

热喷涂技术在燃气轮机领域的应用研究

李彦泽

(固安船行科技有限公司, 廊坊 065599)

摘要:本文立足于热喷涂技术在燃气轮机全流程中的应用场景, 围绕"服役工况-涂层需求-工艺方法-材料体系-失效机制-发展趋势"这一完整逻辑链条, 系统梳理了该领域的主要研究成果与工程应用进展。第一章为引言, 阐述研究背景、技术意义和全文框架; 第二章分析燃气轮机关键部件的服役环境及其对涂层的差异化需求; 第三章详细介绍各主流热喷涂技术的原理、特点及适用场景; 第四章至第七章分别聚焦热障涂层、可磨耗密封涂层、抗冲蚀涂层和抗氧化热腐蚀涂层四个主要涂层类型; 第八章探讨涂层的失效机理与寿命预测方法; 第九章总结全文并展望未来发展方向。期望通过本文的系统性梳理, 为从事燃气轮机设计与制造、热喷涂工艺开发以及涂层材料研究的科技工作者提供有益参考。

关键词:热喷涂技术; 燃气轮机; 热障涂层; 可磨耗涂层; 等离子喷涂; 超音速火焰喷涂

Research on the Application of Thermal Spraying Technology in the Gas Turbine Field

LI Yanze

(Gu'an Chuanhang Technology Co., Ltd., LANGFANG 065599, China)

Abstract: This paper systematically reviews the major research achievements and engineering advancements in thermal spray technology for gas turbine applications, based on a comprehensive logical framework encompassing "operating conditions—coating requirements—process methods—material systems—failure mechanisms—development trends." Chapter 1 serves as an introduction, outlining the research background, technical significance, and overall structure of the paper. Chapter 2 analyzes the service environments of key gas turbine components and their differentiated coating requirements. Chapter 3 provides detailed descriptions of the principles, characteristics, and application scenarios of mainstream thermal spray technologies. Chapters 4 through 7 focus respectively on four primary coating types: thermal barrier coatings, abradable seal coatings, erosion-resistant coatings, and oxidation/corrosion-resistant coatings. Chapter 8 discusses coating failure mechanisms and life prediction methods. Chapter 9 summarizes the entire paper and outlines future research directions. It is hoped that this systematic review will provide valuable references for researchers and engineers involved in gas turbine design and manufacturing, thermal spray process development, and coating materials research.

Key words: thermal spraying technology; gas turbine; thermal barrier coating; wear-resistant coating; plasma spraying; high-velocity oxy-fuel spraying

1 引言

1.1 研究背景

燃气轮机是一种将燃料化学能转化为轴功率或推力的热力旋转机械, 其基本工作原理是由压气机将空气压缩至高压状态, 在燃烧室中与燃料混合并燃烧, 生成的高温高压燃气在涡轮中膨胀做功, 一部分功驱动压气机旋转, 剩余部分对外输出。自20世纪30年代实用化以来, 燃气轮机技术经历了从早期低参数、短寿命到当代高参数、长寿命的巨大跨越, 成为衡量一个国家工业基础与科技综合实力的标志性产品。

布雷顿循环热力学分析表明, 燃气轮机的热效率主要取决于涡轮前温度和压气机压比, 提高涡轮前温度是改善效率最直接的途径。在材料科学的支撑下, 涡轮前温度从早期喷气发动机的约800° C, 逐步提升至当代先进航空发

动机和重型燃气轮机的1650–1750° C, 这一数值已远高于目前最先进镍基单晶高温合金在无涂层状态下能够安全服役的温度上限(约1100–1150° C)。换言之, 在燃气轮机最高温区域, 仅依靠基体材料的承温能力已无法满足服役要求, 必须借助热防护涂层技术来对热端部件实施"外部隔热"和"表面稳定化"。

热喷涂技术在燃气轮机领域的地位, 正是建立在这一基本矛盾之上。热喷涂涂层通过在部件表面构筑具有特定热学、力学和化学性质的防护层, 在高温合金基体与极端燃气环境之间建立了一道"人工屏障"。这道屏障的效能决定了热端部件能否在超温工况下可靠工作, 也直接影响着大修周期、全寿命成本和安全裕度。据统计, 现代航空发动机涡轮叶片若没有热障涂层保护, 其服役寿命将缩短60%–80%。以通用电气公司(GE)的LM系列重型燃气轮机为例, 采用先进热障涂层和可磨耗密封涂层后, 整机效

率提高约1.5~2个百分点,相当于每年减少数万吨二氧化碳排放,经济效益和环境效益十分显著。

从技术演进的角度看,热喷涂在燃气轮机领域的角色已发生深刻变化。在早期阶段,热喷涂主要承担事后维修中的尺寸修复功能;20世纪60年代以后,以铝化物涂层为代表的抗氧化涂层开始被应用于涡轮叶片防护,热喷涂从被动修复走向主动防护;80年代,YSZ热障涂层的实用化标志着热喷涂正式从"辅助工艺"晋升为决定发动机性能上限的"核心技术";进入21世纪,随着PS-PVD、SPS等新一代技术平台的涌现,热喷涂进一步进入"微观结构可控、功能可设计、性能可预测"的精细化阶段。可以说,热喷涂技术的发展历程与燃气轮机的性能跃升构成了相互促进的紧密关系。[1,2]

在我国,燃气轮机产业正处于从仿制测绘向自主正向设计转变的关键时期。两机专项(航空发动机与燃气轮机国家科技重大专项)的实施,打通了从基础研究到工程应用的全创新链条。热喷涂作为其中涉及面最广、应用环节最多的表面技术之一,其研究深度和工程成熟度直接影响着我国自主燃机型号的研制进度。然而,与欧美发达国家相比,我国在先进涂层材料开发、高端喷涂装备制造、涂层寿命预测方法和数据库建设等方面仍存在明显差距,亟需在基础研究和工程应用两个层面同时发力。

1.2 热喷涂技术发展简史

热喷涂技术的起源可以追溯到20世纪初。1909年,瑞士工程师Max Ulrich Schoop发明了世界上第一台实用的金属丝火焰喷涂装置,利用氧-乙炔火焰熔化金属丝并用压缩空气将其雾化喷涂到基体表面,这项开创性工作奠定了热喷涂技术的基础,火焰喷涂至今仍在某些简单防护场合继续使用。

电弧喷涂于1918年由Schoop进一步提出,利用两根连续送进的金属丝之间的电弧作为热源,熔融金属由压缩空气雾化后沉积形成涂层。电弧喷涂的沉积效率高于火焰喷涂,但可喷涂材料局限于导电金属丝材。等离子喷涂技术诞生于20世纪60年代,利用直流电弧产生的高温等离子射流(中心温度可达15000°C以上)熔化粉末材料,大幅拓宽了可喷涂材料的范围,使高熔点陶瓷(如 ZrO_2 、 Al_2O_3)的热喷涂成为可能,这一突破直接催生了热障涂层技术的诞生。超音速火焰喷涂(HVOF)于20世纪80年代初由James Browning发明,通过特殊设计的燃烧室和喷嘴结构使焰流速度达到超音速(>1000 m/s),粒子获得的动能远高于普通火焰喷涂和APS,所制备的碳化物和金属涂层致密度极高,自此成为耐磨涂层和MCrAlY粘附层制备的主流方法之一。低压等离子喷涂(LPPS)通过将喷涂环境维持在低气压惰性气氛中,解决了易氧化材料在APS过程中的氧化损耗问题,为高品质MCrAlY涂层的制备提供了可靠工艺窗口。

进入21世纪,热喷涂技术迎来了新一轮创新高潮。等离子喷涂-物理气相沉积(PS-PVD)将工作压力降至约100~200 Pa,在低压等离子喷涂的基础上进一步实现了气

相沉积,可在更宽的压力范围内调控涂层的形核和生长模式,制备出兼具气相沉积柱状结构和热喷涂层状结构的复合涂层。悬浮液等离子喷涂(SPS)以纳米或亚微米粉末的悬浮液替代传统微米级干粉,开辟了通过纳米原料调控涂层微结构的新途径。冷喷涂(CS)则不依赖高温热源,利用高速固体颗粒的塑性变形实现沉积,特别适用于温度敏感材料和厚铜涂层等特殊应用。这些新兴技术的共同特征是:不再追求单一的致密或疏松结构,而是通过多尺度、多形态的微结构调控来实现涂层功能的精准设计。[3,4]

2 燃气轮机关键部件与涂层需求分析

2.1 燃气轮机基本结构与工作条件概述

燃气轮机虽然在具体构型上因应用场景不同(航空涡喷/涡扇、舰用燃气轮机、地面重型燃机、微型燃机等)而有所差异,但其核心热力循环均遵循布雷顿循环,在结构上可统一划分为压气机、燃烧室和涡轮三大模块。

压气机负责对进气进行逐级压缩以提高工质压力。在先进航空发动机中,高压压气机出口温度已超过650°C,出口压力可达3~4 MPa;地面重型燃气轮机的压气机压比更高(部分型号超过30:1),出口温度亦在500°C以上。压气机叶片承受的主要载荷包括气动弯应力、离心拉应力、振动交变应力以及与机匣和轮盘连接部位的微动磨损。在沙漠、沿海或工业污染环境中,压气机叶片还面临盐雾腐蚀和固体颗粒冲蚀的威胁。这些因素的综合作用要求压气机叶片在保持气动外形精度的同时,具备优良的耐磨性、耐蚀性和一定的抗冲蚀能力。[5]

燃烧室是将燃料化学能转化为热能的场所。燃烧室内的火焰温度通常接近或超过2000°C,火焰筒内壁承受强烈的热辐射和对流换热,局部热流密度可达1~2 MW/m²。虽然燃烧室壁面通常采用气膜冷却技术以降低金属温度,但热应力、热疲劳和高温氧化仍是燃烧室结构完整性的主要威胁。燃烧室材料(多为镍基或钴基高温合金)在无涂层保护下的抗氧化温度上限远低于实际燃气温度,因此燃烧室涂层对于保证其长期可靠工作至关重要。

涡轮是燃气轮机中温度最高、应力最大的部件。高压涡轮进口温度在当代先进燃机中普遍达到1650~1750°C,接近甚至超过许多高温合金的熔点。涡轮叶片在如此极端的环境中承受着巨大的离心载荷(叶身中部的离心应力可达200~300 MPa)、气动载荷、热应力以及振动载荷的多轴复合作用,同时还受到高温燃气的氧化和热腐蚀攻击。可以说,涡轮叶片是整台燃气轮机中"处境最为恶劣"的零件,也是涂层需求最为集中和迫切的部位。[6]

2.2 压气机叶片涂层

压气机叶片通常由钛合金(如TC4、TC11、Ti-6Al-4V)或高强度不锈钢(如17-4PH)制造。先进压气机叶片多采用空心结构以减轻重量,叶片表面质量直接影响气动效率和抗疲劳性能。压气机叶片对涂层的需求可根据部位和功能细分为以下几个方面。

抗微动磨损涂层应用于叶片榫头与轮盘榫槽的接触区

域。在工作过程中,由于离心载荷和气动力的变化,叶片榫头在榫槽内发生微小幅度的往复滑动,这种微动磨损如不加防护,会迅速导致榫头尺寸超差、应力集中增大乃至疲劳断裂。[7]CuNiIn涂层是微动磨损防护的经典方案,其硬度适中(约150–250 HV),摩擦系数较低,且具有一定的自润滑特性,适用于中低温服役环境。但CuNiIn涂层在高于450°C的环境中抗氧化能力不足,限制了其在压气机后级叶片上的应用。干膜润滑涂层是另一种重要方案,通过在叶根表面涂覆含MoS₂或石墨的有机-无机复合涂层,可有效降低摩擦系数至0.1–0.2,大幅延长微动疲劳寿命。GE、罗罗、赛峰等国际航空发动机企业已广泛采用干膜润滑涂层作为压气机叶片的标准防护措施。

抗腐蚀涂层主要用于保护压气机叶片叶身免受工作环境中腐蚀介质的侵蚀。在海洋环境下,含盐空气被吸入压气机后,在叶片表面形成电解质薄膜,引发点蚀和应力腐蚀开裂。传统含铬涂层(如镀铬层)虽防护效果良好,但六价铬具有高致癌性,欧洲REACH法规和美国EPA已对其使用施加了严格限制。[8]在此背景下,无铬锌铝涂层(如锌铝薄片涂层)发展迅速,其通过锌和铝的牺牲阳极作用和致密的腐蚀产物膜层,提供媲美含铬涂层的耐盐雾腐蚀性能,同时满足环保合规要求。

抗冲蚀涂层保护压气机前几级叶片免受吸入空气中的砂尘颗粒的冲蚀磨损。冲蚀会改变叶片前缘的型面曲率,导致压气机效率和喘振裕度下降。碳化物涂层(如Cr₃C₂-NiCr)和氮化物涂层(如TiN、TiAlN)是主要的抗冲蚀涂层体系,通常采用HVOF或PVD工艺制备。近年来,多层叠层结构(如TiN/TiAlN)因界面对裂纹扩展的偏转和阻碍效应而展现出优异的抗冲蚀性能。

阻燃涂层是钛合金压气机叶片的特殊需求。钛合金在特定条件下(高温、高压、与硬质颗粒摩擦产生火花)具有燃烧倾向,这在航空发动机中构成严重安全隐患。阻燃涂层通过隔绝氧气或抑制燃烧反应来降低钛火风险,目前该领域仍处于研究探索阶段。

2.3 涡轮叶片与热端部件涂层

如果说压气机叶片的涂层是“锦上添花”的话,涡轮叶片的涂层则是“雪中送炭”——没有涂层,涡轮叶片在最苛刻工况下根本无法存活。涡轮叶片对涂层的需求最为集中和严格,主要包括热障涂层、抗氧化涂层、抗热腐蚀涂层和封严涂层。

热障涂层(TBCs)是涡轮叶片涂层的核心。通过在叶片表面制备低导热陶瓷层,热障涂层可降低叶片金属基体的表面温度100–200°C,从而在相同材料条件下允许更高的涡轮前温度,或在相同温度下延长叶片寿命3–5倍。典型的双层结构TBCs由金属粘结层(MCrAlY,厚度约100–150 μm)和陶瓷面层(YSZ,厚度约300–500 μm)组成。粘结层一方面缓解陶瓷层与高温合金基体之间的热膨胀系数失配(YSZ为10–11×10⁻⁶/K,高温合金为14–16×10⁻⁶/K),另一方面在高温下形成α-Al₂O₃保护膜,防止基体氧化。陶瓷面层则主要发挥隔热功能。

抗氧化与抗热腐蚀涂层是涡轮叶片除TBCs之外的另一道防线。在涡轮叶片的不同部位,氧化和热腐蚀的相对严重程度不同:叶片前缘受高温燃气冲刷最强烈,氧化是主要威胁;叶盆和叶背温度相对较低,但熔盐沉积物的冷凝和富集使得热腐蚀更为突出;叶片内部冷却通道的内表面则面临高温氧化性气流的腐蚀。包覆型MCrAlY涂层通过真空熔炼-破碎制粉和LPPS或HVOF工艺制备,具有成分灵活可控、涂层致密、结合强度高的优点。扩散型铝化物涂层(主要为NiAl和Pt-NiAl)则通过CVD或包埋渗方法制备,涂层与基体之间形成冶金结合,在薄壁叶片和复杂内腔的防护中具有不可替代的地位。

封严涂层在涡轮叶尖与机匣之间发挥密封作用。涡轮叶尖的高速线速度可达400–500 m/s,径向间隙每增加0.1 mm,涡轮效率约下降0.5–1.0个百分点。可磨耗封严涂层在机匣内壁提供可被叶尖刮削的牺牲层,允许将冷态安装间隙降至最小,而在热态运行时通过叶尖的微量刮削自动形成最优间隙。[9,10]

2.4 燃烧室与密封部件涂层

燃烧室虽然不承受离心载荷,但其所经历的热环境极端严酷。火焰筒内壁在启停循环中经历大幅度的温度变化,产生显著的热疲劳应力。燃烧室涂层的主要功能是隔热和抗氧化。APS制备的多孔YSZ涂层因其热导率低(0.8–1.7 W/mK)、成本可控,在燃烧室隔热中应用最广。对于更高温度要求的先进燃烧室,稀土锆酸盐等超高温涂层材料也受到关注。

密封结构贯穿燃气轮机的整个气路,从压气机到涡轮的各级密封对整机效率都有重要影响。除涡轮叶尖的可磨耗涂层外,级间密封和轴承腔密封也受益于热喷涂耐磨涂层(如WC-Co、Cr₃C₂-NiCr)的应用,以减小磨损、延长密封寿命。

3 主要热喷涂技术原理与工艺特点

热喷涂技术的本质是将涂层材料以粉末、丝材或棒材的形式送入高温热源,使之熔融或半熔融,再通过气流加速后撞击基体表面形成涂层。虽然所有热喷涂工艺都遵循“加热-加速-碰撞-铺展-凝固-堆积”这一基本物理过程,但不同技术路线在热源温度、焰流速度、气氛控制、粉末状态等方面存在显著差异,这些差异最终决定了涂层的微观结构和宏观性能。

3.1 大气等离子喷涂

大气等离子喷涂是热喷涂技术中应用最广、灵活性最强的工艺方法之一。其基本工作原理如下:喷枪阴极(钨电极)和阳极(铜喷嘴)之间的直流电弧将工作气体(主气通常为Ar或N₂,辅气为H₂或He)电离,形成高温、高速的等离子射流;粉末材料由载气(通常为Ar)从喷枪外部或内部注入射流,被加热至熔融或完全熔化状态后,以200–400 m/s的速度撞击基体表面,经快速凝固形成涂层。

等离子射流的核心温度可高达15000°C以上,这一温度远高于任何已知材料的熔点,因此APS的可喷涂材料范

围极广，从低熔点金属（如Al、Zn）到超高熔点陶瓷（如 ZrO_2 、 Al_2O_3 、WC）均可实现有效沉积。APS的操作压力通常为大气环境，设备成本相对较低，工艺窗口宽，沉积速率高（通常为30–150 g/min），适合大面积涂层的大规模生产。

然而，APS也存在固有局限。首先，由于喷涂在空气下进行，高温下易氧化材料（如Ti、Al含量较高的合金）的氧化损耗不可避免，严重时会影响涂层成分的准确性和结合性能。其次，APS涂层的典型微观结构为层状堆叠的扁平粒子，粒子间存在不可避免的孔隙（孔隙率通常为2%–15%）和微裂纹，虽然这种结构有利于降低热导率，但也在一定程度上削弱了涂层的应变容限和抗热冲击性能。再次，APS过程中粉末颗粒经历了极快速的加热和冷却，热历史复杂，涂层中可能保留非平衡相和残余应力。

级联式等离子喷枪是近年来APS技术最值得关注的进步。通过在阳极内部嵌入绝缘环将电弧分段固定，级联喷枪消除了传统喷枪中电弧漂移的弊端，实现了更长的稳定弧根和更高的电压，从而在相同电流下获得更高的功率和更稳定的射流。级联喷枪的另一个显著优势是粉末粒子加热时间的延长和加热均匀性的改善，使得高熔点粉末（如YSZ、稀土锆酸盐）的熔化质量显著提高。在实际生产中，级联喷枪可在高达150 g/min的送粉速率下稳定运行，单次喷涂可覆盖较大面积，这对于重型燃气轮机大尺寸部件的涂层制备尤为重要。[11]

在热障涂层应用中，APS制备的传统层状涂层因应变容限低而在热循环中易于发生层间开裂。为克服这一不足，研究者开发了垂直裂纹（DVC）结构的APS热障涂层。通过在喷涂过程中将基体温度精确控制在特定区间（通常为500–900° C），并辅以适当的工艺参数调整，可在YSZ层中诱导出垂直于涂层表面的裂纹网络。这些裂纹在热循环过程中发挥“手风琴”效应——受热膨胀时裂纹张开，冷却收缩时裂纹闭合——从而有效释放面内热应力，显著提高涂层的抗热冲击能力。垂直裂纹的密度（通常为1–5条/毫米）可通过基体温度和送粉速率等参数进行调控，为面向不同工况需求定制涂层结构提供了可能。

3.2 超音速火焰喷涂

超音速火焰喷涂以燃料（煤油、丙烷、丙烯或氢气）与氧气在燃烧室内的燃烧反应为热源，产生的高温燃气经拉瓦尔喷嘴加速至超音速（通常为1000–1500 m/s，最高可达2000 m/s以上），粉末沿轴向注入焰流后被加热和加速，以极高的动能撞击基体形成涂层。

HVOF的核心优势在于其“低温、高速”的工艺特征。焰流温度一般为2500–3200° C，显著低于等离子射流，这意味着粉末颗粒在飞行过程中与高温燃气的接触时间短，氧化程度低；同时，极高的粒子速度（可达500–800 m/s）赋予熔滴巨大的动能，撞击基体后变形充分，所制备涂层的孔隙率可低至0.5%–1.5%，结合强度常超过70 MPa（有些报道可达100 MPa以上）。这些特征使HVOF非常适用于制备对致密度和纯度要求高的涂层，如MCrAlY粘结层和 Cr_3C_2 –

NiCr耐磨涂层。

HVOF制备的WC–Co涂层因其优异的耐磨性而在压气机叶片抗冲蚀和轴承部件中得到应用。在喷涂过程中需特别注意WC颗粒的脱碳问题：当温度过高或颗粒在高温区停留时间过长时，WC会分解为 W_2C 和游离碳，严重损害涂层的硬度和韧性。通过优化氧燃比、控制喷涂距离和粉末粒径，可将脱碳程度降至最低。对于要求更高抗氧化性的场合， Cr_3C_2 –NiCr是比WC–Co更合适的选择，因为 Cr_3C_2 在高温下的稳定性更好，且在氧化环境中能够形成保护性 Cr_2O_3 膜。

HVOF技术的变种包括HVOF（超音速空气燃料喷涂，以空气替代纯氧作为助燃剂）和LFS（液体燃料喷涂），前者因使用空气而显著降低了成本和安全风险，在某些对涂层氧化不敏感的场所具有竞争力。

3.3 低压等离子喷涂

低压等离子喷涂又称真空等离子喷涂，其基本原理与APS相同，但喷枪和基体均置于一个可抽真空的密闭容器中，喷涂在100–500 mbar的惰性气氛（通常为Ar或He）中进行。低压环境的主要作用有两方面：一是大幅减小等离子射流与周围冷气体的卷吸混合，使射流长度增加、直径增大，有利于大面积的均匀沉积；二是消除了空气中的氧和氮对熔融金属的氧化和氮化反应，使涂层中的氧含量可控制在0.1%以下。

LPPS最成熟和最经典的应用是MCrAlY涂层的制备。在APS过程中，MCrAlY粉末中的Al和Y等活性元素极易被氧化，生成的氧化物夹杂会损害涂层的抗氧化性能和与基体的结合强度。LPPS在惰性气氛中操作，有效避免了这一问题，所制备的MCrAlY涂层成分与原始粉末几乎一致，致密度高、界面结合好，抗氧化性能显著优于APS制备的同成分涂层。此外，LPPS还可用于制备TiAl、Nb基合金等在空气中极易氧化的先进结构材料涂层。

LPPS的主要缺点是设备投资大、运行成本高、批次生产效率较低。这些因素限制了LPPS在大规模、低成本应用中的推广，但在高端航空发动机和工业燃气轮机关键部件的涂层制备中，LPPS凭借其不可替代的涂层品质，仍然占据着稳固的地位。

3.4 新兴先进喷涂技术

等离子喷涂–物理气相沉积是近十年来热喷涂领域最具突破性的技术进展。PS–PVD本质上是对LPPS的延伸——在更低的工作压力（约100–200 Pa）下操作，使等离子射流的体积急剧膨胀，焰流长度可达2 m以上，直径达200–400 mm。在这种极端条件下，注入的粉末材料不仅能够被熔化，其中的一部分还会被进一步蒸发为气相。气态、液态和固态粒子共存于射流中，在沉积过程中可实现“气相–液相–固相”多相共沉积，这是传统APS和LPPS所无法实现的。[12]

PS–PVD所制备的热障涂层具有独特的羽–柱状微观结构：以气相形核和柱状生长为主导机制，柱状晶垂直于基体表面生长，柱间存在纳米级的间隙，柱内则保留了一定

数量的气孔。这种结构兼有EB-PVD涂层的高应变容限（柱间间隙可充分释放热应力）和APS涂层的中低热导率（气孔对声子传热有散射作用），在热循环寿命和隔热性能的综合表现上优于传统涂层。广东省科学院新材料研究所经过近20年的持续攻关，建成了目前世界最大的PS-PVD多相沉积平台，在均匀与非均匀形核理论、高应变容限涂层制备技术等方面取得了一系列原创性成果，相关涂层已成功应用于多型航空发动机和地面燃气轮机，累计交付涂层部件超过千件。该团队开发的镀铝表面改性技术进一步提升了涂层抗热冲击和抗CMAS腐蚀的能力，在国际上达到了领先水平。

悬浮液等离子喷涂以纳米或亚微米粉末在液体（水或有机溶剂）中的稳定悬浮液替代传统干粉作为喷涂原料。由于悬浮液中的固体颗粒尺寸仅为100–500 nm，远小于传统粉末的10–100 μm ，这些微小颗粒在射流中加热和加速的动力学行为与传统粉末完全不同。通过合理调控工艺参数，SPS可以制备出柱状晶结构、垂直裂纹结构或层状-柱状复合结构的涂层。与PS-PVD和EB-PVD相比，SPS的设备投资和运行成本低得多，与APS基本相当，因此在成本和性能之间提供了具有吸引力的平衡点。近年来，水基悬浮液的开发进一步降低了SPS的环境负荷和材料成本，使该技术具备了从实验室走向工业化应用的条件。[13]

冷喷涂是一种完全区别于上述热喷涂方法的崭新工艺。冷喷涂中，粉末颗粒不经过加热熔化，而是在室温或较低温度下（通常 $<1000^\circ\text{C}$ ）以超音速（500–1200 m/s）撞击基体，依靠高速碰撞产生的绝热剪切失稳和塑性变形实现颗粒间的机械结合与冶金结合。由于喷涂温度远低于材料的熔点和再结晶温度，冷喷涂涂层几乎不存在氧化、相变和热应力问题，特别适用于对热敏感的材料（如纳米晶合金、非晶合金、铜合金）以及需要保持原材料相结构和性能的场合。在燃气轮机领域，冷喷涂在铜铬钼合金燃烧室衬套的导热涂层修复、镁合金机匣的腐蚀防护涂层制备等方面展现了独特优势。

4 热障涂层：核心应用与关键技术

4.1 热障涂层的功能原理与设计要素

热障涂层的核心功能是在高温合金基体与高温燃气之间构建一道热阻屏障，从而降低基体金属的实际工作温度。隔热效果来源于陶瓷材料的本质低热导率—— ZrO_2 等陶瓷材料的热导率（1.5–3 W/mK）仅为高温合金（约15–25 W/mK）的十分之一左右。当厚度为300–500 μm 的陶瓷层覆盖于叶片表面时，在稳态热流条件下可在涂层内外表面之间建立起100–200 $^\circ\text{C}$ 的温差，直接相当于降低了基体合金的承温要求。[12]

然而，热障涂层的设计远非“选一种低热导材料、喷一层厚涂层”那么简单。一个实用化的热障涂层必须同时满足一系列相互制约的性能要求：极低的热导率以发挥隔热功能；与基体合金匹配的热膨胀系数以减少热应力；足够的断裂韧性和应变容限以抵抗热冲击和热循环载荷；优

异的抗烧蚀性能以维持长期服役中的结构稳定性和低热导率；以及良好的抗CMAS腐蚀能力以适应实际使用环境中不可避免的污染物攻击。没有任何一种单一材料能够完美兼顾所有这些要求，因此热障涂层的材料选择和结构设计本质上是一个多目标权衡优化的过程。

4.2 经典材料体系：YSZ的优劣与局限

氧化钇部分稳定氧化锆（含6–8 wt% Y_2O_3 ）自20世纪70年代被NASA首次评估为热障涂层材料以来，一直占据着热障涂层材料领域的统治地位，堪称热障涂层领域的“黄金标准”。YSZ之所以能够长期保持这一地位，源于其独特而优越的性能组合：1）热导率低，在室温至1200 $^\circ\text{C}$ 范围内约为1.5–2.2 W/mK，远低于大多数其他氧化物陶瓷；2）热膨胀系数（ $10\text{--}11 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）介于高温合金（ $14\text{--}16 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）和 Al_2O_3 TGO（约 $8 \times 10^{-6}/\text{K}$ ）之间，在一定程度上缓冲了热失配应力；3）断裂韧性在陶瓷材料中相对较高（ K_{IC} 约为2–4 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ），抗热冲击能力优于许多替代材料；4）在宽温区内具有良好的相稳定性， Y_2O_3 的添加将 ZrO_2 的高温四方相（t'）稳定至室温，避免了纯 ZrO_2 在冷却过程中发生的单斜相变（伴随约4%的体积膨胀）。

YSZ在约1200 $^\circ\text{C}$ 以上的长期服役中暴露出两个主要问题。其一，高温烧结会导致涂层中的微孔和微裂纹愈合，使热导率升高、应变容限下降，热障效果和抗热冲击能力随之劣化。其二，在1200 $^\circ\text{C}$ 以上，亚稳态的t'相开始缓慢转变为平衡态的四方相（t）和立方相（c），并在冷却过程中进一步转变为单斜相（m），这种相变伴随的体积变化可能诱发微裂纹的萌生和扩展。因此，YSZ被普遍认为不适合用于长期服役温度超过1200 $^\circ\text{C}$ 的工况。当涡轮前温度进一步提升至1600 $^\circ\text{C}$ 以上时，开发新型超高温热障涂层材料就成为不可避免的需求。

4.3 新型超高温热障涂层材料

稀土锆酸盐（ $\text{A}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ，A为La、Nd、Sm、Gd等稀土元素）具有烧绿石或萤石结构，是YSZ之后研究最为深入的新一代热障涂层材料体系。其热导率可低至1.0–1.5 W/mK，比YSZ更低，而且在高温下对CMAS的耐受性明显优于YSZ——稀土锆酸盐与CMAS反应生成的磷灰石相致密层可有效阻挡熔融CMAS的进一步渗透。 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 是其中的代表，前者因Gd的较高原子质量而热导率更低，后者则在高温相稳定性方面表现更优。然而，稀土锆酸盐的断裂韧性普遍低于YSZ，热膨胀系数也略小（约 $9\text{--}10 \times 10^{-6}/\text{K}$ ），这对涂层的抗热冲击性能提出了挑战。当前的主流思路是将稀土锆酸盐作为YSZ的“顶层覆盖层”（即双层或多层热障涂层），由YSZ层提供主要的应变容限和结合强度，由稀土锆酸盐层提供超高温隔热和抗CMAS防护，从而发挥两种材料的互补优势。

稀土钽酸盐（ RETaO_4 ）是另一类备受关注的新型热障涂层材料。其热导率可低至0.8–1.3 W/mK，且具有独特的铁弹性增韧机制，断裂韧性优于稀土锆酸盐。 GdTaO_4 和 YTaO_4 等体系在1400 $^\circ\text{C}$ 以上的长期相稳定性研究正在深入推进中。

高熵合金涂层是近年来表面工程领域的另一热点。高熵合金由五种以上主要元素以近等摩尔比组成,其热力学上的高混合熵效应可抑制金属间化合物的析出,有利于形成简单的固溶体结构。在抗氧化涂层方面,AlCoCrFeNiY等体系展现出良好的高温抗氧化性和优异的热稳定性能。将其作为热障涂层粘结层或独立的高温防护涂层,是当前探索的前沿方向之一。

4.4 APS制备热障涂层的工艺优化与结构调控

在APS制备热障涂层的工程实践中,工艺参数的微小变化可能引起涂层微结构和性能的显著改变。主要工艺参数包括:电弧功率(电流和电压)、工作气体成分与流量、送粉速率、喷涂距离、基体温度和喷枪扫描路径等。这些参数之间存在复杂的交互作用,使得工艺优化成为一项系统性工程。

喷涂功率和气体成分直接影响粉末颗粒的熔化状态。功率过低时,颗粒熔化不充分,撞击基体后变形不充分,涂层孔隙率过高、结合强度不足;功率过高时,细小颗粒可能发生蒸发或过烧,同样损害涂层质量。最优的工艺窗口通常通过"熔融粒子比例最大化"和"蒸发损失最小化"之间的平衡来确定。对于YSZ粉末,通常采用Ar-H₂或Ar-He混合工作气体,H₂或He的加入可提高射流的焓值和热导率,有助于改善高熔点ZrO₂的熔化效果。

基体温度是调控涂层微结构和应力的关键参数。提高基体温度可促进熔滴铺展后的充分润湿和扩散,减小扁平粒子间的孔隙,降低涂层残余应力;但过高的基体温度可能导致涂层中产生过大的热压应力,并在冷却后形成不利的残余拉应力。对于垂直裂纹结构YSZ涂层的制备,基体温度需要精确控制在特定范围内(通常为600~900℃,具体取决于粉末特性和设备配置),以在涂层中诱导出适当密度和分布的垂直裂纹。裂纹密度过低时,热应力释放效果不足;裂纹密度过高时,则可能因裂纹的贯穿连通而削弱涂层的整体强度和抗冲蚀能力。

后处理也是改善APS热障涂层性能的重要手段。激光重熔可通过瞬时高温熔化涂层表面薄层,消除表层孔隙和微裂纹,提高表面光洁度和抗冲蚀性,但可能同时降低涂层的应变容限。真空热处理可释放残余应力、改善界面结合,并促进粘结层表面Al₂O₃膜的形成。密封处理(如磷酸盐浸渍)则主要针对特定工况下的腐蚀防护需求。

4.5 PS-PVD与SPS制备先进结构热障涂层

PS-PVD和SPS代表了热障涂层制备技术的前沿方向,二者在微结构调控能力上各有特色。

PS-PVD的独特价值在于其"多相沉积"的本质。在低工作压力下,等离子射流的体积膨胀使喷枪与基体之间的距离可以拉长至1000~2000 mm,这是传统APS(距离通常为80~150 mm)所无法企及的。长距离沉积使得射流中的气态物种有时间进行充分的形核和生长,最终在基体表面形成以柱状晶为主、夹杂少量球状颗粒和气孔的多相复合结构。这种结构的应变容限优于APS层状涂层,隔热性能优于EB-PVD纯柱状涂层,且在复杂形状部件(如带气膜冷却

孔的涡轮叶片)上具有良好的绕镀性——气态物种可进入冷却孔内部沉积,这是APS难以做到的。PS-PVD的工程化应用已在国内外多个燃机型号上得到验证,其涂层在热循环寿命和抗热冲击方面的表现显著优于APS同类涂层。

SPS在微结构调控方面表现出更加丰富的多样性。通过改变悬浮液的固含量、溶剂类型、粉末粒径以及喷涂工艺参数,SPS可以在同一个技术平台上制备出层状结构、柱状结构和垂直裂纹结构等不同形态的涂层。柱状结构SPS涂层与PS-PVD和EB-PVD的柱状结构在形貌上相似,但柱状晶的粗细和间距可通过工艺参数灵活调整。垂直裂纹结构SPS涂层则与APS-DVC涂层类似,但因为使用了纳米级原料,其孔隙更细小且分布更均匀,在保持低热导率的同时具有更好的抗烧蚀性能。

SPS的业界推广面临的主要挑战包括悬浮液稳定性控制、高送液速率下的液滴破碎和分散均匀性、以及大面积喷涂时的沉积效率问题。近年来,水基悬浮液技术的进步显著缓解了有机溶剂带来的成本和安全顾虑,多层结构和梯度结构的SPS涂层也在实验室尺度上展现出优异的综合性能。可以预见,随着悬浮液配方标准化和喷涂装备专用化程度的提高,SPS将在大尺寸热端部件涂层制备方面发挥越来越重要的作用。

5 可磨耗密封涂层

5.1 密封涂层在燃气轮机中的重要作用

燃气轮机压气机和涡轮的动叶片与静止机匣之间存在环形径向间隙。工质在叶尖间隙中的泄漏流动会产生两方面负面效应:一是泄漏的工质未通过叶片做功(对涡轮而言)或未获得压缩功(对压气机而言),直接降低了级效率和整机效率;二是泄漏流动干扰了主通道内的气动参数分布,可能影响级间匹配和流动稳定性。研究表明,涡轮叶尖间隙每增加叶片高度的1%,级效率约下降1.5~2.5个百分点;压气机叶尖间隙的影响程度相对略小,但在高压级中也十分显著。

从设计角度看,叶尖间隙的确定是一个典型的两难问题。冷态装配间隙越小,热态运行时因不同零件热膨胀量不同而发生叶片与机匣碰磨的风险越高;冷态装配间隙越大,热态泄漏损失则越大。可磨耗密封涂层的应用从根本上解决了这一两难困境:在机匣内壁喷涂一层可磨耗性良好的涂层,允许在冷态装配时采用最小间隙,试车和运行初期叶片叶尖自动将涂层"刮"出所需的运行间隙,从而在避免碰磨损伤的前提下实现最优密封效果。

5.2 材料体系与微观结构设计

可磨耗涂层在服役过程中面临的核心矛盾是:涂层必须足够"软"和"脆"以便在叶片刮削时优先破碎脱落、不损伤叶片,但又必须足够"强"和"韧"以抵抗高速燃气的冲刷和热冲击而不发生大块剥落。为实现这种矛盾统一的性能,可磨耗涂层的材料设计通常采用"多相复合+可控孔隙"的策略。

典型的可磨耗涂层由以下组元构成:

金属基体提供涂层的结构完整性和环境耐久性。根据服役温度的不同,基体材料的选择差异很大。压气机段(温度通常 $<450^{\circ}\text{C}$)常用Al-Si合金,其密度低、导热性好、与铝合金或钛合金机匣的热膨胀匹配性优良。涡轮段(温度可达 $800\sim 1200^{\circ}\text{C}$)则必须选用CoNiCrAlY或NiCrAl等高温合金体系,以保证在高温下具备较强的氧化抗力和结构稳定性。

润滑相的作用是降低刮削过程中的摩擦系数,减少叶片磨损和摩擦热。六方氮化硼(h-BN)是最常用的高温润滑相,因其层状晶体结构易于滑移,且在惰性气氛中可耐受 2000°C 以上的高温。石墨和 MoS_2 的润滑性能在低温下更优,但氧化温度分别约为 400°C 和 350°C ,限制了其在高温场合的应用。

造孔剂在喷涂或后续热处理中分解挥发,留下均匀分布的孔隙。常用造孔剂包括聚酯(Polyester)、聚酰胺、石墨、碳酸盐等。以Al-Si-聚酯涂层为例,聚酯在APS过程中(温度 $>500^{\circ}\text{C}$)即发生热分解和挥发,在Al-Si基体中留下尺寸为 $10\sim 50\ \mu\text{m}$ 的球形孔隙,孔隙率通常控制在20%~40%之间。对于高温合金基可磨耗涂层,造孔剂有时采用无机盐类(如 CaF_2),其在涂层服役温度下具有化学惰性,也可同时发挥固体润滑作用。[14]

5.3 制备工艺与质量控制

可磨耗涂层主要采用APS工艺制备,部分要求致密度更高的涂层也使用HVOF。APS制备可磨耗涂层的工艺控制要点主要包括:

粉末混料与团聚造粒。由于基体、润滑相和造孔剂的密度、粒径和熔点相差悬殊,直接使用机械混合粉末进行喷涂会导致各组分分离和涂层成分不均。工业上通常采用喷雾造粒或团聚烧结工艺将多组元制备为球形复合粉末,各组分在每个粉末颗粒内部均匀分布,从而保证涂层成分的一致性。

喷涂参数的精细化调控。造孔剂的分解程度受颗粒在射流中的加热历史影响,过高的焰流温度或过长的停留时间会导致造孔剂过早分解、孔隙率降低;过低的加热则可能导致造孔剂残留,影响涂层的热稳定性和可磨耗性。对于Al-Si-聚酯涂层,通常需要精确控制喷涂功率和送粉速率,使聚酯在颗粒撞击基体后的铺展阶段完成分解,既保证造孔效果,又不致因分解气体逸出时破坏涂层与基体的结合。

涂层厚度的控制。可磨耗涂层的设计厚度通常为 $0.5\sim 3\text{mm}$,远高于热障涂层的陶瓷层厚度。如此厚的涂层要求多道搭接喷涂,每道涂层的厚度、冷却状态和残余应力累积方式都会影响最终涂层的结构均匀性和结合性能。

5.4 性能评价方法与标准

可磨耗涂层性能评价的核心手段是模拟工况刮磨试验。专用的刮磨试验台(Rub Rig)可在可控气氛和温度条件下,以与实际发动机相当的叶尖线速度(最高可达 500m/s 以上)、进给速度和侵入深度进行刮磨测试,实时记录叶片与涂层之间的切向力和法向力、摩擦系数、温升以及

叶尖磨损量等参数。试验后通过SEM和光学轮廓仪等对涂层刮痕形貌和叶片磨损状态进行表征,评估涂层的可磨耗指数和叶片友好性。

高温热稳定性是另一项重要评价指标。可磨耗涂层在长期高温服役中可能发生孔隙结构变化(烧结导致孔隙率下降)、润滑相氧化失效或基体相变,这些变化会影响涂层的可磨耗性和抗冲刷能力的平衡。热循环试验和高温时效试验结合后续刮磨测试,可以综合评价涂层在实际工况条件下的性能演变规律。

6 抗冲蚀与抗氧化热腐蚀涂层

6.1 冲蚀损伤机理与抗冲蚀涂层设计

高速固体颗粒对燃气轮机叶片表面的冲蚀是造成气动性能衰退的重要机制。冲蚀损伤的微观过程可分为两种主要模式:脆性冲蚀和塑性冲蚀。对于陶瓷类脆性材料,颗粒撞击以微裂纹萌生和扩展、微破碎和剥落为主要损伤方式;对于金属和合金等塑性材料,则以犁削、切削和挤压变形导致材料挤出和脱落为主。实际的冲蚀过程往往是两种模式的混合,具体以哪一种为主取决于颗粒特性(粒径、形状、硬度)、撞击角度和靶材的力学性能。

从涂层设计的角度,理想的抗冲蚀涂层应具备高硬度、适当的断裂韧性和良好的涂层/基体结合强度。纯硬质材料(如TiN、 Al_2O_3)虽硬度极高,但脆性较大,在颗粒撞击下易发生脆性断裂,特别是在斜撞击条件下抗冲蚀性能未必优于韧性更好的复合涂层。这一矛盾促使研究者发展出"硬质相+韧性相"的复合涂层体系, Cr_3C_2 -NiCr是其中最成熟和成功的一例。 Cr_3C_2 硬质颗粒(约 2000HV)提供抗磨能力,NiCr合金粘结相则赋予涂层一定的韧性,二者协同使涂层在高角度和低角度冲蚀条件下均表现出优良的抵抗能力。

多层涂层结构是近年来抗冲蚀涂层研究的重要方向。在TiN/TiAlN多层叠层结构中,相邻层的晶体结构和晶格常数的微小差异构成界面,这些界面既可作为裂纹偏转的屏障,也可通过界面滑移吸收部分冲击能量,从而有效提高涂层的抗剥落能力。此外,多层结构内的残余应力分布也可以通过层厚比和层数的设计加以优化。[15]

6.2 高温氧化与热腐蚀的基本机制

高温合金在燃气轮机热端服役中的氧化过程本质上是合金元素选择性氧化的结果。镍基高温合金中,Al、Cr和Ti是主要的抗氧化元素,它们与氧的亲合力高于Ni。在高温氧化初期,合金表面形成以 Cr_2O_3 为主的混合氧化物;随着氧化时间延长,由于Al的扩散速率和氧化物热力学稳定性优势, Cr_2O_3 层逐步被下方连续生长的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 层替代。致密的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 膜是优良的保护性氧化膜,其生长速率低、与基体的粘附性好,可有效阻挡氧的进一步向内扩散。

热腐蚀是氧化与熔盐侵蚀的协同过程。当燃料中的硫燃烧生成 SO_2/SO_3 后,与大气中的NaCl(海洋环境)或 V_2O_5 等结合,在叶片表面形成低熔点硫酸盐或钒酸盐熔融沉

积物。这些熔盐溶解并破坏氧化膜的保护性，加速基体材料的腐蚀消耗。热腐蚀的严重程度与温度密切相关，在约700–900°C区间因熔盐呈液态且流动性和活性最佳而最为剧烈，超过约1000°C后部分熔盐挥发导致腐蚀速率下降。

6.3 MCrAlY涂层的成分设计与制备

MCrAlY (M=Ni、Co或Ni+Co)是当前应用最广泛的抗氧化/抗热腐蚀包覆涂层材料。其成分设计遵循以下原则：Cr含量(15%–25%)保证抗热腐蚀性能和氧化膜的自修复能力；Al含量(5%–12%)确保形成和保护 α -Al₂O₃膜；Y(0.1%–1.0%)作为活性元素，通过偏聚于氧化膜晶界和降低硫的有害影响来显著改善氧化膜的粘附性；Co的添加可提高涂层的热腐蚀抗力，尤其在含V和S的劣质燃料工况下效果明显；Ni则主要贡献抗氧化性和与镍基高温合金基体的相容性。

MCrAlY涂层的制备工艺主要有LPPS、HVOF和APS。LPPS制备的涂层氧含量最低、成分控制最准确，适用于高要求的航空发动机叶片；HVOF制备的涂层致密、结合强度高，在成本和性能之间取得了良好平衡，是工业燃气轮机中最常用的工艺；APS虽成本最低，但因涂层中不可避免的氧化物夹杂和较高的孔隙率，其抗氧化性能通常逊于LPPS和HVOF涂层。

真空热处理是MCrAlY涂层制备后的关键工序。在约1000–1100°C的真空或低氧分压环境中保温数小时，可促进涂层与基体之间的元素互扩散、消除部分喷涂残余应力、促进 β -NiAl相的重结晶，并使涂层组织趋于均匀化。经过热处理的MCrAlY涂层在随后的高温服役中形成氧化膜的速度和粘附性都优于未经热处理的涂层。

6.4 扩散型铝化物涂层

扩散型铝化物涂层通过将Al原子扩散进入基体表面层，形成以 β -NiAl或Ni₂Al₃为主要相的金属间化合物层。与MCrAlY包覆涂层不同，铝化物涂层与基体之间不存在清晰的界面，而是通过互扩散形成成分渐变的过渡区，这种冶金结合方式使涂层具有极高的结合强度，在复杂热应力条件下不易发生界面剥落。[12]

CVD(化学气相沉积)是制备扩散型铝化物涂层最常用的方法之一，尤其适合于涡轮叶片的气膜冷却孔内壁涂覆。由于CVD依靠气相传输Al源，可在叶片的内外表面和冷却孔内部获得均匀的涂层厚度，这是LPPS和HVOF等视线喷涂方法所难以实现的。Pt改性铝化物涂层(Pt-Al)通过在渗Al之前在基体表面电镀Pt薄层，显著提高了涂层的抗热腐蚀性能，已广泛应用于舰船燃气轮机和海洋环境下服役的航空发动机涡轮叶片。Pt的有利作用机制包括：提高 β -NiAl中Al的活度，促进优先氧化Al而非Cr和Ni；改变氧化膜的界面结合状态，提高氧化膜的抗剥落能力；以及在热腐蚀环境中形成铂-硫化物，抑制硫向基体内部扩散。

7 涂层失效机理与寿命预测

7.1 热生长氧化物(TGO)主导的失效模式

热障涂层在高温服役过程中，粘结层中的Al与透过陶瓷层扩散而来的氧发生反应，在粘结层/陶瓷层界面处形成以 α -Al₂O₃为主的热生长氧化物层。TGO的正常生长是粘结层发挥抗氧化功能的必然结果，但TGO的持续增厚也是导致涂层最终失效的根本原因之一。

TGO致涂层失效的力学本质在于其与相邻材料之间的热膨胀系数失配。 α -Al₂O₃的热膨胀系数约 $8 \times 10^{-6}/K$ ，低于YSZ($10\text{--}11 \times 10^{-6}/K$)和高温合金/粘结层($14\text{--}16 \times 10^{-6}/K$)。在热循环降温过程中，TGO层的收缩量小于相邻层，导致TGO承受压应力而相邻的陶瓷层和粘结层承受拉应力。与此同时，TGO在高温生长过程中由于Al₂O₃新相的生成(Pilling–Bedworth比约为1.28，即Al₂O₃的摩尔体积大于消耗的Al的体积)会产生体积膨胀，在TGO内部和界面处引入额外的生长应力。这两种应力机制的叠加，使TGO/陶瓷层界面前沿形成显著的应力集中区，当应力超过材料的临界值时，微裂纹在界面处萌生，沿陶瓷层内部或沿TGO/陶瓷层界面扩展，最终导致涂层的层状剥离。通常认为，当TGO厚度超过约8–10 μm 时，涂层剥落的风险急剧升高。

TGO的生长动力学一般服从抛物线规律： $\delta^2 = k_p \cdot t$ ，其中 δ 为TGO厚度， t 为时间， k_p 为抛物线速率常数，后者与温度满足Arrhenius关系。这说明TGO的生长速率随温度升高呈指数级增长，因此服役温度的小幅提升将对涂层寿命产生显著影响。

7.2 热循环应力与疲劳失效

在燃气轮机的启停循环中，热障涂层经历剧烈的温度变化(从室温升至约1000°C以上再降至室温)，各层材料之间热膨胀系数失配产生的热应力在每个循环中都发生加载–卸载。虽然垂直裂纹和柱状结构等设计可以在一定程度上释放面内应力，但近界面区域的应力状态依然复杂。

热循环对涂层损伤的影响体现在两个方面：一是TGO在循环中加速生长(因为每次升温都伴随短暂的“高温窗口”)，二是热应力循环本身具有疲劳特性，可在涂层内部累积损伤。在界面粗糙度较大或有尖角缺陷的位置，应力集中尤为突出，往往是裂纹优先形核的位置。大量实验表明，APS层状结构热障涂层在约1100°C的热循环寿命通常为数百至数千次(取决于涂层厚度和具体工况)，而垂直裂纹结构和PS–PVD柱状结构涂层可将寿命提高数倍。

7.3 CMAS高温腐蚀

CMAS(CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂)是大气环境中常见的沙尘和火山灰的主要成分。在约1200°C以上，CMAS矿物熔融为液态玻璃相，通过热障涂层表面的开孔隙和微裂纹渗入涂层内部。熔融CMAS对YSZ具有强烈的化学侵蚀作用：熔体中Ca、Mg、Si等阳离子可取代YSZ晶格中的Zr⁴⁺，同时引入电荷补偿缺陷，导致稳定的四方相失稳分解为单斜相和立方相，伴随体积变化和热导率升高。在CMAS渗透层与未渗透层之间，由于热学和力学性能的突变，冷却过

程中常产生贯穿性裂纹，严重时可导致整个涂层剥落。

CMAS侵蚀的程度取决于涂层材料的化学组成、孔隙结构和工作温度。稀土锆酸盐因与CMAS反应生成致密的磷灰石（Apatite）阻挡层，可有效阻止熔融CMAS的进一步渗透，因此在抗CMAS性能方面优于YSZ。表面镀Al等改性处理也被证明可在涂层表面预先形成保护层，延缓CMAS的渗透速率。

7.4 寿命预测方法与模型

热障涂层寿命预测的核心目标是在已知服役工况（温度历程、热循环次数、环境介质等）的条件下，估算涂层的剩余寿命或判定涂层是否达到安全使用期限。目前主要有以下几种方法：

基于TGO临界厚度的寿命模型是最简单且应用较广的工程方法。通过Arrhenius型TGO生长动力学方程计算特定温度-时间条件下的TGO厚度，当TGO厚度达到临界值（通常取6-12 μm ，具体取决于涂层体系和部位）时判定为寿命终结。该方法的优点是参数物理意义明确、计算简便；缺点是没有考虑热循环周次和应力状态的影响，在温度波动大的工况下预测精度有限。

基于断裂力学的裂纹扩展模型以Paris公式为基础，将热循环导致的裂纹扩展速率与应力强度因子幅值关联起来。这类模型需要借助有限元分析计算涂层内部的应力分布和应力强度因子，并需要大量的裂纹扩展实验数据来标定材料常数，计算量大但预测精度较高。

基于损伤累积的方法将涂层在热循环中的性能退化视为损伤参数单调累积的过程，每经过一个循环，涂层中的应变能密度或某种损伤指标增加一个增量，当累积损伤达到临界值时判定失效。这类方法可以灵活地处理变幅载荷谱，且可与实验观测（如涂层刚度下降、热导率升高）建立关联。

近年来，机器学习方法在热障涂层寿命预测领域的应用开始受到关注。通过收集大量的涂层工艺参数、微观结构表征数据和热循环试验数据，训练人工神经网络或支持向量回归等模型，可实现涂层寿命的快速预估。这类数据驱动方法的预测精度高度依赖于训练数据的覆盖范围和质量，目前尚处于探索阶段，但有望在数据库逐步完善后成为辅助涂层设计和寿命管理的重要工具。

8 未来展望

8.1 新型涂层材料的探索

涂层材料创新是推动热喷涂技术发展的源动力。在超高温热障涂层领域，未来10-15年的研究重点将围绕以下几个方向展开：

稀土锆酸盐/钽酸盐体系的实用化。 $\text{Gd}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 、 $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ 和 GdTaO_4 等材料在实验室尺度上已证实了优于YSZ的相稳定性、抗烧结性和抗CMAS性能，但它们的断裂韧性和抗热冲击能力仍需通过第二相增韧、层状结构设计和梯度过渡等手段加以改善。将这些材料与YSZ复合使用，构成双层或多层热障涂层系统，是短期内最有希望实现工程应用的

技术路径。

高熵氧化物陶瓷。将高熵合金的设计理念推广至氧化物陶瓷领域，通过在锆酸盐或钽酸盐晶格中同时引入多种稀土阳离子，可进一步降低热导率（因晶格畸变增强声子散射）并提高相稳定性和抗CMAS能力。高熵稀土锆酸盐的合成和喷涂工艺正在积极开发中。

自修复涂层。在涂层中掺入可在特定温度下熔融流动并封填裂纹的修复剂（如玻璃相或贵金属），使涂层在服役过程中的微裂纹能够被自动愈合，是延长涂层寿命的前瞻性方向。该概念已在实验室得到初步验证，但修复剂与基体材料的相容性和修复效率仍需深入优化。

8.2 工艺装备与智能制造

喷涂工艺装备的进步将在未来继续扮演关键角色：

智能过程控制。基于光学传感器（如高速摄像、红外测温、激光散射）对喷涂射流中的粒子温度、速度和飞行轨迹进行实时监测，并结合机器学习算法建立工艺参数-粒子状态-涂层性能的映射关系，有望实现涂层质量的在线预测和闭环控制。这一方向在APS和HVOF工艺中已取得初步进展，正在向工业应用推进。

机器人自动化喷涂。燃气轮机大型部件（特别是重型燃机的涡轮导向叶片和燃烧室）的几何形状复杂，传统手工或简单机械喷涂在涂层厚度均匀性和批次一致性方面存在局限。基于离线编程和在线路径规划的多轴机器人喷涂系统，可实现复杂型面部件涂层厚度的高精度控制（公差可控制在 $\pm 25 \mu\text{m}$ 以内），大幅提高涂层的成品合格率。

数字化喷涂车间。将工艺参数、粉末批次信息、涂层检测数据和部件服役履历等进行全流程数字化管理，建立可追溯、可分析、可优化的数据闭环，是热喷涂从“手艺活”向“科学工程”转变的关键一步。

8.3 环境友好型涂层技术

在全球可持续发展议程的大背景下，热喷涂技术的环境友好化也势在必行：

无铬涂层技术。传统抗腐蚀涂层中六价铬的使用正面临越来越严格的法规限制，无铬锌铝涂层和新型稀土转化膜涂层是可行的替代方案，其耐腐蚀性能已达到或接近含铬涂层的水平。

水基悬浮液。在SPS技术中，使用水替代有机溶剂作为悬浮介质不仅大幅降低了VOC排放和安全隐患，还显著节约了材料成本，是SPS走向大面积工业化应用的关键突破。

废旧涂层回收。退役燃气轮机叶片上的热障涂层和粘结层含有大量贵金属（Ni、Co、Cr、Y等），开发高效、低成本的涂层剥离和材料回收技术，对于节约战略资源和降低全生命周期环境负荷都具有重要意义。

9 结论

本文系统综述了热喷涂技术在燃气轮机领域的应用研究现状与发展趋势，主要得出以下结论：

1) 燃气轮机压气机、燃烧室和涡轮三大部件的服役工

况差异显著,对涂层提出了抗微动磨损、抗冲蚀、隔热、抗氧化、抗热腐蚀和可磨耗密封等多样化功能需求,热喷涂技术凭借其材料选择灵活性和工艺多样性,成为满足这些需求的核心技术手段。

2) 大气等离子喷涂 (APS) 以其宽广的可喷涂材料范围和良好的经济性,是热障涂层和可磨耗密封涂层最主要的制备工艺;超音速火焰喷涂 (HVOF) 凭借其低温高速的工艺优势,在MCrAlY粘结层和碳化物耐磨涂层制备中占据主导地位;低压等离子喷涂 (LPPS) 和等离子喷涂-物理气相沉积 (PS-PVD) 则为高品质抗氧化涂层和先进柱状结构热障涂层提供了不可替代的技术平台;悬浮液等离子喷涂 (SPS) 在成本和性能之间提供了新的平衡点,发展潜力巨大。

3) 以YSZ为面层、MCrAlY为粘结层的双层结构热障涂层是当前应用最广泛的体系,但在超1200°C的长期服役中面临烧结、相变和CMAS侵蚀等瓶颈。垂直裂纹结构APS涂层和PS-PVD/SPS柱状结构涂层通过微结构优化显著提升了涂层的应变容限和寿命,稀土锆酸盐和高熵氧化物等新型材料体系为突破温度极限提供了希望。

4) 可磨耗密封涂层通过多相复合和可控孔隙实现了"易刮削"与"抗冲刷"的统一,是提高燃气轮机效率和保障运行安全的重要技术措施;Cr₃C₂-NiCr和MCrAlY涂层分别在抗冲蚀和抗氧化热腐蚀方面发挥着不可替代的防护作用。

5) 涂层失效受TGO生长、热循环应力和CMAS腐蚀等多因素耦合控制,基于TGO临界厚度、断裂力学和损伤累积的寿命预测方法从不同层面为涂层设计和服役管理提供了依据。

6) 未来热喷涂技术在燃气轮机领域的发展,将在新型涂层材料创制、智能制造工艺开发和环境友好技术应用三个维度协同推进,持续支撑燃气轮机向更高温度、更高效率和更长寿命方向演进。□

参考文献

- [1] 罗丽荣, 陆杰, 蔡黄越, 等. 大气等离子喷涂热障涂层界面设计及寿命优化研究进展[J]. 热喷涂技术, 2025(1).
- [2] 李长久. 热喷涂技术应用及研究进展与挑战[J]. 热喷涂技术, 2018, 10(4): 1-22.
- [3] 崔慧然, 李宏然, 崔启政, 等. 航空发动机及燃气轮机叶片涂层概述[J]. 热喷涂技术, 2019, 11(1): 82-94.
- [4] Sporer D, Girgulis J, Dambra C, et al. 采用级联式喷涂技术喷涂钕稳定氧化锆热障涂层的解决方案[J]. 热喷涂技术.
- [5] 广东省科学院新材料研究所. PS-PVD技术入选“2025中国表面科技十大进展”[EB/OL]. 2025.
- [6] 傅维文. 悬浮液等离子喷涂热障涂层抗热震性能研究与工程化应用[D].
- [7] Bertuol K, Arendarchuk B E, Stoyanov P. An Overview of Metallic Abradable Coatings in Gas Turbine Engines[J]. Coatings, 2025, 15(10): 1216.
- [8] C é leste G, Billi è res D, Bjorklund S, et al. 等离子喷涂 (CPS) 是一种新型的稳健工艺[C]//热喷涂技术杂志, 2026.
- [9] 热障涂层界面结构喷砂表面重熔3D结构裂纹扩展[J]. 热喷涂技术.
- [10] Padture N P, Gell M, Jordan E H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications[J]. Science, 2002, 296(5566): 280-284.
- [11] Clarke D R, Oechsner M, Padture N P. Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines[J]. MRS Bulletin, 2012, 37(10): 891-898.
- [12] VaBen R, Jarligo M O, Steinke T, et al. Overview on advanced thermal barrier coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 205(4): 938-942.
- [13] 官声凯, 徐惠彬. 热障涂层材料与结构的研究进展[J]. 航空材料学报, 2016, 36(3): 1-11.
- [14] 刘培生, 朱敏, 刘阳. 热障涂层失效机理的研究进展[J]. 材料导报, 2019, 33(21): 3571-3578.
- [15] 王铀, 刘燕, 王磊. 悬浮液等离子喷涂热障涂层的研究进展[J]. 中国表面工程, 2020, 33(6): 1-12.

作者简介:李彦泽,男,工程师,主要研究动力系统和涂装技术。

收稿日期:2026-04-09

修回日期:2026-05-18

接受日期:2026-06-13

版权为作者所有。本文为开放获取文章,遵循知识共享署名(CC BY)许可协议(<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)的条款和条件进行发布。

Copyright by the authors. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).