

# 气液两相低温流体空泡率测量技术及其进展

徐冬 龚领会

(中国科学院理化技术研究所 北京 100080)

**摘要:** 对目前几种用于测量低温气液两相流空泡率方法的基本原理、传感器结构及国内外研究情况进行了综述,包括辐射法(射线吸收法)、微波法、射频法、电容法,分析了4种方法的优缺点,在比较4种方法的基础上,提出了目前采用电容传感器测量气液两相低温液体空泡率的优势及设计准则。

**关键词:** 低温 空泡率 射线吸收法 微波法 射频法 电容法

**中图分类号:** TB663 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6516(2007)06-0032-06

## Measurement technique and progress on void fraction in cryogenic two-phase flow

Xu Dong Gong Linghui

(Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences Beijing 100080, China)

**Abstract** The basic principles and sensor construction of several methods used for measurement of void fraction in cryogenic two-phase flow were reviewed including attenuation sensors, microwave type, RF sensors and capacitance type. Based on the analysis and comparison of various measurement techniques, the advantage of capacitance type method was presented and design fundamentals were given.

**Key words** low temperature, void fraction, attenuation sensors, microwave type, RF sensors, capacitance type

### 1 引言

对于气液两相低温流体如液氮、液氢和液氦等,仅依靠压力和温度难以确定低温流体的热力学状态,还需要知道两相流中的气态份额,即空泡率,空泡率又称为截面含气率,指在流动截面上,气相所占截面积与总流通面积之比,即

$$\varphi = \frac{A_g}{A} = \frac{A_g}{A_g + A_l} \quad (1)$$

式中:  $A_g$ 、 $A_l$  分别为气相、液相的截面积,  $A$  为总

流通面积。

空泡率是气液两相流动中的关键参数,得到空泡率即可知道流体的平均密度、压降等一系列参数。在常温下通过检测技术获得空泡率有多种方法:

- (1)直接测量法:快关阀法;
- (2)基于衰减原理:声学法,光学法,辐射法,微波法等;
- (3)基于电学原理:电阻抗法,电容法,电导探针法等;
- (4)基于谐振原理:核磁共振法,电子磁共振法等。

收稿日期: 2007-07-26 修订日期: 2007-11-30

作者简介: 徐冬,女,24岁,硕士、助理研究员。

其中,快关阀法准确快速,但在使用时要切断流体的正常流动,不易在实际工业生产中应用,且不能实现自动测量;光学法响应速度快,但要求使用场合清洁度较高,光的发射和吸收元件不易受污染,限制了其使用范围;辐射法不干扰流体流动,标定简单,但存在安全问题,并且需要一个稳定的放射源,且放射源的维护成本较高,多用于外层空间或具有辐射的环境下;电学法结构简单、价格低、容易实现,能够测量瞬态值,但是易受流型、温度变化、流体内杂质引入等因素影响;核磁共振法适于测腐蚀性和易聚合性物质,精度较高,但结构复杂,成本高,经济性差。

尽管测量空泡率的方法较多,但是对于低温流体的应用,很多方法受到限制,目前用于低温流体的测量方法主要分两种:一种是通过测量辐射衰减特性来测空泡率,即辐射法;一种是通过测量平均介电常数或其引起的变化如相位差、频率、电容来测空泡率,分别为微波法、射频法、电容法。早在 1969 年,美国 NASA 就将线阵电容器放置在流动管道中测低温流体的密度<sup>[1]</sup>,但这种结构易被固体冰晶堵塞或破坏,20 世纪 70 年代各种低温密度计在同时被研究和研制,射频型传感器由美国和俄罗斯研制,日本主要研究电容式和微波式传感器测低温两相流密度<sup>[2]</sup>,法国、比利时等欧洲国家研制了  $\gamma$ 、 $\beta$  等射线吸收型传感器<sup>[3-4]</sup>。中国 20 世纪 80 年代在低温领域普遍使用电容式空泡率传感器<sup>[5]</sup>,但研究较少,未能进行不断完善。本文对这几种方法的基本原理、传感器结构进行论述,分析了在应用中的优势和存在的问题。

## 2 辐射法

$\gamma$ 、 $\beta$ 、 $X$  射线吸收法通常用于常温下两相流体空泡率的测量,很长一段时间内,被认为不适于低温流体,因为低温流体气液两相密度变化比较小。但近年来的实验验证(2002 年法国原子能委员会的 L. Augyround 和 P. Ageron 等采用  $\beta$  射线吸收法测气液两相氦流<sup>[3]</sup>,2005 年比利时列日大学的 A. Carapelle 和 J. P. Collette 采用射线吸收法测低温固液混合物<sup>[4]</sup>),射线吸收法同样适用于低温流体。

用射线吸收法测量空泡率的基本原理如图 1 所示,由射线源发出射线( $\gamma$ 、 $\beta$ 、 $X$  射线的一种),射线经过气液两相低温流体时,部分射线被流体所吸收,吸收的程度与气液两相的空泡率有关,通过测量吸收程度,即可测出两相流的空泡率。

空泡率的测量基于 Beer 定律:

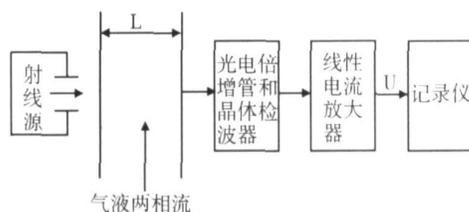


图 1 射线吸收法测低温两相流空泡率原理图

Fig 1 Schematic of attenuation method for measuring void fraction in cryogenic two-phase flow

$$I = I_0 e^{-\mu L} \quad (2)$$

式中:  $I_0$  为射线源的强度,通过厚度为  $L$ ,吸收系数为  $\mu$  的气液两相流后的强度为  $I$ 。

射线打到晶体探测器上,转化为光通量,可见光通过光电倍增管转换为电流,电流信号通过线性电流放大器得到电压输出信号,送到记录仪记录。推导出到空泡率与放大器输出电压的关系式<sup>[6]</sup>:

$$\varphi = \frac{\ln U - \ln U_1}{\ln U_g - \ln U_1} \quad (3)$$

式中:  $U$  为穿过两相流后的射线经变换放大后的输出电压,  $U_g$ 、 $U_1$  为穿过气相、液相的射线经变换放大后的输出电压。

辐射法测空泡率属非接触性测量,精度相对较高,还可通过增大  $I_0$  减小误差,即增大放射源的放射性和测量时间,不受压力、粘度、湿度、腐蚀性的影响,但是考虑到辐射操作有关的安全问题,目前都是采用氦和氮来代替氦做实验<sup>[4]</sup>。

## 3 微波法

微波式空泡率传感器的测量原理是:当低温流体的介电常数发生变化时,穿过该流体的微波的相位就会发生变化,利用这一原理就可以测量低温流体的介电常数的变化,进而得到低温流体空泡率的变化。微波式空泡率传感器包括微波发射天线和微波接收天线,当两天线间的流体空泡率变化时,流体的介电常数变化,这时穿过低温流体的微波发生相位变化,再依靠网络分析器测量相位差,如图 2 所示<sup>[2]</sup>。

测量气体的微波发射天线和接收天线,得到穿过气体的微波相位差  $\Delta\phi_1$ ,测量液体的微波发射天线和接收天线,得到穿过液体的微波相位差  $\Delta\phi_2$ 。如果发射和接收天线间距离相等,那么  $\Delta\phi = \Delta\phi_2 - \Delta\phi_1$  与低温流体介电常数的变化值间的关系为:

$$\Delta\varepsilon = \frac{\lambda\sqrt{\varepsilon}}{180L} \Delta\phi = K \Delta\phi \quad (4)$$

介绍两种常见测空泡率的微波式传感器:

(1) 传统波导和喇叭式天线传感器

传统波导和喇叭式天线传感器中, 流体进入波导和喇叭式天线中, 测量精准度不高。如图 3 所示。

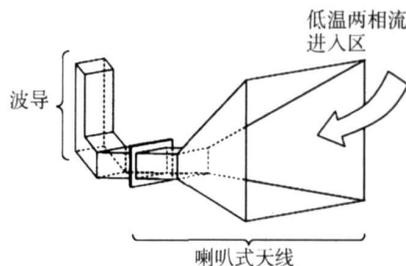


图 3 传统波导和喇叭式天线测空泡率传感器

Fig 3 Sensor of void fraction with conventional waveguide and horn antenna

(2) 平板天线和低温同轴电缆传感器

为了解决传统波导和喇叭式天线传感器存在的精准度不高问题, 结构做了一些改进, 采用平板天线和低温同轴电缆引入微波, 平板天线和低温同轴电缆一次成形, 没有开口, 因此消除了传统波导和喇叭式天线传感器的误差, 如图 4 所示。

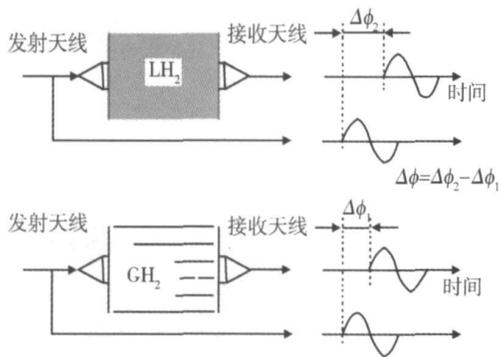


图 2 微波法测空泡率原理图

Fig 2 Schematic of microwave method for measuring void fraction in cryogenic two-phase flow

式中:  $\lambda$ 是微波的波长,  $\epsilon$ 是低温流体的介电常数。

由于低温流体气液两相的介电常数在一定温度范围内变化很小、气液两相之间的介电常数差别也很小, 所以  $\epsilon$ 变化很小, 可视为常数, 则由上式可知, 只要微波波长和天线间距不变, 则  $\Delta\epsilon$ 可看成与  $\Delta\phi$ 成线性关系, 测量出相位差则可确定介电常数变化, 继而确定空泡率  $\phi$ 。

$$\phi = \frac{\Delta\epsilon}{\epsilon_1 - \epsilon_g} \quad (5)$$

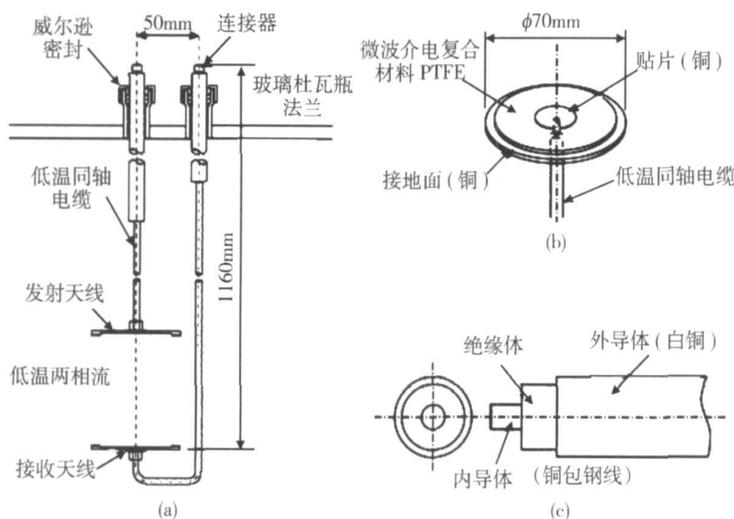


图 4 平板天线和低温同轴电缆测空泡率传感器

(a) 平板天线和低温同轴电缆布置; (b) 平板天线; (c) 低温同轴电缆

Fig 4 Sensor of void fraction with patch antenna and cryogenic coaxial cable

为了减少玻璃杜瓦瓶内壁对微波的反射, 吸波材料的布置也要检测, 包括炭浸渍的聚氨酯泡沫体。在外导体上, 使用导热系数较小的白铜代替铜, 减少同

轴电缆的热扩散。平板天线的接地面连接同轴电缆的外导体, 金属贴片连接内导体, 天线的方向与传统波导和喇叭式天线相同。微波法空泡率传感器属非

接触式测量, 响应较快, 但杜瓦瓶内壁对微波有一定的反射, 影响测量结果。

### 4 射频法

射频法也是目前测量低温两相流空泡率的一种方法, 原理是将电容器连接到谐振电路中, 当空泡率变化时, 谐振回路的频率变化, 只要测量谐振回路的频率, 就可得到低温液体的空泡率。

目前射频式空泡率传感器有两种结构型式:

#### (1) 环形截面传感器

传感器通道壁为电容表面, 将电感和电容连接形成谐振回路, 电场较均匀, 被测段应相对较小, 便于测量定位, 但又不能过小, 以便减小非线性边缘效应。由传感器的等效电路, 可以得到谐振回路的频率:

$$f = 1/[2\pi(L_{eff}C_{eff})^{1/2}] \quad (6)$$

式中:  $L_{eff}$  为传感器电感,  $C_{eff} = C_\phi + C_s$ ,  $C_s$  为传感器结构电容, 与被测介质的介电常数无关。  $C_\phi$  为传感器测量电容:

$$C_\phi = 2\pi\epsilon_0\epsilon'_m / \ln[(d_{in} + 2\delta)/d_{in}] = const \cdot \epsilon \quad (7)$$

式中  $const$  是常数, 由传感器几何结构确定。因此, 谐振频率为:

$$f = K_1 / [(\epsilon + K_2)^{1/2}] \quad (8)$$

式中:  $K_1$  和  $K_2$  由传感器结构设计确定。

则流体的空泡率可表示为<sup>[7]</sup>:

$$\varphi = [\epsilon_1 - (K_1^2 f^2 - K_2)] / (\epsilon_1 - \epsilon_g) \quad (9)$$

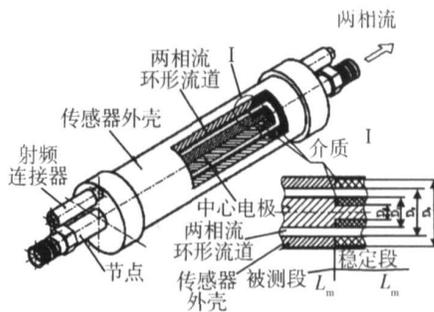


图 5 测空泡率环形截面射频传感器  
Fig. 5 RF-void fraction sensor with annular cross section

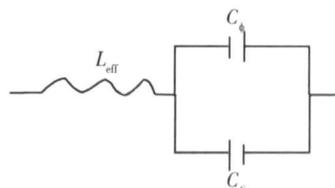


图 6 射频传感器等效电路  
Fig. 6 Equivalent circuit of the void fraction sensor with annular cross section

#### (2) 圆形截面传感器

如图 7 所示, 回绕线位于介质管 (玻璃管) 的外表面, 形成被测通道, 这种设计的优点是测空泡率的同时可以观察流型。2000 年, 改进为螺旋形回绕线, 减小了相对误差<sup>[6]</sup>。

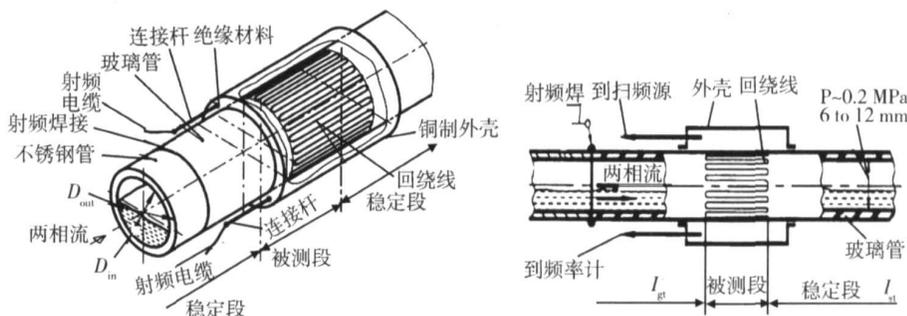


图 7 测空泡率圆形截面射频传感器  
Fig. 7 RF-void fraction sensor with round cross section

谐振回路的频率为:

$$f = 1/[2\pi(L_{eff}C_{eff})^{1/2}] \quad (10)$$

式中有效电容由下式确定<sup>[8]</sup>:

$$C_{eff} = Q_{eff}^2 / 2W_e \quad (11)$$

式中:  $W_e$  为电场能,  $Q_{eff}$  为罩和弯折线上的有效

电荷。

流体的空泡率可表示为<sup>[7]</sup>:

$$\varphi = [\epsilon_1 + (K_3 - K_4 f^2) / (1 - K_4 f^2)] / (\epsilon_1 - \epsilon_g) \quad (12)$$

其中,  $K_3, K_4, K_5$  由传感器结构设计确定,

$$K_5 = \varepsilon_{\text{tube}} [1 - (D_{\text{in}} D_{\text{out}})^2] / [1 + (D_{\text{in}} D_{\text{out}})^2] \quad (13)$$

射频法测空泡率传感器精度很高, 适合测量两相介电常数差非常小的低温流体空泡率, 但其结构设计、测量电路和测控软件很复杂, 在设计时应保证传感器被测段前后流动稳定性, 且截面形状和面积应保持不变。法兰上不能有凸起或凹陷, 以免破坏流型, 影响流速分布、滑脱比和空泡率。其次, 空泡率是具有空间分布物性的参数, 电场能分布不均匀会使流过流道截面的空泡率即使在相同质量下也测得不同的值, 因此设计时应使电场能近可能均匀。建立均匀电场能有多种方法, 对于射频传感器来说, 采用圆形或环形截面可得到相对较均匀的电场<sup>[7]</sup>。

## 5 电容法

电容法测量两相流空泡率的原理: 由于气液两相具有不同的介电常数, 当低温流体通过电容极板间形成的检测场时, 传感器将两相流截面平均介电常数转变为电容变化来测量, 电容与介电常数的关系式为<sup>[2]</sup>:

$$C = C_0 \varepsilon + C_d \quad (14)$$

式中:  $C_0$  为电容灵敏度常数, 取决于电极介质和传感器本身结构,  $C_d$  是传感器寄生电容常数。对于氢流体来说, 由于气液两相的介电常数从 14K - 30K 的变化很小、气液两相之间的介电常数差别也很小, 所以, 测量得到的电容  $C$  的变化将会很有限。因此, 电容式测空泡率传感器设计的主要工作是增大电容随空泡率的变化。对于单相流来说, 提高  $C_0$  仅需要增大电极面积或减小电极间距离, 但对于气液两相流, 就要考虑气泡的影响。电容式空泡计的传感器有很多形式的结构, 其主要目的是为了提高  $C_0$ , 从而提高传感器的灵敏度。本文介绍常见的两种结构形式: 平行平板式和圆柱平板式。

### (1) 平行平板式

如图 8 所示, 电容式传感器的两个电极由平行平板做成, 当忽略边缘效应时, 其电容与被测流体的平均介电常数关系为:

$$C = \frac{S \varepsilon_0}{d} \varepsilon \quad (15)$$

式中:  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $S$  为极板覆盖面积,  $d$  为极板间距离, 由此可见: 传感器的灵敏度随电极材料的介电常数和电极面积的增大而提高、随电极间距的增大而减小。

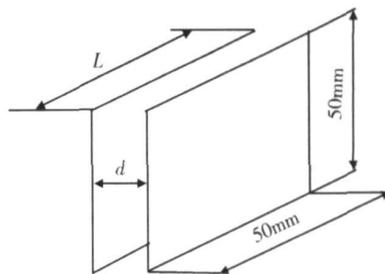


图 8 平行平板式电容传感器

Fig 8 Parallel flat-plate type sensor

### (2) 圆柱平板式

圆柱平板式比平行平板式传感器的灵敏度更高, 结构如图 9 所示。其电容与被测流体的平均介电常数的关系为:

$$C = \frac{4\pi L \varepsilon_0}{\ln[(d + \sqrt{d^2 - a^2})/a]} \varepsilon \quad (16)$$

式中:  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $d$  为圆柱电极半径,  $d$  为圆柱电极到平板间距离,  $L$  为平板边长。

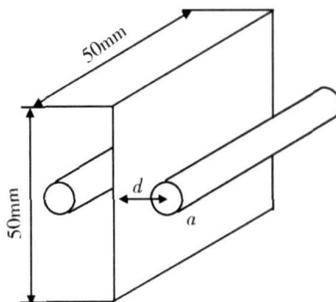


图 9 圆柱平板式电容传感器

Fig 9 Flat-plate and cylinder type sensor

采用电容式传感器测量空泡率也属于非接触性测量, 安全, 经济, 结构简单, 响应快, 缺点是在截面上具有灵敏度分布不均匀问题, 受流型影响大, 流型变化会导致误差增大, 因此在设计电极结构时, 需在截面上具有较高且均匀的灵敏度, 减小其受流型变化的影响, 且电容的电路基线漂移必须低, 也就是灵敏度要稳定, 受寄生电容影响小, 使抗外电场干扰强。

由于在低温两相流空泡率测量中, 传感电容的变化量往往仅有几个或几十个皮法大小, 这就对电容测量电路提出了更高的要求。目前用于解决测量小电容的方法主要有电荷转移法和交流法, 这两种电路的基本测量原理是通过激励信号连接对被测电容进行充放电, 形成与被测电容成比例的电流或电压信号, 从而测量出被测电容。它们的共同缺点是脉动噪声

大,需使用滤波器及考虑相位补偿,电路结构相对复杂,成本也较高<sup>[9]</sup>,因此需研制新的微小电容测量电路和系统来提高精度和稳定性,目前常用的高精度测量电路有:基于  $V/T$  变换的电容测量电路<sup>[10]</sup>;微小电容交流测量电路<sup>[11]</sup>;基于电荷放大原理的电容测量电路<sup>[12]</sup>;数字电路与模拟电路相结合的测量电路<sup>[13]</sup>。

## 6 结束语

在比较 4 种不同类型传感器后发现,辐射法存在一定的操作安全问题,微波法精度受杜瓦瓶内壁反射影响较大,射频法精度高,但结构设计、测量电路和测控软件都较复杂,因此采用结构简单的电容法传感器测量低温流体空泡率更加可行,而且由于目前材料、工艺,特别是测量电路及半导体集成技术等方面已达到了相当高的水平,因此寄生电容的影响可得到较好地解决,使电容式传感器的优点得以充分发挥。

## 参 考 文 献

- George E T, Roger W S. Measurement of liquid and two-phase hydrogen densities with a capacitance density meter. NASA TN D-5015: 1-40.
- Katsuhiko Ohira. Development of density and mass flow rate measurement technologies for slush hydrogen[J]. Cryogenics, 2004(44): 59-68.
- Augryond L, Ageron P, Blumenfeld H, et al. Void fraction measurement in two-phase helium flow with electron energy attenuation detector. Advances in cryogenic engineering. Proceedings of the Cryogenic Engineering Conference-CEC. AIP Conference Proceedings, 2002(613): 1667-1673.
- Carapelle A, Collette J P. Gamma-ray attenuation for measuring cryogenic slush mixture density. Nuclear instruments and methods in physics research section B, 2005(229): 111-116.
- 郑尧兰,李式模,孙国华. 低温二元系统两相流压降实验[J]. 低温工程, 1989(3): 21-27.
- 郝丽,仇性启. 两相流流动测试技术方法综述[J]. 通用机械, 2006(11): 66-68.
- Filippov Yu P. How to measure void fraction of two-phase cryogenic flows[J]. Cryogenics, 2001(41): 327-334.
- Alexeyev A I, Filippov Yu P, Manedov IS, et al. Application of radio frequency method to measurements in cryogenics[J]. Cryogenics, 1991(31): 1020-1029.
- 余生能,孙士平. 电容传感器新型电容测量电路设计[J]. 中国测量技术, 2005(5): 42-43.
- 余生能,孙士平. 基于  $V/T$  变换的电容传感器新型电容测量电路[J]. 现代测量与实验室管理, 2005(1): 20-21.
- 丁英丽. 交流型微小电容测量电路的设计[J]. 电工技术杂志, 2003(9): 100-101.
- 白国花,马铁华. 电容传感器微弱电容测量电路中 CPLD 的应用[J]. 计量与测试技术, 2005(2): 14-16.
- 刘宝华. 一种微小电容的测量电路[J]. 电工技术杂志, 2001(5): 45-46.
- [C]. 第七届制冷低温大会, 2005 274-277.
- 张超,鲁雪生,田丽亭. 火箭低温液体推进剂增压系统数学模型[J]. 低温与超导, 2005, 5(2): 35-38.
- 代予东,赵红轩. 运用数学方法模拟推进剂贮箱增压[J]. 火箭推进, 2003, 6(3): 34-40.
- E L 柯斯乐. [美] 扩散-流体系统中的传质[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- Crowl D A, Louvar J F. Chemical process safety-fundamentals with applications(second Edition). New jersey: Prentice-hall 2001.
- 刘桂玉,刘志刚,阴建民,等. 工程热力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- 化工部第四设计院主编. 深冷技术(上册)[M]. 北京: 燃料化学工业出版社, 1973.

(上接第 31 页)

## 4 结 论

针对低温推进剂贮箱的增压过程建立了传热、传质模型,运用四阶 Runge-Kutta 算法对模型进行了计算,结果表明:在增压开始阶段,气相空间内发生的传热、传质过程比较剧烈,气相空间内的温度、压力增加幅度较快,而在发动机启动后,由于贮箱容积的不断增大,传热、传质作用趋于稳定阶段,气相空间内的温度、压力参数也趋于稳定。

## 参 考 文 献

- 李强,胡忠军,李青,等. 低温液体推进剂增压过程计算模型