

基于两相流的微通道冷却技术研究进展及展望

周云龙, 孙振国

(东北电力大学 能源与动力工程学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 随着科学技术的发展, 较高的温度逐渐限制了大功率器件功率的输出。现有的研究多集中在通道尺寸以及结构优化等方面, 而且流体介质也比较单一, 大多数相变以沸腾形式体现, 有关非相变的两相流动在微通道冷却中的研究相对较少。流型作为两相流动行为研究的基础, 对传热传质特性会产生直接影响。在综合了国内外学者的研究成果后, 对微冷技术在PV电池的实际应用中进行了展望, 可以尝试将多相流动应用于太阳能电池的冷却中, 从而提高其发电效率。

关键词: 微通道; 两相流; 流型; 冷却技术

中图分类号: O359⁺.1 文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2016.07.001

引言

1959年美国著名物理学家Feynman预言微小系统将展现出广阔的发展空间^[1], 微型化定会成为科技发展的一个重要特征, 在科技领域将发挥非常重要的作用。1981年Tucherman和Pease首次提出微通道换热器的理念^[2], 其较大的比表面积、优良的传热传质性能受到了国内外学者的广泛关注, 而且这种技术为未来的散热指明了方向。20世纪90年代初, Manz和Widmer以微机电系统为基础正式提出微全分析系统^[3], 最大限度地把分析实验室的功能转移到便携的设备中, 集成到尺寸很小的组件上, 这一技术的最大优势在于可以将多种单元在微小的可控实验平台上灵活操作。2004年美国Business 2.0杂志将其列为改变未来的七种技术之一, 近年来, 多功能流体脉冲流动微过滤器、整流器等的出现更是引起了人们对微通道的广泛关注^[4]。

1 微尺度两相流

当通道尺寸减小到一定程度时, 就会出现尺寸

效应, 常规通道内一些起主导作用的力此时将变得非常微弱。不同学者基于当量直径, 将换热器进行了如下分类。Mehendale等依据通道直径将换热器分为^[5]: 常规换热器: $Dh \geq 6$ mm; 紧凑型换热器: $1 \text{ mm} \leq Dh \leq 6$ mm; 小型换热器: $100 \mu\text{m} \leq Dh \leq 1$ mm; 微型换热器: $1 \mu\text{m} \leq Dh \leq 100 \mu\text{m}$ 。Kandlikar等则认为^[6]: 小型换热器: $200 \mu\text{m} \leq Dh \leq 3$ mm; 微型换热器: $10 \mu\text{m} \leq Dh \leq 200 \mu\text{m}$ 。

微通道内多相流动是在微尺度下引入两种或者更多互不相容的流体, 与单相流动的根本区别在于体系中存在着被相界面分开的物质组分, 相界面的存在使得气泡或者液滴的流动变得不同寻常, 再者由于马兰戈尼效应的存在使得流动更加复杂^[7]; 早在1977年, Batchelor就提出“微水动力学”的概念^[8], 微通道内的流体流动虽然遵循一般流体力学的理论, 但也会出现不符合常规的现象; Pfahler等在微管道中进行了压力流实验^[9], 得到的流阻系数却与经典的理论预测值不相符; 而Burns在实验中发现了一个有趣的现象^[10], 煤油相竟然可以在水相下面稳定的流动。由此可见, 由于尺度的微小化($1 \mu\text{m} \sim 1$ mm), 微通道确实与常规通道中的一些现象存在着一定的差别。气液、液液两相流作为常见的多相流之一, 广泛存在于空调制冷系统、航天生命保障系统、化工以及喷墨打印等领域。常规通道(宏观)内的两相流动已取得了大量成果, 但是当管道大小降低到一定程度时, 重力在微通道(介观)中不在起主导作用, 表面张力以及惯性力将发挥重要优势, 这样势必会使微尺度下的两相流产生一些不同寻常的现象。

由于通道结构、形状以及流体工质物性的影响,

收稿日期: 2015-07-14; 修订日期: 2015-10-20

作者简介: 周云龙(1960-), 男, 吉林扶余人, 东北电力大学教授。

通讯作者: 孙振国(1989-), 男, 山西大同人, 东北电力大学硕士研究生。

各位学者对流型的认识尚未达到统一,表 1 列出了不同实验条件下的两相流型。总之,现有微通道内常见的流型有泡状流、弹状流、液环流以及环状流等等,在众多的微通道两相流型中,弹状流是一种尤为重要和应用广泛的流型。在弹状流中,气泡在径向几乎填满整个管道,气泡之间由液弹隔开,液弹通过气泡周围的薄膜相互连接,这样大的相接触面积非常有利于传质传热的强化^[11];刘晓磊具体模拟了微通道内液液弹状流的内循环过程^[12],并指出液柱长度越短,受到搅拌的流体越少,液柱内流体的更新频

率也越快。微通道内弹状流内部的循环作用,使得该流型下气液间传质和传热性能都明显优于其它流型。此外,Chiu 等实验研究了微通道空隙率对换热的影响^[13],结果显示当空隙率为 53% ~ 75% 时,传热效果达到最佳状态;重庆大学相威就微流体燃料电池进行了深入研究^[14],在 500 μm × 192 μm 的矩形微通道壁面沉积催化剂,采用氮气和去离子水为工质,观测到泡状流、弹状流、平行流,其中出现弹状流时电池效率高于其他流型。

表 1 不同实验条件下微通道内气液两相流型

Tab. 1 Gas-liquid two-phase flow patterns inside a microchannel under various test conditions

作者	实验段	工质	流型
Sur 等 ^[15]	圆形 玻璃 Dc: 100、180、324 μm	空气、水	泡状流、弹状流、液环流、环状流
Saisorn 等 ^[16]	圆形 玻璃 Dc: 0.53 mm	空气、水	弹状流、喉形环状流、搅拌流、环状小溪流
Tibirica 等 ^[17]	圆形 玻璃 Dc: 400 μm	R134a、R245fa	泡状流、弹状流、环状流、干涸流
Zhang 等 ^[18]	方形 PMMA 500 μm × 500 μm	空气、水	泡状流、弹状流、环状流 偶尔出现分层流
Weinmueller 等 ^[19]	方形 硅 200 μm × 200 μm	CO ₂ 、甲醇溶液	泡状流、楔形流、弹状流、环状流
Choi 等 ^[20]	矩形 玻璃 亲水通道 617 μm × 430 μm 疏水通道 608 μm × 410 μm	氮气、水	亲水: 泡状流、拉长的泡状流、液环流 疏水: 分层流
Donaldso 等 ^[21]	矩形 PMMA Dh: 1.056 3 mm	空气、水	泡状流、塞状流、不稳定塞状流、弹状流
Suwankamnerd 等 ^[22]	矩形 铜 绝热 400 μm × 200 μm	空气、水	分段流、喉形环状流、喉形环状/单液流、环状流
Choi 等 ^[23]	矩形 玻璃 510 μm × 470 μm 608 μm × 410 μm 501 μm × 237 μm 503 μm × 85 μm	空气、水	泡状流、过渡流、液环流 随着深宽比的增加,泡状流成为主导流型

随着发热量的不断增加,传统的空冷方案已经无法满足散热要求,取而代之的将是换热效率更高的冷却方案。目前,比较先进的冷却技术有喷流冷却以及微通道冷却。前者是利用从喷管喷出的高速冷却液来对器件进行有效散热,但是喷管的流体速度往往分布不均匀,并且喷管中心处速度较高。当流体完全脱离喷管,在紧靠壁面的地方形成驻点,就会从系统侧面喷出。此外,由于制作工艺的要求,

喷管直径以及喷管数目也相应受到限制。而微通道的尺寸可以从数微米到数毫米,制作的材料包括金属(硅、铜、铝及合金)以及非金属(PMMA、PDMS),冷却介质除水之外还有液氮、乙醇、硅油、氟利昂等液体,截面也可以做成各种形状,具有较宽的应用范围。由于通道形状、结构以及流体种类的差异,微尺度下的两相流存在着不同的流态,这就必然使传热特性有所差别。

上海交通大学魏珍研究了不同浓度的乙醇溶液(体积分数分别为 0、10%、40%、80%)对硅基矩形微通道流动特性以及传热特性的影响^[24]。结果表明在同一管道中流动阻力变化非常微弱,而换热特性则随浓度发生了较大的变化;中科院广州能源所甘云华等通过对水力直径为 155.3 μm 的微通道内一个完整周期内可视化照片的分析^[25-27]得到了四种不同的流型:液塞/长气泡流、含汽弹的液塞流、含气泡的液塞流和瞬变环状流,并且以水和甲醇为工质,在三角形硅基微通道中进行了层流与换热的实验研究,结果显示以水为工质时壁温较低,水相对甲醇来说具有较好的换热性能,这是由于水的比热容较大的缘故。针对压差和流速之间的关系,可将传热机制分为 4 个区域:单液区、壁面沸腾区、主流沸腾区及过热蒸汽区;另外, Xie 等在铜基微通道中将 FC-72 和乙醇水溶液的换热特性进行了对比性调查^[28],结果发现后者的换热性能明显优于前者。

2 微冷却技术的有效性

微通道与常规通道相比在一些应用中可以发挥独特的优势,这使其有望成为冷却方案中最好的选择之一。于惠对常规流道和微通道结构的冷板散热性能进行了模拟^[29],发现后者的散热能力将近提高了一倍,这说明微通道冷板具有很好的散热效果;西安电子科技大学宋正梅对直入直出型、直角 S 型和圆角 S 型三种形式的 0.5 mm \times 3 mm 的 12 条矩形微通道在相控阵天线上的应用进行了仿真^[30],结果发现 S 型通道比直入直出型的可使单位质量的流体流过 T/R 组件的时间变长,而且单位时间内流经 T/R 组件下方的流体增多,这样会带走更多的热量,而圆角 S 型通道组件上的最大温差还比直角 S 型的大 1 $^{\circ}\text{C}$,进一步证明了微通道冷却能力与通道的形状有着一定的关系。Zheng 等对 LSMC(气液分离式)、PFMC(并行流动式)两种微通道冷凝器的性能进行了比较^[31],发现前者的冷却能力以及能效比 EER 分别可提高 5.18%、3.73%,并指出设计良好的冷凝器不仅可以使结构更加紧凑,同时也能满足节能的需求,从而降低成本。

此外,微通道在 LED 领域也有着广泛的应用。大功率 LED 作为新一代光源,具有寿命长、响应速

度快(纳秒级)、绿色环保等优点,必将取代传统的白炽灯而成为新一代光源,但是现在制约其发展的一个关键问题就是输入功率的 80% 以上没有得到有效利用,绝大多数转化为热能^[32],这样势必会使其结温过高从而影响到效率的提高;袁柳林等建立了 LED 阵列封装模型^[33],对比了常规通道以及交错微通道的冷却性能,发现前者温差为 3.90 $^{\circ}\text{C}$,而后者最大温差仅为 1.86 $^{\circ}\text{C}$,有效降低了各芯片之间温度的不均匀性;Hams 等对微通道不同深宽比下的热阻进行了测量^[34],认为通道越深传热热阻越小;李如春则从理论角度分析了微通道内影响热阻的因素^[35],并指出当微通道材质、尺寸以及冷却液种类确定后,即可确定通道的最优结构参数,从而使系统换热性能达到最佳;Khaled 等则设计了可旋转分离板的微通道^[36];Adewumi 等基于硅基材料对含有微针翅片结构的微通道进行了三维模拟^[37],为使峰值温度最低,将通道水力直径以及深宽比进一步优化;Yang 等设计了一种多层歧管微通道冷却系统如图 1 所示^[38],有效降低了电池表面的温度,经热图像分析表明该结构电池表面温度差异低于 6.3 $^{\circ}\text{C}$ 。以上学者从通道的结构、形状分别就微通道冷却能力展开了研究,也有的学者从通道材质以及实验工质的角度对此进行了分析;Szczukiewica 等采用 R245fa、R236fa 以及一种中压新冷媒 R1234ze^[39],在并行有 67 根通道(正方形截面 100 μm \times 100 μm)的实验段内详细研究了不同流型对换热特性的影响,结果显示泡状流时的传热系数随着干度的增加逐渐减小,然而环状流时传热系数却随干度在增加,并且在干度一定的情况下,壁面传热系数随质量流速也在增加;Joshi 等采用玻璃、泰德拉不同材质对 PV 模块效率进行了对比分析^[40],结果显示前者整体性能要优于后者。

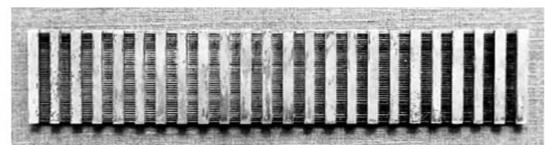


图 1 Yang 等的多层歧管微通道实物图

Fig. 1 Chart showing the real-object of the multi-layer manifold microchannels investigated by Yang and other researchers

3 太阳能电池的冷却

工业生产的硅太阳能电池光电转换效率大约在 13% ~ 15% 左右,影响光电池输出功率的因素主要是光照和温度。有关太阳能电池的冷却,一些学者通过不同的途径使其转化率得到了一些改善;江守利等从光照角度着手^[41],采用二次反射聚光分频系统,将太阳光进行分频利用,减少了其它频率的光波对电池表面温升所带来的影响,结果证明该系统下的光电转换效率可达到 26.7%,采用分频技术后电池表面温度降低了 13 °C;中国电子科技集团第十八研究所曾在神州八号载人飞船上采用了新型的砷化镓电池模块,将模块组合后的光电转换效率由之前的 14.8% 提高到 27.5%;新加坡国立大学 Teo 等人开发了一套太阳电池组件冷却系统^[42],实验中采用了 4 块 55 W 多晶硅太阳能电池组件,并在背板下方依附有空气管阵列,当没有受到鼓风机冷却时,单位面积太阳辐射量每增加 100 W,模块温度就会上升 1.8 °C,而当对组件进行有效冷却时,模块温度最大只上升了 1.4 °C,此时光电转化效率可增加 6% 左右;Peyvand 等用空气和水在当量直径为 0.667 mm 的微通道中进行了混合有微槽道的太阳电池两相流换热实验^[43],实验中液相表观速度控制在 0.04 m/s,气相流速在 0 ~ 3.27 m/s 之间,结果发现在弹状流以及过渡性的弹状/环状流中太阳板的换热特性达到最优;Rahimi 等则在太阳板下方布置风力驱动式通风机来冷却光伏电池^[44],通过引流叶片让空气通过时带走热量,结果发现电池板效率得到了大幅度提升,最终达到 46.54%,但风机同时也消耗了大量的功率。因此,如何更加有效地提高太阳板电池的效率成为各国学者研究的重要方向。

从现有文献的报道来看,传统的一些冷却方式,如风冷和水冷都存在着一些缺点。前者是以自然对流或强制对流的方式将冷空气通过电池背板,从而将热量带走。水冷方式虽然较空气的对流换热系数有所提高,但冷却效果也比较有限,而且也会增加泵与风机的能耗。近来,液体射流冲击冷却以及微通道冷却技术逐渐引起了人们的重视。所谓液体射流冲击冷却,是从微细孔中向被冷却物体表面喷射流体,但物体表面温度存在着较大的梯度,在喷射中心区域,换热系数较大,而在距离中心区域较远的地

方,换热系数相对较小,并且相邻的射流会产生一定的干扰。而微通道冷却技术利用 MEMS 技术加工得到的通道尺寸都在微米量级,可大大增加被冷却面与流体的接触面积,不会产生明显的温度不均匀现象。此外,微尺度下由于重力的作用相对较弱,而表面张力的优势比较明显,微通道中的流型与传热特性都不同于常规通道,随着通道直径的减小,冷却流动中流动的不稳定现象变得更加剧烈,间断的弹状流就会成为主流型,这非常有利于传热的强化。

4 结 语

具有微通道结构的散热器性能明显优于普通结构形式的散热器,其散热性能与通道的宽度、高度以及冷却液体的种类、流速等多种因素有着密切的关系。但是由于现有微通道加工工艺的限制,截面形状以矩形为常见,很少涉及到其他形状,在开展微尺度两相流的同时,如能对不同截面的流动特性进行研究,也是非常好的探索思路。另外,有关微通道理论的研究目前多限于尺寸以及热阻的优化方面,并且大都以单相流体作为工质,很少有将多相流动应用到微通道领域中深入研究。有些组件,如太阳能电池,在实际中表面温度尚未能达到 100 °C,完全可以改变现有的研究思路,如果在 PV 电池或其它组件的生产过程中直接或间接在其背板键合微通道,那么无论从实用性还是经济性来说都是一种很好的方法。流型作为流体力学的重要研究内容,不同的流型有着不同的流动特性及传热特性,开展微通道内两相流型的研究对微通道冷却技术有着非常重要的意义。

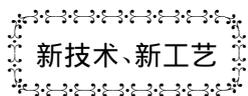
参考文献:

- [1] Feynman R P. There is plenty of room at the bottom[J]. Journal of MEMS, 1992, 1: 60 - 66.
- [2] Tuckerman D B, Pease R F W. High performance heat sinking for VLSI[J]. IEEE Electron Device Letters, 1981, 2(5): 126 - 129.
- [3] Manz A, Graber N, Widmer H M. Miniaturized total chemical analysis systems: A novel concept for chemical sensing[J]. Sens. Actuators B, Chem, 1990, 1: 244 - 248.
- [4] 李战华. 微流控芯片中的流体流动[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 48 - 49.
LI Zhan-hua. Fluid flow in a microfluidic chip[M]. Beijing: Science Press, 2012: 48 - 49.
- [5] Mehendale S S, Jacobi A M, Ahah R K. Fluid flow and heat trans-

- fer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design [J]. *Appl. Mech. Rev.* 2000 53: 175 - 193.
- [6] Kandlikar S G ,Grande W J. Evolution of microchannel flow passages-thermohydraulic performance and fabrication technology. *Heat Transfer Eng.* 2003 24: 3 - 17.
- [7] Nota F ,Savino R ,Fico S. The interaction between drops and solidification front in presence of Marangoni effect [J]. *Acta Astronautica* 2006 59: 20 - 31.
- [8] Batchelor G K. *Developments in micro Hydro-dynamics* [M]. New York: North Holland Publish Company ,1977.
- [9] Pfahler J ,Harley J ,Bau H ,et al. Gas and liquid flow in small channels [J]. *ASME DSC* ,1991 32: 49 - 60.
- [10] Ehrfeld E. *Microreaction technology ,proceedings of the 1st international conference on microreaction technology* [M]. Berlin: Springer-Verlag ,1997.
- [11] Guptar R ,Fletcher D F ,Haynes B S. CFD modelling of flow and heat transfer in the Taylor flow regime [J]. *Chemical Engineering Science* 2010 65(6) : 2094 - 2107.
- [12] 刘晓磊. 微通道内液液弹状流实验与模拟研究 [D]. 天津大学 2012.
LIU Xiao-lei. Experimental and simulation study of a liquid-liquid slug flow inside a microchannel [D]. Tianjin: Tianjin University , 2012.
- [13] Chiu H C ,Jang J H ,Yeh H W ,et al. The heat transfer characteristics of liquid cooling heat sink containing microchannels [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* ,2011 54(1) : 34 - 42.
- [14] 相 威. 非圆截面微通道内气液两相流动特性研究 [D]. 重庆大学 2013.
XIANG Wei. Study of gas-liquid two-phase flow in microchannel with non-circular cross-section shape [D]. Chongqing: Chongqing University 2013.
- [15] Sur A ,Liu D. Adiabatic air-water two-phase low in circular micro-channels [J]. *International Journal of Thermal Science* 2012 53: 18 - 34.
- [16] Saisorn S ,Wongwises S. Flow pattern ,void fraction and pressure drop of two-phase air-water flow in a horizontal circular micro-channel [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2008 32: 748 - 760.
- [17] Tibirica C B ,Ribatski G. Flow patterns and bubble departure fundamental characteristics during flow boiling in microscale channels [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2014 59: 152 - 165.
- [18] Zhang Lexiang ,Peng Dongyue ,Lyu Wenjun ,et al. Uniformity of gas and liquid two phases flowing through two microchannels in parallel microchannels in parallel [J]. *Chemical Engineering Journal* 2015 263: 452 - 460.
- [19] Weinmueller C ,Hotz N ,Mueller A ,Poulikakos D. On two-phase flow patterns and transition criteria in aqueous methanol and CO₂ mixtures in adiabatic rectangular microchannels [J]. *International Journal of Multiphase Flow* 2009 35(8) : 760 - 772.
- [20] Choi C ,Yu D I ,Kim M. Surface wettability effect on flow pattern and pressure drop in adiabatic two-phase flows in rectangular micro-channels with T-junction mixer [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2011 35: 1086 - 1096.
- [21] Donaldson A A ,Kirpalani D M ,Macchi A. Curvature induced flow pattern transitions in serpentine minichannels [J]. *International Journal of Multiphase Flow* 2011 37: 429 - 439.
- [22] Suwankamnerd P ,Wongwises S. An experimental study of two-phase air-water flow and heat transfer characteristics of segmented flow in a microchannel [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science* 2015 62: 29 - 39.
- [23] Choi C W ,Yu D I ,Kim M H. Adiabatic two-phase flow in rectangular microchannels with different aspect ratios: Part I-Flow pattern ,pressure drop and void fraction [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2011 54: 616 - 624.
- [24] 魏 珍 ,吴慧英 ,吴信宇. 水/乙醇混合工质在硅基微通道中的流动与换热 [J]. *化工学报* 2008 59(11) : 2706 - 2712.
WEI Zhen ,WU Hui-ying ,WU Xin-yu. Flow and heat exchange of water/ethanol hybrid working medium in a silicon-base micro-channel [J]. *Journal of Chemical Engineering* ,2008 59(11) : 2706 - 2712.
- [25] 甘云华 ,徐进良. 硅基微通道中周期性沸腾的光学可视化 [J]. *化工学报* 2007 58(7) : 1641 - 1647.
GAN Yun-hua ,XU Jin-liang. Optic visualization of the periodical boiling in a silicon-base microchannel [J]. *Journal of Chemical Engineering* 2007 58(7) : 1641 - 1647.
- [26] 甘云华 ,徐进良. 水和甲醇在硅基微通道中换热特性的实验研究 [J]. *自然科学进展* 2005 15(12) : 1498 - 1503.
GAN Yun-hua ,XU Jin-liang. Experimental study of the heat exchange characteristics of water and methanol in a silicon-base microchannel [J]. *Progress in Natural Science* 2005 15(12) : 1498 - 1503.
- [27] 甘云华 ,徐进良 ,周继军 ,等. 微尺度相变传热的关键问题 [J]. *力学进展* 2004 34(3) : 399 - 407.
GAN Yun-hua ,XU Jin-liang ,ZHOU Ji-jun ,et al. Key problems existing in the microscale phase change heat transfer [J]. *Advances in Mechanics* 2004 34(3) : 399 - 407.
- [28] Xie Y Q ,Yu J Z ,Zhao Z H. Experimental investigation of flow and heat transfer for the ethanol-water solution and FC-72 in rectangular microchannels [J]. *Heat Mass Transfer* ,2005 41: 695 - 702.
- [29] 于 惠. 基于微通道结构的间接液冷散热技术的研究 [D]. 哈尔滨工业大学 2013.
YU Hui. Research of the indirect liquid cooling technology based on the structure of a microchannel [D]. Harbin Institute of Technology 2013.
- [30] 宋正梅. 有源相控阵列天线微通道冷却技术研究 [D]. 西安

- 电子科技大学 2013.
SONG Zheng-mei. Study of the microchannel cooling technology for active phase-controlled array antennas [D]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology 2013.
- [31] Zheng Wenxian ,Chen Ying ,Hua Nan ,et al. Comparative performance of an automotive air conditioning system using micro-channel condensers with and without liquid-vapor separation [J]. Energy Procedia 2014 61: 1646 – 1649.
- [32] Petroski J. Thermal challenges facing new generation light emitting diodes (LEDs) for lighting applications [J]. Proc. SPIE , 2002 4776: 215 – 222.
- [33] 袁柳林,刘胜,陈明祥,等. 基于微通道致冷的大功率 LED 阵列封装热分析[J]. 半导体光电 2006 27(6): 712 – 716.
YUAN Liu-lin ,LIU Sheng ,CHEN Ming-xiang ,et al. Thermal analysis of a high power LED array package refrigerated by using microchannels [J]. Semiconductor Optoelectronics 2006 27(6): 712 – 716.
- [34] Hams T M ,Kazmierczak M J ,Gemer F M. Developing convective heat transfer in EEP rectangular microchannels [J]. International Journal of Heat Fluid Flow ,1999 20 (2): 149 – 157.
- [35] 李如春. 基于微通道散热的大功率 LED 阵列的热阻研究 [J]. 半导体光电 2010 31 (4): 518 – 525.
LI Ru-chun. Research of the thermal resistance of a high-power LED array based on the heat dispersion through microchannels [J]. Semiconductor Optoelectronics 2010 31(4): 518 – 525.
- [36] Khaled A R A ,Vafai K. Cooling augmentation using microchannels with rotatable separating plates [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2011 54: 3732 – 3739.
- [37] Adewumi O O ,Ochende T B ,Meyer J P. Constructal design of combined micro-channel and micro pin fins for electronic cooling [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2013 66: 315 – 323.
- [38] Yang Kaijun ,Zuo Chuncheng. A novel multi-layer manifold microchannel cooling system for concentrating photovoltaic cells [J]. Energy Conversion and Management 2015 89: 214 – 221.
- [39] Szczukiewica S ,Borhani Navid ,Thome J R. Fine-resolution two-phase flow heat transfer coefficient measurements of refrigerants in multi-microchannel evaporators [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer 2013 67: 913 – 929.
- [40] Joshi S ,Tiwari A ,Tiwari GN ,et al. Performance evaluation of a hybrid photovoltaic thermal system [J]. International Journal of Thermal Science 2009 48(1): 154 – 164.
- [41] 江守利,陈则韶,胡芑,等. 半抛物槽式聚光分频光伏系统性能分析 [J]. 工程热物理学报 2009 3(3): 365 – 369.
JIANG Shou-li ,CHEN Ze-shao ,HU Peng ,et al. Analysis of the performance of a semi-parabolic trough type concentrating frequency-divided PV system [J]. Journal of Engineering Thermophysics 2009 3(3): 365 – 369.
- [42] Teo H G ,Lee P S ,Hawladar M N A. An active cooling system for photovoltaic modules [J]. Applied Energy 2012 90: 309 – 315.
- [43] Peyvand V ,Rahimi M ,Karimi E ,et al. Application of two-phase for cooling of hybrid microchannel PV cells: a comparative study [J]. Energy Conversion and Management 2013 69: 122 – 130.
- [44] Rahimi M ,Peyvand V ,Parsamoghadam A. Using a wind-driven ventilator to enhance a photo-voltaic cell power generation [J]. Energy and Buildings 2014 73: 115 – 119.

(刘瑶 编辑)



新技术、新工艺

蒸燃联合循环技术规范

据《Gas Turbine World》2014 ~ 2015 年度手册发布了该年度蒸燃联合循环技术规范。

介绍了世界各国各燃气轮机制造公司生产的各型蒸燃联合循环装置,叙述了各型蒸燃装置的设计性能规范,包括首台可供年份、装备总(毛)输出功率、装置净输出功率、净热耗率、装置净效率、冷凝器压力、燃气轮机功率、汽轮机功率、燃气轮机数量和型号。

在注解一栏中还对这些蒸燃装置的细节作了补充说明,包括余热锅炉的类型(双压、双压不再热、三压再热、单压补燃到 704 ℃、双压补燃到 542 ℃、双压不补燃)、再热、不再热、干式低排放等。

(吉桂明 摘译)

基于两相流的微通道冷却技术研究进展及展望 = **Research Progress and Prospects of Micro-channel Cooling Technology Based on Two-phase Flow** [刊, 汉] ZHOU Yun-long, SUN Zhen-guo (School of Energy and Power Engineering, Northeast Dianli University, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(7). -1~6

With the development of the science and technology, a relatively high temperature may gradually limit the power output of a large power component and the studies currently focus on the dimensions of the channels and structural optimization etc. In addition, the working media are relatively singular and the most majority of the phase change emerge in the form of boiling. The study of the cooling in micro-channels relating to non-phase change two-phase flows is relatively less. The flow patterns serve as the basis for probing into the behavior of a two-phase flow and may produce a direct influence on the heat and mass transfer characteristics. Upon the completion of a summing-up of the research results of researchers both at home and abroad, the authors have viewed the prospects of the micro-channel cooling technology in the actual applications of the PV batteries. One may attempt to apply the multi-phase flows in the cooling of the solar power cells, therefore enhancing its power generation efficiency. **Key words:** micro-channel, two-phase flow, flow pattern, cooling technology

池沸腾临界热流密度关系式分析研究 = **Analysis and Study of the Pool Boiling Critical Heat Flux Density Correlation Formula** [刊, 汉] DONG An-qi, FANG Xian-de (College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, China, Post Code: 210016), HUANG Yong-kuan (Hongdu No. 650 Research Institute, China Aviation Industry Corporation, Nanchang, China, Post Code: 330024) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2016, 31(7). -7~14

With respect to the calculation of the pool boiling critical heat flux density, a great many of correlation formulae were proposed. In the design of engineering projects, it is necessary to be aware of the adaptability of these correlation formulae and to analyze the currently-available calculation methods in the study of a new calculation model. The test data and the number of the correlation formulae involved in the evaluation and analysis of the currently available formulae are limited, leading to a great difference between the evaluation results. A total of 468 groups of data were collected from 27 literatures and used to compare the accuracy and applicable range of the commonly-used 20 critical heat flux density calculation formulae and the formulae in comparatively good agreement with the test data were sifted out. It has been found that El-Genk-Guo formula, which is the best of all, has an average absolute error of 26.2%. To this end, it is necessary to find out a more accurate formula. Moreover, the factors influencing the accuracy of the formulae were analyzed, thus offering reference for proper design of relevant equipment items. **Key words:** pool boiling, critical heat flux density, heat transfer, correlation formula

直接接触式蒸汽发生器传热性能分析 = **Analysis of the Heat Transfer Performance of a Direct Contact Type Steam Generator** [刊, 汉] HUANG Jun-wei (College of Electromechanical Engineering, Yunnan Agricultur-