船舶燃气轮机U型肋通道的颗粒沉积特性研究 *

赵宏杰，姜玉廷，郑 群，陈禹田，陆松兵

（哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院，黑龙江 哈尔滨 150001）

摘 要：为了探究船舶燃气轮机内部冷却通道的颗粒沉积特性，本研究以分析从随压气机抽取的气体进入涡轮内部冷却通道内的颗粒动力学特性及颗粒与壁面相互作用的特性出发，基于高温壁面建立速度场影响的沉积模型，利用用户自定义函数实现沉积模型与CFD程序的嵌套。并简化船舶燃气轮机涡轮内部冷却通道，选取了在气膜孔与壁面之间夹角β=90°时，下游肋倾角α不同（α=30°，45°，60°，75°，90°），及在下游肋倾角α=60°时，气膜孔与壁面之间夹角β不同（β=30°，45°，60°，75°，90°）的八种不同内冷结构进行数值计算。研究表明，在β=90°不变时，随着α=90°减小到α=30°，弯头壁面换热性能和沉积率逐渐呈下降趋势，下游肋与肋之间壁面上颗粒的撞击率逐渐上升。α=60°，β=45°的U型肋通道，是八个内冷结构中弯头壁面沉积率最少、换热性能最好、能够有效减少内部冷却通道颗粒沉积和改善船舶燃气轮机涡轮海洋环境工作适应性的内冷结构。

关键词：船舶燃气轮机；肋倾角；气膜孔；颗粒沉积；沉积模型

中图分类号：V233 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4055（2021）08-1906-09

DOI：10.13675/j.cnki. tjjs. 200560

Particle Deposition Characteristics of U-Shaped Rib Channel of Marine Gas Turbine

ZHAO Hong-jie，JIANG Yu-ting，ZHENG Qun，CHEN Yu-tian，LU Song-bing

（College of Power and Energy Engineering，Harbin Engineering University，Harbin 150001，China）

Abstract：In order to explore the deposition characteristics of marine gas turbine internal cooling channel，based on the particle dynamics characteristics and interaction characteristics between particle and wall of the gas extracted from the compressor into cooling channel of the cooling turbine，a deposition model is established based on the high temperature wall under the consideration of flow field，and the user-defined function is used to realize the couple of deposition model and CFD program. The internal cooling channel of marine gas turbine is simplified. Eight kinds of internal cooling structures with different downstream rib angles（α=30°，45°，60°，75° and 90°）are selected when the angle between the film cooling hole and the wall is 90° and the downstream rib angle α is 60° with different roles between the film cooling hole and the wall（β=30°，45°，60°，75° and 90°）.The results show that when β=90° is constant，with α=90° reduced to α=30°，the heat transfer performance and the deposition rate of the elbow wall gradually decrease，and the impact rate of particles on the wall between downstream ribs gradually increases. The U-shaped channel with α=60° and β=45° has the least deposition rate and

* **收稿日期**：2020-07-30；**修订日期**：2020-10-14。

基金项目：国家自然科学基金（51809065；52071107）。

作者简介：赵宏杰，硕士生，研究领域为燃气涡轮内部通道冷却和沉积特性。E-mail：1436513691@qq.com

通讯作者：姜玉廷，博士，副教授，研究领域为燃气轮机热端部件冷却技术、叶轮机械多相流动。E-mail：jiangyuting07314@126.com

引用格式：赵宏杰，姜玉廷，郑 群，等. 船舶燃气轮机U型肋通道的颗粒沉积特性研究[J]. 推进技术，2021，42(8)：1906-1914.（ZHAO Hong-jie，JIANG Yu-ting，ZHENG Qun，et al. Particle Deposition Characteristics of U-Shaped Rib Channel of Marine Gas Turbine[J]. *Journal of Propulsion Technology*，2021，42(8)：1906-1914.）

the best heat transfer performance among the eight internal cooling structures. It also can effectively reduce the particle deposition in the internal cooling channel and improve the marine environment adaptability of air-cooled turbine for marine gas turbine.

Key words: Marine gas turbine; Rib inclination; Film cooling hole; Particle deposition; Deposition model

1 引　言

船舶燃气轮机长期工作在高盐、高湿的海洋环境中，随压气机流出的气体中会携带一些杂质颗粒，这些颗粒可能沉积在燃气轮机涡轮叶片内部冷却通道的各个表面。由于涡轮叶片内部冷却通道狭窄，在使用寿命期间不能很好地掌握内部的沉积情况，并且沉积颗粒可能会堆积在气膜孔附近堵塞气膜孔，导致涡轮的换热性能衰退，进而影响到船舶燃气轮机涡轮的安全运行和使用寿命。

Land 等[1]指出目前设计的冷却通道变得越加复杂，吸入的颗粒会阻塞这些通道，不易检查清洁，这样大大降低热端部件的寿命。Borello 等[2]研究指出，颗粒被流体拖曳冲击固体表面，从而在内部冷却通道中产生污垢和侵蚀。Schneider 等[3]在文中提到气膜孔的堵塞可能会对叶片周围的冷却气膜产生有害的影响。从而缩短了燃气轮机在运行过程中的平均维护时间，甚至缩短了燃气轮机在运行过程中的意外故障发生时间。同时杨晓军等[4]也提出污染物沉积会降低气膜冷却效果。Kim 等[5]进行了火山灰对涡轮部件影响的试验，发现气膜冷却孔容易沉积和堵塞。因此针对船用燃气轮机涡轮内部冷却通道的沉积特性的研究与现代燃气轮机安全问题紧密相连。Dowd 等[6]研究了在涡轮叶片内冷通道旋转和静止条件下，三种不同壁温(950°，1000°和 1050℃)下的沉积和撞击情况。结果表明，在旋转情况下与静止情况下摄入相同数量的颗粒进入弯曲通道处，弯曲处的沉积程度是相似的。在 3 ~ 20μm 内的颗粒最容易沉积在固定管道中，大于 10μm 的颗粒更容易沉积在旋转管道中。并且在 950 ~ 1050℃的壁温范围内，温度效应对沉积没有显著影响。Li 等[7]为探讨涡轮叶片内冷通道内砂粒沉积机理，采用商用 CFD 软件对带肋片的 U 型弯道进行了数值模拟。结果表明，颗粒沉积通量沿流动方向逐渐减小。颗粒明显沉积在肋壁和弯管壁上，尤其是在迎风肋壁和弯管上游壁上，而在背风肋壁上沉积较少。随着雷诺数和颗粒直径的增加，颗粒在迎风肋壁上的沉积通量增大，而在背风肋壁上的沉积通量减小。张晓明等[8]研究了沙尘在涡轮叶片带肋冷却通道中的气粒两相流动特性，研究结果表明：大粒径颗粒物易随高速气流沿通道中央区域流动，小粒径颗粒物的运动表现出更多的分散性。Singh 等[9]研究了近发动机工况下内冷带肋结构中砂粒的输运和沉积，采用恒定壁温边界条件，研究了温度对颗粒沉积的影响，考虑了 950℃，1000℃和 1050℃三种不同的壁温，粒径为 0.5~25μm。研究表明，颗粒撞击和沉积主要由较大的颗粒组成，弯曲区的下游部分除外。当壁温为 950℃时，颗粒撞击最高，在 1000℃和 1050℃的情况下观察到更高的沉积，沉积量随壁温的升高而显著增加。Shah 等[10]在体积雷诺数为 2.0×10^4 的情况下进行了 LES 计算，研究在带肋的内部冷却通道中的颗粒沉积规律。结果表明，在侧壁处，10μm 的粒子在二次流冲击区表现出很高的能量传递。较大的粒子更倾向于在肋间和导管中心的区域进行能量转移。肋正面是最容易受到冲击能量传递的。到后表面的主要能量传递机制是粒子从前表面反弹并携带足够的动量撞击前肋的后表面。Cheng 等[11]采用冲击孔阵列对涡轮叶片冷却通道进行了模拟，从而可以考虑相邻射流之间的流动相互作用。结果表明，温度对粉尘沉积的位置有一定的影响，尤其是中等粒径颗粒在孔内的沉积。周君辉等[12]研究了气膜孔附近的粒子运动与沉积特性。结果显示在气膜孔下游壁面处，小尺度的微粒出现较少。黄珂楠等[13]分析了堵塞比、堵塞位置对气膜冷却特性的影响。结果表明，背风侧出气端局部堵塞则在堵塞比高于 0.2 时对出口下游冷却效果有明显的削弱作用。Ai 和 Bons 等[14-16]研究了成型孔和不同孔间距对气膜冷却壁面沉积特征的影响。结果显示成型孔能够降低微细颗粒沉积的负面影响，在相同条件下成型孔的壁面颗粒捕获率比圆柱孔低 25%。

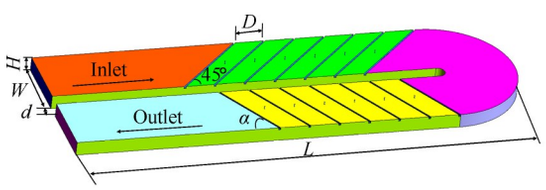
通过对与燃气轮机内部冷却通道颗粒沉积相关的国内外文献的梳理，发现前人已经对涡轮沉积做了很多的实验和数值模拟分析，并且提供了大量的数据支持和理论方法研究。本文基于 EI-Batsh 沉积模型，利用 Fluent 软件进行数值计算，对船舶燃气轮机涡轮内部冷却通道内的颗粒沉积进行研究，分析

颗粒在八种不同U型内部冷却通道中的运动特性和沉积特性。以期研究结果为削弱颗粒沉积对燃气轮机造成的不良影响及改善船舶燃机冷却涡轮的工作适应性发挥一定的作用。

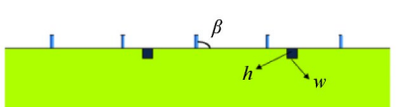
2 方 法

2.1 物理和计算模型

本研究计算模型的气膜孔采用在实际工程中最常用的圆柱孔，孔径 R=0.5mm，总体外部高 H 为20mm、上游和下游通道宽 W 为100mm、总体外部长 L 为660mm、肋间距 D 为40mm、肋高 h 为3mm、肋宽 w 为3mm、弯型通道中两通道间距 d 为20mm，上游肋倾角为45°，下游肋倾角为 α（α=30°，45°，60°，90°），气膜孔与壁面之间的夹角为 β（β=30°，45°，60°，90°）。张宗卫等[17]分析出流孔位置对矩形通道壁面换热特性的影响规律，结果表明，出流孔位于距前肋0.25倍肋距处，壁面的平均换热增强系数最大，出流孔位于距前肋0.75倍肋距处，壁面的平均换热增强系数最小。本研究的出流孔都位于距前肋0.50倍肋间距处。图1给出了本研究的其中一个计算区域示意图（α=60°，β=90°）。



（a）U-bend passed internal cooling passage (α=60°, β=90°)



（b）Ribs at a section

Fig. 1 Schematic diagram of computational domain (α=60°, β=90°)

2.2 粒子沉积模型

临界捕获速度模型是以颗粒撞击壁面时的法向速度（v_n）和捕获速度（v_{cr}）作为判断依据，来决定颗粒是否产生沉积或者反弹。即，若 $v_n<v_{cr}$，则粒子沉积；若 $v_n>v_{cr}$，则粒子反弹。

Brach等[18]根据半经验公式对比得出了临界捕获速度的具体形式

$$v_{cr}=\left(\frac{2E}{d_p}\right)^{\frac{10}{7}} \tag{1}$$

式中 E 是颗粒表面的杨氏模量，d_p 是颗粒直径。

El-Batsh参数根据颗粒表面的杨氏模量给出

$$\begin{aligned} E&=0.51\left[\frac{5\pi^2(k_1+k_2)}{4\rho_p^{\frac{3}{4}}}\right]^{\frac{2}{5}}\\ k_1&=\frac{1-v_s^2}{\pi E_s}\\ k_2&=\frac{1-v_p^2}{\pi E_p}\end{aligned} \tag{2}$$

式中 v_s 是流体表面材料的泊松比；E_s 是流体表面的杨氏模量，Pa；其中 v_p 为颗粒材料的泊松比；E_p 是粒子材料的杨氏模量，Pa；ρ_p 是颗粒密度，kg/m^3。

临界速度模型只考虑了颗粒撞击壁面法向速度的影响，实际上若颗粒撞击壁面时的湍流摩擦速度大于壁面附近的剪切速度，粒子仍然会发生逃离。此时的临界切向速度用下式计算

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

式中 $u_{\tau c}$ 为临界的切向捕获速度；W_A 为黏附常数，取决于粒子与壁面材料的性质；C_u 为Cunningham修正因子；K_c 为El-Batsh参数。

2.3 边界条件及网格划分

计算模型的边界条件如表1所示。

Table 1 Flow condition setting

Boundary Condition	
Inlet temperature/K	388
Wall	Adiabatic no slip
Outlet	Standard atmospheric pressure
Heat flux density between ribs/(W/m^2)	1.5×10^4
Gas	Ideal gas

Wang等[19]的研究表明，边界层通常起到阻挡颗粒到达壁面的作用，从而降低了捕获效率。因此，合适的边界层对于精确地捕捉效率预测是极其重要的。本研究使用ICEM-CFD软件，对气膜孔及近壁面的网格进行结构性划分（如图2所示），气膜孔部分为O型网格，并且保证边界层距离壁面第1层网格的 y^+<1，以满足后续计算的需求。建立网格数分别为200万，300万，500万，1000万的四种网格。结果如图3所示，发现在网格数500万和1000万时，局部努塞尔数基本重合即图中的黑色线和红色线，因此最终计算选择网格节点数为500万。

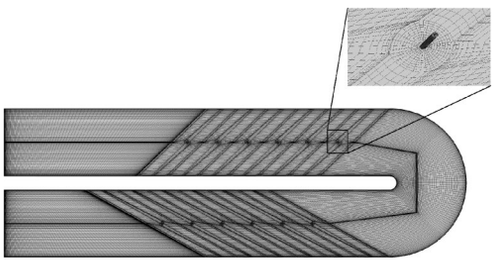


Fig. 2　U-channel structured grid generation

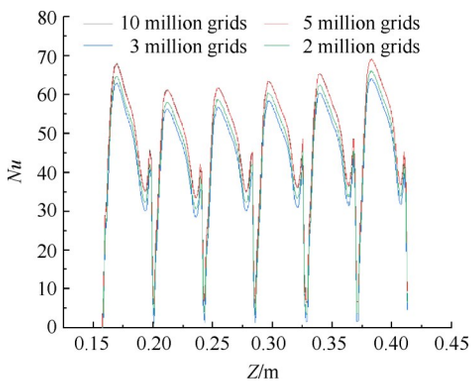


Fig. 3　Grid independence analysis

2.4　湍流模型验证

本研究对常用的六种湍流模型进行了数值计算，同 Tanda[20] 的实验结果对比分析。研究发现，k-ω BSL 湍流模型不仅与实验数据曲线的趋势大致相同，而且与实验数据线最贴近。其中，由于设置肋下表面是绝热的，导致了模拟计算数值略低于实验数据曲线。因此，本文选择 k-ω BSL 湍流模型进行接下来的数值计算，具体的模型验证结果可参见文献[21]。

3　结果与讨论

3.1　颗粒在内冷结构上壁面的撞击沉积分布

本研究在进口用正态分布的方式统计射入平均粒径为 d_p=10μm 的粒子（设置颗粒最小粒径为 0.1μm，最大粒径为 20μm），分析颗粒在内部冷却通道的肋表面上布置不同肋倾角 α，或不同气膜孔与壁面之间夹角 β 下的颗粒撞击和沉积情况。

舰船燃气轮机由于在海洋环境中工作，其燃油中含有硫杂质，在燃烧时生成 SO_2，SO_3 气体，与来自海洋空气的 NaCl 反应生成硫酸钠，即：

$$2NaCl+SO_2+1/2O_2+H_2O\rightarrow Na_2SO_4+2HCl$$

$$NaCl+SO_3+H_2O\rightarrow Na_2SO_4+2HCl$$

Na_2SO_4 是主要成分，其中混有少量 NaCl[22]，因此本研究设置的颗粒为硫酸钠。

为了在图中方便标记，在气膜孔与壁面之间夹角 β 一定时，下游肋倾角分别为 30°，45°，60°，90°时，分别标记为 L30°，L45°，L60°，L90°。在下游肋倾角 α 一定，在气膜孔与壁面之间夹角为 30°，45°，60°，90°时，分别标记为 Q30°，Q45°，Q60°，Q90°。

在模拟过程中，为了避免计算结果的偶然性，在流场稳定后每 5 步迭代一次颗粒，每次射入 5000 个粒子，总共计算 2000 步，迭代 400 次颗粒，总共统计 200 万颗粒的撞击与沉积效果。在进行模拟和分析颗粒沉积模型时，通常用碰撞效率、沉积效率、捕获效率表征沉积过程，它们的定义如下：

$$\text{碰撞效率}=\frac{\text{撞击壁面的颗粒总数}}{\text{射入的颗粒总数}}$$

$$\text{沉积效率}=\frac{\text{沉积壁面的颗粒总数}}{\text{撞击壁面的颗粒总数}}$$

$$\text{捕获效率}=\frac{\text{沉积壁面的颗粒总数}}{\text{射入的颗粒总数}}$$

碰撞效率用来表征颗粒与壁面的撞击情况，其中小尺寸颗粒随流性较好，碰撞效率较小，而大尺寸颗粒由于惯性较大，颗粒随流性表现不明显，碰撞效率更大，因此大尺寸颗粒更易在壁面发生碰撞。判断颗粒是否沉积，主要是从颗粒与壁面之间的相互作用来考虑[23]。沉积效率用来表征当颗粒与壁面发生碰撞后产生沉积的概率。因此根据定义可以得出，碰撞效率和沉积效率的乘积结果即为捕获效率。

燃气轮机叶片内部冷却通道的肋表面上布置不同肋倾角 α，或不同的气膜孔与壁面之间夹角 β，内部冷却通道上壁面的颗粒撞击情况如图 4 所示，颗粒沉积情况如图 5 所示。图中的坐标值 n_{imp} 是指颗粒子在壁面上发生撞击的颗粒个数，n_{dep} 是指颗粒在壁面上发生沉积的颗粒个数，参考文献[9]中坐标值的标记方式。

颗粒还未到达壁面时，颗粒和壁面不发生碰撞并在升力作用下开始向上运动，在颗粒向上运动过程中，气体沿着主流方向的分速度迅速增大，使得颗粒沿着主流方向的分速度与气体沿着主流方向的分速度的差值迅速减小，使得部分颗粒逐渐与壁面发生撞击或沉积在壁面上。当颗粒的速度小于气体的速度时，颗粒对其周围的气体施加同气流流动方向相反的作用力，该作用力对边界层流动有减速作用，从而增强了边界层厚度的增长率，当颗粒在流体各层之间脉动时，由于气体的粘性，对其周围气体施加了一个与气流运动方向相反的作用力，其效果相当于使气体的惯性力减小[24]。从颗粒撞击云图可得，弯头壁面的上游拐角处以及弯头侧壁面上方没有受到太多的颗粒撞击，这意味着这些颗粒能够随气流

旋转并避开上游拐角处的回流区。还可以清晰地看到，颗粒在靠近弯头外侧的撞击量和沉积量要大于颗粒在弯头内侧的沉积分布，这是由于弯通道存在曲率，流体受到的离心力是始终指向外侧壁面，导致出现了二次流，驱使流体中悬浮的颗粒向弯管外侧运动。

并且可以观察到，颗粒在所有弯头壁面的下部到达第一根肋时存在明显的颗粒撞击痕迹，这是由

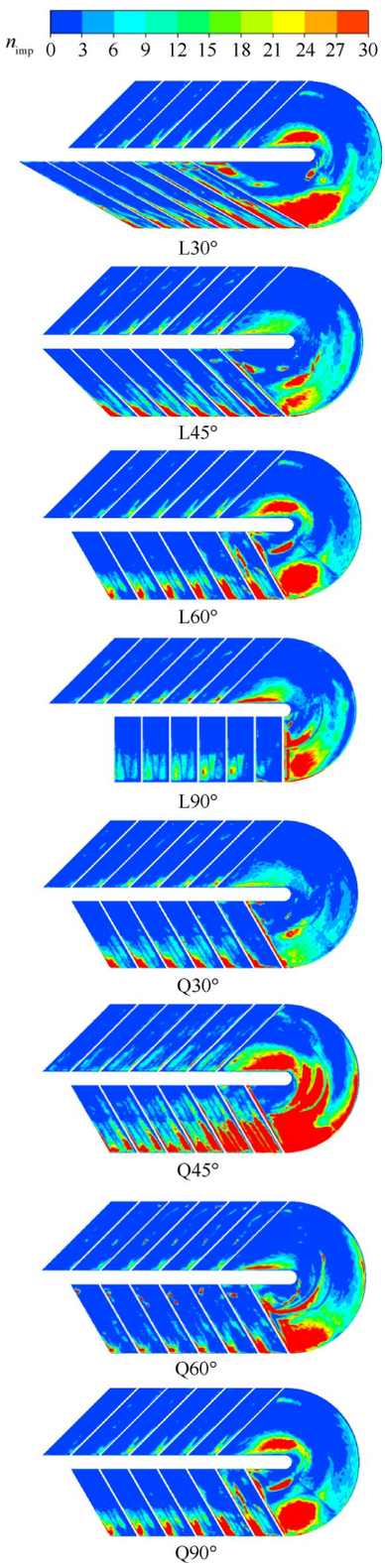


Fig. 4 Contours of particle impact on the wall above internal cooling channel

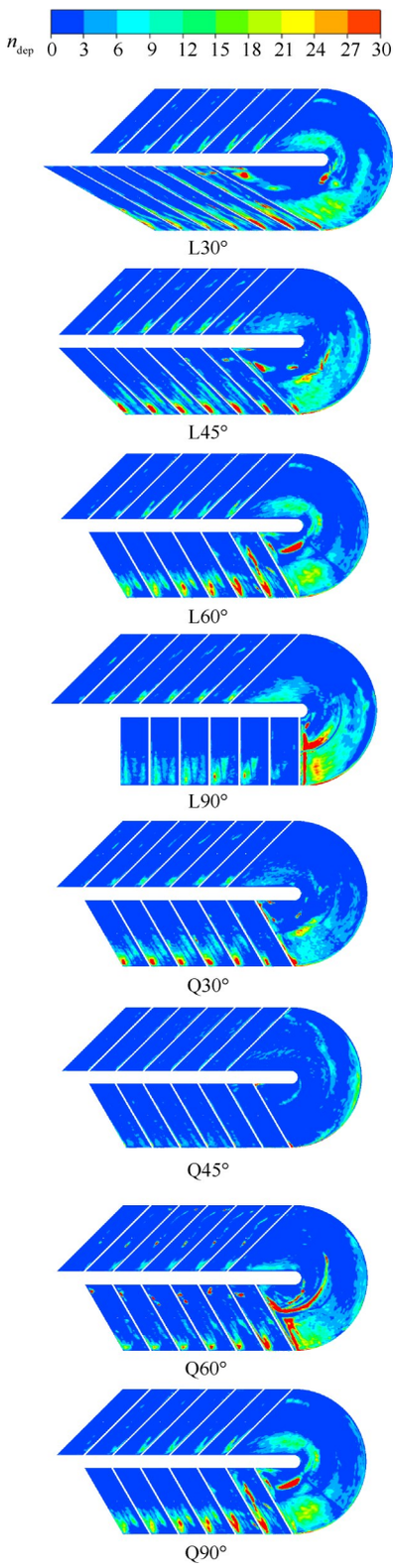


Fig. 5 Contours of particle deposition on the wall above internal cooling channel

于主流流过弯头瞬间，随着流体本身的惯性作用以及遇到了弯头后区域上布置的肋，引起流体的强烈扰动。再结合图 6 的流线图分析，由于大量主流撞击向壁面，引起了部分颗粒随着主流一同撞向壁面，在速度较小的情况下被壁面所捕获。颗粒在下游的撞击量和沉积量都高于颗粒在上游通道中撞击量和沉积量，这主要是由于下游通道内更高的湍流，并伴随着由于转向流而产生的更强的二次流，两者结合在一起，导致更多的颗粒被夹带到湍流漩涡中，增加了下游近壁面的颗粒冲击作用。杂质颗粒所受的离心力小于冷却气体对它的曳力，所以颗粒向弯头下部运动，颗粒与弯头下部表面存在明显的碰撞，原因是从速度流线图可得，气体流速增大，颗粒受冷却气体的曳力增大，颗粒所受曳力与离心力相互作用。同时由于转向的流动，在上游靠近弯头区域的近壁侧也出现了明显的颗粒撞击痕迹，但是此区域并没有因为明显撞击效果而产生明显的沉积，在本研究的八个 U 型通道中均有体现。

当气膜孔与壁面之间夹角 β 相同，内部冷却通道中下游肋倾角 α=45°时，弯头壁面的颗粒撞击率最低，在八个内冷结构中，在下游肋倾角 α=60°，β=45°时，弯头壁面及下游通道中颗粒的撞击量最多，说明气膜孔与壁面之间夹角为 45°引起弯头壁面的颗粒撞击更加剧烈，并且沿着流体流出通道的方向上，撞击量在下游通道中逐渐减少。同时，此结构下内部冷却通道的整个上壁面的沉积量最少。关于颗粒的沉积率随着肋倾角 α 和气膜孔与壁面之间角度 β 各自的具体变化规律，将在下一节通过折线图的形式更加精确地进行展示。

3.2　颗粒存在时流体的流动情况

图 6 给出了 U 型通道中距离上壁面 4mm 平面的速度流线图，从图中可以清楚地发现，在所有结构中，流体在弯头区由于受到离心力的作用，导致速度增大，而外侧壁面由于流动阻力比较大，因此速度比较低。流体在弯头后发生流动分离，在离心力的作用下，部分流体直接被甩向外侧壁面，形成了高速低压区，另一部分流体在弯头后形成了低速区。在弯道的上游边缘，由于弯道内侧有相当大的流速加速度，从而形成了一个强的剪切层。当大部分水流被推向弯道的下游时，在上游拐角处形成一个回流区，同样，在下游外角形成一个较小的回流区。由于壁面附近的大阻力和肋壁附近形成涡流，通道壁面附

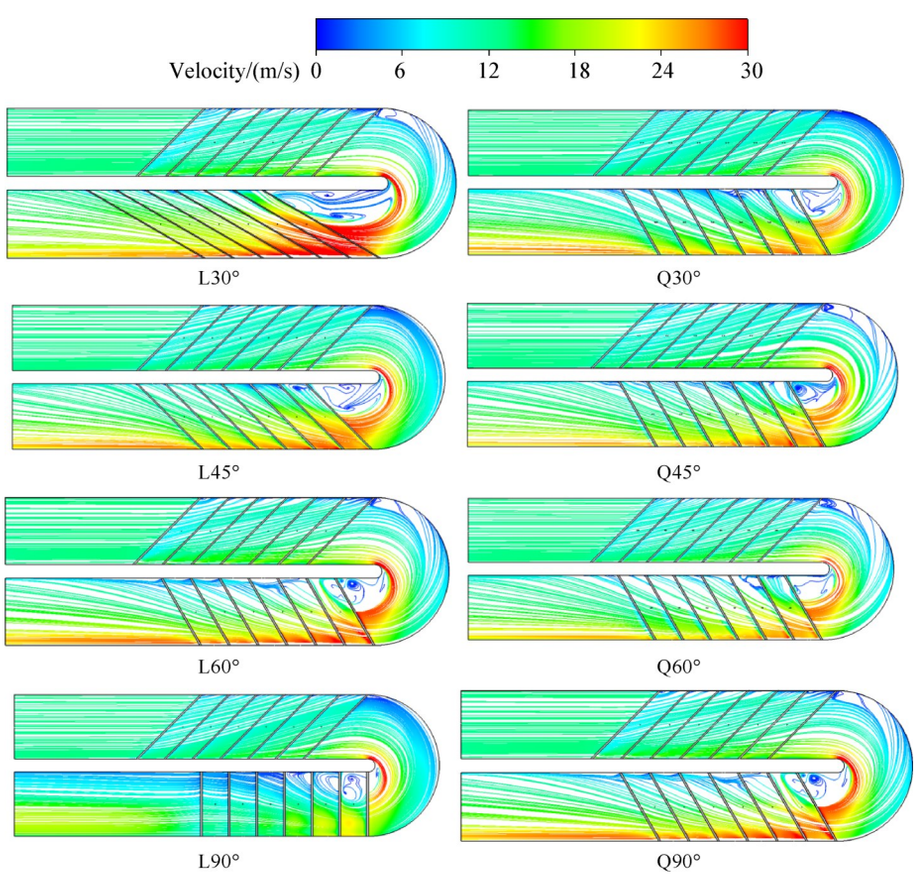


Fig. 6　Velocity streamlines of the plane 4mm away from upper wall in internal cooling structure

近的流体速度很小。主流流过内部冷却通道的弯头后，主流速度都有急速加剧的现象，并形成了一个高速区域，同时均出现了不同程度的旋流。

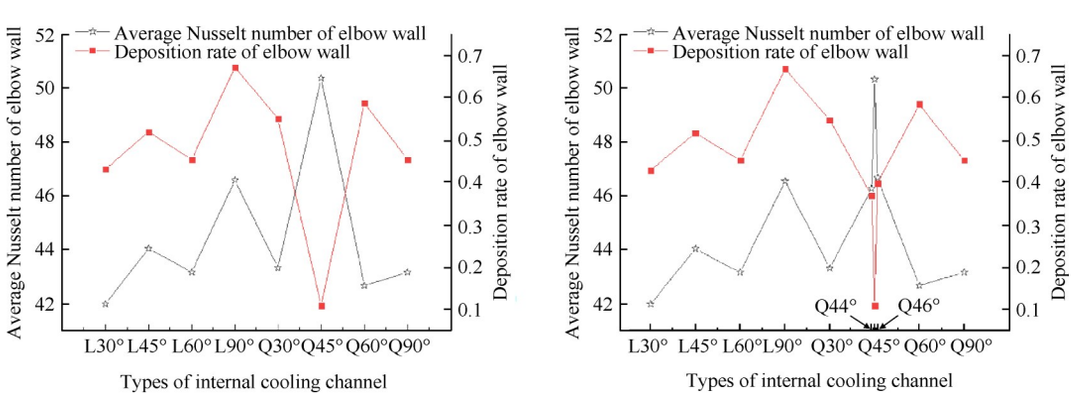
弯头后的主流速度尤其是靠近下侧的流速，都高于上游的主流速度。在流体流过弯头壁面到达下游第一根处，由于有肋的阻拦，导致流体流速迅速下降，转弯处的大量主流流向靠近肋侧壁面，从而再一次形成一道横向二次流，增大了主流流体的湍流度，并且肋壁阻碍了流体的运动，颗粒撞击壁面造成能量损失，因此在图5中，在下游第一根肋处可以观察到明显的颗粒沉积现象。在肋倾角α=30°，β=90°时，流体流过弯头后到达弯头后第一根肋的距离最远，发现此时下游的流速比其它结构中下游的速度都要大很多。肋片改变了流体的流线和肋壁附近的流动状态，在肋片前后形成涡流，影响颗粒在壁面上的沉积。在α=90°，β=90°时，主流流过弯头后速度增加相对较小，没有出现明显的漩流，二次流的效果减弱。

图7(a)是八个U型通道中弯头壁面的沉积率和努塞尔数的双折线图，由图7(a)可得，在气膜孔与壁面之间夹角β=90°一定时，随着下游肋倾角的减小，弯头壁面换热性能逐渐呈现下降趋势。这是由于，随着肋倾角角度的减少，肋间近壁出现横向流动，增加主流与壁面之间的换热能力。同时研究结果表明，颗粒在肋表面的沉积情况与肋壁间夹角有着一定的关系。结果显示从α=90°到α=30°，随着肋倾角角度的减小，颗粒的沉积效率也整体呈下降趋势。这是由于随着角度的减小，颗粒与壁面之间不再是垂直撞击，而是有角度的射入，这就导致了虽然颗粒撞击壁面的法向速度变小，但颗粒撞击壁面的切向速度开始逐渐变大，颗粒的切向速度的变大起到了降低颗粒沉积的作用。因此在气膜孔与壁面之间夹角β=90°一定时，肋倾角α=30°时，弯头壁面的沉积率最低，努塞尔数最低，沉积率为43%，比内部冷却通道中α=90°，β=90°的弯头壁面的沉积率低了24%。

在下游肋倾角α=60°一定时，随着气膜孔与壁面之间夹角β的增大或者减小，弯头壁面的沉积率和努塞尔数都没有明显的变化规律。但是在β=45°时，弯头壁面的沉积率是所有内冷结构中，沉积率最少，沉积率为11%，比内部冷却通道中α=30°，β=90°弯头壁面的沉积率低了33%，比弯头壁面沉积率最高的α=90°，β=90°低了57%。同时当α=60°，β=45°时，换热性能也是最好的。针对这一突出的现象，在β=45°的左右分别建立β=44°，β=46°的两组结构，统计它们弯头的沉积率和努塞尔数，如图7(b)所示。研究发现，这两组结构的沉积率和努塞尔数均与β=45°相近，因此进一步验证了数据结果的可靠性。

当下游肋倾角α=60°，气膜孔与壁面之间夹角β变化时，上游的气膜孔壁面、弯头侧壁面、下游通道中贴近靠近上游方向的侧壁面，以及弯头壁面的沉积率如图8所示。结果表明，虽然Q45°弯头壁面的沉积率最低，但是它上游的气膜孔壁面、弯头侧壁面、下游通道中贴近靠近上游方向的侧壁面的沉积率都比另外三个内部冷却通道的高。说明颗粒在Q45°的弯头壁面受到的离心力大于气体对它的曳力，导致了更多的颗粒运动到弯头侧壁面。由于下游通道中远离上游方向的侧壁面上的颗粒撞击偏多，使得很多颗粒发生反弹并沉积在下游通道中贴近上游方向的侧壁面。

颗粒在八个U型通道中上游的肋与肋之间壁面、弯头壁面、下游的肋与肋之间壁面的沉积率、撞击率、捕获率分别如图9所示。由三张图可得，在气膜孔与壁面之间夹角β=90°不变时，随着下游肋倾角的减小，上游壁面的沉积率、撞击率、捕获率变化量微小不到1%，所以下游肋倾角的改变对上游壁面的沉



(a) Eight internal cooling channels (b) Ten internal cooling channels

Fig. 7 Deposition rate and average Nusselt number of elbows in different internal cooling channels

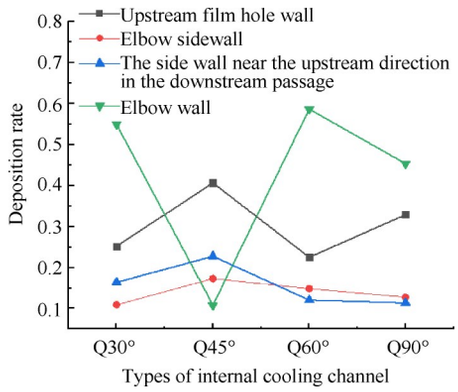
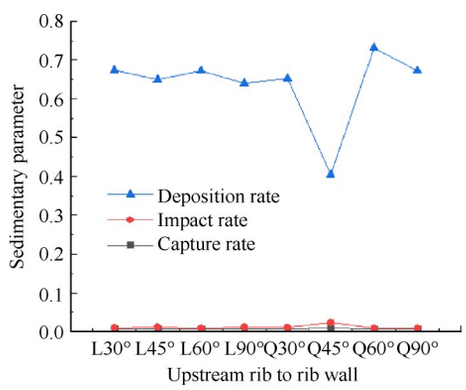
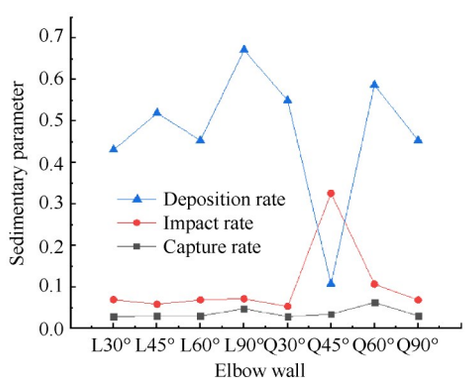


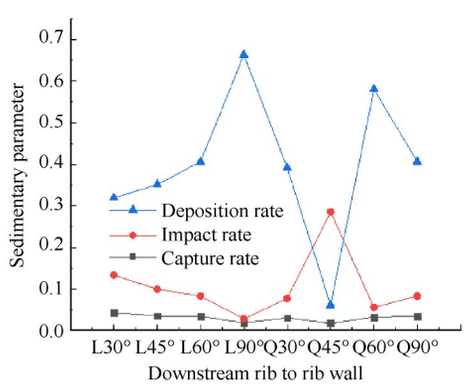
Fig. 8　Deposition rate of different wall surfaces in four different internal cooling channels



(a) Sedimentary parameters of upstream rib to rib wall



(b) Sedimentary parameters of elbow wall



(c) Sedimentary parameters of downstream rib to rib wall

Fig. 9　Sedimentary parameters of the different walls

积特性几乎没有影响。但随着下游肋倾角的减小，弯头壁面和下游肋与肋之间的壁面上的沉积率在明显降低。这是因为随着角度的减小，在主流的运动方向上出现了横向运动，颗粒与壁面之间不在是垂直撞击，而是有角度的射入，这就导致了虽然颗粒撞击壁面的法向速度变小，但颗粒撞击壁面的切向速度开始逐渐变大，颗粒的切向速度的变大起到了降低颗粒沉积的作用。

在下游肋倾角 α=60°，β=45°时，颗粒弯头壁面、下游的肋与肋之间壁面的撞击率最高，但是颗粒在上游的肋与肋之间壁面、弯头壁面、下游的肋与肋之间壁面的沉积率和捕获率都最低，这是由于此时颗粒运动不仅受二次流的作用，还受到湍流脉动的作用，使得一部分颗粒的速度在此刻超过临界捕获速度，从而使颗粒逃离壁面的束缚。因此 Q45°是一个可以有效改善船舶燃气轮机冷却涡轮的海洋环境工作适应性、减少内部冷却通道中颗粒沉积的结构。

4　结　论

本文通过研究得到如下结论：

(1)在气膜孔与壁面之间夹角 β=90°不变时，随着下游肋倾角的减小，弯头壁面换热性能和沉积率逐渐呈下降趋势。下游肋倾角的改变对上游壁面的沉积率、撞击率、捕获率影响数值均不到 1%。随着下游肋倾角的增大，下游肋与肋之间壁面上颗粒的撞击率逐渐下降。

(2)在下游肋倾角 α=60°，气膜孔与壁面之间夹角 β=45°时，弯头壁面的沉积率是本研究中所有内冷结构中沉积率最少的，沉积率为 11%，比 α=30°，β=90°时的弯头壁面的沉积率低 33%，比弯头壁面沉积率最高的 α=90°，β=90°低 57%。同时当 α=60°，β=45°时，换热性能也是最好的。

(3)在下游肋倾角 α=60°，气膜孔与壁面之间夹角 β=45°的 U 型通道是能够有效改善船舶燃气轮机冷却涡轮的海洋环境工作适应性、减少内部冷却通道中颗粒沉积的结构。

致　谢：感谢国家自然科学基金的资助。

参考文献

[1] Land C C, Joe C, Thole K A. Considerations of a Double-Wall Cooling Design to Reduce Sand Blockage[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2010, 132(3).

[2] Borello D, Anielli D, Rispoli F, et al. Unsteady CFD Analysis of Erosion Mechanism in the Coolant Channels

of a Rotating Gas Turbine Blade[R]. *ASME GT* 2015-43266.

[3] Schneider O, Dohmen H J, Benra F K, et al. Investigations of Dust Separation in the Internal Cooling Air System of Gas Turbines[R]. *ASME GT* 2003-38293.

[4] 杨晓军, 许诺然, 刘智刚. 污染物沉积和热障涂层脱落对气膜冷却效率影响的数值研究[J]. 推进技术, 2013, 34(10): 1362-1368. (YANG Xiao-jun, XU Nuo-ran, LIU Zhi-gang. Effects of Deposition and Thermal Barrier Coating Spallation on Film Cooling Effectiveness: A Numerical Study[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2013, 34(10): 1362-1368.)

[5] 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.

[6] 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[R]. *ASME GT* 2017-63167.

[7] Li Lin, Liu Cun-liang, Shi Xiao-yu, et al. Numerical Investigation on Sand Particles Deposition in a U-Bend Ribbed Internal Cooling Passage of Turbine Blade[R]. *ASME GT* 2019-90850.

[8] 张晓明, 虞跨海, 辛士红, 等. 微米沙尘涡轮叶片带肋冷却通道两相流动特性分析[J]. 河南科技大学学报, 2019, 40(2): 17-22.

[9] Singh S, Tafti D K. Prediction of Sand Transport and Deposition in a Two-Pass Internal Cooling Duct[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2016, 138(7).

[10] Shah A, Tafti D K. Transport of Particulates in an Internal Cooling Ribbed Duct[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2007, 129(4): 816-825.

[11] Cheng W L, Lundgreen R, Guo B. A Numerical Study of Dust Deposition in a Model Turbine Vane Cooling Passage[R]. *ASME GT* 2018-75833.

[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.

[13] 黄珂楠, 张靖周, 郭 文. 气膜孔内局部堵塞对气膜冷却特性的影响[J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1330-1338.

[14] Ai W, Murray N, Fletcher T H, et al. Deposition near Film Cooling Holes on a High Pressure Turbine Vane[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2012, 134(4).

[15] Lewis S, Barker B, Bons J P, et al. Film Cooling Effectiveness and Heat Transfer near Deposit-Laden Film Holes[J]. *Journal of Turbomachinery*, 2011, 133(3).

[16] Casaday B P, Ameri A A, Bons J P. Numerical Investigation of Ash Deposition on Nozzle Guide Vane Endwalls[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2013, 135(3).

[17] 张宗卫, 朱惠人, 王振伟, 等. 出流孔位置对带肋矩形通道换热特性的影响[J]. 推进技术, 2011, 32(4): 581-585. (ZHANG Zong-wei, ZHU Hui-ren, WANG Zhen-wei, et al. Influence of Bleed Hole Location on Heat Transfer in Rectangular Channels with Ribs[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(4): 581-585.)

[18] Brach R M, Dunn P F. A Mathematical Model of the Impact and Adhesion of Microsphers[J]. *Aerosol Science and Technology*, 1992, 16(1): 51-64.

[19] Wang J, Levy E K. Particle Motions and Distributions in Turbulent Boundary Layer of Air-Particle Flow Past a Vertical Flat Plate[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2003, 27(8): 845-853.

[20] Tanda G. Heat Transfer in Rectangular Channels with Transverse and V-Shaped Broken Ribs[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2004, 47(2): 229-243.

[21] 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.)

[22] 由宝财, 滕佰秋, 邢丕臣, 等. 海洋环境下航改燃气轮机腐蚀防护与控制[J]. 航空发动机, 2010, 36(4): 45-48.

[23] 杨晓军, 胡英琦, 徐致远, 等. 存在剥离条件下颗粒物沉积过程的数值研究和实验验证[J]. 推进技术, 2019, 40(7): 1523-1535. (YANG Xiao-jun, HU Ying-qi, XU Zhi-yuan, et al. Experimental Validation and Numerical Simulation of Particles Depositional Processes with Detachment[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2019, 40(7): 1523-1535.)

[24] 李爱民, 姜秀民. 颗粒对边界层及对流换热影响机理的探讨[J]. 华北电力大学学报, 1999, 26(1): 46-51.

(编辑:张 贺)