

基础物理实验

液氮比汽化热的测量



物理国家级实验教学示范中心（复旦大学）



液氮比汽化热的测量

液化氮气（简称液氮）的沸点约为 -196°C （77K），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比汽化热。物质的比汽化热是该物质汽化时所需吸热大小的量度。它是物质的主要热学特性之一。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等。

实验目的

本实验要求测量液氮的比汽化热，了解什么是动态称衡法和间接测量法，掌握电子天平、量热器等基本仪器的使用，并学习安全使用液氮的方法。

实验原理

物质由液态向气态转化的过程称为汽化。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 $136\times 10^3\text{J/kg}$ 。这是因为随着温度升高，液相与汽相之间的差别逐渐减小的缘故。

1. 间接测量法测量液氮吸收的热量

液氮吸热后变成气体，其吸收的热量不容易直接测量，因此我们采用间接测量法测量。将一个温度接近室温的小铜柱投入液氮中，使其达到与液氮同温，若不考虑热量损失，那么铜柱放出的热量等于液氮吸收的热量，因此测量液氮吸收的热量转化成了测量铜柱放出的热量。而铜柱放出的热量我们可以通过量热器使其与水热交换测量完成。将浸没在液氮中并与液氮同温度的铜柱取出，迅速放入一盛水的量热器中。若水和量热器的初温为 θ_2 ，而铜柱与水混合后，达到热平衡时，系统的温度为 θ_3 ，则铜柱从液氮的温度升高到 θ_3 时吸收的热量为

$$Q_1 = (m_w c_w + m_a c_a + m_c c_c + h_t)(\theta_2 - \theta_3) \quad (1)$$

式中 m_w 、 c_w 分别为水的质量与比热容； m_a 、 c_a 分别为量热器的内筒质量与比热容； m_c 、 c_c 分别为搅拌器的质量与比热容； h_t 为温度计浸入水中的那部分的热容量。 θ_3 一般小于铜柱初温 θ_1 ，所以如使铜柱温度再从 θ_3 上升到 θ_1 则尚需吸收热量 Q_2 ：

$$Q_2 = m_{\text{铜}} c_{\text{铜}} (\theta_1 - \theta_3) \quad (2)$$

式中 c_b 为铜的比热容，它的数值随温度而改变，由于温差 $\theta_1 - \theta_3$ 的数值较小， c_b 可近似视为恒值，而 m_b 为铜柱的质量。

铜柱由温度 θ_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 θ_1 时所吸收的热量:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$\text{即 } Lm_N = (m_w c_w + m_a c_a + m_c c_c + h_i)(\theta_2 - \theta_3) + m_b c_b (\theta_1 - \theta_3)$$

2. 动态称衡法测量铜柱释放热量而汽化的液氮质量

我们将铜柱投入液氮中, 给液氮主动放热, 液氮和铜柱达到热平衡需要一定的时间, 因此, 实际上不得不考虑这段时间, 空气与液氮热交换所带来的质量损失。为了消除周围空气的影响, 得到仅考虑铜柱释放热量而汽化的液氮质量, 我们用动态称衡法测量液氮质量随着时间的变化, 通过合理的近似和数据处理, 扣除掉由于空气的热交换而带来的液氮汽化所损失的质量。

在保温杯中盛有一定质量的液氮, 放到电子天平上 (此时小铜柱也一起放到天平上, 请思考一下为什么?), 同学们观察一下, 会发现天平示数随着时间的延长慢慢减少, 这是由于保杯瓶内液氮吸收周围大气中的热量而不断汽化为氮气所导致的。可以用天平称出一段时间内液氮质量的变化, 可以发现, 在短小时内, 总质量的减少随时间呈线性关系。接着, b 时刻, 将小铜柱放入液氮中, 由于 1 个大气压下液氮的沸点很低 (为 77.4K), 因此, 铜柱立即向液氮放热, 从而使液氮汽化过程大大加快, 天平示数会迅速降低。直至 c 时刻, 铜柱温度和液氮温度相等时, 它们之间的热交换才停止。(此处请思考一下, 用什么现象可以判定铜柱与液氮达到同温了?) 接下来, 我们继续测量总质量随着时间的变化情况, 发现此时仍然近似为线性关系, 但是放入铜柱前后, 总质量随着时间的变化, 两段直线的斜率并不相同, 请思考一下为什么? 用天平称出盛有液氮的保温杯及铜柱的总质量 M , M 随时间 t 的变化情况如图 1 所示。

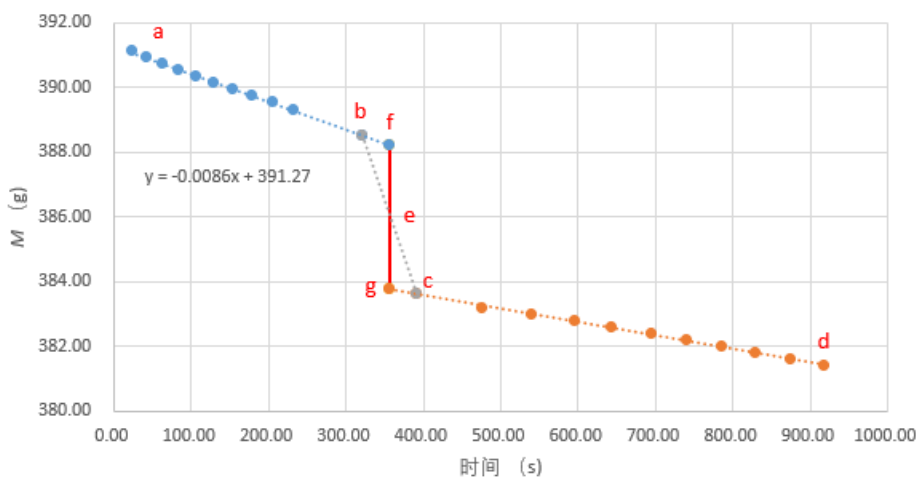


图1 总质量 M 随时间的变化

图中 ab 段为液氮由于吸收空气中的热量, 部分汽化而质量 M 减小的过程; bc 段为液氮除吸收空气中的热量外, 还由于铜柱投入液氮而引起剧烈汽化, 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；过 bc 的中点 e 时刻，做横坐标轴的垂直线交 ab 延长线于 f 和 dc 延长线于 g。此时，我们可以假设一理想物理过程：e 时刻将铜柱投入液氮中，瞬间铜柱和液氮达到热平衡，铜柱投入液氮之前，液氮吸收周围大气中的热量而不断汽化，质量下降到 f 点，投入铜柱之后，液氮质量以 cd 直线斜率的速率下降到 g 点。因此仅考虑铜柱释放热量而汽化的液氮质量 $m_N = m_f - m_g$ ，这样我们就用动态秤衡法去除了由于环境空气与液氮热交换所损失的质量。

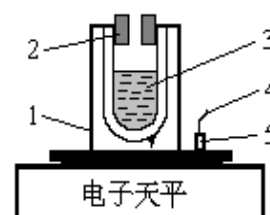
液氮的比汽化热为：

$$L = \frac{1}{m_N} [(m_w c_w + m_a c_a + m_c c_c + h_t)(\theta_2 - \theta_3) + m_b c_b (\theta_1 - \theta_3)] \quad (3)$$

实验中，数字温度计浸入水中的那部分的热容量 h_t 忽略不计。

实验仪器

实验装置如图 2 所示。实验中用到的器材有：电子天平、保温杯、铜柱、量热器、数字温度计、秒表。



1. 保温杯 2. 软木塞 3. 液氮
4. 细棉线 5. 铜柱

图 2 用天平称衡保温杯（含液氮）和铜柱的质量

警告：液氮危险，注意安全！

使用液氮的注意事项：

- (1) 液氮沸点约为 -196°C ，应避免人体皮肤直接与之接触，以防冻伤。不准戴纱手套操作，因为一旦液氮溅到纱手套上即不易挥发，反而增加危害性。
- (2) 在灌注液氮时，应佩戴防护眼镜，头部切不可紧凑在装液氮的保温瓶前。以防液氮损伤眼睛或脸部。
- (3) 铜柱须缓慢地放入待测保温杯内的液氮中，以防止瓶胆受损。

实验内容

一、 $M-t$ 图的测量

1. 调节电子天平水平，称重前注意先将天平示数归零。
2. 秤出铜柱、量热器内筒、搅拌棒的质量。
3. 在保温杯中加入液氮（教师操作）。
4. 将保温杯放在天平的托盘上，且铜柱也要放到电子天平的托盘上，如图 2 所示。开始记录待测物（液氮+容器+铜柱）的质量 M 随时间变化的情况。注意整个测量过程中，即 $ab \rightarrow bc \rightarrow cd$ 整段时间，应连续记录，千万不能有间断。液氮每减少一定质量（0.2g）记录一次质量 M 及相应的时刻 t 。ab 段记录 10 组数据。
5. 将铜柱轻轻地放入保温杯中，记下放入的时刻 t_b （不需要记录此时天平的示数）。

- 铜柱投入后立即引起液氮大量汽化，瓶口冒出大量白雾，随时间的推移，白雾越来越少，约一分钟左右，瓶口突然再次冒出大量白雾，随即白雾很快消失，立即记下此时的时刻 t_c 。（为什么会有两次大量冒出白雾的现象，为何第二次白雾消失时铜柱与液氮的温度相同？）
- 继续测量 M 随时间减少的情况，记录 10 组数据。

二、间接测量法测量液氮吸收的热量

- 用量热器取 1/2 杯到 2/3 杯水，并称量其质量。
- 用温度计测量水的温度 θ_2 （注意温度计要在水中静置 3-5 分钟）。将铜柱从液氮中取出后迅速投入量热器中，并用搅拌器搅拌（不能有水溅出筒外），观察数字温度计的示值，达到热平衡时即记下最低温度 θ_3 。（为什么记下最低温度？）注意：数字温度计探头不要触碰到铜柱。

则铜柱从液氮的温度升高到 θ_3 时吸收的热量为

$$Q_1 = (m_w c_w + m_a c_a + m_c c_c + h_t)(\theta_2 - \theta_3)$$

铜柱温度再从 θ_3 上升到初温 θ_1 （初温应为测量 $M-t$ 图时，铜柱投入液氮前的温度，此处用室温代替）吸收热量为：

$$Q_2 = m_{\text{铜}} c_{\text{铜}} (\theta_1 - \theta_3)$$

- 将铜柱擦干，重新投入液氮中待其温度降为 77K，用量热器内筒重新取 1/2 杯到 2/3 杯水并重复步骤 1、2 三次，将三次测量所得 Q ($Q = Q_1 + Q_2$) 求平均。
- 计算液氮的比汽化热 L 。你的测量结果与预期值是否相符？液氮在常温常压下比汽化热的参考值为 199 J/g

参考资料

- [1] 贾玉润等. 大学物理实验, 复旦大学出版社, 1987。
- [2] 陆申龙. 金浩明. 大学物理, 1984 年第 3 期, 46 - 47。
- [3] 陆申龙. 郭有思. 热学实验, 上海科技出版社, 1986。

数据记录表格

一、测量 $m-t$ 的变化情况：

质量 m 每下降0.20g，记录一次时间（ m 是盛有液氮的保温杯及黄铜样品的总质量）

整个测量过程中，时间是连续的，不能中断

表1 ab段的 $m\sim t$ 变化关系

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m/g										
秒表读数										

注意：秒表读数可用手机时钟自带的“秒表”功能来测量；应记录 $x'xx''xx$ 。

小铜柱的初温 $\theta_1 =$ _____ $^{\circ}\text{C}$ ；

投入铜柱的时刻 $t_b =$ _____；

二次冒白雾消失（达到热平衡）的时刻 $t_c =$ _____

注意：cd 段的第 1 组数据在 t_c 之后间隔约 1 分钟后再测量。

表2 cd段的 $m\sim t$ 变化关系

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
m/g										
秒表读数										

二、热量 Q_1 和 Q_2 的测量：

内筒质量 $m_a =$ _____ g，小铜柱质量 $m_b =$ _____ g，搅拌器质量 $m_c =$ _____ g

	内筒+水的质量 m_{a+w} / g	水的质量 m_w / g	初始水温 $\theta_2 / ^{\circ}\text{C}$	水温最低值 $\theta_3 / ^{\circ}\text{C}$	Q_1 / J	Q_2 / J	Q / J
1							
2							
3							

附表：水、黄铜与铝的比热 ($\times\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)

温度 / $^{\circ}\text{C}$	5	10	15	20	25	30
水	4.215	4.205	4.200	4.190	4.185	4.181
黄铜	0.370	0.370	0.371	0.372	0.373	0.373
铝	0.890	0.895	0.899	0.903	0.907	0.907

注意：计算时， C_w 、 C_{Al} 取与水温 θ_2 、 θ_3 的平均值相近的比热值； C_{Cu} 取与水温 θ_1 、 θ_3 的平均值相近的比热值。

excel 数据处理的方法

1. 利用 trend 函数求出 t_b t_c t_e 时刻的质量

Formula bar: `=AVERAGE(B12,E12)`

	A	B	C	D	E	F
1	序号	t/s	M/g	序号	t/s	M/g
2	1	0.00	352.90	11	589.21	343.80
3	2	19.40	352.70	12	657.44	343.60
4	3	40.82	352.50	13	700.29	343.40
5	4	62.12	352.30	14	737.47	343.20
6	5	84.37	352.10	15	772.38	343.00
7	6	107.06	351.90	16	806.45	342.80
8	7	132.21	351.70	17	841.66	342.60
9	8	155.49	351.50	18	873.01	342.40
10	9	178.37	351.30	19	908.21	342.20
11	10	210.00	351.10	20	937.61	342.00
12	tb	185.00	348.66	tc	562.00	344.08
13	te	523.50	348.33	te	523.50	344.29

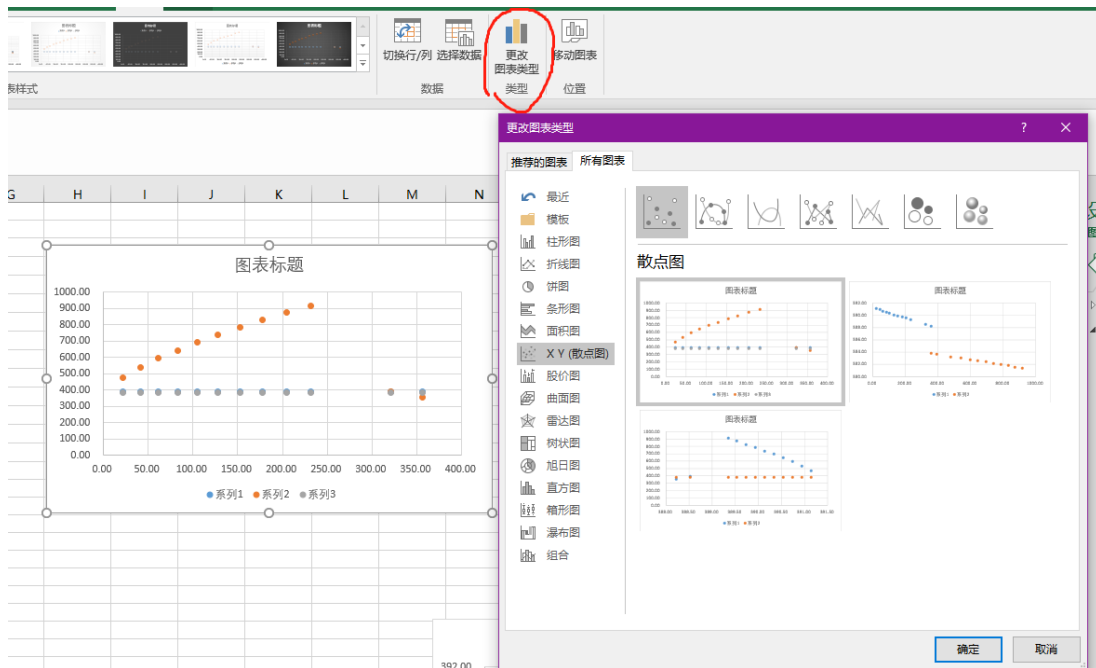
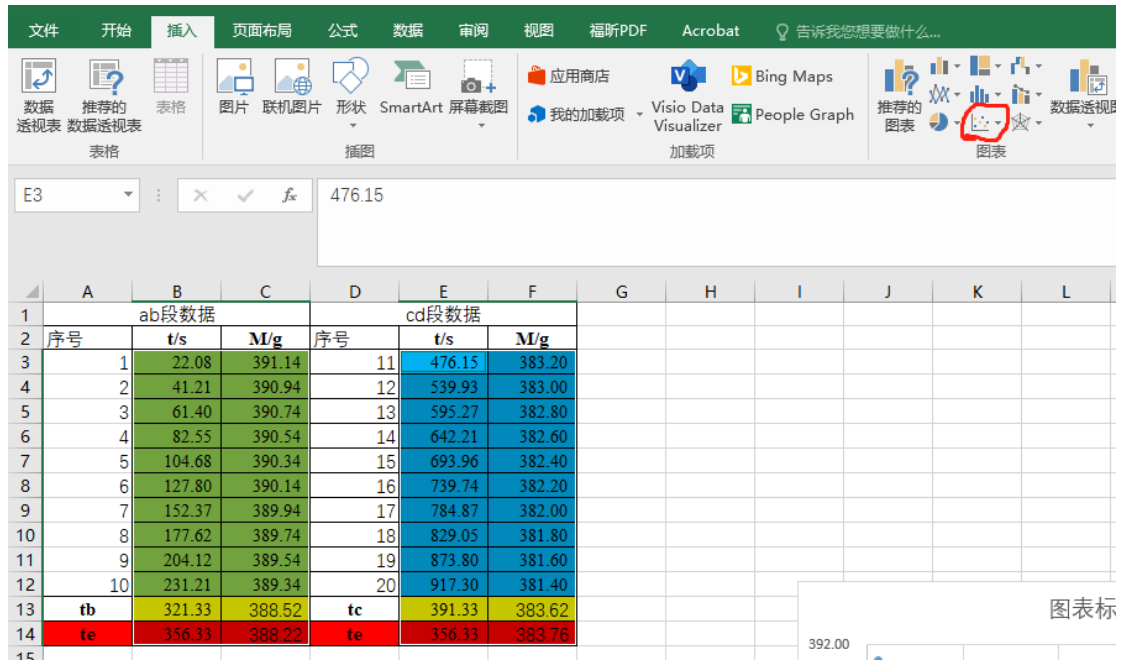
Formula bar: `=TREND(C3:C12,B3:B12,B13)`

	A	B	C	D	E	F	G
1	ab段数据			cd段数据			
2	序号	t/s	M/g	序号	t/s	M/g	
3	1	22.08	391.14	11	476.15	383.20	
4	2	41.21	390.94	12	539.93	383.00	
5	3	61.40	390.74	13	595.27	382.80	
6	4	82.55	390.54	14	642.21	382.60	
7	5	104.68	390.34	15	693.96	382.40	
8	6	127.80	390.14	16	739.74	382.20	
9	7	152.37	389.94	17	784.87	382.00	
10	8	177.62	389.74	18	829.05	381.80	
11	9	204.12	389.54	19	873.80	381.60	
12	10	231.21	389.34	20	917.30	381.40	
13	tb	321.33	388.52	tc	391.33	383.62	
14	te	356.33	388.22	te	356.33	383.76	

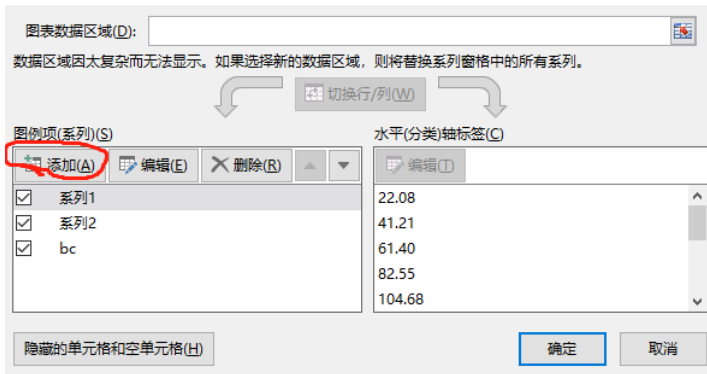
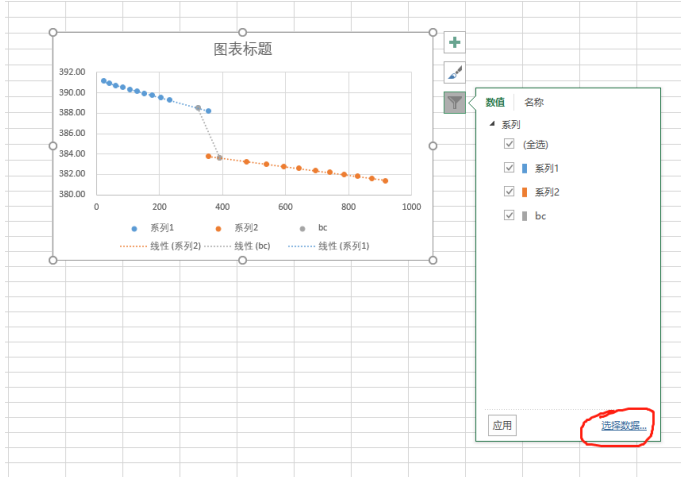
Formula bar: `=TREND(C3:C12,B3:B12,B14)`

	A	B	C	D	E	F	G
1	ab段数据			cd段数据			
2	序号	t/s	M/g	序号	t/s	M/g	
3	1	22.08	391.14	11	476.15	383.20	
4	2	41.21	390.94	12	539.93	383.00	
5	3	61.40	390.74	13	595.27	382.80	
6	4	82.55	390.54	14	642.21	382.60	
7	5	104.68	390.34	15	693.96	382.40	
8	6	127.80	390.14	16	739.74	382.20	
9	7	152.37	389.94	17	784.87	382.00	
10	8	177.62	389.74	18	829.05	381.80	
11	9	204.12	389.54	19	873.80	381.60	
12	10	231.21	389.34	20	917.30	381.40	
13	tb	321.33	388.52	tc	391.33	383.62	
14	te	356.33	388.22	te	356.33	383.76	

2. 选中数据，插入散点图



3. 选中图表，添加新的数据系列，更改系列名称。



4. 添加图表元素，更改图的名称，横纵坐标物理量单位，添加坐标值。

