

螺旋管内高压汽水两相流动沸腾 干涸点的研究

毛宇飞^{1,2} 郭烈锦¹ 白博峰¹ 甄飞强¹ 郭萌¹

(1. 西安交通大学多相流国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 河海大学机电工程学院, 江苏 常州 213022)

摘要 在较宽的实验参数范围内 (系统压力 $P = 8 \sim 15$ MPa, 质量流速 $G = 800 \sim 1800$ kg·m⁻²·s⁻¹, 壁面热流密度 $q_w = 200 \sim 950$ kW·m⁻²) 对一立式螺旋管内 (管内径为 10 mm, 螺旋直径为 300 mm, 节距为 50 mm) 汽水两相流动沸腾干涸特性进行了实验研究。通过研究, 获得了干涸发生时螺旋管圈壁温的分布特征以及压力、质量流速和壁面热流密度这三个参数对临界干度的影响规律。同时在实验数据的基础上, 提出了一个适用于计算螺旋管内高压高含汽率工况下汽水两相流临界干度的经验关系式。

关键词 螺旋管; 汽水两相流; 干涸; 临界干度

中图分类号: O359.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-231X(2011)07-1145-04

Experimental Investigation on the Dryout Point for Two-Phase Flow Boiling of Steam-Water at High Pressures in Helical Coils

MAO Yu-Fei^{1,2} GUO Lie-Jin¹ BAI Bo-Feng¹ ZHEN Fei-Qiang¹ GUO Meng¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

Abstract The dryout characteristics of flow boiling of steam-water mixtures were experimentally studied in a vertically-oriented helically-coiled tube, which was constructed of a 10 mm ID stainless steel tube with the coil diameter of 300 mm and the pitch of 50 mm. Experiments were performed in wide ranges of system pressure 8~15 MPa, mass velocity 800~1800 kg·m⁻²·s⁻¹ and wall heat flux 200~950 kW·m⁻². The wall temperature distribution of the helical coils in the zone where dryout occurred was obtained, and the effects of pressure, mass velocity and wall heat flux on the critical quality were systematically investigated. Based on the experimental data, a new correlation for the prediction of the critical quality of steam-water two-phase flow boiling in helical coils at high pressures was proposed.

Key words helical coils; steam-water two-phase flow; dryout; critical quality

0 引言

临界热流密度 (CHF) 现象是两相沸腾传热中的一个重要课题, 直接影响到换热设备的安全性和经济性。在管内流动沸腾中, 主要存在两种类型的临界热流密度现象: 偏离核态沸腾和干涸。偏离核态沸腾发生在过冷沸腾区和低干度的饱和沸腾区; 而当工质干度较高时, 流动处于环状流区域, 在一定的参数条件下, 管壁表面液膜会完全蒸干, 从而产生干涸型临界热流密度现象, 干涸点即为开始产生这一现象的特征点。

迄今国内外学者对管内流动沸腾的干涸现象已进行了大量的研究工作, 研究以实验为主, 并主

要针对直管。在工程实际中, 螺旋管由于其传热性能好、布置紧凑及热膨胀自由等优点而得到了广泛应用。螺旋管内干涸点的形成机理和特点比普通直管更为复杂, 但目前针对螺旋管内汽水两相流流动沸腾干涸特性的研究^[1~4] 尚不充分, 特别是对高压汽水两相流, 在一些参数范围内仍然缺乏足够的技术支持。本文在较宽的参数范围内对一立式螺旋管内汽水两相流动沸腾干涸特性进行了实验研究。

1 实验系统和方法

实验是在西安交通大学动力工程多相流国家重

收稿日期: 2011-01-19; 修订日期: 2011-06-10

基金项目: 国家自然科学基金会创新研究群体科学基金项目 (No.50821064)

作者简介: 毛宇飞 (1979-), 男, 江苏宜兴人, 讲师, 博士, 主要从事超临界流体传热与管内汽液两相流的研究。

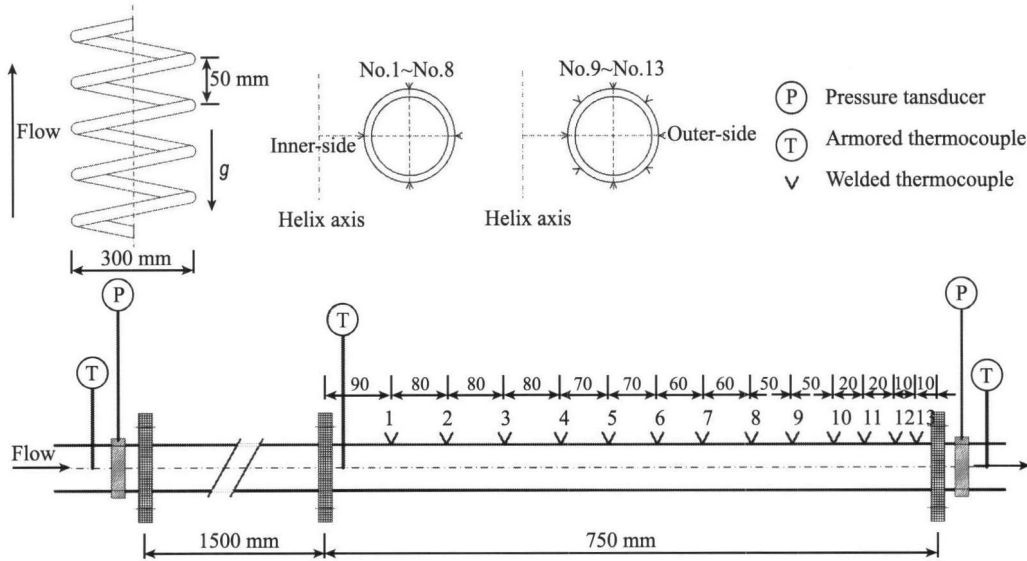


图 1 干涸实验段结构及测点布置图
Fig. 1 Schematic diagram of test section and thermocouple layout

点实验室超临界水流动传热实验平台上进行的，该实验系统的相关介绍见文献 [5]。

螺旋管实验段由 $\phi 14 \times 2$ mm (管内径 $d = 10$ mm) 的不锈钢管弯制而成，其螺旋直径 D 为 300 mm，节距为 50 mm。实验段总长 15 m，共布置有两个加热段。按流向在前面的加热段长度为 7.5 m，加热功率为 100 kW，在本实验中也作为预热段；第二个加热段长 2.25 m (前段长 1.5 m，后段长 0.75 m)，加热功率为 50 kW，该加热段的结构及相关测点布置如图 1 所示。第二加热段的后段即为干涸实验段，在该段 13 个截面上共布置有 72 个壁温测点，其中 No.1~No.8 截面每截面布置 4 个测点，No.9~No.13 截面每截面布置 8 个测点。

实验中工质的流量采用 ST3000 型智能压差变送器配合锐边孔板来测量；压力由安装在实验段进出口的 ST3000 型智能压力变送器测量；电加热功率由测得的电压和电流的有效值计算得到；工质温度采用 $\phi 3$ mm 的 NiCr-NiSi 铠装热电偶测量，电加热段的外壁温度采用 $\phi 0.5$ mm 的 NiCr-NiSi 热电偶丝测量。所有的测量参数的输出信号均由 IMP 3595 分散式采集系统自动采集，并输入计算机内进行显示、计算和存储。

在均匀加热工况下，临界热流现象总是出现在流道出口。实验过程中固定加热段热负荷，逐步增加预热段加热功率，提高工质的入口焓值，观察管圈出口附近的壁温是否发生飞升，若壁温飞升值超过 20°C ，即认为发生了干涸现象，干涸点处的工质干度根据热平衡估算得到。实验参数范围为：压力 $P = 8 \sim 15$ MPa，质量流速 $G = 800 \sim 1800$

$\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ，壁面热流密度 $q_w = 200 \sim 950 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

2 实验结果与分析

2.1 壁温分布特性

螺旋管内干涸点最早产生的位置由汽相受到的浮升力和汽液两相受到的离心力的大小来决定。本文所进行的实验工况均为质量流速较高的工况，故离心力为主要作用力，实验中总是观察到干涸现象首先在管圈内侧处产生。干涸发生时实施瞬态采集以记录壁温随时间的变化特性。图 2 给出了某一干涸工况时 ($P = 15$ MPa, $G = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, $q_w = 320 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$) 出口截面处壁温的分布特性。由图可知，管圈内侧壁面处的液膜首先被蒸干发生干涸，并从截面内侧半圈迅速扩展至外侧半圈；随着截面液

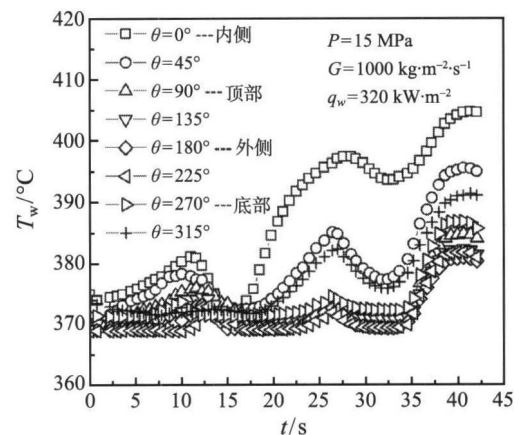


图 2 干涸时出口截面壁温分布特性
Fig. 2 Wall temperature distribution at the exit of the test section where dryout occurs

膜完全蒸干,整个截面的壁温全体飞升,其中管圈内侧的飞升幅度最大,与内侧上下相邻 45° 处的飞升幅度其次,顶部和底部的飞升幅度再其次,外侧及其上下相邻 45° 处的飞升幅度最小。由于螺旋管内二次回流使液膜产生周向运动,汽相和液相交替接触壁面,因此形成间歇性的干涸-湿润-干涸现象,壁温随时间出现剧烈波动。

2.2 影响因素分析

对于环状流动中由于液膜蒸干而引起的干涸点型 CHF 现象,通常采用临界干度 x_{cr} 作为其特性参数。本文在实验中主要研究了压力、质量流速和壁面热流密度这三个控制参量对螺旋管内汽水两相流动沸腾干涸点临界干度的影响规律。

图 3 显示了压力对临界干度的影响。实验表明,在其它参数一定的条件下,随着压力的升高,临界干度呈下降趋势,这与直管的实验结论相一致。压力是通过改变流体物性来影响临界干度。随着压力的提高,饱和水的密度减小,汽流扰动对液膜的影响增加,同时表面张力也减小,降低了液膜的维持能力,使得液膜的稳定性降低而易于被撕破,造成临界干度的减小。此外,压力增大时,工质汽化潜热减小,液膜蒸发所带走的热量更小,这会造成液膜的温度上升,也对抑制传热恶化不利。

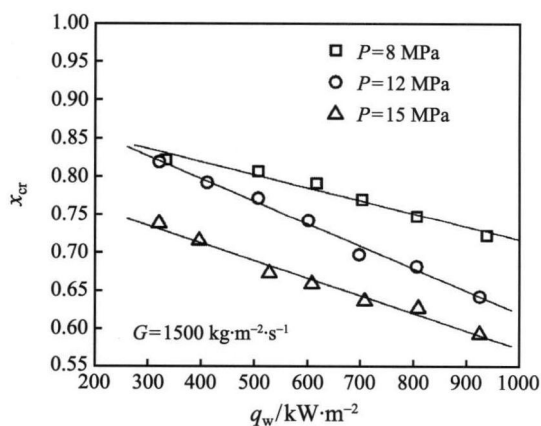


图 3 压力对临界干度的影响

Fig. 3 Effect of pressure on critical quality

目前,关于质量流速对螺旋管内流动沸腾干涸特性的影响尚存在争议。一些学者^[1,2]认为临界干度总是随质量流速的增大而增大;而另一些学者^[3,4]则认为存在一个质量流速的临界值,低于该值时,临界干度随质量流速的增大而增大,而高于该临界值时,临界干度随质量流速的增大而减小。本文的实验结果(如图 4 所示)趋向于后一种结论,这个临界质量流速约为 $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

在环状流区域,传热恶化主要是由于液膜不断蒸发而变薄、最后蒸干引起的。对于螺旋管,一般认为影响液膜蒸干的主要机理有:液滴沉积、液滴夹带、液膜气化和液膜再分布(由二次流引起)。在质量流速小于临界质量流速的范围内,质量流速的增大会使得离心力增大,这会同时使得液滴沉积率和二次流作用的增强,有利于传热恶化的抑制,虽然这个时候汽相速度增大会造成液滴夹带量的上升,但这个影响不占主导地位,因此临界干度增大。当质量流速进一步增大,汽芯的动能增大,能够夹带的液滴数量增加,同时使得壁面液膜的卷吸现象变得剧烈,液膜的减薄速度增加;同时离心力的增大使气液两相分离的作用也增大,使内侧的液膜厚度变薄。因此,当质量流速高于一定值时,干涸点临界干度随质量流速的增大而减小。

从图 3 和图 4 还可看出,临界干度总是随着壁面热流密度的增大而减小,这是因为热流密度增大会加大蒸汽自液膜带走液体的量,使液膜更容易蒸干,并且使得干涸发生时壁温飞升的幅度更大。

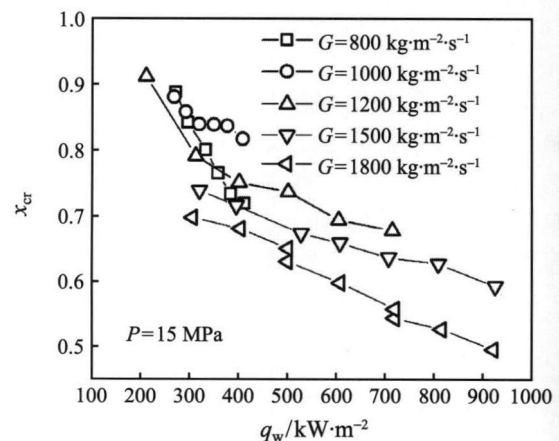


图 4 质量流速对临界干度的影响

Fig. 4 Effect of mass velocity on critical quality

2.3 临界干度计算关系式

以临界干度作为干涸点的特性参数,在对实验数据的拟合过程中考虑压力、质量流速和壁面热流密度对临界干度的影响,而这三个参数的影响采用饱和液相汽相密度比 ρ_f/ρ_g 、蒸汽 Reynolds 数 Re_g 和沸腾数 Bo 这三个无量纲量来反映。采用多元线性回归的方法对实验数据进行分析,得到如下临界干度的计算关系式:

当质量流速 G 低于 $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时:

$$x_{cr} = 0.052Bo^{-0.208}Re_g^{0.071}(\rho_f/\rho_g)^{0.110} \quad (1)$$

当质量流速 G 高于 $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时:

$$x_{cr} = 450Bo^{-0.225}Re_g^{-0.651}(\rho_f/\rho_g)^{0.226} \quad (2)$$

式 (1)、(2) 中 $Re_g = Gd/\mu_g$ (μ_g 为饱和蒸汽动力黏性系数), $Bo = q_w/(G \cdot h_{fg})$; 该关系式共关联了 61 个干涸点, 其计算值与相应实验值的比较如图 5 所示, 所有数据点的偏差均落在 $\pm 10\%$ 以内, 平均偏差为 2.73%.

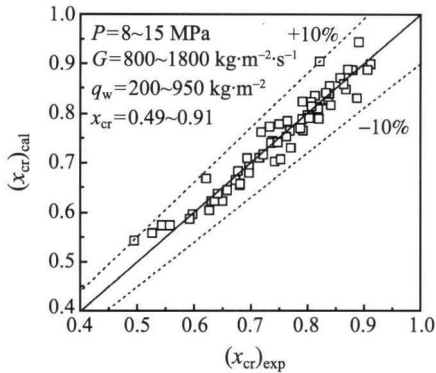


图 5 本文关系式计算值与实验数据的比较
Fig. 5 Comparison of present correlation with experimental results

Berthoud^[4] 把螺旋管内流动沸腾过程中发生的干涸工况按其产生机理分成三类: 重力影响区、沉积影响区和夹带影响区。本文的实验工况均处于沉积影响区, 该区域内 Berthoud 关系式的计算值与本文实验数据的比较如图 6 所示, 由图可知, 几乎所有数

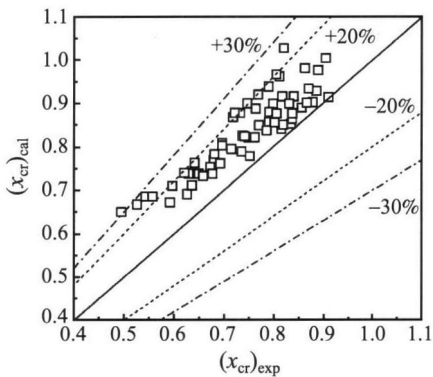


图 6 Berthoud 关系式计算值与本文实验数据的比较
Fig. 6 Comparison of Berthoud correlation with present experimental results

据点的偏差均在 30% 范围内, 其中大部分在 20% 范围内, 只是计算值均偏高实验值, 这可能是因为 Berthoud 关系式所验证的原始实验数据主要针对压力不是很高的工况, 而本文的实验采用了相对较高的压力。

3 结 论

通过对螺旋管内高压汽水两相流动沸腾干涸点的实验研究, 得出以下主要结论:

(1) 流动沸腾过程中因液膜干涸而发生传热恶化时, 壁温飞升首先出现在管圈内侧处, 然后迅速扩展至整个管圈截面; 内侧半圈的壁温飞升幅度高于外侧半圈, 内侧处的壁温飞升值最大; 壁温随时间出现剧烈波动。

(2) 实验结果表明, 干涸点的临界干度随壁面热流密度和压力的增大而减小; 且存在一个临界质量流速值 (约为 $1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), 低于该临界值, 临界干度随质量流速的增大而增大, 高于该临界值, 临界干度随质量流速的增大而减小。

(3) 基于实验数据, 提出了一个新的适用于计算螺旋管内高压汽水两相流动沸腾临界干度的经验关系式。

参 考 文 献

- [1] Cumo M, Farello G E, Ferrari G. The Influence of Curvature in Post Dry-Out Heat Transfer [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1972, 15(11): 2045-2062
- [2] 毕勤成, 陈昕宽, 田永生, 等. 螺旋管内高压汽水两相流传热恶化规律的研究 [J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(5): 30-35
BI Qingcheng, CHEN Tingkuang, TIAN Yongsheng, et al. Study on Critical Heat Flux of Steam-Water Two-Phase Flow in Helical Coil Tubes [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(5): 30-35
- [3] Jensen M K, Bergles A E. Boiling Heat Transfer and Critical Heat Flux in Helically Coiled Tubes [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1981, 103(4): 660-666
- [4] Berthoud G, Jayanti S. Characterization of Dryout in Helical Coils [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1990, 33(7): 1451-1463
- [5] MAO Yufei, GUO Liejin, BAI Bofeng, et al. Convective Heat Transfer in Helical Coils for Constant-Property and Variable-Property Flows with High Reynolds Numbers [J]. Frontiers of Energy and Power Engineering in China, 2010, 4(4): 546-552