

# 气/汽-液相分离技术研究进展

邢峰<sup>1</sup>, 徐进良<sup>1,2\*</sup>, 谢剑<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学北京市新能源与可再生能源重点实验室, 北京 102206;

2. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

**摘要:**从相分离原理的角度出发,分别介绍了惯性力相分离、离心力相分离以及毛细力相分离技术。其中,惯性力相分离技术主要介绍 T 型管的应用,毛细力相分离技术分别介绍了毛细管、多孔膜以及金属丝网 3 种主要结构。同时简要评价了各相分离技术的优缺点及发展趋势。

**关键词:**相分离; T 型管; 毛细管; 多孔膜; 金属丝网

**中图分类号:** O359.1

**文献标志码:** A

**文章编号:** 0253-4320(2015)01-0036-04

## Research progress of gas/vapor-liquid phase separation technique

XING Feng<sup>1</sup>, XU Jin-liang<sup>1,2\*</sup>, XIE Jian<sup>1</sup>

(1. Beijing Key Laboratory of New and Renewable Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Phase separation techniques based on inertial force, centrifugal force, capillary force are introduced, respectively, from the prospective of principle of phase separation. The phase separation technique based on inertial force is described by mainly introducing the utilization of T-junction. Three main structures of phase separation technique based on capillary force, including capillaries, porous membrane and metal mesh, are reviewed. The merits and demerits of each phase separation technique and their development trends are briefly presented.

**Key words:** phase separation; T-junction; capillary; porous membrane; metal mesh

气/汽-液两相流广泛存在于电力、石油、化工、航天、电子、生物等领域。两相流与单向流相比传热系数及阻力更大,不稳定性增强,同时相分布具有随机性。这些特性往往会产生新的问题,如电站系统并联管或分叉管内流量分配不均使得部分管子传热恶化、电子冷却系统中发生流动沸腾时产生的蒸汽增大系统阻力、燃料电池中产生的副产物气体阻塞管路等。因此,有必要开展相分离技术来人为地调控气/汽-液两相流相分布达到优化目的。相分离技术早期广泛应用于大尺度管路中,随着电子冷却等技术的兴起,相分离技术逐渐向微尺度装置转变。本文中从相分离原理的角度分别介绍了惯性力相分离、离心力相分离、毛细力相分离的研究进展情况。

## 1 惯性力相分离

气液混合物在分叉管中流动,当流动方向改变时,由于气液密度、流量不同,即惯性力差别会发生流动分离,此类现象属于惯性力相分离。T 型管作为常用的两相流分离装置,属于特殊的直角分叉管,在工业中如石油开采、核能发电等领域广泛应用<sup>[1-2]</sup>。

下面以 T 型管为例介绍惯性力相分离特性。

T 型管早期主要应用于大管径气液两相系统中。肖全胜等<sup>[3]</sup>通过实验分析了内径 36 mm 的 T 型管质量流速分配比、入口含气量和入口质量流速等对相分离的影响。同时,将所得实验结果与已有的模型或关系式的计算结果进行了比较,并对这些模型进行了评价。

王来顺等<sup>[4]</sup>通过模拟计算水平主管内泡状流流经 T 型管支管时的分离情况,得到其支/主管分离比、相分布图、压力图和速度场图,并研究进口体积分数及气泡尺寸对相分离效应的影响。结果表明,泡状流在 T 型结构处的相分离现象显著,分离比随进口体积分数的增加而降低,对于特定管道尺寸存在一个使相分离效果最显著的气泡尺寸。

Azzi 等<sup>[5]</sup>实验研究了 1 mm 内径的 T 型管内气液两相流相分离特性。实验结果表明,支管内液体含量随着入口液体折算流速的增加而减小,随气体折算流速的增加而增大。通过对不同管径 T 型管数据的对比发现,1 mm 内径的 T 型管相分离特性与大尺度 T 型管差别不大。

收稿日期:2014-07-19

基金项目:国家重点基础研究发展计划(2011CB710703);国家自然科学基金国际合作项目(51210011)

作者简介:邢峰(1989-),男,硕士生;徐进良(1966-),男,博士,教授,长江学者,从事多相流传质传热、低品位能源利用等领域,通讯联系人,010-61772613, xjl@ncepu.edu.cn。

周云龙等<sup>[6]</sup>以氮气和水为工作流体,在  $100\ \mu\text{m} \times 800\ \mu\text{m}$  的矩形截面 T 型微通道内进行了气液两相流可视化实验,得到了流型图和流型转换界限。通过对比弹状流、环状流和分层流相分离实验结果,证明在 T 型微通道内气液两相流相分离特性受上游流型影响。上游流型为弹状流时,气体优先从侧支管流出;上游流型为环状流时,液体优先从侧支管流出;上游流型为分层流时,气体只从其中 1 条支管中流出。

Chen 等<sup>[7]</sup>实验研究了  $0.5\ \text{mm} \times 0.5\ \text{mm}$  方形截面微通道内分叉管支管角度 ( $30^\circ \sim 150^\circ$ ) 对气液两相流相分离的影响,结果表明,分离效率取决于入口两相流流型。对于弹状流,随着角度增加,支管内液体含量减少,对于环状流,由于二次流影响,角度为  $90^\circ$  时支管内液体量最多。同时,与大尺度分叉管相比,微通道分叉管内侧支管液体含量更多。

## 2 离心力相分离

气液两相流在旋转装置中由于受到离心力不同而分离的现象属于离心力相分离。

Ahn 等<sup>[8]</sup>设计了 2 种离心力气-液分离器如图 1 中(a)、(b)。图 1(a)中当气液混合物在  $10\ \text{mm} \times 5\ \text{mm}$  矩形截面的环形管路内流动时,气泡由于离心力作用会在环形管路内侧汇聚形成更大气泡,起到相分离的作用。图 1(b)属于旋风分离器,当气液混合物沿切线方向进入圆筒内,气泡会被卷入容器轴向方向形成的涡流内,起到相分离的作用。通过在微重力环境下的实验研究,验证了该分离器的可行性。Burke 等<sup>[9]</sup>针对气/油混合物相分离设计了一种类似于图 1(b)的离心力相分离器。

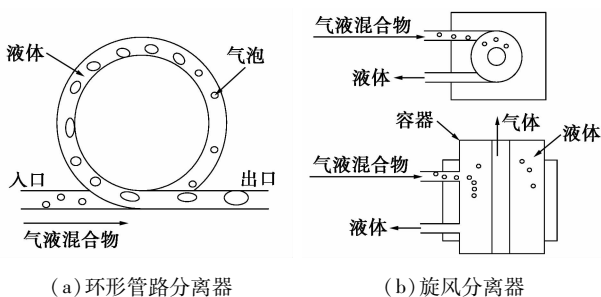


图 1 离心力相分离器

Willems 等<sup>[10]</sup>针对气井内高浓度的气相污染物如水蒸汽、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{S}$  等,利用重力、离心力及剪切力,使气体冷凝成薄液膜并从离心分离器中移除。通过模拟竖直放置的旋转相分离器内的过程,研究了液膜形成机制及影响因素。

## 3 毛细力相分离

微尺度换热器、反应器具有紧凑性、大比表面积、高热流等优点,在电子冷却、燃料电池、生物材料等领域广泛应用。而由于其尺寸特点,微尺度反应器内相分离主要依靠毛细力。

毛细力相分离的基本原理由 Young-Laplace 方程建立,当产生气液固三相时会产生毛细压差:

$$\Delta p_c = \sigma \left[ \left( \frac{1}{r_1} \right) + \left( \frac{1}{r_2} \right) \right] \quad (1)$$

式中,  $\sigma$  为表面张力;  $r_1$ 、 $r_2$  分别 2 个主曲率半径。

相应的主曲率半径为:

$$r_n = R_n / \cos\theta \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为接触角;  $R_n$  为具体部件中的圆管半径或其他形状截面的水力半径。

而接触角计算公式为:

$$\cos\theta = [(\sigma_{sg} - \sigma_{sl}) / \sigma_{lg}] \quad (3)$$

式中,  $\sigma_{sg}$ 、 $\sigma_{sl}$ 、 $\sigma_{lg}$  分别为气固、液固、气液两相比表面能。

对于憎水材料,接触角通常在  $90^\circ \sim 180^\circ$ , 则毛细压差为负值;相反,亲水材料由于接触角  $< 90^\circ$ , 毛细压差为正值。毛细力分离的原理为气液压差无法突破毛细结构产生的毛细压差,使得气液分别在各自通道内流动。

### 3.1 毛细管

Günther 等<sup>[11]</sup>研制一种基于毛细管系统的气-液相分离装置,该毛细管系统由 16 个内径为  $20\ \mu\text{m}$  的毛细管组成,可产生  $10 \sim 30\ \text{kPa}$  的毛细压差。当气液两相流通过主管道时,气体由于毛细作用无法进入湿润的毛细管,而液体则能充满毛细管,起到相分离的作用。

Roydhouse 等<sup>[12]</sup>设计一种微尺度毛细分离器如图 2 所示。在微通道系统主管道两侧垂直安装尺寸更小的毛细管束。通过对不同尺寸及形状(毛细管截面恒定或由宽变窄)的分离器的实验及模拟工作,研究了分离效率与入口流动条件(流量、流型等)的关系,以及实现气液完全分离时需要的外界控制条件如气液管道出口压差等。

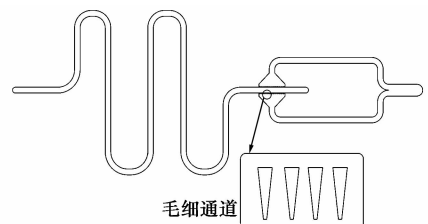


图 2 毛细管分离器

Cho 等<sup>[13]</sup>研究了微通道毛细管束的相分离及流量分配特性。其实验段主管内径为 19.4 mm, 主管两侧垂直连通由 15 个微通道并联而成的微通道管束, 每个微通道由 8 个水力直径 1.32 mm 的方通道并联构成。工质为 R-22 汽液混合物。通过实验研究了主管放置方向(水平或垂直)、来流进入主管的流动方向(平行、倾斜或垂直)以及两相流入口干度对流量分配及相分离特性的影响并得出结论: 主管水平放置以及来流方向与主管非平行时具有更好的流量分配及相分离特性。

### 3.2 多孔膜材料

Zhou 等<sup>[14]</sup>发明了一种针对流动沸腾的蒸汽溢出型微通道换热器, 换热器内的核心部件是一层多孔憎水膜材料, 由于毛细作用阻止水通过该多孔膜, 而使蒸汽通过并从特定通道排出, 起到分离蒸汽的作用。

在这种靠膜结构分离气液两相的换热器中, 膜上孔的尺寸、膜的厚度、渗透率、憎水性等因素至关重要, 既要保证液体泄露压力足够大(否则液体会通过膜), 又要使蒸汽通过膜时阻力很小。因此, 孔径最好是多尺度的, 在气液界面处用小孔阻止液体通过, 而整体用较大的孔使得蒸汽通过。David 等<sup>[15]</sup>通过分析, 在铜微通道换热器内加装孔径为 220 nm 的聚四氟乙烯憎水膜如图 3。膜孔隙率为 0.5~0.8, 厚度为  $(65 \pm 5) \mu\text{m}$ , 水在室温下的静态接触角为  $123^\circ$ 。通过实验及模拟验证, 这种加装多孔膜后的换热器与传统的换热器相比, 阻力可降低 60%, 相应的饱和温度降低  $4.4^\circ\text{C}$ , 同时不稳定性大大降低。

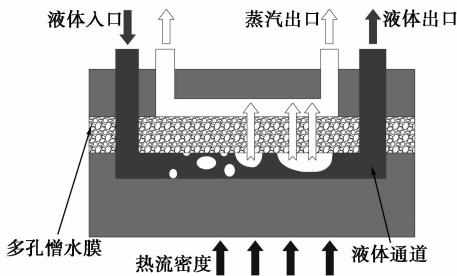


图 3 多孔膜微通道相分离器

在直接甲醇燃料电池(DMFC)的电化学反应中, 阳极持续产生二氧化碳副产物, 形成气泡, 阻塞管路。Meng 等<sup>[16]</sup>使用聚丙烯纳米憎水膜, 成功将二氧化碳气体与甲醇、水分离。作者对这一过程建立了一维模型并用实验验证。

Kraus 等<sup>[17]</sup>在 DMFC 中采用亲水材料和憎水材

料相结合、毫米级通道和微米级通道相结合的方法, 构造毛细压力梯度, 进行气-液相分离, 并通过实验探究了换热器放置方向、系统及环境温度、系统压力、气液比例、环境湿度对分离效率的影响。Hsieh 等<sup>[18]</sup>通过在 DMFC 中构造毛细孔并在孔上覆盖亲水、憎水聚合物材料进行相分离, 并着重介绍了此类装置的加工过程及工艺标准。

Salakij 等<sup>[19]</sup>采用树形分支网状微通道结构和膜结构相结合的方式, 对流动沸腾过程中产生的蒸汽进行相分离, 通过建立一维模型总结出减阻并强化传热的最优运行条件。

Xu 等<sup>[20]</sup>通过实验对这种膜结构的完全相分离提出 4 个公式化准则: 气泡长度须大于通道当量直径; 气塞在膜上有足够长的滞留时间以保证所有气体通过; 气塞速度需要低于某个临界值, 否则气体和膜之间会形成稳定液膜阻止气体通过; 膜两端压差须低于拉普拉斯毛细压差防止水泄漏通过膜。

### 3.3 金属丝网

毛细管、多孔膜等结构通常应用于微换热器、微反应器微尺度部件, 随着工业的需求, 需要在在大尺度部件内进行毛细力相分离, 而金属丝网部件满足了这一要求。

Conrath 等<sup>[21]</sup>在内径 34 mm 的垂直管内垂直于流动方向水平插入一丝网, 该丝网为不锈钢斜纹编织网, 型号为 DTW200 × 1400, 经线丝径和纬线丝径分别为 70、40  $\mu\text{m}$ 。管内工质为空气-水, 垂直上升流动。当空气遇到丝网时由于毛细作用会在丝网下滞留, 形成气泡。作者通过实验及模拟探究了气泡穿透丝网的静态、动态临界条件以及气泡形状、大小、滞留时间、在丝网的覆盖面积等影响因素。

随后, Conrath 等<sup>[22]</sup>提出一种新的相分离手段: 在有水流动的管内平行放置 2 个相距一定距离的金属丝网, 两丝网边缘用毛细芯材料连接, 当管道内存在气泡时, 由于毛细作用, 气泡会存在于两丝网之间形成气塞阻碍液体通过, 该技术有望在航天设备中液体推进剂的安全阀上使用。

Chen 等<sup>[23-24]</sup>针对丝网的气液分离特性, 发明了分液式传热管如图 4 所示。在空气-水两相流可视化实验中, 通过在水平管内同心插入一丝网表面构成的入口封死的空心圆柱状结构, 将流动截面分成中心区和环隙区, 达到相分离目的。实验结果表明, 对于分层流, 当液位低于一定高度时, 液体由于“毛细泵”效应可以被全部捕获到丝网内, 环隙内全部为气体, 其分离率可达到 100%。对于塞状流, 本

来在管子中间的气塞由于毛细压力作用,全部被挤压成马鞍状在环隙区内流动,而丝网内部全部为液体。

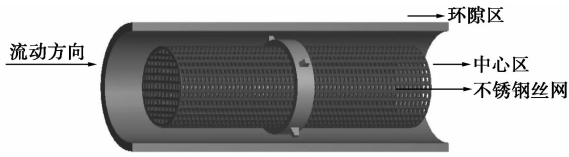


图4 丝网管相分离结构

Chen等<sup>[25]</sup>又将这种丝网管相分离概念应用于垂直管中。实验结果表明,对于弹状流,气弹无法进入丝网而在环隙内流动。同时,当气弹长度达到一定值时,气弹头部破裂,小气泡进入丝网形成脉动流,这种现象有望应用于强化换热领域。

Xie等<sup>[26]</sup>基于上述相分离概念,在内径14.81 mm的R123冷凝管内插入丝网管,该丝网管由2层丝网构成,外层丝网为200目,起毛细作用,内层丝网80目,起支撑作用。实验结果表明,对于分层流,大部分液体被捕获进丝网管内,对于环状流,蒸汽内夹带的液体会被丝网表面捕获。测量结果表明,与未进行相分离的光滑管相比,其冷凝传热系数最大可强化2倍以上。

陈宏霞等<sup>[27]</sup>基于金属丝网相分离概念,发明了外分液式传热管。在传热管外加装并联支管,主管与支管之间用丝网间隔,使得气体由于毛细压力的作用无法进入支管,支管内全部为液体。对于间歇流流型,通过三级相分离可以使主管路内气相比例大大增加,并使流型发生转变,间歇流向分层流过渡,该分离结构有望应用于传热强化领域。

## 4 结论及展望

气/汽-液相分离技术按分离原理主要分为惯性力分离、离心力分离、毛细力分离。T型管通过惯性力分离气液两相,其相分离效率受入口流体条件影响很大,且分离效率往往不高,只能部分分离。离心力相分离器如旋风分离器等分离效率较高,主要应用于较大尺度管路内。毛细管及多孔膜等毛细分离结构主要应用于微尺度系统内,其分离效率往往优于大尺度系统。而金属丝网则将毛细分离技术拓展到大尺度系统上,并在强化传热领域引起关注。

目前的相分离主要以空气-水为工质,由于工业的需求,应更多关注有机工质等。同时,单一分离技术有其局限性,未来的发展趋势应该是将不同分离技术相结合,形成复合相分离技术。

## 参考文献

- [1] 杨利民,赵振莹,赵立立. T形管分离两相流技术研究进展[J]. 化工进展,2009,28(s1):478-482.
- [2] 周云龙,刘博,李书芳. T型通道内气液两相流相分离研究进展[J]. 现代化工,2013,32(12):104-107.
- [3] 肖全胜,朱瑞安. 水平T型管中气水两相流体的分配特性的研究[J]. 核动力工程,1993,14(5):423-427.
- [4] 王来顺,刘丽芳,田文喜,等. T型管内泡状流相分离特性研究[J]. 核动力工程,2014,35(2):53-57.
- [5] Azzi A, Al-Attiyah A, Qi L, et al. Gas-liquid two-phase flow division at a micro-T-junction[J]. Chemical Engineering Science,2010,65(13):3986-3993.
- [6] 周云龙,刘博,刘袖,等. T型微通道内两相流流型及相分离特性[J]. 化学反应工程与工艺,2012,(4):300-305.
- [7] Chen J, Wang S, Ke H, et al. Gas-liquid two-phase flow splitting at microchannel junctions with different branch angles[J]. Chemical Engineering Science,2013,104:881-890.
- [8] Ahn H, Tanaka K, Tsuge H, et al. Centrifugal gas-liquid separation under low gravity conditions[J]. Separation and Purification Technology,2000,19(1):121-129.
- [9] Burke K A, Christol P E, Currie A, et al. Centrifugal gas/liquid separators:US,7435290[P]. 2008-10-14.
- [10] Willems G P, van Esch B P M, Brouwers J J H, et al. Creeping film model for condensed centrifugal separation processes[J]. Chemical Engineering Science,2008,63(13):3358-3365.
- [11] Günther A, Jensen K F. Multiphase microfluidics: From flow characteristics to chemical and materials synthesis[J]. Lab on a Chip, 2006,6(12):1487-1503.
- [12] Roydhouse M D, Pradas M, Al-Rifai N, et al. Operating ranges of gas-liquid capillary microseparators: Experiments and theory[J]. Chemical Engineering Science,2014,114:30-39.
- [13] Cho H, Cho K, Kim Y S. Mass flowrate distribution and phase separation of R-22 in multi-microchannel tubes under adiabatic condition[C]//ASME 2003 1st International Conference on Microchannels and Minichannels. American Society of Mechanical Engineers, 2003:527-533.
- [14] Zhou P, Goodson K, Santiago J. Vapor escape microchannel heat exchanger:US,699415107[P]. 2006-02-07.
- [15] David M P, Miler J, Steinbrenner J E, et al. Hydraulic and thermal characteristics of a vapor venting two-phase microchannel heat exchanger[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2011,54(25):5504-5516.
- [16] Meng D D, Cubaud T, Ho C M, et al. A methanol-tolerant gas-venting microchannel for a microdirect methanol fuel cell[J]. Microelectromechanical Systems, Journal of,2007,16(6):1403-1410.
- [17] Kraus M, Krewer U. Experimental analysis of the separation efficiency of an orientation independent gas/liquid membrane separator[J]. Separation and Purification Technology,2011,81(3):347-356.

产业化。张春光等<sup>[2]</sup>建议完善并制定我国的废油再生加工法规,切实把立足点转移到节约能源和环境保护上来,应借鉴欧洲尤其是意大利的做法,专门组织废油的收集、分类和再生,使我国废油再生行业的发展走向正轨。

废润滑油的回收与利用在国外一些国家已经受到足够的重视,并考虑了废润滑油收益成本比和环境的影响。在我国需要制定完善的法律、法规以及相应的引导政策。

## 2 废润滑油再生成燃油的研究

一些废润滑油是不可能再生成润滑油的,只能再生成为液态燃料。如混有残渣燃料油的废油,即使通过良好的精制,所制取的再生油凝点仍然会不达标。许多废润滑油中含有轻质燃料油,如废内燃机油中含有少量轻柴油及重汽油,机械厂的洗油中含有大量的轻柴油或煤油,洗油罐的洗油中含有大量轻柴油,所以在蒸馏中产生轻柴油、汽油馏分,这类废润滑油适合再生成燃料。而且,将废润滑油再生成燃油,在经济上也有相当大的优势,成为废润滑油的一个主要去向。高温分解与催化裂化是废润滑油再生成燃油的2种主要技术。国内外学者、研究人员对废润滑油再生燃油进行了一系列研究。

Seung-Soo等<sup>[9]</sup>采用热重分析的方法研究车用废润滑油在间歇釜式搅拌反应器的非等温裂解特性。研究表明,裂解产物C原子分布: $C_5 \sim C_{11}$  (10.98% ~ 16.83%),  $C_{12} \sim C_{25}$  (42.95% ~ 55.85%),  $> C_{25}$  (27.32% ~ 46.07%),废润滑油的主要分解温度范围为400 ~ 460℃,在转化率为11% ~ 96%时,活化能大小为281.78 ~ 447.66 kJ/mol,反应级数为

1.35。Seung-Ho等<sup>[10]</sup>还研究了船用废润滑油和废捕鱼绳索的裂解动力学特性,得到了裂解温度范围和活化能参数等。研究表明,裂解的碳氢化合物的碳原子数分别在24以下和21以下。Fuentes等<sup>[11]</sup>采用热重分析方法研究在不同的氮气/氧气的比例(4:1和9:1)、不同的质量(2.5、5 mg)和不同的升温速率下废润滑油的热裂解特性。研究表明,检测到具有半挥发性的多环芳香烃(萘、菲、蒽等)。Manar等<sup>[12]</sup>对废旧轮胎和废润滑油的混合物进行热化学再利用,制成高热值产物进行了研究,考察了温度、催化剂种类及催化剂比例对产物的影响。Song等<sup>[13]</sup>采用电弧法裂解废润滑油,用色谱质谱联用仪分析其成分。结果表明,气体产物主要有35% ~ 40%的氢气、13% ~ 20%的乙炔、3% ~ 4%的乙烯和其他碳氢化合物。Seung-Soo等<sup>[14]</sup>采用热重分析技术研究车用废润滑油和聚苯乙烯的混合物在间歇釜式搅拌反应器中的非等温裂解特性。研究表明,随着加热速率的减小,裂解的碳氢化合物的碳原子数分布向低碳氢化合物偏移。Thallada等<sup>[15]</sup>在含铁催化剂作用下从废润滑油中制取燃油。研究表明,铁/二氧化硅有助于裂解废油中碳原子高达40的碳氢化合物。

Mustafa<sup>[16]</sup>采用催化裂解法从废润滑油中炼制近似汽油燃料(Gasoline-like fuel, GLF)。研究表明,最高出油率达92.5%,所制燃油比汽油辛烷值高,闪点略低于汽油。Demirbas<sup>[17]</sup>也采用催化裂解法从废润滑油中炼制近似汽油燃料。研究表明,在氧化铝催化作用下,在温度为570 ~ 620 K时产油率急剧增加。Charusiri等<sup>[18]</sup>将废润滑油、废食用油和聚丙烯混合后进行裂解制油。研究表明,

(上接第39页)

[18] Hsieh C C, Yao S C, Alyousef Y. Development of a silicon-based passive gas-liquid separation system for microscale direct methanol fuel cells [C]//ASME 2003 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2003:397-403.

[19] Salakij S, Liburdy J A, Pence D V, et al. Modeling in situ vapor extraction during convective boiling in fractal-like branching micro-channel networks [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, 60:700-712.

[20] Xu J, Vaillant R, Attinger D. Use of a porous membrane for gas bubble removal in microfluidic channels: Physical mechanisms and design criteria [J]. Microfluidics and nanofluidics, 2010, 9(4/5):765-772.

[21] Conrath M, Dreyer M. Gas breakthrough at a porous screen [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 42:29-41.

[22] Conrath M, Smiyukha Y, Fuhrmann E, et al. Double porous screen

element for gas-liquid phase separation [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2013, 50:1-15.

[23] Chen H X, Xu J L, Li Z J, et al. Flow pattern modulation in a horizontal tube by the passive phase separation concept [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 45:12-23.

[24] Chen H X, Xu J L, Li Z J, et al. Stratified two-phase flow pattern modulation in a horizontal tube by the mesh pore cylinder surface [J]. Applied Energy, 2013, 112:1283-1290.

[25] Chen H X, Xu J L, Xie J, et al. Modulated flow patterns for vertical upflow by the phase separation concept [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2014, 52:297-307.

[26] Xie J, Xu J L, Xing F, et al. The phase separation concept condensation heat transfer in horizontal tubes for low-grade energy utilization [J]. Energy, 2014, 69:787-800.

[27] 陈宏霞, 徐进良, 李子矜, 等. 新型外分液结构调控水平管间歇流流型 [J]. 化工学报, 2012, 63(11):3470-3477. ■