

文章编号:1000-582X(2003)08-0109-05

三维微肋管内沸腾两相流型及其换热*

周杰¹, 辛明道²

(1. 重庆大学城市建设与环境工程学院, 重庆 400044; 2. 重庆大学工程热物理研究所, 重庆 400044)

摘要:以 R134a 为工质在作者研制的三维微肋管内进行了水平流动沸腾换热实验研究, 通过可视化措施对流型及其转换进行了观测, 结果表明, 在 Taitel - Dukler 流型图上, 三维微肋管内沸腾流型的分界线与光滑管有所不同, 其中间歇流与环状流的判据由 X_{tt} 等于 1.6 减小到 X_{tt} 等于 0.42, 而波状流向环状流转变的 Fr 数有所增加; 而在中等质量流速下环状流与局部蒸干区的转变主要受热流密度的影响。同时, 对三维微肋管内沸腾换热特点进行了讨论, 并对得到的实验数据建立了分区换热关联式, 这些不同流型下的换热关联式的计算值能较好地同实验数据相吻合。

关键词: R134a; 微肋管; 沸腾; 流型; 换热关联式

中图分类号: TK124

文献标识码: A

水平管内流动沸腾广泛存在于制冷空调等的蒸发换热设备中, 由于水平管内流动沸腾, 会在流动方向上出现不同的汽液两相流型, 而在不同的汽液两相流型下, 其换热的控制机理是有所不同的, 因此, 针对不同的两相流型, 研究其换热性能是必要的。

目前国内外制冷空调蒸发器已普遍采用微肋强化管, 但对于微肋强化管内的流动沸腾换热的研究大多局限于螺旋内微肋管, 对于三维内微肋管的流动沸腾换热还缺乏深入的研究, 特别是三维微肋管内流动沸腾换热流型的研究以及在不同的流型下建立分区换热关联式的还未见报道。

以 R134a 为工质在作者研制的一种三维微肋管内进行了水平流动沸腾换热实验研究, 并通过可视化措施对流型及其转换进行了观测, 目的在于得到水平三维微肋管内沸腾流型图 and 不同流型下的换热性能, 并在主要流型下得到换热实验关联式, 这不仅为该管型的应用提供设计依据, 而且能利用换热实验关联式来探讨三维微肋管强化流动沸腾换热机理。

1 实验装置

实验采用的三维内微肋管的几何参数如表 1 所示, 实验范围为: R134a 质量流速 $G = 60 \sim 285 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,

沸腾压力为 0.43 ~ 0.57 MPa, 干度 x 的范围为 0 ~ 1。实验装置及实验的数据处理参见文献[1]。实验段由 10 段长度均为 400 mm 的实验管件组成, 实验段进出口处及各段之间用耐压石英玻璃管连接, 共设置 11 个可视观察口, 这样可以观察到沸腾过程的流型变化, 流型变化的过程采用摄像机进行记录。图 1 为可视段连接结构示意图。

表 1 三维内微肋管实验元件的结构尺寸

几何参数	参数值
外径/mm	16
内径/mm	14
肋高/mm	0.2
轴向间距/mm	0.65
周向间距/mm	0.65
周向微肋数/N	68
螺旋角/(°)	89
肋顶角/(°)	45

2 结果与讨论

2.1 沸腾两相流流型及流型图

实验在以上的工况范围内观察到三维微肋管内沸腾两相流流型有: 泡状流、塞状流、分层流、波状流、弹状流和环状流。图 2 是摄像记录中可辨别的 6 种流型。

* 收稿日期: 2003-04-17

基金项目: 国家重点基础研究专项经费资助(G2000026305)

作者简介: 周杰(1965-), 男, 重庆江津人, 重庆大学博士研究生, 主要从事传热传质研究。

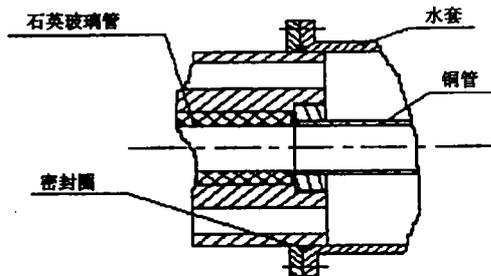


图1 可视段连接及结构示意图

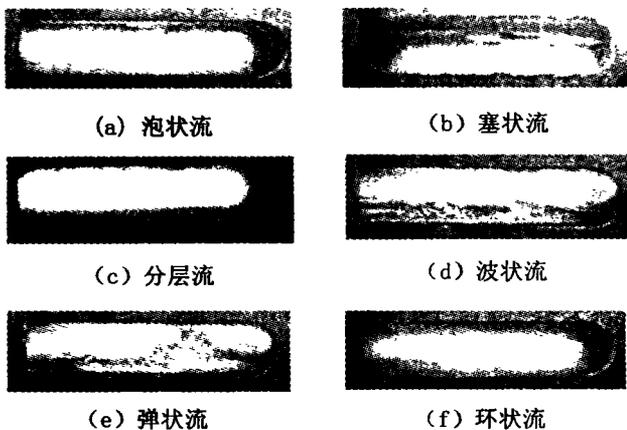


图2 三维内微肋管内沸腾流型

考虑到工程应用的要求,两相流型的区分应尽可能的少而简单,因此对一些出现的时间短的过渡性的流型,例如,泡状流和塞状流在很低的干度下出现,从工程应用来看,可以不予考虑;对有些流型的控制因素是相同的,归纳为相同的类型处理。例如,分层流和波状流,都具有汽液分层的特点,只是汽液界面状况有所不同,因此,为了便于应用,不严格地加以区分,统称为波状流。而对于高干度区,如在高质量流速下,此区变成雾状流区^[2],而实验的质量流速不是太高,会在环状流区后出现管顶部局部蒸干,而管下部管壁有流动液膜,文献^[3]称此流型为带局部蒸干的环状流。因此通过对所观察到的流型进行分析和分类处理,认为有4个流型反映了三维微肋管内沸腾换热两相流型的主体。它们是波状流、间歇流、环状流和带局部蒸干的环状流。

把得到的三维内微肋管内沸腾流型的实验数据点及转变曲线表示在经典 Taitel - Dukler 流型图上,如图3所示,其中,实线是三维内微肋管内沸腾流型的转变曲线,而虚线是原 Taitel - Dukler 流型图的转变曲线。从图3可以看出,三维内微肋管的流型转变曲线与原 Taitel - Dukler 流型图有所不同。从间歇流向环状流转变的临界判据,发现马丁内力参数仍然适用于三维微肋管,但在三维微肋管中临界判据为 $X_{tt} \approx 0.42$,而

原 Taitel - Dukler 流型图上的临界判据为 $X_{tt} = 1.6$,其转变的临界判据 X_{tt} 减小,其原因是原 Taitel - Dukler 流型图是在光滑管得到的,而现在是在三维内微肋管中,流动阻力增加,所以需要更大的蒸汽剪切力才能产生环状流。

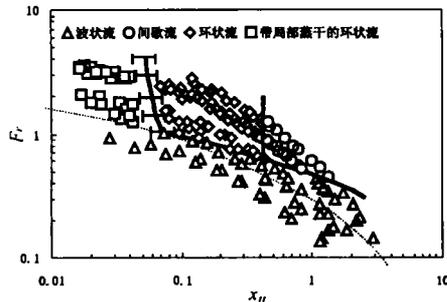


图3 三维内微肋管内沸腾换热流型图

而波状流向环状流的转变曲线,图3可看出三维微肋管同原 Taitel - Dukler 流型图上的转变曲线也有差别,但随 X_{tt} 的减小,其差别减小。

对于带局部蒸干的环状流,环状流向其转变的转变点的确定,在实验中根据管壁顶部温度开始升高来进行确定,其转变点也大致同换热系数达到最大值点相吻合。图3显示,从环状流向其转变是一区间,在实验范围内,环状流向其转变主要受热流密度的影响,图中区间为热流密度从 5 kW/m^2 到 20 kW/m^2 下的转变区间,实验结果表明随热流密度的增加环状流向其转变提前。

2.2 三维微肋管流动沸腾换热特点

图4(a)是在 $q = 10 \text{ kW/m}^2$ 、 $P_s = 0.43 \text{ MPa}$ 时不同质量流速下局部换热系数随干度的变化,从图中可以看出,质量流速对换热系数有较强的影响,当质量流速增加时,换热系数增加,质量流速对沸腾换热系数有较强的影响,其原因主要是质量流速增加,流速加大,导致对流换热作用增强所致。而且,在不同的质量流速下,换热系数的变化规律是不同的。在低质量流速 $70 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 时,换热系数随干度而变化相对较小,此时的流型主要是分层流,核态沸腾在传热中占优势。在较高质量流速下,流型主要是环状流,对流换热作用大大增强,所以,较大的换热系数被得到,其换热系数先随着蒸汽干度的增加而增加,到达峰值后换热系数下降,这是因为管内表面的上部开始出现局部蒸干,虽然换热系数下降,但仍保持较高的数值,其原因是质量流速不是太高,周向管壁仍有流动液膜,微肋表面对流动液膜的换热强化依然存在,另一方面,交叉沟槽中的液体不易被蒸干等因素有关。

图4(b)是在 $q = 20 \text{ kW/m}^2$ 、 $P_s = 0.43 \text{ MPa}$ 时不同

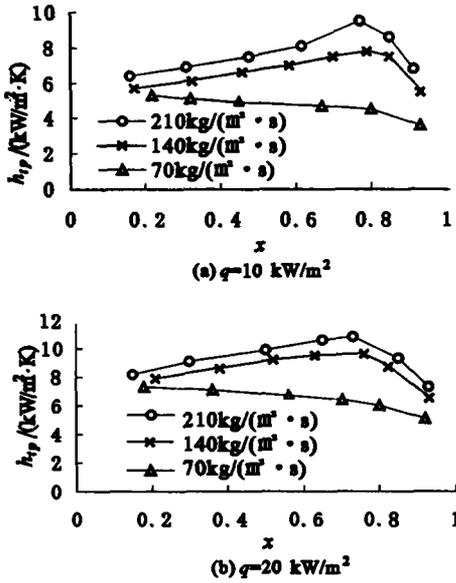


图 4 换热系数随干度的变化

的质量流速下局部换热系数随干度的变化, 图中结果与图 4 (a) 类似。图 4 (b) 与图 4 (a) 比较, 在相同质量流速下随热流密度增加换热系数增加, 其原因是核沸腾换热增强所至, 特别是在中低干度下, 对流换热相对要小一些, 对核沸腾的抑制作用减小, 导致热流密度影响较大; 而在较高干度下对流换热较强, 核沸腾的抑制作用增加较多, 导致热流密度的影响相对减小, 但仍会对换热系数产生一定的增加作用。

2.3 主要流型换热系数关联式的建立

2.3.1 环状流区换热系数关联式的建立

间歇流区的传热特点同环状流很类似, 因此把复杂的间歇流模化为环状流, 同环状流区实验数据一起建立换热系数关联式。环状流区换热系数关联式采用叠加模型^[4]得到, 叠加模型表示成如下的形式:

$$h_p = Fh_i + Sh_p$$

其中 h_i 和 h_p 分别为单相强制对流换热系数和池沸腾换热系数, F 为强化因子, 而 S 为抑制因子。

在三维微肋管中, 假设单相对流换热关系式与光滑管的单相对流换热关系式成比例, 这样在三维微肋管中, h_i 仍采用光滑管的单相对流换热系数公式, 本文采用 Boelt - Dittuss 公式, 由 h/h_i 与 $1/x_{tt}$ 相关得到强化因子近似为 $3.8 (1/x_{tt})$ 。

在叠加模型中, 池沸腾换热系数 h_p 的表达式为相应的管内表面池沸腾换热关系式。其池沸腾换热关系式也假设与光滑表面池沸腾换热关系式成比例, 光滑表面池沸腾换热关系式采用 Cooper 关系式 h_c , 则 $h_p = C_1 \times h_c$, C_1 为待定常数。

而抑制因子采用文献[5]所确定的表达式, 即:

$S = \exp(-C_2 A F h_i 10^6 / q)$, 其中, $A = 2\sigma T_s / (h_{fg} \rho_g)$, C_2 为待定常数。

最后, 得到环状流区换热关联式为:

$$h_p = F h_i + S h_p$$

式中, $h_i = 0.023 [Re(1-x)]^{0.8} Pr^{0.4} \lambda / D$,

$$F = 3.8 (1/x_{tt})$$

$$h_p = C_1 \times 55 (P/P_c)^{0.12} (-\log_{10} (P/P_c))^{-0.55} M^{-0.5} q^{0.6}$$

$S = \exp(-C_2 A F h_i 10^6 / q)$, $A = 2\sigma T_s / (h_{fg} \rho_g)$

通过实验数据回归, 当 $C_1 = 1.7$ 、 $C_2 = 2.05$ 时, 与实验数据有最好的一致性。

关联式适用范围为: 质量流速 $G = 100 \sim 285 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、沸腾压力为 $0.43 \sim 0.57 \text{ MPa}$ 、热流密度为 $5 \sim 20 \text{ kW}/\text{m}^2$ 的环状流和间歇流。

图 5 是该关联式的计算值与实验值比较, 其最大偏差在 $\pm 15\%$ 以内。

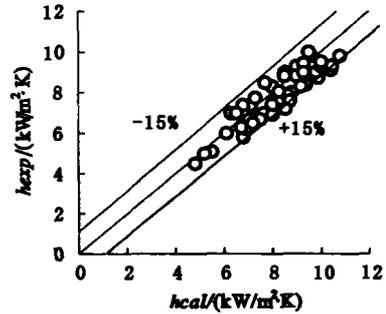


图 5 环状流关联式的计算值与实验值的比较

2.3.2 分层流区换热系数关联式的建立

在分层流区, 在相同的热流密度下, 换热系数沿干度变化不大, 但有所降低, 呈现典型的以核态沸腾为主的特征。因此, 以 h/h_p 为函数来建立换热关系式, 通过用实验值计算 h/h_p , 得到的 h/h_p 值与实验值之间有如下的规律: 1) 随热流密度的升高而有所降低, 这是由于热流密度对池沸腾换热系数的影响比两相流动沸腾更大。2) 在同一质量流速下, 低干度的换热系数要高于较高干度的换热系数, 这主要是由于随干度的增加, 空隙率增加所致。3) 在相同的热流密度下, 较高质量流速的换热系数要高于较低质量流速的换热系数, 这是由于质量流速升高, 流动沸腾中对流换热作用增强所致。也就是说, h/h_p 的值与热流密度 q 成反比而与质量流速 G 和 $(1-X)$ 成正比。因此, 借鉴沸腾数的形式, 引入一新的准则数 $Bo' = q/[G(1-X)h_{fg}]$, 其物理意义为蒸发引起的垂直于壁面的质量通量与通过的流动液体的质量通量的比值。

根据以上的分析, 可以得到分层流区流动沸腾换

热关系式的形式为:

$$h_p/h_c = h / (1.7h_c) = C'Bo'^{-n}$$

上式变形为: $h/h_c = CBo'^{-n}$

式中, C, n 可通过实验数据回归得到, $C = 1.145, n = 0.0911$ 。

最后得到在分层流区换热关系式为:

$$h_p/h_c = 1.145 Bo'^{-0.0911}$$

关联式适用范围为:质量流速 $G = 60 \sim 100 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、沸腾压力为 $0.43 \sim 0.57 \text{ MPa}$ 、热流密度为 $5 \sim 20 \text{ kW}/\text{m}^2$ 的分层流。

图6显示关系式计算值和实验值的最大偏差为 $\pm 16\%$, 这说明关系式有较高的准确度。这也说明新的准则数 $Bo' = q / [G(1-X)h_{fg}]$ 的引入是合理的。

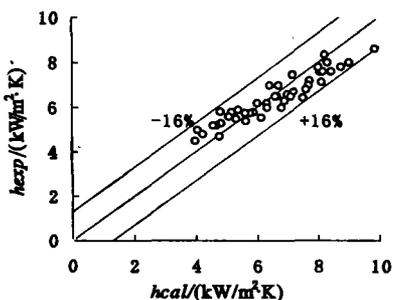


图6 分层流关联式的计算值与实验值的比较

2.3.3 局部蒸干区换热系数关联式的建立

局部蒸干区换热只考虑润湿周向管壁的液膜,分为2个部分考虑,一部分为底部流动液膜,该液膜认为同环状流区的流动液膜的换热是完全一样;另一部分为在沟槽中液膜,认为液膜很薄,只有对流蒸发,由此可得到其换热系数关联式,详见文献[6],其结果为:

$$h_p = (1-X)/(1-X_m) (Fh_l + S h_p) + 172 (X-X_m) 1.85 (1-X) Fh_l$$

其中, Fh_l 和 Sh_p 分别是环状流区换热关联式的对流项和核沸腾项, X_m 为环状流向局部蒸干区转变干度。关联式适用范围为:质量流速 $G = 100 \sim 285 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、沸腾压力为 $0.43 \sim 0.57 \text{ MPa}$ 、热流密度为 $5 \sim 20 \text{ kW}/\text{m}^2$ 的局部蒸干区。关系式计算值和实验值的最大偏差为 $\pm 16\%$ 。

3 结论

1) 在 Taitel - Dukler 流型图上, 三维内微肋管间歇流与环状流的分界线较之光滑管向左平移了一段距离, 对应的 X_m 大约等于 0.42; 波状流向环状流的转变曲线, 也有差别, 但随 X_m 的减小, 其差别减小, 而环状流与局部蒸干区的转变在中等质量流速下主要受热流

密度的影响。

2) 流型对换热系数产生较强的影响。波状流区主要受热流密度的影响; 环状流区质量流速和干度均有较强的影响, 而热流密度在低干度下影响较大; 局部蒸干区换热系数随质量流速和热流密度的增加而增加, 但随干度的增加而迅速减弱。

3) 分区换热关联式计算值能较好地同实验数据相吻合, 最大偏差在 $\pm 16\%$ 以内。能为该管型的应用提供设计依据。

主要符号表

Fr 数, $Fr = G^2/(\rho^2 g D)$;

G 质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;

h 换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;

h_{fg} 汽化潜热, J/kg ;

Pr 数;

q 热流密度, kW/m^2 ;

Re 数, $Re = GD/\mu$;

x 干度;

X_{tt} Lockhart - Martinelli 参数;

λ 导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$;

μ 动力粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

ρ 密度, Kg/m^3 ;

σ 表面张力, N/m ;

下标

l 液相; p 池沸腾;

s 饱和; tp 两相流

参考文献:

- [1] ZHOU J, CHEN Q H, XIN M D, et al. Boiling in a horizontal three dimensional microfin tube for R134a [A]. Multi-phase Flow and Heat Transfer Proc. of the Fourth International Symposium [C]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1999. 318 - 325.
- [2] TAITEL Y, DUKLER A E. Session on Fundamental Research in Fluid Mechanics [A]. AIChE 10th Annual Meeting [C]. New York: New York Press, 1977, 53 - 62.
- [3] KATTAN N, THOME J R, FAVRAT D. Flow Boiling in Horizontal Tubes; Part 1—Development of a Diabatic Two - Phase Flow Pattern Map [J]. ASME. J. of Heat Transfer, 1998, 120:140 - 147.
- [4] CHEN J C. Correlation for boiling heat transfer to saturated fluids in convective flow [J]. Ind. Engng Chem. Proc. Des. Dev, 1966, 5(3):322 - 329.
- [5] 周杰, 辛明道. 流动沸腾中 Chen 模型抑制因子的确定 [J]. 重庆大学学报 (自然科学版), 2001, 24(6):88 - 91.
- [6] 周杰, 辛明道. 水平三维内微肋管在局部蒸干区的沸腾换热及其关联式 [J]. 热科学与技术, 2002, 1:15 - 20.

Boiling Two - phase Flow Patterns and Boiling Heat Transfer in Three - Dimensional Microfin Tube for R134a

ZHOU Jie¹, XIN Ming-dao²

(1. Faculty of Urban Construction and Environment Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;
2. Institute of Engineering Thermophysics, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: The heat transfer characteristics are strongly dependent on the flow pattern in the tube - boiling. Therefore, it is very important to know which flow pattern is expected to exist at certain flow conditions in a tube - boiling and to develop heat transfer correlations consistent with the prevailing heat transfer mechanism in each flow pattern. The boiling heat transfer for R134a is investigated experimentally in a three - dimensional (3 - D) microfin tube. In the range of experimental conditions, six distinguishable flow patterns (bubble flow, plug flow, stratified flow, wavy flow, slug flow and annular flow) are recorded by a video camera. The obtained results are constructed in the Taitel - Dukle flow pattern map. The findings show the annular flow region of 3 - D microfin tube is different from that of smooth tube. The regime transition criterion X_{tt} decreases from 1.6 to 0.42 between intermittent flow and annular flow, and the regime transition criterion Fr have lightly increase between wave flow and annular flow. Based on the experimental data, the empirical correlations are obtained in different flow pattern and the calculated data of these correlations agree well with the experimental data.

Keywords: R134a; microfin tube; boiling; flow pattern; heat transfer correlations

(编辑 陈移峰)

~~~~~  
(上接第108页)

## Co - Combustion Experimental Study of Medical Solid Waste and Coal in a CFBC

PU Ge, ZHANG Li, XING Ming-dao, RAN Jing-yu

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** It is very important to disposing medical solid waste harmlessly, because there are large numbers of bacteria and virus in it. The samples of medical solid waste of a hospital in chongqing were collected and their industry analyse were done. According to the characteristics of medical solid waste, the co - combustion test of medical solid waste and coal are performed in CFBC. The studies about bed temperature, emission characteristics of  $NO_x$  and  $SO_x$ , heating reducing ratio are done when the mixing ratios are different. Experimental research showed that incineration medical solid waste in CFBC is feasible.

**Key words:** medical solid waste; circulating fluidized bed combustor; co - combustion

(编辑 陈移峰)