

# 低温液体-水相际传热模型与数值模拟

舒水明 张林波 古小敏

(华中科技大学 能源与动力工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 研究低温液体-水相际传热问题. 分析低温液体与水之间的传热过程及其特性. 给出一种处理问题的方法. 采用可变网格法追踪低温液体-水相界面的位置. 建立了适合于常压及超临界压力下的液-液传热模型. 根据传热模型进行了数值计算. 得出低温液体温度场分布. 确定了低温液体-水相界面的生存距离. 计算结果表明. 在一定水压和适当的低温液体初始状态下. 从低温液体-水相界面形成到完全消失需历经一段距离.

**关键词:** 低温液体; 液-液两相流; 传热模型; 数值模拟

中图分类号: TK124 文献标识码: A 文章编号: 1674-4512(2006)03-0082-03

## Model for boundary heat transfer in cryogenic liquid-water phases and its numerical simulation

Shu Shuiming Zhang Linbo Gu Xiaomin

**Abstract:** The heat transfer of the cryogenic liquid and water was studied. The process of heat transfer between cryogenic liquid and water and its characteristics were analyzed. A simplified method to handle the problem was given and a front-tracking method was used to track the moving interface. The model for liquid-liquid heat transfer in supercritical and normal environment was established. On the basis of the model, the numerical calculation was done. The result showed that the temperature field of the cryogenic liquid was derived and the existing length of the cryogenic liquid was reduced. The cryogenic liquid can exist for a period of distance in proper conditions.

**Key words:** cryogenic liquid; liquid-liquid two-phase flow; heat transfer model; numerical simulation

**Shu Shuiming** Prof.; College of Energy & Power Eng., Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China.

在某些紧急情况下, 如采用液氧/液氢燃料电池的潜艇在水下发生故障时, 需要快速有效地将低温液体释放到水中. 以上问题涉及到低温液体与水之间的传热. 在作出一些简化后, 可归结为液-液两相流相际传热问题. 要研究这一问题, 首先需要分析低温液体与水之间的传热过程及其特性. 低温液体与常温水之间的温差较大, 且是液-液直接接触传热, 情况非常复杂. 本文主要针对低温液体初始温度低于对应水压下饱和温度的情形. 根据传热学的基本理论及现有的相关研究结果, 对传热过程进行简化与分析, 建立低温液体温

度场的理论模型. 此模型可用于估算低温液体生存距离及低温液体的温度场.

## 1 模型分析

如图1所示, 低温液体出口后形成低温液柱(近似为圆柱), 周围是大量(可视为无穷大)的常温水. 低温液体与水直接接触, 形成液-液相界面. 从出口开始, 液柱与水直接接触, 液-液相界面生成; 随着液柱向前推进, 液柱表面低温液体首先达到饱和; 液柱表面液体继续吸热, 不断汽化, 沿程

收稿日期: 2005-05-25.

作者简介: 舒水明(1954-), 男, 教授; 武汉, 华中科技大学能源与动力工程学院(430074).

E-mail: fei@mail.hust.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50276020); 湖北省自然科学基金资助项目(2002A B004).

液柱半径变小, 液柱表面温度保持在饱和温度不变; 最终液柱及相界面完全消失. 定义低温液柱从出口到低温液柱完全消失所流经的距离为低温液柱的生存距离.

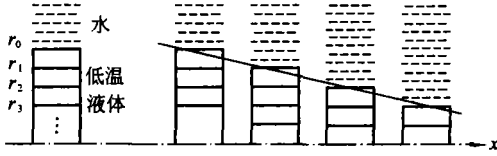


图 1 低温液体出口示意图

在本模型中, 进行了以下一些假设与简化. 低温液体出口稳定后在宏观上是一个稳态过程. 对于低温液柱, 其轴向的传热远不如其径向的传热强烈. 低温液柱表面不断汽化, 气液密度相差很大, 气体直接进入水环境. 由于扰动非常剧烈, 假设低温液体为泡状沸腾, 忽略可能存在的气层对传热的影响, 认为整个过程中低温液体始终与水直接接触, 即忽略气层厚度; 且认为与低温液体表面接触的水保持初始常温不变. 随着表面不断汽化, 低温液柱的半径不断减小, 直至消失. 为简化计算, 将流动过程看作在直径连续变化(直径等同于低温液柱)的圆管内的流动. 于是可看作运动相界面<sup>[1]</sup>的流动传热问题. 忽略速度边界层的影响, 速度视作均匀分布, 其内部径向的传热作为纯导热问题处理, 边界上为第三类边界条件(沸腾换热边界条件).

## 2 传热模型

### 2.1 模型建立

本模型中, 将传热过程分为两段. 初始段为低温液体出口至低温液柱与水接触表面达到饱和, 在此过程中, 没有低温液体汽化, 低温液柱半径无变化. 由于计算温度范围内物性变化很小, 可看作定物性处理, 对定物性流体的稳定的层流流动, 当速度边界层已经充分发展, 圆管热进口段的能量方程式<sup>[2]</sup>为

$$\frac{\partial t}{\partial x} = \frac{1}{\rho u} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ \lambda(t) r \frac{\partial t}{\partial r} \right], \quad (1)$$

初始条件为  $t(0, r) = t_0$ , 初始边界条件

$$\lambda \partial t / \partial r = \alpha(t_\infty - t_{r_0}), \quad (2)$$

式中:  $t$  为温度;  $t_0$  为低温液体初始温度;  $t_\infty$  为水温;  $x$  为轴向距离;  $r$  为半径;  $r_0$  为低温液柱初始半径;  $\lambda$  为低温液体导热系数;  $\alpha$  为低温液体与水界面上的换热系数;  $\rho$  为低温液体密度;  $c$  为低温液体比热容,  $u$  为液体轴向流速.

在低温液柱向前推进  $x_b$  后, 表面达到饱和,

低温液体开始汽化, 液柱半径不断减小. 此时能量方程式同式(1), 边界变为活动边界. 其活动边界条件为

$$r_x = r(x), r(x_b) = r_0,$$

$$\lambda \frac{\partial t}{\partial r} \Big|_{r=r_x} - \rho L u \frac{dr_x}{dx} = \alpha(t_\infty - t_{r_x}), \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为低温液体密度;  $L$  为低温液体相变潜热;  $r_x$  为对应轴向距离为  $x$  时低温液柱半径, 其随  $x$  增大而减小. 当水压达到对应低温液体临界压力时, 相变潜热  $L = 0 \text{ J/kg}$ .

### 2.2 模型离散化

由于低温液柱(圆柱)轴向的对称性, 低温液体温度仅为半径  $r$  和轴向距离  $x$  的函数; 低温液柱半径仅为轴向距离  $x$  的函数. 从低温液柱中心( $r = 0$ )到边界( $r = r_0$ )分为  $n$  等份, 每份  $\Delta r$ ; 而轴向初始步长为  $\Delta x$ . 于是温度  $t$  可表示为  $t(x, r) = t(x_j, r_i) = t(j, i)$ , 式(1)可离散<sup>[3]</sup>为

$$\begin{aligned} [t(j+1, i) - t(j, i)] / \Delta x = & \theta f(j+1) + (1-\theta)f(j), \\ f(j+1) = & \chi(j, i) \{ t(j+1, i+1) - 2t(j+1, i) + t(j+1, i-1) + [t(j+1, i+1) - \\ & t(j+1, i)] / i \} / [\rho(j, i) c(j, i) u], \\ f(j) = & \chi(j, i) \{ t(j, i+1) - 2t(j, i) + \\ & t(j, i-1) + [t(j, i+1) - t(j, i)] / i \} / \\ & [\rho(j, i) c(j, i) u]. \end{aligned}$$

为加强稳定性, 采用隐式离散格式, 式中  $\theta$  为加权因子.

对  $t(j, 0), t(j, n)$  分别依轴对称和边界条件式(2)处理. 由此离散得到隐式的差分格式, 计算下一轴向步温度场时需求解三对角线性代数方程. 依次计算  $j = 1, 2, \dots, j_b$  时,  $t(j_b, n)$  大于对应水压下低温液体饱和温度  $t_s$ . 然后回退  $j = j_b - 1$ , 调整轴向步长  $\Delta x$  作迭代计算, 使  $t(j_b, n) = t_s$ .

当低温液柱表面温度达到饱和温度  $t_s$  时, 记此时轴向距离为  $x_b$ . 低温液柱继续向前推进时, 为活动边界条件<sup>[2]</sup>. 要追踪低温液体-水相界面的位置, 可采用可变网格法. 可变网格法是将半径方向上步长固定, 而轴向距离步长可变, 使相界面始终保持在节点上. 此时边界条件(3)离散为

$$\begin{aligned} \alpha(t_\infty - t_s) - \chi(t(j, n_j - 1)) \cdot \\ [t(j, n_j) - t(j, n_j - 1)] / h = & \rho L u \Phi \Delta r / s_j^*, \quad (4) \\ (1 - \delta) \{ \alpha(t_\infty - t_s) - \chi^*(j+1, n_j - 1) \} \cdot \\ [t^*(j+1, n_j) - t^*(j+1, n_j - 1)] / h \} + \\ \delta \{ \alpha(t_\infty - t_s) - \chi(t(j, n_j - 1)) [t(j, n_j) - \\ t(j, n_j - 1)] / h \} = & \rho L u \Delta r / s_j, \quad (5) \end{aligned}$$

式中:  $\delta$  为 0~1 之间加权因子;  $n_j$  为第  $j$  步时半

径方向步数. 由式(4)和(5)组成预估校正格式. 由式(5)所得  $s_j$  作为计算下一步时轴向步长  $\Delta x$ , 代入式(1)离散求解. 此时  $n_{j+1} = n_j - 1$ , 所得线性方程组维数随之减 1, 变为  $n_{j+1}$  维. 而半径方向上  $n_{j+1} - n$  的格点上  $t = t_\infty$  视为常温水的一部分.

当水压达到或超过低温液体临界压力时, 相变潜热  $L$  为  $0 \text{ J/kg}$ . 此时追踪低温液体-水相界面的位置作如下处理: 调整轴向步长, 使下一轴向步中仅次于表面的格点温度恰好为饱和温度, 而表面格点则视为常温水部分. 低温液体半径随轴向距离增大不断减小直至消失, 对应的轴向距离  $x_s$  即为低温液体生存距离.

### 3 数值模拟

低温液体以液氮与水传热为例. 取液氮初始温度  $80 \text{ K}$ , 出口直径  $5 \text{ mm}$ , 平均速度  $0.1 \text{ m/s}$ , 水温  $283 \text{ K}$ , 水压  $1 \text{ MPa}$ , 液氮出口初始段换热系数  $1500 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ , 液柱开始汽化后换热系数为  $20000 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$ .

数值计算<sup>[4]</sup>中, 半径划分区间数为 300, 初始轴向步长  $0.1 \text{ mm}$ , 加权因子为 0.5. 图 2 为低温液柱温度场分布图. 可见液柱生存距离约为  $0.014 \text{ m}$ , 液柱表面附近温度梯度很大, 远离表面的部分温度梯度较小. 此温度场分布与实际较为接近, 由于低温液体导热系数相对于液体与水表面换热系数较小, 温度梯度较大的部分接近于液柱表面. 图 3 为其他参数不变, 液氮生存距离随液氮汽化时换热系数变化曲线. 可见, 在换热系数大于  $30000 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$  后,  $1 \text{ MPa}$  和  $6 \text{ MPa}$  水压下低温液体生存距离随换热系数改变的变化不大.

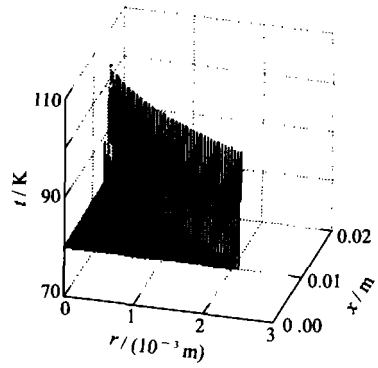


图 2 低温液体温度随半径和轴向距离变化曲线

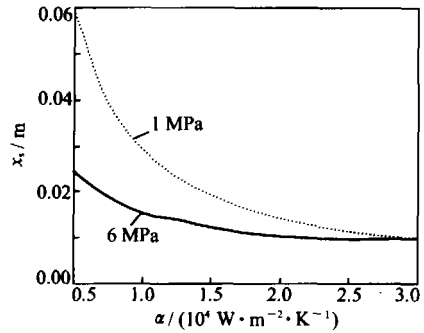


图 3 低温液体生存距离随换热系数变化曲线

### 参 考 文 献

[1] 刘儒勋, 王志峰. 数值模拟方法和运动界面追踪 [M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2001.  
 [2] 杨强生, 浦保荣. 高等传热学 [M]. 2 版. 上海: 上海交通大学出版社, 1996.  
 [3] 陶文铨. 数值传热学 [M]. 2 版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.  
 [4] Vargaftik N B. Tables on the thermophysical properties of liquids and gases in normal an dissociated gases [M]. 2nd ed. Washington-London: Hemisphere Publishing Corporaiong, 1975.

(上接第 81 页)

### 参 考 文 献

[1] 韩西京, 史铁林, 李录平, 等. 故障诊断中几种征兆自动获取技术的研究 [J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(8): 53-55.

[2] 韩西京, 李录平, 史铁林, 等. 旋转机械轴心轨迹的自动识别 [J]. 振动、测试与诊断, 1997, 17(3): 20-25.  
 [3] 王海, 郑莉媛. 水轮发电机组轴心轨迹自动识别方法研究 [J]. 水力发电学报, 2002, 3: 73-80.  
 [4] 柳松青. MATLAB 神经网络 BP 网络研究与应用 [J]. 计算机工程与设计, 2003, 24(11): 81-83.