

沟槽平板颗粒沉积特性和气膜冷却性能

游学磊, 岳国强, 王少良, 张路阳, 姜玉廷
(哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 通过将平板上的气膜冷却孔嵌入横向沟槽中,探究沟槽深度对平板颗粒沉积分布和气膜冷却性能的影响。结果表明:沟槽结构的存在改善了平板表面的颗粒沉积情况和气膜冷却性能,并将一定颗粒阻隔在沟槽内部。在同一吹风比下,沟槽深度的增加使得整体的颗粒碰撞效率增大。在吹风比较小时,3种沟槽深度的结构减小了平板颗粒的沉积和捕获,并改善了冷却孔下游气膜冷却效率。但在大吹风比下,不同沟槽深度改善颗粒沉积分布和气膜冷却效率方面各有差异。对比不同沟槽深度结构在各个工况下的性能,沟槽深度为0.8倍孔径的结构在改善颗粒沉积分布的同时也能兼顾提升气膜冷却孔下游的气膜冷却效率。

关 键 词: 沟槽; 颗粒沉积; 气膜冷却效率; 沉积模型; 气-固两相流

中图分类号: V231.1

文献标志码: A

Particle deposition characteristics and film cooling performance of flat plate with trench

YOU Xuelei, YUE Guoqiang, WANG Shaoliang,
ZHANG Luyang, JIANG Yuting

(College of Power and Energy Engineering,

Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: The effects of different trench depths on the particle deposition distribution and film cooling performance of the flat plate were explored by embedding the cooling holes into the trench. The result showed that the existence of the trench structure improved the particle deposition and film cooling performance on the flat plate, and effectively blocked certain particles inside the trench. Under the same blowing ratio, the increase of the trench depth made the overall particle impact efficiency increase. When the blowing ratio was relatively small, the three trench depth structures all reduced the particles deposition and capture on the flat plate, and improved the downstream film cooling efficiency of the cooling holes. However, under the large blowing ratio, different trench depths had different performances on particle deposition distribution and film cooling efficiency. Comparing the performance of different trench depth structures under various working conditions, the structure with a trench depth of 0.8 times film cooling hole diameter improved the particle deposition distribution and can also promote the downstream film cooling efficiency of the cooling holes.

收稿日期:2020-07-30

基金项目:国家自然科学基金(51809065,52071107);空气动力学国家重点实验室开放基金(SKLA-20190203)

作者简介:游学磊(1996—),男,硕士生,主要研究方向为燃气轮机两相流冷却技术。

通信作者:姜玉廷(1987—),男,副教授,博士,主要研究方向为燃气轮机传热与冷却技术。E-mail:jiangyuting07314@126.com

引用格式:游学磊,岳国强,王少良,等.沟槽平板颗粒沉积特性和气膜冷却性能[J].航空动力学报,2021,36(5):1022-1032. YOU Xuelei, YUE Guoqiang, WANG Shaoliang, et al. Particle deposition characteristics and film cooling performance of flat plate with trench[J]. Journal of Aerospace Power, 2021, 36(5): 1022-1032.

Key words: trench; particle deposition; film cooling efficiency; depositional model; gas-solid two phase flow

航空发动机工作过程中,尤其是在含沙尘和污染严重的环境,微细颗粒物经过燃烧室从固态转化为熔融态,这些熔融态的颗粒到达相对较冷的气膜孔区域时,会堆积在气膜孔周围,甚至堵塞气膜孔,造成冷却结构的局部失效严重时甚至造成涡轮叶片烧蚀。颗粒沉积还会使得涡轮通流面积降低,导致发动机功率下降,同时还会破坏涡轮叶片表面的保护性氧化层和热障涂层。

颗粒沉积是一个涉及到多相流动——固体灰颗粒,熔融颗粒以及主燃气流的复杂过程。Cheng 等^[1]利用 CFD 在不同进口温度下对颗粒碰撞位置进行预测,结果发现,温度对粉尘沉降位置的影响不大,特别是对孔内中等颗粒的沉降影响较小。Yang 等^[2]结合临界速度和黏度模型,建立了一种高温环境下颗粒黏滞计算模型,探究了影响喷嘴导叶前缘颗粒沉积的因素,模拟结果发现,纳米颗粒在前缘的捕获率小于 2%,沉积层厚度的变化随航空发动机运行时间的变化而被量化;同时射流冷却气流可以降低前缘的沉积速率,而粒径、吹风比、进口湍流度等特征与沉积速率和分布有较强的相关性。关于冷却涡轮叶栅内微细颗粒壁面沉积特性及影响因素方面的研究,Crosby 等^[3]采用加速沉积实验研究了燃气温度、颗粒尺度和壁面温度对沉积特征的影响。结果显示壁面沉积表面粗糙度随燃气温度的降低而降低。Prenter 等^[4-5]利用实验和数值计算相结合的方法研究了单列及一级条件下非均匀进口温度(热斑)对壁面沉积特征的影响。结果显示进口温度分布对沉积形式和沉积率均具有重要影响。关于微细颗粒壁面沉积对气膜冷却涡轮流动传热特性影响方面的研究,Lawson 等^[6-9]对平板气膜冷却叶片前缘多排气膜冷却和端壁气膜冷却的微细颗粒沉积特性进行了实验研究。结果显示微细颗粒壁面沉积能够使气膜冷却效率降低 30%,并且压力面气膜冷却和前缘气膜冷却壁面沉积后的气膜冷却效率随吹风比的增加而降低,而端壁气膜冷却壁面沉积后的气膜冷却效率随吹风比的增加而增加。他们同时提出凹槽气膜冷却结构能够削弱沉积对气膜冷却的负面影响,通过采用凹槽气膜冷却结构能够使沉积后的气膜冷却效率降低值由 30% 下降到 15%。Goldstein

等^[10]将 3 个圆柱状表面粗糙度元件放置在平板上的气膜冷却孔的上游和下游位置,在低吹风比下,平板表面气膜冷却效率降低了 10%~20%,但在较高吹风比下,效率却提高了 40%~50%。Schmidt 等^[11]使用锥形表面粗糙度元件进行了类似的研究,发现与较高的动量通量比较,较低的动量通量比时气膜冷却效率的降低更大。

张斐等^[12]研究了不同来流攻角、颗粒体积浓度对平板表面颗粒物沉积的影响规律,分析了等效加速实验的颗粒物沉积效果。结果发现,随着攻角的增大,压力面和吸力面沉积量显著增大,前缘变化不明显;在颗粒体积浓度升高,实验时间变短的情况下,平板前缘位置的沉积量增大。裴钰^[13]建立了有、无气膜冷却 3 种三维几何模型,探究了不同尺寸的粒子及各物理参数对沉积的影响规律。研究表明,对于临界黏度模型,存在粒子最小允许沉积尺寸;对于临界速度模型,存在粒子最大和最小允许沉积尺寸,大尺寸粒子会发生反弹,小尺寸粒子不易与壁面发生碰撞。周君辉^[14]研究了涡轮叶片前缘内部冷却结构内粒子相应的运动及沉积特性以及气膜孔局部堵塞对叶片压力气膜冷却效率的影响,研究发现,由于滞止区内气膜孔内冷气流速比较低,粒子分布较稀疏,虽然粒子碰撞孔壁的质量较小,但是沉积的质量却较多。王佳亮^[15]模拟了气膜孔周围不同沉积凸起形貌、尺寸以及凸起位置对气膜冷却效率的影响,发现在中低吹风比下,凸起位置对气膜冷却效率的影响比较明显,离孔越近,效率降低越为明显;随着凸起尺寸的增加,冷却效率有略微的提高。在高吹风比下,凸起的位置已经不再是影响冷却效率的主要因素。

目前对于颗粒沉积的研究主要还是集中在分析颗粒的沉积特性和不同粒径颗粒的沉积分布情况;缺乏通过优化结构以改善颗粒沉积分布的同时保证或提升气膜冷却性能方面的研究。本文在平板气膜冷却物理模型的基础上通过将冷却孔嵌入不同深度的横向沟槽中,探究不同沟槽深度对平板颗粒沉积特性和气膜冷却性能的影响,从而为研究将冷却涡轮叶片冷却孔嵌入横向沟槽中来改善颗粒沉积分布和提升气膜冷却效率提供一定的参考。

1 方 法

1.1 连续相控制方程

1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m \tag{1}$$

式中 u_i 是 i 方向速度; x_i 是 i 方向坐标; S_m 为质量源项。

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i \tag{2}$$

式中 p 为静压; τ_{ij} 为应力张量的分量; g_i 和 F_i 分别为 i 方向上的重力体积力和外部体积力(如离散相相互作用产生的升力)。

3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho u T) = \text{div}\left(\frac{k}{c_p} \text{grad} T\right) + S_t \tag{3}$$

式中 c_p 为比热容; T 为温度; k 为流体的传热系数; S_t 为流体的内热源及由于黏性作用流体机械能转换为热能的部分。

1.2 离散相控制方程

1) 动量方程

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_d(u_f - u_p) + F_x \tag{4}$$

其中右边方程第 1 项代表每单位颗粒质量的阻力,第 2 项只包含萨夫曼升力。

细微颗粒的运动特征主要受到颗粒与气流存在相对运动所诱导的 Stokes 阻力影响。通常把阻力 F_d 表达式写成

$$F_d = \frac{1}{2} \rho_f (u_f - u_d)^2 A C_d \tag{5}$$

式中 ρ_f 是流体密度; u_f 是流体速度; u_d 是颗粒速度; A 是颗粒的迎风面积,即颗粒与流体相对速度方向上的面积投影; C_d 是颗粒阻力系数。颗粒阻力系数按照流体外掠球形颗粒的实验数据取值,即

$$C_d = \frac{24}{Re_p} \tag{6}$$

$$Re_p = \frac{\rho_f d_p |u_f - u_d|}{\mu} \tag{7}$$

式中 Re_p 是基于颗粒直径的粒子雷诺数。

2) 局部动量方程

$$\frac{dx_p}{dt} = u_p \tag{8}$$

3) 能量方程

颗粒与主流气体掺混运动,与流体之间主要存在对流换热与颗粒表面辐射换热两种形式的能量交换,即

$$m_p \frac{dT_p}{dt} = Q_1 + Q_2 =$$

$$h St_{\text{conv}}(T_f - T_p) + h_{\text{rad}} St_{\text{rad}}(T_{\infty} - T_p) \tag{9}$$

式中 m_p 是颗粒质量; h 是表面传热系数; St_{conv} 是换热 Stokes 数; h_{rad} 是辐射传热系数; St_{rad} 是辐射 Stokes 数。

1.3 沉积模型

Brach 等^[16]提出了一个用半经验模型计算颗粒捕获速度的表达式。在该模型中,根据实验数据计算了颗粒的捕获速度,并给出如下公式:

$$v_{\text{cr}} = \left(\frac{2E}{d_p}\right)^{\frac{10}{7}} \tag{10}$$

$$E = 0.51 \left[\frac{5\pi^2(k_1 + k_2)}{4\rho_p^{\frac{3}{2}}} \right]^{\frac{2}{5}} \tag{11}$$

$$k_1 = \frac{1 - \nu_s^2}{\pi E_s} \tag{12}$$

$$k_2 = \frac{1 - \nu_p^2}{\pi E_p} \tag{13}$$

式中 E 是材料的混合弹性模量,根据颗粒和表面的弹性模量确定; E_s 为表面弹性模量; E_p 为颗粒的弹性模量。 ν_s 为表面泊松比; ν_p 为颗粒泊松比。

颗粒的法向速度 v_n 与捕获速度进行比较。如果颗粒的法向速度小于捕获速度,则颗粒会黏附在表面;否则,颗粒会从表面反弹。

当施加于颗粒的力大于黏附力时,颗粒会从表面分离。Soltani 等^[17]根据临界动量理论来确定颗粒从表面的剥离。这里,临界壁面剪切速度定义为

$$u_{\tau c}^2 = \frac{C_u W_a}{\rho_f d_p} \left(\frac{W_a}{d_p K_c} \right)^{\frac{1}{3}} \tag{14}$$

式中 $u_{\tau c}$ 是临界壁面剪切速度; C_u 是 Cunningham 修正系数; d_p 是颗粒直径; W_a 是一个常数,它取决于颗粒和表面的材料特性; K_c 是 El-Batsh 参数。

如果湍流壁面摩擦速度大于临界壁面剪切速度,则颗粒会从表面移除。其中

$$u^+ = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho_f}} \tag{15}$$

$$\tau_w = \mu \left(\frac{du}{dy} \right)_{\text{wall}} \tag{16}$$

式中 u^+ 是湍流壁面摩擦速度; τ_w 是壁面切应力; μ 为流体动力黏度, u 为壁面上的时间平均速度。

1.4 颗粒沉积数值模拟

1.4.1 几何模型

本文计算域的示意如图 1 所示。计算域包括:冷却剂供应通道,圆柱形冷却孔和主流腔。横流截面的宽度为 $26D$,高度为 $27D$,长度为 $54D$ (D 为给定标尺, $D=1.5\text{ mm}$)。高温主流入口圆心位于斜面的中心处。固体板的厚度为 $2D$ 。与平板成 30° 的三个圆柱形冷却孔排位于平板前缘下游 $24D$ 处和流体出口上游 $30D$ 处,孔间距为 $3.375d$ (d 为孔径, $d=1\text{ mm}$)。

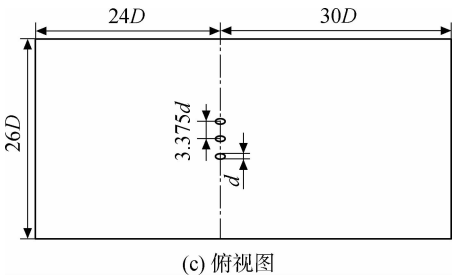
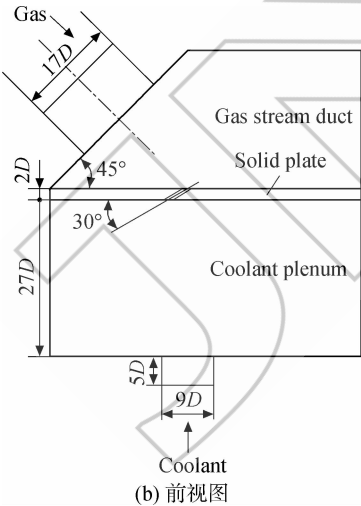
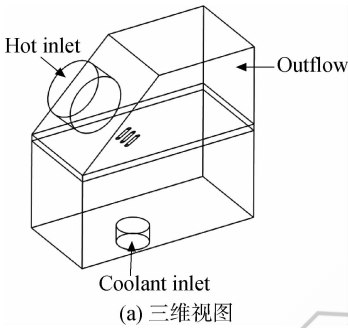


图 1 计算域

Fig.1 Computational domain

图 2 为带沟槽的圆柱冷却孔排的结构示意图,沟槽长度为 d ,宽度为 $9d$,在本文中研究了原模型和带沟槽深度分别为 $0.4d$ 、 $0.8d$ 、 $1.2d$ 的模型对气膜冷却性能和颗粒沉积分布的影响。

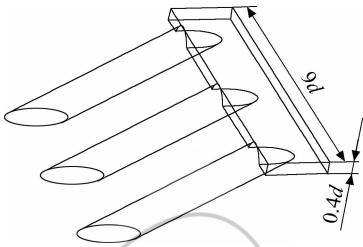


图 2 带沟槽冷却孔

Fig.2 Cooling holes with trench

1.4.2 网格划分

采用四面体单元的非结构化网格,对沉积换热面和沟槽附近的结构分别进行了局部面加密,并设置了相应的边界层。换热面第 1 层边界层厚度设置为 0.01 mm ,设置 10 层;沟槽面第 1 层边界层厚度设置为 0.01 mm ,设置 5 层。如图 3 所示。本文采用了多种网格密度进行了网格无关性的研究,网格无关性验证选取沉积面的面平均温度作为参考,图 4 表明当网格数达到 320 万后,网格数的继续增加已经基本不再影响平板的面平均温度。

1.4.3 湍流模型验证

$k-\omega$ 湍流模型可以应用于整个边界层,此模型无需进行特殊的近壁面处理,消除了壁面附近的颗粒轨迹的近似。为了验证 $k-\omega$ 湍流模型对于模拟壁面颗粒沉积的适用性,图 5 为平板颗粒沉积实验的湍流模型验证,所做数值模拟是在离散相模型(discrete phase model, DPM)进行,计算温度为以中心孔圆心向外半径为 12.7 mm 的圆形区域温度。图 5 中显示了本文采用 $k-\omega$ 湍流模

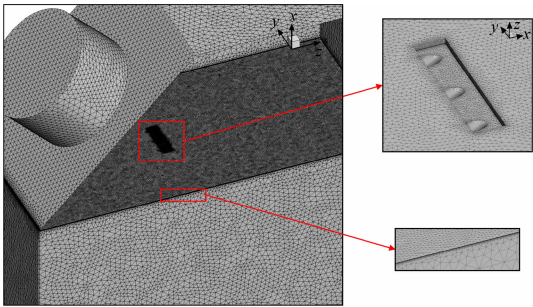


图 3 数值模拟的网格细节

Fig.3 Details of the grid used in numerical simulation

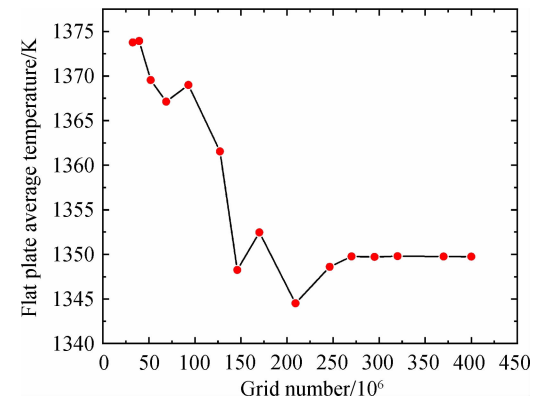


图 4 网格无关性验证

表 1 颗粒和壁面材料参数

Table 1 Particle and wall material parameters

参数	数值
颗粒密度/(kg/m ³)	990
颗粒比热容/(J/(kg·K))	984
颗粒热导率/(W/(m·K))	0.5
固体板的热导率/(W/(m·K))	9

2 结果和讨论

2.1 颗粒运动轨迹模拟

在模拟计算中,一般选择碰撞效率、沉积效率、捕获效率等定义表征颗粒碰撞与沉积过程,在本文中,为了更好更直观地表示,将其定义为

$$P_i = \frac{N_i}{N_{total}} \tag{17}$$

$$P_d = \frac{N_d}{N_i} \tag{18}$$

$$P_c = \frac{N_d}{N_{total}} \tag{19}$$

式中 N_i 为撞击在壁面的射入源总数; N_{total} 为统计的射入源总数; N_d 为沉积在壁面的射入源总数;其中碰撞效率 P_i 用来表征颗粒与表面发生碰撞的可能性;沉积效率 P_d 用来表征颗粒与壁面碰撞后沉积的可能性;而捕获效率 P_c 表征整个射入颗粒在壁面上沉积的可能性,根据定义,捕获效率为碰撞效率与沉积效率的乘积。

为了探究不同沟槽深度对于颗粒运动轨迹的影响,模拟了在吹风比 $M=1.0$,原模型和沟槽深度(t)分别为 $0.4d$ 、 $0.8d$ 、 $1.2d$ 下的沉积分布情况,并得到了不同条件下颗粒运动轨迹图,结果如图 6 所示。从图中可以看出, $1\mu\text{m}$ 的颗粒跟随主流进入腔室,随着射流与主流进行掺混,颗粒基本不与壁面发生碰撞,而粒径较大的颗粒由于惯性力较大,运动状态不能及时改变,从而与壁面发生碰撞后反弹;当沟槽深度为 $0.4d$ 时,较小粒径的颗粒撞击在沟槽侧壁上,然后反弹至另外一侧,由于射流方向与颗粒反弹后运动的方向相反,使得颗粒的动量急剧减小,当颗粒运动到另一侧时黏附在壁面上;当沟槽深度为 $0.8d$ 时, $20\mu\text{m}$ 的颗粒进入沟槽进行反复碰撞后离开沟槽,而一些较小的颗粒进入沟槽碰撞后沉积在沟槽内;当沟槽深度为 $1.2d$ 时,一些原本进入沟槽反复碰撞后离开的颗粒,由于此时冷却孔出口方向正对沟槽

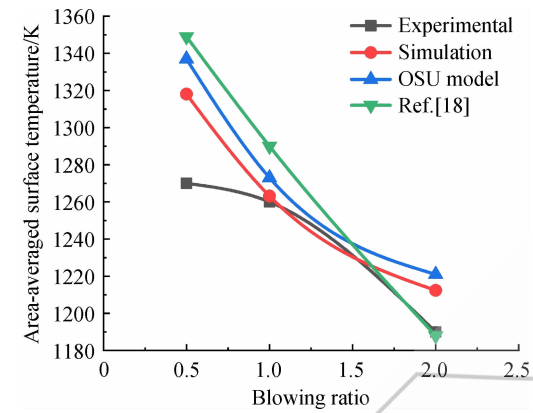


图 5 平板上的面平均温度比较

Fig. 5 Comparison of area-averaged surface temperature on flat plate

型进行数值模拟后的结果曲线,以及文献[18]实验和 OSU(The Ohio State University)模型的结果对比。可以看出,数值模拟结果基本与实验结果相符合。本文选取 $k-\omega$ 湍流模型。由于颗粒对于流场的影响很小,可以近似认为颗粒与流场之间是单向耦合。

数值计算边界条件与 Prashanth^[18] 的实验参数保持一致。主流速度设置为 173m/s ,主流和射流的温度分别设置为 1453K 和 293K 。冷却腔室的壁面设置为绝热。除主流入口附近的表面温度设置为 300K 外,主流腔的上表面和周围表面的温度设置为 900K 。出口设置为出流边界条件。固体板的侧面设置为绝热,其余表面设置为耦合面。流体黏度保持为恒定的 $1.79\times10^{-5}\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 。

采用欧拉-拉格朗日方法对颗粒进行追踪。选用 $k-\omega$ 湍流模型,选取 DPM,并嵌入编译的用户自定义函数(UDF)。颗粒的平均尺寸为 $13.4\mu\text{m}$,颗粒尺寸遵循 Rosin-Rammler 对数分布,颗粒和固体壁面的材料参数由表 1 给出。

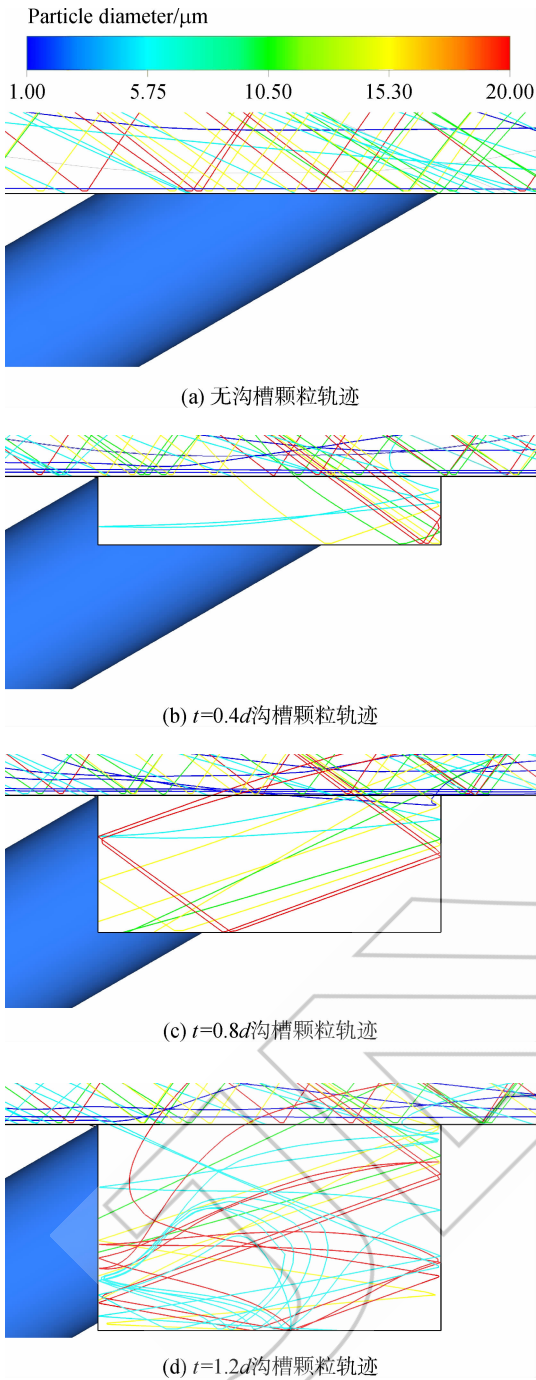


图 6 颗粒轨迹

Fig. 6 Particle trajectory

一侧,导致颗粒与壁面发生碰撞后的法向速度太小,从而沉积在沟槽内。

2.2 颗粒沉积与沟槽深度 t 和吹风比 M 的关系

图 7 为无沟槽及沟槽深度 $t=0.4d, t=0.8d, t=1.2d$ 下,整体和沟槽内颗粒碰撞效率与吹风比之间的关系。从图中可以看出,同一吹风比下,整体的颗粒碰撞效率随着沟槽深度的增加而增加,当吹风比到 $M=1.0$ 时,无沟槽和沟槽深度 $t=0.4d$ 的颗粒的碰撞效率都有所减小,而沟槽

深度 $t=0.8d$ 和 $t=1.2d$ 却有所增大,其中 $t=0.8d$ 的碰撞效率有明显增大,这是由于随着吹风比的逐渐增大,冷气射流的法向抬升能力增大,对颗粒原运动方向的法向速度的抑制作用增大,导致粒径较小的部分颗粒随着掺混气流运动,未与壁面发生碰撞;而沟槽深度的进一步增加削弱了冷气射流的法向抬升能力,从而导致颗粒碰撞效率反而有所增大。当吹风比增大到 $M=2.0$ 时,颗粒的碰撞效率都增大了,此时冷气射流对主流的穿透能力较强,并未形成有效的气膜,抑制颗粒惯性的能力减弱。图中点划线为后 3 种结构沟槽内的颗粒碰撞效率,当吹风比增大到 $M=1.0$ 时,颗粒碰撞效率增大,且沟槽越深,增大程度越大。由于沟槽越深,冷气射流的法向抬升能力越弱,而切向速度越大,导致进入沟槽的颗粒在冷气射流的冲击下,撞击在沟槽侧壁上。对于沟槽深度 $1.2d$ 而言,当吹风比增大到 $M=2.0$ 时,颗粒碰撞效率反而有所减小。

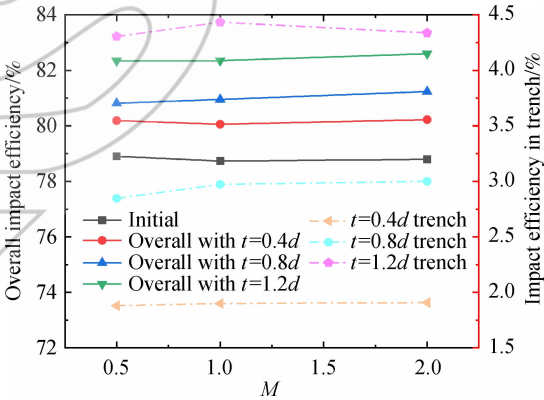


图 7 颗粒碰撞效率与吹风比的关系

Fig. 7 Relationship between particle impact efficiency and blowing ratio

图 8 为无沟槽及沟槽深度 $t=0.4d, t=0.8d, t=1.2d$ 下,整体和沟槽内颗粒沉积效率与吹风比之间的关系。从图中实线可以看出,随着吹风比的逐渐增大,4 种结构整体的颗粒沉积效率都在逐渐减小。同一吹风比下,颗粒沉积效率随着沟槽深度的增加而减小,当吹风比较小,随着沟槽深度的进一步增加,颗粒沉积效率的下降程度变得不太明显,尤其当吹风比为 $M=1.0$ 时,沟槽深度为 $0.8d$ 和 $1.2d$ 的颗粒沉积效率基本相同;但是当吹风比增大到 $M=2.0$ 时,随着沟槽深度的增加,颗粒的沉积效率下降程度却逐渐增大。图中点划线为后 3 种结构沟槽内的颗粒沉积效率,可以看出,随着吹风比的增大,3 种结构的颗

粒沉积效率都在逐渐减小;值得注意的是,同一吹风比下,颗粒的沉积效率并非随着沟槽深度的增加而减小,反而沟槽深度为 $0.8d$ 结构的颗粒沉积效率要小于沟槽深度为 $1.2d$ 结构的颗粒沉积效率。

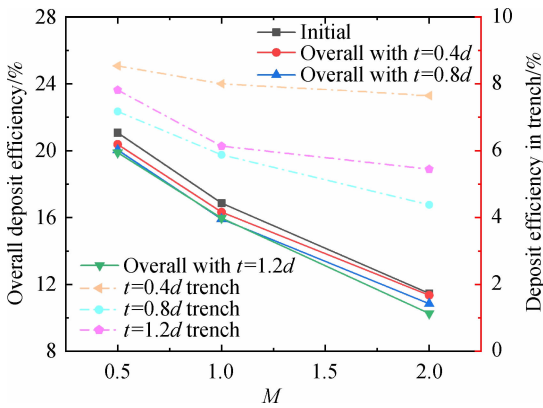


图 8 颗粒沉积效率与吹风比的关系

Fig. 8 Relationship between particle deposit efficiency and blowing ratio

图 9 为无沟槽及沟槽深度 $t=0.4d$, $t=0.8d$, $t=1.2d$ 下,整体和沟槽内颗粒捕获效率与吹风比之间的关系。从图中实线可以看出,随着吹风比的逐渐增大,4 种结构整体的颗粒捕获效率逐渐减小,且 3 种带沟槽结构的颗粒捕获效率都基本要小于无沟槽的。当吹风比为 $M=0.5$ 和 $M=1.0$ 时,沟槽深度为 $0.4d$ 和 $1.2d$ 结构的颗粒捕获效率大致相同,而沟槽深度为 $0.8d$ 结构的颗粒捕获效率都小于其余 3 种结构;当吹风比增大到 $M=2.0$ 后,沟槽深度为 $0.4d$ 结构的颗粒捕获效率反而最大,此时沟槽深度为 $1.2d$ 结构的颗粒捕获效率却小于 $0.8d$ 结构的颗粒捕获效率。

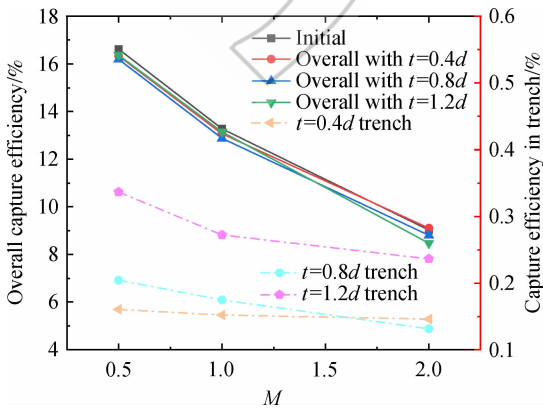


图 9 颗粒捕获效率与吹风比的关系

Fig. 9 Relationship between particle capture efficiency and blowing ratio

图中点划线为后 3 种结构沟槽内的颗粒捕获效率,随着吹风比的增大,3 种结构沟槽内的颗粒捕获效率都在减小,但是在吹风比为 $M=0.5$ 和 $M=1.0$ 时,同一吹风比下,随着沟槽深度的增加,沟槽内颗粒捕获效率也在增大;当吹风比增大到 $M=2.0$ 时,沟槽深度为 $0.8d$ 的颗粒捕获效率却最小。结合整体和沟槽内颗粒的捕获效率可以看出,沟槽结构的存在,能够捕获更多的颗粒的条件下同时又改善了整体的捕获效率。

图 10 为吹风比 $M=0.5$ 时,4 种结构的整体壁面和沟槽内颗粒沉积分布云图。从图 10(a)~图 10(d)可以看出,整体壁面上的颗粒沉积较为广泛,在 $x/d=-20$ 的位置处有少量沉积,这是粒径较小的颗粒跟随主流运动直接碰撞在壁面上发生沉积;由于气腔结构的存在,此位置上沿展向靠近侧壁面的位置,流体形成旋涡,夹杂在其中的小粒径颗粒几乎未和壁面发生碰撞。沉积主要集中在冷却孔上游附近和两侧,下游也有一定沉积,因吹风比较小,冷气射流对主流的穿透能力较弱,从冷却孔喷出后贴合壁面,导致冷却孔沿流向方向沉积分布并未得到改善。从图 10(e)~图 10(g)可以看出,随着沟槽深度的增加,沟槽内沿冷却孔流向上的颗粒沉积分布有所改善,其中 $0.8d$ 的改善结果最好;其次,随着沟槽深度的增加,冷气射流的法向抬升能力减弱,切向速度增

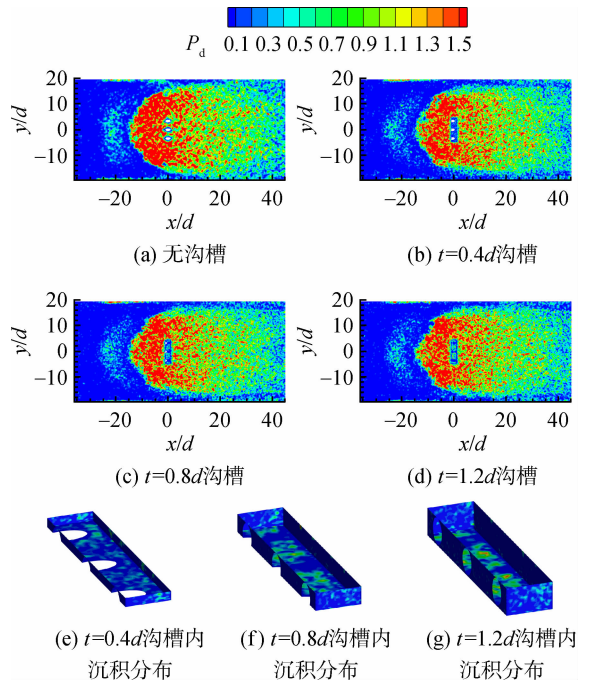


图 10 $M=0.5$ 下的沉积分布

Fig. 10 Deposition distribution of $M=0.5$

大,使得沿冷却孔流向一侧的壁面颗粒沉积减少。

图 11 为吹风比 $M=1.0$ 时,4 种结构的整体壁面和沟槽内颗粒沉积分布云图。从图 11(a)~图 11(d)可以看出,在此吹风比下,冷却孔上游附近的颗粒沉积得到一定的改善,同时沿冷却孔流向上一定距离的颗粒沉积减少,带沟槽结构改善冷却孔流向上颗粒沉积的展向宽度要好于无沟槽,其中沟槽深度为 $0.4d$ 改善的展向宽度最好;此时,沟槽深度为 $0.8d$ 的沿流向改善的距离长度要好于其余两种沟槽深度。从图 11(e)~图 11(g)可以看出,随着吹风比的增大, $0.4d$ 沟槽内沿冷却孔流向上的颗粒沉积也有明显减少,沟槽深度为 $0.8d$ 的沿冷却孔流向上的颗粒沉积还是好于其余两种结构;但是吹风比的增大,也使得沟槽内沿冷却孔流向一侧的壁面未正对孔的位置处颗粒沉积较 $M=0.5$ 时有所增加。

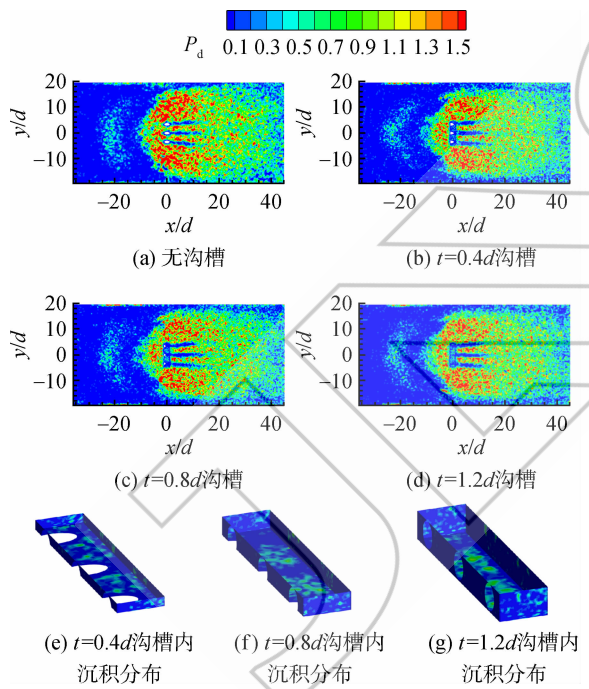


图 11 $M=1.0$ 下的沉积分布
Fig. 11 Deposition distribution of $M=1.0$

图 12 为吹风比 $M=2.0$ 时,4 种结构的整体壁面和沟槽内颗粒沉积分布云图。从图 12(a)~图 12(d)可以看出,吹风比的进一步增大,即冷却射流的动量增大,法向抬升能力增大,使得穿透主流的能力增大,影响了靠近冷却孔上游和两侧位置的气体流动,使得这两处跟随主流运动的小粒径颗粒沉积得到改善;也正因为无沟槽结构在吹风比为 $M=2.0$ 时,冷气射流的法向抬升能力较强,冷却孔下游靠近孔的位置处,冷却射流对运动

到此处的大粒径颗粒的法向速度抑制作用较强,所以这个位置的颗粒沉积变多;但是随着沟槽深度的增加,抑制了冷却射流的法向抬升能力,此处的颗粒沉积又明显减少。从沿冷却孔流向上改善的颗粒沉积长度可以看出,在较大吹风比下,沟槽深度为 $0.8d$ 和 $1.2d$ 的结构,此时沿 3 个孔流向上改善的颗粒沉积长度已经变得不再均匀,中心孔明显好于其余两个孔,而沟槽深度为 $0.4d$ 的结构却比较均匀。从图 12(e)~图 12(g)可以看出,当吹风比 $M=2.0$ 时,3 种沟槽深度的结构的沟槽内的颗粒沉积分布各自都好于吹风比为 $M=1.0$,其中,沟槽深度为 $0.8d$ 的结构沟槽内的颗粒沉积最少。

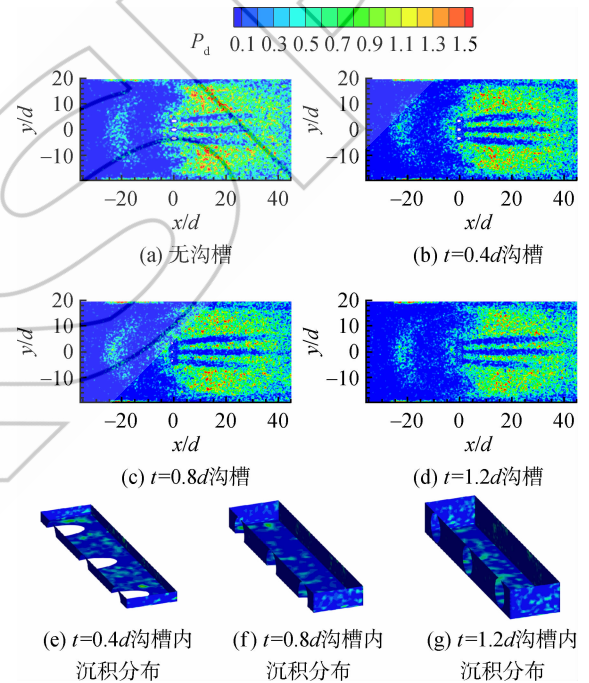


图 12 $M=2.0$ 下的沉积分布
Fig. 12 Deposition distribution of $M=2.0$

2.3 气膜冷却效率与沟槽深度 t 和吹风比 M 的关系

气膜冷却是一个主流和射流高度耦合的流动传热过程。通过探究在不同吹风比下,不同沟槽深度结构对于气膜冷却效率的改善情况显得十分重要。

气膜冷却效率 η 的定义为

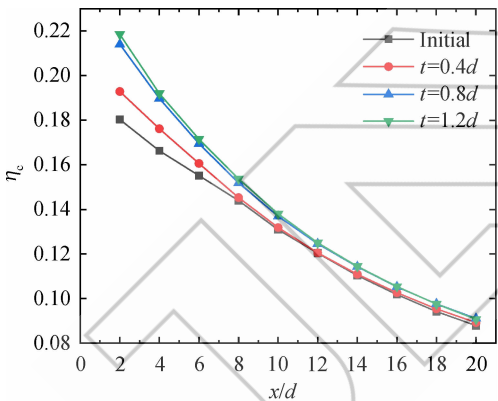
$$\eta = \frac{T_{\infty} - T_w}{T_{\infty} - T_c} \tag{20}$$

式中 T_{∞} 和 T_c 分别为主流和射流的进口温度, T_w 为考虑到导热效应后的壁面温度。

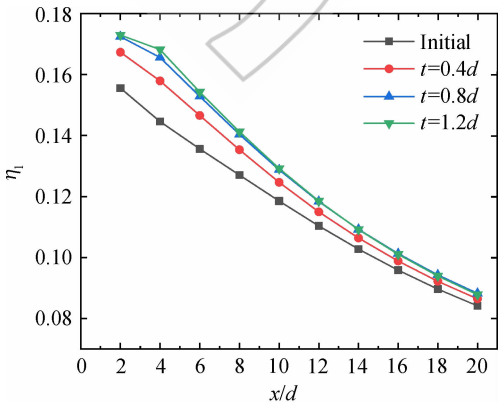
展向平均冷却效率的定义为

$$\eta = \frac{1}{10d} \int_{-5d}^{5d} \eta_l(x,y) dy \tag{21}$$

图 13~图 15 为不同吹风比下,4 种结构的中间冷却孔的中心线气膜冷却效率(η_c)和展向平均气膜冷却效率(η_l)沿流向分布。在吹风比 $M=0.5$ 时,沟槽深度的增加,减小了冷气射流的法向抬升能力,使得冷气射流更易贴近壁面,沟槽深度 $0.8d$ 和 $1.2d$ 的结构对中心线和展向平均沿流向分布气膜冷却效率的提升都比较明显,且两者差异不大;沟槽深度为 $0.4d$ 结构的中心线冷却效率在 $x/d=8$ 之前也有较明显的提升,但之后和无沟槽结构基本相同。当吹风比增大为 $M=1.0$ 后,4 种结构的中心线和展向平均沿流向分布的气膜冷却效率都有所增大,此时,随着 x/d 的增大,沟槽深度为 $0.8d$ 结构的中心线冷却效率越来越接近 $1.2d$; $x/d=14$ 之前,沟槽深度为 $0.4d$ 和 $0.8d$ 结构的中心线冷却效率接近,之后, $0.4d$ 和无沟槽结构比较接近;沟槽深度为 $0.8d$ 和 $1.2d$ 结构的展向平均沿流向分布气膜冷却效率基本相同,随着 x/d 的增大,沟槽深度为 $0.4d$ 结



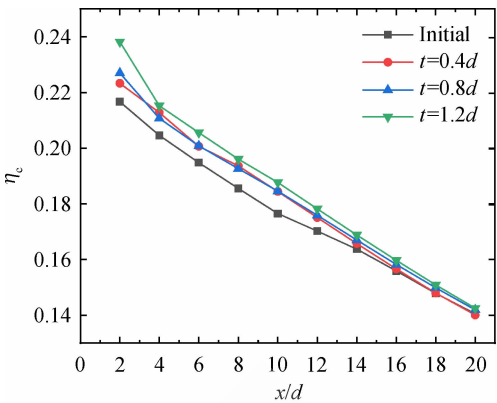
(a) 中心线



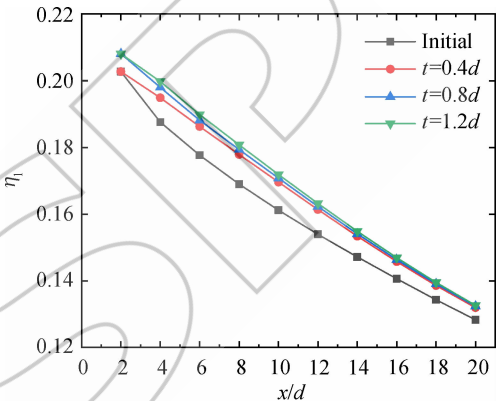
(b) 展向平均

图 13 $M=0.5$ 下的气膜冷却效率

Fig. 13 Film cooling efficiency of $M=0.5$



(a) 中心线

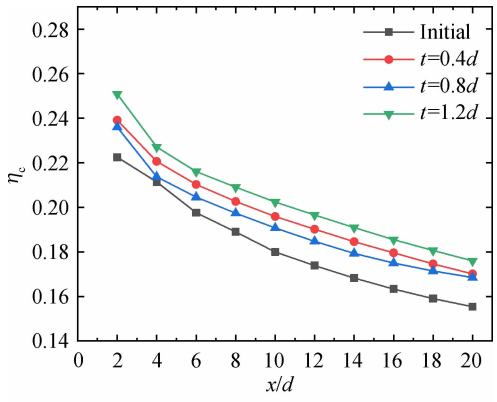


(b) 展向平均

图 14 $M=1.0$ 下的气膜冷却效率

Fig. 14 Film cooling efficiency of $M=1.0$

构的展向平均沿流向分布气膜冷却效率越来越接近两者,在 $x/d=14$ 之后,三者基本相等。当吹风比进一步增大到 $M=2.0$ 后,4 种结构的中心线和展向平均沿流向分布的气膜冷却效率进一步增大,此时,沟槽深度为 $0.4d$ 结构对中心线和展向平均沿流向分布气膜冷却效率的改善好于 $0.8d$ 结构,在 $x/d=2$ 时, $0.4d$ 结构的展向平均沿流向分布气膜冷却效率甚至优于 $1.2d$;值得注意的是,较 $M=0.5$ 和 $M=1.0$ 而言,在此吹风比



(a) 中心线

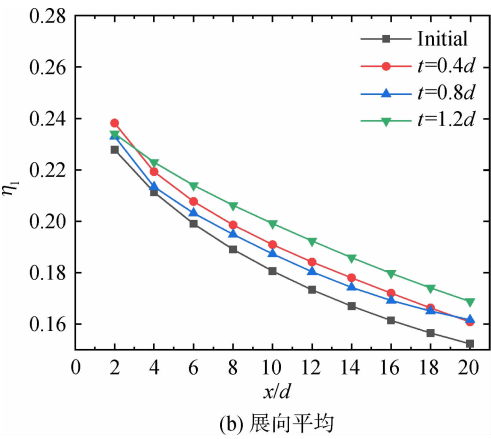


图 15 $M=2.0$ 下的气膜冷却效率
Fig. 15 Film cooling efficiency of $M=2.0$

下,沟槽深度为 $1.2d$ 结构对于中心线和展向平均流向分布气膜冷却效率的提升程度更大。

图 16~图 18 为不同吹风比下,无沟槽和 3 种沟槽深度结构的中心孔下游气膜冷却效率云图。从图 16 可以看出,在较小吹风比下,4 种结构沿冷却中心孔流向上总的气膜冷却覆盖距离大致相同,但沟槽结构的存在,明显改善了靠近中心孔下游一定距离内的沿流向上的气膜冷却效率,且随着沟槽深度的增加,下游靠近气膜孔位置处沿展向的效率也有明显的提升,较深的沟槽深度进一步抑制了冷气射流的法向抬升能力,冷气的切向速度得到进一步增大,这也是导致沟槽深度为 $0.8d$ 和 $1.2d$ 结构靠近沟槽处,气膜冷却效率较其他位置大的原因。从图 17 可以看出,当吹风比为 $M=1.0$ 时,4 种结构沿冷却中心孔流向上的气膜冷却覆盖距离进一步增加,随着吹风比的增加,使得沟槽内的气膜冷却效率有所提升;在此吹风比下,3 种沟槽深度结构的冷却中心孔下游的气膜冷却效率云图差异不大。从图 18 可以看

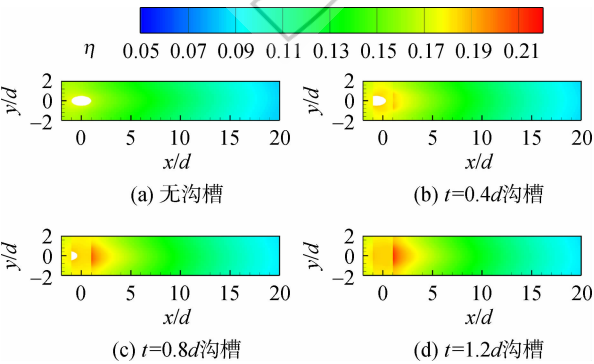


图 16 $M=0.5$ 下的中心孔的气膜冷却效率云图
Fig. 16 Center hole film cooling efficiency contour of $M=0.5$

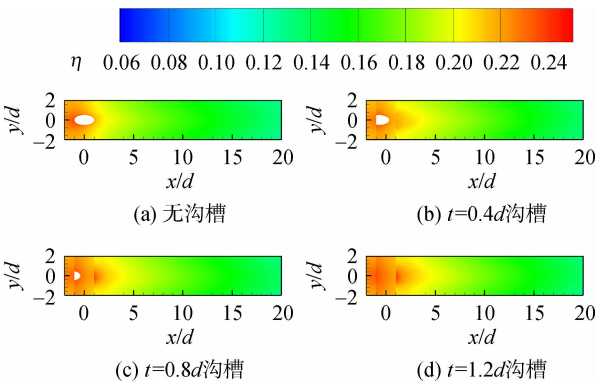


图 17 $M=1.0$ 下的中心孔的气膜冷却效率云图
Fig. 17 Center hole film cooling efficiency contour of $M=1.0$

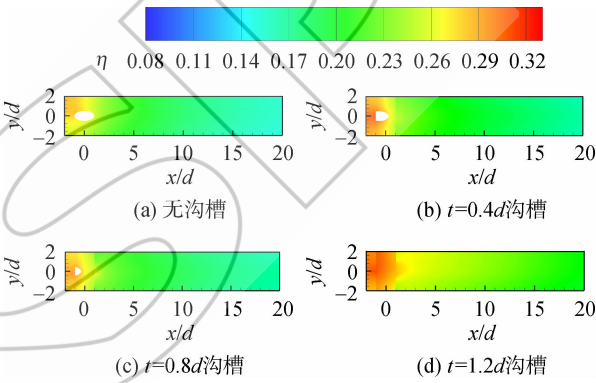


图 18 $M=2.0$ 下的中心孔的气膜冷却效率云图
Fig. 18 Center hole film cooling efficiency contour of $M=2.0$

出,当吹风比为 $M=2.0$ 时,冷气射流对主流的穿透能力较强,冷却中心孔下游沿流向上的气膜覆盖趋势不如 $M=1.0$,沟槽内的气膜冷却效率和沟槽下游有较大差异,没有均匀地过渡;此时,沟槽深度为 $0.4d$ 较 $0.8d$ 结构而言,气膜冷却效率更高。沟槽深度为 $1.2d$ 的结构冷却孔正对沟槽,虽然冷却中心孔下游沿流向上的气膜冷却效率较其他 3 种结构好,但由于吹风比进一步增大,沟槽内的冷气流动不均匀,主流与射流掺混后的气体流动性不好,导致沟槽下游气膜覆盖变得紊乱。

3 结 论

本文通过将冷却孔嵌入横向沟槽内,探究了不同吹风比下沟槽深度对于平板颗粒沉积特性和气膜冷却性能的影响,得到如下结论:

1) 吹风比的增大,整体的颗粒沉积效率和捕获效率都会减小。沟槽结构的存在与否和深度变化,不会影响这个规律。

2) 在同一吹风比下,沟槽结构的存在,减小了整体的颗粒沉积和捕获,改善了冷却孔中心线和下游展向平均沿流向分布气膜冷却效率。

3) 小吹风比下,沟槽深度为 $0.8d$ 和 $1.2d$ 的结构在减小颗粒沉积和改善冷却孔下游气膜冷却效率方面表现更为优异。

4) 大吹风比下,沟槽深度为 $0.4d$ 结构对于颗粒沉积的改善作用较小,但是对冷却孔下游气膜冷却效率的改善甚至稍好于 $0.8d$;虽然 $1.2d$ 结构增大了冷却孔下游气膜冷却效率,但是也使得气膜覆盖变得紊乱,不再均匀。

参考文献:

[1] CHENG W L, LUNDGREEN R, GUO B. A numerical study of dust deposition in a model turbine vane cooling passage[R]. ASME Paper GT2018-75833, 2018.

[2] YANG Xiaojun, LI Zishuo, CUI Mohan. Numerical investigation of particles deposition on leading edge of nozzle guide vane[R]. ASME Paper GT2018-75997, 2018.

[3] CROSBY J M, LEWIS S, BONNS 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): 051503. 1-051503. 9.

[4] PRENTER R, AMERI A, BONNS J P. Deposition on a cooled nozzle guide vane with Nonuniform inlet temperatures[J]. Journal of Turbomachinery, 2016, 138(10): 101005. 1-101005. 11.

[5] PRENTER R, AMERI A, BONNS J P. Computational simulation of deposition in a cooled high-pressure turbine stage with hot streaks[J]. Journal of Turbomachinery, 2017, 139(9): 091005. 1-091005. 11.

[6] LAWSON S A, THOLE K A. Effects of simulated particle deposition on film cooling[J]. Journal of Turbomachinery, 2011, 133(2): 021009. 1-021009. 9.

[7] LAWSON S A, THOLE K A, OKITA Y, et al. Simulations of multiphase particle deposition on a showerhead with staggered film cooling holes[J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(5): 051041. 1-051041. 13.

[8] LAWSON S A, THOLE K A. Simulations of multiphase particle deposition on endwall film cooling[J]. Journal of Turbomachinery, 2012, 134(1): 011003. 1-011003. 11.

[9] LAWSON S A, LYNCH S P, THOLE K A. Simulations of

multiphase particle deposition on a nonaxisymmetric contoured endwall with film-cooling[J]. Journal of Turbomachinery, 2013, 135(3): 031032. 1-031032. 11.

[10] GOLDSTEIN R J, ECKERT E R G, CHIANG H D, et al. Effect of surface roughness on film cooling performance[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1985, 107(1): 111-116.

[11] SCHMIDT D L, SEN B, BOGARD D G. Effects of surface roughness on film cooling[R]. Birmingham, UK: International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exhibition, 1996.

[12] 张斐, 刘振侠, 刘振刚, 等. 不同来流条件对涡轮叶片表面颗粒沉积影响的实验研究[J]. 推进技术, 2019, 40(7): 1536-1545.

ZHANG Fei, LIU Zhenxia, LIU Zhengang, et al. Experimental simulation of particle deposition on turbine blade surface with different free stream condition[J]. Journal of Propulsion Technology, 2019, 40(7): 1536-1545. (in Chinese)

[13] 裴钰. 燃气轮机涡轮叶片表面污染物沉积模型研究[D]. 天津: 中国民航大学, 2016.

PEI Yu. Research of deposition model on blade surface of gas turbine[D]. Tianjin: Civil Aviation University of China, 2016. (in Chinese)

[14] 周君辉. 进气流道粒子磨蚀和涡轮叶片粒子沉积特性及其影响[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2016.

ZHOU Junhui. Particle erosion inside particle separator and particle deposition characteristics of turbine blade as well as its influences[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2016. (in Chinese)

[15] 王佳亮. 颗粒物沉积对气膜冷却特性影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.

WANG Jialiang. Study on the effect of particle deposition on film cooling characteristics[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)

[16] 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.

[17] SOLTANI M, AHMADI G. On particle adhesion and removal mechanisms in turbulent flows[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 1994, 8(7): 763-785.

[18] PRASHANTH S S. CFD simulation and analysis of particulate deposition on gas turbine vanes[D]. Columbus, US: The Ohio State University, 2010.

(编辑:王碧珺)