

# 热喷涂热障涂层孔隙与涂层性能关系研究进展

贾涵<sup>1</sup>, 高培虎<sup>1</sup>, 郭永春<sup>1</sup>, 杨忠<sup>1</sup>, 王建东<sup>2</sup>, 李全平<sup>3</sup>

(1.西安工业大学, 西安 710021; 2.中国人民解放军陆军装甲兵军事代表局驻西安地区军事代表室, 西安 710032; 3.北方通用动力集团有限公司, 山西 大同 030032)

**摘 要:** 孔隙在热障涂层中较为常见, 孔隙对热障涂层的性能有利有弊。对热障涂层陶瓷层中孔隙的形成机理进行了综合分析, 总结了热障涂层孔隙结构的调控方法, 讨论了孔隙结构特征对热障涂层隔热性能和力学性能的影响。孔隙结构的引入将引起力学性能的下降, 同时降低热障涂层的热导率, 提高隔热效果。孔隙结构特征参数包括孔隙形状、孔隙间距、孔隙倾斜角、孔隙高宽比等, 其中孔隙的倾斜角和高宽比对涂层导热性能的影响尤为重要, 是孔隙结构的关键特征参数。通过原始粉末孔隙结构的保留、造孔剂(有机造孔剂、无机造孔剂)的搭配造孔、制备工艺(临界等离子喷涂参数、粒子扁平率等)的调节以及后续的孔隙处理, 可实现热障涂层孔隙结构的调控。在实际应用过程中应同时兼顾力学性能和隔热性能, 最重要的是保证热障涂层的有效寿命, 需要综合考虑力学性能与导热性能的匹配。通过热障涂层孔隙结构特征的设计及分布控制, 可实现孔隙结构高性能、高可靠性热障涂层的制备。

**关键词:** 热障涂层; 孔隙; 力学性能; 热导率; 隔热性能; 调控

**中图分类号:** TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0151-10

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.022

## Relationship between Pores on Thermal Sprayed Thermal Barrier Coatings and Coating Properties

JIA Han<sup>1</sup>, GAO Pei-hu<sup>1</sup>, GUO Yong-chun<sup>1</sup>, YANG Zhong<sup>1</sup>, WANG Jian-dong<sup>2</sup>, LI Quan-ping<sup>3</sup>

(1.Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China; 2.Xi'an Military Delegate Office, Military Mission Bureau of PLA Armoured Force, Xi'an 710032, China; 3.North General Power Group Co., Ltd, Datong 030032, China)

**ABSTRACT:** Pores are common in the thermal barrier coatings (TBCs), and its existence has both advantages and disadvantages on performance of TBCs. Formation mechanism of pores in ceramic layer of TBCs was analyzed comprehensively. Regulating methods of pore structure on TBCs were summarized. The effects of pore structure characteristics on heat insulation performance and mechanical properties of TBCs were investigated. The introduction of pore structure would degrade mechanical properties and thermal conductivity, and improve heat insulation effect. Pore structure characteristic parameters included pore

收稿日期: 2018-03-16; 修订日期: 2018-04-25

Received: 2018-03-16; Revised: 2018-04-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(51771140); 超高温结构复合材料重点实验室创新基金(6142911010202); 陕西省创新人才推进计划-科技创新团队(2017KCT-05)

**Fund:** Supported by the National Natural Science Foundation of China(51771140), Creative Research Foundation of Science and Technology on Thermalstructural Composite Materials Laboratory(6142911010202), Shaanxi Creative Talents Promotion Plan-Technological Innovation Team(2017KCT-05)

作者简介: 贾涵(1995—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为表面工程。

**Biography:** JIA Han (1995—), Male, Master, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 高培虎(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表面工程。

**Corresponding author:** GAO Pei-hu (1979—), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: surface engineering.

shape, distance, slant angle and aspect ratio were proposed. Pore slant angle and aspect ratio were of great significance to thermal conductivity of TBCs, which were also key characteristic parameters of pore structure. The pore structure of TBCs could be regulated by retaining porous structure of original powder, collocating pore-forming with pore formers (organic pore former, inorganic pore former), adjusting preparation processes (critical plasma spray parameter, particle flatness ratio) and treating pores subsequently. The mechanical properties and heat insulation performance shall be adjusted to guarantee effective life of TBCs. High performance and reliable TBCs with pore structure can be prepared based upon structure characteristic design and distribution control of porous structure of TBCs.

**KEY WORDS:** thermal barrier coatings; pore; mechanical properties; thermal conductivity; heat insulation performance; regulation

航空、航天发动机及燃气轮机热端部件的使用温度越来越高, 发动机一级叶片表面的工作温度达到  $1170\text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[1-2]</sup>, 镍基高温合金叶片  $1100\text{ }^{\circ}\text{C}$  时的强度约为  $400\text{ MPa}$ , 约为室温  $1000\text{ MPa}$  的  $2/5$ , 高温合金已达到使用极限<sup>[3]</sup>。热障涂层 (Thermal Barrier Coatings: TBCs) 因其较低的热导率、较强的隔热效果, 对热端部件可以起到较强的防护效果, 保障航空、航天发动机及燃气轮机热端部件的可靠运行<sup>[4-6]</sup>。

$\text{Y}_2\text{O}_3$  部分稳定的  $\text{ZrO}_2$  ( $\text{Y}_2\text{O}_3$  partially stabilized zirconia, 简称 YSZ) 由于具有较低的热导率, 而被广泛用作热障涂层表面的陶瓷层材料<sup>[7-8]</sup>。热障涂层陶瓷层常用的制备方法有等离子喷涂、电子束物理气相沉积 (EB-PVD) 等方法<sup>[9-11]</sup>。EB-PVD 方法制备的陶瓷层组织为典型的柱状晶结构, 热导率相对较高, 而等离子喷涂方法制备的陶瓷层组织为典型的层状结构, 层间存在大量的界面, 可降低陶瓷层的热导率, 热导率相对较低<sup>[9-11]</sup>。

由于等离子喷涂工艺的自身特点, 涂层内部不可避免地会存在孔隙等缺陷<sup>[12-14]</sup>。涂层中的孔隙一方面可以降低涂层的热导率, 提高涂层的隔热性能, 另一方面又使涂层的综合力学性能下降, 因此孔隙问题是研究等离子喷涂热障涂层的关键问题之一<sup>[11-14]</sup>。多年来有关等离子喷涂热障涂层孔隙问题的研究主要集中于涂层的孔隙率, 如工艺参数对孔隙率大小的影响、孔隙率对涂层弹性模量和热导率的影响等, 但对涂层孔隙大小和形状分布的研究较少<sup>[15-19]</sup>。

## 1 热障涂层孔隙形成与控制

### 1.1 原料控制

空心球形 (Hollow Spherical Powder: HOSP) YSZ 粉体是近年来广受关注的等离子喷涂陶瓷材料, 如图 1 所示。粉末中的空结构相当于  $30\sim 50\text{ }\mu\text{m}$  的大孔, 而粉末的球壳结构是由纳米级的 YSZ 细粉团聚后烧结在一起的, 纳米陶瓷颗粒之间存在大量的纳米级、亚微米级以及微米级的孔隙。高培虎等<sup>[20]</sup>在研究空心球形 YSZ 陶瓷沉积特性的过程中发现, 空心球形 YSZ

粉末经过等离子热源加热后, 中空结构的大孔隙变小, 球壳结构中的 YSZ 颗粒部分烧结长大, 球壳部分原来的孔隙有所减少, 但是粉末中的中空结构大孔及纳米级、亚微米级、微米级的小孔孔隙依然得到保留, 如图 2 所示。在粉末撞向基体实现有效沉积的过程中, 断面分析 (如图 3 所示) 可以发现, 在涂层内部存在大量孔隙, 有几十微米的大孔, 也有微孔。通过 X 射线三维扫描分析统计热障涂层孔隙结构的分布特征 (如图 4 所示), 发现涂层内部的孔隙尺寸有大有小, 大至约  $27\text{ }\mu\text{m}$ , 小至  $1\text{ }\mu\text{m}$  以下, 即亚微米级、纳米级尺度。因此, 通过原始粉末的结构设计, 可实现热障涂层内部孔隙的可控分布。

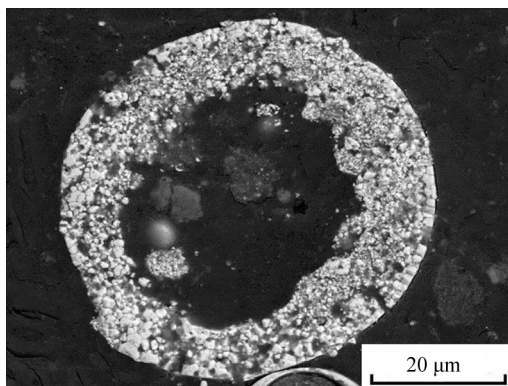


图 1 空心球形 YSZ 粉末结构<sup>[20]</sup>

Fig.1 Microstructure of hollow spherical YSZ powder<sup>[20]</sup>

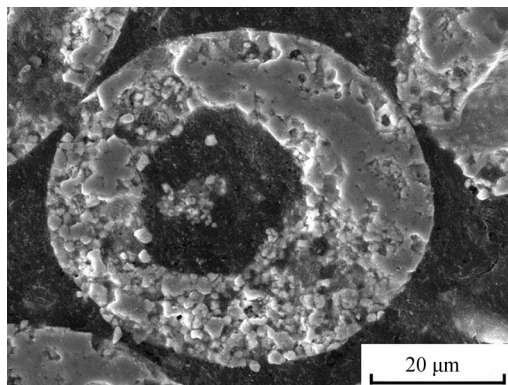
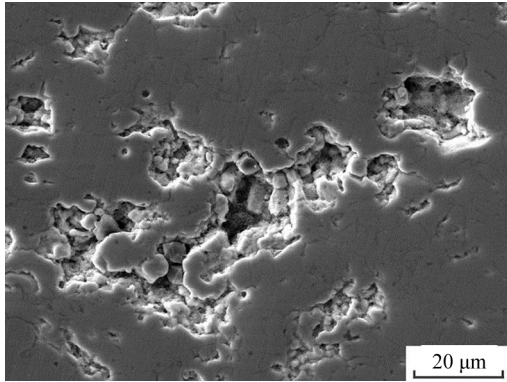
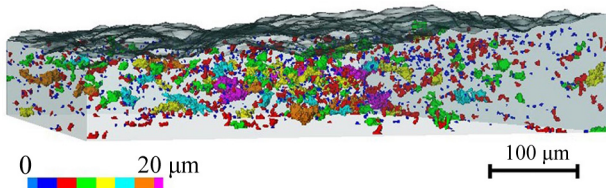
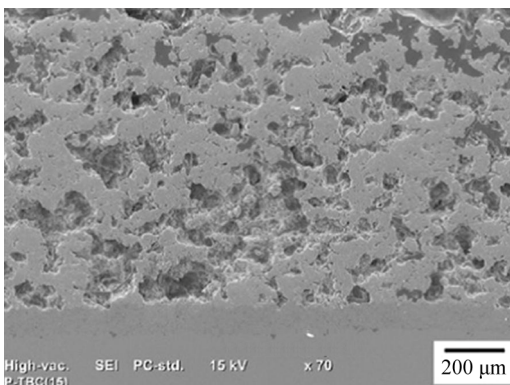


图 2 空心球形 YSZ 粉末经过等离子热源加热后的结构<sup>[20]</sup>  
Fig.2 Microstructure of hollow spherical YSZ powder heated by plasma heat source<sup>[20]</sup>

图 3 热障涂层中的大量孔隙<sup>[20]</sup>Fig.3 Lots of pores in TBCs<sup>[20]</sup>图 4 热障涂层孔隙结构 X 射线三维扫描表征<sup>[20]</sup>Fig.4 X-ray 3D scanning characterization of pores in TBCs<sup>[20]</sup>

另外一方面,通过造孔剂可调控热障涂层内部的孔隙。造孔剂法是提高多孔陶瓷孔隙率既简单又经济实惠的方法,造孔剂从性质上可以分为无机物和有机物两类。无机造孔剂有碳酸铵、碳酸氢铵、氯化铵、石墨和煤粉等;有机造孔剂包括聚苯乙烯、高密度聚乙烯(HDPE)、聚醚醚酮(PEEK)、淀粉等<sup>[21-26]</sup>。Masayuki Arai 等<sup>[27]</sup>采用空结构(HOSP)YSZ 粉末和聚酯粉末中,经机械混合后制备热障涂层,发现在涂层中保留了更多的几十微米的大孔(如图 5 所示),可实现热障涂层中孔隙尺度的设计和调控。

图 5 聚酯粉末和中空结构(HOSP)YSZ 粉末机械混合后制备的热障涂层<sup>[27]</sup>Fig.5 TBCs prepared by mechanically mixing polyester powder and (HOSP) YSZ powder<sup>[27]</sup>

## 1.2 工艺调控

热喷涂是以粉末熔融或半熔融状态撞击到基体表面实现有效沉积。在此过程中,高速熔滴撞击基体

后铺展扁平化,随后快速冷却凝固形成扁平粒子,逐层累加堆积形成涂层。图 6 为热喷涂 YSZ 涂层典型的层状结构,发现在层间结合良好的区域形成了类似于 EB-PVD 方法制备的陶瓷层的柱状晶组织(箭头 A 所示),层间结合较差的区域形成了类似孔隙的组织(箭头 B 所示),层内纵向裂纹(如箭头 C 所示)可以作为连通的孔隙。此外,还有颗粒之间的未结合区(如图 7 所示圈定区域)。

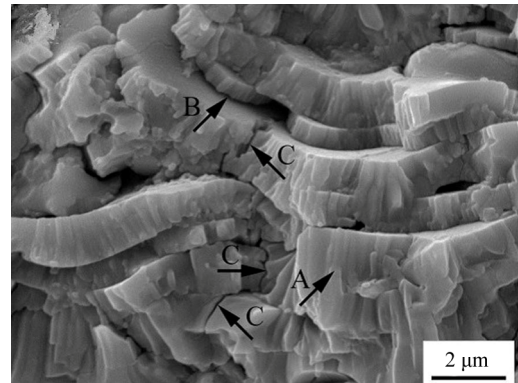
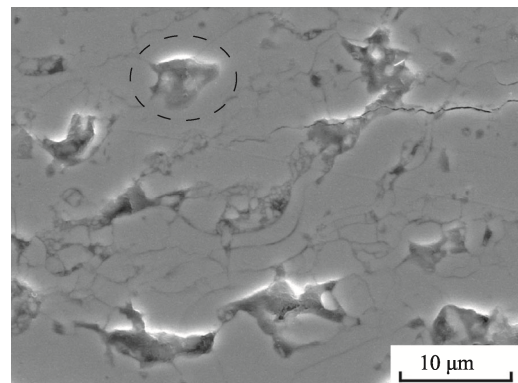
图 6 热喷涂 YSZ 涂层典型的层状结构<sup>[28]</sup>Fig.6 Typical lamellar microstructure of thermally sprayed YSZ coatings<sup>[28]</sup>图 7 热喷涂 YSZ 涂层典型的断面结构<sup>[28]</sup>

Fig.7 Typical cross-sectional microstructure of thermally sprayed YSZ coatings

凌锡祥<sup>[29]</sup>和 Jo Ann Gan 等<sup>[30]</sup>的研究结果表明,热障涂层孔隙是在高速熔融粒子撞击到已形成的涂层表面时,由于对粗糙表面不完全填充及与粒子之间不完全结合而形成的。在喷涂沉积过程中,熔滴温度偏低,铺展流动性差,不易将已凝固的涂层粒子之间的空隙填满,就形成了孔隙。当熔滴充分熔化且流动性好时,若熔滴与固态金属的润湿性不良,或润湿性虽好但凝固太快,也容易造成液态金属(熔滴)不能充满粒子间的孔隙和凹坑。

赵扬等<sup>[31]</sup>采用随机介质理论对热障涂层孔隙模型进行了描述,建造的模型与用扫描电子显微镜表征出来的图像能够较好地吻合,能够准确描述热障涂层中的孔隙。郑允宅等<sup>[32]</sup>用蒙特卡罗法构建出等离子喷



涂孔隙形成的模型,根据喷涂沉积过程,从粉末加热加速、层状铺展凝固、多层堆积三个层次建立随机模型,探讨粉末大小与喷涂速度对孔隙形成过程的影响,并研究涂层的微观结构及喷涂参数对涂层孔隙率的影响。理论建模与实验结果中的孔隙情况比较吻合,熔滴撞击速度增大,孔隙率逐渐减小,喷涂距离增大,涂层孔隙率减小。

喷涂参数主要控制喷涂粒子的温度与速度,使粒子撞击到基体时呈现不同的铺展状态,从而使涂层孔隙位置、大小及数量发生变化<sup>[33]</sup>。吕宇鹏等<sup>[34]</sup>收集等离子喷涂过程中粉末形貌和粒子形貌,发现部分熔融粒子内部有孔隙存在。当带有孔隙的熔融粒子高速撞向基体时,由于粒子内部压力和所拥有的动能,粉末内部孔隙分散成许多小尺度球形孔隙。

刘琨、白宇等<sup>[35-36]</sup>在超音速等离子喷涂制备陶瓷层的过程中,通过 Spraywatch 红外测温测速专用设备监控陶瓷粉末的温度与速度,研究陶瓷层孔隙数量与陶瓷粉末温度、速度的关系。结果表明,粒子表面温度和飞行速度越高,粒子碰撞基体后的扁平率越高,铺展越均匀、越充实,未熔颗粒越少,孔隙数目越低。同时研究了陶瓷颗粒的沉积特性,发现随着喷涂距离的增加,粒子飞行速度与飞行温度的乘积先增大后减小,如图 8 所示,陶瓷层孔隙数量先减小后增加。

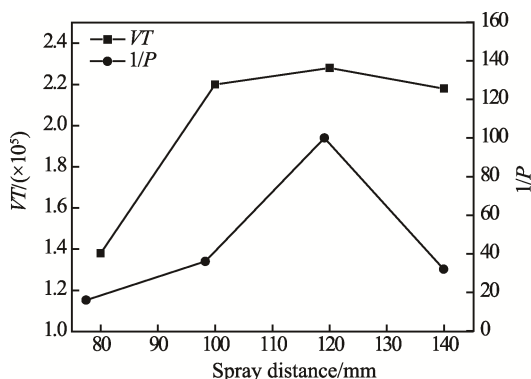


图 8 喷涂距离与孔隙率和粒子飞行速度与飞行温度乘积的关系<sup>[36]</sup>

Fig.8  $VT$  and  $1/P$  (reciprocal of porosity) versus spray distance<sup>[36]</sup>

Sivakumar 等人<sup>[37]</sup>、Alireza Akbari 等人<sup>[38]</sup>、王海斗等人<sup>[39]</sup>在研究等离子喷涂陶瓷层制备过程中的参数对涂层组织特征的影响时发现,在等离子喷涂功率、主气流量、次气流量、喷涂距离、喷涂角度、喷枪移动速度、送粉器流量、送粉速度等参数中,临界等离子喷涂参数 (Critical Plasma Spray Parameter: CPSP) 对陶瓷层组织性能的影响显著。临界等离子喷涂参数 (CPSP) 定义为等离子喷涂功率与主气流量的比值:

$$\text{CPSP} = \frac{\text{Spray power (kW)}}{\text{Primary gas flow rate (m}^3 \cdot \text{h}^{-1}\text{)}} \quad (1)$$

随着临界等离子喷涂参数的增大,等离子喷涂的能量密度增高,陶瓷粉末粒子的熔化程度充分,所制备的陶瓷涂层孔隙率降低 (如图 9 所示),同时显微硬度和弹性模量增加,而断裂韧性降低。因此,在工艺控制调节陶瓷层孔隙率的过程中,调节临界等离子喷涂参数 (CPSP) 可调控陶瓷层总体的孔隙。

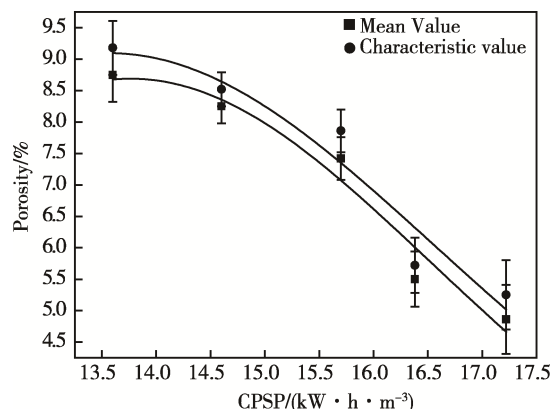


图 9 临界等离子喷涂参数与涂层孔隙率的关系<sup>[39]</sup>

Fig.9 Variation of coating porosity with CPSP<sup>[39]</sup>

### 1.3 孔隙后处理

孔隙对热障涂层性能的影响有利有弊,因此,对于不同使用要求的热障涂层应该区别设计孔隙结构,而在制备过程中,不需要的孔隙结构可以通过后续处理进行调节。譬如,在制备过程中出现的贯通孔隙利于热传导,所制备的热障涂层的热导率相对较高,为了进一步降低涂层的热导率,可对这类贯通孔隙进行封孔处理。

宋占明等<sup>[40]</sup>以等离子喷涂的 Fe 基涂层作为研究对象,分别使用  $\text{SiO}_2$  溶胶和  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  对涂层的孔隙进行封孔处理,该涂层孔隙结构显著减少,涂层的致密性显著提高,涂层表面拉应力的降低幅度很大,从 291 MPa 分别降低到 45 MPa 和 105 MPa。李长久等<sup>[41]</sup>使用高强度的粘结剂对等离子喷涂氧化铝陶瓷涂层进行渗碳处理,粘结剂进入到涂层与基体界面处,涂层孔隙减少,涂层结合强度增大到 40~55 MPa。龚志强等<sup>[42]</sup>使用等离子喷涂方法制备涂层,对涂层进行激光重熔处理,使涂层中的孔隙消失,提高涂层的致密性,涂层由块状结构变成了平行排列并垂直于基体生长的柱状晶和柱状枝晶结构,使得涂层的性能得到了提高。

### 1.4 小结

综合以上三个方面,通过原始粉末孔隙尺度的设计与保留控制、造孔剂形貌及尺寸控制、热喷涂过程中临界等离子喷涂参数控制及孔隙后处理等方法,可有效控制热障涂层的孔隙率。通过原始粉末孔隙尺度的设计、造孔剂形貌尺寸及陶瓷粉末与造孔剂的混合比例,可以控制热障涂层孔隙的形貌、尺寸、分布等特征。而在热喷涂制备热障涂层的过程中,控制粉末粒子的温度和速

度,进而控制陶瓷粉末在沉积过程中的扁平化程度,可控制孔隙的倾斜角、高宽比等结构特征。

## 2 孔隙对热障涂层性能的影响

### 2.1 力学性能

力学性能是直观地反映涂层质量的重要基本指标之一,孔隙的存在使热障涂层弹性模量降低,材料强度降低。K. A. Khor 教授<sup>[43]</sup>研究探明了热障涂层孔隙与弹性模量之间的关系:

$$E = E_0 e^{-bp} \quad (2)$$

式中:  $E_0$  为致密材料的弹性模量;  $p$  为热障涂层的孔隙率;  $b$  为常数。

Karthikeyan 等<sup>[44]</sup>总结出热障涂层孔隙率  $p$  与显微硬度 HV 之间的经验关系,见式(3),可知热障涂层孔隙率增大,显微硬度下降。

$$HV = 1191 - 24.27p \quad (3)$$

但是这些研究都没有涉及孔隙形状和分布对力学性能的影响,特别是孔隙尺度的影响,纳米、微米、数十微米级别的孔隙尺度对热障涂层基本力学性能的影响差异基本没有涉及。

I. Sevostianov 等<sup>[45]</sup>假设涂层中的孔隙弥散分布且皆为椭圆形,垂直方向的弹性模量大于水平方向的弹性模量,孔隙率越大,弹性模量越小。Paul 等<sup>[46]</sup>

研究涂层孔隙形貌对涂层力学性能的影响,结果表明,热处理使陶瓷涂层更致密,杨氏模量和界面应变能增大,涂层力学性能得到增强。

热震性能是指材料经过温度剧烈的变化后,保持原有形貌和性能的能力。抗热震性能能够反应出涂层在受到冷、热循环后抵抗温度变化及保持涂层原有性能和形貌的能力,是涂层力学性能和热学性能在温度骤变情况下的一种综合体现<sup>[47-50]</sup>。

等离子喷涂制备的热障涂层具有层片状结构的典型特征,有的存在贯穿性裂纹,有的裂纹平行于涂层表面,平行于涂层表面的裂纹结构容易导致涂层失效,对抗热震性十分不利。如果涂层孔隙率较高,且小孔径孔隙分布比较均匀,使得裂纹长度有效缩短,没有贯穿性裂纹和平行裂纹,且未完全熔融的小尺寸颗粒能够增加涂层的韧性,这对于抗热震性比较有利。这种孔隙将会吸收热震工况下的热应力,能够容纳较高的应力,使涂层具有较好的抗热震性能。李文生等<sup>[51]</sup>在研究  $ZrB_2$ -SiC 陶瓷涂层的热腐蚀行为时,得到热障涂层孔隙率与显微硬度、弹性模量和断裂韧性的关系曲线如图 10,可以发现随着热障涂层孔隙率的增加,显微硬度和弹性模量显著下降,断裂韧性增加。王千文等<sup>[52]</sup>在研究等离子喷涂热障涂层的隔热性能时,发现热障涂层孔隙率与热震寿命之间的关系如图 11,可知孔隙率增加,热震寿命相应地增加。

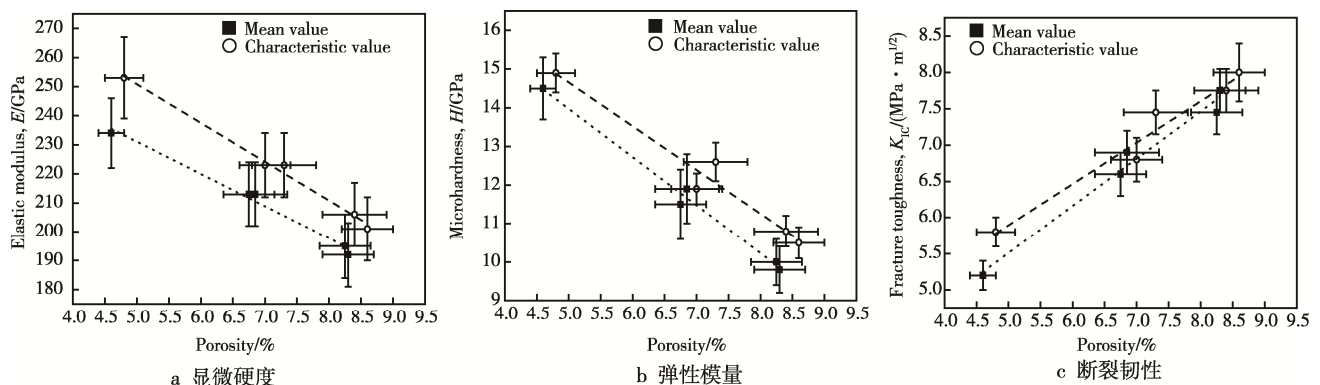


图 10 孔隙率与显微硬度、弹性模量、断裂韧性的关系曲线<sup>[51]</sup>

Fig.10 Relationship between porosity and micro-hardness(a), elastic modulus (b), fracture toughness (c)<sup>[51]</sup>

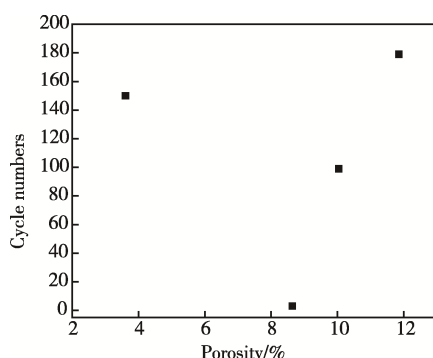


图 11 孔隙率与循环次数的关系曲线<sup>[52]</sup>

Fig.11 Relationship between porosity and cycle index<sup>[52]</sup>

### 2.2 热学性能

孔隙不仅可以对热障涂层的力学性能产生影响,也会对涂层的隔热性能产生影响。根据 Yugeswaran S<sup>[53]</sup>和 Hitoshi Fujimoto 等<sup>[54]</sup>的实验,孔隙在涂层内的分布、形貌、大小均会对热障涂层性能产生影响,粒子在撞击基体表面时,在正常碰撞的条件下,粒子会扩散并变成一个圆盘;在倾斜碰撞的条件下,碰撞后,在颗粒底部形成薄膜,并沿着基体表面扩散,形状也变得不均匀。产生孔隙最多的是在粒子交界处,裂纹容易在此生成,导致涂层的结合强度不高。用于耐腐蚀、高温抗氧化和高温抗冲刷等环境下的涂层,

要求孔隙越少越好,而对于带有润滑剂的摩擦部件和在高温隔热条件下的基体表面,孔隙又是有利的。

静止的空气是热的不良导体,其热导率为  $0.026 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,而氧化锆块材的热导率为  $1.8\sim 2.35 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,引入孔隙将显著降低陶瓷材料的热导率<sup>[55-60]</sup>。在一定孔隙率的情况下,减小孔隙尺寸,将增加孔隙的数量及表面积,进而增加孔隙与陶瓷材料之间的界面数量。在一定的界面热阻条件下,界面数量越多,其导热能力越低,所以孔隙尺寸的减小可降低涂层的热导率<sup>[61]</sup>。

Bertrand 等<sup>[62]</sup>采用纳米团聚粉末制备的热障涂层中,孔隙为纳米尺度,其热导率可以降低到  $0.7 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。G. Neuer 等<sup>[63]</sup>在研究  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  涂层孔隙率对隔热性能的影响时,发现孔隙率与热障涂层热导率之间的关系为:

$$\lambda_p = \lambda_0(1 - \beta \cdot p) \quad (4)$$

式中:  $\lambda_0$  为致密材料的热导率;  $\beta$  为常数;  $p$  为热障涂层的孔隙率。

王铀等<sup>[64]</sup>用有限元模拟的方法研究孔隙方位角、体积分数和形状系数对热障涂层导热系数的影响,研究发现,涂层孔隙方位角和形状系数是影响热障涂层热导率最重要的两个因素。这个模型是根据孔隙实际形貌进行抽象的理想化模型,与真实情况存在一定的差异,实际孔隙分布具有一定的随机性。凌锡祥等<sup>[29]</sup>采用四参数随机生长法构造不同方向孔隙的热障涂层,能够较真实地反映出孔隙结构的随机性分布,并能反映出孔隙分布对热障涂层隔热性能的影响。孔隙结构从层状变为柱状时,涂层的隔热性能变差。孔隙率一定时,层状孔隙直径减小,孔隙分布增多,涂层隔热性能下降。

Masayuki Arai 等<sup>[27]</sup>采用聚酯粉末和中空结构(HOSP)YSZ 粉末,经机械混合后制备热障涂层,发现在涂层中保留更多的几十微米大孔(如图 5 所示),可实现热障涂层中孔隙尺度的设计和调控。Masayuki Arai<sup>[27]</sup>、杨敏<sup>[65]</sup>等具体分析了孔隙形状、孔隙间距、孔隙倾斜角、孔隙高宽比等四个特征参数(图 12)对热导率的影响,研究发现,将孔隙形状理想化成正方形、菱形、圆形、三角形、倒三角形,在总孔隙率一定的情况下,孔隙形状对涂层热导率的影响较小(如图 13 所示),因此可以认为孔隙形状不是影响涂层热导率的主要因素。同时,孔隙之间的间距对涂层热导率的影响较小(如图 13 所示)。孔隙倾斜角越大,涂层热导率越大(如图 14 所示)。孔隙倾斜角增大,接近  $90^\circ$  时,孔隙越接近圆形,此时涂层的有效热传导面积最大,热导率最大;孔隙倾斜角减小至接近  $0^\circ$  时,孔隙完全扁平后类似于裂纹,此时涂层的有效热传导面积最小,所对应的热导率最小。因此,孔隙的倾斜角在孔隙的特征参数中显得比较重要。孔隙的高宽比例越大,涂层的热导率越大(如图 15 所示)。孔隙的高宽比越小,孔隙扁平化程度越高,此时涂层的有效热传导面积越小,所

对应的热导率越小。因此,孔隙的高宽比例在孔隙的特征参数中也比较重要。

在一定孔隙率的情况下,孔隙的四个特征参数中,孔隙的倾斜角和高宽比对涂层的导热影响显得尤为重要,是孔隙结构的关键特征参数。

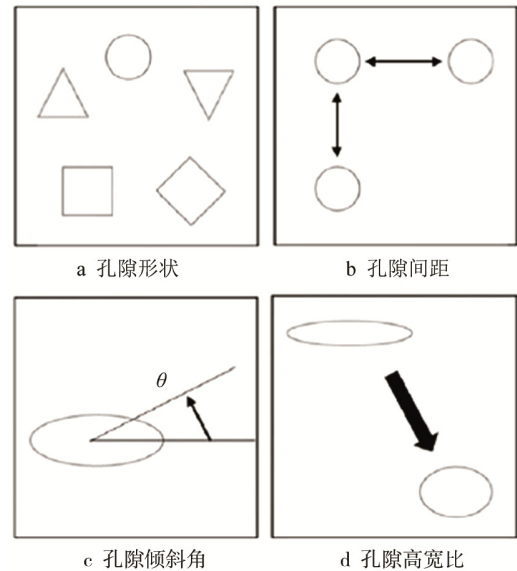


图 12 孔隙四种特征参数模型<sup>[27]</sup>

Fig.12 Four idealized pore characteristic parameter models<sup>[27]</sup>: a) pore shape, b) distance, c) title angle, d) aspect ratio

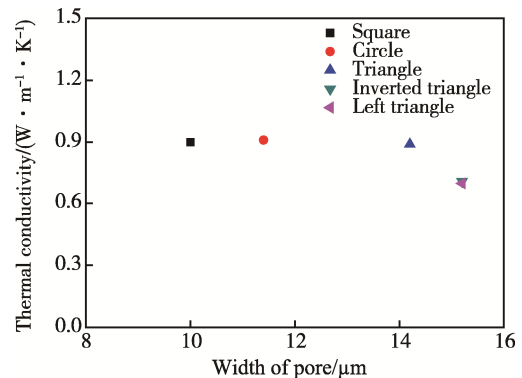


图 13 孔隙形状和间距对热导率的关系曲线<sup>[27]</sup>

Fig.13 Relationship among pore shape, distance and thermal conductivity<sup>[27]</sup>

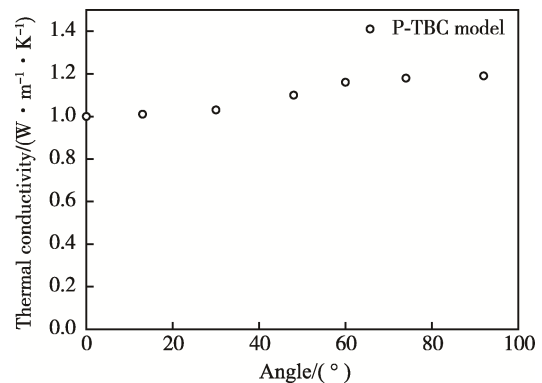


图 14 孔隙倾斜角与涂层热导率的关系曲线<sup>[27]</sup>

Fig.14 Relationship between thermal conductivity and slant angle of elliptical pore<sup>[27]</sup>



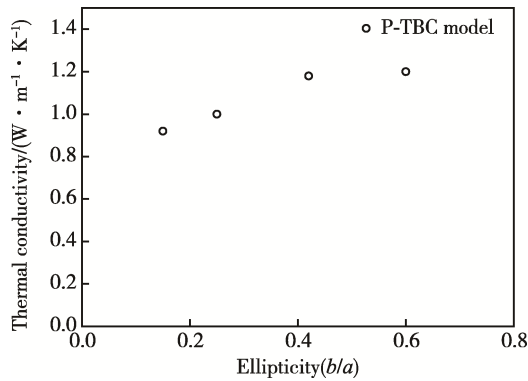


图 15 孔隙高宽比对涂层热导率的影响<sup>[27]</sup>  
Fig.15 Effects of pore aspect ratio on thermal conductivity<sup>[27]</sup>

隔热性能是评价热障涂层性能的一个重要参考因素，会直接影响热障涂层的使用寿命<sup>[66-67]</sup>。热膨胀系数主要依赖于热障涂层中的相成分及测试时的几何尺寸。热障涂层的孔隙率不会影响它的热膨胀系数。一般情况下，孔隙直接阻碍热流，降低热障涂层的导热性能。热障涂层的孔隙率越高，热导率越低。

王乐等<sup>[68]</sup>在测试涂层的隔热性能时，将涂层表面温度固定在 1000 ℃，使用热电偶及温度记录仪来记录背面基体中心位置的温度，隔一定时间记录一次，直到温度变化不明显（如表 1 所示）。通过比较发现，热障涂层的孔隙率越大，热流向基体传导过程中的阻碍越大，热导率越低，对基体的保护作用越强，隔热温差越大，隔热效果越好。

**表 1 涂层孔隙率与隔热温差的关系<sup>[68]</sup>**  
**Tab.1 Relationship between coating porosity and insulation temperature difference<sup>[68]</sup>**

Coatings specimen	1	2	3	4	5	6
Porosity/%	16.8	14.0	10.9	8.9	13.7	17.0
Insulation temperature/℃	109	92	82	77	89	111

沈伟等<sup>[69]</sup>通过理论计算，得到孔隙率一定时，随着热障涂层孔隙直径的减小，热障涂层的隔热性能有所减弱。

$$D = \rho \cdot hL + \sum_{i=1}^n C_k(i) \tag{5}$$

式中： $\rho$  为孔隙率； $h$  为孔隙模型高度； $L$  为孔隙模型宽度； $C_k$  为缺陷周围热非线性区域的一个独立变量，仅受缺陷影响。 $C_k$  与孔隙半径  $a$  之间的关系见式（6），其中  $\alpha$  为常数。

$$C_k = \alpha \cdot a^2 \tag{6}$$

### 3 结语

孔隙结构特征对热障涂层的导热及力学性能有重要影响，本文总结了热障涂层孔隙对涂层力学性能和隔热性能的影响规律。孔隙结构的引入将引起涂层

力学性能的下降，同时降低热障涂层的热导率，提高隔热效果。孔隙结构特征参数包括孔隙形状、孔隙间距、孔隙倾斜角、孔隙高宽比等四个特征参数，其中孔隙的倾斜角和高宽比对涂层的导热影响尤为重要，是孔隙结构的关键特征参数。在实际应用过程中应同时兼顾力学性能和隔热性能，最重要的是保证热障涂层的有效寿命，需要综合考虑力学性能与导热性能的匹配，孔隙率应在一定合理范围内变化，这需要通过理论的模拟计算，给出合理的孔隙率范围，通过实际的性能效果进行验证。

通过原始粉末和造孔剂的搭配、制备工艺的调节以及后续孔隙处理，可实现热障涂层孔隙结构的调控。在一定孔隙率范围内，通过孔隙结构特征的设计及分布控制，实现孔隙结构高性能、高可靠性热障涂层的制备，是未来一定时期内热障涂层发展的一个重要方向。

### 参考文献：

[1] CURRY N, MARKOCSAN N, LI X H, et al. Next Generation Thermal Barrier Coatings for the Gas Turbine Industry[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(1-2): 108-115.

[2] RUPANGUDI S K, RAMESH C S, VEERABHADHRAPPA K, 等. 活塞涂层对柴油机性能影响的研究[J]. 闫红梅, 译. 国外内燃机, 2015, 47(1): 63-65. RUPANGUDI S K, RAMESH C S, VEERABHADHRAPPA K, et al. Research on the Effects of Piston Coating on Combustion Engine Performance[J]. YAN Hong-mei, Translated. Foreign Internal Combustion Engine, 2015, 47(1): 63-65.

[3] 刘丽荣, 温涛, 李金国, 等. 镍基单晶高温合金不同温度下的拉伸性能[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(2): 129-132. LIU Li-rong, WEN Tao, LI Jin-guo, et al. Tensile Properties of a Single Crystal Ni-based Super Alloy at Different Temperatures[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2011, 33(2): 129-132.

[4] QUAZI M A, PARASHAR S. 热障涂层对非道路用柴油机性能和排放的影响[J]. 张然治, 译. 国外内燃机, 2016, 48(1): 32-36. QUAZI M A, PARASHAR S. Thermal Barrier Coating on the Road with the Influence of the Combustion Engine Performance and Emissions[J]. ZHANG Ran-zhi, Translated. Foreign Internal Combustion Engine, 2016, 48(1): 32-36.

[5] PADTURE N P, GELL M, JORDAN E H. Thermal Barrier Coatings for Gas-turbine Engine Applications[J]. Science, 2002, 296(5566): 280-284.

[6] ARMELLE V, CHRISTIAN M, JUN A, et al. The 2016 Thermal Spray Roadmap[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2016, 25(8): 1376-1440.

- [7] DAROLIA R. Thermal Barrier Coatings Technology: Critical Review, Progress Update, Remaining Challenges and Prospects[J]. *International Materials Reviews*, 2013, 58(6): 315-348.
- [8] JONES R L, MESS D. Improved Tetragonal Phase Stability at 1400 °C with Scandia, Yttria-stabilized Zirconia[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1996, 86-87: 94-101.
- [9] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 先进航空发动机热障涂层技术研究进展[J]. *中国材料进展*, 2009, 28(Z2): 12-25.  
GUO Hong-bo, GONG Sheng-kai, XU Hui-bin. Progress in Thermal Barrier Coatings for Advanced Aero-engines[J]. *Materials China*, 2009, 28(Z2): 12-25.
- [10] 于海涛, 牟仁德, 谢敏, 等. 热障涂层的研究现状及其制备技术[J]. *稀土*, 2010, 31(5): 83-88.  
YU Hai-tao, MU Ren-de, XIE Min, et al. Evolution Status and Processing Technologies of Thermal Barrier Coatings[J]. *Chinese Rare Earths*, 2010, 31(5): 83-88.
- [11] 郭双全, 冯云彪, 付俊波, 等. 高性能纳米氧化锆热障涂层性能研究[J]. *表面技术*, 2012, 41(6): 14-17.  
GUO Shuang-quan, FENG Yun-biao, FU Jun-bo, et al. Study on Properties of High Performance Nanostructural Zirconia Thermal Barrier Coating[J]. *Surface Technology*, 2012, 41(6): 14-17.
- [12] ANAND K, VAILAND A, GOLAND A, et al. Processing Effects on Porosity-property Correlations in Plasma Sprayed Yttria-stabilized Zirconia Coatings[J]. *Materials and Engineering*, 2003, 359(1): 100-111.
- [13] MARTIN F, CHRISTER P, JAN W. Influence of Particle In-flight Characteristics on the Microstructure of Atmospheric Plasma Sprayed Yttria Stabilized ZrO<sub>2</sub>[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 141: 115-127.
- [14] LI C J, OHMORI A. Relationship between the Microstructure and Properties of Thermally Sprayed Deposits[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2002, 11(3): 365-374.
- [15] GUY A, GHISLAIN M, FRANCOISE H, et al. Characterization of the Pore-crack Network Architecture of Thermal-sprayed Coatings[J]. *Materials Characterization*, 2004, 53(5): 361-372.
- [16] 张红松, 刘振启, 关绍康. 等离子喷涂纳米与微米 YSZ 热障涂层的孔隙结构比较[J]. *表面技术*, 2010, 39(5): 4-7.  
ZHANG Hong-song, LIU Zhen-qi, GUAN Shao-kang. Comparison of Pore Structure between Plasma-sprayed Nano-YSZ and Micron-YSZ Thermal Barrier Coatings[J]. *Surface Technology*, 2010, 39(5): 4-7.
- [17] LI H, KHOR K A, CHEANG P. Thermal Sprayed Hydroxyapatite Splats: Nanostructures, Pore Formation Mechanism and TEM Characterization[J]. *Biomaterials*, 2004, 25(17): 3463-3471.
- [18] ALLEN A J, LONG G G, BOUKARI H, et al. Microstructure Characterization Studies to Relate the Properties of Thermal-spray Coatings to Feedstock and Spray Conditions[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2001, 146-147(1): 544-552.
- [19] PORTINHA A, TEIXEIRA V, CARNEIRO J, et al. Residual Stress and Elastic Modulus of Thermal Barrier Coatings Graded in Porosity[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2004, 188-189(1): 120-128.
- [20] GAO Pei-hu, YANG Guan-jun, CAO Si-ting, et al. Heredity and Variation of Hollow Structure from Powders to Coatings through Atmospheric Plasma Spraying[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 305: 76-82.
- [21] LYCKFELDT O, FERREIRA J M F. Processing of Porous Ceramics by 'Strach Consolidation'[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 1998, 18(2): 131-140.
- [22] 刘有智, 谷磊, 申红艳, 等. 成孔剂对氧化铝支撑体性能的影响[J]. *膜科学与技术*, 2008, 28(6): 34-37.  
LIU You-zhi, GU Lei, SHEN Hong-yan, et al. Effect of Pore-forming Agent on Properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Support[J]. *Membrane Science and Technology*, 2008, 28(6): 34-37.
- [23] BHATTACHARJEE S, BESRA L, SINGH B P. Effect of Additives on the Microstructure of Porous Alumina[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2007, 27(1): 47-52.
- [24] LV Bo-wen, FAN Xue-ling, LI Ding-jun, et al. Towards Enhanced Sintering Resistance: Air-plasma-sprayed Thermal Barrier Coating System with Porosity Gradient[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38(4): 1946-1956.
- [25] MICHAEL P, OLIVERA K. The Influence of Pore Formers on the Microstructure of Plasma-sprayed NiO-YSZ Anodes[J]. *Journal of Power Sources*, 2012, 210: 204-217.
- [26] NOVAIS R M, SEABRA M P, LABRINCHA J A. Ceramic Tiles with Controlled Porosity and Low Thermal Conductivity by Using Pore-forming Agents[J]. *Ceramics International*, 2014, 40(8): 11637-11648.
- [27] MASAYUKI A, HIROYA O, TATSUO S. A Novel Low-thermal-conductivity Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating Controlled by Large Pores[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2016, 285: 120-127.
- [28] JONES R L, REIDY R F, MESS D. Yttria-stabilized Zirconia for Thermal Barrier Coatings[J]. *Surface and Coatings Technology*, 1996, 82(1-2): 70-76.
- [29] 凌锡祥, 王玉璋, 王星, 等. 层状热障涂层孔隙微结构对其隔热性能影响的数值研究[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(2): 408-414.  
LING Xi-xiang, WANG Yu-zhang, WANG Xing, et al. Numerical Study of Effect of Pore Microstructure of Layered Thermal Barrier Coatings on Thermal Insulation Performance[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2015, 25(2): 408-414.
- [30] GAN J A, BERNDT C C. Quantification and Taxonomy of Pores in Thermal Spray Coatings by Image Analysis and Stereology Approach[J]. *Metallurgical*



- and Materials Transactions A, 2013, 44(10): 4844-4858.
- [31] 赵扬, 林莉, 马志远, 等. 基于随机介质理论的热障涂层随机孔隙模型构建[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 78-81.  
ZHAO Yang, LIN Li, MA Zhi-yuan, et al. Establishing TBC Random Pore Model Based on Random Media Theory[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 78-81.
- [32] 郑允宅, 朱建峰, 曹萍丽, 等. 等离子喷涂涂层微观结构的蒙特卡罗模拟[J]. 真空科学与技术学报, 2014, 34(12): 1304-1309.  
ZHENG Yun-zhai, ZHU Jian-feng, CAO Ping-li, et al. Monte Carlo Simulation of Microstructures of Plasma Sprayed Coatings[J]. China Journal of Vacuum Science and Technology, 2014, 34(12): 1304-1309.
- [33] KUCUK A, LIMA R S, BERNDT C C. Influence of Plasma Spray Parameters on In-flight Characteristics of  $\text{ZrO}_2$ -8wt%  $\text{Y}_2\text{O}_3$  Ceramic Particles[J]. Journal of American Ceramic Society, 2011, 84(4): 685-692.
- [34] LU Yu-peng, YAN Jiao, WANG Jian-hua. A Further Insight into Pores in Plasma Sprayed Hydroxyapatite Coating[J]. Surface and Coatings Technology, 2012, 206(16): 3550-3553.
- [35] LIU Kun, TANG Jian-jiang, BAI Yu, et al. Particle In-flight Behavior and Its Influence on the Microstructure and Mechanical Property of Plasma Sprayed  $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$  Thermal Barrier Coatings[J]. Master Science Engineering A, 2015, 625: 177-185.
- [36] BAI Y, LIU K, WEN Z H, et al. The Influence of Particle In-flight Properties on the Microstructure of Coatings Deposited by the Supersonic Atmospheric Plasma Spraying[J]. Ceramics International, 2013, 39(7): 8549-8553.
- [37] SIVAKUMAR S, PRAVEEN K, SHANMUGAVEL-AYUTHAM G, et al. Thermo-physical Behavior of Atmospheric Plasma Sprayed High Porosity Lanthanum Zirconate Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2017, 326: 173-182.
- [38] RAMAZAN Sobhanverdi, ALIREZA Akbari. Porosity and Microstructural Features of Plasma Sprayed Yttria Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings[J]. Ceramics International, 2015, 41(10): 14517-14528.
- [39] WANG Hai-dou, MA Jian-long, LI Guo-lu, et al. The Dependency of Microstructure and Mechanical Properties of Nanostructured Alumina-Titania Coatings on Critical Plasma Spraying Parameter[J]. Applied Surface Science, 2014, 314: 468-475.
- [40] 宋占永, 郭永明, 于鹤龙, 等.  $\text{SiO}_2$  溶胶和  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  封孔处理对等离子喷涂 Fe 基合金涂层性能的影响[J]. 材料导报, 2017, 31(S1): 493-496.  
SONG Zhan-yong, GUO Yong-ming, YU He-long, et al. Effect of  $\text{SiO}_2$  Sol and  $\text{Al}(\text{H}_2\text{PO}_4)_3$  Sealed Treatment on Property of Plasma Sprayed Fe-based Coatings[J]. Materials Review, 2017, 31(S1): 493-496.
- [41] 李长久, 杨冠军, 王豫跃, 等. 粘结剂浸渗法制备新型高性能等离子喷涂陶瓷涂层的研究[C]//第六届国际热喷涂研讨会暨第七届全国热喷涂会议论文. 重庆: 出版者不详, 2003: 41-47.  
LI Chang-jiu, YANG Guan-jun, WANG Yu-yue, et al. Preparation of Thermally Sprayed Ceramic Coatings of High Performance through Adhesives Impregnation[C]// ITSS CNTSC. Chongqing: [s. n.], 2003: 41-47.
- [42] 龚志强, 吴子健, 刘焱飞, 等. 激光重熔等离子喷涂  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  涂层的组织结构[J]. 中国表面工程, 2011, 24(1): 12-17.  
GONG Zhi-qiang, WU Zi-jian, LIU Yan-fei, et al. Microstructure of Plasma-sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -13% $\text{TiO}_2$  Coating with Laser Remelting[J]. China Surface Engineering, 2011, 24(1): 12-17.
- [43] KHOR K A, GU Y W, DONG Z L. Mechanical Behavior of Plasma Sprayed Functionally Graded YSZ/NiCoCrAlY Composite Coatings[J]. Surface and Coatings Technology, 2001, 139(2-3): 200-206.
- [44] KARTHIKEYAN S, BALASUBRAMANIAN V, RAJENDRAN R. Developing Empirical Relationships to Estimate Porosity and Microhardness of Plasma-sprayed YSZ Coatings[J]. Ceramics International, 2014, 40(2): 3171-3183.
- [45] SEVOSTIANOV I, KACHANOV M. Modeling of the Anisotropic Elastic Properties of Plasma-sprayed Coatings in Relation to Their Microstructure[J]. Acta Materialia, 2000, 48(6): 1361-1370.
- [46] PAUL S. Assessing Coating Reliability through Pore Architecture Evaluation[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2010, 19(4): 779-786.
- [47] 吕艳红, 王全胜, 吴子健. 纳米  $\text{ZrO}_2$  热障涂层热震性能研究[J]. 材料保护, 2006, 39(7): 9-11.  
LU Yan-hong, WANG Quan-sheng, WU Zi-jian. Thermal Shock Resistance of Plasma Sprayed Nanostructured  $\text{ZrO}_2$  Thermal Barrier Coating[J]. Journal of Materials Protection, 2006, 39(7): 9-11.
- [48] TEKMEK C, OZDEMIR I, CELIK E. Failure Behavior of Functionally Gradient Materials under Cycling Conditions[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 174(3): 1101-1105.
- [49] KAWASAKI A, WATANABE R. Thermal Fracture Behavior of Metal Ceramic Functionally Graded Materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2002, 69(14): 1713-1728.
- [50] NUSAIR K A, LU J. Behavior of Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings, Subject to Intense Thermal Cycling[J]. Surface and Coatings Technology, 2003, 166(1): 37-43.
- [51] 李文生, 王磊, 冯力, 等. 等离子喷涂  $\text{ZrB}_2$ -SiC 陶瓷涂层的热腐蚀行为[J]. 兰州理工大学学报, 2017, 43(1): 5-9.  
LI Wen-sheng, WANG Lei, FENG Li, et al. Hot Corrosion Behavior of Ceramic Coating with Plasma-

- sprayed  $\text{ZrB}_2\text{-SiC}$ [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2017, 43(1): 5-9.
- [52] 王千文, 毛卫国, 喻明. 等离子喷涂热障涂层隔热性能分析方法[J]. 材料导报, 2011, 25(18): 125-128.  
WANG Qian-wen, MAO Wei-guo, YU Ming. Analysis of Heat-insulating Performance of Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating Systems[J]. Materials Review, 2011, 25(18): 125-128.
- [53] YUGESWARAN S, AKIRA K, SELVAN B. In-flight Behavior of Lanthanum Zirconate ( $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ ) Particles in Gas Tunnel Type Plasma Jet and Its Coating Properties[J]. Vacuum, 2013, 88(1): 139-143.
- [54] HITOSHI F, SHIOTANI Y U, ALBERT Y, et al. Three-dimensional Numerical Analysis of the Deformation Behavior of Droplets Impinging onto a Solid Substrate[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2007, 33(3): 317-332.
- [55] GIORGIO P. High Porous Yttria-stabilized Zirconia with Aligned Pore Channels: Morphology Directionality Influence on Heat Transfer[J]. Ceramics International, 2016, 42(10): 11674-11681.
- [56] JIN X Q, ZHAO C Y. Numerical Investigation on the Effective Thermal Conductivity of Plasma Sprayed Zirconia Coatings[J]. Ceramics International, 2015, 41(10): 14915-14923.
- [57] 廖红星, 宋鹏, 周会会, 等. 陶瓷层与界面孔隙率对热障涂层寿命及其失效机制的影响[J]. 复合材料学报, 2016, 33(8): 1785-1793.  
LIAO Hong-xing, SONG Peng, ZHOU Hui-hui, et al. Effect of Porosity of Ceramic-coats and Interface on Lifetime and Failure Mechanism of Thermal Barrier Coating[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(8): 1785-1793.
- [58] ZHAO Y, GAO Y. Deposition of Nanostructured YSZ Coating from Spray-dried Particles with no Heat Treatment[J]. Applied Surface Science, 2015, 346: 406-414.
- [59] CHEN Dan, LUO Fa, LOU Xu-fei, et al. Comparison of Thermal Insulation Capability between Conventional and Nanostructured Plasma Sprayed YSZ Coating on  $\text{Ni}_3\text{Al}$  Substrates[J]. Ceramics International, 2017, 43(5): 4324-4329.
- [60] WANG Y, BAI Y, LIU K, et al. Microstructural Evolution of Plasma Sprayed Submicron-/Nano-zirconia-based Thermal Barrier Coatings[J]. Applied Surface Science, 2016, 363: 101-112.
- [61] GIORGIO P, LUDOVICA C, ULRICO S. Porosity and Pore Size Distribution Influence on Thermal Conductivity of Yttria-stabilized Zirconia: Experimental Findings and Model Predictions[J]. Ceramics International, 2016, 42(5): 5802-5809.
- [62] BERTRAND G, BERTRAND P, ROY P, et al. Low Conductivity Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating Using Hollow PSZ Spheres: Correlation between Thermo Physical Properties and Microstructure[J]. Surface and Coatings Technology, 2008, 202(10): 1994-2001.
- [63] NEUER G, STEFFENS H D, BRANDL W, et al. Some Aspects of Properties Design of Plasma-sprayed Thermal Barrier Coatings[J]. Powder Metallurgy International, 1991, 23(2): 108-111.
- [64] WANG L, WANG Y, SUN X G. Influence of Pores on the Thermal Insulation Behavior of Thermal Barrier Coatings Prepared by Atmospheric Plasma Spray[J]. Materials and Design, 2011, 32(1): 36-47.
- [65] YANG Ming, ZHU Yong-ping, WANG Xue-ying, et al. Effect of Five Kinds of Pores Shape on Thermal Stress Properties of Thermal Barrier Coatings by Finite Element Method[J]. Ceramics International, 2017, 43(13): 9664-9678.
- [66] SHEFFLER K D, GUPTER D K. Current Status and Future Trends in Turbine Application of Thermal Barrier Coatings[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1998, 110(4): 605-606.
- [67] 段力, 高均超, 汪瑞军, 等. 航空发动机叶片表面热障涂层温度分布的仿真分析[J]. 上海交通大学学报, 2017, 51(8): 915-920.  
DUAN Li, GAO Jun-chao, WANG Rui-jun, et al. Simulation Analysis of Temperature Distribution of Turbine Blades by Thermal Buffer Coating for Aero Engine[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2017, 51(8): 915-920.
- [68] 王乐, 李太江, 李勇, 等. 45 钢表面大气等离子喷涂氧化钇部分稳定氧化锆热障涂层及其性能[J]. 材料保护, 2014, 47(10): 30-33.  
WANG Le, LI Tai-jiang, LI Yong, et al. Microstructure as well as Mechanical and Heat-Insulation Performance of Yttria Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings on Mild Steel Substrate[J]. Materials Protection, 2014, 47(10): 30-33.
- [69] SHEN Wei, WANG Fu-chi, FAN Qun-bo, et al. Effects of Defects on the Effective Thermal Conductivity of Thermal Barrier Coatings[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(5): 1995-2002.