

水下排放低温液体传热过程分析

古小敏, 舒水明

(华中科技大学 能源与动力工程学院, 武汉 430074)

摘 要: 研究了低温液体水下直接排放时, 低温液体- 水间的传热问题。分析了低温液体与水之间的传热机理。提出在一定条件下, 低温液体在水下直接排放的过程是气膜包围着液体, 液- 气两相共同推进的过程, 气膜厚度不稳定, 呈现由厚变薄, 甚至局部消失, 再重新出现的过程。气膜流动属湍流流动。

关键词: 低温液体; 水下排放; 沸腾; 气泡; 扰动

中图分类号: TK 121

文献标识码: A

文章编号: 1005-7439(2006)01-0001-03

Analysis of Heat Transfer for Cryogenic Liquid Underwater Emission

GU Xiao-min, SHU Shui-ming

(College of Energy & Power Eng.,

Huazhong Univ. of Sci. & Tech., Wuhan 430074, China)

Abstract: The cryogenic liquid directly drained into water was studied. The research problem of the heat transfer of the cryogenic liquid and water was raised in the paper. The process and characteristics of heat transfer between cryogenic liquid and water were analyzed. The view are put forward that the gas encircle the liquid and advance together. The thickness of the gas is volatile, The gas change from thick to thin until disappear partly, and then it will appear again. The flow of the gas is onflow.

Keywords: cryogenic liquid; drained into water; boil; steam froth; stir

随着科学技术的发展, 特别是高新技术的发展, 在科学研究、各行各业以及日常生活中越来越广泛地使用 120K 以下的各种低温液体。一些低温液体、特别是水下航行器中的低温液体, 是不能或者无法直接快速排入大气环境; 另一方面, 若储存它们的容器绝热装置受到损坏, 或者遭到攻击以及遇到其他意外情况, 则会产生巨大的爆炸, 造成人员伤亡和经济损失。因此, 从安全和环境保护角度出发, 在紧急情况下, 希望能够有效地将 120K 以下的各种低温液体排入水中。作为工程热物理学的一道新课题, 研究低温液体在水下直接排放的液- 气- 液或者液液两相流动及传热传质具有重要意义。

低温液体例如液氮在水下直接排放时, 由于它与常温水之间存在较大温差, 沿程将与水发生剧烈

的换热过程, 物理状态也将发生一系列的变化, 直至完全气化。在排放过程中, 低温液体与水的粘滞阻力作用以及液体气化时气泡的产生和跃离都会对水产生较大的扰动, 强化液体与水之间的传热传质。本文根据传热学及相关研究结果, 对传热过程进行机理分析, 描述低温液体水下排放过程中所经历的传热过程。

从排放口排入水中的低温液体可看成一段液柱。根据液柱与环境水的换热特征, 可以把这个过程分为 3 个阶段: 第一阶段不发生气化, 第二和第三阶段分别发生泡态沸腾和膜态沸腾。

1 过冷低温液体排出至表面达到饱和状态

过冷的低温液体进入水中后立即与水进行热交换, 表面温度很快升高, 但在没有达到水环境压力对应的饱和温度前, 低温液体不发生气化, 液柱半径也无变化。这时液体与周围水的换热满足下列能量方

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(2002AB004)。

程式^[1]:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{\rho c u} \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial}{\partial r} \left(\lambda T r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (1)$$

式中: T ——温度, K;

x ——轴向距离, m;

r ——半径, m;

λ ——低温流体导热系数, W/(m·K);

ρ ——低温流体密度, kg/m³;

c ——低温流体比热容, J/(kg·K);

u ——流体轴向流速, m/s。

2 泡态沸腾

表面达到饱和状态的低温液柱在向前推进的过程中不断吸热, 表面转为过热状态; 在达到一定过热度后, 开始气化并产生大量气泡, 进入沸腾阶段。气泡沸腾主要包括气泡核的形成、长大、脱离和上升等历程。环境水为这一系列历程提供所需的热量。

低温液体与水的界面俘获的少量气体、杂质, 或者低温液体内部聚合的高能量分子团成为气化核心。当液面达到足够过热度、气核获得的能量超过气泡生成能 ΔG 时^[2], 水-液界面上有微小气泡生成。

$$\Delta G = \frac{4}{3} \pi R_c^2 \sigma \quad (2)$$

$$R_c = \frac{2\sigma T_s}{\rho l_v \Delta T}$$

式中: R_c ——气泡临界半径, m;

σ ——气泡表面张力, N/m;

ρ ——液体密度, kg/m³;

l_v ——液体气化潜热, J/kg;

T_s ——液体饱和温度, K;

ΔT ——液体过热度, K。

随着气泡的长大, 气泡周围附有的液膜(图1)逐渐变薄。气泡成长所需的热量和蒸气, 由环境水通过液膜 A_1 和表面过热液层 A_2 输入, 能量平衡式^[1]为:

$$A_1 \frac{dR}{d\tau} h_{fg} \rho = q_1 A_1 + q_2 A_2 \quad (3)$$

式中: q_1, q_2 ——分别为通过 A_1, A_2 接触面向气泡传递的热流密度, W/m²;

h_{fg} ——液体气化潜热, J/kg;

ρ ——气体密度, kg/m³;

τ ——时间, s;

A_1, A_2 ——和的接触面积, m²。

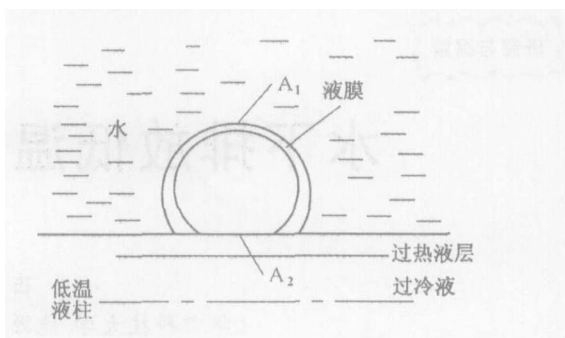


图1 气泡生长

在气泡生长的最初阶段, 它的成长速度主要由液体惯性力和气泡的表面张力决定, 这个阶段历时很短。随着惯性力和表面张力的影响逐渐减弱, 气泡的成长速度主要取决于环境水向气泡的传热速率。假设环境水温度保持不变, 气泡成长速率方程^[1]如下:

$$\begin{aligned} \varphi_v \rho h_{fg} (4\pi R^2 \frac{dR}{d\tau} = \varphi_b 4\pi R^2 \bar{h}_v \Delta T_w \\ + \varphi_c \varphi_s (4\pi R^2) k_1 \frac{d(\Delta T)}{dx} \Big|_{x=0} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: φ_v ——气泡容积修正系数;

φ_c ——液体边界层曲率修正系数;

φ_s ——水-液界面修正系数;

φ_b ——气泡底部修正系数;

$\bar{h}_v$ ——液膜向泡内蒸气的平均对流换热系数, W/(m²·K);

ρ ——液体密度, kg/m³;

h_{fg} ——液体气化潜热, J/kg;

τ ——时刻, s;

k_1 ——液体导热系数, W/(m·K);

T_w ——水温, K;

T_s ——泡内气体温度, K;

T ——液柱过热液层温度, K;

R ——气泡成长半径, m。

式(4)的左端表示气泡成长所消耗的蒸发热, 右端两项分别表示环境水通过液膜向气泡传递的热流及低温液柱过热液层向气泡传递的热流, x 为低温液体过热液层空间坐标, $x=0$ 为表面处。

气泡在生长过程中, 会受到各种力的作用(图2), 这些力决定气泡的形状和脱离尺寸。在气泡脱离的瞬间力平衡方程^[3]为:

$$F_D + F_S = F_1 + F_P + F_B \quad (5)$$

式中的 F_D 为阻力, F_S 为表面张力, F_B 为浮力, F_P 为压力, F_1 为惯性力。

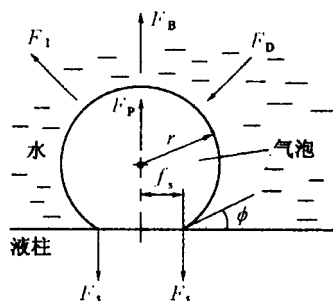


图2 气泡受力示意图

当 $(F_D + F_s) < (F_P + F_B + F_1)$ 时, 气泡脱离液柱表面进入环境水, 受浮升力的作用继续上升, 并在环境水的加热下继续长大。气泡内的蒸气过压做功克服周围环境水的惯性力和粘性力, 忽略气泡内蒸气的惯性力, 能量平衡方程^[3]为:

$$dE_{\Delta P} = dE_1 + dE_D \quad (6)$$

亦即:

$$\Delta P \cdot 4\pi R^2 dR = \frac{4}{3}\pi R^3 \rho \frac{d^2 R}{dt^2} dR + c_w \frac{\rho}{2} \pi R^2 \left(\frac{dR}{dt}\right)^2 dR \quad (7)$$

在气泡的脱离和上升运动过程中, 气泡尾部激起的漂流(如图3), 会在水-液边界层上产生抽吸作用。这种抽吸作用又会导致一定体积的低温液体边界层被撕裂、分离并与水直接接触, 很快被气化。漂流和气泡就象搅拌器在液柱附近进行扰动, 强化了水-液间的换热, 沸腾的换热关系式^[3]:

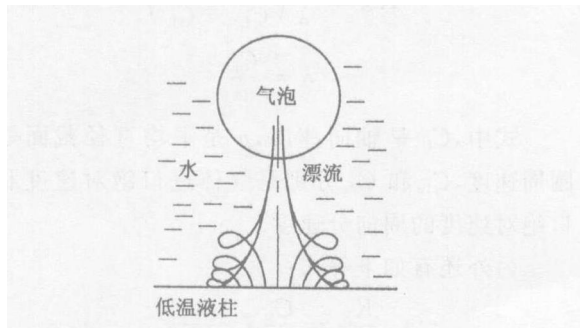


图3 气泡尾流的漂流

$$q = q_{NC} + Nf(V_D \rho h_{fg}) + Nf(V_{df} c_{L} \Delta t_m \rho) \quad (8)$$

式中: q_{NC} ——水-液间对流换热热流量;

V_D ——气泡体积, m^3 ;

V_{df} ——漂流体积, m^3 ;

N ——气化核心数, 个/ m^2 ;

f ——气泡频率, 个/s。

式(8)右侧第二项表示气泡内的蒸气潜热; 第三项为漂流引起的换热量。

气泡脱离液柱时留下一些残存的气体, 会在原来位置上孕育着下一个气泡。

气泡最初只在受热面(即液柱表面)的某些个别点上产生, 但随着热流密度增加, 生成的气泡数量越来越多, 液柱表面的气泡交叉、重叠、合并, 形成蒸气膜层, 沸腾就进入了膜状沸腾阶段。

3 膜状沸腾

在膜状沸腾阶段, 气膜将环境水和低温液柱完全隔开(如图4)。

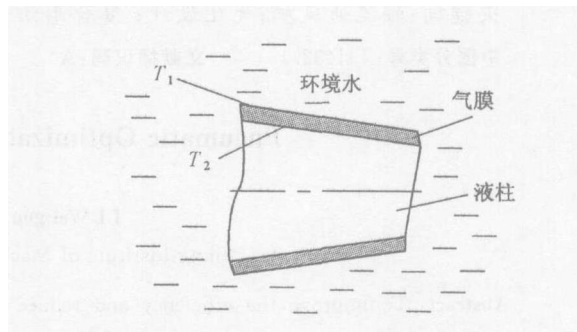


图4 膜态沸腾

传热传质通过气膜进行。环境水一方面通过气膜传热给液柱, 为液体的气化提供能量, 另一方面直接加热气膜表面使气泡受热膨胀。气膜的存在增加了热阻, 使换热系数大大降低, 膜态沸腾的换热关系式^[5]为:

$$h_c = 0.62[k_v^3 \rho(\rho_l - \rho_v) g h'_{fg} / (D \Delta T \mu_v)]^{1/4} \quad (9)$$

$$h'_{fg} = h_{fg} + 0.5c_{pv} \Delta T \quad (10)$$

式中 h_c ——气膜传热系数, $W/(m^2 \cdot K)$;

k_v ——蒸气热导率, $W/(m \cdot K)$;

ρ_v ——蒸气密度, kg/m^3 ;

ρ_l ——环境水密度, kg/m^3 ;

D ——液柱直径, m ;

ΔT ——水与饱和蒸气温差, K ;

μ_v ——蒸气粘度, $N \cdot s/m^2$;

h'_{fg} ——液体有效气化潜热, J/kg ;

h_{fg} ——液体气化潜热, J/kg ;

C_{pv} ——蒸气比热, $J/(kg \cdot K)$ 。

低温液体膜态沸腾时, 传入液柱的热流密度较之泡状沸腾有所减少, 单位时间内液体气化量也减少。在气膜外表面上, 由于环境水的直接加热, 气泡

(下转第6页)

级,用孤立翼型法进行设计。用 VC+ + 编程实现,优化结果和传统设计的比较见表 1。

表 1 传统设计和优化设计结果比较表

参数项	传统设计	只以效率 为优化目 标时结果	以效率为 约束优化 噪音结果	以效率为 约束优化噪音 后凑成离散量
轮毂比 v	0.40	0.55	0.61	0.61
风机转速 $n/r \cdot \min^{-2}$	1000	1234	1344	1250
升力系数	0.79	1.17	1.27	1.27
叶片数 Z	8	12.7	14.9	15
叶轮外径/m	1.81	1.66	1.61	1.66
噪音 / dB	100.9	97.7	84.5	92.5
效率/ %	77.7	85.4	84.4	84.1

4 结论与问题

通过运用优化算法设计轴流通风机,使得风机

的效率和噪音两项指标有了较大的改进,而且风机尺寸也有所减少;设计达到了预期的效果,也验证了优化所采用方法的有效性。

复合形法有它的局限性,表现在它的计算精度可能不理想,如何使优化算法在一定的时间和资源下有更高的计算精确性是一个重要的研究问题。如果优化算法能处理同时包含连续变量和离散变量的优化问题,将可以提高计算的准确性,这也是下一步要进行的工作。

参考文献:

[1] 李庆宜. 通风机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1986.
[2] 商景泰. 通风机手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
[3] 吴秉礼. 关于开发超低噪声塔用轴流通风机的探讨[J]. 风机技术, 2005, (5).
[4] 皮可伟 等. 基于遗传算法的轴流通风机通流构件参数优化[J]. 中南工业大学学报, 2002; 33(3).
[5] 刘惟信. 机械最优化设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
[6] 陈立周 等. 机械优化设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982.

(上接第 3 页)

的逸出数量并未减少,导致气膜厚度逐渐变薄,甚至出现气膜间断的现象;另一方面气膜的变薄又使热流密度有所增加,液膜增厚。因此,在液柱的整个流动中,气膜的厚度不稳定,泡状沸腾与膜态沸腾交替进行,直至液柱完全气化。此外,气泡在气膜中的长大和跃离引起气膜界面的波动(如图 5)。

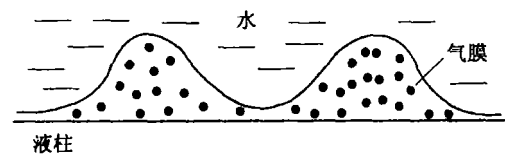


图 5 膜态沸腾气膜扰动

进而引起膜内蒸气的扰动,气膜的流动是湍流流动,这将提高膜层的传热系数。气泡剧烈的运动和 气膜流动的不稳定性以及液体和水的粘滞阻力作用,又会把水和低温液体带入气膜中,形成气液两相流,这又增加了气膜流动的复杂性。

4 结 论

由以上分析可知,低温液体在水下直接排放的

过程,既是液-气两相共同推进的过程,也是液体与环境水进行沸腾传热的过程;液体直径不断变小直至完全气化,包围液体的气膜厚度不稳定,不断发生由厚变薄(甚至局部消失),再重新变厚的过程;膜态沸腾和泡态沸腾交替进行。气膜流动属湍流流动。液体的流速会对气膜的组分和流动状态以及气泡的脱离半径产生影响。

参考文献:

[1] 林瑞泰. 沸腾换热[M]. 北京: 科学出版社, 1988: 14-26, 57- 94.
[2] 吴世功, 张善森. 低温工程学基础[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1991: 145- 166.
[3] [德] E 哈恩, U 格里古尔. 沸腾换热[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 26- 27, 34.
[4] 杨强生, 浦保荣编著. 高等传热学[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1996: 128, 129.
[5] [美] W 弗罗斯特编. 低温传热学[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 129- 132.