

狭缝通道两相流强化换热研究综述

王增辉, 贾斗南, 刘瑞兰

(西安交通大学 核能与热能工程系, 陕西 西安 710049)

摘 要: 在狭缝通道高速流体的冲刷下, 狭缝不易产生杂质沉淀污染传热表面使传热工况恶化。狭缝两相流传热技术结构紧凑, 具有显著的强化效果, 是一种既经济又有效地强化传热方法, 因此狭缝传热在航空航天、微电子和核反应堆等领域得到广泛应用。狭缝两相流强化传热的主导传热机理是受压变形气泡底部的微液膜蒸发机理。本文对狭缝通道内两相流强化换热的研究进展进行了一些介绍, 并对研究现状进行了评述。

关 键 词: 狭缝通道; 微膜蒸发; 强化换热

中图分类号: TK124

文献标识码: A

1 引 言

狭缝传热技术是一种新兴的强化传热方法, 由于换热表面为光滑表面, 在通道内高速流体的冲刷下, 不易产生杂质沉淀污染传热表面使传热情况恶化。它具有显著的强化效果, 而且结构紧凑, 不需要复杂的表面加工处理。由于这些原因, 狭缝传热在航空航天、微电子、核反应堆和热能工程等领域得到广泛的应用。此外, 在大型空分装置中, 若能使核心部件主冷凝蒸发器的换热温差减少 1 K, 则仅一个机组每年就可节省 100 万美元以上, 同时国

内外一些学者已将狭缝强化换热技术应用于板翅式换热器, 收到了显著效果^[1]。20 多年以来, 研究者们对窄缝通道两相流强化换热及其机理、窄缝通道两相流流型及转换等进行了一些实验和理论研究, 以下对这些研究情况做一介绍及评述。

2 换热试验研究

杜建通通过试验观察证实了窄通道在矩形窄通道中加热时^[2], 通道内有大量扁平气泡的存在, 并证实了窄通道对液氮的沸腾传热有明显的强化传热效果。试验窄通道是由铝板加工而成, 传热工质为饱和液氮, 当间隙尺寸为 0.5~1.0 mm 与相同条件下 8.9 mm 的铜管换热相比沸腾换热系数提高了 0.78~2.35 倍。Johston 对纯净水在水平环状窄通道内沸腾传热试验后得出结论^[3], 其与一般的沸腾换热相比, 传热系数提高了 230%。作者所在课题组通过对间隙为 1.5 mm 的环形狭缝进行沸腾传热试验研究发现^[4], 应用 Jens-Lottes 公式对试验数据进行整理, 得到的结果为环形狭缝中换热能力增加了 4.11 倍, 有明显的强化换热趋

势。

当将窄通道竖直放置于液体介质中, 对通道壁面加热负荷时, 通道内的液体沸腾, 产生气泡, 于是通道内外产生密度差, 并相应产生静压差, 从而形成液体由窄通道壁面底部不断流进内部, 形成流动的自然循环, 这种现象称热虹吸沸腾换热。狭窄通道中的热虹吸沸腾换热有明显的强化换热效果^[5]。Yao, Chang 用水、丙酮、氟利昂作工质^[6~7], 对不同间距底端封闭的非对称小环形通道变热流密度自然对流沸腾传热特性进行了研究。Yao 的试验管道高度为 25.4 mm 和 76.2 mm, 间隙宽度 0.32~2.58 mm。Ishibashi 和 Nishikawa 试验研究了两端敞开竖直圆环通道内的自然对流沸腾传热^[8]。试验结果表明环形通道沸腾区域的聚集泡状流的区域传热得到强化, 传热系数有时可达饱和沸腾的 4 倍。

Danilova 证实缝宽与气泡脱离直径接近时, 窄缝通道强化传热效果好^[9]。黄鸿鼎在研究环隙通道时发现, 对于水、乙醇、丙醇、三乙胺等十来种物质, 当缝宽为 2~2.5 mm 时, 能明显强化传热, 大于 3 mm 时不起强化作用, 窄矩形通道的缝宽与传热工质的表

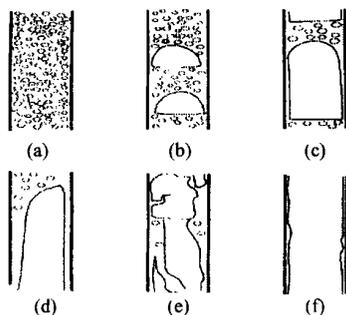
面张力有关^[10]。吴云英提出缝宽与气泡脱离直径相近的窄缝通道内,流动沸腾传热效果最好。窄矩形通道的流动沸腾传热系数可比一般光管提高 60%~90%,它能够强化传热,可在较低热通量下操作,并能消除或减轻两相流的不稳定性^[11]。

对于不同结构的狭窄换热元件,程立新等在研究以水为工质的垂直上升螺旋管和光管中的流动沸腾传热实验时,对直径为 $\Phi 22 \times 5.5$ 的内螺旋管和 $\Phi 19 \times 2$ 的光管的垂直同心环管进行了研究^[12]。试验结果表明,在相同的热流密度的条件下,内螺旋管中的沸腾换热系数明显大于光管,其值大约为光管的 1.62 倍,这表明内螺旋管对流动沸腾传热的强化十分显著。刘振华等对竖直同心套管内填充玻璃珠多孔介质层时的自然对流沸腾的换热特性的实验研究结果表明^[13],采用多孔表面增强换热能力。

3 流型及转换的研究

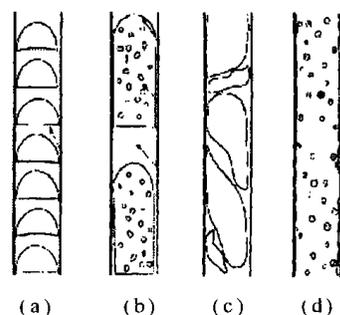
早期流型的研究主要集中在管径大于 10 mm 的圆形管。Sadatomi 和 Saruwatari 提出了大管道中的流型图,流型被分为泡状流、弹状流、环状流和滴状流。Mishima

应用中子摄影技术研究狭窄矩形通道中的流动,测量了流型、空泡份额、气泡速度和两相流压降。试验中发现间隙为 1.0 mm 时没有扰动流。



(a) 泡状流; (b) 带帽泡状流; (c) 弹状流; (d) 弹状扰动流; (e) 扰动紊流; (f) 环状流

图 1 缝隙为 1.0 和 0.6 mm 矩形通道流型



(a) 带帽泡状流; (b) 弹状液滴; (c) 扰动流; (d) 环状液滴

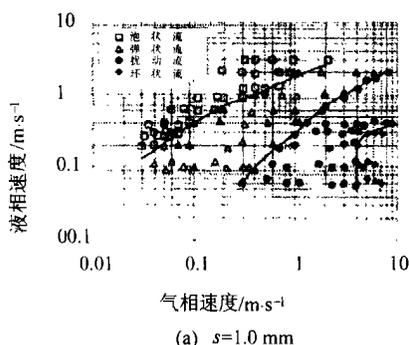
图 2 缝隙为 0.3 mm 矩形通道流型

Yao 和 Chang 对底部封闭环

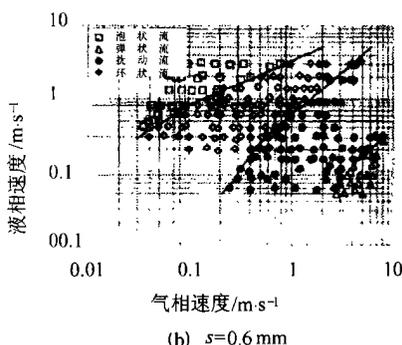
形空间中的水、丙酮和 R-113 的试验中,观察到存在四种流型^[6]。环形间隙宽度 0.32~2.58 mm,在较低的热流密度下,只有很少的气泡呈现底部扁平的半球形气泡。在中等热流密度和小管径下,一些大的气弹沿加热面向上流动。还有一种流型是包括小气泡、扁平的半球形气泡和变形气泡的混合流型。

Xia 研究 R-113 在高度为 88 mm,间隙为 0.8~5 mm 的垂直矩形通道中流动,观察到两种流型。当间隙大于 3 mm 时,气泡不变形并且流动参数与垂直管道中的强制对流相似。当间隙小于 3 mm 时,在不同加热点上出现临近的气泡相互结合并交替被气体或液体覆盖,试验中发现流型沸腾参数依赖于缝隙尺寸。

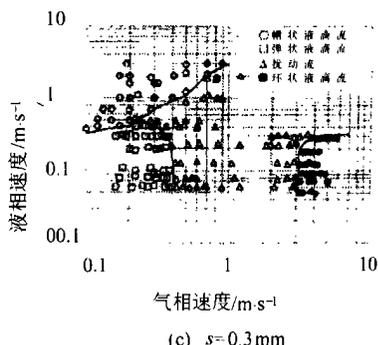
Xu 等对矩形狭窄通道中的气液两相流动进行了试验研究。试验段缝隙宽度分别为 0.3 mm、0.6 mm 和 1.0 mm^[14]。流型通过高速视频摄像机记录。试验结果表明 1.0 mm 和 0.6 mm 间隙中的流型类似于以前的研究(见图 1),可分为泡状流、弹状流、扰动流和环状流。然而,在 0.3 mm 的间隙中的流型完全不同(见图 2),即使在很低的气体流速下泡状流也不出现,流型分为带帽泡



(a) $s=1.0$ mm



(b) $s=0.6$ mm



(c) $s=0.3$ mm

图 3 缝隙为 1.0 mm、0.6 mm、0.3 mm 矩形通道流型图

状流、弹状液滴、扰动流和环状液滴流。由于在狭窄通道中表面张力和摩擦剪切力影响的增加,液体附着在壁面,被流动的气体推动。流型可分为带帽的泡状流、弹状液滴、扰动流和环状流。在流型转化方面,随着通道缝隙的减小,流型转换线都向左移动。如图3(a)所示,在1.0 mm 间隙流型图上,泡状流到弹状流、弹状流到扰动流和扰动流到环状流的流型转换线都向左移动。尤其是通道缝隙为0.6 mm 时(图3(b)所示),泡状流覆盖一个很小的区域。这是由于小气泡聚集在缝隙中并互相结合。弹状流到扰动流转换线偏左是由于增加的摩擦剪切力。在缝隙为0.3 mm (图3(c))时,流型完全不同于1.0 mm 和0.6 mm 的流型,其中重要的现象是:泡状流从没出现,这也与前面的研究符合。

4 换热机理和强化换热方法

Cooper 等利用高速摄影设备、光干涉技术、微型电阻温度计直接证明了微液膜的存在,由此产生了核态沸腾的微膜蒸发机理,这一机理可以成功地解决气泡扰动机理所遇到的问题。Vousikos 用激光干涉法测得气泡下的微液膜厚度为微米数量级^[5]。这个微膜蒸发机理认为沸腾传热主要是通过加热壁面上的这一微层液膜以蒸发、对流和辐射等形式将热量传给主流流体,其中最主要的热传递方式是微层液膜的导热,传热的主要热阻即来自于这层微液膜的导热热阻。采用狭缝通道可以有效地削弱这一微膜导热热阻,具有显著的强化传热效果。这是因为:第一,随着通道间隙的减小,气泡被

狭缝通道两壁面挤压变形成为扁平气泡,从而使微层液膜厚度进一步减小,并使气泡与液膜接触面积和接触时间增大,促进液膜的蒸发;第二,通道内流体受热后,由于通道内外的流体产生密度差,在存在热虹吸作用下形成通道从下至上的自然循环流动(称之为热虹吸流动),由于低温工质流体具有粘性系数小的特点,流动阻力较小,因而热虹吸现象十分明显,加之狭缝通道尺寸小,所以通道内流体流速较高。可见,采用狭缝通道可以减薄微层液膜厚度,显著提高传热系数,达到强化传热的目的。由这一机理还可以推知,狭窄空间内的沸腾存在最佳传热通道间距,这一点也证明了前面试验结果的正确性。

微膜蒸发是核态沸腾的支配性机理,但气泡扰动机理(亦称对流机理)对沸腾传热的贡献亦是不可忽略的。增大扰动或增大两相流速、减小液相边界层厚度都可起到强化传热的效果。在微膜蒸发机理中,正是由于微膜的迅速蒸发导致了气泡的迅速长大,使气泡底部液膜很薄;反之,亦正是由于这层液膜很薄,热阻很小,导致液膜的迅速蒸发,两者是相辅相成的。为了增强换热能力可将管子内外表面轧制成各种不同的表面形状,提高传热性能,如翅片管、螺纹管等;或者制造一种表面多孔管,加工复杂的多孔表面,产生更多的核化中心。

5 结论

由目前对窄缝通道管两相流的研究情况,我们可得出以下结论:

(1) 对窄缝通道两相流强化

换热的研究起步较晚。目前的研究主要限于对垂直和水平窄缝通道,对倾斜窄缝通道的研究很少,对于最佳强化换热间隙存在着不同的见解。

(2) 微膜蒸发机理和气泡扰动机理对两相流传热有很大的影响。在微膜蒸发机理中,微膜的迅速蒸发导致了气泡的迅速长大,使气泡底部液膜很薄;同时由于这层液膜很薄,热阻很小,导致液膜的迅速蒸发。

(3) 要强化两相流换热,可增大扰动或增大两相流速、减小液相边界层厚度。应用内部圆柱旋转的环形管,加工复杂的多孔表面,产生更多的核化中心,增大气泡脱离加热面的频率,或对普通的光滑表面,应用翅片管、螺纹管增大气泡与换热面的接触面积,延迟其脱离壁面的时间,达到强化换热的效果。

总之,对窄缝通道两相流强化换热的研究仍处于较为初期的研究阶段,尤其是在倾斜窄缝通道中的两相流动还需进一步研究;在窄通道中两相流动最佳间隙方面还未见广泛适合工程实际应用的经验关系式;同时微膜蒸发机理和气泡扰动机理对换热各存在多大的影响,窄缝通道两相流强化换热仍需进一步研究。

参考文献:

- [1] NEILLP S O, GOTTZMAN C F. Improve dair plant[J]. *Cryogenic Process and Equipment in Energy System*, 1980, 37: 182-191
- [2] 杜建通. 饱和液氮在矩形窄通道内池沸腾传热的实验研究[D]. 西安:西安交通大学, 1982
- [3] JOHNSTON BSETAL. Boiling heat transfer in a narrow eccentric annulus, part II heat transfer[J]. *ASME Journal of engineering for Power*, 1983, 105: 7481-7490

(下转第335页)

混合后, 蒸汽与水充分接触并进行换热, 汽相凝结, 水温升高, 出口时蒸汽完全凝结为热水。同时, 由于流体在流道内处于超音速流动状态, 受背压等的影响, 在流道中产生激波, 激波同时使汽相凝结加快, 也使流体的压力升高, 从而达到高效换热和增压的目的。

作者利用所建数学模型对两相流动和激波进行了计算^[3], 并与 Cattadori^[4] 的实验结果进行了比较, 如图9和图10所示。从图9可知, 计算值与实验值吻合较好。图10为相应的速度 u 和马赫数 M 分布计算结果。

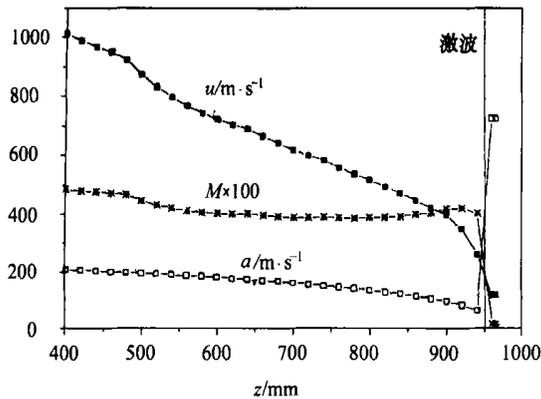


图10 混合段的速度和马赫数分布

6 结论

(1) 两相流体的音速受可压缩性影响而呈现出与单相流不同的特点, 其值大大低于单相流体音速值。同时不可逆因素对音速的影响随频率的增加而增加, 在高频时需考虑导热、粘性和相变对音速的影响, 在低频时应主要考虑相变对音速的影响;

(2) 两相流在缩放流道和渐缩一等截面流道中可能实现跨音速流动;

(3) 对汽液两相流激波, 其波后的参数与相变的强弱密切相关, 相变越强、激波后的压力越高, 在汽相完全凝结时激波最强, 达到最大的压力升高比, 波后最高增压比与波前马赫数平方呈近似线性关系;

(4) 两相流音速和激波特点, 可设计增压高效换热器, 同时实现高效换热和增压。

参考文献:

- [1] ZENG DANLING, ZHAO LIANGJU, XIAO YAN. Sound velocity in vapor-liquid two-phase fluid system [A]. *Proceedings of ICECA* [C]. Wuhan: ICECA, 2001. 18—20.
- [2] 赵良举, 曾丹苓, 袁鹏, 等. 汽液两相混合物的加速流动与激波的热力学分析 [J]. *工程热物理学报*, 2001, 22(3): 284—286.
- [3] 赵良举. 非平衡两相热流体的流动、激波及其应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2001.
- [4] CATTADORI G, GALBIATI L, MAZZOCCHI L, et al. A single-stage high pressure steam injector for next-generation reactors: test result and analysis [J]. *Int J Multiphase Flow*, 1995, 21: 591—606.

(何静芳 编辑)

(上接第331页)

- [4] 刘瑞兰, 贾斗南, 王增辉, 等. 环形狭缝流动沸腾传热特性的试验研究 [J]. *核科学与工程*, 2001, 21: 54—59.
- [5] 吴裕远, 陈流芳, 杜建通, 等. 液氮在狭缝中热虹吸两相传热的强化实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 1994, 28(9): 104—110.
- [6] YAO S C, CHANG Y. Pool boiling heat transfer in a confined space [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1983, 26(6): 841—848.
- [7] CHANG Y. Critical heat flux of narrow vertical annuli with closed bottoms [J]. *Journal of Heat Transfer*, 1983, 105: 192—195.
- [8] ISHIBASHI. Saturated boiling heat transfer in narrow space [J]. *Int J Heat Transfer*, 1969, 12: 863—894.
- [9] DANILOVA G N, ZARSKOV V M, ZEMSKOV B B. A heat transfer and two-phase flow of freons in vaporators of refrigerators [J]. *Heat Transfer-Soviet Research*, 1986, 18(6): 18—23.
- [10] 黄鸿鼎, 陈远明, 张松敏. 内热虹吸式再沸器 [J]. *化工学报*, 1987, 38(3): 293—298.
- [11] 吴云英, 杨伟. 竖直窄矩形通道内环状流区沸腾传热 [J]. *天津大学学报*, 1996, 29(7): 509—515.
- [12] 程立新, 陈听宽, 罗毓珊. 内螺纹管中流动沸腾强化传热研究 [J]. *化学工程*, 1999, 27: 14—16.
- [13] 刘振华, 陈玉明. 充满多孔质材料竖直套管内的自然对流沸腾换热 [J]. *上海交通大学学报*, 1998, 32(7): 75—80.
- [14] XU JINLIANG. Experimental study on gas-liquid two-phase flow regimes in rectangular channels with mini gaps [J]. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 1999, 20(4): 422—428.
- [15] VOUSIKOS C M, JUDD R L. Laser interferometric investigation of the microlayer evaporation of the microlayer evaporation phenomenon [J]. *ASME Journal of Heat Transfer*, 1975, 97(1): 88—92.

(何静芳 编辑)

狭缝通道两相流强化换热研究综述 = **A Overview of the Intensified Heat Exchange Research of Two-phase Flows in a Narrow-gap Channel** [刊, 汉] / WANG Zeng-hui, JIA Dou-nan, LIU Rui-lan (Nuclear & Thermal Energy Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4): 329 ~ 331, 335

Under the sweep action of a high-speed fluid in a narrow gap channel the narrow gap is immune from foreign matter sedimentation which may pollute heat transfer surfaces, resulting in a deterioration of the heat transfer conditions. Narrow-gap two-phase heat transfer technology features a compact structure and, endowed with remarkable intensification effectiveness, represents a kind of both economical and effective intensified heat transfer method. Hence, the narrow gap heat transfer has been widely utilized in various engineering sectors, such as aerospace and aeronautics, microelectronics and nuclear reactors. The main heat transfer mechanism of the above-cited heat transfer is based on the micro-liquid film evaporation at the bottom of pressured and deformed gas bubbles. The authors have given a brief account of the research progress made in the area of two-phase flow intensified heat transfer in a narrow-gap channel with an overview of the present status of the on-going study. **Key words:** narrow-gap channel, micro-film evaporation, intensified heat transfer

两相流超音速流动、激波及其应用研究 = **A Study of Two-phase Flow Supersonic Flows, Shock Waves and Their Applications** [刊, 汉] / ZHAO Liang-ju, ZENG Dan-ling (College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing, China, Post Code: 400044) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4): 332 ~ 335

On the basis of the specific features of two-phase fluid sonic speed a study was conducted of two-phase supersonic flows followed by an analysis of the shock waves triggered by the supersonic flows. Moreover, by the use of the features of two-phase shock-wave accelerating condensation and pressure rise designed is a supercharged heat exchanger. The sonic speed of two-phase flows under the influence of its compressibility presents some features different from those of single-phase flows. Their relatively low sonic speed makes it easier to realize two-phase supersonic flows. The two-phase flow shock waves are closely related to wave-front Mach number. Wave-rear vapor condensation results in a pressure rise. A steam-water direct-contact heat exchangers designed by exploiting the above-mentioned feature is characterized by a high-efficiency heat exchange and pressure charging. **Key words:** vapor-liquid two-phase flow, supersonic flow, shock wave, supercharged heat exchanger

利用 T 型三通测量气液两相流体的流量和干度 = **Measurement of Flow Rate and Dryness of a Vapor-liquid Two-phase Fluid by Using a T-junction** [刊, 汉] / WANG Dong, LIN Yi, LIN Zong-hu (Energy and Power Engineering Department, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, China, Post Code: 710049) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4): 336 ~ 338, 348

Through the use of the phase separation features of a T-junction a portion of single-phase gas stream is extracted and separated from a measured gas-liquid two-phase fluid. By the measurement of this portion of the single-phase gas flow rate determined is the flow rate or dryness of the measured gas-liquid two-phase fluid. The specific feature of this method lies in the conversion of flow rate measurement of a two-phase fluid into the measurement of a single-phase fluid, resulting in a significant improvement of instrumentation stability and reliability and a remarkable enhancement of measurement precision. Test results indicate that the flow extraction ratio is directly proportional to the dryness of the measured two-phase flow. Within the test range adopted by the authors the average measurement error of flow rate and dryness is less than $\pm 5\%$. **Key words:** flow meter, two-phase flow, T-junction, flow extraction and separation

分层协同进化模型在热力系统在线优化中的应用研究 = **Applied Research of a Multi-tier Synergetic Evolution Model in the On-line Operation Optimization of a Thermodynamic System** [刊, 汉] / WANG Xin-xin, XU Xiang-dong (Department of Thermal Energy Engineering, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2002, 17(4): 339 ~ 341