

# 碳钢 - 水热虹隙管内部强化传热机理研究

(吉林化工学院) 孙世梅  
(南京化工大学) 张红庄 骏

**摘要** 在微层蒸发模型的理论基础上,对热虹吸管内部设置分流管结构强化沸腾传热进行机理分析。建立分流管强化热虹吸管内部沸腾传热模型,同时选择七种不同的分流管开孔结构,与光滑管进行对比实验研究,寻得最佳分流管结构。并综合大量实验数据建立强化沸腾传热准数方程式。

**关键词** 分流管 强化沸腾传热 传热模型

**中图分类号** TK172.4

## 1 引言

碳钢 - 热管换热器具有结构简单,制造成本低廉,而且换热性能优良和工作可靠等优点,所以是当前我国应用最多的一种换热器。但在应用中仍存在一定问题,如:提高换热效率,拓宽温度使用范围是亟待解决的问题。在热虹吸管设置分流管是前人提出并证明是一种行之有效的强化传热方法<sup>[1,2]</sup>,但迄今为止对其机理的研究还甚少,本文针对分流管结构对热虹吸管内部传热性能影响进行分析研究,力图寻找最佳分流管结构。

## 2 强化传热物理模型建立

两相闭式热虹吸管内部传热机理表明<sup>[3]</sup>,热虹吸管工作时,其内部进行的是核态沸腾。那么,加热壁面上气泡的产生和脱离的过程是影响核沸腾换热的决定因素。而气泡在加热壁面上产生后对气泡的成长过程起决定作用的是气泡附近液体微层的蒸发。即加热面上液体沸腾的主要热阻来自微层液膜,微层越薄,热阻越小。而微层蒸发只能在汽液界面上进行,所以,接触面积的增大,微层蒸发时间的延长将有助于沸腾换热的增强。在热虹吸管内部设置分流管可以起到强化沸腾换热的效果。因为:

(1) 从前面的讨论可知,由于分流管的作用,汽泡在加热壁面成长受到限制,一方面使得汽泡底部的液

体微层的传热面积增加,延长液膜的蒸发时间;另一方面,由于液膜很薄,热阻很低,有效的热传导使得热量在很低的温差推动下达到汽液界面,造成液体的急速蒸发,从而大大提高热虹隙管内部传热性能。

(2) 汽泡在成长过程中,汽泡长大到开孔处或恰遇开孔处时,由于压差作用就从分流管的小孔中逸出,汽泡脱离直径小,脱离频率快,且对液体造成扰动,使得沸腾传热加强。

通过上述分析,我们可以将分流管强化沸腾传热随热负荷增加划分为三个阶段。如图 1 所示: a. 饱和核沸腾传热; b. 间隙内局部薄液膜蒸发; c. 间隙内大面积薄液膜蒸发。

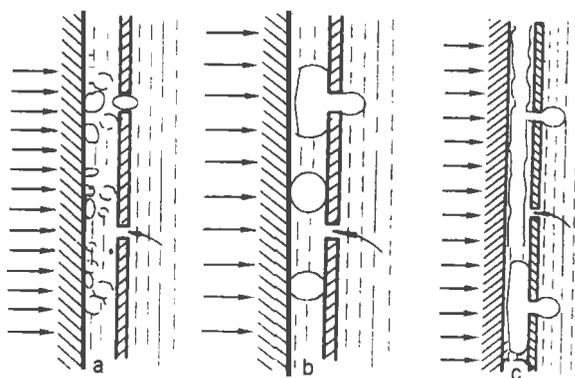


图 1 分流管强化蒸发段沸腾传热物理模型

## 3 强化传热关系式建立

前面已论述:分流管强化沸腾传热的主要原因是扩大薄液膜的覆盖面积和增强对汽泡周围液体的扰动。因此,本文力图寻找能够反映微层液膜和分流管几何尺寸的准则数来建立分流管强化沸腾传热的准则方程。

文献 [4] 中报道了两平行板间汽泡长大时液体微层液膜厚度有如下的关系式

$$dW/dR = K (11w/e)^{1/2} (s/R) \quad (1)$$

收稿日期 1997-09-15 收修改稿 1998-09-27

本文联系人 孙世梅 女 1966年生 硕士 讲师 132022 吉林市吉林化工学院化机系机器教研室

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

本文采用分流管强化核态沸腾的机理与文献[4]的报道很相似,所不同的是分流管上开有不同数量的小孔,因此,本文试对式(1)作一些修正,得出下列关系式:

$$dW/dR = M \left( \frac{1}{1 + u_v} \right)^{\frac{1}{2}} \times \left( \frac{s}{R} \right) \times X \quad (2)$$

$M$  是无量纲系数,  $X$  是与分流管结构有关的无量纲参数,  $n$  是指数

因采用分流管,在核态沸腾中气泡被限制在加热面和分流管所形成的环隙间呈饼状生长,泡内汽体全部是泡底微层蒸发产生。当气泡脱离半径为  $R$  时,蒸汽的体积是  $cR^2s$ , 气泡体积增长率为  $dV/dt = 2cRsu_v$ , 若此刻通过单个汽泡泡底的平均热流密度为  $q'$ , 则  $dt$  时间内微层导入的热量为:  $dQ = cR^2q'dt$ , 这部分热量全部转换为蒸汽的热焓, 则有热平衡关系式:  $cR^2q'dt = 2cRsu_v dh_g dt$ , 从而可求得:

$$dW/dR = M \left( \frac{1}{1 + q' / d h_g} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{s}{R} \right)^{\frac{1}{2}} X \quad (3)$$

上式表明: 微层液膜的厚度与半径的比与无因次量  $1/q' / d h_g$  及  $s/R$  有关。这里将  $M_b = 1/q' / d h_g$  定义为微层特性准则。因此我们用微层液膜特性准则  $M_b$  与无因次量  $s/R$  来反映泡底微层液膜导热蒸发的特性。式中的  $R$  为气泡半径, 它受开孔间距  $t$  的限制, 因此  $t/s$  是与分流管的几何尺寸有关的准则。努谢尔特准数中的定性尺寸取  $t$ , 即:  $Nu = ht/k_s$ 。此外, 从机理分析中可知, 气泡的产生受工作压力的影响也是不容忽略的, 至此我们初步认为采用分流管强化沸腾传热受以下无因次因素影响: 即

$$Nu = f \left( M_b, Pr, t/s, X, P/P_g \right) \quad (4)$$

从关系式(3)中可以看出: 当  $S$  减小时, 则微膜变薄, 传热增强, 但流体的流动阻力增大, 传热能力下降; 当  $S$  增大时, 环隙对气泡的抑制作用减小, 也就是说分流管对强化传热的效果降低。这里将环隙  $S$  作为单位函数来考虑是很不全面的, 故用环隙和分流管的对数平均截面积与热虹吸管内截面积之比  $h = F_w / F_R$  来表征与分流管几何参数有关的一个特性准则。则式(4)将改变为:

$$Nu = f \left( M_b, h, X, Pr, P/P_g \right) \quad (5)$$

## 4 实验研究

### 4.1 实验装置

性能测试装置如图 2 所示:

### 4.2 实验方法

试验管为 - 碳钢 - 水热虹吸管, 长 300 mm, 内径为 34 mm, 壁厚 8 mm, 热虹吸管蒸发段长 1600

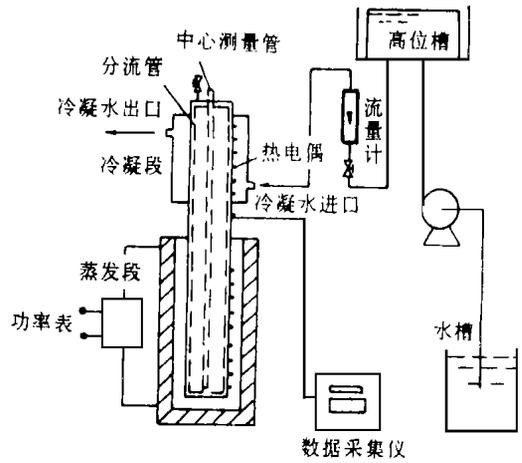


图 2 高性能热虹吸管性能测试装置

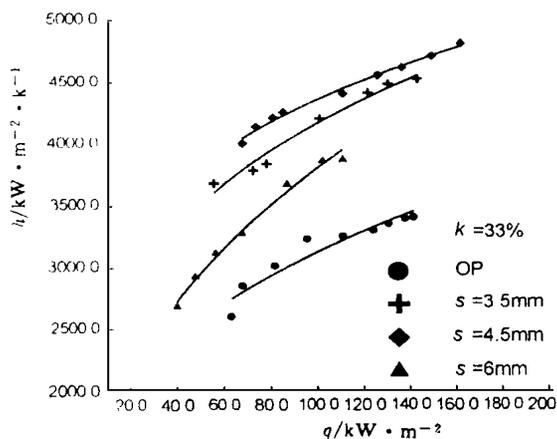
mm, 冷凝段长 900 mm

蒸发段用硅碳棒加热。冷凝段焊有水夹套, 用冷却水吸收热量。热虹吸管传输的热量是按冷却水带走的热量为准计算的。为了保证冷却水流量稳定, 采用带溢流环的 8000 mm 高的高位水槽经转子流量计供给冷却水, 进出水温用 0.1 级精密温度计测量。

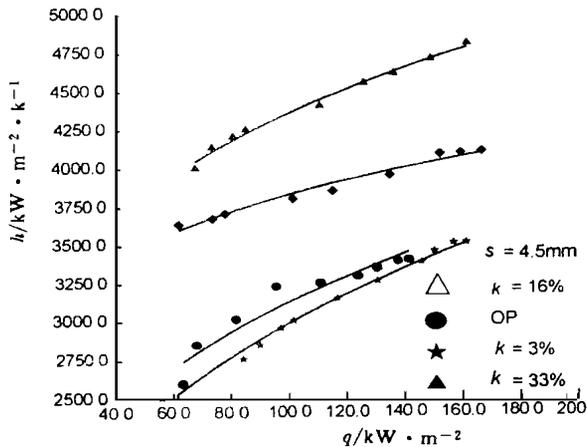
蒸发段管壁温度由 9 对 H0.5 的镍铬 - 铐铜热电偶测量, 为保证测温的准确性, 在蒸发段开有 4 个 8 mm 宽 4 mm 深的槽, 将 9 对热电偶分别嵌在 4 个槽里, 冷测量凝段管壁温度由 6 对 H0.5 的镍铬 - 铐铜热电偶测量。热虹吸管的顶部布置 1 对 H0.5 的镍铬 - 铐铜热电偶, 目的是为了检验用蒸汽排气阀是否完全, 热虹吸管中心布置一根 H10 × 1 的不锈钢中心测温管, 长 3000 mm, 蒸汽温度由中心管内 H<sub>3</sub> 的镍铬 - 铐铜铠装热电偶测量, 蒸汽的测温点与管壁电偶的布置点相对应。待工况稳定后再用数字显示仪表记录数据。

## 5 结果分析与讨论

采用图 2 装置测量了数组高性能闭式热虹吸管随热流密度变化的换热系数, 根据实验结果制成 8 幅分流管结构在不同开孔率  $k$  和环隙  $s$  组合下的  $q-h$  曲线图, 从中寻得最佳分流管结构, 如图 3 所示, 最佳管间隙在 4.5 mm 左右, 最佳开孔率在 33% 左右。在最佳分流管结构条件下, 换热系数大约提高 2~3 倍。从图 3(a) 中可知, 环隙大于 4.5 mm 时, 加热面上气泡没有受到分流管的抑制作用, 起不到强化传热的效果。当环隙小于 4.5 mm 时, 虽液膜减薄, 蒸发热阻减小, 单冷凝液体的回流阻力增大对传热不利。从图 3(b) 中可知, 开孔率在 33% 时, 换热性能明显提高, 这与机理分析非常吻合。



(a)  $k = 33\%$



(b)  $s = 4.5 \text{ mm}$

图 3 高性能闭式热虹吸管  $q-h$  曲线图

在最佳分流管结构条件下, 沸腾换热系数明显提高, 大约提高 2~3 倍

(2) 最佳分流管结构: 管间隙在 4.5 mm 左右, 开孔率在 33% 左右。

(3) 这种强化换热元件结构简单, 加工简单, 易于在回热工业中推广应用。

## 6 回归方程式建立

前面我们通过理论分析得出了分流管强化沸腾换热准则关系式 (5), 采用这个相关式, 对 330 个试验点进行多元线性最小二乘法回归分析得到分流管强化沸腾换热准数方程式

$$Nu = 199.5 M_b^{0.315} h^{-1.23} X^{0.08} Pr^{0.009} (p/p_a)^{0.22} \quad (6)$$

从复相关系数  $r = 0.96$  可知, 回归结果很好, 且与实验结果非常吻合。如图 (4) 所示, 实验范围:  $M_b = 2 \times 10^5 \sim 4.67 \times 10^4$ ,  $t/s = 2 \sim 5.28$ ,  $X = 3\% \sim 33\%$ , 且计算值与实验值相比误差在  $\pm 11.6\%$  左右, 误差带范围在  $\pm 23\%$  内。

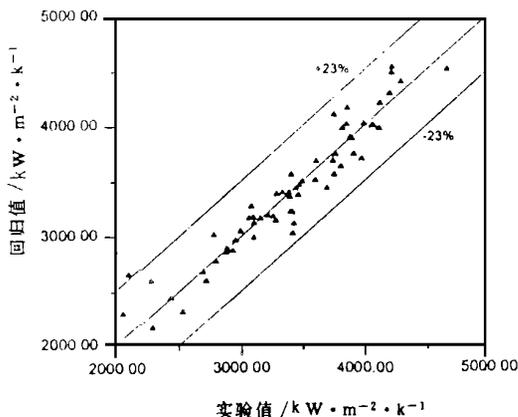


图 4 实验值与回归值对比分析

## 7 结论

(1) 分流管结构尺寸对沸腾换热有很大影响,

### 符号说明

- $h_{fg}$  - 汽化潜热, J/kg
- $K$  - 常数
- $M$  - 无量纲系数
- $P$  - 压力, Pa
- $P_a$  - 环境压力, Pa
- $Q$  - 热量, J
- $q_e$  - 蒸发段平均热流密度, W/m<sup>2</sup>
- $Q$  - 泡底微层液膜的平均热流密度, W/m<sup>2</sup>
- $R$  - 气泡脱离半径, m
- $s$  - 管间隙, m
- $W$  - 汽泡底部微液膜的厚度, m
- $t$  - 开孔间距, m
- $d$  - 液体密度, kg/m<sup>3</sup>
- $\mu$  - 液体黏性系数, kg/m·s
- $e$  - 表面张力, N/m
- $X$  - 开孔率
- $U_v$  - 气泡脱离半径生长速度, m/s
- $Nu$  - 努谢尔特准则
- $M_b$  - 微层液膜特性准则
- $Pr$  - 普朗特准则

### 参考文献

- 1 Groll M, Spended Th. Thermal behaviour of high performance close tow-phase thermosyphon. 5th IHCP. Supplement, 1984.
- 2 童明伟, 石程名, 辛明道. 两相闭式热虹吸管的强化传热实验. 工程热物理学报, 1984, 5(4).
- 3 庄骏, 徐通明, 石寿春. 热管与热管换热器. 上海: 上海交通大学出版社, 1989.
- 4 伊藤猛宏, 藤田恭伸, 西川兼康. 核沸腾热传递の高性能传热面. 机械の研究, 1979, 31(1).

(李乡复 编辑)

Yiqin // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 415~ 417

To fully utilize the low-temperature exergy of liquid hydrogen, installed additionally in a hydrogen energy-based gas turbine cycle is an air precooler and hydrogen turbine. Such a cycle enjoys a significant enhancement in specific power, thermal efficiency and exergy efficiency as compared with a simple cycle gas turbine. A thermodynamic analysis of the liquid hydrogen-gas power cycle is conducted and the latter's superior power performance predicted. Key words hydrogen energy-based gas turbine cycle, low-temperature exergy, thermal efficiency, analysis

管内复合强化传热技术及机理分析 = **In-tube Combination Intensified Heat Transfer Technology and An Analysis of its Mechanism** [刊, 中] / Gao Xiaotao ( Jiangsu Provincial Electric Power Test & Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 418~ 420

With respect to in-tube intensified heat transfer and combination intensified heat transfer technology presented in this paper is an analysis of resistance and heat transfer characteristics under turbulent flow conditions. Experimental research results of several kinds of combination intensified heat transfer techniques are also given. It is pointed out that the insertion of a partial tube length twisted tape with a counter rotation in a spiral-corrugated tube can be regarded as a highly effective combination intensified heat transfer technique. Key words intensified heat transfer, combination intensified heat transfer, spiral-corrugated tube, twisted tape

碳钢-水热虹吸管内部强化传热机理研究 = **A Study of the Internal Intensified Heat transfer Mechanism of a Carbon Steel-Water Thermosyphon Pipe** [刊, 中] / Sun Shimei ( Jiling Chemical Engineering Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 421~ 423

On the theoretical basis of a microlayer evaporation model an analysis is conducted of the intensified boiling heat transfer mechanism of thermosyphon pipe with an internally installed shunt tube structure. Set up is an internal boiling heat transfer model for a shunt tube intensified thermosyphon pipe. In addition, seven different kinds of perforated shunt tube structure have been selected for comparison with smooth tubes and for experimental study in order to seek an optimum shunt tube structure. A huge amount of experimental data is synthesized to establish a dimensionless number equation for intensified boiling heat transfer. Key words shunt tube, intensified boiling heat transfer, heat transfer model

煤颗粒流化床脱挥发份的实验研究 = **An Experimental Study of the Devolatilization of a Coal Particle Fluidized Bed** [刊, 中] / Zheng Shouzhong, Zeng Dong, Cai Song ( Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power). - 1998, 13(6). - 424~ 426

A devolatilization test of coal particles was conducted on a small-sized fluidized bed test rig. Studied is the effect of bed layer temperature, coal type, ambient atmosphere and other factors on the changing behavior of such elements as C, H and N in the coal in the course of devolatilization. Key words coal fluidized bed, devolatilization

里克型脉动燃烧技术工程化应用实验研究 = **Experimental Research of Rijke Type Pulsating Combustion Technology and Its Engineering Applications** [刊, 中] / Zhong Yingjie, Chen Fulian, Shi Zhuling, et al (Zhe-