

# 热障涂层在飞机 APU 中的应用、失效形式与维护方法

王璐璐<sup>1,2</sup>, 刘延宽<sup>3</sup>, 王志平<sup>1,3</sup>, 许婧<sup>3</sup>, 费宇杰<sup>3</sup>

(1. 沈阳工业大学, 沈阳 110870; 2. 中国南方航空公司, 沈阳 110169;  
3. 中国民航大学 天津市民用航空器适航与维修重点实验室, 天津 300300)

**摘要:** 飞机辅助动力装置 (Auxiliary Power Unit, APU) 是当前主流民用飞机上必不可少的部件, 而热障涂层在 APU 中的应用能够减少发动机油耗、提升效率、延长热端部件的使用寿命。首先概述了飞机辅助动力装置的结构和工作原理, 以及热障涂层的材料及结构体系。其次归纳了飞机 APU 常见热端部件中热障涂层的制备技术及应用特点, 主要对大气等离子 (Air Plasma Spraying, APS) 和电子束物理气相沉积 (Electron-Beam Physical Vapor Deposition, EB-PVD) 等 2 种热障涂层进行了论述。在此基础上, 重点综述了热障涂层在民用飞机 APU 中的典型失效形式, 包括高温氧化失效、烧结失效、CMAS 腐蚀、颗粒物冲击等, 同时结合热障涂层热生长氧化物 (Thermally Grown Oxide, TGO) 生长、应变能释放、蠕变与疲劳、颗粒物沉积、外来物损伤等行为, 对以上失效形式的失效机理进行了重点论述; 分别从微观结构观察、断裂力学参数计算、有限元建模等方面详细阐述了飞机 APU 热障涂层的失效分析手段与方法。最后结合航空公司的实际运营情况对提升 APU 使用寿命和系统可靠性给出了基于热障涂层的维护建议和预防措施。

**关键词:** 辅助动力装置; 热端部件; 热障涂层; 失效分析; 维护方法

**中图分类号:** TG148; V257 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)06-0170-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.014

## Application, Failure Modes and Maintenance Methods of Thermal Barrier Coatings in Aircraft APU

WANG Lu-lu<sup>1,2</sup>, LIU Yan-kuan<sup>3</sup>, WANG Zhi-ping<sup>1,3</sup>, XU Jing<sup>3</sup>, FEI Yu-jie<sup>3</sup>

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China; 2. China Southern Airlines, Shenyang 110169, China; 3. Tianjin Key Laboratory of Civil Aircraft Airworthiness and Maintenance, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

**ABSTRACT:** The aircraft auxiliary power unit (APU) is an indispensable component on the main types of modern civil aircraft, while the application of thermal barrier coatings (TBCs) in APU can reduce engine fuel consumption, improve engine efficiency,

收稿日期: 2021-07-14; 修订日期: 2021-09-25

Received: 2021-07-14; Revised: 2021-09-25

基金项目: 天津市教委科研计划 (2020KJ016); 天津市省部级科研机构开放基金 (TKLAM202202)

Fund: Scientific Research Project of Tianjin Education Commission (2020KJ016); Opening Fund of Tianjin Provincial and Ministerial Scientific Research Institution (TKLAM202202)

作者简介: 王璐璐 (1978—), 女, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为表面工程。

Biography: WANG Lu-lu (1978-), Female, Doctor student, Senior engineer, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 刘延宽 (1988—), 男, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为表面工程。

Corresponding author: LIU Yan-kuan (1988-), Male, Doctor, Assistant researcher, Research focus: surface engineering.

引文格式: 王璐璐, 刘延宽, 王志平, 等. 热障涂层在飞机 APU 中的应用、失效形式与维护方法[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 170-179.

WANG Lu-lu, LIU Yan-kuan, WANG Zhi-ping, et al. Application, Failure Modes and Maintenance Methods of Thermal Barrier Coatings in Aircraft APU[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 170-179.

and extend the service life of hot section components. This article firstly makes an overview of the structure and working principle of the aircraft APU, as well as the material and structure system of the TBCs. Secondly, the article summarizes the preparation technology and application characteristics of TBCs on hot section components of aircraft APU, mainly focusing on two types of TBCs: Air Plasma Spraying (APS) and Electron-Beam Physical Vapor Deposition (EB-PVD). On this basis, the article concludes the typical failure modes of TBCs applied in civil aircraft APU: including high-temperature oxidation failure, ablation failure, CMAS corrosion, particle impact, etc. At the same time, the failure mechanism of the above failure modes are discussed combining with TGO growth, strain energy release, creep and fatigue, particle deposition, foreign object damage and other behaviors. In addition, the failure analyzing means and methods of aircraft APU TBCs are elaborated in detail from the aspects of microstructure observation, fracture mechanics calculation, and finite element modeling. Finally, maintenance suggestions and precautions based on TBCs are given to improve the service life and system reliability of APU according to the actual situation of air companies.

**KEY WORDS:** APU; hot section components; thermal barrier coatings; failure analysis; maintenance method

为了降低对地面供电设备的依赖性, 以及提高飞行安全性和可靠性, 在现代民用飞机及大型直升机的尾部均装有一台独立的小型动力装置, 以及辅助动力装置 (Auxiliary Power Unit, 简称 APU)。APU 的主体是一台小型燃气涡轮发动机, 能为飞机在地面主发动机关车时提供电源和空调引气, 以及为发动机起动提供必要的压缩空气。若飞机在飞行过程中出现发动机空中停车的紧急状况, APU 也能保证飞机空调气源和电源的供应, 从而确保客舱和驾驶舱内的空调系统、灯光系统等正常运行<sup>[1-4]</sup>。APU 的正常运转成为目前保证大中型客机停放在地面时客舱舒适的必要条件<sup>[5]</sup>, 因此 APU 系统的重要性不言而喻。

APU 是飞机上除了主发动机外, 结构最复杂、维修费用也最高的部附件。实时了解 APU 的使用工况和健康状态, 将有助于运营人监控 APU 状态, 实施主动计划性维护, 降低突发故障概率, 提高 APU 可用率和可靠性, 降低不经济修理风险概率。与主发动机类似, APU 中最为核心的部件为热端部件, 热端部件上起隔热和保护作用的热障涂层的状态对部附件的可用性、可靠性和 APU 的整体系统健康状态至关重要。由此, 文中将探讨热障涂层技术在民用 APU 上的应用及其典型失效形式和分析方法, 并从运营和使用的角度提出可以采取的在翼维护措施和机队管理措施, 以提高 APU 热障涂层及 APU 整体系统的使用寿命。

## 1 APU 的结构及工作原理

APU 是一个燃气涡轮发动机, 在设计时为了减少总体积、提高做功效率, 通常采用离心式压气机、回流式燃烧室和轴流式涡轮, 结构上采用单元体式设计。以空客 A320 上某型号 APU 为例(图 1—2), APU 包括齿轮箱、负载压气机和核心机等 3 个单元体。在某些更为现代的飞机上, 如波音 B787 飞机上的 APU (图 3—4) 已经取消了负载压气机单元体部分, 不

再为飞机提供引气, 主要保留发电功能<sup>[6-7]</sup>。

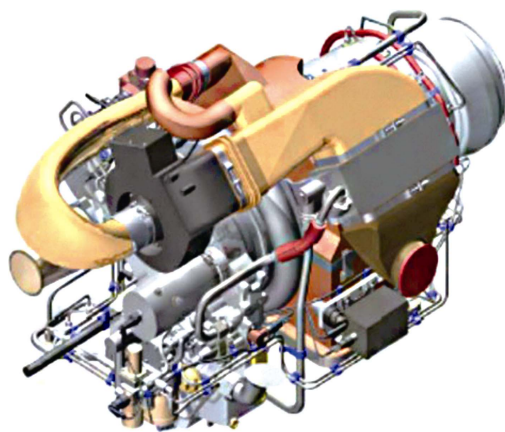


图 1 A320 飞机上某型 APU 外观<sup>[2]</sup>  
Fig.1 The appearance of APU on A320 aircraft<sup>[2]</sup>

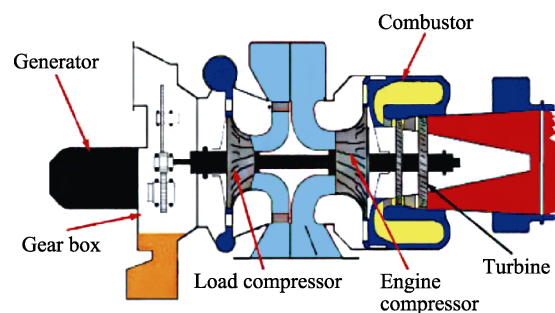
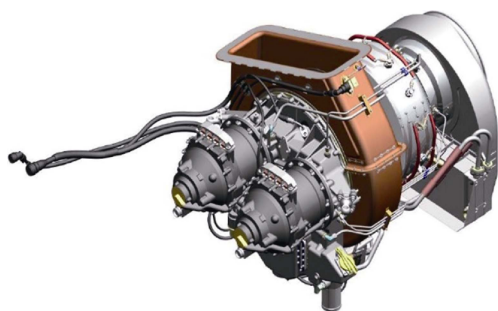


图 2 A320 飞机上某型 APU 剖面结构<sup>[2]</sup>  
Fig.2 Cross-sectional structure diagram of a certain type of APU on A320 aircraft<sup>[2]</sup>

当前主流 APU 主要为飞机提供引气和发电功能, 其中引气为飞机空调系统供气 (ECS 模式, Environmental Control System) 和飞机主发动机起动用气 (Main Engine Start, MES)。在飞行过程中, 若飞机突然遭遇发动机停车的紧急情况, 可以通过起动 APU 临时为飞机提供引气和应急电源, 以待发动机重起。

在飞机不同的飞行阶段, APU 呈现不同的工作

状态。飞机在地面时,飞机内的电力和压缩空气由APU独立提供,用以保证飞机上空调系统和灯光系统的正常运行,同时可用于主发动机(大发)的起动。在飞机起飞和爬升阶段,APU辅助主发动机工作,以确保其功率全部用于地面加速和爬升,从而保证飞机的起飞性能。当爬升到一定高度(约5 000 m)后,APU关闭。在飞机巡航阶段,当主发动机出现空中停车时,APU可在12 000 m高度以下起动,为重启动发动机提供动力。降落后,飞机的主发动机关车,转而由APU继续提供空调和灯光,在节省燃油的同时降低了噪声<sup>[8]</sup>。



APS 5000 auxiliary power unit

图3 B787飞机APU外观<sup>[7]</sup>

Fig.3 Appearance of APU on B787 aircraft<sup>[7]</sup>

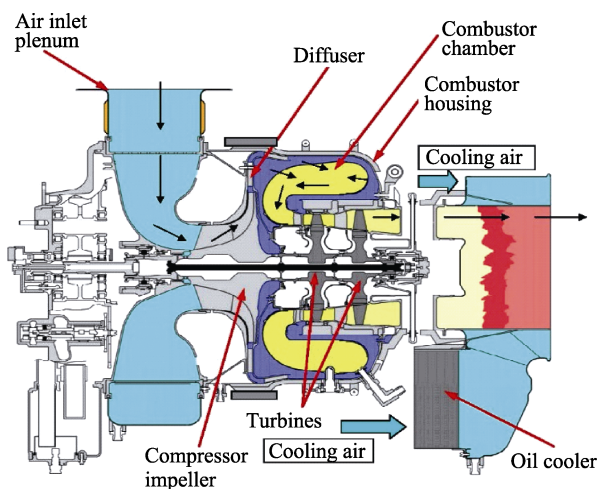


图4 B787飞机APU剖面图<sup>[7]</sup>

Fig.4 Cross-section view of APU on B787 aircraft<sup>[7]</sup>

## 2 热障涂层技术在民用飞机 APU 上的应用

### 2.1 热障涂层材料及结构体系

热障涂层(Thermal Barrier Coatings, TBCs)是一种具有优良隔热性能的功能性陶瓷涂层。由于陶瓷材料具有耐高温、抗腐蚀、热导率低等特点,将其喷涂于高温合金的表面,可以起到保护基体材料的目的。热障涂层技术的应用,使包括飞机APU在内的

航空发动机热端部件的耐高温、抗腐蚀性能得到了显著提升,并且能节省冷却空气,使热端部件的热效率达到60%以上,从而大大节省了燃油的消耗<sup>[9]</sup>。

目前,大量应用于APU的热端部件上的热障涂层是氧化钇(质量分数一般为6%~8%)部分稳定氧化锆的陶瓷材料,即以Yttria Stabilized Zirconia(YSZ)为陶瓷面层(Top Coat)材料,以MCrAlY合金(M为Ni、Co等金属)作为金属黏结层(Bond Coat)材料的双层结构热障涂层体系<sup>[10-12]</sup>。陶瓷层作为面层,主要起隔热、抗氧化腐蚀的作用。将连接基体与陶瓷层的金属黏结层作为底层,能够改善金属基体与陶瓷层之间热膨胀系数过大所带来的问题,同时还能起到阻止基体元素扩散的作用<sup>[13]</sup>。

### 2.2 热障涂层的研究背景及应用

热障涂层的概念于20世纪40年代末50年代初被提出并开始研究。由于热障涂层具有优异的隔热性能,因此其很快应用于航空发动机中<sup>[14]</sup>。从20世纪70年代中期开始,英美等多国开始将目光转向热障涂层在发动机和APU涡轮导向叶片的应用上,期望延长涡轮导向叶片等非限寿件的维修周期。此时,TBCs主要采用等离子喷涂(Plasma Spraying, PS)技术。20世纪80年代中叶,电子束物理气相沉积(Electron-Beam Physical Vapor Deposition, EB-PVD)技术被美国普惠(Pratt & Whitney, PW)和通用公司(General Electric, GE)等航空发动机制造商应用,以制备保护涡轮导向叶片的热障涂层。同一时期,该项技术在欧洲各国也得到了普遍应用,欧洲早期将通过EB-PVD制备的热障涂层首先应用于军用飞机的转子叶片上。在20世纪90年代后期,大部分民用飞机发动机和APU的涡轮导向叶片上都应用了第1代EB-PVD热障涂层,以降低金属基体的实际工作温度。PW公司于1994年3月交付使用的“降温型(RTC)”PW2000发动机上,将热障涂层喷涂于第1级高压涡轮导向叶片上,研究发现其寿命相较于原型机提高了2倍。

早期,只将热障涂层应用于飞机APU内部外形较为简单的燃烧室的筒体,随着制备工艺向精密化发展,在涡轮静子导向叶片和转子叶片等工作环境更恶劣的部件表面也开始喷涂热障涂层。热障涂层的应用,改善了叶片基体抗高温腐蚀性能,使涡轮导向叶片能够承受更高的涡轮前温度,在大幅度提高使用寿命和可靠性的同时,也减少了油耗,提高了APU的工作效率。热障涂层技术已被欧美以及我国视为新一代航空发动机和辅助动力装置的关键技术之一<sup>[15]</sup>。

### 2.3 APU热障涂层的制备技术及应用特点

APU上常见热端部件(如燃烧室、涡轮盘、涡轮叶片、导向叶片等)的热障涂层通常采用大气等离子喷涂(Air Plasma Spraying, APS)和EB-PVD技



术制备<sup>[16-17]</sup>。如 APU 燃烧室的折流顶部涂层通过等离子喷涂技术获得, APU 涡轮导向叶片的涂层通过 EB-PVD 技术获得。

1) APS 法。利用高温等离子焰流, 将粉末材料加热到熔融状态, 在 Ar、H<sub>2</sub> 等惰性气体的保护下, 通过喷枪将其喷射在经喷砂粗化处理后的基体表面。熔融态的粉末轰击到基体表面后发生变形, 并迅速冷却、凝固, 大量变形粒子铺展、堆垛, 形成了具有一定结合强度的波浪状层式结构涂层。等离子喷涂法具有设备易操作、制备效率高等特点, 在早期多用该法制备热障涂层。受到工艺的限制, 采用等离子喷涂法制备的涂层内部不可避免地会出现微裂纹和较大孔隙等缺陷, 导致涂层的抗腐蚀和抗热振性能均较差<sup>[18-19]</sup>。

2) EB-PVD 法。在真空条件下, 电子束将坩埚内材料加热蒸发, 使之溅射沉积在基体表面, 涂层与基体主要为化学结合, 结合强度较高。EB-PVD 法的蒸发速率较高, 且易控制电子束的功率, 因而得到的涂层膜厚均匀且易于调节<sup>[20-21]</sup>。采用 EB-PVD 法制备的涂层在垂直于界面方向具有柱状晶结构, 这使得涂层具有较高的结合强度和应变容限。由于 EB-PVD 的设备较为昂贵, 考虑到成本等因素, 这种技术更多地被应用于服役工况极为苛刻的热端部件中, 如具有超高转速的飞机 APU 涡轮叶片(最高转速可达 48 000 r/min)。

通过对比以上 2 种热障涂层技术, 总结出了 2 种喷涂技术的结构特点。采用等离子喷涂的热障涂层的结构特点: 涂层较为致密, 层间多靠机械勾连结合, 结合强度较高; 层状结构涂层的抗热冲击性能较差; 涂层界面多为不规则的波浪状, 且涂层内部存在较多微裂纹<sup>[15,22-23]</sup>。采用电子束物理气相沉积法制备的热障涂层的结构特点: 涂层结合强度高; 拥有较大应变容限的柱状晶结构能使涂层承受更大的热应力, 从而提高了涂层的热疲劳寿命<sup>[24-25]</sup>; 界面较为平整, 应力不易累积; 柱状晶生长方向平行于热流, 晶界对热流的阻挡作用较弱。

### 3 热障涂层在民用飞机 APU 中的失效与分析

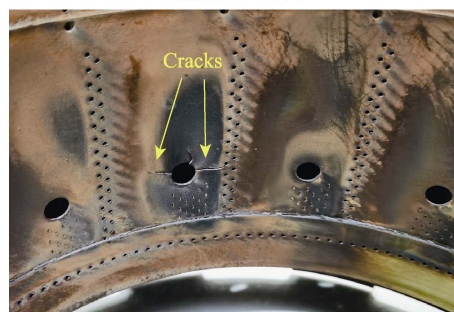
#### 3.1 APU 热端部件的典型失效形式

APU 热端部件的损伤通常指燃烧室(含)之后部件的损伤, 如燃烧室的热腐蚀、材料脱落、裂纹等(见图 5); 一级涡轮导向叶片的前缘热腐蚀、后缘材料缺失(见图 6)、裂纹等; 一级涡轮转子叶片叶尖磨损、腐蚀(见图 7)、叶片及涡轮盘材料的缺失(见图 8); 二级涡轮导向叶片的盘根部磨蚀、硫化腐蚀; 二级涡轮叶片的热腐蚀、叶片折断等<sup>[26]</sup>。这些损伤通常都伴随着整体的性能衰退, 主要在翼表现包括 APU 起动时间长、排气温度(Exhaust Gas Temperature, EGT)高、引气压力低、引气流量低、进气导

向叶片(Inlet Guide Vane, IGV)角度关回(cutback)等<sup>[27]</sup>。热端的损伤可以通过航线孔探检查方法发现, 如燃烧室、一级涡轮导向叶片、一级涡轮、二级涡轮的损伤。上述损伤绝大多数都是由 APU 热端部件上所应用的热障涂层失效所致, 热障涂层作为 APU 热



a 燃烧室整体构型



b 燃烧室局部裂纹

图 5 APU 燃烧室裂纹

Fig.5 Cracks on APU combustion chamber:  
a) overall configuration of combustion chamber;  
b) local cracks in combustion chamber



图 6 涡轮导向叶片后缘材料缺失  
Fig.6 Missing material on the trailing edge of turbine guide vanes

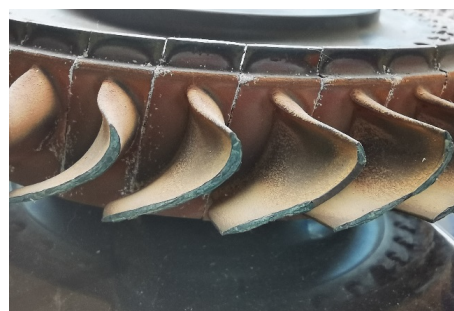


图 7 涡轮叶尖损伤  
Fig.7 Damage to turbine blade tip

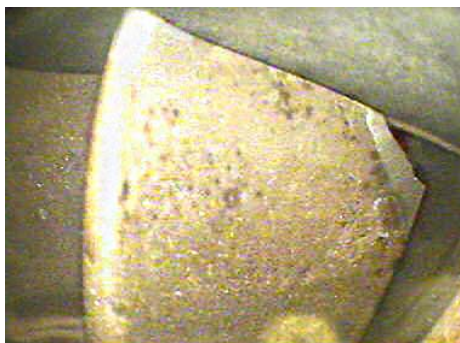


图 8 涡轮转子叶片后缘材料缺失  
Fig.8 Missing material on the turbine blade trailing edge

端部件的重要组成部分,即可总结为涂层的失效引起了部件的损伤。APU 热端部件热障涂层的典型失效形式可归纳为以下几类。

### 3.1.1 热障涂层高温氧化失效

APU 在高温服役过程中,氧气极易通过 YSZ 涂层的孔隙扩散到金属黏接层,与  $\text{MCrAlY}$  材料中的  $\text{Ni}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Al}$  等金属元素发生选择性氧化,从而在金属黏结层和陶瓷面层的界面处形成一层热生长氧化物 (Thermally Grown Oxide, 简称 TGO) [28]。在初始氧化阶段, TGO 由大量致密的氧化铝和少量“有害”的尖晶石相氧化物组成[29],少量 TGO 的形成能够显著抑制空气中的氧向黏结层扩散,有益于提高金属基体的抗氧化能力。随着 TGO 在黏结层/陶瓷层界面处的不断增厚,铝元素被大量消耗,使得金属黏结层出现“贫铝带”。随着高温氧化时间的增加,贫铝带逐渐增大,富  $\text{Ni}$ 、 $\text{Co}$ 、 $\text{Cr}$  的尖晶石类氧化物在 TGO 中大量生成,造成涂层局部膨胀,从而在陶瓷面层内产生较大的应力[30-31]。当应力累积超过了陶瓷层的结合力强度,就会引起裂纹的扩展,进而出现表面涂层的剥落,最终导致 APU 热障涂层的失效和部件的损伤[32-33]。

### 3.1.2 热障涂层烧结失效

EB-PVD 热障涂层的损坏会导致陶瓷柱状晶结构暴露在高温条件下,此时会发生烧结,最终会破坏热障涂层的力学性能。在不同的位置和工况条件下,烧结的程度也会不同。这就导致微观应力和弹性模量沿着热障涂层厚度方向存在差异,这些差异会进一步影响热障涂层应变能的释放,进而导致热障涂层的失效。

烧结一般最先发生于热障涂层的外部表面,这里是温度最高的位置,而在黏接层界面上热障涂层的收缩量相对最小,收缩产生的应力由陶瓷层和黏接层共同承受。烧结后的柱状晶簇收缩会导致 EB-PVD 热障涂层形成“泥潭”状的裂纹,在柱状晶簇上表面收缩时,晶簇边缘的柱状氧化锆会受到拉应力,这可能会加速热障涂层的脱落[34]。

### 3.1.3 CMAS 沉积物腐蚀失效

在 APU 高速运行过程中,气流中的一些微观颗粒会对 APU 导向叶片的热障涂层造成冲击。即使这些冲击不会造成损伤,也会在叶片前缘形成一层沉积物。以 EB-PVD 涂层来说,它的陶瓷层柔性微结构容易因沙石和盐粒产生玻璃质灰尘 (CMAS) 和熔融硫酸盐的表面沉积物。当 CMAS 和硫酸盐沉积物较多时,氧化钇会从涂层扩散到熔融沉积物中,造成 YSZ 中的四方相向单斜相转变,并且沉积物的存在会使涂层局部位置发生熔化,随后再沉淀,从而对涂层的柱状晶结构造成损伤,加速涂层的腐蚀[35]。

此外,CMAS 和硫酸盐在不断沉积过程中会降低热障涂层的应变柔度,导致涂层在冷却过程中更易发生脱落。当涂层表层温度超过  $1\,240\text{ }^{\circ}\text{C}$  时,沉积物会熔化,并侵入涂层的微观结构中。当涂层表面沉积大量的熔融物时,这些熔融物会一直侵蚀热障涂层,直到温度下降到一定程度后才会停止,这个温度一般接近氯化钙-氧化铝-二氧化硅系统的最低共熔温度 ( $1\,170\text{ }^{\circ}\text{C}$ )。

### 3.1.4 颗粒物冲击导致的涂层脱落

在工作过程中,发动机的热端部件极易受到高速颗粒物的冲击,使得涂层发生损伤,甚至侵蚀、脱落。颗粒物冲击造成的损伤主要有以下 3 种类型。

1) 较小颗粒物的侵蚀损伤。这种损伤的位置一般位于热障涂层的近表面位置,热障涂层表面受到冲击发生开裂后,导致涂层损伤,这种损伤深度一般为  $10\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 。受到冲击后,涂层会在冲击颗粒下的弹/塑性界面位置产生裂纹。虽然冲击会导致裂纹的产生,但裂纹通常不会贯穿整个涂层的厚度方向,晶格边界会阻止裂纹的扩散。

2) 挤压损伤。这种损伤主要由较小的颗粒造成。冲击发生后,会明显影响涂层表面的塑性形变和密实化。虽然冲击造成了一定损伤,但冲击能量密度较低,由冲击造成的应力和应变仍然不会使涂层发生断裂。

3) 外来物损伤 (Foreign Object Damage, FOD)。主要由较大的颗粒或者高速小颗粒冲击引起,这种损伤一般较明显,涂层会发生较大的形变。在 FOD 冲击后,其最轻的程度是发生了挤压损伤,并且伴随冲击过程产生横向和剪切裂纹;最重的程度是涂层出现大面积的塑性形变和密实化。涂层中的陶瓷层应变场、黏结层界面、TGO 三者之间存在交互作用。在以上情况下,会出现剪切带,并且有向外和向下扩散的趋势,扩散直到 TGO 界面处发生转向,最终产生与黏结层 TGO-陶瓷层界面相平行的裂纹[36]。

## 3.2 APU 中热障涂层的失效分析方法

热障涂层的失效是 APU 热端部件失效的主要原因,热障涂层已经成为保障 APU 热端高温部件安全性的重要因素。由此,国内外学者对热障涂层的失效



分析方法开展了大量研究,主要采用的研究方法有微观结构观察法、断裂力学计算法、有限元建模法等。

### 3.2.1 微观结构观察法

微观结构观察法主要采用光学显微镜或扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM) 对热障涂层试样进行微观结构的观察分析,并结合物相分析结果和理论推导,确定热障涂层的失效形式,从而实现对 APU 热障涂层的状态监控与寿命预测。通过对热障涂层表面和截面微观结构的观察,可以有效地掌握涂层各组成部分的微观组织结构 (如裂纹、孔隙、分层、氧化基团等) 的变化情况,以及 TGO 的生长情况,并为热障涂层失效和寿命预测模型的构建提供理论支撑。考虑到 APU 的实际工作环境,在这种方法中,金属黏结层的氧化程度、TGO 生长行为及其厚度的变化是失效分析最重要的影响因素。这是由于 TGO 在生长增厚过程中会引起金属黏结层中 Al 元素的大量消耗,会导致裂纹的产生和涂层的剥落<sup>[37]</sup>。

### 3.2.2 断裂力学计算法

目前,断裂力学的理论和方法被广泛应用于 APU 热障涂层裂纹萌生和扩展研究中。由于热障涂层特殊的制备工艺,以及 APU 部件严苛的工作环境,因此 APU 热障涂层的金属黏结层和陶瓷面层都会表现为多孔结构,并存在大量微裂纹。这些微观的孔隙和裂纹具有一定程度的断裂力学特征,采用断裂力学的理论与方法对 APU 热障涂层进行性能表征和失效分析是一条切实可行的路径。王铁军等<sup>[38]</sup>通过对涂层断裂的力学研究发现,当热障涂层的应变能释放率大于其自身的断裂韧性时,涂层会产生断裂失效。同时受 APU 热端部件构型的影响,TBCs 陶瓷层的断裂韧性受到 I 型 (张开型) / II 型 (剪切型) 裂纹混合程度和曲率半径的共同作用,表现出各向异性,裂纹长度也受到一定影响。Wang 等<sup>[39]</sup>和 Eriksson 等<sup>[40]</sup>对受热载荷影响的热障涂层进行了研究,通过试样中裂纹的产生位置、生成长度、扩展方向对涂层的能量释放率、应力分布和强度因子进行了表征,发现陶瓷层断裂力学的各值受不同工艺的影响较大。以上学者的研究均基于断裂力学,针对静态裂纹扩展问题提出了解决方案。这些研究首先需提前制备适当长度的裂纹,为保证计算的准确性,还需在裂纹尖端对网格进行细化。当裂纹扩展时,还需要重新对网格进行划分,使工作量大大增加,这一问题通过下述有限元建模法得到了有效的解决。

### 3.2.3 有限元建模法

有限元建模仿真软件的快速发展对于热障涂层界面性能与内应力的研究产生了巨大的推动作用,其研究内容包括 TGO 生长速率的建模、涂层微观层面应力分布、基于 TGO 生长和内应力累积所产生的涂层失效,以及针对热障涂层受蠕变、疲劳等非线性特

性的作用所导致的失效的模拟计算。随着以上有限元方法的不断完善,在提高准确性的同时对相应试验结果的验证也起到了巨大的作用<sup>[41]</sup>。

Jiang 等<sup>[42]</sup>借助有限元分析方法分别对涂层的界面处裂纹和陶瓷层内裂纹的萌生和扩展进行了研究,发现涂层界面形貌和氧化层厚度是影响涂层内裂纹萌生位置和扩展速率的主要因素。这一结论也验证了采用 4.2.1 所述微观结构观察法时需重点关注金属黏结层的氧化程度和 TGO 生长厚度变化的正确性。Lu 等<sup>[43]</sup>和 Kyaw 等<sup>[44]</sup>利用扩展有限元法对涂层受拉伸载荷时内部裂纹的萌生、演化规律等进行了分析,进而得到最终的失效模式。

## 4 基于热障涂层的 APU 维护方法

### 4.1 APU 性能状态监控

正常情况下,APU 在空中并不启动 (仅在空中主发失效情况下,才会启动 APU,以使用备份电源和再启动主发动机),因此航空公司对 APU 的关注度普遍较低。工程管理方面通常为机队中管理发动机的工程师兼职管理 APU,仅部分拥有大机队的航空公司设置了专职的 APU 管理工程师。即便是专职的工程师,也很少对 APU 进行主动管理干预,通常只有当 APU 出现故障或有系统报警时,才会开展排查工作。

机队管理工程师对 APU 性能变化趋势的监控能够提前获取很多 APU 运行的关键信息,进而主动进行维护干预,能够有效地延长 APU 热端部件的使用寿命,进而延长 APU 的整机在翼使用时间,提高其可靠性<sup>[44]</sup>。

某公司机队 APU 的排气温度 (EGT) 观测数据见图 9。经对比趋势发现,有 APU 的 EGT 上升趋势异常 (如图 9 中右下角所示,出现了不正常的温度增长趋势),后续进行孔探检查后发现涡轮叶尖有不同程度的材料缺失 (如图 10 所示)。这些材料缺失是由于 APU 涡轮叶片热障涂层剥落、烧结后基体材料直接暴露在高温环境中造成的基体烧蚀或烧穿。出现以

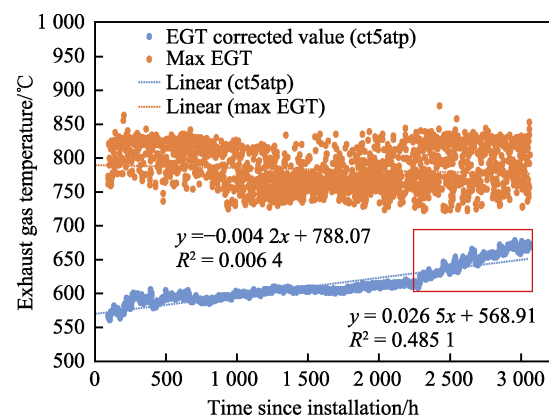


图 9 APU 排气温度趋势  
Fig.9 APU EGT trend chart



图 10 进场分解后发现的涡轮叶尖损伤情况  
Fig.10 Damage to turbine blade tip found after approach and decomposition

上情况,需及时对 APU 进行拆发修理或直接换发(更换 APU),避免出现更为严重的损伤和不经济修理的情况发生。

同时需要注意 APU 起动系统的起动曲线(见图 11),当 APU 的转速为最大转速的 20%~30%时,EGT 达到峰值,之后随着转速的增高,EGT 逐渐下降;当 APU 转速达到最大时,EGT 值趋于稳定。后续在运行过程中,当 APU 处于不同工况时,EGT 会不同程度地增高,但整个 APU 运行过程中,峰值出现在起动加速过程中,因此可以判断 APU 热端部件上热障涂层的短时最恶劣工况处于转速为最大转速的 20%~30%的工作状态。为了保证热障涂层的结构和性能完整性,进而提高 APU 的使用寿命,必须要尽量避免长期停留在转速为最大转速的 20%~30%时期。另外,在维护过程中对起动热悬挂的故障,或起动时间长、加速慢的故障要额外关注,并及时排查<sup>[45]</sup>。在实际工作中可通过报文中的运行数据来获取这部分信息,如通过 A320 的 ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System, 飞机通信寻址与报告系统)报文 13 中提供的起动 APU 时间和起动 APU 峰值 EGT 的读数来进行监控。当外界进气环境不同时,会导致起动时间有一定差异。通常在 APU 性能良好情况下, A320 飞机 APU 的起动时间应不超过 60 s,其性能衰退后,起动时间会延长,起动时间超过 90 s 就应对其进行关注,并视情况进行排故工作,

如更换起动机、检查飞机起电瓶电量、预防性更换或清洗副喷嘴等措施。这些都有助于减少短时高热冲击对 APU 热端部件热障涂层的热冲击和烧蚀损伤<sup>[46-47]</sup>。

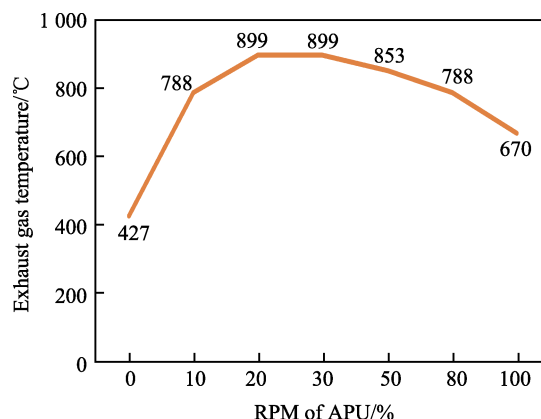


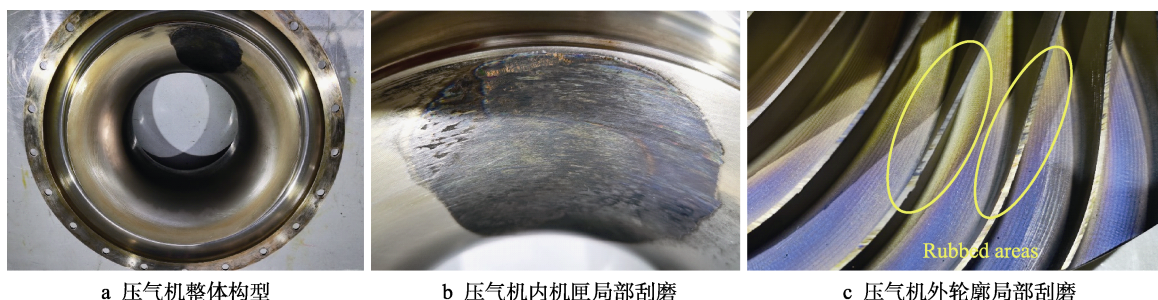
图 11 某型 APU 起动过程中 EGT 保护性关断温度  
Fig.11 EGT protective shutdown temperature during starting of a certain type of APU

## 4.2 APU 运行与维护注意事项

在飞机 APU 的运行过程中,需注意必要时提示一些 APU 的使用细节注意事项。如关闭 APU 时,若 APU 刚刚卸载引气或发电负载后,应在无负载状态下运转 1~2 min 以上后再关断 APU,使 APU 热端冷却,有助于解决停车过程和再次短时起动过程中的热端间隙控制问题,减少转动部件(如涡轮叶尖、压气机外轮廓)与其配合面的刮磨问题。此外,在 APU 停车后应严格遵守再次允许起动时间间隔的限制,避免在热起动过程中过高的温度对热端部件造成损伤等<sup>[48]</sup>。

在进场修理的 APU 中,常存在因热起动造成 APU 不同程度的损伤情况,如压气机段的刮磨问题(见图 12)、涡轮叶片后缘材料的缺失现象等。这些都在一定程度上缩短了 APU 的寿命,特别是涡轮叶片的材料缺失会导致很多短期拆发案例情况的出现<sup>[49]</sup>。

对于长期在环境恶劣地区运行的 APU,应视情况定期清洗或更换副燃油喷嘴。副燃油喷嘴工作示意图见图 13,在 APU 起动过程中优先供油副燃油喷嘴,



a 压气机整体构型

b 压气机内机匣局部刮磨

c 压气机外轮廓局部刮磨

图 12 在热起动情况下压气机机匣的刮磨

Fig.12 Scraping and grinding of the compressor casing under the hot start condition: a) overall configuration of compressor; b) local abrasion in compressor inner casing; c) local abrasion in compressor outer contour



当供油燃油压差达到一定值时,主喷嘴才进入供油模式。使用一段时间后,副喷嘴的积碳、喷头堵塞等情况都会影响 APU 加速过程的供油,导致启动加速性能变差,启动时间变长,热端部件处于峰值 EGT 时间变长,长期处于这样的高温条件下工作会使 APU 的热障涂层性能下降<sup>[50]</sup>。由此可见,应视情况定期清洗或更换副燃油喷嘴,以保证 APU 工作的状态良好<sup>[51-52]</sup>。

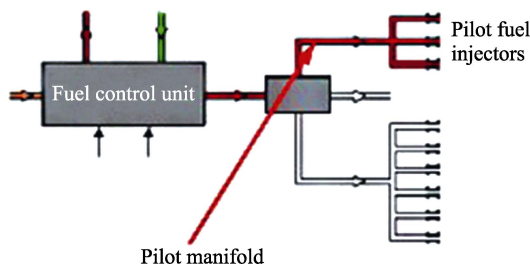


图 13 副燃油喷嘴工作示意图  
Fig. 13 Working schematic diagram of auxiliary fuel nozzle

对于在严酷环境地区运行的 APU,应结合性能变化情况进行航线水洗工作。对于在严酷地区运行的 APU,如我国新疆地区的 E190 型号飞机的 APU,生产厂家提供了航线在翼水洗 APU 压气机段的指导。通过水洗压气机部分,可以清洁气路,清除附着在压气机外轮廓的空气杂质,在一定程度上提高压气机效率,有效避免 APU 热障涂层因高温受热时间过长导致的涂层失效,对 APU 裕度的恢复有一定的效果(如图 14 所示)。

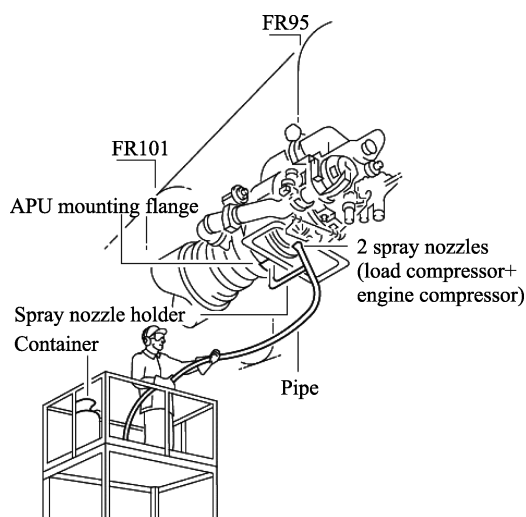


图 14 航线水洗 APU 压气机叶轮示意图  
Fig.14 Schematic diagram of line washing APU compressor impeller

## 5 结语

APU 作为现代飞机重要的辅助动力装置,承担着保障飞机闲时供电、引气,以及改善主发动机性能

的作用。作为 APU 热端部件“保护伞”的热障涂层,则起到保护热端部件、减少油耗,从而提升 APU 使用寿命及使用性能的作用。长时间在高温环境下服役,受到长期循环热载荷作用,APU 上的热障涂层会出现多种(诸如高温氧化、烧结)CMAS 腐蚀形式的失效。这些形式的失效最终均会导致陶瓷面层内部以及与金属黏结层界面处发生开裂现象,极易引起陶瓷层剥落,从而造成涂层整体失效。由此,在使用过程中对 APU 表面热障涂层状态进行监控显得至关重要。

未来,基于热障涂层方向的 APU 防护应开展主动的维护干预工作。通过对 APU 性能变化趋势的监控和分析,提前获取 APU 表面热障涂层的使用状态等信息,从而制定有效的维修方案,以延长 APU 热端部件的使用寿命。除此之外,机务维修人员了解 APU 使用细节对提升 APU 使用寿命也极为关键。在实际使用过程中,维修人员应根据 APU 在不同地区的运行情况,结合文中给出的相关机队维修方面的建议做出一定调整,以保证 APU 处于良好的工作状态。

同时,应继续深入研究热端部件热障涂层的失效机理,完善在 APU 使用过程中需要采取的预防措施,提高 APU 维修水平。这一系列的工作能够有效提高 APU 的可靠性和维修经济性,从而延长发动机部件的寿命。

## 参考文献:

- [1] 顾洲. APU 控制系统的设计与实现[J]. 制造业自动化, 2007, 29(10): 50-53.  
GU Zhou. Design and Implementation of APU Control System[J]. Manufacturing Automation, 2007, 29(10): 50-53.
- [2] ANGHEL C. A Novel Start System for an Aircraft Auxiliary Power Unit[C]// 35th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference and Exhibit (IECEC), 2000: 7-11.
- [3] GORINEVSKY D, DITTMAR K, MYLARASWAMY D, et al. Model-Based Diagnostics for an Aircraft Auxiliary Power Unit[C]// Proceedings of the International Conference on Control Applications. Glasgow, 2002: 215-220.
- [4] 严春晨, 朱珈驹, 李传鹏. APU 风车启动中压气机特性计算与分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2021, 53(3): 435-441.  
YAN Chun-chen, ZHU Jia-ju, LI Chuan-peng. Numerical Analysis of a Centrifugal Compressor in APU Windmill [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(3): 435-441.
- [5] 黄国平, 梁德旺, 何志强. 大型飞机辅助动力装置与微型涡轮增压发动机技术特点对比[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 383-388.  
HUANG Guo-ping, LIANG De-wang, HE Zhi-qiang. Comparison of Technical Characteristics of APU and Micro



- Turbine Engines for Large Aircraft[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 383-388.
- [6] 周飞. 波音 787 飞机 ASG 在 APU 上的应用[J]. 航空维修与工程, 2021(1): 43-45.  
ZHOU Fei. The Application of ASG on the APU for B787[J]. Aviation Maintenance & Engineering, 2021(1): 43-45.
- [7] The Boeing Company. Aircraft Auxiliary Power Unit (APU) Control System Having Speed Compensation[N]. Defense & Aerospace Week, 2020(2).
- [8] 常博博, 苏三买, 刘铁庚, 等. 辅助动力装置建模及数值仿真[J]. 航空动力学报, 2011, 26(9): 2122-2127.  
CHANG Bo-bo, SU San-mai, LIU Tie-geng, et al. Model and Numerical Simulation of Auxiliary Power Unit[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(9): 2122-2127.
- [9] CAO X Q, VASSEN R, STOEVEVER D. Ceramic Materials for Thermal Barrier Coatings[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2004, 24(1): 1-10.
- [10] NAUMENKO D, PILLAI R, CHYRKIN A, et al. Overview on Recent Developments of Bondcoats for Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26(8): 1743-1757.
- [11] LIU Yan-kuan, LIU Ying-hui, LOURS P, et al. Influence of Isothermal Aging Conditions on APS TBC'S Interfacial Fracture Toughness[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 313: 417-424.
- [12] 刘连胜, 张晗星, 刘晓磊, 等. 面向飞机辅助动力装置在翼剩余寿命预测的性能参数扩增方法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(7): 107-116.  
LIU Lian-sheng, ZHANG Han-xing, LIU Xiao-lei, et al. Performance Parameter Augment Method for On-Wing Remaining Useful Life Prediction of Aircraft Auxiliary Power Unit[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(7): 107-116.
- [13] JACKSON R D, TAYLOR M P, EVANS H E, et al. Oxidation Study of an EB-PVD MCrAlY Thermal Barrier Coating System[J]. Oxidation of Metals, 2011, 76(3): 259-271.
- [14] JOHHARI A D, RAHMAN M M. A Review of Advance Thermal Barrier Coating Architecture[C]// The 3rd National Graduate Conference (Nat Grad 2015). Malaysia: University Tenaga Nasional, Putrajaya Campus, 2015.
- [15] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal Barrier Coatings for Gas-Turbine Engine Applications[J]. Science, 2002, 296(5566): 280-284.
- [16] 宋佳楠, 李少林, 齐红宇, 等. 热障涂层失效行为与寿命预测研究进展[J]. 航空制造技术, 2019, 62(3): 34-40.  
SONG Jia-nan, LI Shao-lin, QI Hong-yu, et al. Research on Failure Behavior and Life Prediction of Thermal Barrier Coatings[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(3): 34-40.
- [17] 杨宏波, 刘朝辉, 丁逸栋, 等. 热障涂层的制备工艺及研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2017, 36(14): 786-791.  
YANG Hong-bo, LIU Zhao-hui, DING Yi-dong, et al. Preparation Technologies and Research Progress of Thermal Barrier Coatings[J]. Electroplating & Finishing, 2017, 36(14): 786-791.
- [18] 彭徽, 郭洪波, 宫声凯, 等. 等离子体辅助电子束物理气相沉积制备热防护涂层[J]. 航空制造技术, 2016, 59(21): 98-104.  
PENG Hui, GUO Hong-bo, GONG Sheng-kai, et al. Thermal Protective Coatings Fabricated by Plasma Assisted Electron Beam-Physical Vapor Deposition[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(21): 98-104.
- [19] 钟颖虹, 陆辛, 计亚平, 等. 等离子喷涂梯度热障涂层的抗热震性能[J]. 金属热处理, 2015, 40(7): 176-179.  
ZHONG Ying-hong, LU Xin, JI Ya-ping, et al. Thermal Shock Resistance of Gradient Thermal Barrier Coating Prepared by Atmospheric Plasma Spraying[J]. Heat Treatment of Metals, 2015, 40(7): 176-179.
- [20] JIANG Peng, FAN Xue-ling, SUN Yong-le, et al. Competition Mechanism of Interfacial Cracks in Thermal Barrier Coating System[J]. Materials & Design, 2017, 132: 559-566.
- [21] NICHOLLS J R, LAWSON K J, JOHNSTONE A, et al. Methods to Reduce the Thermal Conductivity of EB-PVD TBCS[J]. Surface and Coatings Technology, 2002, 151/152: 383-391.
- [22] 赵荻, 安宇龙, 赵晓琴, 等. 不同厚度 8YSZ 热障涂层的结构及性能表征[J]. 表面技术, 2020, 49(1): 276-284.  
ZHAO Di, AN Yu-long, ZHAO Xiao-qin, et al. Structure and Properties of 8YSZ Thermal Barrier Coatings with Different Thickness[J]. Surface Technology, 2020, 49(1): 276-284.
- [23] 吴涛, 朱流, 郦剑, 等. 热喷涂技术现状与发展[J]. 国外金属热处理, 2005, 26(4): 2-6.  
WU Tao, ZHU Liu, LI Jian, et al. Present Situation and Development of Thermal Spraying Technology[J]. Heat Treatment of Metals Abroad, 2005, 26(4): 2-6.
- [24] 王莉莉, 王伟, 谭世磊, 等. 热障涂层制备方法的研究[J]. 热加工工艺, 2016, 45(18): 15-18.  
WANG Li-li, WANG Wei, TAN Shi-lei, et al. Research on Preparation Methods of Thermal Barrier Coatings[J]. Hot Working Technology, 2016, 45(18): 15-18.
- [25] 刘景顺, 曾岗, 李明伟, 等. 电子束物理气相沉积 (EB-PVD) 技术研究及应用进展[J]. 材料导报, 2007, 21(S3): 246-248.  
LIU Jing-shun, ZENG Gang, LI Ming-wei, et al. The Research and Application Evolvement of Electron Beam-Physical Vapor Deposition Technology[J]. Materials Review, 2007, 21(S3): 246-248.
- [26] 陈振中, 王航超, 王璐璐, 等. 基于威布尔分布的 APU 二级涡轮叶片可靠性分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2018, 35(5): 23-28.  
CHEN Zhen-zhong, WANG Hang-chao, WANG Lu-lu, et al. Reliability Analysis of the Second Stage Turbine Blade in APU Based on Weibull Distribution[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2018, 35(5): 23-28.

- [27] TILMANN B, OLENA T, ROLAND H, et al. TBCs for Gas Turbines under Thermomechanical Loadings: Failure Behaviour and Life Prediction[J]. *Journal of Energy and Power Engineering*, 2013(4): 647-653.
- [28] 付伟, 黄国胜, 程旭东, 等. NiAl/NiCoCrAlY/8YSZ 复合喷涂层的微观结构与性能研究[J]. *表面技术*, 2019, 48(4): 61-67.  
FU Wei, HUANG Guo-sheng, CHENG Xu-dong, et al. Microstructure and Properties of NiAl/NiCoCrAlY/8YSZ Composite Coatings[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(4): 61-67.
- [29] 朱晨, 于建海, 郭亚飞, 等. 航空发动机热障涂层存在的问题及其发展方向[J]. *表面技术*, 2016, 45(1): 13-19.  
ZHU Chen, YU Jian-hai, GUO Ya-fei, et al. Problems of Aircraft Engine Thermal Barrier Coating and Its Developing Direction[J]. *Surface Technology*, 2016, 45(1): 13-19.
- [30] ALI I, GRUND T, LAMPKE T D, et al. TGO Formation and Failure Mode of TBC Systems Comprising PVD-Al interlayers [C]// *Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, 2015.
- [31] 王志平, 费宇杰, 刘延宽. 热障涂层失效机理、改进方法及未来发展方向[J]. *表面技术*, 2021, 50(7): 126-137.  
WANG Zhi-ping, FEI Yu-jie, LIU Yan-kuan. Failure Mechanism, Improvement Method and Future Development Direction of Thermal Barrier Coatings[J]. *Surface Technology*, 2021, 50(7): 126-137.
- [32] RENUSCH D, SCHORR M, SCHÜTZE M. The Role that Bond Coat Depletion of Aluminum Has on the Lifetime of APS-TBC under Oxidizing Conditions[J]. *Materials and Corrosion*, 2008, 59(7): 547-555.
- [33] 刘延宽, 许婧, 李尧, 等.  $\text{Eu}^{3+}$  掺杂对 YSZ 热障涂层隔热性能与涂层界面断裂韧性的影响研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2021, 50(5): 1699-1705.  
LIU Yan-kuan, XU Jing, LI Yao, et al. Effect of  $\text{Eu}^{3+}$  Doping on Thermal Insulation Property and Interfacial Fracture Toughness of YSZ Thermal Barrier Coatings[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2021, 50(5): 1699-1705.
- [34] 周思博, 吴敬涛, 邓文亮, 等. EB-PVD 热障涂层系统界面应力的理论分析[J]. *表面技术*, 2020, 49(3): 189-198.  
ZHOU Si-bo, WU Jing-tao, DENG Wen-liang, et al. Analytic Research on Interface Stress of EB-PVD Thermal Barrier Coatings[J]. *Surface Technology*, 2020, 49(3): 189-198.
- [35] 沈文雁, 霍晓, 张建苏, 等. EB-PVD 热障涂层的失效行为研究[J]. *材料工程*, 1998, 26(6): 35-37.  
SHEN Wen-yan, HUO Xiao, ZHANG Jian-su, et al. The Failure Behavior of EB-PVD Thermal Barrier Coatings [J]. *Journal of Materials Engineering*, 1998, 26(6): 35-37.
- [36] GOLEWSKI P, SADOWSKI T. The Influence of TBC Aging on Crack Propagation Due to Foreign Object Impact [J]. *Materials (Basel, Switzerland)*, 2019, 12(9): 1488.
- [37] MOHAMED H. Finite Element Analysis (FEA) Implementation of Thermal Barrier Coating (TBC) Lifetime Prediction Methods[D]. Pittsburgh: University of Pittsburgh, 2013: 30-35.
- [38] 王铁军, 范学领, 孙永乐, 等. 重型燃气轮机高温透平叶片热障涂层系统中的应力和裂纹问题研究进展[J]. *固体力学学报*, 2016, 37(6): 477-517.  
WANG Tie-jun, FAN Xue-ling, SUN Yong-le, et al. The Stresses and Cracks in Thermal Barrier Coating System: A Review[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2016, 37(6): 477-517.
- [39] WANG L, YANG J S, NI J X, et al. Influence of Cracks in APS-TBCS on Stress around TGO during Thermal Cycling: A Numerical Simulation Study[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 285: 98-112.
- [40] ERIKSSON R, SJÖSTRÖM S, BRODIN H, et al. TBC Bond Coat-Top Coat Interface Roughness: Influence on Fatigue Life and Modelling Aspects[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 236: 230-238.
- [41] 徐惠彬, 宫声凯, 陈立强, 等. 热、力耦合作用下热障涂层的失效机制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004, 30(10): 919-924.  
XU Hui-bin, GONG Sheng-kai, CHEN Li-qiang, et al. Failure Process of Thermal Barrier Coatings under Thermal and Mechanical Loading[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2004, 30(10): 919-924.
- [42] JIANG Ji-shen, WANG Wei-zhe, ZHAO Xiao-feng, et al. Numerical Analyses of the Residual Stress and Top Coat Cracking Behavior in Thermal Barrier Coatings under Cyclic Thermal Loading[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2018, 196: 191-205.
- [43] LU P, XIAO X, CHOU Y K. Interface Delamination Study of Diamond-Coated Carbide Tools Considering Coating Fractures[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 260: 239-245.
- [44] KYAW S T, JONES I A, HYDE T H. Simulation of Failure of Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating Due to Interfacial and Bulk Cracks Using Surface-Based Cohesive Interaction and Extended Finite Element Method[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2016, 51(2): 132-143.
- [45] 赵振可. 辅助动力装置的健康管理研究[J]. *装备制造技术*, 2016(5): 184-185.  
ZHAO Zhen-ke. Auxiliary Power Unit Health Management Study[J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2016(5): 184-185.
- [46] 王冰, 赵鑫, 王璐璐. 遗传算法在更换 APU 涡轮叶片工艺中的应用[J]. *航空维修与工程*, 2020(9): 68-71.  
WANG Bing, ZHAO Xin, WANG Lu-lu. Application of Genetic Algorithms in the Process of Replacing APU Turbine Blades[J]. *Aviation Maintenance & Engineering*, 2020(9): 68-71.