

加。狭窄裂缝的平均当量热导率是  $3\sim 8\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ 。单位裂缝面积上热流的增大是裂缝纵横比的函数,其最大值为  $149\text{ Wm}^{-2}$ 。

2.用镀铝迈拉补片补盖每层的效果是好的,但不容易安装。而用双面镀铝迈拉,  $1000\text{ \AA}$  的平补片叠盖在几层上,将与在每层上加补片几乎效果相同。把补片补在外(热)半部分比补在内(冷)半部分要好得多。把补片叠放在裂缝外侧并不很有效。

3.用镀有较厚铝层( $1000\text{ \AA}$ )的迈拉作为补片材料较好。单面镀铝  $300\sim 500\text{ \AA}$  的皱纹迈拉易于安装,因为它不需要间隔物。

4.减少狭窄裂缝的冷表面的发射率,对热流没有明显影响。

5.裂缝和补片的存在,改变了近裂缝处多层绝热体的温度分布。随裂缝宽度增加,

最接近冷表面的层温增高,最接近热表面的层温降低。补片使近裂缝处的多层绝热体的温度比裸露的狭缝低。最后(最热)的补片的温度较高表明,补片系统能保护冷表面,使之免受入射辐射。

6.裂缝的局部当量热导率是沿裂缝的补片分布和补片数量的敏感函数。当在多层绝热体的热半部分安装补片时,离冷表面的第一块补片周围有一最小值,在第一块补片后的几层里有一最大值。

7.实验结果与增强的黑腔模型普遍相符合。

#### 参 考 文 献 (共17篇,略)

浙江大学低温工程教研室陈虹译自:  
Cryogenics, 27 (6),  
298—311 (1987), 陈国邦校

### 测试仪表

## 电容式低温流体密度计的原理及实验法

浙江大学低温工程教研室 陈国邦 黄志秀 崔培红

### 一、前 言

由于低温流体输送系统中始终存在着热漏,因而这些系统中出现两相流动是难以避免的。两相流的存在,使测量流体流量、计算压降等参数的问题变得相当复杂,可以说是低温技术中的一个难题。

如果低温流体输送系统中饱和蒸汽和饱和液体的介电常数具有足够大的差值,就可以通过电容式密度计测出系统中流体的平均

电容值,进而求出系统中两相流体的流量及干气分率。

采用的电容探测器元件的结构和形状,具有相当大的选择余地。例如,可以由两个同心圆筒、两个平行板或若干平行线组构成。本文重点介绍电容式密度计的工作原理及实验方法。

### 二、工作原理

如果两相混合流体的质量分率已知,那

么, 两相流体的密度为

$$\frac{1}{\rho} = \frac{(1-x)}{\rho_f} + \frac{x}{\rho_g} = \frac{1}{\rho_f} + x \left( \frac{1}{\rho_g} - \frac{1}{\rho_f} \right) \quad (1)$$

式中,  $x$ —混合流体的质量分率,

$\rho_f$ —饱和液体的密度,

$\rho_g$ —饱和蒸汽的密度。

由电容式密度计测得的平均电容值可由下式表示

$$C = 2\pi L \varepsilon \varepsilon_0 / \ln \left( \frac{D_o}{D_i} \right) \quad (2)$$

式中,  $D_o$ —圆柱式电容器内筒外径,

$D_i$ —圆柱式电容器外壳内径,

$L$ —密度计圆柱长度,

$\varepsilon$ —一环隙中流体混合物的相对介电常

数,

$\varepsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12} \text{ F/m}$ —自由空间的介电常数。

两相混合物的相对介电常数与蒸汽和液体的容积分率成线性关系

$$\begin{aligned} \varepsilon &= y \varepsilon_f + (1-y) \varepsilon_g \\ &= \varepsilon_f - (1-y) (\varepsilon_f - \varepsilon_g) \end{aligned} \quad (3)$$

式中,  $\varepsilon_f$ —饱和液体的介电常数,

$\varepsilon_g$ —饱和蒸汽的介电常数,

$y = V_f / (V_f + V_g)$ —液体的体积分率。

表 1 给出了若干低温介质的介电常数。

由表 1 可见, 氧、氮和氢的液体和气体的介电常数比具有较大的数值, 分别为 1.482、1.430 和 1.223, 可采用电容式密度计测量气液比率。

表 1 低温介质的介电常数  $\varepsilon$

| 介 质            | 标 准 气 体  | 沸 点 气 体 | 沸 点 液 体 | $\varepsilon_L / \varepsilon_G$ |
|----------------|----------|---------|---------|---------------------------------|
| O <sub>2</sub> | 1.000494 | 1.00156 | 1.484   | 1.482                           |
| N <sub>2</sub> | 1.000548 | 1.00206 | 1.433   | 1.430                           |
| H <sub>2</sub> | 1.000254 | 1.00387 | 1.228   | 1.223                           |
| He             | 1.000064 | 1.00618 | 1.048   | 1.042                           |

由式 (3) 可求出蒸汽分率

$$1-y = \frac{\varepsilon_f - \varepsilon}{\varepsilon_f - \varepsilon_g} \quad (4)$$

两相混合物的密度也可写成体积分率的关系

$$\rho = y \rho_f + (1-y) \rho_g = \rho_f - (1-y) (\rho_f - \rho_g) \quad (5)$$

因此, 体积分率和质量分率的关系为

$$x = \frac{m_g}{m} = \frac{V_g \rho_g}{(V_f + V_g) \rho} = (1-y) \frac{\rho_g}{\rho} \quad (6)$$

应当指出, 由于介电常数与饱和液体及蒸汽的密度都是压力的函数, 因此, 用 1 个压力下标定的密度计测量不同压力的流体密

度时, 会产生误差。在 0.1MPa 和 0.71MPa 下, 液氢的测值大约有 5% 的误差。

### 三、关系曲线预测

流体的介电常数可由 Clausius—Massitti 方程来估算

$$\frac{M(\varepsilon - 1)}{\rho(\varepsilon + 2)} = \alpha_M \quad (7)$$

式中,  $M$ —分子量,  $\rho$ —密度,  $\alpha_M$ —分子极化强度 (见表 2)。

表 2 低温流体的分子极化强度

| 物 质                                | He     | H <sub>2</sub> | Ne     | N <sub>2</sub> | Ar    | O <sub>2</sub> | CH <sub>4</sub> |
|------------------------------------|--------|----------------|--------|----------------|-------|----------------|-----------------|
| $\alpha_M(\text{cm}^3/\text{mol})$ | 0.5173 | 2.083          | 1.0254 | 4.380          | 4.207 | 3.878          | 6.930           |

对于氢, 由式 (7) 得

$$\rho = \frac{M}{\alpha_M} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} = \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} (\text{g/cm}^3) \quad (8)$$

$$\text{亦即} \quad \varepsilon = \frac{V + 2}{V - 1} \quad (9)$$

式中,  $V = 1/\rho$

对于两相混合物

$$V = xV_g + (1-x)V_f = V_f - x(V_f - V_g) \quad (10)$$

将式 (10) 代入式 (9)

$$\varepsilon = \frac{(V_f + 2) - (V_f - V_g)x}{(V_f - 1) - (V_f - V_g)x} \quad (11)$$

密度计测出的电容值

$$C = \frac{2\pi L \varepsilon_0 \varepsilon}{\ln(D_o/D_i)} = 59.291 \times 10^{-12} \varepsilon \text{ (F)} \quad (12)$$

式中,  $L = 0.6\text{m}$ ;  $\varepsilon_0 = 8.8542 \times 10^{-12}\text{F/m}$ ;  $D_o = 66.9\text{mm}$ ;  $D_i = 38.1\text{mm}$ 。上述尺寸数据应按探测器的实际尺寸代入, 这里仅是一个假设值。

在压力已知的条件下,  $V_f$  和  $V_g$  已知, 可见式 (11) 给出了介电常数与气相质量分率的关系, 由式 (12) 即得电容值和气体质量分率的关系。

图 1 给出了按上述方法计算的液氢在 0.1MPa 和 0.33MPa 压力下的  $\varepsilon$  和  $x$  的关系。由图可知, 介电常数和含汽率  $x$  在一定范围内呈线性关系。

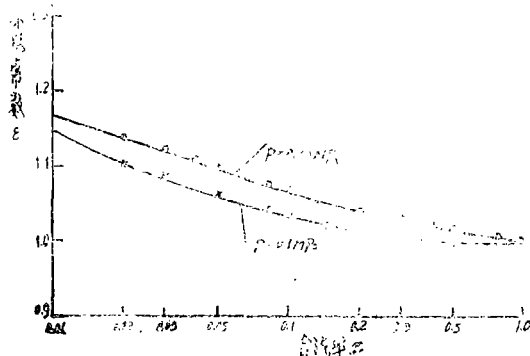


图 1 液氢两相流的介电常数与蒸汽质量分率的关系

#### 四、电容探头的结构

图 2 示出了一种常用的电容探头结构, 它由一根内金属杆和与之同心的圆筒形外套管组成, 内杆通过绝缘支承件悬挂在外套管中。环形空间的横截面积与输送管线的流通截面积相等, 以保证装入探头后不会改变流体的流动状态。

#### 五、静态试验

电容探头和仪表在进行动态试验之前, 必须进行静态标定, 其标定装置如图 3 所示。电容探头安装在真空绝热的液化气体杜瓦瓶中。杜瓦瓶内装有若干只定点液面计, 与电桥线路相连接, 用来指示和调节杜瓦瓶中的液面位置。试验时可按一定的体积百分数进行, 如用 100%、75%、50%、25% 和

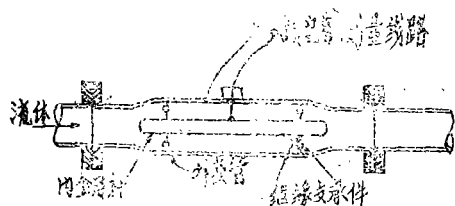


图 2 电容探头结构

0 % 的液体进行测量，分别记下相应的电容仪读数，视为相应液位时平均干气质量分率下的平均电容值，最后作出电容与干气质量含率的关系曲线。

由于连接电容的同轴电缆的电容随温度而变化，故应将同轴电缆保持恒定温度。研究表明，当室温变化时，电容指示仪的读数随之变化，引入的误差可达 5~8 %。

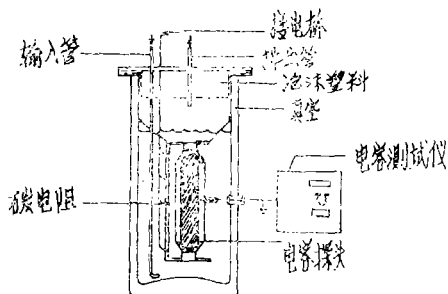


图 3 静态标定装置

## 六、动态试验

实际输液系统的工作是一个动态过程，要求测试仪表具有一定的灵敏度和瞬态性能。为了进行实验室内的动态试验，可采用如图 4 所示的试验装置。其中，加热器可采用电加热或采用室温气体加热。当试验介质是液氮时，采用电加热。对于可燃易爆介质，则应采用室温气体加热。加热后汽化了的气体经电容探头的环形空间排出，由气体流量计测量，由此可换算成电容探头环隙中的气

液比，同时测出电容值。改变加热功率，导致不同的汽化率，可获得不同气液比的流体在流动状态下的电容值。

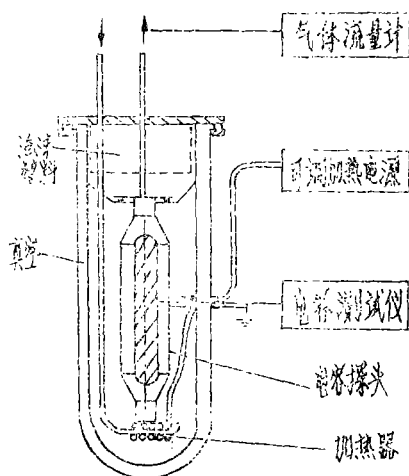


图 4 动态试验装置

## 七、模拟试验

图 5 示出了液氢密度计模拟试验装置，它由容积为  $6\text{m}^3$  的液氢贮槽、试验管段、节

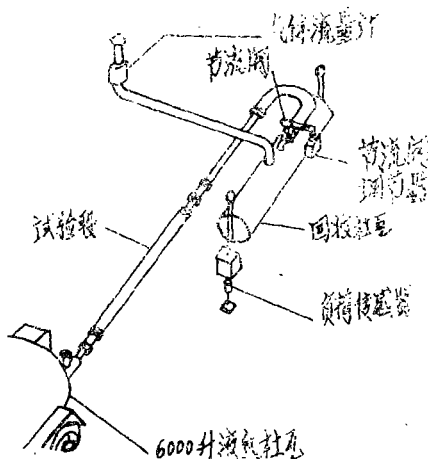


图 5 模拟试验装置

流阀、液氢回收贮槽及计量仪表等组成。试验管段的进、出口装有压力、温度测量装

置,以给出试验时的流体工况。调节节流阀的开度,可改变流体的流量。

电容探头的基本测量线路如图6所示。振荡器电路由测量电容探头、两个半导体电容器和电感等组成。如果有两相流动状态存

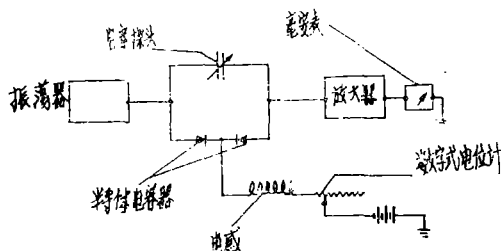


图6 电容密度计测量线路

在,则探头间隙中介质的介电常数就要变化,因而引起电容值的变化,以致振荡器回路的电感—电容变化,破坏了回路的谐振。调节数字电阻计,改变加在半导体电容器上的压降,使回路再次回到谐振状态。数字式电阻计的读数就相当于电容探头上的某个电容量,亦即对应于液体的汽、液比。

## 参 考 文 献

[1] W. R. Killion and J.O.Simpson, "Measuring Vapor—Liquid Ratios During Flow by a Capacitance Method", 《Advances in Cryogenic Engineering》, Vol.5, p.505—508, 1960.

[2] W.L.Willis and J. R. Smith, "Detection of Density Variations in Flowing Two—Phase Hydrogen", 《Advances in Cryogenic Engineering》, Vol.10, P.323—329, 1965.

[3] K.D. Williamson, Jr., "Techniques for Determining Average Density and Related Parameters", 《Advances in Cryogenic Engineering》, Vol. 17, P.206—211, 1972.

[4] "Capacitive Fluid Gauging Probe Calibration", U.S.P.4509366—A.

[5] "Capacitance Sensor for LHe Detection Research", U. S. P. 4470008—A.

[6] "Gas Flow Meter Using Capacitance Measurement", U.S.P.4484479—A.

[7] R. F. Barron, 《Cryogenic Systems》, P.337~340, 1985.

[8] NASA TN D—5015.

(1988年3月29日收稿)

# 13~273K工业铂电阻温度计的稳定性

J.Vepřep

本文考察了用于13~273K的5支双引线100Ω的工业铂电阻温度计的稳定性。静态稳定性是将温度计置于室温3个月后检查的,动态稳定性是将温度计从室温到液氮温度重复进行5次和50次热循环后测得的。有4支温度计经5次热循环后,动态不稳定性在273K时小于0.3K,在13K时小于0.15K。仅1支温度计显示的动态不稳定性在两个温度点小于0.05K。所有的5支温度计的静态不稳定性比动态不稳定性低许多,可以忽略不计。

虽然绕线型电阻温度计用于30K以下的低温测量已很多年了,但很少发表有关热循环后它们在这个温度范围的稳定性。

Gehring和Gerstein<sup>[1]</sup>论述了用科伐(铁、镍、钴)合金做套管的3支商品小型

铂电阻温度计在293K和4.2K之间进行20次缓慢热冲击后的稳定性。Johnston和Lindberg<sup>[2]</sup>检验过两支来自同一生产厂的经过一连串热冲击后的套管型铂电阻温度计的稳定性,其结果类似于Gehring和