

## 气膜孔附近粒子沉积特性的数值研究

周君辉, 张靖周

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

**摘 要:** 研究了气膜孔附近的粒子运动与沉积特性, 重点研究了粒子直径和气膜出流吹风比对粒子运动与沉积特性的影响. 基于 EI-Batsh 粒子沉积模型, 考虑了粒子的黏附/反弹和离去机制, 编制了相应的粒子沉积计算模块集成在 Fluent 软件中, 并利用相关实验数据对该计算方法进行了验证. 结果表明:  $1, 2 \mu\text{m}$  直径粒子沉积率随吹风比增大而增大;  $3, 4 \mu\text{m}$  直径粒子沉积率则随吹风比增大而减小.  $1 \mu\text{m}$  直径粒子易受气膜出流卵形涡对的卷吸作用而沉积于相邻气膜孔之间区域, 当吹风比为 2 时粒子沉积率比吹风比为 0 时高约 5 倍;  $5 \mu\text{m}$  直径粒子运动轨迹受气膜出流影响较小. 总体沉积率随吹风比升高而不断降低, 吹风比为 2 时总体沉积率比吹风比为 0 时减小 1.7%.

**关键词:** 气-固两相流动; 沉积模型; 沉积特性; 气膜孔; 吹风比

**中图分类号:** V231.1

**文献标志码:** A

### Numerical investigation on particle deposition characteristics in vicinity of film cooling holes

ZHOU Jun-hui, ZHANG Jing-zhou

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** Numerical study on the particles movement and deposition in the vicinity of film cooling holes was performed, focusing on the effects of particle diameter and film outflow blowing ratio on the particle movement and deposition characteristics. Based on the EI-Batsh deposition model including particle sticking/rebounding and particle detachment, user definition functions were linked with FLUENT to predict the particle deposition, and verify the calculation data with relevant experimental data. The research results show that the deposition rates of  $1, 2 \mu\text{m}$  diameter particles increase with the growing blowing ratio, but the deposition rates of  $3, 4 \mu\text{m}$  diameter particles decrease with the growing blowing ratio.  $1 \mu\text{m}$  diameter particles are prone to deposit in the local region between adjacent film cooling holes under the suction of kidney vortices, and the particle deposition rate of the blowing ratio of 2 is about 5 times higher than that of the blowing ratio of 0. The trajectories of  $5 \mu\text{m}$  diameter particles are less affected by the film outflow. The total deposition rate decreases with the increase of blowing ratio, and the total deposition rate at blowing ratio of 2 decreases by 1.7% compared with that at blowing ratio of 0.

**Key words:** gas-solid flow; deposition model; deposition characteristics;  
film cooling holes; blowing ratio

**收稿日期:** 2013-06-13

**基金项目:** 国家自然科学基金(51276090); 江苏省普通高校研究生科研创新计划(CXLX13\_166);  
中央高校基本科研业务费专项资金

**作者简介:** 周君辉(1984—), 男, 河南鹤壁人, 博士生, 主要从事叶轮机械气动热力学研究.

航空燃气涡轮发动机在含砂尘环境中工作时,外部微细粒子的侵入极易在涡轮叶片壁面形成沉积或在冷却结构中形成堵塞,对涡轮叶片冷却结构的可靠性将造成严重的影响<sup>[1-4]</sup>.

国内外对于气-固两相流动和固体粒子运动特性的研究已十分广泛和深入,对于航空燃气涡轮发动机外部微细粒子的侵入现象,目前国际上普遍关注两类问题<sup>[5]</sup>,即直径相对较大的粒子对壁面的磨蚀行为以及直径相对较小的粒子在壁面的沉积行为.在粒子对壁面的磨蚀行为研究方面,国内外研究人员已对粒子的磨蚀机理开展了较为深入的研究<sup>[6-9]</sup>,粒子撞击所形成的壁面磨蚀主要由两部分构成:即垂直冲击速度引起的变形磨蚀和切向速度引起的切削磨蚀,基于上述机理建立了粒子磨蚀模型.相对于粒子对壁面的磨蚀行为,粒径相对较小的粒子在壁面的沉积行为机制更为复杂,在早期对于粒子沉积的计算模型中,一般都假定粒子与壁面接触后全部黏附于壁面<sup>[10]</sup>.这种假定显然与实际情况有很大出入,Brach和Dunn<sup>[11]</sup>引入了粒子临界捕获速度的概念,认为只有当粒子撞击速度小于临界捕获速度时,粒子才能黏附于壁面,否则弹离壁面.进一步的研究表明,微细粒子在壁面上的沉积不仅与微细粒子和壁面的机械接触有关,而且与微细粒子和壁面的流体动力接触相关.EI-Batsh等<sup>[12]</sup>在粒子临界捕获速度基础上发展了包含黏附模型与离去模型的粒子沉积模型,并对模型进行了实验验证,基于上述机理,研究者针对壁面和微细粒子的物理属性建立了相应的捕获和沉积模型,对微细粒子在壁面上的沉积形貌进行了理论研究<sup>[13-18]</sup>.

本文基于EI-Batsh粒子沉积模型,数值研究了气膜孔附近的粒子运动与沉积特性.研究了气膜出流吹风比对粒子运动以及气膜孔附近粒子沉积特性的影响.

## 1 数学模型

### 1.1 气-固两相流动模型

本文假设粒子为坚硬的球体,并简化为点,位于球体中心.针对稀疏气-固两相流动特征,不考虑粒子之间的碰撞以及对于气相流动的影响,仍采用单相气流流动的控制方程.采用Fluent-CFD软件进行数值计算,求解Navier-Stokes(N-S)雷诺时均方程,压力和速度方程耦合采用SIMPLE(semi-implicit method for pressure-linked equations)方法.由于边界层对粒子与壁面作用影响

较大,湍流模型采用低雷诺数SST(shear stress transport)  $k-\omega$  模型,因为其能较准确模拟边界层流场结构,提高了粒子在边界层运动的预报能力.为了准确模拟边界层对粒子影响,边界层网格尺度必须足够精细,本文网格在边界层处加密使 $y^+$ 约等于1,能够较准确模拟边界层的影响.各物理量的离散格式均为2阶离散格式.

粒子运动轨迹采用拉格朗日法进行求解,主要考虑粒子与气流存在相对运动所承受的Stokes阻力,由于边界层速度梯度较大,对粒子的升力作用影响较大不能忽略,计算中考虑Saffman升力影响.

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_{\text{drag}} + F_{\text{lift}} \quad (1)$$

式中

$$F_{\text{drag}} = \frac{1}{2} \rho (u - u_p)^2 A_{cp} C_d$$

$$F_{\text{lift}} = 1.615 \mu u_p^2 \sqrt{\frac{k_r}{\nu}} (u - u_p)$$

式中下标p表征粒子,其他则为气流参数. $\mu$ 为流体动力黏度, $u$ 为流体速度, $u_p$ 为粒子速度, $\nu$ 为流体运动黏度, $m_p$ 为单个粒子的质量; $A_{cp}$ 为粒子迎风面积; $k_r$ 为局部速度梯度; $C_d$ 为粒子阻力系数,粒子阻力系数和粒子雷诺数定义为

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \quad Re_p = \frac{\rho D_p |u - u_p|}{\mu}$$

式中 $\rho$ 为流体密度, $D_p$ 为粒子直径.粒子的传热方程为

$$m_p c_p \frac{dT_p}{dt} = h_c A_p (T_f - T_p) \quad (2)$$

式中 $A_p$ 为粒子表面积; $c_p$ 为粒子比定压热容; $T_f$ 为流体温度; $T_p$ 为粒子温度; $h_c$ 为气流与粒子之间的表面传热系数,采用经验关系式确定

$$Nu = \frac{h_c D_p}{k} = 2.0 + 0.6 Re_p^{1/2} Pr^{1/3} \quad (3)$$

式中 $Nu$ 为努塞尔数; $Pr$ 为普朗特数; $k$ 为湍动能.

### 1.2 粒子沉积模型

微细粒子在壁面上的沉积形貌取决于微细粒子与壁面的相互作用机制,具体表现为微细粒子与壁面的机械接触和流体动力接触.前者反映了微细粒子在壁面上的黏附与反弹机制,这一行为与微细粒子的碰撞能力和壁面的捕获能力相关;而后者则反映了微细粒子在壁面上的剥离与沉积机制,这一行为与壁面摩擦速度和微细粒子的临界剪切速度相关.

基于 EI-Batsh 粒子沉积模型<sup>[12]</sup>,黏附过程采用粒子临界捕获速度概念,粒子临界捕获速度为

$$V_{cr} = \left( \frac{2E}{D_p} \right)^{10/7} \quad (4)$$

其中

$$E = 0.51 \left[ \frac{5\pi^2(k_1 + k_2)}{4\rho_p^{3/2}} \right]^{2/5}$$

$$k_1 = \frac{(1 - \nu_s^2)}{\pi E_s} \quad k_2 = \frac{(1 - \nu_p^2)}{\pi E_p}$$

式中  $V_{cr}$  为粒子临界捕获速度,  $E_p$  和  $E_s$  分别为粒子和壁面材料的弹性模量,  $\nu_p$  和  $\nu_s$  分别为粒子和壁面材料的泊松比. 如果粒子对壁面的法向撞击速度小于临界捕获速度,则粒子黏附于壁面,否则粒子在壁面形成反弹.

如果湍流流动壁面摩擦速度大于临界剪切速度,则粒子将被移离壁面. 离去过程采用临界动量理论计算临界剪切速度. 临界剪切速度用下式计算:

$$u_{c}^2 = \frac{W_a}{\rho D_p} \left( \frac{3\pi W_a}{2 D_p K_c} \right)^{1/3} \quad (5)$$

式中  $W_a$  为黏附常数,取决于粒子与壁面材料的性质.  $K_c$  为复合弹性模量

$$K_c = \frac{4}{3} \left( \frac{1 - \nu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \nu_p^2}{E_p} \right)^{-1} \quad (6)$$

## 2 计算模型和方法

### 2.1 计算模型

计算模型取自文献<sup>[17]</sup>,如图 1 所示.单排气膜孔的孔径  $d$  均为 1 mm,气膜孔倾角为  $30^\circ$ ,气膜孔数为 3,孔间距为 3.375 mm.高温主流进口平面与气膜孔板呈  $45^\circ$  角布置,高温主流进口直径为 17 mm,冷气腔进口孔径为 9 mm.为了与实验条件一致,坐标原点设置在中央气膜孔的出口,本文统计的沉积率以及  $x-y$  截面分布图均截取固体平板上以中间气膜孔出口为圆心,直径为 25.4 mm 的圆形截面.

高温主流进口速度为 173 m/s,温度为 1453 K;通过调节冷气进口速度改变气膜出流吹风比,冷气温度为 293 K.吹风比定义为

$$M = \rho_c u_c / \rho_\infty u_\infty \quad (7)$$

式中  $\rho_c$  和  $u_c$  分别表征主流的密度和速度,  $\rho_\infty$  和  $u_\infty$  为气膜孔进口二次流的密度和速度.

固体边界采用无滑移速度边界,固体平板导热系数为  $9 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;粒子最小直径为  $1 \mu\text{m}$ ,最大直径为  $20 \mu\text{m}$ ,平均直径为  $13.4 \mu\text{m}$ ,粒子分布使用 Rosin-Rammler logarithm 分布,密度为 990

$\text{kg}/\text{m}^3$ ,比热容为  $984 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ,导热系数为  $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;粒子进口速度和温度均与高温主流一致,粒子质量流量为  $0.005 \text{ kg}/\text{s}$ ;计算中,粒子和壁面材料的泊松比  $\nu_p$  和  $\nu_s$  均取为 0.27,壁面材料的弹性模量与粒子的弹性模量取为

$$E_s = E_p = 3 \times 10^{20} \exp(-0.02365 T_g) \quad (8)$$

式中  $T_g$  为气体温度.

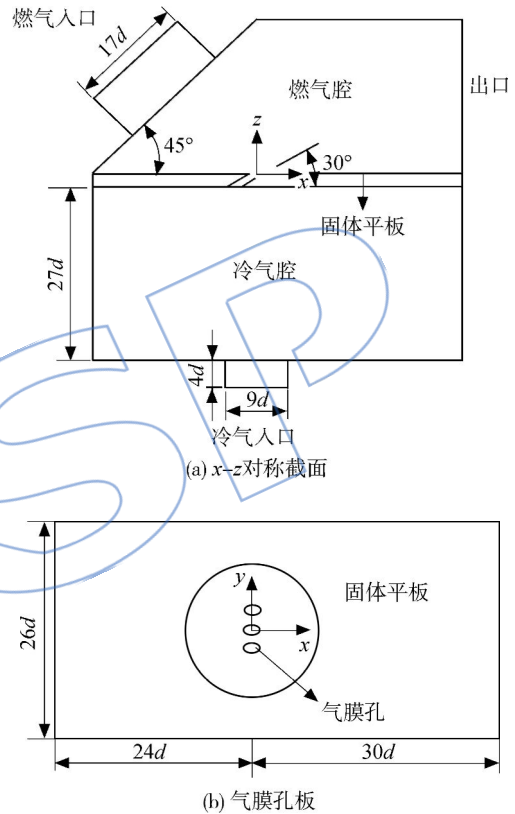


图 1 计算模型示意图<sup>[17]</sup>

Fig. 1 Schematic of computational model<sup>[17]</sup>

### 2.2 计算方法

基于 Fluent-CFD 软件计算单相气流流场和粒子运动轨迹;粒子沉积过程采用用户自定义计算模块分析.计算流程如下:

- 1) 计算单相气流流场.
- 2) 计算粒子的运动轨迹,依据式(4)判断粒子是否被壁面捕获;如果不能被捕获,则继续追踪粒子的运动轨迹.
- 3) 对于被捕获的粒子,依据式(5)判断粒子是否沉积于壁面,一旦沉积则累积粒子质量;否则粒子被移离壁面,继续追踪粒子的运动轨迹.
- 4) 追踪粒子在计算域的运动轨迹以及与壁面的相互作用,直至粒子沉积于壁面或离开计算域;然后进行其他粒子的运动分析.

网格采用非结构化网格,固体壁面近壁区采用加密网格,使壁面平均  $y^+$  约等于 1,气膜孔内及气膜出流附近由于温度梯度比较大,也进行网格加密处理.图 2 所示为网格数对壁面温度的影响,经过网格独立性实验,本文选择的计算网格数约为 220 万.

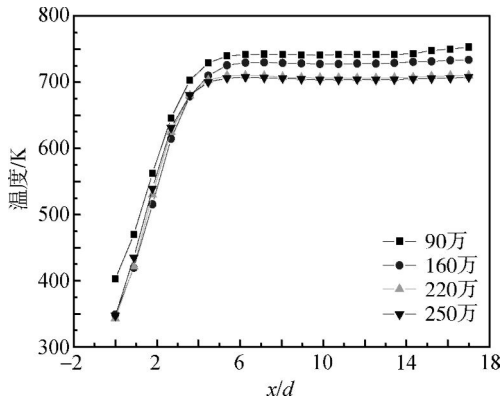


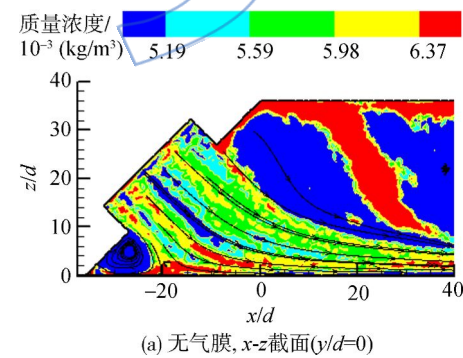
图 2 网格数对壁面温度的影响

Fig. 2 Effect of grid number on wall temperature

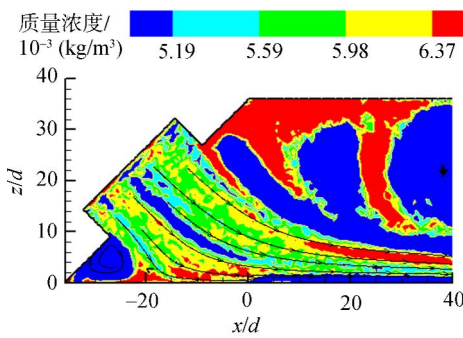
### 3 计算结果与分析

#### 3.1 粒子运动特性

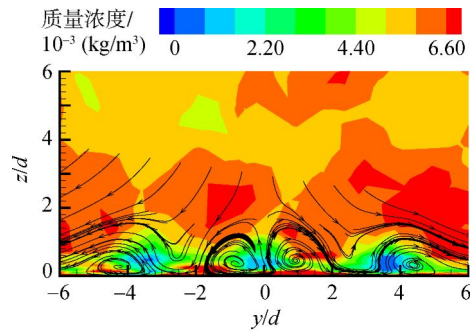
图 3 为有/无气膜出流时  $1\mu\text{m}$  直径粒子的质量浓度分布图.可以看出,气膜出流的存在对粒子质量浓度分布产生了重要影响.有气膜出流时,



(a) 无气膜,  $x$ - $z$ 截面( $y/d=0$ )



(b)  $M=2$ ,  $x$ - $z$ 截面( $y/d=0$ )



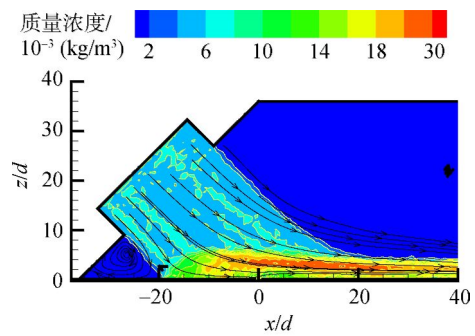
(c)  $M=2$ ,  $y$ - $z$ 截面( $x/d=2$ )

图 3  $1\mu\text{m}$  直径粒子的质量浓度分布

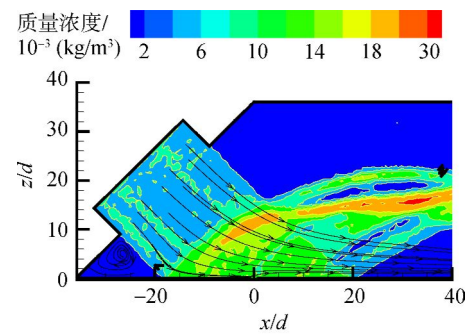
Fig. 3 Particle mass concentration distribution for  $1\mu\text{m}$  diameter

$1\mu\text{m}$ 直径粒子主要分布在气膜孔上游以及气膜出流的上方,而在气膜孔下游的粒子分布较少(图 3 (b)).这是由于  $1\mu\text{m}$  直径粒子的动量较小,易于被气膜出流所携带,使大部分粒子难以靠近气膜出流下游壁面;另一方面,由于气膜出流在流向上所形成的卵形涡对<sup>[19-20]</sup>卷吸入高温燃气和小粒径的粒子,使气膜出流下游气膜孔之间的局部区域出现了粒子聚集现象.

图 4 为  $x$ - $z$ 截面上,在气膜出流吹风比为 2 时,  $5\mu\text{m}$  直径粒子和  $10\mu\text{m}$  直径粒子的质量浓度分布图.可以看出,  $5\mu\text{m}$  直径粒子显现优先富集



(a)  $D_p=5\mu\text{m}$ ,  $x$ - $z$ 截面( $y/d=0$ )



(b)  $D_p=10\mu\text{m}$ ,  $x$ - $z$ 截面( $y/d=0$ )

图 4 吹风比为 2 时的粒子质量浓度分布

Fig. 4 Particle mass concentration distribution at  $M=2$



效应,质量浓度最大区域出现在气膜出流上方,气膜出流下方粒子质量浓度较低.相对于  $1\mu\text{m}$  直径粒子, $5\mu\text{m}$  直径粒子的动量有所增强,对气膜出流层的穿越能力得到一定程度体现,气膜出流的携带能力减弱,使得粒子仍顺着流动方向运动;对于  $10\mu\text{m}$  直径粒子,粒子对于气膜出流层的穿越变得十分显著,气膜出流对粒子运动的影响仅限于一个很小的范围,同时注意到大直径粒子碰撞壁面形成的反弹能力增强,在气膜出流下游上方也出现了大直径粒子的高质量浓度区域.

图 5 为粒子在壁面上的碰撞率分布图.碰撞率定义为碰撞于壁面的粒子质量与投入粒子质量之比.由图可知, $1\mu\text{m}$  直径粒子在无气膜时因随流性强而对于壁面的碰撞率很小,在吹风比  $M=2$  时,粒子在相邻气膜孔间的碰撞率有所增强,主要是由于小粒径粒子由于自身的动量小而受到气膜卵形涡对的卷吸作用.对于  $4\mu\text{m}$  直径粒子而

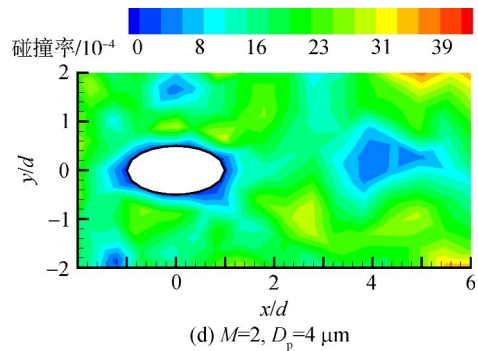


图 5 粒子碰撞率分布

Fig. 5 Particle collision ratio distribution

言,气膜出流对粒子碰撞率分布的影响规律则与  $1\mu\text{m}$  直径粒子有较大不同,气膜孔周围碰撞率并没有增加,而气膜孔下游碰撞率反而减少,尤其是沿气膜出流方向,说明卵形涡对对  $4\mu\text{m}$  直径粒子的卷吸作用较小,气膜出流对粒子的吹离作用使粒子撞击壁面的概率减小.

图 6 反映了粒子直径和吹风比对粒子碰撞率的影响,图 6 为图 5 方形区域的碰撞率统计结果.  $4\mu\text{m}$  以上直径粒子碰撞率随吹风比增大而不断减小,说明气膜出流对  $5\mu\text{m}$  直径粒子影响主要体现在气膜出流对粒子的吹离作用,阻止粒子接触壁面,但是影响幅度并不大,  $M=2$  时的碰撞率只比  $M=0$  时减少  $0.2\%$ .  $3\mu\text{m}$  以下直径粒子则相反,容易被大吹风比气膜出流的卵形涡对卷吸至气膜孔周围,从而导致相邻气膜孔间的粒子碰撞率增大,因此  $3\mu\text{m}$  以下直径粒子碰撞率随吹风比增加而不断增加,增幅最大的是  $3\mu\text{m}$  直径粒子,  $M=2$  时的碰撞率比  $M=0$  时增加大约  $1\%$ ,而  $1\mu\text{m}$  与  $2\mu\text{m}$  直径粒子则增幅相对较小,只有  $0.5\%$  左右.

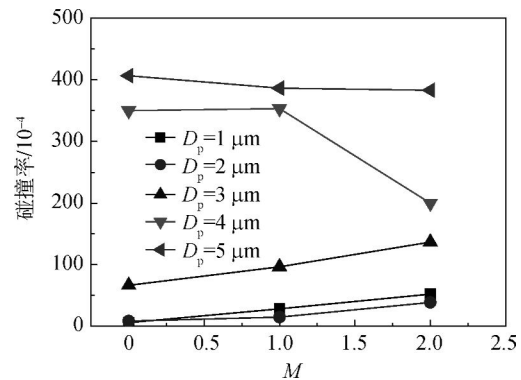
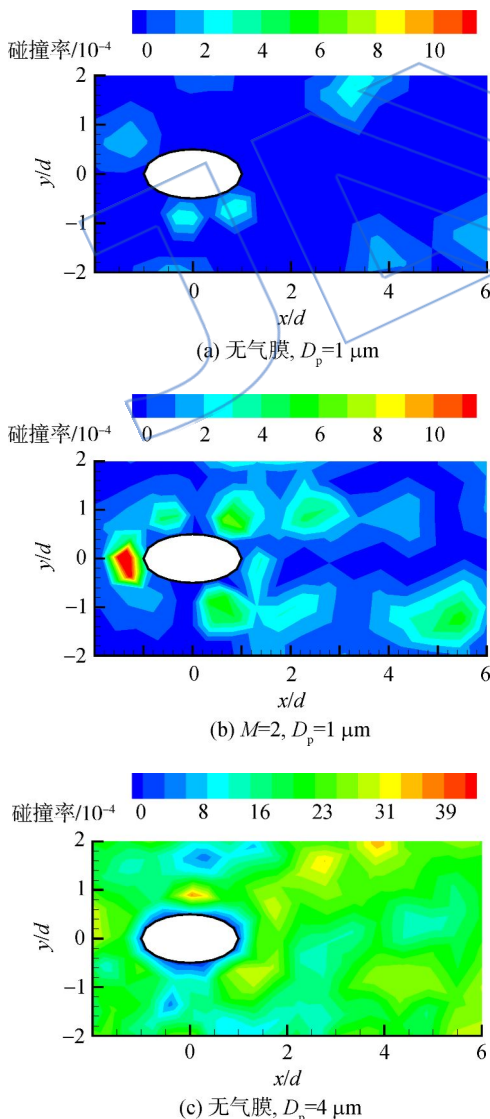


图 6 粒子直径和吹风比对粒子碰撞率影响

Fig. 6 Effects of particle diameter and blowing ratio on particle collision ratio

### 3.2 粒子沉积特性

图 7 为粒子直径和吹风比对粒子黏附率的影响,黏附率定义为黏附于壁面的粒子质量与碰撞壁面粒子质量之比.由黏附过程的粒子临界捕获速度(式(4)),临界捕获速度与粒子直径成反比,粒子直径越小则临界捕获速度越大,即粒子到达壁面的法向撞击速度小于临界捕获速度的概率越大,导致小直径粒子的黏附率高;气膜出流吹风比的增大,对于  $1, 2 \mu\text{m}$  直径粒子的黏附率影响很微弱,  $M=2$  时的  $1 \mu\text{m}$  直径粒子黏附率比  $M=0$  时减小了  $40\%$ ,而  $2 \mu\text{m}$  直径粒子也减小了  $40\%$ ,这是由于小直径粒子的随流性高,粒子速度和气流速度之间的差异较小;而对于  $4 \mu\text{m}$  以上直径粒子,由于粒子的随流性变差,到达壁面的速度较大,导致黏附率减小,而吹风比的增大也会使壁面的温度变低,从而使黏附率降低.  $M=2$  时的  $3 \mu\text{m}$  直径粒子黏附率比  $M=0$  时减小  $30\%$ ,而  $4 \mu\text{m}$  直径粒子则减小了  $22\%$ ,  $5 \mu\text{m}$  以上直径粒子黏附率在任何吹风比下均为  $0$ .

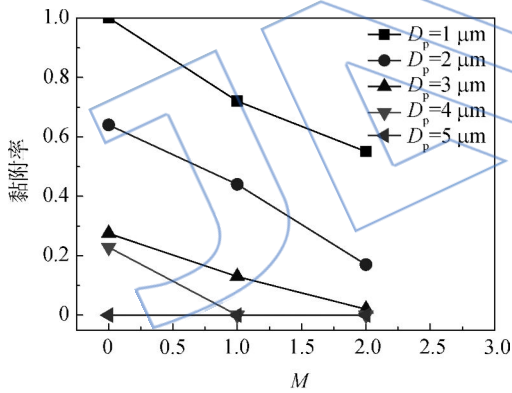


图 7 粒子直径和吹风比对粒子黏附率影响  
Fig. 7 Effects of particle diameter and blowing ratio on particle sticking ratio

图 8 为  $1 \mu\text{m}$  直径粒子在无气膜或  $M=2$  时的沉积率分布图.沉积率定义为黏附于壁面的粒子质量与投入粒子质量之比.沉积率在数值上等于黏附率与碰撞率的乘积,所以沉积率由碰撞率与黏附率共同影响.对于  $1 \mu\text{m}$  直径粒子,  $M=2$  时,粒子由于气膜出流的卵形涡对卷吸作用,粒子主要沉积于相邻气膜孔之间,此工况下的粒子沉积率分布与其碰撞率分布一致(图 5(b)),表明  $1 \mu\text{m}$  直径粒子的黏附率高.

图 9 为粒子直径和吹风比对粒子沉积率的影响.不同直径粒子在不同吹风比下的沉积规律并不相同,  $1 \mu\text{m}$  直径粒子和  $2 \mu\text{m}$  直径粒子的沉积

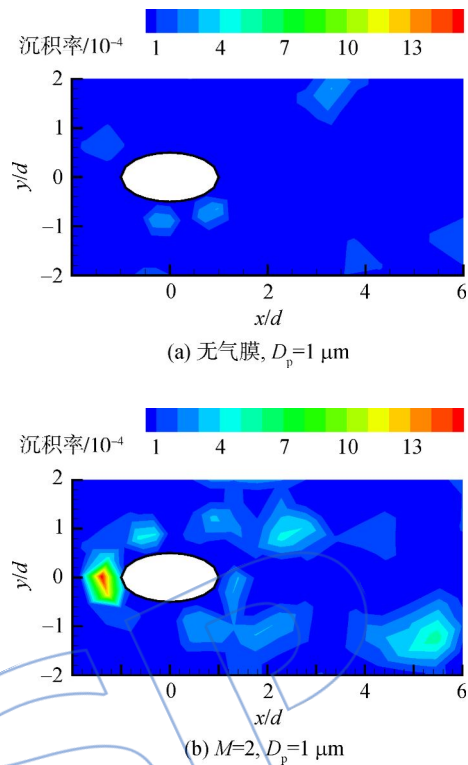


图 8 吹风比对  $1 \mu\text{m}$  直径粒子沉积率分布的影响  
Fig. 8 Effects of blowing ratio on particle deposition rate distribution for  $1 \mu\text{m}$  diameter

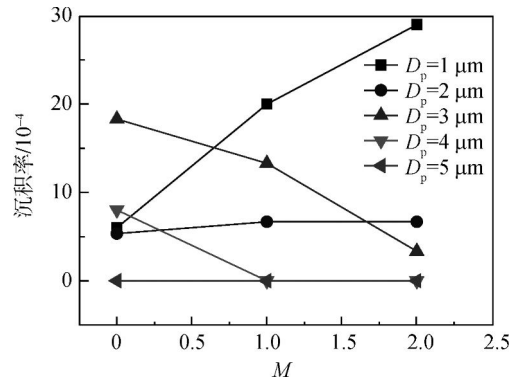


图 9 粒子直径和吹风比对粒子沉积率的影响  
Fig. 9 Effects of particle diameter and blowing ratio on particle deposition rate

率随着吹风比增大而逐渐增加,但  $M=2$  时  $1 \mu\text{m}$  直径粒子沉积率比  $M=0$  时增加  $0.25\%$ ,  $2 \mu\text{m}$  直径粒子沉积率增加  $0.01\%$ .但是  $3 \mu\text{m}$  直径粒子和  $4 \mu\text{m}$  直径粒子的沉积率却随着吹风比增加而逐渐减小,  $M=2$  时  $3 \mu\text{m}$  直径粒子沉积率比  $M=0$  时减小  $0.15\%$ ,而  $4 \mu\text{m}$  直径粒子沉积率则减小了  $0.08\%$ ,  $5 \mu\text{m}$  以上直径粒子在各吹风比条件下均不能沉积.

图 10 为不同吹风比下粒子的总体沉积率的

计算结果与文献[17]实验结果的对比,总体沉积率指按文献[17]所给粒子分布的沉积率,沉积率是按照图1(b)所示的圆形区域确定的,可以看出本文计算结果与实验结果符合较好,最大误差为1.3%,这可能是由于计算中对实验条件进行了一些简化假设处理,与真实实验当中的条件可能有一些差距,随着气膜出流吹风比的增加,总体沉积率随吹风比升高而呈现不断降低的趋势, $M=2$ 时的总体沉积率比 $M=0$ 时减小了1.7%。

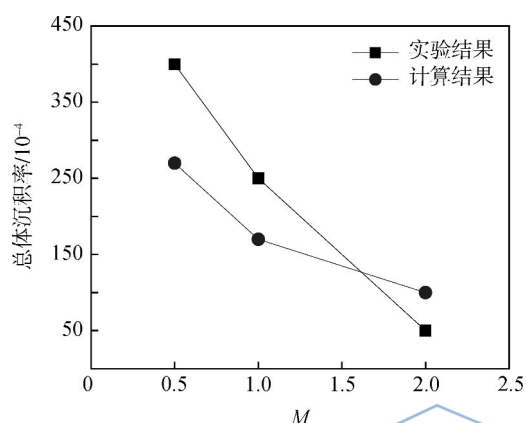


图10 不同吹风比下,粒子的总体沉积率的计算结果与实验结果<sup>[17]</sup>对比

Fig. 10 Comparison of calculation result and experiment result<sup>[17]</sup> of particle total deposition rate at different blowing ratios

## 4 结论

1) 吹风比对不同直径粒子沉积率影响规律并不相同,1,2 $\mu\text{m}$ 直径粒子沉积率随吹风比增大而增大;3,4 $\mu\text{m}$ 直径粒子沉积率则随吹风比增大而减小,5 $\mu\text{m}$ 直径粒子在各吹风比下均没有沉积,总体沉积率随吹风比升高而不断降低, $M=2$ 时总体沉积率比 $M=0$ 时减小1.7%。

2) 1 $\mu\text{m}$ 直径粒子易于被气膜出流所携带,使大部分粒子难以靠近气膜孔下游壁面,但在气膜出流卵形涡对卷吸下聚集于相邻气膜孔之间的局部区域.在无气膜时因随流性强而对于壁面的碰撞率很小,在吹风比 $M=2$ 时,粒子在相邻气膜孔间的碰撞率增大0.5%。

3) 5 $\mu\text{m}$ 直径粒子显现优先聚集效应,聚集于气膜出流上方,对于5 $\mu\text{m}$ 以上直径粒子,粒子对于气膜出流层的穿越较为显著,气膜出流对粒子运动的影响仅限于4 $\mu\text{m}$ 以下直径粒子。

## 参考文献:

[1] Brun K, Nored M, Kurz R. Particle transport analysis of

sand ingestion in gas turbine engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2012, 134(1): 012402. 1-012402. 8.

[2] Dunn M G, Padova C, Moller J C, et al. Performance deterioration of a turbofan and a turbojet engine upon exposure to a dust environment[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1987, 109(3): 336-343.

[3] Kim J, Dunn M G, Baran A J, et al. Deposition of volcanic materials in the hot sections of two gas turbine engines[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1993, 115(3): 641-651.

[4] Sundaram N, Thole K A. Effects of surface deposition, hole blockage, and thermal barrier coating spallation on vane endwall film cooling[J]. Journal of Turbomachinery, 2007, 129(3): 599-607.

[5] Hamed A, Tabakoff W, Wenglarz R. Erosion and deposition in turbomachinery[J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22(2): 350-360.

[6] Hamed A A, Tabakoff W, Rivir R B, et al. Turbine blade surface deterioration by erosion[J]. Journal of Turbomachinery, 2005, 127(3): 445-452.

[7] Zhang Y L, McLaury B S, Shirazi S A. Improvements of particle near-wall velocity and erosion predictions using a commercial CFD code[J]. Journal of Fluids Engineering, 2009, 131(3): 031303. 1-031303. 9.

[8] 伊景海,史峰,徐忠. 平面叶栅内固体粒子运动特性的研究[J]. 航空动力学报, 1995, 10(3): 277-279, 313.

YI Jinghai, SHI Feng, XU Zhong. A study on motion behaviours of particles through turbine cascade[J]. Journal of Aerospace Power, 1995, 10(3): 277-279, 313. (in Chinese)

[9] 饶江,葛满初,徐建中,等. 固体颗粒与通道壁面相互作用的实验研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 134-136.

RAO Jiang, GE Manchu, XU Jiangzhong, et al. Experimental investigation on interaction between solid particle and wall surface[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(1): 134-136. (in Chinese)

[10] 席光,贾会霞,王晓锋,等. 轴流压缩机叶栅内固体微粒沉积的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(1): 55-58.

XI Guang, JIA Huixia, WANG Xiaofeng, et al. Numerical study of the deposition of solid particles in the blade cascade of axial compressors[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2003, 24(1): 55-58. (in Chinese)

[11] Brach R M, Dunn P F. A mathematical model of the impact and adhesion of microspheres[J]. Aerosol Science and Technology, 1992, 16(1): 51-64.

[12] El-Batsh H, Haselbacher H. Numerical investigation of the effect of ash particle deposition on the flow field through turbine cascades[R]. ASME Paper GT-2002-30600, 2002.

[13] Wammack J E, Crosby J, Fletcher D, et al. Evolution of surface deposits on a high pressure turbine blade: Part I physical characteristics[J]. Journal of Turbomachinery, 2008, 130(2): 021020. 1-021020. 8.

[14] Guha A. Transport and deposition of particles in turbulent

- and laminar flow [J]. *Annual Review Fluid Mechanics*, 2008, 40: 311-341.
- [15] Crosby J M, Ai W G, Lewis S, et al. Effects of particle size, gas temperature, and metal temperature on high pressure turbine deposition in land based gas turbines from various syngases [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2008, 130(5): 051503. 1-051503. 9.
- [16] Cardwell N D, Thole K A, Burd S W. Investigation of sand blocking within impingement and film-cooling holes [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2010, 132(2): 021020. 1-021020. 10.
- [17] Ai W G, Fletcher T H. Computational analysis of conjugate heat transfer and particulate deposition on a high pressure turbine vane [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(4): 041020. 1-041020. 12.
- [18] Ai W G, Murray N, Fletcher T H, et al. Effect of hole spacing on deposition of fine coal flyash near film cooling holes [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(4): 041021. 1-041021. 9.
- [19] YAO Yu, ZHANG Jingzhou. Investigation on film cooling characteristics from a row of converging slot-holes on flat plate [J]. *Science China: Technological Sciences*, 2011, 54(7): 1793-1800.
- [20] YANG Chengfeng, ZHANG Jingzhou. Experimental investigation on film cooling characteristics from a row of holes with ridge-shaped tabs [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2012, 37: 113-120.

JAS SP