

多相流与传热论文集

西安交通大学
工程热物理研究所 编

原子能出版社

序 言

多相流与传热或称多相流热物理学,是工程热物理领域内的一个新学科。它是在流体力学、传热学、传质学与燃烧动力学的基础上发展起来的。它研究的内容已在动力、化工、石油、节能、环保、国防工业以及各种过程工业的换热设备中得到了广泛应用。近20年来,由于核电的发展、国防现代化以及新技术高技术的开发,对从事多相流及其传热过程的研究工作者,不断提出了新的研究课题,从而促进了多相流与传热的机理和应用的发展。这对各有关工业的设备设计、工况预测、系统控制以及保证安全运行等方面均具有重大理论和现实意义。

西安交通大学于60年代初成立了国内第一个工程热物理研究室,1979年经原教育部批准建立了高等学校内的第一个工程热物理研究所。该所以多相流热物理学为主要研究方向,下设多相流与传热研究室、气动研究室、燃烧研究室、低温研究室、热工基础理论研究室。1984年起又增设了涡轮机械研究室与内燃机研究室。该所成立10年来,与动力机械工程系和能源与动力工程系密切合作,共同领导上述研究室的工作,取得了一系列科研成果。本论文集收入了工程热物理研究所各研究室及两个系各有关教研室的研究人员、教师和研究生近几年来在管内两相流与传热、透平机械两相流与传热、气固两相流与传热、两相流不稳定性以及两相流测试等方面的38篇论文。我们希望本论文集能作为从事动力、化工、核电、能源转换与节能以及有关工业的科技工作者和高等学校教师、研究生的参考书。

本论文集中有不少篇论文是得到国家自然科学基金委员会的基金资助研究的成果,在此向该委员会表示谢意。

陈学俊

1989年4月于西安交通大学

西安交通大学工程热物理研究所

所长

陈学俊教授

名誉所长

田长霖教授（美国伯克利加州大学）

副所长

向一敏、周龙保、翁泽民教授，周芳德副教授

多相流与传热研究室主任

陈听宽教授

气动研究室主任

姚承范副教授

燃烧研究室主任

许晋源教授

低温研究室主任

边绍雄副教授

涡轮机械研究室主任

向一敏教授

内燃机研究室主任

王陈生副教授

热工基础理论研究室主任

陶文铨教授

目 录

序 言

卧式螺旋管内气液两相流流型转换的研究.....	郭烈锦 周芳德 陈学俊 (1)
垂直 U 型管沸腾传热特性的改进.....	陈听宽 贾岫庄 (7)
管道内两相流截面含气率预报模型.....	郭烈锦 陈学俊 (12)
水平 T 型管内气液两相流体的相分离和阻力特性研究.....	耿生斌 林宗虎 (19)
扰流子对液膜厚度及传热的影响.....	陈 曦 陈立勋 (26)
垂直沸腾管下降流传热特性研究.....	杜社教 陈听宽 (32)
垂直上升管近临界压力区两相流沸腾传热特性的研究.....	陈听宽 陈宣政 陈学俊 庄文贤 丁惠民 (39)
内螺纹管近临界压力区两相流沸腾传热特性的研究.....	陈听宽 陈宣政 陈学俊 庄文贤 丁惠民 (45)
内螺纹管高压汽水两相流摩擦压降特性的研究.....	陈听宽 陈宣政 陈学俊 赵家梁 (51)
亚临界及近临界压力区水平管沸腾传热特性的试验研究.....	陈听宽 郑建学 (57)
过冷沸腾压降的通用计算方法.....	贾斗南 (62)
湿蒸汽喷管流量系数的研究与计算.....	张金玲 蔡颐年 (67)
切力驱动的湍流液膜的传热特性.....	俞茂铮 (72)
蒸汽初态对初始湿蒸汽透平不平衡汽流特性的影响.....	俞茂铮 孙弼 王文生 (80)
工业热水发电闪蒸系统热力学分析.....	王璧玉 (85)
一元非定常两相流的特征线理论及其在凝结激波管中的应用.....	何卓烈 史琳 蔡颐年 (92)
一个新的关于液滴与固体表面高速碰撞的力学模型.....	施红辉 俞茂铮 蔡颐年 (98)
水平 U 型管中沸腾流动不稳定性试验研究.....	张旭 林宗虎 陈学俊 T.N.Veziroglu S.Kakac (106)
多通道沸腾流动系统密度波不稳定性分析.....	阮养强 傅龙舟 (111)
中高压水-蒸汽回路压力降型脉动的实验研究.....	王 芊 陈学俊 (118)
垂直管中两相流动密度波型脉动的实验研究.....	许保华 陈学俊 (123)
气-固两相流中计算颗粒湍流扩散的一种整体/局部扩散(轨道分裂)模型...	杨耀宾 许晋源 陈学俊 (128)
弯管内空气-煤粉两相流动的特性及应用.....	徐通模 周小天 惠世恩 刘仲军 (132)
流化床内低污染燃烧的试验研究.....	张永照 张建强 张建民 (139)
双组分低温工质两相流及等熵膨胀过程的研究.....	计光华 郭有仪 陈志勤 (145)
液池核态沸腾强化传热的实验研究.....	边绍雄 (153)
非极性过饱和氮 Wilson 点的试验研究.....	计光华 王群 林明峰 (159)

水平肋管外凝结换热及强化的理论与实验研究.....	厉彦忠 吴清金 (166)
径向环形叶栅的气粒两相流特性的研究.....	郭有仪 计光华 张浩然 (173)
矩形腔内相变工质接触式熔化的实验研究.....	董志锋 王启杰 陈钟顺 (177)
一端封闭的圆柱形空腔内冲击式传热(传质)的实验研究.....	康海军 陶文铨 (184)
不同倾角重力热管传热特性的研究.....	徐国强 俞建洪 陈听宽 (192)
泡沫强化传热的试验研究和理论分析.....	蒋宗传 胡其才 潘福田 (199)
应用瞬态流动技术测量双排叉排孔气膜冷却特性.....	张鸣远 邹福康 陈学俊 (205)
全息实时干涉法测量二维温度场的实验研究.....	杨天亮 章燕谋 (214)
应用光导纤维传感器测量气-液两相流流型.....	
.....	高华魂 张增庆 李崇祥 赵在三 (219)
用孔板进行蒸汽-水两相流流量和干度的单参数测量.....	
.....	刘尧奇 陈听宽 陈学俊 (225)
两相流中水滴尺寸的测量和一种离线的水滴图象自动分析系统的研制.....	
.....	毛靖儒 彭少敏 (230)

CONTENTS

Preface

Investigations on the Gas-Liquid Two-Phase Flow Patterns Transitions in Horizontal Helical Coils

Guo Liejin Zhou Fangde Chen Xue-jun

Improvement of Boiling Heat Transfer Characteristic in Vertically U-Type Tube

Chen Tingkuan Jia Xiuzhuang

An Theoretical Model for the Prediction of Void Fraction in Two-Phase Channel Flow

Guo Liejin Chen Xue-jun

An Investigation of Phase Separation and Resistance Characteristics of Gas-Liquid Two-Phase Flow in a Horizontal T Junction

S.B.Geng Z.H.Lin

The Effects of Twisted Tape on the Film Thickness and Heat Transfer

Chen Xi Chen Lixun

A Research on the Characteristic of Boiling Heat Transfer in Vertical Downward-Flow Tube

Du Shejiao Chen Tingkuan

An Investigation on Boiling Heat Transfer Characteristics at Near Critical Pressure in Smooth Tubes

Chen Tingkuan Chen Xuanzheng Chen Xue-jun

Zhuang Wenxian Ding Huimin

An Investigation on Boiling Heat Transfer Performance at Near Critical Pressure in Internally Ribbed Tubes

Chen Tingkuan Chen Xuanzheng Chen Xue-jun

Zhuang Wenxian Ding Huimin

Frictional Pressure Drop Characteristics of High Pressure Steam-Water Two-Phase Flow in Internally Ribbed Tubes

Chen Tingkuan Chen Xuanzheng Chen Xue-jun Zhao Jialiang

Experimental Research of Boiling Heat Transfer Characteristic in Horizontal Tube at Subcritical and Near Critical Pressures

Chen Tingkuan Zheng Jianxue

A Generalized Procedure for Predicting the Pressure Drop in a Subcooled Boiling Channel

Jia Dounan

Calculations of the Nozzle Coefficient of Discharge of Wet Steam Turbine

Stages

Zhang Jinling Cai Yinian

Heat Transfer in the Shear Driven Turbulent Liquid Film Flow

M.Z.Yu

Effects of Steam Inlet Conditions on Behaviour of Nonequilibrium Flow in the Primary Wet Steam Turbine Stage

M.Z.Yu B.Sun W.S.Wang

Thermodynamic Analysis of Flashing System of Industrial Hot Water for Electric Power Generation

Wang Biyu

Characteristic Theory on One Dimension Nonstationary Two-Phase Flow and Its Apply on Experimental Condensation Shock Tube

He Zhuolie Shi Lin Cai Yinian

A New Hydrodynamic Model of the Liquid Drop in High-Speed Impact on Solid Surfaces

H.H.Shi M.Z.Yu Y.N.Cai

An Experimental Investigation of Flow Boiling Instabilities in a Hairpin Tube

X.Chang, Z.H.Lin, X.J.Chen, T.N.Veziroglu, S.Kakac.

Analysis of Density Wave Instability in Multichannel Boiling Flow system.

Y.Ruan L.Fu

Experimental Research on Pressure Drop Type Oscillation in Medium-High Pressure Water-steam Loop

Wang Qian Chen Xue-jun

An Experimental Investigation of Two-Phase Flow Density Wave Type Instability in Vertical Up-Flow Tube

Xu Baohua Chen Xue-jun

The Macro/Micro (Trajectory Splitting) Diffusion Model for Computation of Particle Turbulent Diffusion in Gas-Solid Flows

Yang Yaobin Xu Jinyuan Chen Xue-jun

The Characteristics and Its Applications of Air-Coal Particle Gas-Solid Two-Phase Flow in Bends

Xu Tongmo Zhou Xiaotian Hui Shien Liu Zhongjun

An Experimental Study of Low Pollution Combustion in Fluidized Bed

Zhang Yongzhao Zhang Jianqing Zhang Jianmin

Research on Two-Phase Flow and Isotropic Expansion Process for Binary Cryogenic Mixture

Ji Guanghua Guo Youyi Chen Zhiqin

Enhancement of Heat Transfer in the Pool Nucleate Boiling

- Bian Shaoxiong
Research on Wilson Points for Non-Polar Supersaturated Nitrogen
- Ji Guanghua Wang Qun Lin Mingfeng
Theoretical and Experimental Investigation of Heat Transfer and Its Enhancement Outside a Horizontal Finned Tube
- Li Yanzhong Wu Qingjin
A Study of Particle-Gas Flow Properties on the Radial Circular Cascade
- Guo Youyi Ji Guanghua Zhang Haoran
An Experimental and Analytical Study of Close-Contact Melting in an Rectangular Cavity
- Dong Zhifeng Wang Qijie Chen Zhongqi
Experimental Investigation of Impinging Heat (Mass) Transfer in a Cylindrical Cavity with One End Open to the Ambient Air
- Kang Haijun Tao Wenquan
An Investigation of Heat Transfer Performance of Gravity Heat Pipe with Various Inclined Angles
- Xu Guoqiang Yu Jianhong Chen Tingkuan
Experimental Study and Theoretical Analysis on Froth Enhancing Heat Transfer
- Jiang Zongchuan Hu Qicai Pan Futian
Measurements of Film-Cooling Performance from Two-Staggered Rows of Holes Using a Transient Flow Technique
- Zhang Mingyuan Fu-Kang Tsou (Drexel University, U.S.A)
Chen Xuejun
Experimental Research on the Measurement of Two-Dimensional Temperature Profile Using Holographic Real-Time Interferometric Method
- Yang Tianliang Zhang Yanmou
Use of Optic Fiber Transducer to Measure Two Phase Flow Patterns
- Gao Huahun Zhang Zengqing Li Chongxiang
Zhao Zaisan
Single Parameter Measurement of Steam-Water Two-Phase Flow with Sharp Edged Orifice
- Liu Yaoqi Chen Tingkuan Chen Xue-jun
Measurements of Water Drop Sizing in Two-Phase and the Development of an Off-Line Automatic Drop Image Analysis System
- Mao Jingru Peng Shaomin

卧式螺旋管内 气液两相流流型转换的研究

郭烈锦 周芳德 陈学俊

一、前言

螺旋管式蒸汽发生器、化学反应器及换热器在电力、动力、化工、核电厂及航海、航天工业等领域有着广泛的应用。到目前为止,大量的文章资料都报道了有关立式螺旋管内单相流动与传热特性的研究工作,但对于气液两相的流动与传热特性的研究还很有局限性,特别是对流型转变特性的系统研究则更少^(1~3)。对于卧式螺旋管内的流型及其转变特性的研究尚不见报道。

本文作者在空气-水回路上实验研究了卧式螺旋管内气液两相流流型及其转变特性,实验段包括一水平直管和螺旋直径与管内径比为 12, 24, 50 三种管圈,都由 $\phi 25 \times 3$ 透明有机玻璃管制成。本实验系统地研究了螺旋直径对转变的影响及圆周角的影响,在实验数据基础上作出了流型图。由力平衡原理,依据连续流动介质中不相溶离散相的形状变化及其运动的稳定性分析,作者提出了分散泡状流动与环状流动转变的理论模型,由此提出了两个准则关系式,以确定在不同流动条件下卧式螺旋管内的流型转换。

二、流型分类及实验结果

卧式螺旋管内气液两相流动现象极其复杂,由于重力及离心力的作用,随着圆周角 θ (即流向)的增加两相流型在不断变化着。同一宏观流动结构(视整个管圈为一整体而言)稳定工况下的不同圆周角位置上的局部流动结构特征也很不相同,因此,从局部特征的观点难以对卧式管圈内的流型作出统一的描述,作者从宏观的角度对卧式螺旋管内气液两相流型作如下分类:

1. 不稳定停滞脉冲流 (USP, unstable pulsed flow)

这是一种周期性脉冲形式出现的流动,类似于但不同于间歇状流,发生在很低的混合物流速下。在这种流动中,脉冲周期内某段时间内,管圈的 $\theta = 180 \sim 300^\circ$ 部分几乎全部由气相占据,而另外一部分 $\theta = -5 \sim 160^\circ$ 则全部由液相充塞,流动近于停滞,当进口工质越聚越多,导致液块后部压力大得足以推动前方液块时,一次脉冲式混合物流动发生,然后又重复如上聚积-冲出过程。

2. 间歇状流 (Intermittent flow)

当混合物流速变高(特别是液相速度要较高)时,液相沿管圈周向成连续状态,而气相呈气弹状以不连续形式随液相流动,或以混块状形式流动。在这种流型中管圈圆周角 $\theta = 0 \sim$

170° 区域内存在液体上升和下降的脉动特征。

3. 环状流 (Annular flow)

液相呈环膜状沿管壁向前流动，高速中心气柱夹带液粒。液膜沿管圈周向和管壁周向都不均匀，并且液膜厚度随流量的变化呈不同的分布。

4. 离散泡状流 (Dispersed bubbly flow)

高液速条件下气相以离散泡状形式分布在连续的液体中，由于离心力的作用，液相一般在管圈外侧流动，而气相则在内侧。在整个离散泡状流动区间，管圈向下流动部分，特别是在圆周角为 $\theta = 180^\circ < \theta < 270^\circ$ 之间，截面含气率显著高于其它部分。

图 1(a)、(b)、(c) 分别示出了在实验数据基础上三个实验管圈的流型图。图中，以气、液两相折算速度为坐标变量。///// 表示实验转变区域；——表示准则方程式计算结果；DB 代表离散泡状流；INT——间歇状流，A——环状流，USP——不稳定停滞脉冲流。从图中可见，流型可分为四个区域、三条转变边界，它们是不稳定停滞脉冲流—间歇状流转变、间歇状流—环状流转变和离散泡状流—间歇状流转变。USP-INT 边界类似在垂直方向的弯刀形带状区域；DB-INT 转变近似为接近垂直的直带域，这意味着这种转变的发生主要取决于液相流速，气速的影响很小。INT-A 边界为一倾斜直带区，在 $u_{LS} < 1.0 \text{ m/s}$ 内，转变气速随液速增加而减小，而当 $u_{LS} \geq 1.0 \text{ m/s}$ 后，转变气速随液速的增加而增加。

实验观察表明：随着流程圆周角 θ 的逐渐增大，流型特征在不断变化，不同圆周角 θ 位置处的转变条件是不同的。随着液速的增加，整个管圈一周上环状流转变的最迟点由 $\theta = 180^\circ$ 向 θ 增大方向移动； $\theta = 0^\circ$ 左右，离散泡状流最难形成；而 USP-INT 转变在 $\theta = 210 \sim 240^\circ$ 区域最难发生。

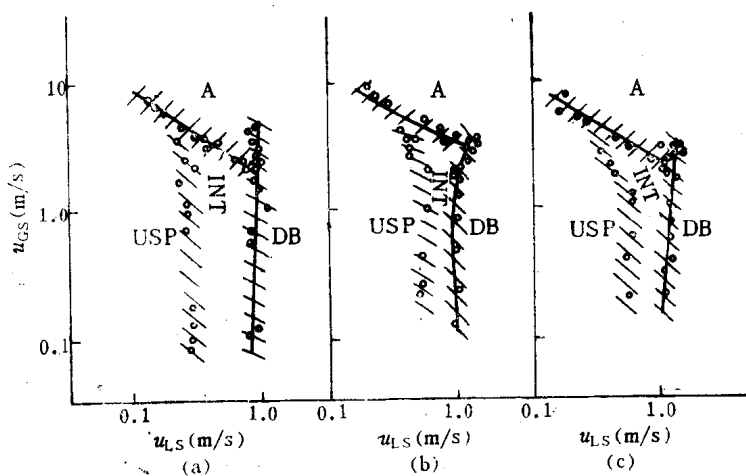


图 1 卧式螺旋管圈流型图

(a) $D/d=12$, (b) $D/d=24$, (c) $D/d=50$

随着螺旋直径的减小，DB-INT 转变液速略有降低；环状流的形成气速也有所减小。USP-INT 转变边界向较小气速、较小液速方向移动，INT 流动区域被扩宽。

从实验结果可见，卧式螺旋管内离散泡状流动发生在较水平直管及立式螺旋管更低的液

速下；环状流的形成也更早，并且受液相速度的影响也较小。作者以为由于重力及离心力的联合作用效果导致的强烈紊动及二次流动加快上述两种流型的形成和稳定。

三、理论分析及流型转变准则

气液界面的不确定性，使得两相流动现象非常复杂。在气液两相流动中，各种流型的发生和转变都是受作用于气液两相介质上的所有力的相互作用及平衡所控制。管内气液两相流动中，作用在流体上的力主要是：惯性力、粘性力、重力和表面张力。螺旋管内离心力的存在使问题更为复杂。前人工作表明：尽管这些力总存在于任何型式两相流动中，但在不同的流型中起主要作用的力还是不同，忽略次要因素。我们可得到反映现象本质特征的简化方程：

1. 离散泡状流转变

液体主流内的强烈紊动是离散泡状流形成的主要条件；表面张力和管内径大小影响离散泡状流的稳定性。这里引入如下两组无量纲数来描述上述两种过程的影响效应：

$$T = Fr_{iw-1}/We_1 = \left\{ \frac{(\rho_c - \rho_g)g \cos \theta \cos \alpha + (\rho_c \cdot u_{1z}^2 - \rho_g \cdot u_{gz}^2)/R}{\sigma/a} \right\}^{-1}$$

$$We_{1w} = \frac{\rho_c(u_{1z}^2 + u_{gz}^2)d}{\sigma}$$

螺旋管内作用于流体介质上的离心力对散泡状流的稳定性有巨大的破坏性，而二次流则强化了离散过程。这里引入 $De_{1z} = (\rho_c u_{1z} \cdot d^3)/(\mu_c \cdot D^3)$ 和 (D/d) 来联合考虑上述两种作用。综合上述过程，对这种转变拟如下准则方程来描述：

$$f_1(T, We_{1w}, De_{1z}, D/d) = u_{1z}/u_{gz} \quad (1)$$

在较高液速下，紊流应力起着破碎和离散气相为小气泡的作用，对一定的紊流强度下离散泡有一最大稳定直径。在螺旋管内，离散泡状流的形成机理与直管内基本相同，只是紊流应力不尽相同。因此，引用 Hinze (6) 的结论，即有：

$$d_{max,z} = K_c \left(\frac{\sigma}{\rho_l} \right)^{3/5} \varepsilon_c^{-2/5} \quad (2)$$

这里， K_c ——适用于螺旋管内方程(2)的常数。

ε_c ——螺旋管内单相质量的能量耗散率，由下式计算，

$$\varepsilon_c = |dp/dx|_{1w} \frac{V_{1w}}{\rho_{1w}} = |dp/dx|_{10} \cdot V_{1w}/\rho_c = 2f_{10,c} \cdot V_{1w}^3/d$$

$$f_{10} = 0.079(\rho_{1c} u_{1z} d/\mu)^{0.2} (D/d)^{0.4}$$

另一方面，流动中又存在气泡的聚合与变形。如果由破裂过程产生的气泡尺寸大得足以允许变形，在 $\alpha = 0.25$ 左右时，聚积过程则导致形成弹块状流动中的具有气弹特征的大泰勒泡，因此气泡的破裂过程强于其聚积的过程而足以避免小气泡的聚积长大的条件，只能是由其破裂与离散过程所产生的气泡尺寸小得足以使气泡不致严重变形。在这种条件下，离散泡状流也必定是稳定的。参考 Brodkey (8,7) 的工作。我们建议，在卧式螺旋管内，保持其

形状基本不变的临界气泡直径为

$$d_{crit_{cg}} = K_{crit_c} |\sigma / ((\rho_l - \rho_g)g \cos \theta \cos \alpha + (\rho_l u_{ls}^2 - \rho_g u_{gs}^2) / R)|^{0.5} \quad (3)$$

作者认为, 当紊流强度所决定的气泡最大稳定直径 d_{max} 小于由于表面张力, 气泡内外压力等所决定的维持形状基本不变的临界直径 d_{crit} 时, 紊流强度足以离散化大于临界直径的气泡而抑制其变形聚合的过程发生, 这时离散泡状流动得以保持。

由 $d_{max_{cg}} \leq d_{crit_{cg}}$ 可得

$$T^{-0.5} De_{ls}^{0.08} We_{lw}^{0.6} \leq K_v \quad (4)$$

根据方程(1)可知, $K_v = K_v(u_{ls}/u_{gs}, D/d)$, 因此, 我们假设 $K_v = A(u_{ls}/u_{gs})^B$ 。

由观察知, 在 $\theta = 0^\circ$ 附近, 离散泡状流最早丧失它的稳定性, 方程(4)展示了与实验观察结果一致的趋势。根据实验数据, 对 $\theta = 0$ 可得离散泡状流的转变准则式, 如下:

$$T^{-0.5} De_{ls}^{0.08} We_{lw}^{0.6} = A(u_{ls}/u_{gs})^B \quad (5)$$

这里, A, B 是与 (D/d) 相关的常数, 如表 1 所示。

(5) 式与实验值吻合良好。

表 1 式(5)中 A、B 系数的值

D/d	A	B	标准误差 SE	相关系数 R	相对误差
12	10.7954	0.6152	0.0742	0.9681	平均 $\leq 20\%$
24	8.3326	0.5877	0.0608	0.9677	最大 ≤ 28.65
50	5.9301	0.5617	0.0480	0.9781	

2. 环状流转变

高速气流克服液相重力效应使液相离散并夹带液粒在管内流动, 表面张力对液膜附壁起稳定作用是环状流的主要特征。螺旋管内离心力与二次流分别起强化与抑制气柱中液粒聚积长大的作用, 引入修正弗鲁德数 $Fr_{lw} = \rho_g \cdot u_{gs}^2 / [d \cdot g(\rho_l - \rho_g) + (d/R)(\rho_l u_{ls}^2 - \rho_g u_{gs}^2) \cos \theta \cos \alpha]$, 韦伯数气相 $We_g = \rho_g u_{gs}^2 d / \sigma$; 气相 Dean 数 $De_g = (\rho_g \cdot u_{gs}^2 \cdot d^3 / \mu_g \cdot D^2)$ 和 (D/d) 四组无量参数来描述上述四种作用。综合 We_g, De 与 (D/d) , 令 $J_g = We_g / De_g (D/d)^2 = \mu_g \cdot V_g / \sigma$, 从而有环状流转变的控制方程如下:

$$f_2(Fr_{lw}, We_g, J_g, D/d) = u_{gs} / u_{ls} \quad (6)$$

由实验数据及力平衡分析, 考虑紊流应力效应, 得如下 $\theta = 0^\circ$ 位置处, 卧式螺旋管内环状流转变条件为

$$Fr_{lw} J_g^{0.5} \left(1 + 0.7 \left(\frac{\mu_l}{\mu_g} \cdot J_g \right)^{0.7} \right)^{-1} We_g \geq \lambda_v \quad (7)$$

$$\lambda_v = \lambda_v(u_{ls}/u_{gs}, D/d)$$

$$= 6.70067 \times 10^3 [(D/d)(38.5 - D/d)^2]^{-1.97211} (u_{gs}/u_{ls})^{1.89848} \quad (8)$$

式(7)和(8)与实验数据吻合良好。

四、结 论

1. 卧式螺旋管内气液两相流型可分类为不稳定停滞脉动流动、间歇状流动、环状流动和离散泡状流动四种类型。在实验观察和实验数据基础上,本文给出了三种管圈的流型图。

2. 卧式螺旋管内气液两相流型随管圈圆周角的增加而逐渐发生变化,在不同的圆周角位置同一种流型转变的条件也不同。

3. 随着螺旋直径的减小,从间歇状流向离散泡状流动的转变发生在略低的液体流速下,环状流形成的气速也更低;对不稳定停滞脉动流与间歇状流的转变边界则向较低气速度和较低流速方向移动,间歇状流动区域变大。

4. 实验结果表明,卧式螺旋管内离散泡状流动和环状流的形成都较之直管及立式螺旋管要早。

5. 根据不相溶离散相在紊流流体中的形状和运动的稳定性分析,由力平衡原理导得了由间歇状流向离散泡状流转变及由间歇状流向环状流转变的准则关系式分别如式(5)、(7),该两式与实验结果符合良好。

6. 实验表明使用电容探针法测量气液两相流型在一定的流速范围内是相当精确可靠的。

参 考 文 献

- [1] 陈学俊,屠传经,螺旋管式蒸汽发生器的流动和传热特性,西安交大科技报告,80~317。
- [2] 张鸣远,螺旋管内气液两相流型转换,硕士论文,西安交大(1982)。
- [3] 周芳德,“螺旋管内空气-水两相流摩擦阻力特性研究”,硕士论文,西安交大(1981)。
- [4] Bergles, A.E., et al. "Two-Phase Flow and Heat Transfer in Power and Process Industries, Hemisphere Publishing Corporation (1981)。
- [5] Weisman, J., et al. "Effect of Fluid Properties and Pipe Diameter on Two-Phase Flow Pattern in Horizontal line", *Int. J. Multiphase Flow*, Vol. 5, pp437~482 (1979)。
- [6] Hinze, J.O., "Fundamentals of the Hydrodynamic Mechanism of Splitting in Dispersion Processes", *AIChE J.*, Vol. 26, pp289 (1955)。
- [7] Taitel, Y., et al. "Modelling Flow Pattern Transitions for Steady Upward Gas-Liquid Flow in Vertical Tubes", *AIChE, J.* Vol. 26, pp365~354 (1980)。
- [8] Brokey, B.S., "The Phenomena of Fluid Motions", Addison-Westley Press (1967)。
- [9] Clift, R., et al. "Bubbles, Drops and Particles" Chapter 12, New York San Francisco London (1978)。
- [10] Sleicher, C.A., "Maxium Stable Drop Size in Turbulent Flow" *AIChE J.*, Vol. 8, pp471~477, (1962)。
- [11] Taitel, Y., et al. "A Model for Predicting Flow Regime Transition in Horizontal

- and Near Horizontal Gas-Liquid Flow" , *AIChE.J.*, Vol.22, pp47~55, (1976)
- [12] Ito, H., "Friction Factors for Turbulent Flow in Curved Pipes" *J.Basic Engng.*,
Trans.ASME.D81, pp123~134 (1959).
- [13] Hewitt, G.F., "Measurement of Two-Phase Flow Parameters" , Academic Press
(1978).

垂直 U 型管沸腾传热特性的改进

陈听宽 贾岫庄

一、引言

垂直 U 型沸腾管在废热锅炉, 蒸汽发生器中有广泛的应用。例如在年产 30 万 t 的大型合成氨装置中, 采用垂直 U 型管废热锅炉回收高温工艺气的热量, 每小时可产生 10.6 MPa 高压蒸汽 180t, 这对提高合成氨装置的经济性具有重要意义。可是, 该锅炉在运行中, 在 U 型管弯管段, 经常发生爆管事故, 严重影响生产的安全性。为了弄清锅炉爆管原因, 作者已经对垂直 U 型管弯管段的传热特性进行了试验研究^[1, 2], 得出在 U 型管弯管段中, 由于受离心力和重力的双重作用, 在刚产生蒸汽的低含气率区, 当质量流速不够大时, 将发生分层流动, 在管子内侧发生传热恶化, 引起壁温飞升。传热恶化的区域从弯管段下行段中部到上行段 15° 间, 而在弯管段底部上游约 15° 处, 飞升值最大。随质量流速增加, 壁温飞升减小; 随热负荷增加, 则飞升值增大; 随含气率增加, 壁温飞升即消失。图 1 示出 $p=10.6\text{MPa}$ 时在不同质量流速和热负荷时的管子内外侧最大壁温差。合成氨废热锅炉原设计的质量流速为 $1200\sim1300\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{s}$, 外圈 U 型管的热负荷约 $300\text{kW}/\text{m}^2$, 因而内侧壁温的飞升值较大, 经常引起爆管事故。

根据作者对垂直 U 型管两相流流型特性的研究^[2], 在低质量流速及低含气率条件下, 两相流处于层状流动, 使弯管段内侧与蒸汽相接触, 得不到水的冷却, 因而传热恶化, 引起壁温飞升。又从汽泡运动规律来看, 在 U 型管下行段, 汽泡受浮力作用, 其方向与流动方向相反, 使汽泡运动速度小于液体速度, 因而汽泡易于积聚在内侧管壁引起壁温飞升。当汽泡

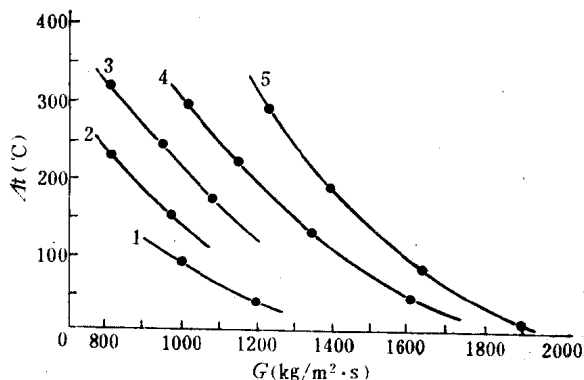


图 1 U 型管壁温飞升时, 管子内外侧最大壁温差与质量流速和热负荷的关系 ($p=10.6\text{MPa}$)

1. $q=80\text{kW}/\text{m}^2$; 2. $q=120\text{kW}/\text{m}^2$; 3. $q=180\text{kW}/\text{m}^2$;

4. $q=250\text{kW}/\text{m}^2$; 5. $q=330\text{kW}/\text{m}^2$.

运动到管子的上行段时, 由于汽泡受浮力作用的方向与流动方向一致, 因而汽泡运动速度快于液体速度, 汽泡不易积聚, 壁温飞升也就消失。在垂直向上或垂直向下的流动中, 当壁面上形成的汽泡长大到一定大小时, 就将脱离壁面进入流体的中心流动, 因而在壁面上有较好的冷却条件。在水平或曲线管中, 由于受重力和离心力的作用, 汽泡偏于管子的上侧和内侧流动, 因而在管子的上侧和内侧容易发生传热恶化。由以上分析可知, 在各种流动方向的管子中, 以微倾斜向下流动的条件最差, 传热恶化最易发生。也正由于此, 所以在垂直 U 型管中, 在下行段接近底部处的传热条件最差, 因而壁温飞升最为严重。

由以上分析，为了改善垂直 U 型管中的传热特性，应设法消除 U 型管中平缓下降的下行段，因而提出采用底部倾斜上升的改进型 U 型管来代替普通的 U 型管结构，以取得改善其传热特性的效果。

二、试验设备与方法

高压水回路试验系统参见文献〔1, 2〕。改进型 U 型管的试验段结构和热电偶布置如图 2 所示。试验管采用 $\phi 25 \times 2\text{mm}$ 不锈钢管，弯管段进口弯头 $R_1/d=3$ ，出口弯头 $R_2/d=6$ 。底部倾斜管段的倾角 18° 。加热段展开长度 2.38m ，与原 U 型管试验相同。试验段前后的直段高度 7.8m 。在实验段外壁 No1~No12 共 12 个截面上共布置 36 对 $\phi 0.2\text{mm}$ 镍铬镍硅热电偶，以测量管壁温度沿管子的分布。每个截面由顶部、底部和侧面三对热电偶组成。

试验过程是在一定的压力、流量和热负荷条件下进行，用逐次增加预热段功率的方法，增加试验段进口工质的焓值，待工况稳定后，通过数据采集系统记录所有数据。试验段工质含气率由热平衡法确定，电加热效率在试验前用欠热水标定。

试验所用的参数为：

压 力 $P(\text{MPa})$	7.5	10	14	
质量流速 $G(\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s})$	500	750	1050	1350
热 负 荷 $q(\text{kW}/\text{m}^2)$	90	260	290	330

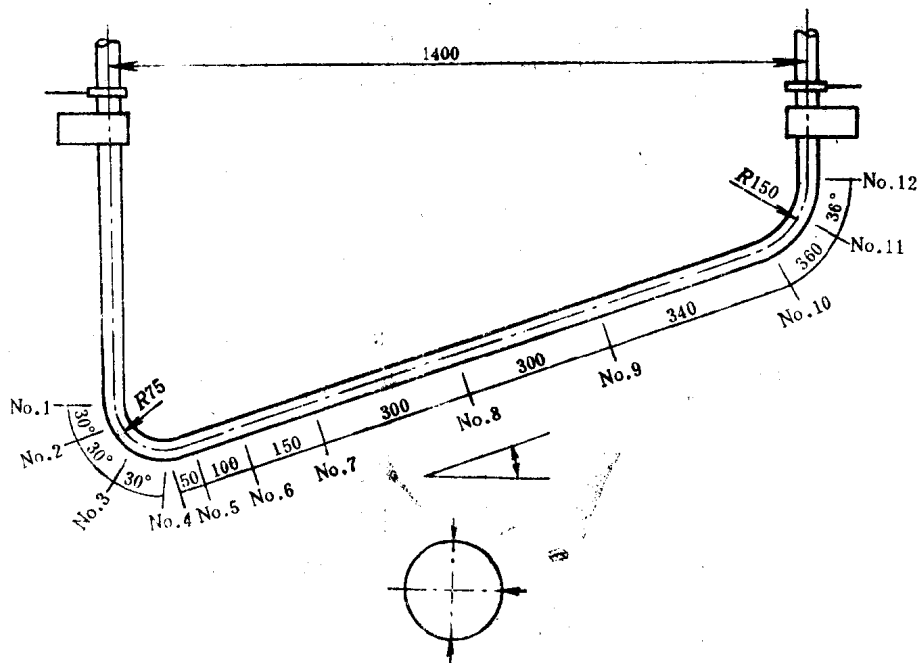


图 2 改进型 U 型管的结构和热电偶布置

三、试验结果

根据试验结果,改进管型的传热特性与原 U 型管相比有很大改善。在低含气率时,在进口端弯头处发生传热恶化的质量流速比 U 型管降低很多。图 3 表示 $P=10\text{MPa}$, $q=330\text{kW/m}^2$ 时不同质量流速下发生传热恶化的壁温分布。由图可见,在质量流速低时,在进口端弯头处发生传热恶化弯头后即逐渐消失。随质量流速增加,壁温飞升减小。当 $G\geq 1050\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ 时,即没有传热恶化,发生。图 4 表示不同热负荷及不同质量流速条件下的管子内外侧最大壁温差,并同时给出 U 型管数据进行比较。可见,改进管型的传热特性比 U 型管的要好得多。如合成氨废热锅炉采用改进管型,则在原设计质量流速 $1200\sim 1300\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ 条件下,不会发生传热恶化的问题,并有足够的安全裕度。

改进型 U 型管的传热特性分进口弯头、倾斜管段和出口弯头三部分。在试验参数范围内,出口弯头均未发生传热恶化。图 5(a) 表示 $P=10\text{MPa}$, $q=330\text{kW/m}^2$ 和 $G=1050\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ 条件下发生传热恶化的特性。由图可见,在低含气率条件下,在进口弯头和倾斜管段均未发生传热恶化。当进口含气率 x_{i1} 增加到 0.17 时,在倾斜管段开始发生传热恶化,即管子上部液膜被汽流撕破,使壁温升高。随含气率的增加,壁温飞升有所增加,而传热恶化区域在截面 8~10 之间,基本上保持不变。当 x_{i1} 增加到 0.4 时,在进口弯头处也发生传热恶化,在弯头后壁温飞升消失,到截面 8 处再度飞升,形成了这种管型特有的温

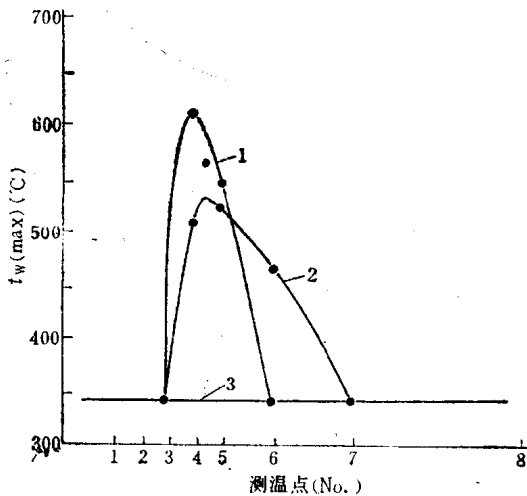


图3 $P=10\text{MPa}$, $q=330\text{kW/m}^2$ 条件下改进型 U 型管进口弯头处不同质量流速时的壁温分布

1. $G=500\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ 2. $G=750\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$
 $x_{\max}=0.08$; $x=0.17$;
 3. $G=1050\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$

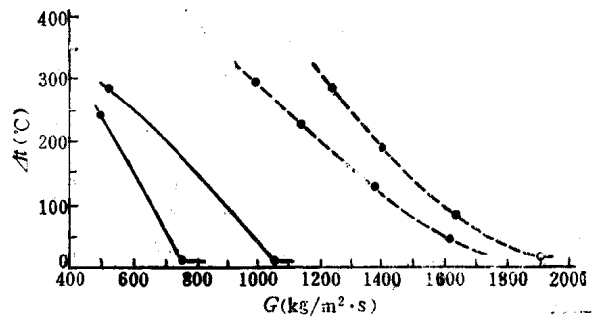


图4 管子内外侧壁温差与质量流速和热负荷的关系($P=10\text{MPa}$)

实线——改进型 U 型管; 虚线——原 U 型管。

1. $q=90\text{kW/m}^2$; 2. $q=260\text{kW/m}^2$;
 3. $q=330\text{kW/m}^2$; 4. $q=80\text{kW/m}^2$;
 5. $q=260\text{kW/m}^2$; 6. $q=330\text{kW/m}^2$ 。