

# 微米沙尘高温气-粒两相流平板沉积特性研究

徐鑫东<sup>1</sup>, 虞跨海<sup>1</sup>, 姚世乐<sup>1</sup>, 岳珠峰<sup>2</sup>

(1. 河南科技大学 工程力学系, 河南 洛阳 471023; 2. 西北工业大学 力学与土木建筑工程学院, 陕西 西安 710072)

**摘 要:**基于微米沙尘高温弹塑性碰撞理论及沙尘-壁面碰撞沉积模型和两相流理论,研究了不同温度下1~5  $\mu\text{m}$  沙尘与镍基单晶材料壁面碰撞沉积特性,分析了气流流动特性、颗粒运动轨迹和碰撞沉积结果等,研究了粒径和温度对微米沙尘碰撞率、沉积率和捕捉率的影响。结果表明:微米沙尘在通道输送过程中不同出口位置处运动轨迹差异较大;温度为1 323 K时,直径1~5  $\mu\text{m}$  沙尘碰撞率随粒径减小而减小,1  $\mu\text{m}$  沙尘沉积率和捕捉率最大,分别为37.86%和6.049%,2  $\mu\text{m}$  以上沙尘沉积率和捕捉率相对较小;直径1  $\mu\text{m}$  沙尘在1 273, 1 323 和 1 343 K 3种温度下沉积率和捕捉率随温度升高而增大。

**关 键 词:**微米沙尘;颗粒沉积;碰撞损失;气-粒两相流动

中图分类号:V231.4 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.11.011

[引用本文格式]徐鑫东,虞跨海,姚世乐,等.微米沙尘高温气-粒两相流平板沉积特性研究[J].热能动力工程,2021,36(11):80-86. XU Xin-dong, YU Kua-hai, YAO Shi-le, et al. Study on plate deposition characteristics of micron-sized sand dust in high temperature gas-particle two-phase flow[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11): 80-86.

## Study on Plate Deposition Characteristics of Micron-sized Sand Dust in High Temperature Gas-particle Two-phase Flow

XU Xin-dong<sup>1</sup>, YU Kua-hai<sup>1</sup>, YAO Shi-le<sup>1</sup>, YUE Zhu-feng<sup>2</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Henan University of Science and Technology, Luoyang, China, Post Code: 471023;  
2. School of Mechanics, Civil Engineering and Architecture, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, China, Post Code: 710072)

**Abstract:** Based on the high temperature elastic-plastic collision theory of micron-sized sand dust, the sand dust-wall collision deposition model and the two-phase flow theory, the collision and deposition characteristics at different temperatures were studied for the sand dust of 1 to 5  $\mu\text{m}$  and the nickel-based single crystal wall surface, the air flow characteristics, particle motion trajectories and collision deposition results were analyzed, and the influence of particle size and temperature on the collision rate, deposition rate and capture rate of micron-sized sand dust was studied. The results show that the motion trajectories of micron-sized sand dust at different outlet positions are quite different in the channel transportation process. The collision rate of sand dust with the diameters of 1 to 5  $\mu\text{m}$  decreases with the decrease of particle size when the temperature is 1 323 K. The deposition rate and capture rate are highest for the sand dust of 1  $\mu\text{m}$ , which are 37.86% and 6.049% respectively. The deposition rate and capture rate are much lower for sand dust with the diameter above 2  $\mu\text{m}$ . The deposition rate and capture rate for the sand dust with

收稿日期:2020-12-21; 修订日期:2021-03-01

基金项目:国家自然科学基金(51975187);国防基础科研项目(JCKY2018419C002);国家科技重大专项(2017-IV-0003-0040);河南省科技攻关项目(202102210309);河南省高等学校重点科研项目(19A130002)

**Fund-supported Project:** National Natural Science Foundation of China (51975187); National Defense Basic Scientific Research Project (JCKY2018419C002); National Science and Technology Major Project (2017-IV-0003-0040); Science and Technology Key Project of Henan Province (202102210309); Key Scientific Research Project of Colleges and Universities of Henan Province (19A130002)

作者简介:徐鑫东(1995-),男,湖北广水人,河南科技大学硕士研究生。

通讯作者:虞跨海(1982-),男,浙江义乌人,河南科技大学教授。

the diameter of 1  $\mu\text{m}$  increase with the rise of the temperature at 1 273 K, 1 323 K and 1 343 K.

**Key words:** micron-sized sand dust, particle deposition, collision loss, gas-particle two-phase flow

## 引 言

航空发动机服役于恶劣沙尘环境时,灰尘和沙粒等微颗粒极易随空气摄入,不仅侵蚀压气机叶片,而且易在高温热端部件表面和冷却通道内发生沉积,导致叶片冷却性能下降,甚至发生烧蚀,威胁发动机安全<sup>[1]</sup>。虽然直升机发动机和燃气轮机进气粒子分离器能够有效分离较大颗粒,但无法有效清除混杂于空气的微小颗粒。因此,开展微米颗粒高温下的气-粒两相流壁面碰撞和沉积特性研究,对探索微颗粒沉积机理和防沉积设计具有重要意义。

Crosby 等人<sup>[2]</sup>通过涡轮加速沉积试验装置,研究了微颗粒粒径、气体温度和叶片温度对颗粒沉积的影响。Reagle 等人<sup>[3-4]</sup>开展了微颗粒-平板碰撞沉积实验,研究了微颗粒与壁面的碰撞沉积特性。目前国内外开展微米沙尘碰撞沉积计算的理论模型主要有临界速度模型、临界粘性模型和碰撞沉积统一模型等。EL-Batsh 等人在 Brach<sup>[5]</sup> 理论上建立了包含颗粒粘附和剪切分离的临界速度模型<sup>[6]</sup>。Singh 和 Tafti 将临界粘性理论<sup>[7]</sup>与软球碰撞模型相结合,提出了临界粘性模型<sup>[8]</sup>。Yu 和 Tafti<sup>[9-11]</sup>考虑微米颗粒物性参数与温度、粒径相关性,以及粘附力做功、粗糙表面塑性变形损失等,建立了微米沙尘碰撞沉积统一模型。微颗粒沉积理论的建立推动了气-粒两相流仿真技术的发展。周君辉和张靖周<sup>[12]</sup>采用临界速度模型研究了粒径和出流吹风比对气膜孔附近区域的颗粒运动与沉积特性的影响;杨晓军等人<sup>[13]</sup>基于临界粘性模型研究了涡轮叶栅通道内颗粒物的沉积情况;Dowd 等人<sup>[14]</sup>基于临界粘性模型和碰撞沉积统一模型研究了在 U 型冷却通道内微米沙尘颗粒的输送和沉积;虞跨海等人<sup>[15]</sup>提出了一种阵列涡流管分离装置,研究了涡流管分离器的微颗粒分离机理。

本文考虑了微米沙尘-壁面碰撞作用力、颗粒相受力和温度相关的微米沙尘弹塑性碰撞特性等,研究了不同温度下 1~5  $\mu\text{m}$  沙尘对平板的碰撞沉

积特性,为开展涡轮叶片气膜孔和冷却通道的防颗粒沉积设计提供参考。

## 1 微米沙尘-壁面碰撞沉积特性

微米沙尘在涡轮叶片冷却通道输送过程中,不断与气膜孔壁、粗糙肋等碰撞而发生沉积,将微米沙尘与各类壁面碰撞理想化为微颗粒-平板冲击问题,结合颗粒高温弹塑性碰撞沉积理论,建立恢复系数预测曲线,开展了微米沙尘-壁面碰撞沉积特性研究。

### 1.1 理论基础

颗粒法向碰撞压缩过程根据入射法向速度  $V_{ni}$  不同分为弹性、弹塑性或完全塑性 3 个阶段,对应临界压力分别为  $1.1\sigma_Y$  和  $2.8\sigma_Y$  ( $\sigma_Y$  为颗粒屈服应力);反弹过程中弹性应变能释放做功获得反弹速度,反弹后动能为  $W_{RF}$ <sup>[9]</sup>:

$$W_{RF} = \frac{8}{15} E_* R_*^{1/2} \delta_{re}^{5/2} \quad (1)$$

式中:  $E_*$ —等效弹性模量, Pa;  $R_*$ —等效半径, m;  $\delta_{re}$ —恢复变形量, m。

其中,恢复变形量  $\delta_{re}$  根据碰撞所处阶段进行分段预测<sup>[9]</sup>:

$$\delta_{re} = \begin{cases} \delta_{\max}, \text{弹性} \\ [1 + \frac{1}{33} \ln(2\delta_{\max}/\delta_c - 1)](2\delta_{\max}/\delta_c - 1)^{1/2} \delta_c, \text{弹塑性} \\ [1 + \frac{1}{33} \ln(2\delta_{cp}/\delta_c - 1)](2\delta_{cp}/\delta_c - 1)^{1/2} \delta_c, \text{完全塑性} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\delta_{\max}$ —压缩过程中最大变形量, m;  $\delta_c$ —弹性-弹塑性阶段临界变形量, m;  $\delta_{cp}$ —弹塑性-完全塑性阶段临界变形量, m。

入射法向动能  $W_{ni}$  与反弹法向动能  $W_{RF}$  之差为损失的颗粒塑性变形能,此外微颗粒碰撞还需要考虑粘附力做功<sup>[16]</sup>和表面粗糙度塑性能量损失<sup>[11]</sup>等。因此,法向恢复系数  $e_n$  和反弹法向速度  $V_{nr}$  为:

$$\begin{cases} e_n = \sqrt{(W_{RF} - W_A - W_{asp})/W_{ni}} \\ V_{nr} = e_n V_{ni} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $W_A$ —粘附力做功, J;  $W_{asp}$ —表面粗糙度塑性变形能量损失, J。当粘附力做功与表面粗糙度塑性变形能量损失之和的预测结果等于或大于碰撞模型反弹法向动能时, 微米沙尘颗粒发生沉积, 有  $e_n = 0$ 。

沙尘颗粒屈服应力受颗粒粒径、温度等因素影响<sup>[11]</sup>:

$$\sigma_Y = \begin{cases} [1 - 1.125 \times 10^{-3} (T - 1000)] \cdot \\ (315.3 + 11.99l^{-0.55}), T \leq 1\,340\text{ K} \\ [0.6175 - 1.029 \times 10^{-2} (T - 1340)] \cdot \\ (315.3 + 11.99l^{-0.55}), T > 1\,340\text{ K} \end{cases}$$

(4)

式中:  $l$ —赫兹接触半径, mm。

微米沙尘颗粒与壁面斜碰时在切向方向也存在能量损失, 切向恢复系数  $e_t$  和反弹切向速度  $V_{tr}$  为<sup>[10]</sup>:

$$\begin{cases} e_t = 1 - \lambda \tan \alpha \cdot (1 + e_n) \\ V_{nt} = e_t V_{ti} \end{cases}$$

(5)

式中:  $\lambda$ —摩擦系数;  $\alpha$ —颗粒入射速度方向与壁面之间的夹角, rad;  $V_{ti}$ —切向入射速度, m/s。

1.2 碰撞特性预测

基于上述沉积理论, 考虑粘附力做功、表面粗糙度塑性变形能量损失等, 预测微米沙尘与 DD3 镍基单晶材料壁面碰撞沉积特性, DD3 镍基单晶材料属性如表 1 所示。

表 1 DD3 镍基单晶材料属性

Tab. 1 Properties of DD3 nickel-based single crystal materials

| 参数                                       | 1 273 K | 1 323 K | 1 343 K |
|------------------------------------------|---------|---------|---------|
| 弹性模量/GPa                                 | 61      | 51      | 47      |
| 屈服应力/MPa                                 | 440     | 340     | 290     |
| 表面能 <sup>[11]</sup> /J · m <sup>-2</sup> | 1.62    | 1.62    | 1.62    |
| 表面粗糙度/nm                                 | 10      | 10      | 10      |
| 摩擦系数 $\lambda$ <sup>[10]</sup>           | 0.092   | 0.092   | 0.092   |
| 密度/kg · m <sup>-3</sup>                  | 8 200   | 8 200   | 8 200   |

图 1 为 1 273, 1 323 和 1 343 K 温度下, 1 ~ 5  $\mu\text{m}$  颗粒法向恢复系数随法向入射速度和粒径变化预测曲线。入射速度较小时, 法向恢复系数为零, 随着入射速度增大, 恢复系数快速升高随后逐渐减小。

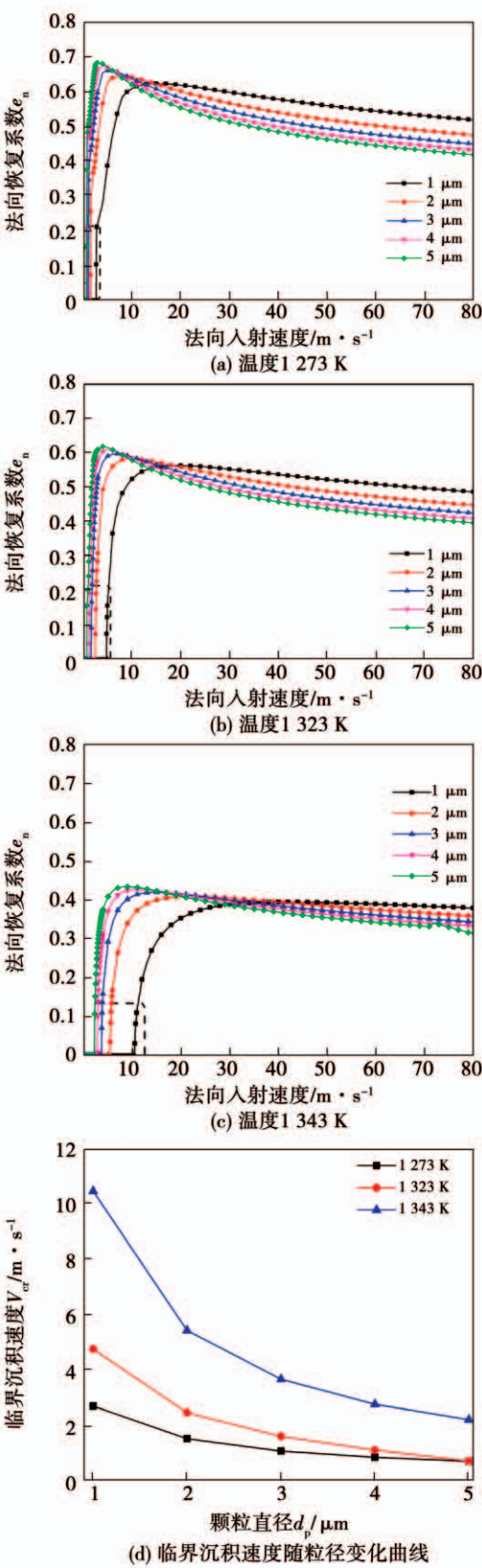


图 1 法向恢复系数和临界沉积预测变化曲线  
Fig. 1 The predicted change curves of normal recovery coefficient and critical deposition

原因是颗粒在较低速度下由于表面粘附力做功而发生沉积,但随着入射速度的增大,粘附力做功效果减弱,恢复系数升高,在入射速度较高时颗粒塑性变形能量损失增大,法向恢复系数逐渐减小。因此,对于微米颗粒-壁面碰撞问题,存在临界沉积速度  $V_{cr}$ ,这取决于颗粒粒径、材料属性及表面粗糙度等。不同温度下微米沙尘-DD3 镍基单晶壁面碰撞的临界沉积速度随粒径变化曲线如图 1(d) 所示。临界沉积速度随粒径增大而减小,随温度升高而增大。

## 2 数值模拟方法

### 2.1 几何模型

基于文献[3-4]的沉积实验,建立微米沙尘高温气-粒两相流冲击平板几何模型,主要包括外部流体域、输送通道和目标靶面 3 部分,如图 2(a) 所示。颗粒输送通道长为  $8D$ ,横截面为边长等于  $D$  ( $D=5\text{ mm}$ ) 的正方形;目标靶面平面与输送通道出口平行,两者之间距离为  $0.8D$ ,输送通道与目标靶面横截面高度比为  $10:7$ ;外部流体域长、宽、高分别为  $18.8D$ 、 $10D$  和  $10D$ 。采用六面体结构化网格进行单元划分,并对输送通道出口至目标靶面附近区域作网格加密处理,壁面第一层网格  $y^+$  小于 1。经过网格无关性验证,确定网格单元总数约为 370 万,图 2(b) 所示为输送通道出口与目标靶面间区域局部网格示意图。

### 2.2 流体相控制方程

流体相计算采用雷诺时均 Navier-Stokes 方程求解。

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho_g u_i) = 0 \quad (6)$$

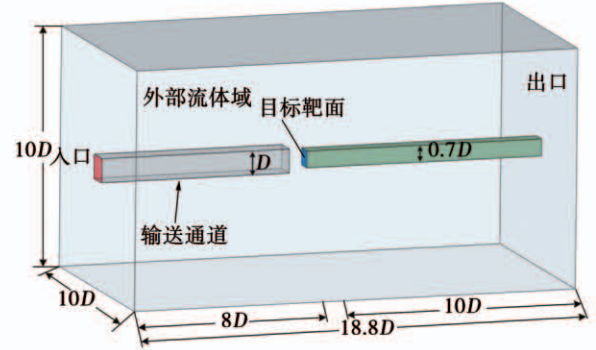
动量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho_g u_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\mu_g \frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'}) \quad (7)$$

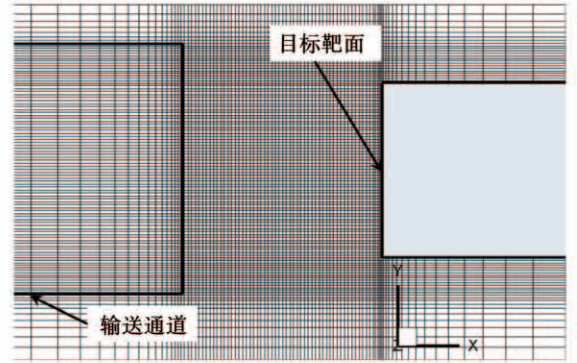
能量守恒方程:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_i}(\frac{\lambda}{\rho_g c_p} \frac{\partial T}{\partial x_i}) \quad (8)$$

式中:  $\rho_g$ —气流密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $u_i$ —气流速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $p$ —气流压力,  $\text{Pa}$ ;  $\mu_g$ —气流动力粘度系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $T$ —气流温度,  $\text{K}$ ;  $c_p$ —比定压热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $\lambda$ —导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 。



(a) 几何模型



(b) 局部网格

图 2 几何模型及局部网格图

Fig. 2 Schematic diagrams of geometric model and local meshes

### 2.3 颗粒相受力模型

沙尘微颗粒通道输送属于颗粒稀相流动,采用 DPM 离散型模型,忽略颗粒间相互作用以及颗粒相对流体流动的影响。沙尘直径为  $1 \sim 5\text{ }\mu\text{m}$ ,颗粒-壁面碰撞力根据微颗粒弹塑性碰撞理论模型计算,建立颗粒相受力平衡方程:

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_{\text{drag}} + F_{\text{lift}} + F_p + F_T + F_{\text{collision}} \quad (9)$$

式中:  $m_p$ —颗粒质量,  $\text{kg}$ ;  $u_p$ —颗粒运动速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $F_{\text{drag}}$ —曳力,  $\text{N}$ ;  $F_{\text{lift}}$ —Saffman 升力,  $\text{N}$ ;  $F_p$ —压力梯度力,  $\text{N}$ ;  $F_T$ —热泳力,  $\text{N}$ ;  $F_{\text{collision}}$ —颗粒-壁面碰撞作用力,  $\text{N}$ 。曳力、Saffman 升力、热泳力和压力梯度力计算见文献[18-21]。

3 气 - 粒两相流仿真

3.1 边界条件

通道入口速度为 70 m/s,入口雷诺数为30 000,通道壁面、目标靶面和计算域边界壁面均采用无滑移绝热边界,计算域出口为自由出口<sup>[10]</sup>。连续方程、动量方程、能量方程采用二阶迎风格式离散,采用压力耦合方程半隐式解法(SIMPLE 算法),湍流模型采用  $k-\omega$  SST 模型,流体计算时间步长为  $1.0 \times 10^{-6}$  s,不考虑重力作用。待流场计算收敛后,在输送通道入口中心位置建立  $3.6\text{ mm} \times 3.6\text{ mm}$  的方形注射面,进行 21 次注射,每次均匀注射 10 000 个颗粒,共计颗粒数 210 000,注入时颗粒速度与流体速度相同,沙尘颗粒密度为  $2\ 630\text{ kg/m}^3$ 。

3.2 颗粒碰撞与沉积计算

图 3 为微颗粒碰撞与沉积计算流程。当微米沙尘运动到目标靶面时,以临界沉积速度  $V_{cr}$  作为颗粒沉积判据。比较颗粒入射法向速度  $V_{ni}$  与临界沉积速度  $V_{cr}$  大小关系,当  $V_{ni} < V_{cr}$  时,颗粒发生沉积;否则,颗粒碰撞发生反弹。颗粒碰撞沉积模型通过用户自定义函数(UDF)实现,持续记录目标靶面上碰撞颗粒数和沉积颗粒数,初始值为 0;壁面边界上每发生一次碰撞或沉积,修改相关记录参数;追踪颗粒并进行计算,直到全部颗粒离开计算域或发生沉积为止。

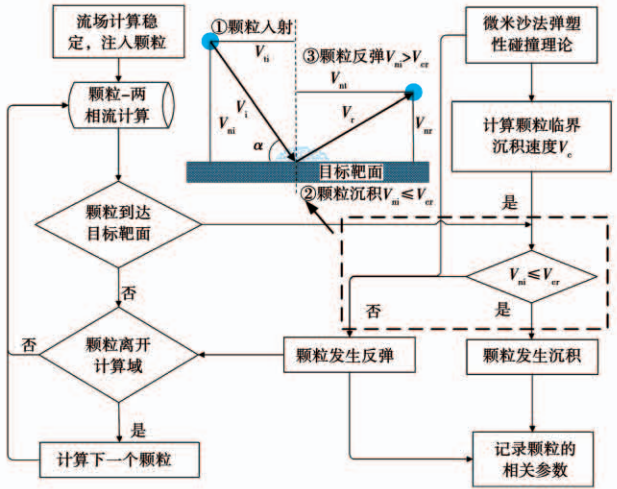


图 3 微颗粒碰撞与沉积计算流程图

Fig.3 Flow chart of calculation for micro-particle collision and deposition

4 结果与分析

4.1 流场特性分析及射流区域颗粒运动轨迹

气流冲击平板中间截面( $z=0$ )处速度分布云图及流线图如图 4 所示。气流以自由射流形式离开输送通道冲击目标靶面,然后沿目标靶面周围区域加速向出口流出。流场中气流速度大小沿截面中心线呈对称分布,在目标靶面附近区域速度梯度较大,速度在冲击的中心区域较小,沿目标靶面中心向外逐渐增大;目标靶面后方出现回流区,其长度约为板高的 1.9 倍,与文献[8]结果相符,表明采用  $k-\omega$  SST 湍流模型能够较准确预测气流冲击平板的流动特性。

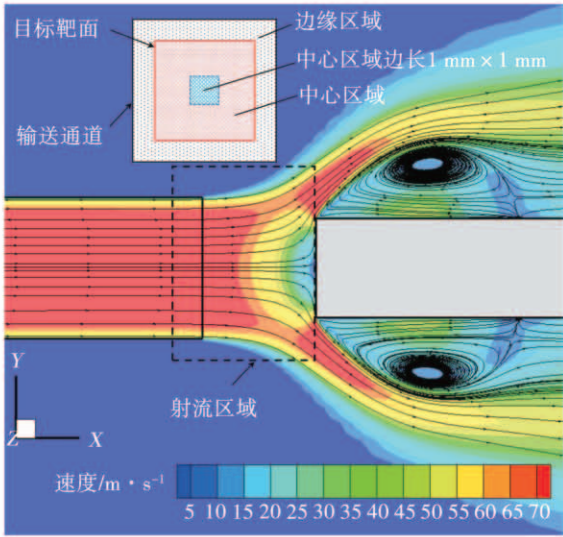


图 4 中间截面( $z=0$ )速度分布云图及流线图  
Fig.4 Velocity distribution and streamline diagram of the middle section( $z=0$ )

射流区域微米颗粒运动轨迹示意如图 5 所示。根据微米颗粒不同的运动轨迹,将输送通道出口分为边缘区域、中心区域和中间区域 3 个部分。边缘区域为输送通道与目标靶面错位区域,宽度各为 0.75 mm,中心区域大概为通道中央边长 1 mm 的正方形区域,其余为中间区域。颗粒从通道边缘区域流出后随气流运动通常不与目标靶面发生碰撞(a);颗粒从通道中心区域出口流出后,可能与目标靶面发生一次碰撞后沉积(c);也可能与目标靶面发生二次碰撞后沉积并终止运动(d);颗粒从通道

中间区域出口流出后,在流体相作用下,与目标靶面发生一次碰撞后反弹离开目标靶面(b),也可能与目标靶面发生二次碰撞后离开射流区域(e),或最终随气流离开射流区域。

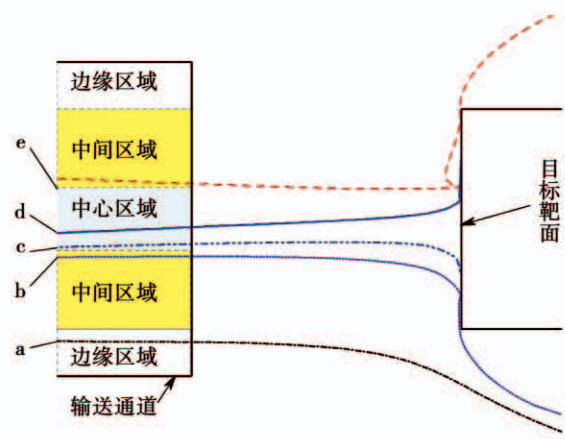


图 5 射流区域微米颗粒运动轨迹

Fig. 5 Motion trajectories of micron-sized particles in the jet region

4.2 粒径对微米沙尘碰撞和沉积的影响

采用颗粒碰撞率、沉积率和捕捉率表征颗粒碰撞沉积特性,其中碰撞率  $\eta_{imp}$  定义为:

$$\eta_{imp} = \frac{N_{imp}}{N_{inp}} \times 100\%$$

(10)

式中: $N_{imp}$ —在目标靶面上碰撞的颗粒总数, $N_{inp}$ —注入到计算域内的颗粒总数。

沉积率  $\eta_{dep}$  定义为:

$$\eta_{dep} = \frac{N_{dep}}{N_{inp}} \times 100\%$$

(11)

式中: $N_{dep}$ —在目标靶面上沉积的颗粒总数。

捕捉率  $\eta_{cap}$  定义为:

$$\eta_{cap} = \frac{N_{dep}}{N_{inp}} \times 100\%$$

(12)

温度为 1 323 K 时,沙尘颗粒在目标靶面的碰撞率和碰撞分布情况如图 6 所示。1~5  $\mu\text{m}$  沙尘碰撞率分别为 15.98%、47.86%、64.60%、74.44% 和 78.70% (沙尘颗粒总数为 21 万),颗粒粒径越小,碰撞率越低。

1 323 K 温度时,沙尘颗粒沉积率和捕捉率如图 7 所示,1~5  $\mu\text{m}$  沙尘沉积率分别为 37.857%、0.330%、0.416%、0.004% 和 0.004%,捕捉率分别

为 6.049%、0.158%、0.269%、0.003% 和 0.003%。1  $\mu\text{m}$  沙尘沉积率和捕捉率最大,2  $\mu\text{m}$  以上沙尘沉积率和捕捉率相对较小,表明 2  $\mu\text{m}$  以下沙尘沉积率和捕捉率受颗粒粒径影响显著。

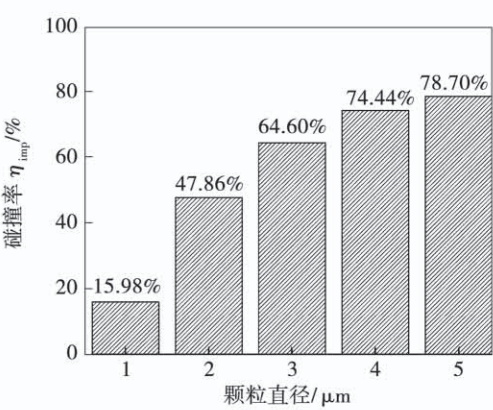


图 6 1~5  $\mu\text{m}$  沙尘碰撞率

Fig. 6 Collision rate of sand dust with the diameters of 1 to 5  $\mu\text{m}$

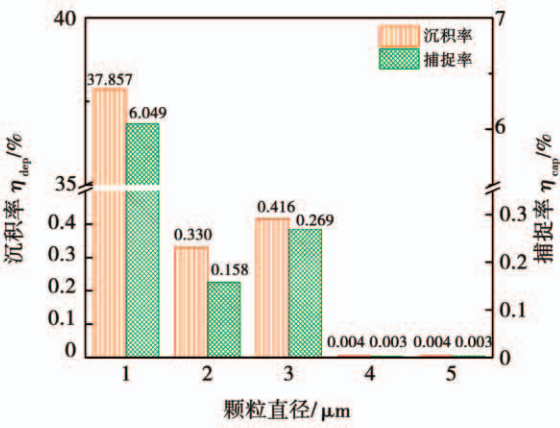


图 7 1~5  $\mu\text{m}$  沙尘沉积率和捕捉率

Fig. 7 Deposition rate and capture rate of sand dust with the diameters of 1 to 5  $\mu\text{m}$

4.3 温度对微米沙尘碰撞和沉积的影响

1  $\mu\text{m}$  沙尘颗粒在 1 273、1 323 和 1 343 K 温度下的碰撞率、沉积率和捕捉率计算结果如表 2 所示,碰撞率分别为 16.51%、15.98% 和 16.00%,沉积率分别为 21.27%、37.85% 和 79.07%,捕捉率分别为 3.51%、6.05% 和 12.66%。颗粒沉积率随温度升高而增大,温度 1 343 K 时,由于沙尘颗粒软化,屈服强度快速下降,临界沉积速度增大,颗粒沉积率显著升高,捕捉率也随温度升高而增大,表明温度对微

米沙尘颗粒沉积影响较为显著。

表 2 不同温度下 1  $\mu\text{m}$  颗粒的碰撞率、沉积率和捕捉率  
Tab.2 The collision rate,deposition rate and capture  
rate of particles with the diameter of 1  $\mu\text{m}$  at  
different temperatures

| 温度/K  | $N_{\text{imp}}$ | $N_{\text{dep}}$ | $\eta_{\text{imp}}/\%$ | $\eta_{\text{dep}}/\%$ | $\eta_{\text{cap}}/\%$ |
|-------|------------------|------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1 273 | 34 683           | 7 376            | 16.51                  | 21.27                  | 3.51                   |
| 1 323 | 33 555           | 12 703           | 15.98                  | 37.85                  | 6.05                   |
| 1 343 | 33 618           | 26 583           | 16.00                  | 79.07                  | 12.66                  |

5 结 论

(1) 温度 1 323 K 时,微米沙尘在直通道输送冲击平板过程中,1 ~ 5  $\mu\text{m}$  沙尘碰撞率随颗粒粒径减小而减小。

(2) 1 ~ 5  $\mu\text{m}$  颗粒沉积率和捕捉率受粒径影响显著。温度 1 323 K 时,直径 1  $\mu\text{m}$  沙尘颗粒的沉积率和捕捉率最高,分别为 37.86% 和 6.049%;4 和 5  $\mu\text{m}$  沙尘在目标靶面的沉积率和捕捉率相对较低,沉积率均为 0.004%,捕捉率均为 0.003%。

(3) 1  $\mu\text{m}$  沙尘颗粒沉积率和捕捉率受温度影响显著。1 273,1 323 和 1 343 K 3 种温度下,1  $\mu\text{m}$  沙尘沉积率和捕捉率随温度升高而增大;碰撞率分别为 16.51%,15.98% 和 16.00%,受温度影响较小。

参考文献:

[1] WYLIE S, BUCKNELL A, FORSYTH P, et al. Reduction in flow parameter resulting from volcanic ash deposition in engine representative cooling passages[J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139(3):1-13.

[2] CROSBY J M, LEWIS S, BONIS J P, et al. Effects of temperature and particle size on deposition in land based turbines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130(5):819-825.

[3] REAGLE C J, DELIMONT J M, NG W F, et al. Measuring the coefficient of restitution of high speed microparticle impacts using a PTV and CFD hybrid technique[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(10):105303.

[4] REAGLE C J, DELIMONT J M, NG W F, et al. Study of microparticle rebound characteristics under high temperature conditions [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 136(1):

10.1115.

[5] BRACH R, DUNN P. A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres [J]. Aerosol Science and Technology, 1992, 16(1):51-64.

[6] ELBATSH H, HASELBACHER H. Numerical investigation of the effect of ash particle deposition on the flow field through turbine cascades [C]//Amsterdam, Netherlands; Proceedings of ASME Turbo Expo 2002, GT-2002-30600.

[7] SREEDHARAN S, TAFTI D. Composition dependent model for the prediction of syngas ash deposition in turbine gas hot path[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2011, 32(1):201-211.

[8] SINGH S, TAFTI D. Particle deposition model for particulate flows at high temperatures in gas turbine components[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2015, 52:72-83.

[9] YU K H, TAFTI D. Impact model for micrometer sized sand particles[J]. Powder Technology, 2016, 294:11-21.

[10] YU K H, ELGHANNAY H A, TAFTI D. An impulse based model for spherical particle collisions with sliding and rolling[J]. Powder Technology, 2017, 319:102-116.

[11] YU K H, TAFTI D. Size and temperature dependent collision and deposition model for micron-sized sand particles[J]. Journal of Turbomachinery, 2019, 141(3):1-11.

[12] 周君辉, 张靖周. 气膜孔附近粒子沉积特性的数值研究[J]. 航空动力学报, 2014, 29(9):2166-2173.

ZHOU Jun-hui, ZHANG Jing-zhou. Numerical investigation on particle deposition characteristics in vicinity of film cooling holes [J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(9):2166-2173.

[13] 杨晓军, 祝佳雄. 涡轮叶栅通道内颗粒物沉积过程的数值模拟[J]. 航空学报, 2017, 38(5):36-47.

YANG Xiao-jun, ZHU Jia-xiong. Numerical simulation of particle deposition process inside turbine cascade[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017, 38(5):36-47.

[14] 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, 2017.

[15] 李明远, 虞跨海, 芦清文, 等. 微颗粒涡流管惯性分离特性数值模拟[J]. 热能动力工程, 2020, 35(5):134-140.

LI Ming-yuan, YU Kua-hai, LU Qing-wen, et al. Numerical simulation of separation characteristics for a micro-particle vortex tube inertial separator[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(5):134-140.

[16] TSAI C J, PUI D Y H, LIU B Y H. Capture and rebound of small particles upon impact with solid surfaces[J]. Aerosol Science and Technology, 1990, 12(3):497-507.