

## 可磨耗封严涂层研究进展

## Development Progress of Abradable Seal Coatings

北京矿冶研究总院 尹春雷 陈美英 占 佳 陈舒予

**[摘要]** 可磨耗封严涂层是一种重要的热喷涂涂层,广泛应用于飞机发动机,对提高发动机效率、降低油耗进而提升发动机整体性能具有重要意义。本文介绍了可磨耗封严涂层材料的主要种类及其发展趋势,阐述了可磨耗封严涂层性能评价方法。

**关键词:** 可磨耗 封严 涂层 热喷涂

**[ABSTRACT]** Abradable seal coatings are important thermal sprayed coatings widely used in aero-engine and have significance to increase the efficiency and to reduce fuel consumption. The main varieties and development tendency of abradable seal coating materials are introduced, and the evaluation methods of the coating properties are described.

**Key words:** Abradable Seal Coating Thermal spraying

大推力、高效率、低油耗是航空发动机设计和制造的总体目标,为此应尽量提高涡轮机进口气体温度,并减小转子与静子部件之间的间隙<sup>[1]</sup>。但当结构与材料一定时,提高涡轮机进口气体温度是有限的,因而减小压气机、涡轮机叶尖与机匣之间间隙的气路封严技术就成为提高发动机性能的重要手段。可磨耗封严涂层由于生产工艺简便、维护和性能调整简易、封严效果好、不稳定现象少等优点而在航空发动机上得到了广泛应用。

封严材料位于发动机的压气机和涡轮机的机匣上,所处的位置和功能决定了它要

在较高温度和高速气流冲刷的恶劣条件下工作。理想的封严涂层应既有足够的强度抵抗外部颗粒及气流的冲蚀,又可被刮削,在叶片与涂层发生摩擦接触时,涂层被刮削而叶片尖端不磨损,涂层不脱落。因此,要求可磨耗封严涂层必须具备下列性能:可磨耗性、抗冲蚀性、结合强度和抗热震性强,其他性能包括,低的摩擦系数和抗粘着性,以及高的化学稳定性和整体强度等<sup>[2]</sup>。

## 1 可磨耗封严涂层材料

可磨耗封严涂层材料种类较多,以粉体材料为主,另有少数品种的棒材。通常封严涂层材料由金属

表1 常见可磨耗封严材料

牌号	成分	粒度/ $\mu\text{m}$	喷涂方法	使用温度/ $^{\circ}\text{C}$
Metco 320NS	Al 8Si 20BN	-212 +45	等离子	低于 480
Metco 311NS	Al 7Si 26 石墨	-150 +7.8	等离子	315 ~ 415
Metco 601NS	Al 12Si 40 聚苯酯	-125 +11	等离子	低于 325
AMDRY 2000	Al 12Si 47 聚酰亚胺	-176 + 16	等离子	低于 350
Sulzer Metco 2042	CoNiCrAlY 聚苯酯/BN	-176 + 11	等离子	低于 850
Metco 610NS	铝青铜 14 聚苯酯	-125 +11	等离子	低于 650
Metco 308NS	Ni 15 石墨	-90 +30	火焰	低于 480
Durabrade 2231	Ni 20 石墨	-106 +45	火焰	低于 480
Metco 307NS	Ni 25 石墨	-90 +30	火焰	低于 480
Metco 312NS	Ni 4Cr 4Al 21 膨润土	-150 +45	火焰	低于 815
Metco 314NS	Ni 4Cr 4Al 21 膨润土	-150 +75	火焰	低于 815
Metco 301NS	Ni 14Cr 8Fe 5.5BN 3.5Al	-125 +45	火焰	低于 480
Durabrade 2211	Ni 40 石墨	-90 +30	火焰	低于 480
Metco 600NS	聚苯酯	-125 + 45	等离子	低于 325
KF-21	Ni 25 天然石墨	-96 + 45	火焰	低于 480
KF-21R	Ni 25 人造石墨	-106 +45	火焰	低于 480
KF-21T	Ni 25 天然石墨	-106 +45	火焰	低于 480
KF-114	Al7.5Si39.5 聚苯酯	-150 +45	等离子	低于 325
KF-115	Al20.5BN	-315 +45	等离子	低于 450
KF-116	Ni14.3C 9.5Cr3.2Al	-125 +48	火焰	低于 480
KF-117	Cu33.5Ni12C 5.5Al	-125 +48	火焰	低于 480
KF-20B	Ni19.5Cu18BN9C	-315 +10	等离子	低于 650

材料和非金属材料两类材料复合而成,其中金属材料提供可喷涂性、结构强度和抗冲蚀性等性能,如镍、铜、铬、铝等及其合金;非金属材料提供可磨耗性,通常具有自润滑性能,如聚苯酯、石墨、硅藻土、膨润土、六方氮化硼等;复合方法有化学包覆<sup>[3-5]</sup>、物理团聚<sup>[6]</sup>、机械混合<sup>[7]</sup>等。可磨耗性和抗冲蚀性是封严涂层最重要又相互矛盾的要求,协调和解决好这一对矛盾是封严涂层研究、设计和制造的关键。常见可磨耗封严材料详见表1。

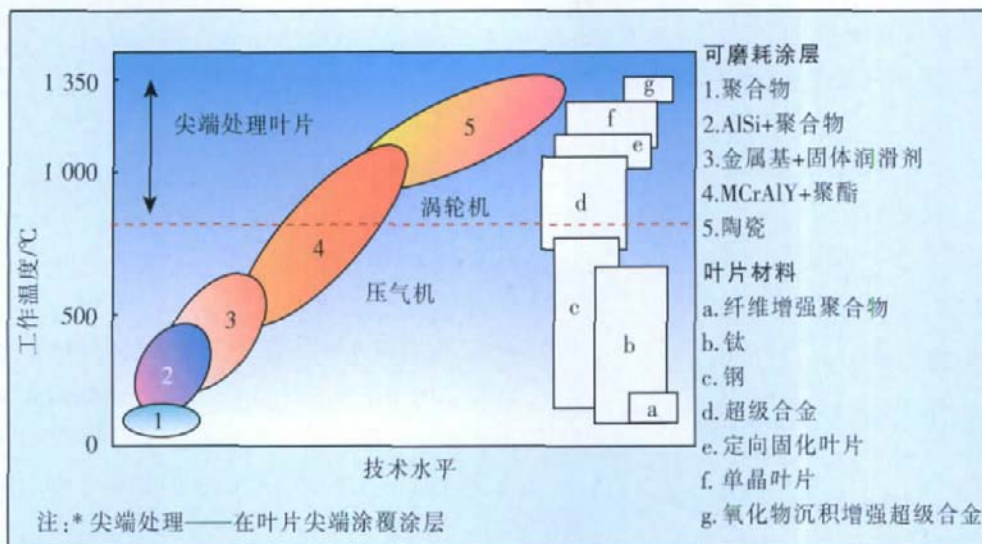


图1 叶片及涂层材料使用温度及其技术水平<sup>[11]</sup>

Fig.1 Operation temperature and technical level of blade and coating materials

随着发动机工作温度的提高,研究和开发高温封严涂层已成为封严涂层研究的重点。多元复合氧化物是研究热点之一<sup>[8-10]</sup>,氧化锆在涂层领域最常见的用途是制备热障涂层,近年来利用氧化锆的高耐热性,制备高温可磨耗封严涂层日益受到重视。通过添加其他组分(如六方氮化硼)提供自润滑性能以提高氧化锆涂层的可磨耗性;通过轴向送氧化锆、径向送聚苯酯制备复合涂层,再将涂层热处理使聚苯酯分解以控制涂层的孔隙率;通过调控氧化锆和聚苯酯的比例得到孔隙率连续变化的梯度涂层。图1描述了叶片及涂层材料的使用温度及其技术水平。

## 2 可磨耗封严涂层评价

可磨耗封严涂层评价包含涂层使用情况和涂层性能2个方面,涂层使用情况包括可磨耗性、抗冲蚀性和氧化寿命,涂层性能包括结合强度、硬度、孔隙

率、抗热震性、耐腐蚀性等。

### 2.1 可磨耗性评价

可磨耗性目前尚无标准的试验方法,评价方法大多是定性的。早期曾用拉伸强度和硬度来考核,认为拉伸强度和硬度低,可磨耗性就好。曾使用划痕法、划痕硬度法、车削法、滑动磨损法、刮削功法等方法评价可磨耗性,但是这些方法的测试环境与发动机工况差距较大。目前较为先进的是采用可磨耗试验机模拟发动机内叶片对封严材料刮削磨损过程。在规定的进刀

速度下对涂层进行刮削,通过测量和计算磨耗量及摩擦功来评价涂层的可磨耗性,市售可磨耗试验机其叶尖线速度为150~500m/s,切削涂层速度为1.5~3000 $\mu$ m/s,试样可加热到1200 $^{\circ}$ C。当转盘叶尖速度和试样温度达到所要求的值时,对试样进行切削,当切削到一定深度后快速退出。试验过程中可记录切削力,试验后测量叶片和涂层重量变化以及被磨涂层的表

面粗糙度,考察磨损机理,综合考核可磨耗性。

### 2.2 抗冲蚀性评价

抗冲蚀性评价目前也无标准方法。常用的是一种气体-固体粒子冲蚀装置。用夹带 $Al_2O_3$ 或 $SiO_2$ 砂粒的压缩空气以一定速度、一定角度冲击喷有可磨耗涂层的样片,测试涂层失重及冲蚀后的形貌。采用热冲蚀磨损试验可以更好地模拟发动机的工作环境,提高与实际工况的相似性。

### 2.3 其他性能评价

氧化寿命可采用静态加速热氧化法测试,可参照GB/T 13303-1991标准进行;结合强度可采用ASTM C633-79或者GB/T 8642-2002标准测试;封严涂层测试表面洛氏硬度(HRC),大多采用15Y标尺,氧化锆封严涂层用45Y标尺;孔隙率采用图像分析的方法测试,通过计算涂层图片中不同灰度区域的面积所占图片面积的比例得到孔隙率<sup>[12]</sup>;抗热震性能测试将涂

层样片在指定高温与低温之间反复切换,记录涂层出现裂纹时的切换次数,可参照 GB/T 16536-1996 标准测试;耐腐蚀性可采用 ASTM G76 标准测试。

### 3 结束语

可磨耗封严涂层作为热喷涂领域的一类重要涂层,在发动机上得到广泛应用。几十年来国内外开发出了一系列适用于不同部件、不同温度的可磨耗封严材料,对可磨耗封严涂层的评价手段也日臻完善。但是在以下方面还有很多工作需要开展:

- (1) 研究和开发高温封严涂层材料;
- (2) 优化模拟发动机工况的可磨耗性和抗冲蚀性等性能检测的试验方法;
- (3) 对涂层材料、喷涂工艺、涂层性能以及相关的基础理论进行系统研究,探索相互之间的关系,最终能够实现根据工况要求设计相应的涂层材料及制备工艺的目标。

### 参 考 文 献

[1] 郝兵,李成刚.表面涂层技术在航空发动机上的应用航空发动机,2004,30(4):38-40.

[2] Bobzin K, Lugscheider E, Zwick J, et al. Microstructure and properties of new abradable seal coatings for compressor applications. Proceedings of the 2006 international thermal spray conference. seattle, 2006.

[3] 梁焕珍,毛铭华.水热加压氢还原制取镍包石墨.化工冶金,1996,17(2):111-116.

[4] Sherritt Gordon Mines Limited. Composite powders sprayable to form abradable seal coatings. US, 4291089. 1981-09-22.

[5] Thomas Saarinen, Lars-Eric Lindfors, Sigmund Fugleberg. A review of the precipitation of nickel from salt solutions by hydrogen reduction. Hydrometallurgy, 1998, 47: 309-324.

[6] 北京矿冶研究总院.超微或纳米铝粉包覆的铝包镍复合粉末.中国专利,02100588.5. 2003-08-20.

[7] Harold E. Sliney. Coatings for High-Temperature Bearings and Seals. [http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880004071\\_19880004071.pdf](http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880004071_19880004071.pdf).

[8] General Motors Corporation. Abradable ceramic seal and method of making same. US, 4269903. 1981-05-26.

[9] Novinski E, Harrington J, Klein J. Modified zirconia abradable seal coating for high temperature gas turbine applications. Thin solid films, 1982, 95(3): 255-263.

[10] Lima R S, Marple B R, Dadouche A et al. nanostructured abradable coatings for high temperature applications. Proceedings of the 2006 international thermal spray conference,

2006.

[11] Ghasripor F, Schmid R, Dorfman M. Abradables improve gas turbine efficiency. Materials world, 1997, 5 (6): 328-330.

[12] Jiří Matějček, Blahoslav Kolman, Jiří Dubský, et al. Alternative methods for determination of composition and porosity in abradable materials. Materials characterization, 2006, 57: 17-29.

(责编 微凉)



(上接第 91 页)  
 确得到所测样品的牌号。如果将这组数据内置于数字分析系统中,可由计算机自动进行牌号鉴别。

### 3 结论

- (1)合金钢焊材焊缝中 Mo 元素的可见光谱快速分析可使用 Mo438.16nm 和 Mo481.93nm 分析谱线组,以兼顾 Cr 和 V 等元素的快速分析。
- (2)Mo 元素分析谱线组的视场定位和谱线辨别可借助数字化分析系统的视场定位和谱线辨别功能。
- (3)数字化系统能给出视场中所有谱线的相对强度,在此基础上可进行较为精确的定量分析。
- (4)使用数字化系统可在量化的数据基础上完成牌号鉴别工作,技术简单可靠,便于初学者掌握。
- (5)图 1~5 可以直接用于棱镜看谱镜的分析工作,也可参照使用于光栅看谱镜。

### 参 考 文 献

[1] 刘平.合金可见光谱看谱分析方法研究.钢铁研究,2007,35(2):44-47.

[2] 刘平,庞晓辉,杨军红,等.钼元素看谱分析方法研究.中国钨业,2006,21(1):35-38.

[3] 刘平,庞晓辉,杨军红,等.棱镜看谱镜线色散率及应用研究.材料工程,2006,1:27-31.

[4] 刘平,杨军红,张福来.材料可见光谱计算机辅助分析系统应用研究.现代科学仪器,2007(4):46-48.

[5] 冶金工业部情报产品标准研究所.光谱线波长表,北京:中国工业出版社,1971.

[6] 刘平,庞晓辉,张蓓,等.钼元素看谱分析在合金牌号鉴别中的应用研究.现代科学仪器,2008(1):75-78.

[7] 刘平,杨军红,刘浩新.铁基合金中钼元素看谱分析方法研究.现代铸铁,2007,27(4):80-84.

[8] 刘平,杨军红,黄建华.数字化技术在铁基合金镍元素可见光谱分析中的应用.钢铁研究,2008,36(3):44-47.

[9] 刘平,庞晓辉,杨军红,等.铁基合金中钼元素的看谱分析技术应用研究.中国钨业,2005,20(6):41-44.

(责编 未艾)