

文章编号: 1671-6612 (2023) 02-217-08

# 微通道换热器研究与应用进展综述

梁迪 李晓凤 杨卓 王毅 刘芸彤 孙艳博 张慧帆 叶佳琪

(天津商业大学天津市制冷技术重点实验室 天津 300134)

**【摘要】** 微通道换热器凭借换热效率高、抗压性能强、优异的抗腐蚀性能、结构紧凑、节约成本等优点已成为目前相关领域的研究热点, 从微通道换热器的流动换热特性、微通道内部结构的优化、结霜问题及其在各相关领域的应用等方面进行综述。

**【关键词】** 微通道换热器; 流动特性; 流量分配; 应用前景; 综述

中图分类号 TK172 文献标识码 A

## Review on Research and Application of Microchannel Heat Exchanger

Liang Di Li Xiaofeng Yang Zhuo Wang Yi Liu Yuntong Sun Yanbo Zhang Huifan Ye Jiaqi

(Tianjin University of Commerce, Tianjin Key Laboratory of Refrigeration Technology, Tianjin, 300134)

**【Abstract】** The microchannel heat exchanger has become a research hotspot in the related fields at present because of its high heat transfer efficiency, strong compression resistance, excellent corrosion resistance, compact structure, cost saving and other advantages. This paper summarizes the flow and heat transfer characteristics of the microchannel heat exchanger, the optimization of the internal structure of the microchannel, the frost problem and its applications in various related fields.

**【Keywords】** Microchannel heat exchanger; Flow characteristics; Flow distribution; Application prospect; Review

## 0 引言

微通道内的流动与传热现象凭借着其优异的换热效率、高耐压性、耐腐蚀、结构紧凑、节约成本诸多优势<sup>[1]</sup>, 被越来越多地应用于航空航天、电子信息技术、空调、机电系统等领域。目前对于微通道换热器的定义将水力直径小于 1mm 的换热器称为微通道换热器。根据应用途径分类, 微通道换热器可分为芯片冷却和工业换热两大类。目前, 对于微通道换热器的研究主要集中于微通道内流体流动、换热机理、微通道换热器内部结构优化及结霜问题等方面。本文就微通道换热器的结构、机理、应用等研究现状进行了综述。

## 1 微通道换热器的研究现状

### 1.1 微通道换热器的流动特性

表面效应、稀薄效应、低雷诺效应等都是气体流动微尺度效应的重要组成部分, 经研究表明, 微尺度效应下气体流动的稀薄效应与大气层中稀薄效应在物理上可完全等价, 因此, 可通过努森数对微尺度下的气体流动进行判断流动状态, 如: 连续介质流、过渡流等, 可为未来实验研究提供参考<sup>[2]</sup>。对于微通道换热器来说, 其特征尺寸都在微米和亚毫米范围内, 因此研究其流动特性, 要涉及到更加复杂的尺度效应, 目前微通道换热器的流动特性主要分为微尺度效应和入口段效应。

#### (1) 微尺度效应

对于气体的单相流动, 当努塞尔数 $\geq 0.001$  时, 其传热和流动会受到气体稀薄效应的影响。对于液体的单相流动, 与常规尺度相比, 微通道换热器内流体粘性力和压力大幅度增加, 易引起流动场内密

作者简介: 梁迪 (1999-), 男, 硕士研究生, 研究方向为制冷系统优化, E-mail: ld18837722262@163.com

通讯作者: 李晓凤 (1981-), 女, 博士研究生, 实验师, 研究方向为制冷系统优化, E-mail: xfli@tjcu.edu.cn

收稿日期: 2022-11-09

度分布的不均匀,因此不能简单地视为不可压缩流体来计算<sup>[3]</sup>。对于液体两相流动而言,与常规尺度内界面现象的表面张力相比,微尺度通道影响更加显著,使得转换准则及流型分布发生变化,同时观察到,微通道尺度内表面张力的影响一般集中在两相微流动的初始阶段<sup>[2]</sup>。张赛等<sup>[4]</sup>对基于微小通道尺度效应的冷板进行不同流速和不同通道尺寸的沸腾换热数值研究,得出微小通道换热装置能更好的将沸腾传热的特性与微尺度效应结合在一起,高效利用高流密度传递能力的同时增大换热量。张承武等<sup>[5]</sup>研究不同高度下微/小柱群内部在低雷诺数下的换热特性,结果表明在实验研究的微/小柱群中,当雷诺数小于 20 时,由于微/小柱群内部所形成滞流区域,会导致装置对流换热情况的恶化。大量文献表明,液体流动的微尺度效应中表面效应最为重要,不能效仿气体流动根据努森数来判断其流动状态。比如:常规尺寸下的小宽高比矩形通道(宽高比趋于无穷小),充分发展层流状态在等热流密度壁面条件下,努塞尔数最大达到 8.23,在微尺度及其他条件相同条件下,充分发展层流下的努塞尔数可达 9.20,原因是表面效应增强了微尺度对流换热效果。除此之外,对于液体微尺度效应的研究,还涉及到表面粗糙度、粘性耗散等因素<sup>[2]</sup>。

### (2) 入口段效应

宏观条件下,流体通道,入口段长度可以忽略不计,但对于微通道换热器尺寸来说,通道尺寸较小,入口段长度占通道长度的比例较大,此外,受到边界层发展缓慢、应用领域要求等条件限制,此时入口段长度不可忽略不计<sup>[3]</sup>。入口效应与入口段相关,与充分发展段相比,入口段具有更加优越的换热特性。宁晓茹<sup>[6]</sup>对矩形微通道层流进口段的输运特性进行数值模拟,以此来深入了解进口段和充分发展段的流动换热特性。苏尚美等<sup>[7]</sup>对微通道换热器微电子领域进行研究分析,指出集成元件上微通道无量纲长度  $L$  较小,当  $L=0.05$  时,流动趋于充分发展状态,此时流动入口段长度占总长度的 12.5%。

### 1.2 微通道内流体的换热

微通道流体的换热现象按照流体相态可分为单相对流换热、凝结换热和沸腾换热三种。凝结换热和沸腾换热的过程均伴随着相变的对流传热,有着更高效的换热性能。

#### 1.2.1 单相对流换热

微通道单相对流换热的单相介质包括气体和液体两种,研究主要集中在管道布置方式、流体流动状态、流体通道的几何因素等几个方面。Kihoon Li 等<sup>[8]</sup>在单相对流换热实验中提出一种可实现的逆流联锁双层微通道散热器,其特点是相邻区域的流向相反,在低流速条件下,沿着流动方向,温度的变化梯度最大。Khouodor Keniar 等<sup>[9]</sup>对单微通道内二氧化碳的流动现象进行了实验研究。实验发现压降分别为 0.70kPa, 0.81kPa; 热流密度在 15~72kW/m<sup>2</sup> 之间时,随着压降和热流密度的增加,传热系数增加。Balkrishna 等<sup>[10]</sup>测定了方形微通道中单相脉动层流的局部实验传热系数,如图 1 所示,结果表明,在流动脉动频率很低的情况下,通道内部的换热量减少。

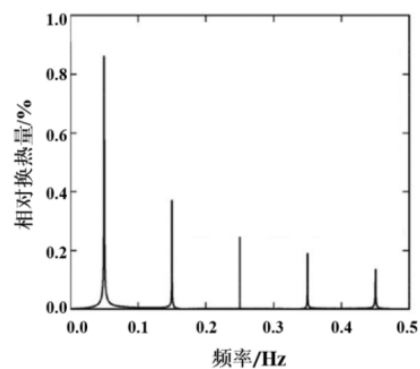


图 1 不同频率下的相对换热量<sup>[10]</sup>

Fig.1 Relative heat exchange capacity at different frequencies

#### 1.2.2 凝结换热

微通道内的凝结换热性能远超于单相对流换热。Khouodor Keniar 等<sup>[11]</sup>建立了微通道环形层流膜的冷凝模型并研究了七种不同的几何形状对传热系数的影响、建立了环形层流膜状冷凝的模型。C P Liang 等<sup>[12]</sup>通过实验探究冷凝条件下有干燥剂涂层的微通道换热器的性能,发现低的冷却水温度不仅促进除湿,单位时间空气的除湿率提高了 192%,而且还提高热回收效率。

#### 1.2.3 沸腾换热

针对如何提高沸腾换热过程中换热系数问题,国内外学者展开研究。Yaxian Zhang 等<sup>[13]</sup>研究 R134a 为工质微通道散热器内流动、沸腾特性及其相互影响,结果表明下游对上游的影响较弱,但上游散热器的相变对下游散热器的传热影响很大,实

验中测定的数据显示下游散热器的入口、出口均降低了 2.5℃。Jiaqi Tang 等<sup>[14]</sup>实验研究了膨胀区内微通道影响流动沸腾的强化传热系数的因素, 如图 2 所示, 得出当质量流量为 200kg·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 时, 在微通道中增加了三膨胀区, 可以有效地使流动沸腾换热系数提高了 43.3%。

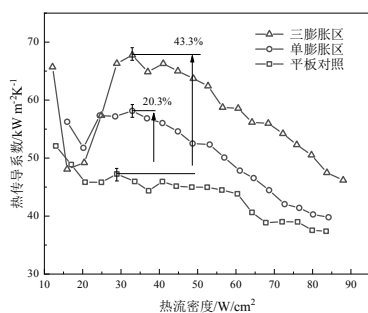


图 2 不同膨胀区数目和热流密度下的热传导系数<sup>[14]</sup>

Fig.2 HTC's under different number of expansion zones and heat flux density

### 1.3 微通道换热器内部结构的优化

#### 1.3.1 翅片形式及片间距

微通道换热器主要由集流管、扁管、翅片等结构组成, 因其传热表面积大, 扰动流体边界层等作用, 汽车空调中广泛采用的是对称式百叶窗翅片换热器。

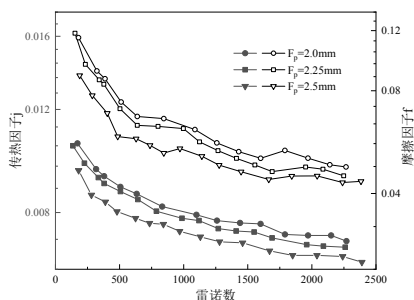


图 3 传热因子  $j$  和摩擦因子  $f$  与雷诺数的变化关系图<sup>[18]</sup>

Fig.3 The relationship between Heat transfer factor  $j$ , friction factor  $f$  and Reynolds number

JY Jang 等<sup>[15]</sup>对初始和不同的百叶窗翅片角度进行研究表明, 变角度的百叶窗翅片综合性能高于均匀角度的百叶窗翅片换热器。杨林等<sup>[16]</sup>在普通矩形百叶窗的基础上提出一种新型的斜针形百叶窗翅片, 借助三维数值计算模型和经验关系式进行研究, 得出斜针形百叶窗翅片窗翅的最佳布置方式。A Okbaz 等<sup>[17]</sup>通过实验研究确定和比较不同管排数、翅片间距和工况对百叶式和波浪形翅片式换热器的传热和压降特性的影响规律, 结果显示, 百叶

窗散热片周期性起伏变化的几何结构破坏了边界层的形成, 并减小其厚度, 从而增强传热。董军启等<sup>[18]</sup>试验研究 20 种不同结构参数的扁管百叶窗翅片的传热和流动阻力性能, 结果表明雷诺数相同条件下, 随着翅片间距的减少和翅片高度减少, 传热因子  $j$  和摩擦因子  $f$  增大。如图 3 所示, 图中  $F_p$  表示翅片间距。

#### 1.3.2 微通道换热器其他结构尺寸影响

微通道换热器内部结构的优化除翅片及片间距外, 还包括均流腔结构流量分配、截面尺寸和流程结构对流量分配等的影响。

袁鑫森等<sup>[19]</sup>研究不同微通道入口结构和均流腔结构对并联微通道间流量分配均匀性的影响, 结果显示均流腔与微通道入口连接的壁面弧度越小, 微通道入口与后续直通道连接的壁面弧度越大, 流量分配均匀性越好。Mahvi 等<sup>[20]</sup>实验研究水平矩形和三角形均流腔对两相流分布的影响, 结果发现与矩形均流腔相比, 三角形均流腔通常能够改善流量分布, 在测试条件下, 平均液体归一化标准差降低 0.06, 气体归一化标准差降低 0.04。候志旭等<sup>[21]</sup>研究相同的芯体尺寸下, 微通道平行流蒸发器流程结构和扁管改变对制冷剂流动的影响, 结果显示, 保证蒸发器外形尺寸的条件下, 仅将内部结构由 2 流程改为 4 流程, 制冷量比原蒸发器降低了 2.1%~4.1%, 制冷剂压降增加了 7.8%, 出风侧温度均匀性明显改善。高博等<sup>[22]</sup>研究截面尺寸对微通道换热器流量分配均匀性及压降的影响, 得出微通道换热器通道面积不变时, 当量直径最大时, 压降最低, 流量分配均匀性最好, 如图 4 所示。

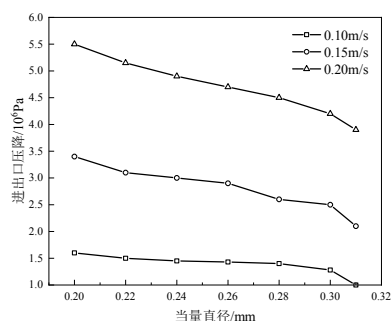


图 4 不同当量直径对压降的影响<sup>[22]</sup>

Fig.4 Effect of different equivalent diameters on pressure drop

#### 1.3.3 集流管结构和流程布置

集流管结构的优化是微通道换热器内部结构

优化的重要组成部分, 制冷剂流量分配不均会导致换热器更易结霜, 降低换热器换热效率等问题。

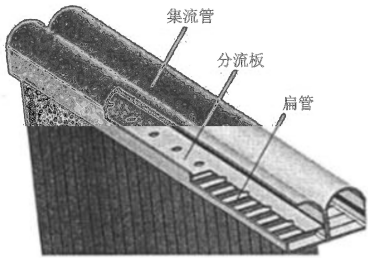


图 5 分流板结构图<sup>[23]</sup>

Fig.5 Structure diagram of splitter plate

Shi 等<sup>[24]</sup>通过研究不同分流管结构对微通道蒸发器性能的影响及入口分流板处穿插分流板对换热器内部流体分配的影响, 结果显示在入口集流管内插入多孔圆管, 可有效改善换热器内部分流情况。徐凯<sup>[25]</sup>通过改变集流管中节流板的位置和孔径大小来调节制冷剂的流量分配, 得出在集流管流动方向上设置两个节流板能明显改善流量分配不均匀现象。高志成<sup>[26]</sup>针对平行流换热器集液管内分流板进行优化设计, 研究得出三孔径对称型分流板 (A1) 比均匀孔径分流板 (A0) 流量分配均匀性更高, 如图 6、图 7 所示。

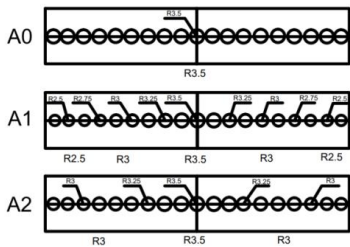


图 6 三种不同分流板结构<sup>[26]</sup>

Fig.6 three different manifold structures

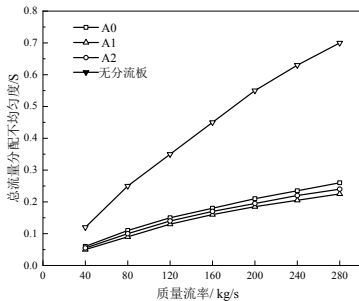


图 7 不同流量下四种换热器模型总流量分配不均匀度<sup>[26]</sup>

Fig.7 Unevenness of total flow distribution of four heat exchanger models at different flow rates

### 1.4 微通道换热器结霜问题

微通道换热器内结霜问题主要是由于外表面

相对粗糙及表面残留膜状或珠状水滴等因素造成, 使得翅片换热器更容易结霜且不易化除。

#### 1.4.1 环境因素

目前影响微通道换热器结霜的环境因素包括空气温度、换热器翅片表面温度以及迎风量等。

朱建民<sup>[27]</sup>研究了环境参数对微通道换热器结霜性能的影响, 结果显示结霜厚度和增长速度、制冷量的衰减速度都受进风温湿度和风速的影响。Zhang Ping 等<sup>[28]</sup>主要研究空气相对湿度对微通道换热器结霜周期的影响, 研究表明较高的空气湿度会导致霜层生长速度增加, 换热器结霜周期缩短。郭宪民等<sup>[29]</sup>研究不同迎面风速条件下微通道换热器表面霜层生长特性, 得出随迎面风速的降低, 换热器表面霜层厚度增长速度加快, 结霜周期近乎线性地减小, 相对湿度越低, 结霜周期下降的速度越快, 如图 8 所示。

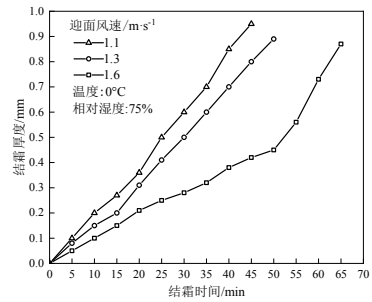


图 8 迎面风速对霜层厚度的影响<sup>[29]</sup>

Fig.8 The effect of head-on wind speed on the thickness of the frost layer

龚建英等<sup>[30]</sup>建立空气源热泵蒸发器结霜动态参数模型, 研究翅片温度不均匀分布、霜层参数动态变化等因素影响, 结果显示翅片表面温度分布存在梯度, 导致霜在翅片上的分布不均匀, 且越靠近翅根, 翅片温度越低, 如图 9 所示。

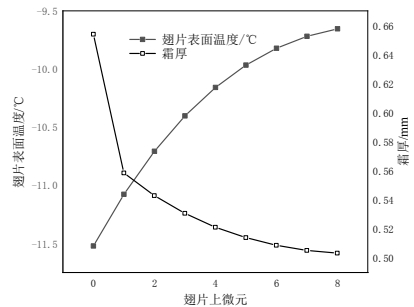


图 9 翅片表面温度和霜厚随翅片微元变化关系图<sup>[30]</sup>

Fig.9 Relationship between fin surface temperature and frost thickness with fin microelements

### 1.4.2 结构因素

目前影响换热器结霜的结构因素包括微通道换热器的扁管尺寸、扁管间距、翅片形状和翅片布置方式等。

Xu 等<sup>[31]</sup>实验研究了微通道换热器扁平管布置方向对循环结霜影响, 结果表明, 垂直扁管具有更好的排水性能和融霜性能, 而水平扁管的结霜现象加重, 结霜周期缩短。Park 等<sup>[32]</sup>研究相等和不相等的百叶窗翅片设计的霜冻生长均匀性, 得出变间距结构的布置方式使得翅片之间结霜堵塞被延迟, 换热性能提高 21%。江乐新等<sup>[33]</sup>、杨风叶等<sup>[34]</sup>研究变角度百叶窗结构对蒸发器性能的影响, 通过对三种翅片的综合性能  $j/f^{1/3}$  比较 (见图 10), 结果发现变角度百叶窗翅片 B 和 C 的综合性能均优于均匀角度百叶窗翅片 A。

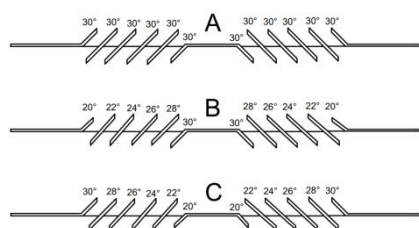


图 10 三种百叶窗翅片结构<sup>[33]</sup>

Fig.10 Three kinds of louver fin structures

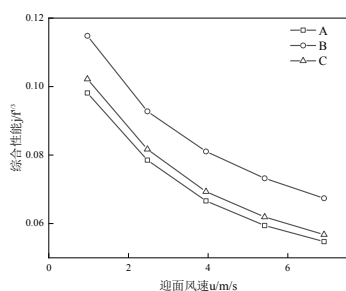


图 11 不同迎面风速下的综合性能  $j/f^{1/3}$ <sup>[33]</sup>

Fig.11 Comprehensive performance  $j/f^{1/3}$  at different head-on wind speeds

### 1.5 微通道临界热流密度的研究

所谓的临界热流密度是指流体沸腾过程中, 核态沸腾和膜态沸腾的边界点; 一旦热流密度超过该值, 加热设备的过热度将会瞬间提高, 极易造成设备的烧毁。

AV Belyaev 等<sup>[35]</sup>测试了微通道高减压条件下不同质量流量制冷剂流动沸腾的临界热流密度, 如图 12 所示, 在微通道中, 随着流体压降的增大,

临界热流密度逐渐下降。Rémi Revellin 等<sup>[36]</sup>在 30% 的误差范围内预测了 83% 的水的临界热流密度数据, 实验结果与数值模拟结果比较如图 13 所示, 大大改进了微通道临界热通量预测方法, 有助于实验数据预测的准确性。

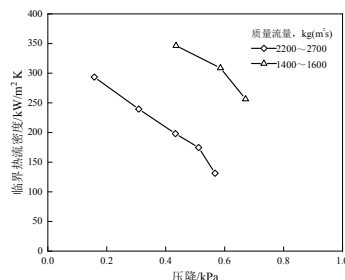


图 12 近似相同的质量流量下压降对临界热流密度的影响<sup>[35]</sup>

Fig.12 The effect of pressure drop on critical heat flux density at approximately the same mass flow

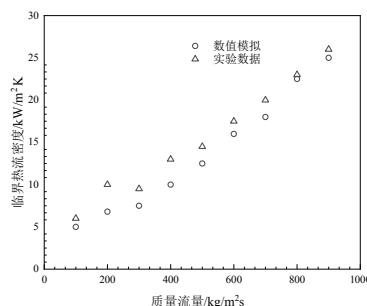


图 13 数值模拟与实验测量数据对比<sup>[36]</sup>

Fig.13 comparison of numerical simulation and experimental measurement data

## 2 微通道换热器的应用

### 2.1 微通道换热器在汽车空调的应用

汽车空调换热器经历了管片式、管带式、微通道换热器的更新换代过程。微通道换热器与此前车用管带式换热器相比, 压降减小了 70%~80%, 整体的换热性能提高约 30%。孙亚松<sup>[37]</sup>综述了近年来针对影响微通道换热中结构的研究成果与进展, 通过对研究成果的分析探讨了微通道尺寸形状等对其换热效果的影响。刘运科<sup>[38]</sup>针对客车空调器中的微通道冷凝器进行实验研究, 结果显示在相同制冷量情况下, 与管片式换热器相比, 换热器质量减少 70%, 制冷剂的充注量减少 29%。葛昕<sup>[39]</sup>对汽车空调微通道换热器结霜过程进行实验研究, 结果发现结霜速度在不同的环境温度和湿度条件下是不同

的,且表面结霜现象在不同流程的换热器中结霜不均匀。

## 2.2 微通道换热器在商业、家用空调的应用

目前微通道换热器在家用、商用空调的应用成为研究的热点,铝制微通道换热器的使用可明显降低成本、提高产品的市场竞争力,促进微通道换热器在商用、家用领域的应用。高强等<sup>[40]</sup>研发了特殊的微通道换热器热气旁通除霜管和基于集流管折弯的换热器局部结构,与原翅片管换热器相比,该设备可显著降低制冷剂充注量,提升低温制热性能。汪年结等<sup>[41]</sup>通过将微通道换热器引入 3HP 柜式家用空调,结果显示系统的充注量降低近 55%,制冷量提高 0.8%,系统 COP 则提高 5.2%。郭霞龄等<sup>[42]</sup>对 1.5HP 单冷 R290 家用空调器进行整机性能配试,得出以微通道换热器作为室外机冷凝器,可以满足整机配试要求,并具备实际产品产业化应用的可行性。

## 2.3 微通道换热器在微电子领域的应用

微通道换热器在微电子领域的应用也较为广泛。研究表明,当电子芯片温度达到 70~80℃后,性能受到严重影响<sup>[16]</sup>。微通道换热器因其高效的传热能力,成为推动微电子产业发展的重要动力之一。

Yunfei Yan<sup>[43]</sup>通过采用数值模拟方法,研究了水凝胶包埋位置对分形微通道吸热器自适应冷却的影响,解决局部热点引起的电子芯片故障。嵌入水凝胶的分形微通道散热器可以处理更大范围的热流密度。杨晨光<sup>[44]</sup>研究了相同入流功率下不同单层微通道拓扑结构对中心有高热流密度热点芯片的散热能力,结果表明相同入流功率下,Y 分形散热能力最强,直槽结构最弱。李湘林<sup>[45]</sup>研究了注射成型工艺参数对环烯烃类共聚物微流控芯片微通道尺寸均匀性的影响规律,结果表明,工艺参数对微通道上宽的影响较大,对微通道深度影响较小。

## 2.4 微通道换热器在其他领域的应用

微通道换热器凭借其优异的性能,除在商用、家用、微电子等方面具有广阔的应用前景外,在其他领域的应用也越来越多,如航空航天领域、材料科学领域、化学工程领域等。邓大祥等<sup>[46]</sup>对微通道冷却技术在航空航天领域的发动机燃烧室壁面冷却、高超声速飞行器预冷器系统、涡轮叶片散热冷却等应用进行归纳总结,强调微通道冷却技术是当

今航空航天领域的研究热点和重要组成部分。卢佳敏等<sup>[47]</sup>对微流控技术应用在微/纳米材料合成领域的应用做出归纳总结,为微/纳米材料的合成提供了新的思路和方法,有助于微通道设备在材料科学领域的发展和应用。陈玉娴等<sup>[48]</sup>研究新型微通道设备系统对制备 2-羟基-3-三氟甲基-5-硝基吡啶产物的影响,结果显示新型微通道设备传质和换热性能优异,总换热效率更高,能够极大缩短反应周期。

## 3 总结与展望

本文回顾了微通道换热器的研究现状,对其流动特性、性能优势等方面进行了总结,最后针对微通道换热器不同方面的优势介绍了在不同领域的应用。尽管对于微通道换热器的研究已经取得了较大进展,但在实验和应用中由于自身的缺陷和设计方法的不当,仍有很多缺陷阻止其大规模商业化的应用。根据国内外现有研究,本综述认为可以从以下五个方面继续发展:

(1) 研究微通道分流板的流量分配试验中,大多采用的工质是水,而制冷剂的两相流动规律较复杂,影响因素较多,需进行更深入的研究;

(2) 目前微通道蒸发器大多采用侧面平整、翅片间距小的扁管和百叶窗翅片结构,而扁管不利于冷却水的排放,容易引起微通道蒸发器的结霜。此外,目前主要研究微通道换热器的结霜问题,而对于除霜问题需要进一步研究;

(3) 不同流体工质在微通道换热微槽道内的流动阻力、换热特性与常规槽道内存在差异,需对此进行深入研究,以期掌握相应的流动阻力规律、换热特性;

(4) 微通道换热器的制造、装配、封装困难度较大,仍是限制其广泛应用的重要问题,随着新科技和材料的研发应用,相关解决方案将会被逐步提出;

(5) 微通道换热器相关产品的检验方案及行业标准仍不齐全和统一,制度体系不够严格,这对微通道换热器的广泛应用起到障碍作用,对于微通道行业的发展有所限制。

总而言之,微通道换热器作为微型化换热器的代表,凭借高换热效率、强抗腐蚀性能、高抗压性能、低成本、结构紧凑、运行安全可靠等优势,能缓解传统的落后的换热装置与先进的微型机械电

子系统和微型化学机械系统之间的矛盾,是未来在汽车空调制冷、微机电系统、航空航天、现代医疗等领域的重要发展方向。尽管微型换热装置在设计、制造、装配、密封技术和参数测量(无接触测量技术)等技术方面还存在很多难点,但随着钎焊领域的完善、行业标准的形成和蒸发器关键技术的解决,微通道换热器必然在未来能得到广泛应用。

### 参考文献:

- [1] 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,(S1):6.
- [2] 任川,RENChuan.微/小通道冷却技术的工程化应用[J].电子机械工程,2014,(5):6.
- [3] 尤文焘,郁林枫.浅谈微通道换热器[J].中国石油和化工标准与质量,2019,39(1):2.
- [4] 张赛,刘向农,杨友进,等.基于微小通道尺度效应的冷板沸腾换热数值研究[J].低温与超导,2014,42(5):4.
- [5] ZHANG Chengwu.尺度效应对低 Reynolds 数下微/小柱群通道内对流换热的影响[J].Ciesc Journal, 2011, 62(7):1852-1859.
- [6] 宁晓茹.矩形微通道入口段流动与换热特性的理论分析与数值模拟[D].北京:北京交通大学,2020.
- [7] 苏尚美,张亚男,成方园,等.微通道换热器的特性分析及其应用前景[J].区域供热,2007(5):34-38.
- [8] Kihoon Lim, Jaeseon Lee. Experimental study on single-phase convective heat transfer of interlocking double-layer counterflow mini-channel heat sink[J]. Energy Conversion and Management, 2021,243.
- [9] Khoudor Keniar, Srinivas Garimella. Enhanced condensation heat transfer for dielectric fluid within Analytical modeling of laminar annular flow condensation in an arbitrarily shaped microchannel heat sink[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020,(162):120334.
- [10] Balkrishna, MehtaSameer, Khandekar. Local experimental heat transfer of single-phase pulsating laminar flow in a square mini-channel[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2015,(91):157-166.
- [11] Khoudor Keniar, Federico Mazzelli, Srinivas Garimella. Experimental investigation of carbon dioxide flow boiling in a single microchannel[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020,(159):120100.
- [12] C P Liang, F Ture, YJ Dai, et al. Experimental investigation on performance of desiccant coated microchannel heat exchangers under condensation conditions[J]. Energy and Buildings, 2021,231,(15): 110622.1-110622.13.
- [13] Yaxian Zhang, Jingtao Wang, Wei Liu, et al. Heat transfer and pressure drop characteristics of R134a flow boiling in the parallel/tandem microchannel heat sinks[J]. Energy Conversion and Management, 2017,148(15): 1082-1095.
- [14] JiaqiTang, YiLiua, BaolingHuang, et al. Enhanced heat transfer coefficient of flow boiling in microchannels through expansion areas[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2022,(177):107573.
- [15] Jang J Y, Chen C C. Optimization of louvered-fin heat exchanger with variable louver angles[J]. Applied Thermal Engineering, 2015,91:138-150.
- [16] 杨林,漆波,陈金友,等.斜针形百叶窗翅片布置方式的数值模拟与分析[J].机械工程师,2015,(12):3.
- [17] OKBAZ A, PINARBASI A, OLCAY A B. Experimental investigation of effect of different tube row-numbers, fin pitches and operating conditions on thermal and hydraulic performances of louvered and wavy finned heat exchangers[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2020,151:106256.
- [18] 董军启,陈江平,陈芝久.百叶窗翅片的传热与阻力性能试验关联式[J].制冷学报,2007,28(5):10-14.
- [19] 袁鑫森,袁俊飞,王林,等.入口结构对微通道内两相流量分配特性影响[J].低温与超导,2022,50(7):50-56,62.
- [20] Mahvi A J, Garimella S. Visualization of flow distribution in rectangular and triangular header geometries[J]. International Journal of Refrigeration, 2017,76(Complete):170-183.
- [21] 侯志旭,张子瀚,徐飞.微通道平行流蒸发器流程结构优化设计[J].制冷与空调,2018,18(12):5.
- [22] 高博,焦永刚,田玉思,等.截面积尺寸对微通道换热器流动特性的影响机理[J].石家庄铁道大学学报(自然科学版),2021,(3):81-86.
- [23] 刘巍.微通道蒸发器的优化设计及流量分配特性研究[D].南京:南京航空航天大学,2013.
- [24] Shi J, Qu X, Qi Z, et al. Investigating performance of microchannel evaporators with different manifold

- structures[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2011,34(1):292-302.
- [25] 徐凯.汽车空调微通道蒸发器研究[D].长春:吉林大学,2018.
- [26] 高志成.平行流换热器内变孔径分流板的分配特性研究[D].郑州:郑州轻工业学院,2018.
- [27] 朱建民,王丹东,陈江平.环境参数对平行流蒸发器结霜动态性能的影响[J].*制冷技术*,2017,37(2):7.
- [28] Zhang P, Hrnjak P S. Air-side performance of a parallel-flow parallel-fin (PF2) heat exchanger in sequential frosting[J]. *International Journal of Refrigeration*, 2010,33(6):1118-1128.
- [29] 郭宪民,王冬丽,陈轶光,等.室外换热器迎面风速对空气源热泵结霜特性的影响[J].*化工学报*,2012,(S2):6.
- [30] 龚建英,袁秀玲.空气源热泵蒸发器结霜过程数值模拟[J].*低温与超导*,2010,38(5):53-57.
- [31] Bo X, Han Q, Chen J, et al. Experimental investigation of frost and defrost performance of microchannel heat exchangers for heat pump systems[J]. *Applied Energy*, 2013,103(MAR.):180-188.
- [32] Park J S, Dong R K, Lee K S. Frosting behaviors and thermal performance of louvered fins with unequal louver pitch[J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2016,95(APR.):499-505.
- [33] 江乐新,翟辰辰.变角度百叶窗翅片的数值模拟和性能分析[J].*低温与超导*,2012,40(11):49-54.
- [34] 杨凤叶,赵鹏飞,周光辉.新型变角度百叶窗翅片换热器的性能研究[J].*低温与超导*,2015,43(6):5.
- [35] AV Belyaev, AN Varava, AV Dedov, et al. Critical heat flux at flow boiling of refrigerants in minichannels at high reduced pressure[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018,(122):732-739.
- [36] Rémi Revellin, Kaichiro Mishima, John R Thome. Status of prediction methods for critical heat fluxes in mini and microchannels[J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2009,30(5):983-992.
- [37] 孙亚松,刘红敏.微通道强化换热研究进展[J].*应用化工*,2022,(4):51.
- [38] 刘运科.微通道换热器在客车空调器上的应用[J].*制冷与空调*,2016,16(2):3.
- [39] 葛昕,罗淑贤,韩南奎,等.电动汽车热泵系统微通道换热器结霜特性研究[J].*低温与超导*,2020,48(12):56-62.
- [40] 高强.绿色高效热泵室外微通道换热器关键技术及产业化[M].杭州三花微通道换热器有限公司,2020-07-31.
- [41] 汪年结,王颖,李峰,等.微通道换热器在家用空调上的应用研究[J].*制冷技术*,2014,34(2):47-50.
- [42] 郭霞龄,王学友.微通道换热器在R290家用空调器中的应用[J].*制冷与空调*,2015,35(10):5.
- [43] Yunfei Yan, Ziqiang He, Gange Wu, et al. Influence of hydrogels embedding positions on automatic adaptive cooling of hot spot in fractal microchannel heat sink[J]. *International Journal of Thermal Sciences*, 2020,155(C).
- [44] 杨晨光,邵宝东,王丽凤,等.单层微通道热沉拓扑结构对芯片中心热点的降温效能研究[J].*应用力学学报*,2020,37(1):189-194,481.
- [45] 李湘林,蒋炳炎,朱来余,等.注射成型工艺对微流控芯片微通道尺寸均匀性的影响[J].*高分子材料科学与*,2020,36(5):86-91.
- [46] 邓大祥,陈小龙,谢炎林,等.航空航天冷却微通道制造技术及应用[J].*航空制造技术*,2017,(Z2):9.
- [47] 卢佳敏,王慧峰,潘建章,等.微流控技术在微/纳米材料合成中的研究进展[J].*化学学报*,2021,79(7):11.
- [48] 陈玉娟,赵转霞,刘耀赞.新型微通道反应器中合成 2-羟基-3-三氟甲基-5-硝基吡啶[J].*精细石油化工*, 2022,39(5):39-42.