

螺旋管内气液两相流动和传热特性的研究

周芳德 指导教师 陈学俊教授

(工程热物理研究所、能源与动力工程系)

螺旋管式换热器和蒸汽发生器已经在动力、核电站、化工、石油等工程领域里得到广泛的应用,成为一种十分重要的传热设备。螺旋管式换热器,由于其本身结构、流动和传热特点,已愈来愈受到人们的重视。为了对螺旋管式换热器和蒸汽发生器提供正确的设计和计算方法,需要对气液两相在螺旋管内的流动和传热进行深入研究。目前,对于以工程应用为目的、以高压蒸汽—水系统为对象的研究工作还十分少,缺乏供工程实际应用的试验数据,对于气液两相在螺旋管内流动和传热特性以及机理的了解也很不够。

本文分五个方面对螺旋管内气液两相流动和传热特性进行理论分析和试验研究。

主题词: 两相流动; 传热; 螺旋焊管

中国图书资料分类法分类号: TK172

1 螺旋管内气液两相流动的二次回流

在螺旋管内,两相流体和单相流体一样,除了轴向流动外,还要产生和轴向垂直的涡旋流动,称为二次回流。本文假定气相在管子中心部分流动,其形状为圆柱形,液体以液膜形式在气体外层流动;同时,假定流动是稳定的,气液交界面光滑。根据上述假定,导出无量纲三维流动方程,并引入两相 D 数,应用摄动方法求解。由于本文假定气液两相为分相流动,则运动的控制方程为两个八阶微分方程组。根据实际流动情况,得到十六个边界条件。解得的结果表明,离心力使气液两相部分分别形成两个对称的二次回流。气相和液相的二次回流速度和轴向速度相比都十分小。计算结果得到了实验的证实。实验是用多普勒激光测速仪进行的,测量螺旋管内气液两相流动时的液膜流动速度,试验工质为空气—水混合物。螺旋管试验段内径为 25mm,曲率直径为 480mm。实验数据表明,液相二次回流速度比轴向速度小 1—2 个数量级。试验结果也表明,在上述假设条件下得到的螺旋管内液相、气相均为层流时的理论解是合理的,也是可信的。

本文收到日期: 1986-07-05

2 螺旋管内截面含气率

本文根据Zuber和Wallis的漂移流率模型,导出螺旋管内截面含气率的关系式。在螺旋管圈内,气液两相混合物受到离心力的作用,使管道中心轴线外侧流体的速度高于内侧流体的速度。由于密度差,气相受到的离心力小于液相受到的离心力,使得气相一般集聚在中心轴线内侧流动,其结果造成局部含气率和流体的速度在通道截面上的分布不均匀,它们的分布是非轴对称的。通道内的流动分布参数由局部含气率和流动速度分布指数来决定。

本文应用三种测量方法,测量了以空气-水和蒸汽-水为工质的螺旋管内平均截面含气率。其目的是为了检验测试的可靠性。测量方法为快速关闭阀门法、电容法和 γ -射线衰减法。应用 γ -射线衰减法测量了高压下蒸汽-水平均截面含气率,当压力升高,在同样的容积含气率下,平均截面含气率增加,这种变化趋势和水平管内的相类似。

3 水平管和螺旋管内两相摩擦阻力

两相流体摩擦阻力是管内气液两相流动中最基本也是最重要的问题。目前已有的计算式的计算结果和实验数据相比,相差很大。已有的试验数据大部分是在不加热条件和绝热气液双组份两相条件下得到的。对于加热条件下以及高压下蒸汽-水两相摩擦阻力的研究还十分缺少。由于螺旋管内的两相摩擦阻力特性和水平管较为类似,本文同时对水平管内两相摩擦阻力进行了试验研究,以作比较。

本文假定螺旋管内气液两相流动是稳定流动,在通道截面上的任一点,气液两相具有相同的速度,该点的截面含气率和速度分布服从指数分布,流体的物性取决于流体所处截面上的位置。在这些条件下,对流体参数进行加权平均,最后得到以两相摩擦因子形式来表达的摩擦阻力计算关系式。试验是在高压水回路上进行的。试验段为三种不同曲率直径的螺旋管圈,内径为16mm,曲率直径为195mm、405mm和800mm。试验范围为:压力4.5-10.5MPa,质量流速500-2700kg/m²·s,热流密度0-0.57MW/m²,进口干度0-0.81。

螺旋管曲率直径和管子直径的比值越大,摩擦阻力也越大。压力对两相摩擦阻力的影响是明显的。压力增加,两相摩擦阻力修正系数减小。螺旋管内两相摩擦阻力一般比水平直管大百分之十几,并随质量流速、质量干度、压力和曲率直径的不同而有变化。全部964个试验数据和理论计算结果的相对误差为-3.99%,均方根误差为12.9%。加热和不加热情况下得到的两相摩擦阻力无多大差别,可用相同的计算式计算。

4 螺旋管内的传热

在强制对流沸腾区,螺旋管管径和曲率直径之比对放热系数的影响不大。放热系数的范围为20-30kW/m²·℃。本文给出了螺旋管内两相强制对流沸腾区放热系数的经验关系式。

流体干涸后,螺旋管壁面温度的飞升没有水平管那么严重。周界壁面温度最高点的位置

取决于气相所受到的浮升力和离心力的大小。在过热点附近，“液膜影响区”在不断地变化。由于二次回流的作用以及气芯液滴沉积，过热处不断地得到液体补充。进入的液体使过热点温度下降，放热系数增高。但很快又被蒸干，温度继续上升。这种连续的过热点被湿润、蒸干引起壁面温度的脉动情况是和水平管相类似的。干涸后的放热系数只有两相强制对流沸腾区放热系数的几分之一到几十分之一。

5 螺旋管和水平管的临界热负荷

在过冷和低干度区域，临界热负荷条件被假定为在某个位置上液体的蒸发量超过净液体的补充量或者气芯内液滴的沉积量。本文根据水平直管内一个汽泡的大小和脱离的情况以及能量守恒，导出过冷和低干度区域的临界热负荷关系式。在高干度区域，流型为环状流，液体形成液膜附于管壁上，其中部分液体被气芯夹带走，而汽芯中液滴也向液膜中沉积。由于浮力和离心力的影响，沿壁面周界的液膜分布是不均匀的。作者提出了“液膜影响区”概念，即在临界热负荷产生点附近的液膜厚度对临界热负荷的影响最大。液膜薄，在该点附近的气芯中液滴浓度减少，液滴沉积率和夹带率也减少。液膜影响区的大小和压力、质量流速有关。作者依据壁面周界温度分布和液膜影响区概念，导出高干度区域螺旋管和水平直管的临界热负荷关系式。

6 主要结论

(1) 本文首次在简化条件下，应用摄动法，得到螺旋管内气液两相在环状流时三维速度分布的分析解。在气相和液相内同时存在着上、下对称的二次回流。流动截面上一点的二次回流速度和轴向速度相比，要小 1 - 2 个数量级。作者首次应用激光多普勒测速仪测量气液两相环状流时液膜的速度，验证了二次回流的流动性质。

(2) 由螺旋管内两相流速和局部含气率非均匀、非轴对称分布和漂移流率模型，导出了螺旋管内截面含气率关系式。应用 γ - 射线衰减法测量了高压蒸汽水混合物流动时的截面含气率，并得到高压条件下的截面含气率经验关系式。

(3) 通过对流动参数的加权平均以及考虑到质量流速的影响，导出螺旋管高压蒸汽-水两相摩擦阻力的计算公式。计算公式和试验数据符合良好。

(4) 螺旋管在两相强制对流区和干涸后的平均放热系数要高于水平直管。干涸后的壁面温度飞升值比水平直管低，且变化平缓。本文给出了计算该区放热系数的经验关系式。

(5) 根据水平管内汽泡的脱离直径和能量守恒，得出水平直管在低干度区的临界热负荷关系式，关系式和试验数据符合良好。

(6) 本文根据作者提出的“液膜影响区”概念以及导出的环状流液膜厚度分布，得到水平直管及螺旋管内高干度区域的临界热负荷关系式。螺旋管在高干度区的临界热负荷要高于相同条件下水平直管内的临界热负荷。应用“液膜影响区”概念，能很好地关联低质量速度时螺旋管临界热负荷试验数据。

THE STUDY OF THE PROPERTIES OF GAS-LIQUID TWO-PHASE FLOW AND HEAT TRANSFER IN HELICAL COILED TUBES

Zhou Fangde *Advisor: Prof. Chen Xuejun*
(Engineering Thermophysics Institute &
Department of Energy and Power Engineering)

Abstract

This paper studies the properties of gas-liquid two-phase flow and heat transfer in helical coiled tubes. The experiments are mainly done in a high pressure water loop. The parameters characteristic of the experiments are: mass velocity 500-2600 kg/m²·s; pressure 6.5-10.5MPa; heat flux 0.1-0.54 MW/m²; exit quality 0.01-0.95.

This paper is divided into five parts. They are: 1. two-phase secondary flow; 2. void fraction; 3. two-phase frictional pressure drop; 4. forced convection boiling and post-dryout heat transfer; and 5. critical heat flux in various helical coiled tubes.

Subject terms: *two-phase flow; heat transfer; helical-weld tubes*