

## 低温液体送入热管道后的升压过程

徐烈 李兆慈 赵兰萍 孙恒

(上海交通大学 上海 200030)

**摘要** 分析了低温液体输入热管道后升压过程,并对输送过程中的临界质量流进行了计算,结合有关文献的实验数据,给出输送过程中的压力计算公式。并提出了减少压力最大值的方法,对于低温液体输送参数的确定、管道的设计提供参考。

**主题词** 低温液体 输送 热管道 升压

### 0 前言

在低温过程中,常常要涉及到低温液体的管道输送,如充液、排液等。在液体管道送过程中,由于管道的温度高于液体的蒸发温度以及外部的漏热,使液体升温并蒸发,压力升高,使输送的阻力增大,造成输送困难。本文将根据传热学与流体动力学的有关知识,推导出输送过程中压力的计算式,并给出了减少压力最大值的方法,为低温液体的输送参数的确定和管道的设计提供参数。

### 1 液体送入热管的过程描述

为讨论的方便,以等截面的热管为对象,讨论低温液体进入热管道的行为。首先,由于管道温度较高,与液体温度间存在温差 $\Delta t$ 。对于过冷液体,其液体温度先上升到该压力的蒸发温度,在再这个温度下蒸发(汽化),以这两部分焓降来平衡管道的热容与漏热。

对于低温管道的冷却过程,最主要是确定压力波的振幅。因最大压力可能超过允许压力,而低温液体直接进入热管后,第一次形成的最大压力(即峰值)超过了管道压力允许值,故只要控制流量和压力波第一峰值就可以满足使用要求。第一峰值产生的机理如下:

当开启入口阀,过冷的低温液体在压差的驱动下快速充填管道,由于管道的过热,液相与管壁之间被蒸汽膜隔开,出现了变形的心轴流态。此时的阻力系数很小,此压差用于驱动流体,故其流速很高。如压差 $\Delta p=0.1\text{ MPa}$ 下,阀门的阻力系数 $\zeta=4$ 时,液氧的流速可达 $5.9\text{ m/s}$ ,液氮的流速可达 $7\text{ m/s}$ ,而管内的计算流速一般为 $2\sim 3\text{ m/s}$ 。试验研究表明<sup>[1]</sup>,过冷液体中的蒸汽膜非常薄,它对液体运动无约束。另外,由于气膜的粘度比液体粘度小一个数量级,而导致切向应力的减小,随着液体沿管路方向的流动而其逐渐升高,管路应力也增大,填充速度也减小,达到某一管路后,液体头部温度达到与容器应力相对应的饱和温度,液体就

徐烈,男,57岁,教授。

停止进入管路。此时液体的温升与蒸发量的增加也破坏了液体的形态。液体温升达到饱和状态后，此时来自管壁的全部漏热均用于液体蒸发。由于汽化的速率增高，管路中的压力也升高，此时尽管液体停止进入，但管路中的压力依然比入口处高1.5~2倍。以后随着液体的蒸发，蒸发气体从入口处排出，而使液体反向被压回容器。在管路中蒸发速率减小，经过一段时间后，又达到液体进入的条件，此时由于管内有较高的压力，和保留的部分液体，使得新进入液体的压力增长变小，其流量与压力波的振幅均小于第一次峰值。某一典型低温液体（液氮）进入热长管后的流速与压力变化曲线如图1所示。

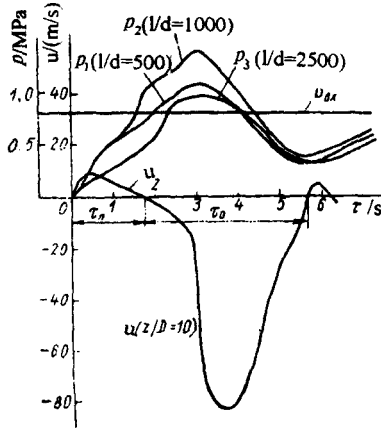


图1 低温液体(LN<sub>2</sub>)进入热长管后入口流速和压力变化的典型曲线

(管径  $D=20$  mm, 管壁  $\delta=1$  mm, 长径比  $L/D=5000$ , 壁温  $T_w=290$  K, 液体温度  $T_b=78$  K,  $\tau_n$ —液体水平移动时间,  $\tau_o$ —液汽混合物反向运动时间。)

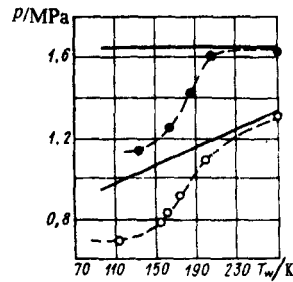


图2 液氮进入热管道时壁温对管中升压的影响

( $\phi=20$  mm,  $\delta=1$  mm,  $L/D=2500$ ,  $p_{bx}=0.7$  MPa,  $T_{bx}=78$  K,  $p_{out}=0.1$  MPa  
 •—直管; o—管路开口; ---按式(18)计算值。

## 2 产生第一峰值的流量与压力计算

前面论述低温液体进入热管道后的行为，从中可以看出，第一峰值的计算非常重要。若忽略声波的影响，低温液体的流动可以用伯努利方程描述

$$\rho \frac{\partial u}{\partial \tau} - \rho u \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{dp}{dz} - \Delta p_{bx} = 0 \tag{1}$$

代入边界条件  $p_{z=0} = p_{bx}$ ,  $u_{z=0} = 0$ , 方程(1)在指定的时间范围内又写成  $\frac{\partial u}{\partial \tau} = u \frac{\partial u}{\partial z}$ , 然后按时间和座标积分得出

$$u_{i+1} = u_i^2 \cdot \frac{z_i}{z_{i+1}} + \left(1 - \frac{z_i}{z_{i+1}}\right) \frac{2\Delta p}{\rho L} \tag{2}$$

式中, 
$$\Delta p = p_{bx} - P_z - \frac{\rho_L u^2}{2} \left(1 + \xi(\tau_i) + \frac{\lambda_T z_i}{D}\right) \tag{3}$$

$z_i, u_i$  为  $\tau_i$  时间内液体头部的座标和流速。

过冷段的液体温度

$$T_{i+1} = T_{ij} + q \frac{4\Delta\tau}{C_{pL}\rho_L D} \tag{4}$$

$$q = \frac{0.023\lambda_T}{D}(T_w - T_s)Re^{0.8}Pr^{0.4} \quad (5)$$

其定性温度  $T=0.5(T_w+T_s)$ 。

蒸发段的振幅速率按下式计算:

$$G_{ij} = 0.5(z_{i+1j} - z_i) \frac{qR}{i_g - i_L} \quad (6)$$

式中  $R$  为经验系数, 其值为  $R = \exp[-12.4(x_j^{1.715} - 0.254)^2]$ 。

压力达到峰值时, 产生的蒸气质量  $G_{g,p}$  与流出量  $G_{g,o}$  的应相等, 即  $G_{g,p} = G_{g,o}$  或者  $(\rho u)_{g,p} = (\rho u)_{g,o}$ , 而排出的蒸气质量由两部分组成:

$$(\rho u)_{g,o} = (\rho u)_1 + (\rho u)_2 \quad (7)$$

式中,  $(\rho u)_1$ 、 $(\rho u)_2$  分别为通过管子开口端流出的气体质量流速和反向阀门流入容器的气体质量流速。对于稳定流的气体, 在  $T_0$  等温过程中的质量流速为

$$(\rho u)_1 = \sqrt{(p^2 - p_a^2)/RT_0 \left( \frac{\lambda_T L}{D} + 2 \ln \frac{p}{p_a} \right)} \quad (8)$$

式中,  $p_a$ —出口压力,  $p$ —压力最大时阀门后的压力,  $T_0$ —管壁温度。

因为  $p_a^2/p^2 \ll 1$ , 又  $\ln \frac{p}{p_a} \ll \frac{\lambda_T L}{D}$ , 故方程可以简化为

$$(\rho u)_1 = p / \sqrt{RT_0 \frac{\lambda_T L}{D}} \quad (9)$$

管路出口处局部阻力系数为  $\xi_{out}$ , 则对通道面积为  $f$  的当量孔板, 有如下关系

$$\alpha f = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{1.19}{1 + \sqrt{\xi_{out}}} \quad (10)$$

气体通过孔板时, 在临界压差下的流量为

$$G_1 = \frac{\alpha f p m}{\sqrt{RT_0}} = \frac{\pi D \times 1.19 p m}{4(1 + \sqrt{\xi_{out}}) \sqrt{RT_0}} \quad (11)$$

式中,  $p$ —孔板前压力,  $m = \sqrt{R \left( \frac{2}{R+1} \right)^{\frac{R+1}{R-1}}}$ , 对于双原子气体  $m=0.685$ 。

将式 (9) 与式 (11) 联解, 可得到气体质量流速计算公式

$$(\rho u)_1 = p / \sqrt{\left[ \frac{\lambda_T L}{D} + \frac{(1 + \sqrt{\xi_{out}})^2}{1.416 m^2} \right] RT_0} \quad (12)$$

对于双原子气体

$$(\rho u)_1 = p / \sqrt{\left[ \frac{\lambda_T L}{D} + 1.5(1 + \sqrt{\xi_{out}}) \right] RT_0} \quad (13)$$

而计算通向容器气体质量流速时, 若阻力仍用当量孔板, 并取气温等于液温, 加上管道中压力上升值比容器中高的多, 故按临界流计算

$$(\rho u)_2 = 1.19 m p / [(1 + \sqrt{\xi_{in}}) \sqrt{RT_s}] \quad (14)$$

这样可以得到压力到达峰值时的流出质量流速  $(\rho u)_{g,o}$  和产生的最大压力  $p$  的计算式

$$(\rho u)_{g.o} = \frac{p}{\sqrt{\left[\frac{\lambda_T L}{D} + 1.5(1 + \sqrt{\xi_{out}})^2\right]RT_0}} + \frac{p}{\sqrt{1.5(1 + \sqrt{\xi_{in}})^2RT_S}} \quad (15)$$

$$p = (\rho u)_{g.p} = \frac{1}{\sqrt{\left[\frac{\lambda_T L}{D} + 1.5(1 + \sqrt{\xi_{out}})^2\right]RT_0}} + \frac{1}{\sqrt{1.5(1 + \sqrt{\xi_{in}})^2RT_S}} \quad (16)$$

有人针对上述公式,通过试验,给出下列管内产生气体质量流的经验公式:

$$(\rho u)_{g.p} \approx \sqrt{\frac{2\rho_L(p_{bx} - p_a)}{\xi_{in}}} \left(\frac{p_{bx} - p}{p_a}\right)^{0.18} \cdot \left(\ln \frac{\theta}{Q_k}\right)^{1.34} \quad (17)$$

最大压力  $p$  为

$$p = A \frac{\left[\frac{(p_{bx} - p_a)^2 p_L}{\xi_{in}}\right]^{0.5} \cdot \left(\frac{p_{bx} - p_a}{p_a}\right)^{0.18} \cdot \{\ln[T_S(p_b) - T_b]\}^{1.34}}{\left[\frac{\lambda_T L}{D} + 1.5(1 + \sqrt{\xi_{out}})^2 RT_0\right]^{-0.5} + [1.5(1 + \sqrt{\xi_{in}})^2 RT_S]^{-0.5}} \quad (18)$$

式中,  $A$  为系数。该式适用范围:  $L/D \geq 1500$ , 工质为液氧、液氮、入口过冷度  $\theta = T_S(p_{bx}) - T_{bx} > 3$  K,  $p_{bx}$  为  $(0.2 \sim 1)$  MPa,  $\xi \leq 500$ 。

### 3 减小峰值的方法

为了减小峰值,不仅要考虑液体入口温度与压力,还要考虑管路的特性,即对气体的排放条件。当出口处的局部压力系数增加时,压力趋某一极限,不再与管长有关。当  $\xi \rightarrow \infty$  时,管路变成盲管  $((\rho u)_1 = 0)$ , 则式(18)变成

$$p = A \frac{\left[\frac{(p_b - p_a)^2 p_L}{\xi_{in}}\right]^{0.5} \cdot \left(\frac{p_b - p_a}{p_a}\right)^{0.18} \cdot \{\ln[T_S(p_b) - T_b]\}^{1.34}}{[1.5(1 + \sqrt{\xi_{in}})^2 RT_S]^{-0.5}} \quad (19)$$

若在入口处有单向阀,气体排出只能通过管子开口端,  $(\rho u)_2 = 0$ , 则式(18)有如下形式

$$p = A \frac{\left[\frac{(p_{bx} - p_a)^2 p_L}{\xi_{in}}\right]^{0.5} \cdot \left(\frac{p_{bx} - p_a}{p_a}\right)^{0.18} \cdot \{\ln[T_S(p_{bx}) - T_{bx}]\}^{1.34}}{\left[\frac{\lambda_T L}{D} + 1.5(1 + \sqrt{\xi_{out}})^2 RT_0\right]^{-0.5}} \quad (20)$$

试验表明,壁温  $T_0 < 200$  K 时,  $P$  计算值与实验值相差很大,见图 2。

从上述推导和实验数据中可以看出,为了减少低温液体进入热管后的压力波峰值可以采用如下措施:

- (1) 采用预冷降低壁温,如下降 200 K 以下;
- (2) 降低作用在阀门之上的压差,即选用低阻力系数的阀门;
- (3) 提高低温液体的过冷度;
- (4) 在管路入口处增设附加阻力。

### 参 考 文 献

- 1 Кошкин В К, Калинин З К, Дречер Т А, Ярхо. С А Нестационарный теплообмен. Машиностроение, 1973. 327с.
- 2 华绍曾, 杨学宁等编译. 实用流体阻力手册. 北京: 国防工业出版社, 1985.

3 吴世功等编译, 徐烈审校. 低温工程学基础. 上海: 上海交通大学出版社, 1991.

## THE PROGRESS OF PRESSURE RISING FOR CRYOGENIC LIQUID IN THE HOT PIPE

Xu Lie Li Zhaoci Zhao Lanping SunHeng

(Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 20030)

**ABSTRACT** In this paper the progress of pressure rising for cryogenic liquid in the heated pipe was analyzed and the critical mass flow velocity in the transfer process was calculated. According to the experimental data in some literatures, the calculation formula of the pressure in this transfer process was proposed. The ways to reduce the maximum pressure were also proposed in this paper. It provided the reference to determine the parameter in transferring cryogenic liquid and to design the pipes.

**KEYWORDS** cryogenic liquid; transfer; hot pipe; pressure rising