垂直下降管内高压汽、水两相流动及沸腾传热特性研究*

刘尧奇　陈学俊　陈听宽

(西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，西安 710049)

摘　　要

在垂直下降管内，以汽、水两相流为工质，对中压条件下绝热两相流的流型及截面含汽率、高压条件下沸腾两相流的流型及传热恶化特性（诸如传热恶化机理、临界干度、最大壁温飞升值及最小放热系数等）进行试验和理论研究，分析其规律及相互关系．并对中、高压汽水两相流流型(用光导探针、电导探针及压差脉动信号法判别)和截面含汽率(用光导探针、电导探针及快速关闭阀门法测量)的测试方法进行了研究．

关键词：两相流，垂直下降管，流型，截面含汽率，沸腾传热恶化

在垂直下降管内高压汽、水两相流动及沸腾传热广泛应用于锅炉、核反应堆及石油化工等领域的重大设备中，但国际上关于这方面的研究尚很少[1)]，仅有的少量研究工作大多是在低压冷态气液系统中进行的，其试验条件与工程实际情况相差甚远．为了填补这一研究领域的空白，作者等在国家自然科学基金资助下，在高压汽、水两相流系统中，对垂直下降管内绝热两相流的流型及截面含汽率，以及沸腾两相流的流型及传热恶化特性，进行了比较全面的试验和理论研究，同时还研究了有关参数的测试方法．

一、　试验装置及数据获取系统

电加热高压汽、水两相流试验回路如图 1 所示．试验用工质为去离子水，其运行流程如图 1 中箭头所示．试验系统的流量用阀 a 调节，压力用出口节流阀 b 调节，二阀配合调节，可维持系统的压力和流量不变．预热器和受热试验段均用低压大电流交流电以钢管自身为发热元件进行直接电加热．试验过程以稳定其他参数而逐次增加预热器电加热功率，并以逐渐提高试验段 入口工质含汽率的方法进行．

试验参数的测量方法及数据获取系统如图 2 所示．流型用光导纤维探针法、电导探针法

本文 1991 年 3 月 12 日收到，1991 年 6 月 6 日收到修改稿．

* 国家自然科学基金资助项目．

1) 刘尧奇，博士学位论文，西安交通大学，1989．

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

及压差波动信号法判别；含汽率用快速关闭阀门法、光导纤维探针法及电导探针法测量；蒸汽干度用孔板节流法测量[1]，并根据热平衡进行校核计算；流量在单相区用孔板测量；压力用弹簧式精密压力表测量；功率用功率表测量；工质温度用Φ0.5 mm 铠装Cr-Si 热电偶测量；管壁温度用Φ0.2 mm Cr-Si 热电偶测量；压差用压差变送器测量．各参数分别经各种传感器用计算机数据采集系统进行采集．

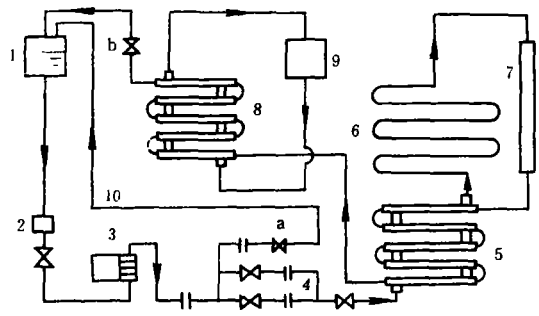

图1 电加热高压汽、水两相流试验回路

(1——水箱，2——过滤器，3——高压柱塞泵，4——流量测量装置，5——再生式换热器，6——预热器，7——试验段，8——冷却器，9——冷却塔，10——流量旁路，a，b——阀门)

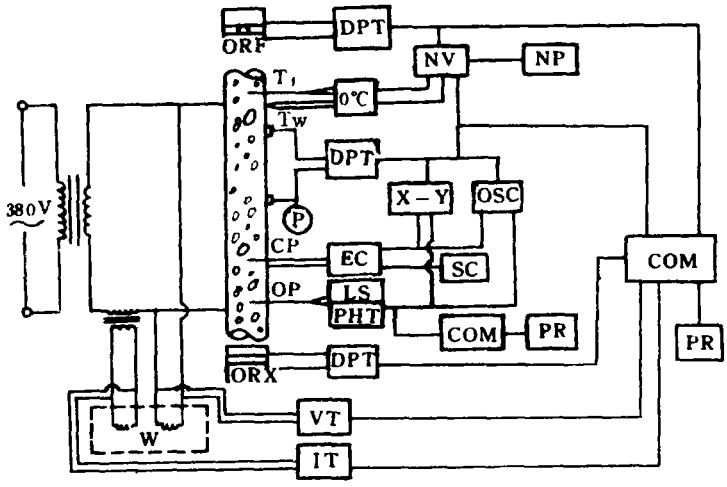

图2 试验数据获取系统

(COM——计算机，CP——电导探针，DPT——差压变送器，EC——测量电路，IT——电流变送器，LS——光源，NP——数字打印机，NV——数字电压表，OP——光导纤维探针，ORF——测流量孔板，ORX——测干度孔板，OSC——示波器，PHT——光电转换器，PR——打印机，P——压力表，SC——屏幕显示器，T_f——测工质温度热电偶，T_w——壁温热电偶，TP——两相流体，VI——电压变送器，W——功率表，X-Y——函数记录仪，0°C——冰点)

二、绝热下降流的流型及截面含汽率

1. 汽、水两相流流型及截面含汽率测试方法

(1)光导纤维探针法　用光导纤维探针对汽、水两相流进行测量，是利用汽相和水相对光的折射率不同．在探针头部由入射光导丝和反射光导丝构成一个角度 β，它应满足[1)]：

$$2\arccos(n_e/n_o)<\beta<2\arccos(n_g/n_o), \tag{1}$$

1)刘尧奇、罗毓珊，第二届全国传感器学术会议论文集，武汉，1988，323—327.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中n_g，n_i和n_o分别为汽相、液相及光导纤维的折射率．因为蒸汽的折射率小于水的折射率，所以角度适当的探头与汽相接触时，入射光就会被反射，经反射光导丝进入光电转换元件；而当探头与水相接触时，入射光透射入流体，光电转换元件接收不到信号．这样，当不同流动结构的汽、水混合物通过探头时，光电转换元件及信号处理电路就会输出不同形式的脉冲信号，分析比较这些信号即可区分不同的流型．把这些信号输入计算机中进行数字化处理，在采样时间内记录通过探针头部的汽泡的个数及时间，并累计汽相通过探针的总时间，与采样时间之比即为含汽率的值[2]．作者用$\beta=90°$角的光导纤维探针在 3MPa 压力下，成功地实现了对垂直下降管内汽、水两相流流型及截面含汽率的测量，这在国内、外尚属首次．

(2) 电导探针法　用电导探针测量汽、水两相流，利用的是蒸汽和水具有不同电导率的特性．水的电导率远远高于蒸汽的导电率，因此当探针头部的正、负电极间被水连接时，电路导通，输出低电位信号；当正、负极间被蒸汽隔开时，电路断开，输出高电位信号．这样，当不同流型的汽、水混合物流过探针时，就会得到不同的脉冲信号，由之可区分不同的流型．在稳定流动情况下，若含汽率一定，则在某采样时间内探针两极间介质的平均电阻为一定值．所以用比例积分等电路对信号进行处理，即可得含汽率的值[2]，其对应关系通过标定确定．

(3) 用快速关闭阀门法测汽、水两相流截面含汽率　在低压冷态的气、液系统中，快速关闭阀门法是对截面含汽率进行测量和标定的常用手段．但在高温高压的汽、水两相流中，由于常规的体积测量或称重无法实现，使快关阀法难以测量截面含汽率．为此，作者开发了一种"液位测量法"，即通过测量关阀后试验段的重位压差计算出液位高度来求取含汽率．如图 3 所示，阀 a，b 关闭后，差压计测得的仅为重位压差，设为 H (mm)，假定测压差段长为 L (mm)，汽、水分离后水柱高度为 x (mm)，则存在如下等式：

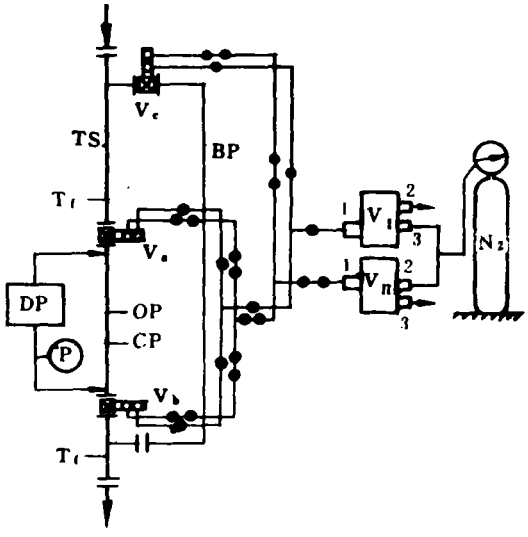

图 3　测含汽率试验段及快关阀试验系统

(—•—气动阀气路 1，—•—•—气动阀气路 2，TS——试验段，BP——旁路，DP——差压计，V_I，V_{II}——三通电磁阀，OP——光导纤维探针，V_a，V_b，V_c，——气动快关阀，CP——电导探针，P——压力表，T_f——铠装热电偶)

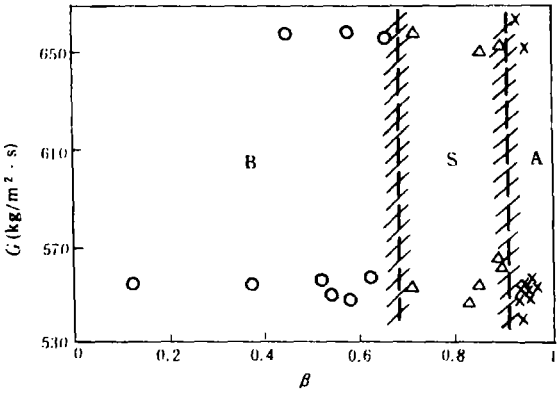

图 4　垂直下降管内绝热汽水两相流流型图

(p=3MPa，D=21mm；B——泡状流，S——弹状流，A——雾环状流)

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

$$\rho_c H=(\rho_c-\rho_g)(L-x)+(\rho_c-\rho_l)x, \tag{2}$$

其中ρ_g, ρ_l 和ρ_c 分别为饱和汽、饱和水及传压管内冷水的密度. 由(2)式可计算得液位高度 x. 假定压差上测点截面距阀a 间及下测点距阀 b 间的管内容积分别为 V_a(mm^3)和 V_b(mm^3), 试验管内经为D(mm), 则平均截面含汽率可由下式求得:

$$\alpha=[(L-x)\pi D^2+V_a]/(L\pi D^2+V_a+V_b), \tag{3}$$

其适用范围为: $V_a/(L\pi D^2+V_a+V_b)<\alpha<(L\pi D^2+V_a)/(L\pi D^2+V_a+V_b)$. 对本文测试系统来说, 适用范围为: $0.0286<\alpha<0.9606$.

2. 绝热下降流的流型

借助于光导纤维探针法和电导探针法,将绝热下降管内汽、水两相流的流型划分为泡状流、弹状流及雾环状流等三种,它们的特征与文献中所述基本相同. 在平均压力$p=3$MPa, 质量流速 $G=540-660$kg/m$^2\cdot$s 及干度$x=0-0.35$ 的条件下,得到了内经为 0.021m 的垂直下降管内绝热汽、水两相流的流型图,以 $G\sim\beta$ 坐标形式示于图 4. 由此可见,在(本文)试验参数范围内,流型之间的转变线可以近似地用容积含汽率的等值线表示,质量流速无明显影响. 泡状流和弹状流及弹状流和雾环状流之间的转变线分别在 $\beta=0.68$ 左右及 $\beta=0.91$ 左右.

3. 绝热下降流截面含汽率

在 3MPa 压力下用光导纤维探针、电导探针及快速关闭阀门法测量了内径为0.021m 的绝热下降管内汽、水两相流的截面含汽率, 其试验结果如图 5 所示. 由之可见,在下降流动中,存在一个临界容积含汽率 β_{cr} ,当$\beta<\beta_{cr}$ 时,截面含汽率大于容积含汽率,即$\alpha>\beta$;而当 $\beta>\beta_{cr}$ 时, 则有$\alpha<\beta$. 根据截面含汽率与容积含汽率的关系(式中 S 为两相滑移率):

$$\alpha=\frac{1}{1+S(1/\beta-1)}. \tag{4}$$

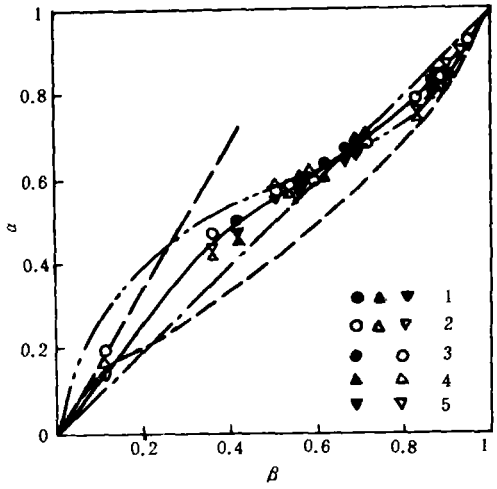

图 5 垂直下降管内绝热汽、水两相流截面含汽率测量结果及与模型的比较
(1 —— $p=3.09$MPa, $G=656.71$ kg/m$^2\cdot$s; 2 —— $p=2.98$MPa, $G=552.96$kg/m$^2\cdot$s; 3 —— 光导探针; 4 —— 电导探针, 5 —— 快速关闭阀门法. —— 本文模型, – – Stalycowaqu 模型(1958), —··— Tikhouenko 模型(1973), – – – – Yamazaki 等模型(1979))

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

上述结果表明，对下降两相流，在低含汽率区，汽速小于水速；而在高含汽率区，汽速则大于水速.

4. 截面含汽率与流型的对应关系

在本文试验条件下，$\beta_{cr}=0.65$ 左右. 考察其在流型图中的位置，不难发现，β_{cr} 刚好是处于流型从泡状流向弹状流转变的区域. 因此，$\beta<\beta_{cr}$ 的区域为泡状流区，此时由于浮力的影响很大，而使下降泡状流中汽相速度小于液相速度，故有 $\alpha>\beta$. 当 $\beta>\beta_{cr}$ 后，流动进入弹状流区和环状流区，此时由于浮力作用减小而惯性力作用占主导地位，使汽相速度大于液相速度，故 $\alpha<\beta$.

另外，试验发现，光导纤维探针和电导探针法只适用于 $\beta<0.85$ 的情况，而 $\beta=0.85$ 刚好处于流型即将从弹状流向环状流过度的区域. 这是因为：两种探针法直接测得的原始值实际上是管子中心处的局部值，当流型处于泡状流和弹状流时，管中心局部含汽率值与截面上平均含汽率值存在一定的对应关系(可通过标定确定)；但随含汽率增大，当流型发展为环状流时，上述对应关系则不复存在.

5. 截面含汽率理论模型

假定汽相速度 w_g. 液相速度 w_l 及局部含汽率 α_y 沿管半径 R 的分布为

$$w_g/w_c=(y/R)^{1/m}, \tag{5}$$

$$w_l/w_c=(y/R)^{1/n}, \tag{6}$$

$$\alpha_g/\alpha_c=(y/R)^{1/l}, \tag{7}$$

其中 w_c 和 α_c 分别为管中心处的速度及局部含汽率，y 为径向上至壁面的距离，m，l 和 n 为分布指数.

通过积分

$$\alpha=\frac{1}{A}\int_A \alpha_y dA, \tag{8}$$

$$\beta=\frac{V_g}{V_g+V_l}=\frac{\int_A w_g\alpha_y dA}{\int_A w_g\alpha_y dA+\int_A w_l(1-\alpha_y)dA}, \tag{9}$$

可推导得绝热汽、水两相流截面含汽率与容积含汽率的关系式如下：

$$\alpha=\frac{2l^2(m+n+mn)(m+n+2mn)}{m^2(l+1)(2l+1)(n+1)(2n+1)}\beta. \tag{10}$$

此式中，当 $m=l$ 时，该模型则简化为Bankoff变密度模型[3].

对于热力学平衡的汽、水两相流动，取分布指数为 F_r 数，压力 p 及容积含汽率 β 的函数，即：

$$m,n,l=f(F_r,p,\beta). \tag{11}$$

考虑到汽、水两相下降流动的约束条件：$\beta\to 1$ 时，$m=l$；$\beta\to 1$ 或 $p\to p_{cr}$ 时，$\alpha/\beta\to 1$，$n\to\infty$；$\beta\to\beta_{cr}$ 时，$\alpha/\beta\to 1$，$m=1$，$n\to\infty$；同时为尽量简化，各分布指数确定为

$$m=l+C_1(1-\beta)^{C_2}(\beta-\beta_{cr})l, \tag{12}$$

$$l=C_3F_r^{C_4}, \tag{13}$$

$$n=\frac{C_5}{(1-\beta^5)(\beta-\beta_{cr})^2}\left(\frac{p}{p_{cr}-p}\right)^{C_6}, \tag{14}$$

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其中 C_1 — C_6 为试验系数. 由试验数据拟合可得,当$\beta>0.3$ 时:

$$C_1=2.1,\ C_2=-0.01,\ C_3=4.2\ ,$$
$$C_4=0.5,\ C_5=2,\ C_6=1\ . \tag{15}$$

当 $\beta\leqslant 0.3$ 时,可直接用下式近似计算截面含汽率:

$$\alpha=1.4\beta\ . \tag{16}$$

β_{cr} 和 F_r 数可用下式计算:

$$\frac{\beta_{cr}}{1-\beta_{cr}}=2.62\left(\frac{G^2}{\rho_l^2 gD}\right)^{-3/8}, \tag{17}$$

$$F_r=\frac{G^2}{\rho_l^2 gD}\left[1+x(\rho_l/\rho_g-1)\right]\ . \tag{18}$$

本模型与试验数据及文献[4 — 6] 的公式比较的结果示于图 5. 由之可见,本模型与试验数据基本吻合,但在低含汽率区,偏低于文献 [4,5] 的公式,而在高含汽率区与文献 [5] 的公式相近.

三、沸腾下降流的流型及传热特性

1. 沸腾下降流的流型

(1)流型的判别　用压差脉动信号法判别两相沸腾流动的流型,其原理是:压差脉动信不同,说明流体对管壁面的作用形式不同,从而反映出不同的流型[1]. 沸腾流动及传热试验段为垂直放置的 $\phi 18\times 3$mm 不锈钢管,加热段长 4.376m,压差测量段长 1.5m,处于加热段的出口段. 压差脉动信号经 1151 电容式压差传感器,用 X·Y 记录仪记录. 在 6.9 — 21.1 MPa 压力范围的试验表明,在 19.6MPa 压力以下,压差脉动信号随干度等参数变化较大,可用以区分流型.

(2)流型划分及定义　(本文)将沸腾管内汽、水两相下降流的流型划分为核沸腾泡状流、平稳环状流、波环状流、"溪状流"、弥散液滴状流及强混弥散状流"等七种, 其中,"溪状流"和"强混弥散状流"是作者新发现并定义的两种沸腾流动所特有的流型. 这里着重介绍以下几种流型:

1)核沸腾泡状流　此种泡状流以壁面上的核态沸腾为主要特征之一,对应的压差信号是高频小振幅脉动(由于壁面上大量汽泡产生并脱离所致),故作者称之为核沸腾泡状流.

2)"溪状流"　这种特殊的流型出现在第二类传热恶化(干涸)发生之后,此时壁面上的液膜被部分地蒸干或被高速汽流撕裂,形成一条条"小溪流",反映在壁面上呈现波动的液膜,故作者称之为"溪状流".

3)"强混弥散状流"　发生在高干度的弥散液滴状流区,当受热壁面附近形成过热度很高的蒸汽层时,使管中心区液滴与壁面过热蒸汽层间形成很大的质扩散梯度,在壁面附近发生强烈的质交换(蒸发、混合),并引起流体强烈的端动. 因此,称这种流型为"强混弥散状流".

1)刘尧奇、陈听宽、陈学俊,第三届全国多相流、非牛顿流、物理化学流学术会议文集,杭州,1990,56 — 57.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

（3）流型图及讨论　（本文）在质量流速 800 — 2000kg/m²·s，外壁热负荷 220 — 460 kW/m²，工质干度0 — 1的范围内，获得了压力分别为6.9，9.8，12.7，14.7，15.7，17.2，18.1 及19.6MPa 时，内径为12mm 的垂直下降管内汽、水两相沸腾流动的流型图．作为例子将 14.7MPa 压力下的流型图示于图 6．试验结果表明，质量流速及热负荷对流型的转

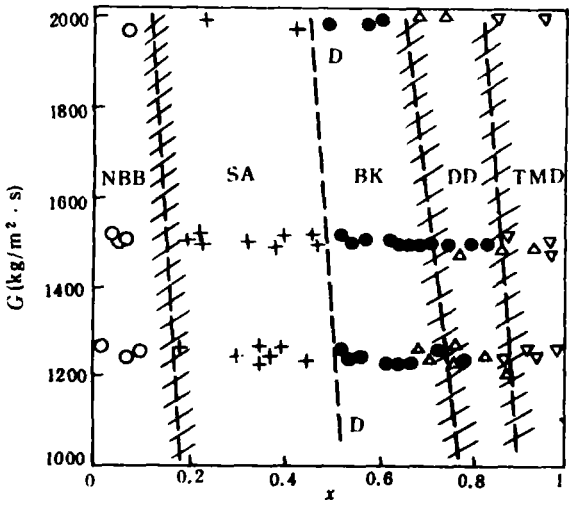

图 6　p=14.7MPa 时垂直下降沸腾管内汽水两相流流型图

（NBB —— 核沸腾泡状流，SA —— 平稳环状流，Bk —— 溪状流，DD —— 弥散液滴状流，TMD —— 强混弥散状流）

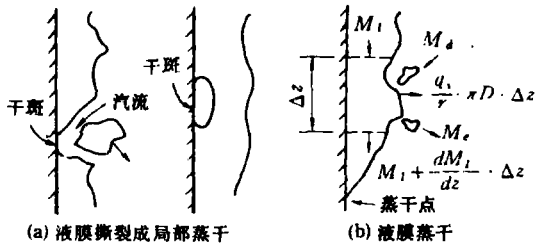

图 7　垂直下降沸腾管内传热恶化发生的机理

变有一定影响，一般随它们增大，各种流型的转变均提前．但影响最大的是压力，不同压力下具有不同的流型图．一般随压力增加，核沸腾泡状流区域逐渐减少；平稳环状流区域逐渐扩大；弥散液滴状流区域逐渐减小，到 17.2MPa 压力即基本消失；"强混弥散状流"在 12.7MPa 压力以上才出现；"溪状流"只存在于 9.8 — 15.7MPa 压力范围（图中D-D 线根据壁温飞升情况确定，它代表此时压力测量段的大部分地区管壁内已发生干涸）．

2. 沸腾传热恶化机理及其与流型转变的关系

在本文试验条件下所发生的传热恶化均属于第二类传 热恶化．根据壁温飞升现象的分析，作者认为在垂直下降沸腾管中，干涸型传热恶化的发生有两种机理（图 7），一种是液膜被局部撕裂或蒸干，它发生在液膜较厚的环状流区，由于管中心高速蒸汽流对壁面液膜的冲刷和夹带，或大汽团在液膜下形成及脱离，壁面上即可能形成干斑．但随后干斑可能被液膜覆盖和再形成，所以其特征是对应于壁温呈现波动飞升．这种情况下起主要作用的是本身的动力学行为，发生的干度较低，对应于流型向"溪状流"转变．

另一种是液膜完全蒸干．在蒸发、夹带和沉积的综合作用下，当环状流发展到一定程度时，壁面上的液膜就会被完全蒸干，从而使壁温发生飞升．它发生在比前一种情况高的干度下，此时起主要作用的是热力学行为和传热特性，对应于流型向弥散液滴状流转变．

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

3. 沸腾传热恶化特性

在 13 种压力(3 — 22.6MPa)、4种质量流速(800 — 2000kg/ m^2·s)及5 种热负荷(外壁热负荷 q_o = 220 — 460 kw/m_2)的共74 个工况下,对垂直下降沸腾管传热恶化特性进行了全面研究.

(1) 临界干度　试验发现,当管内工质干度达到某一值——临界干度时,壁温即发生飞升. 不过壁温飞升起始点的位置是不确定的,尤其是当压力较高时,它可能在试验段的任何地方[7]. 临界干度与各参数的关系比较复杂,特别是压力的影响很大,以 G = 1200kg/ m^2·s 时的情况为例示于图8. 这表明,在不同压力下发生传热恶化的迟早是不相同的. 质量流速和热负

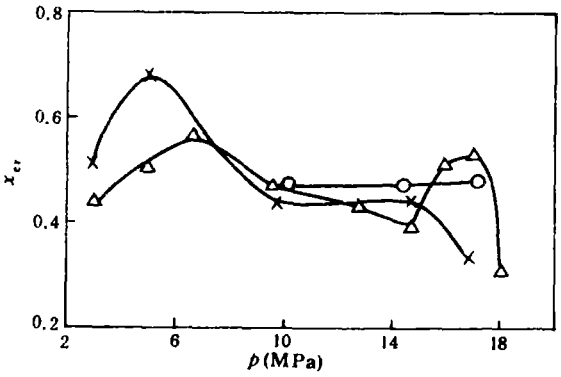

图 8. 临界干度与压力的关系
(G = 1200kg/ m^2·s、O —— q_i = 340kW/ m^2, x——q_i = 400kW/ m^2, Δ ——q_i = 480kW/m^2)

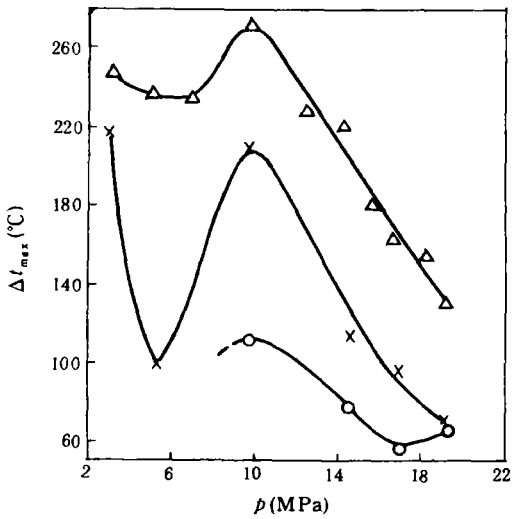

图 9　壁温飞升峰值与压力的关系
(G = 1200kg/ m^2·s. O —— g_i = 340kW/ m^2、X —— q_i = 340kW/ m^2, Δ —— q_i = 480kW/ m^2)

荷的影响稍规律一些,在大多数情况下,临界干度随质量流速和热负荷的增加而减小. 根据上述关系及试验数据,作者对临界干度 x_{cr} 提出如下关联式:

$$x_{cr} = 152.65G^{-0.33}q_i^{-0.125}\exp(-0.01758p/p_{cr}). \tag{19}$$

此式适用范围为: p = 5 — 18.5MPa, G = 800 — 2000 kg/ m^2. s, q_i = 320 — 700kW/ m^2, D = 12mm.

(2) 壁温飞升峰值及其对应干度　在发生传热恶化后,当进一步提高干度或热负荷时,壁温飞升会在某处出现峰值,其位置一般与壁温飞升起始点相对应. 壁温飞升峰值对应的干度 x_{max} 与临界干度 x_{cr} 大体上存在如下关系:

$$x_{mas} = x_{cr} + 0.05 . \tag{20}$$

壁温飞升峰值与各参数的关系亦比较复杂, 尤其是与压力的关系. 以 G = 1200kg/ m^2·s 时的情况为例示于图9. 结合临界干度与压力的关系(图 8), 可以得出如下结论: 在 5 — 7MPa 压力范围附近,下降管沸腾传热比较安全;而 3MPa 和 10MPa 压力附近是两个易于发生传热

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

恶化的危险压力区；10MPa 压力以上，随压力升高沸腾传热特性逐渐改善．质量流速和热负荷对壁温飞升峰值的影响是单调的，随质量流速的增大或热负荷的减小，壁温飞升峰值总是降低的．根据上述关系及试验数据，作者对壁温飞升峰值 Δt_{max} 提出如下关联式：

$$\Delta t_{max} = (620 - 0.26G) \times 10^{-3} q_i^{1.01} \exp(-2.545\, p/p_{cr}), \tag{21}$$

该式适用范围与(19)式相同．式中 Δt_{max} 为内壁温飞升峰值与工质饱和温度之差．

(3)最小传热系数　传热恶化发生后，当壁温飞升达到峰值时，传热系数为最小值 α_{min} 可用下式确定：

$$\alpha_{min} = q_i / \Delta t_{max} = \frac{1000}{620 - 0.26G} q_i^{-0.01} \exp(2.545 p/p_{cr}). \tag{22}$$

因此，压力和质量流速对 α_{min} 的影响趋势刚好与它们对 Δt_{max} 的影响趋势相反．热负荷增大，α_{min} 是减小的．(22)式的适用范围同(19)式．

四、主要结论

1．首次成功地将光导纤维探针应用于中压汽、水两相流流型及截面含汽率的测量．同时也成功地应用了电导探针技术．提出“液位测量法”，解决了快速关闭阀门法应用于高压汽、水两相流截面含汽率测量的技术难点．

绝热下降流的流型可划分为泡状流、弹状流和雾环状流 3 种．3MPa 压力下，流型之间的转变线可以近似地用容积含汽率的等值线表示．

在低含汽率区，绝热下降流截面含汽率大于容积含汽率；在高含汽率区，截面含汽率小于容积含汽率，其转变的区域大致上处于流型从泡状流向弹状流过渡的区域．建立了一个二维二速度含汽率模型．

2．压差脉动信号法可判别压力小于 19.6MPa 时汽、水两相沸腾流动的流型．

沸腾下降流的流型可划分为核沸腾泡状流、平稳环状流、波环状流、“溪状流”，弥散液滴状流及“强混弥散状流”等 6 种，其中“溪状流”和“强混弥散状流是作者新发现并定义的两种沸腾流动特有的流型．压力对流型出现的特性及转变的规律有很大的影响．

3．沸腾下降管中干涸型传热恶化的发生有液膜撕裂或局部蒸干以及液膜完全蒸干两种机理，它们分别对应于流型从环状流向“溪状流”和弥散液滴状流的转变．

压力对沸腾传热恶化特性有很大影响．在 5— 7MPa 压力范围附近，下降管沸腾传热比较安全；3MPa 和 10MPa 压力附近是处于发生传热恶化的危险压力区；10MPa 压力以上，随压力升高，沸腾传热特性逐渐改善．质量流速和热负荷也有一定影响，在大多数情况下，质量流速降低或热负荷增加，使传热恶化提前发生，壁温飞升峰值增加．

提出了可适用于 5— 18.5MPa 压力范围的垂直下降沸腾管临界干度、壁温飞升峰值及其对应干度以及最小放热系数的预报公式．

参　考　文　献

[1]　Liu yao-Qi, Chen Ting-Kuan & Chen Xue-Jun, in *Multiphase Flow and Heat Transfer* (Eds. Chen Xue-Jun et al.), Hemisphere, Washington, D.C., 1991, 1349— 1355.

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[2] 刘尧奇等，工程热物理论文集，西安交通大学出版社，1990，427—430.
[3] Bankoff, S. G., *ASME Ser. C*, **82** (1960), 265—272.
[4] Stalycowagu, M. A., *Boiler Units*, National Power Press, Moscow, 1958.
[5] Tikhonenko, L. K., in *Achievements in Research of Herat Transfer and Hydraulics of Two-Phase-Flow in Power Generating Equipment*, Science, Moscow, 1973, 109—119.
[6] Yamazaki, Y. & Yamaguchi, K., *J. Nucl. Sci. Tech.*, **16** (1979), 245—255.
[7] 陈听宽、刘尧奇、陈学俊，工程热物理学报，**12** (1991).

?1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net