

文章编号:0253-4339(2023)03-0150-07
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2023.03.150

一种用于数据中心冷却的空气换热器的设计与模拟

刘斌¹ 耿士江¹ 王子星² 陶文铨²

(1 浙江英特科技股份有限公司 湖州 313300; 2 西安交通大学能源与动力工程学院 热流科学与工程教育部重点实验室 西安 710049)

摘要 本文提出一种应用于数据中心场景的空气冷却器的换热板片设计,介绍了板片的设计思路并对板片间空气流动传热特性进行了数值仿真。利用圆台型丁胞以及不同凹凸方向的棒状丁胞阵列等丁胞结构进行强化传热,并通过数值模拟方法分析了改进芯片的强化传热效果。结果表明:雷诺数 Re 越高,改进板片的强化传热效果越好,其中改进芯片 3 在 Re 为 15 091 时相对于原始板片可实现等泵下强化传热 37%,在 Re 为 5 000 时也能实现强化传热 20%。对比不同改进板片,发现棒状丁胞阵列的长轴方向及凹凸方向对强化传热效果影响较大, Re 为 15 091 时,通过调节棒状酒窝阵列的布置方式后得到的改进板片 3 相较于改进板片 1 可在等泵功下强化传热 11% 以上。

关键词 数据中心;强化传热;丁胞结构;数值模拟

中图分类号:TB61⁺1;TK172;TP308

文献标识码:A

Design and Numerical Simulation of an Air Handling Unit Heat Exchanger for Data Center Cooling

Liu Bin¹ Geng Shijiang¹ Wang Zixing² Tao Wenquan²

(1. Zhejiang Extex Technology Co., Ltd., Huzhou, 313300, China; 2. Key Laboratory of Thermal Fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract This study proposed a heat exchanger plate design scheme for an air handling unit used in a data center. In this study, the thin plate design idea was introduced step by step, and the flow and heat transfer performance were investigated using a numerical model. Circular estrade dimple and rod-shaped dimple arrays with different concave and convex directions were applied to the plates to enhance heat transfer. The numerical results show that the improved plates have a better heat transfer enhancement effect at larger Reynolds numbers (Re). When the Re is 15 091, compared with the baseline plate, the improved plate 3 enhances the heat transfer by 37% at the same pumping power, while the improved plate 3 enhances the heat transfer by 20% at Re of 5 000. It is found that the axial direction and the transverse directions of the rod-shaped dimple array have a significant influence on the enhancement of heat transfer. When the Re is 15 091, compared with the improved plate 1, the improved plate 3 enhances the heat transfer by more than 11% at the same pumping power, by adjusting the arrangement of the rod-shaped dimple array.

Keywords data center; heat transfer enhancement; dimple structure; numerical simulation

随着近年来互联网产业与通信服务产业的持续高速发展,作为其设备基础的数据中心等基础设施总量也在迅速增长。截至 2017 年,中国数据中心耗电量达到 1 250 亿 $\text{kW}\cdot\text{h}$,而至 2017 年底,全国大型数据中心的平均 PUE(power usage effectiveness,电能使用效率,数据中心设备总耗电量除以 IT 设备能耗)为 1.54^[1]。由此可知,对于数据中心产业而言,如何提高制冷系统的能效,从而降低数据中心 PUE,成为未来研究的重点。

数据中心空气冷却器是将数据中心机房送出热风冷却至一定温度后重新送回机房的热量交换设备,其中用于冷却的冷风来源于外部环境。由于无需通过冷却塔及机械制冷等方式提供低温冷源,仅需付出泵送冷风与热风的风机设备所耗功,故在数据中心应用空气冷却器可有效提高数据中心整体制冷系统的能效。图 1 所示为换热芯模型^[2],这是一典型的交叉流板式换热器冷热风热量交换设备,冷热风皆会经由换热芯的一侧入口通过芯体内部到另一侧出口,换热

基金项目:国家自然科学基金(51721004)资助项目。(The project was supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51721004).)

收稿日期:2022-06-23;修回日期:2022-08-30

芯由同一换热芯板片交叉堆叠以分隔出冷热流体的流动通道,换热芯板片如图 1(b)所示,通过强化传热措施对换热芯板片进行改进将有助于提高换热芯的换热能力,从而达到提高数据中心冷却冷量并降低泵送耗功的目的。

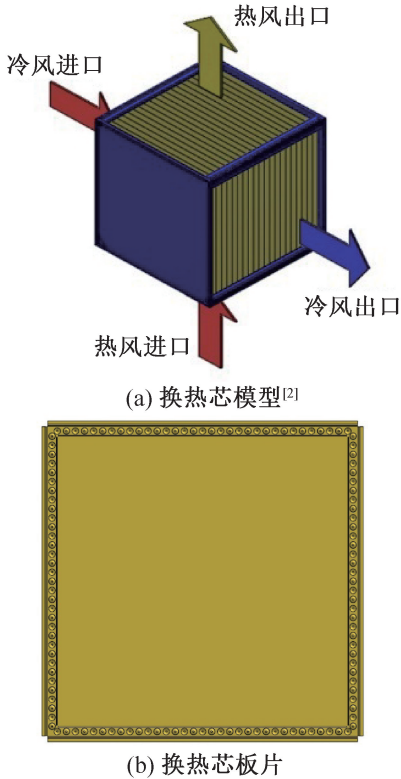


图 1 换热芯模型及板片结构

Fig.1 Model and plate structure of heat exchanger

换热芯换热能力的提升是一个典型的通道内空气单相强制对流传热强化问题,本文采用在板片上设置丁胞结构的方法对换热芯进行强化传热。对于丁胞结构可带来的强化传热效果,已有许多学者研究过类似问题。S. Rashidi 等^[3]对丁胞强化传热结构进行了综述分析,介绍了丁胞结构应用于热交换器、两相流、微通道、光热集热器以及射流冲击冷却等换热系统的效果,并简单总结了丁胞结构强化传热的原理。M. Faizan 等^[4]研究了 U 形通道中单侧的三角形与半球凸包对流动传热的影响。Rao Yu 等^[5]对通道中高雷诺数 Re 范围下的三种不同深度与直径比的单侧球形丁胞阵列进行了实验与模拟研究,结果表明酒窝深度与 Re 对流动传热特性影响较大。Xie Pengyong 等^[6]研究了用于液体火箭发动机燃烧壁冷却的丁胞-翅片耦合结构,发现在 Re 为 42 000 时,强化结构的阻力因子 f 为光滑结构的 2.6 倍,努塞尔数 Nu 为光滑结构的 1.94 倍。A. Perwez 等^[7]对热沉翅片上的球冠与倾斜泪滴形丁胞单侧凹陷结构进行了

仿真与实验研究, Re 范围为 1 800~7 000,所设计倾斜泪滴结构与球冠结构相比可在等泵功下强化传热 7.36%。Jiang Chen 等^[8]研究了相邻丁胞对称布置的倾斜胶囊丁胞相对于常规阵列布置的丁胞结构在紧凑板式水冷换热器中的性能表现,结果表明,相邻倾斜胶囊丁胞的对称布置有助于促进涡旋形的流动与边界层的破坏,在高 Re 下可强化传热 10% 以上。S. A. Isaev 等^[9]对通道中单侧的倾斜凹陷圆棒状丁胞阵列结构在 Re 为 10 000 的工况下进行了不同丁胞阵列间距对流动传热特性的研究,指出在凹陷丁胞内,前部的流动分离位置会产生一个低的静压区域,而丁胞后部的冲进区域会产生一个高的静压区域,从而在丁胞内部产生一个逆向的压力梯度,相比于平板壁面而言,可以强化传热。Jing Qi 等^[10]对单侧泪滴形丁胞在超临界 CO_2 矩形流动通道内的应用进行了研究,分别对泪滴形凹陷丁胞、泪滴形凸起丁胞以及反向泪滴形凸起丁胞进行了模拟研究,实现了等泵功下相对于平壁面通道强化传热 17%。

上述研究均未考虑由典型换热器由入口至出口的影响,或对典型单元进行了分析^[8],或对有限阵列进行了分析^[9],这对于具有较长通道长度且通道内几何结构具有良好周期性的换热器通道而言是较为合理的,而实际换热器一般难以达到该要求。本文将利用在换热芯板片上附加强化传热丁胞的方法,基于圆台形丁胞与棒状丁胞,建立板片几何模型,提取出由换热器入口至出口的完整流动通道,进行数值模拟,研究不同 Re 下,改进通道相对于基础通道的强化传热的效果,数值模拟结果将更加接近实际工况,更具有应用价值。

1 换热芯模型描述

1.1 芯片结构分析

本文所研究数据中心空气冷却器换热芯由许多相同的金属薄板片交叉堆叠构成,相邻的两块板片构成数据中心机房回风与室外冷风各自的流动通道,冷热风在流经换热芯时通过对流与导热的方式进行热量交换。

图 2 所示为板片的基础板片结构及相同的两片所装配成的芯体通道结构。由图 2(a)可知,在基础板片周边的区域分布有凹凸相间的圆台型丁胞,而基础板片的其余部分均为平壁面,尺寸约为 642 mm×642 mm。图 2(b)为圆台形丁胞的几何参数。将两个相同的芯片旋转交叉 90°并装配后,构成了两芯片间的流动通道,图 2(c)展示了在通道一角的凹凸相间丁胞布置,可以看到凹凸相间的圆台丁胞设计可使

两板片交叉堆叠时保持接触,有助于在多板片堆叠时提高芯体的结构稳定性。图 2(d)为流动通道入口正视的结构,同样可以看到相间的圆台丁胞支撑点,换热芯工作时,空气将沿垂直图中入口方向送入。本文以图 2 所示的绝大部分面积为平壁面的通道结构作为基准案例进行强化传热结构的设计与效果的模拟验证,后文统一称该结构为基础板片。

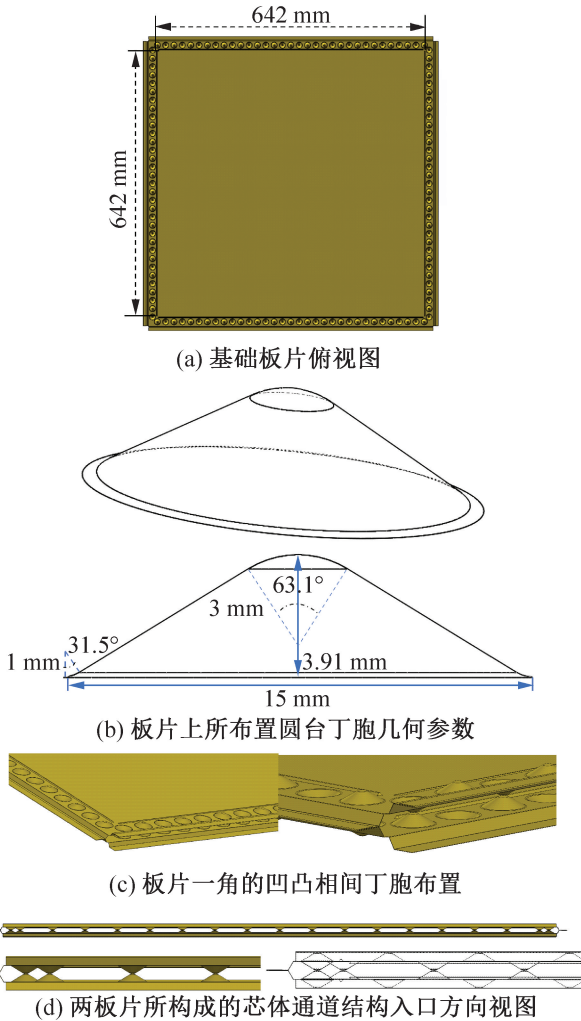
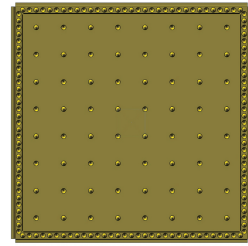


图 2 基础板片及两个板片装配后的通道示意图
Fig.2 Basic plate and two plates assembled channel

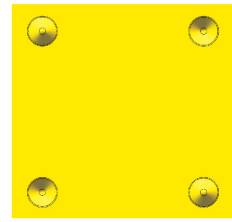
由基础板片出发,首先在板片内部布置与周边相同的圆台形丁胞结构,同样采用凹凸相间的布置,图 3 所示为得到的板片。图 3(a)为在原有平壁面上均匀布置了凹凸方向相互交错的圆台丁胞后的板片,图 3(b)为布置的凹凸方向互相交错的圆台丁胞的放大示意图,可知在所示一个周期分布上,对角线上的丁胞凹凸方向一致,可使新布置的丁胞仍然在两个相邻芯片间起支撑作用,与基础板片相比,该板片仅添加了部分圆台丁胞结构,后文称为支撑改进板片。

基于支撑改进板片,在图 3(b)中平板部分设置

了三种主要起强化传热作用的小型棒状丁胞结构阵列,每种丁胞阵列的凹陷方向与丁胞长轴对应的方向有所不同。



(a) 支撑改进板片



(b) 支撑改进板上设置的交错凹凸丁胞

图 3 支撑改进板片及其丁胞布置放大示意图

Fig.3 Mechanical support improved plate and dimple layout magnification

所用小型棒状丁胞的几何参数如图 4 所示(注:0.2 mm 为圆角弧线的半径),将该小型棒状丁胞阵列布置,可以得到本文提出的改进板片:改进板片 1、2、3。图 5 所示为改进板片丁胞阵列单元的结构。

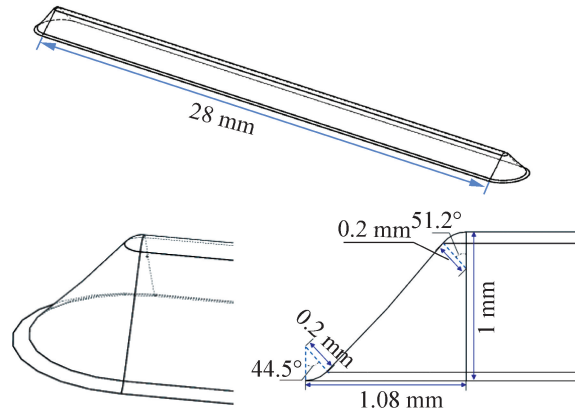


图 4 棒状丁胞的几何参数

Fig.4 Geometric parameters of rod-shaped dimple

由图 5 可知,改进板片 1 在支撑改进板片的基础上直接在其 4 个圆台丁胞所环绕的大片平板部位上布置了长轴沿水平方向的 4 组小型棒状丁胞阵列,所有丁胞阵列均向纸面内凹陷。改进芯片 2 则在改进板片 1 的基础上,将右上与左下的棒状丁胞阵列设置为向纸面外凹陷(图中可见为凸起),改进板片 3 进一步将改进板片 2 中的左上与右下的丁胞阵列的长度方向调整为垂直方向。

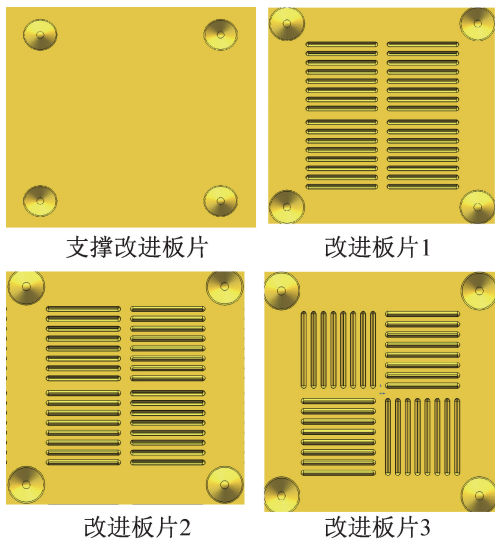


图 5 改进板片的局部放大示意图

Fig.5 The local magnification of improved plate

改进板片 1、2、3 为本文所提出的最终改进板片，设计思路为：通过较大的圆台丁腈强化片间支撑后配合不同的小型棒状丁腈阵列单元进行强化传热。后文中将直接对基础板片、改进板片 1、改进板片 2 以及改进板片 3 进行数值模拟以获得所设计改进结构的强化传热效果。

1.2 模型简化

由于完整换热芯尺寸大、通道多，难以对整个换热芯进行整体模拟。仅能对芯体中的单个通道进行仿真，而对于换热芯体中的单通道而言，其通道长、宽、高分别为 700、700、7.85 mm，且通道内部具有许多丁腈结构，对整个通道进行数值模拟同样较为困难，故需要对单通道进行进一步的分析简化。以改进板片 3 为例，图 6(a) 为相邻两个芯片所构成的流动通道，空气沿着垂直纸面的方向流入通道。为获得空气在通道内的流动传热特性，需要对该通道内的空气流动进行仿真模拟。但由于该通道几何结构的长宽过大，需要进一步简化。沿着图 6(a) 中的虚线框对图中两个板片进行截取，保留虚线框内的板片几何，得到图 6(b) 所示的由上下两个板构成的简化通道。抽取两板间的流体域，并在流体域之后补充一段出口段流体域，构成图 7(a) 中的数值模拟流体域。图 7(b)~(c) 为图 7(a) 虚线框中流体域的放大示意图。数值模拟采用的边界条件为：原上下两板对应的面上设置为恒温壁面边界 (288.15 K)，出口段流体域的上下壁面设置为绝热壁面边界，流体域的左右面上设置对称边界条件，入口处设置平均入口流速与入口温度 (309.15 K)，延长段的出口设置压力出口边界条件。

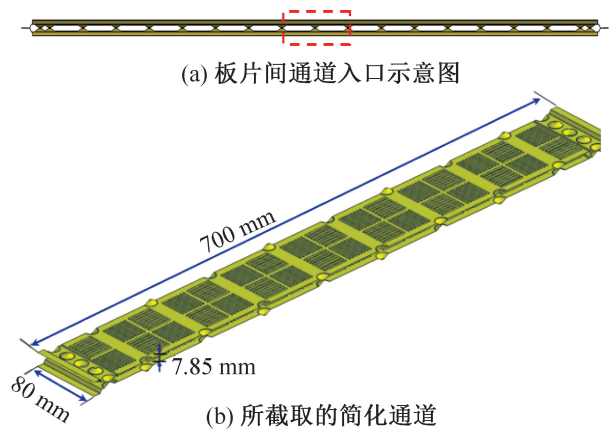
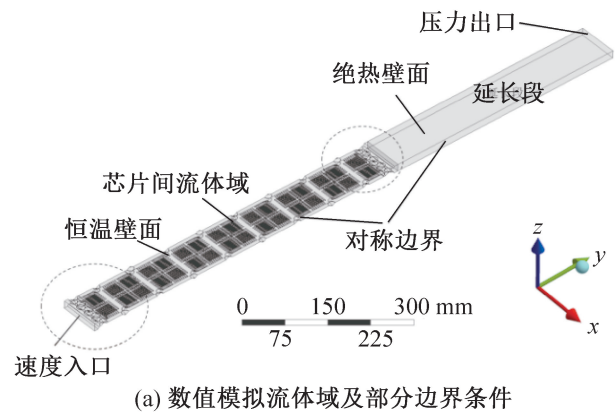
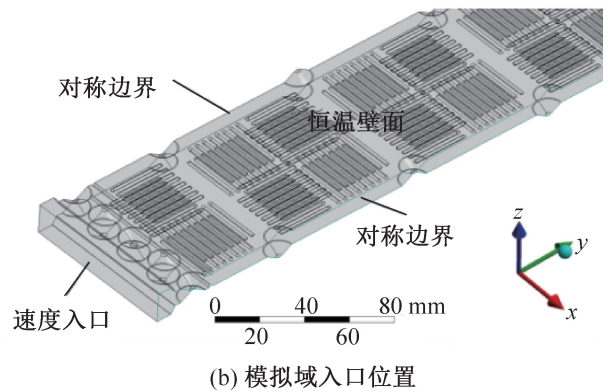


图 6 板片通道的简化截取

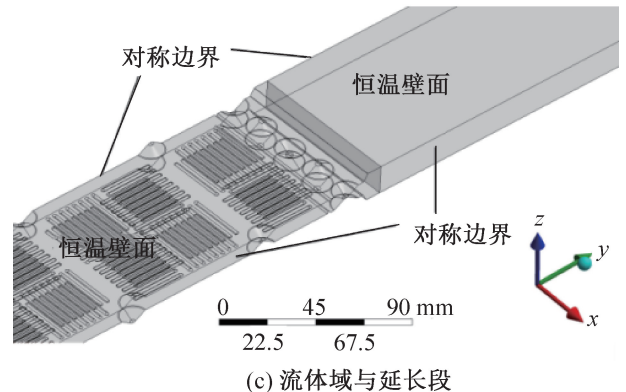
Fig.6 The simplified interception of two plates formed channel



(a) 数值模拟流体域及部分边界条件



(b) 模拟域入口位置



(c) 流体域与延长段

图 7 模拟域与数值模拟边界条件

Fig.7 Numerical zone and boundary condition

2 模拟方法

为模拟上述复杂丁胞表面板间的流动传热特性, 利用 FLUENT 进行流动传热控制方程组的求解, 采用 SST $k-\omega$ 湍流模型^[6,8], 对模拟网格进行了壁面加密处理, 确保边界层网格足够密且最终模拟结果的壁面处 $y^+ < 1$ 。

为验证湍流模型的选择是否合适, 针对本文涉及的两板间流动通道模拟域, 建立了与模拟域宽、高一一致的扁管通道模型, 如图 8 所示, 该扁管通道的宽度与高度和图 5(b) 中的模拟截取部分一致, 而长度设置为 1 000 mm, 这是为了保证管内空气流动充分发展。

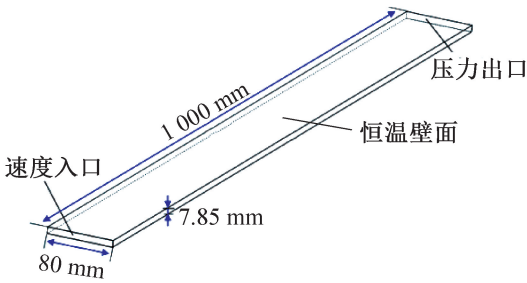


图 8 扁管通道几何模型与边界条件

Fig.8 Geometric model and boundary conditions of flat pipe

将模拟结果与 Gnielinski 公式^[11] 进行对比, Gnielinski 公式的适用 Re 范围为 $2.3 \times 10^3 \sim 1 \times 10^6$ 。后文中将该结果称为实验值, 公式如下:

Gnielinski 公式:

$$Nu = \frac{(f/8)(Re - 1000)Pr}{1 + 12.7\sqrt{f/8}(Pr^{2/3} - 1)} \left[1 + \left(\frac{D_h}{L} \right)^{2/3} \right] \quad (1)$$

式中: Pr 为空气普朗特数; L 为通道长度, m; Re 为雷诺数; D_h 为水力直径, m; f 为管内湍流流动的 Darcy 阻力系数, 按 Konakov 公式^[11] 计算:

$$f = (1.8 \lg Re - 1.5)^{-2} \quad (2)$$

非圆管通道的水力直径如式(3)所示:

$$D_h = 4A_{cross}/P \quad (3)$$

式中: A_{cross} 为通道的流动截面积, m^2 ; P 为润湿周长, m。

通道内空气流动的雷诺数定义为:

$$Re = \rho u D_h / \mu \quad (4)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ; u 为通道入口截面上的平均空气流速, m/s; μ 为动力黏度, $Pa \cdot s$; D_h 为水力直径, m。

对于模拟通道而言, 定义其面积平均的对流换热

表面传热系数为:

$$h = \frac{A_{cross} \rho c_p (T_{in} - T_{out})}{A_{wall} \Delta T_m} \quad (5)$$

式中: c_p 为空气热容, $J/(kg \cdot K)$; T_{in} 、 T_{out} 分别为出口面、入口面的质量平均温度, K; A_{wall} 为壁面的等效投影面积; ΔT_m 为对数温差, 定义为:

$$\Delta T_m = \frac{(T_{in} - T_{wall}) - (T_{out} - T_{wall})}{\ln \left(\frac{T_{in} - T_{wall}}{T_{out} - T_{wall}} \right)} \quad (6)$$

式中: T_{wall} 为壁面温度, K。

对于模拟通道, 努塞尔数为:

$$Nu = h D_h / \lambda \quad (7)$$

式中: λ 为空气的导热系数, $W/(m^2 \cdot K)$ 。

阻力系数定义为:

$$f = \frac{\Delta p D_h}{\rho u^2 L / 2} \quad (8)$$

式中: Δp 为通道的出入口压降, Pa。

为评估所设计改进结构相对于基本板片的强化传热提升程度, 以单位泵功下的强化换热指标 PEC ^[12] 进行评价, 计算式为:

$$PEC = \frac{Nu/Nu_0}{(f/f_0)^{1/3}} \quad (9)$$

式中: Nu_0 与 f_0 为参考结构(基础板片)的努塞尔数与阻力系数; Nu 与 f 为改进结构的努塞尔数与阻力因子。

利用式(2)~式(4)计算扁管光滑通道的 f 实验值, 利用式(1)计算扁管光滑通道的 Nu 实验值; 而基于扁管光滑通道的数值模拟结构, 利用式(5)~式(8)计算 Nu 与 f , 并进行对比, 结果分别如图 9 及图 10 所示。在 Re 较高时, 模拟结果与实验值吻合良好, 而随着 Re 逐渐降低, 模拟结果呈现出高于实验值

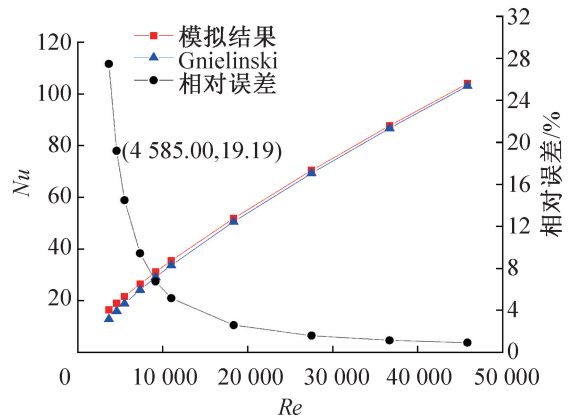


图 9 模拟结果与实验值的 Nu 对比

Fig.9 Comparison between numerical results and experiment results of Nu

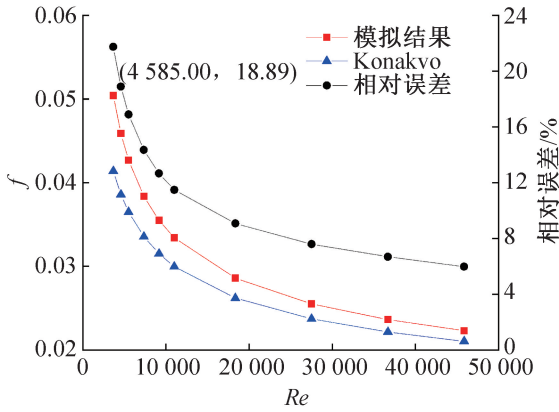


图 10 模拟结果与实验值的 f 结果对比

Fig.10 Comparison between numerical results and experiment results of f

的特征, Re 低于 4 585 时, 模拟结果与实验值的误差大于 20%, 而 Re 继续降低时, 误差已难以接受。考虑到模拟模型通道本身流动截面的大宽高比 (>10) 与圆管通道在几何结构上的较大差异在低 Re 下体现地更加显著, 用 Gnielinski 公式结果代表实验值的可靠性将降低, 从而导致在低 Re 下的扁管通道内的 Nu 与 Gnielinski 公式出现了较大差异。

综上分析, 认为本文用的湍流模型是较为合适的, 并控制本文中所有模拟案例的 Re 均高于 4 585。

除对所用湍流模型的考核外, 为保证模拟结果的网格无关, 还需确定进行数值模拟所需的网格量级。以改进芯片 3 为例, 图 11 所示为不同网格数量下的平均对流换热表面传热系数随网格数量的变化, 在网格量达到 8 000 万之后, h 随网格数量的变化已不明显, 可以认为模拟结果已经实现了网格无关。对于图 6 及图 7 所示的长通道而言, 当壁面结构的复杂程度较高时, 需要十分巨大的网格量级才可以得到较为可靠的模拟结果。本文讨论的所有改进结构案例的数值模拟均基于该网格量级进行, 图 12 所示为在该网

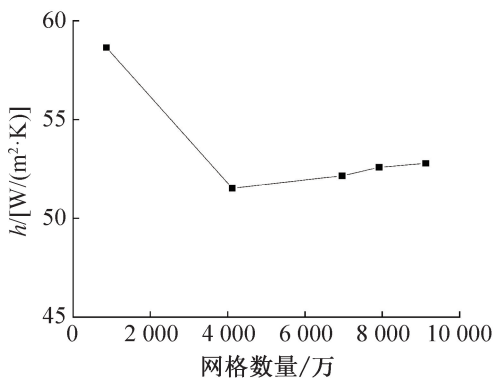


图 11 网格考核

Fig.11 Grid independent test

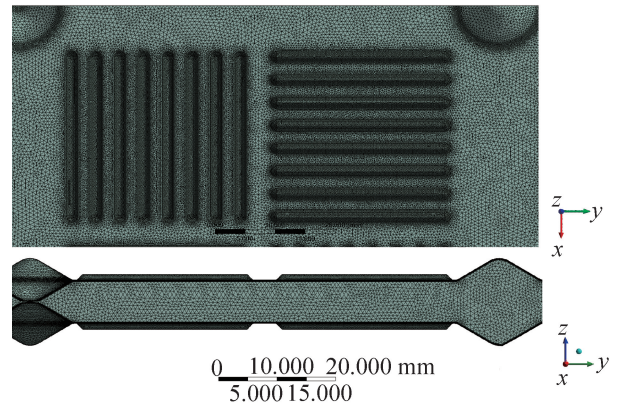


图 12 部分位置的网格

Fig.12 The grid diagram at some location

格量级下改进结构 4 不同位置的网格示意, 在该网格量级下, 小型棒状丁胞整列的每一个小凹坑与凸包均需要十分密集的网格。

3 模拟结果与分析讨论

为获得本文提出的三种改进结构的流动传热特性与强化传热效果, 依照上文所述模拟方法进行了不同 Re 下的流动传热模拟。

图 13 所示为本文上述三种改进板片及基础板片的片间流动通道的 Nu 随 Re 的变化, 图 14 所示为 f 随 Re 的变化。

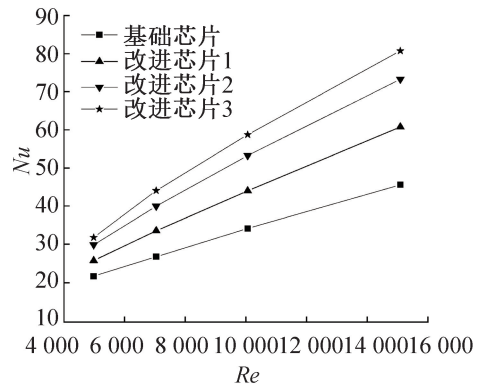


图 13 基础板片及改进板片的 Nu 随 Re 的变化

Fig.13 Variation of Nu of base plate and improved plate with Re

由图 13 可知, 对于所有板片, 随着 Re 的增加, Nu 基本呈线性增长的趋势。同 Re 下, 改进板片 3 具有最大的 Nu , 改进板片 2 次之, 改进板片 1 的 Nu 提升比例最小, 这在高 Re 下更为显著。

由图 14 可知, 对于所有板片而言, f 随 Re 的增长而呈下降趋势, 高 Re 时降幅均逐渐减小。改进板片 2 及改进板片 3 的 f 随 Re 增加而下降的幅度很小, 而改进板片 1 与基础板片在低 Re 下的降幅较大。

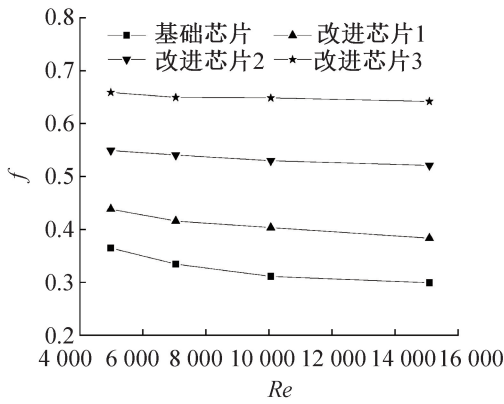


图 14 基础板片及改进板片的 f 随 Re 的变化
Fig.14 Variation of f of base plate and improved plate with Re

以基础板片作为参考结构,由式(9)计算三种改进板片的 PEC 值,得到在不同 Re 下改进结构在等泵功下的强化传热效果,如图 15 所示。

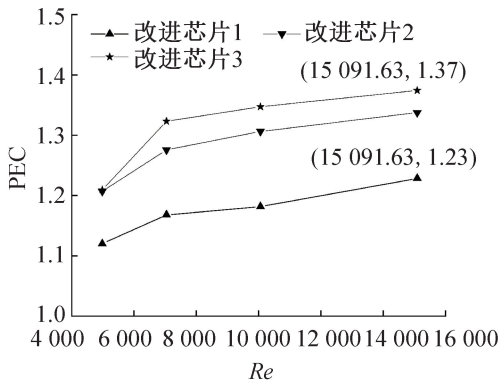


图 15 三种改进板片在不同 Re 下的 PEC 值
Fig.15 PEC values of three kinds of improved plates at different Re

由图 15 可知,所有改进板片的强化传热效果均随 Re 的增加而提升,其中改进板片 1 的强化传热效果不佳,测试工况内,PEC 最高为 1.23, $Re < 10\ 000$ 时,PEC 均低于 1.2。相比于改进板片 1,改进板片 2 与改进板片 3 对小型棒状丁胞阵列的凹凸方向及长轴方向进行了调整,并未对棒状丁胞几何参数做调整,如图 5 所示。由图 15 可以直观地发现,通过上述调整获得的改进板片 2 与改进板片 3 的强化传热效果得到较大提升,且改进板片 3 在 Re 较高时强化传热效果优于改进板片 2。 $Re = 5\ 000$ 时,改进板片 3 与改进板片 2 的 PEC 均大于 1.2,且二者十分接近,改进板片 3 的 PEC 略高于改进板片 2,而该 Re 下改进板片 1 的 PEC 仅为 1.12。本文研究的换热器工作在 Re 为 5 000 以上,故本文未进行更低值时的研究。 $Re = 15\ 091$ 时,改进板片 3 的 PEC 为 1.37,相比于改

进板片 1(此时 PEC 为 1.23),在该 Re 下也可在等泵功下强化传热 11% 以上,可知丁胞的布置方式对于强化传热效果也有巨大影响。对于本文设计的棒状丁胞阵列而言,改进板片 3 的设计具有最好的强化传热效果,说明该类丁胞的凹凸方向及长轴方向不应在芯片上始终相同,在对角位置上进行如图 5 所示的布置调整后将获得更好的强化传热效果。

4 结论

本文提出一种数据中心空气冷却器换热芯板片的设计方案,利用凹凸相间的圆台丁胞在板片上的交错布置使得相邻芯片间的圆台丁胞可以相互接触,可强化板片间的支撑能力,然后在其余的大面积平片位置上通过小型的棒状丁胞进行传热强化,最终获得了换热板片的完整几何模型。通过对换热板片构成的换热器通道进行几何结构分析,在进行合理的简化后对所设计换热芯相对于基础板片的强化传热效果进行了模拟分析,得到结论如下:

1) $Re = 5\ 000$ 时,改进板片 1 的 PEC 为 1.12,而改进板片 2 及改进板片 3 的 PEC 均达到了 1.2,在测试范围内,随着 Re 的增加,所有改进芯片的 PEC 均增加。

2) 在测试的 Re 范围内,改进板片 3 在 $Re = 1\ 091$ 时 PEC 最高,此时相比于基础板片,可在等泵功下强化传热 37%。

3) 小型棒状酒窝阵列的长轴方向及凹凸方向对通道内的流动传热特性具有较大影响。相对于改进板片 1,改进板片 2 及 3 通过调节小型棒状酒窝阵列的凹凸方向及长轴方向后可进一步强化传热,其中最好的结构为改进板片 3, $Re = 15\ 091$ 时,相比于改进板片 1 可进一步在等泵功下强化传热 11%。

本文受西安市科技局项目(2019218714SYS002CG024)资助。(The project was supported by the Xi'an Science and Technology Bureau (No. 2019218714SYS002CG024).)

参考文献

[1] 中国制冷学会数据中心冷却工作组. 中国数据中心冷却技术年度发展研究报告—2020[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021. (Data Center Cooling Working Group of Chinese Association of Refrigeration. China data center cooling technology annual development research report—2020 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2021.)

[2] 王子星, 雷乐, 李楠, 等. 数据中心空气冷却器性能改进的数值计算[J]. 工程热物理学报, 2021, 42(12):

3249–3253. (WANG Zixing, LEI Le, LI Nan, et al. Heat transfer performance improvement of air-cooling unit in data center by numerical simulation[J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2021, 42(12): 3249–3253.)

[3] RASHIDI S, HORMOZI F, SUNDÉN B, et al. Energy saving in thermal energy systems using dimpled surface technology – a review on mechanisms and applications[J]. *Applied Energy*, 2019, 250: 1491–1547.

[4] FAIZAN M, SHUJAS Z, YILBAS S, et al. Flow analysis of a rectangular channel with triangular and semi-spherical protrusions[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2021, 162: 106793.

[5] RAO Yu, ZHANG Peng, XU Yamin, et al. Experimental study and numerical analysis of heat transfer enhancement and turbulent flow over shallowly dimpled channel surfaces [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 160: 120195.

[6] XIE Pengyong, ZHANG Xiaobing. The influence of thermal stratification on hydrogen fuel flow and heat transfer in cooling channel with combining fin and dimple[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020, 45(15): 9064–9076.

[7] PERWEZ A, KUMAR R. Heat transfer performance investigation of the spherical dimple heat sink and inclined teardrop dimple heat sink[J]. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 2019, 76(2): 73–86.

[8] JIANG Chen, BAI Bofeng, WANG Haibo, et al. Heat transfer enhancement of plate heat exchangers with symmetrically distributed capsules to generate counter-rotating vortices[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 151: 119455.

[9] ISAEV S A, GRITCKEVICH M S, LEONTIEV A I, et al. NT Vortex enhancement of heat transfer and flow in the

narrow channel with a dense packing of inclined one-row oval-trench dimples[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 145: 118737.

[10] JING Qi, XIE Yonghui, ZHANG Di. Thermal-hydraulic performance and entropy generation of supercritical carbon dioxide in heat exchanger channels with teardrop dimple/protrusion[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 135: 1082–1096.

[11] GNIELINSKI V. On heat transfer in tubes[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2013, 63: 134–140.

[12] FAN J F, DING W K, ZHANG J F, et al. A performance evaluation plot of enhanced heat transfer techniques oriented for energy-saving[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(1/2): 33–44.

通信作者简介

陶文铨,男,教授,西安交通大学能源与动力工程学院,029-82669106,E-mail:wqtao@mail.xjtu.edu.cn。研究方向:传热与流动的先进数值计算方法及其应用;强化传热的基本理论与工程应用;电子元器件的冷却技术;高效换热器的优化设计与研发;微细尺度流动和传热的研究;燃料电池中的关键工程热物理问题等。

About the corresponding author

Tao Wenquan, male, professor, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, +86 29-82669106, E-mail: wqtao@mail.xjtu.edu.cn. Research fields: advanced numerical methods for heat transfer and flow and their applications, basic theory and engineering application of heat transfer enhancement, cooling technology for electronic components, optimization design and development of high efficiency heat exchanger, study of microscale flow and heat transfer, key engineering thermophysics problems in fuel cells, et al.

(上接第 141 页)

通信作者简介

王志华,男,副教授,西安交通大学人居环境与建筑工程学,13991852456,E-mail:wangzh065@xjtu.edu.cn。研究方向:建筑节能与可再生能源利用技术。

About the corresponding author

Wang Zhihua, male, associate professor, Residential Environment

and Architectural Engineering, Xi'an Jiaotong University, + 86 13991852456,E-mail:wangzh065@xjtu.edu.cn. Research direction: building energy conservation and renewable energy utilization technology.