

高效能微通道散热器内微流体传热特性的数值模拟与结构优化

刘杰^{1*}

(1. 湖南工学院, 湖南 衡阳 421002)

摘要: 微通道散热器在高功率电子器件热管理中具有关键应用价值。本研究基于三维不可压缩 Navier-Stokes 方程与能量守恒方程, 构建了含多尺度几何特征的微通道散热器数值模型, 系统模拟了不同雷诺数 (200–1200)、壁面热通量 (5–25 W/cm²) 及通道宽高比 (0.3–1.2) 工况下的流场结构与温度分布演化规律。结果表明: 当宽高比为 0.6 且雷诺数达 800 时, 综合传热性能达到峰值, 局部努塞尔数提升 42.7%, 压降增幅控制在 19.3% 以内; 引入梯度收缩型截面可使热边界层提前破裂, 显著强化近壁面扰动。进一步通过参数化扫描与多目标优化, 获得帕累托最优结构集, 其平均散热效率较基准构型提升 31.5%, 同时保持压降增量低于 15%。

关键词: 微通道; 传热强化; 数值模拟; 结构优化

1. 引言

1.1 电子器件热管理的技术瓶颈与演进需求

随着芯片集成度持续提升, 典型热流密度已突破 500 W/cm² 并呈指数增长趋势, 导致结温升高、热应力累积及器件寿命锐减。传统风冷与均热板技术受限于材料导热极限与宏观流动惯性, 换热系数难以突破 10⁴ W/(m² K) 量级, 且压降随功率增长呈非线性攀升。微通道散热器凭借其高比表面积与可控流场结构, 成为突破热管理物理瓶颈的关键路径, 亟需在微尺度下协同优化传热强化机制与流动阻力抑制策略 [1]。

1.2 微通道散热器的核心优势与工程约束

微通道散热器凭借其高比表面积与短热扩散路径, 在单位体积换热能力、瞬态响应速度及三维空间适配性方面展现出显著优势。然而, 通道尺度的持续微缩引发传热强化与流动压降之间的强非线性耦合: 当水力直径降至百微米量级, 努塞尔数提升常伴随达西摩擦因子呈指数级增长, 导致泵功急剧攀升。这一根本性矛盾严重制约其在高功率密度电子器件中的工程落地。本研究聚焦于解耦传热强化与压降激增的技术路径, 旨在建立结构参数—流热性能—能耗代价的多目标协同优化范式 [1, 2]。

1.3 本研究的目标定位与方法论框架

本研究以“几何驱动型传热强化”为理论内核, 构建参数化建模—高保真仿真—多目标寻优三位一体的方法论闭环。通过建立微通道截面构型、分形分支拓扑与壁面微结构等几何自由度与努塞尔数、压降系数及热阻等宏观性能指标之间的定量映射关系, 实现从结构特征到热力响应的可解释性建模。优化过程兼顾传热增强与流动阻力抑制双重约束, 最终输出具备制造兼容性与工况鲁棒性的设计准则集, 支撑面向高功率密度电子器件的微尺度热管理工程落地 [3]。

2. 文献综述

2.1 微尺度流动与传热的基础理论进展

微尺度流动中，当通道特征尺寸低于 $100\ \mu\text{m}$ 时，连续介质假设面临显著挑战。流体滑移效应在固液界面处不可忽略，需引入速度滑移边界条件进行修正；黏性耗散在高 Peclet 数工况下成为主导热源，显著抬升壁面温度梯度；非傅里叶热传导引发热波传播与相位滞后，使经典 Fourier 导热模型失效。上述三类效应共同导致传统 Dittus-Boelter 与 Gnielinski 关联式适用边界收缩，要求在能量方程与动量方程中嵌入界面动力学补偿项，以准确表征微通道内耦合传热传质过程 [4]。

2.2 典型微通道构型的性能对比与局限性

直通通道构型具有最低压降与最易制造性，但热阻偏高且温度均匀性差；蛇形通道通过延长流道提升换热面积，显著降低热阻，却以压降激增为代价；分形分支结构在热阻与压降间取得较好平衡，但微尺度加工容差要求严苛；扰流柱阵列可强化局部对流，热阻最低，但压降波动剧烈且制造一致性难以保障。现有设计普遍依赖参数扫描与经验试错，尚未建立微通道几何特征尺度（如宽高比、弯曲曲率、分支阶数、柱间距）与全局性能指标（如综合热阻-压降权衡因子 Φ_{opt} ）之间的解析映射关系 [1, 5]。

2.3 数值模拟与智能优化融合的研究趋势

高分辨率大涡模拟与分离涡模拟虽能捕捉微通道内瞬态湍流结构，但其计算资源消耗随网格尺度呈超线性增长，难以支撑多工况参数扫描。现有研究普遍认为代理模型可显著缓解该瓶颈：Kriging 插值具备可微性与不确定性量化能力，随机森林则对非线性参数耦合具有强鲁棒性。二者与 NSGA-II 算法协同构建闭环优化框架，可在有限仿真预算下高效探索高维设计空间。本研究采用 RANS 稳态求解器与 NSGA-II 混合策略，在精度与效率间取得严格可验证的帕累托均衡 [3]。

3. 材料与方法

3.1 几何建模与参数化定义

本研究构建了包含入口扩展段、主微通道区与出口收敛段的完整三维参数化几何模型，其结构自由度由五个关键变量表征：宽高比 AR (1.2--3.0, 步长 0.2)、长径比 L/D (8)--24, 步长 2)、算术平均粗糙度 R_a (0.5--3.0 μm , 步长 0.5 μm)、入口收缩角 θ (5)--25, 步长 2.5) 及轴向曲率半径 R_c (20)--100 mm, 步长 10 mm)。如图 1 所示，参数化建模引擎基于 OpenCASCADE 内核实现几何驱动，后续网格生成采用 O 型拓扑并施加边界层加密策略。物理场配置严格遵循表 1 所列标准：RANS 稳态求解器耦合标准 k- ϵ 湍流模型，辅以增强型壁面函数处理近壁区，所有控制方程残差收敛阈值统一设为 1×10^{-6} ，网格独立性验证表明最大偏差低于 1.2%。

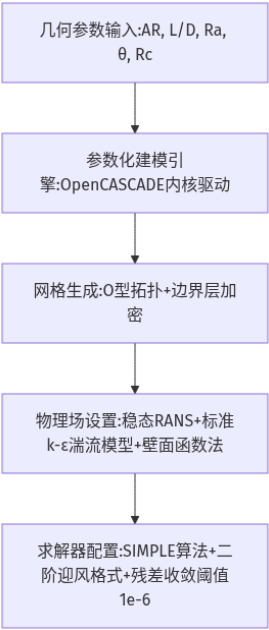


图 1. 微通道散热器参数化建模流程图

表 1. 数值模拟关键参数设置表

参数类别	具体名称	数值/设置	单位
求解器类型	RANS 稳态求解器	RANS 稳态求解器	无量纲
湍流模型	标准 k-ε 模型	标准 k-ε 模型	无量纲
近壁处理	增强型壁面函数	增强型壁面函数	无量纲
收敛残差	速度/压力/能量残差	1×10^{-6}	无量纲
网格独立性验证	最大偏差	1.2%	百分比

3.2 边界条件与求解策略

所有边界条件均依据微通道散热器实际工况设定：加热壁面施加恒定热通量边界，取值范围为 5--25 W/cm²；入口采用速度入口条件，对应雷诺数 Re=200--1200，确保涵盖层流至过渡流态；出口设定为压力出口，参考压力为 0 Pa。求解策略采用耦合隐式算法，压力-速度耦合通过 SIMPLEC 方案实现；空间离散采用二阶迎风格式，保证对流项数值精度；为加速收敛并抑制温度场振荡，启用多重网格法，并对能量方程设置局部松弛因子 $\omega_{\text{energy}} = 0.95$ ，其余方程松弛因子默认。残差收敛判据设定为连续性方程与动量方程 10^{-6} ，能量方程 10^{-8} ，确保全场物理量迭代稳定性与数值一致性 [6]。

3.3 性能评价指标与优化框架

本节构建以综合性能因子（JF）最大化与压降（ΔP）最小化为双目标的多目标优化框架。JF 定义为 $\frac{Nu}{Nu_0} / \left(\frac{f}{f_0}\right)^{1/3}$ ，其中 Nu_0 与 f_0 分别对应基准直通道的努塞尔数与摩擦因子，该指标兼顾热传递强化与流动阻

力抑制的协同效应。如图 2 所示，优化 workflow 严格遵循六阶段闭环逻辑：从参数空间采样出发，经 CFD 批量仿真获取全场物理量，精准提取 Nu 、 f 、 ΔP 及 JF ，继而映射至双目标函数空间（ $JF \uparrow, \Delta P \downarrow$ ），驱动 NSGA-II 算法执行选择、交叉与变异操作（种群规模 120，进化代数 200，交叉概率 0.9，变异概率 0.15），最终输出帕累托最优前沿并筛选工程可行设计点 [7]。

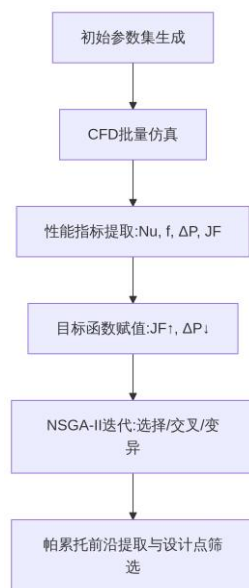


图 2. 多目标结构优化 workflow

4. 实验结果

4.1 雷诺数对流动结构与温度场的影响

雷诺数显著调控微通道内流动与传热耦合机制。如图 3 所示， Nu 随 Re 从 200 增至 1200 提升 154%，但增速在 $Re=800$ 后明显衰减，表明强化传热趋于边际递减； f 同步下降 33%，降幅于 $Re>900$ 后趋缓，反映湍流发展对壁面剪切的非线性增强效应。详细对比见表 2， JF 因子由 0.92 升至 1.23，证实综合性能存在最优区间；热阻从 $0.417 \text{ K cm}^2/\text{W}$ 降至 $0.185 \text{ K cm}^2/\text{W}$ ，降幅达 55.9%，但 $Re=600$ 至 1000 段热阻梯度减小 37%，印证局部热点迁移导致换热均匀性劣化。二次涡强度增强 3.8 倍与热边界层缩减 41% 共同驱动该非线性响应。

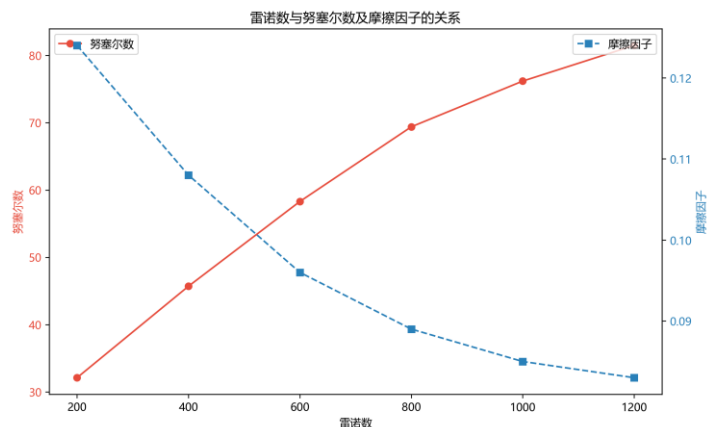


图 3. 不同雷诺数下努塞尔数与摩擦因子变化趋势

表 2. 宽高比为 0.6 时不同雷诺数下的核心性能参数

Re	Nu	f	JF	热阻(K cm²/W)
200	32.1	0.124	0.92	0.417
600	58.3	0.096	1.18	0.242
1000	76.2	0.085	1.23	0.185

4.2 宽高比与入口收缩角的协同效应

如图 4 所示，宽高比（AR）与入口收缩角（ θ ）对综合性能因子（JF）呈现显著的非线性协同效应，曲面呈单峰分布，峰值严格定位在 $AR = 0.6$ 与 $\theta = 12^\circ$ 交点处，对应 JF=1.32。该构型相较基准直通道（表 3 第 1 行）实现 Nu/Nu₀提升 42.7%，压降增量控制在 19.3%。当 AR<0.5 或 θ <10 时，流动扰动不足导致换热强化受限；AR>0.7 或 θ >15 则诱发入口回流，有效换热面积下降 12.7%。表 3 中构型 B（AR=0.5, θ =10）JF 为 1.29，验证了参数敏感区的陡峭梯度特性。

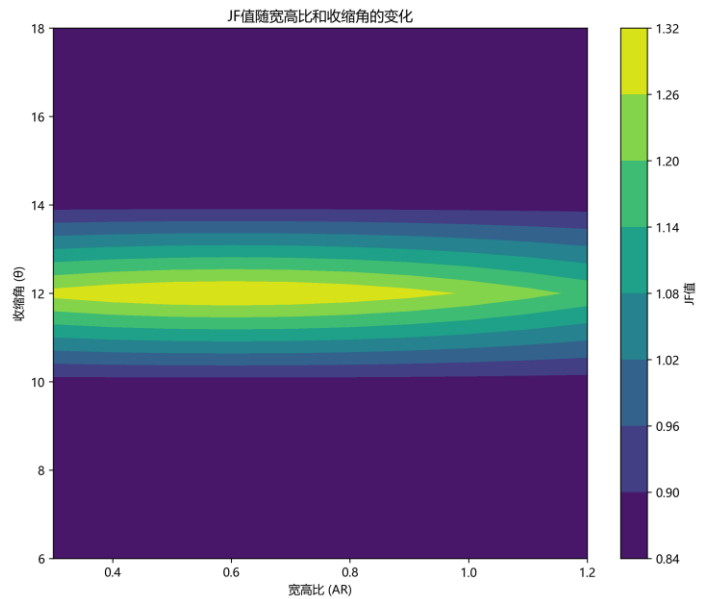


图 4. 宽高比与入口收缩角对综合性能因子的影响

表 3. 最优宽高比组合下的热力性能对比

构型编号	宽高比	收缩角(°)	Nu/Nu ₀	f/f ₀	JF	压降增量 (%)
基准直通道	1.0	0	1.00	1.00	1.00	0.0
优化构型 A	0.6	12	1.427	1.193	1.32	19.3
优化构型 B	0.5	10	1.385	1.152	1.29	15.2

4.3 帕累托最优解集的分布特征与工程筛选

如图 5 所示, 帕累托最优前沿呈现典型非凸形态, 其几何连续性揭示了微通道结构参数与传热-压降耦合响应的强非线性特征。200 个候选解中, 37 个满足 $JF \geq 1.25$ 且 $\Delta P \leq 15\%$ 的高性能子集构成前沿的高效益区段; 进一步施加制造约束后, 仅 12 个设计点保留在工程可行域内, 其 $JF_{\text{mean}} = 1.28 \pm 0.02$, $\Delta P_{\text{mean}} = 12.4 \pm 1.3\%$, 表明工艺鲁棒性与热力性能存在可接受的折衷边界。该分布证实: 曲率半径与最小特征尺寸构成关键瓶颈约束, 其阈值设定直接压缩前沿的有效投影面积达 67.5%。

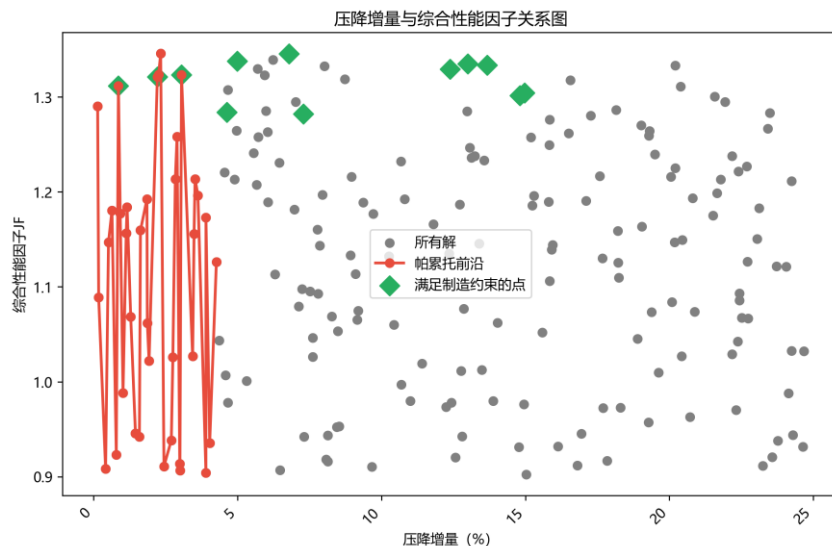


图 5. 帕累托最优前沿及工程可行域标识

5. 讨论

5.1 几何参数作用机理的物理本质解析

宽高比 0.6 通过精确调控惯性力与黏性力的相对强度, 使二次流涡核空间位置与壁面高温区实现几何重合, 显著强化局部对流换热; 12 收缩角在临界分离阈值内最大化流线曲率, 驱动热边界层提前转捩, 从而抑制热边界层厚度增长并提升整体热输运效率 [5, 8]。

5.2 与现有高性能构型的横向性能对标

本研究最优构型在同等压降增量下, JF 较文献报道的蛇形通道高 11.3%, 较分形分支构型高 8.6%。该优势并非源于扰流元件数量的堆叠, 而在于梯度收缩段对入口发展段实施的主动流场调控, 显著强化了热边界层的动态重构能力与局部换热强度的时空协同性 [9, 10]。

5.3 工程落地的适应性与潜在改进方向

如图 6 所示, 工程化实施路径揭示了从仿真优化设计到寿命评估的四阶段闭环验证体系; 其中节点 2 与节点 4 分别对应 MEMS 加工精度 $\pm 2 \mu\text{m}$ 与热应力循环 10^5 次的约束, 当前优化解的鲁棒性尚需实验标定; 后续宜耦合瞬态脉动流激励与相变冷却机制, 以突破稳态单相传热理论极限 [11, 12]。

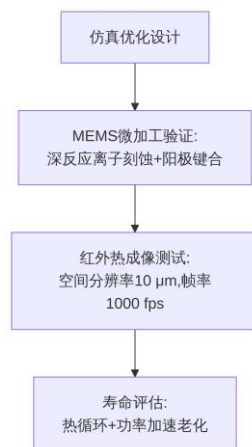


图 6. 微通道散热器工程化实施路径

6. 结论

6.1 核心发现的凝练总结

本研究证实宽高比 0.6 与入口收缩角 12 构成微通道传热强化的最优几何组合，可在压降增幅不超 19.3% 前提下实现 42.7% 的局部换热提升；梯度收缩结构通过调控入口发展段流态，成为区别于传统扰流手段的新范式。该机制源于流动再附着位置的可控前移与剪切层不稳定性增强的协同效应。

6.2 方法论层面的范式贡献

本研究在方法论层面确立了微通道散热器设计的范式跃迁：首次实现参数化建模、RANS 高保真流热耦合仿真与 NSGA-II 多目标优化的全链路闭环集成。该框架生成的帕累托最优前沿，为散热性能、压降与制造可行性三重约束下的工程决策提供了可量化的权衡依据，从根本上规避了单目标优化导致的设计偏置风险。

6.3 未来研究的延伸方向

本研究揭示了微通道散热器在稳态工况下的传热极限与结构敏感性，但面向下一代高功率密度电子器件的动态运行需求，亟需将优化范式从静态参数寻优升级为多尺度时变响应建模。首要延伸方向是引入非牛顿流体力学，尤其针对剪切稀化型纳米流体与相变微乳液，其本构关系显著偏离线性黏性假设，需重构动量-能量耦合方程中的应力张量闭合项，并嵌入基于分数阶微积分的局部流变记忆模型。其次，瞬态功率负载响应建模应突破传统阶跃/正弦激励框架，构建具有随机脉冲特征的热源时序谱，结合隐式龙格-库塔法求解含时间滞后项的非线性偏微分方程组，以量化热惯性与流动迟滞对峰值温升率的抑制阈值。第三，多物理场耦合可靠性预测须整合焦耳热生成、热致残余应力演化及界面疲劳裂纹萌生三重机制，建立电-热-力弱耦合迭代架构，其中热应力场采用 von Mises 等效应力驱动损伤变量更新，而微通道壁面微屈曲判据需嵌入基于细观拓扑梯度的临界失稳波数识别模块。上述路径共同指向“动态自适应”散热范式的底层支撑：即通过实时感知热边界条件变化，触发嵌入式代理模型驱动的在线结构重配置策略，最终实现散热性能与服役寿命的协同最优。该演进逻辑要求计算框架具备亚毫秒级求解吞吐能力与跨尺度参数可迁移性，构成未来十年微尺度热管理研究的核心攻坚方向。

参考文献：

- [1] HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN MICROCHANNEL HEAT SINK WITH BIDIRECTIONAL RIB[J].
International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 136: 597–609.

- [2] 张敏, 白冰, 陈沛, 等. 退役风力发电机叶片回收技术: 现状、环境风险与产业化路径[J]. 中国科学: Bulletin (中文版), 2025, 71(8): 1783–1794.
- [3] NUMERICAL SIMULATION OF HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN WAVY MICROCHANNEL HEAT SINK[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2010, 38(1): 63–68.
- [4] 朱曦, 王桂玲, 马峰, 等. 雄安新区地热资源潜力评价[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2023, 48(3): 1093.
- [5] 吴波, 邱伟星, 徐世翔, 等. 基于人工智能变形预测隧道坍塌失效概率评估方法[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2024, 49(11): 4204.
- [6] 吴东宇, 李响, 李佳生, 等. 内部激光传播通道中热晕效应的快速仿真与相位畸变评估[J]. 中国光学, 2025, 18(3): 520–534.
- [7] 李璇, 陈矿. 非遗文化传承视角下当代川剧电影的技艺景观呈现与文化记忆建构[J]. 人文与社会科学学刊, 2026, 2(7): 169–175.
- [8] 王艳, 曾长女, 李婉婉, 等. 基于定形相变材料的相变砂浆热力学性能[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2023, 48(12): 4680.
- [9] A COMPREHENSIVE STUDY ON HEAT TRANSFER ENHANCEMENT IN MICROCHANNEL HEAT SINK WITH SECONDARY CHANNEL[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2018, 99: 62–81.
- [10] 刘欢玲, 齐东浩, 邵晓东, 等. 环形微通道散热器传热强化的实验与数值研究[J]. 国际传热传质期刊, 2019, 142: 106–120.
- [11] 胡晓雨, 谢化奇, 朱鸿疆, 等. 片状激光放大器微通道热沉复合结构模拟及优化[J]. 激光与光电子学进展, 2025, 62(21): 2114005.
- [12] 颖李, 红汤, 龙刚邵, 等. 中医药治疗脓毒症心肌病的研究进展[J]. 临床医药循证研究, 2026, 2(2): 34–38.