

# 航空发动机涂层技术及应用

## Surface Coating Technology and Application for Aeroengine

中航工业北京航空制造工程研究所 武洪臣 高 巍



武洪臣

自然科学研究员, 等离子体物理专业理学博士。多年来一直投身于航空科研生产第一线, 参加、负责多项科研生产及型号攻关任务。目前从事表面涂层工艺及技术研究。“九五”、“十五”、“十一五”先后负责“全方位等离子体源离子注入表面改性技术”、“电子束物理气相沉积技术”等大型预研课题及多项基金课题。获多项科技成果奖, 并荣立集团公司个人一等、二等、三等功。2006年入选“511人才工程”学术技术带头人, 获得政府特殊津贴。

涂层通常指覆盖或涂敷于零件表面的一层特殊材料, 广义上讲是增材制造的特殊形式。涂层在材料或工件上所占质量及体积比例虽然很小, 但其对提高材料性能、延长零件

在诸多涂层中, 热障涂层结构最为复杂, 并且在高温工作环境中承担着重要角色。尤其是利用电子束作为热源的热障涂层沉积技术, 在航空航天领域得到了广泛应用并发挥了巨大作用。

工作性能的作用却十分显著。国外文献报道, 有 75% 以上的航空发动机零件加有金属或陶瓷涂层以改进其性能和可靠性<sup>[1]</sup>。在当代先进应用技术如微电子、光学、航空航天领域中的作用也非常重要。同时, 大多数涂层往往工作环境恶劣, 承受着各种复杂的载荷(图 1)<sup>[2]</sup>, 因此如何延长涂层的工作寿命、提高相关性始终是涂层制备工艺具有挑战性的课题。除喷漆和电镀以外, 工业上所用涂层工艺可分为三大类: 物理气相沉积(PVD)、化学气相沉积(CVD)和热喷涂(近几年也出现了温度较低的冷喷涂)。每种工艺各有特点, 可满足特定的工艺要求, 如表 1<sup>[3]</sup>所示。目前, 工业上有几百种涂层用于各种结构工程材料的防腐、耐磨、润滑、隔热等功能。

### 技术分类及应用

航空发动机不同部件由于工作环境的差别需要不同的涂层, 按功能可以分为: 热障涂层、高温抗氧化涂

层、耐磨涂层、耐腐蚀涂层、抗冲刷涂层、封严涂层、抗微动磨损涂层、阻燃涂层、环境障碍涂层、憎水涂层、隐身涂层等。采用的技术主要有: 电子束物理气相沉积、大气/真空等离子喷涂、超音速火焰喷涂、冷喷涂、真空电弧沉积和磁控溅射等。各种涂层大概分类、功能、性能要求、制备方法与典型应用部件如表 2 所示。

### 热障涂层

在诸多涂层中, 热障涂层(Thermal Barrier Coatings, TBCs)结构最为复杂, 并且在高温工作环境中承担着重要角色。尤其是利用电子束作为热源的热障涂层沉积技术, 在航空航天领域得到了广泛应用并发挥了巨大作用。正常情况下, TBCs可降低金属表面温度 50~80℃, 个别高温点降温可达 140℃, 有望达到 170℃, TBCs 涂层的使用, 可提高推重比 5%(或降低 1%的燃料消耗比), 同时可降低热疲劳、提高可靠性。热障涂层的隔热效果主要取决于陶瓷

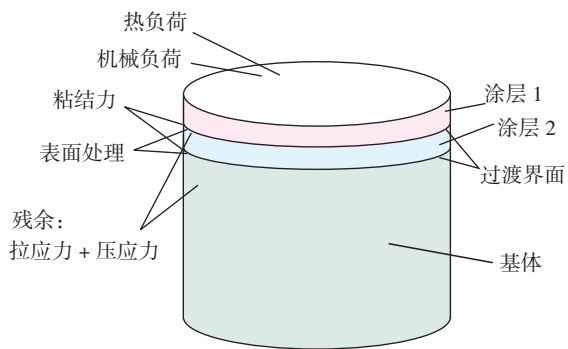


图1 典型双层结构涂层及所加载荷示意图

表1 典型沉积工艺的特性比较

工艺种类	材料	均匀性	不纯度	晶粒度 / nm	薄膜密度	沉积速率 / (Å · s <sup>-1</sup> )	基体温度 / °C	定向性	成本
热蒸发	金属或低熔点材料	差	高	10~100	差	1~20	50~100	有	很低
EB 蒸发	金属及非金属	差	低	10~100	差	1~100	50~1000	有	高
溅射	金属及非金属	很好	低	10	好	金属:100 绝缘物:1~10	200~300	几度	高
PECVD	主要为非金属	好	很低	10~100	好	1~100	200~300	几度	很高
LPCVD	主要为非金属	很好	很低	1~10	很好	10~100	600~1200	各向同性	很高

层热导率的大小,所以研究人员一直致力于低热导率热障涂层的制备。

### 1 热障涂层的制备技术

目前广泛使用的航空发动机热障涂层系统主要由氧化钇部分稳定化的氧化锆(YSZ)陶瓷涂层和MCrAlY(其中M代表Ni, Co或NiCo)金属粘结层组成,其中起隔热作用的是YSZ陶瓷涂层。YSZ涂层的结构和性能与制备方法和工艺参数密切相关,其制备方法主要是等离子喷涂和电子束物理气相沉积(EB-PVD),两种方法各有优缺点,如表3所示。等离子喷涂制备的YSZ的结构是层状结构,而EB-PVD制备的YSZ的结构是柱状晶结构。等离子体喷涂具有工艺简单、沉积速率及效率较高、成本低等一系列优点。但等离子喷涂的层状结构平行于基体表面,使陶瓷层中存在许多横向界面,这种结构的涂层在高温工作环境中不足以抵抗热循环产生的热应力,会

导致涂层过早剥落。而用EB-PVD制备涂层,可以获得具有垂直于基体表面的柱状晶结构,具有较高的应力容限,明显提高了涂层抗热应力的能力,使用寿命远大于等离子喷涂的热障涂层,很适用于高速旋转的动叶。

但是EB-PVD制备的热障涂层,隔热效果一般不如等离子喷涂。

最早的TBCs是由等离子喷涂来制备的。然而,传统层状结构的热障涂层(如等离子喷涂的TBCs)不足以经受涡轮发动机高应力的机械载荷及长时间大温差的循环热疲劳载荷的工作环境,在应力交替变化的情况下极易脱落。自20世纪七八十年代以来,对高速运转部件其热障涂层基本由EB-PVD工艺制备。如,自80年代以来,Pratt & Whitney、GE等公司研制的航空涡轮发动机开始采用EB-PVD技术制备的热障涂层来保护转子叶片和导向叶片。

### 2 热障涂层的研究进展

在基础研究方面,人们试图通过改进涂层工艺来进一步提高涂层自身性能,如高温抗氧化性、抗热冲击性、降低导热性等。为此出现了梯度、多层分层等结构形式的涂层。涂层性能也得到了提高。德国宇航

中心材料研究所对EB-PVD沉积温度、蒸气压、工件转数对热障涂层的密度、微观结构和热导率的影响作了较为深入的研究<sup>[4-5]</sup>。英国克兰菲尔德大学从分析陶瓷内部的热传导机制入手,研究了包括涂层显微结构及陶瓷组分、晶格振动与辐射等因素对热导性的影响<sup>[6]</sup>。

EB-PVD工艺中,由于涂层材料中各组饱和蒸气压不同,往往造成涂层与原材料的成分差异,这时可以采用多坩埚蒸发加以解决<sup>[7]</sup>。多坩埚蒸发工艺也可用于制备叠层材料和梯度涂层材料。乌克兰巴顿电焊所国际电子束技术中心B.A. Movchan院士及其同事对梯度涂层进行的深入研究表明,在厚度方向某些元素呈梯度分布的涂层比普通双层的涂层性能有大幅度提高<sup>[8]</sup>,多层阶梯涂层比成分单一的涂层综合性能有明显提高<sup>[9]</sup>。美国宾夕法尼亚州立大学采用非连续沉积方法制备多层柱状晶结构的热障涂层,将涂层热导率降低了30%,反射率增加了56%<sup>[10]</sup>。

离子束辅助电子束物理气相沉积(IA EB-PVD)是一种在EB-PVD系统上添加离子源进行涂层制备的新技术。IA EB-PVD可以改变涂层结构,控制涂层的组分,改善界面状况。在离子辅助进行沉积时,可以在更低的氧分压和更低的沉积温度条件下得到完全化学配比的YSZ涂层<sup>[11]</sup>。国际上美国Sandia国家实验室、英国克兰菲尔德大学、罗·罗公司以及国内的中航工业北京航空制造工程研究所均开展了离子束辅助沉积热障涂层的研究。图2为中航工业北京航空制造工程研究所采用IA EB-PVD技术制备出的分层柱状晶结构的热障涂层,采用该技术可以将涂层热导率降低20%以上,接近等离子喷涂的水平。

近几年,随着涡轮进口温度要求越来越高,人们开始研发相稳定温度更高的涂层材料与结构,烧绿石结构

表2 航空发动机涂层技术及应用

涂层种类	功能	性能要求	制备方法	应用部件
热障涂层	耐高温燃气冲击且有隔热功能,提高部件使用温度和寿命	耐高温、热导率低、耐热应力、抗热冲击和热循环	EB-PVD、等离子喷涂、多弧离子镀(底层)	燃烧室、涡轮叶片、尾喷管
封严涂层	减小气体泄漏、降低油耗,提高压气机和涡轮效率	抗热震性能、抗氧化性能、足够的结合强度、优良的可磨耗性能及抗气流冲刷性能	等离子喷涂、冷喷涂	压气机机匣、涡轮外环
耐磨/耐蚀/耐冲刷涂层	抵御空气中的尘埃、水滴和沙粒等在高速气流作用下对风扇/压气机叶片的冲蚀及海洋环境对部件的腐蚀	硬度高、抗腐蚀、涂层结合力高	多弧离子镀、磁控溅射、等离子喷涂	风扇叶片、压气机叶片、轴、轴承、燃油泵柱塞
高温抗氧化涂层	抗高温氧化,提高部件使用寿命	抗高温氧化、耐腐蚀	化学气相沉积、等离子喷涂	涡轮叶片
抗微动磨损涂层	承受表面反复加载和卸载周期性应力而阻止或减少基体零件蠕动腐蚀或表面疲劳损伤	良好的韧性和结合强度、抗氧化、耐腐蚀	等离子喷涂、多弧离子镀	压气机/涡轮叶片榫头和榫槽、紧固件连接部位、摩擦副结构
阻燃涂层	阻止摩擦热的积累,有效延缓或阻止燃烧的进展	燃烧热值低、抗氧化、导热性好、可磨耗、摩擦系数低、较高的硬度	等离子喷涂、多弧离子镀	压气机叶片、压气机机匣
环境障碍涂层	阻止或减小发动机环境对高温结构材料性能的影响	高温和发动机环境稳定性;耐热应力及机械应力;热导率低;热和环境防护性能	等离子喷涂、化学气相沉积、EB-PVD	陶瓷基复材构成的涡轮叶片、喷嘴、喷管
憎水涂层	通过制备超疏水结构的涂层,使涂层与水的接触角变大,从而达到防止结冰的作用	结合强度高、接触角大	多弧离子镀、磁控溅射	进气机匣、帽罩、发动机进气道、桨叶、翼面前缘、垂尾
隐身涂层	红外隐身、雷达隐身	吸收雷达波、热发射率低	等离子喷涂	尾喷管

表3 热障涂层制备技术对比

工艺	等离子喷涂	EB-PVD
沉积速度	高	适中
粗糙度	粗糙	光滑
缺陷	结构不均匀,往往产生微孔、非粘界面、晶粒间界、夹杂等缺陷	结构均匀、致密
结构	层状结构	柱状晶结构
冷却气孔影响	冷却通道易堵塞	冷却通道堵塞小
结合强度	20~40MPa,机械结合,弱	100~400MPa,冶金结合,强
寿命	短	长
热导率	低,0.8~1.1W/(m·K)	高,1.5~1.9W/(m·K)

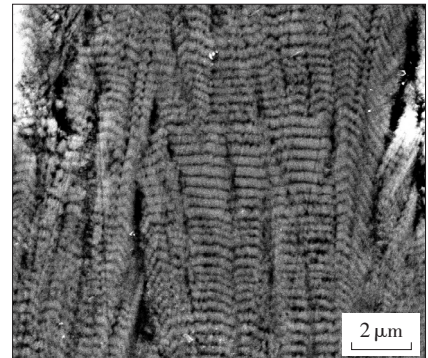


图2 1A EB-PVD热障涂层SEM照片

的涂层就是一类典型的代表<sup>[12]</sup>,如La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>、Sm<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>或掺杂少量其他稀土的涂层材料。但该类涂层材料的热膨胀系数较小、断裂韧性低,直接沉积在金属粘结层上的寿命并不理想,由此产生了双陶瓷层的热障涂层。

## 封严涂层

### 1 封严涂层的工作原理

封严涂层亦称密封涂层,主要用于发动机气路密封,以减少气体泄漏、增加喘振裕度、提高压气机和涡轮效率。

封严涂层作为发动机的重要技术之一,可调控涡轮发动机中旋转部件与固定部件之间的密封性,显著提高发动机的性能。在发动机压气机叶片、涡轮叶片与外环机匣之间,均用到封严涂层(图3)。封严涂层的性能,直接影响发动机的功率、推力和效率。如涡轮外环至叶尖间隙与叶片长度的比值每增加1%,涡轮效率损失就增加1%~3%。可见,封严涂层的采用是提高效率和性能的重要途径之一<sup>[13]</sup>。有时一些油路密封,也用到封严或密封涂层。

### 2 封严涂层的研究状况

航空发动机上采用的封严涂层主要有蜂窝封严、镶块封严、金属毡封严和热喷涂封严<sup>[14]</sup>。常用的耐磨封严涂层材料如表4所示。近年发展最快的是热喷涂封严涂层和耐高温的陶瓷基封严涂层。热喷涂封严涂层具有优良的可磨耗性和抗冲蚀性,同时提供热障涂层的性能,在生产成本和应用方面均有其优势<sup>[15]</sup>。蜂窝封严通常是在蜂窝格内用喷涂的方法喷涂具有可磨耗涂层以增加封严效果(图4),而蜂窝则起到了强化涂层与基体结合的作用。蜂窝封

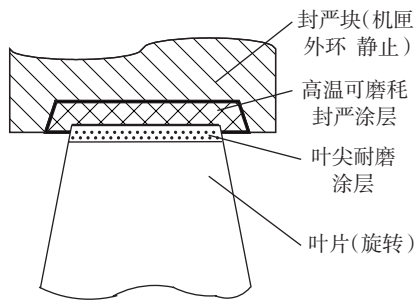


图3 封严涂层工作原理

强度又往往呈现矛盾趋势,因此可磨耗性与结合强度的协调性是封严涂层制备技术的关键点。为了增加结合强度,近几年国际上出现了真空烧结工艺用于封严涂层的制备。此类工艺是利用专用或特殊组织的结构材料(钎料),附着在封严部件之上,然后进行真空烧结,实现涂层与基体的冶金结合。其结合强度与热疲劳

能力,可以明显减少冷却气量,使发动机工作效率更高,减少氮化物和CO排放,是最有希望取代镍基高温合金在发动机热端部件中得以应用的高温结构材料,可以应用于燃烧室内衬和涡轮叶片。然而, SiC/SiC 复合材料在发动机环境中会与水蒸气和CO<sub>2</sub>会发生氧化反应,所以必须采用环境障碍涂层以提高其寿命。

表4 常用耐磨封严涂层材料

涂层材料	喷涂方法	适用温度 /℃	用途
银铜合金	等离子、火焰	≤ 400	盘轴封严环
NiCuSi/C	等离子喷涂	650	涡轮篦齿封严
NiCrAl	等离子、火焰	900~1000	涡轮封严
Ni/Al	等离子、火焰	900~1000	涡轮封严
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> /NiCr	等离子、爆炸	≤ 980	涡轮封严
NiCrAlY	低压等离子	1100	涡轮封严

严一般用于发动机的压气机部分。在涡轮叶片与外环之间,采用另一种重要涂层——高温封严涂层。早期的高温封严涂层一般用低压等离子喷涂“MCrAlY+ 聚苯酯”。MCrAlY起高温抗氧化作用而聚苯酯在涂层内部造成一定量空隙以增加可磨耗性。但是此类涂层在使用过程中有时会出现局部剥落现象,当剥落渣块尺寸超过一定限度时,封严效率就会下降。更为严重的是,大尺寸的剥落物可能会对高速旋转件造成一定危害。但封严涂层的可磨耗性与结合

寿命大大提高。目前国内也开始研究这种方法,但尚未大规模应用。

### 环境障碍涂层

#### 1 环境障碍涂层的工作原理

环境障碍涂层(Environmental Barrier Coatings, EBC)是指在航空发动机环境下使用的高温结构材料表面的防护涂层(一般为氧化物或氧化物混合物陶瓷),阻止或减小发动机环境对高温结构材料性能的影响。碳化硅纤维增强的碳化硅(SiC/SiC)陶瓷基复合材料具有很强的耐高温

#### 2 环境障碍涂层的体系结构

典型的环境障碍涂层为3层结构<sup>[16]</sup>,最外层是BSAS(Barium Strontium Aluminum Silicate),粘结层为Si,粘结层与BSAS顶层之间为莫来石与BSAS的混合过渡层。先进EBC涂层体系为一种先进的环境障碍涂层体系,用于1650℃热环境系统<sup>[17]</sup>。顶层是耐高温陶瓷热障涂层,主要功能是用来提供热防护,也用来作第一级防辐射障碍层。能量耗散层、二级防辐射层和环境障碍层共同提供应变容限,进一步减少辐射能渗透,确保环境防护功能。

### 结束语

航空发动机各部件的工作环境十分恶劣,很多部件需要同时承受高温、高压、震动、摩擦、磨损、冲刷、腐蚀和大的机械载荷。尤其是随着高推重比航空发动机和节能减排环保的需要,对材料的性能要求越来越高,从而推动了应用材料的不断发展。但单一的材料往往无法满足高性能航空发动机的使用需求,而涂层技术可以非常有效地弥补材料性能的不足,是航空发动机制造领域必不可少的技术手段。目前,涂层技术在我国航空发动机制造领域的应用方兴未艾,可以预见未来有广阔的发展前景。

本文共有参考文献17篇,因篇幅所限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 夏宛)

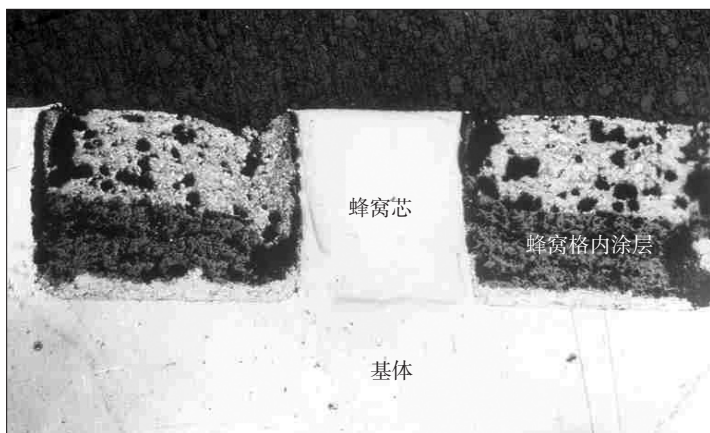


图4 蜂窝封严涂层截面