

换热技术从大型化向微小化的发展

周帼彦, 涂善东

(华东理工大学机械与动力工程学院, 上海 200237)

摘 要: 在分析传统换热器结构特点的基础上, 具体分析了目前常用紧凑型换热器的结构、性能及应用情况, 阐述了微型化学(化工)机械系统的发展及应用情况。以氨冷器为例, 分别进行了板式换热器和另一种高效的小型换热装置——热管换热器的设计, 表明板式换热器具有更加高效的换热效率和紧凑的结构, 由此综合说明了换热技术从大型化向紧凑化、微小化发展的必然趋势。进一步以典型的微型化换热器装置——微通道换热器、微通道蒸发器和微通道加热器为例, 具体分析了微型换热技术广阔的应用前景。

关键词: 换热技术; 微型化; 微通道; 微传热; 微型化学机械系统(MCMS); 板式; 热管式

中图分类号: TK17

文献标识码: A

1 前 言

随着现代科学技术的不断发展, 纳米科技的研究急速兴起, 生态环境和能源问题日益引起人们的重视。空间科技、地球科技和海洋科技将倍受关注, 新的形势对微小化技术提出了迫切的要求, 如化工技术微小化、制造技术微小化、产品和装置等的微小化^[1-3]。许多科研机构的着力研

究促进了从大型化向微小化的全面发展, 如美国 Sandia 国家实验室对微型发动机的制造^[4], 美国能源部太平洋西北国家实验室(PNNL)对微型化工—热系统的研究^[5], 麻省理工学院对微燃烧器技术的研究^[6]。微技术在工业、医学、军事和科研部门领域的广阔应用潜力促使它成为本世纪末的关键技术之一。

过程工艺的微小化涉及化学、热力过程装置的微小化, 与一般微机械不同, 它不仅涉及空间尺度的微小化, 同时涉及更为复杂的时间尺度效应。化学过程一般以反应器为代表设备, 热力过程则以换热器为代表设备, 在一种工艺中, 一般两者并存。鉴于换热设备的普遍性, 本文主要介绍换热设备从大型化向微型化发展的历史进程。

换热器作为化工过程机械的典型产品, 是工艺过程中必不可少的单元设备, 广泛地应用于石油、化工、动力、核能、冶金、船舶、交通、制冷、食品及制药等工业部门及国防工程中。其材料及动力消耗占整个工艺设备的 30% 左右, 在化工生产中占有重要的地位。由于工艺特点的特殊性和相关知识体系的复杂性^[7], 最初以

大型甚至是巨型存在, 随科技进步及发展要求, 正经历着向细、微小化的过程快速发展。

2 换热器概述

由于生产中热交换条件的多样性, 基于混合式、蓄热式、间壁式的不同工作原理, 换热器有着各种各样的结构型式。列管式换热器作为标准化和规范化最早的换热设备, 主要包括固定管板式、浮头式、U 型管式及填料函式等结构型式, 以其结构坚固、可靠性高、适应性强和材料范围广等优点, 在很多工业部门中大量使用, 尤其在石油、化工及能源等部门中处于主导地位。由于近代技术的发展, 化工、能源等工业装置趋于大型化发展, 相应的生产工艺要求高容量的换热器。如: 一座以矿石燃料为能源的 1 200 MW 涡轮发电装置, 要排出的热量大约为 $5.4 \times 10^9 \text{ kJ/h}$, 这意味着当空气循环量为 $220 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{h}$ 时, 冷却水循环量为 $13 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$, 即要求总换热面积超过 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^2$ 。由此可见, 传统的换热器是以大型化的列管式换热器为主。

随着能源问题的日渐突显, 要求在满足热量交换的前提下,

尽可能缩小设备体积,即提高设备的紧凑性,进而减轻设备重量,节约材料,并相应地减少占地面积。由此,紧凑式换热器应运而生。但是,随着微电子技术和纳米技术的发展,在微电子、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^[8],对换热设备的尺寸和重量有着特殊的要求,因而体积微小、单位体积换热面积很大的超紧凑式换热器,即微型化的换热器已经成为当前换热设备生产发展的必需。

目前,虽然相关技术的发展对传统列管式换热器的设计制造技术有部分补充和完善,但并没有突破性进展,其使用局限性反而越来越突出,具体主要表现在以下几个方面^[9]:

(1)单位体积换热面积小,紧凑性差。管束中管子之间不能紧密排列。在流动面积相等的条件下,圆形通道的表面积最小。虽然列管式换热器的体积大,但总的换热面积小,因此经济效果差。

(2)传热系数小,效率低。传热系数是衡量换热器性能的一个重要指标。经过大量的研究改进,虽然列管式换热器的传热系数有所提高,但都是以增大压力损失为代价的,总体而言效率还是很低。

(3)可靠性差。高流速下容易产生管束振动,使管子破裂,损坏设备的基础与管路,同时产生噪音。多年来,虽然在理论上提出了一些流体激振机理和振动预测方法,但是,由于流体流动的复杂性,对其规律认识的肤浅,还难以通过理论计算对振动进行有效

的控制与预防。虽然在工程应用方面也开发了一些新的抗振结构,但效果并不理想^[10]。

(4)生产周期长,金属耗量大。传统列管式换热器的管束由上千根管子组成,管板直径可达3~5 m,厚几十厘米,钻削精度和光洁度要求也比较严格。采用数控钻床,钻孔周期也要25天左右,生产周期较长;切屑量可达几吨甚至几十吨,材料浪费比较大。

(5)组装、检修、维护困难。管与孔、管束与筒体之间的间隙很小,管束的组装、管束与筒体的套装等都要求圆度或直度偏差较小,难度较大。管与管之间距离较小,不易安放检测仪器,无法检测和维护局部危险部位。

3 紧凑式换热器的发展及其应用

当前换热器发展的基本方向是继续提高设备的热效率,改进设备结构的紧凑性,加速生产制造的标准化、系列化和专门化。列管式换热器的局限性要求新型、高效、紧凑换热器的研究开发。随着强化传热理论的发展和机械加工技术的提高,国内外出现了许多新型高效的强化传热表面结构,扩大传热面积,增大单位体积内的传热,由此而出现了一系列的紧凑式换热器。具有发展前途的紧凑式换热器有板式、板翅式、螺旋板式及热管换热器。

3.1 板式换热器^[11~12]

板式换热器最早出现于1923年,具有体积小、重量轻、效率高、清洗方便、使用灵活和便于检修等优点,广泛应用于食品、化工、石油、动力和医药等领域,在市场中仅次于列管式换热器。随着结构的改进和大型化制造技术

水平的提高,板式换热器性能比列管式换热器明显提高。

板式换热器单片传热面积为0.02~4.45 m²/片,单台换热面积为2 500 m²/台,总传热系数可达3 500~7 500 W/(m²·K),介质处理量达3 500~5 000 m³/h。结构紧凑性成倍地提高,如板式换热器6 m³(3×2×1)的传热效果,列管式换热器需要12.7 m³(φ1 800×5 000)。由一种规格的板片设计两种不同波形夹角,以满足有不同压力降要求的场合,从而扩大了应用范围。采用垫片无胶连接技术,使板式换热器安装和维修的时间节省80%。板片材料的多样化,满足了不同介质的使用场合,目前已使用的材料有不锈钢、高铬镍合金、蒙乃尔和哈氏合金等,西德ALFA-LAVAL公司还推出了石墨式换热器。

3.2 板翅式换热器^[13]

20世纪30年代,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,唯以铝合金材料为主。我国是从20世纪60年代初期开始试制的,首先,制成了第一套板翅式空分设备,用于空分制氧。近几年来,在产品结构、翅片规格、生产工艺和设计以及科研方面都有较大发展,应用范围也日趋广泛。

板翅式换热器以其结构紧凑、轻巧、传热强度高,被认为是最有发展前途的新型换热设备之一。可满足对流、错流、逆流、错逆流和多股流换热,可进行气—液、气—气、液—液间的冷却、冷凝和蒸发等换热过程,广泛用于

空分装置、压缩气体冷却、石化产品生产、燃料电池、热回收、污染控制系统等方面,与列管式换热器相比,其优越性主要表现在传热强度高、结构紧凑、适应性强、密封性及可靠性高、经济性好等几个方面。

3.3 螺旋板式换热器^[14-15]

螺旋板式换热器最早由瑞典 Roseblad 于 1930 年提出,其结构是由两张间隔一定距离的平行薄金属板卷制而成,在其内部形成两个同心的螺旋形通道。冷热流体分别通过两条通道,在器内逆流流动,通过薄板进行换热。较早应用于废液、废气的热量回收,各种化工溶液、酸类物质、酒厂浆汁的加热和冷却等。

螺旋板式换热器螺旋流道中的流体在单一弯曲的通道中流动,引起惯性离心力的作用,又受定距柱的干扰,在较低雷诺数下即达到湍流,因此传热系数较高。弯曲流道的惯性离心力还可减缓污垢生长。螺旋板式换热器结构紧凑,单位体积的换热面为列管式的 3 倍。

进而改进结构,出现新型的螺旋板式换热器。如对螺旋板式换热器的上下部进行扩展,并改变通道的焊接方式,制造成一种横向流动的螺旋式换热器。其具有短流程、大流通面积、低压降和大热通量等特点,可用作低压或真空冷凝器等;卷叠和焊接技术的改进使螺旋换热器的尺寸扩大、压力等级提高;连续螺旋管的应用使焊接次数减少,大大降低了费用。

螺旋板式换热器目前使用压强最高不超过 2 MPa,最高使用温度在 300 ~ 400 °C 之间。虽可通过增加板厚来提高承压能力,

但这样既会相应增加消耗功率,还会给制造工艺带来困难,并使成本提高。

3.4 热管换热器^[16]

热管是一种高效传热元件,利用封闭的管内介质的沸腾吸热和冷凝放热进行热传导,可将大量热量通过其很小的截面远距离地传输而无需外加功力。其原理首先由美国俄亥俄州通用发动机公司(The General Motors Corporation, Ohio, USA)的 R. S. Gaugler 于 1944 年提出^[17]。在此基础上,1965 年 Cotter 首次提出了较完整的热管理论^[18]。由于热管内部抽高真空,工作介质极易蒸发汽化,管内传热热阻很小,所以能以较小的温差获得较大的传热率,而且结构简单;另外由于是相变传热,其温度均匀性好,抗热冲击性能好,易于实现温度控制;而且热管两端可自由伸缩,从而避免了高温下可能会发生的温差应力变形破坏,可靠性高,因而广泛应用于化工、动力、冶金、玻璃、轻工和陶瓷等领域的高效传热传质设备,及其晶体管、可控硅元件、电路控制板等的冷却。

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 形翅片管和嵌入式翅片管等,它们都有较普通热管换热器有较高的传热性和较广的使用范围。

4 微小型化制造的技术进展

过去,电子器件的微小化改

变了人类的生活方式,微机电系统技术(MEMS)应运而生。进入新世纪后,化学能源动力装置的微小化成为不可避免的问题,由此而出现了微型化学(化工)机械系统技术(MCMS)。微型化学(化工)机械系统的功能是传热、传质和化学反应,由于系统在带温度、压力和腐蚀介质的情况下工作,服役条件更显苛刻,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,因此微型化学(化工)机械系统的制造技术和质量显得非常重要。

对于微型化学(化工)机械系统技术的研究,涉及机械工程、材料工程、传热学、化学、物理学等多种工程技术和科学,是一多学科交叉的前沿研究领域。微型化学(化工)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(化工)机械系统尺寸微小化后,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的难度,还会引起构件间的几何误差和接触摩擦^[19]。目前由于对微观条件下的化学(化工)机械系统的特性、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小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,对微型换热器等微小型设备的结构和流场问题进行分析 and 推测^[20-22],试图归纳、总结出适用于微小型系统的微观理论。

微通道是微型设备的关键部位。为了满足高效传热、传质和化学反应的要求，必须实现高性能机械表面的加工制造，其中包括金属材料制造各种异形微槽道的技术，金属表面制造催化剂载体的技术等。常规微系统微通道的加工制造技术主要有以下 4 大类^[23~24]：

(1) IC 技术：从大规模集成电路(IC 工艺)发展起来的平面加工工艺和体加工工艺，所使用的材料以单晶硅及在其上形成微米级厚的薄膜为主，通过氧化、化学气相沉积、溅射等方法形成薄膜；再通过光刻、腐蚀特别是各向异性腐蚀、牺牲层腐蚀等方法形成各种形状的微型机械。虽然 IC 工艺的成熟性决定了它目前在微机械领域中的主导地位，但这种表面微加工技术仅适合于硅材料，并限于平面结构，厚度很薄，限制了应用范围。

(2) 光刻电镀 (LIGA) 技术：1986 年由德国 Ehrfeld 等利用高能加速器产生的同步辐射 X 射线线刻蚀、结合电铸成形和塑料铸模技术发展出的 LIGA 工艺。该技术特点是：可以加工出大深宽比的微结构，加工面宽。但 LIGA 需要同步辐射 X 射线光源、制造成本高；LIGA 实际上是一种标准的二维工艺，难以加工形状连续变化的三维复杂微结构；而且同步辐射 X 光刻掩膜的制备也极为困难。

(3) 属于个别特殊、特微加工，如微细电火花 EDM、电子束加工、离子束加工、扫描隧道显微镜技术等。可加工材料面窄、工艺复杂。

(4) 近年来出现的准分子激光微细加工技术。准分子激光处

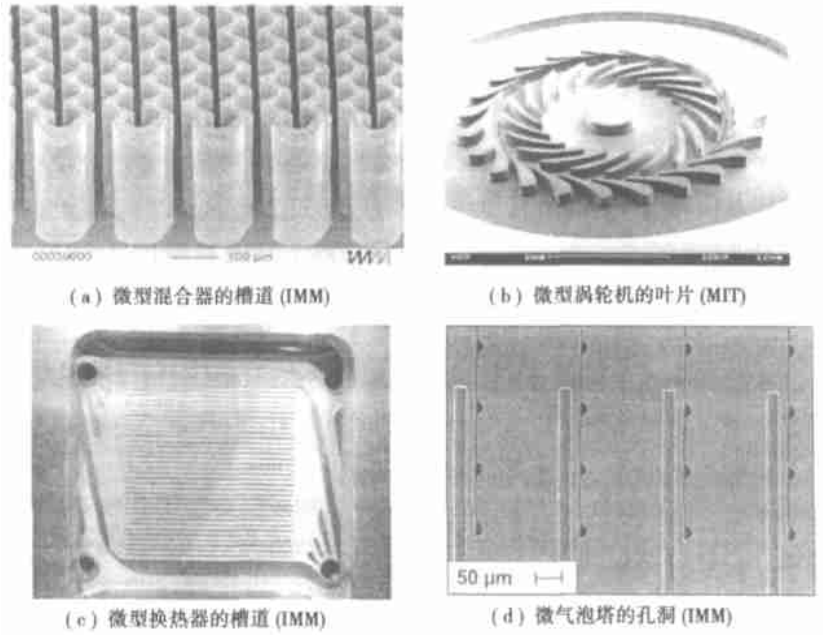


图 1 各种复杂机械表面

于远紫外波段，波长短、光子能量大，可以击断高聚物材料的部分化学键而实现化学“冷加工”。利用准分子激光的掩膜投影直刻技术能获得大深宽比的微结构、加工面宽、成本低、可实现批量生产；利用聚焦激光束光栅扫描刻蚀技术实现连续三维结构的加工。

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，如图 1 所示。但从当前国际微型机械产品的生产来看，三维复杂微成形在技术上仍未得到很好的解决，正在积极开发新型的、更有效的微加工和微成形技术。

微型化学机械系统的关键技术是系统的封装。由于不同的使用温度对材料的要求不同，因此封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，如图 2 所示，采用扩散焊进行封焊。

扩散焊一般在高温真空环境下进行，封焊温度较高，如对于

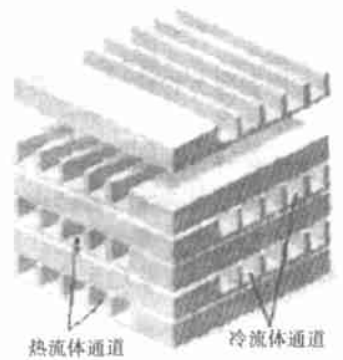


图 2 微化学机械系统中的槽道板和迭层结构

铜，扩散焊温度要求为 630 °C 以上，而对于不锈钢则在 920 °C 以上，因此其制造难度较采用软钎料封焊 (200 °C) 的 MEMS 大得多^[25]。高温封焊时，在顶部施加液压载荷，使得材料界面发生非弹性变形，由此实现层间的扩散焊连接。扩散焊技术涉及材料表面处理工艺、过渡层成份的优化、温度压力的控制等问题，目前对于高温扩散焊技术的理论研究还十分薄弱，已有的针对电子封装

的研究工作大量地集中于熔点较低的软钎焊, 且主要是针对焊后的评价。因此, 温度、压力、时间、真空环境对封焊结构可靠性的影响及其尺度效应对封焊强度的影响是扩散焊技术的两个重要部分。只有合理地解决这两个问题, 才能保证封焊技术的可靠性和产品质量的稳定性。目前, 华东理工大学针对扩散焊技术的关键性问题, 正尝试采用试验法和分子动力学模拟法对其进行深入的研究。

5 微小型换热器的研究进展与应用

从技术发展和能源利用的角度来看, 微小型化换热装置具有单位体积换热量大、单位体积换热面积大、通道水力直径小等突出优点, 比传统换热装置有明显的优势, 具有极大的开发潜力和广泛的应用前景。随着微小型化学机械系统的发展及成功运作, 特别是微型核反应堆的试运行、燃料电池动力潜艇的试航、微透平机械以及微化学仪器的应用等^[26~27], 微小型化的换热装置作为相应系统的配备设备, 正经历着从小型化向微型化的过渡发展。

5.1 小型化换热装置及应用

板翅式换热器是小型化换热装置的典型代表, 它的技术进展代表着小型化换热装置的发展方向。经过 70 多年的发展, 板翅式换热器以它高效、紧凑、轻巧的特性已在石油化工、航空航天、电子、原子能、武器工业、冶金、动力工程和机械等领域得到了广泛的应用, 并在利用热能、回收余热、节约原料、降低成本以及一些特殊用途上取得了显著的经济效益。近年来, 随着高科技的发展及新技术的渗透, 板

翅式换热器在理论设计、制造工艺、应用范围等方面逐步趋于成熟和完善, 成为工程领域青睐的一种换热设备。

板翅式换热器结构的复杂性增加了其流体流动和传热的复杂性, 无疑使得板翅式换热器的理论设计更加困难。长期以来, 翅片的结构形式、表面特性, j 和 f 因子的选择和修正, 通道的分配和排列以及通道间的物流分配, 换热器内相变传热机理等都是板翅式换热器理论设计的难点, 应用理论推导不切实际, 而试验研究费用太高、周期太长。计算机辅助工程技术的发展, 使得应用计算流体力学对换热器进行模拟计算成为 20 世纪 80 年代以来换热器理论设计的主要方法, 许多商业化的模拟计算软件被用来研究板翅式换热器的传热机理, 进而进行优化设计。南京化工大学综合了经验、试验和数值模拟的数据库, 于 1995 年推出了板翅式换热器的计算机辅助设计 (PF-ECAD) 软件包^[28], 兼具了物性计算模块和计算机绘图模块, 缩短了设计周期和提高了设计精度, 使得板翅式换热器的理论设计进入一个新的发展平台。

板翅式换热器的工业化生产始于在制造中采用钎焊工艺, 而其整个技术进步的进程也是与钎焊工艺的不断进步紧密相关的。钎焊工艺的确定和钎焊中各工艺参数的严格控制是决定板翅式换热器质量和使用性能的关键因素。初始的盐浴浸渍钎焊工艺对环境污染严重, 工艺繁复, 能量消耗高。20 世纪 80 年代以来, 真空钎焊以其适应性强、抗腐蚀、短周期、低能耗、低成本、无污染等优点而逐渐成为板翅式换热器最

主要的生产工艺。目前可钎焊的最大铝板翅式换热器芯体尺寸为 $1.2\text{ m} \times 1.2\text{ m} \times 6\text{ m}$, 最大承压 8.0 MPa , 最多 12 股流。钎焊工艺不仅朝着纵向发展, 横向也有很大的扩展。目前还开发了对不锈钢、钛合金等材质的钎焊工艺, 正逐渐趋于成熟。

热交换的广泛性要求换热装置具有更广的适用范围。针对高温、高压、易腐蚀、易结垢等甚而恶劣的工况条件, 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, 并广泛应用于各行各业。日本铝碳纤维复合材料制板翅式换热器可承压 35 MPa ^[29]; 我国开发的石墨改性碳纤维增强聚四氟乙烯板翅式换热器^[30], 具有极强的抗腐蚀和抗结垢能力; 由特殊陶瓷材料制成的板翅式换热器, 可耐 $1\ 000\text{ }^\circ\text{C}$ 以上高温。

以上技术的发展进步使板翅式换热器的优点更加明确突出, 明显优于其它小型换热装置。以氨冷器为例, 分别利用板翅式换热器和另外一种比较高效的小型换热装置——热管换热器进行设计。由表 1 所示的特征性能指标的比较可见, 相同的操作工况下, 板翅式换热器的综合性能指标明显优于热管换热器^[31]。

5.2 微型化换热装置及应用

小型化换热装置的技术虽然已很成熟, 但对于微电子、航空航天、医疗、化学生物工程、材料科学、高温超导体的冷却、薄膜沉积中的热控制、强激光镜的冷却以及其它一些对换热设备的尺寸和重量有特殊要求的场合, 却受到了很大的限制, 因而, 推动了换热装置向着更加高效、更加小型化的方向发展。

微型换热装置包括由多层槽道板构成的微通道换热器、微通道蒸发器和微通道加热器等。所谓微通道换热器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。微通道换热器通常含有当量直径小于 $500 \mu\text{m}$ 的流体通道^[33]，如图3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大大减小，传热速率大大增加^[33]，其无相变传热系数可达 $10 \sim 15 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，有相变传热系数可达 $30 \sim 35 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ；同时微通道使得流体与通道单位体积接触表面积要远大于常规通道中流体与通道的单位体积接触表面积（见图4）^[34]，从而使得整个换热器的体积可比常规换热器的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高5个数量级以上（见图5）^[35~36]；用微通道换热器预热系统进行预热时，其加热速率是普通换热器的40倍，且不会加热过头^[37]，可控性较好；随过程控制、过程稳定性和产品质量的提高，可使用微型换热器的并行操作提高生产速率。

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（Pacific Northwest National Laboratory）设计的微通道燃料蒸发器为例^[38]，将尺寸为 $9 \text{ cm} \times 10 \text{ cm} \times 3.8 \text{ cm}$ ，质量 1.8 kg 的微通道燃

表1 板式换热器与热管换热器性能比较

		板式换热器	热管换热器
操作工况	流量(氮气侧/空气侧)/ $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0.172/1.6	0.172/1.6
	进口温度(氮气侧/空气侧)/ $^{\circ}\text{C}$	450/23	450/23
	出口温度(氮气侧)/ $^{\circ}\text{C}$	40	40
	操作压力(氮气侧/空气侧)/MPa	0.1/0.1	0.1/0.1
	空气出口温度/ $^{\circ}\text{C}$	129.2	138
特征性能指标	压力降(氮气侧/空气侧)/kPa	(0.23+0.41)/(0.59+0.96)	0.98/4.65
	材质	1F2+316L	20g+Q-235A
	总换热量/kW	60.32+111.67	498
	换热面积(氮气侧/空气侧)/ m^2	(34.31+8.82)/(25.06+19.60)	105.5/264.9
	设备体积/ m^3	0.021+0.018	4.18
	单位体积的换热量/ $\text{kW} \cdot \text{m}^{-3}$	2872.4(1F2)/6203.9(316L)	119.1
	设备总重量/kg	57.76+142.26	9121
	价格/万元	5.1	19.8

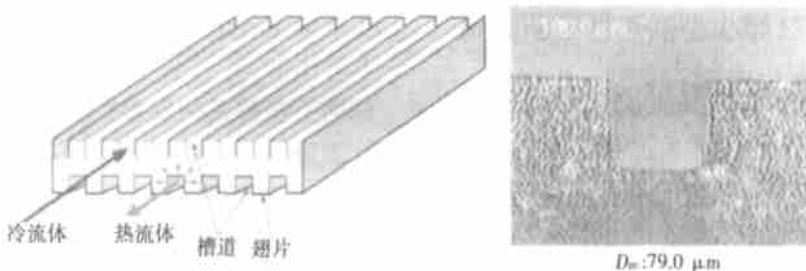


图3 微槽道换热器结构

料蒸发器（见图6）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 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2。

然而，到目前为止，对于微通道沸腾换热的传热机理等的认识还相当有限，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^[39]，需要进一步地

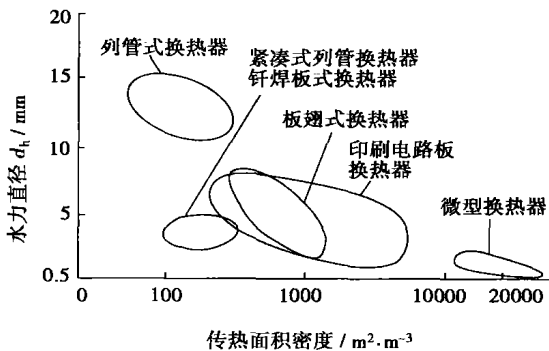


图4 各种换热器面积密度及水力直径的比较

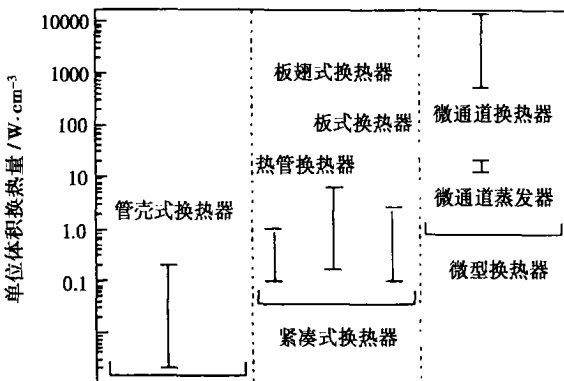


图5 各种换热器单位体积换热量的比较

表 2 微通道燃料蒸发器与常规燃料蒸发器的性能比较

	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 V/L	0.35	> 10	体积不到 1/10
质量 m/kg	1.8	> 227.5	质量很轻, 可携带使用
响应时间 t/s	几秒钟	几十秒~几百秒	可适应各种负载要求
单位体积热流量 $/W \cdot cm^{-3}$	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

表 3 微通道加热器与常规加热器的性能比较

	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 $/kW$	1.2~35.2	23.4~44.0	高效、模块化、可扩展性、重量轻、体积小
能量效率 $/\%$	80~85	76~94	
单位体积能量输出 $/kW \cdot m^{-3}$	2.5×10^4	$0.88 \times 10^2 \sim 4.55 \times 10^2$	
单位重量能量输出 $/kW \cdot kg^{-1}$	5	0.26~1.67	
单位成本能量输出 $/kW \cdot \$^{-1}$	0.025~0.05	0.019~0.05	

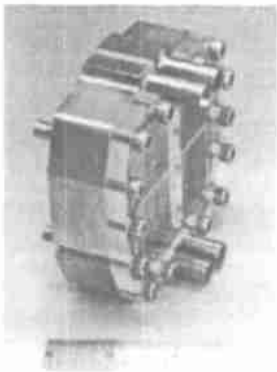


图 6 微通道燃料蒸发器



图 7 微通道加热器

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 kg,仅为常规燃烧器的 1/10,其体积也为常规燃烧器的 1/10 左右,可用于便携式加热/冷却装置、户内取暖装置、串列式热水器及燃料电池系统。每平方厘米燃烧面积可产生 30 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 h 加热或为串列式热水器提供热量。并行的 20 个微通道加热器模块大约可产生 20 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 3。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。

6 结束语

随着微型机械电子系统和微型化学机械系统的发展,传统的换热装置已不能满足应用系统的

基本要求,换热装置从大型化向小型化的发展成为迫切要求和必然趋势。目前,微型换热装置虽然在设计、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,但随着大量的试验和数值模拟对其结构、性能等的技术改进和优化设计研究^[41~43],微型换热装置将日趋成熟,成为一种具有广泛应用前景的新型设备。

参考文献:

- [1] 陈文光,袁权.微化工技术[J].化工学报,2003,54(4):421-439.
- [2] 杨大伟.微型机械及其制造技术[J].机械制造,1996,34(2):4-5.
- [3] 孙雅洲,梁迎春,程凯.微型化制造设备与微型制造系统[J].中国机械工程,2002,13(7):592-596.
- [4] EBSTEIN A H, SENTURIA S D. Macro power from micro machinery[J]. Science 1997, 276(5316): 1211.
- [5] BRENCHLEY D L, WEGENG R S, DROST M K. Development of micro chemical and thermal systems [EB/OL]. <http://www.pnl.gov/microcats/aboutus/publications/microchemical/micro-cats.PDF>, 2000-03-09.
- [6] SPADACCINI C M, MEHRA A, LEE J, et al. High power density silicon combustion

微通道加热器(见图 7)是一个微尺度的燃烧系统^[40],由 100~200 μm 厚的蚀刻板层压装配

- systems for micro gas turbine engines[J] . **ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, 2003, **125**(3): 709—719.
- [7] 涂善东, 凌 祥. 以知识为基础的化工过程机械产品的快速创型[J] . **化工机械**, 2000, **27**(6): 347—351, 346.
- [8] TUCKERMAN D B, PEASE R F W. Optimized convective cooling using micromachined structure[J] . **Journal of Electrochemical Society**, 1982, **129**(3): 98.
- [9] 兰州石油机械研究所. 换热器[M] . 北京: 烃加工出版社, 1986.
- [10] 杨波涛, 胡明辅, 朱效钦, 等. 管壳式换热器新型抗震结构体系及工程设计[J] . **石油化工设备**, 2001, **30**(1): 18—20.
- [11] 张平亮. 新型高效换热器的技术进展及其应用[J] . **压力容器**, 1997, **14**(2): 56—62.
- [12] REPPICH M. Use of high performance plate heat exchangers in chemical and process industries[J] . **International Journal of Thermal Science**, 1999, **38**(12): 999—1008.
- [13] 王松汉. 板式翅式换热器[M] . 北京: 化学工业出版社, 1984.
- [14] ASTANOVSKIH D L, ASTANOVSKIH L Z. New design of heat exchanger[J] . **Khimicheskoe i Neftegazovoe Mashinostroenie** 2003(4): 13—15.
- [15] HO J G, WIJEYSUNDERA N E. Study of a compact spiral—coil cooling and dehumidifying heat exchanger[J] . **Applied Thermal Engineering**, 1996, **16**(10): 777—790.
- [16] 李祥华, 宋光强. 几种新型换热器的特点及使用状况对比[J] . **化工学报**, 2002, **29**(3): 33—35.
- [17] GAUGLE R S. Heat transfer device[P] . US Patent: 2350348, 1944—04.
- [18] COFFER T P. Theory of heat pipes[R] . New Mexico: Los Alamos National Laboratory Report no. LA—3246—MS, The University of California, Los Alamos 1965.
- [19] 魏悦广. 机械微型化所面临的科学难题—尺度效应[J] . **世界科技研究与发展**, 2000, **22**(2): 57—61.
- [20] GILLOT C, BRICARD A, SCHAEFFER C. Single— and two— phase heat exchangers for power electronic components[J] . **International Journal of Thermal Sciences**, 2000, **39**(9): 826—832.
- [21] NARAYANAN S P, VENKATARAMANAM G. Analysis of performance of heat exchangers used in practical micro miniature refrigerators[J] . **Cryogenics**, 1999, **39**: 517—527.
- [22] 喻世平, 辛明道. 微通道散热器的性能试验[J] . **重庆大学学报**, 1974, **17**(4): 6—11.
- [23] 杨大伟. 微型机械及其制造技术[J] . **机械制造**, 1996, **34**(2): 4—5.
- [24] 左铁钊, 蒋毅坚. 微制造技术的回顾与展望[J] . **中国机械工程**, 2000, **11**(z1): 8—10.
- [25] MARTIN P M, MATSON D W, BENNETT W D. Microfabrication methods for microchannel reactors and separations systems[J] . **Chemical Engineering Communications**, 1999, **173**: 245—254.
- [26] HADFIELD P, FITZPATRICK M. Mini nuclear reactor could power apartment blocks[EB/OL] . <http://www.newscientist.com/article.ns?id=dn186>, 2001—08—22.
- [27] PARRISH A. Germany launches submarine fuel cell era with “U31”[EB/OL] . http://www.fuelcelltoday.com/FuelCellToday/IndustryInformation/IndustryInformationExternal/IndustryInformationDisplayArticle/1588_471_0.html, 2002—05—20.
- [28] 凌 祥, 柳雪花, 涂善东. 板式翅式换热器 CAD 系统的开发[J] . **炼油设计**, 1997, **27**(6): 57—59.
- [29] SHAH R K. Compact heat exchanger technology and applications, heat exchanger engineering[M] . Edit by Founmeny E A, Heggs P J. London: Ellis Horwood Limited, 1991.
- [30] 南京工业大学. 非金属板式翅式换热器[J] . **化工科技市场**, 2002, **25**(12): 61.
- [31] 周帼彦. 紧凑型氨冷却器的设计[R] . 上海: 华东理工大学, 2004.
- [32] TONG J, NAKAJIMA M, NABETANI H, et al. Production of oil—in—water microspheres using a stainless steel microchannel[J] . **Journal of Colloid and Interface Science**, 2001, **237**(2): 239—248.
- [33] GUI F, SCARINGE R P. Enhanced heat transfer in the entrance region of microchannels[A] . **Proceedings of the 30th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference** [C] . New York: ASME, 1995. 289—294.
- [34] REAY D A. Compact heat exchangers, enhancement and heat pumps[J] . **International Journal of Refrigeration**, 2002, **25**(4): 460—470.
- [35] 毛希澜. 化工设备设计全书—换热器设计[M] . 上海: 科学技术出版社, 1988.
- [36] INSTITUTE FOR MIKROTECHNIK MAINZ GMBH. The catalogue—process technology of tomorrow[M] . Mainz: Marketing/ Unternehmenskommunikation Presse, 2004.
- [37] LEIPPRAND I, HEINICHEN H, KINZL M, et al. Benefits of micro reaction engineering for the process industry[J] . **MST News**, 2002(3): 8—9.
- [38] MACRO J L, TONKOVICH A Y, IAMONT M J, et al. Compact microchannel fuel vaporizer for automotive applications[EB/OL] . <http://www.pnl.gov/microcats/aboutus/publications/microchemical/cmfv—macro—rev.PDF>, 2003—03—09.
- [39] 马富芹, 王晓璐, 吴建波. 紧凑型微通道蒸发器设计的理论探讨[J] . **中原工学院学报**, 2004, **15**(1): 60—62.
- [40] DROST M K, WEGENG R S, MARTIN P M, et al. Micro heater[EB/OL] . <http://www.pnl.gov/microcats/aboutus/publications/microthermal/microheaterrev.PDF>, 2000—03—09.
- [41] 姜培学, 李 勳, 马永昶. 微型换热器的实验研究[J] . **压力容器**, 2003, **20**(2): 8—12.
- [42] PRADEEP NARAYANAN S, VENKATARAMATHNAM G. Analysis of performance of heat exchangers used in practical micro miniature refrigerators[J] . **Cryogenics**, 1999(39): 517—527.
- [43] OKABE T, FOIL K, OIHOFFER M, et al. Comparative studies on micro heat exchanger optimisation[A] . **Proceedings of the 2003 Congress on Evolutionary Computation** [C] . Canberra: IEEE Press, 2003. 647—654.

换热技术从大型化向微小化的发展 = **Development of Heat Exchange Technology from Macro-sized Heat Exchange Units to Miniaturized Ones** [刊, 汉] / ZHOU Guo-yan, TU Shan-dong (Mechanical & Power Engineering Institute under the East China University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200237) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 447 ~ 454

On the basis of analyzing the construction features of traditional heat exchangers a specific analysis was conducted of the construction, performance and applications of now commonly used compact heat exchangers along with an exposition of their development and potential use in micro-sized chemico-mechanical systems. With an ammonia cooler serving as an example the design of a plate-fin heat exchanger and another kind of high-efficiency miniaturized heat exchange unit, the so-called heat-pipe heat exchanger, was respectively carried out. It can be shown that the plate-fin heat exchanger features higher heat-exchange efficiency and a compact structure. This also in a comprehensive way indicates the inevitable development trend of heat exchange technology from macro-sized units to compact and miniaturized ones. The wide prospects of the application of miniaturized heat exchange devices are specifically analyzed by citing as examples such typical miniaturized heat exchange units as micro-channel heat exchangers, micro-channel evaporators and micro-channel heaters. **Key words:** heat exchange technology, miniaturization, micro-channel, micro heat transfer, miniaturized chemico-mechanical system, plate-fin type, heat-pipe type

汽轮机密封技术的应用和发展 = **Application and Development of Steam Turbine Sealing Technologies** [刊, 汉] / WEI Lin-jian, LI Chun-qing, GAO Lei, et al (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 455 ~ 458

Steam turbine gland seal is a major constituent element of a turbine, which has a direct bearing on the steam leakage of a turbine seal, and thus affects the thermal efficiency of a steam turbine unit. In the light of the sealing mechanism of various kinds of gland seal construction the sealing performance of various turbine gland seals currently in use is analyzed and compared along with a forecast of the development prospects of turbine sealing technology. Described in especial detail is the adjustable gland seal of Brandon type developed by U.S. Brandon Engineering Co. in the recent decade or so and now extensively used worldwide. By using this type of gland seals it is possible to enhance the turbine operational safety and reliability as well as significantly improve its thermal efficiency. However, its use in China has given rise to gland seal rust corrosion and spring plastic deformation. **Key words:** steam turbine, steam gland, application, development

船用燃气轮机变几何动力涡轮大攻角流动特性的三维数值模拟 = **Three-dimensional Numerical Simulation of the Flow Characteristics at a Large Incidence of the Variable-geometry Power Turbine of a Marine Gas Turbine** [刊, 汉] / FENG Yong-ming, LIU Shun-long (Power & Nuclear Energy Engineering Institute under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001), LIU Min, WANG Lin (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(5). — 459 ~ 463

By employing three-dimensional numerical simulation techniques a study was conducted of the flow field mechanism of the aerodynamic performance variation of a variable-geometry power turbine caused by the rotation of adjustable guide vanes. The results of the study indicate that within a range of relatively small turning angles the adjustable guide vanes designed by using a large turning angle will enable the turbine to operate at a large incidence. The three-dimensional separation flow field structure and its generation mechanism in the rotating cascade flow channel of an adjustable guide vane stage at a large positive incidence are very different from those of the same vane stage at a large negative incidence. Moreover, the suction-surface separation flow caused by a large positive incidence will significantly reduce the efficiency of the turbine as a whole. Through a systematic mechanistic analysis the authors have proposed the use of a rear loaded blade profile for the adjustable guide vanes using a relatively small turning angle and the adoption of an aerodynamic design principle under which a relatively large negative incidence is employed for the rotating cascade of the adjustable guide vane stage of the variable-geometry power turbine. **Key words:** marine gas turbine, variable-geometry power turbine, flow characteristics at a large incidence, numerical simulation