

带三棱锥体群通道流动和传热特性的数值模拟

鲍 锋, 侯 昶, 江裕荣
(厦门大学 航空航天学院, 福建 厦门 361102)

摘 要: 对带有三棱锥体群的涡轮叶片内部冷却通道进行了数值模拟,对比了三棱锥体群在迎风和背风状态、顺排和交错排列以及不同横向列数、不同流向间距时冷却通道内部的流动和传热特性。结果表明:三棱锥体群所产生的纵向涡能够兼顾压损的降低与传热效果的改善;背风顺排状态放置的三棱锥体群具有最高的综合传热效率,较其他放置方案高出 20%~30%;在背风顺排时,较优横向列数为 5,流向间距比为 4~6。
关 键 词: 涡轮叶片冷却; 传热特性; 三棱锥体群; 横向列数; 流向间距比
中图分类号: V231.1 **文献标志码:** A

Numerical simulation of flow and heat transfer characteristics
in passage with triangular pyramids

BAO Feng, HOU Chang, JIANG Yurong

(School of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen Fujian 361102, China)

Abstract: Numerical simulation was performed for the internal cooling passage of turbine blades with triangular pyramids, and the focus was put on the flow and heat transfer characteristics in the cooling passage, with respect to the differences between cases of windward and leeward conditions, aligned and stagger arrangements, different horizontal columns and different streamwise spacing ratios. Results revealed that the decrease of pressure loss and improvement of heat transfer efficiency attributed to the longitudinal vortex generated by the triangular pyramids. The case of leeward condition with aligned arrangement had the highest comprehensive heat transfer efficiency, which was 20%—30% higher than other cases; while in this case, the most suitable number of horizontal columns was 5, and the streamwise spacing ratio was 4—6.

Key words: cooling turbine blades; heat transfer; triangular pyramids; horizontal columns; streamwise spacing ratio

航空发动机的热效率与涡轮前温度呈正相关,因此提高涡轮前温度是提高发动机性能的重要切入点。在提高涡轮叶片耐热性的常用方法中,改进叶片冷却结构有着更大的研究价值。要在使用尽量少的冷却气体,较少影响发动机整体性能的情况下,尽可能提高涡轮叶片的耐受温度,这就需要对叶片的不同冷却结构形式以及流动传热机理做深入研究,为结构的优化设计提供依据。典型的涡轮叶片内部布置有带扰流肋结构的通道,其流动与传热特性是较为广泛的研究课题。

Han 等^[1-4]提出静止通道的传热效果主要取决于扰流肋结构、通道宽高比以及流动雷诺数,并指出 45° 或 60° 的斜肋及 V 型肋的传热效果相比于直肋有明显提高。李建华等^[5]发现 V 型肋的传热效果好于直肋和斜肋。Ryu 等^[6-7]提出传热效果好的肋结构通常也会伴有较大的压损。迟重然等^[8]得出,相比于直肋, $60^\circ \sim 70^\circ$ 的斜肋会造成更强的旋涡结构,因而传热效果更好,但其压损也会更大。另外,流向间距也是影响流动和传热特性的因素之一。Webb 等^[9]发现在给定通道阻塞比时,流向间距比的增大使得总压损失与传热系数都会减小。韩绪军^[10]提出流向间距的改变会使得边界层的分离与再附出现不同,从而传热效果不同。Lei 等^[11]发现流向间距比为 10 时传热效果最好,同时压损也较小。周明轩等^[12]也发现,对于较高阻塞比的通道,流向间距比为 10 时的传热效果要好于流向间距比为 5 或 15。除此之外,也存在一些对新型扰流肋结构如三棱锥体的研究,Tiggelbeck 等^[13]发现通过在通道壁上放置三角形件或矩形件可以产生纵向涡。Biswas 等^[14]发现纵向涡的螺旋流既能使通道壁面流体和主流得到充分掺混,又能阻碍边界层的发展,从而得到较好的传热效果。Liou 等^[15]对比了斜肋、V 型肋以及三棱锥体群的传热效果,发现间断 V 型肋和三棱锥体群的传热效果最好。王龙飞^[16]也提到,三棱锥体群作为间断肋的一种变形,具有比斜肋更好的传热效果及更低的压损。可见,由于其出色的流动及传热特性,三棱锥体群结构能够为叶片内部通道的优化设计提供参考,具有很大的研究价值。

近年来针对传统扰流肋结构的研究已经形成一定的体系,而对三棱锥结构的流动及传热特性的研究相对欠缺,因此本文采用数值模拟的方式,对带三棱锥体群的静止通道进行了分析,重点研究了三棱锥体群在不同放置方式、不同横向列数及不同流向间距比时对通道的流动及传热特性的影响规律。

1 数值方法

1.1 模型与边界条件

本文选择文献[17]中试验所用的静止通道作为计算模型,如图 1 所示,通道宽 $W=50.8\text{ mm}$,高 $H=50.8\text{ mm}$,宽高比 $W/H=1$,水力直径 $D=50.8\text{ mm}$,均与文献[17]中保持一致。为减小入口和出口对通道内部流场的影响,共设置了入口

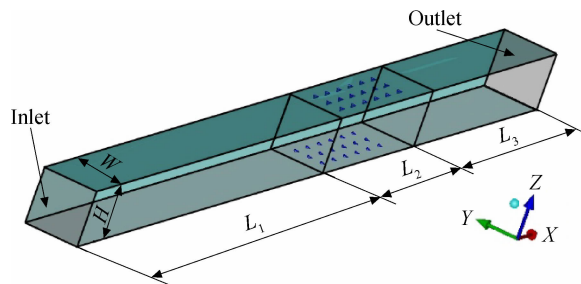


图 1 计算模型

Fig. 1 Computational model

段、试验段及出口段 3 部分,其中入口段 $L_1=10D=508\text{ mm}$,出口段 $L_3=5D=254\text{ mm}$ 。

试验段上下壁面各放置有 6 排三棱锥结构,其横向列数设为 n ,取值范围为 $1 \sim 6$,图 1 中 $n=3$ 。三棱锥结构的具体参数如图 2 所示,其中单个三棱锥的侧边 1 垂直于底面 2,长度 $e=2.38\text{ mm}$,阻塞比 $e/D=0.047$,与典型试验保持一致,底面 2 为等边三角形,边长 $c=2e=4.76\text{ mm}$ 。横向间距 $S=D/(n+1)$,流向间距为 P ,流向间距比 P/e 的初始值为 10,第 1 排三棱锥体距试验段入口距离为 P ,第 6 排距出口距离为 $2P$,试验段总长 $L_2=8P$ 。定义侧面 3 正对来流放置为迎风,反之为背风,前后两排插空放置为交错排列,前后对齐放置则为顺排,图中所示为迎风交错排列。另外选择传统肋结构中性能较好的 45° V 型肋作为对照方案,其阻塞比、流向间距等参数均与三棱锥体群保持一致。

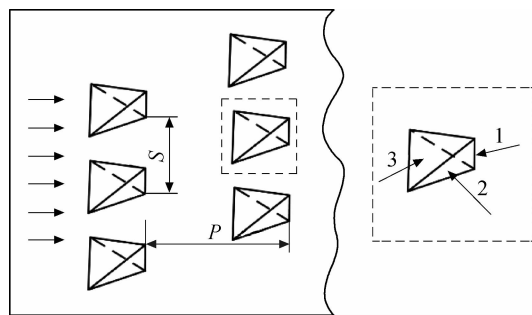


图 2 三棱锥体群

Fig. 2 Triangular pyramids

进口处边界条件采用速度进口,来流温度 $T_\infty=288\text{ K}$,湍流度为 5% ;出口设为压力出口,大小为 101325 Pa 。所有壁面无滑移,试验段壁面使用等热流密度加热,其余壁面均为绝热边界条件。

1.2 数据处理及数值计算方法

引入相对传热强化值 r_{Nu} 、相对压损增大值 z_f 来分别衡量不同方案的传热性能与总压损失,定

义如下:

$$r_{Nu} = \frac{Nu}{Nu_0} = \frac{hD/\lambda}{0.023Re^{0.8}Pr^{0.4}} \tag{1}$$

$$z_f = \frac{f}{f_0} = \frac{2\Delta p D/(L_2\rho_\infty V_\infty^2)}{0.316Re^{-0.25}} \tag{2}$$

式中 Nu 为努塞尔数, Nu_0 为具有相同水力直径光滑通道的平均努塞尔数^[18], h 为壁面传热系数, λ 为流体导热系数, Pr 为普朗特数, Re 为雷诺数, f 为达西摩擦因子, f_0 为相同水力直径光滑通道的达西摩擦因子, Δp 取试验段进出口的压力差; ρ_∞ 为来流密度, V_∞ 为来流速度。

引入均匀性指数 γ_{Nu} , 用以衡量努塞尔数在壁面分布的均匀程度, 定义为

$$\gamma_{Nu} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k [(|Nu_i - \overline{Nu}|) A_i]}{2|\overline{Nu}| \sum_{i=1}^k A_i} \tag{3}$$

式中 Nu_i 为每个网格单元的努塞尔数, $\overline{Nu}$ 为壁面平均努塞尔数, A_i 为单个网格面积, k 为网格数。

采用综合传热效率 η ^[19-20], 用以将传热增强和总压损失的影响综合考虑, 定义为

$$\eta = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} = \frac{r_{Nu}}{z_f^{1/3}} \tag{4}$$

采用 Fluent 分离隐式求解器进行稳态求解, 采用 semi-implicit method for pressure-linked equations(SIMPLE)算法, 差分格式均采用 2 阶精度。收敛的标准是各项残差精度均小于 10^{-5} , 试验段上下方壁面平均努塞尔数保持稳定且进出口流量相等。

1.3 湍流模型验证与网格独立性检验

选择文献[17]中的典型试验, 即 $Re=30\,000$ 时的直肋方案, 进行湍流模型的验证, 如图 3 所示。其中横坐标 X/D 表示基于通道水力直径的壁面无量纲流向长度, 纵坐标为按照试验中数据处理方法得到的 r_{Nu} 。可以发现 re-normalization group(RNG) $k-\epsilon$ 模型和试验值最为吻合, 变化趋势也趋于一致, 尤其是在第 3 排肋以后, 因此下文所有计算均采用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型。

为检验网格独立性, 选择 $n=3$ 的背风顺排三棱锥体群, 对其划分不同数量的结构化网格, 分别为 59 万、76 万、98 万、122 万、177 万以及 252 万。由于三棱锥体群存在较多的三角形面, 因此在划分网格时使用 Y-block 命令切分块, 122 万网格数划分如图 4 所示。

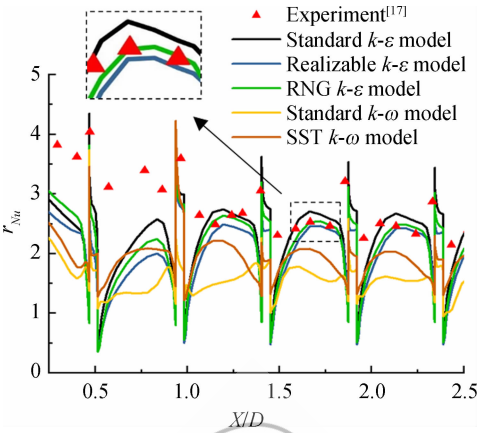


图 3 湍流模型验证
Fig. 3 Verification of turbulence model

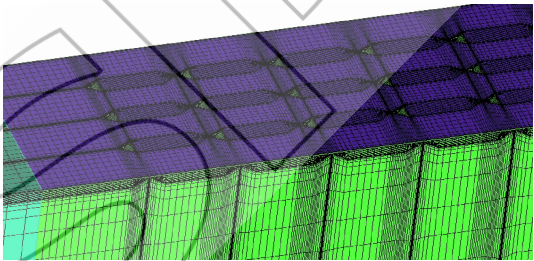


图 4 计算网格
Fig. 4 Computational grid

分别计算 $Re=30\,000$ 时不同网格数量下试验段上下壁面的平均努塞尔数 $\overline{Nu}$ 及达西摩擦因子 f , 如图 5 所示。可以看出网格数量在 100 万以上时计算结果受网格数量的影响已较小, 因此本文所有模型的网格均遵循此模型在 122 万网格时的划分及加密准则。

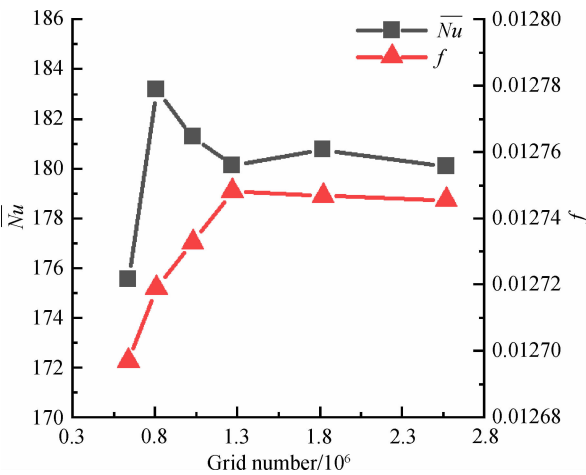


图 5 网格无关性验证
Fig. 5 Verification of grid independence

2 结果与讨论

2.1 迎风背风、顺排交错排列对流动和传热特性的影响

对流传热是叶片内部冷却通道传热的主要形式,其强化可通过涡旋的形成、边界层分离和再附着、流动扰动及湍流强化来实现^[21]。扰流肋能够产生涡旋,一方面由于其下洗剪切作用,能够造成附近流体流动边界层及热边界层的分离与再附着,被破坏的边界层以及再附着后重新发展的较薄边界层相对更有利于热量的传递;另一方面还使流体的掺混程度提高,促进了流体间质量和热量的传递,也能够改善传热效果。

下文对三棱锥体群在迎风背风、顺排交错排列时的流动及传热特性进行分析,45° V 型肋作为对照方案。各方案流向间距比 P/e 均为 10,三棱锥体群横向列数 n 取 3。

λ_2 准则则是第二代涡识别准则中应用较广泛的方法,其基本原理是将速度梯度张量 $\mathbf{V}$ 分解为代表流体变形的对称张量 $\mathbf{S}$ 以及代表旋转运动的反对称张量 $\mathbf{S}'$,之后计算出张量组合方程 $\mathbf{S}'^2 + \mathbf{S}^2$ 的 3 个特征值,并按照大小顺序排列为 λ_1 、 λ_2 及 λ_3 ,通过判断 λ_2 是否小于零来识别涡旋。不同 λ_2 的大小能够得到不同尺度的涡旋结构。在 $Re=30\,000$ 时,对不同方案进行 λ_2 准则涡识别后结果如图 6 所示,其中 λ_2 取 $-5\times 10^5\text{ s}^{-2}$,速度云图截面取 $Z=3\times 10^{-4}\text{ m}$,图示范围为第 3、4 排肋结构所在区域。可以看到,流体在流经单个三棱锥结构后会形成 1 对纵向涡,对称地分布在其后方,并沿流向向下延伸,而在流经 V 型肋后则会形成尺度较大的二次流,其延伸方向为由肋尖沿肋向两侧壁面,与主流呈现一定的夹角,有利于改善带肋壁面及侧壁面的传热效果,但也带来了更多的流动损失。

图 6 为 4 种旋转方案下的涡旋分布。分别将图 6(a)和图 6(c)、图 6(b)和图 6(d)进行对比,从涡旋分布来看,背风状态涡的尺度更大,流体与三棱锥前端的冲击更加猛烈,覆盖范围也更广,使得更大面积的边界层被破坏,也有利于流体的充分掺混。而从截面速度分布来看,背风状态三棱锥后方流体流速更高,能够在相同时间内带走更多热量,而迎风状态不仅整体流速小于背风状态,在三棱锥前方还出现了大面积低流速区域,这将不利于传热效果的改善。而分别将图 6(a)和图

6(b)、图 6(c)和图 6(d)进行对比可以发现,交错排列后涡的尺度明显减小,其截面流速整体变低,低流速区域面积也有所增加。总地来说,在三棱锥体群的 4 种放置方案中,迎风状态和交错排列均不利于改善其流动特性,而背风顺排无论是在纵向涡的尺度还是截面的速度分布上,均显著优于其余方案。

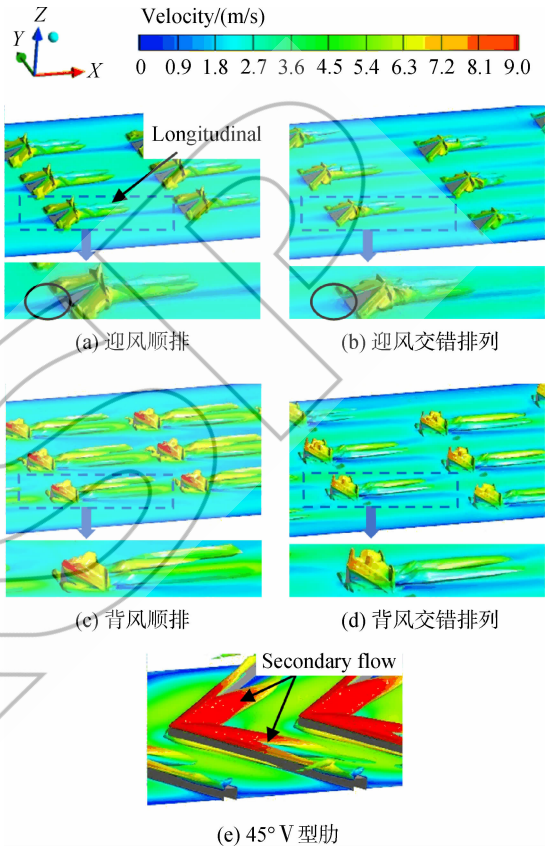


图 6 不同排列方式下涡旋分布

Fig. 6 Vortex distribution with different arrangements

图 7 给出了背风顺排三棱锥体群及 V 型肋的截面流线分布,截面位置取紧邻第 3 排肋结构后方,即 $X/D=1.5$ 处。可以看到,流体流经 V 型肋后发生了较明显的流动分离,在肋后方形成了低速回流区,这会导致紧靠肋后方区域的传热效果变差,也使得压损有所增加。而三棱锥体群所产生的纵向涡走向与主流一致,不仅能对流体起到扰动作用,还具有一定的导流作用,因而图 7(a)中可看出其后方并没有明显的回流区,这能极大减少流体的压损。

图 8 为 $Re=30\,000$ 时,各方案试验段下方壁面相对传热强化值 r_{Nu} 的分布云图。总体来看,与前文对流场的分析相对应,背风顺排三棱锥体群中代表传热效果较好的高 r_{Nu} 区域面积较大,且与

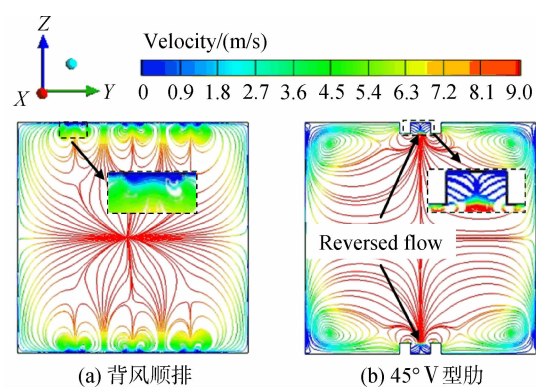


图 7 截面流线分布
Fig. 7 Streamlines distribution

V 型肋较为接近,但 V 型肋方案在紧靠肋后方处出现了回流所引起的低 r_{Nu} 区域。三棱锥体群各方案的高 r_{Nu} 区域均出现在单个三棱锥后方,呈条状分布,与纵向涡的分布规律相吻合,验证了纵向涡对传热效果的增强作用。分别对比图 8(a)和图 8(c)、图 8(b)和图 8(d),可以看出迎风状态三棱锥体群高 r_{Nu} 区域面积均小于对应的背风状态,且在其正前方存在低 r_{Nu} 区域,这也对应着速度截面图中的低流速区域,验证了较高流速对传热效果的增强作用。分别对比图 8(a)和图 8(b)、图 8(c)和图 8(d)可以看到,交错排列不利于传热效果的改善,迎风交错后低 r_{Nu} 区域有所增加,而背风交错后高 r_{Nu} 区域面积则有所减少。 r_{Nu} 分布不均匀易产生较大的温度梯度,使壁面产生热应力,因此其分布均匀性也是衡量传热效果的重要因素。从图中可以看出,迎风状态 r_{Nu} 分布的均匀性要明显优于背风状态,而交错排列对其影响则相对不明显,迎风状态交错后均匀性有所下降,而背风状态则有所上升。

从图 8 中还可看出,三棱锥体群对两侧壁面附近传热效果的改善不明显,尤其是背风状态,在下游处出现了较大面积条状低 r_{Nu} 区域,这是由于两侧壁面附近换热性能主要受肋诱导的二次流的影响^[16],三棱锥体群的导流作用阻碍了二次流的形成以及对侧壁上流体的扰动,而在 V 型肋扰流肋通道中,肋为贯穿式,具有较长的横向长度,有利于二次流的形成和移动,进而能够改善侧壁面的换热性能。

在涡轮叶片的内冷通道中,冷气流动的雷诺数通常在 10 000~50 000 之间,图 9 给出了各方案试验段上下方壁面相对传热强化值 $\overline{r_{Nu}}$ 及均匀性指数 γ_{Nu} 随雷诺数的变化趋势,用以量化衡量通道整体的传热效果。从图 9(a)可以看出,雷诺

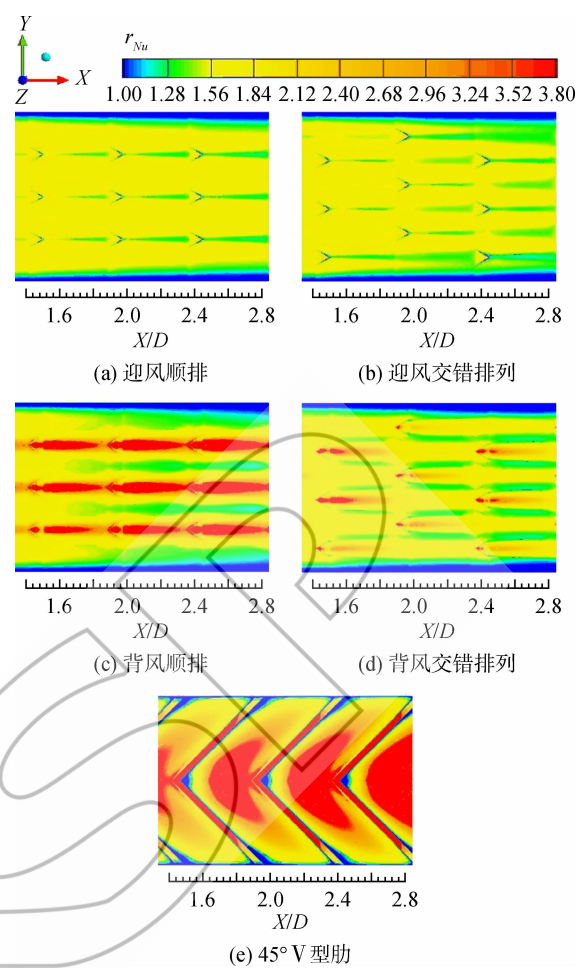


图 8 不同排列方式下 r_{Nu} 分布云图
Fig. 8 Contours of r_{Nu} with different arrangements

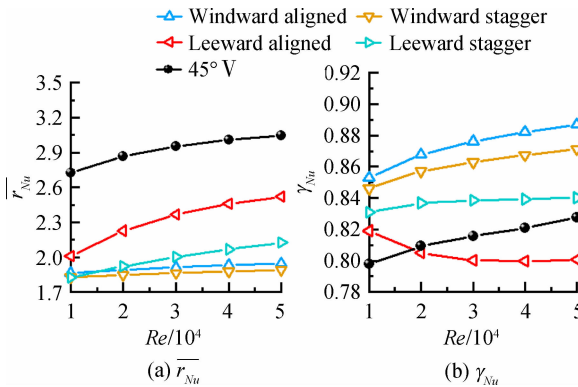


图 9 $\overline{r_{Nu}}$ 及 γ_{Nu} 随 Re 变化
Fig. 9 Variation of $\overline{r_{Nu}}$, γ_{Nu} with Re

数的增大增强了 V 型肋和背风状态三棱锥体群对壁面的传热改善能力,但各方案间的大小关系并未改变。对于三棱锥体群,与前文分析结果相一致,同一雷诺数下迎风状态时的整体传热效果均差于背风状态,且迎风状态增大雷诺数并不能显著改善其传热效果。另外,交错排列时的整体传

热效果均差于顺排状态,这也与 Sriromreun 等^[22]对顺排和交错排列的 Z 型肋结构所做研究得到的结论一致。就传热效果而言,背风顺排是最佳的三棱锥体群放置方案,但与 V 型肋相比仍有 25%~30% 的差距。从图 9(b)可以看到,与图 8 结论一致,迎风状态两种方案的 Nu 分布具有最好的均匀性,也要优于 V 型肋方案,且增大雷诺数能使其均匀性进一步提高。迎风状态交错排列会使均匀性降低,而背风状态交错排列则会使均匀性提高,背风顺排方案均匀性最差,且随雷诺数的增大没有明显改善。

图 10 为各方案相对压损增大值 z_f 及综合传热效率 η 随雷诺数的变化趋势。从图 10(a)可以看到, V 型肋方案的 z_f 显著大于三棱锥体群的 4 种方案,证明了纵向涡在减小压损方面的优势。与其较好的传热效果相对应,背风顺排方案的 z_f 稍大,而其余 3 种差距较小,其中迎风顺排与背风交错排列两种方案的差距在 5% 以内。随着雷诺数的增大,各方案的 z_f 均有所增大,但 V 型肋方案增幅更明显,表明其性能受雷诺数影响的不确定性,不利于其在高雷诺数工况下工作,而三棱锥体群 4 种方案压损的变化受雷诺数的影响则相对较小。

由图 10(b)可以看到,背风状态的 η 要高于对应的迎风状态,而交错排列后的 η 均低于对应的顺排方案。在中高雷诺数下背风顺排方案具有最高的 η ,较其他方案要高出 20%~30%,且随着雷诺数的增大逐渐升高并趋于稳定,表现出对雷诺数变化的较强适应性,而 V 型肋由于 z_f 随雷诺数增大增幅明显,其 η 呈下降趋势。

综合上述分析,相较于传统肋,在涡轮叶片冷却通道内布置背风顺排的三棱锥体群具有明显优势,其产生的纵向涡能够兼顾传热效果的改善和

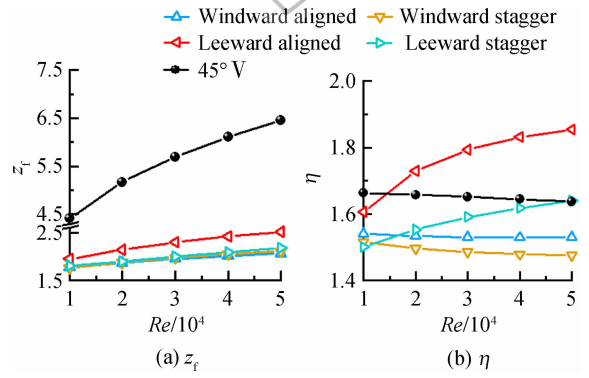


图 10 z_f 及 η 随 Re 变化
Fig. 10 Variation of z_f , η with Re

压损的降低,有着优异的综合传热效率,且能适应更加广泛的雷诺数范围,但该方案也有 Nu 分布均匀性相对较差的缺点。

2.2 横向列数、流向间距比对流动和传热特性的影响

根据文中第 2.1 节分析,本节各方案中三棱锥体群均采用背风顺排放置,首先在流向间距比 $P/e=10$ 时,选取横向列数 $n=2\sim6$ 的方案进行分析。

图 11(a)~图 11(c)分别为 $Re=30\,000$ 时, n 为 2、4、6 三种方案的试验段下壁面涡旋分布,速度云图截面取 $Z=3\times10^{-4}\text{ m}$,范围取第 3~6 排三棱锥结构所在区域。可以看到,随着列数增加,三棱锥体群的阻滞效应逐渐显现,流体流速明显减慢,纵向涡强度有所减小,对下游的冲击作用减弱,其扰流作用也随之减弱,这将在一定程度上抵消涡数量增加所带来的扰流作用的增强。

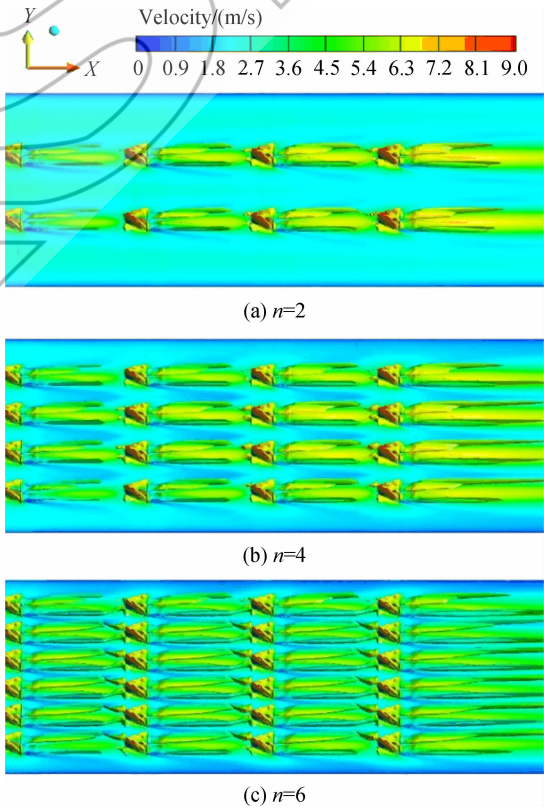


图 11 不同横向列数下涡旋分布
Fig. 11 Vortex distribution with different horizontal columns

图 12(a)~图 12(e)分别为 $Re=30\,000$ 时不同 n 取值方案下壁面 r_{Nu} 的分布云图。可以看到,当 $n<4$ 时, r_{Nu} 分布均匀性较差的现象仍较明显,每列三棱锥结构之间存在较大面积条状低 r_{Nu} 区域,与其后方的高 r_{Nu} 区域呈交错排列,而这种情

况在 $n > 4$ 后有较好改善,由于纵向涡数量较多,低 r_{Nu} 区域面积大幅度减小, r_{Nu} 分布均匀且规律。从高 r_{Nu} 区域的面积大小来看,较大的 n 对应着较大面积的高 r_{Nu} 区域,有利于整体传热效果的改善。从图中还可看出, n 较小时单个三棱锥后方的高 r_{Nu} 区域面积有沿流向增大的趋势,而 n 较大时则有沿流向减小的趋势,这也是由于列数增加带来的阻滞效应增大所引起。

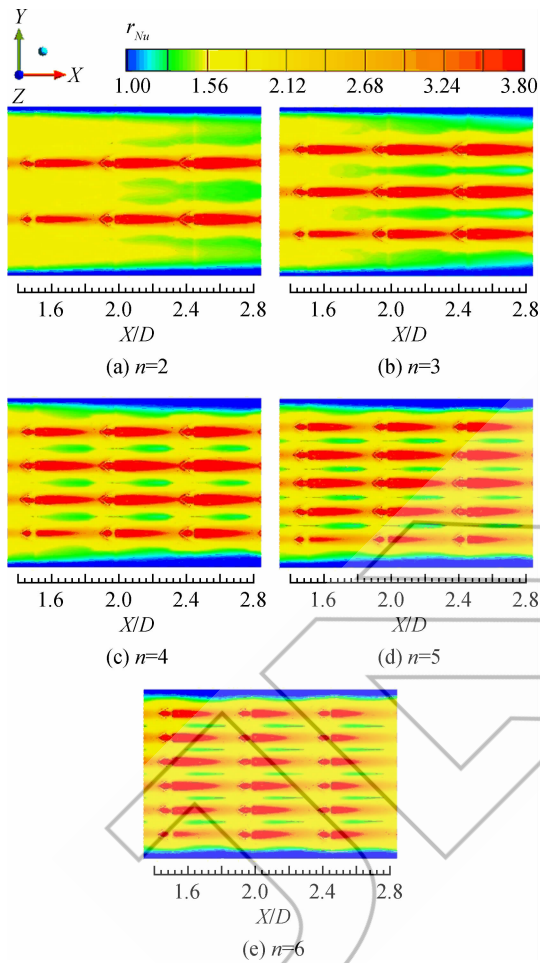


图 12 不同横向列数下 r_{Nu} 分布云图

Fig. 12 Contours of r_{Nu} with different horizontal columns

图 13 给出了 $Re = 30\,000$ 时各方案通道下方壁面 r_{Nu} 展向平均值 ($\overline{r_{Nu}}$) 的流向分布,以将 n 的取值对传热特性的影响做进一步的分析,图示范围取自第 4 排、第 5 排三棱锥结构附近。可以看到,不同方案 $\overline{r_{Nu}}$ 沿流向的变化规律基本一致,三棱锥的前端由于流体的剧烈冲击,有着最高的 $\overline{r_{Nu}}$,而后沿流向迅速降低,在肋后方区域先保持相对恒定,后随着涡强度的减小缓慢降低。

对图 13 进一步分析还可看出,与云图中反映出的规律一致,在 n 较小时 $\overline{r_{Nu}}$ 顺流向逐渐增大, n

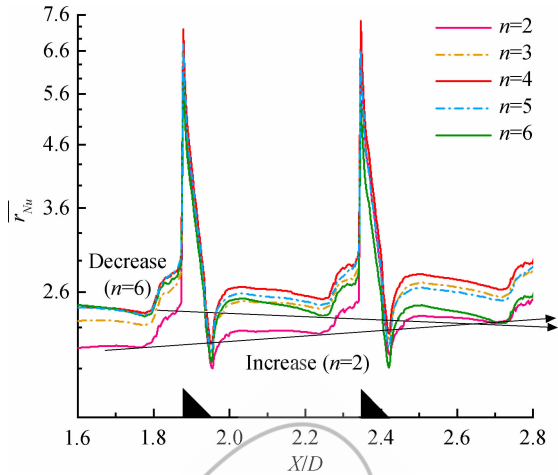


图 13 $\overline{r_{Nu}}$ 随 X/D 变化

Fig. 13 Variation of $\overline{r_{Nu}}$ with X/D

较大时则逐渐减小,当 $X/D > 2$ 时, $n = 6$ 方案的 $\overline{r_{Nu}}$ 要小于其余方案,且越往下游这种趋势越明显,说明其对 r_{Nu} 的提升主要集中在上游区域,相对不利于下游换热效果的改善,因而 n 不宜取得过大, n 为 4 和 5 方案的 r_{Nu} 始终保持较大值,且随顺流向变化不明显,为较优方案。

图 14(a)~图 14(d)为各方案 $\overline{r_{Nu}}$ 、 γ_{Nu} 、 z_f 及 η 随雷诺数的变化趋势图,仍取 $45^\circ V$ 型肋作为对照方案。可以看到随着雷诺数的增大,三棱锥体群各方案 $\overline{r_{Nu}}$ 、 z_f 均有所增大,增幅也比较接近,且各方案 $\overline{r_{Nu}}$ 增幅均大于 V 型肋, z_f 增幅则要小于 V

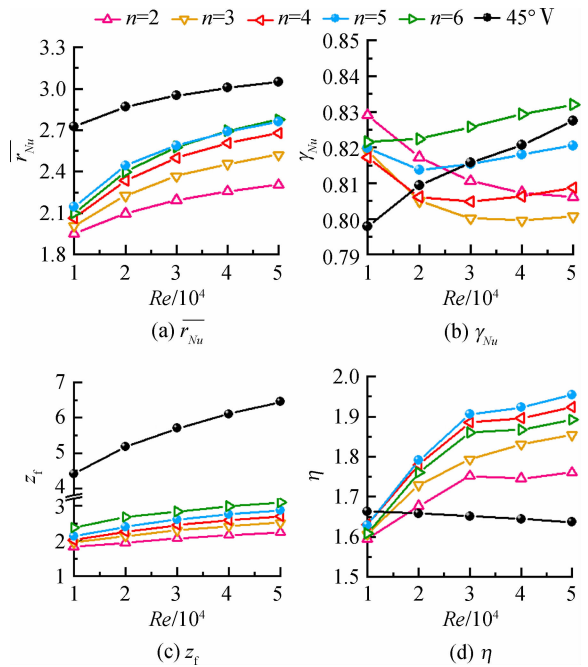


图 14 $\overline{r_{Nu}}$ 、 γ_{Nu} 、 z_f 及 η 随 Re 变化

Fig. 14 Variation of $\overline{r_{Nu}}$, γ_{Nu} , z_f , η with Re

型肋, γ_{Nu} 在 n 较小时变化仍不明显, 但 n 较大时会有所增大。在同一雷诺数下, 随着 n 增大, $\overline{r_{Nu}}$ 相应随之增大, 但增幅逐渐变缓, $n > 4$ 后会趋于稳定, γ_{Nu} 则有先减小后增大的趋势, 且在 $n=5$ 时达到了与 V 型肋相近的水平, z_f 的增大没有明显的变缓趋势, 较大的 n 会相应带来较大的压损。从综合传热效率来看, 三棱锥体群各方案在中高雷诺数下均表现优异, 随雷诺数增加呈先上升后稳定趋势, 在同一雷诺数下, 当 n 较小时, η 随 n 的增大而增大, 但当 n 大于 5 后, η 反而会减小, $n=5$ 时 η 达到最大值, 在 $Re=30\,000$ 时, 相比 V 型肋增大了 15%。

从上述分析可知, 当前参数下 $n=5$ 为较优方案, 既在一定程度上解决了 r_{Nu} 分布相对不均的问题, 也具有优异的综合传热效率, 但此时的分析仅考虑到 $P/e=10$ 一种间距比, 还需将不同间距比因素一同考虑, 进行进一步分析。

保持各参数不变, 设置不同大小的流向间距比 P/e , 取值范围为 3~16, 并分别在低中高雷诺数下对其综合传热效率进行计算, 所得结果如图 15(a)、图 15(b) 及图 15(c) 所示。可以看到较小的流向间距比有利于三棱锥体群 η 的提高, 随着流向间距比的增大, 绝大多数方案的 η 呈先增大后减小趋势, 且均在 $P/e=4$ 附近取到最大值, 注意到 $n=2$ 方案的 η 整体呈下降趋势, 但由于其 η 始终较小, 对较优方案的选择影响不大。另一方面, 流向间距比大小的改变对 n 取值的影响相对

较小, 在流向间距比很小时, $n=6$ 方案具有最高的 η , 其次为 $n=5$ 方案, 但两者差距非常小, 当流向间距比稍大时, 由于 $n=6$ 方案的 η 有明显的降低, $n=5$ 方案具有最高的 η , 当流向间距比大于 16 时, $n=4$ 方案具有最高的 η , 但此时各方案的 η 均较小, 相互之间的差距不太明显, 可以看到, 在较大的流向间距比范围内, $n=5$ 仍为较优方案。

图 16 为 $Re=30\,000$ 时三棱锥体群 $n=5$ 及 45°V 型肋两种方案 $\overline{r_{Nu}}$ 、 γ_{Nu} 、 z_f 、 η 随流向间距比的变化趋势图。整体来看, V 型肋的 $\overline{r_{Nu}}$ 随流向间距比增加呈先增大后略微减小趋势, 在 $P/e=6\sim 10$ 处取得最大值, 这也与已有研究结论相符。 γ_{Nu} 变化较小, 仅略有增大。 z_f 整体较大, 但随着流向间距比的增加有明显减小, 因此在中小流向间距比时其 η 低于三棱锥体群, 而在大流向间距比时则高于后者。三棱锥体群随流向间距比的增加 $\overline{r_{Nu}}$ 、 z_f 均有明显减小, γ_{Nu} 保持相对恒定, η 则呈先增大后减小趋势, 并在 $P/e=4$ 附近取得最大值, 这是由于与 V 型肋的二次流相比, 单个三棱锥体群产生的纵向涡尺度较小, 当流向间距比较大时, 涡的延伸长度不够, 流体的掺混程度降低, 也会有较长的流向距离使得被破坏的边界层完全形成, 使其 $\overline{r_{Nu}}$ 显著减小, η 也随之减小, 而当流向间距比很小时, z_f 又会显著增大, 也不利于 η 的提高。从图中还可以看出, 三棱锥体群的流动及传热特性受流向间距比的影响相对更明显, 尤其是在较大流向间距比时, 其 $\overline{r_{Nu}}$ 、 z_f 和 η 的变化量显著高于 V 型肋。

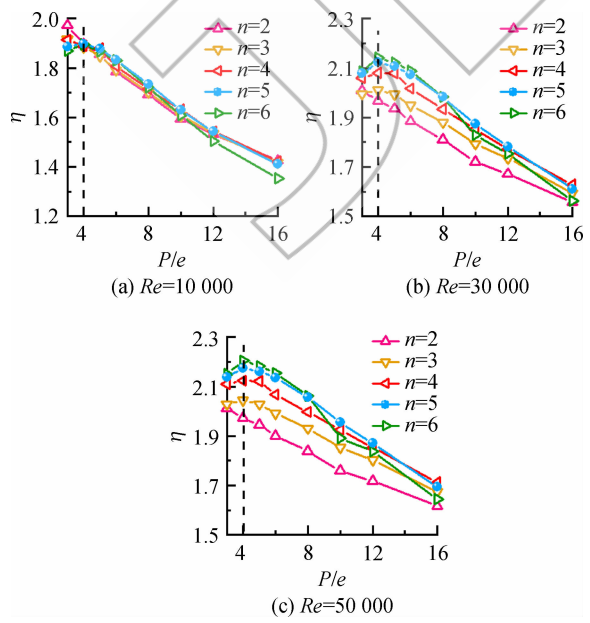


图 15 η 随 Re 、 P/e 、 n 变化

Fig. 15 Variation of η with Re , P/e , n

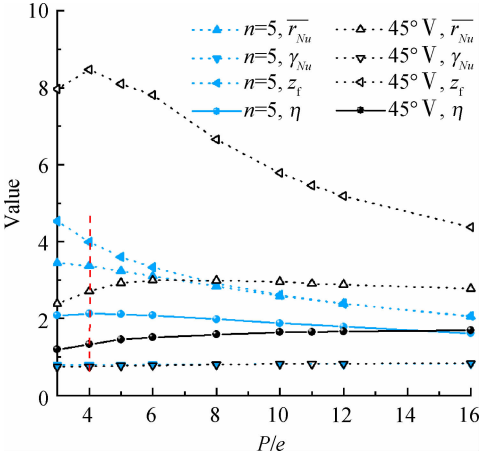


图 16 $\overline{r_{Nu}}$ 、 γ_{Nu} 、 z_f 及 η 随 P/e 变化

Fig. 16 Variation of $\overline{r_{Nu}}$, γ_{Nu} , z_f , η with P/e

3 结 论

本文通过数值模拟方法, 采用阻塞比 $e/D=$

0.047, 宽高比 $W/H=1$ 的静止通道, 研究了带三棱锥体群冷却通道流动和传热特点, 并对比了三棱锥体群在迎风背风、顺排交错排列以及不同横向列数、不同流向间距时对通道内部流动及传热特性的影响。主要得到以下结论:

1) 三棱锥体群通过产生顺流向的纵向涡, 既能极大减少总压损失, 也能够较好地改善传热效果。

2) 相比于其他 3 种放置方式, 背风顺排状态放置的三棱锥体群能产生尺度更大的纵向涡, 具有最优的综合传热效率, 较其他方案要高出 20%~30%。

3) 背风顺排状态时, 三棱锥体群流向间距比的改变对横向列数取值的影响不太明显, 但对其流动传热特性的影响较大, 较高的流向间距比会显著降低其综合传热效率。较优的横向列数为 5, 流向间距比为 4~6。

4) 相较于 45° V 型肋, 背风顺排的三棱锥体群在达到较为理想的换热效果的同时, 能显著地降低通道压损, 综合传热效率更高, 且能够适应更加宽泛的雷诺数区间, 在中高雷诺数时优势则更加明显。

参考文献:

- [1] HAN J C. Heat transfer and friction in channels with two opposite rib-roughened walls[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1984, 106(4): 774-781.
- [2] HAN J C, OU S, PARK J S, et al. Augmented heat transfer in rectangular channels of narrow aspect ratios with rib turbulators[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989, 32(9): 1619-1630.
- [3] HAN J C. Turbine blade cooling studies at Texas A&M University: 1980-2004[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2006, 20(2): 161-187.
- [4] HAN J C, ZHANG Y M. High performance heat transfer ducts with parallel broken and V-shaped broken ribs[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1992, 35(2): 513-523.
- [5] 李建华, 宋双文, 杨卫华, 等. 不同结构肋化通道对流传热特性的试验[J]. *航空动力学报*, 2007, 22(10): 1663-1666.
LI Jianhua, SONG Shuangwen, YANG Weihua, et al. Study of convective heat transfer in channels with different geometrical ribs[J]. *Journal of Aerospace Power*, 2007, 22(10): 1663-1666. (in Chinese)
- [6] RYU D N, CHOI D H, PATEL V C. Analysis of turbulent flow in channels roughened by two-dimensional ribs and three-dimensional blocks; Part I resistance[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007, 28(5): 1098-1111.

- [7] RYU D N, CHOI D H, PATEL V C. Analysis of turbulent flow in channels roughened by two-dimensional ribs and three-dimensional blocks; Part II heat transfer[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2007, 28(5): 1112-1124.
- [8] 迟重然, 任静, 蒋洪德. 燃机叶片平行肋扰流内冷通道传热特性研究 Part I: 流动传热机理[J]. *工程热物理学报*, 2013, 34(4): 624-627.
CHI Chongran, REN Jing, JIANG Hongde. Heat transferring of channels with repeated ribs in turbine blades Part I: mechanism of flow and convective heat transfer[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2013, 34(4): 624-627. (in Chinese)
- [9] WEBB R L, ECKERT E R G, GOLDSTEIN R J. Heat transfer and friction in tubes with repeated-rib roughness[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1971, 14(4): 601-617.
- [10] 韩绪军. 涡轮叶片冷却结构参数化及带肋通道优化设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.
HAN Xujun. Parametric expression of cooling structure of turbine blade and the optimization design of channels with ribs[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011. (in Chinese)
- [11] LEI J, HAN J C, HUH M. Effect of rib spacing on heat transfer in a two pass rectangular channel ($AR=2:1$) at high rotation numbers[J]. *Journal of Heat Transfer*, 2012, 134(9): 091901.1-091901.9.
- [12] 周明轩, 薛树林, 贺宜红, 等. 高阻塞比肋化通道对流传热特性实验研究[J]. *推进技术*, 2018, 39(2): 335-341.
ZHOU Mingxuan, XUE Shulin, HE Yihong, et al. Experimental investigation on convective heat transfer characteristics of high blockage ribs channel[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2018, 39(2): 335-341. (in Chinese)
- [13] TIGGELBECK S, MITRA N K, FIEBIG M. Comparison of wing-type vortex generators for heat transfer enhancement in channel flows[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1994, 116(4): 880-885.
- [14] BISWAS G, DEB P, BISWAS S. Generation of longitudinal streamwise vortices-a device for improving heat exchanger design[J]. *Journal of Heat Transfer*, 1994, 116(3): 588-597.
- [15] LIOU T M, CHEN C C, TSAI T W. Heat transfer and fluid flow in a square duct with 12 different shaped vortex generators[R]. ASME Paper 99-GT-255, 1999.
- [16] 王龙飞. 燃气涡轮叶片中新型扰流结构的传热和流动研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
WANG Longfei. Study on the heat transfer and flow characteristics of novel turbulence generators in gas turbine blades[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2018. (in Chinese)
- [17] HAN J C, PARK J S, IBRAHIM Y M. Measurement of heat transfer and pressure drop in rectangular channels with turbulence promoters[R]. NASA Report 4015, 1986.

[18] DITTUS F W,BOELTER L M K. University of California publications on engineering[M]. Davis, US: University of California Publications in Engineering,1930.

[19] GEE D L,WEBB R L. Forced convection heat transfer in helically rib-roughened tubes[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1980,23(8):1127-1136.

[20] WEBB R L. Performance evaluation criteria for use of enhanced heat transfer surfaces in heat exchanger design[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,1981,24(4):715-726.

[21] FIEBIG M. Vortices, generators and heat transfer[J]. Chemical Engineering Research and Design,1998,76(2): 108-123.

[22] SRIROMREUN P, THIANPONG C, PROMVONGE P. Experimental and numerical study on heat transfer enhancement in a channel with Z-shaped baffles[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer,2012, 39(7):945-952.

(编辑:陈 越)

