華東理工大學学报 自然科学版 Natural Science Edition
JOURNAL OF EAST CHINA UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

热障涂层扁平梭形孔隙内颗粒减缓熔融CMAS渗入的流动机理

叶梅笑寒 李泓辰 张文康 杨挺 王卫泽

Flow Mechanism of Particles Mitigating Molten CMAS Infiltration within Flat Fusiform Pores of Thermal Barrier Coatings

YE Meixiaohan, LI Hongchen, ZHANG Wenkang, YANG Ting, WANG Weize

在线阅读 View online: http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20260306001

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

热障涂层微-纳分级微观结构制备及其抗CMAS润湿性能

Preparation of Micro-Nano Hierarchical Microstructure of Thermal Barrier Coatings and Its Performance against CMAS Wetting

华东理工大学学报（自然科学版）. 2023, 49(4): 598-605 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20220331001

基于CT技术的加热卷烟孔隙率特征可视化研究

Visualization and Analysis of Pore Structure Characteristics in HTP Using Computed Tomography

华东理工大学学报（自然科学版）. 2026, 52(4): 499-510 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20251210001

十字型通道内黏弹性撞击流混合机理研究

Mixing Mechanisms of Viscoelastic Impinging Flow in Cross-Shaped Channels

华东理工大学学报（自然科学版）. 2023, 49(3): 360-367 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20220316001

溶剂挥发和相分离法制备环氧树脂基疏水涂层

Preparation of Epoxy Resin-Based Hydrophobic Coating by Solvent Volatilization and Phase Separation

华东理工大学学报（自然科学版）. 2022, 48(5): 609-615 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20210531001

模板法制备耐久性疏水环氧涂层

Preparation of Robust Hydrophobic Epoxy Coating by Template Method

华东理工大学学报（自然科学版）. 2021, 47(3): 272-277 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20200101001

基于分子对接研究小分子对冰核蛋白的微观抑制机理

Microscopic Inhibition Mechanism of Small Molecules on Ice Nucleation Protein Based on Molecular Docking

华东理工大学学报（自然科学版）. 2022, 48(1): 1-7 http://doi.org/10.14135/j.cnki.1006-3080.20201218002

扫码关注公众号，获取更多信息！

文章编号：1006-3080(2026)05-0748-14 DOI：10.14135/j.cnki.1006-3080.20260306001

热障涂层扁平梭形孔隙内颗粒减缓熔融 CMAS 渗入的流动机理

叶梅笑寒， 李泓辰， 张文康， 杨 挺， 王卫泽
（华东理工大学机械与动力工程学院，上海 200237）

摘要：高温熔融钙镁铝硅酸盐 (CMAS) 侵蚀是导致航空发动机热障涂层 (TBCs) 失效的关键因素，涂层微观结构调控是物理阻断 CMAS 渗入的核心手段。本研究针对具有优异抗 CMAS 渗入的热障涂层中多孔嵌入颗粒团簇 (PEPC) 结构，建立了二维蠕动流与粒子追踪耦合模型，深入揭示了扁平梭形孔隙内颗粒几何特征对 CMAS 渗入动力学的影响机理。研究表明：在双颗粒尺度下，大颗粒与微间距的耦合显著增强孔喉节流效应，而垂直于流向的颗粒排布可消除流场屏蔽作用，最大化颗粒阻滞效能。在多颗粒尺度下，平均颗粒间距是决定抗渗性能的主导因素，研究揭示了其对抗渗性能的非线性阈值的控制规律，在 72% 孔隙率 PEPC 结构中临界值约为 0.7 μm。本研究阐明了颗粒间距、孔隙率与曲折度之间的强耦合阻滞机制，发现增加小颗粒占比可同时实现减小平均间距与提升流道曲折度的双重阻滞效果。

关键词：热障涂层；熔融 CMAS；微观孔隙结构；蠕动流模拟；渗入机理

中图分类号：TG174.4 **文献标志码：**A

热障涂层因其高熔点、低导热系数和化学稳定性而被广泛用作航空发动机涡轮叶片的防护涂层[1]。然而，由于熔融钙镁铝硅酸盐 (CMAS) 的侵蚀，涂层寿命大幅缩短。CMAS 颗粒在发动机燃烧过程中熔化，并在高温下渗入到热障涂层中，降低涂层对应变的耐受性，并引发物理化学反应，使涂层更容易剥落[2-3]。针对该问题的防护策略主要归为新材料体系研发与微观结构优化两大类。在新材料替代路径中，目前已开发出多种技术方案，如沉积 Pd、Pt 惰性致密防渗层[4]，研发了含 $Gd_2Zr_2O_7$、$La_2Ce_2O_7$ 等[5] 化学防护层，或通过成分调控引入 Al、Ti 等元素加速 CMAS 结晶以阻滞渗入[6]。但此类方法普遍存在缺点，如防渗层易因热膨胀失配、断裂韧性不足等而导致防护效能衰减；新型涂层高温热循环稳定性欠佳；相较于传统热障涂层用氧化钇稳定氧化锆 (YSZ) 涂层，多数材料需牺牲隔热性能与热膨胀兼容性，难以满足航空发动机等极端服役环境的长期需求。

在微观结构设计领域，孔隙结构调控因可直接干预 CMAS 渗入动力学过程，成为近年来 TBCs 抗 CMAS 侵蚀研究的热点方向。孔隙特征对渗入行为具有显著调控作用，已有研究通过优化孔隙参数实现抗 CMAS 性能提升。李志远[7] 发现向 YSZ 涂层中引入球形孔结构可抵御涂层降解，同时应考虑保留一定比例网状裂纹结构，以此来降低孔的开裂再合并的影响。Shan 等[8] 研究表明，在大气等离子喷涂 (APS) 涂层中引入大尺寸球形孔，可缓解 CMAS侵蚀危害并降低涂层高温屈曲失效风险。Naraparaju 的实验[9-11] 则揭示 CMAS 的渗入深度取决于流体特性，如黏度、表面张力和微观结构。然而，现有研究多局限于对孔隙率、孔径等宏观参数的调控与表征，对孔隙微观形貌及孔内颗粒的协同作用机制缺乏系统的理论解析，无法精准阐明调控与表征对抑制 CMAS

收稿日期：2026-03-06

作者简介：叶梅笑寒(2000—)，男，安徽人，硕士生，研究方向为热障涂层 CMAS 腐蚀防护技术研究。E-mail: ecustymxh@163.com

通信联系人：王卫泽，E-mail: wangwz@ecust.edu.cn

引用本文：叶梅笑寒，李泓辰，张文康，等. 热障涂层扁平梭形孔隙内颗粒减缓熔融 CMAS 渗入的流动机理 [J]. 华东理工大学学报(自然科学版)，2026, 52(5): 748-761.

Citation: YE Meixiaohan, LI Hongchen, ZHANG Wenkang, *et al*. Flow Mechanism of Particles Mitigating Molten CMAS Infiltration within Flat Fusiform Pores of Thermal Barrier Coatings[J]. Journal of East China University of Science and Technology, 2026, 52(5): 748-761.

渗入的内在机理, 进而制约了 TBCs 微观结构的定向设计与优化。

为调控涂层中孔隙结构, 本课题组改进传统 APS 等离子喷涂工艺, 通过引入第二相粒子, 制备得到第二相微孔团聚粉末嵌入涂层[12] (EMAP, Embedded Micro-Agglomerated Particle Coating), 并且通过调整改进后的 APS 工艺喷涂参数, 制备得到一种扁平梭形孔隙结构涂层[13]。该设计的关键是将微孔团聚粉末引入到由完全熔化的致密球形粉末形成的层状结构基体中, 相比传统 APS 涂层, 该方法含有大量多孔嵌入颗粒团簇的混合结构 (PEPC, Porous Embedded Particle Clusters)。实验中观察到, PEPC 在 EMAP 涂层中呈随机分散排布, 且形状大多为类椭圆形; 而在扁平梭形孔隙结构涂层中 PEPC 结构大多呈扁平梭形, 且和致密基体层交替线性排列分布, 故称之为扁平梭形孔隙定向分布涂层, 简称扁平梭形孔隙结构涂层。值得注意的是, PEPC 结构的孔隙内分布大量固体颗粒, 这类颗粒源于添加的微孔团聚粉末未完全熔化, 且相比 EMAP 涂层, 扁平梭形孔隙结构涂层中 PEPC结构中的颗粒更小且数量更多。实验数据显示经过 4 h 侵蚀, CMAS 熔体前沿在 TBC1、TBC2 和 TBC3 中侵入深度分别是 492、664 μm 和 500 μm, 这表明扁平梭形孔隙结构涂层相较于 EMAP 涂层具有更好的抗 CMAS 性能[13], 与传统 APS 致密涂层相当。基于计算流体力学初步分析, 这种性能差异主要源自熔融 CMAS 在渗入 PEPC 结构时二者流域的几何形状差异, 但造成差异的具体作用机理尚不明确。

本研究从物理渗入角度出发, 利用 AUTOCAD 构建系列化二维孔隙结构几何模型, 通过多物理场有限元分析软件 COMSOL Multiphysics 6.3 建立蠕动流-粒子追踪耦合模型, 设计单因素与多因素耦合模拟方案, 系统分析不同孔隙结构参数对 CMAS 渗入的减缓效果, 优化最佳微观结构参数, 为扁平梭形孔隙结构涂层抗 CMAS 性能定向提升提供理论支撑。

1　物理模型

1.1　几何特征提取

热障涂层的微观形貌通常基于扫描电子显微镜 (SEM) 的二维截面进行表征, 二维计算域能直接反映渗入路径截面上的几何分布, 是研究局部渗流机理的典型代表单元。高温熔融 CMAS 在微孔隙内的流动属于典型的极低雷诺数 (*Re*, 远小于 1) 蠕动流, 在黏性力主导的流态下, 流体不产生分离, 且不存在非球形颗粒在高雷诺数下产生的复杂尾流结构, 压力降主要取决于颗粒占据的面积分数以及壁面的黏性阻滞。考虑到实际 PEPC 结构中, 微团聚颗粒在高温烧结及喷涂后多呈球形或半球形圆形, 为突出颗粒尺寸、间距等核心几何特征对渗入规律的影响并提高计算效率, 本文采用等效投影面积的圆形颗粒模型。该模型能有效捕捉孔喉处的节流效应、揭示阻滞规律, 在三维受限孔隙中普适性强, 能够以更高网格精度表征黏性底层对流动的调控作用。本研究基于已有研究实验数据, 使用 ImageJ 图像处理软件对 PEPC 结构进行几何特征提取。图 1(a, b, c) 所示为扁平梭形孔隙结构涂层的典型 PEPC 结构 SEM 图像的 ImageJ 处理结果。针对涂层内部随机分布的不规则颗粒, 引入 Feret 半径作为其尺寸度量的关键参数。Feret 半径定义为颗粒投影轮廓在特定方向上平行切线间距离的一半, 能够有效表征不规则颗粒的几何空间占用特征。统计图 1(a, b, c) 所示 PEPC 结构孔隙内部颗粒的 Feret 半径与相邻颗粒间距分布规律, 分别如图 1(d)和图 1(e)所示。结果表明, 颗粒半径分布在 0~3 μm, 相邻颗粒间距分布在 0~8 μm, 且数据分布都呈现“前密后疏”特征, 故模型参数提取时采用对数梯度取值 (e^{-2}~e^{2} μm) 设计不同粒径组合。在二维几何模型中, 将单个孔隙区域简化为固定边长矩形计算域。这种简化模型旨在聚焦于孔隙内部流体在微颗粒群间的绕流行为, 忽略孔隙宏观边缘对流场的次要影响。颗粒在矩形孔隙内采用随机分布或受控排列方式, 通过调整颗粒数量与位置, 使计算域的初始孔隙率保持在 72% ± 6% 范围内, 以符合扁平梭形孔隙结构涂层实验测得的平均孔隙率指标[14]。

1.2　熔融 CMAS 孔隙流动的物理模型及控制方程

在 COMSOL 中, 选择蠕动流和流体流动粒子追踪建立耦合模型来模拟熔融 CMAS 在 PEPC 结构中的实际流动行为。蠕动流即斯托克斯流 (Stokes Flow), 该流动的核心条件为 *Re* 远小于 1, 即流体流动过程中黏性力占绝对主导, 惯性力可完全忽略。雷诺数计算公式如下:

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} \tag{1}$$

式中, μ 为动力黏度, Pa·s; ρ 为流体密度, kg/m^3; L 为特征尺寸, m; U 为特征流速, m/s。高温服役环境下, 熔融 CMAS 为均匀不可压缩流体, 本模拟中熔融 CMAS 的 μ 取 15 Pa·s, ρ 取 2630 kg/m^3, 扁平梭形孔隙的 L 可取其短轴尺寸 25 μm, 结合涂层孔隙内 CMAS 低速渗入的实际流动特征[15-16], U 取 0.8 μm/s, 代入上式计算可得 $Re \approx 3.95\times10^{-9}$(远小于 1), 表明熔

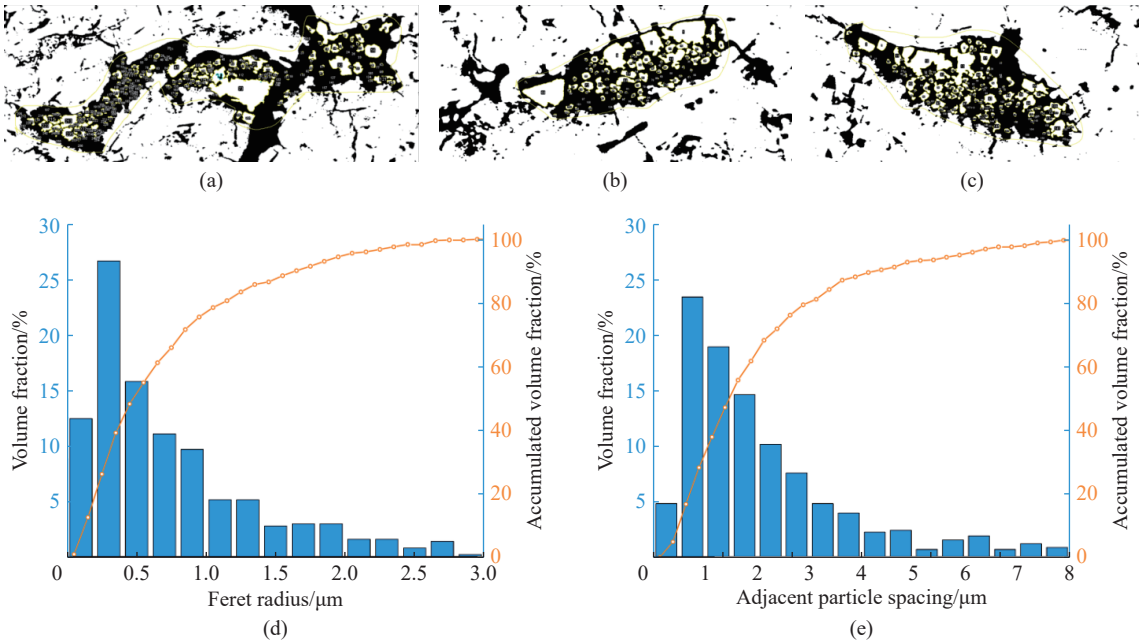


图 1 (a, b, c) 典型扁平梭形 PEPC 结构 SEM 图像后处理表征; PEPC 结构颗粒几何特征参数统计: (d) Feret 半径; (e) 相邻颗粒间距

Fig. 1 (a, b, c) SEM image post-processing characterization of typical flat fusiform PEPC structure; Statistics of geometric characteristic parameters of particles in the PEPC structure: (d) Feret radius; (e) Adjacent particle spacing

融 CMAS 在孔隙内的流动完全满足蠕动流核心判定条件, 黏性力远大于惯性力。因此惯性项可从动量守恒方程中剔除, 采用斯托克斯方程描述该流动过程。孔隙特征尺寸为微米级, 重力引发的体积力对流动的影响远小于黏性力, 因此本研究中忽略重力作用[16], 仅考虑黏性力与压力梯度的耦合作用。针对熔融 CMAS 不可压缩牛顿流体特性及蠕动流判定结果, 采用连续性方程与斯托克斯方程构建其在孔隙内流动的控制方程组[9, 17]。基于质量守恒定律, 不可压缩流体连续性方程为:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{v} = 0 \tag{2}$$

式中, $\boldsymbol{v}$ 为熔融 CMAS 的速度矢量, m/s。基于动量守恒定律, 忽略惯性项与体积力的斯托克斯方程为:

$$\mu \nabla^2 \boldsymbol{v} = \nabla p \tag{3}$$

式中, p 为流体压力, Pa。上述方程组为线性偏微分方程组, 适用于有限元法数值求解, 可准确表征熔融 CMAS 在涂层孔隙内的低速黏性流动规律。

为量化熔融 CMAS 渗入程度, 本研究基于 COMSOL 流体流动粒子追踪 (Particle Tracing for Fluid Flow) 接口, 在蠕动流场基础上构建粒子追踪耦合模型, 对 CMAS 渗入过程进行模拟。通过在入口按固定时间间隔释放固定数量熔融 CMAS 粒子, 统计规定时间内出口处流经粒子数量, 直观反映不同孔隙结构对 CMAS 渗入的减缓效果。流体流动粒子追踪接口的理论基础为牛顿第二定律, 粒子动量变化率等于其所受总作用力, 原始控制方程表达式为[18]:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(m_\mathrm{p}\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{q}}{\mathrm{d}t}\right) = \boldsymbol{F}_\mathrm{t} \tag{4}$$

式中, $m_\mathrm{p} = \frac{\pi}{6} d_\mathrm{p}^3 \rho_\mathrm{p}$ 为刚性球形粒子质量, kg; d_p 为粒子直径, m; ρ_p 为粒子密度, kg/m^3; $\boldsymbol{q}$ 为粒子位置矢量, m; $\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{q}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{v}_\mathrm{p}$ 为粒子速度矢量, m/s; $\boldsymbol{F}_\mathrm{t}$ 为粒子受到的总作用力, N。结合前文蠕动流判定结果 ($Re \approx 3.95\times 10^{-9}$, 远小于 1), 粒子与流体间的相互作用仅需考虑黏性曳力, 重力、浮力、虚拟质量力等其他力的影响可忽略, 即 $\boldsymbol{F}_\mathrm{t} = \boldsymbol{F}_\mathrm{D}$。COMSOL 中曳力采用弛豫时间形式进行数值实现, 表达式为:

$$\boldsymbol{F}_\mathrm{D} = \frac{1}{\tau_\mathrm{p}} m_\mathrm{p} (\boldsymbol{u} - \boldsymbol{v}_\mathrm{p}) \tag{5}$$

其中, $\boldsymbol{u}$ 为粒子所在位置流体速度矢量, m/s; τ_p 为粒子弛豫时间 (粒子速度响应流体速度变化的特征时间), 其定义为 $\tau_\mathrm{p} = \frac{\rho_\mathrm{p} d_\mathrm{p}^2}{18\mu}$。本研究采用 COMSOL 中忽略惯性项的粒子追踪求解形式, 由于本模拟中粒子响应时间远小于模拟总时间, 粒子可瞬时跟随流体速度变化, 曳力与惯性力动态平衡, 采用该简化形式可有效避免数值刚度问题, 在保证计算精度的同时显著提升求解效率。粒子位置由速度积分得到, 满足 $\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{q}}{\mathrm{d}t} = \boldsymbol{v}_\mathrm{p}$, 通过该式可实时追踪粒子在孔隙流场中的运动轨迹。

1.3　数值计算模型设定

如图 2 所示, 在边长为 50 μm×25 μm 矩形孔隙区域中, 圆形部分为 PEPC 结构中的固体颗粒, 其数量、半径与排布以及整体区域孔隙率可自行设计。矩形上边界为熔融 CMAS 入口边界, 设定为压力边界。矩形下边界为熔融 CMAS 出口边界, 设定压力出口的静压为 0。侧向边界设定为对称边界, 以消除有限计算域产生的边界层效应, 模拟无限延伸的孔隙环境。颗粒壁面设定为无滑移条件, 反映高黏度熔体在固体表面的真实黏附特征。为定量评估 CMAS 渗入程度, 在入口处引入粒子追踪模型, 按固定时间间隔释放固定数量无质量标记粒子, 粒子受流体曳力驱动, 运动方程遵循斯托克斯曳力定律。设定出口边界为冻结边界, 在规定模拟时间内穿过出口边界的粒子逃逸率 E_R (Escape Ratio), 作为衡量抗渗入性能的定量评价指标。网格划分选择蠕动流、流体流动粒子追踪和流体-粒子相互作用影响的物理场控制网格, 以多颗粒尺度下颗粒级大、中、小所占比例分别为 60%、20%、20% 的几何模型为例, 根据不同的网格单元大小选择, 得到不同的网格单元数、平均单元质量以及相应 E_R。如表 1 所示, 可以发现即便采用常规网格单元相对误差也仅为 1.49%, 计算结果与网格数量无关。为保障计算结果精确性, 模拟时网格单元大小选择“超细”。

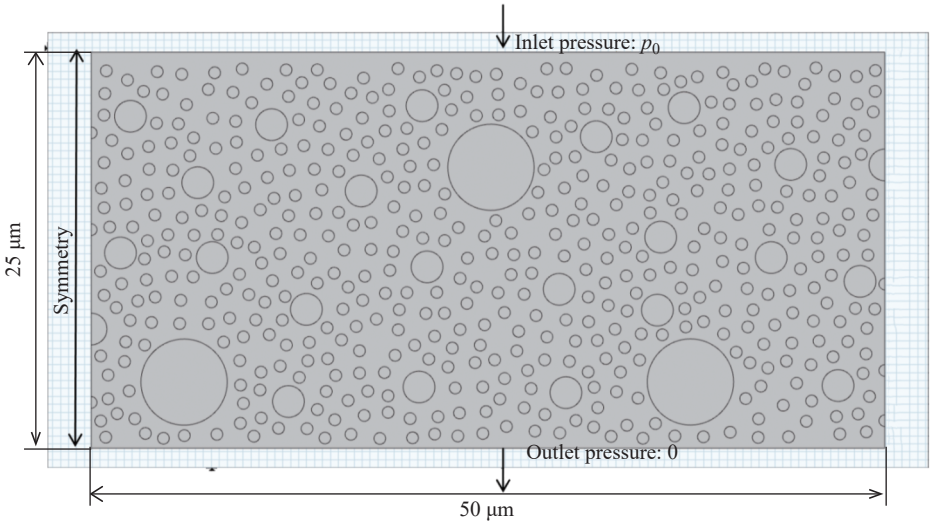


图 2　边界条件示意图

Fig. 2　Schematic diagram of boundary conditions

表 1　网格无关性验证

Table 1　Mesh independence test

Element size	Number of element	Average element quality	E_R/%	Relative error/%
Extra fine	234412	77.34	82.34	–
Finer	173275	74.32	82.48	0.17
Fine	159281	74.50	81.98	−0.44
Normal	114617	75.40	81.11	−1.49

1.4　模型有效性验证与入口压力确立

本研究基于文献中实验测定的特征流速与流体动力学相似原理, 反推并确立模型的入口压力边界条件, 以确保数值模拟能够准确还原熔融 CMAS 在热障涂层微观孔隙内真实流体动力学行为。由于熔融 CMAS 在微米级孔隙内流动主要受毛细力与黏性阻力控制, 实验难以直接测定微孔两端实时驱动压差, 因此需基于真实流动速率反推合理压力梯度量级。PEPC 结构中孔隙与电子束物理气相沉积(EB-PVD)涂层中柱状间隙均连通性良好, 两者均为熔融 CMAS 提供低流阻的优先渗入通道, 并且考虑到 PEPC 结构特征孔径普遍大于 EB-PVD 的亚微米级柱间间隙, 根据多孔介质渗流理论, 更宽阔的孔道结构往往意味着更低黏性阻力与更高渗入潜力。因此, 选取 EB-PVD 的实测流速作为本模拟流速基准, 代表一种典型的严重渗入工况。以此确定的流场边界条件, 能够有效涵盖大孔隙结构中熔融 CMAS 快速侵入的动力学特征。

Shao 等[16] 发现熔融 CMAS 在 EB-PVD涂层内部孔隙的特征渗入速率约为 0.8~0.9 μm/s。为在数值模拟中还原该微观流动特征, 同时确保不同微观结构模型在同一驱动力下的横向可比性, 本研究首先依据流体动力学相似原理, 参考与热障涂层在孔喉尺度上具有高度几何相似性的致密砂岩流体流动文献[19], 考虑到熔融 CMAS 与水在微孔隙内的流动雷

诺数均远小于 1, 满足蠕动流特征并遵循达西定律:

$$Q = \frac{kA\Delta P}{\mu L} \tag{6}$$

式中, Q 为流量, m^3/s; Q 又可写成流速、有效截面积和孔隙率 (φ) 的乘积。k 为多孔介质渗透率, m^2; A 为有效截面积, m^2; $\Delta P/L$ 为驱动压力梯度, Pa/m。流体在几何相似介质中的流动压降与动力黏度成正比。Tian 等[19] 指出, 在孔隙半径主要分布在 0.16~40 μm 的致密砂岩中, 驱动水 (μ 约为 0.001 Pa·s) 以 0.8~0.9 μm/s 速度流动所需的压力梯度为 (0.72 ± 0.02) MPa/m, 利用高温熔融 CMAS 与常温水的黏度比进行理论修正, 从而推导出驱动熔融 CMAS 以 0.8~0.9 μm/s 速度流动的理论压力梯度范围。基于该理论推导值, 本研究在所有的双颗粒及多颗粒几何模型中设定统一的入口压力边界条件。这种单一变量的设置不仅保证各组模型处于相同的外部驱动环境下, 从而能够单纯通过几何结构的差异来考察其对流体流动的阻滞机理, 同时也确保模拟的物理场环境不偏离实际工况。

为验证该压力边界设置的合理性, 将上述统一的压力值输入到不同孔隙率及颗粒分布的几何模型中进行试算。例如对于图 2 所示几何模型, 其孔隙率为 72.36%、渗透率为 2.91×10^{-14} m^2, 通过上述方法计算得到压力梯度为 376.44~397.96 MPa/m, 又因模型宽 25 μm, 故入口压力应设置在 9411.11~9948.89 Pa。入口压力 p_0 设置为 9680 Pa 得到的熔融 CMAS流动速度云图如图 3 所示, 尽管由于内部微观结构差异导致具体流场分布有所不同, 但计算所得熔融 CMAS 平均流速均稳定在 0.8 ~0.9 μm/s。熔融 CMAS 在流经颗粒表面时呈现绕流特征, 且在颗粒壁面处流速趋近于零, 符合高黏度流体的无滑移壁面边界条件特征。上述结果表明, 本研究所建立的物理模型及边界条件设置具有良好物理真实性与数值准确性, 能够有效反映熔融 CMAS在微观孔隙结构中动力学行为。

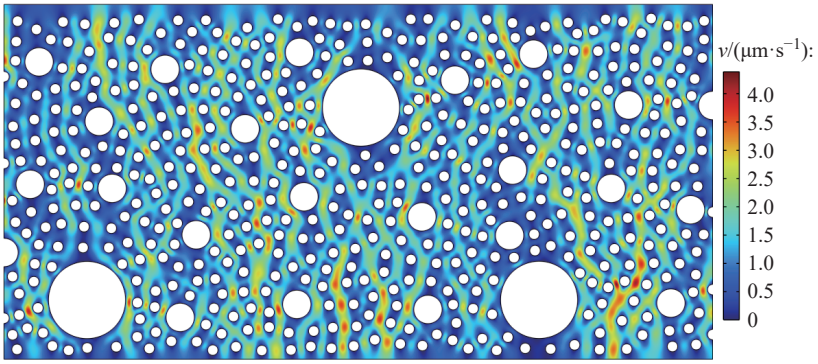


图 3 入口压力正确性验证的熔融 CMAS 速度云图

Fig. 3 Velocity contour of molten CMAS for inlet pressure validation

2 结果与讨论

基于前文建立的微观孔隙蠕动流模型与流体流动粒子追踪物理场, 深入解析微观结构参数对熔融 CMAS 渗入动力学的控制机理。在扁平梭形孔隙热障涂层中, 内嵌的微团聚颗粒改变了传统大孔隙内的空旷流场, 将单一的渗入通道转化为复杂的曲折网络。本研究首先聚焦于构成该网络的最基本单元——双颗粒单元, 从流体动力学层面揭示局部流场的节流效应与流畅屏蔽作用; 随后扩展至多颗粒复杂随机体系, 引入逃逸率作为宏观评价指标, 定量阐明颗粒级配、临界间距阈值以及孔隙曲折度对渗入过程的协同阻滞机制。通过从微观单元到多颗粒体系的跨尺度分析, 旨在为 PEPC 微观结构的定向设计提供理论依据, 确立抑制 CMAS 渗入的最优拓扑形态。

2.1 双颗粒单元

在扁平梭形孔隙内部, 任意相邻的两个微颗粒构成阻碍熔融 CMAS 流动的基本物理单元。两颗粒间的相互作用直接决定局部流场的速度梯度与压力分布, 是理解 PEPC 结构抗渗入性能的物理基础。本章讨论的双颗粒尺度影响熔融 CMAS 流动行为的几何因素为颗粒半径 r、颗粒间距 s 和颗粒排列角度 θ, 具体的几何参数定义及其二维空间构型如图 4 放大黄色方框中所示。经有效性验证计算, 本节几何模型入口压力设置为 1 Pa, 基于流体流动粒子追踪场, 在入口释放 200 个流动粒子, 通过统计 90% 熔融 CMAS 渗入时间长短, 定量分析 r、s 和 θ 等影响因素对熔融 CMAS 渗入的协同控制规律。

2.1.1 颗粒尺寸与间距 图 5 和图 6 分别为不同颗粒半径 (r) 和间距 (s) 下熔融 CMAS 速度 (v) 云图以

及相对应的颗粒中心连线速度(v_l)曲线, 从单颗粒绕流特征来看, 颗粒迎流面形成的局部高压滞止区迫使流体分流, 而在其背流面则形成明显的低速尾流区。

对比不同半径 (从 e^{-2} μm 增至 e^{1} μm) 的模拟结果 (图 5) 可以发现, 在保持颗粒间距恒定的前提下, 随着颗粒半径的增大, 整体流域流速下降, 熔融 CMAS 流体质点抵达计算域底边所需的特征时间显著延长。这是由于大尺寸颗粒不仅大幅延长流体沿颗粒表面的附面层绕流路径, 更重要的是其所占据的体积在有限的孔隙空间内挤压流体通道, 扩大背流面的低速死水区范围, 从而增强对流体动能的耗散作用。进一步分析关键变量颗粒间距, 可以观察到显著的孔喉节流效应[20]。当两颗粒间距从 e^{2} μm (图 6(d)) 逐渐减小至 e^{-1} μm(图 6(a)) 时, 虽然整体流域流速上升, 但是两颗粒中心连线上的速度分布曲线由原本平缓的 W 形逐渐演变为中间凹陷更深的 U 形特征, 说明两颗粒间的流体通道中心流速呈现明显下降趋势。这是因为狭窄的间隙迫使流体通过时产生剧烈的剪切变形, 孔喉中心局部流速因截面收缩而急剧下降。

模拟结果揭示了颗粒尺寸与间距对流场产生的显著耦合效应。如图 7 所示, 大颗粒尺寸与大颗粒间距的组合展现出最佳的阻滞效能, 在未设定空间整体孔隙率约束的双颗粒模型中, 大尺寸几何体提供广阔实体遮挡, 而大间距排布则赋予单体颗粒充裕的空间以充分发挥其独立流场迟滞作用, 避免相邻尾迹区流线的过早干涉。然而三维曲面纵坐标仅映射几何模型整体的迟滞效能。当双颗粒间距被大幅压缩时, 全局渗入时长虽变短, 但结合图 6 颗粒中心连线速度的分布特征可知, 狭窄间距在缝隙中心激发了更为剧烈的流体加速与剪切应力。该跨尺度流体力学特征表明, 全局阻力受控于大尺寸边界, 而局部耗散依赖于小间距孔喉, 这为后续恒定孔隙率约束下的多颗粒尺度抗熔融 CMAS 渗入模型研究提供了

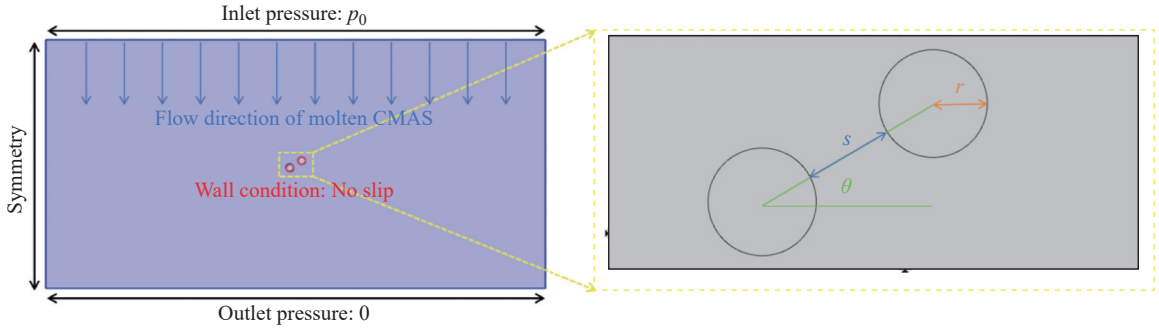


图 4　双颗粒单元边界条件与几何参数定义示意图

Fig. 4　Schematic diagram of boundary conditions and geometric parameters in two-particle unit

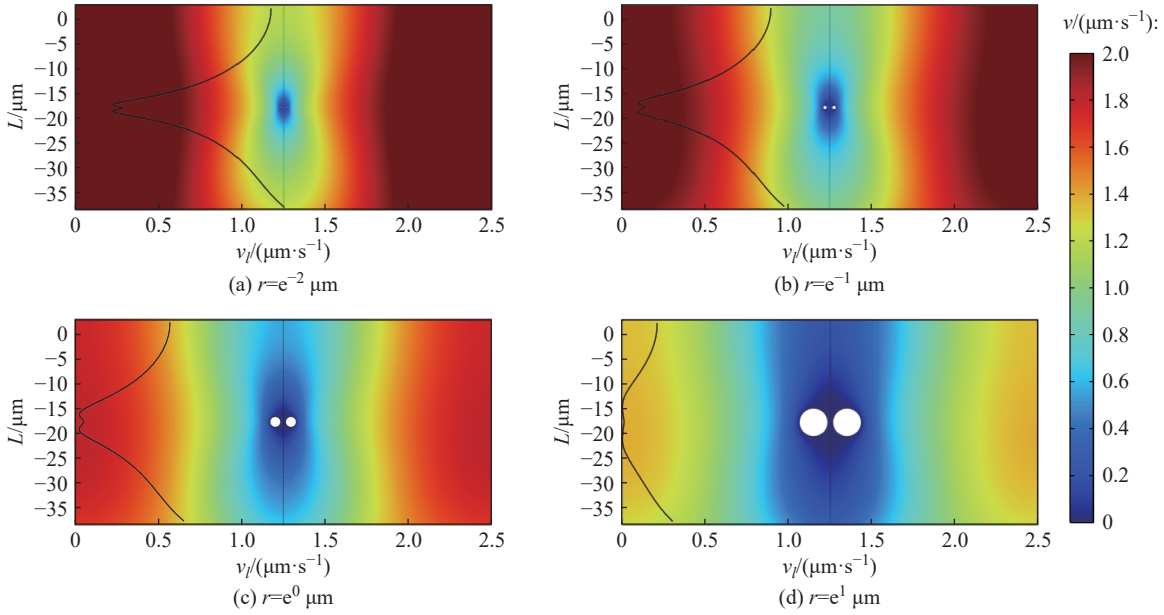


图 5　不同颗粒半径下熔融 CMAS 速度云图及颗粒中心连线速度曲线

Fig. 5　Velocity contours of molten CMAS and velocity profiles along the particle center line under different r

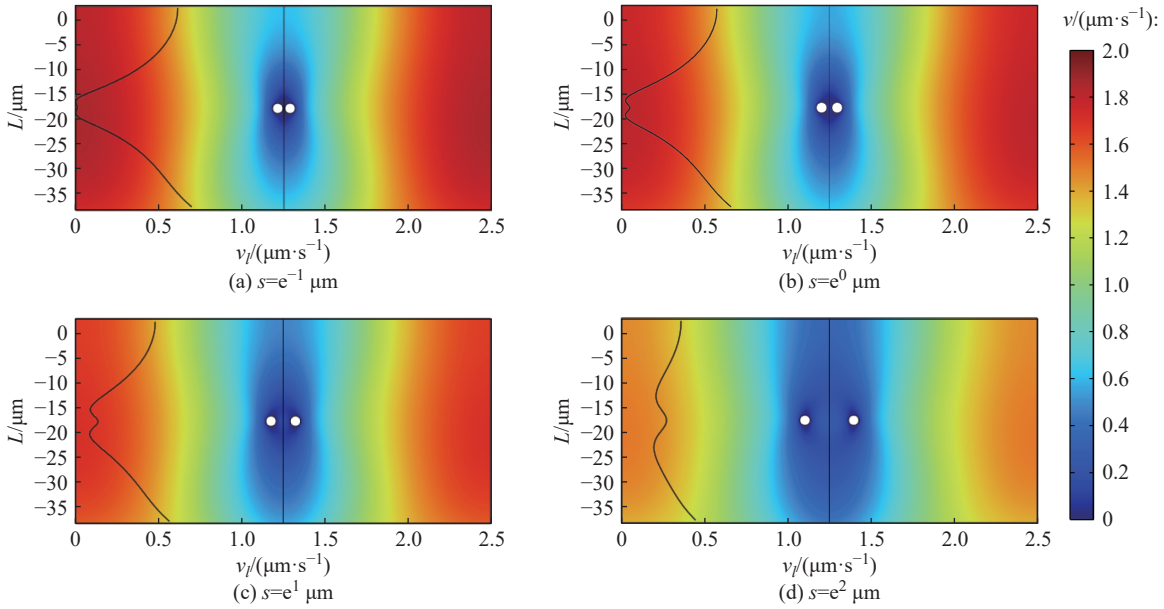


图 6 不同颗粒间距下熔融 CMAS 速度云图及颗粒中心连线速度曲线

Fig. 6 Velocity contours of molten CMAS and velocity profiles along the particle center line under different s

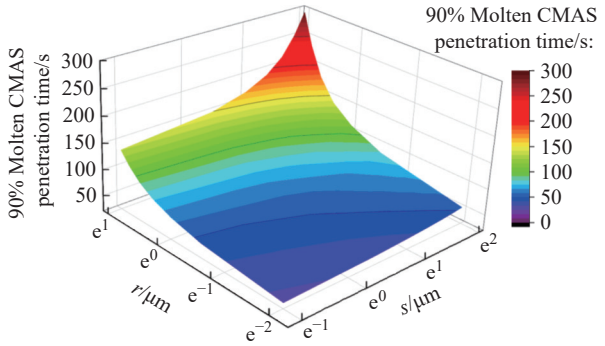


图 7 不同颗粒半径与间距耦合作用下熔融 CMAS 渗入时间云图

Fig. 7 Infiltration time contours of molten CMAS under coupling effect of different r and s

理论依据。该耦合规律表明，在 PEPC 结构设计中，若要在微观尺度下实现对 CMAS 的高效拦截，不仅需关注颗粒的填充密度，更应致力于在扁平孔隙内引入大尺寸骨架颗粒并极力压缩颗粒间的平均自由程。

2.1.2 颗粒排列角度 除了几何尺寸，颗粒相对于熔融 CMAS 侵入方向的排列角度同样对阻滞效率起决定性作用。模拟设定 0°代表两颗粒垂直于流向并排分布 (即水平排列)，90°代表顺流向串联分布 (即垂直排列)。图 8 所示为不同颗粒排列角度下熔融 CMAS 速度云图以及相对应的颗粒中心连线速度曲线，从速度场云图演变可清晰地观测到流体力学中的流场屏蔽作用[21]。当两颗粒呈 0°水平排列时，二者均直接面对上游来流，构成最大有效拦截截面，迫使熔融 CMAS流体必须大幅度改变流向以绕过障碍物，此时涂层抗渗入性能达到峰值。然而，随着排列角度逐渐增大，位于下游的颗粒逐渐进入上游颗粒形成的低速尾流区内。特别是当角度接近 90°时，上游颗粒几乎完全阻挡来流的直接冲击，导致下游颗粒处于低流速、低压差的受屏蔽区域，无法发挥其应有的阻碍作用。

图 9 所示为颗粒排列角度对熔融 CMAS 流动的影响。随角度增大，尽管两颗粒间隙处的局部速度波峰因尾流干扰而降低，但整体流场的平均贯穿流速却呈现上升趋势，表明有效拦截面积减小是导致渗入加剧的主因。故为了达到最大化微颗粒的阻滞效能，在喷涂沉积过程中，应通过工艺参数调控 (如调整粉末粒径分布与沉积速率)，诱导微颗粒在扁平孔隙内倾向于形成垂直于热流方向的层状交错排布，避免顺流向的柱状堆叠，从而确保每个颗粒都能在抗 CMAS 渗入的过程中发挥阻流作用。

2.2 多颗粒体系

在实际扁平梭形孔隙内，填充大量随机分布、尺寸不一的微颗粒。为深入探究 PEPC 结构内部多颗粒对熔融 CMAS 渗入行为的阻滞机理，并且控制并定量探讨多颗粒尺度的几何形貌特征，模型构建时定义颗粒级配 (Particle gradation)、孔隙率 (φ) 和孔隙曲折度 (τ) 3 个几何参数，多颗粒体系边界条件与几何参数定义示意图如图 10 所示。经有效性验证计算，本节几何模型入口压力设置为 1 000 Pa。

以多颗粒尺度下颗粒级配大中小所占比例分别为 60%、20% 和 20% 几何模型为例，图 11 所示为在入口释放流动粒子时不同时间步长下 E_R 值随总模拟时长的变化关系，可以发现，在 400 s 后 E_R 值趋于稳定，且不同时间间隔的选择对模拟结果影响不大。

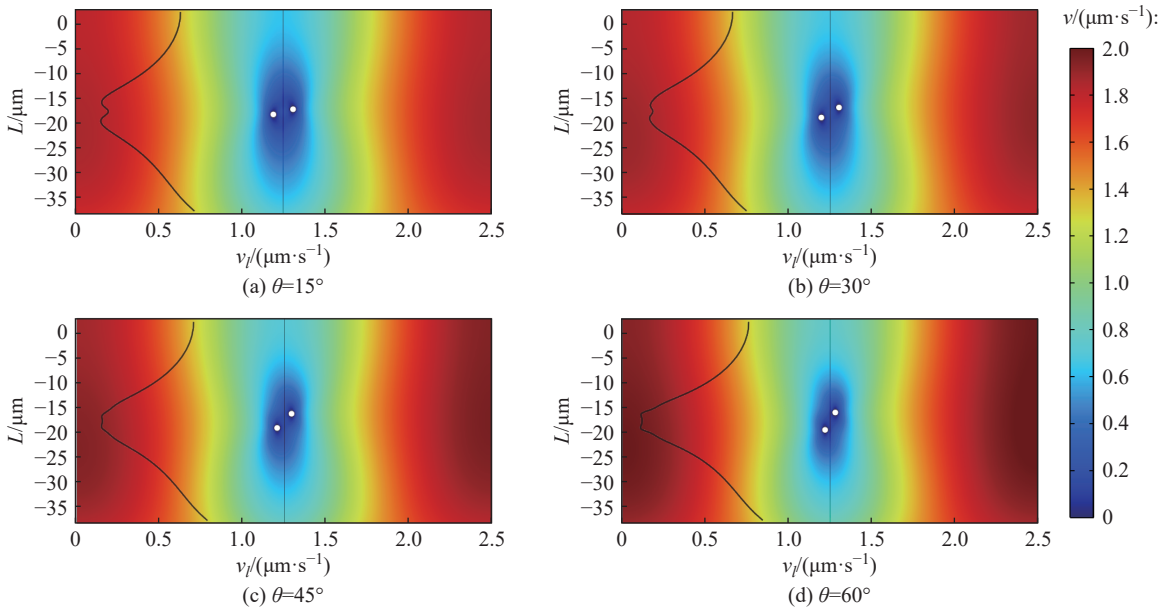


图 8　不同颗粒排列角度下熔融 CMAS 速度云图及颗粒中心连线速度曲线

Fig. 8　Velocity contours of molten CMAS and velocity profiles along the particle center line under different θ

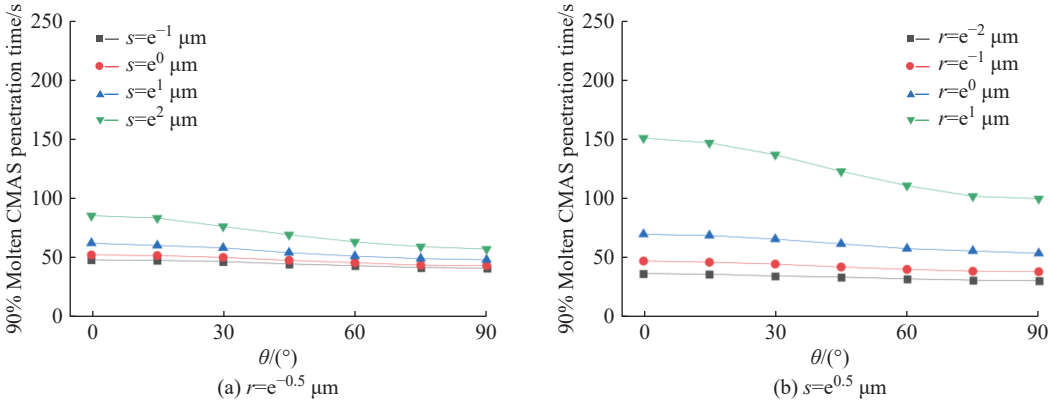


图 9　不同颗粒排列角度与熔融 CMAS 渗入时间关系

Fig. 9　Relationship between molten CMAS infiltration time and different θ

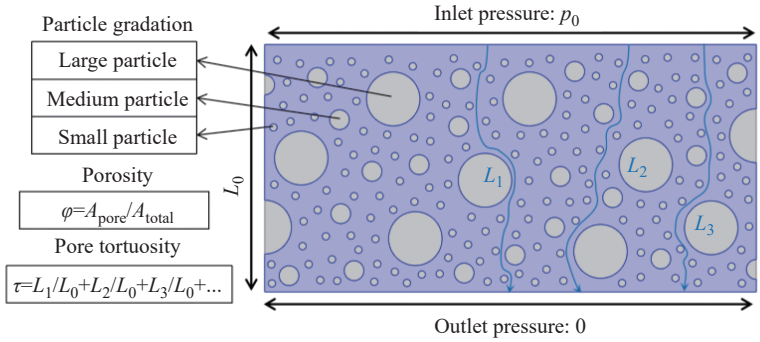


图 10　多颗粒体系边界条件与几何参数定义示意图

Fig. 10　Schematic diagram of boundary conditions and geometric parameters in multi-particle system

故本节流体流动粒子追踪场模拟统一设定为在入口每隔 10 s 释放 200 个流动粒子, 通过统计 400 s 内从出口边界逃逸的粒子比例 E_R, 定量解析颗粒级配与间距、孔隙率 φ 及孔隙曲折度 τ 这 3 个影响因素对熔融 CMAS 渗入的协同控制规律。

2.2.1　颗粒级配与间距　颗粒级配, 即大 (r=e¹ μm)、中 (r=e⁰ μm)、小 (r=e⁻¹ μm) 这 3 种不同尺寸颗粒的混合比例, 直接决定多孔介质内部的孔喉分布特征。图 12 为 72% 孔隙率下不同大、中、小 3 种颗粒占比的几何模型在 400 s 时的流动轨迹示意图。在保持同一

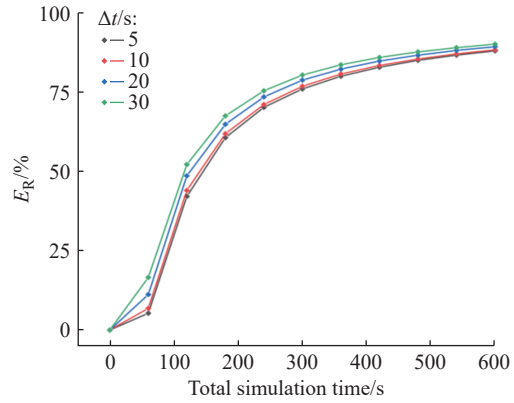
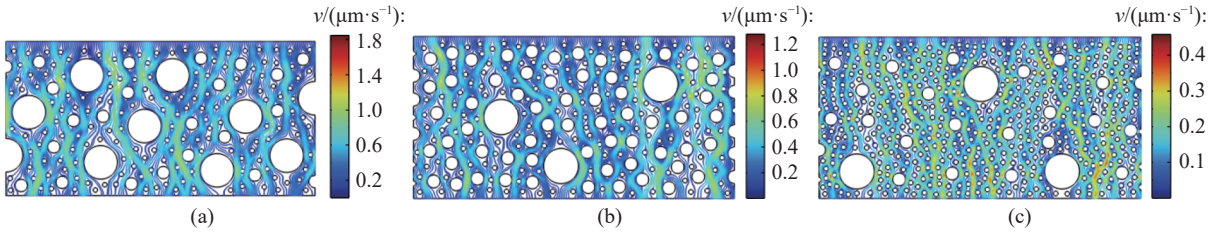


图 11 不同时间步长下 E_R 与总模拟时长关系

Fig. 11 Relationship between E_R and total simulation time with different time step

孔隙率的前提下，不同颗粒级配方案构建的三元等值线图谱 (图 13) 揭示了清晰的成分-性能关系：随体系中小颗粒体积分数的增加，E_R 值呈现显著的单调下降趋势。在相同的孔隙体积内，引入更多的小颗粒意味着固液界面的比表面积大幅增加。大的比表面积不仅提供更多的黏性阻力作用面，且无数微小颗粒将原本宽阔的流体空间切割得支离破碎，形成致密的拦截网络。值得注意的是 EMAP 涂层中 PEPC 结构内多颗粒模型更接近图 12(a)，大颗粒占比更多，区域流速更快；而扁平梭形孔隙结构涂层中 PEPC 结构内多颗粒模型更接近图 12(c)，小颗粒占比更多，熔融 CMAS 的渗入时间更长，此模拟结果与实验现象一致[13]。



Proportions of large-medium-small particles: (a) 60%-20%-20%; (b) 20%-60%-20%; (c) 20%-20%-60%

图 12 不同颗粒级配第 400 s 时熔融 CMAS 粒子轨迹示意图

Fig. 12 Schematic diagram of molten CMAS particle trajectories at 400 s under different particle gradations

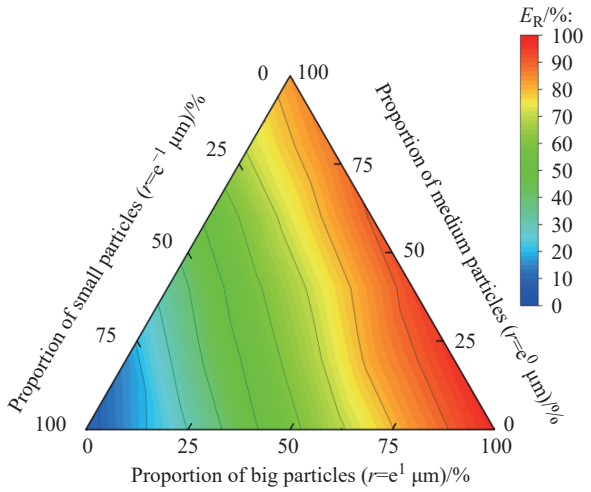
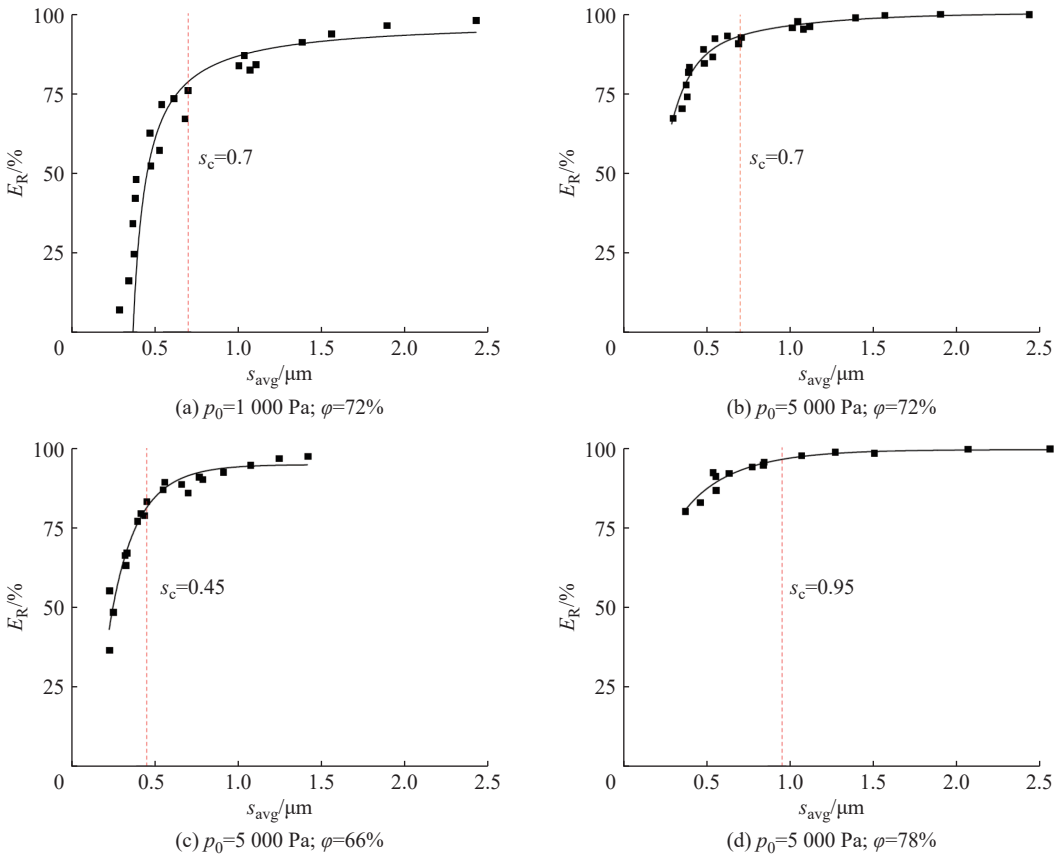


图 13 不同颗粒级配比时的 E_R 值

Fig. 13 E_R values under different particle gradations

为保持区域内孔隙率一致，小颗粒占比越多几何模型中颗粒越拥挤，相邻颗粒间距越小，区域流速越慢。通过对所有几何模型的 E_R 值与平均颗粒间距 s_{avg} 进行关联分析，发现临界间距阈值 s_c 及其演化特征。如图 14(a) 所示的拟合曲线显示，颗粒间距是控制 CMAS 逃逸率的主导几何参数，但其影响并非线性的。曲线在平均间距约为 0.7 μm 处呈现出明显的拐点，当平均颗粒间距被压缩至 0.7 μm 以下时，E_R 值急剧下降，表明此时涂层内部的流体动力学机制发生改变。尽管流体始终处于蠕动流状态，但随流道尺寸缩小至亚微米级，狭缝流动效应[10, 22] 急剧增强。根据泊肃叶流动定律，流阻对通道宽度变化具有高度的非线性敏感性，微小的间距缩减会导致粘性剪切耗散呈指数级上升。因此，在 0.7 μm 阈值以下，极高的黏性阻力迫使熔体流动近乎停滞，从而使微观结构的物理阻滞效果发生飞跃。

为探究阻滞机理的稳定性与适用范围，本研究在不同入口驱动压力 (1 000~5 000 Pa) 及不同孔隙率 (66%、72%、78%) 条件下进行多组对照模拟。首先，以 72% 为例，对于确定的孔隙率，当入口驱动压力从 1 000 Pa 提升至 5 000 Pa 时，如图 14(b)，尽管出口处的 E_R 绝对值因流速加快而整体上升，但 E_R 值随间距变化的曲线拐点始终稳定在 0.7 μm 附近。这证实 s_c 是由微观拓扑结构决定的本征几何参数，不随外部驱动力的改变而漂移。其次，孔隙率对 s_c 表现出显著的调制作用。图 14(c) 和 (d) 显示，随着孔隙率从 66% 先后增加至 72% 和 78%，对应的 s_c 呈现出由 0.45 μm 向 0.7 μm 及 0.95 μm 的正向偏移趋势。同时，整体 E_R 值散点分布随孔隙率增加而显著抬升，证实高孔隙率虽降低涂层密度，但也削弱对熔融 CMAS 的物



(a) p_0=1 000 Pa; φ=72%　(b) p_0=5 000 Pa; φ=72%

(c) p_0=5 000 Pa; φ=66%　(d) p_0=5 000 Pa; φ=78%

图 14　不同参数下系列几何模型平均颗粒间距对应 E_R 值的拟合曲线

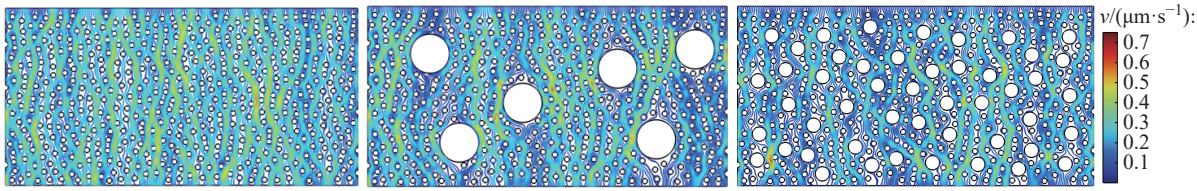
Fig. 14　Fitting curve of E_R values corresponding to s_{avg} for a series of geometric models with different parameters

理阻隔效能。“阈值漂移”现象在流体力学本质上揭示了局部黏性边界层干涉与全局背景耗散之间的非线性耦合竞争机制。在 CMAS 渗入所处的极低雷诺数蠕动流态下, 孔喉处的流动阻力主要源于壁面无滑移条件引发的黏性边界层重叠。在高孔隙率(78%) 体系中, 涂层内部的平均孔径较大, 背景流场的黏性剪切率较低。此时, 相对较宽的颗粒间隙(0.95 μm) 即显著小于周围流场的平均特征尺寸。当流体被强制汇聚通过该局部孔喉时, 流线剧烈收缩导致局部速度梯度骤增, 产生极高的黏性耗散密度。由于大孔隙率下的背景流阻较低, 这种局部边界层干涉引发的节流效应能够迅速主导全场的压力降, 导致阻滞拐点 s_c 在较大间距下即提前出现。相反, 在低孔隙率 (66%) 的致密体系中, 流体通道普遍狭窄, 流场中广泛存在边界层重叠, 导致背景流阻本身极高。在这种高阻力背景下, 只有当颗粒间距被极度压缩至 0.45 μm 以下, 引发更为极端的边界层深度重叠与剧烈的流体剪切形变时, 该局部区域产生的额外黏性耗散才能显著超过致密基体自身的背景阻力波动, 从而在宏观上触发抗渗性能的非线性跃迁(即拐点后移)。这种由微观流场演化特征决定的漂移规律, 为针对不同致密度涂层设计最优颗粒级配提供了坚实的物理基础。

在 PEPC 结构涂层的制备工艺中, 控制微观结构参数需综合考虑孔隙率与颗粒间距的匹配关系。s_c 并非一个孤立的常数, 而是一个与 PEPC 结构孔隙率呈正相关的动态几何指标。该发现为涂层的制备工艺提供定量的质量控制标准, 即在制备微孔团聚粉末及调控喷涂工艺时, 必须确保嵌入孔隙内的微颗粒群能够形成平均间距小于 s_c 的致密结构。只有跨越该临界阈值, 才能真正触发 PEPC 结构优异的抗渗入潜能。

2.2.2　*孔隙率*　为独立探究孔隙率对熔融 CMAS 渗入行为的影响, 如图 15 所示在几何构造时, 在平均颗粒间距为 0.55 μm 左右的初始小颗粒骨架网络中, 分别引入不同尺寸的颗粒作为体积填充物, 保持基础颗粒间距分布特征不变, 通过改变固体占空比将整体孔隙率从 78% 逐步调控至 66%。

图 15(a) 为初始小颗粒网络, 其孔隙率在图 15 中最低, 可以发现图中绿色的较高流速的区域最多, 其原因如图 16(a) 所示。在恒定的入口压力边界驱动下, 随孔隙率的降低, E_R 值呈现明显的下降趋势。这与熔融 CMAS 在孔隙率相较于 EMAP 涂层和扁平梭形孔隙结构涂层更低的致密涂层中渗入更慢现象



Methods for introducing particles of different sizes: (a) Initial small particle network; (b) Filling with particles of radius e^1 μm; (c) Filling with particles of radius e^0 μm

图 15 第 400 s 时不同孔隙率熔融 CMAS 粒子轨迹示意图

Fig. 15 Schematic diagram of molten CMAS particle trajectories under different porosity at 400 s

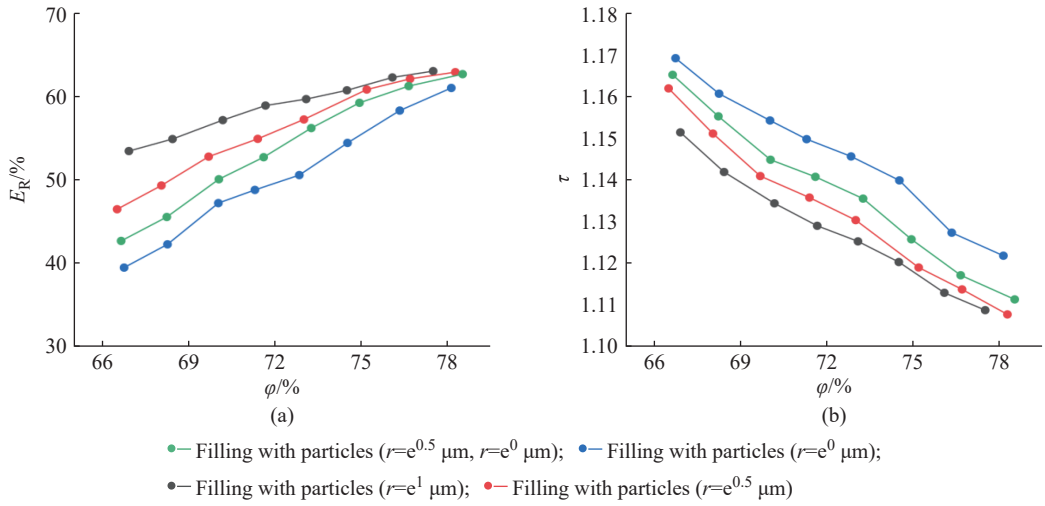


图 16 (a) 不同孔隙率下 E_R 值; (b) 图 (a) 中几何模型孔隙率与孔隙曲折度关系

Fig. 16 (a) E_R values under different porosities; (b) Relationship between porosity and pore tortuosity for the geometric models in (a)

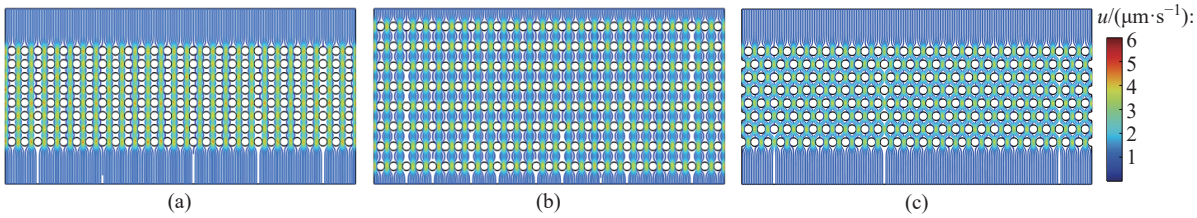
一致[13]。孔隙率降低意味着流体流通通道面积的收缩和固体壁面阻力增加。根据达西定律及泊肃叶流动原理, 在驱动压差不变的情况下, 过流通道截面的收缩会导致流阻急剧上升, 从而迫使流体平均流速下降, 显著抑制熔融 CMAS 在单位时间内的渗入量。

图 15(b) 所示为使用较大颗粒填充的几何模型, 其孔隙率虽然与使用较小颗粒填充的图 15(c) 几何模型一致, 但其绿色的较高流速的区域比图 15(c) 中多, 在相同孔隙率水平下, 填充不同尺寸的颗粒会导致 E_R 值出现细微但规律性的差异。具体表现为采用小颗粒填充模型的抗渗效果优于大颗粒填充模型。其原因在于填充同等面积的孔隙需小尺寸颗粒数量更多, 在流场中引入更多的障碍物实体, 迫使流线发生更高频次的弯曲与分流, 从而显著提升孔隙曲折度。填充小颗粒的模型具有最高的几何曲折度, 流体质点必须在极其复杂的迷宫状通道中运动, 路径的延长和壁面剪切的累积效应进一步降低逃逸率。

此外, 在孔隙率从 78% 调控至 66% 过程中, 图 16(b) 所示每条线的孔隙曲折度的变化幅度几乎相同, 但是图 16(a) 所示的 E_R 在填充小颗粒时表现出更明显的下降幅度, 因为颗粒间距不受填充颗粒大小的影响, 所以这并非源于颗粒间距的改变, 而是源于小颗粒数量增加带来的比表面积上升。在极低雷诺数下, 流体与颗粒表面的黏性摩擦是压降的主要来源。小颗粒模型在相同孔隙率下提供了更密集的阻滞节点, 增加了抗渗性能。

降低孔隙率是提升涂层抗渗性能的基础手段, 而在相同的孔隙率设计目标下, 若能通过引入更多数量的微细颗粒来占据空间, 而非少量大颗粒, 将通过最大化流道曲折度和比表面积的机制, 实现对抗 CMAS 渗入性能的二次强化。

2.2.3 孔隙曲折度 孔隙曲折度作为表征微观拓扑结构复杂性的关键几何参数, 物理上描述流体质点运动轨迹相对于直线距离的偏离程度[23-24]。模拟中可用流体粒子实际移动长度与直线距离之比来表示。在相同孔隙率和颗粒间距下, 通过改变颗粒分布探讨孔隙曲折度对 E_R 值的影响。如图 17(b)和 (c) 所示, 在几何构造时, 通过将固定数量颗粒分散分布和交错排列, 导致流体被迫进行高频次的转向和绕流, 从而在不改变孔隙率和颗粒间距的前提下获得较大的几何曲折度数值, 独立探究其对熔融 CMAS 渗入行为的影响。



Methods for solely increasing pore tortuosity: (a) Original model; (b) Increased vertical spacing; (c) Staggered arrangement

图 17　不同孔隙曲折度第 400 s 时熔融 CMAS 粒子轨迹示意图

Fig. 17　Schematic diagram of molten CMAS particle trajectories at 400 s under different pore tortuosities

如图 18 所示, 首先, E_R 的大小主要取决于颗粒间距, 不同间距区间的散点在纵轴方向上形成显著的级差, 证明颗粒间距是决定结构抗渗能力量级的核心变量。其次, 在颗粒间距相近的数据群内部, 随孔隙曲折度的增加, E_R 虽然总体呈现下降趋势, 但变化曲线较为平缓, 未出现大幅度的数值跃迁。这表明在确定的孔喉尺度限制下, 单纯增加流体路径的几何复杂性对最终抑制 E_R 的作用有限。该现象说明流道截面收缩带来的阻滞作用远大于路径延长带来的阻滞作用。颗粒间距直接决定流体通过最窄截面时的黏性耗散量级, 其对流阻的影响呈幂律关系[15]; 而曲折度主要线性改变流体流经的路径长度。尽管曲折度的影响相对次要, 但其提升客观上拉长熔融 CMAS 的渗入路径, 不仅迫使流体消耗更多压力势能来克服沿程阻力, 更增加流体质点与颗粒壁面发生碰撞、吸附或滞留的概率。相较于 EMAP 涂层, 扁平梭形孔隙结构涂层典型 PEPC 结构的孔隙曲折度经计算分别为 1.65 和 2.18[14], 这也在一定程度上提高了其在实验中抗 CMAS 渗入性能。

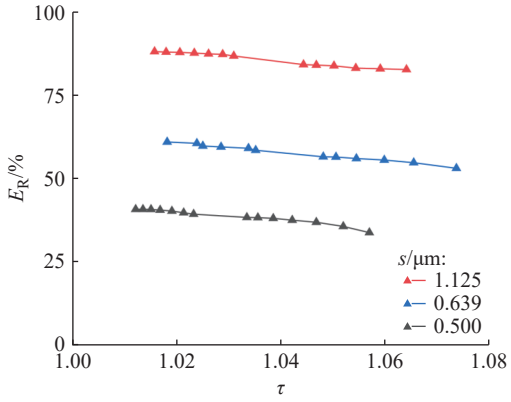


图 18　不同孔隙曲折度下 E_R 值

Fig. 18　E_R values under different pore tortuosities

因此 PEPC 微观结构优化应遵循以间距控制为主、曲折度调节为辅的设计原则。在工艺实现上, 首先致力于将颗粒间距压缩至临界阈值以下以构建强流阻通道, 在此基础上诱导颗粒在扁平梭形孔隙内形成高度无序且交错的排布阵列以最大化曲折度。这种利用扁平孔隙高长径比与内部颗粒复杂拓扑的协同设计, 能够迫使熔融 CMAS 无法沿直线穿透, 只能在复杂的迷宫状通道中耗散动能, 从而作为一种有效补充机制进一步减缓其渗入行为。

3　结　论

(1)双颗粒单元流场受控于孔喉节流与屏蔽效应的竞争机制。颗粒间距缩小显著增强孔喉节流效应, 是提升流动阻力的重要原因。尽管大尺寸颗粒能强化单点拦截能力, 但其背流面易形成低流速的流场屏蔽区, 导致后续颗粒的拦截效率降低。研究表明采用垂直于流向的颗粒排布方式可有效消除屏蔽效应, 从而最大化有效拦截面积。

(2)平均颗粒间距存在控制抗渗性能突变的动态临界阈值 s_c。研究表明, 平均颗粒间距是决定结构抗渗能力的主导因素, 其与 E_R 呈显著非线性关系。值得注意的是, 该临界阈值 s_c 并非一个孤立常数, 而是一个与结构孔隙率呈正相关的动态几何指标(本研究典型工况下约为 0.7 μm)。该发现为 PEPC 涂层的制备工艺提供定量的质量控制标准: 即在微孔团聚粉末制备及喷涂工艺调控时, 需确保嵌入孔隙内的微颗粒群能够形成平均间距小于 s_c 的致密结构。

(3)颗粒间距、孔隙率与曲折度的强耦合作用决定阻滞效率。研究揭示三个几何参数并非独立作用, 而是通过耦合机制共同影响渗入行为。在孔隙率恒定的条件下, 增加小颗粒占比不仅减小平均颗粒间距, 更同步提升流道曲折度, 这种“间距缩小-路径延长”的双重效应叠加是 E_R 值降低的物理本质。此外, 在间距恒定条件下降低孔隙率, 通过压缩有效流通体积进一步增强了这种阻滞作用。因此, 同时追求更小的颗粒间距和更高的孔隙曲折度, 是优于单纯降低孔隙率的热障涂层抗渗设计方向。

参考文献:

[1]　PADTURE N P. Advanced structural ceramics in aerospace

propulsion[J]. Nature Materials, 2016, 15: 804-809.

[2] STEINBERG L, MIKULLA C, NARAPARAJU R, *et al*. Erosion behavior of CMAS/VA infiltrated EB-PVD $Gd_2Zr_2O_7$ TBCs: Special emphasis on the effect of mechanical properties of the reaction products[J]. Wear, 2022, 506: 204450.

[3] 方焕杰, 王卫泽, 俞泽新. 热障涂层微-纳分级微观结构制备及其抗 CMAS 润湿性能 [J]. 华东理工大学学报 (自然科学版), 2023, 49(4): 598-605.

[4] WANG L, GUO L, LI Z M, *et al*. Protectiveness of Pt and $Gd_2Zr_2O_7$ layers on EB-PVD YSZ thermal barrier coatings against calcium-magnesium-alumina-silicate (CMAS) attack[J]. Ceramics International, 2015, 41(9): 11662-11669.

[5] GAO L H, GUO H B, GONG S K, *et al*. Plasma-sprayed $La_2Ce_2O_7$ thermal barrier coatings against calcium-magnesium-alumina-silicate penetration[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2014, 34(10): 2553-2561.

[6] BACOS M, DORVAUX J, LANDAIS S. 10 years-activities at Onera on advanced thermal barrier coatings[J]. Aerospace Lab, 2011, 3: 1-14.

[7] 李志远. 热障涂层孔隙对 CMAS 侵蚀行为的影响 [D]. 天津: 中国民航大学, 2022.

[8] SHAN X, CHEN W F, YANG L X, *et al*. Pore filling behavior of air plasma spray thermal barrier coatings under CMAS attack[J]. Corrosion Science, 2020, 167(5): 108478.

[9] NARAPARAJU R, CHAVEZ J J G, NIEMEYER P, *et al*. Estimation of CMAS infiltration depth in EB-PVD TBCs: A new constraint model supported with experimental approach[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(9): 2936-2945.

[10] NARAPARAJU R, HÜTTERMANN M, SCHULZ U, *et al*. Tailoring the EB-PVD columnar microstructure to mitigate the infiltration of CMAS in 7YSZ thermal barrier coatings[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2017, 37(1): 261-270.

[11] MIKULLA C, STEINBERG L, NIEMEYER P, *et al*. Microstructure refinement of EB-PVD gadolinium zirconate thermal barrier coatings to improve their CMAS resistance[J]. Coatings, 2023, 13(5): 905.

[12] HUANG J B, WANG W Z, LI Y J, *et al*. A novel strategy to control the microstructure of plasma-sprayed YSZ thermal barrier coatings[J]. Surface & Coatings Technology, 2020, 402: 126304.

[13] YANG T, WANG W, TANG Z, *et al*. CMAS infiltration behavior of atmospheric plasma-sprayed thermal barrier coating with tailored pore structures[J]. Ceramics International, 2024, 50(5): 7218-7229.

[14] 杨挺. 团聚粒子嵌入式热障涂层孔隙结构设计及新型结构涂层开发 [D]. 上海: 华东理工大学, 2024.

[15] YIN B B, LIU Z Y, YANG L, *et al*. Factors influencing the penetration depth of molten volcanic ash in thermal barrier coatings: theoretical calculation and experimental testing[J]. Results in Physics, 2019, 13: 102169.

[16] SHAO Y T, WANG Z H, LIU Z Y, *et al*. Numerical modelling of CMAS infiltration and dimensionless numbers of anti-infiltration designs of thermal barrier coatings[J]. Materials & Design, 2024, 246: 113332.

[17] BATCHELOR G K. An Introduction to Fluid Dynamics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000: 182-183.

[18] CROWE C T, SCHWARZKOPF J D, SOMMERFELD M, *et al*. Multiphase Flows with Droplets and Particles[M]. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2011: 75-78.

[19] TIAN W, LI A, REN X, *et al*. The threshold pressure gradient effect in the tight sandstone gas reservoirs with high water saturation[J]. Fuel, 2018, 226(4): 221-229.

[20] DULLIEN F A L. Porous Media: Fluid Transport and Pore Structure[M]. San Diego: Academic Press, 1992: 26.

[21] HAPPEL J, BRENNER H. Low ReynoldS Number Hydrodynamics[M]. The Hague: Martinus Nijhoff, 1983: 249-252.

[22] KABIR M R, SIRIGIRI A K, NARAPARAJU R, *et al*. Flow kinetics of molten silicates through thermal barrier coating: A numerical study[J]. Coatings, 2019, 9(5): 332.

[23] KRÄMER S, YANG J, LEVI C G, *et al*. Thermochemical interaction of thermal barrier coatings with molten CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2 (CMAS) deposits[J]. Journal of the American Ceramic Society, 2006, 89(10): 3167-3175.

[24] WIESNER V L, BANSAL N P. Mechanical and thermal properties of calcium–magnesium aluminosilicate (CMAS) glass[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2015, 35(10): 2907-2914.

Flow Mechanism of Particles Mitigating Molten CMAS Infiltration within Flat Fusiform Pores of Thermal Barrier Coatings

YE Meixiaohan, LI Hongchen, ZHANG Wenkang, YANG Ting, WANG Weize
(School of Mechanical and Power Engineering, East China University of Science and Technology, Shanghai 200237, China)

Abstract: The infiltration and subsequent degradation induced by molten calcium-magnesium-alumina-silicate (CMAS) at high service temperatures remain a critical challenge triggering premature failure of thermal barrier coatings (TBCs) in advanced aero-engines. Consequently, tailoring coating microstructures to physically block CMAS intrusion has emerged as a core strategy to boost coating durability. Focusing on the Porous Embedded Particle Clusters (PEPC) structure, which possesses outstanding CMAS resistance potential, this study systematically investigates the infiltration dynamics of molten CMAS. A coupled numerical model integrating two-dimensional creeping flow and particle tracing is established to reveal how geometric features of particles inside flat spindle-shaped pores influence CMAS infiltration and the corresponding underlying mechanisms. Simulation results show that at the dual-particle scale, the synergistic matching of large particles and micro-gaps greatly strengthens the throttling effect of pore throats. Meanwhile, arranging particles perpendicular to the flow direction effectively suppresses the hydrodynamic shielding effect and maximizes barrier efficiency. At the multi-particle scale, average particle spacing is proven to be the primary factor dominating anti-CMAS infiltration capacity. A nonlinear threshold control mechanism is uncovered, identifying a critical spacing of roughly 0.7 μm for PEPC structures with 72% porosity; below this threshold, infiltration resistance rises sharply. Furthermore, this work reveals a strong synergistic barrier mechanism coupling particle spacing, porosity and pore tortuosity. It is demonstrated that raising the fraction of fine particles produces a dual barrier effect by simultaneously narrowing average particle spacing and increasing flow channel tortuosity. Ultimately, these results reveal the physical nature of infiltration suppression in PEPC architectures, laying a solid theoretical basis for microstructure optimization of next-generation high-performance TBCs.

Key words: thermal barrier coating; molten CMAS; micro-pore structure; creeping flow simulation; infiltration mechanism

（责任编辑：王晓丽）