

用于个人冷却的 微型制冷系统研究现状^{*}

北京工业大学 钟晓晖[☆] 吴玉庭 张行周 杜春旭 马重芳

摘要 微电子机械系统(MEMS)的迅速发展,使过程机械装置的微型化和轻量化成为可能。与传统制冷装置相比,微型制冷系统的体积可以缩小到 1/60 以下。微型制冷系统可以广泛应用于特殊环境下的个人冷却。重点介绍了微型制冷系统在国内外的研究成果和研究进展,指出了当前存在的主要问题,并对今后的研究工作提出了一些建议。

关键词 微型制冷系统 个人冷却 研究现状

Micro refrigeration systems for personal cooling: a review

By Zhong Xiaohui[★], Wu Yuting, Zhang Xingzhou, Du Chunxu and Ma Chongfang

Abstract The development of MEMS makes the micromation and light weight of process machine possible. Compared with the size of traditional refrigeration systems, the size of micro ones can reduce to below one-sixtieths. Micro refrigeration systems can be widely used for personal cooling in special environment. Presents the research findings and progress of micro refrigeration systems at home and abroad, points out the current main problems and puts forward some suggestions for the future researches.

Keywords micro refrigeration system, personal cooling, research status

[★] Beijing University of Technology, Beijing, China

^①

0 引言

近年来,随着微电子机械系统(MEMS)的迅速发展,许多微细加工方法得到了发展和应用,使过程机械装置的微型化和轻量化成为可能。微技术可以大大地提高过程机械装置的传热和传质效率,由于尺度的微细,面积体积比增大,表面作用增强,从而导致传递效果有明显的增强,比常规尺度的提高了 2~3 个数量级。将微制造技术用于制冷装置,可使其体积缩小到 1/60 以下,人们将尺寸为厘米数量级的制冷系统称为微型制冷系统。

随着科技的发展,人们在能源、动力、军事、航空航天等领域中,对环境温度提出了更高的要求,高温是不少人-机系统不可避免的环境因素,它会引起人缺氧和抗荷耐力降低、注意力分散、记忆力

减弱、反应灵活性下降等一系列生理、心理变化^[1]。这些都严重影响着工作人员的工作情绪和身体健康,对工作质量与效率也产生很大的影响。此外,随着人们对生活品质的不断追求,微型制冷系统在民用方面也有着广阔的开发前景,可用于户外的行人和烈日下的交警等。所以,微型制冷系统一个比较广泛的应用场合即是特殊环境下的个人冷却。当前,个人冷却还停留在采用被动式冷却的阶段,如使用含有冰的背心,它的效率和适用性差,一直很难被推广。微型制冷系统用于个人冷却的制冷方法有多种,包括蒸气压缩式、吸附式、半导体制冷

^{①☆} 钟晓晖,男,1977 年 9 月生,博士研究生
100022 北京工业大学 427 信箱
(010) 67396661-8209
E-mail: zhong_xiaohui@163.com

收稿日期:2005-12-02

一次修回:2006-01-19

二次修回:2006-09-11

^{*} 国家重点基础研究发展规划(973 计划)资助项目(编号:G2000026304)

等,由于半导体制冷效率较低,较少用于个人冷却,本文不予讨论。

当前,最受研究者青睐的是蒸汽压缩式和溴化锂吸收式微型制冷系统,这是因为微型制冷系统对轻量化的要求很高,而蒸汽压缩式制冷效率高、结构简单;溴化锂吸收式制冷则可以利用人体本身的热量。从目前已经研制出的用于个人冷却的微型制冷系统的样机来看,也多属于这两种型式。

1 吸收式微型制冷系统的研究现状

美国国家能源部(DOE)太平洋西北国家实验室(PNNL)开发了一种溴化锂吸收式微型制冷系统,并用于个人便携式冷却系统和分布式空调等控制微气候的系统^[2-6]。这种制冷系统是基于传统的溴化锂/水吸收式循环而开发的,与传统的系统相比,采用了许多平行的微通道,强化了传热传质,制冷装置的体积和质量可以大大减小。

目前,该实验室已经利用微制造技术生产出了吸收式制冷循环的各个部件,但该制冷系统在技术上还没有真正实现个人可便携式的推广应用。这种热驱动制冷系统的制冷性能系数 COP 为 0.68,与电驱动制冷系统值为 2.8 的 COP 相当。整套制冷装置质量约为 4.95 kg,体积约为 0.0175 m^3 ,制冷量为 350 W,连续使用时间为 8 h,制冷装置尺寸为 $250\text{ mm}\times 280\text{ mm}\times 250\text{ mm}$,还没有批量生产。

溴化锂吸收式制冷系统部件较多,除了冷凝器、蒸发器和膨胀阀以外,还有发生器和吸收器等,各元件的装配较为复杂,这也就提高了它的加工难度和生产成本,而且,溴化锂溶液是一种具有较强腐蚀性的物质,它对普通的金属材料,例如碳钢、紫铜等都有较强的腐蚀性。溴化锂溶液对金属材料造成的腐蚀,不仅大大缩短了制冷装置的使用寿命,而且腐蚀产物,例如铁锈、不凝性气体(氢气)等还会直接影响机组的性能和正常运行。在安全装置方面,除了蒸汽压缩式制冷装置所需要的安全装置以外,吸收式制冷装置还应设有防结晶和自动溶晶装置。因此,该种形式的制冷系统有一定的弊端和局限性。

2 蒸汽压缩式微型制冷系统的研究现状

蒸汽压缩式制冷有质量流量小、冷凝温度低及 COP 高等优点^[7],因此,一些研究机构致力于开展微型蒸汽压缩式制冷系统的研究。美国 A 公司已经研制出一种基于高效蒸汽压缩式制冷的个人冷

却系统,它是该公司为美国军队研制的。该系统在 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下可以产生 300 W 的制冷量,制冷装置共计约 2.75 kg,制冷装置尺寸为 $241\text{ mm}\times 178\text{ mm}\times 94\text{ mm}$ 。

目前,北京工业大学环境与能源工程学院传热强化与过程节能教育部重点实验室已经开始了这一方面的研究工作,并研制出了微型制冷系统的样机,该系统在 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下最大可以产生约 400 W 的制冷量,图 1 给出了该系统制冷量随时间的变化。制冷装置尺寸为 $265\text{ mm}\times 250\text{ mm}\times 120\text{ mm}$,质量约为 4 kg。因尚处于前期开发阶段,该系统运行还不够稳定,与国外系统相比,还有一定的差距。

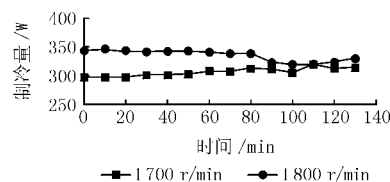


图1 制冷量随时间的变化

综上所述,目前国内外对微型制冷系统的研究还处于样机研制阶段,在理论上研究得也不多,还有待于进一步的完善和改进。

3 微型制冷系统部件的研究现状

制冷系统的部件主要有压缩机(吸收式系统的发生器和吸收器相当于压缩机)、冷凝器、膨胀阀和蒸发器等。由于个人便携式冷却系统对轻量化的要求很高,因此高效、紧凑、微型的部件是关键,其中的核心部件就是微型压缩机。

3.1 微型压缩机的研究进展

微型压缩机多采用旋转式。旋转式压缩机没有往复运动的传动机构,不需要吸气阀,零部件少、结构简单、容易制造、成本较低,同时操作简便、不维修运行时间长、易于实现自动化^[8],是微型压缩机的首选结构型式。

为了满足体积和质量的要求,美国 A 公司的微型制冷系统采用其自行研制的微型转子压缩机(如图 2 所示),它包含了一个大功率压缩机和直流无刷电动机,直流无刷电动机可以调节转速,从而使压缩机在可调速度下运转以满足负荷要求。该微型转子压缩机在 $38\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下可以产生 300 W 的制冷量,该压缩机直径约 5 cm,长 7 cm,质量 0.59 kg,使用的制冷剂为 R134a,电压(DC)为 24 V 或 12 V。



图 2 美国 A 公司开发的微型转子压缩机

北京工业大学利用微细电火花加工技术制造微型旋转式压缩机。图 3 为微型压缩机的外形图,该压缩机采用铸铁和铝合金制造,质量为 0.4 kg,在 40 °C 的环境温度下可以产生 300 W 的制冷量,制冷剂为 R22,电压为 24 V 或 12 V(DC)。



图 3 北京工业大学研制的微型压缩机

3.2 微型制冷系统换热器的研究进展

对于制冷系统来说,若采用紧凑高效的换热器,不仅可使整个装置的体积和质量减小,而且由于装置的功耗减小,其能耗比也大为提高。

3.2.1 微型制冷系统微通道换热器的研究进展

近年来,随着微加工技术的进步,电子和机械工业的发展,人们可以制造出流体通道深度范围由几微米到几百微米的高效微型换热器。国内外很多学者相继在实验和模拟方面开展了研究。各种各样的微加工技术被应用于加工微型换热器,如平板印刷术、化学蚀刻技术、光刻法(LIGA)、钻石切削技术、微电子控制加工技术以及离子束加工技术等^[9-12]。

根据微通道的不同,微型换热器可以分为带有宽而扁平通道的微型换热器、带有窄而深通道的微型换热器和带有宽而深通道的微型换热器三种型式。PNNL 的微型制冷系统所用的微型换热器(见图 4)即是一种带有宽而扁平通道的微型换热器,这种换热器的厚度很小,易于布置,所以在微型

制冷系统中应用较多。该换热器内流体的流动分布如图 5 所示^[13]。平板的四角均有开口,其中两

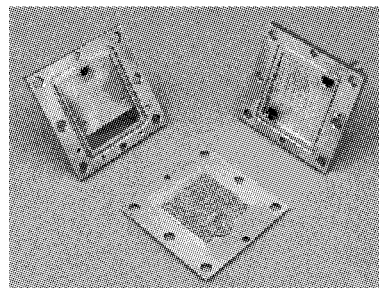


图 4 PNNL 研制的微型换热器

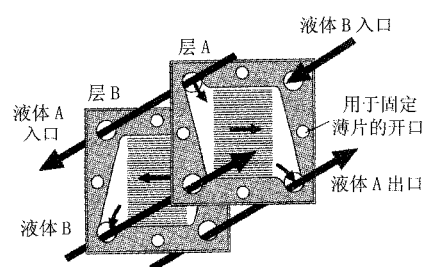


图 5 微型换热器内流体的流动分布

个对角处的开口作为同一种流体的入口及出口。另一流体经另一对角线上的开口流至相邻平板,相邻平板的构造除与上一平板呈轴对称外,其余均与上一平板相同。为实现高效传热,平板的厚度非常小,在其两侧通过平行肋片的导流作用形成了分布均匀的逆向流动。

微型换热器的特点是通过采用微通道,使单位体积内的换热面积增大,因而其体积小、质量小且传热效率高,单位质量的换热量大^[14]。但由于加工工艺不成熟、成本高以及理论上的研究不够完善等原因,微型换热器目前还处于实验室研究阶段,商业化的产品还没有出现;此外,微型换热器的压力损失较大,这也给其实际应用带来了一些困难。所以,微型制冷系统更多采用加工上更容易实现的小型紧凑式换热器。

3.2.2 微型制冷系统中常用的紧凑式换热器的研究进展

通过改变换热器的材料、改善换热表面的形状以及对换热器进行优化设计,可以提高紧凑式换热器单位体积和质量的换热量。微型制冷系统中空冷冷凝器多采用平行流式紧凑式换热器,而液液换热器可采用紧凑式换热器中有发展前途的板式或者螺旋式。

平流式冷凝器由管带式冷凝器发展而成,也是由扁管和散热片组成,它吸收了管带式的各项新技术,具有结构先进、换热系数高、材料消耗少、外形尺寸小等优点,是目前最有前途的冷凝器形式,是技术上较成熟的一种产品,常用于汽车空调。很多学者对平行流换热器的管内冷凝换热和空气侧阻力做了大量的研究^[15-17]。北京工业大学为其微型制冷系统设计开发了微型多元平行流冷凝器(见图6),即在平行流式结构的基础上加设隔断的变通程结构,并对其进行了优化设计。该换热器的质量只

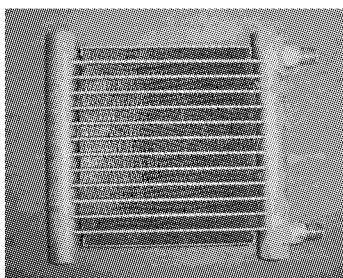


图6 微型多元平行流冷凝器

有 0.45 kg,研究者用水代替制冷剂进行了平行流空冷冷凝器和肋片管冷凝器的对比换热实验,在水进口温度 35 °C,空气进口温度 19 °C,风速 3 m/s 的试验条件下,平行流冷凝器的换热量可达 450 W 左右,而在同样的试验条件下,质量为 1.7 kg 的肋片管式换热器换热量只有 270 W。对比实验证明,多元平行流冷凝器具有优良的轻量化性能,适于微型制冷系统的开发。

另外,北京工业大学还为其微型制冷系统设计了一种微型螺旋管蒸发器(见图7),质量只有 0.16 kg,通过对流动表面的粗糙处理及内部加扭转带来强化传热。在水进口温度 $t_1 = 22$ °C,温差 $\Delta t =$

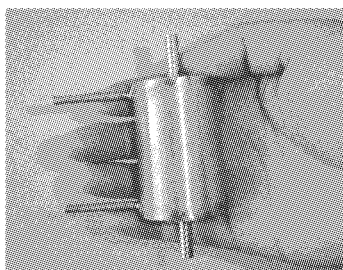


图7 微型螺旋管蒸发器

5.6 °C,流量为 45.7 kg/h,制冷剂为 R22,蒸发温度为 5 °C,流量 $G = 2$ g/s,蒸发压力为 0.58 MPa 的实验条件下,换热量可达 300 W 左右。

3.2.3 微型换热器的理论和模拟计算研究进展

Liao 等人对微型换热器的结构参数进行了数值模拟,得到了热阻、通道宽度和肋片厚度之间的关系式^[14]。在换热工况、压力降和通道深度一定的条件下,得到了热阻最小时换热器的最佳结构参数:肋高 20 mm,肋间距 16 mm,肋厚 32 mm。

Stief 等人对微型换热器的最佳热传导性能进行了数值模拟,由于通道壁面对轴向热传导有影响,结果表明减小壁面材料的导热系数,能够提高换热器的传热效率^[18]。

Yin 等人的研究^[19]也表明,在传统型式换热器计算中可以忽略的轴向热传导,在微型换热器的计算中却起着十分重要的作用,是不容忽视的。Yin 和 Bau 采用硅片制成通道尺寸相同的微型换热器,使用液氮作冷却剂,对该换热器进行三维计算,解决了传热以及包括液体和固体之间的轴向热传导问题^[20]。计算结果表明,存在一个最佳通道宽度使得热阻最小。另外,同样存在一个通道厚度使得整个热阻最小。对于比较浅的通道,最佳的肋片厚度可以更小一些。但在许多实际应用中,制造这么薄的肋片不太容易,因此肋片厚度往往是由其结构和加工要求决定的。

三种水力学通道直径不同的微型换热器中的流道水流速(质量流量)与加热功率之间的关系如图8所示。由图8可知,流体之间的热传递功率随

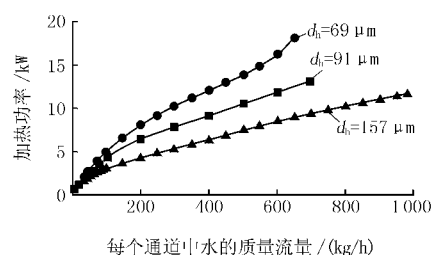


图8 微型通道水力学直径对微型换热器的影响

通道水力学直径的减小而升高,与理论预测结果相吻合。另一方面,在一定的质量流量及通道长度下,水力学直径的减小会带来压力损失的增加,因此设计时必须兼顾传递功率和压力损失。

4 讨论和建议

吸收式微型制冷系统部件较多,就轻量化而言,该型式不予以优先考虑。蒸气压缩式微型制冷系统的核心部件是压缩机,压缩机的效率高低是整个制冷系统的关键,为了减少振动和降低噪声,应采用旋转式压缩机。

由于微型制冷系统的制冷量较小,且对制冷量的需求变化不大,故节流装置采用结构简单且质量小的毛细管。

微型换热器由许多微通道组成,微型通道中热量传递的实验结果与用 Navier-Stokes 方程及一些传统传热关联式的理论计算值并不相符^[21-22]。例如,在毫米及亚毫米级通道中得到的 Nu 数较传统关联式的预计值要高,当通道尺寸小于 1 mm 时结果更是如此^[23]。结果表明,在毫米尺度通道内的传热得到了强化。由于加工工艺复杂,成本很高,微通道换热器还没有商业化的产品。

5 结语

在当前能源日益紧张的形式下,微型制冷系统已经引起了世界上的广泛重视。微型制冷系统采用微型换热器,和传统的制冷系统相比,传热得到强化,系统效率得以提高,因此,微型制冷系统的研制成功,必将推动制冷行业的进一步发展,随着微电子机械系统的迅速发展,微型制冷系统的加工成为可能。目前,微型制冷系统在我国已经得到了一定程度的重视,但是产品的开发及相关微尺度传热的理论研究还需加强。

参考文献

- [1] 陈信,袁修干. 人-机-环境系统工程生理学基础[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000:175
- [2] Drost M K, Friedrich M. Miniature heat pumps for portable and distributed space conditioning applications [C] // AIChE 1997 Spring National Meeting,1997: 1271-1274
- [3] Wegeng R S, Drost M K, Brenchley D L. Process intensification through miniaturization or micro thermal and chemical systems in the 21st century[C] // 3rd International Conference on Microreaction Technology, 2000:2-13
- [4] Drost M K, Friedrich M, Martin C, et al. Mesoscopic heat-actuated heat pump development[C] // ASME IMECE Conference, 1999:9-14
- [5] Drost M K, Friedrich M, Martin C, et al. Recent developments in microtechnology-based chemical heat pumps [C] // 3rd International Conference on Microreaction Technology, 2000:394-401
- [6] Drost M K, Friedrich M. A microtechnology-based chemical heat pump for portable and distributed space conditioning applications [C] // 2nd Int Conf on Microreaction Technology,1998:318
- [7] Peeples J W. Vapor compression cooling for high performance applications [J]. Electronics Cooling, 2001,7(3):19
- [8] 马国远,李红旗. 旋转压缩机[M]. 北京:机械工业出版社,2003:1-3
- [9] Friedrich C R, Coane P J, Vasile M J. Micromilling development and applications for microfabrication[J]. Micro-Electronic Engineering, 1997, 35:367-372
- [10] Friedrich C R. Near cryogenic machining of polymethyl methacrylate for micromilling tool development [J]. Materials and Manufacturing Processes, 2000,15(5):667-678
- [11] Kang S W, Chen J S, Hung J Y. Surface roughness of (110) orientation silicon based micro heat exchanger channel[J]. Int J Mach Tools Manufact, 1998, 38:663-668
- [12] Vasile M J, Friedrich C R, Kikkeri B, et al. Micrometer scale machining: tool fabrication and initial results[J]. Precision Engineering, 1996, 19 (2/3): 180-186
- [13] Ehrfeld W, Görtner C, Golbig K, et al. Fabrication of components and systems for chemical and biological microreactors [C] // Microreaction Technology- Proceedings of the First International Conference on Microreaction Technology,1997:72-90
- [14] Liao X S, Liu Y, Ning Y Q, et al. The optimal design of structure parameter for micro channel heat sink [C] // Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering,2002,4914:181-186
- [15] Yeon-Pun Chang, Rueyyih Tsai, Jiin-Wen Hwang. Condensing heat transfer characteristics of aluminum flat tube [J]. Applied Thermal Engineering, 1997, 17(11):1055-1065
- [16] Yang C Y, Webb R L. Condensation of R12 in small hydraulic diameter extruded aluminum tubes with and without micro fins [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1996, 39(4):791-800
- [17] Yang C Y, Webb R L. Friction pressure drop of R12 in small hydraulic diameter extruded aluminum tubes with and without micro fins[J]. International Journal of Heat Mass Transfer,1996,39(4):801-809
- [18] Stief T, Langer O U, Schubert K. Numerical investigations of optimal heat conductivity in micro heat exchangers [J]. Chemical Engineering and Technology, 1999, 22(4):297-303

(下转第 47 页)

表 3 手术室及辅房静态/空态沉降菌测试平均值

洁净等级	房间数/个	测点数/个		静态/空态沉降菌浓度实测平均值/ (个/(30 min·Ø90 皿))		国内规范要求指标/(个/ (30 min·Ø90 皿))	
		手术区	周边区	手术区	周边区	手术区	周边区
I 级	8	112	34	0.094	0.031	0.2	0.4
II 级	3	15	18	0.163	0.163	0.75	1.5
III 级	12	36	48	0.083	0.167	2	4
1 000 级辅助用房	1	32		0.1		1.5	
10 000 级辅助用房	8	21		0.063		4	

表 4 菌落数平均值为 0 的房间或区域统计数据

菌落数平均值为 0 测试的房间 的房间或区域		总数/个	菌落数平均值为 0 的房间或 区域所占比例/%
辅助用房	7	9	78
手术区	12	23	52
周边区	14	23	61

理论上说,手术区应比周边区清洁,手术室应比辅助用房清洁,但表 3,4 检测的空态、静态空气中细菌浓度的结果却不能给予证明。

综上所述不难看出,目前国内在对生物洁净手术室的分级,及其在降低感染率方面的实际功效等方面的认识与做法与国外有所不同,一些人过分强调生物洁净环境对降低手术感染率的贡献,扩大了生物洁净技术的应用范围,这对医疗卫生事业基础相对薄弱的中国,无疑是十分不利的。日本标准中降低医院空调通风要求,正是基于近年来调查发现医院空调通风运行能耗偏高,从而较客观地把握医院感染的有效控制与空调通风的关系才做出的决策,这与目前欧美各国对待生物洁净室的态度是一致的。对于幅员广大、经济发展极不平衡的中国,如果规范、标准不适宜地拔高要求,造成过高的初投资和沉重的运行与维护费用,而这些终将转嫁到就诊的民众,可能造成社会某些新的矛盾,因此这些问题不能不引起业内人士的关注。总之,国外的新经验,国外的新标准和规范值得我们探讨与重视。

参考文献

[1] 日本医療福祉設備協会,日本医療福祉設備協会規格 HEAS-02—1998 病院空調設備の設計・管理指針[S]. 東京:日本医療福祉設備協会,1998

[2] 日本医療福祉設備協会,日本医療福祉設備協会規格. HEAS-02—2004 病院空調設備の設計・管理指針[S]. 東京:日本医療福祉設備協会,2004

[3] ASHRAE. ASHRAE handbook 2003 HVAC applications [M]. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, 2003

[4] Hospital Infections Program, National Center for Infectious Diseases, Centers for Disease Control and Prevention, et al. Guideline for prevention of surgical site infection[S], 1999

[5] Farhad M, Andrew P M. Comparison of operating room ventilation systems in the protection of the surgical site[G]// ASHRAE Trans, 2002, 108(2)

[6] Farhad M, Andy M. Reducing risks of surgery[J]. ASHRAE Journal, 2003, 45(2): 28-33

[7] Lewis J R. Operating room air distribution effectiveness[G]// ASHRAE Trans, 1993, 99(Part 2): 1191-1197

[8] Rodrigo M, Michael J M, Andreas K A. Assessment of thermal comfort during surgical operations[G]// ASHRAE Trans, 2001, 107(1): 52-60

[9] 涂光备. 医院建筑空调净化与设备[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2005

(上接第 42 页)

[19] Yin X, Bau H H. Axial conduction effects on the performance of micro heat exchangers [J]. American Society of Mechanical Engineers, 1993, 5:1-10

[20] Yin X, Bau H H. Uniform channel micro heat exchangers [J]. Journal of Electronic Packaging, 1997, 119:89-94

[21] Adams T M, Abdel-Khalik S I, Jeter S M, et al. An experimental investigation of single phase forced convection in microchannels[J]. International Journal

of Heat Mass Transfer, 1998,41(6/7):851-857

[22] Zhang N, Xin M D. Liquid flow and convective heat transfer in microtube [C] // China National Heat Transfer, 1992:11189

[23] Peng X F, Wang B X, Peterson G P, et al. Experimental investigation of heat transfer in flat plates with rectangular microchannels [J]. International Journal of Heat Mass Transfer, 1995, 38(1):127-138