

基于 CFD-DEM 微细带肋内冷通道中 颗粒沉积特性比较研究

孔德海¹, 李心慧¹, 牛夕莹², 刘存良¹

(1. 西北工业大学 动力与能源学院, 陕西 西安 710100;

2. 中国船舶集团有限公司第七〇三研究所, 黑龙江 哈尔滨 150078)

摘要: 航空发动机全天候全域长航时运行时, 颗粒随着二次流空气系统进入到涡轮叶片内部, 沉积堵塞在涡轮叶片内冷通道中, 严重影响了涡轮叶片的冷却性能。本文采用计算流体力学和离散单元法(CFD-DEM)相结合的方法研究了涡轮叶片带肋细小矩形内冷通道中微尘颗粒的流动和沉积特性。所研究的内冷通道肋片周期性布置在通道的一侧, 肋片阻塞比和肋间距比分别为 0.024 和 10, 考虑了平行直肋、45°斜肋和 45°V 肋 3 种肋结构, 详细分析了雷诺数、颗粒斯托克斯数、入口颗粒体积分数和肋片的类型对颗粒流动和沉积特性的影响规律。结果表明: 颗粒沉积主要发生在第 1 根肋片的前缘处; 颗粒的沉积质量均随着雷诺数、斯托克斯数和颗粒体积分数增加而减小; 在所有的肋片类型中, 直肋布置时颗粒沉积现象最明显, 其次是 V 肋, 斜肋拥有最小的颗粒沉积质量。

关键词: 涡轮叶片冷却; 微细通道; 肋片; 颗粒沉积; 离散单元法

中图分类号: TK221

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.12.010

[引用本文格式] 孔德海, 李心慧, 牛夕莹, 等. 基于 CFD-DEM 微细带肋内冷通道中颗粒沉积特性比较研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(12): 84-94. KONG De-hai, LI Xin-hui, NIU Xi-ying, et al. Comparative study of particle deposition characteristics in a miniature ribbed internal cooling channel based on CFD-DEM[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(12): 84-94.

Comparative Study of Particle Deposition Characteristics in a Miniature Ribbed Internal Cooling Channel based on CFD-DEM

KONG De-hai¹, LI Xin-hui¹, NIU Xi-ying², LIU Cun-liang¹

(1. School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710100;

2. No. 703 Research Institute of CSSC, Harbin, China, Post Code: 150078)

Abstract: When operating aero-engines under all-weather, all-region and long endurance conditions, particles enter the internal parts of turbine blades through the secondary flow air system. These particles deposit and block the internal cooling air system of gas turbines, significantly impeding the cooling performance of the turbine blades. A combination of computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) was used to investigate the flow and deposition characteristics of fine dust particles in a miniature ribbed rectangular internal cooling channel of a turbine blade. The ribs were periodically arranged on one side of the channel, with a rib blockage ratio of 0.024 and a rib spacing ratio of 10. Three rib structures, such as transverse rib, 45° inclined rib, 45° V-shaped rib were analyzed. The effect of Reynolds number, Stokes number, inlet particle volume fraction and rib layout on the particle flow and deposit characteristics was studied. Results show that particle deposition occurs mainly at the

收稿日期: 2023-10-25; 修订日期: 2023-11-03

基金项目: 国家自然科学基金联合基金“叶企孙基金”科学基金(U2241251); 国家科技重大专项(J2019-II-0022-0043)

Fund-supported Project: Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (“Ye Qisun” Science Funds, Grant No. U2241251); National Science and Technology Major Project (J2019-II-0022-0043)

作者简介: 孔德海(1988-), 男, 西北工业大学副教授.

leading edge of the first rib; the deposited mass of the particles all decrease with increasing Reynolds number, Stokes number and particle volume fraction; in all different rib layouts, the transverse rib exhibits the highest deposition mass, followed by the V-shaped rib, while the inclined rib has the lowest deposition mass.

Key words: turbine blade cooling, miniature cooling channel, ribs, particle deposition, discrete element method (DEM)

引 言

提高涡轮入口温度是提升航空发动机推力和热效率的主要技术手段之一。目前先进的航空发动机涡轮入口燃气温度达到了 2 200 K,已经远远超过了涡轮叶片所用的高温耐热合金材料的熔点温度。因此,在新材料耐温性能难以大幅提升的条件下,需要采取高效的涡轮叶片冷却措施来保障其安全稳定运行^[1]。

对于全天候全域长期服役的航空发动机,环境中的砂尘颗粒会与进气道中的空气掺混,一起进入到发动机内部,沉积到涡轮叶片表面^[2]及内部冷却流道^[3],导致叶片的冷却性能降低,严重危害其使用寿命。因此,在高性能航空发动机研制过程中需要考虑涡轮叶片细小内冷通道中流动和沉积特性的影响。

微尘颗粒在涡轮叶片内冷通道中的沉积特性,作为颗粒在发动机内部输运的典型特征,已经成为国内外学者高度关注的一个研究课题^[4]。随着计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)技术的发展,数值模拟方法已逐渐成为一种获得通道内冷气-颗粒气固两相流流动和沉积特性的有力工具。针对稀相气固两相流的模拟,欧拉-拉格朗日模型由于考虑了离散相中每个颗粒(或颗粒微团)的运动,更加适合研究颗粒流动的微观机理。传统的计算流体力学耦合离散相模型(Computational Fluid Dynamics and Discrete Phase Method,CFD-DPM)方法中忽略颗粒之间的碰撞作用,并结合不同的沉积模型来获得颗粒微团在壁面上的沉积特性。Cowan 等人^[5]研究了带有扰流柱阵列的涡轮叶片内冷却通道的微尘颗粒输运特性,结果表明,颗粒沉积率随粒子斯托克斯数的减小而增加,与颗粒无量纲温度成反比。Li 等人^[6]数值研究了颗粒的粒径和雷诺数对 U 型通道中双侧带肋时颗粒沉积特性的影响,结果表明,第 1 根肋片对于下游肋片上颗

粒的沉积具有一定的保护作用,增加冷气雷诺数和颗粒的直径都有利于颗粒在通道内的沉积。赵宏杰等人^[7]进一步研究了肋角度对 U 型冷却通道内单侧带肋时颗粒-空气气固两相流动传热和颗粒沉积特性的影响,结果表明,随着肋倾角增大,U 型通道的换热能力和沉积率呈现逐渐减小的趋势,当肋倾角为 60°时,U 型通道同时具有较高的传热性能和较低的壁面沉积率;增加导流片可以有效降低弯头壁面的捕获率和沉积率。Singh 等人^[8]和 Shah 等人^[9]采用大涡模拟耦合离散相模型(LES-DPM)方法分别研究了矩形和 U 型通道内双侧带肋时颗粒的输运特性。Dowd 等人^[10]进一步考虑了旋转效应及壁温影响下涡轮叶片 U 型带肋冷却通道中微尘颗粒的输运特性,结果表明,科里奥利力的作用使得微尘颗粒向旋转通道入口段尾缘侧集中,导致旋转条件下第 1 通道颗粒的沉积率大幅提高,约增加了 2.1 倍;在实际涡轮叶片温度下,温度的变化对颗粒沉积特性的影响很小。

尽管许多学者采用 CFD-DPM 方法针对涡轮叶片内部冷却通道的颗粒沉积特性展开了广泛的研究,但是这种方法在处理颗粒与壁面的碰撞时忽略了颗粒之间的作用,导致其计算颗粒沉积特性时偏离了颗粒与壁面作用的真实物理特性。基于此,Lu 等人^[11]和 Yu 等人^[12]基于单向耦合在 DPM 方法基础上发展了修正的颗粒沉积模型来考虑颗粒与壁面的作用机制,不同于 DPM,离散单元法(DEM)是一种考虑颗粒之间的碰撞机制的方法,可以较好地模拟微尘颗粒的团聚,分散和堆积等行为^[13-15]。Hong 等人^[13]采用三向耦合的方式来考虑颗粒与流体的相互作用,并基于 CFD-DEM 方法数值研究了颗粒的质量浓度和气流的速度对矩形方肋通道内颗粒沉积特性的影响,研究表明,颗粒沉积概率密度随着颗粒质量浓度的增加存在极值,并一步比较了肋片粗糙元的类型对颗粒沉积特性的影响^[14],结果表明,由于粗糙元附近的涡结构差异,直角三角形粗糙元表面颗粒的沉积率最大,而锐角三角形粗糙元表

面的沉积率最低。Dufresne 等人^[15]发展了一种粗粒的离散单元法来同时满足求解精度和求解速度的要求。

上述研究都是基于涡轮叶片相似放大通道中开展的,颗粒在通道中的沉积特性与颗粒和通道的尺度密切相关。本文针对实际涡轮叶片细小通道中颗粒的沉积特性开展研究。流体相采用基于雷诺平均的 N-S 方程耦合 SST $k-\omega$ 湍流模型求解,离散相采用离散单元法 (DEM) 来追踪每个颗粒的运动。通过数值研究,分析了颗粒斯托克斯数、体积分数、肋排布方式以及雷诺数对带肋通道内颗粒沉积特性的影响。

1 数值研究

1.1 计算模型和边界条件

涡轮叶片内部带肋冷却通道的三维模型和周期性流域如图 1 所示。计算区域由入口段、工作段、出口段组成。通道的横截面为 12 mm×3.2 mm 的矩形,宽高比 $W/H=3.75:1$ 。通道的进口和出口长度分别为 12 mm 和 12.5 mm,以消除进出口效应。周期性直肋布置在工作段的下壁面上,其长度为 20.5 mm。肋片具有 0.12 mm×0.12 mm 的横截面,肋高 $e=0.12$ mm,阻塞比 $e/D_h=0.024$ 。肋间距与肋高之比 p/e 固定为 10。边界条件定义如下:入口为基于给定雷诺数核算的速度入口,流体入口流速为 U_∞ ,流动的湍流强度为 5%。压力出口为 1.01×10^{-5} Pa。设定壁面为无滑移壁面。空气的物性参数:密度为 1.205 kg/m³,动力粘度为 1.81×10^{-5} Pa·s。

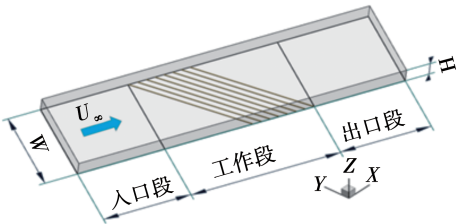


图 1 带肋通道的计算模型

Fig. 1 Computational model of ribbed channel

1.2 颗粒相控制方程和计算方法

针对涡轮叶片内部细小带肋通道内颗粒-空气稀疏气固两相流的流动和沉积特性展开研究,其中气相流场由 N-S 方程进行描述,而颗粒相的运动则根据牛顿动力学方程计算出其运动轨迹。在离散

单元方法 (DEM) 中每个颗粒都是 1 个单元,包含体积、几何形状、材料属性、运动状态和受力状态等参数。

颗粒运动方程如下:

$$\frac{m_p d \vec{V}_p}{dt} = \vec{F}_G + \vec{F}_{ad} + \vec{F}_D + \vec{F}_C + \vec{F}_S + \vec{F}_{Ar} \quad (1)$$

式中: m_p —颗粒质量; $\vec{V}_p$ —颗粒运动速度; t —颗粒运动时间; $\vec{F}_G$ —拖重力; $\vec{F}_{ad}$ —颗粒粘附力; $\vec{F}_D$ —曳力; $\vec{F}_C$ —碰撞力; $\vec{F}_S$ —萨夫曼升力; $\vec{F}_{Ar}$ —浮力。

对于流体相数值计算采用分离隐式求解器,各控制方程中对流项的离散格式均为一阶精度迎风格式,采用 SIMPLE 算法为压力速度耦合的处理方法。对于离散相的求解,其基本原理是研究对象被划分为相互独立的单元,根据单元之间的相互作用和牛顿运动定律,进行循环迭代计算,在每个时间步长内,计算所有单元的受力和位移,并更新所有单元的位置。通过对每个单元的微观运动轨迹进行跟踪计算,即可得到研究对象整体的宏观运动规律。

计算中涉及的颗粒和壁面的物性参数设置如表 1 所示。本章研究了雷诺数 Re 、颗粒入口体积分数 ε_{in} 、斯托克斯数 St 、肋片布置方式对通道内颗粒沉积特性的影响,具体的工况设置如表 2 所示。为了确保离散相计算的稳定,时间步长要小于临界时间步长,离散相的时间步长根据瑞利时间步长计算得到,不同的颗粒粒径 d_p 对应着不同的瑞利时间步长。根据进入发动机涡轮流道中微尘颗粒的典型尺寸特征^[16],研究了 1,5 和 10 μm 3 个不同的粒径,离散相时间步长分别取为 5×10^{-8} , 2×10^{-8} 和 1×10^{-7} ,即 $0.2\Delta t_{cr}$,其中 Δt_{cr} 表示瑞利波传递半球面所需要的时间。流体时间步长分别为 5×10^{-6} , 2×10^{-6} 和 1×10^{-5} 。在研究的所有工况下,颗粒总输入质量均为 2.6×10^{-7} kg。

表 1 颗粒和壁面的材料特性

Tab. 1 Material properties of particle and wall

参数	颗粒	壁面
密度/kg·m ⁻³	2 450	4 000
剪切模量/Pa	1.4×10^7	1×10^9
杨氏模量/Pa	3.556×10^7	2.5×10^7
泊松比	0.27	0.25
导热系数/W·(m·K) ⁻¹	0.50	12.17
比热容/J·(kg·K) ⁻¹	966	-
颗粒表面能/J·m ⁻²	0.20	-

表 2 数值模拟工况设置

Tab. 2 Numerical simulation condition settings

工况	Re	流体入口速度 $V_f/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$d_p/\mu\text{m}$	$q_{m,\text{in}}/10^{-5}\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	ε_{in}	St	肋片布置方式
1	10 000	29.74	5	1	0.007 2	0.124 3	直肋
2	20 000	59.49	5	1	0.003 6	0.248 5	直肋
3	30 000	89.23	5	1	0.002 4	0.372 8	直肋
4	10 000	29.74	5	2.5	0.018 0	0.124 3	直肋
5	10 000	29.74	5	5	0.035 0	0.124 3	直肋
6	10 000	29.74	1	1	0.007 2	0.005 0	直肋
7	10 000	29.74	10	1	0.007 2	0.497 0	直肋
8	10 000	29.74	5	1	0.007 2	0.124 3	45°斜肋
9	10 000	29.74	5	1	0.007 2	0.124 3	45° V 肋

1.3 颗粒沉积判断准则

在对内冷通道沉积特性进行分析之前,需要明确颗粒沉积的判断准则。首先,需要明确内冷通道沉积层的形成是一个动态过程,并且当微尘颗粒与沉积层产生碰撞时,总会有能量在沉积层内传递与耗散,所以不能简单以速度为零来定义其沉积状态;其次,单个微尘颗粒对流场影响有限,沉积层是大量低动量微尘颗粒聚集的结果;最后,沉积要依附于流道壁面而存在。所以在此提出对于颗粒沉积判断的 3 点基本原则:(1)高浓度:微尘颗粒体积分数接近物理堆积极限;(2)低动量:在一段时间内,微尘颗粒位移基本不变或者变化极小;(3)近壁面:沿流道壁面的法向方向,微尘颗粒体积分数递减。根据观察,计算域内速度小于 0.5 m/s 的微尘颗粒符合上述 3 个原则,在研究中速度小于 0.5 m/s 的微尘颗粒即认为达到沉积状态。

1.4 数据定义

雷诺数 Re :

$$Re = \frac{\rho V_f D_h}{\mu} \tag{2}$$

式中: ρ —流体密度; V_f —流体的入口速度; D_h —通道当量直径; μ —流体的动力粘度。

斯托克斯数 St 表征颗粒惯性作用与受到流体扩散作用的相对大小, St 越小,颗粒的随流性越好,惯性越小,定义式如下:

$$St = \frac{\tau_p^+}{L_{\text{char}}/V_{\text{char}}} = \frac{\rho_p d_p^2 V_{\text{char}}}{18\mu L_{\text{char}}} \tag{3}$$

式中: τ_p^+ —颗粒的无量纲弛豫时间; $L_{\text{char}}/V_{\text{char}}$ —流体的特征时间; ρ_p —颗粒密度; d_p —颗粒粒径; V_{char} —颗粒入口速度; L_{char} —通道长度。

微尘颗粒入口体积分数 ε_{in} :

$$\varepsilon_{\text{in}} = \frac{q_{m,\text{in}}/\rho_p}{V_f A_{\text{in}} + q_{m,\text{in}}/\rho_p} \tag{4}$$

式中: $q_{m,\text{in}}$ —颗粒入口的质量流量; A_{in} —通道入口截面积。

沉积率 β_{dep} 反映了当前条件下,输入微尘颗粒沉积的“难”与“易”,定义式如下:

$$\beta_{\text{dep}} = m_{\text{dep}}/m_{\text{del}} \tag{5}$$

式中: m_{dep} —沉积质量; m_{del} —输送的微尘颗粒质量。

无量纲沉积速度 V_d^+ :

$$V_d^+ = \frac{V_d}{V_\tau} = -\frac{AV_f}{ci_{\text{Lchar}}} \ln(1 - \beta_{\text{dep}}) \tag{6}$$

式中: V_d —沉积速度; V_τ —摩擦速度; A —通道横截面积; c_i —通道周长。

无量弛豫时间 τ_p^+ :

$$\tau_p^+ = \frac{C_c \rho_p d_p^2 V_\tau^2 \rho}{18\mu^2} \tag{7}$$

式中: C_c —滑移修正系数。

1.5 网格划分和无关性验证

采用 ICEM CFD 对计算模型划分六面体结构化网格,以实心斜肋为例进行网格展示和网格无关性验证,如图 2 所示。对近壁面以及肋片附近的网格进行加密处理,第 1 层网格高度为 0.001 mm,网格增长率为 1.1,以保证首层网格节点的无量纲法向

距离 $y^+ < 1$ 。提取通道中心线处的当地努塞尔数来评价网格粗细程度引起的平均离散误差。分别生成单元数量为 9.7 万、23.8 万和 56.8 万的 3 种网格。

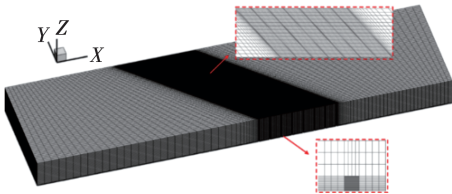


图 2 斜肋通道网格结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of mesh structure of inclined ribbed channel

图 3 为雷诺数 $Re = 10\ 000$ 时 45° 斜肋中心线处的局部努塞尔数沿流向分布变化。从图中可以看出,网格数量大于 23.8 万以后局部努塞尔数基本不发生变化,为了兼顾经济型与精确性,网格数量确定为 25 万左右。

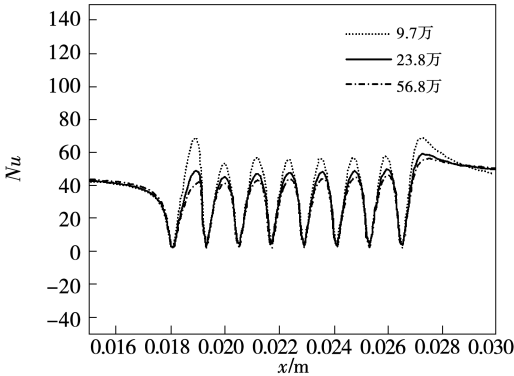


图 3 不同网格密度下通道中心线局部努塞尔数随流向距离的变化

Fig.3 Variation of local Nusselt number at channel center along flow direction distance at different mesh densities

1.6 计算方法验证

气相模型选择 SST $k-\omega$ 湍流模型,对初始速度为 11.7 m/s 的颗粒沉降进行了数值模拟,并考虑了 1.4 ~ 21 μm 范围内的颗粒直径。根据文献[17 - 18]的实验,选择三维矩形通道的计算域和流动条件。颗粒的无量纲弛豫时间 τ_p^+ 在 $0.01 < \tau_p^+ < 1\ 000$ 的范围内,类似于直管的内壁,粒子沉积区域分为 3 个区域:扩散区域($\tau_p^+ < 0.1$),扩散碰撞区域

($0.1 \leq \tau_p^+ \leq 10$)和惯性缓冲区($\tau_p^+ > 10$)。在 $\tau_p^+ < 0.1$ 范围内,无量纲沉积速度 V_d^+ 随着 τ_p^+ 的增加而降低;在 $0.1 < \tau_p^+ < 10$ 范围内, V_d^+ 随着 τ_p^+ 的增加而增加;当 $\tau_p^+ > 10$ 时, V_d^+ 随着 τ_p^+ 的增加而增速减缓并出现下降的趋势。图 4 给出了采用 CFD-DPM 和 CFD-DEM 两种方法的数值计算结果与实验结果的对比。由图 4 可知,两种计算方法的数值计算结果与实验测量结果吻合较好,验证了本文计算方法的准确性。因此,本文采用 CFD-DEM 来计算颗粒沉积是合理的。

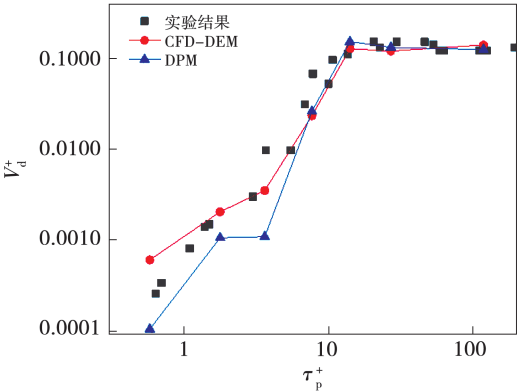


图 4 无量纲沉积速率随无量纲弛豫时间的变化
Fig.4 Variation of dimensionless deposition rate with dimensionless relaxation time

2 结果与讨论

研究的颗粒入口体积分数的范围为 0.24% ~ 3.5%,属于稀疏相的范畴,航空发动机涡轮叶片内冷通道的实际颗粒入口体积分数也在此范畴内。图 5 为微小直肋通道壁面体积分数前缘微尘沉积形貌的非稳态变化。其中 $\tau = t_{total}$ 为计算模拟的总时长, t 为当前计算时间, ε_p 为壁面处颗粒的体积分数。壁面体积分数越高,代表该处的颗粒浓度越高。可以观察到,体积分数较高的区域主要发生在进口段第 1 根肋片前缘以及肋片顶端。第 1 根肋片前缘随时间增加逐渐形成一条连续的沉积带,当 $t = 0.4\tau$ 时,第 1 根肋前开始出现连续的沉积带,当 $t \geq 0.6\tau$ 时,沉积带范围不再有明显变化,而在其余肋片前后均没有观察到明显的沉积。这与文献[6,10]的研究结论一致。

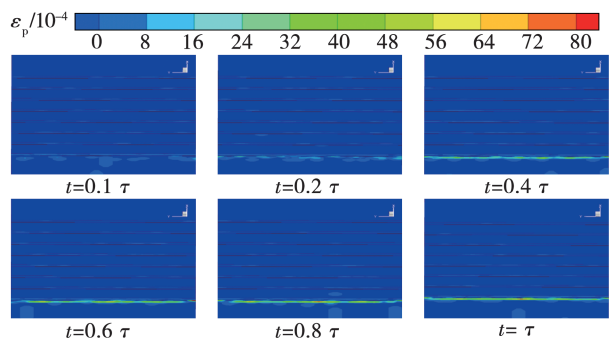


图 5 微小直肋通道颗粒沉积形貌的非稳态变化

Fig. 5 Unsteady variation of the morphology of particle deposition in a miniature ribbed channel

图 6 给出了微小直肋通道中第一根肋片前缘微尘沉积形貌的非稳态变化。可以看到,当携带有微尘颗粒的气流冲击到肋壁,微尘颗粒与肋壁垂直并发生碰撞,伴随着颗粒反弹,其动量也迅速减小。而后不断有微尘颗粒被携带到该区域,并与从壁面反弹的微尘颗粒发生碰撞,动量迅速降低,逐渐在肋前缘距离约 1.5 个肋高的位置形成一条带状沉积层。在 $t = 0.4\tau$ 时,第一次出现带状沉积层;当 $t \geq 0.6\tau$ 时,带状沉积层不再有明显的变化。

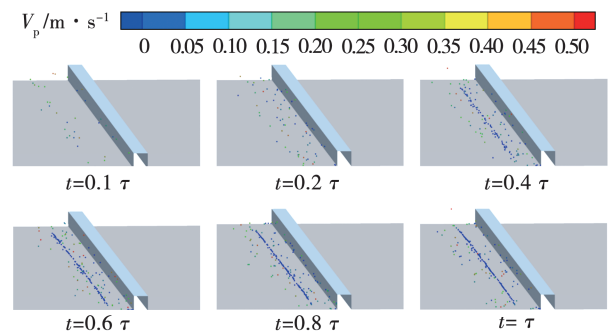


图 6 第一根肋片附近颗粒沉积分布云图

Fig. 6 Contours of particle deposition distribution near the first rib

2.1 雷诺数对微小扰流肋沉积特性的影响

图 7 给出了 $t = \tau$ 时不同雷诺数下微小直肋通道壁面颗粒体积分数对比。壁面颗粒体积分数越高,代表该处的颗粒浓度越高。可以看到,随着雷诺数的增大,肋前的颗粒体积分数减小,颗粒浓度减小,肋前带状的高体积分分数区逐渐消失。但其覆盖的范围变大,这主要是由于雷诺数越高,气流裹挟的微尘颗粒速度越快,撞击到肋片后反弹的位置沿上

游移动得更远。颗粒动能越高,也意味着在壁面经过一次反弹后残余的动量依然很大,更易越过肋片,也就更不容易在肋前沉积下来。

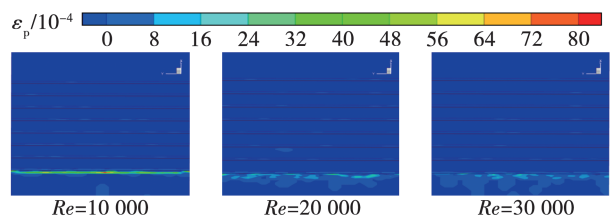


图 7 微小直肋通道壁面颗粒体积分数随雷诺数的变化

Fig. 7 Variation of wall particle volume fraction in a miniature ribbed channel with Reynolds number

为了更加清晰地表现出雷诺数对沉积层的影响,图 8 给出 $t = \tau$ 时,不同雷诺数下 $y = 0.006 \text{ mm}$ ($x - z$ 截面)处的流线及体积分分数云图,其中 h 表示肋高。可以看到,雷诺数越高,高体积分分数区的峰值逐渐降低,覆盖的区域也更加狭长,沿上游方向移动得更远(见图 6)。此外,紧邻肋前的角涡也更大,近肋区域的涡会吸引并将颗粒拖向肋壁,此处的涡流变大将导致颗粒与肋壁碰撞的概率大大增加,也会导致肋片的磨损变大。

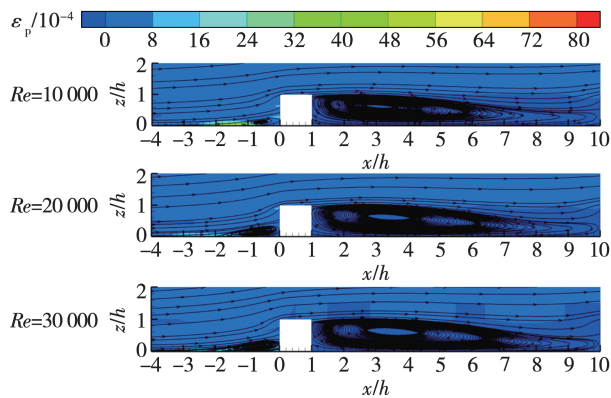


图 8 不同雷诺数下 $x - z$ 截面中心线处的流线及颗粒体积分分数云图

Fig. 8 Contours of streamlines and particle volume fraction at the centerline of the $x - z$ section under different Reynolds numbers

图 9 给出了不同雷诺数下微小直肋通道的微尘沉积质量和微尘颗粒沉积率随微尘颗粒输入时间的变化。

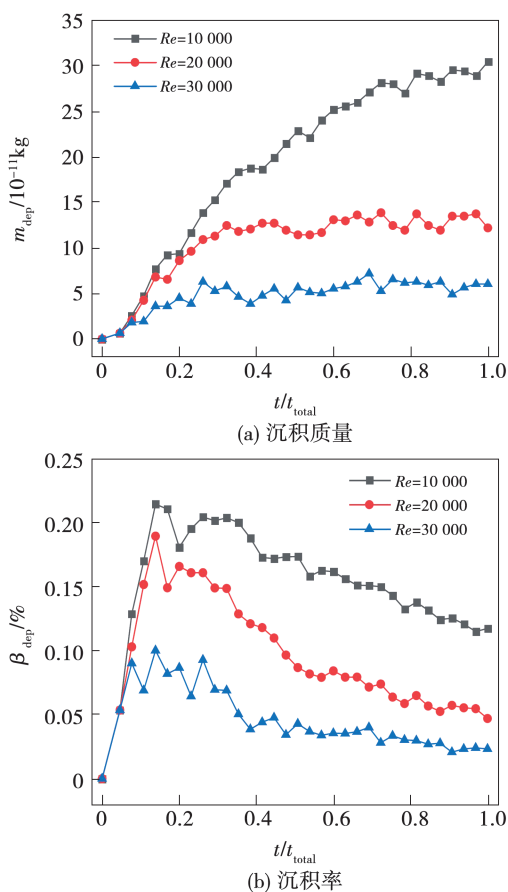


图9 不同雷诺数下微小直肋通道颗粒沉积质量与沉积率

Fig. 9 Particle deposition mass and deposition rate in a miniature ribbed channel under different Reynolds numbers

可以看到,在微尘颗粒刚开始输入时微尘沉积质量迅速增加,几乎呈线性变化,然后沉积质量增加的速度逐渐减缓,直至最后保持稳定。另外,雷诺数不同,也导致了微小直肋通道微尘沉积质量的变化规律不同,雷诺数越大,沉积质量变化率越小。当 $Re = 10\,000$ 时,最终时刻的沉积质量分别为 $Re = 20\,000$ 和 $Re = 30\,000$ 时的 2.49 倍和 5.04 倍。但是雷诺数越大,沉积质量从急剧上升到趋于平缓的拐点,则越提前。造成这种现象的主要原因是高雷诺数下,相同时间内,微尘颗粒可以更快地冲击到肋壁前,但是难以沉积下来。图 9(b) 给出了不同雷诺数下微尘颗粒沉积率随微尘颗粒输入时间的变化规律。当微尘颗粒输入时间 $t \leq 0.1\tau$ 时,各雷诺数

下的沉积率都急剧升高。随着微尘颗粒输入时间的逐渐增加,沉积率逐渐减小,且变化速度逐渐降低。当 $t \geq 0.6\tau$ 、雷诺数高于 10 000 时,沉积层的厚度逐渐达到极限沉积状态,沉积层的厚度逐渐趋于稳定状态,沉积质量只发生小幅度的波动。

2.2 颗粒入口体积分数对微小扰流肋沉积特性的影响

图 10 给出了 $t = \tau$, 雷诺数为 10 000, 斯托克斯数为 0.124 3, 微尘颗粒入口体积分数为 0.72%、1.80% 和 3.50% 时,不同颗粒入口体积分数下微小直肋通道壁面体积分数对比。壁面体积分数越高,代表该处的颗粒浓度越高。可以看到,不同颗粒入口体积分数下,高体积分数区主要分布在肋片顶端,第 1 根肋片前缘以及进口段,其中第 1 根肋片前缘处的体积分数最大,颗粒浓度最高。随着颗粒入口体积分数的增加,肋片顶端、第 1 根肋片前缘以及进口段处的体积分数随之变大。

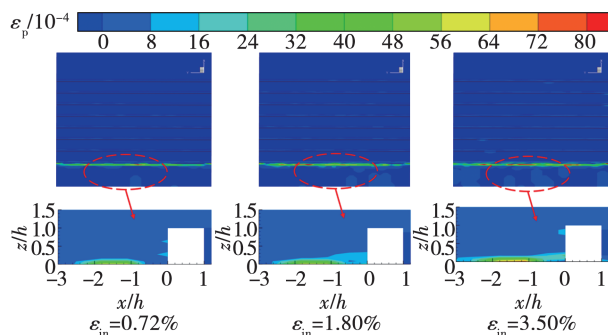


图10 不同颗粒入口体积分数下微小直肋通道壁面颗粒体积分数对比

Fig. 10 Comparison of wall particle volume fractions in a miniature ribbed channel at different inlet volume fractions

图 11(a) 给出了不同颗粒入口体积分数下微小直肋通道的微尘沉积质量随微尘颗粒输入时间的变化规律。可以看到,在微尘颗粒刚开始输入时微尘沉积质量迅速增加,几乎呈线性变化,然后沉积质量增加的速度逐渐减缓,直至最后保持稳定。当沉积质量不再增加的时候,说明此时的沉积层达到了此工况下的极限高度,单位时间内,达到沉积状态的

颗粒数与从沉积层剥离的颗粒数基本保持一致。另外,颗粒入口体积分数不同,也导致了微小直肋通道微尘沉积质量的变化规律不同,入口体积分数越大,沉积质量变化率越大,沉积质量从急剧上升到趋于平缓的拐点也越靠后。由图 11(a)可知,颗粒入口体积分数 $\varepsilon_{in} = 3.50\%$ 在最终时刻的沉积量较 $\varepsilon_{in} = 1.80\%$ 和 $\varepsilon_{in} = 0.72\%$ 时刻高 21.69% 和 70.46%。造成这种现象的主要原因是高入口体积分数下,相同时间内,到达肋壁前的颗粒数量也越多,颗粒之间的碰撞频率也越大,因此肋片前方沉积下来的颗粒数量也越多,需要达到完全沉积的时间也越久。图 11(b) 给出了不同微尘颗粒入口体积分数下微尘颗粒的沉积率。从中可以观察到,微尘颗粒输入时间 $t \leq 0.1 t_{total}$ 时,各颗粒入口体积分数下沉积率都急剧升高,因为在该时间段内,通道内的沉积量非常少,远未达到极限沉积高度。随着微尘颗粒输入时间的增加,沉积率逐渐减小,且变化速度逐渐降低。造成这种现象的主要原因是随着沉积层的建立并接近极限高度,沉积速率降低。

2.3 斯托克斯数对微小扰流肋沉积特性的影响

图 12 比较了雷诺数为 10 000、微尘颗粒入口体积分数为 0.72% 时,不同斯托克斯数下直肋通道壁面颗粒的体积分数分布。

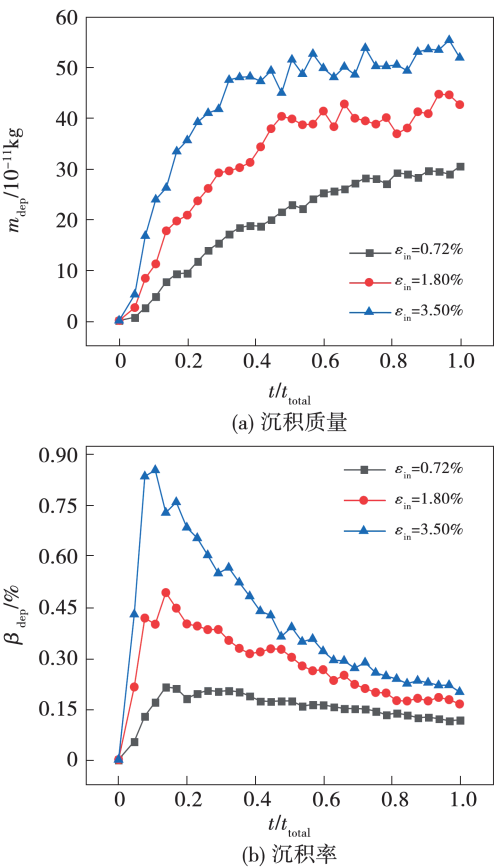


图 11 不同体积分数下微小直肋通道微尘沉积质量与沉积率

Fig. 11 Particle deposition mass and deposition rate in a iniature ribbed channel at different inlet volume fractions

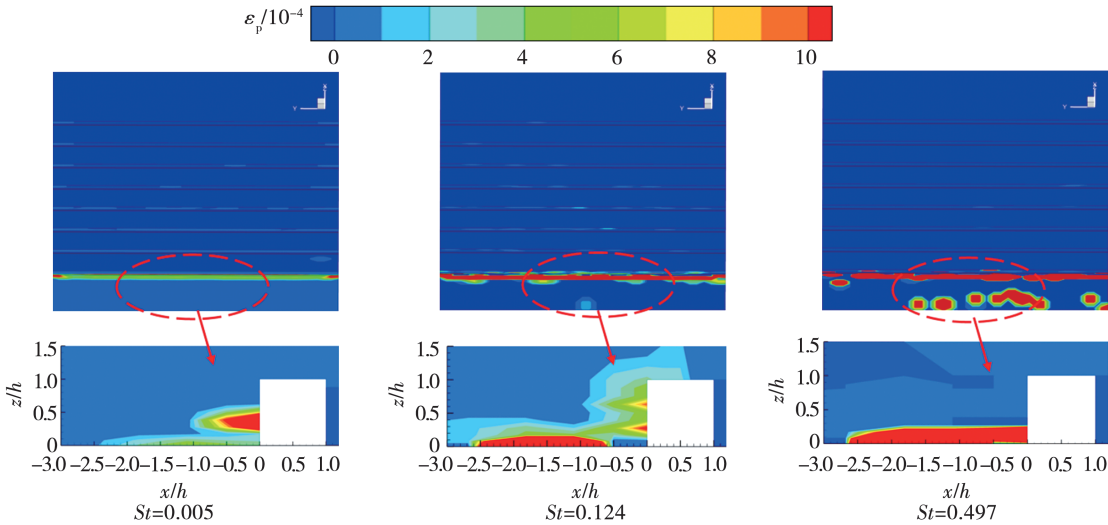
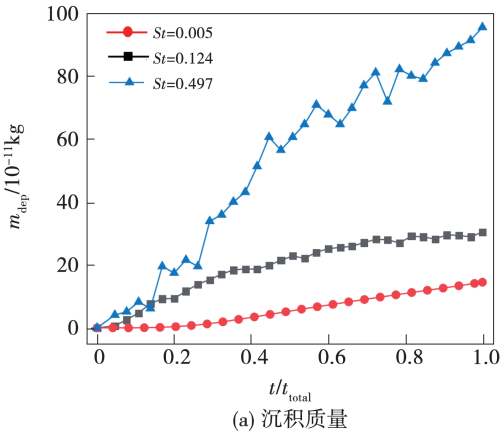


图 12 雷诺数为 10 000 时不同斯托克斯数下微小直肋通道表面颗粒体积分数分布

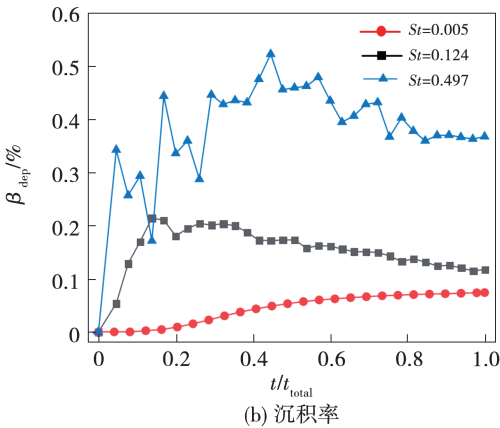
Fig. 12 Distribution of particle volume fraction on the surface of miniature transverse ribbed channels with different Stokes numbers at $Re = 10\,000$

壁面颗粒体积分数越高,代表该处的颗粒浓度越高。由图 12 可见,斯托克斯数减小说明相同质量流量下输入的颗粒数目增多,颗粒覆盖范围更广,但是颗粒体积分数随着斯托克斯数的减小而减小。这是由于虽然粒径变小,输入的颗粒数目变多,但是达到相同体积分数所需要的颗粒数目也更多。斯托克斯数越大,高体积分数区的峰值更大,且覆盖的范围也更大。相同的颗粒入口速度下, St 越小对应的颗粒粒径越小, $St=0.005$ 与 $St=0.497$ 的颗粒粒径差 10 倍,其对应的颗粒体积差 1 000 倍,因而导致了近壁处体积分数云图的分布差异。此外,随着斯托克斯数的减小,肋壁上的颗粒体积分数逐渐增大。这是因为斯托克斯数越小,颗粒的随流性越好,更易受肋壁角涡影响,这些涡流吸引并将颗粒拖向肋壁,导致肋壁处的颗粒体积分数变大。

图 13(a) 给出了不同斯托克斯数下微小直肋通道的微尘沉积质量随微尘颗粒输入时间的变化规律。可以看到,不同斯托克斯数下,微尘沉积质量均随着微尘颗粒输入时间的增加而增加,只是增加的趋势不同,斯托克斯数越小,微尘沉积质量随微尘颗粒输入时间增加的速度逐渐减缓。在最终时刻, $St=0.497$ 的沉积量分别是 $St=0.124$ 3 和 $St=0.05$ 时的 3.14 倍和 6.59 倍。图 13(b) 展示了不同斯托克斯数下微尘颗粒的沉积率随微尘颗粒输入时间的变化规律。可以观察到,在所有颗粒入口体积分数下,沉积率都急剧升高。随着微尘颗粒输入时间的逐渐升高,沉积率逐渐减小,且变化速度逐渐降低。



(a) 沉积质量



(b) 沉积率

图 13 不同斯托克斯数下微小直肋通道微尘沉积质量与沉积率

Fig. 13 Particle deposition mass and deposition rate in a miniature ribbed channel under different Stokes numbers

2.4 肋片布置方式对微尘颗粒沉积特性的影响

图 14 所示为不同肋片布置方式下的体积分数云图对比。壁面体积分数越高,代表该处的颗粒浓度越高。可以看到,不同肋片布置方式下,壁面体积分数云图分布规律类似,颗粒浓度高的位置主要分布在肋片顶端、第 1 根肋片前缘以及进口段。并且高体积分数区主要集中在第 1 根肋前,90°直肋前存在一条带状的高体积分数区,45°斜肋主要集中在肋前的后角区域,45°V 肋则主要集中在肋的两端。

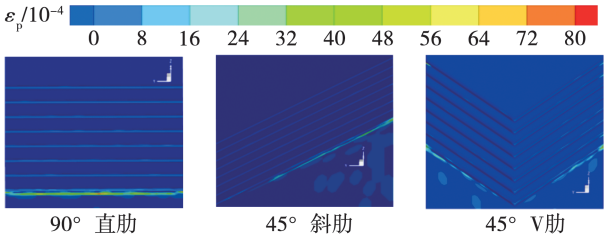


图 14 不同肋片布置方式下 xy 截面 $z=0.006\text{ mm}$ 处的颗粒体积分数云图

Fig. 14 Contours of particle volume fraction at $z=0.006\text{ mm}$ of xy section under different rib arrangements

图 15(a) 给出了不同肋片形状下微小扰流肋通道的微尘沉积质量随微尘颗粒输入时间的变化规律。可以看到,对于 90° 直肋,微尘沉积质量在微尘颗粒刚开始输入时迅速增加,几乎呈线性变化,然后沉积质量增加的速度逐渐减缓,直至最后保持稳定。当沉积质量不再增加的时候,说明此时的沉积层达

到了在此工况下的极限高度,单位时间内达到沉积状态的颗粒数与从沉积层剥离的颗粒数基本保持一致。而对于 45°斜肋和 45°V 肋,沉积质量随微尘颗粒的输入缓慢增加,在 $t \leq 0.2t_{\text{total}}$ 时,就已经达到稳定状态,并且达到稳定时的沉积质量较 90°直肋有明显降低。在最终时刻,90°直肋的沉积量分别为 45°V 肋和 45°斜肋的 6.41 倍和 10.77 倍。图 15(b) 给出了不同肋片形状下微小扰流肋通道的微尘沉积率随微尘颗粒输入时间的变化规律。从中可以观察到,微尘颗粒刚开始输入时,不同肋片形状下沉积率都急剧升高。随着微尘颗粒输入时间的增加,沉积率逐渐减小,且变化速度逐渐降低。造成这种现象的主要原因是随着沉积层的建立并接近极限高度,沉积速率降低。不同的肋片布置方式下,90°直肋整体的沉积率最高,45°斜肋和 45°V 肋的沉积率相当且远远低于 90°直肋。

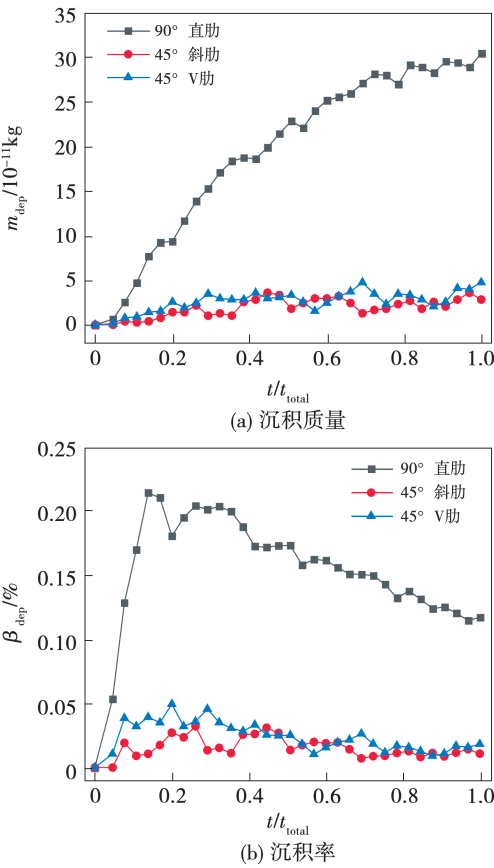


图 15 不同肋片布置方式下带肋通道微尘沉积质量与沉积率

Fig. 15 Particle deposition mass and deposition rate in a miniature ribbed channel under different rib arrangements

3 结 论

针对涡轮叶片内部细微扰流肋通道颗粒沉积特性展开研究,分析了空气进口雷诺数、斯托克斯数、颗粒入口体积分数及肋片布置方式对微小扰流肋通道砂尘颗粒沉积特性的影响,得到结论如下:

- (1) 阵列微小扰流肋通道中沉积颗粒浓度较高的区域主要集中在第 1 根肋前、肋片顶端和入口段。壁面上的沉积形貌主要由第 1 根肋前的带状沉积层构成,其沉积层的厚度随模拟时间增加而增大, $t \geq 0.6\tau$ 时趋于稳定状态。
- (2) 颗粒沉积质量随着雷诺数的增大而减小,而随着颗粒入口体积分数和斯托克斯数的增大而增大。 $Re = 10\ 000$ 时最终时刻的沉积量分别为 $Re = 20\ 000$ 和 $Re = 30\ 000$ 的 2.49 倍和 5.04 倍;在相同的雷诺数和斯托克斯数下,颗粒入口体积分数 $\varepsilon_{\text{in}} = 3.50\%$ 在最终时刻的沉积量较 $\varepsilon_{\text{in}} = 1.80\%$ 和 $\varepsilon_{\text{in}} = 0.72\%$ 时分别高 21.69% 和 70.46%;在相同的雷诺数和入口体积分数下, $St = 0.497$ 最终时刻的沉积量分别是 $St = 0.124\ 3$ 和 $St = 0.05$ 时的 3.14 倍和 6.59 倍。
- (3) 在相同的雷诺数、入口体积分数和斯托克斯数下,3 种不同的肋片排布方式中,90°直肋的沉积量最多,45°V 肋次之,45°斜肋的沉积量最小。其中,90°直肋最终时刻的沉积量分别是 45°V 肋和 45°斜肋的 6.41 倍和 10.77 倍。此外,与 90°直肋不同的是,颗粒沉积主要集中在斜肋的后角的流动死区以及 V 肋两端的流动死区。

参考文献:

[1] RONALD S. Evolution of turbine cooling[C]//ASME Turbo Expo 2017: Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Charlotte, North Carolina, USA, 2017.

[2] 周君辉,张靖周. 涡轮叶栅内粒子沉积特性的数值研究[J]. 航空学报, 2013, 34(11): 2492 - 2499.

ZHOU Jun-hui, ZHANG Jing-zhou. Numerical investigation on particle deposition characteristic inside turbine cascade [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013, 34(11): 2492 - 2499.

[3] SCHNEIDER O, DOHMEN H. Investigations of dust separation in the internal cooling air system of gas turbines[C]//ASME Turbo Expo 2003, collocated with the 2003 International Joint Power Gen-

eration Conference, Atlanta, Georgia, USA, 2016.

[4] BORELLO D, CARDILO L, CORSINI A, et al. Modelling of particle transport, erosion and deposition in power plant gas paths [C]//ASME Turbo Expo 2016; Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Seoul, South Korea, 2016.

[5] COWAN J B, TAFTI D K, KOHLI A. Investigation of sand particle deposition and erosion within a short pin fin array [C]//ASME Turbo Expo 2010: Power for Land, Sea, and Air, Glasgow, UK, 2010.

[6] LI Lin, LIU Cun-liang, LI Bing-ran, et al. Numerical study on particles deposition in the U-bend ribbed passage [J]. Journal of Heat Transfer, 2021, 143 (2) : 023002. 1 – 023002. 11.

[7] 赵宏杰, 姜玉廷, 杜磊, 等. 船舶燃气轮机冷却涡轮叶片内部带肋冷却通道颗粒沉积特性研究 [J]. 推进技术, 2020, 41 (11) : 2499 – 2508.

ZHAO Hong-jie, JIANG Yu-ting, DU Lei, et al. Particle deposition characteristics on internal rib cooling channel of air-cooled turbine blade for marine gas turbine [J]. Journal of Propulsion Technology, 2020, 41 (11) : 2499 – 2508.

[8] SINGH S, TAFTI D, REAGLE C, et al. Sand transport in a two pass internal cooling duct with rib turbulators [J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2014, 46 : 158 – 167.

[9] SHAH A, TAFTI D K. Transport of particulates in an internal cooling ribbed duct [J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129 (4) : 816 – 825.

[10] DOWD C, TAFTI D, YU K. Sand transport and deposition in rotating two-passed ribbed duct with Coriolis and centrifugal buoyancy forces at $Re = 100\ 000$ [C]//ASME Turbo Expo 2017; Turbomachinery Technical Conference and Exposition, Charlotte, North Carolina, USA, 2017.

[11] LU Hao, QUAN Yun-yun. A CFD study of particle deposition in three-dimensional heat exchange channel based on an improved deposition model [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2021, 178 (10) : 121633. 1 – 121633. 18.

[12] YU K, TAFTI D. Impact model for micrometer-sized sand particles [J]. Powder Technology, 2016, 294 (6) : 11 – 21.

[13] HONG Wen-peng, LIU Yan, WANG Bi-hui, et al. Three-way coupling of fine particle deposition behavior on a rib-roughened surface [J]. Powder Technology, 2020, 327 (6) : 420 – 427.

[14] HONG Wen-peng, WANG Bi-hui, ZHENG Jian-xiang. Numerical study on the influence of fine particle deposition characteristics on wall roughness [J]. Powder Technology, 2020, 360 (15) : 120 – 128.

[15] DUFRESNE Y, BOULET M, MOREAU S. Energy dissipation and onset of instabilities in coarse-grained discrete element method on homogeneous cooling systems [J]. Physics of Fluids, 2022, 34 (3) : 033306. 1 – 033306. 18.

[16] USA Department of Defense. Military specification of engines aircraft turbojet and tubofan [R]. MIL-E-5007D, 1973.

[17] LIU B Y H, AGARWAL J K. Experimental observation of aerosol de-position in turbulent flow [J]. Journal of Aerosol Science, 1974, 5 (2) : 145 – 155.

[18] SEHMEL G A. A particle size distribution function for data recorded in size ranges [J]. Annals of Occupational Hygiene, 1968, 11 (2) : 87 – 98.

(刘 颖 编辑)