材料研究与应用 2022,16(1):19-28 Materials Research and Application

文章编号:1673-9981(2022)01-0019-10

# 使役环境涡轮叶片 EB-PVD 热障涂层失效机制

邓畅光,张小锋\*,邓春明,毛杰,况敏\*

(广东省科学院新材料研究所,现代材料表面工程技术国家工程实验室,广东省现代表面工程技术重点实验室,广东广州 510650)



摘 要:运用场发射扫描电镜、能量色散光谱仪和金相显微镜等测试表征手段,详细检查退役高温 发动机涡轮叶片表面涂层残存状况,发现带气膜孔的高温发动机涡轮叶片经服役2000h后,表面各 部位EB-PVD涂层承受CMAS攻击、硬质物撞击和冷热应力冲击程度各异,导致退役叶片表面共存 多种损伤.通过对这些损伤现象的分析,了解使役环境下叶片各部位的失效模式和失效机理.研 究结果表明:叶棱为受CMAS攻击最严重处,同时也是受硬质点撞击最密集处,存在大面积涂层脱 落;气膜孔周围的TBCs涂层受CMAS攻击发生本质性固化,受交变热应力和机械应力共同作用而呈规律

性脱落;叶棱周围气膜孔表面(无论是叶背或是叶盆)均存在硬质物碾压划过叶片表面而压实CMAS,引起表面TBCs脱落的现象,同时在气膜孔内发现飞落的TBCs柱和CMAS块,从侧面反应对叶片表面造成实质性伤害的硬质物可能为脱落的TBCs柱或固化的CMAS块.

关键词:发动机涡轮叶片;CMAS腐蚀;侵蚀;EB-PVD涂层;柱状结构中图分类号:TG174.451文献标志码:A

**引文格式:**邓畅光,张小锋,邓春明,等. 使役环境涡轮叶片EB-PVD热障涂层失效机制[J]. 材料研究与应用,2022,16(1): 19-28.

DENG Canguang, ZHANG Xiaofeng, DENG Chunming, et al. Failure Mechanism of EB-PVD Thermal Barrier Coating on Turbine Blades in Service Environment[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(1):19-28.

热障涂层(TBCs)是先进航空涡轮发动机、船 用/发电燃机中必不可少的关键材料,热障涂层对 于提高发动机性能、工作稳定性和服役寿命起到至 关重要的作用.经历数十年的发展,YSZ热障涂层 体系基本成熟,其以第三代高温涂层(MCrAlY)作 为粘结层、第四代陶瓷热障涂层(ZrO<sub>2</sub>涂层)作为面 层,是目前使用最广的高温热障涂层体系.采用电 子束物理气相沉积(EB-PVD)技术制备的TBCs的 组织呈柱状结构,因具有柱间孔隙,因此拥有优异 的结合性能、应变容限大、抗热震性能强及热循环 寿命长等优点,是目前应用最广泛的航空发动机热 障涂层<sup>[1-2]</sup>.

航空发动机热端部件的热障涂层服役环境恶 劣,涡轮叶片表面承受着高温氧化、高温CMAS (CaO,MgO,Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,SiO<sub>2</sub>)腐蚀、外来硬质点粒子侵 蚀、气动应力、振动应力、离心应力及剧烈冷热循环 等严苛工作环境,涂层失效难免发生.国内外对热 障涂层失效进行了大量的研究,Wellman,Nicholls 等人是最先研究TBCs侵蚀机理的,他们详细研究 了由外来物损伤造成的严重侵蚀和近表面裂纹造 成的轻微侵蚀,随后Lars Steinberga, Ravisankar Naraparaju等人同时研究了侵蚀、腐蚀和侵蚀-腐蚀

收稿日期:2021-09-27

基金项目:广东省科学院建设国内一流科研机构行动专项资金项目(2021GDASYL-20210302005)

作者简介:邓畅光(1970-),男,硕士,教授级高级工程师,主要从事材料领域现代材料表面工程技术研究,主攻新型热喷涂技术,包括 EBPVD和PSPVD的形成机理及失效机理

通讯作者:张小锋(1985-),男,博士,高级工程师,从事航空发动机热障/环境障涂层研究 况敏(1963-),女,硕士,教授级高级工程师,从事金属材料表面与界面、金属材料失效分析等

协调作用的机理<sup>[3-28]</sup>,C. Mercer和 Guillaume Pujol 等人<sup>[29-30]</sup>详细研究了受CMAS 攻击的TBCs分层失 效机理和不同形状TBCs柱抵御CMAS 腐蚀的能 力. 至此,初步掌握了CMAS 和外来硬质点对 TBCs柱的侵蚀,以及CMAS 对TBCs柱侵蚀和腐 蚀侵蚀的综合影响的机理.

以往的研究单纯聚焦于TBCs羽状柱的CMAS 腐蚀情况,硬质点侵蚀对羽状柱造成的失效等,鲜见 对实际运行的飞机叶片在高温氧化、热腐蚀、磨损、 外来物冲击等多重因素的影响下热障涂层的失效行 为综合分析的报道,特别是带气膜孔的飞机叶片的 各部位因所受CMAS腐蚀、硬质点侵蚀、侵蚀腐蚀 交替作用、温度变化和气流变化等因素交互叠加作 用导致的失效.通过观察退役叶片表面典型状况, 厘清涂层受外来硬质点侵蚀、CMAS腐蚀和侵蚀腐 蚀交互作用等不同伤害因素对叶片特征部位损伤机 理和损伤权重,确定叶片在使役环境下的失效性质.

# 1 材料和方法

#### 1.1 材料

研究对象为服役后叶片,其基体为高温合金,表面覆盖采用电子束物理气相沉积法(EB-PVD)制备的ZrO<sub>2</sub>热障涂层(TBCs).EB-PVD制备涂层为柱状结构具有柱间孔隙,除具有优良的隔热性外还具有高的热容限性.CMAS广泛分布于大气中,通常以沙子、跑道碎屑和火山灰为特征,外还有空气中的尘埃,叶片服役时CMAS进入飞机发动机,这些硅

质颗粒对 TBCs 的侵蚀或热腐蚀将导致 TBCs 过早 失效.

# 1.2 方 法

针对使役叶片受损伤典型特征部位,如进气边 叶棱部位表面损伤及TBC柱脱落坑、叶盆表面及气 膜孔周围损伤、叶背表面及气膜孔周围损伤,利用 FEI NNS450扫描电镜观察叶片表面,利用EDAX Octane Plus EDS能量色散光谱仪分析叶片损伤表 面微区成分,确定CMAS损伤权重.利用LEICA 5000M金相显微镜和图像分析仪,分析叶片横截面 状况.

# 2 结果与讨论

#### 2.1 叶片表面及横截面

叶片为带气膜孔的空间异型构件,经正常运行 后表面整体呈砖红色,涂层剥落主要集中于进气边、 气膜孔附近区域(图1).其中叶盆表面全部呈砖红 色,靠叶尖部分颜色较靠基板部分深;叶背上存在一 个8mm×2mm的椭圆状剥落坑,剥落坑位于叶盆 叶背交界处,距叶尖约40mm,剥落坑颜色不一致, 靠叶片叶尖侧呈灰白金属色,靠叶片基板部分呈砖 红色;叶背进气面表面存在砖红、浅白色和铁灰色三 个区域,叶背进气面表面存在砖红、浅白色和铁灰色三 个区域,叶背进气边整体呈深砖红色,气膜孔出气孔 为条带状浅白色,叶背中部有两块背对背的弧形铁 灰色区域;叶尖表面整体呈砖红色加深青色,叶尖周 边露出剥离的陶瓷白色涂层.



图1叶片表面形貌图 (a)叶盆、气膜孔和脱落坑;(b)叶背和气膜孔;(c)叶尖

Fig. 1 The surface morphology of the blade(a) leaf pots, stoma holes and shedding pits; (b) leaf backs and stoma holes; (c) leaf tips

沿垂直叶片基板方向截取部分叶片,以平行于 基板面镶嵌,经研磨抛光后观察,叶片涂层表面存在 一层厚度为6~17 μm外来覆盖物,叶片涂层由覆盖 物层、EBPVD陶瓷层(柱状组织)和粘结层组成. 经能谱分析覆盖物层含Ca,Mg,Al和Si,由此可确 认,叶片表面最外层覆盖物为CMAS.涂层各层金 相组织见图2.



图2 叶片横截面金相组织图

Fig. 2 Metallographic of blade cross section

## 2.2 叶片进气边叶棱

2.2.1 进气边叶棱表面形貌

叶片进气边叶棱表面覆盖的 CMAS 层由直径 约 200~800 nm 的圆形颗粒组成,表面随机存在着疏 松、裂纹和凹坑;放大观察,疏松和裂纹为 CMAS 熔 融物点状或线状脱落后露出的稀疏的 TBCs 柱顶 端,凹坑为 TBCs 柱拔出后 CMAS 再次覆盖而显现 的凹陷;存在硬质点侧向压实疏松的 CMAS 颗粒并 留下条带状运动轨迹,所有 TBCs 柱拔出形成的独 立孔洞旁均存在机械擦痕,擦痕位于孔洞一侧或双 侧.具体形貌见图 3.



#### 图3 叶片进气边叶棱表面微观形貌图

(a)CMAS层表面形貌;(b)CMAS脱落后的形貌;(c)CMAS再次覆盖TBCs孔洞形成的凹陷;(d)CMAS表面存在的孔洞概况;(e)孔洞一侧的擦痕;(f)孔洞双侧的擦痕

#### Fig. 3 The micro-morphology of the surface of the blade inlet edge

(a) surface morphology of the CMAS layer; (b) the top of the TBCs column is exposed after the CMAS falls off; (c) CMAS covers the depression formed by the hole of the TBCs again; (d) overview of the holes existing on the surface of the CMAS; (e) wipe on the side of the hole marks; (f) scratches on both sides of the hole

此观察说明:新CMAS粘附于陈旧CMAS玻璃 上时为颗粒状,CMAS熔融物脱后露出的TBCs柱 是疏松的;叶片该部位受大量CMAS攻击前已存在 TBCs柱拔出,TBCs柱拔出或与硬质物碰撞摩擦 有关.

#### 2.2.2 叶棱上的脱落坑起始处

叶片进气边存在一个肉眼可见的脱落坑,是一 个约8mm×2mm的长条状凹坑,并包含4个气膜 孔(3个位于叶盆侧,1个位于叶背侧),凹坑距进气 边距叶尖约40mm;脱落坑靠基板侧为TBCs柱成 片折断区,折断区残存TBCs陶瓷柱顶端可见 CMAS覆盖,CMAS覆盖是不均匀的,远离脱落坑 处较厚,靠近脱落坑旁较薄,脱落坑由远及近是第次 减薄的;放大观察TBCs陶瓷柱顶端,新鲜断口上可 见TBCs陶瓷柱柱间裂隙.具体形貌见图4.

从残存 TBCS 陶瓷柱顶端 CMAS 覆盖厚度随

离脱落坑距离由远及近第次减薄的现象可知,硬质 点对脱落坑附近的撞击不止一次,叶片越靠近脱落 坑部位受硬质点撞击次数越多.因为同样气氛下 CMAS覆盖物厚度应该是一致的,TBCS柱是从底 至顶连续的柱子,顶端部分受硬质点冲击而脱落后 的残存部分将被CMAS沉积物覆盖,只有再次脱落 后露出新鲜的TBCs柱顶端又被CMAS覆盖,其厚 度才会薄于上一次.所以,从覆盖物第次减薄的现 象可以推测越靠近脱落坑位置的叶棱受外来硬质点 冲击越频繁.表明:(1)叶片脱落坑位置,是叶棱受 硬质物冲击的密集部位;(2)TBCs陶瓷柱柱间裂隙 证实,该位置(包括深度)受硬质物冲击冲击时未发 生CMAS渗透导致的TBCs本质固化.

### 2.2.3 叶棱上脱落坑底部及侧面

脱落坑底表面肉眼可分为两个区域,靠叶片基板侧呈红色,此区域包含叶盆内左一左二气膜孔范



图4 块状脱落坑四周一侧 TBCs 柱成片折断形貌图

(a)远离脱落坑的TBCs柱顶端厚的CMAS覆盖物;(b)折断TBCs柱形貌图;(c)近脱落坑处TBCs柱顶端薄的CMAS覆盖物 及柱内裂纹;(d)TBCs柱成片折断位置及分布

Fig. 4 Fracture morphology of the TBCs column on one side of the massive shedding pit (a) thick CMAS covering at the top of the TBCs column far from the shedding pit; (b) topography of the fractured TBCs column; (c) thin CMAS covering and intra-column cracks at the top of the TBCs column near the shedding pit; (d) TBCs the fracture position and distribution of the column into pieces

围),靠叶尖侧呈银白色,此区域包含叶盆内左二左 三与叶背气膜孔包含的范围.电镜观察,近基板侧 周围为TBCs折断区,表面由颗粒状物组成,能谱分 析含Ni,Mg,Al,Si,Ca和Cr等元素,说明该区域为 镍基高温合金基体上残存MCrAlY过渡层和陶瓷层 混合物组成.靠叶尖区域的表面呈蜂窝状,能谱分 析由 Ni和 Al组成,其基本为裸露的镍基高温合金 基体.从脱落坑侧面观察陶瓷柱可见从 MCrAlY 过 渡层根部到柱顶的完整形貌,以及可见 TBCS 柱与 基体分离线,此处叶片基体存在多处硬质点摩擦痕 迹.具体形貌见图 5.



#### 图5 脱落坑及坑内表面和侧面形貌图

(a)脱落坑表面(靠基板侧)低倍形貌图;(b)脱落坑表面(靠叶尖侧)低倍形貌图;(c)脱落坑侧面(靠叶尖侧)低倍形貌图;(d)脱落坑 表面(靠基板侧)底部高倍形貌图(残存颗粒状陶瓷层);(e)脱落坑靠叶尖侧底部高倍形貌图;(f)脱落坑侧面(靠叶尖侧)高倍形貌图

Fig. 5 The topography of the shedding pit and the inner surface and side of the pit(a) magnification topography of the surface of the shedding pit (on the side of the substrate); (b) magnification topography of the surface

of the shedding pit (side of the tip); (c) magnification of the side of the shedding pit (side of the tip) topography; (d) magnification topography of the bottom of the shedding pit surface (on the side of the substrate) (residual granular ceramic layer); (e) magnification topography of the bottom of the shedding pit on the tip side; (f) side of the shedding pit (but Leaf tip side) high magnification topography 以上观察表明:(1)脱落坑底 TBCs柱呈块状脱 落,由靠基板侧萌生向叶片叶尖侧蔓延并扩展的; (2)脱落坑存在 TBCs柱与过渡层的分离;(3)在裂 纹扩展过程中,存在 TBCs柱和过渡层呈撕裂状与 叶片基体分离;(4)TBCs柱呈块状脱落后,裸露的 叶片基体表面仍遭受硬质点冲击.

对叶棱表面的所有观察可知:(1)脱落坑为从靠 基板侧萌生,然后向叶尖侧方向扩展;(2)硬质点对 叶片进气边脱落坑旁的陶瓷柱数次撞击造成 TBCs 柱折断,并萌生了产生脱落坑的 TBCs柱与过渡层 间微裂纹;(3)块状 TBCs柱脱落后,裸露的叶片基 体仍遭受硬质点冲击;(4)叶片进气边脱落坑部位, 是受外来硬质点冲击密度最大的地方.

# 2.3 叶盆和叶盆内气膜孔

2.3.1 叶盆和叶盆内气膜孔周围涂层损伤

图 6 为气膜孔周围特征花纹图. 从图 6 可见,叶 盆表面 CMAS 呈波浪状分布,所有气膜孔周围均存

在围绕气膜孔的特征花纹.花纹有两种表现形式, 一是气膜孔外顺叶盆出气方向延伸的"慧尾状" CMAS 增厚花纹,二是环气膜孔四周 CMAS 脱落 纹. 第一种特征纹为半熔融态 CMAS 呈波浪状被 强力吹向顺叶盆表面气流流动方向,孔波浪状花纹 上间或可见挂于CMAS层上的大颗粒;第二种特征 纹多呈环形围绕于气膜孔左右侧,环形花纹内可见 疲劳条带,也可见CMAS脱落后露出的孔洞和 TBCS柱尖.这是由于:(1)CMAS严重攻击了叶盆 带气膜孔区域,使该区域TBCs柱尖降解为球形颗 粒:(2)叶片高温工作时,半熔融态球形颗粒呈受叶 片表面和气膜孔内气流综合作用吹向一侧形成特征 "慧尾"纹;(3)近气膜孔处CMAS渗透TBCs柱并 引起固化,固化深度由内及外呈递减趋势;(4)固化 层脱落在叶片表面留下环形花纹,固化层脱落时可 能受外界交变应力影响而留下疲劳条带.



#### 图6 气膜孔周围特征花纹图

(a)气膜孔四周增厚及顺气流方向的"慧尾"状花纹;(b)气膜孔四周增厚及顺气流方向的波浪状花纹;(c)气膜孔四周增厚层的 脱落;(d)气膜孔四周增厚层的脱落

## Fig. 6 Characteristic pattern around the air film hole

(a) the thickening around the air film hole and the "come tail" pattern along the airflow direction; (b) the thickening around the air film hole and the wavy pattern along the airflow direction; (c) the thickening layer around the air film hole shedding; (d) shedding of the thickened layer around the gas film hole

# 2.3.2 气膜孔内脱落物及周边形貌

图 7 为气膜孔内存在脱落后烧损的 TBCs 柱及 该孔四周的机械擦痕.从图 7 可见:第二排气膜孔 气道内存在脱落并被烧损的 TBCs 柱, TBCs 柱旁边 散落的大颗粒均为圆形;大颗粒为细小的球形颗粒 团聚而成,该气膜孔与叶盆交界表面 CMAS 层存在 大量硬质点擦伤痕迹. 由于一般 TBCs 柱不会单 个拔出的,通常呈7个以上的集束状拔出,所以气道 内存在单个的 TBCs 柱,很大可能是一束 TBCs 柱 掠过气膜孔,部分碰撞气膜孔旁 CMAS 留下大量机 械擦痕然后飞走了,其中一个跌落气膜孔遗留下来. 以上观察说明:(1)有的气膜孔四周存在的大量 机械擦痕,很大可能是脱落的TBCs柱造成的;(2) 气膜孔内存在的TBCs柱不一定来源于气膜孔内 部,有大可能是叶盆表面飞行的TBCs柱跌落后留 驻于此.



**图7** 气膜孔内存在脱落后烧损的TBCs柱及该孔四周的机械擦痕 (a)TBCs柱在气膜孔内的位置图;(b)TBCs柱低倍形貌图;(c)TBCs柱基周围散落的圆形颗粒;(d)气膜孔左侧的机械擦痕; (e)气膜孔上侧的机械擦痕;(f)气膜孔右侧的机械擦痕

**Fig. 7** The TBCs column burned off after falling off in the air film hole and the mechanical scratches around the hole (a) map of the TBCs column in the gas film hole; (b) low magnification topography of the TBCs column; (c) scattered round particles around the base of the TBCs column; (d) mechanical scratches on the left side of the gas film hole; (e) mechanical scratches on the upper side of the gas film hole; (f) mechanical scratches on the right side of the gas film hole

## 2.4 叶背及叶背内气膜孔

2.4.1 叶背表面气膜孔周围的情况

图 8 为叶背气膜孔四周 CMAS 形貌图. 从图 8 可见,叶背表面气膜孔均位于进气边附近,气膜孔四

周CMAS堆积层较厚,除顺气流方向存在"慧尾"状花纹外,第一排气膜孔四周存在条状CMAS脱落纹,有个气膜孔上近气膜孔位置存在疲劳辉纹,远离 气膜孔位置为稀疏的YSZ柱尖端.



#### 图8 叶背气膜孔四周CMAS形貌图

(a)气膜孔四周的CMAS环形堆积、慧尾状花纹堆积;(b)气膜孔四周CMAS脱落后留下的环状花纹;(c)CMAS脱落后留下的条状花纹;(d)CMAS脱落后留下的条状花纹;(e)CMAS脱落后留下的疲劳辉纹

#### Fig. 8 Morphology of CMAS around the air film hole on the back of the leaf

(a) CMAS annular accumulation and coma-like pattern accumulation around the air film hole; (b) the annular pattern left after the CMAS fell off around the air film hole; (c) the striped pattern left after the CMAS fell off; (d) stripe pattern left after CMAS fell off; (e) fatigue streak left after CMAS fell off

25

气膜孔附近的叶片表面出现疲劳辉纹,说明: (1)此处CMAS渗透已经引起该区域本质上固化, 应变容限丧失,导热率降低,这是因为TBCS的形态 和结构,使CMAS可以通过毛细作用被吸入所有开 放的孔中,如果渗入层较厚,当温度降低时,CMAS 冷却并凝固,导致渗透区域形成高模量的本质上固 化<sup>[11]</sup>;(2)较厚的高模量本质固化区域内部微裂纹 在受外界交变应力作用发生扩展,留下疲劳辉纹,而 叶片服役中的外界交变应力就是其速度改变的机械 应力和高低温循环的热应力,故疲劳辉纹由机械应 力或热循环应力导致;(3)气膜孔周围有的位置 CMAS固化不完全彻底,留下稀疏的疲劳条带;(4) 远离气膜孔位置TBCs内部虽有CAMS渗透但没 有发生本质性上固化,CMAS剥离时仅去除了固化 的自身,留下了TBCs尖端;(5)气膜孔周围CMAS 脱落呈环状剥落,也证实CMAS固化程度由气膜孔 四周向外是递减的.

2.4.2 大块硬质物摩擦轨道

图 9 为叶背进气边表面气膜孔周围硬物碾压摩 擦形貌图.从图 9 可见:第二、三排气膜孔间存在一 条较长的终止于第二排气膜孔的大块硬物碾压摩擦 轨道,轨道长约 2.8 mm、宽约 100 μm,硬物运动轨 道上可见硬物碾压摩擦痕和 TBCs柱断续状成束拔 出的孔洞、垂直于运动轨道的裂缝,其中近终止处的 拔出孔洞较多,远离终止处的碾压摩擦痕较多;碾压 摩擦痕为数硬质点同时摩擦留下的犁沟,从拔出孔 洞往 TBCS柱内观察可看到,暴露的 TBCS 柱表面 呈颗粒状和穿晶断裂状,柱上横、纵向裂纹止于柱 内,未越过晶界向旁柱扩展,柱侧表面再次覆盖了薄 层CMAS熔融物.



#### 图9 叶背进气边表面气膜孔周围硬物碾压摩擦形貌图

(a)碾压摩擦轨道宏观形貌图;(b)碾压摩擦轨道终止于第二排一气膜孔;(c)碾压摩擦轨道近起始处;(d)碾压摩擦轨道近终止 处;(e)轨道上的裂纹和犁沟;(f)孔洞内YSZ柱表面的球状颗粒、柱上裂纹、穿晶断裂表面和薄的CMAS覆盖层

**Fig. 9** Topography of rolling friction of hard objects around the air film holes on the air inlet edge of the blade back (a) macro topography of the rolling friction track; (b) the rolling friction track ends at the second row of a gas film hole; (c) the rolling friction track is near the beginning; (d) the rolling friction track is near the end; (e) cracks and furrows on the track; (f) spherical particles on the surface of the YSZ column inside the hole, cracks on the column, transgranular fracture surface and thin CMAS overlay

以上观察可知:(1)碾压摩擦轨道只有一条,说明是一大块硬质物同时所为,由轨道宽度大致可以 推测硬质物有100µm左右;(2)硬质物碾压摩擦 CMAS表面留下数条平行状犁沟,可以推测硬质物 由数颗粒组成;(3)由孔洞观察到的TBCs侧面颗粒 状,说明TBCs柱拔出前已受CMAS攻击;(4)穿晶 裂纹说明发生了TBCs柱发生了柱内断裂;(5)横向 裂纹未贯穿至旁柱,可以知道残留区域未发生 CMAS本质固化;(6)洞侧再次覆盖CMAS薄层说 明TBCs柱拔出后再次受到CMAS攻击.

2.4.3 气膜孔内发现的块状 CMAS 脱落物

图 10 为硬质物终止处的气膜孔表面形貌图. 从图 10 可见,硬质物摩擦轨道终止处的气膜孔周围,叶片与气膜孔交界区域约 1/4 受硬质物碾压,其 余部分几乎全部脱落,露出TBCs柱顶端.该气膜 孔内发现数块CMAS脱落块,最大的两块中,靠近 孔内侧的表面稍光滑,呈半熔融态,旁边还有数颗圆 形熔融物;靠近孔外侧的表面可见犁沟.

以上观察说明:(1)气膜孔周围 TBCs 已受

CMAS攻击,但未发生本质性固化;(2)气膜孔周边 CMAS层脱落与硬质点碰撞有关;(3)碰撞碾压叶 片表面 CMAS层的硬质物可能是脱落的结晶 CMAS块;(4)气道内残留硬质状 CMAS脱落物可 能非同时留驻.



图 10 硬质物终止处的气膜孔表面形貌图

(a)气膜孔四周的表面形貌;(b)气膜孔外侧的脱落CMAS;(c)气膜孔外侧的脱落CMAS;(d)气膜孔被碾压区域

Fig. 10 Surface topography of air film pores at the end of hard material

(a) surface topography around the air film hole; (b) the detached CMAS outside the air film hole; (c) the exfoliated CMAS outside the air film hole; (d) the rolled area of the air film hole

# 3 结 论

通过观察叶片进气边叶棱处表面受CMAS 攻 击和硬质点侵蚀划伤形貌、进气边叶棱中部脱落坑 周围、坑底和残存 TBCs 表面及侧面形貌,观察叶盆 上气膜孔周边共性形貌、损伤严重处特征形貌和气 膜孔内残留物,观察叶背上气膜孔周边共性形貌、损 伤最严重气膜孔周围特征形貌和气膜孔内残留物, 可以得出以下结论.

(1)服役叶片表面全面遭受CMAS攻击,发生 渗透.

(2)叶片进气边叶棱中部是叶片服役过程中承 受硬质物冲击最密集的部位,叶片进气边叶棱中部 的脱落坑是该处 TBCs 未发生本质性 CMAS 渗透 固化,其脱落性质属于外来物侵蚀.

(3)叶片进气边叶棱、叶背及其上气膜孔是受

CMAS攻击严重最部位,叶片服役过程中承受最大 热应力和化学腐蚀,而叶盆内气膜孔次之.

(4) 靠叶棱的气膜孔,无论叶背或叶盆,因受 CMAS攻击渗透后发生本质性固化,应变容限降低,是承受机械应力和热交变应力最薄弱部位.

(5)冲击 CMAS 覆盖层的硬质物不一定来自于 外来环境中的 CMAS 粉尘,有可能为脱落的 TBCs 柱或块状 CMAS.

## 参考文献:

- SCHULZ U, LEYENS C. Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings[J]. Aerospace Science & Technology, 2003, 7 (1):73-80.
- [2] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications [J]. Science, 2002, 296 :280-284.
- [3] WELLMAN R G, NICHOLLS J R. A review of the

- [4] WELLMAN R G, NICHOLLS J R. On the effect of ageing on the erosion of EB-PVD TBCs[J]. Surface and Coatings Technology, 2004, 80-88:177-178.
- [5] WELLMAN R G, NICHOLLS J R, MURPHY K. Effect of microstructure and temperature on the erosion rates and mechanisms of modified EB PVD TBCs[J]. Wear, 2009, 267:1927-1934
- [6] WELLMAN R G, DEAKIN M J, NICHOLLS J R. The effect of TBCs morphology on the erosion rate of EB PVD TBCs[J]. Wear, 2005, 258: 349-356
- [7] WELLMAN R G, DEAKIN M J, NICHOLLS J R. The effect of TBCs morphology and aging on the erosion rate of EB-PVD TBCs[J]. Tribol Int, 2005,38: 798-804
- [8] WELLMAN R G. Methods for studying erosioncorrosion [M]. Woodhead: Woodhead Publishing Limited, 2011.
- [9] WELLMAN R G, NICHOLLS J R. Some observations on erosion mechanisms of EB PVD TBCS [J].Wear,2000,242:89-96
- [10] REZANKA S, MACK D E. Investigation of the resistance of open-column-structured PS-PVD TBCs to erosive and high-temperature corrosive attack [J]. Surf Coat Technol, 2017, 324:222-235
- [11] CERNUSCHI F, LORENZONI L. Solid particle erosion of thermal spray and physical vapour deposition thermal barrier coatings [J]. Wear, 2011, 271: 2909-2918
- [12] CERNUSCHI F, GUARDAMAGNA C. Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings[J]. Wear, 2016,348-349:43-51
- [13] SCHMITT M P, RAI A K, ZHU D, et al. Thermal conductivity and erosion durability of composite twophase air plasma sprayed thermal barrier coatings [J]. Surf Coat Technol, 2015, 279:44-52
- [14] SCHMITT M P, HARDER B J, WOLFE D E. Process-structure-property relations for the erosion durability of plasma spray-physical vapor deposition (PS-PVD) thermal barrier coatings [J]. Surf Coat Technol, 2016, 297:11-18.
- [15] SHIN D, HAMED A. Influence of microstructure on erosion resistance of plasma sprayed 7YSZ thermal barrier coating under gas turbine operating conditions [J]. Wear, 2018, 396-397: 34-47.
- [16] FLECK N A. ZISIS T H. The erosion of EB-PVD thermal barrier coatings: The competition between

mechanisms[J]. Wear, 2010, 268:1214-1224.

邓畅光,等:使役环境涡轮叶片EB-PVD热障涂层失效机制

- [17] CHEN X, HE M Y, SPITSBERG I, et al. Mechanisms governing the high temperature erosion of thermal barrier coatings[J]. Wear, 2004, 256:735-746.
- [18] MAHADE S, CURRY N, BJORKLUND S, et al. Erosion performance of gadolinium zirconate-based thermal barrier coatings processed by suspension plasma spray[J]. J Therm Spray Technol, 2017, 26: 108-115.
- [19] YANG L, LI H L, ZHOU Y C, et al. Erosion failure mechanism of EB-PVD thermal barrier coatings with real morphology[J]. Wear, 2017, 392-393:99-108.
- [20] LARS S, CHRISTOPH M. Erosion resistance of CMAS in fi ltrated sacri fi cial suspension sprayed alumina top layer on EB-PVD 7YSZ coatings [J]. Wear, 2019,438-439:1-16.
- [21] LARS S, RAVISANKAR N. Erosion behavior of EB-PVD 7YSZ coatings under corrosion/erosion regime: E ffect of TBC microstructure and the CMAS chemistry [J]. Journal of the European Ceramic Society, 2018, 38:5101-5112.
- [22] WELLMAN R G, NICHOLLS J R.A review of the erosion of thermal barrier [J]. Journal of Physics: Applied Physics, 2007, 40:293-R305
- [23] SCHMITT M P, WOLFE D E. Multilayered thermal barrier coating architectures for high temperature applications [J]. Ceramic Engineering and Science Proceedings, 2012(1):21-28
- [24] STEENBAKKER R J L, WELLMAN R G, NICHOLLS J R. Erosion of gadolinia doped EB-PVD TBCs[J]. Surf Coat Technol, 2006, 201: 2140-2146.
- [25] UWE S, WOLFGANG B. Degradation of La<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and other novel EB-PVD thermal barrier coatings by CMAS (CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) and volcanic ash deposits [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 235:165-173.
- [26] WELLMAN R G, WHITMAN G, NICHOLLS J R. CMAS corrosion of EB PVD TBCs: Identifying the minimum level to initiate damageJournal of refractory [J]. Metals & Hard Materials, 2010, 28:124-132.
- [27] CRAIG M, NDAMKA N L. CMAS degradation of EB-PVD TBCs: The effect of basicity [J]. Surface &. Coatings Technology, 2015, 270:145-153.
- [28] VIDAL-SETIF M H, CHELLAH N. Calciummagnesium-alumino-silicate (CMAS) degradation of EB-PVD thermal barrier coatings: Characterization of CMAS damage on ex-service high pressure blade TBCs [J]. Surface & Coatings Technology, 2012, 208: 39-45.

- [29] MERCER C, FAULHABER S. A delamination mechanism for thermal barrier coatings subject to calcium-magnesium-alumino-silicate (CMAS) in fi ltration[J]. Acta Materialia, 2005, 53: 1029-1039.
- [30] PUJOL G, ANSART F. Step-by-step investigation of degradation mechanisms induced by CMAS attack on YSZ materials for TBC applications [J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 237:71-78.
- [31] 王允良. PS-PVD 制备柱状 7YSZ 涂层抗 CMAS 高温 腐蚀性能研究[C]. 昆明:昆明理工大学,2017.
- [32] SHEN Zaoyu, LIU Zheng. LaGdZrO/YSZ thermal barrier coatings by EB-PVD: Microstructure, thermal properties and failure mechanism [J]. Chemical Engineering Journal Advances, 2021 (5):100073.
- [33] SHEN Zaoyu, LIU Guanxi. Effects of Er stabilization on thermal property and failure behavior of Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings[J]. Corrosion Science, 2021, 185:109418.

# Failure Mechanism of EB-PVD Thermal Barrier Coating on Turbine Blades in Service Environment

DENG Canguang, ZHANG Xiaofeng\*, DENG Chunming, MAO Jie, KUANG Min\*

(The Key Lab of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences, Guangzhou 510650, China)

**Abstract:** Using field emission scanning electron microscope, energy dispersive spectrometer and metallographic microscope and other test methods, the residual condition of the surface coating of the high-temperature turbine blade of the retired engine was examined in detail. , the EB-PVD coating on various parts of the surface is subjected to different degrees of CMAS attack, hard material impact, and thermal stress impact, resulting in the coexistence of multiple damages on the surface of retired blades. Through analysis of these damage phenomena, the failure mode and failure mechanism of each part of the blade under the service environment are clarified. The research results show that the blade edge is the most severely attacked by CMAS, and it is also the most densely impacted by hard points, so there is a large area of coating peeling; Under the combined action of alternating thermal stress and mechanical stress, it falls off regularly; there are hard substances on the surface of the air film hole around the leaf edge (whether it is the back of the leaf or the leaf basin), and the CMAS is compacted by rolling across the surface of the blade and compacting the CMAS. This causes the phenomenon of surface TBCs falling off. At the same time, flying TBCs pillars and CMAS blocks are found in the air film holes, reminding us from the side that the hard substances that cause substantial damage to the blade surface may be fallen TBCs pillars or solidified CMAS piece.

Key words: engine turbine blades; CMAS corrosion; erosion; EB-PVD coating; columnar structure