

交错阵列短小柱肋强化传热特性的定量分析

卜诗^{1,2}, 沈彦儒¹, 许伟刚^{1,2}, 柳林^{1,2}, 张琳^{1,2}

¹常州大学机械工程学院, 江苏 常州

²江苏省绿色过程装备重点实验室, 江苏 常州

Email: bushi@cczu.edu.cn

收稿日期: 2020年10月6日; 录用日期: 2020年10月21日; 发布日期: 2020年10月28日

摘要

短小柱肋阵列在紧凑型换热装置的强化传热中具有广泛应用。对用于受限空间强化传热的小高径比交错阵列柱肋通道进行了数值模拟, 研究了展向柱间距、流向柱间距和雷诺数对气动传热特性的影响规律, 给出了通道阻力系数和强化传热等级的经验关联式, 并基于此对柱间距的影响作了定量分析。结果表明, 通道阻力系数随展向柱间距的扩大而减小, 但随流向柱间距呈非单调变化, 而须在沿程阻力和局部阻力间达到平衡, 阻力经验关联式中的指数绝对值表明: 流阻更多是受展向柱间距的影响; 通道强化传热能力随流向柱间距的缩小而增强, 但随展向柱间距呈非单调变化, 而须在柱间交互作用和柱侧附面层分离抑制之间达到平衡, 传热经验关联式中的指数绝对值表明: 传热更多是受流向柱间距的影响。

关键词

短小柱肋, 交错阵列, 强化传热, 经验关联式, 数值模拟

Quantitative Research on the Heat Transfer Enhancement from Staggered Arrays of Short Aspect Ratio Pin Fins

Shi Bu^{1,2}, Yanru Shen¹, Weigang Xu^{1,2}, Lin Liu^{1,2}, Lin Zhang^{1,2}

¹School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou Jiangsu

²Jiangsu Key Laboratory of Green Process Equipment, Changzhou Jiangsu

Email: bushi@cczu.edu.cn

Received: Oct. 6th, 2020; accepted: Oct. 21st, 2020; published: Oct. 28th, 2020

Abstract

Short Pin Fin array sees a broad range of applications in area of compact heat transfer devices. Computation was conducted for staggered arrays of low aspect pin fins used for enhancing heat

transfer in limited spaces. Effect of spanwise and streamwise pin spacing and Re number on the aerothermodynamic performances were investigated. Empirical correlations were established to estimate friction factor and heat transfer enhancement level, based on which a quantitative analysis was conducted for pin spacing. The results indicated that, friction factor increases with expanding spanwise pin spacing, yet no monotonic variation is observed with streamwise pin spacing, as balance is to be achieved between monolith and local resistances. The index value in friction correlation indicates that pressure loss is more influenced by spanwise pin spacing. Heat transfer capacity can be enhanced by increasing streamwise pin spacing, similarly, it doesn't show a monotonic variation with spanwise pin spacing, as balance is to be achieved between pin-pin interaction and depress of boundary layer separation on pin surface. The index value in heat transfer correlation indicates that heat transfer is more influenced by streamwise pin spacing.

Keywords

Short Pin Fin, Staggered Array, Heat Transfer Enhancement, Empirical Correlation, Numerical Simulation

Copyright © 2020 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

换热装置小型化要求的逐步提高,使受限空间内的强化传热日趋重要。在核心单元体积缩小但热负荷不变的条件下,如何在保证结构强度的同时使热通量满足要求,成为亟待解决的问题。短小柱肋阵列因具有较好的加工鲁棒性而成为一种常用的强化传热手段[1]。为保证结构强度,柱肋高径比(柱高 H /柱直径 D)通常很小。例如:为在燃气轮机小微化的同时保证功率和热效率,须为承受较高热负荷的叶片设计高效内部冷却结构[2][3][4],其中的叶片尾缘末端很薄,热负荷更高[5][6],却难以布置复杂的冷却拓扑,因此广泛采用小高径比的短柱肋阵列。为达到较好的传热效果,短柱阵列采取交错布置方式,如图1所示。交错阵列短小柱肋的强化传热能力受窄空间的限制,通过优化柱间距,能使其性能得到有效改善。

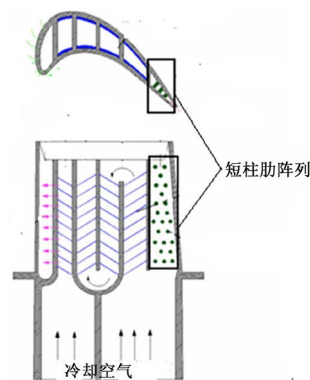


Figure 1. Short pin fin array in the trailing edge of turbine blade

图1. 涡轮叶片尾缘末端短柱肋阵列冷却结构示意图

小高径比的优点是结构强度高,但传热能力易被削弱。相比普通列管换热器,短柱阵列的特殊性体现在:结构方面,相比光通道,实际总传热面积减小,即柱面的面积小于柱肋占据的端壁面积;流动方

面, 柱面与端壁交互作用形成的大尺度流动结构在柱高方向上覆盖率较大, 使流场三维性加强; 传热方面, 端壁贡献的传热量比重较大。国内外学者已通过对比柱肋进行该型设计, 旨在减少流动阻力的同时进一步强化传热。饶宇等[7] [8]采用在柱肋中部劈缝的方式减少了部分形状阻力, 发现当窄缝宽度符合一定要求时, 阵列在阻力下降的同时传热水平还能有所提高, 但劈缝结构会在一定程度上牺牲部分结构强度。Katharine 等[9]检验了通过增材制造技术获得的星型、三角型、多面体等非常规柱肋的气动传热特性, 发现柱型结构的复杂化往往不利于强化传热性能的改善。因此, 综合考虑结构强度和制造鲁棒性, 圆柱型肋依然具有一定的优势和潜力。

由于柱面传热强于端壁, 柱肋阵列的平均传热系数随高径比的增大而增强[10] [11]。因此在传热空间受限且结构强度要求须被同时满足的条件下, 无法通过大幅增加高径比改善传热, 此时可采用调整柱间距的方式平衡气动阻力和传热系数, 使结构热通量满足要求。根据柱间距方向与整体流向相对位置的不同, 可分为流向柱间距 S_x 和展向柱间距 S_y , 如图 2 所示。为增加通用性, 通常用 S_x/D 和 S_y/D 作无量纲处理。围绕柱间距对阵列气动传热特性的影响, 已经有过一些定性的研究。Lyll 等[12]发现对于 $H/D = 1.0$ 的阵列, 柱面与端壁传热的相对强弱取决于 S_y/D 。Axtmann 等[13] [14]测量了 $H/D = 2.0 \sim 4.0$ 、 $S_x/D = S_y/D = 2.5 \sim 5.0$ 柱肋阵列的端壁传热, 得到了与 Re 数无关的流向传热分布。Lawson 等[15]指出, 对于 $H/D = 1.0$ 的阵列, 缩小 S_x/D 同时扩大 S_y/D 可改善气动传热性能。

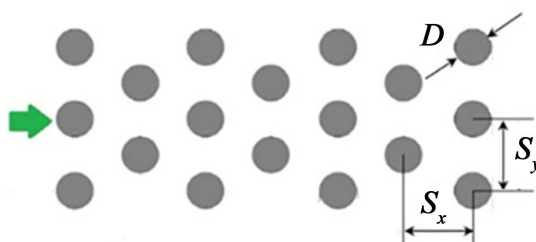


Figure 2. Definition of pin spacing
图 2. 柱间距定义

目前, 针对 $H/D < 1.0$ 短柱肋的定量研究未见报道。本文针对 $H/D = 0.5$ 典型交错短柱阵列的气动传热特性展开定量分析, 获得气动参数 Re 数和结构参数 S_x/D 、 S_y/D 对阵列流阻和传热的影响规律, 为此类受限空间内强化传热性能的改善提供指导。

2. 研究方法

2.1. 研究对象

针对 $H/D = 0.5$ 的短柱, 考察柱间距的影响, 取值范围为 $1.0 \leq S_x/D \leq 5.0$ 和 $1.5 \leq S_y/D \leq 5.5$, 涵盖大多数应用中的结构参数范围。具体取值如表 1 所示。共需考察 $1 \times 5 \times 5 = 25$ 种阵列结构。

Table 1. Structural parameters of short pin fin array
表 1. 短柱阵列结构参数

结构参数	取值				
H/D	0.5				
S_x/D	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0
S_y/D	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5

2.2. 参数定义

柱肋阵列气动传热性能用无量纲参数表征，其中阻力系数定义为：

$$f = \frac{\Delta P}{2\rho U_{\max}^2 N} \quad (1)$$

ΔP 为从阵列进口到出口的总压损失， ρ 为进口工质密度， U_{\max} 为阵列中的最高流速， N 为柱肋总排数。

用 Nu/Nu_0 表征扰流引起的强化传热， Nu 为实际努塞尔数， Nu_0 为相同当量直径光滑通道平均努塞尔数，通过 Dittus-Boelter 公式计算：

$$Nu_0 = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (2)$$

公式(2)中， Pr 为普朗特数。

2.3. 计算域和边界条件

根据短柱阵列的流动特点，取单一流向周期，进一步利用对称面，取一半通道作为计算域。为在阵列入口达到流动完全发展和避免出口回流，在通道进出口分别设置延伸段，如图 3 所示。工质为理想气体，粘度 ν 由 Sutherland 定律计算。进口速度根据 Re 数计算。表征 Re 数的特征尺度是柱肋直径，特征速度是流体通过柱间展向最小截面的平均通流速度，根据一般的工况范围， Re 数取 5000~65,000，进口温度取 293 K。出口给定压力，大小为 1 atm。端壁和柱面设为速度无滑移，温度设为 323 K。

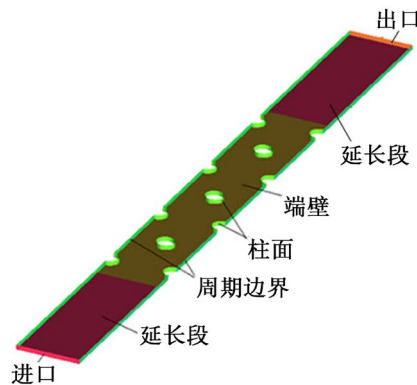


Figure 3. Computational domain and boundary conditions of pin fin array ($H/D = 0.5$, $S_x/D = 3.0$, $S_y/D = 3.5$)

图 3. 短柱阵列计算域和边界示意($H/D = 0.5$, $S_x/D = 3.0$, $S_y/D = 3.5$)

2.4. 网格建立

利用 ICEM 软件划分全域六面体结构化计算网格，近壁面加密，局部网格如图 4 所示， Y^+ 值限定在 1.0 以下。为平衡计算效率和经济性，对典型阵列结构作网格独立性检验。图 5 显示，网格数达到一定量级后对计算结果的影响可忽略。因此，对全部 25 种阵列结构，采用网格独立后的一致尺度。

2.5. 数值方法验证

采用 ANSYS Fluent 19.1 软件进行三维流动传热数值计算。参考 Axtmann [14] 的交错阵列柱肋实验数据进行模型验证，如图 6。其中 standard $k-\omega$ 模型在流阻(图 6(a))和传热(图 6(b))两方面与实验结果取得了较高的吻合度。因此，在对不同结构进行数值计算时，统一采用 standard $k-\omega$ 模型。

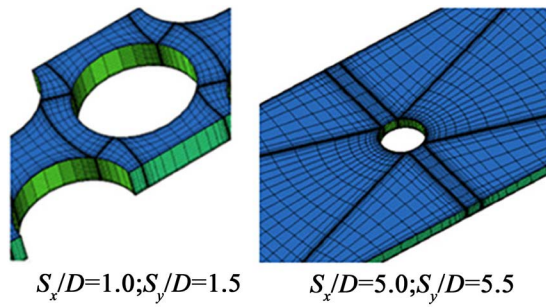


Figure 4. A schematic diagram of local grids
图 4. 局部网格示意图

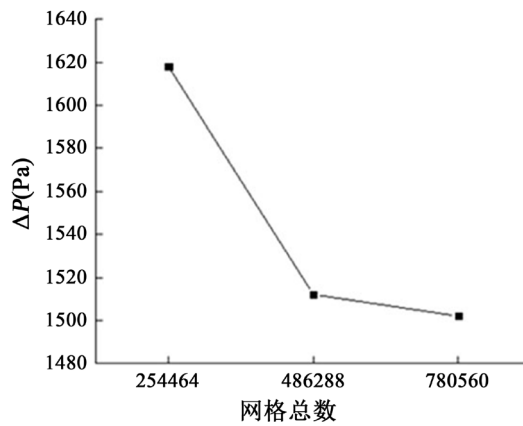


Figure 5. Variation of pressure loss against mesh size
图 5. 阵列总压损失随网格数量的变化

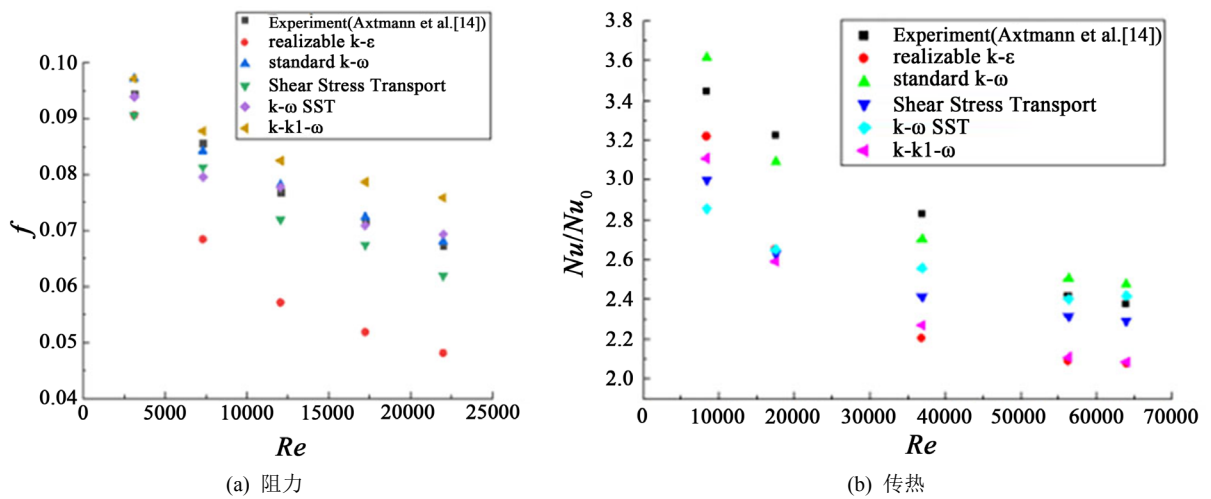


Figure 6. Validation of numerical method
图 6. 数值方法验证

3. 结果与分析

3.1. 阻力特性

对于不变的流向柱间距，阻力随展向柱间距的减小而增大，如图 7(a)和图 7(b)所示。原因是，较小

的 S_y/D 意味着较高的通道堵塞率。对比图 7(a)和图 7(b)可知, 流向柱间距较小时, S_y/D 对流阻的影响较大, 显然是受相邻柱肋间更加剧烈的流动交互作用影响。对于不变的展向柱间距, 流阻却随 S_x/D 呈非单调变化, 如图 7(c), 图 7(d)所示。 S_x/D 较小时, 上下游相邻柱肋间的流动交互作用较剧烈, 产生较高的局部耗散, 但较小的柱间距离使沿程损失不显著; S_x/D 较大时, 上下游相邻柱肋间的流动交互作用减弱, 局部损失减少, 但较长的流向距离却带来更显著的沿程损失。因此存在某最佳 S_x/D 值, 能在局部损失和沿程损失间达到平衡, 获得最小的流阻, 这一最佳值随展向柱间距的不同而改变。比如, 当 $S_y/D = 1.5$ 时, $S_x/D = 2.0$ 是较好的方案, 而当 $S_y/D = 5.5$ 时, $S_x/D = 1.0$ 是较好的方案。在考查阵列流阻时, 流向柱间距是不太重要的因素, 对比图 7(a), 图 7(b)和图 7(c), 图 7(d)可知, 展向柱间距对流阻的影响远大于流向柱间距。因此, 仅通过扩大展向柱间距可达到有效减阻的目的。

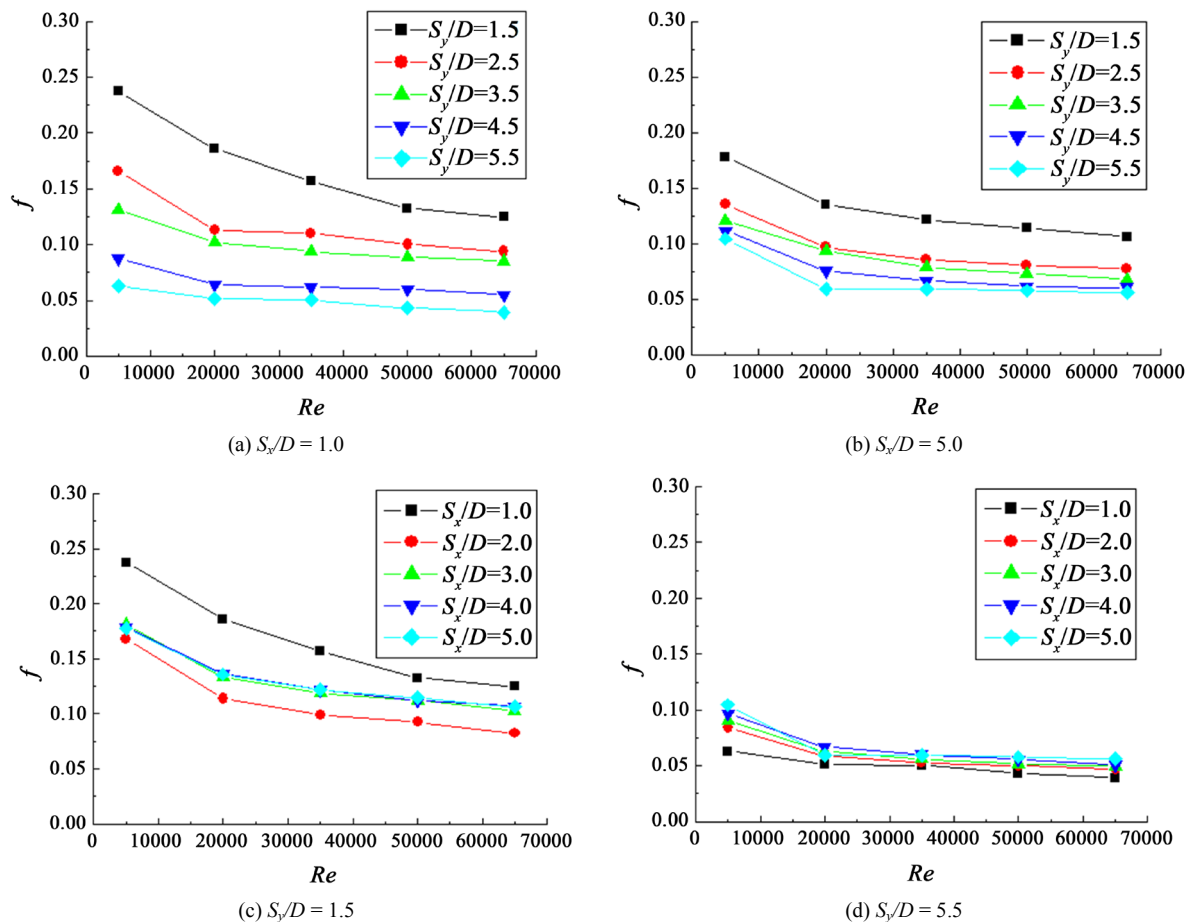


Figure 7. Friction factor across array against pin spacing
图 7. 阵列阻力特性随柱间距的变化

3.2. 传热特性

相比可作二维几何简化的长柱结构, 短柱肋阵列流场的三维特性大幅加强, 其背风面的回流结构不同于典型的柱体扰流[15], 引起传热特性变化。注意到, 短柱阵列通道高度的压缩使得大尺度流动结构受到抑制, 流动的惯性效应被削弱, 粘性效应相对增强, 传热受到不利影响, 部分结构工况下的传热甚至弱于光滑通道($Nu/Nu_0 < 1.0$)。分别对比图 8(a)和图 8(c)或图 8(b)和图 8(d)可以看出, 流向柱间距对传热的影响强于展向柱间距, 这与 Lawson 等[16]关于高径比为 1.0 的柱肋阵列的研究结论是一致的。但是, 相

比长柱阵列，小高径比短柱阵列流向与展向柱间距对传热影响程度的差异较小，也是由于上下游柱间交互作用形成的大尺度流动受到了窄空间的抑制。对比图 8(a)和图 8(b)或图 8(c)和图 8(d)可知，由于缩小柱间距使相邻柱间的交互作用更加剧烈，柱肋在一个方向上的排布越紧凑，受另一个方向间距变化的影响越显著，由此推断，不同方向柱间距变化之间有明显的相互影响。分析图 8(a)和图 8(b)，对于固定的流向柱间距，传热随 S_y/D 不呈单调变化，而是存在某一最佳值。若 S_y/D 太小，柱侧附面层分离受到抑制，不利于传热；如果 S_y/D 太大，相邻柱间的交互作用削弱，也不利于传热。在所考察的参数范围内， $S_y/D = 2.5$ 是一个较为理想的取值。图 8(c)和图 8(d)表明，传热随流向柱间距呈单调变化， S_x/D 越小，传热越强，这是受上下游柱肋间交互作用增强的影响，在所考察的 S_x/D 范围内，上游柱肋背风面的大尺度流动基本不受下游柱肋的抑制。因此，可先选定某一较为理想的展向柱间距，然后尽量缩小流向柱间距，实现有效的强化传热。

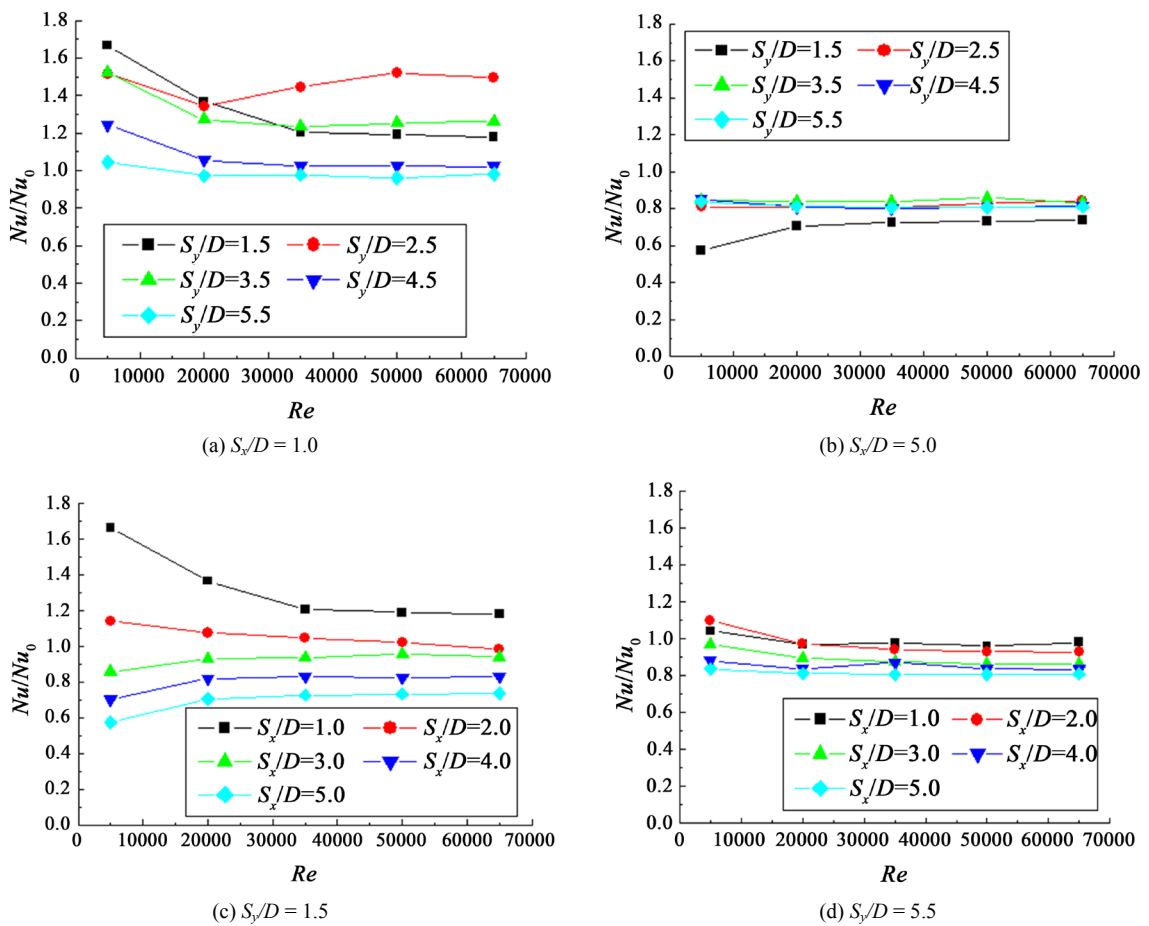


Figure 8. Array heat transfer against pin spacing
图 8. 阵列传热特性随柱间距的变化

3.3. 经验关联式

对全部计算所得数据进行回归分析和指数拟合，可得阻力系数 f 的经验关联式为：

$$f = 0.1198 \left(\frac{S_x}{D} \right)^{0.0505} \left(\frac{S_y}{D} \right)^{-0.7022} Re_D^{0.0327} \quad (3)$$

强化传热等级 Nu/Nu_0 的经验关联式为:

$$Nu/Nu_0 = 1.2023 \left(\frac{S_x}{D} \right)^{-0.3248} \left(\frac{S_y}{D} \right)^{-0.1138} Re_D^{0.0222} \quad (4)$$

关联式中流向和展向柱间距对应指数绝对值的大小分别指明了两种几何参数对流阻和传热的相对影响程度。对于阻力系数, S_x/D 和 S_y/D 的对应指数绝对值分别为 0.0505 和 0.7022, 说明展向柱间距对流阻的影响远高于流向柱间距, 这与 2.1 节的分析一致; 对于强化传热等级, S_x/D 和 S_y/D 的对应指数绝对值分别为 0.3248 和 0.1135, 说明流向柱间距对传热的影响高于展向柱间距, 这与 2.2 节的分析一致。由关联式可进一步看出两种柱间距对流阻和传热影响程度的定量差异。对于流阻, 两种方向柱间距存在 14 倍差距, 而对传热, 两种方向柱间距只存在不到 3 倍差距。因此, 交错阵列短小柱肋传热系统的“投入”在几何上受到显著的方向差异影响, 而其“产出”受几何的影响则相对趋于各向同性。

4. 结论

通过数值模拟研究了展向和流向柱间距对交错阵列短小柱肋强化传热特性的影响规律, 拟合了阵列流阻和强化传热的经验关联式, 基于定量分析结果给出了气动传热性能的优化方向。主要结论有:

- 1) 阻力系数随展向柱间距的扩大而减小, 但随流向柱间距的改变不呈单调变化, 而须在沿程阻力和局部阻力之间达到平衡。
- 2) 传热随流向柱间距的缩小而增强, 但随展向柱间距的改变不呈单调变化, 而须在柱间交互作用和柱侧边界层分离之间达到平衡。
- 3) 展向柱间距对流阻的影响远强于流向柱间距, 而传热则更多是受流向柱间距的影响。

致 谢

本研究得到江苏省高等学校自然科学研究面上项目(No. 19KJB470002), 以及江苏省绿色过程装备重点实验室开放课题基金资助项目(No. GPE202005)的支持, 特此感谢!

参考文献

- [1] Ritunesh, K., Rufat, A., Gherhardt, R., *et al.* (2020) New Approach of Triumphant Temperature Nonuniformity and Heat Transfer Performance Augmentation in Micro Pin Fin Heat Sinks. *Journal of Heat Transfer*, **142**, Article ID: 062501. <https://doi.org/10.1115/1.4046535>
- [2] 马超. 涡轮叶片在空气和蒸汽两种冷却介质下冷却性能的对比分析[J]. 热科学与技术, 2014, 13(2): 169-175.
- [3] 李彦霖, 饶宇, 王德强. 涡轮叶片冷却通道高性能微小肋湍流传热的数值研究[J]. 工程热物理学报, 2018, 39(10): 2271-2279.
- [4] 侯伟涛, 潘贤德, 张洪, 等. 高压涡轮气冷叶片冷却掺混损失数值研究[J]. 推进技术, 2018, 39(2): 342-350.
- [5] Mazaheri, K., Zeinalpour, M. and Bokaei, H.R. (2016) Turbine Bladecooling Passages Optimization Using Reduced Conjugate Heat Transfer Methodology. *Applied Thermal Engineering*, **103**, 1228-1236. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.05.007>
- [6] 夜毅, 李雪英, 任静, 等. 倾斜冲击与柱肋组合冷却结构的传热特性[J]. 工程热物理学报, 2019, 40(2): 389-395.
- [7] 饶宇, 李麟. 具有柱肋阵列与分离式柱肋阵列的冷却通道内流阻与传热实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(6): 782-787.
- [8] 李麟, 饶宇, 万超一. 窄缝宽度对分离式柱肋冷却通道内传热与流动影响的数值计算[J]. 上海交通大学学报, 2014, 48(6): 756-760.
- [9] Ferster, K.K., Kirsch, K.L. and Thole, K.A. (2018) Effects of Geometry, Spacing, and Number of Pin Fins in Additively Manufactured Microchannel Pin Fin Arrays. *ASME Journal of Turbomachinery*, **140**, Article ID: 011007. <https://doi.org/10.1115/1.4038179>

-
- [10] Chyu, M.K., Siw, S.C. and Moon, H.K. (2009) Effects of Height-to-Diameter Ratio of Pin Element on Heat Transfer from Staggered Pin-Fin Arrays. *Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea and Air*, Orlando, 8-12 June 2018, GT2009-59814. <https://doi.org/10.1115/GT2009-59814>
- [11] Chyu, M.K., Yen, C.H. and Siw, S.C. (2007) Comparison of Heat Transfer from Staggered Pin Fin Arrays with Circular, Cubic and Diamond Shaped Elements. *Proceedings of ASME Turbo Expo: Power for Land, Sea, and Air*, Montreal, GT2007-28306. <https://doi.org/10.1115/GT2007-28306>
- [12] Lyall, M.E., Thrift, A.A., Thole, K.A., *et al.* (2011) Heat Transfer from Low Aspect Ratio Pin Fins. *Journal of Turbomachinery, Transactions of the ASME*, **133**, Article ID: 011001. <https://doi.org/10.1115/1.2812951>
- [13] Axtmann, M., Wolfersdorf, J.V. and Meyer, G. (2015) Application of the Transient Heat Transfer Measurement Technique in a Low Aspect Ratio Pin Fin Cooling Channel. *ASME Journal of Turbomachinery*, **137**, Article ID: 121006. <https://doi.org/10.1115/1.4031267>
- [14] Axtmann, M., Poser, R., Wolfersdorf, J.V., *et al.* (2016) Endwall Heat Transfer and Pressure Loss Measurements in Staggered Arrays of Adiabatic Pin Fins. *Applied Thermal Engineering*, **103**, 1048-1056. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.04.066>
- [15] 李国能, 方佳, 郑友取. 层流脉动流中平行圆柱体的温度边界层[J]. 热科学与技术, 2015, 14(3): 208-213.
- [16] Lawson, S.A., Thrift, A.A., Thole, K.A., *et al.* (2011) Heat Transfer from Multiple Row Arrays of Low Aspect Ratio Pin Fins. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **54**, 4099-4109. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2011.04.001>