

等离子喷涂-物理气相沉积制备热障涂层对气膜冷却孔的影响

刘飞^{1,2}, 毛杰², 邓子谦², 邓春明², 张小锋², 邓畅光², 刘敏²

(1.华南理工大学 材料科学与工程学院, 广州 510640; 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 广东省现代表面工程技术重点实验室, 广州 510651)

摘要: **目的** 研究等离子喷涂-物理气相沉积 (PS-PVD) 制备热障涂层过程中影响气膜冷却孔堵塞情况的因素。**方法** 采用等离子喷涂-物理气相沉积技术, 以团聚烧结的 $\text{ZrO}_2\text{-}7\%\text{Y}_2\text{O}_3$ (7YSZ) 为原料, 在预制有气膜冷却孔的高温合金板基体上制备热障涂层, 研究了气膜冷却孔的孔角度、孔径大小等参数在热障涂层制备过程中对气膜孔堵塞情况的影响。**结果** 当气膜冷却孔的孔径控制为 0.85 mm 时, 30°、60°、90°气膜冷却孔的孔径收缩率分别为 19.01%、14.50%、14.86%, 孔径收缩率随角度的增大而减小, 一定程度后保持稳定。孔内部涂层结构与表面涂层结构一致, 都为柱状结构涂层。当气膜冷却孔的角度控制为 30°时, 孔径为 1.0、1.3、1.5 mm 的气膜冷却孔的孔径收缩率分别为 36.40%、31.70%、24.45%, 孔径收缩率随孔径的增大而减小。涂层在孔内的分布深度随孔径大小的增大而增大。**结论** 气膜冷却孔的角度会影响 PS-PVD 热障涂层的沉积效率, 从而影响孔径收缩率。气膜冷却孔的孔径不影响 PS-PVD 热障涂层的沉积效率, 但会影响孔径收缩率。

关键词: 等离子喷涂-物理气相沉积; 热障涂层; 气膜冷却孔; 孔径收缩率; 柱状涂层; 堵孔

中图分类号: TG174.442 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)08-0021-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.08.004

Effects of Thermal Barrier Coatings Prepared by Plasma-spray Physical Vapor Deposition on Air Film Cooling Hole Contraction

LIU Fei^{1,2}, MAO Jie², DENG Zi-qian², DENG Chun-ming², ZHANG Xiao-feng²,
DENG Chang-guang², LIU Min²

(1.School of Materials Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2.Guangdong Institute of New Materials, National Engineering Laboratory for Modern Materials Surface Engineering Technology, Key Laboratory of Guangdong for Modern Surface Engineering Technology, Guangzhou 510651, China)

ABSTRACT: The work aims to study factors affecting blocking of air film cooling hole during preparation of thermal barrier coating by plasma-spray physical vapor deposition. With agglomerated and sintered $\text{ZrO}_2\text{-}7\text{wt}\%\text{Y}_2\text{O}_3$ (7YSZ) powder as raw

收稿日期: 2017-01-09; 修订日期: 2017-06-21

Received: 2017-01-09; Revised: 2017-06-21

基金项目: 广东省对外合作项目 (2013B050800027); 广州市对外合作项目 (201508030001); 广东省自然科学基金项目 (2016A030312015)

Fund: Supported by the Foreign-cooperation Project of Guangdong Province (2013B050800027), Foreign-cooperation Project of Guangzhou City (201508030001), Research Team of Guangdong Province Natural Science Foundation of China (2016A030312015)

作者简介: 刘飞 (1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为材料表面工程。

Biography: LIU Fei (1993—), Male, Master graduate student, Research focus: surface engineering.

通讯作者: 刘敏 (1965—), 男, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为材料表面工程。

Corresponding author: LIU Min (1965—), Male, Master, Professorate senior engineer, Research focus: surface engineering.

material, thermal barrier coatings were prepared by plasma spray-physical vapor deposition (PS-PVD) on superalloy plate substrate with precast air film cooling holes. Effects of parameters including hole angle and pore size of the air film cooling hole on hole blockage were studied. When pore size of the air film cooling hole was controlled within 0.85 mm, shrinkage factor of the pore size was 19.01%, 14.50%, 14.86%, respectively at the angle of 30°, 60° and 90°. Shrinkage factor of the pore size decreased and maintained stable after a while as the angle increased. Both coatings outside and inside the hole were of columnar structure. When the angle of air film cooling hole was 30°, shrinkage factor of the pore size was 36.40%, 31.70% and 24.45%, respectively provided with pore size of 1.0 mm, 1.3 mm and 1.5 mm. The shrinkage factor decreased while distribution depth of the coating in hole increased as the pore size increased. The angle of air film cooling hole will influence deposition efficiency of thermal barrier coatings, and thus affecting shrinkage factor of pore size. Pore size of the air film cooling hole has no effect on deposition efficiency of thermal barrier coatings, but it will affect shrinkage factor of pore size.

KEY WORDS: plasma spray-physical vapor deposition; thermal barrier coating; air film cooling hole; shrinkage factor of pore size; columnar coating; hole blockage

随着航空发动机推重比不断提高, 涡轮进口温度已经提升到超过高温合金使用极限的水平^[1], 为了满足高温环境的工作要求, 需要联合使用多种隔热降温手段以提高合金基体的工作温度, 如采用气膜冷却结构, 表面制备热障涂层等^[2]。

在带气膜孔的涡轮叶片上制备热障涂层 (Thermal barrier coatings, TBCs), 主要有两种方法: 一是先在叶片上喷涂热障涂层, 再用激光加工制孔, 但是激光可能会引起热障涂层的剥离, 造成损伤缺陷^[3]; 另一种方法是先制孔, 然后再喷涂热障涂层, 这种方法的问题在于喷涂制备的热障涂层会严重堵塞气膜孔。研究表明, 孔径为 0.5 ~ 0.6 mm 的叶片采用等离子工艺喷涂热障涂层, 有约 2% 气膜孔被完全堵死, 超过半数的气膜孔孔径减小了 1/5。采用电子束物理气相沉积 (EB-PVD) 工艺喷涂热障涂层, 当热障涂层总厚度为 0.15 mm 左右时, 测量显示气膜孔径缩小 0.02 ~ 0.05 mm^[4]。气膜孔堵塞会影响气膜冷却的效率^[3], 使气膜冷却达不到理想的效果, 从而影响发动机的性能。

近年来, 新兴了一种新的热障涂层制备技术: 等离子喷涂-物理气相沉积 (Plasma-spray Physical Vapor Deposition, PS-PVD) 技术, 兼具 PS 和 EB-PVD 两种技术的优点^[5-6]。PS-PVD 制备 TBCs 是在高真空环境中, 用热等离子体将原料气化或部分气化并在射流作用下在基体上沉积获得柱状结构涂层。与传统的热喷涂方法相比, PS-PVD 具有以下技术特点: 1) 工作压力可低于 200 Pa; 2) 涂层材料可以以气相形式沉积, 获得类似 EB-PVD 的柱状晶结构; 3) 等离子体输出能量高, 可达 180 kW; 4) 等离子焰流长度可达 2 m, 直径可达 200~400 mm, 径向上涂层材料的气相分子分布更均匀^[7]。通过 PS-PVD 技术可制备热导率低、抗热震性好的热障涂层, 且通过工艺调整能制备层状、柱状或混合状结构涂层, 工艺效率高、成本较低, 是制备先进热障涂层最有前景的技术之一^[8-14]。

为解决喷涂涂层时的堵孔问题, 研究 PS-PVD 在带气膜孔的叶片上制备热障涂层的技术, 对实现气膜冷却和热障涂层技术在航空发动机上的广泛应用具有重要意义。

针对采用 PS-PVD 技术在带气膜孔的叶片上制备 TBCs 过程中气膜孔堵塞情况的研究, 目前还少见报道。本工作采用 PS-PVD 技术, 在制有气膜孔的 K4169 高温合金叶片基体上制备了 7YSZ 热障涂层, 主要研究了一定厚度的 PS-PVD 热障涂层, 对不同角度和不同孔径的气膜孔堵塞情况的影响及其规律。

1 试验

1.1 气膜冷却孔设计

金属基体材料为 K4169 高温合金, 试样尺寸为 100 mm×50 mm×2 mm。用电火花加工制备气膜冷却孔, 气膜孔参数如表 1 所示。其中 1[#]、2[#]、3[#]孔分布于板一, 4[#]、5[#]、6[#]孔分布于板二, 每种类型的孔各 6 个, 呈两行平行排列。

表 1 气膜冷却孔参数表
Tab.1 Parameters of film cooling holes

Number of hole	Diameter/mm	Angle/(°)
1 [#]	0.85	30
2 [#]	0.85	60
3 [#]	0.85	90
4 [#]	1.0	30
5 [#]	1.3	30
6 [#]	1.5	30

1.2 涂层制备

采用 280 号白刚玉砂砾, 在 0.2 MPa 空气压力下对基体进行喷砂粗化。采用低温超音速火焰喷涂 (LT-HVOF, GTV-K2) 设备, 以 NiCrAlY 粉末 (4~45 μm,

AMPERITTM413) 为原料制备中间粘结层 (Bonding coating, BC)。采用等离子喷涂-物理气相沉积设备 (PS-PVD, Sulzer-Metco), 以团聚烧结的 7YSZ 粉末 (5~22 μm, M6700) 为原料, 在粘结层上制备陶瓷面层 (Top coating, TC)。喷枪型号为 O3CP, 喷枪口径为 12.5 mm。

PS-PVD 具体喷涂过程为:把样品固定在夹具上,

样品表面与射流方向垂直, 设置喷涂机器人程序; 用真空泵将喷涂真空罐内气压抽至 150 Pa, 然后回充氩气至 4000 Pa, 进行喷枪点火; 点火后用等离子体预热基体至 850 ℃, 通过机器人程序调整喷距为 950 mm, 喷枪上下扫动进行喷涂, 喷涂过程中对真空罐进行适量的补氧, 防止 7YSZ 晶体失氧^[15]。PS-PVD 工艺参数如表 2 所示。

表 2 PS-PVD 喷涂 7YSZ 热障涂层参数
Tab.2 Coatings parameters of 7YSZ thermal barrier prepared by PS-PVD

Material	Current/A	Ar(nlpm)	He(nlpm)	O ₂ (nlpm)	Stand-off distance/mm	Feed rate/(g·min ⁻¹)	Pre-heating temperature/℃	Chamber pressure/Pa
7YSZ	2600	35	60	2	950	10×2	850~950	150

1.3 涂层表征

采用螺旋测微器与涡流测厚仪测量涂层厚度, 得到各位置的涂层厚度分布, 如表 3 所示。采用光学显微镜 (LEICA DMI5000M, German) 自带测量程序直接测量喷涂前、喷涂 BC 层后以及喷涂 TC 层后的气膜孔的孔口直径, 孔口为椭圆则取短轴直径, 计算孔径收缩率。孔径收缩率用式 (1) 计算:

$$C = \frac{d - d_0}{d_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中: C 为孔径收缩率; d 为制备热障涂层后气膜孔的孔口直径; d₀ 为原始孔径。

利用场发射-扫描电子显微镜 (FE-SEM, Nava-Nano-430, FEI) 检测制备 TBCs 后气膜冷却孔的微观形貌。

表 3 热障涂层厚度分布
Tab.3 Thickness distribution of thermal barrier coating

Number of sample	Thickness of specimen/mm	Thickness of BC/mm	Thickness of TC/mm	Thickness of TBC/mm
1 [#]	1.70	0.17	0.16	0.33
2 [#]	1.63	0.20	0.22	0.42
3 [#]	1.93	0.15	0.25	0.40
4 [#]	1.73	0.16	0.25	0.41
5 [#]	1.68	0.17	0.25	0.42
6 [#]	1.64	0.19	0.24	0.43

2 结果及分析

2.1 角度对气膜冷却孔堵塞情况的影响

图 1 为 φ0.85 mm 的不同角度气膜孔经过 PS-PVD 制备热障涂层后的微观形貌, 柱状结构的涂层在孔口和孔内沉积, 气膜孔的孔径有不同程度的减小, 图 1a、1b、1c 分别为 30°、60°和 90°气膜孔截面。30°、60°和 90°气膜孔的孔径收缩率分别为 19.01%、14.50%和 14.86% (如表 4 所示), 表明 φ0.85 mm 的

气膜孔采用 PS-PVD 制备热障涂层, 孔径收缩率小于 20%。图 2 为不同角度气膜孔的孔径收缩率变化趋势, 可知 30°孔的收缩率最大, 堵塞情况最严重; 随角度的增大, 孔径收缩率逐渐减小, 达到一定水平后保持稳定。分析认为, 当气膜孔角度较小时, 孔口的几何形状更有利于等离子体射流中的气相分子附着、沉积

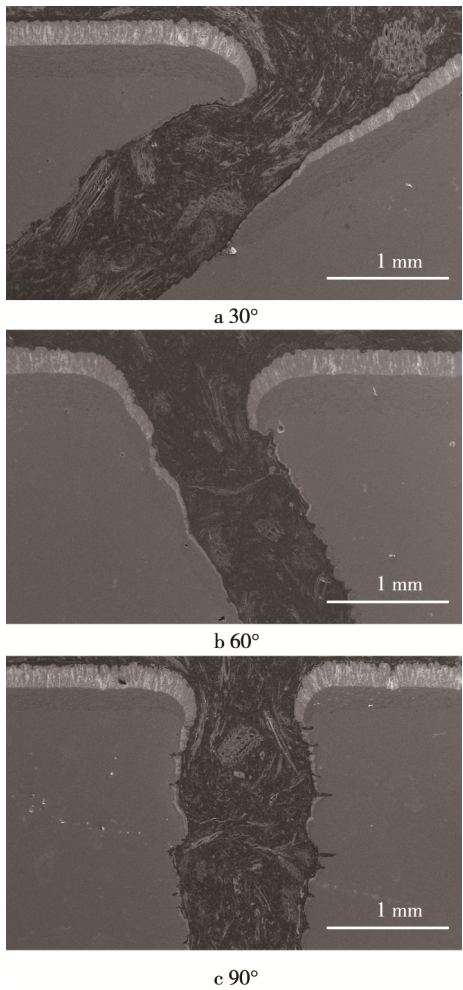


图 1 1[#]、2[#]、3[#]气膜冷却孔用 PS-PVD 制备 7YSZ 涂层后的微观形貌
Fig.1 Micro-topography of film cooling holes after spraying 7YSZ coating by PS-PVD

表 4 1[#]、2[#]、3[#]气膜冷却孔的孔径收缩率
Tab.4 Percentage of contraction of diameter with 1[#], 2[#] and 3[#] film cooling hole

Num- ber	Diameter/ μm			Thickness/ μm		Contraction	
	Pri- mary	after HVOF	after PS-PVD	BC	TC	Diame- ter/ μm	Percen- tage/%
1 [#]	855	808	692	46	116	162	19.01
2 [#]	863	780	738	83	42	125	14.50
3 [#]	875	810	745	65	65	130	14.86

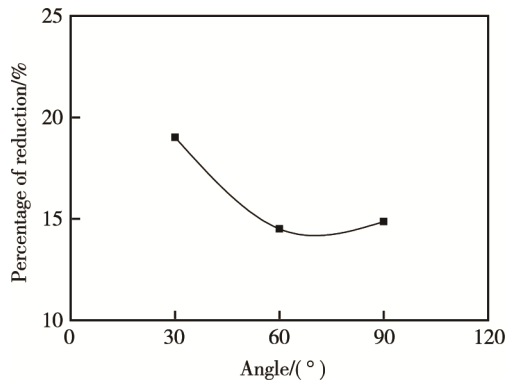


图 2 孔径收缩率趋势
Fig.2 Trend chart of diameter contraction

并形成涂层。随角度的增大,气膜孔的结构使等离子体射流中的部分气相分子能够穿孔而过,而不是在孔口位置附着和沉积,导致沉积效率降低,涂层厚度相较于小角度孔更薄,孔径收缩率因此也更小。气膜孔角度的改变影响了涂层的沉积效率,从而影响了气膜孔的孔径收缩率。

由 PS-PVD 制备所得到的热障涂层为柱状结构,在平整基体表面沉积的厚度较为均一,如图 1 所示。在气膜孔的孔口和孔内位置,由于基体几何条件的改变,涂层的沉积条件不同于平面位置。角度的存在增大了沉积面积,从而使孔口和孔内的涂层厚度比平面位置薄,且位置越深入孔内,气相分子越难以沉积,涂层厚度越薄。气膜孔的角度越大,孔内涂层变薄的趋势越快,如图 1 所示。但是由于孔内和平面涂层的沉积方式一致,所以孔内涂层结构和平面位置同样为柱状结构。图 3 为 2[#]气膜冷却孔内部的涂层形貌,可以看出与图 1 中平面位置结构相似,明显不同于等离子喷涂所形成的层片状结构。

2.2 孔径对气膜冷却孔堵塞情况的影响

图 4 为角度 30°、不同孔径的气膜孔经过 PS-PVD 制备热障涂层后的微观形貌。图 4a、4b、4c 分别为 4[#]、5[#]、6[#]气膜孔截面。4[#]、5[#]、6[#]气膜孔的孔径收缩率分别为 36.4%、31.7%、25.45%,如表 5 所示。由前面分析已知,30°气膜孔的孔径收缩率较大,实验结果与分析较为符合。图 5 为不同孔径的 30°气膜冷

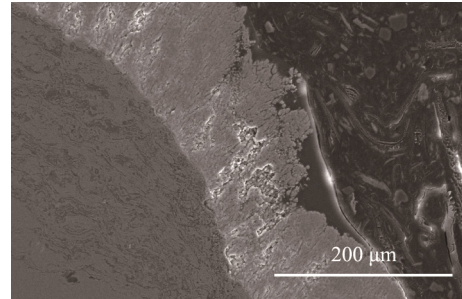
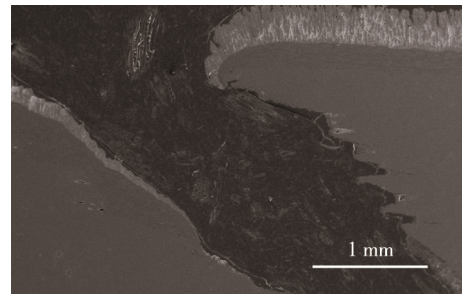
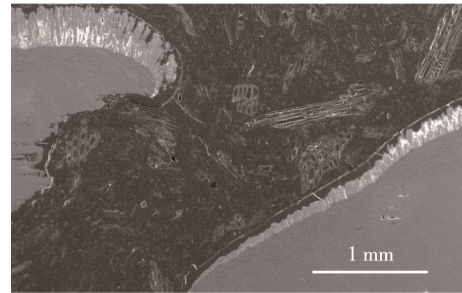


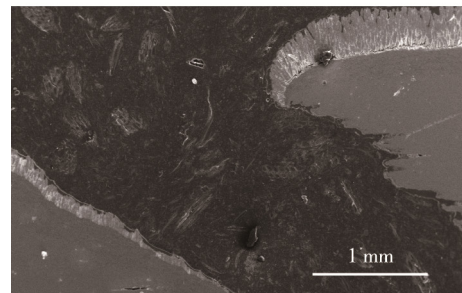
图 3 2[#]气膜冷却孔内部涂层形貌
Fig.3 Cross section topography of TBCs inside 2[#] film cooling hole



a 1.0 mm



b 1.3 mm



c 1.5 mm

图 4 不同孔径的 30°气膜冷却孔用 PS-PVD 制备热障涂层后微观形貌

Fig.4 Micro-structures of film cooling holes with 30° which diameter are different after spraying TBCs by PS-PVD

表 5 4[#]、5[#]、6[#]气膜冷却孔的孔径收缩率
Tab.5 Percentage of contraction of diameter with 4[#], 5[#] and 6[#] film cooling hole

Num- ber	Diameter/ μm			Thickness/ μm		Contraction	
	Pri- mary	after HVOF	after PS-PVD	BC	TC	Diame- ter/ μm	Percen- tage/%
4 [#]	1015	870	645	144	225	369	36.40
5 [#]	1334	1151	911	182	240	422	31.70
6 [#]	1502	1351	1119	150	231	381	25.45

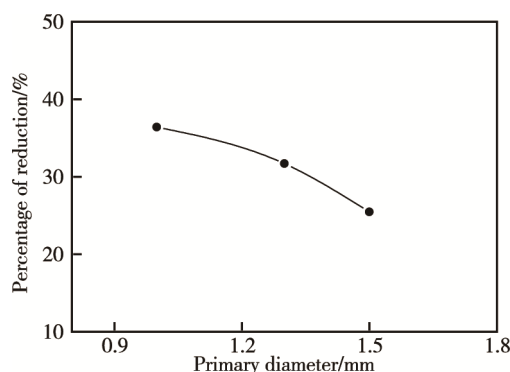
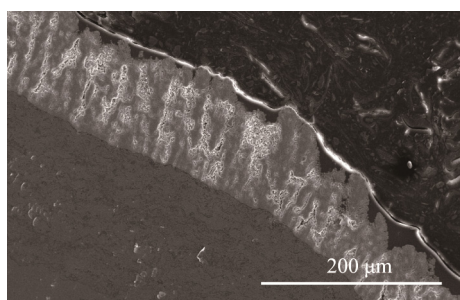


图 5 孔径收缩率趋势

Fig.5 Trend chart of diameter contraction

却孔的孔径收缩率的变化趋势。由图 5 可知,随孔径的增大,气膜冷却孔的孔径收缩率逐渐减小。分析认为,由于气膜孔的角度都为 30° ,只是孔径大小不同,孔口位置的基体几何条件相似,可以认为涂层的沉积条件也是相似的。由表 5 可知,4[#]、5[#]和 6[#]气膜孔孔口的 TC 层厚度大致相当,可以认为三者的涂层沉积效率相同,即孔径大小对 PS-PVD 涂层在气膜孔位置的沉积效率没有影响,只是会影响孔径收缩率。

如图 4 所示,涂层在气膜孔内的分布随深度的增加而变薄,图 4a 所示的 4[#]孔在孔深 3/4 位置处涂层消失,而 5[#]、6[#]孔内的涂层基本贯穿整个气膜孔。同时观察图 1a 可以发现,1[#]孔内的涂层在孔深约 1/2 位置即消失不见。表明孔径会影响 PS-PVD 涂层在气膜孔内的分布,且随孔径的增大,涂层在孔内的分布区域也会增大。图 6 为 6[#]气膜孔的孔内涂层截面形貌,与图 4 平面位置涂层形貌大致相似,可以观察到涂层的柱状结构。

图 6 6[#]气膜冷却孔内部涂层形貌Fig.6 Cross section topography of TBCs inside 6[#] film cooling hole

2.3 涂层沉积过程分析

在 PS-PVD 制备热障涂层的过程中,在高能量的等离子体作用下,涂层材料气化。同时,由于等离子射流直径膨胀到 200~400 mm,使射流中单位面积上分布的原料分子密度稀薄^[7],因此单道次喷涂仅会沉积 0.25~0.50 μm 的涂层,不会像等离子喷涂的大颗粒液滴一样直接堵塞气膜孔^[4],如图 7 所示。在气膜孔

位置,原料气态分子在音速射流的作用下,在接触基体后,部分分子会向不同的方向反弹散射,或是随射流直接通过气膜孔。同时射流通过气膜孔也会使孔内的环境更加复杂,影响涂层沉积。综合以上因素,PS-PVD 热障涂层在气膜孔位置的沉积效率会降低,导致气膜孔位置的热障涂层厚度较薄,从而使气膜孔堵塞的程度较轻微。

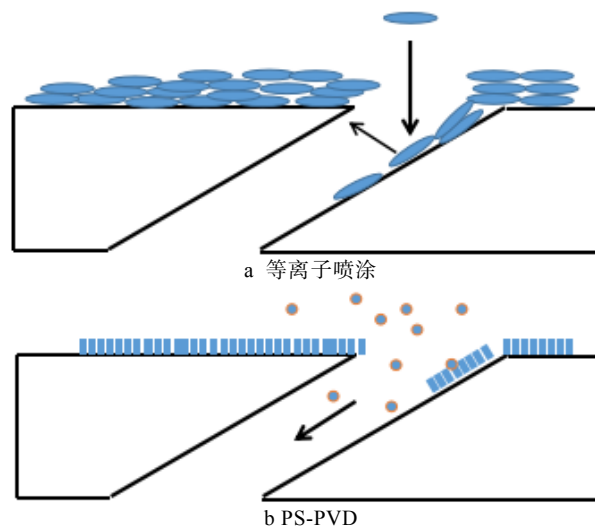


图 7 气膜冷却孔附近涂层沉积示意

Fig.7 Schematic diagram of coating deposition around film cooling hole

3 结论

1) $\phi 0.85$ mm 气膜孔的孔径收缩率小于 20%; 60° 气膜冷却孔的孔径收缩率最小,为 14.5%,随着角度的增大,孔径收缩率呈下降趋势,且到一定程度后保持稳定。气膜孔角度的改变会影响涂层的沉积效率,从而影响气膜孔的孔径收缩率。

2) 30° 气膜孔的孔径收缩率随孔径的增大而减小。 $\phi 1.5$ mm 气膜孔的孔径收缩率最小,为 25.45%。孔径大小对 PS-PVD 涂层在气膜孔位置的沉积效率没有影响,只会影响孔径收缩率。

3) 气膜孔内涂层结构与平面位置涂层结构相同,都为柱状结构。气膜孔孔径大小影响孔内涂层的分布深度,孔径越大,涂层分布深度越深,甚至会贯穿整个气膜孔。

参考文献:

- [1] 周洪, 李飞, 何博, 等. 等离子喷涂热障涂层的隔热性分析[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(10): 1609-1615.
ZHOU Hong, LI Fei, HE Bo, et al. Analyses on Thermal Barrier Effects of Zirconia Based Thermal Barrier Coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(10): 1609-1615.

- [2] 孙瑞峰, 张晓兵, 曹文斌, 等. 带热障涂层镍基单晶高温合金的激光制孔研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2014(5): 1193-1198.
SUN Rui-feng, ZHANG Xiao-bing, CAO Wen-bin, et al. Laser Drilling of Ni-base Single-crystal Superalloy through Thermal Barrier Coatings[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014(5): 1193-1198.
- [3] 李佳, 任静, 蒋洪德. 燃气轮机高温叶片气膜冷却系统的研究进展[J]. 热力透平, 2010(1): 6-11.
LI Jia, REN Jing, JIAN Hong-de. Recent Progress on Gas Turbine Film Cooling Research[J]. Thermal Turbine, 2010(1): 6-11.
- [4] 张志强, 宋文兴, 陆海鹰, 等. 热障涂层在航空发动机涡轮叶片上的应用研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(2): 38-42.
ZHANG Zhi-qiang, SONG Wen-xing, LU Hai-ying, et al. Application of Thermal Barrier Coating on Aeroengine Turbine Blade[J]. Aeroengine, 2011, 37(2): 38-42.
- [5] 郭洪波, 宫声凯, 徐惠彬. 新型高温/超高温热障涂层及制备技术研究进展[J]. 航空学报, 2014, 35(10): 2722-2732.
GUO Hong-bo, GONG Sheng-kai, XU Hui-bin. Research Progress on New High/Ultra-high Temperature Thermal Barrier Coatings and Processing Technologies[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(10): 2722-2732.
- [6] MUEHLBERGER E, MEYER P. LPPS-thin Film Processes: Overview of Origin and Future Possibilities[C]// International Thermal Spray Conference. Las Vegas: Thermal Spray, 2009: 737-740.
- [7] HALL A C, SPINHIRNE N R, HIRSCHFELD D A, et al. Low Pressure Plasma Spray Thin Film at Sandia National Laboratories[C]// International Thermal Spray Conference 2009. Las Vegas: ITSC, 2009: 725-728.
- [8] DORIER J L, GINDRAT M, HOLLENSTEIN C, et al. Plasma Jet Properties in a New Spraying Process at Low Pressure for Large Area Thin Film Deposition[C]// International Thermal Spray Conf 2001. Singapore: ITSC, 2001: 759-644.
- [9] HOSPACH A, MAUER G, VABEN R, et al. Columnar-structured Thermal Barrier Coatings (TBCs) by Thin Film Low-pressure Plasma Spraying (LPPS-TF)[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(1): 116-120.
- [10] REFKE A, GINDRAT M, VON K. LPPS Thin Film: A Hybrid Coating Technology Between Thermal Spray and PVD for Functional Thin Coatings and Large Area Applications[C]// International Thermal Spray Conf 2007. Beijing: ITSC, 2007: 705-710.
- [11] 王佳文, 刘敏, 邓春明, 等. 等离子喷涂制备 ZrB_2 -SiC 复合涂层及其静态烧蚀性能[J]. 装备环境工程, 2016(3): 43-47.
WANG Jia-wen, LIU Min, DENG Chun-ming, et al. Static Ablation Resistance of ZrB_2 -SiC Composite Coatings Prepared by Atmospheric Plasma Spraying[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016(3): 43-47.
- [12] HARDER B. PS-PVD Processing Varies Coating Architecture with Processing Parameters[J]. Advanced Materials & Processes, 2011, 169(8): 49-51.
- [13] 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): 190-197.
- [14] VABEN R, MAUER G. Plasma Spray-PVD: Plasma Characteristics and Impact on Coating Properties[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2012, 406: 1-22.
- [15] 张小锋, 周克崧, 宋进兵, 等. 等离子喷涂-物理气相沉积 7YSZ 热障涂层沉积机理及其 CMAS 腐蚀失效机制[J]. 无机材料学报, 2015, 30(3): 287-293.
ZHAN Xiao-feng, ZHOU Ke-song, SONG Jin-bing, et al. Deposition and CMAS Corrosion Mechanism of 7YSZ Thermal Barrier Coatings Prepared by Plasma Spray-physical Vapor Deposition[J]. Journal of Inorganic Materials, 2015, 30(3): 287-293.