

# 密闭容器漏热液氢饱和过程分析

梁怀喜<sup>1</sup>, 韩战秀<sup>1</sup>, 李 清<sup>2</sup>

(1. 北京航天试验技术研究所, 北京 100074; 2. 中国兵器工业标准化研究所, 北京 100089)

**摘 要:**结合在氢氧火箭发动机及箭体组件试验过程中遇到实际情况,提出了液氢介质在密闭容器内饱和过程状态变化的问题,该问题的分析结果可以用于试验过程的安全评估。首先利用质量和能量守恒方程,对密闭容器内氢介质的饱和状态过程建立了数学模型;根据模型的数学解析结果对饱和过程进行了定性分析,提出了临界充满率的概念,发现了饱和状态过程可以分成完全汽化、完全液化、中间饱和平衡等不同的过程。然后结合一个典型的液氢试验的工程实例,利用数学模型对饱和过程的状态参数进行了计算,计算结果与定性分析非常吻合。最后总结了密闭容器内液氢的饱和状态过程的规律,指出液氢充满率低时液氢可以完全汽化、充满率高时液氢可以膨胀至完全充满;同时指出,对于试验导管 90% 的充满率下,液氢将膨胀并充满试验腔,容易出现超压破坏风险。

**关键词:**氢氧火箭发动机; 密闭容器; 液氢; 饱和过程分析

**中图分类号:**V434.3-34 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-9374(2018)03-0049-05

## Analysison saturation process of liquid hydrogen with heat leakage in closed container

LIANG Huaixi<sup>1</sup>, Han Zhanxiu<sup>1</sup>, LI Qing<sup>2</sup>

(1. Beijing Institute of Aerospace Testing Technology, Beijing 100074, China;

2. China Ordnance Industrial Standardization Research Institute Beijing 100089, China)

**Abstract:** The state variation of the saturation process for the liquid hydrogen in a closed container is presented according to the practical problem in the tests of a hydrogen-oxygen rocket engine and its components. The analysis results of this problem can be used for the safety assessment of the test process. In this paper, the mass and energy conservation equations are used to establish a mathematic model for the saturated condition of hydrogen medium in the closed container. The saturation process is qualitatively analyzed according to the mathematical analysis results of the model, and the conception of critical filling rate is proposed creatively. It is found that the saturation state process can be divided into different processes of complete vaporization, complete liquidation and intermediate saturation equilibrium. Combined with a typical engineering case of liquid hydrogen test, the state parameters of the saturation process are calculated by means of the mathematic model. The calculated results are in good agreement

收稿日期:2017-11-02;修回日期:2017-06-25

基金项目:国家自然科学基金(1187041725)

作者简介:梁怀喜(1982—),男,工程师。研究领域为低温设计及试验、空间环境设计及模拟、液体发动机试验、振动系统设计

with the qualitative analysis. The rule of the saturation process of liquid hydrogen in the closed container is summarized. It is indicated that the liquid hydrogen can be completely vaporized when the filling rate of liquid hydrogen is low, and the liquid hydrogen can be fully expanded when the filling rate is high. In addition, the liquid hydrogen will expand and completely fill the test duct when the filling rate of test duct is 90%, which is easy to cause an overpressure damage risk.

**Keywords:** hydrogen-oxygen rocket engine; closed container; liquid hydrogen; saturation process analysis

## 0 引言

在航天、化工、低温基础研究中广泛使用低温介质,低温介质一般在敞口或密闭低温容器中存放。存放过程中的漏热将使低沸点的低温介质吸热汽化膨胀,如果在密闭容器中气枕压力将升高;当内压到达一定限定值后,必须进行放气;如果压力得不到及时释放,将有可能造成低温容器的超压破坏。密闭容器内低温介质的物理状态变化是一个比较复杂的动态过程,需要对状态变化过程进行深入研究,便于控制容器内压。在液氢火箭发动机及箭体组件试验过程中,经常遇到液氢容器或者液氢管路密闭憋压的过程,因此需要对密闭容器内液氢的状态变化进行探讨,便于对过程的安全性进行分析。本文主要对液氢介质在密闭容器内的饱和过程进行了分析,饱和过程后的超临界状态变化暂不进行探讨。

## 1 液氢物性分析

液氢的饱和物性决定了密闭容器内液氢以及气氢之间的过程状态变化。首先,在饱和温区,饱和蒸汽压随温度上升逐渐升高;其次,液氢密度随着温度的上升逐渐减小,气氢密度随着温度的上升而增大;最后,液氢单位焓值随着温度的上升逐渐上升,气氢的单位焓值随着温度的上升先上升后逐渐下降,在临界温度点液相和气相两者的单位焓值趋于一致。特别指出的是,在临界温度时,液氢与气氢之间的物性(密度、焓、熵)差异完全消失,液相不复存在,这时液相可以连续地变化为气相,或气相也可以连续地变化为液相;高于临界温度之后,液氢将进入超临界状态。

## 2 模型引入与定性分析

### 2.1 问题假设

为了定性分析密闭容器内的液氢状态变化,需要建立一个密闭容器模型。该容器内部的液氢和气氢处于饱和状态,随着漏热进行,液氢将会温升、汽化,压力也随之上升;在密闭空间内,由于液氢和气氢的密度相差较大,液氢与气氢在相互转化过程中,可以直观的猜想出存在 3 种不同的饱和变化过程:

液氢完全汽化。容器内的液氢量少,漏热过程中,液氢逐渐汽化的同时温度上升,在没有达到临界温度前,液氢已经完全汽化。

液氢完全充满容器。容器内液氢量多,漏热过程中,液氢逐渐汽化的同时温度上升,液氢的密度变小,气氢的密度变大,这时存在两种情况:一是液相体积增大,汽相体积减少;二是液相体积减少,气相容积增大(这种情况不可能发生,这是由于液氢密度随温度的变化率比气氢小);随着温升的继续进行,由于液相体积的增大,气相由于压力的上升受到压缩,将发生液化;经过一定时间漏热后,容器内的温度在没有达到临界温度前,气氢完全液化,液氢充满整个容器。

临界状态。容器内液氢充满率为某一值时(临界充满率),随着漏热的进行,当达到液氢的临界温度时,液氢恰好完全汽化或者充满。如果完全充满时,只要有极其微小的漏热液氢将瞬间转变为气氢,在临界温度时,液、气处于混沌不分的状态。

### 2.2 数学模型分析

对于密闭容器漏热过程,需要建立这样的一个简化数学模型:密闭容器在漏热恒定的情况下,液氢和气氢处于平衡状态,并且各自内部都处于均匀

状态(无温度分层),也就是说液相内部、气相内部以及它们相互之间的温度、压力是一致的。对在  $t_i, t_{i+1}$  不同时刻的质量和能量建立守恒关系式:

质量守恒:密闭容器内,内部与外界没有质量运输过程,容器内的氢介质总质量不变,故:

$$M = m_{L,i} + m_{g,i} = m_{L,i+1} + m_{g,i+1} \quad (1)$$

式中:  $M$  为容器内氢介质总质量;  $m_{L,i}, m_{g,i}$  分别为  $t_i$  时刻液氢和气氢的质量;  $m_{L,i+1}, m_{g,i+1}$  分别为  $t_{i+1}$  时刻液氢和气氢的质量。

能量守恒:密闭容器内,氢介质与外界的能量输送只有漏热输入,漏热使氢介质的焓值发生了变化,故:

$$\Delta H_{i+1,i} = \Delta Q_{i+1,i} > 0 \quad (2)$$

式中:  $\Delta H_{i+1,i}$  为  $t_{i+1}$  与  $t_i$  时刻内焓值的变化量;  $\Delta Q_{i+1,i}$  为  $t_{i+1}$  与  $t_i$  时刻内的漏热量。

根据初始状态温度、压力、容器的体积以及液氢的初始充满率,并结合(1)和(2)两个关系式,就可以对漏热状态下密闭容器内的物理状态过程进行定量分析。

### 2.3 过程分析

下面就饱和状态变化的几个重要过程进行分析。

#### 2.3.1 临界状态下初始充满率的计算

液氢的临界温度为 33.19 K,压力为 1.330 MPa,该温度下的液氢密度和相对应饱和蒸汽密度都是 30.118 kg/m<sup>3</sup>。这样对于初始温度下的临界充满率满足以下关系式:

$$V\beta_{T_0,cr}\rho_{T_0,L} + V(1 - \beta_{T_0,cr})\rho_{T_0,g} = V\rho_{33.19}$$

式中:  $V$  为密闭容器的容积;  $\rho_{T_0,L}, \rho_{T_0,g}$  分别为初始温度下液氢密度和气氢密度;  $\beta_{T_0,cr}$  为初始温度下的临界充满率;  $\rho_{33.19}$  为临界状态下的密度。

对于初始温度 20.39 K 下的饱和液氢,液氢密度为 70.797 kg/m<sup>3</sup>、气氢密度为 1.339 kg/m<sup>3</sup>,所以该初始状态下的临界充满率为:

$$\beta_{20.39,cr} = 41.437\%$$

#### 2.3.2 质量随体积的变化率

漏热过程中,液相和气相在动态转化过程,质量随体积的变化率分别为:

$$\frac{\partial m_{T,L}}{\partial V_{T,L}} = \rho_{T,L} + V_{T,L} \frac{\partial \rho_{T,L}}{\partial V_{T,L}}$$

$$\frac{\partial m_{T,g}}{\partial V_{T,g}} = \rho_{T,g} + V_{T,g} \frac{\partial \rho_{T,g}}{\partial V_{T,g}}$$

式中:  $m_{T,L}, m_{T,g}$  为温度  $T$  下液氢质量、气氢质量;  $V_{T,L}, V_{T,g}$  为温度  $T$  下液氢体积、气氢体积;  $\rho_{T,L}, \rho_{T,g}$  为温度  $T$  下液氢密度、气氢密度。

转化过程存在以下关系:

$$\Delta m_L = -\Delta m_g, \Delta V_L = -\Delta V_g$$

$$\frac{\partial m_{T,L}}{\partial V_{T,L}} = \frac{\partial m_{T,g}}{\partial V_{T,g}}$$

根据公式:

1) 当  $\frac{\partial m_{T,g}}{\partial V_{T,g}} > 0, \partial m_{T,g} > 0$  时,  $\partial V_{T,g} > 0$ , 说明气相质量增加,气相容积也增加,也就是说液氢汽化的同时,气氢的容积增大了;

2) 当  $\frac{\partial m_{T,g}}{\partial V_{T,g}} > 0, \partial m_{T,g} < 0$  时,  $\partial V_{T,g} < 0$ , 说明气相质量减少,气相容积也减少,也就是气氢发生了液化,气氢容积减少了;

3) 当  $\frac{\partial m_{T,g}}{\partial V_{T,g}} < 0, \partial m_{T,g} < 0$  时,  $\partial V_{T,g} > 0$ , 说明气相质量减少,气相容积增加,也就是说气氢液化的同时,气氢的容积反而增大了(这在温升过程中是不存在的,因为气氢的饱和密度是随着温度的升高而增大的);

4) 当  $\frac{\partial m_{T,g}}{\partial V_{T,g}} < 0, \partial m_{T,g} > 0$  时,  $\partial V_{T,g} < 0$ , 说明气相质量增加,气相容积减少,也就是说液氢汽化的同时,气氢的容积减小了。

## 3 液氢在密闭容器中的案例结果分析

在进行某一代氢氧火箭液氢导管试验时,在加满液氢后需要静置一定的时间,故而需要对静置过程的状态进行分析,确保在该时间段内导管不出现超压的危险。该液氢导管容积为 40 L;漏热量约为 150 W;容器内氢介质初始状态为 1 atm, 20.39 K,根据数学模型分析在不同充满率下氢介质的饱和状态变化。容器内液氢充满率随时间的变化如图 1 所示,气氢质量随时间变化如图 2 所示,容器内压随时间变化如图 3 所示,气体质量随体积的变化率如图 4~图 6 所示。

可以看出随着漏热的进行,充满率比较低和比较高的时候,饱和过程持续的时间相对短,液相与气相之间的相互转化主要有以下 6 种情况:

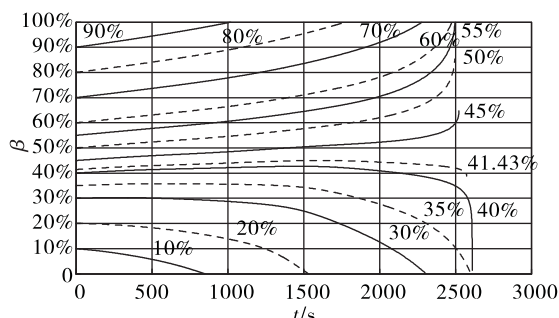


图1 饱和过程液氢充满率随时间的变化情况

Fig. 1 Variation of filling rate of liquid hydrogen with time in the saturation process

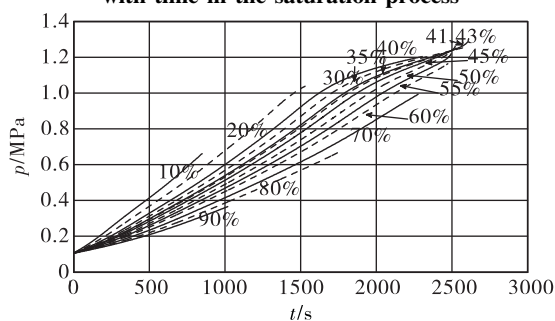


图2 饱和过程气氢质量随时间的变化情况

Fig. 2 Mass variation of vapour hydrogen with time in the saturation process

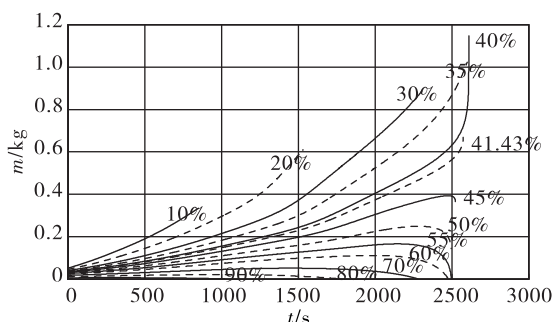


图3 饱和过程压力随时间的变化情况

Fig. 3 Pressure variation with time in the saturation process

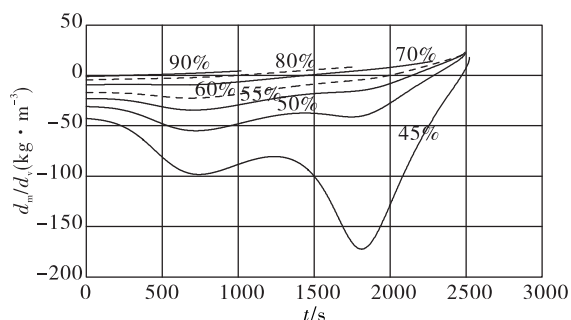


图4 气氢质量与体积变化率随时间的变化情况

Fig. 4 Change rate of vapour hydrogen mass and volume with time

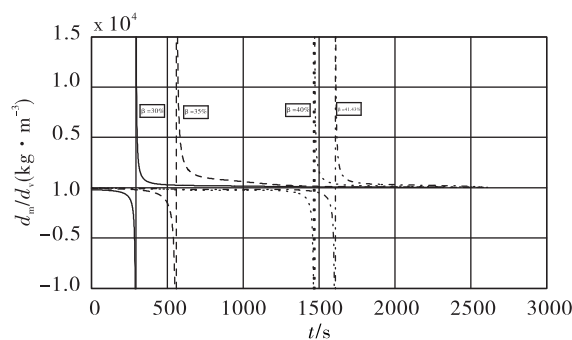


图5 气体质量对体积的变化率随时间的变化情况

Fig. 5 Change rate of gas mass and volume with time

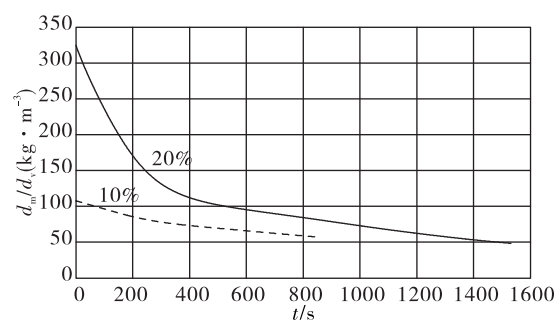


图6 气体质量对体积的变化率随时间的变化情况

Fig. 6 Change rate of gas mass and volume with time

当液氢充满率特别少(比如 $\beta < 20\%$ 时):液氢在到达临界点温度前一直在汽化,气氢质量一直在增加,液氢体积一直在变小,最终液氢完全汽化,气相充满整个空间;此后气相进入等容温升状态。整个过程气氢质量相对体积的变化率一直大于0,而气体质量一直在增加,因而气氢体积一直在增大,说明液氢汽化的同时,气相体积增大了,说明条件1)在实际过程中是存在的。

当液氢充满率很少时(比如 $\beta = 30\%$ 或 $\beta = 35\%$ ):液氢在到达临界点温度前一直在汽化,气氢质量一直在增加,但是液氢的体积是先增大后变小,最终液氢完全汽化,气氢充满整个空间;此后气氢进入等容温升状态。另外,整个过程气氢质量相对体积的变化率先小于0后大于0,而气体质量一直在增大,因而气氢的体积先减少再增大,所以前期汽化的同时,气相体积减少了,说明条件4)在实际过程中是存在的;后期液化的同时,气氢体积减少了,说明条件1)在实际过程中是存在的。

当液氢充满率比较少时(比如 $\beta = 40\%$ 或

$\beta = 41.43\%$ ):液氢在到达临界点温度前一直在汽化,气氢质量一直在增加,但是液氢的体积是先增大后变小,最后中止于某一饱和状态,液氢没有完全汽化,气相没有完全充满整个空间;此后液氢和气氢将进入过热相互转化的状态。另外,整个过程气氢质量相对体积的变化率先小于0后大于0,而气体质量一直在增大,因而气氢的体积先减少再增大,所以前期汽化的同时,气氢体积减少了,说明条件4)在实际过程中是存在的;后期液化的同时,气氢体积减少了,说明条件1)在实际过程中是存在的。

当液氢充满率中等时(比如 $\beta = 45\%$ 或 $\beta = 50\%$ 或 $\beta = 55\%$ ):液氢在到达临界点温度前先汽化后液化,气氢质量先增加后减少,但是液氢的体积一直在增大,最后中止于某一饱和状态,液氢没有完全汽化,气氢没有完全充满整个空间。此后液氢和气氢将进入过热的相互转化的状态。整个过程气氢质量相对体积的变化率先小于0后大于0,而气体质量先增大后减少,因而气氢的体积一直在减小,所以前期汽化的同时,气氢体积减少了,说明条件4)在实际过程中是存在的;后期液化的同时,气氢体积减少了,说明条件2)在实际过程中是存在的。

当液氢充满率比较多时(比如 $\beta = 60\%$ 或 $\beta = 70\%$ 或 $\beta = 80\%$ ):液氢在到达临界点温度前先汽化后液化,气氢质量先增加后减少,直到气氢完全液化,但是整个过程液氢的体积一直在增大,最终液氢完全充满整个空间;此后液氢将进入过热状态。整个过程气氢质量相对体积的变化率先小于0后大于0,而气体质量先增大后减少,因而气氢的体积一直在减小,所以前期汽化的同时,气氢体积减少了,说明条件4)在实际过程中是存在的;后期液化的同时,气氢体积减少了,说明条件2)在实际过程中是存在的。

当液氢充满率很多时(比如 $\beta = 90\%$ ):气氢在到达临界点温度前一直液化,气氢质量一直减少,直到气氢完全液化,整个过程液氢的体积一直在增大,最终液氢完全充满整个空间;此后液氢将进入过热状态。整个过程气氢质量相对体积的变化率一直大于0,而气体质量在减少,因而气氢的体积也

在减小,所以液化的同时,气氢体积减少了,说明条件2)在实际过程中是存在的。

## 4 结论

从以上分析可以看出,密闭容器内氢介质的饱和状态变化过程是非常复杂的,主要有以下特点:

1) 液氢充满率很低时,液氢能一直汽化,直至完全汽化,气相充满整个容器,此时分为两个状态,特别低时,气氢体积一直在增大,稍微大点时,气氢体积先减少后增大。

2) 液氢充满率比较低时,液氢能一直汽化,但是到某一个饱和状态后将进入过热状态,液氢无法完全汽化,过程中气氢体积先减少后增大。

3) 液氢充满率很高时,气氢能一直液化,直至完全液化,液相充满整个容器,此后进入过热状态。

4) 液氢充满率比较高时,液氢先汽化后气氢再液化,此后到达一个饱和状态后将进入过热状态,整个过程液氢的充满率在增加。此时分为两种状态,很高时液氢能完全充满整个容器;相对低时无法完全充满就已经进入过热状态。

5) 临界充满率是一个“伪临界充满率”,该充满率下液氢没有恰好在临界温度时完全汽化或者完全充满,使得容器内的氢介质处于临界状态;除非存在一个冷却过程。另外,“伪临界充满率”是一个特殊的值,小于该充满率的饱和过程是一个一直汽化过程。

6) 饱和变化后的状态将分别进入等容温升、液体过热、平衡过热、超临界等一系列复杂过程。

7) 对于试验的液氢导管接近满液时(90%)的憋压过程,漏热比较严重,液氢将很快膨胀并完全充满导管,试验时应采用合理排压的措施避免超压破坏。

### 参考文献:

- [1] 王竹溪. 热力学[M]. 北京:北京大学出版社. 2003.
- [2] 陈国邦,包锐,黄永华. 低温工程技术数据卷[M]. 北京:化学工业出版社. 2005.
- [3] 弗罗斯特 W. 低温传热学[M]. 陈叔平,陈玉生译. 北京:科学出版社. 1982:228-237.

(上接第 53 页)

- [4] 徐烈,赵兰萍,李兆慈,等. 低温容器无损贮存中的最佳充满率[J]. 低温工程,1999(4):126-131.
- [5] 荣顺,高鲁嘉,徐芳. 低温容器无损贮存规律[J]. 北京:低温工程,1999(4):132-135.
- [6] 穆鹏刚,童飞,蒲光荣,等. 温度对贮箱增压系统的影响分析[J]. 火箭推进,2015,41(4):74-78.  
MU Penggang, TONG Fei, PU Guangrong, et al. Influence of temperature on tank pressurization system [J]. Journal of rocket propulsion, 2015, 41(4): 74-78.
- [7] 范瑞祥,田玉蓉,黄兵. 新一代运载火箭增压技术研究[J]. 火箭推进,2012,38(4):9-16.  
FANRuixiang, TIAN Yurong, HUANG Bing. Study on pressurization technology of the new generation launch vehicle [J]. Journal of rocket propulsion, 2012, 38(4): 9-16.
- [8] 陈春富,李茂,王树光. 液氧贮箱增压过程研究[J]. 火箭推进,2013,39(4):80-84.  
CHEN Chunfu, LI Mao, WANG Shunguang. Numerical study on pressurization process of liquid oxygen tank [J]. Journal of rocket propulsion, 2013, 39(4): 80-84.
- [9] ZILLIAC G, Karabeyoglu M A. Modeling of propellant tank pressurization: AIAA2005-3549 [R]. USA: AIAA,2005.
- [10] LI Zhaoqi, XU Lie, SUN Heng, et al. Investigation on performances of non-loss storage for cryogenic liquefied gas [J]. Cryogenics, 2004, 44(5): 357-362.
- [11] FADDOUL J M, MCLNTYRE S D. The NASA cryogenic fluid management technology program plan: NASA-TM 1999-105256 [R]. USA: NASA, 1999.
- [12] AHUJA Vineet, HOSANGADI Ashvin, MATTICK Stephen, et al. Computational analyses of pressurization in cryogenic tanks: AIAA-2008-4752 [R]. USA: AIAA, 2008.

(编辑:马 杰)