

加热面粗糙度与材料对低温流体 闪蒸现象的影响

孙 雷¹, 赵 亮¹, 花冈裕²

(1. 大连铁道学院 机械工程系, 辽宁 大连 116028; 2. 日本室兰工业大学, 北海道)

摘 要: 针对贮藏容器及输送管道的安全问题, 以液化氮为工质, 模仿在实际中可能遇到的容器及管道裂缝而引起的容器内压力变化, 利用不同材质、不同粗糙度试验棒作为加热面进行实验, 对减压后的压力变动情况及沸腾样态作了一定的研究。

关键词: 液化氮; 减压; 沸腾样态; 试验棒

中图分类号: TH137.86 **文献标识码:** A

第二次世界大战后, 由于核技术与火箭技术的出现与发展, 对液体沸腾问题的研究取得了重大进展。最初的研究领域多为针对提高锅炉及冷凝器的热效率, 以及针对原子反应堆冷却水损失事故 (LOCA), 以高温水为对象的研究。除水以外, 用以研究的液体还有苯、氟里昂等, 但针对低温流体沸腾现象的研究目前还很少。近年来, 随着宇航业的惊人发展, 对于低温液体燃料的需求很大, 在超导技术中, 对作为制冷剂的低温流体的需求也大大增加, 因此, 低温液体贮藏容器及输送管道的安全问题就很重要。本实验针对低温液体贮藏容器及输送管道的安全问题, 以液化氮为工质, 利用不同材质、不同粗糙度的试验棒作为加热面进行实验, 对减压后的压力变动情况及沸腾样态作了一定的研究。

1 实验装置及实验方法

本实验的实验装置如图 1 所示, 由压力容器装置, 检测系统, 组合真空泵, 试验棒 (Test Piece) 及其他辅助设备构成。压力容器的材料为耐热玻璃, 制成内筒与外筒的双重结构, 上部的盖板设有静压孔、液化气体注入口、压力开放用破膜装置及调整减压速度的节流片。为了测定容器内的压力, 盖板的静压孔外斜向设置了压力传感器; 压力容器内的不同高度上垂直设置了 3 个热电偶以测定容器内的温度。压力传感器的压力信号由信号增幅器放大, 热电偶的变化电压由直流安培计增幅。被放大及增幅的压力信号通过 A/D 转换器的转换, 输入计算机进行记录。沸腾样态由高速度摄像机进行拍摄并录像。本实验中, 为了实现容器内液体与外界大气的绝热, 压力容器的内筒管与外筒管之间用真空泵抽成真空。作为加热面的试验棒的材料为不锈钢 (SUS304), 铝 (A2017BD-T4), 黄铜 (C3604BD-F) 及耐热玻璃, 分别制成直径为 $\Phi 6$ mm、 $\Phi 10$ mm、 $\Phi 12$ mm 及 $\Phi 20$, 长 200 mm

收稿日期: 2001-03-18

作者简介: 孙雷 (1973-), 女, 助教, 硕士。

的实心棒,表面粗糙度分别处理成 $\#60$ 、 $\#220$ 、 $\#1\,000$ 及抛光表面($\#buff$)。

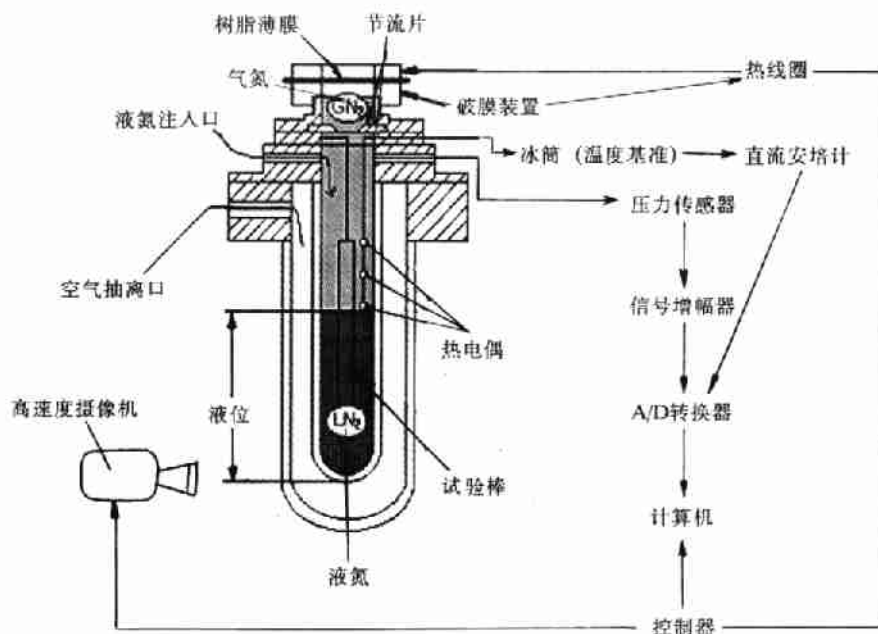


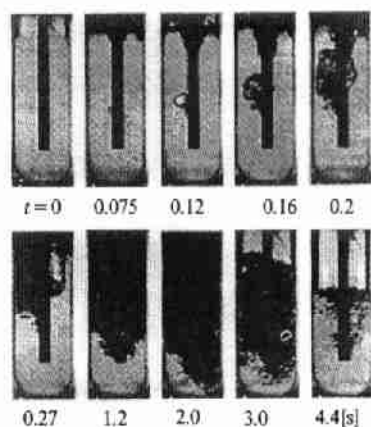
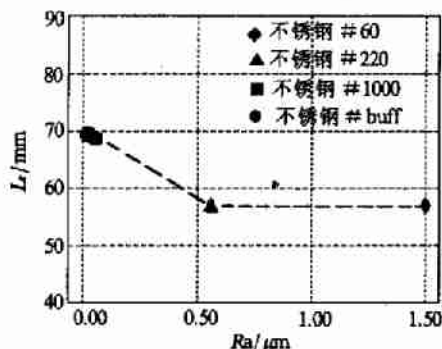
图1 实验装置图

2 实验结果与分析

2.1 加热面粗糙度的影响

为了研究试验棒材料的表面粗糙度（即加热面粗糙度）对液化气体的减压沸腾有什么样的影响，用同一材质及直径，表面粗糙度分别为 $\#60$ 、 $\#220$ 、 $\#1\,000$ 、 $\#buff$ 的不锈钢试验棒进行实验。沸腾样态一般为最开始在气液界面近旁发生沸腾，随后沸腾沿试验棒下行，至其下部，而后扩散至整个液相。由热电偶测得的温度可知，容器中气相部的温度要高于液氮在大气压下的饱和温度，而且随着密闭升压，气相中的温度一般要升高十几开尔文。试验棒的上部暴露于气相中，而下部浸没在液体里，因此存在温度梯度，减压时热能由试验棒的上部向下传递，同时加热其周围的液体，使其沸腾蒸发。另外有一少部分的沸腾样态如图2所示，减压后，试验棒中部与气液界面同时发生沸腾（以后简称同时沸腾），此种现象在表面粗糙度较大的试验棒上经常发生。

减压时压力的变化是由节流口开放“释压”和液相沸腾后“升压”的联合作用决定的。减压后不同粗糙度试验棒的实验所对应的压力变动大致相同，都是由于压力瞬时开放而降至极小值，随后由于液体沸腾产生蒸汽而引起压力的回复，到达一个极限值（最大回复压力）后经过一定的时间降至大气压。 $\#60$ 及 $\#200$ 的最大回复压力平均值较低，到达时间较快，这表明沸腾开始较早而过程比较平稳。这是因为表面较粗糙的试验棒较表面平滑的试验棒相同长度上的微观表面积较大，表面上的空穴较多，液体过热时加热面上较容

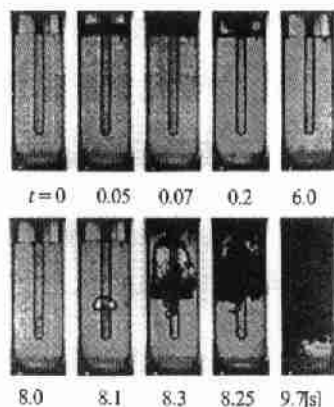
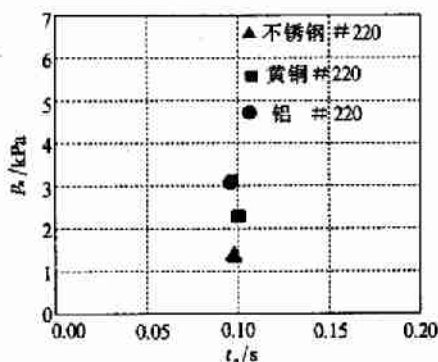
图2 沸腾样态(突然沸腾, 不锈钢 #220, $\Phi 16\text{mm}$)图3 减压时试验棒粗糙度 Ra 与沸腾浸透距离 Lr 的关系(不同粗糙度的试验棒)

易生成气泡, 因此液体沿加热面的沸腾进行速度较快, 其到达最大回复压力的时间较快。但由于其沸腾开始得较早, 一般地极小压力值较高, 由于压降而造成的过热度便较小, 因此其沸腾不是很剧烈, 最大回复压力值也不高。图3表示了试验棒的表面粗糙度与至最大回复压力时的沸腾浸透距离的关系, 这是因为同表面粗糙的试验棒相比, 表面光滑的试验棒上气泡的产生较难, 沸腾开始得较晚, 但由于其极小压力值较低, 获得的过热度较大, 因而随后的沸腾较剧烈, 持续时间较长, 最大回复压力值也较大。

2.2 材质不同的影响

为了研究试验棒材质的不同对液化氮的减压沸腾有何影响, 使用直径相同, 材质不同的试验棒进行实验。所利用的材料有不锈钢、黄铜、铝和耐热玻璃, 四种试验棒的粗糙度同为#220。前三种材质的试验棒作加热面时, 沸腾都是首先在气液界面近旁发生, 接着沿试验棒壁面向下浸透, 而后扩散至整个液相。而耐热玻璃试验棒的沸腾样态则如图4所示, 减压时只在气液界面近旁发生小的沸腾, 数秒之后试验棒上才有较大的气泡产生, 发生剧烈的突沸。

图5、图6表示了减压时用不锈钢、黄铜及铝试验棒作加热面时极小压力、最大回复压力与到达时间的关系。可以看出, 不锈钢、黄铜、铝的极小压力及最大回复压力顺次增

图4 沸腾样态(耐热玻璃 #220, $\Phi 10$)图5 极小压力 $P_{\min}$ 与时间 t_a 的关系(不同材质的试验棒)

高, 各极小压力的到达时间大致相等, 不锈钢的最大回复压力到达时间稍迟一些. 在这几种材料中, 铝的导热系数及热扩散系数最大, 其次为黄铜、不锈钢, 而耐热玻璃的导热系数最小. 当试验棒上存在温度梯度时, 导热系数高的金属向低温区的热的传导较迅速, 因此试验棒上沸腾的浸透速度也较快, 即气泡的产生速度较快. 由图7可以看出, 虽然三种试验棒到达最大回复压力的时间大致相同, 但沸腾浸透距离却有显著的差别, 铝试验棒的最长, 其次为黄铜, 不锈钢试验棒的浸透距离最短, 这说明铝试验棒作加热面时沸腾最剧烈, 持续的时间也较长, 因而其极小压力及最大回复压力值都是最高的.

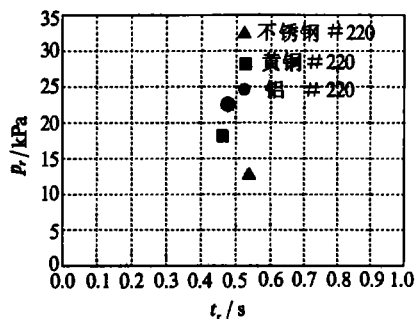


图6 最大回复压力 P_r 与时间 t_r 的关系
(不同材质的试验棒)

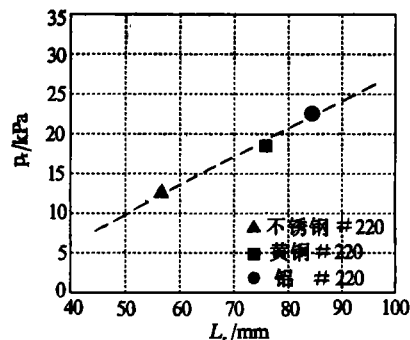


图7 最大回复压力 P_r 与沸腾浸透距离 L_r 的关系
(不同材质的试验棒)

3 结 语

(1) 加热面粗糙度对热量沿试验棒的传递速度影响不大, 但表面越粗糙, 划痕与空穴就越多, 气泡的产生也越容易.

(2) 加热面材料的导热系数与热扩散系数越大, 沿加热面进行的沸腾速度越快, 产生的气泡越多, 回复压力的最大值也越大.

致谢: 本实验工作是在日本室兰工业大学·极限环境研究室(花冈裕教授研究室)进行的, 衷心感谢给予本实验和研究大力支持和帮助的花冈裕教授和研究同仁, 同时也衷心感谢赵亮教授于百忙之中给予此论文写作的帮助和指导.

参考文献:

- [1] 花冈裕, 户仓郁夫. 低温液体急减压沸腾现象に関する研究[R]. 平成9年度文部省科学研究辅助基金、基础研究研究成果报告书, 1998.
- [2] 渡边敏晃, 花冈裕, 户仓郁夫. 减压に伴う液体窒素のフラッシング現象[C]. 日本机械学会论文集, 1995.
- [3] 冈信弘, 山本春树, 平田哲夫, 等. 传热工学[M]. 东京都: 森北出版社, 1989.
- [4] 石田惠介, 渡边敏晃, 花冈裕, 户仓郁夫. 液体窒素のフラッシングに及ぼす初期温度分布の影響[C]. 第72期日本机械学会全国大会讲演论文集, 1997.

A Study on Flashing Phenomena under sudden Depressurization of different Test Pieces **SUN Lei¹, ZHAO Liang¹, HANAOKA²**

(1. Dept of Mechanical Engineering, Dalian Railway Institute, Dalian 116028, China; 2. Muroran Institute of Technology, HOKKAIDO, Japan)

Abstract: The flashing phenomena of low temperature liquid under sudden depressurization were examined. Liquid Nitrogen was used as a test liquid. Different kinds of test pieces were used as heating surface to study the effect of different wall roughness and thermophysical properties of heating surface on pressure change and flashing pattern.

Key words: Liquid Nitrogen ; flashing phenomena ; depressurization ; test pieces

~~~~~  
(上接第 60 页)

## **The Coupled Principle and Application of Three Dimensional Joint Elements and Finite or Infinite Elements**

**BI Qiao-wei, JU Jian-min, ZHANG Fu-gui, GUO Ji-tan, CAO Zhi-jun**

(Dept. of Transportation Engineering, Dalian Railway Institute, Dalian 116028, China)

**Abstract:** A coupling system of three dimensional infinite or finite elements and joint infinite or joint finite elements is presented. This coupling system is used for simulating dam foundation with tectonic faults and analysing the stress and displacement result. The result shows that the system can successfully simulate the tectonic faults and can give a more accurate result than that of the joint elements ordinarily used.

**Key words:** finite element; infinite element; joint finite element; joint infinite element; dam foundation