

内螺纹管微通道强化换热研究综述

姚骄芮, 吴宛泽*, 张鑫*, 王华璐, 王君翔

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年3月17日; 录用日期: 2026年3月28日; 发布日期: 2026年4月7日

摘要

内螺纹管微通道作为高效紧凑式换热器的核心元件, 在高功率电子器件冷却、航空航天热管理及空调制冷等领域具有广阔应用前景。本文系统综述了内螺纹管微通道强化换热的研究进展, 重点关注肋片形状及几何尺寸对流动与换热特性的影响机制。通过梳理国内外研究成果, 总结了肋片几何参数对二次流强度、边界层扰动、传热恶化抑制及阻力特性的作用规律, 分析了不同肋片结构的性能优劣及其适用工况。研究表明, 三角形肋片因流线型好、扰流强度适中兼具综合性能优势, 梯形肋片在高雷诺数下表现突出, 方形肋片虽扰动最强但阻力损失过大。当前研究仍存在肋形对比系统性不足、多参数耦合机制不清、预测关联式普适性差等问题。未来研究应聚焦于肋形-尺寸协同优化、机器学习辅助设计及多工况适应性评价体系的建立。本文为内螺纹管微通道换热器的结构优化与工程应用提供理论参考。

关键词

内螺纹管, 微通道, 肋片形状, 强化换热

A Review on Heat Transfer Enhancement in Microchannels with Rifled Tubes

Jiaorui Yao, Wanze Wu*, Xin Zhang*, Hualu Wang, Junxiang Wang

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: March 17, 2026; accepted: March 28, 2026; published: April 7, 2026

Abstract

The rifled tube microchannel as the core component of an efficient and compact heat exchanger has broad application prospects in high-power electronic device cooling, aerospace thermal management, and air conditioning refrigeration. This paper systematically reviews the research progress of rifled tube microchannel heat transfer enhancement, with a focus on the influence mechanism of

*通讯作者。

文章引用: 姚骄芮, 吴宛泽, 张鑫, 王华璐, 王君翔. 内螺纹管微通道强化换热研究综述[J]. 电力与能源进展, 2026, 14(2): 68-78. DOI: 10.12677/aepe.2026.142008

rib shape and geometric size on the flow and heat transfer characteristics. By sorting out the research results at home and abroad, it summarizes the effect laws of rib geometric parameters on secondary flow intensity, boundary layer disturbance, heat transfer deterioration suppression, and resistance characteristics, and analyzes the advantages and disadvantages of different rib shapes and their applicable conditions. The research shows that triangular rib shapes have the most comprehensive performance advantages due to their good streamline and moderate turbulence intensity. Trapezoidal rib shapes perform outstandingly at high Reynolds numbers. Square rib shapes have the strongest disturbance but excessive resistance loss. Current research still has problems such as insufficient systematic comparison of rib shapes, unclear multi-parameter coupling mechanism, and poor universality of prediction correlation formulas. Future research should focus on the coordinated optimization of rib shape and size, machine learning-assisted design, and the establishment of a multi-condition adaptability evaluation system. This paper can provide theoretical references for the structural optimization and engineering application of rifled tube microchannel heat exchangers.

Keywords

Rifled Tube, Microchannel, Fin Shape, Heat Transfer Enhancement

Copyright © 2026 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

随着高功率电子器件特征尺寸不断减小、集成度持续提升,其运行过程中的热流密度急剧增加,散热问题已成为制约器件性能与可靠性的关键瓶颈[1]。美国空军的调查显示,超过50%的电子设备失效源于温度控制不当[2]。在此背景下,高效紧凑的冷却技术成为研究热点,微通道换热器因其比表面积大、体积小、冷却剂用量少、换热系数高等优势,被广泛认为是解决高功率密度散热问题的有效途径[3][4]。微通道换热器的概念可追溯至1981年Tuckerman和Pease[5]的开创性工作,他们首次提出在硅基集成电路上集成微通道液冷散热器,实现了 790 W/cm^2 的散热能力。此后四十余年间,研究者们从通道结构优化、表面微纳结构设计、工质改性等多个维度探索强化换热方法。其中,内螺纹管作为一种被动式强化换热技术,通过在管道内壁加工出螺旋状肋片,诱导流体产生二次流和旋流效应,显著增强流体掺混并破坏边界层,从而提升换热性能。本文所讨论的内螺纹管微通道是指水力直径在 0.2 mm 至 3 mm 范围内的内螺纹管结构。这一尺度范围介于常规通道与微尺度通道之间,既保留了微通道换热系数高的优势,又避免了过小尺度带来的制造困难和流动阻力过大的问题,是当前工程应用和研究的热点尺度区间。内螺纹管的核心优势在于肋片诱导的旋流可使中心低温流体不断补充至壁面以延缓液膜蒸干[6],同时肋片既增加了换热面积又扰动近壁区流动,其螺旋结构产生的离心力还能促进气液相重新分布并抑制传热恶化[7],这些特性使其在超临界流体冷却、两相流沸腾换热及空调制冷等领域备受关注。

肋片几何形状是影响内螺纹管性能的关键参数。常见的肋形包括方形、梯形、三角形和圆形,不同形状对应不同的流动扰动模式、二次流强度及阻力特性。此外,肋高、肋宽、螺旋角、肋间距等尺寸参数同样对换热性能有显著影响[8]。因此,系统研究肋片形状与尺寸对流动换热的影响规律,对于优化内螺纹管设计、提升换热器综合性能具有重要意义。

2. 内螺纹管微通道强化换热的发展历程

2.1. 强化换热技术的演进脉络

换热强化技术的发展可划分为四个阶段。第一代技术以光管为基础，依靠增大流速或扩展表面提升换热效果；第二代技术引入二维粗糙元，如螺纹、横纹槽等，通过破坏边界层强化换热；第三代技术采用三维复杂结构，如针翅、交错肋等，进一步强化流体掺混[9]；第四代技术则结合微尺度效应与多相流，在微通道尺度上实现高效热管理。

内螺纹管作为第二代强化换热技术的典型代表，其发展经历了从常规尺度到微尺度的跨越。早期研究主要集中于空调制冷领域的大管径内螺纹管，关注其对制冷剂冷凝与蒸发性能的提升。罗欣[10]回顾了内螺纹铜管的发展历史，指出不同齿形结构对空调能效比的影响显著，螺旋角、齿高、齿数等参数优化可使能效比提升 3% 以上。秦妍等人[11]的实验研究表明，采用 7 mm 内螺纹管的冷凝器相比光管，冷凝温度降低 1 K，换热量增大 2.5%，能效比增加 3.3%。

2.2. 微通道尺度的内螺纹管研究兴起

随着 MEMS 加工技术的进步，研究者开始将内螺纹结构引入微通道尺度。刘恩光等人[12]采用 MEMS 工艺在硅基上制作了带有方形内肋的平行微通道，首次实验研究了微尺度内肋管的流动换热特性，发现肋高和肋间距对阻力与换热性能有显著影响，合理设计肋参数可起到明显的强化换热作用。这一研究标志着内螺纹管从常规尺度向微尺度的延伸。

此后，针对微通道内螺纹管的研究日益丰富。谈玉龙[13]综述了微通道换热器在空调中的应用现状，指出微通道结霜性能、翅片参数优化是研究重点。葛洋和姜未汀[14]则系统介绍了微通道换热器在航空航天、暖通空调、微型核反应堆等领域的应用前景，同时指出两相流机理、制冷剂分布、制造规范等问题仍是推广应用的障碍。Khan 和 Fartaj [15]的综述进一步明确了微通道相比常规通道的优势，但同时也指出其传热与流动关联式尚未成熟。

2.3. 内螺纹管研究的多元化发展

近年来，内螺纹管研究呈现出多元化趋势。在工质方面，从传统的水、制冷剂扩展到超临界流体、纳米流体[16]、混合工质[17]等。邵明坤等人[18]指出，混合工质在沸腾吸热过程中具有温度滑移特性，可能为微通道冷却带来新机遇，但多因素参数影响仍需深入研究。

在应用领域方面，内螺纹管从最初的空调冷凝器拓展至航空发动机空-油换热器[19]、超临界锅炉水冷壁、电子器件散热等高温流密度场景。孙文清等人[20]的论文系统研究了内螺纹管中超临界 RP-3 航空煤油的换热特性，探讨了螺纹数目、螺纹升角等参数对传热恶化的抑制机制。吴宛泽等人[21]则从旋流强化两相流传热的角度，深入分析了内螺纹管对沸腾危机的抑制作用，提出了基于绝对涡通量的二次流强度定量表征方法。

在研究方法方面，实验研究与数值模拟并重。张定才等人[22]采用 Fortran 编程和数值模拟方法，系统研究了螺旋角、肋高、肋条数对内螺纹管湍流传热与阻力特性的影响。闫晓婷[23]和马静云[24]等人分别针对内螺纹管的传热关联式和阻力关联式开展了系统研究，提出了适用于不同参数范围的预测模型。付江奇等人[25]则针对高雷诺数下电蓄热锅炉内螺纹管进行了换热计算与模拟对比。国际上，Negi 等人[26]通过参数化 CFD 分析优化了内螺纹管的肋形结构。

3. 肋片形状对流动换热影响的研究现状

3.1. 不同肋形结构的特点与作用机制

肋片形状直接影响内螺纹管内的流动结构与换热机理，以下四种基本肋形各有其流体动力学特征。

方形肋对流动的阻碍作用最为显著，能在肋后形成明显的回流区，导致流线畸变程度最大。这种强扰动虽有利于促进流体混合，但也使摩擦系数显著增加。研究表明，方形肋的换热系数并非最高，但其引起的压力损失明显高于其他肋形。

三角形肋的流线型最好，流体流经肋片时分离区较小，流动阻力相对较低。但由于扰流强度适中，三角形肋仍能有效破坏边界层，实现较好的换热效果。在相同肋高和肋宽条件下，三角形肋的综合性能评价指标最优，这主要得益于其在强化换热与控制阻力之间取得的良好平衡。

梯形肋的性能介于方形与三角形之间。研究发现，在高雷诺数下，梯形肋的换热系数和摩擦系数均表现突出，综合性能优于其他肋形，这可能源于其斜边对流动方向的引导作用，从而产生更有利的二次流结构。

圆形肋在文献中研究相对较少，但其流线型最佳，流动阻力最小。通过优化肋形设计，可以将矩形肋调整为特定形状，可在相同肋高下显著提升换热效果而基本保持压降不变，这说明通过肋形优化可以在不增加阻力代价的前提下获得换热增益。

3.2. 肋形对二次流与旋流强度的影响

内螺纹管区别于光管的核心特征在于其能够诱导二次流和旋流。旋流产生的离心力可以促进汽-液分层和流体微团混合，使中心液体不断补充壁面液膜，从而强化换热并抑制沸腾危机。另一方面，通过螺旋度和二次流强度定量描述了内螺纹管内的旋流效应，发现高温区二次流强度与换热状况存在耦合机制。

肋形对二次流的产生与发展具有重要影响。三角形肋诱导的二次流强度适中而且分布均匀，方形肋产生的二次流局部强度高但分布不均。在单相流工况下，叶文林等人[27]针对 T 型内螺纹微型管内 Taylor 流的数值研究发现，螺纹的存在会加强管内扰动，螺纹高度对泰勒气泡分裂有决定性影响，而螺纹宽度的影响较小。这表明肋形参数对不同流型的影响机制存在差异。王彦红等人[28]的研究进一步揭示了内螺纹管内二次流与变密度耦合产生的作用机制，螺纹结构和变密度耦合产生二次流，螺旋度沿流动方向不断增大，高温区二次流强度与换热状况具有耦合机制。这种耦合机制为理解肋形对换热的影响提供了理论依据。

在两相流工况下，肋形对沸腾换热的影响更为复杂。研究表明，肋片的存在能够促进气泡的脱离和重新分布，方形肋由于其较强的扰流作用，有助于破坏壁面气膜，延缓沸腾危机的发生；而三角形肋则因其流线型特征，对气泡的阻碍作用较小，有利于气泡及时脱离壁面。不同肋形对临界热流密度的提升效果存在差异，需结合具体工质和工况进行评价。

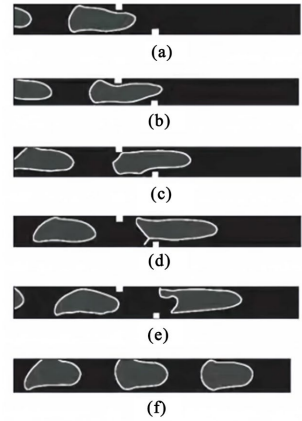
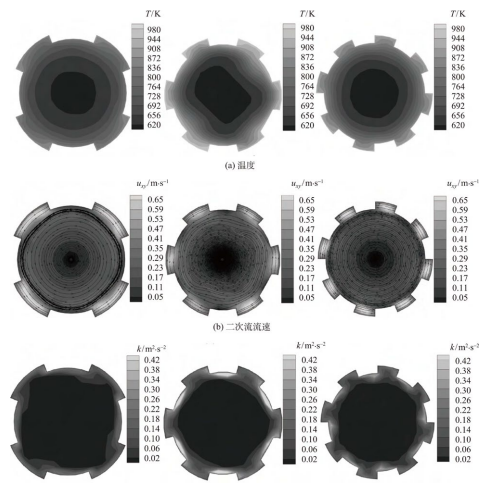
在超临界流体工况下，张鑫等人[29]在倾斜内螺纹管中超临界水的实验研究中发现，内螺纹管的传热系数几乎不随倾斜角度变化，但摩擦阻力系数随螺旋角增大而显著增加。这提示我们在肋形优化中需综合考虑螺旋角的影响。曲默丰等人[30]的数值研究表明，半周加热条件下内螺纹肋的旋流作用导致内壁温度和热流密度呈抛物线分布，肋底与背风侧交点处温度最高，肋顶与迎风侧交点处温度最低。肋形对超临界流体类气膜效应的抑制能力是其性能优劣的关键评判标准。

3.3. 不同肋形的综合性能对比

根据现有文献如下表 1 所示，不同肋形的性能特点可归纳为梯形肋和方形肋的换热强度较高，方形肋的流动阻力最大而三角形与圆形肋阻力较小，从综合性能来看三角形肋在低雷诺数下表现优异，梯形肋则在高雷诺数下更具优势。

值得注意的是，不同工质工况下肋形的综合性能排序存在差异。在单相湍流工况下，换热性能主要取决于肋片对边界层的破坏程度，方形肋和梯形肋表现突出；在流动沸腾工况下，肋形对气泡行为和液膜分布的影响成为主导因素，三角形肋因对流动体的阻碍较小而表现出更好的综合性能；在超临界流体工况下，肋形对类气膜效应的抑制能力成为关键，梯形肋和三角形肋因能够诱导更强的二次流而更具优势。因此，肋形的优选需结合具体工质和应用场景进行。靳亚娟[31]的研究表明，在非均匀加热条件下，内螺旋管内的换热特性与均匀加热时有显著差异，旋流作用使受热面附近的流体与非受热面附近的低温流体混合加强，从而改善受热面传热。Shanmugam 和 Maganti [32]的实验研究也证实，对于非均匀热负荷，不同微通道结构和流动配置的适应性存在差异，I 型流配置在均匀热负荷下表现优异，但在某些非均匀热负荷下 MC-1 型通道反而更适用。

Table 1. Typical research findings on the impact of ribbed structures on flow heat transfer
表 1. 肋形结构对流动换热影响的典型研究成果

研究者	研究对象与工况	核心研究结论	研究图片
叶文林等人[27]	T 型内螺纹微型管内 Taylor 流的数值模拟	螺旋结构可显著加强管内扰动；螺旋高度对泰勒气泡分裂起决定性作用，螺旋宽度的影响较小；肋形参数对不同流型的影响机制存在显著差异	 <p>(a) (b) (c) (d) (e) (f)</p> <p>弹状流在有螺纹管和无螺纹管内的不同形态</p>
王彦红等人[28]	内螺纹管内二次流与变密度的耦合作用机制	螺旋结构与流体变密度耦合可诱发二次流，螺旋度沿流动方向持续增大；高温区二次流强度与换热状况存在显著耦合机制	 <p>(a) 温度 (b) 二次流速度 (c) 湍流强度</p>

续表

张鑫等人[29]

倾斜内螺线管中超临界水的流动换热实验

内螺线管的传热系数几乎不随管体倾斜角度变化；摩擦阻力系数随螺线管螺旋角的增大而显著提升

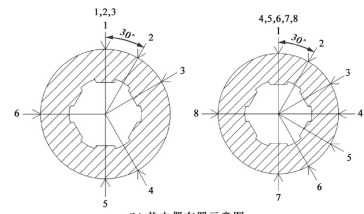
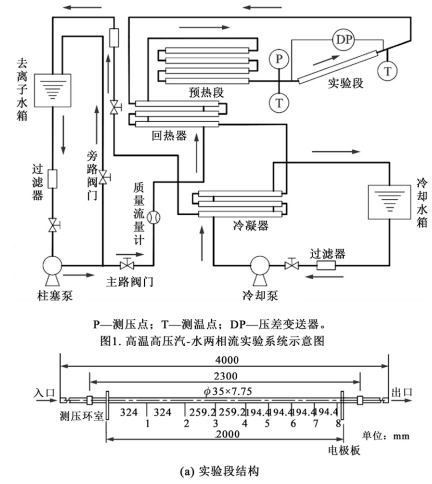


图2. 实验段结构及热电偶布置示意图

曲默丰等人[30]

半周加热条件下内螺线管的流动换热数值研究

肋结构的旋流作用导致内壁温度与热流密度呈抛物线分布，肋底与背风侧交点处温度最高，肋顶与迎风侧交点处温度最低；肋形优化必须结合具体工况开展

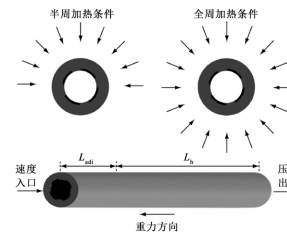
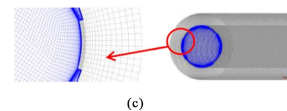
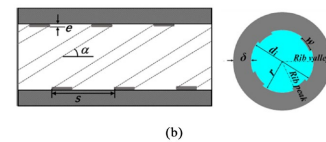
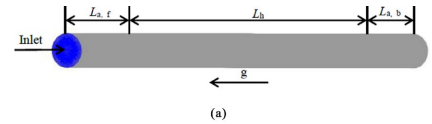
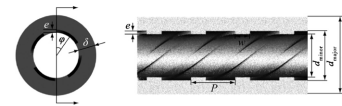


Fig.1 Physical model of the internally ribbed tube



靳亚娟[31]

非均匀加热条件下内螺线管的换热特性

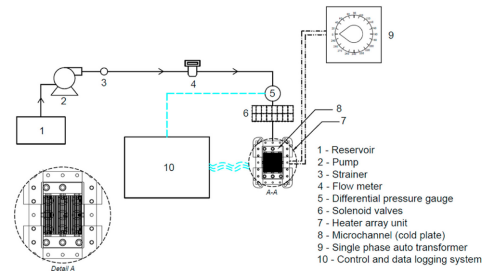
非均匀加热工况下，内螺线管的换热特性与均匀加热工况存在显著差异；旋流作用可强化受热面与非受热面的流体混合，显著改善受热面传热效果

续表

Shanmugam 和 Maganti [32]

非均匀热负荷下不同微通道结构的流动换热适应性实验

非均匀热负荷下，不同微通道结构与流动配置的工况适应性存在显著差异；I型流配置在均匀热负荷下表现优异，部分非均匀热负荷工况下MC-1型通道适配性更优



4. 肋片尺寸参数的优化研究

4.1. 肋高对换热与阻力的影响

肋高是影响内螺纹管性能的最敏感参数之一。螺纹高度直接影响蒸干起始位置与蒸干演进区域，而螺纹宽度和截距对蒸干演进的影响相对较小。随着肋高增加，蒸干起始位置延后，蒸干区域扩大，同一截面内的壁温差异增大。

在换热性能方面，肋高增加能够有效提升努塞尔数，在 0.20 mm 至 0.60 mm 的范围内，换热性能可提升约 7%至 19%，这归因于肋片对边界层的破坏和二次流的增强。然而，换热增益伴随着显著的阻力代价，阻力系数随肋高增加呈线性增长趋势，增幅最高可达 44.5%，且在高雷诺数下这一效应更为突出。值得注意的是，肋高的影响并非孤立存在，其与螺旋角、雷诺数等参数存在耦合作用，在不同工况下表现有所差异。云红杰等人[33]的研究指出，通过合理调整管材结构参数如图 1 所示，内螺纹管换热性能较光管提升近 3 倍，但进一步优化发现减小齿高和齿顶角可在一定范围内提升换热性能。综合来看，肋高与换热性能并非简单的正相关关系，而是存在一个最佳范围。因此，肋高的选择需要在换热强化与流动阻力之间寻求平衡，通过精细化设计实现最优的综合效能。

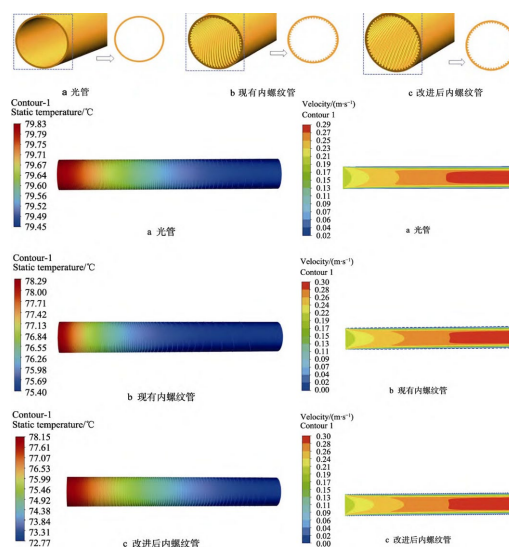


Figure 1. Geometric models of three types of pipes; simulation results of the outer wall temperature fields of the three types of pipes; velocity vector of the middle plane of the three types of pipes

图 1. 3 种管材几何模型；3 种管材外壁温度场模拟结果；3 种管材中间平面速度矢量

4.2. 螺旋角与肋间距的影响

螺旋角是影响内螺纹管性能的另一关键几何参数,其对流动与换热特性的作用机制与肋高有所不同。螺旋角对传热性能的影响最为显著其变化如图 2 所示,螺旋角增大会使单位管长压降逐渐上升,且在高雷诺数下这种效应更为明显,而在较低雷诺数下影响较小。其作用机制主要包括两方面,一是改变速度分布,使肋条上方流速增大、两侧流速减小,导致流动均匀性下降,二是增强流体的剪切作用,形成不规则涡流,从而提升湍流强度,这两方面共同导致摩擦阻力增大。值得注意的是,螺旋角对壁面温度的影响相对复杂,研究表明其对内壁面温度和传热系数的影响并不显著,主要作用体现在阻力特性和旋流强度的改变上。增大螺旋角能够有效削弱类气膜效应并延后其发生位置,同时显著提高旋流强度,这对于抑制传热恶化具有积极意义。

肋间距对流动换热的影响相对较小。研究表明,肋间距对蒸干演进的直接影响较为有限,其对阻力特性的影响也不及肋高和螺旋角显著。肋间距的变化主要影响流动的再附着过程和边界层重建,合理设计肋间距能够起到一定的强化换热作用,但其敏感度低于其他几何参数。总体而言,螺旋角是调控旋流强度和阻力特性的主导参数,而肋间距的优化需要与其他参数协同考虑,以实现综合性能的提升。

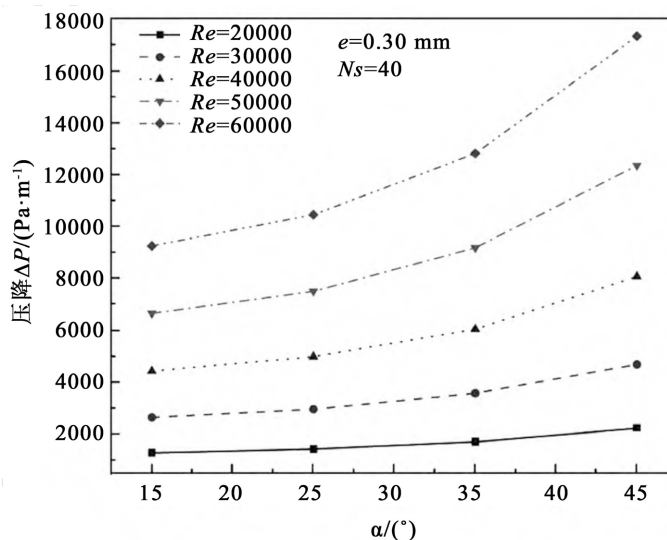


Figure 2. The influence of helix angle on the pressure drop per unit pipe length at different Reynolds numbers

图 2. 不同雷诺数下螺旋角对单位管长压降的影响

4.3. 肋宽与肋条数的影响

肋宽与肋条数对内螺纹管性能的影响相对温和。肋条数增加可使努塞尔数提升约 6%至 25%,但提升速率随肋条数增加逐渐趋缓;阻力系数则在肋条数较少时上升显著,超过一定阈值后增长减缓。肋宽对蒸干演进影响较小,但可通过调节二次流分布间接影响换热性能。因此,肋宽与肋条数的优化需兼顾换热增益与阻力控制,在满足换热需求的前提下选择适当参数,避免过度阻力损失。

Shahsavari 等人[34]则采用两相混合模型研究了肋数对生物纳米流体在螺纹管内层流流动的影响如图 3 所示,随着肋数的增加,流体温度升高,且温度分布更加均匀,这是因为肋数增多使得流体混合更加充分。图 3 还展示了肋数增加对流体混合效果的改善:靠近肋部的流体开始旋转,而当远离肋部后旋转运动停止。发现肋数增加对热力学第一定律有利,但对第二定律不利。对于六头和八头螺纹管,性能评价

系数始终大于 1，而对于双头螺纹管则始终小于 1。这表明存在最小肋数要求，只有超过一定数量后内螺纹管的强化效果才能体现。

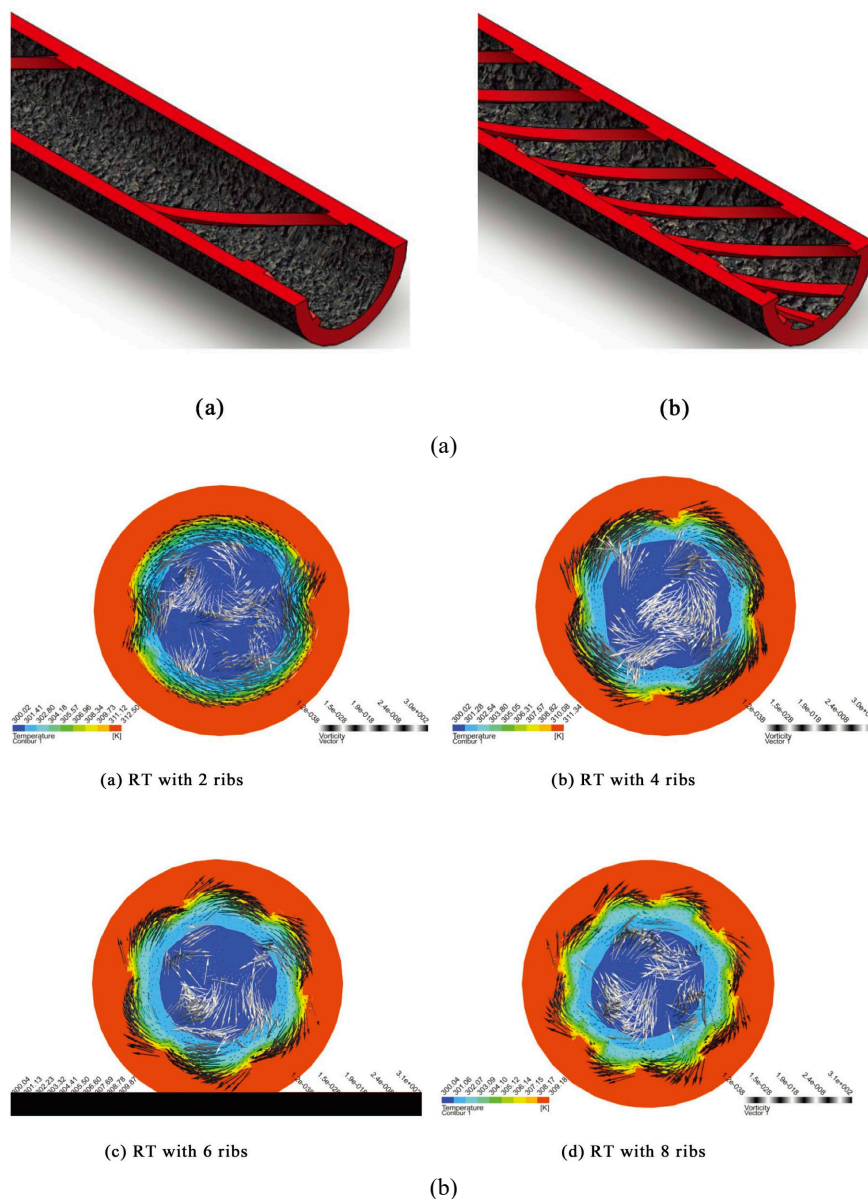


Figure 3. Models with 2 and 8 ribs; isotherm lines and velocity vectors at the cross-section
图 3. 具有 2 根和 8 根肋骨的模型；截面处的温度等值线和速度矢量

5. 总结与展望

内螺纹管微通道凭借其独特的旋流强化传热机制，在电子器件散热、沸腾危机抑制及超临界流体冷却等关键领域展现出显著的应用价值。研究表明，通过优化肋片形状与尺寸，内螺纹管能有效诱导二次流，延缓液膜蒸干并抑制传热恶化，其性能优势已在空-油换热器与超临界锅炉等场景中得到验证。然而，当前研究仍存在微通道肋形对比缺乏系统性、多几何参数间的耦合机制不清晰，以及现有预测关联式普适性较差等问题。未来研究应着力于肋形与尺寸的协同优化，引入机器学习等先进方法辅助设计，

并结合微细制造技术开展多工况下的实验验证, 从而建立更完善的性能评价体系。通过深入揭示肋片结构对流动换热的影响机理, 有望推动内螺纹管从经验设计向机理性设计跨越, 为高功率设备的热管理提供更高效的解决方案。

参考文献

- [1] Sefiane, K. and Koşar, A. (2023) Prospects of Heat Transfer Approaches to Dissipate High Heat Fluxes: Opportunities and Challenges. *Applied Thermal Engineering*, **215**, Article 118990. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2022.118990>
- [2] Yeh, L.T. (1995) Review of Heat Transfer Technologies in Electronic Equipment. *Journal of Electronic Packaging*, **117**, 333-339. <https://doi.org/10.1115/1.2792113>
- [3] Miao, Y., Zhang, T., Xu, X., Yang, S., Chen, H. and Huang, H. (2025) A Comprehensive Review on Advanced Microchannel Cooling Technologies: Two-Phase Thermal Management and Machine Learning Applications. *Applied Thermal Engineering*, **279**, Article 127697. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.127697>
- [4] Yu, Z.Q., Li, M.T. and Cao, B.Y. (2024) A Comprehensive Review on Microchannel Heat Sinks for Electronics Cooling. *International Journal of Extreme Manufacturing*, **6**, Article 022005. <https://doi.org/10.1088/2631-7990/ad12d4>
- [5] Tuckerman, D.B. and Pease, R.F.W. (1981) High-Performance Heat Sinking for VLSI. *IEEE Electron Device Letters*, **2**, 126-129. <https://doi.org/10.1109/edl.1981.25367>
- [6] Behnampour, A., Akbari, O.A., Safaei, M.R., Ghavami, M., Marzban, A., Sheikh Shabani, G.A., et al. (2017) Analysis of Heat Transfer and Nanofluid Fluid Flow in Microchannels with Trapezoidal, Rectangular and Triangular Shaped Ribs. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, **91**, 15-31. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2017.04.006>
- [7] Du, X., Li, W., Zhang, X., Chen, J., Chen, T. and Yang, D. (2022) Experimental Research on the Flow and Heat Transfer Characteristics of Subcritical and Supercritical Water in the Vertical Upward Smooth and Rifled Tubes. *Energies*, **15**, Article 7941. <https://doi.org/10.3390/en15217941>
- [8] Zhang, J.Z., Zhang, L.L., Zhang, B., Zhou, N.X., et al. (2024) Numerical Analysis and Experimental Study of Two-Phase Flow Pattern and Pressure Drop Characteristics in Internally Microfin Tubes. *Case Studies in Thermal Engineering*, **64**, Article 105521. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105521>
- [9] 谢公南, 王秋旺, 罗来勤. 管内强化传热性能的熵产分析与性能评价[J]. 化工学报, 2006, 57(2): 241-245.
- [10] 罗欣. 空调能效比与高效传热内螺纹铜管的发展[J]. 铜业工程, 2007(2): 33-34.
- [11] 秦妍, 张剑飞. 关于内螺纹管及光管冷凝器换热效果的实验分析[J]. 制冷与空调(四川), 2011, 11(1): 59-61.
- [12] Liu, E.G., Wu, H.Y. and Tang, H.M. (2009) Flow and Heat Transfer Characteristics in Silicon-Based Microchannels with Internal Ribs. *CIESC Journal*, **60**, 1906-1911.
- [13] 谈玉龙. 微通道换热器在空调应用中的研究现状[J]. 机械工程师, 2018(8): 95-97.
- [14] 葛洋, 姜未汀. 微通道换热器的研究及应用现状[J]. 化工进展, 2016, 35(S1): 10-15.
- [15] Khan, M.G. and Fartaj, A. (2011) A Review on Microchannel Heat Exchangers and Potential Applications. *International Journal of Energy Research*, **35**, 553-582. <https://doi.org/10.1002/er.1720>
- [16] Maïga, S.E.B., Nguyen, C.T., Galanis, N. and Roy, G. (2004) Heat Transfer Behaviours of Nanofluids in a Uniformly Heated Tube. *Superlattices and Microstructures*, **35**, 543-557. <https://doi.org/10.1016/j.spmi.2003.09.012>
- [17] 赵金辉, 魏延龙, 徐政, 布一凡. 不同断面冷却通道内超临界 RP-3 对流换热数值研究[J]. 热科学与技术, 2025, 24(4): 375-383.
- [18] 邵明坤, 常慧, 雷旭斌, 等. 混合工质两相流微通道冷却研究进展[J]. 微纳电子技术, 2025, 62(8): 78-91.
- [19] Kaya, A., Özdemir, M.R., Keskinöz, M. and Koşar, A. (2014) The Effects of Inlet Restriction and Tube Size on Boiling Instabilities and Detection of Resulting Premature Critical Heat Flux in Microtubes Using Data Analysis. *Applied Thermal Engineering*, **65**, 575-587. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.062>
- [20] 孙文清. 内螺纹管中超临界 RP-3 航空煤油换热特性数值研究[D]: [硕士学位论文]. 吉林: 东北电力大学, 2024.
- [21] 吴宛泽. 旋流强化两相流传热特性及沸腾危机抑制研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024.
- [22] 张定才, 马静云, 梁冰, 等. 内螺纹管湍流特性的数值模拟[J]. 中原工学院学报, 2023, 34(4): 51-58.
- [23] 闫晓婷. 内螺纹管湍流传热特性及关联式研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 中原工学院, 2023.
- [24] 马静云. 内螺纹管管内流动特性及阻力关联式研究[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 中原工学院, 2023.

- [25] 付江奇, 王启民, 王国峰. 高雷诺数下电蓄热锅炉内螺纹管换热计算与分析[J]. 沈阳工程学院学报(自然科学版), 2021, 17(2): 30-32+37.
- [26] Negi, V.P.S., Pandey, V.K. and Ranganayakulu, C. (2024) Optimization of Rifled Tube by Parametric Changes Using CFD for Goodness Factor Enhancement. *Heat Transfer*, **53**, 688-706. <https://doi.org/10.1002/htj.22970>
- [27] 叶文林, 鄢志鹏, 张莹, 等. T型内螺纹微型管内 Taylor 流型变化的数值研究[J]. 化学工程, 2017, 45(9): 45-51.
- [28] 王彦红, 孙文清, 李雨健, 等. 竖直内螺纹管中超临界 RP-3 航空煤油换热特性数值研究[J]. 工程热物理学报, 2024, 45(3): 826-835.
- [29] 张鑫, 刘朝晖, 毕勤成, 等. 倾斜内螺纹管中超临界水的传热和流动阻力特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(12): 106-115.
- [30] 曲默丰, 李娟, 董乐, 等. 半周加热内螺纹管中超临界水传热特性的数值模拟及机理分析[J]. 动力工程学报, 2019, 39(11): 893-899.
- [31] 靳亚娟. 非均匀加热内螺纹管中超临界水的换热特性研究[D]: [硕士学位论文]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- [32] Shanmugam, M. and Maganti, L.S. (2024) Experimental Investigation of Microchannel Heat Sink Performance under Non-Uniform Heat Load Conditions with Different Flow Configurations. *International Journal of Thermal Sciences*, **203**, Article 109128. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2024.109128>
- [33] 云红杰, 陈大勇, 刘劲松, 等. 基于传热模型和有限元模拟的内螺纹管材换热性能改进研究[J]. 精密成形工程, 2025, 17(10): 157-166.
- [34] Shahsavari, A., Jafari, M., Baniasad Askari, I. and Selimefendigil, F. (2023) Thermo-Hydraulic Performance and Entropy Generation of Biologically Synthesized Silver/Water-Ethylene Glycol Nano-Fluid Flow Inside a Rifled Tube Using Two-Phase Mixture Model. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, **45**, 4463-4480. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1850932>