

广州市南山自然科学学术交流基金会  
广州市合力科普基金会 资助出版  
广州市科学技术协会

# 微小流道（槽道） 传热强化与节能

朱冬生 罗小平 钱颂文 编著



科学出版社

# 微小流道(槽道)传热强化与节能

朱冬生 罗小平 钱颂文 编著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书介绍了微小流道(槽道)传热研究进展和微流道传热的某些试验结果,包括微流道流体的强化传热及比较、微流道电场强化传热及与常规流道的比较、微流道磁场强化传热、微流道纳米流体强化传热、微流道壁面粗糙度对传热及流阻的影响、微流道沸腾传热的可视化等。

本书可供轻化工、石油化工、化工机械、制冷、电子及热能和动力相关专业本科生和研究生参考,也可供以上各专业的有关企业和工厂、设计院等专业人士参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

微小流道(槽道)传热强化与节能/朱冬生,罗小平,钱颂文编著. —北京:科学出版社,2014.10

ISBN 978-7-03-042025-5

I. ①微… Ⅱ. ①朱…②罗…③钱… Ⅲ. ①换热器-传热学 Ⅳ. ①TK172

中国版本图书馆(CIP)数据核字(2014)第224216号

责任编辑:耿建业 陈尚洪 / 责任校对:郭瑞芝  
封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京科印技术咨询服务公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2014年10月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014年10月第一次印刷 印张:16 1/2

字数:321 000

定价:75.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

微小流道(槽道)传热强化与节能是当前最为前沿的传热研究热点之一,而国外已有不少报导。在作者前一部著作——《换热器技术及进展》<sup>①</sup>中,管壳式换热器微小流道传热以及喷淋式蒸发冷凝器的相关章节已对国内外有关微小流道传热的研究略有介绍。在此基础上,本书进一步介绍了微小流道(槽道)传热研究进展和微流道传热的某些试验结果,包括微流道流体的强化传热及比较、电场强化传热及与常规流道的比较、微流道磁场强化传热、微流道纳米流体强化传热、微流道壁面粗糙度对传热及流阻的影响、微流道沸腾传热的可视化等,以便抛砖引玉,促进科研人员在这一领域的研究工作。

本书是国内第一部公开单独出版的微流道传热著作,涉及面广,所研究探索的内容仍在发展阶段中,书中选择了一些最新的研究报导并结合作者的研究实际介绍给读者,故本书只是选编而不是包括该领域的全部内容,可供大学本科生和研究生以及从事该领域的科技工作者参考。

本书还有很多不足之处,请有关学者和读者不吝指教,这对本书的进一步完善以及我们的后续研究工作将是很好的鼓励和帮助。

参加本书部分编写工作的还有华南理工大学徐婷、毛玮、王延香、刘世杰、钟艳、陈朗、王二利、郭燕、文敏、张洁娜等。

最后,谨以本书作为钱颂文教授八十四岁高寿生日纪念。

朱冬生 罗小平 钱颂文

2013年12月25日

---

<sup>①</sup> 朱冬生,钱颂文,马小明,等. 换热器技术及进展. 北京:中国石化出版社,2008.

# 目 录

## 前言

第一章 绪论	1
第一节 引言	1
第二节 微型换热装置	4
第二章 国内外一些微小流道内单相流传热和流体摩擦因子试验简介	10
第一节 评述	10
第二节 国内外一些微流道单相流传热简介	12
第三节 影响微小流道单相流传热和流阻的一些因素分析	23
第三章 制冷空调微小流道换热器和冷凝器传热特性	30
第一节 引言	30
第二节 微小流道换热的冷凝器	33
第三节 微小流道内制冷剂的流动压降和传热计算	36
第四章 微小流道内单相流流动压降评述以及层流向湍流的过渡特性	40
第一节 气体流在光滑微流道管内的流动压降和层流向湍流的过渡简述	40
第二节 微小流道摩擦因子以及过渡区流动特性与微流道表面粗糙度特性	43
第三节 微流道表面粗糙度对微流道内流动摩擦因子的影响	51
第四节 微流道层流、过渡流以及低雷诺数湍流流动下流道表面粗糙度及其节距等参数对流动摩擦因子的影响	59
第五章 微小流道沸腾传热	71
第一节 微小流道内两相流流动沸腾传热与压降综述	71
第二节 微小流道小沸腾传热一些试验及其结果介绍	83
第三节 三种微小流道沸腾实验结果及分析	87
第四节 三种微槽道饱和沸腾膜系数和两相流摩擦压降试验的分析及比较	94
第六章 微小流道(槽道)流动沸腾传热与两相流摩擦特性分析	98
第一节 影响微小流道流动沸腾传热特性因素的一些试验及分析	98
第二节 三种矩形微槽流道流动沸腾两相流摩擦阻力特性试验及分析	104

<b>第七章 微小流道沸腾机理评述与三区模型</b> ·····	109
第一节 微小流道沸腾机理评述·····	109
第二节 微小流道沸腾经典预测模型及分析·····	116
<b>第八章 微小流道电场强化沸腾传热</b> ·····	123
第一节 微小流道电场下沸腾传热强化试验·····	123
第二节 微小流道沸腾传热电场强化与常规流道的比较·····	134
<b>第九章 微小流道沸腾临界热流密度</b> ·····	137
第一节 微小流道沸腾临界热流密度(CHF)·····	137
第二节 矩形微槽道饱和和沸腾临界热流密度试验与模型预测·····	139
<b>第十章 纳米流体沸腾传热与其微流道临界热流密度</b> ·····	148
第一节 总论·····	148
第二节 纳米流体临界热流密度分析和讨论·····	149
第三节 微槽道 $\text{Al}_2\text{O}_3$ + 水纳米流体的流体阻力特性和传热性能试验 与比较·····	156
<b>第十一章 磁场强化微流道沸腾传热</b> ·····	180
第一节 磁场强化去离子水和 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -水磁性纳米流体微流道沸腾 传热试验·····	180
第二节 外加磁场下 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -水磁性纳米流体微流道饱和和沸腾试验的 模型验证·····	188
第三节 微流(槽)道外磁场作用下 $\text{Fe}_3\text{O}_4$ -水纳米磁性流体两相流摩擦 压降·····	196
第四节 去离子水和磁流体及外加磁场下微流道沸腾传热临界 热流密度·····	205
<b>第十二章 在有无外加电场下 <math>\text{Al}_2\text{O}_3</math> 纳米流体与去离子水在微槽道内         沸腾传热特性试验及比较</b> ·····	212
第一节 无电场下微槽内影响沸腾传热膜系数的因素·····	212
第二节 无电场下试验拟合曲线及关联式·····	219
第三节 以去离子水为工质外加电场下传热膜系数分析·····	220
第四节 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 纳米流体沸腾试验结果与 Q&M 预测模型比较 (无外加电场下)·····	227
<b>第十三章 微槽道沸腾实验的可视化</b> ·····	232
第一节 气泡生长过程的一些可视化图像·····	232
第二节 微槽道内流动沸腾流型的一些可视化图像·····	234

---

<b>第十四章 微槽道壁面粗糙度对沸腾传热和临界热流密度(CHF)以及流</b>	
<b>    动沸腾流阻的影响试验研究</b> .....	237
第一节 微槽道壁面粗糙度测量方法简述.....	237
第二节 通道壁面粗糙度对沸腾传热的影响试验结果.....	240
第三节 微槽道壁面粗糙度对临界热流密度的影响.....	244
第四节 微流道壁面粗糙度两相摩擦压降试验结果.....	246
<b>参考文献</b> .....	250

# 第一章 绪 论<sup>[1]</sup>

## 第一节 引 言

### 一、化工设备及换热器的微小型化

换热设备由早期开始,一直沿用至今的都是大型化管壳式结构。直到 20 世纪 20~30 年代才出现紧凑式板式及板翅式换热器。到了 21 世纪 90 年代,又出现了微流道微型换热器。

对于化工机械设备的微小型化,发达国家在 20 世纪 80 年代便开始进行了反应与换热设备小型化的研究,如德国 Karlsruhe 的核能研究中心在 80 年代末开发的  $1\text{cm}^3$  小型换热器的换热功率最大可达  $20\text{kW}$ ;90 年代初开始了微小型化工(动力)机械系统的研究,如美国能源部的太平洋西北国家实验室(Pacific Northwest National Laboratory, PNNL)在美国国防前沿研究署及能源部的支持下开展了微型化工系统的研究,而后又纳入微型热系统的概念,并注册了名为 Micro-CATS (Micro Chemical and Thermal System)的开发平台,针对能源、空间技术、军事、运输、环保、建筑领域的需求开发了微型换热器、微型蒸发器、微型热泵、微型反应器、微型吸收器等尖端设备。美国 Oregon 州立大学也与 PNNL 合作开展了以微技术为基础的能源与化工系统(MECS)的研究;麻省理工学院开展了微燃烧器技术的研究;我国华东理工大学在微型换热器和制氢反应器的设计制造方面也取得了重要进展。

小型化学机械系统在传统的学科框架下基本上可以找到其设计的理论依据,但在制造技术上则仍有许多困难需要克服。而微型化学机械系统相对于宏观系统存在尺度效应问题,即微型化学机械系统并非传统意义下宏观化学机械系统的简单几何缩小。因为当化学机械系统尺寸微型化后,材料的物理性质及其对环境变化的响应发生很大的改变,微机械的力学特性和构件在环境介质中的行为以及所受体积力和表面力的相对关系也发生变化;另外,由于制造工艺和制造技术存在的难度,还会引起构件间的几何误差和接触摩擦。目前由于对微观条件下的化学机械系统的特性以及介质、负载作用下的物理、化学行为等尚缺乏充分的认识,还没有形成基于一定理论基础之上的微型化的设计理论与方法,只是借助试验和模拟方法,利用一些成型的宏观理论,对微型换热器、微型反应器等设备的结构和流场



问题进行分析和推测,试图归纳、总结出适用于微型化学机械系统的设计理论。

至于换热器,具体来说,由于列管式换热器体积庞大等诸多局限,而提出了开发高效、紧凑式换热器的要求。随着强化传热理论的发展和机械加工技术的提高,出现了许多新型高效的强化传热表面结构,进而开发了以板式换热器、板翅式换热器、螺旋板式换热器及热管换热器为代表的小型化换热装置。经过几十年的发展,小型化换热装置技术虽然已很成熟,但对于微电子、航空航天、医疗、化学生物工程、材料科学等领域,对高温超导体的冷却、薄膜沉积中的热控制、强激光镜的冷却等方面,尤其是对于超大规模集成电路的热障问题以及其他一些对换热设备的尺寸和质量有特殊要求的场合,却受到了很大的限制。因而,这些需求又进一步推动了换热装置向着更加高效、更加小型化的方向发展——微型换热装置。

## 二、微小型化设备制造技术进展简述

微小型化学机械系统的功能是传热、传质和化学反应,由于系统在高温度、压力和腐蚀介质的情况下工作,条件更显苛刻,系统结构的好坏直接影响着系统内物理过程和化学反应的效果,因此微小型化学机械系统的制造技术和质量显得非常重要。

随着加工制造技术的发展,目前已实现了一些复杂的机械表面。但从当前的国际微型机械产品的生产来看,三维复杂微成型在技术上仍未得到很好的解决,人们正在积极开发新型的、更有效的微加工、微成型技术。

微型化学机械系统的关键技术是系统的组装。由于不同的使用温度对材料的要求不同,因此组装工艺也有很大差别。目前微型化学机械系统一般采用多层槽道板重叠布置,采用扩散焊进行封焊。

## 三、紧凑式及小型化换热装置

### 1. 各种紧凑换热设备的特点

公认的紧凑换热设备一般包括板式换热器、板翅式换热器、螺旋板式换热器及热管换热器等。板式换热器最早出现于1923年,有垫片密封式、半焊接式、全焊接式、钎焊式等多种结构形式。板式换热器两侧流体完全呈逆流流动,且板片间流体返混极小,极大提高了有效能的利用率。其单片传热面积为 $0.02\sim 4.45\text{m}^2/\text{片}$ ,单台换热面积为 $2500\text{m}^2/\text{台}$ ,总传热系数可达 $3500\sim 7500\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ,介质处理量达 $3500\sim 5000\text{m}^3/\text{h}$ 。结构紧凑性翻倍提高。

20世纪30年代进一步发展板翅式换热器,英国的马尔斯顿·艾克歇尔瑟(Marston Excelsior)公司首次开发出铜及铜合金制板翅式换热器,并将其用作航

空发动机散热器。此后,各种金属材料的板翅式换热器相继出现在工程应用中,以铝合金材料为主。其在传热效率、适应性、密封性、可靠性以及经济性等方面,比列管式换热器表现出了更大的优越性。近年来,针对高温、高压、易腐蚀、易结垢等甚为恶劣的工况条件,具有相应对抗特性的不同材质的新型板翅式换热器相继问世,如日本开发的可承压 35MPa 的铝碳纤维复合材料制板翅式换热器等,国内开发的具有极强的抗腐蚀和抗结垢能力石墨改性碳纤维增强聚四氟乙烯板翅式换热器等。螺旋板式换热器最早由瑞典 Rosemblad 于 1930 年提出,是由两张间隔一定距离的平行薄金属板卷制而构成的一种高效间壁式传热设备,具有 I 型(不可拆式)、II 型(可拆式)和 III 型(垫片密封式的可拆式)3 种基本形式。相对于列管式换热器,它具有流动均匀、传热均匀、体积小、易于检查维修等优点。目前,螺旋板式换热器最高使用压强小,最高使用温度在 300~400℃;近期,我国扬子石化公司创造了第四种基本结构的螺旋板结构,其应用良好,开始在我国石化系统中应用。

热管是 20 世纪 60 年代中期发展起来的一种新型高效的传热元件,主要由管壳、吸液芯和工质组成,其导热能力比金属高几百倍至数千倍,其较为完整的理论由 Cotte 于 1965 年首次提出。由于热管特有的传热机理,使得冷热流体间的换热均在管外进行,因此可以很方便地进行管外传热强化,如加焊翅片、钉头等扩展传热面,以克服气体换热系数较小的问题,使整个设备结构紧凑。目前管外传热强化热管形式主要有合金钎焊翅片管、高频绕焊翅片管、U 形翅片管、嵌入式翅片管等,都较普通热管换热器有较高的传热性和较广的使用范围。

## 2. 紧凑式小型化换热器与列管式换热器的性能比较

为了进一步说明紧凑式小型化换热装置比传统列管式换热器效率高和节能,以及换热装置向微小化发展的必然性和迫切性,现以某种酸性腐蚀介质的冷却为例,在同一工况下(设计工艺参数见表 1-1),分别采用不同结构形式和材质的小型化换热装置进行实际设计,并与传统列管式换热器进行比较(表 1-2)。

表 1-1 工艺参数

操作参数	硫酸水溶液	水
进口温度/℃	70	25
出口温度/℃	35	40
设计压力/MPa	0.3	0.3
体积流量(工况)/(m <sup>3</sup> /h)	20	56

表 1-2 小型化换热器与列管式换热器的比较

结构	板式换热器	螺旋板式换热器	板翅式换热器	板翅式换热器	列管式换热器
材料	不锈钢	不锈钢	316L	F <sub>4</sub> 复合材料	不锈钢
实际热量/W	1018.9	1048.2	832.0	832.0	1018.2
实际换热面积/m <sup>2</sup>	29.2	41.3	77.5(H)/ 77.5(C)	69.7(H)/ 70.6(C)	673.1
质量/kg	315.5	932.5	514.0	179.0	14645.2
体积/m <sup>3</sup>	0.23	1.18	0.38	0.55	8.28
比表面积/(m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> )	125.7	35.0	413.0	255.9	81.3
压降/kPa	1.5(H)/ 10.7(C)	18.3(H)/ 65.9(C)	0.2(H)/ 0.3(C)	0.2(H)/ 0.4(C)	1.7(H)/ 3.8(C)
设备费/万元	7.26	19.9	12.34	5.91	13.44
单位成本换热量/(W/万元)	140.34	52.67	67.42	140.78	75.76

对表 1-2 中各参数进行比较发现,从结构形式来看,相同的设备材料下,板翅式换热器的比表面积最高(约是板式换热器的 4 倍、螺旋板式换热器的 2 倍、列管式换热器的 5 倍),压力降最小,所占空间比螺旋板式和列管式小;从设备材料的角度来看,聚四氟乙烯复合材料制板翅式换热器质量轻(约为不锈钢制的 1/3),经济指标最优(小于不锈钢制的 1/2);从能量的角度来讲,聚四氟乙烯复合材料制板翅式换热器单位成本输出的能量最高,远大于列管式(约是不锈钢制板翅式换热器的 2 倍、螺旋板式的 3 倍、列管式的 2 倍)。由此可见,小型化换热装置在工业应用中不仅成本低,而且节能。

## 第二节 微型换热装置

所谓微型换热装置是一种借助特殊微加工技术以固体基质制造的可用于进行热传递的三维结构单元。通常含有当量直径小于 500 $\mu\text{m}$  的微通道,如图 1-1 所示。在这种狭窄的通道中,流动边界层厚度大大减小,因而流体热传导阻力减小,传热速率增加,其无相变传热膜系数可达 10~15kW/(m<sup>2</sup>·K),有相变传热膜系数可达 30~35kW/(m<sup>2</sup>·K);同时,微通道使流体与通道单位体积接触表面积远大于常规通道(图 1-2),从而使得整个换热器的体积可比常规换热器体积小一个数量级以上,单位体积内的换热量可比常规换热器的高五个数量级以上(图 1-3)。微型换热装置包括由多层槽道板构成的微通道蒸发器、微通道加热器等。

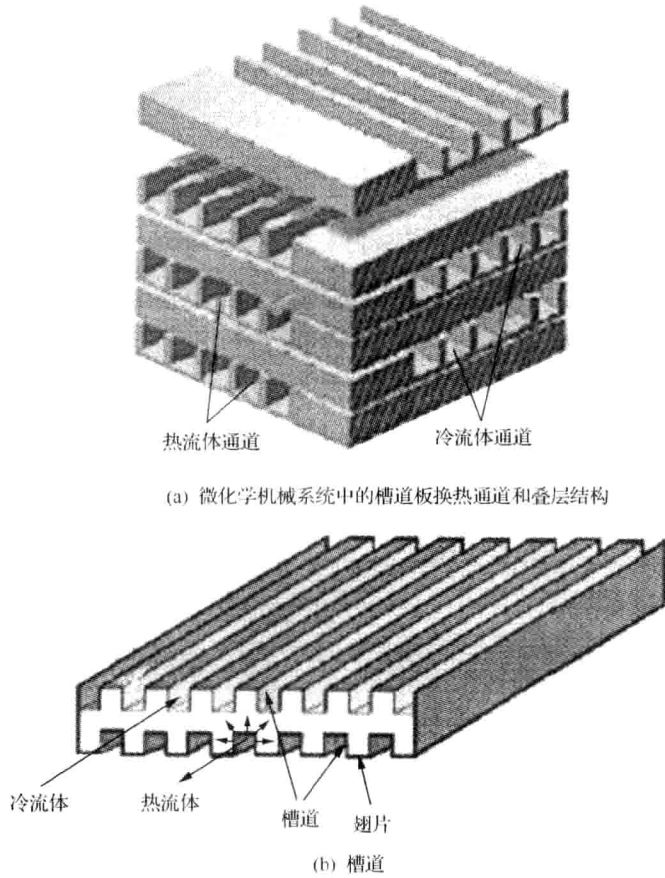


图 1-1 微槽道换热器结构

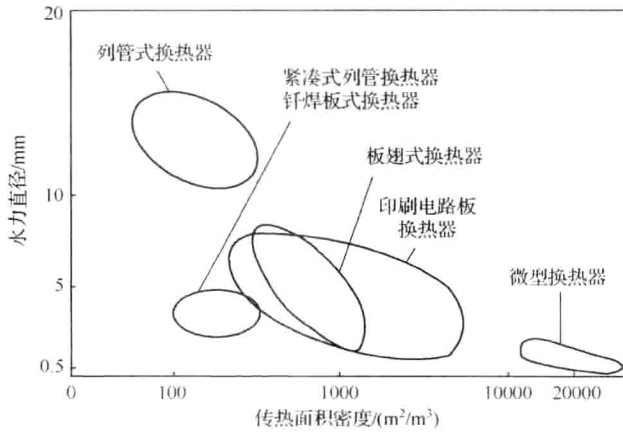


图 1-2 各种换热器传热面积密度及水力直径的比较

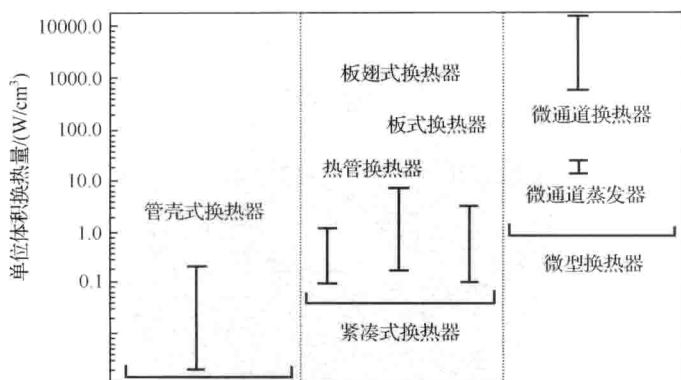


图 1-3 各种换热器单位体积换热量的比较

### 一、微通道蒸发器及应用

微通道蒸发器以其微型换热装置的显著特点,成为机动车辆、航空以及低温制冷技术领域中的热门研究内容之一。与常规的蒸发器性能相比,微通道蒸发器具有优良的特性指标,如高传热系数 $[10 \sim 30 \text{ kW}/(\text{cm}^2 \cdot \text{K})]$ 、高热流量 $(100 \text{ W}/\text{cm}^2)$ 、高传热效率 $(>80\%)$ 和低的热响应时间(几秒)等。以 1999 年美国 PNNL 设计的微通道燃料蒸发器为例,将尺寸为  $9 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 3.8 \text{ cm}$ 、质量为  $1.8 \text{ kg}$  的微通道燃料蒸发器(图 1-4)应用到燃料电池的燃料处理系统中,可蒸发汽油量  $260 \text{ mL}/\text{min}$ ,可为  $50 \text{ kW}$  燃料电池的燃料处理系统提供燃料。PNNL 微通道燃料蒸发器与常规燃料蒸发器的性能比较见表 1-3。

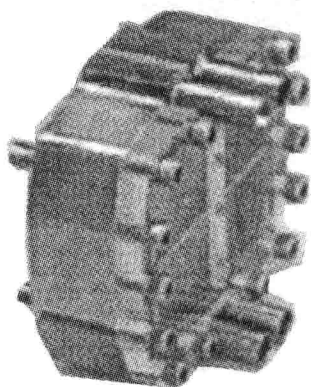


图 1-4 微通道燃料蒸发器

表 1-3 PNNL 微通道燃料蒸发器与常规燃料蒸发器的性能比较

性能	微通道燃料蒸发器	常规燃料蒸发器	微通道燃料蒸发器的优越性
体积/L	0.35	>10	体积不到 1/10
质量/kg	1.8	>227.5	质量很轻,可携带使用
响应时间	几分钟	几分钟	可适应各种负载要求
单位体积热流量 $(\text{W}/\text{cm}^3)$	11.5	0.1~1.0	热流密度大 10 倍以上
加工方法	低费用,层压扩散焊	模压,机加工,焊接	低费用,加工性能稳定

然而,到目前为止,尤其是对于微通道沸腾换热传热机理等的认识还相当有限,基本上不能应用常规大流道的换热机理和计算公式,许多相关的研究尚处于起步阶段,还没有通用的经验关联式来计算微通道内的热传递,需要进一步地进行研究。

## 二、微通道加热器及应用

微通道加热器(图 1-5)是一个微尺度的燃烧系统,由  $100\sim 200\mu\text{m}$  厚的蚀刻板层压装配而成,其热源来自于系统内的天然气燃烧,而不需电池、外部蒸汽发生器等驱动。微通道加热器的质量不到  $0.2\text{kg}$ ,仅为常规燃烧器的  $1/10$ ,其体积也比常规燃烧器小  $10$  倍左右,可用于便携式加热/冷却装置、户内取暖装置、串联式热水器及燃料电池系统, $1\text{cm}^2$  燃烧面积可产生  $30\text{W}$  的热量。对于单个微通道加热器模块,只需消耗少量燃料,就可连续进行  $8\text{h}$  加热或为串联式热水器提供热量。并行的  $20$  个微通道加热器模块大约可产生  $20\text{kW}$  的热量,可为一间大房子供暖,同时可减少  $45\%$  的热量损耗。微通道加热器与常规加热器的性能比较见表 1-4。相关资料表明,微通道蒸发器在汽车冷却系统的热源、微化学系统的过程加热、煤气热水系统等方面也具有广泛的应用前景,有待进一步的研究。

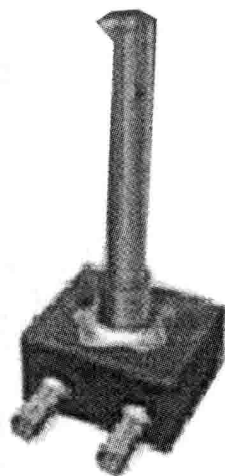
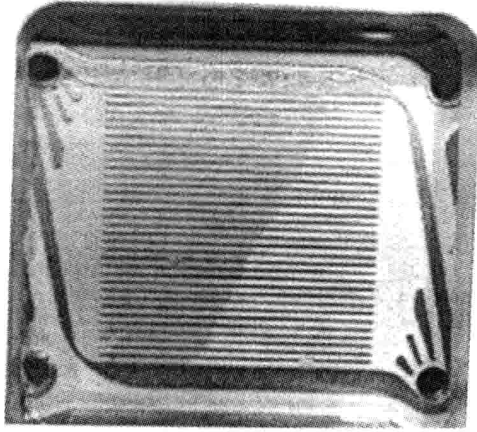


图 1-5 微通道加热器

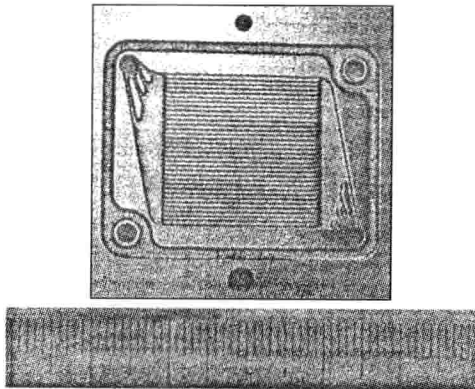
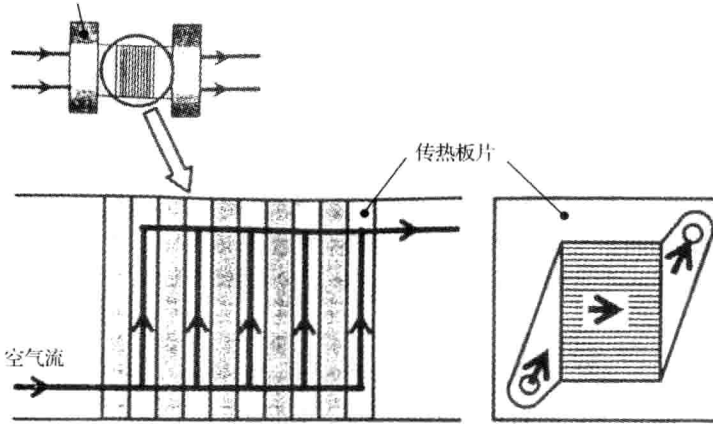
图 1-6 所示为一种微型板式换热器及其板片结构。

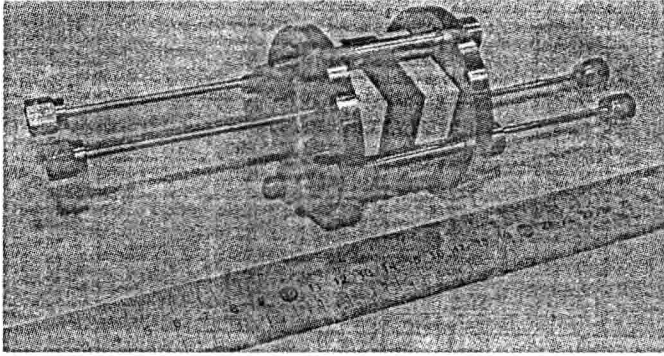
表 1-4 微通道加热器与常规加热器的性能比较

性能	微通道加热器	常规加热器	微通道加热器的优越性
能量输入/ $\text{kW}$	$1.2\sim 35.2$	$23.4\sim 44.0$	
能量效率/ $\%$	$80\sim 85$	$76\sim 94$	
单位体积能量输出/ $(\text{kW}/\text{m}^3)$	$2.5\times 10^4$	$0.88\sim 4.55\times 10^2$	高效、模块化、可扩展性、质量轻、体积小
单位质量能量输出/ $(\text{kW}/\text{kg})$	$5$	$0.26\sim 1.67$	
单位成本能量输出/ $(\text{kW}/\$)$	$0.025\sim 0.05$	$0.019\sim 0.05$	



(a)





(b)

图 1-6 微型换热器的槽道(1mm)(a)与微型板式换热器(COMH)(b)



## 第二章 国内外一些微小流道内单相流传热和流体摩擦因子试验简介<sup>[2~7]</sup>

在介绍微小流道传热之前,我们首先定义何为微小流道。在文献中一般都是基于流道水力直径而将流道分为几类:

(1) 微流道(microchannel):流道水力直径为  $1\sim 100\mu\text{m}$  或者  $200\mu\text{m}$ 。

(2) 中小流道(mean-channel 或 mini-channel):水力直径为  $100\mu\text{m}$  或  $200\mu\text{m}\sim 1\text{mm}$ 。

(3) 常规的大流道(micro-channel):水力直径大于  $6\text{mm}$ 。

此外,也有按照特定的应用过程方法来分类。

例如,在两相流应用过程中,Fukano 或 Kariyasaki 以及 Serijana 等基于表面张力  $\sigma$  对重力  $g$  的相对尺度来分类,提出了一种所谓 Laplace 长度:

$$L = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho_l - \rho_v}}$$

式中,  $\sigma$  为表面张力,  $\text{N/m}$ ;  $\rho_l, \rho_v$  分别为液相和汽相密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

Kew 和 Cornwell 则建议,以  $L/d_h$  ( $d_h$  为流道水力直径,  $\text{m}$ ) 作为在流动沸腾应用中的一个临界准则。

流道尺寸的效应对传热和流体流动现象的影响有所不同。各种流道类型具体尺寸如表 2-1 所示。

表 2-1 流道类型的尺寸分类

流道类型	流道尺寸( $d$ 为直径)
常规流道(conventional channel)	$d > 3\text{mm}$
小流道(minichannel)	$3\text{mm} > d > 200\mu\text{m}$
微流道(microchannel)	$200\mu\text{m} > d > 10\mu\text{m}$
过渡流道(transitional channel)	$10\mu\text{m} > d > 1\mu\text{m}$
过渡微流道(transitional microchannel)	$1\mu\text{m} > d > 0.1\mu\text{m}$
分子纳米流道(molecular nano transitional microchannel)	$0.1\mu\text{m} > d$

### 第一节 评 述<sup>[2]</sup>

近年来,对流体在微小流道内流动和传热特性的研究的报导开始增多,由于微小流道管的较小的水力直径,更重要的是其各种各样的微尺寸多维效应,显示得更