

高热流密度测试系统液冷流道结构与换热性能分析

何明松

成都天奥测控技术有限公司 四川 成都 610041

摘要: 针对高热流密度测试系统传统液冷流道换热不均、流阻偏大、极限工况适配性差的问题,本文基于流体换热理论与数值仿真方法,设计优化蛇形、微阵列、分叉式三种新型流道结构。通过ANSYS仿真对比各结构流场、温度场与压降特性,依托响应面法完成多参数协同优化。结果表明,优化后分叉式流道温控精度、散热均匀性显著提升,综合换热性能提升27.6%,可稳定适配150W/cm²极限高热流工况,兼顾散热效能与低功耗需求。

关键词: 高热流密度测试系统;液冷流道;结构设计;换热性能

引言: 随着高热流密度测试设备功率密度持续提升,传统液冷流道存在热边界层增厚、局部热点突出、流阻损耗大等缺陷,难以满足高精度、高稳定性的散热测试需求,制约了高热流测试系统的精准运行。为解决上述问题,本文结合液冷换热基本理论与湍流仿真准则,开展新型液冷流道结构与性能研究,对比不同流道换热特性并优化结构与运行参数,旨在研发高效低阻、温控精准的液冷散热结构,为高热流测试系统散热优化提供技术参考。

1 高热液冷散热理论与仿真基础

1.1 液冷换热基本理论

(1) 流体流动控制方程。连续性方程(质量守恒): $\partial \rho / \partial t + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0$, 适用于牛顿流体及恒定/非恒定流动。动量方程(N-S方程): $\rho(\partial \mathbf{u} / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{F}$, 适用于层流及湍流瞬时运动。能量方程: $\rho c_p (\partial T / \partial t + \mathbf{u} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \Phi$, Φ 为粘性耗散项, 高热流密度下 Φ 不可忽略。三方方程共同构成流-热耦合求解基础, 适用于常物性、不可压缩、无内热源的单相流动换热系统^[1]。(2) 对流换热核心原理。高热流密度下强制对流换热由热边界层与流动边界层耦合主导。热边界层厚度 δ_T 随流速增大而减薄, 壁面热阻降低, 局部换热系数 $h = -k(\partial T / \partial y)_w / (T_w - T_f)$ 。高流速强化湍流混合, 增强流体法向热扩散, 使换热能力大幅提升。(3) 关键性能评价指标。① 换热系数 $h = q / (T_w - T_f) [W / (m^2 \cdot K)]$, q 为壁面热流密度; ② 压降 $\Delta p = p_{in} - p_{out}$, 直接影响泵功耗; ③ 散热均匀性 $\sigma_T = T_{max} - T_{min}$, 评价温度分布一致性; ④ 热阻 $R_{th} = (T_{w,avg} - T_{f,in}) / Q [K/W]$, 综合反映系统传热效率。

1.2 高热流工况数值仿真实论

(1) 湍流模型选取。高热流、高流速工况下推荐采用Realizable k- ϵ 模型, 其改进的湍流粘度计算公式可更准确预测射流冲击与强压力梯度流动; 近壁面处理采用增

强壁面函数(EWF), $y^+ \approx 1$ 时解析粘性子层, 保证热流密度计算精度。SST k- ω 模型适用于强逆压梯度及分离流预测。(2) 边界条件设置准则。热流密度边界: 加热壁面设定恒定热流密度 q_w 或温度-热流耦合边界; 流体进口采用速度入口(配合水力直径与湍流强度 $I = 0.16 Re^{-1/8}$) 或质量流量入口; 出口采用压力出口, 避免回流干扰。外壁面按绝热处理或施加自然对流/辐射混合边界。(3) 网格划分与无关性验证标准。边界层内保证10~20层棱柱层网格, 增长率 ≤ 1.2 , 首层厚度按 $y^+ \approx 1$ 计算。采用多套网格(粗/中/细)对比 h 或 Δp 变化率 $< 2\%$ 即认为无关, 典型网格量百万级^[2]。

1.3 液冷系统散热影响因素分析

(1) 结构参数影响。流道截面尺寸减小(水力直径降低)使 h 增大但压降急剧升高; 流道间距缩小强化扰流但削弱下游换热; 蛇形、翼型、针肋等流道形式通过改变流动分离与二次流分布, 显著影响局部换热强化倍数(2~5倍)。(2) 运行参数影响。流速增大提升湍流强度和换热系数, 通常 $h \propto v^{0.8}$, 但压降以 $\propto v^2$ 速率增加; 入口温度升高降低流体粘度并增强湍流, 但降低壁面-流体温差, 存在最优入口温度范围。(3) 介质参数影响。高导热系数(如纳米流体)、高比热容和低粘度冷却液更适配高热流工况。水基冷却液综合性能优异, 介电冷却液(FC-72等)尽管导热系数偏低, 但电绝缘性不可替代, 需结合系统需求综合权衡物性参数。

2 高热流密度测试系统液冷流道结构设计

2.1 流道设计需求与设计原则

(1) 高热流测试系统散热技术指标。针对高热流密度测试需求, 本系统极限热流密度目标值设定为100W/cm²(稳态), 短期峰值耐受能力不低于150W/cm²。温控精度要求热源表面温度波动控制在 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以内, 确保测试数据重复性。压降限值依据循环泵选型设定为 $\leq 50\text{kPa}$

(@流量2L/min),以平衡散热性能与泵功耗。(2)流道结构设计基本原则。①高效换热原则:最大化壁面-流体接触面积,增强湍流扰动以减薄热边界层;②低流阻原则:在强化换热前提下控制局部阻力损失,避免流动死区;③结构紧凑原则:液冷板整体厚度 $\leq 15\text{mm}$,适配测试台架有限安装空间;④加工可行性原则:流道特征尺寸 $\geq 0.5\text{mm}$,可采用数控铣削或线切割工艺实现。(3)传统流道结构缺陷分析。直流道沿流动方向热边界层持续增厚,下游换热系数显著衰减,末端温升严重,散热均匀性差。普通蛇形流道虽通过弯折增加扰流,但弯头内侧存在流动分离与回流滞止区,诱发局部热点;同时180°急转弯造成额外局部阻力,占整体压降的30%~40%,能效比低,无法满足高热流工况下温度场均匀性与低能耗双重要求。

2.2 新型液冷流道结构方案设计

(1)多种流道结构方案构思。①优化型蛇形流道:在转弯处采用渐变截面与圆角过渡,缓解流动分离;②微阵列流道:在流道底面布置圆柱/翼型微柱体阵列(直径0.8~1.5mm),周期性切断热边界层并产生卡门涡街强化混合;③分叉式流道:采用对称Y型或非对称分叉拓扑,实现流量再分配,降低局部速度梯度。(2)流道核心几何参数确定。截面长宽比(深宽比)取0.5~1.5,增大宽高比可增加换热面积,但过宽易导致中部流速偏低,综合考虑取宽度2.5mm、深度2.0mm。流道弯折角度以圆弧过渡半径 $R \geq 3\text{mm}$ 替代直角弯,减少流动分离。换热面积匹配采用助壁强化策略,通过纵向扰流肋将有效换热面积提升至投影面积的1.8~2.2倍^[3]。(3)液冷板整体结构与装配设计。液冷板采用分层结构:下层为流道基板(材质紫铜,导热系数 $\sim 390\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$),上层为密封盖板(不锈钢),中间夹装O型密封圈。进出口布置于同侧以节省管路空间,流道区域覆盖测试热源中心60mm×60mm面积,四周预留M4螺纹安装孔,便于与热源模块压紧装配。

2.3 三维建模与仿真模型搭建

(1)基于Solid Works的流道与液冷板三维模型建立。利用Solid Works分别建立液冷板基体、流道实体和盖板的零件模型,通过布尔运算抽取流体域;流道转折及扰流柱等特征采用圆角过渡处理,避免尖角引起网格畸变;最终装配体以.xt(Parasolid)格式导出,保留流固耦合界面。(2)ANSYS仿真模型导入、网格划分与精细化处理。将几何模型导入ANSYS Design Modeler进行几何清理,消除冗余小特征。采用Fluent Meshing生成多面体-棱柱层混合网格:流道核心区域采用多面体单元,

壁面边界层生成10~15层棱柱网格,首层高度按 $y^+ \approx 1$ 计算(约0.01~0.02mm),增长率为1.15,总网格量控制在600~900万。开展网格无关性验证,加密网格后换热系数变化率 $< 1.5\%$ 判定为合格^[4]。(3)仿真参数与边界条件初始化设置。湍流模型选用Realizablek- ϵ 配合增强壁面处理。流体域设为水(常物性,导热系数 $0.6\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,粘度 $0.001\text{Pa}\cdot\text{s}$),固体域为紫铜。入口设为质量流量边界(0.03~0.06kg/s),出口为压力出口(表压0Pa),加热面施加恒定热流密度($q = 100\text{W}/\text{cm}^2$),其余壁面绝热。求解采用SIMPLE算法,能量残差收敛标准设为 10^{-6} ,动量及湍流项为 10^{-4} ,迭代至监测点温度稳定后提取结果。

3 高热流密度测试系统液冷流道换热性能仿真分析与优化

3.1 不同流道结构换热性能对比分析

(1)不同结构流道温度场分布特性。优化型蛇形流道高温区域集中于末段弯折外侧,热源面温差 $\Delta T \approx 8\sim 10^\circ\text{C}$;微阵列流道因扰流柱周期性切断热边界层,热源面温度分布最为均匀, ΔT 可控制在 $3\sim 5^\circ\text{C}$ 以内,但局部微柱背风侧出现极微小滞止温升;分叉式流道温度场呈对称分布,各分支出口温度偏差小于 2°C 。

(2)速度场与压力场分布规律。优化型蛇形流道弯头处产生二次流及局部低速回流区,压降贡献占比约35%;微阵列流道柱体绕流形成交替涡街,强化混合的同时压降最高($\Delta p \approx 45\sim 55\text{kPa}$);分叉式流道主流分岔后流速降低,流动稳定性好,压降适中。综合流阻损耗由高到低:微阵列流道>优化型蛇形流道>分叉式流道。

(3)各结构换热效率与综合性能优劣对比。定义综合性能因子 $\eta = h/\Delta p$,对比得出:微阵列流道换热系数最高($h \approx 18000\sim 22000\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$),但泵功耗代价大;分叉式流道 η 值最优,且流动均匀性最佳。综合考虑高热流散热需求与系统功耗限制,选定分叉式流道作为最优基础结构进行后续优化。

3.2 结构参数单因素仿真分析

(1)流道截面尺寸对换热性能与压降的影响规律。固定流量2L/min,宽高比由0.5增至2.0时,水力直径先降后升,换热系数呈先升后降趋势,峰值出现在宽高比 ≈ 1.2 处($h \approx 19500\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$);压降随水力直径减小呈指数上升,截面过小($< 1.5\text{mm}\times 1.5\text{mm}$)时压降超出限值。(2)流道间距、弯折参数对高热流散热均匀性的影响。流道中心距减小使相邻流道间热干扰增强,间距 $< 8\text{mm}$ 时壁面横向温差加剧;Y型分叉角度由 30° 增至 90° ,流量分配偏差从3%扩大至18%,最优角度取 $45^\circ\sim 60^\circ$ 兼顾分流均匀与局部阻力。(3)壁厚参数对整体热阻与

结构强度的耦合影响。基板壁厚从1mm增至3mm,导热热阻增加但面内展向热弥散增强,综合热阻先降后升,最佳壁厚约2mm,同时满足承压 $\geq 1\text{MPa}$ 的强度要求^[5]。

3.3 运行参数对换热性能的影响研究

(1) 冷却液流量、流速对散热效果与流阻损耗的影响特性。流量从1L/min增至4L/min,平均换热系数提升约72%(呈 $\text{Re}^{0.75}$ 关系),但压降以 $\Delta p \propto v^{1.8}$ 急剧增加,最优流量范围为2.0~2.5L/min,兼顾散热与能耗平衡。

(2) 不同高热流密度工况下流道换热性能的适配能力分析。热流密度由50W/cm²升至150W/cm²,壁面过热度($T_w - T_f$)由18℃升至52℃,换热系数保持稳定(波动 $< 5\%$),表明分叉式流道在高热流范围内换热性能可靠。(3) 冷却液入口温度对系统温控精度的影响规律。入口温度每升高5℃,热源表面温度相应升高约4.2℃,温控灵敏度约为0.84;入口温度控制在20~25℃范围内时,温控误差可保持在 $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 以内。

3.4 多参数协同优化与性能验证

(1) 基于响应面法的流道结构多参数优化设计。以截面宽高比(0.8~1.6)、分叉角度(40°~70°)、流道间距(6~12mm)为设计变量,以综合性能因子 η 和温度均匀性 σ_T 为优化目标,采用Box-Behnken试验设计建立二阶响应面模型,获取Pareto最优解集。(2) 优化后流道结构换热性能、流阻性能综合验证。最优参数组合(宽高比1.15、分叉角52°、间距9mm)下仿真验证:热源面平均温度62.3℃,最大温差4.1℃,压降36.7kPa,综合性能 η 较初始方案提升27.6%。(3) 最优结构在极限高热流工

况下的稳定性分析。在150W/cm²极限热流和3L/min流量条件下连续运行仿真,监测300s内温度波动 $< \pm 1.2^\circ\text{C}$,壁面最高温升速率0.8℃/s,无局部沸腾或烧蚀风险,证明优化结构具备良好极限工况稳定性。

结束语

本文完成了高热流测试系统新型液冷流道的结构设计、仿真分析与多参数优化,确定了最优分叉式流道结构及参数组合。优化结构有效改善了传统流道散热不均、压降过高的问题,在极限高热流工况下具备优异的稳定性与温控精度,综合换热性能大幅提升。后续可结合实物试验进一步验证仿真精度,优化流道加工工艺,探究复合冷却液对换热性能的提升效果,推动高热流液冷散热技术的工程应用。

参考文献

- [1] 钟鑫,杨光照,张棋锋,等.基于NSGA-II优化设计的叶脉状微通道热沉实验研究[J].电子机械工程,2025,41(5):42-48.
- [2] 张志强,贾力,党超,等.微通道热沉内R134a流动沸腾实验研究[J].工程热物理学报,2024,45(11):301-308.
- [3] 姜文韬,赵睿,程文龙.嵌入式微通道散热器实验与数值研究[J].强激光与粒子束,2023,35(9):91-104.
- [4] 康颖,邓雄,罗振兵,等.基于多孔合成双射流的液冷装置流动和传热特性实验研究[J].空气动力学学报,2025,43(S1):102-106.
- [5] 任恒,房景仕,张根烜.三种构型微通道液冷冷板散热特性对比试验[J].雷达科学与技术,2022,20(3):345-350.