

翅片结构对开缝翅片管空冷器性能的影响

李 岩

上海理工大学上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海
Email: 348233021@qq.com

收稿日期: 2021年6月18日; 录用日期: 2021年7月8日; 发布日期: 2021年7月15日

摘 要

基于双向开缝翅片4排管空冷器的原始模型, 建立了涡发生器高度分别为 $0.2P_f$ 、 $0.4P_f$ 、 $0.6P_f$ 和 $0.8P_f$ 的4种半球突开缝翅片管空冷器的物理模型, 运用三维数值模拟方法对不同涡发生器高度的空冷器的 Nu 数、 Eu 数和等压降下的综合性能指标进行了研究, 并运用场协同原理对半球突开缝翅片管空冷器的换热性能进行了分析。结果表明: 在相同雷诺数下, 空冷器的努塞尔数和欧拉数均随着涡发生器高度的增加而增大。与未布置涡发生器的空冷器相比, 布置高度为 $0.8P_f$ 涡发生器的空冷器的努塞尔数提升了4.16%~4.33%, 欧拉数提升了3.16%~4.54%, 等压降下的综合性能指标提升了2.06%~2.56%。半球突涡发生器能够改善速度场与温度场的协同性从而减小协同角并达到强化传热的效果。研究成果可为开缝翅片管空冷器传热和阻力性能的进一步优化提供参考。

关键词

开缝翅片管空冷器, 数值模拟, 强化换热, 纵向涡发生器

Effects of Fin Structure on Heat Transfer and Resistance Characteristics of Super Slit Finned Tube Air Cooler

Yan Li

Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai
Email: 348233021@qq.com

Received: Jun. 18th, 2021; accepted: Jul. 8th, 2021; published: Jul. 15th, 2021

Abstract

Based on the original model of the bidirectional slit finned 4-row tube air cooler, four physical

models of semi-dimpled slit finned tube air cooler with different vortex generator heights ($0.2P_f$, $0.4P_f$, $0.6P_f$ and $0.8P_f$) were established. The Nusselt number, Euler number and the comprehensive performance index were investigated by employing 3-D numerical simulation method and the field synergy principle was used to analyze the thermal performance of semi-dimpled slit finned tube air cooler. The results show that under the same Reynolds number, both the Nusselt number and Euler number of the air cooler increase with the increase of the height of the vortex generator. Compared with the air cooler without the vortex generator, the Nusselt number of the air cooler with the $0.8P_f$ vortex generator is increased by 4.16%~4.33%, the Euler number is increased by 3.16%~4.54%, and the comprehensive performance index is increased by 2.06%~2.56% with the same Reynolds number. The semi-dimpled vortex generator can improve the synergy between the velocity field and the temperature field, thereby reducing the synergy angle and achieving the effect of enhancing heat transfer. The research results can provide reference for the further optimization of the heat transfer and resistance performance of the slit fin tube air cooler.

Keywords

Slit Fin Tube Air Cooler, Numerical Simulation, Heat Transfer Enhancement, Longitudinal Vortex Generator

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

开缝翅片是一种强化型翅片结构，翅片上的条带和狭缝增强了翅片侧流体的扰动并且破坏了边界层的发展，可以达到强化翅片侧换热的目的，因此已经被广泛应用于空冷器中[1]。为了进一步提高开缝翅片管空冷器传热与阻力性能，国内外研究人员已经进行了大量研究[2] [3] [4] [5] [6]。

在翅片管空冷器上安装纵向涡发生器可以通过产生二次流的方式增强流体之间的混合并增强空冷器的传热性能。Wang 等人[7]通过试验比较了翅片间距为 1.6 mm 和 2 mm，管排数为 1、2 和 4，翅片形式分别为半球突涡发生器翅片、百叶窗翅片和平直翅片的空冷器在迎面风速为 0.5~5 m/s 时的传热性能，发现翅片间距为 2 mm 的单排管空冷器在迎面风速小于 2 m/s 的工况下，采用半球突涡发生器翅片时的空气侧对流换热系数最高；而对于双排管或 4 排管空冷器，采用半球突涡发生器翅片时的空气侧对流换热系数低于百叶窗翅片管空冷器。何雅玲等人[8]通过数值模拟的方法对布置矩形翼纵向涡发生器的翅片管空冷器进行了研究，发现空冷器空气侧的对流换热系数和流动阻力均随着纵向涡发生器数目和攻角的提高而增加。Gong 等人[9]对柱面矩形翼涡发生器翅片管空冷器进行了数值模拟，发现将这种纵向涡发生器布置在圆管下游区域可以增强二次流强度并减小尾迹区。苏石川[10]等人通过数值模拟方法对柱面三角形翼和平直三角形小翼进行了对比，发现柱面三角形翼是一种高效低阻的结构形式。周国兵等人[11]通过数值模拟研究了安装 6 种不同纵向涡发生器的单排蛇形翅片扁管的传热和阻力性能，结果显示布置平直矩形翼纵向涡发生器的翅片扁管的传热性能最好而布置柱面梯形翼纵向涡发生器的翅片的综合性能最好。冯知正等人[12]通过实验研究了矩形通道内设置平直、柱面翼涡发生器对其综合传热性能的影响，发现呈流线型的椭圆柱面翼涡发生器的综合传热性能优于平直翼。

纵向涡发生器在空冷器上的应用受到了国内外学者的关注，但是目前关于在开缝翅片管空冷器上安装涡发生器的研究较少。

本文对半球突涡发生器在双向开缝翅片 4 排管空冷器的应用进行了数值模拟研究，并分析了涡发生器高度对半球突开缝翅片管空冷器传热和阻力性能的影响，采用 $Nu/f^{1/2}$ 评价了空冷器等压降条件下的综合性能，旨在为双向开缝翅片 4 排管空冷器的传热与阻力性能的进一步优化提供参考。

2. 数值模拟

2.1. 物理模型与结构参数

本文所研究的空冷器开缝翅片原始结构如图 1 所示。翅片长度为 136 mm，翅片宽度为 320 mm，换热管排数为 4 排，管束呈错列布置，管内、外流体分别为水和空气，翅片材质为铝。空冷器主要结构参数如表 1 所示。

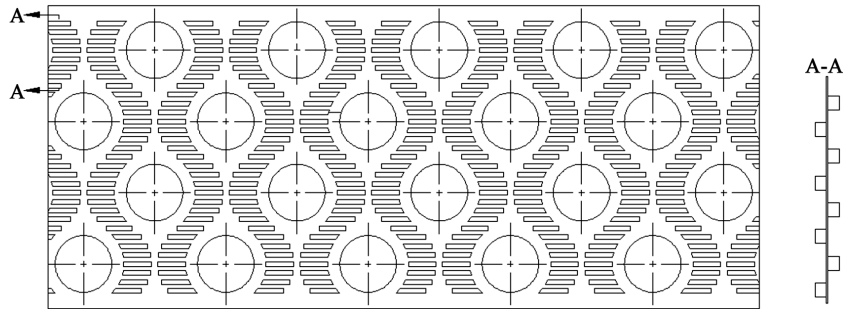


Figure 1. Schematic diagram of bidirectional slotted fin 4-row tube air cooler
图 1. 4 排管空冷器双向开缝翅片结构示意图

Table 1. Fin structure parameters
表 1. 空冷器主要结构参数

参数	数值
管外径 d/mm	25.45
管壁厚度 δ/mm	0.87
纵向管间距 S_1/mm	32
横向管间距 S_2/mm	64
翅片间距 P_f/mm	3.8
翅片厚度 δ_f/mm	0.23
开缝高度 S_f/mm	1.92
翅片长度 L/mm	136

为了使进口处空气流速均匀、防止出口处空气产生回流，数值模拟的计算区域向气流上游延长 3 倍管径长度，向气流下游延长 7 倍管径长度[13]。而且翅片管结构具有沿 y 轴方向呈对称性分布、沿 z 轴方向呈周期性分布的特点，因此为了节省计算资源并提高计算效率，选择如图 2 所示的虚线内的区域，即相邻翅片中心面之间的区域作为计算区域，计算区域宽度为 32 mm (即横向管间距的一半)，高度为 3.8 mm (即翅片间距)，长度为 390.5 mm。

为了进一步提高双向开缝翅片 4 排管空冷器的性能，设想在所有管子周围的翅片上冲压出半球突涡发生器。半球突开缝翅片如图 3 所示，本文研究的涡发生器高度 H_{VG} 分别为 $0.2P_f$ 、 $0.4P_f$ 、 $0.6P_f$ 和 $0.8P_f$ 。

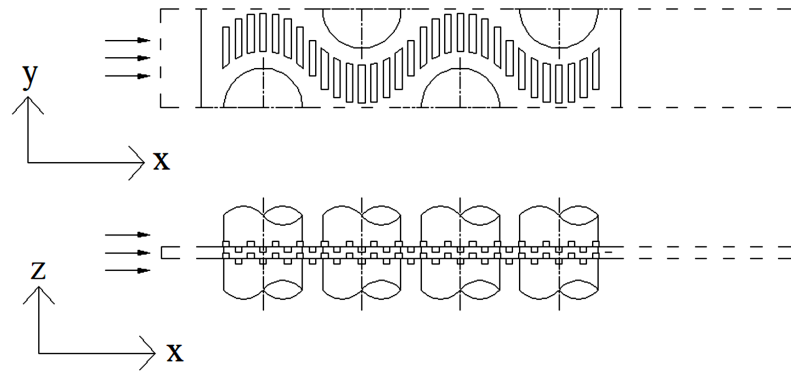
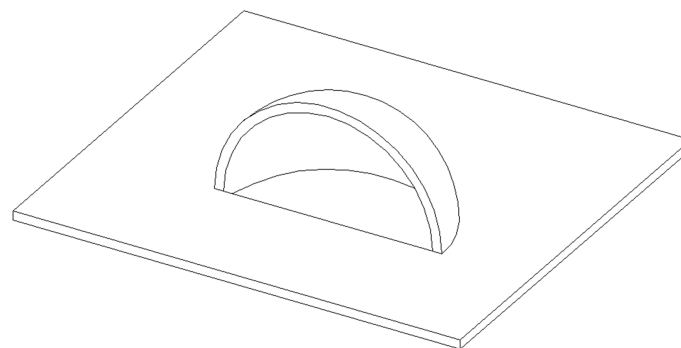
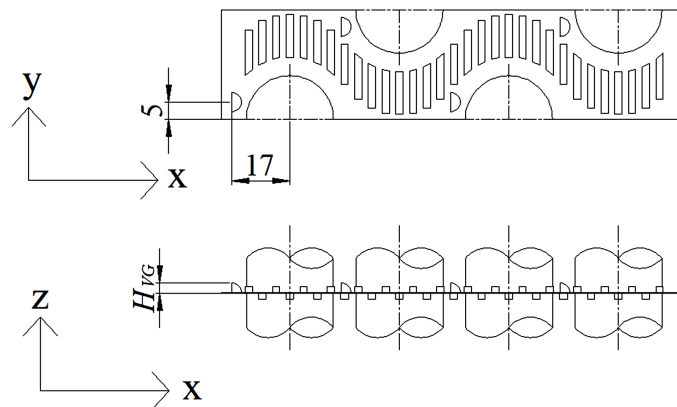


Figure 2. Schematic diagram of numerical simulation
图 2. 计算区域示意图



(a) 半球突涡发生器形状



(b) 半球突涡发生器结构参数

Figure 3. Vortex generator dimensions and placement
图 3.4 排管空冷器半球突开缝翅片结构示意图

2.2. 数学模型与边界条件

本文采用 Fluent 进行数值模拟, 假定空气流动过程为稳态、不可压缩、湍流; 计算模型使用标准 $k-\epsilon$ 湍流模型; 控制方程包括连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程, 对上述控制方程的离散均采用二阶迎风差分格式, 采用 SIMPLE 算法处理压力与速度的耦合; 收敛条件设置为能量方程残差小于 10^{-6} , 其他方程残差小于 10^{-4} 。

翅片及换热管表面为无滑移边界条件, 其中翅片表面为流固耦合热边界条件, 管内壁温度恒定为 60°C ;

沿 z 轴方向计算域上下面为周期性边界条件；沿 y 轴方向计算域的左右面为对称性边界条件；计算域入口面为速度入口边界条件，温度恒定为 25°C ；计算域出口面为自由流出边界条件。

2.3. 数据处理方法

本文中雷诺数 Re 、努赛尔数 Nu 、欧拉数 Eu 和摩擦因子[14] f 的定义如下：

$$Re = u_m d / \nu \quad (1)$$

$$Nu = hd / \lambda \quad (2)$$

$$Eu = \frac{\Delta p}{N \rho u_m^2} \quad (3)$$

$$f = \frac{2\Delta p d}{\rho u_m^2 L} \quad (4)$$

换热量 Q 、对流换热系数 h 、对数平均温差 ΔT 和场协同角 θ 的定义如下

$$Q = mc_p (T_o - T_i) \quad (5)$$

$$h = \frac{Q}{A\Delta T} \quad (6)$$

$$\Delta T = \frac{(T_w - T_i) - (T_w - T_o)}{\ln[(T_w - T_i)/(T_w - T_o)]} \quad (7)$$

式中： u_m ——管束间最小截面风速， m/s ； d ——管外径， mm ； ν ——空气运动粘度， m^2/s ； λ ——空气热导率， $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ； Δp ——空气侧流动阻力， Pa ； N ——沿空气流动方向管排数； ρ ——空气密度， kg/m^3 ； c_p ——空气比热， $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ ； m ——空气质量流量， kg/s ； A ——空冷器空气侧传热面积， m^2 ； T_i ——空气入口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_o ——空气出口温度， $^{\circ}\text{C}$ ； T_w ——管壁温度， $^{\circ}\text{C}$ 。

2.4. 网格划分与独立性检验

由于翅片结构本身比较复杂，因此采用四面体非结构化网格系统以提高网格质量。为了捕捉空冷器中传热和流动过程的细节，对翅片和管壁附近的网格进行了加密处理。

为了验证网格的独立性，在计算前分别对数量为 542 万、573 万和 599 万的网格进行了考察， Nu 的最大偏差为 1.20%， Eu 的最大偏差为 0.59%，达到了网格独立的要求。为了保证计算精度的同时提高计算速度，选择网格数量为 573 万的网格系统进行数值模拟研究。

3. 数值模拟的准确性验证

3.1. 试验系统

为了验证数值模拟结果的准确性，对结构参数如表 1 所示的开缝翅片管空冷器进行了模化对比试验。

模化试验系统如图 4 所示。外界空气被引风机吸入风道中，由电加热器加热到试验工况所需温度，经过整流后横向冲刷试验元件吸收热量后进入喷嘴流量箱，最后经风机排至外界环境。循环水在稳压水箱中由水加热器加热到试验工况所需温度后，经过水泵和电磁流量计后进入试验元件管束内放出热量，最后回到水箱完成一次循环。

试验元件进、出口空气温度由经标定的铜-康铜热电偶网测得。试验段进出口压差、喷嘴进出口压差由 0.2 级精度的 EJA120A 型差压变送器测得。空气流量通过喷嘴流量箱测得。喷嘴进口压力由 0.15 级

精度的 PTX1400 型压力变送器测得。试验元件进、出口水温由精度 A 级的 Pt100 铂电阻测得。水体积流量由 0.2 级精度的 AFX040G 型电磁流量计测得。

利用 ADAM-4118 型模块采集所有测量仪表的输出信号，通过 ADAM-4520I 型模块转换后接入计算机进行数据自动采集、计算、动态显示及储存。在试验过程中，当空气吸热量与水放热量的误差在 $\pm 2.00\%$ 以内时，认为试验工况已经稳定，可以进行试验数据采集。

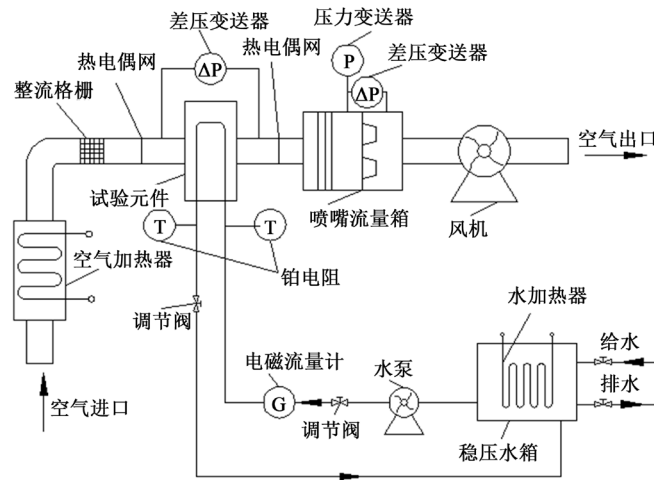


Figure 4. Experimental system
图 4. 试验系统

3.2. 试验结果与数值模拟结果对比

试验结果与数值模拟结果的对比见图 5，由图中可知，努赛尔数 Nu 的偏差为 $-1.47\% \sim 9.79\%$ ，欧拉数 Eu 的偏差为 $-5.51\% \sim 0.71\%$ ，说明数值模拟结果与试验结果吻合较好，满足工程应用的要求，因此本文所采用的数值模拟方法是可行的。

数值模拟结果与试验结果存在误差主要原因有：1) 数值模拟中采用了对称边界，而实际试验中边界存在流体交换；2) 数值模拟中管壁设为温度恒定，而实际过程中管壁温度沿水流方向存在变化；3) 由于加工工艺的局限导致试件与数值模拟模型存在差异；4) 数值模拟中未考虑试件的翅片与管壁之间的接触热阻；5) 试验中参数的测量存在误差。

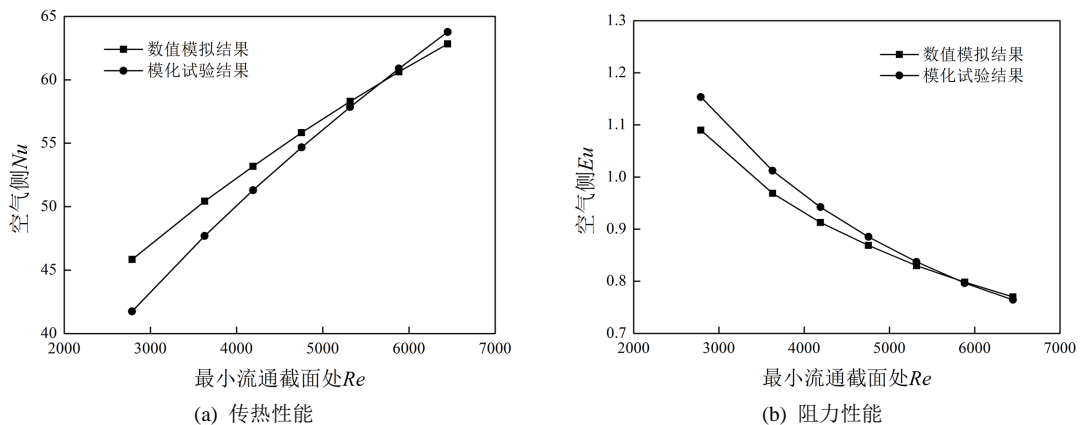


Figure 5. Comparison of results between experiment and numerical simulation
图 5. 试验结果与数值模拟结果对比

4. 计算结果及分析

4.1. 纵向涡发生器对空冷器传热与阻力性能的影响

图6为双向开缝翅片4排管空冷器的原始模型以及布置有高度 H_{VG} 分别为 $0.8P_f$ 、 $0.6P_f$ 、 $0.4P_f$ 和 $0.2P_f$ 纵向涡发生器的空气侧努赛尔数 Nu 和欧拉数 Eu 随最小流通截面处雷诺数 Re 变化的情况。

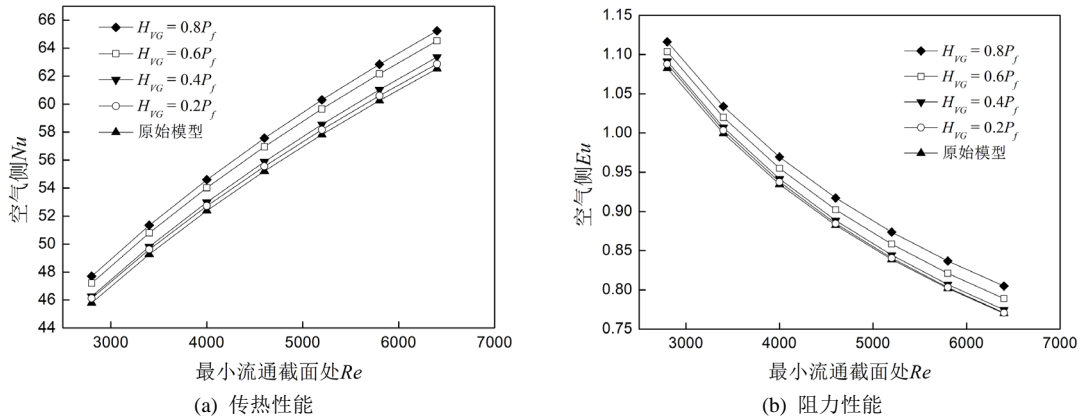


Figure 6. Effect of the height of vortex generator on heat transfer and flow resistance performances of slit finned tube heat exchangers

图 6. 纵向涡发生器高度对双向开缝翅片管换热器传热和阻力性能的影响

由图6可知，随着雷诺数的增加，不同纵向涡发生器高度下的空冷器的传热和阻力性能均提升；相同雷诺数下，布置有纵向涡发生器的空冷器的 Nu 和 Eu 均高于原始结构。

如图6(a)所示，相比于原始结构，相同雷诺数下布置高度 H_{VG} 分别为 $0.2P_f$ 、 $0.4P_f$ 、 $0.6P_f$ 和 $0.8P_f$ 纵向涡发生器的空冷器的 Nu 分别增加了0.54%~0.73%、1.03%~1.32%、3.08%~3.19%和4.16%~4.33%。与原始结构相比，布置了半球突涡发生器的空冷器传热性能得到了增强，其原因是气流经过半球突涡发生器时产生旋涡，气流的扰动增强；同时半球突涡发生器引导主流区的空气穿过冲孔，增强主流区与边界层区流体的混合。在形成纵向涡和二次流的作用下，冷热流体之间的混合加剧，空气的边界层减薄，空冷器的传热性能得到提升。

如图6(b)所示，相比于原始结构，相同雷诺数下布置高度 H_{VG} 分别为 $0.2P_f$ 、 $0.4P_f$ 、 $0.6P_f$ 和 $0.8P_f$ 纵向涡发生器的空冷器的 Eu 分别增加了0.13%~0.52%、0.62%~0.86%、1.97%~2.49%和3.16%~4.54%。空冷器的阻力性能随着涡发生器高度的增加而降低，这是由于随着涡发生器高度的增加，空气流经涡发生器时受到的局部阻力增大。

4.2. 纵向涡发生器对空冷器综合性能的影响

在空冷器的实际应用中，需要在满足换热量需求的同时尽可能降低空气侧流动阻力从而降低空冷塔的高度和建造成本。因此引入等压降约束条件下的综合性能评价指标[14] $Nu/f^{1/2}$ 评价空冷器的综合性能，图7为具有不同纵向涡发生器的双向开缝翅片4排管空冷器的综合性能 $Nu/f^{1/2}$ 随最小流通截面处 Re 变化的情况。由图可知，空冷器的综合性能随着涡发生器高度的提高而提高， H_{VG} 分别为 $0.2P_f$ 、 $0.4P_f$ 、 $0.6P_f$ 和 $0.8P_f$ 纵向涡发生器的空冷器的综合性能评价指标 $Nu/f^{1/2}$ 分别增加了0.48%~0.49%、0.61%~1.03%、1.95%~2.09%和2.06%~2.56%。布置涡发生器的空冷器的综合性能均优于原始结构，这表明布置半球突纵向涡发生器能够以较小的阻力升高为代价实现空冷器空气侧传热性能的较大提高，是一种高效低阻的强化换热方法。

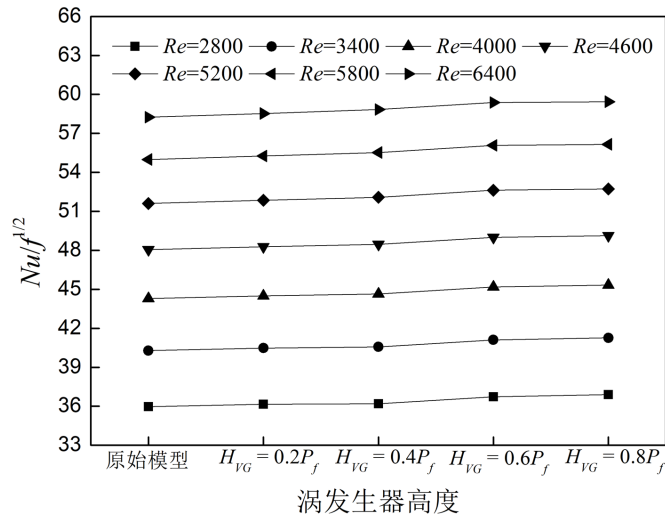


Figure 7. Overall performance of slit finned tube heat exchangers with different vortex generator height
图 7. 不同纵向涡发生器高度下的双向开缝翅片管空冷器综合性能

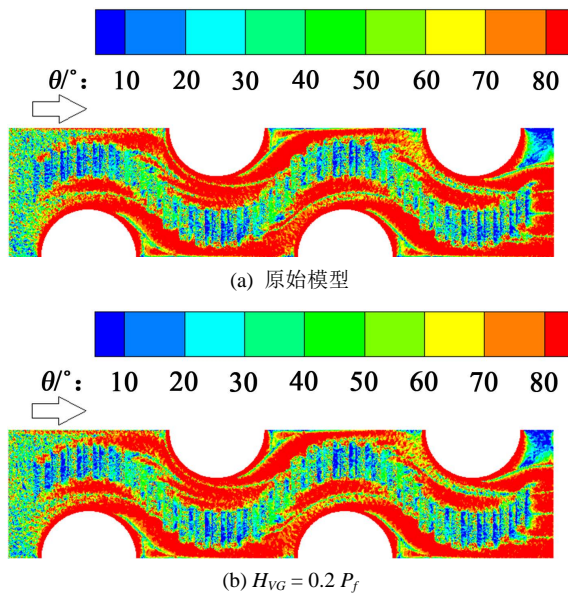
4.3. 纵向涡发生器对空冷器协同角的影响

在分析对流换热物理机制的基础上,过增元等人[15]提出了场协同原理,指出降低速度矢量与温度梯度方向的夹角可以使换热强化。协同角 θ 的定义式如下:

$$\theta = \arccos \frac{|u \cdot \nabla T|}{|u||T|} \quad (8)$$

式中: u 为速度矢量, T 为温度。

图 8 为进口风速为 2.1 m/s 时,翅片中间截面($z = 1.9 \text{ mm}$)协同角分布的对比。由图 8(b)~(e)可见,安装有涡流发生器的空冷器,涡发生器附近的协同角比较低。因此在涡发生器产生的纵向涡和导流的作用下,增强了空气的扰动,使空冷器的传热性能提高,可以归结为半球突涡发生器改善了空气侧的速度场与温度场的协同性。



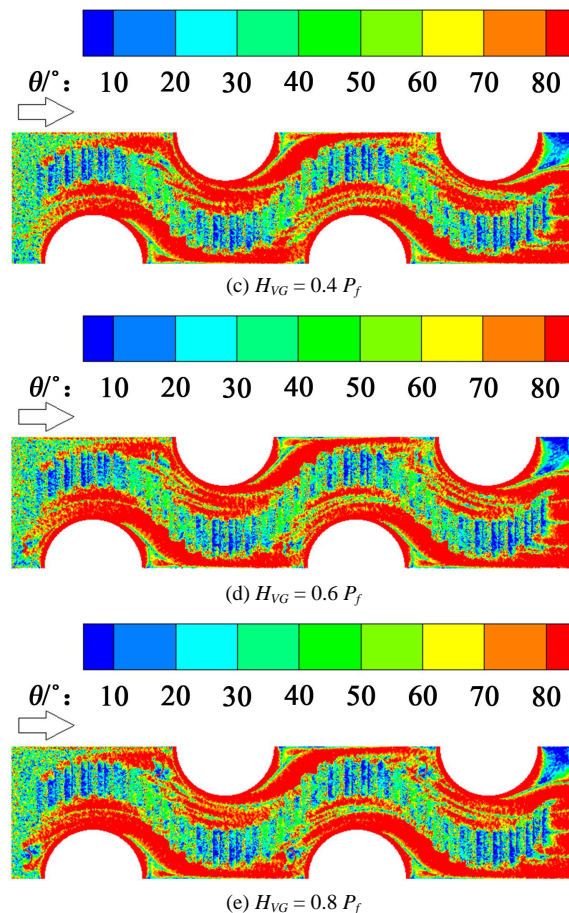


Figure 8. Synergy angle distribution of air channel center face
图 8. 翅片间中间截面空气协同角分布

5. 结论

- 1) 在开缝翅片管空冷器上布置半球突涡发生器后能够提升空冷器空气侧的传热性能和等压降条件下的综合性能。
- 2) 当涡发生器高度在 $0.2 P_f \sim 0.8 P_f$ 的范围内时，空冷器的传热性能和等压降条件下的综合性能随着涡发生器高度的增大而提高。
- 3) 在双向开缝翅片管空冷器上布置半球突纵向涡发生器使经过的流体产生二次流并改善空冷器空气侧速度场与温度场的协同性。

参考文献

- [1] 顾维藻, 神家锐, 马重芳. 强化传热[M]. 北京: 科学出版社, 1990.
- [2] 屈治国, 何雅玲, 陶文铨. 平直开缝翅片传热特性的三维数值模拟及场协同原理分析[J]. 工程热物理学报, 2003, 24(5): 825-827.
- [3] Wang, C.C., Lee, W.S. and Sheu, W.J. (2001) A Comparative Study of Compact Enhanced Fin-and-Tube Heat Exchangers. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **44**, 3565-3573.
[https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(01\)00011-4](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(01)00011-4)
- [4] 魏双. 翅片管换热器强化传热与流阻性能分析及结构优化[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [5] 袁益超, 衣志超, 王学刚. 开缝布置方式对开缝翅片管换热器传热与阻力特性的影响[J]. 热科学与技术, 2015,

- 14(6): 462-469.
- [6] 杨涛, 袁益超. 管束结构对开缝翅片椭圆管换热器性能的影响[J]. 化工学报, 2018, 69(4): 1365-1373.
- [7] Wang, C.C., Chen, K.Y., Liaw, J.S., *et al.* (2015) An Experimental Study of the Air-Side Performance of Fin-and-Tube Heat Exchangers Having Plain, Louver, and Semi-Dimple Vortex Generator Configuration. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, **80**, 281-287. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.030>
- [8] 何雅玲, 楚攀, 谢涛. 纵向涡发生器在管翅式换热器中的应用及优化[J]. 化工学报, 2012, 63(3): 746-760.
- [9] Gong, B., Wang, L.-B. and Lin, Z.-M. (2015) Heat Transfer Characteristics of a Circular Tube Bank Fin Heat Exchanger with Fins Punched Curve Rectangular Vortex Generators in the Wake Regions of the Tubes. *Applied Thermal Engineering*, **75**, 224-238. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.043>
- [10] 苏石川, 李光琛, 陈明华, 等. 圆弧形三角翼翅片管换热器流动与传热特性的数值模拟[J]. 动力工程学报, 2013, 33(3): 194-198.
- [11] 周国兵, 杨来顺. 涡流发生器对直接空冷凝汽器换热的影响[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(5): 1-8.
- [12] 冯知正, 周国兵, 杨来顺, 等. 等热流矩形通道内柱面翼涡发生器的强化换热特性研究[J]. 热能动力工程, 2013, 28(3): 246-251.
- [13] 于新娜, 袁益超, 马有福, 等. H形翅片管束传热和阻力特性的试验与数值模拟[J]. 动力工程学报, 2010, 30(6): 433-438.
- [14] 李雪, 陈永东, 吴晓红, 等. 热交换器能效评价指标适用性及可行性研究[J]. 热能动力工程, 2019, 34(2): 137-144.
- [15] 过增元, 黄素逸. 场协同原理与强化传热新技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.