

实验十一 液氮比汽化热与固体材料放热的测量

物质的比汽化热是在一个标准大气压下单位质量的物质汽化时所吸收的热量，它是物质的主要热学特性之一。液化氮气（简称液氮）的沸点约为 -196°C (77.3K)，它是现代实验室中获得低温的最常用的一种制冷剂。本实验测量在1个大气压下液氮处于沸点温度时的汽化质量，并计算固体材料释放的热量，从而求出液氮的比汽化热。

因液氮汽化较快，实验时应采用动态法称衡，并须校正由于与外界热交换引起的误差。另外本实验还学习应变片式天平的工作原理、结构及标定方法，虚拟仪器的使用方法。

【实验目的】

1. 了解物质的比汽化热的概念和测量方法；
2. 了解固体材料定容比热容 C_v 与温度的关系，掌握固体材料放热的三种计算方法；
3. 了解虚拟仪器的概念和使用，体验 LabView 软件的编程。

【实验原理】

1. 汽化热

物质由液态向气态转化的过程称为汽化。在汽化的过程中，分子要克服分子与分子之间的吸引力而做功，因此要吸收一定的能量。宏观上表现为液体的温度下降。

在一定压强下（如1个大气压）、保持温度不变时，单位质量的液体转化为气体所需吸收的热量，称为该物质的比汽化热 L ，即 $L=Q/m$ 。当然，它也等于单位质量的该气态物质转化为同温度液体时所放出的热量。

比汽化热值与汽化时液体的温度有关，如温度升高，则比汽化热减小。水在 100°C 时的比汽化热为 $129\times 10^3\text{ J/Kg}$ ，而在 5°C 时为 $136\times 10^3\text{ J/Kg}$ 。这是因为随着温度的升高，分子的热运动加剧，液相与汽相之间差别逐渐减小的缘故。

在本实验中，我们将室温下的铜柱和其他金属柱放置于液氮中，通过圆柱放热加速液氮的汽化。

2. 放热量 Q 的计算

因为铜柱由温度 T_1 降至液氮温度时释放的热量 Q 应该等于它从液氮温度回升到 T_1 时所吸收的热量，所以可以把液氮温度的铜柱放到量热器中，用量热器直接测量。但是也可以用计算的方法，因为固体物理学已经对固体的比热容有了比较精确的描述，而且已经有实验数据。

在本实验中用到三种方法计算。

(1) 用焓差计算。从热力学中知道，焓 H 是表示物质内部具有的一种能量的物理量，也是一个表示物质状态的参数。

$$H = U + PV \quad (1)$$

式中： U 是物质的内能， P 是压强， V 是体积。 H 的单位是能量的单位： kJ 或 kJ/kg 。

焓差反应了物体能量状态的变化。对于固体材料来说， PV 变化可以忽略，所以焓差直接反应了铜柱热量的变化。所以知道了铜对应温度的比焓，就能直接计算铜柱的放热量

Q. 对于铜在室温和液氮温度的比焓已在附录 1 中给出.

(2) 用比热容计算. 根据比热容的定义, 只要知道了铜柱的比热容和铜柱的质量, 就可以计算出铜柱从室温降到液氮温度所放出的热量. 但是从固体物理学知道, 物质的比热容在低温范围时, 不是一个常数, 而是随温度下降而减小的. 所以我们必须知道铜的比热容随温度变化的关系. 对于铜在室温和液氮温度之间的定压比热容 C_p 已在附录 2 中给出.

(3) 用德拜的固体比热容模型计算. 从固体物理学知道, 德拜的固体定容比热容模型能较好地反映出固体定容比热容 C_v 与温度的变化规律. 在德拜模型中, 固体的内能可以表示为:

$$U = \frac{9NkT^4}{T_D^3} \int_0^{T_D/T} \frac{x^3}{e^x - 1} dx \quad (2)$$

式中: $N = 6.02E23 \text{ mol}^{-1}$, 是阿伏伽德罗常数; $k = 1.38E-23 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$, 是波尔兹曼常数; T_D 是物质的德拜温度, 可由实验确定; 后面的积分是一个定积分, 被积函数变量 x 已被无量纲化, 所以在式中只是一个待定系数. U 的单位是 $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}$. 上式指出, 以摩尔为单位时, 固体的内能与具体的物质种类无关.

(2) 式对 T 求偏导即得到德拜固体比热容 C_v 的表达式. 对于金属来说, 在极低温范围时 (约低于 10K), 电子对比热容的贡献不能忽略, 从而德拜模型与实验值偏离较大. 但液氮的温度远高于这个温度范围, 可以忽略这种影响.

这种方法, 类似于计算焓差. 只要知道物体的特征温度--德拜温度 T_D 就能计算出物体在不同温度下的内能, 从而求出释放或吸收的热量, 所以这种方法具有普遍意义. 定积分无法给出解析式, 但可以采用数值积分或小步长求和的方法计算, 材料的德拜温度 T_D 可以查表. 附录 3 中给出了几种材料的德拜温度.

最后, 我们得到液氮的比汽化热:

$$L = \frac{Q}{m_N} \quad (3)$$

【实验技术】

1. 汽化重量的测定

在盛有一定质量液氮的保温杯瓶塞上开个小孔, 则瓶内液氮将由于吸收周围大气中的热量而不断汽化为氮气. 可以用天平称出单位时间内汽化的液氮量. 接着, 将已知质量、而温度为室温 θ 的小铜柱从孔中放入液氮中. 由于 1 个大气压下液氮的沸点很低 (77.3K), 因此铜柱立即向液氮放热, 从而使液氮汽化过程大大加快. 直至铜柱温度和液氮温度相等时, 它们之间的热交换才停止.

整个变化过程如图 1 所示. 设盛有液氮的保温杯及铜柱的总质量为 M , 图中 ab 段为液氮吸收

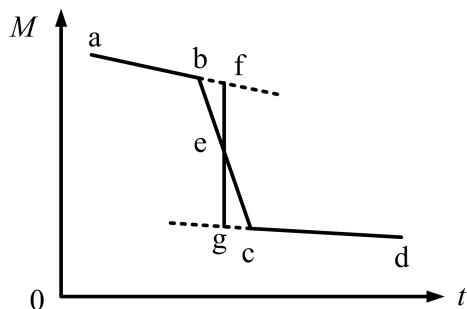


图 1 总质量 M 随时间变化关系

空气中的热量，部分汽化而引起质量 M 减小的过程；bc 段为液氮除吸收空气中的热量外，还由于室温铜柱浸入而引起剧烈汽化， M 迅速减小的过程；cd 段表示铜柱不再放热，液氮继续吸收空气中热量而 M 继续减小的过程。延长线段 ab、cd 并在线段 bc 的中点 e 做垂直线 fg。垂直线 fg 则表示在 bc 段中仅考虑铜柱释放热量而汽化的液氮质量 m_N ，即 $m_N = m_f - m_g$ 。

由于 bc 过程持续的时间很短，用人工记录数据的方式很难完整记录整个实验过程，因此可以引入数据采集技术，不仅可以清晰地记录液氮的汽化过程，而且可以提高测量精度。

2. 虚拟仪器

在现代科技发展的过程中，计算机技术不断地从各个方面影响着不同领域的技术发展。虚拟仪器(Virtual Instrument, 简称 VI)是在 20 世纪后期随计算机水平和软件技术的迅速进步而出现并发展起来的有别于传统仪器的新概念。

虚拟仪器技术就是利用各种标准的高性能模块化硬件，结合高效灵活的软件来完成各种测试、测量和自动化的应用。能创建完全自主定义的用户界面，虚拟仪器技术突破了传统电子仪器以硬件为主体的模式，将日益普及的计算机技术与传统的仪器仪表技术结合起来，使用户在操作计算机时，如同在操作自己定义的仪器。在本实验中，我们使用了 NI 公司的软件平台 LabView 来搭建测量系统。

3. 称量

本实验用的重量传感器是电阻应变片式传感器。它用 4 片应变片粘在刚性支架上，组成桥式连接，外形结构见图 3、图 4。当支架因重量而产生形变，电阻阻值有相应变化，从而输出电压变化。测量电路采用了非平衡电桥原理。这部分测量技术的详细讨论见《大学物理实验·第一册》中的《电阻应变片传感器灵敏度的测量》和本册中的《非平衡电桥的应用》两个实验。根据非平衡电桥的原理，传感器输出的电压与工作电压有关，所以在本实验中，为了能确定传感器输出与重量的关系，必须现场用砝码定标。

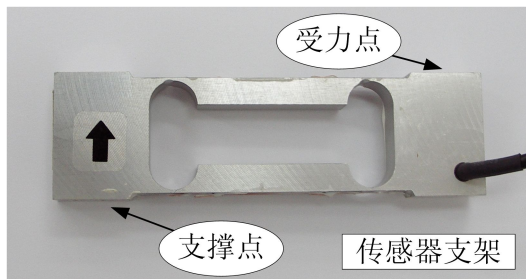


图 3 刚性支架的外形和上下受力位置

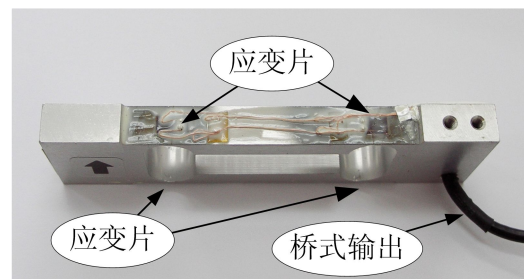


图 4 四张应变片贴在形变最大的位置

【实验仪器】

整个实验装置如图 5 所示。它由砝码，称重传感器，保温杯，数据采集器，计算机，铜柱、铝柱、不锈钢柱和温度计等组成。

【实验内容】

1. 标定称重传感器。用天平分别称出砝码的重量，然后用已标记号好的砝码对称量传感器进行标定，现场用 Origin 作电压—重量关系图，检查曲线是否符合要求，求出拟合表

达式。这一步很重要，如果线性不好，必须重测。

2. 记录液氮汽化过程中重量的变化过程。现场利用 Origin 作图求出液氮因铜柱放热汽化而损失的重量 m_N 。金属柱用铜柱、铝柱和不锈钢柱。

3. 用三种方法计算铜柱的放热量。直接利用本实验中的计算机处理实验数据，做出实验报告所需要的图表。定积分可以用 Origin 中的曲线积分功能计算或利用 Excel 计算。具体方法也可参见实验室提供的资料。

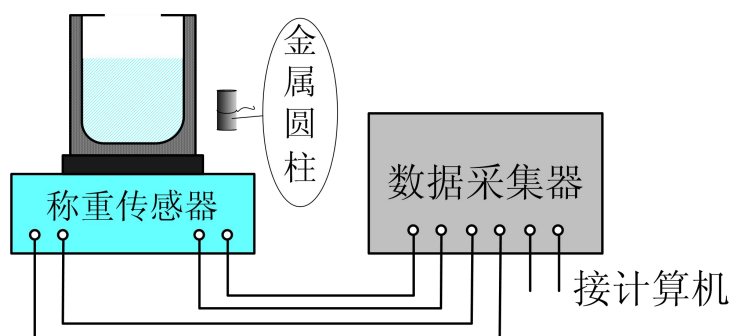


图 5 实验装置图

【思考题】

1. 对称重传感器进行标定时，如何判断曲线是否符合要求？
2. 如果温度从 300K 降到 77K，要求放出同样的热量，材料分别采用 Cu 和 Al，那么它们的质量比为多少？体积比又是多少？

【参考文献】

1. 余建波 王瑗 陈民溥，用计算机数据采集系统测量液氮的汽化潜热，物理实验，2007，27 (3)
2. Kittel, Introduction to Solid State Physic, 8th Ed.

附表 1: 铜的比焓 $H^{[1]}$

78 K	300 K
6.02 kJ / kg	79.6 kJ / kg

附表 2: 铜的定容比热 C_P 与温度 T 的关系^[1]

T / K	$C_P / (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	T / K	$C_P / (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$
70	171.5	190	350.0
80	202.7	200	355.0
90	229.5	210	359.4
100	252.2	220	363.5
110	271.2	230	367.1
120	287.2	240	370.2
130	300.7	250	373.1
140	312.2	260	375.8
150	322.0	270	378.3
160	330.6	280	380.7
170	338.0	290	382.9
180	344.5	300	384.8

附表 3: 几种材料的摩尔质量、密度和德拜温度 $T_D^{[2]}$

物理量/单位	Fe	Ni	Cu	Al	Si	C	Pt
$M / g \cdot mol^{-1}$	55.84	58.69	63.54	26.98	28.08	12.01	195.08
$\rho / g \cdot cm^{-3}$	7.87	8.9	8.96	2.7	2.33	2.25	21.45
T_D / K	470	450	343	428	645	2230	240