



层状热障涂层孔隙微结构对其隔热性能影响的数值研究

凌锡祥, 王玉璋, 王星, 李佳莉

(上海交通大学 动力机械与工程教育部重点实验室, 上海 200240)

摘要: 基于四参数随机生长方法开发涂层微结构构造软件, 构造层状涂层各向异性孔隙微结构, 基于热阻网络方法开发涂层隔热性能分析软件, 通过数值模拟分析不同孔隙大小、厚度和方向下层状涂层内部传热过程, 得到层状涂层有效导热系数和稳态导热温度场。结果表明: 提高涂层的孔隙率能有效地增强涂层隔热性能; 孔隙率一定时, 层状孔隙细小化会减弱涂层的隔热性能, 但有利于稳态导热温度场的均匀分布, 有利于涂层结构稳定; 孔隙率一定时, 层状孔隙细长化在一定程度上会增强涂层的隔热性能; 孔隙率一定时, 在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 内, 随着孔隙水平夹角的增大, 涂层的隔热性能会有所减弱。且孔隙率越大, 这种减弱趋势越明显。

关键词: 热障涂层; 层状微结构; 孔隙率; 有效导热系数; 隔热性能

中图分类号: TK124

文献标志码: A

Numerical study of effect of pore microstructure of layered thermal barrier coatings on thermal insulation performance

LING Xi-xiang, WANG Yu-zhang, WANG Xing, LI Jia-li

(Key Laboratory for Power Machinery and Engineering, Ministry of Education,
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A software for constructing coating microstructure was developed based on the quartet structure generation set (QSGS), and the anisotropic pore microstructure of layered coating was constructed, also a software for analyzing the thermal insulation performance was developed based on thermal resistance network method. By numerical simulation, the heat transfer process within the layered coatings of different pore sizes, thicknesses and directions was analyzed, then, the coating effective thermal conductivity and thermal steady state temperature field were obtained. The results show that increasing the porosity of the coating can effectively enhance the thermal insulation performance of the coating. When porosity is constant, as the layered pores diameter decreases, its thermal insulation performance will be weakened, but the steady-state temperature distribution will be more uniform, and the structure will be more stable. When porosity is constant, as the layered pores elongating, its thermal insulation performance will be enhanced to some extent. When porosity is constant in the range of $0^\circ\sim 90^\circ$, as the horizontal angle of the layered pores increases, its thermal insulation performance will be weakened. And the higher the porosity, the more obvious the weaken trend.

Key words: thermal barrier coating; layered microstructure; porosity; effective thermal conductivity; thermal insulation performance

高涡轮前进口温度是高推重比航空发动机的一大特征。随着航空发动机朝着高推重比方向迅速发展, 即使采用最先进的气冷结构技术, 航空发动机涡轮叶片表面达到的温度也将远高于目前涡轮叶片合金材料

所能承受的极限温度。在叶片表面采用耐高温的性能优异的热障涂层是先进航空发动机迅速发展提出的迫切需求。热障涂层在燃气涡轮发动机热端部件上使用, 可以提高涡轮前进口温度, 从而提高发动机的工作效

率;同时,能够大幅度降低热端部件的表面温度,提高部件的寿命和可靠性。热障涂层的研究成为近年来国际高温涂层领域最活跃的研究课题之一^[1-2]。

隔热性能是评价热障涂层性能的重要指标。涂层隔热性能(通常用涂层的导热系数进行表征)能直接关系到金属部件的使用温度,同时也影响到热障涂层热循环的服役寿命^[3]。涂层隔热性能与涂层制备材料的选取、涂层结构的布置、制备工艺以及工作环境等密切相关。热障涂层的材料成分从传统的 8%(质量分数)Y₂O₃-ZrO₂(8YSZ)逐渐发展到掺稀土元素的 ZrO₂ 体系。目前,主流的制备工艺是等离子喷涂(APS)和电子束物理气相沉积法(EB-PVD)。等离子喷涂或者是电子束物理气相沉积制备的热障涂层都是各向异性的,非致密多孔状介质,其孔隙率在 5%~20%之间^[4-5]。等离子喷涂制备的热障涂层为层状结构,隔热性能好,但涂层内层间结合差;电子束物理气相沉积制备的热障涂层为柱状晶结构,抗热震性能优异,但隔热性能有待提高。各种类型涂层表现出来的热导率和隔热性能差异与涂层内的组织结构和孔隙率相关^[6]。研究涂层内的组织结构对其隔热能力的影响,可以为增强涂层隔热能力的喷涂制作工艺发展方向提供参考依据,因而,该研究将具有重要意义。已有部分学者研究了裂纹的形状与方向、孔隙形状与大小对涂层隔热能力的影响^[7-10]。其中,包括 SHEN 等^[7]通过对傅立叶导热定律进行相关的严格推导,以及通过有限元模拟,定量地分析了层状结构涂层孔隙直径与裂纹长度对有效导热系数的影响。WANG 等^[9]通过有限元模拟定量地分析了孔隙方位角、孔隙体积分数和孔隙形状系数对有效导热系数的影响。然而其模型比较简化,不能够模拟真实涂层的随机性孔隙构造。本文作者利用构造多孔介质的有效方法,有效地模拟了真实涂层的孔隙分布随机性,因而构造的模型更加有效、可靠,同时,构造模型的多项参数可以调控,因而能更加全面地研究涂层空隙不同的分布对涂层隔热性能的影响。本文作者所在课题组已针对层、柱状涂层进行导热数值研究,发现柱状结构比层状结构隔热能力差,但其结构较稳定^[11]。

基于四参数随机生长法^[12],构造了各向异性孔隙结构分布为层状的 YSZ 热障涂层的模型,通过改变相关构造参数得到不同孔隙分布的几何模型。进一步完善了本课题组开发的涂层性能分析软件,深入研究层状涂层的孔隙微结构及不同方向孔隙微结构对其隔热性能的影响,其结果可以为涂层结构的设计及制备提供参考依据。

1 热阻网络法

利用热阻网络法^[13]基于涂层模型的空间结构,对热量在材料内的传递过程进行数值研究以获得其有效导热系数。

在直角坐标系 xy 中,对传热方向按空间步长 L 离散,节点 (i,j) 在 x 方向上的热流形式为

$$q_x = \frac{k_{i,j}^+(T_{i+1,j} - T_{i,j})}{\Delta x} = \frac{k_{i,j}^-(T_{i,j} - T_{i-1,j})}{\Delta x} \quad (1)$$

式中: i, j 表示节点符号,上标“+”,“-”分别表示节点 (i,j) 与前后节点之间的传热系数。同理可得,在 y 方向上离散形式。对节点形式为正方形有 $\Delta x = \Delta y = L$ 。稳态条件下,流经任何一个节点的净热流为 0,综合上述可得节点温度表达式为

$$T_{i,j} = \frac{k_x^+ T_{i+1,j} + k_x^- T_{i-1,j} + k_y^+ T_{i,j+1} + k_y^- T_{i,j-1}}{k_x^+ + k_x^- + k_y^+ + k_y^-} \quad (2)$$

若相邻节点为同种材料,节点之间的导热系数分别取 k_a 或 k_b ,若不同则取为调和导热系数

$$k = \frac{2k_a k_b}{k_a + k_b} \quad (3)$$

由于方程组的节点数量巨大,可以直接采取迭代法进行求解。模拟区域的单值性条件为在 x 方向为绝热边界条件,在 y 方向为定温边界条件。则由此可以求得多相材料的有效导热系数为

$$k_c = \frac{\sum_i q_y}{(T_{y=N} - T_{y=0})N} \quad (4)$$

本文作者利用四参数随机生长法构造的两相热障涂层结构模型,模型以数值 0、1 形式的数字化网格呈现,然后将数值矩阵作为数值模拟的网格导入用 C++ 基于 Visual Studio 2010 平台编写计算程序,进而对实现热障涂层进行数值传热分析。计算程序的准确性已在王星等^[14]研究中得到验证。

$$\text{FLAG}(x, y) = \begin{cases} 0, & (x, y) \text{ 是孔隙填充相} \\ 1, & (x, y) \text{ 是基体材料相} \end{cases}$$

2 构造涂层微结构模型

四参数随机生长法是构造多相多孔介质的有效方

法, 同时, 它可以通过参数调整控制生成介质的形貌特征。在本研究中以构造固相 8YSZ 和孔隙两相构成的二维多孔介质为例, 以固相 8YSZ 为生长相, 孔隙为非生长相, 初始相全为孔隙, 构造过程如下。

1) 在构造网格上以概率 p_c 随机布置固相生长成核, p_c 要小于该相的体积分数。

2) 对每一个生长核, 以概率 p_d 向各个方向生长, 如图 1 所示。

3) 重复步骤 2) 直至固相达到预设的体积分数的 p , 输出结构数据。

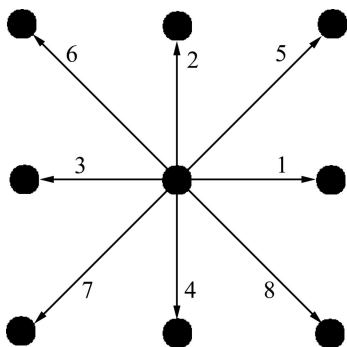


图 1 二维节点的 8 个生长方向示意图

Fig. 1 Schematic diagram of eight growth direction of two-dimensional node

等离子喷涂制备的热障涂层为层状结构, 孔隙均以直径在 1~10 μm 之间的孔隙含量最多, 等轴圆形孔隙较多, 其次为不等轴扁平状孔隙, 再其次为缝隙状孔隙^[15]。等离子喷涂制备的热障涂层实验文献[15-16]中真实层状涂层组织结构与图 3(b)和(c)中所示结构非常相近, 本模型是在真实层状涂层结构的基础上, 改进模型参数设计, 数值研究其隔热性能变化。

利用四参数随机生长方法构造了多孔涂层的层状组织结构, 其层状结构模型分别如图 2 和 3 所示。图中所示涂层厚度为 0.2 mm, 宽度为 0.2 mm。模型中, 固相 8YSZ 为生长相, 非生长相为孔隙空气, 通过改变固相形核中心生成概率 p_c 的大小来控制层状孔隙直径的大小, 通过控制层状方向生长概率 p_d 的大小来调整层状孔隙的粗细。

控制涂层孔隙率为 15%, 层状 1, 3 方向生长概率为 $p_d=0.02$, 其余各方向生长概率均为 $p_d=0.0002$ (即 1, 3 方向生长概率为其他方向的 100 倍), 通过控制固相 8YSZ 形核中心生成概率 p_c 的增大, 实现层状孔隙直径减小、孔隙数量增多, 得到一系列的层状组织结构模型(见图 2)。

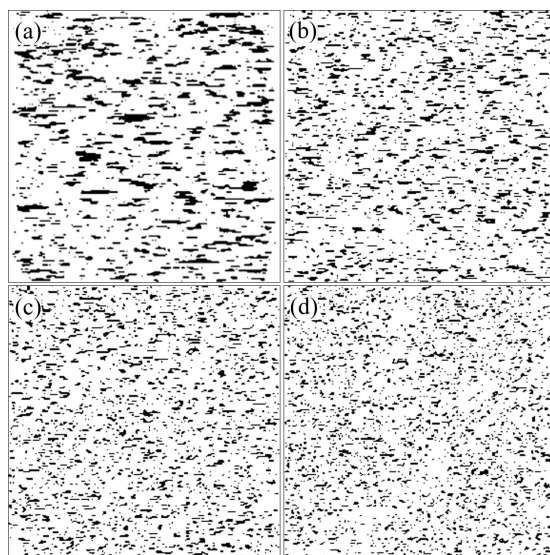


图 2 不同固相形核中心生成概率的层状结构模型

Fig. 2 Layered structure geometry models under different generation probabilities of solid phase nucleation centers: (a) $p_c=0.05$; (b) $p_c=0.20$; (c) $p_c=0.35$; (d) $p_c=0.50$

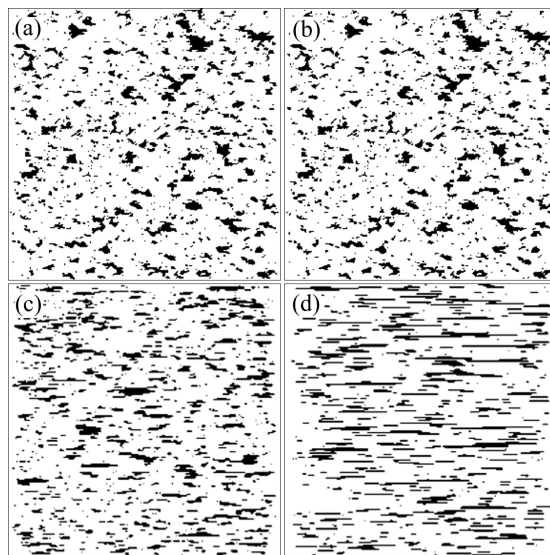


图 3 沿 1, 3 方向不同生长概率下的层状结构模型

Fig. 3 Layered structure geometry models under different growth probabilities of direction 1 and 3: (a) $p_d=0.0002$; (b) $p_d=0.002$; (c) $p_d=0.02$; (d) $p_d=0.2$

控制涂层孔隙率为 15%, 固相 8YSZ 形核中心生成概率 $p_c=0.05$, 通过控制层状 1, 3 方向生长概率 p_d 增大, 实现整体层状孔隙的细长化, 得到一系列的层状组织结构模型(见图 3)。图 3(a)、(b)、(c)、(d)中模型的 1, 3 方向生长概率分别为 $p_d=0.0002$ 、 $p_d=0.002$ 、 $p_d=0.02$ 、 $p_d=0.2$, 其他方向均为 0.0002 (即 1, 3 方向

生长概率分别为其他方向的1倍、10倍、100倍、1000倍)。

图4所示为固定涂层孔隙率为10%、固相8YSZ形核中心生成概率 $p_c=0.05$,在四参数随机生长方法构造的层状结构模型(层状孔隙方向生长概率为其余各方向生长概率的100倍)基础上,进一步处理得到的一系列不同孔隙方向结构模型。图4(a)、(b)、(c)和(d)的孔隙方向水平夹角分别为 0° 、 30° 、 60° 和 90° 。

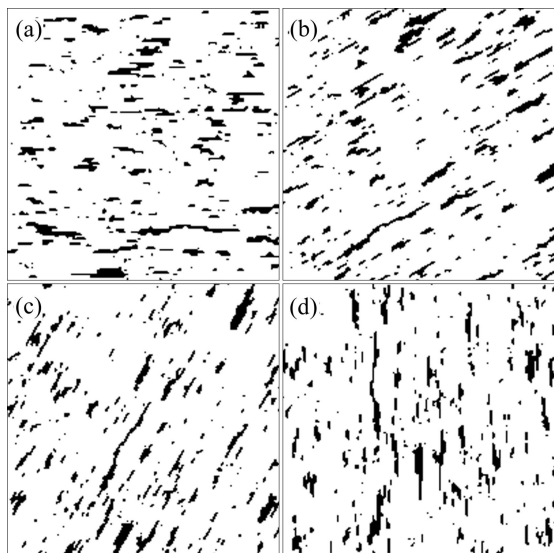


图4 不同孔隙方向的结构模型(0.2mm×0.2mm)

Fig. 4 Structure geometry models along different pore directions (0.2 mm×0.2 mm): (a) 0° ; (b) 30° ; (c) 60° ; (d) 90°

3 涂层隔热性能分析

计算模型的上下边界为定温边界条件,左右边界为绝热边界条件。通常情况下,0.2 mm涂层的隔热温差大约为 70°C 。因此,模拟中选取上边界为高温 $t_h=1035^\circ\text{C}$,下边界为低温 $t_l=965^\circ\text{C}$;模拟区域为正方形,取样空间尺度为 $L=0.2\text{ mm}$,离散单元格尺度为 $l=1\text{ }\mu\text{m}$,空间中离散单元体个数 $N=(L/l)^2=200\times 200=40000$ 。

热障涂层基体材料为8YSZ,致密的8YSZ材料导热系数在 $2.1\sim 2.6\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,其与温度的关系可查文献[11]选取。孔隙内为空气,本研究中的孔隙率变化区间为5%~20%,孔隙率比较低,孔隙也非常小(孔隙直径一般在 $10\text{ }\mu\text{m}$ 以内),内部对流传热和辐射传热可以忽略不计,但空气导热系数会随温度发生变化,计算中取其随温度变化的一系列值可查阅文献[17]。为了简化模型计算,下文模拟中,孔隙中空气选取空气平

均温度 $t_m=(t_h+t_l)/2=1000^\circ\text{C}$ 时,导热系数为 $0.0807\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$,8YSZ材料导热系数同时也选取平均温度 $t_m=1000^\circ\text{C}$ 时的数值 $2.43\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ 。

3.1 层状孔隙大小对隔热性能的影响

图5所示为层状结构涂层有效导热系数随固相形核中心生成概率的变化关系。由图5中数据可知,层状结构涂层的有效导热系数随着固相形核中心生成概率的增大而逐渐增大。涂层材料的热量主要是沿着涂层的固体骨架由高温侧向低温侧传递,高温空气再向周围骨架传热,最终达到平衡状态。层状结构下,随着固相形核中心生成概率的增大,在孔隙率一定的条件下,单个孔隙的直径变小,孔隙分布增多,并且单个孔隙横向覆盖区域显著变小。涂层热流方向出现了更多的高热导率的固体骨架区域,因而,其等效导热系数增大,层状结构涂层的孔隙细小化会减弱其隔热性能。

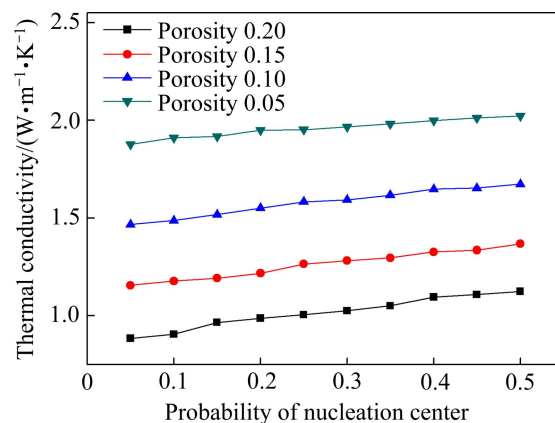


图5 层状结构涂层有效导热系数与固相形核中心生成概率的关系

Fig. 5 Relationship between layered structure thermal conductivity and generation probabilities of solid phase nucleation centers

图6所示为不同固相形核中心生成概率下孔隙率对层状结构导热系数的影响。由图6可知,层状结构涂层的有效导热系数随着孔隙率的增大而逐渐减小。低热导率空气孔隙的增多能显著增强涂层的隔热能力。对比该图中固相8YSZ形核中心生长概率 p_c 为0.50、0.25和0.05的曲线更加证明层状结构涂层的孔隙细小化会减弱其隔热性能的结论。

图7所示分别为固相8YSZ形核中心生长概率 $p_c=0.05$ 、 $p_c=0.20$ 、 $p_c=0.35$ 、 $p_c=0.50$ 时孔隙率均为15%的层状结构涂层稳态导热温度场。比较图7(a)和(d)的等温线可知,图7(d)所示的曲线更加平稳些。低固相

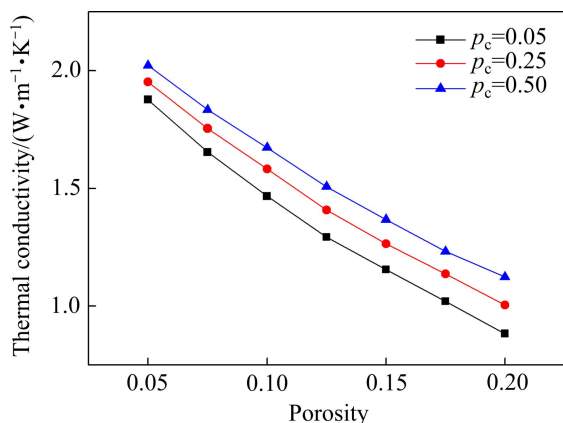


图 6 不同固相形核中心生成概率下层状结构导热系数与孔隙率的关系

Fig. 6 Relationship between layered structure thermal conductivity and porosity under different generation probabilities of solid phase nucleation centers

形核中心生成概率 p_c 结构容易出现局部热点, 造成热应力分布不均匀, 而比高固相形核中心生成概率 p_c 结构易于出现应力破坏现象, 随着固相形核中心生长概率的增大, 层状结构涂层的孔隙细小化分布有利于其结构的稳定。

3.2 层状孔隙裂纹粗细对隔热性能影响

图 8 所示为层状结构涂层有效导热系数随层状 1, 3 方向上生长概率的变化关系。由图 8(a)和(b)中数据表明, 在孔隙率一定的条件下, 层状结构涂层的有效导热系数与 1, 3 方向上生长概率在一定范围内成对数减少关系。在 1, 3 方向生长概率 p_d 由 0.0002 增长为 0.02 的区间内, 等效导热系数同时迅速减小。这是由于层状结构孔隙垂直于热量传导方向, 孔隙迅速层状细长化, 单个孔隙横向覆盖区域显著变大, 使得孔隙两边可供热量传递的固体骨架大为减少, 通过孔隙传递的热量显著增加。涂层热流方向上出现了更多的低热导率的孔隙区域, 导热热阻明显增加, 因而, 等效导热系数迅速减小。在 1, 3 方向生长概率 p_d 由 0.02 增长为 0.2 局部区间内, 随着方向生长概率的增长, 孔隙的细长改变程度变小, 等效导热系数的减小趋势逐渐放缓。图 9 中数据表明, 层状结构涂层的有效导热系数随着孔隙率的增大而逐渐减小。低热导率空气孔隙的增多能显著的增强涂层的隔热能力。对比该图中 1, 3 方向生长概率 p_d 为 0.002、0.02、0.2 的曲线, 可更加证明层状结构涂层的孔隙细长化有利于其隔热性能增强的结论。

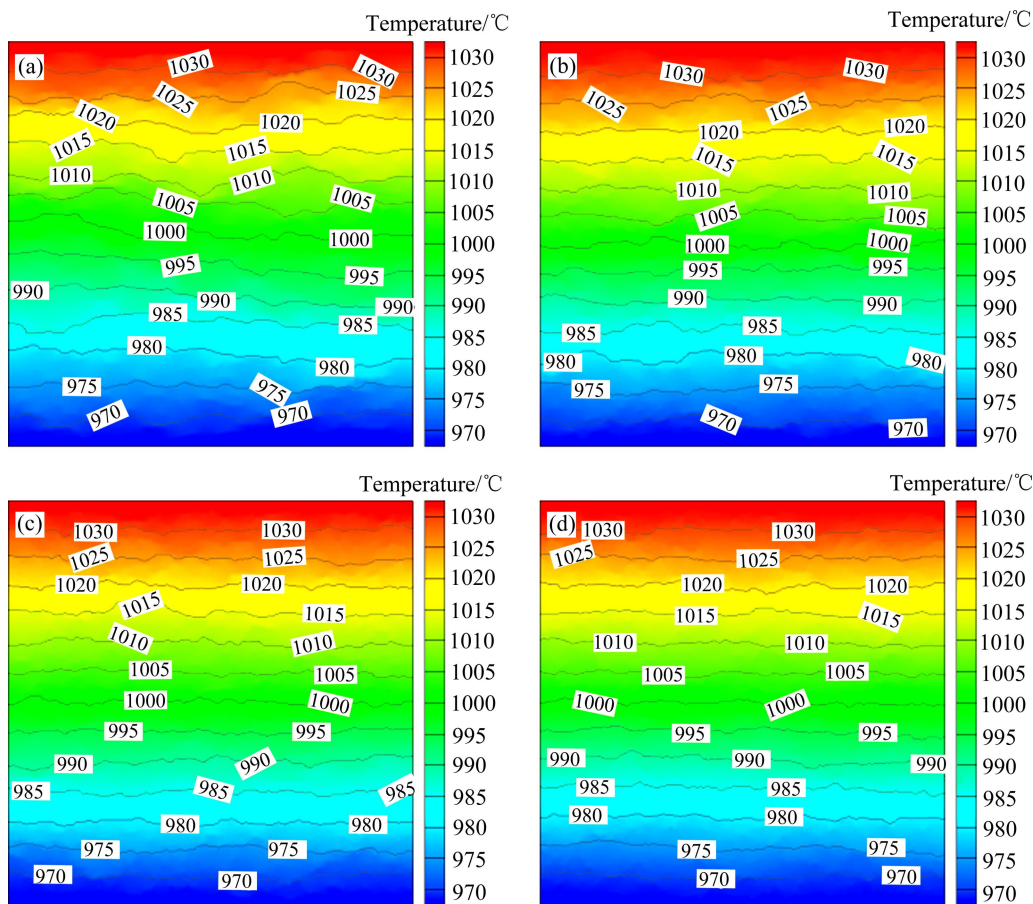


图 7 不同 p_c 层状结构涂层稳态导热温度场分布

Fig. 7 Steady-state temperature field of layered structures coatings with different p_c : (a) $p_c=0.05$; (b) $p_c=0.20$; (c) $p_c=0.35$; (d) $p_c=0.50$

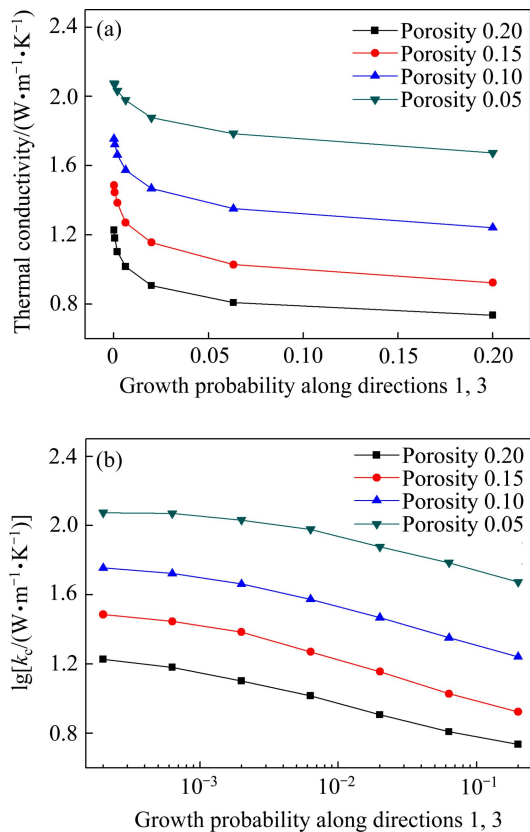


图8 1, 3方向生长概率对层状结构导热系数的影响

Fig. 8 Relationship between layered structure thermal conductivity and growth probabilities along directions 1, 3:

(a) Linear coordinates; (b) Logarithmic coordinates

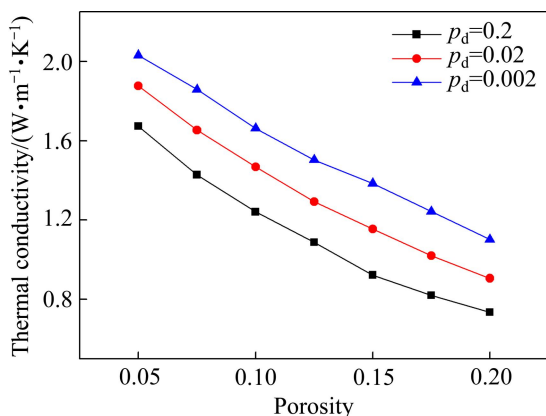


图9 不同1, 3方向生长概率下层状结构导热系数与孔隙率的关系

Fig. 9 Relationship between layered structure thermal conductivity and porosity under different growth probabilities along directions 1, 3

图9中数据表明,层状结构涂层的有效导热系数随着孔隙率的增大而逐渐减小,孔隙率对涂层的有效导热系数有显著影响。文献[18]中等离子喷涂制备的热障涂层随着高温烧结,涂层孔隙率不断下降,测得的

涂层导热率同时不断增加。证明了模拟结论的正确性。

3.3 孔隙方向对隔热性能的影响

图10所示为涂层有效导热系数随孔隙方向(用孔隙水平夹角表示)的变化关系。在一定范围内,随着孔隙水平夹角的增大,涂层的有效导热系数逐渐增大。在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内,随着孔隙水平夹角的增大,涂层热量传导方向由与孔隙方向垂直逐渐变化到与孔隙方向平行。作为热流方向上的导热热阻较大的孔隙环节,随着孔隙水平夹角的增大,单个孔隙横向覆盖区域变小,因此,涂层内同一热流方向截面出现了更多的高导热率的固体骨架区域,涂层等效导热系数也随之增大。因而在一定范围内,随着孔隙水平夹角的增大,涂层的隔热性能会有所减弱。

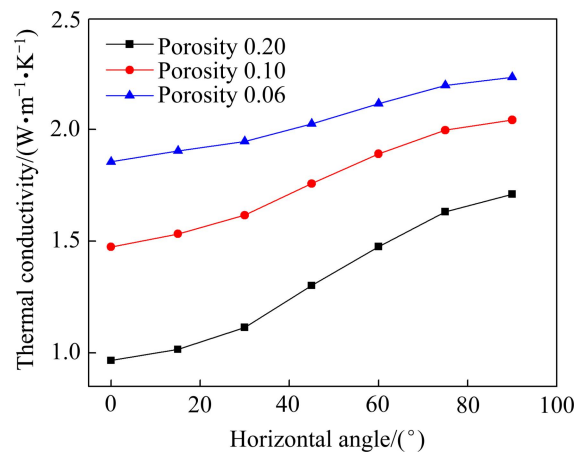


图10 涂层导热系数与孔隙方向的关系

Fig. 10 Relationship between coating thermal conductivity and pore directions

由图10可知,在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 及 $60^\circ \sim 90^\circ$ 范围内,涂层有效导热系数增加比较缓慢;在 $30^\circ \sim 60^\circ$ 范围内,涂层有效导热系数增加比较迅速;在 45° 附近,涂层有效导热系数曲线随孔隙水平夹角的生长出现了拐点。比较图8中孔隙率为6%及20%的曲线可知,孔隙率为20%的曲线具有更明显的变化趋势。孔隙率较低时,孔隙的直径明显较小并且分布数量也较少,在相同孔隙水平夹角增加下,涂层内同一热流方向截面出现高导热率的固体骨架区域增加程度相对要小的多,因而,等效导热系数增加的趋势要平缓些。

4 结论

1) 孔隙率对涂层的有效导热系数有显著影响,一定范围内增大孔隙率能显著的提高其隔热性能。

2) 孔隙率一定时, 随着固相形核中心生成概率 p_c 的不断增大, 层状孔隙直径减小, 孔隙分布增多, 涂层隔热性能会有所减弱, 但稳态导热温度场分布更均匀, 结构更加稳定。

3) 孔隙率一定时, 随着层状 1, 3 方向上生长概率 p_d 不断增大, 层状孔隙均匀细长化, 涂层的有效导热系数在一定范围内成对数减少, 涂层隔热性能有所增强。

4) 孔隙率一定时, 在 $0^\circ\sim 90^\circ$ 范围内, 随着孔隙水平夹角的增大, 也就是孔隙结构从层状变成柱状, 涂层的隔热性能会有所减弱。且孔隙率越大, 这种减弱趋势越明显。

REFERENCES

- [1] 郑 蕾, 郭洪波, 郭 磊, 彭 徽, 宫声凯, 徐惠彬. 新一代超高温热障涂层研究[J]. 航空材料学报, 2012, 32(6): 14-24.
ZHENG Lei, GUO Hong-bo, GUO Lei, PENG Hui, GONG Sheng-kai, XU Hui-bin. New generation thermal barrier coatings for ultrahigh temperature applications[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2012, 32(6): 14-24.
- [2] 王 青, 王亚平, 丁秉钧. 热障涂层隔热性能研究进展[J]. 功能材料, 2013, 44(23): 3363-3367.
WANG Qing, WANG Ya-ping, DING Bing-jun. Progress on heat insulation performance of thermal barrier coatings[J]. Journal of Functional Materials, 2013, 44(23): 3363-3367.
- [3] 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(9): 125-129.
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(9): 125-129.
- [4] 魏绍斌, 陆 峰, 何利民, 许振华. 热障涂层制备技术及陶瓷层材料的研究进展[J]. 热喷涂技术, 2013, 5(1): 31-37.
WEI Shao-bin, LU Feng, HE Li-min, XU Zhen-hua. Progress in processing techniques and ceramic materials of thermal barrier coatings[J]. Thermal Spray Technology, 2013, 5(1): 31-37.
- [5] SCHULZ U, LEYENS C, FRITSCHER K, PETERS M, SARUHAN-BRINGS B, LAVIGNE O, DORVAUX J M, POULAIN M, MEVREL R, CALIEZ M. Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings[J]. Aerospace Science and Technology, 2003, 7(1): 73-80.
- [6] 周 洪, 李 飞, 何 博, 陆燕玲, 王 俊, 孙宝德. 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, LU Yan-ling, WANG Jun, SUN Bao-de. Analyses on thermal barrier effects of zirconia based thermal barrier coatings[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(10): 1609-1615.
- [7] SHEN W, WANG F C, FAN Q B, MA Z. Effects of defects on the effective thermal conductivity of thermal barrier coatings[J]. Applied Mathematical Modelling, 2012, 36(5): 1995-2002.
- [8] JADHAV A D, PADTURE N P, JORDAN E H, GELL M, MIRANZO P, FULLER E R Jr. Low-thermal-conductivity plasma-sprayed thermal barrier coatings with engineered microstructures[J]. Acta Materialia, 2006, 54(12): 3343-3349.
- [9] WANG L, WANG Y, SUN X G, HE J Q, PAN Z Y, ZHOU Y, WU P L. Influence of pores on the thermal insulation behavior of thermal barrier coatings prepared by atmospheric plasma spray[J]. Materials & Design, 2011, 32(1): 36-47.
- [10] WANG Z, KULKARNI A, DESHPANDE S, NAKAMURA T, HERMAN H. Effects of pores and interfaces on effective properties of plasma sprayed zirconia coatings[J]. Acta Materialia, 2003, 51(18): 5319-5334.
- [11] WANG Y Z, WANG X, WENG Y W. Analysis of effective thermal conductivity of thermal barrier coatings based on microstructure [C]// ASME Turbo Expo 2014. Turbine Technical Conference and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2014: V006T22A015Q.
- [12] WANG M R, WANG J K, PAN N, CHEN S Y. Mesoscopic predictions of the effective thermal conductivity for microscale random porous media[J]. Physical Review E, 2007, 75(3): 036702.
- [13] 张海峰, 葛新石, 叶 宏. 预测复合材料导热系数的热阻网络法[J]. 功能材料, 2005, 36(5): 757-759.
ZHANG Hai-feng, GE Xin-shi, YE Hong. The thermal network method to evaluate the thermal conductivity of the composites[J]. Function Material, 2005, 36(5): 757-759.
- [14] 王 星, 王玉璋. 颗粒填充型复合材料有效导热系数的数值计算方法[J]. 材料导报, 2013, 27(10): 143-147.
WANG Xing, WANG Yu-zhang. Numerical calculation method for effective thermal conductivity of particle filled composites[J]. Materials Review, 2013, 27(10): 143-147.
- [15] 张红松, 王富耻, 马 壮, 成志芳, 王全胜, 冼文锋. 等离子喷涂 ZrO_2 涂层孔隙定量分析[J]. 材料工程, 2006(z1): 407-410.
ZHANG Hong-song, WANG Fu-chi, MA Zhuang, CHENG Zhi-fang, WANG Quan-sheng, XIAN Weng-feng. Quantitative analysis of pores in plasma-sprayed ZrO_2 coatings[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(z1): 407-410.
- [16] 李其连. 等离子喷涂参数对热障涂层热冲击性能的影响[J]. 航空制造技术, 2004(6): 16.
LI Qi-lian. Effect of plasma spraying parameters on the thermoshock performance of TBCs[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2004(6): 16.
- [17] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 559.
YANG Shi-ming, TAO Wen-quan. Heat transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 559.
- [18] WANG K, PENG H, GUO H B, GONG S K. Effect of sintering on thermal conductivity and thermal barrier effects of thermal barrier coatings[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2012, 25(5): 811-816.

(编辑 龙怀中)