蚀作用^[21].对已使用排气门的密封面上两相均被侵蚀掉的位置留下的沉积物的能谱分析也表明腐蚀产物中确实含有磷元素,如图6.在两种燃油的技术规范中规定了相同的硫质量浓度上限标准^[4-5],但据对实际油样的检测显示100LL航空汽油中硫质量浓度是国产RH100号航空汽油中硫质量浓度的8倍,而该型发动机大量的运行实践证明在100LL航空汽油条件下并未出现如此大量排气门烧蚀故障,同时单纯由磷引起氧化侵蚀的相关报道也较少见,可见尽管在腐蚀产物中检测到了磷元素,但磷元素和硫元素都不是引起这种特定故障的原因;况且镍铬合金应能够抵抗高温氧化和含硫、钒等气体的腐蚀^[9,13].据分析,此处磷元素应来自于中国民航飞行学院按照厂家推荐在国产RH100号航空汽油中添加的排铅剂磷酸三甲苯酯(TCP).

腐蚀介质的侵蚀程度取决于排气门的工作温度^[2],中空钠冷气门主要的散热通道不在排气门密封面上,排气门温度对排气门-气门座间密封面的接触状况不敏感,况且中空钠冷气门的实际运行温度比实心气门低,所以高铅燃油条件下中空钠冷气门能够正常使用.但实心气门最主要的散热渠道是排气门-气门座间密封面,如果密封面上铅沉积导致排气门-气门座间接触不良引起排气门散热困难,则排气门密封面位置的温度就会升高;当温度升高至临界值后,密封面表层的 Cr_2O_3 氧化膜被破坏掉;长时间的持续超温最终导致材料贫铬, Cr_2O_3 氧化膜难以恢复,排气门密封面彻底失去 Cr_2O_3 氧化膜的保护;此后灰黑色、灰白色两相被相继侵蚀,再加上密封面区域材料失去灰黑色耐磨相后硬度降低,以及排气门在气门弹簧弹力作用下与气门座之间的撞击、磨损等因素^[1],在排气门密封面上就形成凹陷区(图4),引起密封面凹陷区关闭不严,高温燃气从该区域逸出.

据相关研究资料,燃烧室中燃气温度可达 2500°C ^[22],速度为 $70\sim 80\text{ m/s}$ ^[8],这些逸出的高温燃气流对逸出区的排气门金属组织进行高速冲刷加热并带走熔融的排气门材料,使烧蚀区域不断扩大^[8],排气门烧蚀故障得以发生.

由此可见,该型发动机排气门烧蚀的直接原因是排气门密封不严引起高温燃气泄漏冲刷加温所致.而排气门密封不严的根本原因是排气门温度持

续过高导致密封面材料贫铬化失去 Cr_2O_3 氧化膜.

4 实践检验

由以上分析可知,降低燃油中的铅质量浓度能够减少排气门积铅,为改善排气门散热条件、降低排气门运行温度提供了可能.基于此,中国民航飞行学院于2014年7月开始在其新型教练机上改用了国外100LL航空汽油,到2014年12月为止整个机群共飞行 $16\,618\text{ h}54\text{ min}$,未再有排气门烧蚀故障的案例报告,而形成鲜明对比的是上一年度同期飞行 $12\,729\text{ h}36\text{ min}$ 却出现了近40起排气门烧蚀故障.

作为对研究结果正确性的确认,改用100LL航空汽油并收到预期效果后在该型发动机上随机选取一排气门进行检测.样本排气门的使用时间为 $454\text{ h}12\text{ min}$,在高倍放大镜下观察到密封面上有致密的氧化膜形貌存在,如图9.这说明排气门密封面上的 Cr_2O_3 氧化膜确实是在后期使用中合适的温度环境中形成的,也证明通过保护排气门上 Cr_2O_3 氧化膜来针对性解决该型发动机排气门烧蚀故障的思路是正确的.

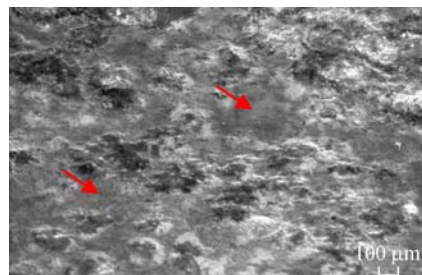


图9 排气门密封面上的氧化膜形貌

Fig. 9 Oxidation film on the sealing face of a sample exhaust valve

5 结 论

1) 排气门烧蚀的起始点在于排气门密封面积铅,但是否引起烧蚀与排气门温度升高程度有关,这决定于积铅程度和排气门散热方式.以密封面作为主要散热渠道的实心气门对密封面积铅很敏感.

2) 燃油中的铅沉积在排气门密封面上导致实心气门散热困难,提高了排气门的运行温度,使 Cr_2O_3 氧化膜被破坏的概率增大,在排气门密封面上失去表面 Cr_2O_3 氧化膜的情况下能够加速排气门材料的氧化腐蚀进程.

3) 随燃油中铅质量浓度增加实心气门的烧蚀概率增大,在采用实心气门设计的发动机上不

适合使用高铅燃油。

4) 解决排气门烧蚀的关键是保护排气门密封面上的 Cr_2O_3 氧化膜,即保持排气门运行温度在 Cr_2O_3 氧化膜被破坏的临界值以下。

参考文献:

- [1] 王琳,刘佐民. 发动机排气门失效机理研究的国内外概况[J]. 武汉工业大学学报,2000,22(5):83-86.
WANG Lin, LIU Zuomin. The present situation of the failure mechanism of engine exhaust valve in the world[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2000, 22(5): 83-86. (in Chinese)
- [2] 吴旭初,沈文君. 发动机气门材料应用及进展[J]. 内燃机工程,1999(1):33-39.
WU Xuchu, SHEN Wenjun. The application and development of engine valve materials[J]. Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 1999(1): 33-39. (in Chinese)
- [3] Schwaner J. Sky ranch engineering manual[M]. 2nd ed. Sacramento: Sky Ranch Incorporation, 1991.
- [4] 全国石油产品和润滑剂标准化技术委员会. GB 1787-2008 航空活塞式发动机燃料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008: 2.
- [5] ASTM International. ASTM D910-15 Standard specification for leaded aviation gasolines[S]. USA: ASTM International, 2015: 3-4.
- [6] 刘玉科. 使用高铅航空汽油的航空活塞发动机抖动故障原因初探[J]. 中国民航飞行学院学报, 2013, 24(2): 57-58.
LIU Yuke. Discussion on piston engine shaking caused by high-lead aviation gasoline [J]. Journal of Civil Aviation Flight University of China, 2013, 24(2): 57-58. (in Chinese)
- [7] 陈亮, 吴江. 航空活塞发动机火花塞积铅分析与预测[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(25): 313-317.
CHEN Liang, WU Jiang. Analysis and prediction of spark-plug lead fouling for reciprocating aeroengine[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(25): 313-317. (in Chinese)
- [8] Zima S, Greuter E. Engine failure analysis: internal combustion engine failures and their causes[M]. Warrendale: SAE International, 2012.
- [9] 王成, 巨少华, 荀淑玲, 等. 镍基耐蚀合金研究进展[J]. 材料导报, 2009, 23(2): 71-76.
WANG Cheng, JU Shaohua, XUN Shuling, et al. Progress in research on nickel-based corrosion resistant alloys[J]. Materials Review, 2009, 23(2): 71-76. (in Chinese)
- [10] 王会阳, 安云岐. 镍基高温合金材料的研究进展[J]. 材料导报, 2011, 25(18): 482-485.
WANG Huiyang, AN Yunqi. Research progress of Ni-based superalloys[J]. Materials Review, 2011, 25(18): 482-485. (in Chinese)
- [11] 卢旭东, 陈涛, 李光瑞. 一种镍基合金 850℃ 的盐膜热腐蚀行为[J]. 电镀与精饰, 2013, 35(5): 36-39.
LU Xudong, CHEN Tao, LI Guangrui. Hot corrosion behaviour of a Ni-base superalloy beneath Na_2SO_4 - K_2SO_4 mixture salt deposit at 850℃ [J]. Plating and Finishing, 2013, 35(5): 36-39. (in Chinese)
- [12] 卢旭东, 田素贵, 孙振东. 高 Cr 镍基单晶合金 1050℃ 的高温氧化性能[J]. 铸造, 2011, 60(2): 175-179.
LU Xudong, TIAN Sugui, SUN Zhendong. Oxidation behaviour of a high chromium single-crystal Ni-base superalloy at 1050℃ [J]. China Foundry, 2011, 60(2): 175-179. (in Chinese)
- [13] 李铁藩. 金属高温氧化和热腐蚀[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [14] 杨威, 潘健, 黄智泉. 高铬铸铁合金研究与发展的探讨[J]. 新世纪水泥导报, 2010, 16(1): 42-46.
- [15] 黄乾尧, 师燕渝. 一种镍基高温合金的碳化物析出与转化动力学[J]. 金属学报, 1988, 24(6): 399-403.
HUANG Qian Yao, SHI Yanyu. Dynamics of precipitation and transformation of carbides in a Ni-base superalloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 1988, 24(6): 399-403. (in Chinese)
- [16] 李巨峰, 韩建成, 吴志军, 等. Incoloy800H 传热管抗晶间腐蚀性能研究[J]. 核动力工程, 2012, 33(4): 50-53.
LI Jufeng, HAN Jiancheng, WU Zhijun, et al. Study on resistance to intergranular corrosion of heat transfer incoloy800H tube[J]. Nuclear Power Engineering, 2012, 33(4): 50-53. (in Chinese)
- [17] 郭永安, 李柏松, 赖万慧, 等. 铸造镍基合金 K444 在 900℃ 空气中的长期氧化行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2012, 32(4): 285-290.
GUO Yong'an, LI Bosong, LAI Wanhui, et al. Oxidation behavior of Ni-based superalloy K444 at 900℃ in air during long term[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2012, 32(4): 285-290. (in Chinese)
- [18] 林凤功, 林华, 程永强. 发动机排气门瞬态温度场数值模拟分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2009(10): 30-33.
LIN Fenggong, LIN Hua, CHENG Yongqiang. Transient thermal-field numerical analysis of the engine exhaust valve[J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2009(10): 30-33. (in Chinese)
- [19] 周廷美, 吕俊成, 莫易敏. 发动机气门的动力学及温度场三维数值模拟[J]. 内燃机, 2004(6): 7-8.
ZHOU Tingmei, LÜ Juncheng, MO Yimin. The dynamics and temperature field three-dimensional data of engine valve[J]. Internal Combustion Engines, 2004(6): 7-8. (in Chinese)
- [20] 王飞华, 孔祥刚. Inconel 751 合金排气门锥面烧蚀失效分析[J]. 理化检验: 物理分册, 2009, 45(10): 642-644.
WANG Feihua, KONG Xianggang. Guttering failure analysis of inconel 751 alloy exhaust valve cone[J]. Physical Testing and Chemical Analysis: Physical Testing, 2009, 45(10): 642-644. (in Chinese)
- [21] Radcliff A S, Stringer J. The effect of phosphorus-containing additives in fuels on automobile exhaust valve corrosion[J]. Corrosion Science, 1974, 14(11/12): 651-656.
- [22] 刘嘉. 发动机活塞温度场仿真分析[J]. 机械管理开发, 2011(3): 127-129.
LIU Jia. Temperature field simulation analysis of the engine piston [J]. Mechanical Management and Development, 2011(3): 127-129. (in Chinese)

(编辑: 陈 越)