

研究论文

温度与充满率对低温容器无损贮存性能的影响

徐 烈 孙 恒 李兆慈 张存泉 赵兰萍

(上海交通大学动力与能源工程学院, 上海 200030)

摘 要 分析了环境温度和充满率对升压速度的影响, 给出了环境温度变化对无损贮存性能影响的曲线、不同充满率下贮存压力与容器单位容积受热量和不同充满率下无损贮存压力与时间等关系图, 并提出了最佳充满率的概念。

关键词 温度 充满率 无损贮存

中图分类号 TB 6

文献标识码 A

文章编号 0438-1157(2001)10-0891-05

引 言

对于贵重气体、高纯气体和有害气体等液化气体, 为避免贮运中的损耗, 经常采用无损贮存方式。无损贮存的性能受多种因素影响, 对于某一确定的容器, 在绝热结构和内容器强度确定的情况下, 环境温度和充满率是影响无损贮存性能的最主要因素。为此, 本文分析了环境温度的变化对无损贮存升压速率的影响, 给出了不同绝热类型的低温容器由于环境温度变化对无损贮存性能影响的曲线, 并讨论了不同充满率对升压速率的影响。还给出了不同充满率下贮存压力与容器单位容积受热量的关系图和不同充满率下无损贮存压力与时间的关系图, 并提出了最佳充满率的概念。这些结果对于液化气体无损贮存容器的设计、使用和选择等均有指导意义。

1 环境温度对无损贮存性能的影响

对于无损贮存的低温容器, 一般均具有高效的绝热结构。目前用得最多的是真空粉末绝热和高真空多层绝热, 也用高真空绝热。由于环境温度的变化, 其传热温差和绝热材料的导热系数均发生改变, 从而使传热量改变。由于传热量的改变而导致贮存介质的蒸发率增加, 容器的压力增高, 而使无损贮存的时间缩短。

不同绝热结构的热导率 λ_e 可以用下式表征^[1]

$$\lambda_e = A(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) \quad (\text{高真空绝热})$$

$$\lambda_e = B(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) \quad (\text{真空粉末绝热})$$

$$\lambda_e = C(T_1 + T_2)(T_1^2 + T_2^2) + D(T_2 - T_1) \quad (\text{高真空多层绝热})$$

式中 A 、 B 、 C 、 D 为计算系数, 由材料的性质和绝热层结构等因素决定。

当环境温度 T_2 变化时, λ_e 值也会改变。另外, 传热温差 Δt_1 ($\Delta t_1 = T_2 - T_1$) 也改变, 这两种因素都会导致传热量改变, 其改变系数 η_T 为

$$\eta_T = \frac{\Delta t_2}{\Delta t_1} \cdot \frac{\lambda_{e2}}{\lambda_{e1}} \quad (1)$$

式中 $\Delta t_1 = T_2 - T_1$, $\Delta t_2 = 273 - T_1$, λ_{e1} 为 $T_2 \sim T_1$ 之间绝热层的热导率, λ_{e2} 为 $273 \sim T_1$ 之间的热导率。设定在标准状态下 $T_2 = 273\text{K}$ 时的温度影响系数为 $\eta_T = 1$, 根据作者的实验数据和文献[1,]不同环境温度下的影响系数 η_T 随 T_2 的变化关系见图 1~ 图 3。图中的 K 值表示通过绝热层的漏热量占总漏热量的比率。

2 液体充满率的影响

低温容器无损贮存(憋压)后, 由于受其漏热的影响, 一方面系统的焓值增加, 温度上升, 其对应的饱和压力增加; 另一方面, 由于温度上升, 使液体的体积膨胀, 使气相空间减少, 由于液体体积具有不可压缩性而使贮存压力急剧增大。对于不同的充满率, 这一变化也不一样。根据文献[2]可以知道无损贮存中两相系统的单位质量的焓值 h 如下

$$h = \frac{h_l M_l + h_g M_g}{M_l + M_g} = h_l(1 - \varphi) \frac{v_{cm}}{v} + h_g \varphi \frac{v_{cm}}{v_g} \quad (2)$$

介质的平均比容按每一相的原始比容计算

$$v_{cm} = \frac{V}{M_l + M_g} = \frac{v_{0l} v_{0g}}{v_{0l}(1 - \varphi_0) + v_{0g} \varphi_0} \quad (3)$$

2000-01-07 收到初稿, 2000-10-09 收到修改稿。

联系人及第一作者: 徐烈, 男, 57 岁, 教授。

基金项目: “863” 基金资助项目。

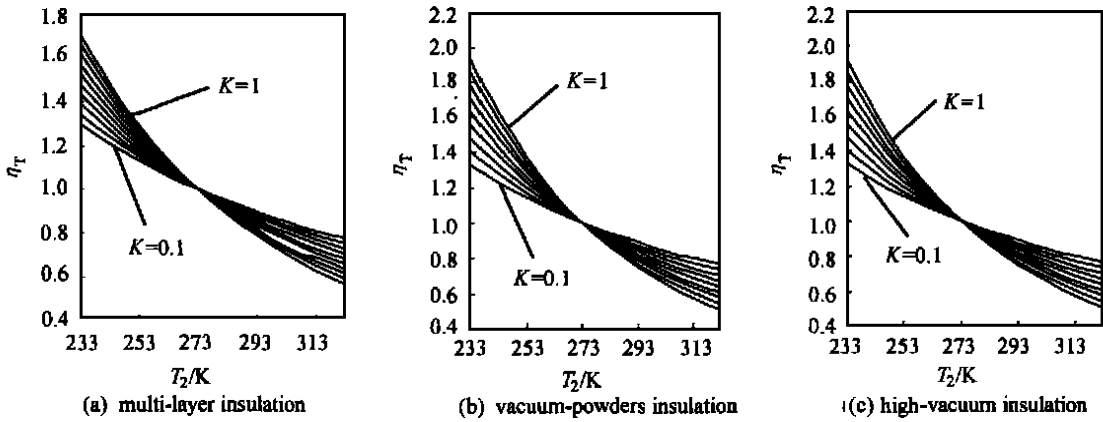


Fig. 1 η_T - T figure of liquid nitrogen vessel ($T_1 = 77$ K)

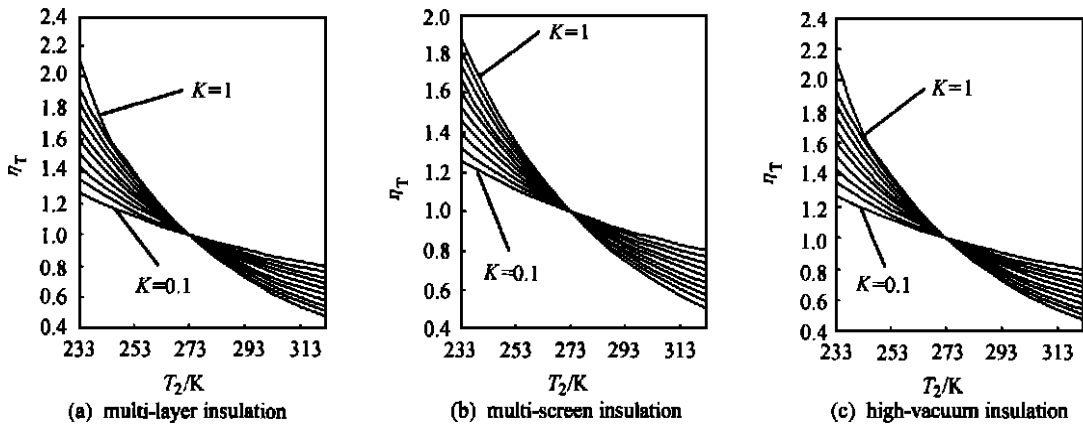


Fig. 2 η_T - T figure of liquid hydrogen vessel ($T_1 = 20$ K)

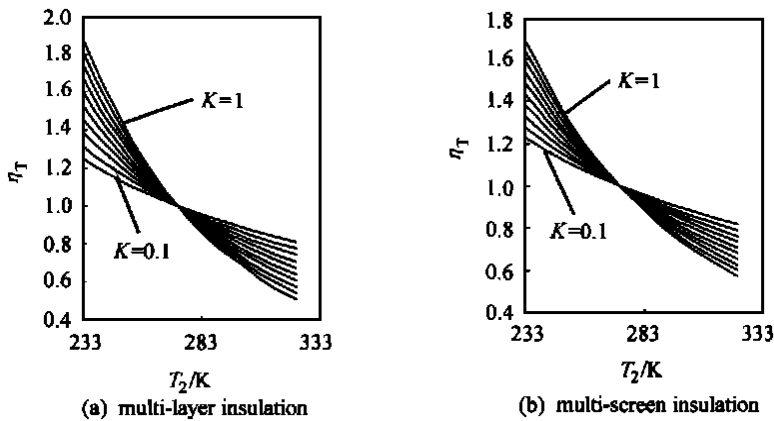


Fig. 3 η_T - T figure of liquid helium vessel ($T_1 = 4.2$ K)

在无损贮存中, 介质的平均比容 u_m 是不变的, 从式 (3) 知, 气体容积含量的变化可由下式决定

$$\varphi = \frac{u_g u_m - u u_g}{u_g u_{cm} - u u_{cm}} \quad (4)$$

而充满率 $(1 - \varphi)$ 为

$$1 - \varphi = \frac{u u_g - u u_{cm}}{u_g u_{cm} - u u_{cm}} \quad (5)$$

这样, 介质的单位质量的焓值 h 将变成

$$h = \frac{h_l(u_g - u_{cm}) + h_g(u_{cm} - u)}{u_g - u_l} \quad (6)$$

利用上述公式, 就可以计算出几种常用低温工

质在不同充满率下的贮存压力与单位漏热量 $\left(\frac{q_T}{V}\right)$ 的关系, 见图 4~ 图 6, 再根据热平衡条件下饱和温度和饱和蒸汽压的对应关系, 可以得到在无损贮存中达到热平衡时充满率 $(1-\varphi)$ 与温度变化的曲线, 见图 7.

从上述图中可以看出, 随着充满率的增大, 无损贮存到达容器允许最高压力的时间 (即无损贮存时间) 先是增加, 而后减少. 这可以解释为: 随着容器中充满率 $(1-\varphi)$ 的增加, 整个容器的热容量增大, 达到热平衡时, 两相区压力增长速度减小, 但是, 由于热膨胀, 液体充填整个容积后使压力增长的速度增加, 而且充满率越高, 液相膨胀充满

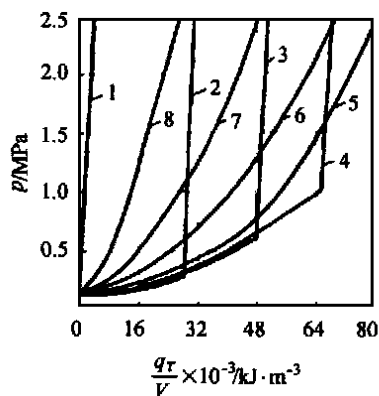


Fig. 4 Relation between pressure and heat leakage per unit volume in heat balance for various l. v. f.

for liquid oxygen vessels

φ_0 : 1—0; 2—0.05; 3—0.1; 4—0.15;
5—0.3; 6—0.5; 7—0.7; 8—0.9

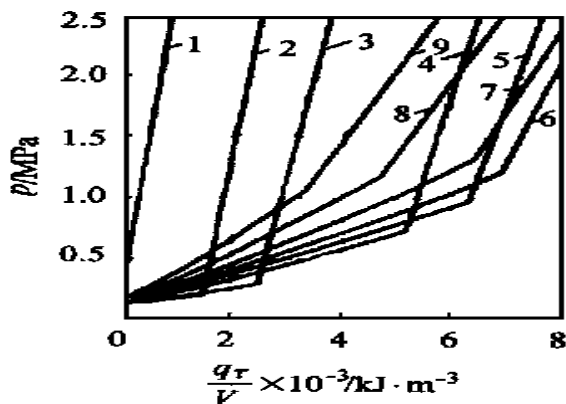


Fig. 5 Relation between pressure and heat leakage per unit volume in heat balance for various l. v. f. for liquid hydrogen vessels

φ_0 : 1—0; 2—0.05; 3—0.084; 4—0.2;

5—0.285; 6—0.4; 7—0.58; 8—0.7; 9—0.81

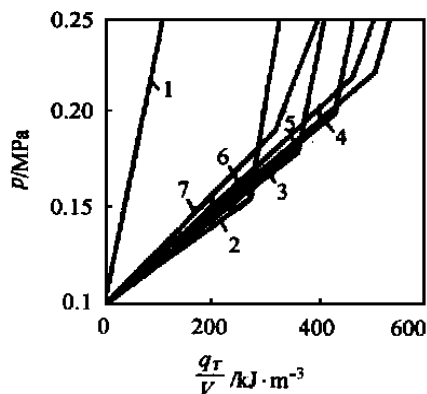


Fig. 6 Relation between pressure and heat leakage per unit volume in heat balance for various l. v. f. for liquid helium vessels

φ_0 : 1—0; 2—0.106; 3—0.154; 4—0.215;
5—0.32; 6—0.54; 7—0.686

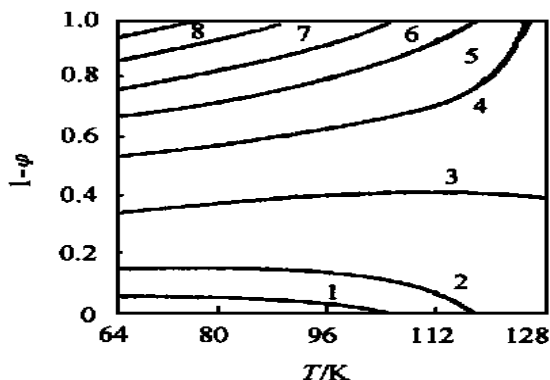


Fig. 7 Relation between l. v. f. $(1-\varphi)$ and temperature in heat balance in non-loss storage
1— φ_0 : 1—0.556; 2—0.138; 3—0.333; 4—0.533;
5—0.667; 6—0.756; 7—0.804; 8—0.922

整个容器的时间愈短, 而压力增长愈快.

从图 7 可以看出, 充满率高时, 随着热量的传入, 液体的体积膨胀, 使液体在容器中占有的容积愈来愈大, 这时会使气体在界面处冷凝. 而充满率很低时, 热量传入引起液体蒸发大于液体体积的膨胀, 结果使液体的体积逐渐变小, 直至完全汽化. 因此图 4~ 图 6 中的现象可以这样解释: 单从能量平衡看, 由于充满率的增加使得整个系统的热容量增加, 温升变慢, 其对应的饱和压力增加速率减慢; 但是, 由于液体的不可压缩性, 随着温度升高, 液体的体积膨胀, 液体充填容器的容积后, 压力急速增长. 因此, 随着充满率 $(1-\varphi)$ 增加到某—限度后, 液体充满容器的时间就愈短, 即达到某

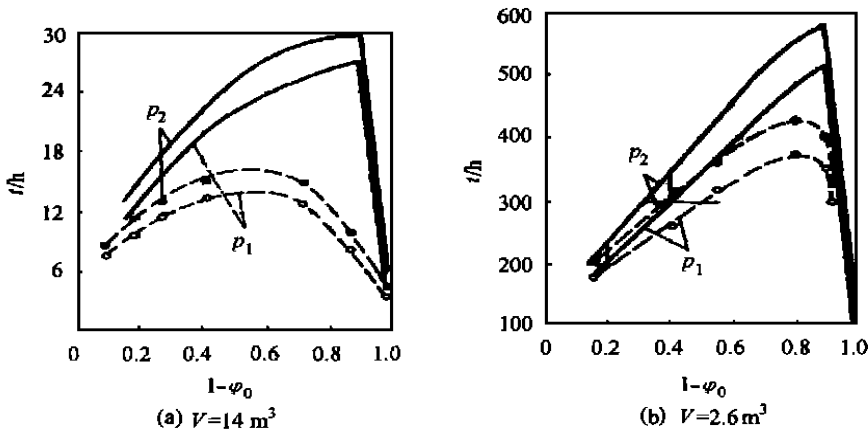


Fig. 8 Relation between l. v. f. and time when the pressure rises from $p_0 = 0.1$ MPa to p_1 and p_2 for two non-loss storage liquid nitrogen vessels
($p_1 = 0.5$ MPa; $p_2 = 0.6$ MPa)
— cal.; - - - exp.

一贮存额定压力(安全压力)的时间愈短. 这一结果在作者与他人的实验结果中得到很好证实^[3], 见图 8.

从图 8 中可以看出, 在低温液体无损贮存中, 开始随着充满率的提高, 无损贮存升压到某一临界压力的时间增长, 但超过某一充满率后, 情况发生急速变化, 随充满率的增加, 达到某一压力的时间急速下降, 这也是低温液体无损贮存中存在一个最佳充满率的原因.

3 结 论

(1) 环境温度和充满率是影响低温液体无损贮存的主要因素, 环境温度的变化不仅影响传热温差, 也影响绝热结构的热导率. 这二者均会影响传热量的大小, 从而影响无损贮存时间; 而造成不同充满率对无损贮存性能发生变化的, 不仅是热容量的大小, 还与低温液体体积膨胀等因素有关.

(2) 不同充满率其无损贮存时间不同, 存在一个最佳充满率. 在未达到最佳充满率前随着充满率的提高其无损贮存时间增长; 在超过此最佳充满率后, 随着充满率的增加, 无损贮存时间急速下降.

(3) 不同绝热结构的贮存容器, 环境温度变化而引起无损贮存压力变化速率不同, 高真空绝热 > 多屏绝热 > 多层绝热.

符 号 说 明

A, B, C, D ——系数

M_l, M_g ——分别为容器中液体和蒸汽的质量, kg

T_1, T_2 ——分别为绝热层冷面与热面温度, K

T_s ——液体的饱和温度($T_s \approx T_1$), K

Δt_1 ——因环境温度改变而引起的传热温差, K

Δt_2 ——标准状态下的传热温差($273 - T_s$), K

u ——介质的比内能, $J \cdot kg^{-1}$

V ——容器的容积, m^3

λ_e ——有效热导率, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

λ_{el} ——环境温度下的热导率, $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

λ_{e2} ——标准状态下的热导率($273 \sim T_s$ 之间),

$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$

φ ——气体的容积含量, %

v ——介质的比容, $m^3 \cdot kg^{-1}$

τ ——时间, s

下角标

0——贮存初始状态

cm——平均

g——气相介质

l——液相介质

References

- 1 Xu Lie (徐烈), Zhu Weidong (朱卫东), Tang Xiaoying (汤晓英). Cryoinsulation and Cryostorage & Cryotransfer Technology (低温绝热与贮运技术). Beijing: Mechanical Industry Publishing Company, 1999
- 2 Feilen N W. Liquid cryogenic systems(液体低温系统). Zhao Yunsheng (赵运生) trans. Beijing: Editorial Department of Cryogenics, 1993
- 3 Xu L, Li Z C, Wang W Y, Zhao L P, Sun H, Wu J Y. In: Don

- J Cleland, Chris Dixon, eds. Proc. 20th International Congress of Refrigeration. Sydney: International Institute of Refrigeration, 1999, Vol. 1, Paper 006
- 4 Aganigfongnof E M, Domasheko A M. *Manufacture of Chemical and Petroleum Machine (Russia)*, 1983(2): 19—21
- 5 Gilisheko U A. Mass Exchange Process for Liquid in the Partially Filled Closed Vessel. Harkov: Cryogenic Physical Technology Institute of Ukraine, 1980. 24

EFFECTS OF TEMPERATURE AND LIQUID VOLUME FRACTION ON PERFORMANCE OF NON- LOSS STORAGE IN CRYOGENIC VESSELS

XU Lie, SUN Heng, LI Zhaoci, ZHANG Cunquan and ZHAO Lanping

(School of Power and Energy Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract In this paper, the effects of temperature and liquid volume fraction on pressure rise in non-loss cryogenic vessels are analyzed. Graphs are provided for the relation between environmental temperature and the performance of non-loss storage for the different types of cryogenic vessel (multi-layer insulation, vacuum-powders insulation, high-vacuum insulation), as well as for the relationship between storage-pressure and heat flow received by the container per unit volume for various volume fractions. The conception of optimum liquid volume fraction is also presented. The results are useful for the design, use and choice of non-loss storage vessels for liquefied gases, precious gases, rare gases and poisonous gases.

Keywords temperature, fraction of liquid volume, non-loss storage

Received date: 2000-01-07.

Corresponding author: XU Lie.

*

*

*

信息与交流

日本科学家成功制作环状纳米碳管

日本九州大学教授新海征治通过试验成功地把纳米碳管做成了环状。

据日本报纸报道,这位教授是在有机溶液中把坚硬的纳米碳管加工成为环状的。经过不断地调整有机溶液浓度,他终于把长 1.6 μm 的纳米碳管两端连接起来,制成环状,直径大约为 0.5 μm 。

纳米碳管是日本科学家饭岛澄男在 1991 年发现的。目前世界各国的科学家正在就它的用途进行积极的研究开发,例如用作储氢材料、新的薄型显示装置的电子枪等。据认为,解析了环状纳米碳管的特性,即可为它开拓用途。

(摘自“中国化工信息网”)