文章编号: 1006-2467(2005) 02-0238-04

低温输送系统间歇泉现象实验研究

张 亮, 林文胜, 鲁雪生, 顾安忠 (上海交通大学制冷与低温工程研究所,上海 200030)

摘 要:为研究低温输送系统的低温垂直管路中可能出现的间歇泉现象,采用液氮为工质,进行了 间歇泉现象模拟实验研究.实验纪录了不同的管路结构及不同绝热结构条件下,管路出现的振动信 号及管路温度分布,并将实验结果与 Murphy 曲线进行了对比.结果表明,管路的长径比和绝热结 构对间歇泉现象的产生有较大的影响.

关键词: 低温液体; 输送系统; 间歇泉

中图分类号: TB6 文献标识码: A

Geysering Research in Cryogenic Transfer System

ZHANG Liang, LIN Wen-sheng, LU Xue-sheng, GU An-zhong (Inst. of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: A geyering experiment study in vertical cryogenic transfer system was made with liquid nitrogen as a working fluid. The vibration and temperature distribution ware recorded in different pipe structure and insulation conditions. The results of experiment were compared with the Murphy's result. From the results, it is clear that geysering is significantly affected by the pipe's structure and insulation conditions. Key words: cryogenic liquid; transfer system; geysering

间歇泉现象主要发生在低温液体垂直输送管路 中,该现象的产生将对管路系统产生结构性损坏.随 着低温推进剂在现代空间技术中应用的越来越广 泛^[1~4],低温液体在贮运中有可能产生的间歇泉现 象越来越受到重视,因此,研究低温输送系统中间歇 泉现象产生的机理具有重要的意义.

间歇泉现象指液体在长的低温垂直输送管路 中,由于液体汽化产生汽泡,汽泡不断增多并聚集堵 塞管路,最终将液柱挤出管路产生喷发的现象.这现 象导致低温液体将产生类似水锤的压力波动,会对 供应管道、阀门和管路造成结构性损害,同时也使液 氧的蒸发量显著上升.这种现象在火箭工业中经常 存在,尤其是在连接推进剂贮箱与火箭引擎的垂直 管路中. 在液化天然气(LNG) 的贮运的垂直输送管 路中也有该现象的产生^[5].

Murphy^[6]使用LH、LN、水和F113等工质对不 同长径比、不同流体的低温垂直输送管路进行了测 试,得出了长径比、管路漏热及工质物性等相关因素 之间的关系,并总结出了一条能够判定是否产生间 歇泉现象的 Mulyhy 曲线. Burkhalter等^[7]以水为 工质,Kuncoro等^[8]以氟利昂为工质进行了间歇泉 实验研究,他们认为用 Murphy 曲线在判断间歇泉 是否产生时有一定的局限性.

本文实验以液氮为工质,研究了低温垂直输送 管路中绝热结构、管路长径比对间歇泉现象产生的 影响.

收稿日期: 2004-03-01

顾安忠(联系人),男,教授,博士生导师,电话(Tel.):021-62932602, E-mail: Anzqu@online. sh. cn. © 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.

作者简介:张 亮(1977-),男,江苏宜兴人,博士生,现主要从事低温液体输送、贮运及气体分离、液化等方面的研究.

1 实验装置

间歇泉实验装置使用一个贮罐连接一根输送管路,管路端部密封,如图 1 所示.为了考察管路长径比、漏热量等因素对产生间歇泉现象的影响,模拟实验拟采用不同长径比及不同绝热结构的管路.输送管路有两种:单层输送管路(包覆 PEF 绝热);双层输送管路(抽真空绝热).管路的结构数据如表1所示,D 为输送管路内径,L 为管路长度.图1中测点 T₁、T₂、T₃测量的是单层输送管路壁面温度,T₄测量的是绝热层外表面温度.在双层输送管路系统中, 只测量管路外部温度.测量系统包括:测温、测压及测量振动信号系统.



图1 间歇泉实验装置示意图

Fig. 1 Experimental apparatus

表1 低温输送管路结构数据

Tab. 1 Structure of cryogenic transfer pipe

输送管路	编号	D/mm	$L/{\rm m}$	L/D	绝热方式
单层输送管	1	32	1. 10	34	绝热层 40 mm
(PEF 管绝热)	2	50	1. 00	20	绝热层初始时20 mm
双层输送管	3	16	0.48	30	真空夹层 8 mm,真空度
(抽真空绝热)	4	16	0. 80	50	0.5 Pa 真空夹层 8 mm,真空度
	5	16	0. 80	50	1.0 mPa 真空夹层 8 mm,真空度
					0. 1 mPa

间歇泉现象对系统的最大危害在于其可能形成 液击,造成瞬间压力急剧升高.为此,在单层输送管 路底部安装动态压力传感器以捕捉这一可能出现的 压力峰值.由于管内流体为液氮,温度很低,因此在 测压点处焊接了一段毛细管,防止压力传感器直接 与低温液体接触而产生损坏.同时液击产生的剧烈 压力波动在管路上必然形成振动,因此,实验中在管 路上安装振动传感器,以记录可能出现的振动.振动

2 实验步骤

整个模拟实验由单层低温输送管路和双层低温 输送管路间歇泉模拟实验组成.实验主要步骤如下:

(1) 连接贮罐及管路,包覆绝热层.布置测点.

(2) 向贮罐内充注液氮,约至贮罐 3/4 处,记录 温度、压力及振动信号数据.充注的液体保证在实验 期间输送管路内部充满液体.

(3) 实验结束,更换实验输送管段,重复步骤(1)、(2).

在单管输送管路实验中,改变了2号管路的端 部绝热结构,观测不同的漏热量对管路内间歇泉产 生的影响.

双层输送管路在实验前需要对管路进行抽真 空,根据实验的要求决定是否对管路进行加热、使用 扩散泵及延长抽真空时间.

3 实验结果

3.1 实验结果分析

1、2 号管路为 PEF 管包覆绝热, 在管路充注液 氮初期绝热效果较好, 约2 h以后管路法兰接头及管 路底部等绝热较差部分出现结霜结冰现象, 约3 h后 管路出现结霜现象.由于整个输送系统采用包覆绝 热,在法兰及管路端部绝热包覆效果较差, 绝热性能 没有管路中段好, 出现结霜及结冰的现象比管路中 段要早.

对于双层抽真空绝热管路,绝热效果较好,真空 度的高低直接影响到了绝热效果的好坏.实验对不 同真空度及不同长径比的管路进行了实验模拟.3 号管路采用机械泵抽真空,真空度仅为0.5 Pa,绝热 效果比 PEF 管绝热要好.4、5 号管路均使用了扩散 泵进行抽真空,在管路充注液氮后,抽真空口处的真 空度达到了 1.0 mPa 及0.1 mPa,绝热效果明显好 于1~3号管路.

由于间歇泉喷发并在管路内形成压力波动的时间较短,因此,对振动信号采取了高频率阶段性测量.图2(a)为1号管路在实验过程中记录下的一条 典型振动曲线,图右上角为第1个振动点放大后单 个振动点的波形图.由图可见,1号管路的振动曲线 出现了多次不规则的波动,即管路出现了振动现象. 由于在测量时实验装置没有外界振动干扰,因此可 以认为振动是由输送管路产生间歇泉现象后,液体 回流产生的水锤撞击管路底部造成了管路的振动. 从几组获得的振动曲线来看振动时间间隔为20.

传感器安装社管路底部,紧贴输送管管壁Electronic Publishio, 9126, 130 s等.没有明显的规律性、出此说明管t

路出现了不规则振动现象.

图 2(b) 为 3 号管路在产生间歇泉时出现的振动曲线. 由图可见, 在出现间歇泉的时候, 管路内会产生频繁的振动, 振动时间间隔小于20 s. 图 2(c)、(d) 分别为 4、5 号管路的典型振动曲线. 由于管路内径较小, 液体喷发后的回流现象不太明显, 回流引起的管内流体波动较小, 因此液体喷发较快, 振动时间间隔与 1 号管路相比较小.





2 号管路的振动曲线没有明显的振动信号.为 了改变绝热结构,采取了改变管路端部绝热结构及 对管路进行电加热的方法.但效果并不明显,振动曲 线还是没有明显的波动.造成这种结果的主要原因 是由于 2 号管路的长径比较小,管路内的气泡还没 有聚合成较大的 Taylor 气泡就已经冲出管路了,产 生不了明显的喷发及液体回流现象,因此振动也就 不明显.

图 3 为单层输送管路实验时 1、2 号管路管壁平 均温度随时间的变化曲线. 由图可见, 输送管路管壁 温度变化不大, 1 号管路的间歇泉现象的产生对管 壁温度影响较小。图 4 为单层输送管路中绝热层外 部温度随时间的变化曲线.1 号管路的温度变化较 小,2 号管路在实验中采取剥离绝热层的方法对管 路绝热结构进行了改变,绝热层外部温度有一定的 下降.单层输送管路采取的 PEF 管绝热的方法在实 验有效时间内绝热效果较好.当实验进行到2h以 后,在管路法兰连接处及管路末端才出现结霜现象. 4、5 号双层输送真空管路采用了高真空绝热,绝热 效果更好,而3 号管路为低真空绝热,绝热效果比 4、5 号管路差.



图 4 1、2 号管路的绝热 层外部温度曲线

Fig. 4 Variation of the temperature of outside of the insulation layer of the 1st and 2nd pipe with time

由于管路内是低温液体,故在测量压力时,压力 传感器无法直接安装在管壁上,而是通过从管路上 引出的毛细管安装的,因此,压力传感器接触的是毛 细管尾部已经气化的气体空间.由于液体的不可压 缩性,液体即使压力升高很多,其体积的改变也是很 小的,由此造成的气相空间的压力变化也微乎其微. 因此,间歇泉现象产生后,产生的压力波动被毛细管 中的气相空间衰减,在测出的压力曲线上没有产生 任何波动.由于振动信号是由剧烈的压力波动产生, 故振动信号的测出也能反映出管路内出现了不规则 的、剧烈的压力波动,即产生了间歇泉现象.但压力 没有测出,不能确定压力波动的大小,因此,压力测 量毛段需要改进rights reserved. http://www.cnki.net

3.2 与 Murphy 曲线对比

从间歇泉产生的机理可以看出,间歇泉的产生 与输送管的几何尺寸、管内流体的性质及漏热量有 关. Murphy^[6]给出了能够区分间歇泉与非间歇泉区 的曲线,如图 5 所示.相应的公式为

$$Y = C_1 \, \frac{L}{D} D^{-0.68} \tag{1}$$

$$Z = C_2 \frac{(q/A) L}{12Dr(Pr)^{1/3}}$$
(2)

式中: Z 为与漏热量、管路长度、流体性质相关的参数, kJ/m^3 ; Y 为与管路长径比和管路直径相关的参数; A 为管路传热区域的面积, m^2 ; D 为管路直径, m; L 为受热管路的长度, m; Pr 为普朗特数; q 为漏 热率, W; DT 为热扩散系数, m^2/s ; C_1 、 C_2 为常数, C_1 = 39. 37, C_2 = 37. 3.

将本次间歇泉实验管路长径比、漏热率及液氮 物性等参数代入式(1)、(2),并与其给出的曲线进行 对比,结果如图 5 所示.1 号管路的实验参数点远离 Murphy 曲线,产生间歇泉的机会较大;2 号管路实 验参数点略微高于 Murphy 曲线;3 号管路的实验 点虽然高于1 号管路,但由于管路内径较小,没有出 现明显的间歇泉现象;4、5 号管路长径比相同,真空 夹层厚度不同,在图中两点较为接近,均出现了明显 的间歇泉现象.





Murphy 曲线是从不同工质的多次实验总结得 出的, 其预测结果偏于易发生间歇泉现象. 采用液氮 为工质的模拟实验结果基本与 Murphy 曲线的预测 相符. 以液氮为工质的低温输送管路在一定绝热条 件下, *L/D*> 30 时产生间歇泉的可能性较大.

4 结 论

(1) 低温液体垂直长输送管路在一定长径比、 漏热率的条件下,有可能发生间歇泉现象. (2)对于以液氮为工质的低温垂直输送管路, 长径比和绝热方式对系统产生间歇泉现象有较大的 影响,其中长径比的影响更为显著.

(3) 实验产生的间歇泉现象从振动曲线来看, 没有周期性,现象产生时间间隔不定.

(4)间歇泉现象对垂直输送管路上管壁温度及 管路绝热层的温度影响不大.

(5) Murphy 经过实验得出的曲线对低温垂直 输送管路是否发生间歇泉现象的预测偏于容易发 生,但对于系统的结构设计和热工设计均有一定的 指导作用,可以节省大量的实验对比工作.

(6) 总结出了以液氮为工质的低温输送管路产 生间歇泉的大致范围,对低温推进剂在垂直输送管 路中的研究有重要意义.

参考文献:

- Nagai H, Noda K. Status of H- rocket first stage propulsion system [J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8(2): 313-319.
- [2] Hands B A. Problems due to superheating of cryogenic liquids [J]. Advance in Cryogenics, 1988, 28: 823 - 829.
- [3] 张 亮,林文胜,鲁雪生,等.低温液体输送系统间歇泉现象机理分析与消除措施[J].低温与超导,2002,30
 (2):1-6.

ZHANG Liang, LIN Wen-sheng, LU Xue-sheng, *et al.* Physical mechanism and elimination of the geysering effect in gryogenic liquid transfer system[J]. **Cryo-genics and Superconductivity**, 2002, 30(2): 1-6.

- [4] Zhang L, Ling W S, Lu X S, et al. Geysering inhibit ing research for single feed-line in gryogenic propellant transfer system [J]. Cryogenics, 2004, 44(9): 643 – 648.
- [5] Morioka M, Obama T. Simulation of the geysering phenomenon in LNG pipes [J]. Advance in Cryogenic Engineering, 1986, 31: 1111- 1119.
- [6] Murphy D W. An experimental investigation of geysering in vertical tubes [J]. Advance in Cryogenic Engineering, 1965, 10:353-359.
- Burkhalter J E, Sforzini R H. Investigations of geysering in vertical tubest [J]. Journal of Spacecraft, 1968, 5(7): 854-857.
- [8] Kuncoro H. Rao Y E, Fukuda K. An experimental study on the mechanism of geysering in a closed twophase thermosyphon [J]. International Journal of Multiphase Flow, 1995, 21(6): 1243-1252.