

X 型桁架阵列通道流动及传热性能的数值研究

席雷, 徐亮, 高建民, 赵振, 李云龙

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为提高涡轮叶片中弦区的冷却效果,提出了一种力学性能优异、导热和对流传热性能均优良的 X 型桁架阵列结构,并填充于叶片中弦区内冷通道之中。采用耦合传热数值方法开展了 X 型桁架阵列冷却通道的数值模拟研究,分析了雷诺数(Re 为 10 000~60 000)、桁架杆直径比(d/D 为 0.037 5~0.075)、桁架杆夹角(α 为 30°~60°)和桁架杆倾角(β 为 15°~45°)对 X 型桁架阵列通道流动和传热性能的影响规律,拟合得到了有关 X 型桁架阵列通道流动和传热性能的经验关联式。研究表明:X 型桁架通道的摩擦系数随雷诺数 Re 的增大以及桁架杆直径比 d/D 和夹角 α 的减小而降低,随倾角 β 的增大而先提高后又降低;在研究参数范围内,桁架杆表面平均努塞尔数大约是通道壁面平均努塞尔数的 2.32~4.41 倍;增大 Re 、 d/D 、 α 和 β 使得 X 型桁架阵列通道的整体平均努塞尔数有效提高;减小 Re 和 d/D 、增大 α 和 β ,使得 X 型桁架阵列通道的基于整体平均努塞尔数的综合热力系数有效提高。

关键词: 涡轮叶片;桁架阵列;冷却通道;流动;传热性能

中图分类号: TK47 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202108013 **文章编号:** 0253-987X(2021)08-0101-10



OSID 码

Numerical Research on Flow and Heat Transfer Performance of X-Type Truss Array Channels

XI Lei, XU Liang, GAO Jianmin, ZHAO Zhen, LI Yunlong

(State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: An X-type truss array structure with excellent mechanical properties, good heat conduction and convective heat transfer performance is proposed to improve the cooling effect in the central chord area of turbine blades and to be filled into the cooling channel in the central chord area of turbine blade. Numerical simulations of X-type truss array cooling channel are carried out by using the coupled heat transfer numerical method. The influences of Reynolds number (Re from 10 000 to 60 000), diameter ratios of truss rods (d/D from 0.037 5 to 0.075), intersection angles of truss rods (α from 30° to 60°) and inclination angles of truss rod (β from 15° to 45°) on the flow and heat transfer performance of X-type truss array channel are analyzed. The empirical correlations for the flow and heat transfer performance of X-type truss array channel are obtained by fitting. Results show that the friction coefficient of X-type truss array channel decreases with the increase of Reynolds number Re , and the decrease of diameter ratio d/D and intersection angle α , and increases first and then decreases with the increase of inclination angle β . Within the ranges of the study parameters, the average Nusselt number on the truss rod surfaces

is about 2.32 to 4.41 times of that on the channel walls; Increasing Re , d/D , α and β effectively increases the overall average Nusselt number of X-type truss array channel. Reducing Re and d/D and increasing α and β effectively increase the comprehensive thermal coefficients based on the overall average Nusselt number of X-type truss array channel.

Keywords: turbine blade; truss array; cooling channel; flow; heat transfer performance

随着未来先进燃气轮机性能的不断提高,涡轮叶片的冷却技术和结构强度将面临着更大的挑战^[1]。为保证燃气轮机涡轮叶片的安全可靠运行,亟需研究既能提高叶片冷却效率,又能提升叶片结构强度的新型冷却方式。

桁架单元是近年来出现的一种多功能结构拓扑优化下产生的性能优异的构型,其典型形式有四面体、金字塔和 Kagome 等^[2]。桁架单元通过周期性地阵列布置而组成桁架阵列结构,文献表明桁架阵列结构具有高比强度、高比刚度等优异机械力学性能^[3-4]以及优良的导热和对流传热性能^[5]。如果将桁架阵列结构应用于涡轮叶片内部冷却之中,定能够在增强叶片强度的同时有效地提高叶片的冷却效率。

目前,一些学者开展了有关桁架阵列通道流动及传热性能的研究。Kim 等对 Kagome 型桁架阵列结构的压力损失和传热特性进行了实验和数值研究^[6-7]。Lu 等综述了具有承载和主动冷却能力的周期性桁架阵列芯体的金属夹层结构的热特性^[8]。Wadley 等通过研究指出,桁架阵列结构的传热能力是金属泡沫材料的 3 倍^[9]。Joo 等指出,编织 Kagome 桁架阵列夹芯结构的传热系数主要受到开口面积比的影响^[10]。Shen 等研究指出在相同的压力损失下,单层 Kagome 桁架阵列夹芯板的传热系数较金属丝编织 Kagome 夹芯板提高了 26%~31%^[11]。Wei 等研究得到了不同温度下四面体桁架阵列结构的等效导热系数^[12]。Son 等研究指出,四面体桁架阵列结构相比于金属泡沫材料具有更高的孔隙率和更低的压降^[13]。Yan 等数值研究了一种连续型 X 型桁架结构的流动及传热特性,并将其应用于汽车刹车盘的散热之中^[14]。高亮等研究指出,桁架杆周围所形成的多种局部涡旋流动是实现高主动传热效率的主要机制^[15]。然而,有关桁架阵列结构在涡轮叶片冷却技术方面的应用研究几乎空白。因此,亟需研究涡轮叶片尺度和工况下内部填充桁架阵列结构的冷却通道的流动、传热机理及特性,探索工况和结构参数对涡轮叶片桁架阵列通道冷却性能的影响规律。

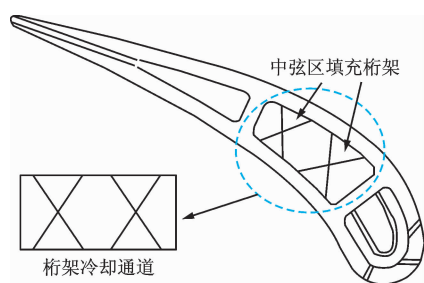
本课题组对某重型燃机涡轮叶片开展了实验和

数值研究^[16-17]。为提高该叶片中弦区的结构强度和冷却效果,本课题组提出将新型的 X 型桁架阵列结构填充于该叶片中弦区内冷通道之中,并开展了 X 型桁架通道机械性能的优化研究^[18]。本文将通过数值模拟的方法研究 X 型桁架阵列冷却通道的流动及传热特性。首先建立内部填充 X 型桁架阵列结构的矩形冷却通道;接着分析了雷诺数、桁架杆直径比、桁架杆夹角和桁架杆倾角对该通道流动和传热性能的影响规律;最后拟合得到了相关的经验关联式。

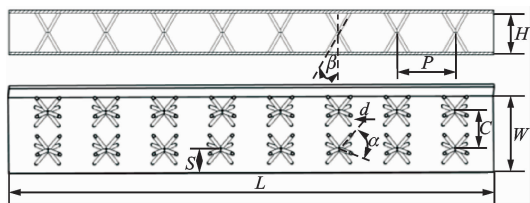
1 数值方法

1.1 研究对象

本文以某重型燃机涡轮叶片为研究对象,如图 1a 所示,该叶片中弦区的宽高比约为 2。为方便研究,将其中弦区内冷通道模化为宽高比为 2 的矩形通道,并填充 X 型桁架阵列,形成 X 型桁架冷却通道。图 1b 给出了模化后的 X 型桁架冷却通道的结构示意图。通道及桁架的材质为 304 不锈钢。通道壁厚 δ 为 3 mm,长度 L 为 500 mm,宽度 W 和高度 H 分别为 80 mm 和 40 mm。在通道 W 侧的两个对



(a) 桁架冷却通道的模化



(b) 桁架冷却通道结构图

图 1 研究对象

Fig. 1 Research objects

应壁面上等间距布置了2列8排X型桁架,2列X型桁架沿通道中心线对称分布,列间距 $C=40\text{ mm}$ ($C/D=0.75$),2列X型桁架中心距离两侧通道壁面的距离 S 均为 20 mm 。X型桁架阵列的排间距 $P=60\text{ mm}$ ($P/D=1.125$),第1排X型桁架与通道入口的距离和第8排X型桁架与通道出口的距离均为 40 mm 。研究的基础参数; Re 为 $30\ 000$,桁架杆直径 d 为 3 mm ($d/D=0.056\ 3$),与文献[17]中肋片高度 2.5 mm 接近,桁架杆夹角 α 为 45° ,桁架杆倾角 β 为 30° 。在此基础上,各参数的变化范围为 $Re=10\ 000\sim 60\ 000$, $d/D=0.037\ 5\sim 0.075$, $\alpha=30^\circ\sim 60^\circ$, $\beta=15^\circ\sim 45^\circ$ 。

1.2 计算方法及边界条件

采用耦合传热数值方法开展研究,数值模型如图2所示,冷却工质为空气。将流体域与固体域的交界面设置为耦合面,该耦合面两侧具有相同的热通量和温度。流体域被假设为三维、定常、无重力的流动,采用基于有限元的有限差分法来离散控制方程,通过CFX求解三维可压缩的雷诺时均N-S方程,方程中的扩散项、源项和对流项均采用高精度的离散格式进行离散。固体域只求解导热方程。数值模拟的整体残差水平设置为 10^{-6} 。为防止回流影响,在通道进、出口各延长了 200 mm 的整流段。

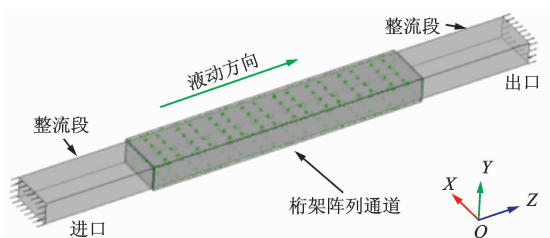


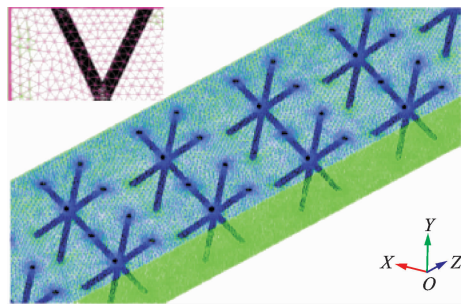
图2 数值模型

Fig. 2 Numerical model

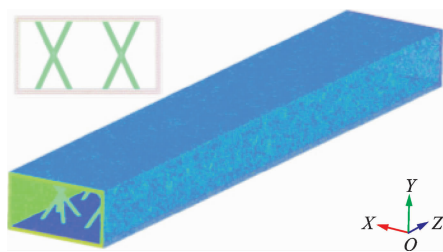
根据本课题组前期有关带肋通道耦合传热的研究^[17]可知,在标准 $k-\epsilon$ 、 $k-\omega$ 和SST $k-\omega$ 等3种常用的湍流模型中,SST $k-\omega$ 湍流模型对带肋通道传热性能的预测精度最高,与实验数据最吻合。对于与桁架类似的柱肋冷却,Li等使用RKE $k-\epsilon$ 、RNG $k-\epsilon$ 、SST $k-\omega$ 、BSL $k-\omega$ 、EARS $k-\omega$ 和V2F等6种湍流模型评估了窄通道内柱肋阵列冷却的流动和传热特性,指出SST $k-\omega$ 湍流模型对通道内柱肋阵列冷却的流动和传热变化做出了最准确、最全面的预测^[19]。对于桁架阵列冷却通道,文献[11-13]均表明,SST $k-\omega$ 湍流模型能够较其他湍流模型更准确地预测桁架阵列通道的传热性能。因此本文针对桁

架阵列通道的耦合传热数值模拟也采用了SST $k-\omega$ 湍流模型。

图3所示为桁架阵列通道的网格模型示意图。为适应SST $k-\omega$ 模型,对流体域近壁面棱柱体网格进行了细化处理,其中,近壁面第一层网格尺寸为 0.001 mm ,网格增长率为 1.2 ,边界层的层数为 15 。固体域和流体域中桁架及其邻近区域也都进行了网格细化处理,并对流固交界面上的网格节点进行了匹配,以减少传递误差。此外,网格无关性验证表明总网格数达 7.83×10^6 时可以满足要求。



(a) 流体域网格



(b) 固体域

图3 X型桁架通道网格模型

Fig. 3 The grid model for X-type truss array channel

计算边界条件与文献[17]中带肋通道计算时的边界条件相同,具体如下:流体域进口给定总压 0.3 MPa ,总温 446 K ,法向均匀进气,进口端流度为 5% 。出口根据 Re 数给定相应的质量流量。固体域外壁面给定等热流密度为 $3\ 000\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

1.3 数据处理

通道入口雷诺数的计算式可以表示为

$$Re = uD/\nu \quad (1)$$

式中: u 和 ν 为通道进口冷气平均速度和运动黏度。

当地努塞尔数的计算式可以表示为

$$Nu = qD/[(T_w - T_f)\lambda] \quad (2)$$

式中: T_w 为流固交界面当地温度; T_f 为参考温度,通过通道进出口平均温度线性插值得出; q 为流固交界面当地热流密度; λ 为空气的导热系数。

平均努塞尔数可以表示为

$$Nu_a = qD / [(T_a - T_f)\lambda] \quad (3)$$

式中: T_a 为通道壁面或桁架杆表面的平均温度, 单位为 K。

摩擦系数 f 可以表示为

$$f = \Delta p D / (2\rho L u^2) \quad (4)$$

式中: Δp 为通道进出口压差; ρ 为冷气密度。

通过综合热力性能系数 F 来衡量 X 型桁架阵列冷却通道的综合热力性能, 其计算式如下

$$F = (Nu_a / Nu_0) / (f / f_0)^{1/3} \quad (5)$$

式中: Nu_0 和 f_0 为光滑圆管的努塞尔数和摩擦系数

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (6)$$

$$f_0 = (1.58 \ln Re - 3.28)^{-2} \quad (7)$$

1.4 数值方法验证

图 4 给出了桁架阵列通道壁面 Nu_a 的计算结果与文献[20]中实验数据的对比, 桁架类型为 Kagome。由图可见, 数值结果和实验结果得到的通道壁面 Nu_a 随 Re 的变化趋势基本一致。同时, 数值预测的通道壁面 Nu_a 值与实验值很接近, 误差在 8% 以内, 说明了 SST $k-\omega$ 模型可以较为准确地模拟桁架阵列通道中的传热情况。综上, 本文有关桁架阵列通道流动和传热特性研究的数值方法是可靠的。

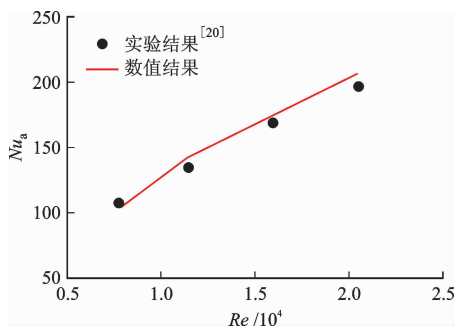


图 4 数值方法验证

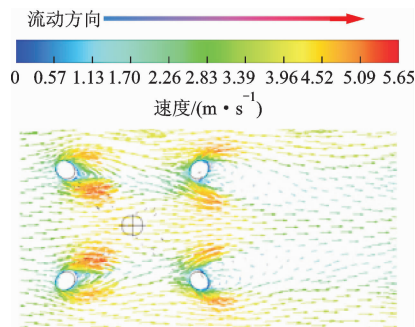
Fig. 4 Validation of numerical method

2 结果分析与讨论

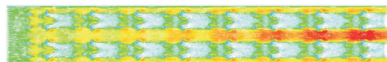
2.1 流动与传热特性

图 5 给出了基础参数下 X 型桁架阵列通道近壁面处的流场分布。从图 5a 中可以看出, X 型桁架单元的四个桁架杆周围都形成了马蹄涡和尾流。由于桁架杆的阻挡作用, 每个桁架杆正后方流体的速度变小, 两侧流体的流速迅速增大, 进而导致了 X 型桁架下游的流体速度较低, 两侧的流速较大。从图 5b 中可以看出, 通道内的流场特征在通道宽度方向上对称分布, 而沿流向具有周期性的分布, 即每排 X 型桁架单元处的流动特征相似。此外还可以发

现, 每个 X 型桁架单元两侧的流体速度较大, 导致通道中心区域沿流动方向形成了一条高流速带, 通道中靠近壁面的两侧也各形成了一条较窄的高流速带。



(a) 近壁面局部流场特性

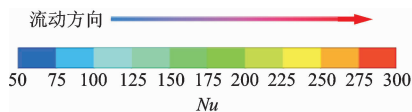


(b) 近壁面整体流场特性

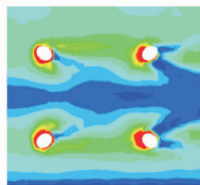
图 5 流场分布特性

Fig. 5 Distribution characteristics of flow field

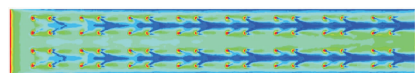
图 6 给出了基础参数下 X 型桁架单元表面以及通道壁面当地 Nu 分布。对于桁架单元表面, 如图 6a 所示, 桁架杆迎风面由于受到冷却流体的直接冲刷而具有很高的 Nu ; 背风面由于受到尾流的影响而传热迅速变差。对于通道壁面, 如图 6b 所示, 桁架杆端部周围的通道壁面当地 Nu 很高, 桁架杆端部下游以及桁架杆两侧通道壁面的当地 Nu 也较高, 这是由于桁架杆周围形成了马蹄涡和尾流而引起的; 而桁架单元中部区域的当地 Nu 较低, 这可能是因为桁架单元对冷气的阻碍作用所造成的。从图 6c 中可以看出, 在沿主流流向上, 由于入口效应通道壁面靠近入口处的 Nu 较高, 随着流动的发展, 流



(a) 桁架杆表面传热



(b) 通道内壁面局部传热



(c) 通道内壁面整体传热

图 6 通道壁面当地 Nu 分布特性

Fig. 6 Distribution characteristics of local Nu of channel wall

动边界层和热边界层逐渐生长变厚,使得壁面 Nu 逐渐降低。随后,由于 X 型桁架阵列的扰流作用,桁架杆周围区域的 Nu 较高。之后从第 3 排桁架开始,通道壁面当地 Nu 进入了周期性的相似分布。此外,由于桁架单元中部区域的传热较差,壁面上每列 X 型桁架中心处会形成一条低传热区域带。在通道宽度方向上,壁面当地 Nu 沿壁面中心线呈现出对称分布。壁面中心区域在两列 X 型桁架的相互作用下传热较好,而桁架杆到壁面边缘传热逐渐变差。

2.2 雷诺数的影响

图 7 所示为不同 Re 时 X 型桁架阵列通道内近壁面流场分布和当地努塞尔数分布,可以看出,随着 Re 的增大,近壁面上高流速区域明显增大,冷却流体扫掠桁架杆的流动更加剧烈。因此,雷诺数的增大会带来更多的压力损失。此外,随着 Re 的增大,通道壁面及桁架杆表面的当地努塞尔数均明显增大。这是因为 Re 的增大提高了冷却流体的流速和湍流度,增强了桁架杆的扰流作用,使得通道壁面和桁架杆表面的传热都得到了有效的强化。同时还可发现, Re 的增大使得通道壁面的传热均匀性变差,桁架杆表面的传热均匀性变好。

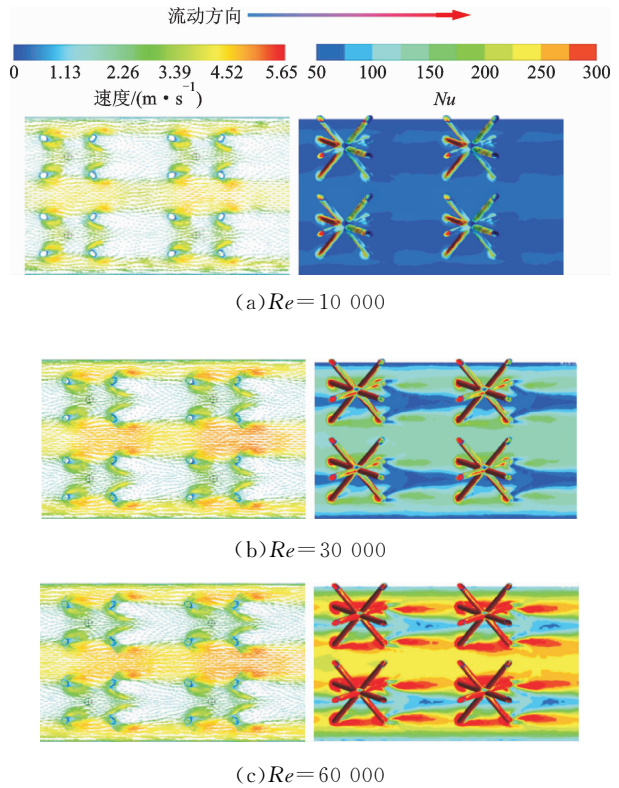


图 7 不同雷诺数时通道内流场及 Nu 分布
Fig. 7 Distributions of flow field and Nu in the channel with different Reynolds number

图 8 给出了 Re 的变化对 X 型桁架阵列通道摩擦系数、努塞尔数和综合热力系数的影响规律。为方便分析,本文将 X 型桁架杆表面的努塞尔数和通道壁面的努塞尔数进行面积加权平均,计算得出通道的整体平均努塞尔数,用于表征通道的整体平均传热系数。从图 8a 中可以看出,随着 Re 的增大,通道摩擦系数逐渐降低,且降幅放缓。 Re 为 60 000 时通道的摩擦系数较 Re 为 10 000 降低了约 26.99%。从图 8b 中可以看出,在所有研究案例中,桁架杆表面 Nu_a 都明显高于通道壁面 Nu_a ,具体来讲,桁架杆表面 Nu_a 大约是通道壁面 Nu_a 的 2.32~4.41 倍。当 Re 从 10 000 增大至 60 000 时,通道壁面 Nu_a 、桁架杆表面 Nu_a 和通道整体 Nu_a 分别提高了

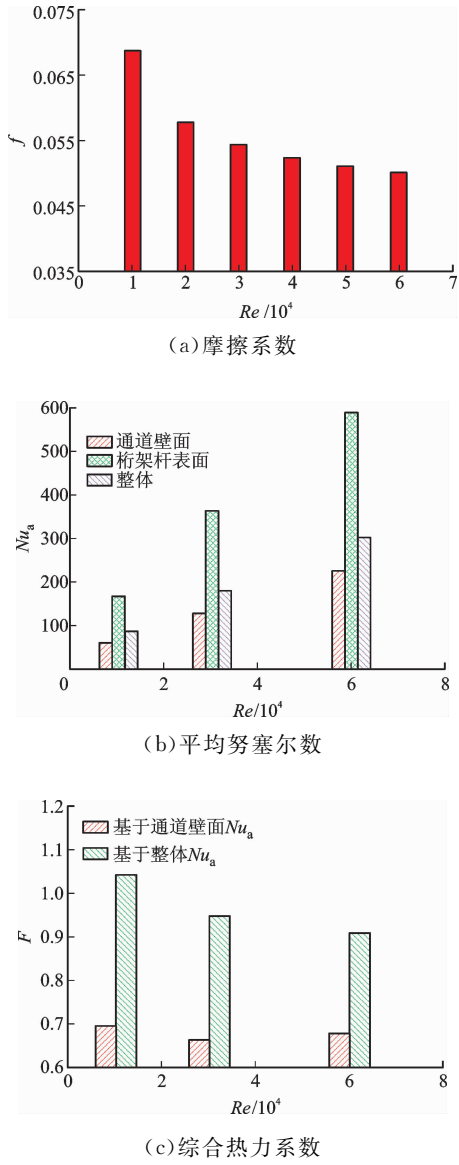
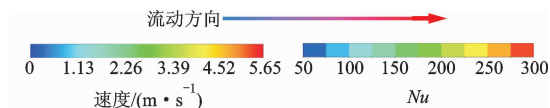


图 8 雷诺数对通道内流动及传热性能的影响
Fig. 8 Effects of Reynolds number to the cooling performance of the channel ($Re=30\,000$)

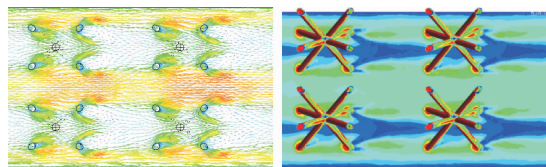
3.26、2.68 和 2.81 倍。从图 8c 中可以发现, Re 的增大使得基于通道壁面 Nu_a 的通道综合热力系数先减小后又增大, 而使得基于通道整体 Nu_a 的综合热力性能系数明显地降低; 当 Re 从 60 000 减小至 10 000 时, 基于通道整体 Nu_a 计算的综合热力系数提高了 15.11%。

2.3 桁架杆直径比的影响

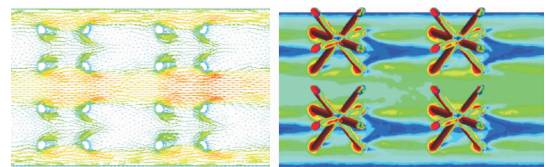
图 9 所示为不同 d/D 时 X 型桁架阵列通道内近壁面流场分布和当地努塞尔数分布。从图 9 中可以发现, 随着 d/D 的增大, 近壁面上桁架杆周围会形成更大的马蹄涡, 桁架杆两侧的流体速度也明显有所提高, 加剧了桁架杆对通道内流体的扰流作用。从图 9 中还可以发现, 随着 d/D 的增大, 通道壁面当地努塞尔数明显提高, 尤其是每根桁架杆下游区域以及两列 X 型桁架之间的区域。 d/D 的增大也增加了通道壁面传热的不均匀性。此外, 桁架杆表面的当地努塞尔数随着 d/D 的增加略微减小。



(a) $d/D=0.0375$



(b) $d/D=0.0635$

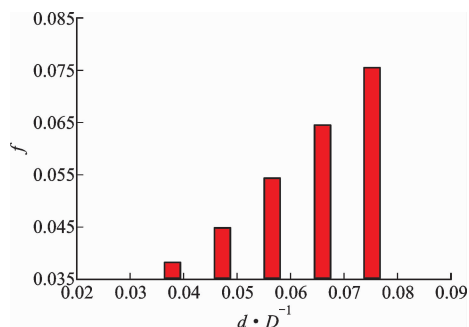


(c) $d/D=0.0750$

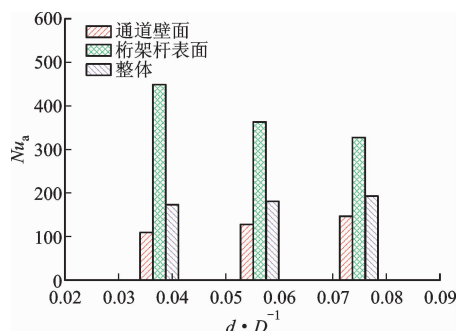
图 9 不同 d/D 时流场及 Nu 分布 ($Re=30\ 000$)

Fig. 9 Distributions of flow field and Nu with different d/D ($Re=30\ 000$)

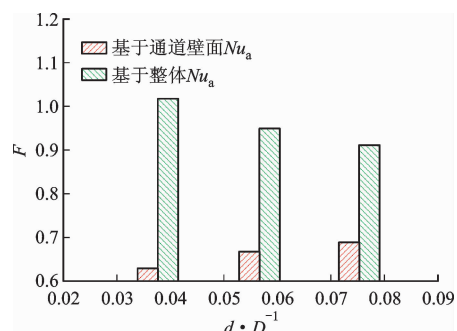
图 10 给出了 d/D 的变化对 X 型桁架阵列通道摩擦系数、努塞尔数和综合热力系数的影响规律。由图 10a 可看出, 随着 d/D 的增大, 通道摩擦系数逐渐增大。当 d/D 从 0.037 5 增大至 0.075 0 时, 通



(a) 摩擦系数



(b) 平均努塞尔数



(c) 综合热力系数

图 10 d/D 对通道冷却性能的影响 ($Re=30\ 000$)

Fig. 10 Effects of d/D to the cooling performance of the channel ($Re=30\ 000$)

道摩擦系数增大了 97.44%。由图 10b 可知, 增大 d/D 使得桁架杆表面 Nu_a 降低, 通道壁面 Nu_a 和通道整体 Nu_a 提高; 这是因为增大 d/D 一方面增强了桁架杆端部的扰流作用, 另一方面增加了桁架杆有效传热面积, 因此提高了通道整体传热效果。当 d/D 从 0.037 5 增大到 0.075 0 时, 通道壁面 Nu_a 和整体 Nu_a 分别增大了 37.71% 和 11.92%, 桁架杆表面 Nu_a 降低了 27.36%。由图 10c 可知, d/D 的增大提高了基于通道壁面 Nu_a 的综合热力系数, 而降低了基于通道整体 Nu_a 的综合热力系数; 当 d/D 从 0.075 减小到 0.037 5 时, 基于通道整体 Nu_a 的综合热力系数提高了 12.09%。

2.4 夹角 α 的影响

图 11 所示为不同夹角 α 时 X 型桁架阵列通道内近壁面流场分布和当地努塞尔数分布。从图 11 中可以发现,随着 α 的增大,通道内近壁面的高流速区域明显减小。同时,由于 α 的增大,桁架杆端部的椭圆形截面的长轴变大,进而导致桁架杆周围形成更大的马蹄涡。从图 11 中还可以发现,随着 α 的增大,通道壁面以及桁架杆表面的当地努塞尔数都有所增加,这是因为 α 的增大使得桁架杆变长、扰流作用增大,强化了通道内壁面的传热。桁架杆下游区域当地努塞尔数的增加最为明显,这是由于 α 的增大增加了桁架杆端部椭圆形截面长轴的长度,在桁架杆周围引起了更大的马蹄涡所造成的。

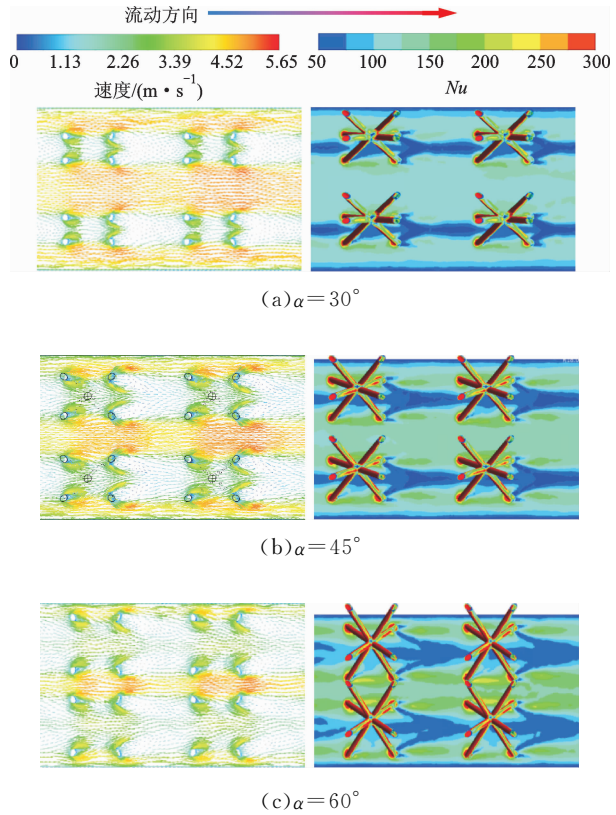


图 11 不同夹角 α 时流场及 Nu 分布 ($Re=30\ 000$)
Fig. 11 Distributions of flow field and Nu with different α ($Re=30\ 000$)

图 12 给出了夹角 α 的变化对 X 型桁架阵列通道摩擦系数、努塞尔数和综合热力系数的影响规律。从图 12a 中可以看出, α 的增大会增加通道摩擦系数。这是因为 α 的增大使得桁架杆变得更长,且桁架杆向通道宽度方向更加倾斜,增大了通道的阻塞面积,同时桁架的扰流作用更强,从而导致更大的摩擦损失。当 α 从 30° 增大到 60° 时,通道摩擦系数增大了 28.09%。从图 12b 中看出, α 的增大使得桁架

杆表面 Nu_a 、通道壁面 Nu_a 和通道整体 Nu_a 都得到提高。当 α 从 30° 增大到 60° 时,通道的整体 Nu_a 提高了 23.31%,桁架杆表面 Nu_a 提高了 22.69%,而通道壁面 Nu_a 的变化很小。从图 12c 中可以看出, α 的增大可以有效地提高基于通道整体 Nu_a 的综合热力系数,但使得基于通道壁面 Nu_a 的综合热力系数先提高后又降低;经计算,当 α 从 30° 增大到 60° 时,基于通道整体 Nu_a 的综合热力系数提高了 13.54%。

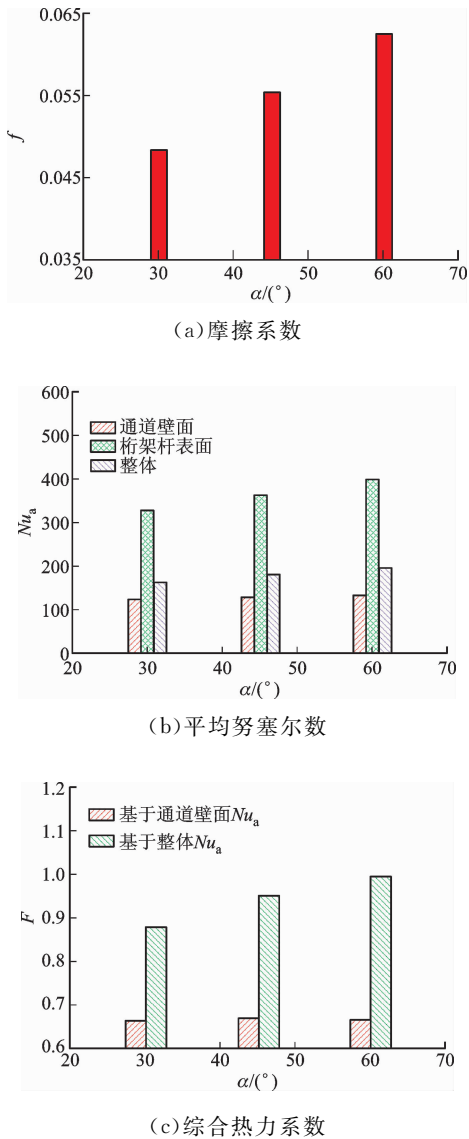


图 12 夹角 α 对通道冷却性能的影响 ($Re=30\ 000$)
Fig. 12 Effects of α to the cooling performance of the channel ($Re=30\ 000$)

2.5 倾角 β 的影响

图 13 所示为不同倾角 β 时 X 型桁架阵列通道内近壁面流场分布和当地努塞尔数分布。由图 13 发现,随着 β 的增大,通道内近壁面上的高流速区域

先增加后又减小,桁架杆周围形成的马蹄涡也先增大后减小。随着 β 的增大,通道壁面以及桁架杆表面的当地努塞尔数均有所提高,这是因为 β 的增大使得桁架杆变长,增强了桁架杆对冷却流体的扰动作用,同时也增大了通道内的有效传热面积,进而提高了通道壁面及桁架杆表面的传热效果。

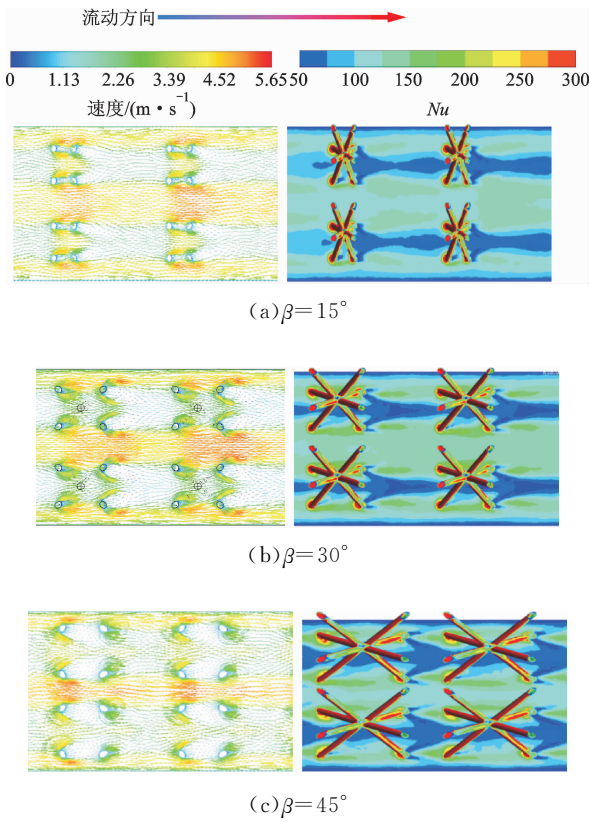


图 13 不同倾角 β 时流场及 Nu 分布 ($Re=30\ 000$)
Fig. 13 Distributions of flow field and Nu with different β ($Re=30\ 000$)

图 14 给出了 β 的变化对 X 型桁架阵列通道摩擦系数、努塞尔数和综合热力系数的影响规律。由图 14a 可以看出,通道摩擦系数随着 β 的增大先增大后减小, β 为 30° 时通道摩擦系数较 β 为 15° 和 45° 时分别增大了 12.45% 和 2.03%。这可能是以下两方面原因的综合结果:一方面,随着 β 的增大,桁架杆的长度增加,通道的阻塞面积增大,导致通道摩擦系数增大;另一方面, β 的增大使得 X 型桁架杆沿流动方向更加倾斜,即桁架杆和主流流向更加趋于一致,这种桁架杆的顺流趋势又导致了通道内摩擦损失的减少。因此,综合以上两种原因, β 的增大使得通道摩擦系数先提高后又降低。由图 14b 可以看出, β 的增大使得桁架杆表面 Nu_a 和通道整体 Nu_a 得到提高,使得通道壁面 Nu_a 先增大后减小。当 β 从 15° 增大到 45° 时,通道的整体 Nu_a 提高了 26.45%,

桁架杆表面 Nu_a 提高了 11.46%,而通道壁面 Nu_a 的变化很小。由图 14c 可知,当 β 从 15° 增大到 45° 时,基于通道整体 Nu_a 的综合热力系数提高了 22.42%,但基于通道壁面 Nu_a 的综合热力系数先提高后又降低。

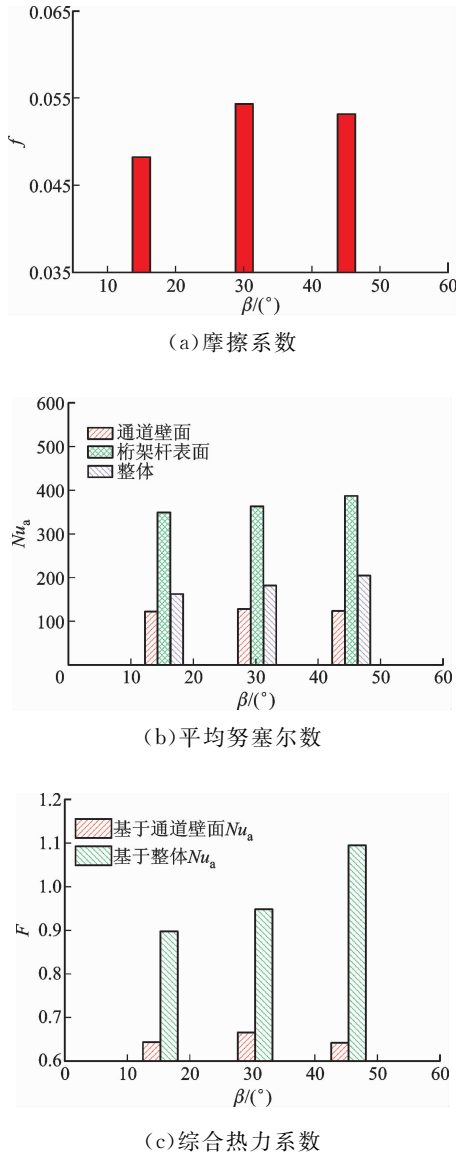


图 14 倾角 β 对通道冷却性能的影响 ($Re=30\ 000$)
Fig. 14 Effects of β to the cooling performance of the channel ($Re=30\ 000$)

2.6 关联式拟合

从 2.2~2.5 节中的分析可知,X 型桁架通道的整体平均努塞尔数 Nu_a 随 Re 、 d/D 、 α 和 β 的增大均呈现出单调增大的趋势,因此 Nu_a 与 Re 、 d/D 、 α 和 β 之间的关系可以采用幂函数来拟合。通道的摩擦系数 f 随 Re 的增大而单调下降,随 d/D 和 α 的增大而单调升高,而随 β 的增大呈现出先增大后减小的分布规律,因此, f 与 Re 、 d/D 和 α 的关系可以采

用幂函数拟合,与 β 的关系可以采用二次函数拟合。为此,本文建立了如下形式的传热和摩擦关联式

$$Nu_a = a_1 Re^{a_2} (d/D)^{a_3} \alpha^{a_4} \beta^{a_5} \tag{8}$$

$$f = b_1 Re^{b_2} (d/D)^{b_3} \alpha^{b_4} (b_5 \beta^2 + b_6 \beta + b_7) \tag{9}$$

式中: $a_1 \sim a_5$ 和 $b_1 \sim b_7$ 分别为传热和摩擦关联式中的待拟合参数。

以本文研究结果数据为样本,采用 Python 中的非线性拟合模块 Curve_Fit 进行式(8)和(9)的拟合,结果如下

$$Nu_a = 0.0181 Re^{0.7584} (d/D)^{0.1822} \alpha^{0.3025} \beta^{0.2101} \tag{10}$$

$$f = 0.0039 Re^{-0.1813} (d/D)^{1.0390} \alpha^{0.3560} (-0.1683 \beta^2 + 11.48 \beta + 271.47) \tag{11}$$

式(10)和式(11)的适用范围为: $10\,000 \leq Re \leq 60\,000$, $0.0375 \leq d/D \leq 0.075$, $30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$, $15^\circ \leq \beta \leq 45^\circ$ 。

图 15 给出了 X 型桁架冷却通道传热和摩擦关联式的拟合偏差分布,对于传热关联式,最大偏差为 6.72%,平均偏差为 3.01%。对于摩擦关联式,最大偏差为 5.33%,平均偏差为 1.53%。这表明本文拟合得到的关联式能够准确地预测 X 型桁架冷却通道的传热和流动性能,可以为 X 型桁架结构在未来先进燃机涡轮叶片内冷通道中的应用提供参考和

借鉴。

3 结 论

本文采用 SST $k-\omega$ 湍流模型对 X 型桁架阵列冷却通道内的流动和传热特性进行了详细的数值研究,得出以下主要结论。

(1) X 型桁架通道的摩擦系数随着雷诺数 Re 的增大以及桁架杆直径比 d/D 和夹角 α 的减小而降低,随着倾角 β 的变化而先提高后又降低。

(2) 高热区域出现在桁架杆迎风面、桁架杆端部周围的通道壁面及其下游区域。在研究参数范围内,桁架杆表面平均努塞尔数大约是通道壁面平均努塞尔数的 2.32~4.41 倍;增大 Re 、 d/D 、 α 和 β 分别使 X 型桁架阵列通道的整体平均努塞尔数提高了 280.86%、11.92%、23.31% 和 26.45%。

(3) 在研究参数范围内,减小 Re 和 d/D , X 型桁架阵列通道的基于整体平均努塞尔数的综合热力系数分别提高了 15.11% 和 12.09%;增大 α 和 β ,通道的基于整体平均努塞尔数的综合热力系数分别提高了 13.54% 和 22.42%。

(4) 拟合得到了 X 型桁架阵列冷却通道的整体平均努塞尔数和摩擦系数有关于 Re 、 d/D 、 α 和 β 的经验关联式,其最大拟合偏差分别为 6.72% 和 5.33%。

参考文献:

[1] XI L, GAO J, XU L, et al. Study on heat transfer performance of steam-cooled ribbed channel using neural networks and genetic algorithms [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 127: 1110-1123.

[2] EVANS A G, HUTCHINSON J W, FLECK N A, et al. The topological design of multifunctional cellular metals [J]. Progress in Materials Science, 2001, 46 (2/3/4): 309-327.

[3] SCHAEGLER T A, JACOBSEN A J, TORRENTS A, et al. Ultralight metallic microlattices [J]. Science, 2011, 334(6058): 962-965.

[4] LU T J, ZHANG Q C, JIN F. Recent progress in the development of lightweight porous materials and structures [J]. Materials China, 2012, 31(1): 14-35.

[5] XIONG J, MINES R, GHOSH R, et al. Advanced micro-lattice materials [J]. Advanced Engineering Materials, 2015, 17(9): 1252-1264.

[6] KIM T, HODSON H P, LU T J. Fluid-flow and end-wall heat-transfer characteristics of an ultralight lat-

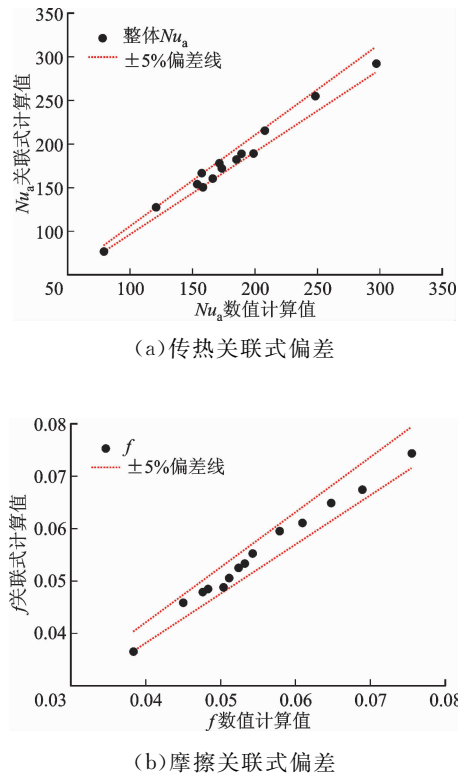


图 15 非线性公式拟合偏差

Fig. 15 Fitting deviations of nonlinear correlations

- tice-frame material [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2004, 47: 1129-1140.
- [7] KIM T, HODSON H P, LU T J. Contribution of vortex structures and flow separation to local and overall pressure and heat transfer characteristics in an ultra-light weight lattice material [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2005, 48: 4242-4264.
- [8] LU T J, VALDEVIT L, EVANS A G. Active cooling by metallic sandwich structures with periodic cores [J]. Progress in Materials Science, 2005, 50: 789-815.
- [9] WADLEY H N G, QUEHEILLALT D T. Thermal applications of cellular lattice structures [J]. Materials Science Forum, 2007, 543: 242-247.
- [10] JOO J H, KANG K J, KIM T, et al. Forced convective heat transfer in all metallic wire-woven bulk Kagome sandwich panels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011, 54: 5658-5662.
- [11] SHEN B, YAN H, XUE H, et al. The effects of geometrical topology on fluid flow and thermal performance in kagome cored sandwich panels [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 142: 79-88.
- [12] WEI K, HE R, CHENG X, et al. Fabrication and heat transfer characteristics of C/SiC pyramidal core lattice sandwich panel [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 81: 10-17.
- [13] SON K N, WEIBEL J A, KUMARESAN V, et al. Design of multifunctional lattice-frame materials for compact heat exchangers [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 115: 619-629.
- [14] YAN H B, ZHANG Q C, LU T J, et al. A light-weight X-type metallic lattice in single-phase forced convection [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 83: 273-283.
- [15] GAO Liang, SUN Yuguo, CONG Lixin. Active cooling performance of all-composite lattice truss core sandwich structure [J]. Heat Transfer Research, 2016, 47(12): 1093-1108.
- [16] XU L, WANG W, GAO T, et al. An experimental research on the cooling performance of the turbine vane with an advanced duplex-medium combined cooling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 79: 72-81.
- [17] 席雷, 徐亮, 高建民, 等. 蒸汽冷却厚壁通道传热性能的耦合传热研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(9): 32-38.
- XI Lei, XU Liang, GAO Jianmin, et al. Study on heat transfer performance of a steam cooled thick-wall ribbed channel using the conjugate calculation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(9): 32-38.
- [18] 徐亮, 湛清云, 席雷, 等. 微类桁架点阵结构填充内冷通道的多目标优化设计 [J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(3): 1-11.
- XU Liang, CHEN Qingyun, XI Lei, et al. Multi-objective optimization design of micro-class truss lattice structure for filling internal cooling channel [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(3): 1-11.
- [19] LI W, REN J, JIANG H, et al. Assessment of six turbulence models for modeling and predicting narrow passage flows; part 2 Pin fin arrays [J]. Numerical Heat Transfer: Part A Applications, 2016, 69(5): 444-463.
- [20] HOFFMANN F, HODSON H, LU T J. Heat transfer performance and pressure drop of Kagome core metal truss panels [M]. Cambridge, UK: University of Cambridge, 2003: 10-35.

(编辑 刘杨 荆树蓉)