doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190315001

PS-PVD 等离子射流特性的光谱诊断研究进展

张 岩^{1,2},邓畅光²,毛 杰²,邓子谦²,罗志伟¹

(1. 中南大学 材料科学与工程学院,长沙 410083; 2. 广东省新材料研究所 现代材料表面工程技术国家工程实验室,广州 510650)

摘 要:等离子喷涂-物理气相沉积(PS-PVD)作为一种新型喷涂技术融合了气相沉积与喷涂工艺两者的优点,其射流 特性决定了涂层的结构与性能。光学发射光谱法(OES)作为一种等离子射流特性诊断技术,能实现射流特性原位检 测,是判断射流内气化现象的有力手段。文中介绍了粉末送入前后及射流接触基体后射流特性的变化,展示了局部 热力学平衡(LTE)假设及展宽理论下射流中各粒子状态的计算,探索了射流不同区域的传质传热等活动。Ar/He具有 最高的温度,Ar具有高焓值对粉末的加热起主要作用,He凝聚射流能量对粉末的加热气化起关键作用,H2会扩展射 流宽度降低射流温度易形成带有致密层的柱状结构。结合射流数值模拟和射流光谱图可知,喷枪内复杂的热交互作 用是粉末加热的主要原因,喷嘴处膨胀/压缩区发生热能与动能的交替转换,而射流中后段由于低压与高温继续发生 气化现象,达到峰值后射流处于冷凝降温阶段,部分气相原子凝聚成团簇状粒子。文中还总结了功率、电流和送粉率 等对等离子射流特性的影响等。

关键词: 等离子喷涂-物理气相沉积; 等离子射流特性; 光学发射光谱; 热障涂层; 局部热力学平衡 中图分类号: TG174.44 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007–9289(2019)05–0055–14

Research Progress in Spectroscopic Diagnosis of Plasma Jet Characteristics Under PS-PVD

ZHANG Yan^{1,2}, DENG Changguang², MAO Jie², DENG Ziqian², LUO Zhiwei¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China; 2. National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Guangdong Institute of New Materials, Guangzhou, 510650, China)

Abstract: Plasma spray-physical vapor deposition (PS-PVD), as a new spray technology, combines the advantages of both vapor deposition and thermal spray processes. The plasma characteristics determine the micro structure and properties of the coatings. As a plasma jet characteristic diagnosis technology, optical emission spectroscopy (OES) can realize the in-situ detection of jet characteristics, which is a powerful means to judge the evaporation phenomenon in the jet. This paper introduced the changes of jet characteristics before and after the powder was inject and after the jet impacted the substrate. It shows the calculation of the state of each particle in the jet under the assumption of local thermodynamic equilibrium (LTE) and the theory of broadening, and explores the activities of mass and heat transfer in different regions of the jet. Ar/He has the highest temperature, and Ar has a high enthalpy value, which plays a major role in evaporating the powder. The He condensed jet energy plays a key role in the heating and evaporation of the powder. H₂ expands the jet width and reduces the jet

收稿日期: 2019-03-15; 修回日期: 2019-06-25

通信作者: 毛杰 (1979—), 男 (汉),教授级高级工程师,博士;研究方向: 高温功能涂层; E-mail: maojie@gdinm.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51771059); 广东省科技计划项目 (2014B070705007, 2017A070701027, 2017B030314122); 广东省科学院项目 (2019GDASYL-0104022, 2017GDASCX-0111)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51771059), Science and Technology Project of Guangdong Province (2014B070705007, 2017A070701027, 2017B030314122) and Guangdong Academy of Sciences Project (2019GDASYL-0104022, 2017GDASCX-0111)

引用格式:张岩,邓畅光,毛杰,等. PS-PVD 等离子射流特性的光谱诊断研究进展[J].中国表面工程,2019,32(5):55-68. ZHANG Y, DENG C G, MAO J, et al. Research progress in spectroscopic diagnosis of plasma jet characteristics under PS-PVD[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(5): 55-68.

temperature to form a mixed layer with dense and columnar structure. Combined with simulation calculation and spectroscopy of the jet, it is known that the complex thermal interaction in the spray gun is the main reason for powder heating. The thermal energy and kinetic energy are alternately converted in the expansion/compression zone at the nozzle, and the middle and rear sections of the jet continue to vaporize due to low pressure and high temperature. After reaching the peak, the jet is in the stage of condensation and cooling, and some of the vapor phase atoms are agglomerated into cluster-like particles. The effects of power, current and powder feeding rate on plasma jet characteristics are also summarized.

Keywords: plasma spray-physical vapor deposition (PS-PVD); plasma jet characteristics; optical emission spectroscopy(OES); thermal barrier coatings; local thermodynamic equilibrium (LTE)

0 引 言

在现代航空航天、能源、冶金化工等领域,高 温合金及高温防护涂层是不可缺少的重要部分^[1-2], 而航空发动机热端部件的发展则令人格外的关 注。热障涂层 (TBCs) 作为发动机叶片的三大关键 技术之一被寄予厚望,Y2O3 部分稳定 ZrO2(YSZ) 陶瓷因其低导热性、耐热性、化学惰性、良好的耐 腐蚀性和耐磨性以及与金属相容的热膨胀系数, 被认为是理想的热障涂层材料^[3-4]。TBCs 用作发动 机热端部件的热保护层不仅可以提高部件可靠 性,提高工作温度,而且可以提高效率和改善环 境效益^[5]。

等离子喷涂-物理气相沉积 (PS-PVD) 工艺是 近年来发展起来的一种新型喷涂工艺,其目的是 在短时间内获得均匀、薄的涂层。在沉积工艺方 面,气相法 (PVD 或 CVD) 和热喷涂法是制备具 有不同微观结构特征的 TBCs 最常用的方法^[7]。所 有传统热喷涂方法的共同之处在于涂层的形成是 通过熔融或半熔融涂层材料实现的。与热喷涂技 术相反,物理气相沉积 (PVD) 工艺在低环境压力 (~10⁻² Pa) 下从气相中形成涂层^[8]。PVD 涂层可以 非常均匀、薄、致密,或者可以具有特殊设计的 微观结构。但是沉积效率低、成本高、只能覆盖 直接接触面,凹形或复杂几何形状的部件很难沉 积到^[9]。通过电子束物理气相沉积 (EB-PVD) 工艺 沉积的 YSZ 涂层[10-12] 表现出特殊的柱状晶粒结 构,沿着垂直方向从基板表面生长,具有较高的 热冲击性能和应变耐受性。而传统热喷涂技术, 例如大气等离子喷涂 (APS), 沉积效率高, 成本 低,可以沉积复杂几何面,制备的 TBCs 具有致 密的层状结构和良好的隔热性能,但抗热冲击性 能差。

为了将两种工艺之间的优势进行互补,Sulzer Metco 基于低压等离子喷涂 (LPPS) 工艺发展了具

有蒸发材料气相沉积方式的热喷涂工艺,称为 PS-PVD^[9,13-14]。PS-PVD 技术采用大流量真空泵,真 空容器内的动态工作压力降到 50~200 Pa,等离子 射流长度超过 2000 mm,直径为 200~400 mm,由 于其配置大功率喷枪 (可达 180 kW),射流温度能 达到 6000~12 000 K^[15]。具有非视线沉积的特点,可 以沉积几何形状复杂的部件。沉积方式不仅有液 相沉积,而且可以发生纳米团簇和气相沉积,这 为获得先进的微观结构提供了新的途径,从而满 足对现代功能涂层不断增长的需求,为热喷涂技 术的应用提供了新的机遇^[16]。

为了开发这种新型气相沉积的潜力,必须更 好地了解等离子体射流特性及其对工艺条件的依 赖性[17]。在喷涂过程中,等离子射流的温度、速 度、焓值等射流特性决定了粉末粒子的物相状态 和速度,进而影响涂层与基体的结合强度及涂层 自身性能。因此,等离子射流特性诊断是基础研 究和生产应用中需要首先解决的一个问题[18]。常 用的等离子射流诊断技术包括发射光谱仪、热焓 探针^[19]、DPV-2000^[20]和计算机断层扫描^[16]等。 DPV-2000 只能探测飞行中的熔融颗粒,对于粉末 气化后的状态无法监测。Gindrat^[21]对等离子体射 流特性的研究发现,低压条件下粒子的平均自由 程甚至大于静电探针的尺寸,不能对低压热等离 子体中的电子密度和温度进行准确测量;另外, 使用热焓探针法测量低压等离子体射流时,探针 前会形成激波,且在高温流态下焓探头稳定性不 足,大大缩短探头寿命。所以在 PS-PVD 工艺下 很难通过诸如静探针法或特定焓探针测量[22-24]的 诊断获得关于等离子体射流的精确数据和信息。

因此,对等离子体射流的诊断多采用非侵入 式的光学发射光谱 (OES) 测量法。利用这种方 法,可以获得等离子体的一些基本特征,如通过 记录不同激发态的特征发射谱线来获得电子温度 (Te)^[25]和利用谱线的 Stark 展宽计算电子密度 (Ne)^[26]等。目前通过光学发射光谱对等离子体射 流特性诊断已经进行了大量的研究,对在不同喷 涂参数下进行的 PS-PVD 进行了大量的发射光谱 测量,并分别对发射光谱进行了整个谱图的元素 标定、局部放大对比和提取数据进行模拟计算处 理,并一一对照涂层的微观结构和性能,得出了 众多可行性结论。

1 发射光谱诊断原理

光谱分析包括发射光谱、吸收光谱、荧光光 谱和拉曼光谱等,其中发射光谱是应用最广泛的 一种等离子体诊断方法^[27-29]。原子发射光谱是由原 子中核外电子受到外来能量作用,激发跃迁到激 发态,再由高能态回到各种低的能态或基态时, 以辐射形式放出其激发能而产生的光谱^[30]。发射 光谱仪是研究热喷涂等离子体的一种重要的诊断 设备,通过测量元素的气态原子或离子激发后所 发射的特征谱线,根据谱线的波长和强度从而判 断物质中各粒子的状态、组成和含量。

发射光谱仪通常包括光源、色散系统和检测 系统,光电直读仪器还包括数据处理及系统控制 系统。光源用以提供激发态粒子及其发射的辐 射;色散系统是将发射的各种波长的辐射按波长 顺序展开为光谱;检测系统则是对不同波长的辐 射进行检测并进行相应的处理,获得最终的测量 结果^[30]。其原理如图 1 所示。





发射光谱仪通过光纤从外界接收到的光信号 通过入射狭缝 A,经过准直光镜 B 反射后变成平 行光到达分光设备 C。分光设备包括棱镜分光和 光栅分光两种。棱镜分光是利用棱镜对不同波长 辐射的折射率不同进行分光,其分辨能力与棱镜 的材料和几何尺寸息息相关;而光栅分光是利用 光的衍射现象进行分光,通过多缝干涉和单缝衍 射一起产生作用,其中多缝干涉与光谱线的空间 位置有关,单缝衍射则决定了各级光谱线的强 度^[31]。经过分光设备后,入射光被分解为不同波 长的谱线,分解后的光经聚焦镜聚焦D后,传入 检测系统E。检测方法分为早期的摄谱法和现代 的光电转换法。现代光谱仪已经普遍采用光电转 换元件——光电倍增管或固体检测器将光信号转 换为电信号进行测定,这就是所谓的直读光谱仪。

2 光谱诊断现状及应用

光谱分析是利用物质的电磁辐射所形成的光 谱分析测定物质的组成及状态,应用最早的是原 子发射光谱 (AES),其对早期元素的发现发挥了 至关重要的作用,由于 AES 是利用原子发射特征 谱线进行元素分析的,具有多元素同时、直接测 定的优点,因此广泛应用于各个领域,如对钢铁 及其合金,有色金属及其合金等^[32]进行定性和定 量分析;对水质样品^[33]和环境样品^[34]进行检测; 通过分析矿石或矿物样品判断地矿中元素的组 成等^[35]。

20世纪 50年代出现的原子吸收光谱 (AAS), 促进了原子光谱的发展。随着等离子体光源的应 用及光电转换器等电子技术的发展,出现了电感 耦合等离子体原子发射光谱 (ICP-AES)分析法, 兼具多元素同时与灵活性及稳定性的特点,把发 射光谱分析技术推向了一个新的发展阶段。

原子发射光谱分析不仅在冶金、地质、机械 制造等传统领域中作为定性和定量分析的工具, 而且扩大到农业、食品工业、生物学、医学核能以 及环境保护等新领域。光谱仪器制造技术的不断 提高,特别是中阶梯光栅交叉色散和固体检测元 件等新技术,使得今后发射光谱仪在直读方面成 为一种发展趋势。目前,国内外进行的 PS-PVD 等离子射流的许多研究正是基于光谱学诊断新发 展的技术和仪器。

3 PS-PVD 的光谱诊断

3.1 PS-PVD 光谱诊断的重要性

热障涂层作为发动机涡轮叶片的三大关键技 术之一,获得高隔热、长寿命热障涂层一直是研 究关注的目标,积极探索新型涂层制备技术是实 现目标的必由之路^[36]。目前常用的两种沉积方法 APS 和 EB-PVD^[37-38] 都存在自己的缺点,而基于 低压等离子喷涂工艺 (LPPS,又称为真空等离子 喷涂)开发的等离子喷涂-物理气相沉积 (PS-PVD) 结合了两者的优势,是一种很有前途的新技术^[39]。

随着热喷涂涂层的应用越来越广泛,两个主 要研究问题变得越来越突出:一是加快开发新工 艺、制备更先进的功能性涂层,二是监控加工过 程以确保质量可靠和生产可持续。即随着热喷涂 涂层的质量要求越来越高,需要不断发展新的表 征技术,实现工艺过程在线诊断,达到涂层性能 和质量的实时监测和动态控制^[18]。已知的诊断技 术包括设备诊断、送粉诊断、涂层诊断和等离子 体射流特性诊断,如图2所示。前3种已经实现 常态化诊断,等离子射流特性诊断还处于研究 状态。



图 2 PS-PVD 喷涂过程的诊断示意图



等离子射流诊断技术是表征等离子喷涂射流 特性、辅助研究等离子射流与喷涂粉末粒子间复 杂的热动力学交互作用和验证等离子喷涂模拟研 究结果的重要手段。通过测量这些特性来控制喷 涂的过程与结果,虽然目前作用机理和影响效果 都没有被完全地理解,但这些内部过程变量的微 小变化可以被检测出来,从而指导设备的检查和 纠正措施以及对涂层质量优劣的初步判断。

由于 PS-PVD 技术采用大功率喷枪,使得 YSZ 粉末发生气化,传统的飞行粒子检测设备(如 DPV-2000,高速 CCD 相机)无法测量,各种探针 技术受侵入式测量的扰动而缺乏准确性,因此需 要使用发射光谱仪^[40] 对气相材料进行表征。目前 针对 PS-PVD 的研究多是对不同工艺参数下的喷 涂结果的理论解释与性能表征,包括不同涂层微 观结构的组成与形成机理,沉积效率与性能特 点,以及涂层的失效机制等,而等离子射流特性 诊断技术的研究是相对滞后的。但随着 PS-PVD 基础理论研究的深入和涂层技术应用的拓 展,研究人员越来越关注连接工艺参数与喷涂结 果的中间环节研究,即等离子射流特性诊断技 术。它不仅可以帮助理解喷涂研究结果,还可以 支持优化喷涂工艺,实现喷涂过程的动态监控。

3.2 PS-PVD 光谱诊断试验

目前进行的光谱诊断试验大多在 Sulzer Metco PS-PVD 系统 (Sulzer Metco, Wohlen, Switzerland) 上进行,该系统是对现有常规 LPPS 系统的全面 重建产生的^[17]。使用大功率的 O3CP 喷枪,低真 空环境,射流更长更粗,因此,颗粒速度和温度 在射流截面上分布更加均匀^[41]。为了确保注入的 粉末发生气化,采用了细粒度的原始粉末,开发 了专用 7%~8%(质量分数)氧化钇部分稳定氧化锆 (YSZ, Sulzer Metco M6700)粉体,氧化钇稳定剂 能防止氧化锆相变^[42])。激光粒度仪显示颗粒的大 小为 $d_{10} = 2 \mu m, d_{50} = 8 \mu m, d_{90} = 18 \mu m$ 。等离子射 流的研究方法为采用不同的 PS-PVD 喷涂参数制 备 YSZ 的 TBC 涂层,喷涂过程中通过光学发射 光谱仪 (OES) 等一系列诊断设备进行监测,如 图 3 所示。

发射光谱仪用来确定等离子体特性,表征等 离子射流中气化粒子的发射特性。等离子体辐射 通过硼硅酸盐玻璃窗口和消色差透镜采集,通过 光纤传输到入口狭缝和检测的 CCD 阵列。调控 好 OES 的各种参数后,进行光谱诊断。OES 使用 前,用汞灯进行校准。DPV-2000,用于探测飞行 中的熔融颗粒。红外(IR)相机,用于控制基板温度。





图 3 PS-PVD 诊断装置布置示意图^[9]

Fig.3 Schematic diagram of PS-PVD diagnostic device layout^[9]

3.3 PS-PVD 射流特性光谱诊断

研究等离子射流特性的本质是为了搞清楚不 同的等离子气体组合下射流的形貌、温度、速度 及成分分布等特性,常用的等离子气体有 Ar、 He、H₂和 N₂,在超低压条件下,使用这几种气体 混合作为等离子发生气体时,产生的射流特性都 有所不同[43-45]。影响等离子射流特性的因素有很 多,不同等离子气体组合、功率、腔室压力;不 同喷距(轴距,距喷枪口的轴向距离)和径向距离 (距射流中心轴线的距离)的等离子射流特性各有 差异,但究其根源,不同等离子气体的混合对射 流特性的影响是根本。使用光学发射光谱仪 (OES) 对等离子射流特性进行诊断时,测量得到 的强度是光路上的累积强度,为了准确地描述等 离子体内部某一局部区域的辐射性质,可以进行 Abel 转换将其化为射流径向上各个局部区域的 强度。

Mauer G^[17,46] 采用不同的等离子气体制备 TBCs 来研究等离子射流特性,喷涂参数如表 1。 在不同等离子气体组合下通过调控电流大小以保 证净功率的相同。运用玻尔兹曼绘图法计算出不 同轴距下的电子温度,谱线展宽理论计算了电子 密度,并分析对比了 Ar/He 和 Ar/He/H₂ 不同等离 子气体组合下的特性值,如图 4。

图 4(a)(b) 显示较低腔室压力 200 Pa 时,温度 变化较平缓,可以认为在低压测量范围内射流中 后段特性更加均匀。较高的腔室压力下,沿着喷

表1 等离子喷涂参数117

Table 1	Parameters of Plasma spray ^[17]	
		_

	Parameter A	Parameter B
Plasma gas/(L·min ⁻¹)	Ar 35 / He 60	Ar 35 / He 60 / H ₂ 10
Current/A	2600	2200
Net power/kW	60	60
Pressure/Pa	200-1000 (varied)	200-1000 (varied)
Spray distance/mm	300-1400 (varied)	300-1400 (varied)

射轴的静压和温度变化更加明显,等离子体特性 发生大的波动,显示出超低压等离子射流明显的 偏离平衡状态。通过图 4(a)(b)可以发现 Ar/He 比 Ar/He/H₂ 拥有更高的等离子温度值。图 4(c)(d) 显 示随着轴距的增加,电子密度和电离度均呈减小 趋势。综合图 4 可得,H₂ 的加入会使等离子温度 降低,结合 Mauer G^[47]关于射流径向特性的研究 可知,H₂ 会使等离子射流变宽,使径向温度分布 变平,这对原料的加热和微观结构都有影响。

王凯^[31]也曾经对不同等离子气体组合下射流 特性进行研究与计算,发现随着轴距的增加电子 温度呈下降趋势,对轴距 950 mm 处进行射流径 向成分分布及特性计算发现,H2 加入后使得电 子温度降低并趋于平缓分布,与图 4 结果相符。 Chen X 等^[48-50] 开发了等离子射流建模方法,采用 气体动力学理论编译了等离子射流气体动力学 CEA2 代码^[51-52],分别计算了 Ar/He、Ar/He/H2 和 Ar/H2 下的等离子射流特性,结果显示 Ar/He 参数具有 最高的温度,加入 H2(Ar/He/H2 参数)后由于氢电 离的能量消耗降低了温度,而具有等离子体气体 的最高质量密度的 Ar/H2 参数的温度最低。

Liu M J 等^[53]利用 Ansys Fluent 16.0 对 Ar100H₂10 的等离子体射流进行了模拟仿真计 算,计算结果如图 5。可以明显看出射流初段有 膨胀区和压缩区的不断交替,温度、速度和压力 会进行交替变化,但整体呈减弱趋势。文魁^[54] 曾 对 Ar35He60H₂10 进行了射流特性模拟仿真,得 出相似的结论。这种模拟计算直观简洁,可以为 等离子射流特性光谱诊断结果进行佐证,但 Ivchenko 等^[55]的结果表明,在LTE 假设下,模拟 低估了射流半径和下游温度。

根据表1中的喷涂参数,MauerG同时研究 了腔室压力对等离子射流特性的影响。ZhangN 等^[6]对H_β进行了一系列研究,发现非氢谱线易受



图 4 不同射流轴距和腔室压力下的等离子特性计算结果[17]









离子动力学影响^[50], 谱线太窄, 应用 H_β (486.13 nm)^[57] 线通过 Strak 效应展宽理论可以准确地获得电子密 度的计算结果, 所以选择不同腔室压力下 H_β 的强 度变化来进行比较说明。结果说明较高压力下, 谱线累积强度值更大,处于激发态的H更多,等 离子温度更高,结果与图 4(b)相符。

Semenov S^[58]研究了不同功率下的等离子射流 特性,发现随着功率的增大等离子射流温度增 高,且随着轴距增大温度下降趋势趋于平缓。孙 成琪^[40]总结了电流强度对发射光谱测量强度的影 响,发现不同的探测距离下,随着电流的增加, 等离子体的电子温度都会增加;电流值固定后, 计算得到的电子温度随轴向逐渐降低。

3.4 PS-PVD 送入 YSZ 粉末后射流特性光谱诊断

热障涂层的制备材料和涂层结构对性能有着 很大的影响,而涂层的微观结构与射流中粉末状 态和射流接触基体后粉末状态的变化有关^[59],OES 更多的用来研究前者。影响粉末进入等离子射流 后状态的重要因素是射流不同区域对粉末的加热 效果,所以等离子射流特性的光谱诊断对热障涂 层的制备及性能至关重要。

图 6 为送入粉末前后不同气体组分的射流 图^[31],可以看出粉末送入前 Ar/He 的射流直径小 于 Ar/He/H₂, 说明 He 具有约束射流的作用, H₂ 具有扩展射流的作用,所以一定程度上可以反映 Ar/He 具有更高的射流温度, 与图 4 结论相符。 送入粉末后,等离子射流直径变小,亮度增加并 且出现分层现象, 这表明 7YSZ 粉末的加入不仅 起到了聚集等离子射流的作用,而且还影响了各 成分在射流径向上的分布。Ar/He 等离子射流直 径最小,亮度最高,没有明显的分层现象,说明 Ar/He 具有最好的传热能力,粉末可能具有最高

的气化量,各成分更多的聚集在径向中心;Ar/He/ H2和Ar/H2的等离子射流在送入7YSZ粉末后分 层现象较为明显,焰流中心出现高亮度区域,但 整体分布比较均匀,射流直径更大,说明H2具有 扩展射流的作用,且 Ar/He/H2 射流中高亮度区域 明显大于 Ar/H₂ 射流。

Mauer G^[17,46] 将表1中参数 A 和 B 喷涂得到的 涂层进行 SEM 结构表征,如图 7 所示。图 7(a) 是 明显的柱状结构,图7(b)是有局部冷凝结构的致





(c) Ar35He60H₁₀





(d) Ar35He60H₁₀ + YSZ



(e) Ar35He60



(f) Ar35He60 + YSZ

图 6 送入 7YSZ 粉末前后不同气体组分的射流[3] Fig.6 Jet of different gas composition with/without injection of 7YSZ powder[31]



(a) Columnar coatings from nano-sized clusters and vapor phase, parameter A, chamber pressure of 200 Pa



(b) Mixed mode deposition from liquid splats, nano-sized clusters, vapor phase; parameter B, chamber pressure of 200 Pa

图 7 不同涂层的微观结构[17] Fig.7 Microstructure of different coatings^[17] 密结构。柱状结构的生成离不开 YSZ 大量的气化,而冷凝结构是 YSZ 粉末发生了部分气化所致。这也很好的印证了上述观点,Ar/He 等离子射流具有最高的温度。

以 Ar35He60 为例, 王凯^[31] 对不同轴距下的 等离子射流进行了光谱测量, 总结了 Zr 的光谱强 度随轴距的分布, 如图 8 所示, Zr 的光谱强度随 着轴距不断下降, 说明 YSZ 粉末气相原子在 600~1500 mm 范围内逐渐减少, 间接反应射流温 度在逐渐降低; 高丽华^[39] 研究不同轴距下等离子 射流所处的状态, 认为轴距 650~1400 mm 时等离 子射流处于冷凝降温阶段; 张小峰^[16,69] 研究了在 不同探测距下等离子射流所处的状态, 如图 9。

Niessen 等^[9] 也将 Ar/He 喷涂后得到的光谱图 进行元素标注,YSZ 光谱图的强度值可以直观表 示蒸发量,如图 10 所示。图 10(a)为非柱状结 构,图 10(b)对应着由 YSZ 气化沉积而成的柱状 结构,这说明 YSZ 谱线强度与蒸发量呈正相关。

为了更准确地描述等离子射流的状态以及粉 末送入后的传热过程,众多科研人员进行了大量 的研究,得出了众多重要结论,但是喷枪内对粉 末的加热过程复杂,监测困难。为了对喷枪外等 离子射流特性的试验结果进行验证以及对喷枪内 复杂的热交互作用进行模拟,Chen X 等^[48-50] 开发





Fig.9 Photographs of PS-PVD plasma jet with 7YSZ powders injection^[60]

了等离子射流建模方法,采用气体动力学理论编 译了等离子射流气体动力学 CEA2 代码^[51,52],分别 计算了 Ar/He、Ar/He/H₂ 和 Ar/H₂3 个参数下的等 离子射流特性。

计算得到的 1、2、3 这 3 个位置的等离子体 温度如图 11。Ar/He 参数显示具有最高的温度, 加入 H₂(Ar/He/H₂ 参数)后由于氢解的能量消耗降 低了温度,而具有等离子体气体的最高质量密度 的 Ar/H₂ 参数的温度最低。以 Ar/He/H₂ 为例,计 算的 3 个位置各粒子摩尔分数如图 12,显示在射 流中已经发生了 H₂ 的结合,消耗了能量,印证了 图 11 的结果。图 13 为 3 个位置图的传热计算结 果,分别给出了原子、离子和电子的贡献。计算 结果表明,粉末加热主要发生在等离子喷枪和喷 射膨胀之间的第一轨迹段内,即粉末注入点与喷 枪喷嘴之间 (喷枪内);其次是射流膨胀和压缩 区,会发生动能与热能的转换;在射流中后段粒 子间的传热几乎不存在,这也解释了射流轴向温 度的相对稳定 (缓慢降低)。



图 10 具有 7YSZ 的等离子体射流 (Ar / He) 的光谱对应不同结构的涂层^[9]

Fig.10 Optical spectrum of the plasma jet (Ar/He) with 7YSZ corresponding to coatings with different columnar structure^[9]



图 11 在喷嘴喉道处(临界 c/s),喷嘴出口(出口 c/s)以及在膨胀射流中的3个等离子体参数下的等离子体温度^[46]

Fig.11 Calculated plasma temperatures at the nozzle throat (critical c/s), nozzle exit (exit c/s), and in the expanded jet for the three investigated plasma parameters^[46]



图 12 Ar/He/H2 参数在喷嘴喉道(临界 c/s)、喷嘴出口(出口 c/s)和扩张射流中的等离子体组成;曲线表示累积到100%的 摩尔分数,数字表示喷嘴喉部的单摩尔分数^[46]

Fig.12 Ar/He/H₂ parameters at the nozzle throat (critical c/s), nozzle exit (exit c/s), and in the expanded jet for the three investigated plasma parameters; the curves represent the molar fractions cumulated to 100%, and the numbers denote the single molar fractions at the nozzle throat^[46]

结合等离子射流数值模拟以及等离子射流特 性光谱诊断可知,对粉末的传热主要发生在喷枪 内,喷嘴处的膨胀区/压缩区有少量传热,而射流 后边的平稳区几乎没有传热发生。大量研究得出, Ar 增加了等离子气体密度,YSZ 与重质等离子体 (原子和离子)之间的碰撞增加,增加了粉末原料 所经受的阻力和增大了传热效率(喷嘴内)。故粉 末原料的最大热处理发生在喷嘴内。但是 Ar 的粘 度太低,YSZ 的微观结构表明,等离子体气体中 He 的存在是非常重要的,因为它的粘度而不是焓 值。粘度是一个宏观特征,它与自由流动的射流 的约束程度成正相关,He 具有高粘度,有束流的 作用。Ar 因为高焓值是射流对 YSZ 传热的主要介 质,必须存在,需要与 He 和 H2 组合。若需要增加粉末气化效率生成更完整的柱状结构则加 He,若需要形成带有致密层的柱状结构则添加 H2。



图 13 喷嘴喉道 (临界 c/s)、喷嘴出口 (出口 c/s) 和扩张射流中 的传热计算结果;传递的热量减少到单位表面积;分别给出了 原子 (a)、离子 (i) 和电子 (e) 的贡献^[46]

Fig.13 Results of the heat transfer calculations at the nozzle throat (critical c/s), nozzle exit (exit c/s), and in the expanded jet for the three investigated plasma parameters; transferred heats are reduced to per unit surface area; the contributions of atoms (*a*), ions (*i*), and electrons (*e*) are indicated, respectively^[46]

O3CP 喷嘴内通过阴阳极产生的电弧,将送入 的等离子气体迅速加热解离/离化,温度急速升 高,气体急速膨胀加速;粉末送入后,通过粒子 的撞击与热辐射, YSZ 粉末迅速解离离子化, 产 生大量气相粒子(离子和电子)。喷嘴附近的膨胀 区与压缩区会发生动能与热能的转换,由于喷枪 内与腔室压力差别巨大,射流喷出后寻找平衡发 生膨胀,速度急剧增大,温度迅速下降,之后的 压缩区会发生动能向热能的转变,温度会呈现微 弱的上升,速度减慢,整体而言,由于拖拽力的 影响,射流是做减速流动的;此阶段会有大量气 相进一步生成,但仍会存在未气化颗粒,此处为 气、液、固混合状态沉积涂层,多为致密结构。 而射流中后段为冷凝降温阶段,射流密度、速度 和温度均很小,理论上为自由流动条件,对原料 粉体没有明显的加热功能,可事实上存在熔融颗 粒发生气化的现象。Liu M J 等^[61] 提出了一种熔融 颗粒蒸发模型,提出了自冷和外加热两种形式的 传热传质活动,可以导致熔融颗粒气化。通过计 算总气态氧化锆数的分布,得到了开放等离子体 射流的局域气态物质容量^[62]。测得 650~1400 mm 区间 Zr 的光谱强度先升后降, 1000 mm 处有最大 值,之后会有团簇状结构生成,是因为随着气化 的深入,后续温度不断下降,饱和蒸气压慢慢小 于腔室压力,发生粒子间的结合。

此外,除了对喷枪内和喷枪外等离子射流的 特性进行大量研究外,Liu MJ等^[53]对高温高速的 等离子射流与温度较低的基体相互作用后的等离 子特性的变化做了大量探索。他们提出了团簇沉 积单元的过饱和边界层热力学条件,通过模拟仿 真计算,得出了通粉后等离子射流与基体的相互 作用区域,区域分为滞止流区和壁面射流区,并 分别分析了其中温度、速度和压力的变化。结果 显示巨大的温度梯度与过饱和的边界层均利于团 簇结构的生成,而团簇的阴影效应对柱状结构的 生成至关重要。

除了等离子气体和轴距的影响以外, Mauer G 等^[47]研究了 YSZ 送粉速率对 Zr 峰强度的影响。 结果发现,当使用 Ar/He 作为等离子发生气体 时, Zr 峰强度随着送粉速率的增加而增加,当送 粉速率超过 20 g/min 时,光谱测量强度的增加变 缓甚至开始下降,如图 14 所示。Mauer G 表明如 果喷枪功率足够大时,光谱测量强度随着送粉速 率的增加呈线性增加。



(a) Using standard LPPS, the emission lines of plasma gas and metal powder are only partially in the gas phase



(c) Liquid under LPPS sputtered, minimal gas phase layered structure



图 14 不同送粉速率的光谱测量强度[47]



3.5 金属粘结层的光谱诊断

金属气相沉积研究取得初步成果。与YSZ类 (机,OES 用来检测等离子体射流中气相的金属激 发辐射。使用精细的 MCrAlY 粉末 (Sulzer Metco Amdry 365, <35 μm) 和标准参数,光谱已包含一 些金属蒸气物质的发射线^[9],如图 15。图 15(a)分 别为 LPPS 和 PS-PVD 工艺下等离子气体和气相金 属的发射线。



(b) Emission line of the same condition metal powder under PS-PVD is more in the gas phase



(d) Mixed condensed structure of small gas phase, cluster and liquid sputtering under PS-PVD (right)

图 15 LPPS 和 PS-PVD 工艺下等离子气体和气相金属的发射线^[9] Fig.15 Emission lines of plasma gas and gas phase metal in LPPS and PS-PVD processes ^[9] 图 15(b) 为相对应的金属粘结层的 SEM 相 貌。发现, PS-PVD 大功率下金属相发射线强度明 显高于 LPPS, 微观结构里有明显的气凝现象发 生, 而 LPPS 下微观结构为传统的层状堆积, 说 明少量气相的发生不足以影响整体结构的改变, 也说明低压等离子下, 极少气相的产生是必然事 件。而且图 15(a) 中只发现 Cr 和 Ni 的发射线, 没 有发现 Al 和 Co, 猜测有可能是未达到气化条件 而发生气化, 也可能是含量太低, 光谱未分辨出 来。MCrAlY 合金气相光谱分析的复杂性, 使得 这些探索和涂层的精确化学成分仍在研究中。

4 总结与展望

PS-PVD 工艺是物理气相沉积技术与等离子喷 涂工艺的结合,独特的柱状结构和优异的性能为 热障涂层的应用提升了巨大空间,新技术、新工 艺和新结构伴随而来的是表征技术的发展。PS-PVD 工艺的光谱诊断相较于传统的检测手段,操 作简便,选择性好,灵敏度和准确度高,对等离 子体本身无干扰,能实现原位诊断,同时光学发 射光谱学具有非接触法的优点。通过不同喷涂参 数下的光谱诊断,实现了等离子射流特性的分 析。热力学平衡是分析和计算等离子射流特性的 理论基础,基于局部热力学平衡假设的两谱线法 或玻尔兹曼绘图法可以计算出电子温度; 谱线展 宽理论的发展,为射流中各粒子状态的研究提供 了基础,通过指定谱线的 Stark 展宽可以计算出电 子密度和重粒子温度; Abel 转化提供了射流特性 空间值计算的可行性,转换后的强度值可以计算 出射流径向温度的分布。

原子发射光谱诊断是 PS-PVD 等离子射流特 性诊断技术的有效手段和研究热点, PS-PVD 等离 子射流特性的理论研究、数值模拟和特征参数计 算,还存在极大的发展空间,需要形成一个整体 来系统研究和相互佐证:

(1)针对整个等离子射流(包括膨胀区、压缩 区、平稳区和末端的紊流区),需要提出一套合适 的热力学平衡理论,不同区域的射流状态,射流 中各粒子的状态以及满足的分布理论及守恒定理 等等,这是研究射流特性的基础。

(2) 注入粉末后,超低压等离子体喷涂条件下 多相等离子体射流的空间分布、电离度和 LTE 偏 差还需要进行研究。 (3) 其他工艺参数 (如舱压) 的等离子特性变化 较大,确保光谱诊断在较小等离子射流尺寸条件 下的诊断和分析,获得有效的、准确的谱线和后 续数据。当 PS-PVD 处于较高室压下 (500 Pa, 1000 Pa),等离子射流会大幅度缩短,等离子特性 也会发生较大波动,出现明显的非平衡状态,所 以对于 PS-PVD 的整个工艺参数,还需要设计试 验进行研究。

参考文献

- [1] FENG Q, TONG J Y, ZHENG Y R, et al. Service induced degradation and rejuvenation of gas turbine blades[J]. Materials China, 2012, 31(12): 21-34.
- [2] ZHENG L, GUO H B, GUO L, et al. New generation thermal barrier coatings for ultrahigh temperature applications[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(32): 14-24.
- [3] MARKOCSAN N, NYLEN P, WIGREN J, et al. Low thermal conductivity coatings for gas turbine applications[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2007, 16(4): 498-505.
- [4] SHINOZAWA A, EGUCHI K, KAMBARA M, et al. Feather-like structured YSZ coatings at fast rates by plasma spray physical vapor deposition[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(1-2): 190-197.
- [5] WANG H, DINWIDDIE R B, PORTER W D. Development of a thermal transport database for air plasma sprayed ZrO₂-Y₂O₃ thermal barrier coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(5): 879-883.
- [6] ZHANG N, SUN F, ZHU L, et al. Electron temperature and density of the plasma measured by optical emission spectroscopy in VLPPS conditions[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(6): 1321-1327.
- [7] ZHU L, ZHANG N, SUN F, et al. Thin yttria-stabilized zirconia coatings deposited by low-energy plasma spraying under very low pressure condition[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(5): 1118-1124.
- [8] TERRY S G, LITTY J R, LEVI C G. Evolution of porosity and texture in thermal barrier coatings grown by EB-PVD, Elevated Temperature Coatings, Science and Technology Ⅲ[C]. Proceedings of TMS Annual Meeting, Warrendale, USA, 1999: 13-25.
- [9] NIESSEN K V, GINDRAT M, REFKE A. Vapor phase deposition using plasma spray-PVD[™][J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(1-2): 502-509.
- [10] RENTERIA A F, SARUHAN B, SCHULZ U, et al. Effect of morphology on thermal conductivity of EB-PVD PYSZ TBCs[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(6):

2611-2620.

- [11] RA TZER-SCHEIBE H J, SCHLZ U, KRELL T. The effect of coating thickness on the thermal conductivity of EB-PVD PYSZ thermal barrier coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 200(18-19): 5636-5644.
- [12] KAKUDA T R, LIMARGA A M, BENNETT T D, et al. Evolution of thermal properties of EB-PVD 7YSZ thermal barrier coatings with thermal cycling[J]. Acta Materialia, 2009, 57(8): 2583-2591.
- [13] HOSPACH A, MAUER G, VAβEN R, et al. Columnarstructured thermal barrier coatings (TBCs) by thin film lowpressure plasma spraying (LPPS-TF)[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(1-2): 116-120.
- [14] REFKE A, GINDRAT M, NIESSEN K V, et al. LPPS thin film: A hybrid coating technology between thermal spray and PVD for functional thin coatings and large area applications[C]. Thermal Spray 2007: Global Coating Solutions, 2007: 705-710.
- [15] GAO L, GUO H, WEI L, et al. Microstructure and mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings prepared by plasma spray physical vapor deposition[J]. Ceramics International, 2015, 41(7): 8305-8311.
- [16] MAUER G, JARLIGO M O, REZANKA S, et al. Novel opportunities for thermal spray by PS-PVD[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 268: 52-57.
- [17] MAUER G, VAβEN R. Plasma spray-PVD: Plasma characteristics and impact on coating properties[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2012, 406: 012005.
- [18] 毛杰,邓畅光,宋进兵. 等离子喷涂过程中的等离子射流特 性诊断技术[J]. 材料保护, 2013, 46(3): 38-41.
 MAO J, DENG C G, SONG J B, et al. Review of diagnostic techniques for plasma jet characteristics in plasma spraying[J]. Journal of Materials Protection, 2013, 46(3): 38-41 (in Chinese).
- [19] 孙成琪, 高阳, 杨德明, 等. 大气等离子喷涂中等离子体温度的焓探针法测量[J]. 核聚变与等离子体物理, 2014, 34(2): 187-192.
 SUN C Q, GAO Y, YANG D M, et al. Measurement of plasma temperature by enthalpy probe method in atmospher-

ic plasma spraying[J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 2014, 34(2): 187-192 (in Chinese).

- [20] FUKANUMA H, OHNO N, SUN B, et al. In-flight particle velocity measurements with DPV-2000 in cold spray[J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201(5): 1935-1941.
- [21] GINDRAT M, DORIER J L, HOLLENSTEIN C, et al. Characterization of supersonic low pressure plasma jets with electrostatic probes[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2004, 13(3): 484-492.

- [22] FANG M T C, ZHANG J L, YAN J D. On the use of Langmuir probes for the diagnosis of atmospheric thermal plasmas[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2005, 33(4): 1431-1442.
- [23] SCHERMER S, BINGS N H, ATTILA M B, et al. An improved microstrip plasma for optical emission spectrometry of gaseous species[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2003, 58(9): 1585-1596.
- [24] READY J F. Effects of high-power laser radiation[M]. New York: Academic Press, 1971.
- [25] GARCA M C, RODERO A, SOLA A, et al. Spectroscopic study of a stationary surface-wave sustained argon plasma column at atmospheric pressure[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2000, 55(11): 1733-1745.
- [26] HOLCLAJTNER A I, RASKOVIC M, JOVICEVIC S. Spectroscopic characterization of low power argon microwave induced plasma[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2004, 59: 419-428.
- [27] QAYYUM A, ZEB S, NAVEED M A, et al. Optical emission spectroscopy of Ar-N₂ mixture plasma[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2007, 107(3): 361-371.
- [28] KOLEV St, SCHIUTER H, SCHLUTER A, et al. Diffusioncontrolled regime of cylindrical inductive discharges[J]. Plasma Sources Science Technology, 2006, 15(4): 744-756.
- [29] IORDANOVA S, KOLEVA I. Optical emission spectroscopy diagnostics of inductively-driven plasmas in argon gas at low pressures[J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2007, 62(4): 344-356.
- [30] 郑国经, 计子华, 余兴. 原子发射光谱分析技术及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2010.
 ZHENG G J, JI Z H, YU X. Atomic emission spectroscopy analysis technology and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2010 (in Chinese).
- [31] 王凯. PS-PVD 等离子体及送入 7YSZ 粉末后射流的光谱 诊断[D]. 长沙: 中南大学, 2017.
 WANG K. Spectral diagnosis of PS-PVD plasma and jet after feeding 7YSZ powder[D]. Changsha: Central South University, 2017 (in Chinese).
- [32] 韩宝珩, 唐保凤. ICP-直读光谱快速测定铝合金中主要成 分 Ti、V、Zr、Mn 及次要成份 Si、Fe、Mg[J]. 分析试验室, 1996, 15(4): 44.

HAN B Y, TANG B F. Rapid determination of Ti, V, Zr, Mn and minor components Si, Fe, Mg in aluminum alloy by ICP-Direct reading spectroscopy[J]. Analytical Laboratory, 1996, 15(4): 44 (in Chinese).

[33] THOMPSON M, PAHLAVANPOUR B, WALTON S J, et al. Si₂ multaneous determination of trace concentrations of arsenic, antimony, bismuth, selenium and tellurium in aqueous solution by introduction of the gaseous by drides into an inductively coupled plasma source for E_2 mission spectrometry[J]. Analyst, 1978, 103: 568.

- [34] 刘朝霞,张习昌, 习莉. 黄土区环境土壤中有效硼测定方法 探讨[J]. 农业环境保护, 1996, 15(6): 268.
 LIU Z X, ZHANG X C, XI L. Discussion on determination method of available boron in environmental soil in Loess area[J]. Agricultural Environmental Protection, 1996, 15(6): 268 (in Chinese).
- [35] SEN GUPTA J G. Determination of barium, strontium and nine minor and trace lements in impure barite and strontianite by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry after dissolution in disodium ethylendiaminetetraacetate[J]. Talanta, 1991, 38(10): 1087.
- [36] GUO H B, GONG S K, XU H B. Progress in thermal barrier coatings for advanced aero-engines[J]. Materials China, 2009, 28(9-10): 18-27.
- [37] WU J, GUO H B, ZHOU L, et al. Microstructure and thermal properties of plasma sprayed thermal barrier coatings from nanostructured YSZ[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(6): 1186-1194.
- [38] HE J, GUO H, PENG H, et al. Microstructural, mechanical and oxidation features of NiCoCrAIY coating produced by plasma activated EB-PVD[J]. Applied Surface Science, 2013, 274(5): 144-150.
- [39] GAO L, GUO H, WEI L, et al. Microstructure, thermal conductivity and thermal cycling behavior of thermal barrier coatings prepared by plasma spray physical vapor deposition[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 276: 424-430.
- [40] 孙成琪,高阳,杨德明,等.光谱测量低压热喷涂等离子体的电子温度和电子密度[J].激光与光电子学进展,2015, 52(4):1-7.

SUN C Q, GAO Y, YANG D M, et al. Spectrometric measurement of electron temperature and electron density of low pressure thermal spray plasma[J]. Progress in Laser and Optoelectronics, 2015, 52(4): 1-7 (in Chinese).

- [41] GINDRAT M, DORIER J L, HOLLENSTEIN C H, et al. Effect of specific operating conditions on the properties of LPPS plasma jets expanding at low pressure[C]. Proceedings of the 3rd ITSC, DVS-Verlag, 2002: 459-464.
- [42] HUANG C, CHUANXIAN D. Microstructure of nanostructured zirconia coating prepared by atmospheric plasma spraying[J]. Journal of Inorganic Materials, 2002, 150(1): 31-36.
- [43] VENKATRAMANI N. Industrial plasma torch and application[J]. Current Sciences, 2002, 83(3): 254-262.

- [44] BOURG F, PELLERIN S, MORVAN D, et al. Study of an argon-hydrogen RF inductive thermal plasma torch used for silicon deposition by optical emission spectroscopy[J]. Solar Energy Materials & Solar Cells, 2002, 72(1): 361-371.
- [45] KAI R, LANGER K, HERTWIG C, et al. The impact of different process gas composition on the inactivation effect of an atmospheric pressure plasma jet on Bacillus spores[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2015, 30: 112-118.
- [46] MAUER G. Plasma characteristics and plasma-feedstock interaction under PS-PVD process conditions[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2014, 34(5): 1171-1186.
- [47] MAUER G, HOSPACH A, VABEN R, et al. Process development and coating characteristics of plasma spray-PVD[J]. Surface & Coatings Technology, 2013, 220(15): 219-224.
- [48] CHEN X, CHEN X M. Drag on a metallic or nonmetallic particle exposed to a rarefied plasma flow[J]. Plasma Chemistry & Plasma Processing, 1989, 9(3): 387-408.
- [49] CHEN X. The drag force acting on a spherical non-evaporating or evaporating particle immersed into a rarefied plasma flow[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1996, 29(4): 995-1005.
- [50] CHEN X, HE P. Heat transfer from a rarefied plasma flow to a metallic or nonmetallic particle[J]. Plasma Chemistry & Plasma Processing, 1986, 6(4): 313-333.
- [51] GORDON S, McBRIDE BJ. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications-analysis[M]. NASA-Reference Publication, 1994.
- [52] GORDON S, McBRIDE BJ. Computer program for calculation of complex chemical equilibrium compositions and applications - user's manual and program description[M]. NASA-Reference Publication, 1996.
- [53] LIU M J, ZHANG K J, ZHANG Q, et al. Thermodynamic conditions for cluster formation in supersaturated boundary layer during plasma spray-physical vapor deposition[J]. Applied Surface Science, 2019, 471: 950-959.
- [54] 文魁. 等离子喷涂的电弧、射流与颗粒特性研究[D]. 长沙: 中南大学, 2018.
 WEN K. Characteristics of plasma arc, jet and sprayed particle in thermal plasma spraying[D]. Changsha: Central South University, 2018 (in Chinese).
- [55] IVCHENKO D, ZHANG T, MARIAUX G, et al. On the validity of continuum computational fluid dynamics approach under very low-pressure plasma spray conditions[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2018, 27: 3-13.
- [56] MARSHALL J, CHENERY S, EVANS E H, et al. Atomic spectrometry update-atomic emission spectrometry[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 1998, 13: 107-130.

- [57] AKHTAR K, SCHARER J E, MILLS R L. Substantial doppler broadening of atomic-hydrogen lines in dc and capacitively coupled RF plasmas[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42: 135-207.
- [58] SEMENOV S, CETEGEN B. Spectroscopic temperature measurements in direct current arc plasma jets used in thermal spray processing of materials[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2001, 10(2): 326-336.
- [59] 王晓静. Yb2O3 掺杂对 Y2O3-Ta2O5-ZrO2 结构和性能的影响[D]. 呼和浩特:内蒙古科技大学, 2013.
 WANG X J. Effect of Yb2O3 Doping on the structure and properties of Y2O3-Ta2O5-ZrO2[D]. Hohhot: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2013 (in Chinese).
- [60] ZHANG X F, ZHOU K S, LIU M, et al. Toughness and elasticity behaviors in nano-structured 7wt.% Y₂O₃-stabilized ZrO₂ coating[J]. Surface & Coatings Technology, 2015, 276: 316-319.
- [61] LIU M J, ZHANG M, ZHANG Q, et al. Evaporation of droplets in plasma spray-physical vapor deposition based on energy compensation between self-cooling and plasma heat transfer[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26: 1641-1650.
- [62] LIU M J, ZHANG M, ZHANG Q, et al. Gaseous material capacity of open plasma jet in plasma spray-physical vapor deposition process[J]. Applied Surface Science, 2018, 428: 877-884.

第二十届全国疲劳与断裂学术会议将在银川召开

为解决材料与结构的安全评价和寿命预测问题,推动我国疲劳断裂领域的理论研究和技术应用,服务国家经济建设和社会发展,加强该领域专家学者交流、研讨与合作,"第二十届全国疲劳与断裂学术会议"将于 2020 年 5 月 8~11 日在重庆保利花园皇冠假日酒店召开,会议由中国航空学会、中国金属学会等主办;中国航空学会失效分会、材料工程分会和中国航发北京航空材料研究院承办。全国疲劳与断裂学术会议始于 1977 年召开的"中国金属学会断裂学科讨论会"和 1982 年召开的"全国疲劳学术大会",在各自举行八届以后,1998 年合并举办"第九届全国疲劳与断裂学术会议"。此后每两年举办一届,由中国航空学会、中国金属学会、中国力学学会、中国腐蚀与防护学会、中国机械工程学会、中国材料研究学会六学会轮流主办。

此次会议的论文征集范围包括:①疲劳与断裂力学;②疲劳与断裂微观机制;③复杂环境下的材料 损伤失效分析;④典型材料与结构的破坏理论研究;⑤重大装备的疲劳与断裂工程应用;⑥关键行业的 疲劳与断裂工程应用;⑦材料与结构疲劳断裂的测试表征。

论文摘要请通过会议网站 (http://ncff2020.com/) 的投稿系统提交,摘要提交日期为 2019 年 9 月 1 日~12 月 30 日。全文接收的截止日期为 2020 年 2 月 15 日。会议将提供摘要集,供与会者交流。欢迎 全国从事相关领域研究和应用的的专家学者、科研人员、工程技术人员、高校师生踊跃投稿,欢迎全国从 事相关领域的高等院校、科研院所、企事业单位踊跃参会。

(本刊编辑部供稿)

本刊讯