

低温下的真空粉末绝热试验研究

杭州制氧机研究所绝热课题组

一、前言

各国低温工程的迅速发展，大大促进了对各种绝热形式的研究。

我国科学技术和国防工业的飞跃发展，对低温液体的需用量不断增加，尤其作为火箭燃料之一的液氢的获得及其貯运设备绝热的研究，已成为当今研究的重要课题。

真空粉末绝热在較低的真空度下就能获得良好的绝热效果，目前已广泛应用在大型低温液体貯运设备上。由于帝国主义同修正主义的技术封锁，国内原有基础较为薄弱，但中国人民有志气有魄力，“我们希望有外援，但是我们不能依赖它，我们依靠自己的努力，依靠全体军民的创造力。”因此我国在短短的几年内就成功地试制出了气凝胶、珠光砂等优良绝热材料，雄辩地证明了毛主席所教导的“我们能够学会我们原来不懂的东西。我们不但善于破坏一个旧世界，我们还善于建设一个新世界”的革命真理。

本文介绍的主要目的在于通过对国产最新绝热材料的试验研究，为真空粉末绝热的低温液体（即液氢、液氮、液氧等）的貯运和液化设备提供优良的绝热材料，以适应国防和科学发展的需要。

二、试验方法及装置

毛主席说“我们不但要提出任务，而且要解决完成任务的方法问题。我们的任务是过河，但是没有桥或没有船就不能过。”本试验应用量热法原理，即通过测量容器内低温液体（如液氮、液氢）的蒸发量，求得自量热器外以辐射、传导和对流等形式通过绝热粉末层传入量热器内的总热量，根据该热量大小，便可计算出所测之材料的平均有效导热系数（以下简称“导热系数”） $\bar{\lambda}$ 。

试验所建立的装置系统如图1所示，该测量装置适合于在 $300\text{K}^{\circ}\sim 77\text{K}^{\circ}$ ， $300\text{K}^{\circ}\sim 20\text{K}^{\circ}$ 及 $77\text{K}^{\circ}\sim 20\text{K}^{\circ}$ 温度范围内测定各种不同绝热材料的导热系数。

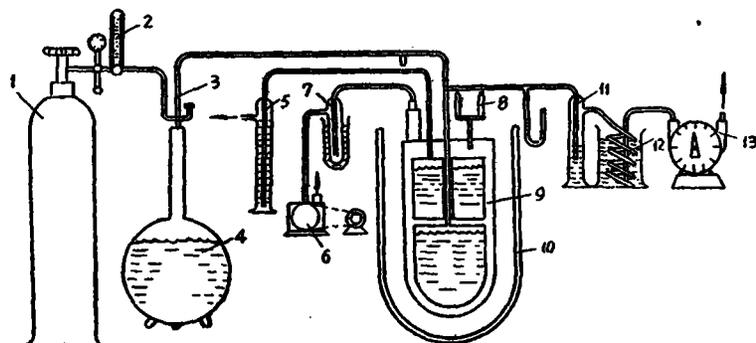


图1 测量装置系统图

从量热器（9）蒸发出来的气体沿着排气管流经水饱和器（11）、热交换器（12）后进入流量计（13），将测出之蒸发气量，通过计算便可确定材料的导热系数。

试验所设计的是一种新型的圆柱型量热器，结构如图2所示，量热器底部成半球型，整个容器均用铜制成，为保证内外容器的同心度，量热器上装有定位元件。

实践证明量热器在所试验的温度范围内和足够长的测试时间内，均能

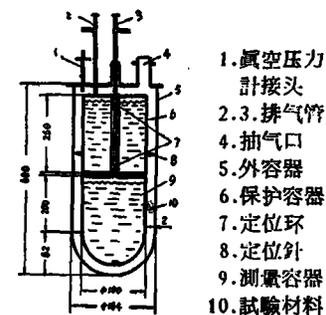


图2 量热器结构图

保持良好的热平衡, 保证测量结果的准确可靠。

传入量热器内的热量均为径向热流, 导热系数 $\bar{\lambda}$ 按下式计算:

$$\bar{\lambda} = \frac{Q_T}{G(T_1 - T_2)} \text{ 千卡/米·时·度}$$

式中: Q_T ——测量容器的总热量, 千卡/时

G ——量热器的几何因子, 米

T_1, T_2 ——热壁及冷壁温度, °K

Q_T 由下式计算:

$$Q_T = L_r \frac{dM}{dt} \left(\frac{\rho_l}{\rho_l - \rho_g} \right)$$

L_r ——汽化热, 千卡/千克

$\frac{dM}{dt}$ ——蒸发速率, 千克/时

ρ_l ——测量液体密度, 千克/米³

ρ_g ——测量气体密度, 千克/米³

G 由下式计算:

$$G = \frac{2\pi l}{\ln r_2 / r_1} + \frac{2\pi r_2 r_1}{r_2 - r_1}$$

l ——测量容器圆柱部分长度(0.2米)

r_1 ——内容器外半径(0.05米)

r_2 ——外容器内半径(0.08米)

三、结果与分析

各种绝热材料的导热系数与压力、粒度和密度的变化关系分别列于下表:

表 1

| 绝热材料 | 密度 (公斤/米 ³) | 粒度 (网目) | 温度 (°K) | 导热系数 $\bar{\lambda}$ (卡千/米·时·度) | | | | | | | |
|-----------|----------------------------|------------|------------|---------------------------------|--------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| | | | | 常压** | 大气压 | 10 ² ㏐ | 10 ¹ ㏐ | 10 ⁰ ㏐ | 10 ⁻¹ ㏐ | 10 ⁻² ㏐ | 10 ⁻³ ㏐ |
| 高压 气凝胶 | 104 | 40—80 | 310—77 | 0.0158 | 0.0130 | 0.00736 | 0.00266 | 0.00201 | 0.00132 | 0.00128 | 0.00123 |
| | 124 | | | 0.0158 | 0.0132 | 0.00850 | 0.00312 | 0.00180 | 0.00114 | 0.00113 | 0.00110 |
| 常压 气凝胶 | 120 | 粉状 | | — | 0.0230 | 0.00582 | 0.00222 | 0.00147 | 0.00138 | 0.00123 | — |
| | 170 | | | 0.0238 | 0.0230 | 0.0108 | 0.00144 | 0.00129 | 0.00106 | 0.00104 | — |
| 珠光砂 | 73—77 | 20—40 | | 0.0242 | 0.0240 | 0.0232 | 0.0191 | 0.0147 | 0.00153 | 0.00148 | 0.00144 |
| | 130 | 40—80 | | 0.0294 | 0.0254 | 0.0228 | 0.00354 | 0.00138 | 0.00104 | 0.000885 | — |
| 珠光砂* | 60—70 | 粒状 | | 0.0217 | 0.0215 | 0.0195 | 0.00626 | 0.00174 | 0.00149 | 0.00138 | — |
| 蛭石 | 290 | 40—80 | | — | 0.0468 | 0.0357 | 0.00366 | 0.00137 | 0.00136 | 0.00130 | — |
| | 300 | 80—120 | | — | 0.0459 | 0.0272 | 0.00788 | 0.00113 | 0.00108 | 0.000930 | — |
| 气相胶 | 290 | 80—120 | | — | 0.0258 | 0.00562 | 0.00108 | 0.00100 | 0.000978 | 0.000951 | — |

备注: *——日本产;

**——测试时粉末层与大气相通。

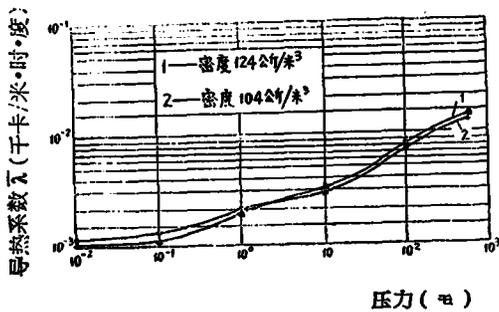


图3 高压气凝胶的导热系数与压力的关系

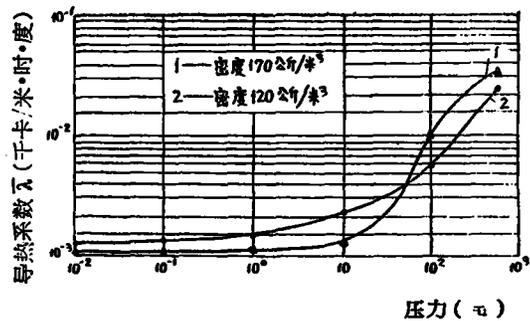


图4 常压气凝胶的导热系数与压力的关系

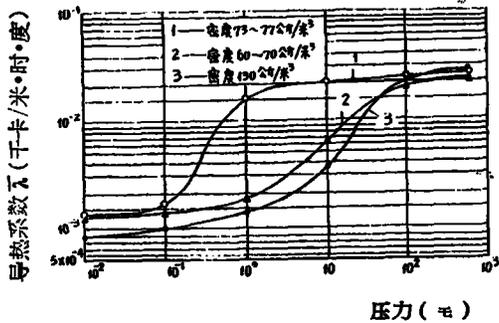


图5 珠光砂的导热系数与压力的关系

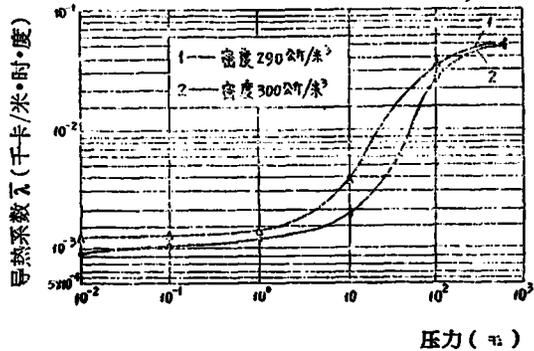


图6 蛭石的导热系数与压力的关系

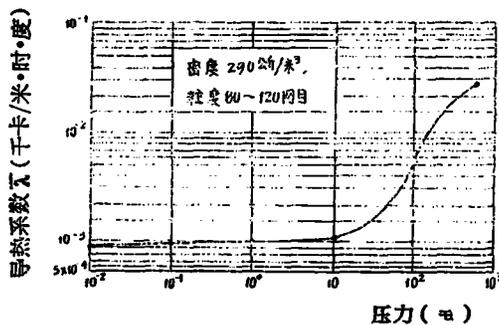


图7 气相胶的导热系数与压力的关系

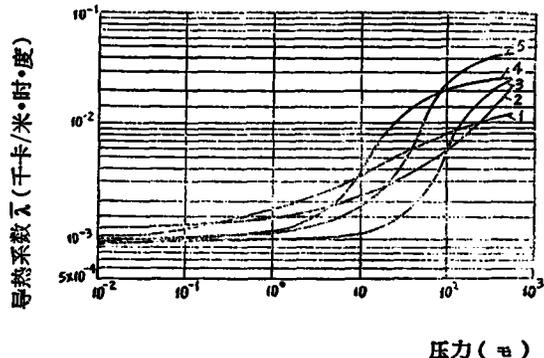


图8 各种绝热材料的导热系数与压力的关系

- 1——高压气凝胶，密度124公斤/米³
- 2——常压气凝胶，密度120公斤/米³
- 3——气相胶，密度290公斤/米³
- 4——珠光砂，密度130公斤/米³
- 5——蛭石，密度300公斤/米³

“无论何人要认识什么事物，除了同那个事物接触，即生活于（实践于）那个事物的环境中，是没有法子解决的。”人们对事物的“认识从实践始，经过实践得到了理论的认识，还须再回到实践去。”因此，要正确分析上述图表中试验结果及其变化规律，必须遵循毛主席的教导去研究分析。

理论和实践均表明在真空粉末绝热中，其传热的主要形式为粉末粒子间的热传导、热辐射及气体分子的对流三种传热形式的综合作用。该三种传热是随粉末粒子自身的粒度、密度以及粉末层残余气体压力的

改变而異。要正确判断三种传热形式在不同场合下所起的作用，必須“对于具体情况作具体分析。”

从上图表中得出，真空粉末絕热的导热系数随压力的变化有一个普遍的規律，即导热系数随压力的降低而减小，其变化过程分为三部分：从大气压至 10^{-2} ，导热系数随压力变化不大。从 10^{-2} 至 0.1^{-2} ，导热系数随压力的降低减小很快。至 0.1^{-2} 以下时，导热系数又与压力变化关系不大。

根据分子运动論，在較高的压力下，气体的导热系数与 $n \cdot l$ 乘积成正比关系（ n ——每单位体积中的分子数， l ——分子平均自由程）。压力提高，分子数 n 增加，但每个分子传热路径增长。压力降低则反之。因此在較高压力范围内气体的导热与压力无关，此时主要是气体热传导。随着压力降低，分子数 n 进而减少，分子平均自由程 l 增加，由于粉末粒子的存在， l 很快接近絕热层间距时，气体分子传热开始减小，此时气体传热仅与分子数 n 有关，因此出现了导热系数随压力降低而急剧减小的现象。当压力再降低，则 $n \cdot l$ 乘积近于恒量，气体导热已很小了。

在真空粉末絕热中，除了气体传热外，当压力低于 0.01^{-2} 后，粉末粒子间的热传导和热辐射起主要作用。粉末间的热传导是随絕热材料的密度、粒度及孔径而变。由于粉末间接触的不規則，通过粉末传热的路径曲而长，使传热阻力增加。应指出作用于粉末的力，除受压力外，当粉末粒子很細或密度很大时，还可能出现分子力。这种力的出现，无疑将会增加粉末间的热传导。由于粉末的存在，也实际上起着辐射屏的作用，从而大大地减小了辐射热。辐射热也随絕热材料的密度，粒度而变。特別应指出的是辐射热与热壁和冷壁溫度的四次方之差成正比，溫度的增加将会使辐射热显著的增加。

1. 絕热材料的密度对导热系数 λ 的影响

試驗結果表明，在真空粉末絕热中处于較低压力下，导热系数随密度的增加而减小，在較高压力下則反之。导热系数随密度的大小而变，其实质决定于粉末粒子间的热传导和热辐射的增减。一般說来密度增大辐射热减小，而固体热传导增加，反之則相反。在低压下珠光砂和气凝胶密度大的比密度小的导热系数小，因为密度增加引起辐射热的减小比增加的固体热传导更显著，故总的热流减小。在較高压力下密度大的比密度小的导热系数大，由于大量气体分子的存在，改善了粉末粒子间的热接触，另則密度大使得粉末粒子间接触面积的形变而减小了接触热阻力，因此密度增加而引起固体热传导的增加比减小的辐射热更为明显，故总的热流增加。

2. 絕热材料的粒度对导热系数 λ 的影响

試驗結果表明，导热系数随粒度的减小而降低。粒度减小使粉末粒子间接触面变小以及接触断裂数增加，引起粉末粒子间热阻增大而使固体热传导减小。辐射热流也随粒度的减小而降低，故总的热流减小。但事物的变化总带有两面性，“在一定的条件下，坏的东西可以引出好的結果，好的东西也可以引出坏的結果。”当粒度小到某种程度后，虽只增加了粉末粒子间的辐射屏数，但屏之厚薄减小，从热辐射持有可透性来看，粒度过小辐射热和固体热传导不仅不能降低反而增加。

3. 热壁和冷壁溫度的变化对导热系数 λ 的影响

(1) 冷壁溫度对导热系数的影响

从表 2 分析，当热壁溫度保持不变（即 300°K ）时，导热系数随冷壁溫度的降低而减小。但应指出在 $300^\circ\text{K} \sim 77^\circ\text{K}$ 的导热系数比 $300^\circ\text{K} \sim 20^\circ\text{K}$ 为大，这种明显的热的矛盾和反常现象，在其它情况也被观察到，并非是試驗的誤差，这个原因有待于今

表 2

| 絕 热 材 料 (公斤/米 ³) | 密 度 (吨) | 压 力 (吨) | (T ₁ -T ₂)°K | | | | |
|------------------------------|---------|--------------------|-------------------------------------|---------|----------|----------|----------|
| | | | 300—90 | 300—80 | 300—77 | 300—20 | 77—20 |
| 高 压* 气 凝 胶 | 104 | 1×10 ⁻² | 0.00118 | 0.00111 | 0.000994 | 0.000889 | 0.000484 |
| 珠 光 砂 | 73—77 | | 0.00165 | 0.00155 | 0.00148 | 0.00101 | 0.000538 |

注：1. 此数据与表 1 所列不一致是因在不同情况下測定的，只作为考察壁温对导热系数影响时的定性說明。

2. 試驗用的液氢（ 20°K ）予先經過正—仲氫轉換，轉換后的仲氫含量为90%~95%。

表 3

| 絕 热 材 料 (公斤/米 ³) | 密 度 (吨) | 压 力 (吨) | (T ₁ -T ₂)°K | | | |
|------------------------------|---------|--------------------|-------------------------------------|---------|---------|---------|
| | | | 273—77 | 293—77 | 313—77 | 333—77 |
| 高 压* 气 凝 胶 | 104 | 1×10 ⁻² | 0.00112 | 0.00124 | 0.00147 | 0.00169 |
| 珠 光 砂 | 73—77 | | 0.00115 | 0.00125 | 0.00138 | 0.00158 |

后进一步研究。

(2) 热壁温度对导热系数的影响

从表3、图9分析,当冷壁温度保持不变(即77°K)时,热壁温度从273°K增至333°K时,导热系数随温度的增加成线性的增加。

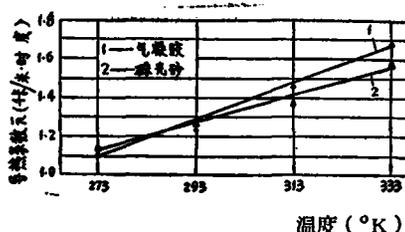


图9 导热系数与热壁温度的关系

四、误差分析

影响试验准确度的因素如下:

流量计用体积法校正,误差为±2%。真空压力计自身准确度误差是±15%,引起测量误差为±1%。水恒温器内温度计的准确度及读数偏差共为±0.3°C,引起测量误差为±0.13%。选取蒸发量是在稳定状态下取一组或几组平均值作为原始数据,引起测量误差为0.59%。试验室的温度和大气压力均取平均值,引起测量误差为±0.32%。计算时以室温为准,但室温同流量计间存在温差,最大差±3°C,引起测量误差为±1%。由于每次试验用的液体(液氮、液氢等)的纯度不同,其沸点温度有异,最大差+3°C,引起测量误差为1.3%。在完全相同的试验条件下,其试验的重复性偏差为±0.97%。量热器内外容器的同心度已用定位元件保证之,在此误差不考虑。其它如每次装填材料的松紧不同及抽空程度引起测量误差未作试验,估定为±2%。

五、结论

“一切结论产生于调查情况的末尾,而不是在它的先头。”通过前一阶段的试验探索,初步得出如下结论:

在所试验的范围内,绝热材料的导热系数随粒度的减小而降低,随密度的增加而减小,随压力的降低而减小。

高压气凝胶在大气压下与其它绝热材料相比,导热系数最小,作为无真空度要求的低温贮液器及液化设备的绝热材料是满意的,但它价格较贵,大量采用必须考虑经济性的。

珠光砂除了在真空度下具有良好的绝热性能外,同时它来源丰富,成本低廉,密度小,易除气抽空等特点,因此作为大型的低温贮液器和液化设备的绝热材料十分有利,尤为用在运输式槽车上更为适宜。

常压气凝胶在真空度下同高压气凝胶相比,具有同样的绝热效能,而前者比后者制造工艺简单,成本低得多,如将常压气凝胶由粉状改变成粒状或球状,它将是一种很有发展前途的绝热材料。

蛭石在真空度下导热系数小,我国产地甚多,来源丰富,成本低廉,是一种很经济的绝热材料,但它密度较大,用在固定式的低温贮液设备上较宜。

气相胶在真空度下绝热效果优良,但因制造成本高,使用受到限制。

高压气凝胶和珠光砂在77°K~20°K比在300°K~20°K温度范围内所测之导热系数将近小一倍,说明在极低温(如液氢、液氮)贮液器上,装上液氮屏是减小冷损的有效方法。

从对高压气凝胶、珠光砂试验证明,绝热材料的导热系数随热壁温度(T_1)的增加而增加,随冷壁温度(T_2)的降低而减小。

在相同的试验条件下,国产珠光砂同日本珠光砂在310°K~77°K温度范围内所测定的导热系数相近。

本试验累积误差为±10%左右。

结束语

近年来我所在真空粉末绝热方面做了一些工作,但由于我们活学活用毛主席著作不够,加之业务水平低,因此本文难免存在缺点和错误,但正如毛主席所教导的:“我们的责任,是向人民负责。每句话,每个行动,每项政策,都要适合人民的利益,如果有了错误,定要改正,这就叫向人民负责。”所以,我们恳切的希望有关部门及兄弟单位,给予批评指导,以助今后改进。

在我们的工作中,为提供试验样品方面,得到了上海大庆化工厂、大连耐火材料厂及大连光明所等单位的大力协助,在此表示感谢。