

低温管路预冷过程的实验研究

孙恒¹, 李兆慈¹, 张曙光², 徐烈²

(1. 中国石油大学城市油气输配技术北京市重点实验室, 北京 102249;

2. 上海交通大学制冷与低温工程研究所, 上海 200030)

摘要:搭建了低温管路预冷过程实验台,并对不同管长和不同入口压力下低温管路预冷过程中压力和温度的变化情况进行了实验研究。结果表明,管路较长时,不稳定现象表现得更加剧烈,管路预冷时间变长,并会产生更大的压力峰值。

关键词:低温管路;预冷;压力峰值

Experimental investigation of the pre-cooling process of cryogenic pipe

Sun Heng¹, Li Zhaoci¹, Zhang Shuguang², Xu Lie²

(1. China University of Petroleum, Beijing Key Laboratory of Urban Oil and Gas Distribution Technology, Beijing 102249, China)

2. Institute of Refrigeration and Cryogenics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: The experimental device of pre-cooling of cryogenic pipe was established. The pressure and temperature variations of cryogenic pipe during pre-cooling process was experimental investigated. The results show that the longer pipe will cause more serious unsteady process and increase the cooling time. Meanwhile, the peak value of the pressure was increased.

Keywords: Cryogenic pipe, Pre-cooling, Peak pressure

1 前言

对低温管路系统中的各种非稳定过程进行研究对于低温设备的经济、安全运行有着重要的意义,低温管路的预冷是其中最普遍的一种情况^[1~2]。随着我国 LNG 技术^[3]、新一代低温液体推进剂火箭及其地面加注系统、以及航天器空间环境模拟设备的发展,需要对低温管路的预冷过程进行更进一步的研究。为了加速预冷,需采用较大的预冷流量。但如果流量过大,由于低温液体剧烈汽化引起的压力回波,再加上剧烈冷却产生的冲击热应力,有可能造成严重事故^[4]。对预冷过程的实验研究有助于此类问题的解决。

符锡理^[4,5]分析了低温管路的预冷过程和预冷耗液量的计算方法,但没有对预冷过程中的不稳定过程进行研究。任德鹏,丁鹏飞等人采用均相两相流模型建立了一维模型对预冷(充填)过程进行了模拟^[6],但对流动中的不稳定过程考虑的很少。程谋森,刘昆等^[7]对用一维均相拟平衡流体动力学模型,对于液体推进剂低温输送管路系统的预冷过程进行了模拟计算,结果表明可以近似反映预冷充填过程的动态特性,但是由于缺乏数据,其计算结果在定量方面的预示精度还无法判断。由于低温管路预冷过程的复杂性,对此研究应建立在大量实验数据的基础上,但目前实验研究还太少。本文建立了低温输送管路实验台,并实验研究了低温管路预冷中管路温度和压力的变化和波动情况,以及管路长度和入口压力对预冷过程的影响。

2 实验装置和过程

2.1 实验装置

采用液氮作为工质,主管道全部采用通径为 10mm、外径为 12mm 的 1Cr18Ni9Ti 的不锈钢管。实验管道设计成可拆分的形式,以便组合成不同的管长。保温材料采用 3cm 厚的环状柱体聚苯乙烯保温材料。在实验管路上设有单向阀以防止液体倒流。采用厂家订制的低温气动阀门作为主阀,实验时将驱动气压调至接近最大,则阀门打开速度很快,可以认为阀门是瞬间打开的。整个实验系统如图 1 所示。实验中选定了 9m、6m、3m 三个管长和 350kPa、250kPa、200kPa 三个入口压力共 9 个组合工况对预冷过程作了实验研究。

收稿日期:2006-06-13

作者简介:孙恒(1976-),男,讲师,从事低温设备、LNG 和食品冷冻干燥的研究

2.2 主要参数测量

预冷过程的不稳定性要求参数测量响应速度快、灵敏度高、在低温下能正常工作。

(1) 压力测量:

采用 MSI 公司 Msp-320 系列传感器,并通过转换电路转为电压信号后与 Agilent 公司的 34097A 数据采集仪相连。为避免低温液体直接与压力感受元件接触,用通径 3mm 的紫铜管将压力引出。在气动阀门出口处(离截止阀入口处 100cm)、管道 1 与管道 2 接点(离截止阀 400cm)、管道 2 与管道 3 接点(离截止阀 700cm)处采集压力信号。

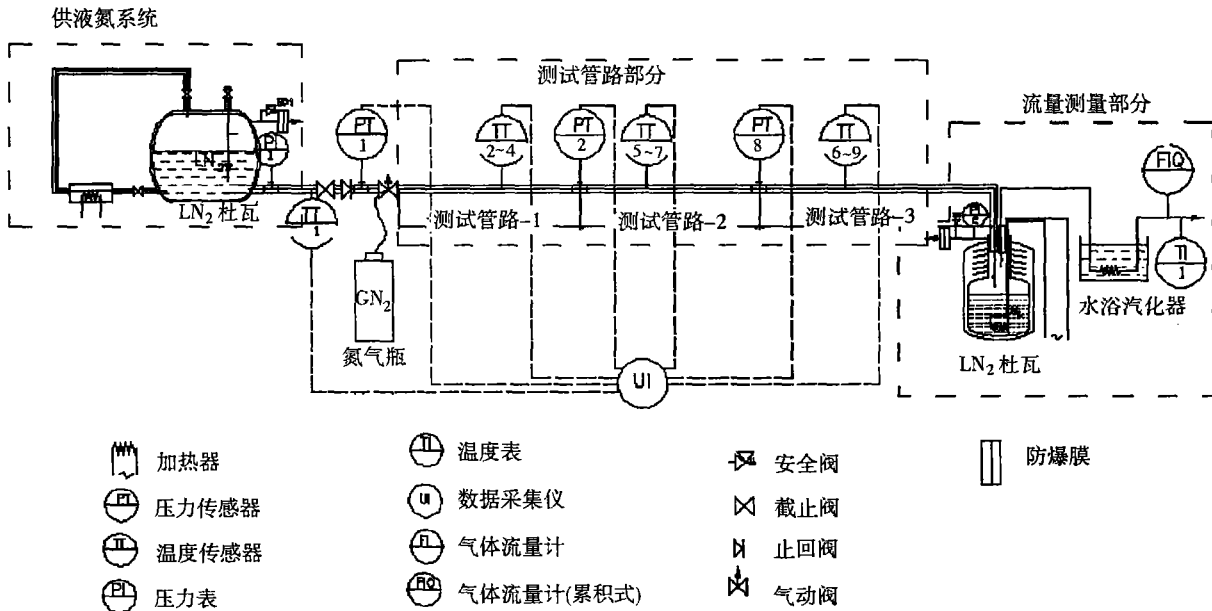


图 1 预冷过程研究实验装置示意图

Fig.1 Scheme of the pre-cooling experimental apparatus

(2) 温度测量:

采用自制的铜-康铜 T 型热电偶,其热惯性小于 0.1 秒,可满足低温下非稳态过程温度测量的需要。从截止阀入口开始,每隔 100cm 设一个测温点测量钢管壁温,共 10 个测点。

(3) 流量测量:

由于两相流态时很难直接测量其真实流量,因而采用累积测量气体流量的方法来间接测量流量(如图 1 所示)。

2.3 误差分析

(1) 压力测量误差分析

压力测量误差由传感器测量精度($\pm 0.5\%FS$,包括线性、重复性和回差)、信号转换器转换误差(0.1%)以及数据采集仪(0.01%)误差组成:

$$|F - F_0|_{\max} = \frac{5}{16} \times (20 - 4) \times 0.5\% + 5 \times 0.1\% + (5 - 0) \times 0.01\% = 0.0305V$$

转换为相对于整个测压范围的相对误差为 0.61%。

(2) 温度测量误差分析

数据采集仪与 T 型热电偶配合,在所测温区精度为 $\leq 1.5^\circ C^{[8]}$ 。

(3) 流量测量误差分析

平均液体流速的误差由气体流量计误差、长度测量误差、时间测量误差、水浴温度误差和压力测量误差组成:

$$\begin{aligned} \frac{dv}{v} &= \frac{dV}{V} + \frac{dp_0}{p_0} + \frac{dT_{\text{水}}}{T_{\text{水}}} + 2 \frac{dD_0}{D_0} + \frac{d\Delta\tau}{\Delta\tau} \\ &= 1\% + 0.61\% + 3.33\% + 0.2\% \times 2 + 0.33\% = 5.67\% \end{aligned}$$

3 实验结果及讨论

3.1 温度变化过程

实验中分别对 9 种组合进行了实验。其中管长 9m, 压力 $3.5 \times 100\text{kPa}$ 时预冷过程一壁温曲线如图 2 所示(图中第一点温度后期由于热电偶脱落而不准), 对应的压力变化过程如图 3 所示。管长 9m, 压力 $2.0 \times 100\text{kPa}$ 、管长 3m, 压力 $3.5 \times 100\text{kPa}$ 时的温度和压力变化曲线如图 4 和图 5 所示。从温度变化图中可以看出, 除第一点外, 其它各点的冷却过程均可以分成三段: 第一段冷却速度很慢, 此时经过这一点的管内流体处于气体或两相流状态; 第二段, 经过一段时间后流过此处的为液体, 此时冷却速度变大, 温度迅速下降; 最后当测点温度冷却到接近低温液体温度时, 冷却速度又变小。因此, 通过对冷却速度的测量, 就可以推断管路中低温液体的流动状态。压力的变化过程要复杂一些。整个过程中压力均处于波动之中, 这反映了管内流动的不稳定性。第一次压力波的波幅最大, 这也是最危险的情况。此后波幅越来越小。后面两点(P_2, P_3)的压力有先升后降的趋势。这是因为开始时管内为不稳定气化过程和两相流, 流阻较大, 后期管内流动以单相液体流动为主, 压力降低。

在管路较长且入口压力较大时, 流动及压力变化情况也较更复杂, 流动的不稳定性更剧烈: 预冷过程中间断地发出巨大的喘振声, 尾气回收装置出口的氮气流量波动剧烈。由于流量波动大, 不仅第一个压力回波非常大, 而且由于此后推进的两相流不断气化, 使得管路中的压力在一段时间内(图上 636~656s)一直处于较高的压力水平和较大的压力波动中。

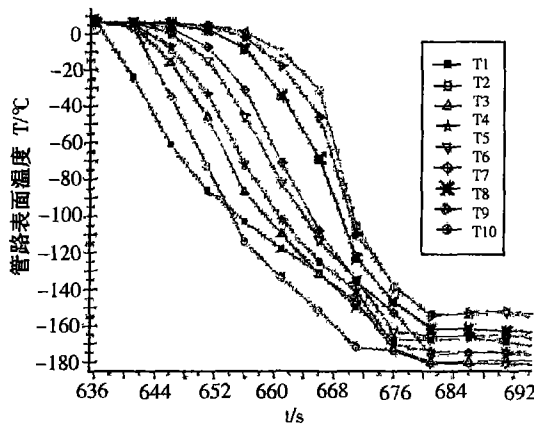


图 2 管长 9m, 压力 $3.5 \times 100\text{kPa}$ 预冷壁温曲线

Fig. 2 The cooling temperature curve for 9m and $3.5 \times 100\text{kPa}$

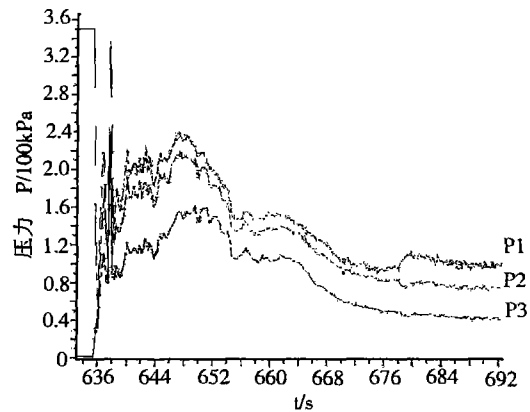


图 3 管长 9m, 压力 $3.5 \times 100\text{kPa}$ 时的压力曲线

Fig. 3 The pressure curve for 9m and $3.5 \times 100\text{kPa}$

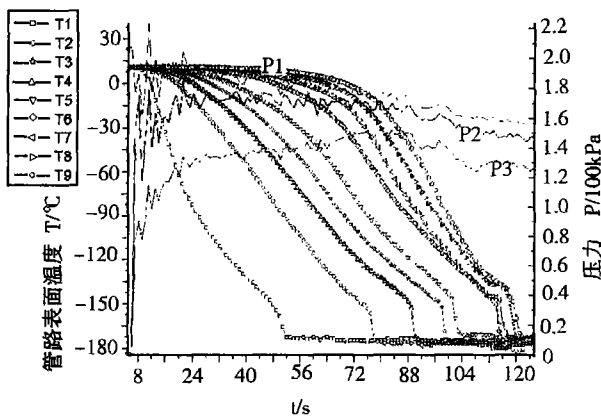


图 4 管长 9m, 压力 $2.0 \times 100\text{kPa}$ 时的预冷过程

Fig. 4 The pre-cooling process for 9m and $2.0 \times 100\text{kPa}$

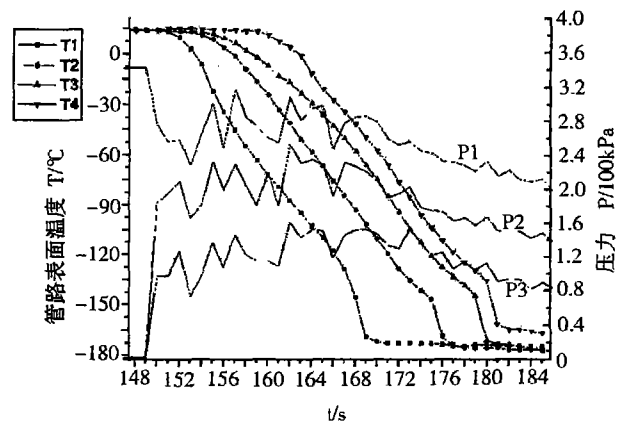


图 5 管长 3m, 压力 $3.5 \times 100\text{kPa}$ 时的预冷过程

Fig. 5 The pre-cooling process for 3m and $3.5 \times 100\text{kPa}$

3.2 冷却时间的讨论

三种管长、三个入口压力时管道的冷却时间如表1所示。从中可以看出,在管路较短、入口压力较小的情况下,管道的整体冷却时间基本与管长成比例。这是因为这种情况下管内流运过程较为平稳。随着管路变长和入口压力的上升,管路预冷过程的不稳定性增加,此时的预冷时间与流动过程的不稳定性相关,与管长间不存在简单的函数关系。从表中还可得出,较大入口压力时($3.5 \times 100\text{kPa}$)的冷却速度要比中间压力($2.5 \times 100\text{kPa}$)和低压($2.0 \times 100\text{kPa}$)时的冷却速度都要慢,这与单相流冷却时压力越大,冷却速度越快的特点相反。这是因为在较大入口压力下,管内产生剧烈的流动波动,而且推进的两相流在到达管末端前就完全气化,导致管内低温介质流动受阻,从而使第一点冷却变慢。

3.3 压力峰值的讨论

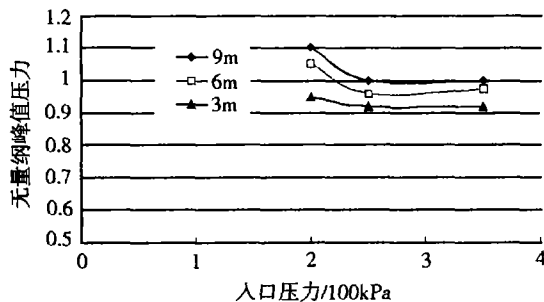


图6 预冷过程中无量纲压力峰值($p^* = p/p_0$)

Fig. 6 The dimensionless peak pressure during pre-cooling process

低温液体直接进入热管路后形成的最大压力波对管路运行的影响最为关键,通常第一压力波即是压力波动的峰值^[2,6]。但有时由于阀门开启并非瞬时完成,在阀门完全打开前如有部分液体进入管道,就会产生少量较小的压力波。本文以下对压力峰值时进行讨论。图6是预冷过程中无量纲压力峰值($p^* = p/p_0$)。从图6看出,随着入口压力增加,压力峰值也随之增加,而无量纲峰值在压力较低时稍大,此后随压力上升的变化不大。而随着管路长度增加,则压力峰值和无量纲压力峰值均增加。这是因为在管道较长时,低温液体在管路中更容易大量气化积聚,进而产生更激烈的回波并导致更大的压力峰值。

4 结论

(1) 预冷过程中,存在冷却速率和压力分布的规律性

变化,可据此推断管内的流动状态。

(2) 管路较长且入口压力较大时,不稳定现象表现得更加剧烈,预冷过程中会间断地发出喘振声,同时压力发生剧烈波动。

(3) 在管路较长和压力较大时,由于管内产生剧烈的流动波动,而且两相流在推进到管末端前就气化,从而使管路预冷时间变长。

(4) 在管道较长时,低温液体在管路中更易大量气化积聚,进而使压力回波峰值增大。

参考文献

- 1 张曙光,徐烈,刘凤梁,等. 低温液体管路输送中几个问题的分析,低温与超导,2004,32(4):11~14.
- 2 尼.瓦.费林,亚.波.布拉诺夫. 液体低温系统. 北京:低温工程编辑部,1993,87~88.
- 3 徐烈,李兆慈,张洁,等. 我国液化天然气(LNG)的陆地储存与运输. 天然气工业,2002,22(3):89~91.
- 4 符锡理. 低温系统的预冷过程和计算. 低温工程,1998,(2):1~6.
- 5 符锡理. 低温系统的预冷过程和计算,导弹与航天运载技术,1995,(6):22~28.
- 6 任德鹏,丁鹏飞,夏新林,等. 低温液体充填管路的数值计算,工程热物理学报,2004,25(1):118~120.
- 7 程谋森,刘昆,张育林. 低温推进剂供应管路预冷充填瞬变流计算. 推进技术,2000,21(5):38~41.
- 8 《现代综合机械设计手册》编委会. 现代综合机械设计手册. 北京:北京出版社,1999.