

发动机燃气烧粘破坏量化评估分级方法^{*}

肖 军¹ 张秋禹¹ 李铁虎¹ 陈建敏² 岳美娥²

(1 西北工业大学材料科学与工程学院,西安 710072)

(2 中国科学院兰州化学物理研究所固体润滑国家重点实验室,兰州 730000)

摘 要 简要讨论了采用分级方法对发动机高温高速燃气烧粘破坏、不同防烧粘材料模拟试验观测结果的量化评估。研究表明,分级表征的兼有烧蚀、粘渣等混杂烧粘破坏现象的冷/热模拟、发动机试车台模拟结果简便、直观、便于比较。

关键词 烧粘破坏,评估,模拟试验,发动机燃气,残渣

Classifying Evaluation of Ablative-erosive-residue-adhering Damage by Rocket Engine Exhaust

Xiao Jun¹ Zhang Qiuyu¹ Li Tiehu¹ Chen Jianmin² Yue Meie²

(1 College of Material Science and Engineering, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072)

(2 State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract This paper discusses classifying evaluation methods on ablative-erosive-residue-adhering damage and the simulating test of different ablative-erosive-residue-adhering protection materials. The results show that simulating tests such as cold-hot-simulating, rocket engine station simulating, are simple and convenient.

Key words Ablative-erosive-residue-adhering damage, Evaluation, Simulating test, Rocket engine exhaust, Residue

1 前言

有烟发动机燃气“烧粘”过程是气动环境与材料热化学和热力学作用的复杂过程,结果可能分别或同时包含了烧蚀、冲蚀和粘渣等多种破坏现象,且存在着热冲蚀减重、粘渣增重以及烧蚀产生炭化、脱落等现象(图1、图2)。由于极端高温、高速和瞬时过程的特殊性,加之涉及敏感技术,目前尚未查到可以直接借用的成熟技术和资料。试验表征、评估和考核是防烧粘应用研究的重要内容,建立较为完善、实用的试验手段和评估方法是选材和研究的基础^[1]。

在研究和改进烧粘防护材料技术时首先遇到的问题是烧粘破坏程度的评估、比较以及烧粘工况的模拟问题。根据对发射过程和烧粘表面的观察与分析,主要破坏因素可解析为:(1)高温气相烧蚀;(2)高速粒子流冲蚀;(3)熔融残渣的粘附烧蚀;(4)辐射破坏。采用因素解析法对烧粘破坏主要因素分别加以研究可以更好地了解各种破坏作用的方式、程度,为评估和改进表面防护技术提供实验依据,文献[1~6]报道了多种烧蚀和冲蚀有关的试验方法和手段,各有其适用性和局限性。

收稿日期:2002-12-02;修回日期:2003-06-24

^{*}国家杰出青年科学基金资助:59 925 513

肖军,1962年出生,博士研究生,主要从事与材料有关的质量保证、生产工艺、腐蚀防护等研究工作

本研究参照采用了氧乙炔焰烧蚀作为热模拟试验,结合常规热分析手段研究材料的热防护性能,吹砂冷模拟试验研究抗冲蚀性能;采用发动机模拟试验代替导弹实际发射烧蚀粘渣工况,考察防烧粘材料和技术的工程实用性,为台架试验提供数据。为便于防烧粘材料研制、筛选和改进,我们参考涂料标准^[7~11]以分级方式将连续变化的试验观测值转化为不连续的分立数值,简便、实用的指导思想,有效地量化评估了烧粘和防护的试验结果。文章讨论了烧粘破坏分级量化评估方法及其应用,为便于比较,文中还列出了采用“+”及文字描述的评估结果。

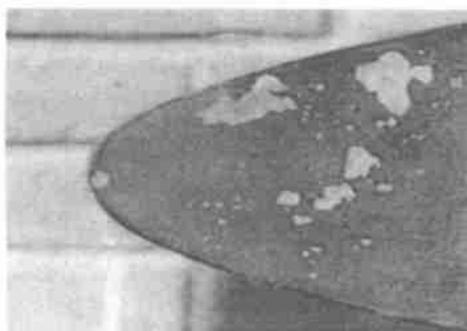


图1 燃气严重烧粘的装备表面 0.3 ×
Fig. 1 Picture of ablated coating and residue on surface by rocket exhaust fume



图2 烧粘表面的燃气残渣 0.5 ×
Fig. 2 Picture of corrosive residue from rocket exhaust fume

2 实验评估

2.1 试样

对机械去除表皮的硫酸阳极氧化/ $K_2Cr_2O_7$ 填充的硬铝合金 LY12CZ、硬质阳极氧化/热水填充超硬铝合金 LCXCS 板和 1Cr17Ni2 不锈钢板分区域涂敷
宇航材料工艺 2003年 第5期

防护涂层、 MoS_2 干膜或特种防护脂制成试样(100 mm × 50 mm × 6 mm 或 200 mm × 50 mm × 6 mm)。涂层包括聚氨酯无光蒙皮磁漆、环氧—有机硅耐热漆、硅酮涂料、有机硅耐热磁漆、防护脂、高温脂、功能涂层 1[#] ~ 4[#]、 MoS_2 干膜 PMM(高温)和 PMS(常温)。

2.2 仪器设备

氧乙炔烧蚀装置(自组装);GS—3型吹砂机(北京);SCIMN—8型发动机综合模拟试验装置(自行研制);3种型号的发动机试车台和3种型号的导弹发射装置。

2.3 热模拟试验

热模拟试验采用相当于燃气流中高温气相热流的氧乙炔焰进行烧蚀试验^[4~6]。温度为 2 000 ~ 3 000 °C,热流 $8.4 \times 10^5 J/m^2 \cdot s \sim 6.3 \times 10^6 J/m^2 \cdot s$ (烧蚀时间 0.2 s、0.5 s,烧蚀角度 45°、90°)。为便于观察,将一块纵横交错刻画 100 等份的无色透明有机玻璃板[100 mm × 50 mm × (1 mm ~ 2 mm)]置于烧蚀试件表面目视检查,按 5 级评估烧蚀部位破坏程度 P (%) : 1 级——烧蚀表面轻微变色,无起泡、脱落; 2 级——较明显变色、起泡或脱落 (< 2 mm), $P < 10\%$; 3 级——严重变色、起泡、脱落, $10\% < P < 30\%$; 4 级——炭化、脱落、露出基底, $30\% < P < 60\%$, 涂层可被乙醇擦落; 5 级——更严重烧蚀、炭化、脱落或露金属基底, $P > 60\%$ 。

2.4 冷模拟试验

残渣粒子流冷模拟试验采用不含烧蚀热、实用、简便的吹砂方法。试验装置和条件见文献[2~5]。目视判别表面冲蚀破坏程度 P (%) ,分 5 级评估: 1 级——冲蚀区涂层完整、未脱落; 2 级——涂层局部破损或露出基底、底漆, $P < 10\%$; 3 级——明显破坏、基底暴露, $10\% < P < 30\%$; 4 级——涂层严重破坏、脱落、金属基底露出, $30\% < P < 60\%$; 5 级——脱落 $P > 60\%$ 或完全露基底的严重破坏。

2.5 发动机试车台模拟试验

与实际发射相比,发动机试车台点火试验的机会较多、模拟真实、成本较低,然而发动机点火瞬时非稳态试验是复杂而危险的工程试验,无现成技术和资料可借用。根据对燃气烧粘特性的理解,采用自制 SCIMN8 模拟装置开展防烧粘试验。装置、原理见文献[4,5]。试验采用具有典型烧粘特性的 L、A、B、C 型固体发动机试验(铝粉含量、燃气温度及

燃气速度排序为:C、L>B>A,直径:C>B>A>L)。

综合考虑烧蚀、粒子流冲蚀与粘渣作用,烧粘破坏 P (%)分5级比较:1级——烧粘表面轻微变色,涂层完好,无起泡、脱落、残渣,允许有燃气烟尘;2级——烧粘部位明显变色、起泡、脱落或粘渣面积 $P < 10\%$;3级——起泡、露基底,粘渣面积 $10\% < P < 30\%$;4级——烧粘表面炭化、露基底,粘渣面积 $30\% < P < 60\%$;5级——残渣覆盖 $P > 60\%$ 。

此外,对于特种防粘润滑脂,烧粘后同时出现了因燃气烧蚀和冲蚀减重、因粘渣增重和因残留脂难于辨别的情况。为此我们先用溶剂小心清洗掉试件烧蚀后残余的脂(保留残渣),然后用2.3节的透明有机玻璃板置于试件表面目视检查,破坏程度 P (%)按5级评定^[5]:1级——无燃气残渣;2级——粘渣面积 $< 10\%$;3级——粘渣面积 $10\% < P < 30\%$;4级——粘渣面积 $30\% < P < 60\%$;5级——粘渣面积 $P > 60\%$ 。

3 结果与讨论

3.1 热模拟试验

采用分级方法和“+”及文字描述的部分热模拟试验的结果见表1。实验表明:(1)烧蚀程度与涂层的配方和树脂的耐热性有关。无机组分含量高、树脂结构热稳定性高以及纳米改性涂层(3[#]、7[#]、9[#]等)的抗烧蚀结果好;(2)试验呈现出实际烧粘破坏相似的变色、起泡、脱落、炭化现象,较好地模拟了燃气高温烧蚀情况;(3)烧蚀结果与火焰烧蚀时间、角度有关,在瞬间烧蚀(< 0.2 s)条件下的差别较小;(4)分级方法获得的定性、半定量结果比“+”表示和文字描述的结果更直观、准确。由于试验后绝大多数材料都发生了变化,设“0级”无实际意义;且由于具体试验材料类别的差异,各类材料之间难于进行系统比较。非等间隔分级的目的是针对实际试验结果分散性较大且高于30%严重烧蚀(粘)破坏的试片已无使用价值,级差范围和大小随试验对象而定,便于对有效数据进行分析。这同样适用于冷模拟、发动机模拟等试验结果的分级、评估。

表1 不同涂层的热模拟试验结果

Tab.1 Results of different coating samples in hot simulating tests

序号	涂料名称	干燥条件	热模拟破坏					
			级别		“+”表示		文字描述	
			0.2 s 45°	0.5 s 90°	0.2 s 45°	0.5 s 90°	0.2 s 45°	0.5 s 90°
1 [#]	聚氨酯蒙皮漆	50 ,6 d	2	4	++	++++	局部小泡,稍变色	起泡、脱落、变色
2 [#]	环氧—有机硅涂层	180 ,2 h	1	2~3	+	++~+++	稍变色	起皱、小泡、稍变色
3 [#]	硅酮涂料	RT,24 h	1	2	+	++	稍变色	稍变色
4 [#]	有机硅漆	180 ,2 h	1	2	+	++	稍变色	小泡、稍变色
5 [#]	防护脂	RT	2	4	++	++++	稍变色	起泡、变色
6 [#]	高温脂	RT	1	3	+	+++	稍变色	起泡、变色
7 [#]	功能涂层1 [#]	RT,24 h	1	2	+	++	稍变色	起皱、小泡、稍变色
8 [#]	功能涂层2 [#]	RT,24 h	1	2	+	++	稍变色	起皱、小泡、变色
9 [#]	功能涂层4 [#]	RT,24 h	1	1	+	+	稍变色	稍变色
10 [#]	MbS ₂ 干膜 PMM	200 ,1.5h	1	2	+	++	稍变色	变色、小泡
11 [#]	MbS ₂ 干膜 PMS	RT,24 h	2	3	++	+++	稍变色	变色、起泡、脱落

3.2 冷模拟试验

采用分级方法和“+”及文字描述的部分冷模拟

试验的结果见表2。

表 2 不同涂层的冷模拟试验结果

Tab. 2 Results of different coating samples in cold simulating tests

序号	涂料名称	干燥条件	冷模拟破坏		
			级别	“+”表示	文字描述
1 [#]	聚氨酯蒙皮漆	50 ,6 d	2-	++	抗冲蚀性能较好
2 [#]	环氧-有机硅涂层	180 ,2 h	2+	++	抗冲蚀性能较好
3 [#]	硅酮涂料	RT,24 h	1	+	抗冲蚀性能最好
4 [#]	有机硅漆	180 ,2 h	3+~4	+++~++++	抗冲蚀性能差,脱落、露基底
5 [#]	防护脂	RT	1+~2	+~++	抗冲蚀性能好
6 [#]	高温脂	RT	3+	+++	抗冲蚀性能差,露基底
7 [#]	功能涂层 1 [#]	RT,24 h	2	++	抗冲蚀性能好
8 [#]	功能涂层 2 [#]	RT,24 h	2~3	++~+++	抗冲蚀性能较好
9 [#]	功能涂层 4 [#]	RT,24 h	2~4	++~++++	抗冲蚀性能较差,露基底
10 [#]	MbS ₂ 干膜 PMM	200 ,1.5 h	2~3	++~+++	抗冲蚀性能略差,稍露基底
11 [#]	MbS ₂ 干膜 PMS	RT,24 h	4~5	++++~+++++	抗冲蚀性能差,露基底

试验表明:(1)提高涂层的弹性和韧性、树脂的交联度,改善附着力,利用功能组分增强涂层有利于提高抗冲蚀性能;(2)试验呈现出与实际烧粘破坏相似的冲蚀条纹、沟槽等痕迹,可在平行条件下根据冲蚀结果的差异区分出材料的抗冲蚀性能;(3)分级方

法以及级差范围和大小选取的优点显而易见。

3.3 发动机试车台模拟试验

采用分级和文字描述的部分发动机模拟试验结果的对比见表 3。

表 3 发动机试车台烧粘模拟试验结果

Tab. 3 Results of ablative-erosive-residue-adhering simulating tests at rocket engine station

序号	涂料名称	干燥条件	发动机烧粘破坏(级别)				文字描述 ¹⁾
			L	A	B	C	
1 [#]	聚氨酯蒙皮漆	50 ,6 d	4	1	2~3-	4~5	起泡、变色、露底漆/基底、粘渣
2 [#]	环氧-有机硅涂层	180 ,2 h	1~2	1	1	1~2	变色、甚至粘渣
3 [#]	硅酮涂料	RT,24 h	1	1	1	1	稍变色、稍减薄
4 [#]	有机硅漆	180 ,2 h	2~3	1~2-	2~3	3~4	起泡、变色、露底漆/基底、粘渣
5 [#]	防护脂	RT	1~2	1	1~2	1~3	变色、减薄较快
6 [#]	高温脂	RT	3~4	1	2	3~5	变色、严重减薄或吹掉、粘渣
7 [#]	功能涂层 1 [#]	RT,24 h	1	1	1	1~2	减薄
8 [#]	功能涂层 2 [#]	RT,24 h	1	1	1	1~2	变色、减薄
9 [#]	功能涂层 4 [#]	RT,24 h	1~2	1	1~2	1~3	减薄严重
10 [#]	MbS ₂ 干膜 PMM	200 ,1.5 h	1	1	1~2	1~3	减薄严重
11 [#]	MbS ₂ 干膜 PMS	RT,24 h	3	1~2-	1~2	3~5	完全粘渣

注:1)描述现象为L、C以及B型发动机燃气烧粘现象。

表 3 烧粘现象的文字详细描述占用篇幅大,难以对同时出现烧蚀、变色、起泡、起皱、脱落、粘渣现

象综合评估比较。试验的分级结果表明下列情况。

(1)烧粘破坏与发动机装药的铝粉含量和性质

有直接关系^[12]。少烟发动机(A)的残渣很少、烧蚀轻,而尺寸小的(L)和大的(C)高铝粉装药发动机的烧粘破坏都严重。

(2)高铝粉发动机的热冲蚀破坏作用更为突出。例如:高温(扣丝)脂的使用温度近千度但不耐烧粘,而耐温高、粘附性好、针入度小的防护脂抗烧粘性能才好;有机硅涂层的耐热性高于环氧有机硅涂层,但抗烧粘性能不如后者(比丙烯酸聚氨酯蒙皮涂层好)。相反,少烟发动机(A)的烧蚀和冲蚀作用同时减小,但烧蚀破坏更明显。在比较表1~表3的分级结果后发现,仅仅提高耐热性或抗冲蚀性对抗高铝粉燃气(高温、高速)是不够的,因为在高温烧蚀条件下材料的力学性能会迅速下降,加上冲蚀的耦合作用,导致严重的烧粘破坏,此时需要同时改进材料的耐热性和抗冲蚀性能。

(3)材料发动机试车台试验结果的趋势与抗烧蚀、冲蚀性能的冷模拟、热模拟试验的趋势相同,在冷模拟和热模拟试验中表现良好的材料抗高温、高速燃气两相流烧粘性能也好。如果热模拟效果好而冷模拟较差的涂层(如功能涂层4[#])发动机烧粘后涂层减薄快,但烧蚀痕迹轻;而抗冲蚀冷模拟效果好的聚氨酯涂层表面炭化、起皮、脱落严重。试验中,薄试片极易被烧毁掉,厚试片因粘渣增重相对量小使称重法评估误差大且粘渣牢固,这些变化难于表征烧粘程度。由此可见,冷热模拟试验能够为防护材料改进提供简便、快速的定性依据,而发动机烧粘模拟试验为实际发射的台架试验提供关键数据。

(4)在防护材料中加入MoS₂、PTFE、石墨等防粘组分有利于提高抗烧粘性能,减少粘渣。这些热防护强度高的低能表面组分阻滞和削弱了熔融残渣粒子在表面的冲蚀、浸润、铺展而形成的粘附力,因而减少粘渣量。此外,分散效果对涂层材料的防护效果也有影响。鉴于上述工作,利用冷热模拟试验调整材料在发动机模拟试验中的性能,避免了研制过程走弯路,提高了效率。综上所述,在高温高速烧粘研究中模拟试验起到了常规试验的互补和无法替代

的作用,而分级方法简便、清晰地量化了兼有烧蚀、冲蚀和粘渣等混杂破坏现象。

用改进的功能涂层1[#]、2[#]、4[#]、MoS₂干膜PMM、MoS₂干膜PMS等涂层和特种MoS₂防粘润滑脂分区涂敷的样机在冬季、初夏某靶场进行了地面和空中实弹发射台架试验,试验现象和结果与发动机模拟结果完全吻合。

4 结论

采用分级量化评估方法可以将不同材料在抗烧粘试验中复杂的烧粘破坏现象(结果)用简明、清晰的量化数值加以描述,适用于同时出现烧蚀、变色、起泡、起皱、脱落、粘渣等复杂现象进行综合比较和评估。烧蚀热模拟、冲蚀冷模拟和发动机试车台点火试验为材料的抗烧粘性能研究和改进提供了简明、清晰的量化分级数据,其研究思想可以为类似工况提供参考和借鉴。

参考文献

- 1 肖军,李铁虎,张秋禹等.滑轨防高温高速烧粘技术的应用研究及进展.宇航材料工艺,2003;33(2):14~15
- 2 Slikkerveer P J, In 't Veld F H. Model for patterned erosion. WEAR, 1999;233~235:377~386
- 3 Lemistre M, Soulevant D, Micheli F et al. New test facility for sand erosion studies. WEAR, 1999;233~235:712~716
- 4 肖军,李铁虎,陈建敏等.机载武器抗烧蚀防护涂层的研究.材料保护,2003;(6):34~37
- 5 肖军,李铁虎,周惠娣等.特殊防护用润滑脂的研究.润滑与密封,2003;(3):19~22
- 6 GB323A—1996 烧蚀材料烧蚀试验方法.
- 7 GB9286—88 色漆和清漆,漆膜的划格试验.
- 8 GB1865—80(89) 漆膜老化(人工加速)测定方法.
- 9 GB1766—1995 色漆和清漆,涂层老化的评级方法.
- 10 GB/T14826—93 色漆涂层粉化程度的测定方法及评级.
- 11 GB/T1740—79 漆膜耐湿热测定法.
- 12 萨登 G P 著,王兴甫,于广经等译.火箭发动机.北京:宇航出版社,1992:36~37,312~360

(编辑 李洪泉)