

基于整体蒸发定律解开姆潘巴效应之谜

江正杰¹, 朱韵之², 冯跃春³

1. 山东工商学院, 人文与传播学院, 山东烟台

2. 江苏省扬州中学, 江苏扬州

3. 扬州市青少年科技教育协会, 江苏扬州

摘要: 基于确信姆潘巴效应只与整体蒸发定律有关, 而与对流现象无关。通过大量姆潘巴效应实验发现, 将姆潘巴效应的研究推进了五步: (1) 发现在保温容器中水的冷却过程中的上下同步降温现象, 由此避免了热水与冷水在冷却过程产生上下液面之间的温差的影响, 从而大大降低了姆潘巴效应影响因素的复杂性。(2) 提出了三级姆潘巴效应说: 热水比冷水先结冰(一级); 热水的降温赶上冷水的温度(二级); 热水冷却到冷水的初温时比冷水的降温速度快(三级)。任何一级发生了都表明存在姆潘巴效应。(3) 从而揭示了姆潘巴效应所反映的一般规律是: 在同样的冷却环境条件下从更高温冷却下来的液相比之从低温开始冷却的同温液相具有更快的冷却速度。因此姆潘巴效应的发生不依赖于一定要观测到结冰现象。这个规律的发现明显违背了牛顿冷却定律。(4) 根据这个规律, 在酒精的冷却过程中也发现了更加明显的姆潘巴效应。证明了姆潘巴效应不仅是水的冷却过程的一般规律, 还是液相冷却过程的一般规律。(5) 最后基于液相整体蒸发定律和液体的液气混合态模型对姆潘巴效应实验的微观物理机制进行详细的解释, 阐明液体本身是一个短程有序、长程无序的单元结构, 从单元核心到边缘的固相分子-液相分子-气相分子的结构分布。姆潘巴效应的谜底在于, 在液相的整体蒸发定律和同步降温的原理基础上发生的, 在冷却过程中, 无氢键自由液相水分子到气相水分子的相互过渡状态和自由气相水分子的数量或密度, 在修复到静态的与温度之间的对应关系的过程中发生的滞后效应。因此通过本文及其实验可以宣布: 液相整体蒸发定律是完全可以成立的, 并且宣布困扰物理学界60多年的姆潘巴效应之谜最终得以破解, 牛顿冷却定律需要得到修正。

关键词: 整体蒸发定律; 同步降温实验; 姆潘巴效应; 酒精姆潘巴效应; 液相单元结构

Solving the Mystery of the Mpemba Effect Based on the Law of Overall Evaporation

Zhengjie Jiang¹, Yunzhi Zhu², Yuechun Feng³

1. School of Humanities and Communication, Shandong Technology and Business University, Yantai, Shandong

2. Yangzhou High School of Jiangsu Province, Yangzhou, Jiangsu

3. Jiangsu Association of Science and Technology Education for Teenagers, Yangzhou, Jiangsu

* 作者简介: 江正杰(1968—)男, 汉族, 福建闽清人, 哲学硕士, 副教授。研究方向: 自然哲学, 基础物理, 引力学, 中国文化经典研究、经典教育学。

朱韵之(2008—), 江苏省扬州中学高一学生, 中国江苏扬州。江苏省中学生英才计划学员。

冯跃春(1960—), 扬州市新华中学, 理科学士, 中国江苏扬州。研究方向: 青少年科技教育。扬州市青少年科技教育协会。

Abstract: Based on the belief that the Mpamba effect is only related to the law of global evaporation, and has nothing to do with convection. Through a large number of Mpamba effect experiments, it is found that the study of Mpamba effect has been promoted in five steps: (1) it is found that the upper and lower simultaneous cooling phenomenon occurs in the cooling process of water in the insulation container, which avoids the influence of the temperature difference between the upper and lower liquid levels of hot water and cold water in the cooling process, thus greatly reducing the complexity of the influencing factors of Mpamba effect. (2) The third-order Mpamba effect is proposed: hot water freezes before cold water (first-order); The cooling of hot water catches up with that of cold water (Level 2); The cooling rate of hot water to the initial temperature of cold water is faster than that of cold water (Level 3). The occurrence of any level indicates the existence of the Mpamba effect. (3) The general rule reflected by the Mpamba effect is that the cooling rate of the liquid cooled from higher temperature is faster than that of the liquid cooled from lower temperature under the same cooling environment. Therefore, the occurrence of the Mpamba effect does not depend on the observation of icing. The discovery of this law obviously violates Newton's cooling law. (4) According to this rule, more obvious Mpamba effect was also found in the cooling process of alcohol. It is proved that the Mpamba effect is not only the general rule of water-cooling process, but also the general rule of liquid phase cooling process. (5) Finally, the microphysical mechanism of the Mpamba effect experiment is explained in detail based on the law of liquid phase overall evaporation and the liquid gas mixed state model of liquid. It is clarified that the liquid itself is a short-range ordered and long-range disordered unit structure, and the structural distribution of solid molecules, liquid molecules and gas molecules from the core to the edge of the unit. The mystery of the Mpamba effect lies in the lag effect that occurs on the basis of the overall evaporation law of the liquid phase and the principle of synchronous cooling. During the cooling process, the mutual transition state of free liquid phase water molecules without hydrogen bonds to gas phase water molecules and the number or density of free gas phase water molecules occur in the process of repairing the corresponding relationship between static and temperature. Therefore, through this paper and its experiments, it can be declared that the law of liquid phase evaporation is completely tenable, and that the mystery of Mpamba effect, which has puzzled the physics community for more than 60 years, has been finally solved, and Newton's cooling law needs to be modified.

Keywords: Overall evaporation law; Simultaneous cooling experiment; Mpemba effect; Alcohol Mpemba effect; Liquid phase unit structure

1 本文姆潘巴效应研究的前提——液相水整体蒸发定律

1.1 液相水整体蒸发定律简说

依据现有的物理常识观点，蒸发从微观上看就是液体分子脱离液面离去的过程。这个理论从来只是想当然而已，没有经过任何的实验验证。江正杰最早提出不同于上述常识的对于蒸发的理解——液相（水）整体蒸发定律[1]。整体蒸发定律将水的蒸发不仅理解为是液面的（高动能气相）水分子逸出水面的过程，而主要是液相整体发生相变蒸发产生的内部水蒸气上升到液面并逸出的过程。液相整体蒸发定律建立在气液相混态（与气液相溶态相区分）的基础上，认为如同空气溶于水还是气相的空气一样，水蒸气溶于水，在大多数水蒸气分子变成液相水分子的前提下，还有部分水蒸气在水中仍然以气相存在，因此蒸发首先是液相内部的液相水分子发生相变变为内部的气相水蒸气分子的过程，然后才发生水蒸气上升和逸出液面的过程。江正杰并且证明了，液相水中的水蒸气含量的下限为或恰好等于同体积和同温度的空气处于饱和蒸气压时的含湿量。从这个假定出发可以解释空气溶解度随温度变化的规律，误差精度达到5.5%。

江正杰认为液相（水）整体蒸发定律可以通过蒸发速率或蒸发量与水量的相关性实验得到验证[2]，并且已经做过多个此类实验[3]。实验发现在蒸发液面相同的情况下，水量相差1到3倍，水量大的容器蒸发量高出10-30%，甚至也有多出50%的例子，具体数值受到空气湿度变化的影响比较大。

后来朱韵之、冯跃春发现江正杰的以上实验存在问题，没有看到液面到容器口的距离不同会影响蒸发速率或蒸发量。朱韵之、冯跃春在排除了这个因素之后继续通过实验深入研究整体蒸发问题，重复做了许多液体深度与蒸发速度相关性的实验，得到更为精确的数据。并把水的蒸发问题扩展到汽油和酒精的蒸发，进一步验证了江正杰提出的整体蒸发定律是正确的[4]。

笔者并且提出的水的基本结构是液气混合态[2]，并且用液气混合态这个概念来解释液相水整体蒸发定律。液相整体蒸发定律将液相内部的水蒸气看作

是一个整体，由其组成液相内部的气相空间，蒸发就好像是用抽气机将水蒸气抽出，由此导致水的蒸发速率与水量的相关性。江正杰假定对于液相水分子的动能而言，麦克斯韦气体分子速率分布曲线对于液相水分子而言也是成立的，液相内部存在的那些高动能水分子已经成为气相水分子。那些在动能上已经气化的水分子，由于其密度较液相水分子较小，故倾向于朝向液面的运动，就会溢出液面形成蒸发。

1.2 液相水整体蒸发定律的三大验证实验简介

由此笔者与朱韵之、冯跃春又设计了三类大的实验项目来验证液相整体蒸发定律：

（一）对于液体深度与蒸发速度相关性的重复与扩展实验研究。其中又包含三个实验：

（1）同液面不同高度的容器蒸发速度与水量的关系实验。实验结果显示，在同蒸发液面的水体高度比例为3.6：2.5：1.7：1的情况下，蒸发量之比为1.31：1.17：1.05：1。（2）异形容器水量与蒸发量关系实验。这个实验证明了在相同蒸发液面和水量的情况下，如果有更多水量更接近于液面，蒸发量也会越大。（3）2米长管与4.75厘米短管水量与蒸发量关系的对比实验。它们的截面相同，外径为108mm，内径为105mm。这个实验的结果是蒸发量差别超过了51%。以上实验主要由冯跃春和朱韵之实际操作完成[4]。

（二）蒸发引起的上下液面同步降温效应实验。其中又包含五个实验：（1）室温环境下的开口蒸发引起的上下同步降温效应的实验。每5分钟降温0.5℃以上[4]。（2）冰柜冷却环境下的蒸发引起上下同步降温的实验。（3）酒精在冰柜冷却环境中的蒸发引起同步降温实验。（4）圆塑料杯和玻璃杯内上热下冷的水在冰柜内开口蒸发引起上下同步降温的实验。这个实验数据清楚而无可置疑地显示，在侧面和底部加隔热膜保温的情况下，热量可以从圆塑料杯和玻璃杯底部通过内部蒸发自发上传到较高温的顶部。这个实验与水蒸气气泡现象一起给出了热力学第二定律的反例。以上实验主要为江正杰设计和实际操作完成。

(三) 从均温开始的蒸发引起微弱上热下冷效应的实验。其中又包含三个实验：(1) 保温茶水桶常温水的蒸发引起上热下冷效应实验。这个实验分上开口与上封口两种情况，分别测到 $0.3-0.4^{\circ}\text{C}$ 上热下冷效应。(2) 2米管（其侧面和底面用绝热漆和隔热膜经过保温和隔热处理）常温水的蒸发引起上热下冷效应实验。这个实验分上开口与上封口两种情况，分别测到 $0.5-4.8^{\circ}\text{C}$ 上热下冷效应。(3) 酒精在冰柜内的蒸发引起上热下冷效应的实验。随着时间进程分别测到 $0.1-0.3^{\circ}\text{C}$ 的上热下冷效应。以上这些实验的结论都符合基于液相整体蒸发定律的预期，因此确证了整体蒸发定律是成立的。以上实验数据正处于发表过程中。

笔者是通过得到新的液相水分子的单元结构模型对整体蒸发定律进行解释。这个新的液相水分子的单元结构模型是这样的：液体本身是一个短程有序、长程无序的单元结构，从单元核心到边缘的固相分子-液相分子-气相分子的结构分布。从液相单元结构的核心应该是四面体的强氢键水分子结构，沿着水的弱氢键结构——水分子链和水线等，是从强氢键结构过渡到弱氢键结构，再过渡到范德华力束缚的无氢键结构的过程，接着就是从自由液相水分子过渡到气相水分子的外围结构。这个链条过程也可以简称为是“强氢键-弱氢键-无氢键范德华力-自由态”的链接过渡结构，或者是“固相-液相-气相”的链接过渡结构。

以此解释液相整体蒸发定律：阐明水的整体蒸发就是自由液相水分子过渡到气相水分子的转化过程。液相水中存在越多处于范德华力束缚态的相对自由液相水分子，其过渡到自由气相水分子的过程的速率就会越大，进而整体蒸发速率也越大。蒸发的过程也是能量从固相和液相水分子转化到气相水分子的过程。

2 水和酒精的三级姆潘巴效应的实验研究

2.1 姆潘巴效应问题概述

姆潘巴效应也称为“姆佩巴效应”，它最早是坦桑尼亚中学生埃拉斯托·姆潘巴（Erasto

Mpemba）于1963年在其所在的中学学习制作冰淇淋的过程中发现并用他的名字命名的现象：热与冷的冰淇淋同时放进冰箱，热的冰淇淋比冷的冰淇淋更快结冰的现象。后来人们重复实验的结果发现，在一定的条件下，对于普通的水也存在热水比冷水更快结冰的现象。

关于姆潘巴效应的研究，尽管至今为止还没有给出一定会发生姆潘巴效应的规律性的方法，但是，关于姆潘巴效应存在的真实性问题，还是得到了世界物理学界比较普遍的公认，只是关于它的解释方式至今没有任何一种得到了普遍的公认，因此关于造成姆潘巴效应的原因问题至今还是一个谜。

对于姆潘巴效应，60多年来物理学家曾提出几种可能的解释方式。笔者通过自己的研究总结出了对于姆潘巴效应共有14种解释方式：奥斯玻恩博士的液体温度梯度决定说、过冷引起的冰点改变说、“硬水”导致冰点改变说、生物原因说、溶解气体改变冰点说、氢键如弹簧说、冰和水的分子结构不同说、热水上的时间比冷水上的时间流逝得更快说、液面冰壳阻止了热传递，减慢了降温速度说、对流引起的“热顶”说、随机性说、周围环境事物影响说、蒸发说、实验本身谬误说等。此外还有很多种解释，但任何一种解释最终都很难让人完全信服，因为这种效应并不可靠，姆潘巴效应实验结果表明，成功率并不高，冷水冻结速度往往还是超过热水。

2.2 基于存在上下液面温差所理解的姆潘巴效应

最先肯定“姆潘巴效应”存在的奥斯玻恩博士，与姆潘巴本人合作形成的论文以《姆潘巴的故事》为题发表于英国《物理教育》(Physics Education)1969年的杂志上。这篇论文的前一部分[5]主要是讲姆潘巴本人回顾了自己发现姆潘巴效应的过程。后一部分[6]内容主要写了奥斯玻恩博士正式研究姆潘巴效应的主要过程和结果，属于正式的学术论文的范畴。这一论文中有三张图，几乎集中了奥斯玻恩博士研究姆潘巴效应的全部成果。奥斯玻恩博士发现：把热水放入电冰箱冷却时，水的上

表面(S)与底部(B)之间存在着显著的温度差, 且是上热下冷。论文并且画出了初始温度分别为70℃(实线)和47℃(虚线)的水的S-B温度差随时间变化的观测记录(图2)。从图中可看出, 初始时, 上表面与底部不存在温度差, 但一经急剧冷却, 温度差就立即出现, 其中初温为70℃的水内产生的最高温度差接近14℃, 而初温为47℃的水内产生的最高温度差只有10℃左右。到了后期的缓慢冷却阶段, 上下的温度差不断减小, 一直到几乎观察不到的程度。这也是笔者所观察到的冷、热水在急剧冷却时的重大差别。

从奥斯玻恩博士的《姆潘巴的故事》至今, 所有姆潘巴效应的实验都是类似的: 由于容器壁都是不隔热和不保温的, 因此实验的时候在冰箱的冷却环境下都会产生上下温差, 其结果就是热水与冷水温度变化进行对比的时候, 就会产生超过4个以上的温度值, 造成对比的复杂性, 因此是否产生姆潘巴效应都要等到实际发生结冰的时刻。又因为容器不隔热, 所以加快了冷却的速度, 许多与产生姆潘巴效应无关的散热因素影响过大, 结果就是不能突出真正引起姆潘巴效应的关键因素——蒸发。

因为这个原因, 以至于至今还有研究者怀疑姆潘巴效应是否真实存在。如, 2016年, 剑桥大学应用数学和理论物理系Paul F. Linden教授和帝国理工学院Henry C. Burridge教授在Scientific Reports上发表论文[7], 质疑并明确指出, 根据他们的实验结果姆潘巴效应是不存在的。

中国的代表性人物如上海向明中学的一位教师 and 三名中学生在2005年初完成了100多次实验, 通过实验他们认为姆潘巴现象只是一种巧合, 甚至说姆潘巴现象不存在[8]。

绵竹城南中学的物理老师张明元为了探索姆潘巴效应, 历时一年, 做了800多个实验, 绝大多数都没有成功出现姆潘巴效应。偶有成功的一例后, 被自己证明是冰箱的温度不均造成的。经过分析、比较, 最终得到了自己的结论, 否定了姆潘巴效应的真实性, 认为是“实验证明, 被列为‘物理之谜’的‘姆潘巴效应’并非是一种违反常规的、奇特的现象。实验揭示, 此现象的产生是由于冰箱内温度

不均匀所致, 是一种很正常的热学现象。简言之, 姆潘巴效应不存在”[9]。

其中的原因现在笔者已经知道了, 在于这些研究者找不到一个办法能够让冷却过程实现无温度梯度的冷却, 因此只能用“冷却到相同的平均温度”这个概念。而这样的“平均温度”在涉及热水和冷水的上下液面之间存在温度梯度的情况下实际上很难准确地测定, 事实上也没有研究者试图去测定这个“平均温度”, 故实验很难取得进展。

2.3 走出姆潘巴效应实验的最大误区

笔者在获得上述文献(《姆潘巴的故事》)之前, 就确信姆潘巴效应应该就是整体蒸发定律引起的效应, 并通过自己对于姆潘巴效应实验的探索, 意识到姆潘巴效应很可能与这种上下液面的温差有关, 并且是在冷却过程中, 从上下均温开始产生的热水的上下温差要大于冷水的上下温差。笔者最初以为姆潘巴效应与这样的上下温差有必然的关系, 甚至一度得出结论: 姆潘巴效应发生的整个历程一定是这样的: 最先是热水的底面温度低于冷水的液面温度, 然后热水在液面更高温度所确定的更大整体蒸发速度的带动下, 导致热水底面温度进一步低于冷水的底面温度, 直到最后在热水更低的底面温度引起的热传导下, 热水液面温度也可能低于冷水的液面温度。这样姆潘巴效应发生的概率就大多了。

以上是笔者最初设想的姆潘巴效应发生的四阶段的必然逻辑进程, 即任何一个姆潘巴效应的逻辑进程, 必然要完整经历这四个阶段, 缺一不可。笔者由此得出结论, 姆潘巴效应发生的决定性原因一定是整体蒸发与上下温差的叠加的结果。而理解整体蒸发起作用的关键点在于, 更高的液面温度决定的更快蒸发速度引起的上下液面的同步降温效应。笔者甚至一度认为, 如果在冷却过程中不会产生温差, 就不可能发生姆潘巴效应, 这就是姆潘巴效应实验不稳定和缺乏可预期性的原因。

但是, 后来笔者在姆潘巴效应与温度梯度存在必然联系这个思路的基础上, 不断实验探索的结果发现, 实验事实并非都是如此。许多研究者都发

现,热水在冷却过程中产生的温差要大于冷水,如张亚刚团队最近对于姆潘巴效应实验的最新研究就是如此[10]。笔者在实验中虽然也发现了这样的案例,但是笔者也发现这样的案例具有很大的差别,即热水在冷却过程中产生的温差要大于冷水的幅度差别很大,有大有小,如果差别很小,就很难观测到姆潘巴效应。甚至于笔者也观测到了相反的案例,即热水在冷却过程中产生的上下温差要小于冷水的温差。以至于笔者最后不能肯定热水的上下温差一定比冷水更高。最后的结论是姆潘巴效应与上下温差不一定存在必然的联系。

于是笔者想到需要首先验证一下姆潘巴效应是否与上下温差存在必然的联系。笔者尝试用保温桶(杯)作为容器进行冷却实验,看看能不能发生姆潘巴效应。在这个实验过程中笔者终于发现保温桶(杯)中的水在冷却条件下的同步降温效应。在冷却过程中液面温差传热当然也会引起上冷下热的温差,但是这个温差只是在液面附近10mm左右才存在,对于更深处的液相没有造成温差,或者说这样的温差被整体蒸发引起的蒸气上传效应所抵消。这样我们就得到了整体蒸发引起的同步降温实验。笔者所累积的这样的同步降温实验数据不计其数,本文不发表,在本文后面的所有姆潘巴效应实验的数据中都包含了整体蒸发引起的同步降温效应实验。

这个同步降温效应实验意味着从上下均温开始的冷却过程可以基本上始终保持均温的状态。这个就是整体蒸发定律的最明显表现。于是笔者通过对比热水与冷水在冰柜中的冷却数据得出结论:姆潘巴效应所反映的一般规律就是在同一温度下热水的降温速度比冷水要快,如果不是如此,热水的冷却就永远不可能追上冷水的温度。这就是说,在上下均温的情况下仍然能够发生姆潘巴效应。至此,笔者也就走出了姆潘巴效应实验的最大误区:将姆潘巴效应与上下温度梯度的存在必然地联系起来。

2.4 三级姆潘巴效应的区分

对于姆潘巴效应的理解和研究中存在的一个普遍问题是,绝大多数研究中对于姆潘巴效应的理解还局限于热水与冷水哪一个先结冰的问题,而没

有看到姆潘巴效应所反映的本质或一般的问题,其实是有关在同样的条件下冷却速度的比较问题,即是热水的冷却速度比冷水的冷却速度快的问题。但是,热水的初始温度比冷水高,当然在同一条件下的热水从初温开始的冷却速度比冷水高,这样的对比具有不可比性。在这样的情况下我们应该如何进行对比呢?显然应该在同温下进行对比。也就是说,至少应该在热水从初温冷却到冷水的初温的时候进行对比。

热水要能够先结冰,最起码需要在冷却过程中在结冰之前降温到等于或低于冷水的程度。而要实现这个目标的必要条件就是,热水从初温开始的冷却速度比冷水快,但是这一点无法通过直接的对比确定。于是我们只能等到热水冷却到冷水的初温的时候,再与冷水在初温时候的冷却速度进行对比。如果对比的结果显示:此时热水的冷却速度还是比冷水在初温点时的冷却速度要快,就说明有发生姆潘巴效应的可能。满足这个要求是热水的冷却速度能够赶上冷水温度的前提和必要条件,也是热水能够先结冰的必要条件,但是不是充分条件,因为此外还要求热水比冷水的冷却速度快得足够多,和在结冰之前持续时间足够长。

为此我们可以将姆潘巴效应进行分级:可以达到通常讲的热水先结冰的程度属于一级姆潘巴效应。而二级姆潘巴效应指的就是一级姆潘巴效应发生的这个必要条件:热水的降温赶上冷水的温度的时刻。可以说二级姆潘巴效应才是一级姆潘巴效应的本质。而比二级姆潘巴效应更加本质的是三级姆潘巴效应:当热水降温到冷水的初温的时候,其冷却速度比冷水处于初温时的冷却速度要快。

只有在三级姆潘巴效应的基础上才能进而发生二级姆潘巴效应。只有找出三级姆潘巴效应发生的原因,才能体现出姆潘巴效应实验研究的真正重点,它就是判断姆潘巴效应是否能够发生的真正原因或谜底。

2.5 酒精蒸发引起的姆潘巴效应实验设想

笔者根据以上新的思路所做的水的姆潘巴效应实验取得了成功,但是也发现一个问题,就是水的

姆潘巴效应并不是十分明显。已有实验显示，在同样的冰柜冷却条件下热水的冷却速度大约比同温冷水的冷却速度最多快5-6%。这大约是与水的蒸发速度快慢有关。

笔者由此想到，如果用蒸发速度更快的液相来做这个实验，姆潘巴效应是不是应该更加明显呢？由此笔者想到了用酒精进行实验，酒精的蒸发速度要比水的蒸发大多倍（大约3到5倍，甚至更多）。乙醇的沸点是78.3℃，熔点是-114.1℃。由此可以推论，如果存在由整体蒸发引起的三级姆潘巴效应，那酒精的三级姆潘巴效应要比水强得多。于是笔者就得到了下面的酒精的姆潘巴效应实验，实验结果完全符合预期，在同样的冰柜冷却条件下，热酒精的冷却速度大约比同温冷酒精的冷却速度最多快10-20%。

2.6 水和酒精的姆潘巴效应实验的一般方法与设计

在进行水和酒精的姆潘巴效应实验的时候，笔者意识到，除了整体蒸发定律外，任何其他因素都不可能导致一级、二级和三级姆潘巴效应，因此实验要尽可能排除除了整体蒸发之外的因素的影响。这些因素包括底面温差传热、周围温差传热、液面温差传热。由于液面温差传热与蒸发散热同时进行，所以不可能被排除，除此之外都可以通过用保温杯或保温桶（罐）作为容器来加以排除。故笔者尽可能选购保温质量比较好的保温桶和保温杯作为容器。

本文使用到的保温容器主要就是两种规格：一种是北欧蓝牌的同规格的保温罐A、B，为玻璃真空内胆，直径D120mm,高度H150mm,容量1400mL。另一种是伊水牌的同规格的保温杯A、B，为玻璃真空内胆，直径D60mm,高度H160mm,容量480mL。

实验用酒精：澳迈（AOM）牌工业酒精，浓度98%。

虽然原则上可以从热水的温度冷却到冷水的初温开始测温进行对比，但是考虑到冷水的初温是容器放进冰柜的温度，这时的冰柜因为开门关门的原因温度还是处于不稳定的状态，估计经过5分钟以

上，冷却条件进入稳定的常态，故开始计时和读取测温值，将热水和冷水的两个15分钟的周期的温度值进行对比。

实验之前仪器经过检测，将两台人民电器的测温仪一同放入同一杯热水。测量数据显示读数基本相同，误差在±0.2℃，下部读数较为不稳，误差稍微大些，需要耐心等待稳定。

同时还检测了A、B两个保温罐（杯）的保温效果的差别。方法是用同温的水进行冷却实验，没有发现误差范围外的差异。

测温仪器主要选择的是两台人民电器的双通道测温仪，在室外测同一杯水的检测实验中，可以做到两台读数完全一样，动态误差在±0.2℃。

笔者将探头固定在一根木质的圆形条上。避免木条上浮，在顶部套上一个金属帽。之所以选择木条，是因为木条的导热系数极小。探头距离底部15mm。探头距离液面20-30mm，目的是为了躲开液面的温差散热造成的局部不稳定的温度梯度。

实验用的冰柜主要是两台：一是奥克斯牌的上开门展示柜，100L，最低冷却温度是-18℃。二是美菱牌的上开门冰柜，66L，最低冷却温度是-35℃。实验充分考虑到了冰柜内部可能存在的温度不均造成的影响，因此尽量让两个保温容器靠近，并经过交换测试，显示确定没有系统误差。

以下是我们选择其中一次典型的也是数据最大的二次（水与酒精各一次）数据，限于篇幅，其余只是列出实验数据的最终结果。对于结果数据差异较大的原因，可能受到多种因素的影响，有待于进一步分析总结。我们的实验数据也有显示姆潘巴效应不明显的结果，但是没有相反效应的数据。

2.8 实验一：高低温水在冰柜中的蒸发引起的姆潘巴效应实验结果

实验用容器：玻璃真空内胆北欧蓝牌保温罐D120mm,H150mm,1400mL。

实验开始时间2024年10月1日周二18:30，热水初温89.2℃，冷水初温80.5℃。热水液面开始结冰时间4:30，冷水液面开始结冰时间5:30。

热水从19:08到21:08，共历时2小时0分，从



图1. 姆潘巴效应实验设备



图2. 姆潘巴效应实验用澳迈 (AOM) 酒精

63.7℃降温到35.9℃，共降温27.8℃。

冷水从19:00到21:08,共历时2小时8分，从63.7℃降温到35.9℃，共降温27.8℃。

热水的降温速度 $27.8/2=13.9^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 。冷水的降温速度 $27.8/2.133=13.033^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 。

热水比冷水的降温速度快 $0.867^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ，化成百分数，热水比冷水的降温速度快 $=0.867/7.639=6.65\%$

2.8.1 实验二：高低温水在冰柜中的蒸发引起的姆潘巴效应实验结果

容器：玻璃真空内胆北欧蓝牌保温罐 A、B:D120mm,H150mm,1400mL。

实验开始时间2024年10月3日周四8:35，热水初温91.1，冷水初温72.2。热水液面开始结冰时间17:30，冷水液面开始结冰时间17:45。

热水从9:04到16:30，共历时7小时26分，从66.4℃降温到7.2℃，共降温59.2℃。

冷水从8:45到16:30,共历时7小时45分，从66.4℃降温到7.2℃，共降温59.2℃。

热水的降温速度 $59.2/7.433=7.964^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 。冷水的降温速度 $59.2/7.75=7.639^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 。

热水比冷水的降温速度快 $0.325^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ，化成百分数，热水比冷水的降温速度快 $=0.325/7.639=4.25\%$ 。

如下图3是高低温水在冰柜冷冻室内的同步降温效应实验:

容器：玻璃真空内胆北欧蓝牌保温罐 A、B:D120mm,H150mm,1400mL。

实验开始时间2024年10月3日周四8:35，热水初温91.1，冷水初温72.2。热水液面开始结冰时间17:30，冷水液面开始结冰时间17:45。

热水从9:04到16:30，共历时7小时26分，从66.4℃降温到7.2℃，共降温59.2℃。

冷水从8:45到16:30,共历时7小时45分，从66.4℃降温到7.2℃，共降温59.2℃。

热水的降温速度 $59.2/7.433=7.964^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 。冷水的降温速度 $59.2/7.75=7.639^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 。

热水比冷水的降温速度快 $0.325^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ ，化成百分数，热水比冷水的降温速度快 $=0.325/7.639=4.25\%$ 。

于是笔者想到需要首先验证一下姆潘巴效应是否与上下温差存在必然的联系。笔者尝试用保温桶（杯）作为容器进行冷却实验，看看能不能发生姆潘巴效应。在这个实验过程中笔者终于发现保温桶（杯）中的水在冷却条件下的同步降温效应。在冷却过程中液面温差传热当然也会引起上冷下热的温差，但是这个温差只是在液面附近10mm左右才存在，对于更深处的液相没有造成温差，或者说这样的温差被整体蒸发引起的蒸气上传效应所抵消。这

表1. 热水与冷水在奥克斯冰柜内的冷却过程中蒸发引起姆潘巴效应与同步降温效应的对比实验

热水（保温罐A:D120mm,H150mm,1400mL玻璃真空内胆）				冷水（保温罐B: D120mm,H150mm,1400mL玻璃真空内胆）		
测温时间 (2024.10.1.周二)	上部温度（℃）	底部温度（℃）	上下液面温差 （℃）	上部温度（℃）	底部温度（℃）	上下液面温差（℃）
18:30	89.2	89.2	0.0	80.5	80.5	0.0
18:45	76.7	76.7	0.0	71.6	71.6	0.0
19:00	67.0	67.0	0.0	63.7	63.7	0.0
19:08	63.7	63.7	0.0	60.8	60.8	0.0
19:15	60.8	60.8	0.0	58.3	58.3	0.0
19:23	57.6	57.6	0.0	55.5	55.5	0.0
19:30	55.6	55.6	0.0	53.8	53.8	0.0
19:38	53.3	53.3	0.0	51.7	51.7	0.0
19:45	51.5	51.5	0.0	50.1	50.1	0.0
19:53	49.5	49.5	0.0	48.5	48.5	0.0
20:00	48.0	48.8	0.0	47.0	47.0	0.0
20:08	46.3	46.3	0.0	45.5	45.5	0.0
20:15	44.9	44.9	0.0	44.2	44.2	0.0
20:23	43.5	43.5	0.0	42.8	42.8	0.0
20:30	42.0	42.0	0.0	41.5	41.5	0.0
20:38	40.7	40.7	0.0	40.3	40.3	0.0
20:45	39.5	39.5	0.0	39.3	39.3	0.0
20:53	38.2	38.2	0.0	38.0	38.0	0.0
21:00	37.1	37.1	0.0	37.0	37.0	0.0
21:08	35.9	35.9	0.0	35.9	35.9	0.0
21:15	34.9	34.9	0.0	34.9	34.9	0.0
21:23	33.7	33.7	0.0	33.8	33.8	0.0
21:30	32.8	32.8	0.0	33.0	33.0	0.0
21:38	32.0	32.0	0.0	32.2	32.2	0.0
21:45	31.2	31.2	0.0	31.5	31.5	0.0
21:53	30.2	30.2	0.0	30.5	30.5	0.0
22:00	29.4	29.4	0.0	29.8	29.8	0.0
22:08	28.4	28.4	0.0	28.8	28.8	0.0
22:15	27.6	27.6	0.0	28.0	28.0	0.0
22:23	26.8	26.8	0.0	27.2	27.2	0.0
22:30	26.0	26.0	0.0	26.5	26.5	0.0
22:38	25.3	25.3	0.0	25.8	25.8	0.0
22:45	24.7	24.7	0.0	25.2	25.2	0.0
22:53	24.0	24.0	0.0	24.5	24.5	0.0
23:00	23.1	23.1	0.0	23.7	23.7	0.0
23:08	22.5	22.5	0.0	23.1	23.1	0.0
23:15	21.8	21.8	0.0	22.4	22.4	0.0
23:23	21.3	21.3	0.0	21.9	21.9	0.0
23:30	20.6	20.6	0.0	21.2	21.2	0.0
23:38	20.0	20.0	0.0	20.7	20.7	0.0
23:45	19.4	19.4	0.0	20.1	20.1	0.0
23:53	18.8	18.8	0.0	19.6	19.6	0.0
0:00	18.2	18.2	0.0	18.9	18.9	0.0
0:08	17.9	17.9	0.0	18.6	18.6	0.0
0:15	17.3	17.3	0.0	18.0	18.0	0.0
0:23	16.7	16.7	0.0	17.5	17.5	0.0
0:30	16.1	16.1	0.0	16.9	16.9	0.0
0:38	15.6	15.6	0.0	16.4	16.4	0.0
0:45	15.1	15.1	0.0	16.0	16.0	0.0
0:53	14.6	14.6	0.0	15.5	15.5	0.0
1:00	14.2	14.2	0.0	15.1	15.1	
1:08	13.7	13.7		14.6	14.6	
1:15	13.3	13.3		14.2	14.2	
1:23	12.8	12.8		13.7	13.7	
1:30	12.2	12.2		13.2	13.2	
1:38	11.7	11.7		12.6	12.6	
1:45	11.3	11.3		12.3	12.3	
1:53	10.9	10.9		11.9	11.9	
2:00	10.5	10.5		11.5	11.5	
2:08	10.1	10.1		11.1	11.1	
2:15	9.8	9.8		10.8	10.8	
2:23	9.4	9.4		10.4	10.4	

2:30	9.0	9.0	10.0	10.0
2:38	8.8	8.8	9.8	9.8
2:45	8.3	8.3	9.3	9.3
2:53	7.9	7.9	8.9	8.9
3:00	7.6	7.6	8.6	8.6
3:08	7.3	7.3	8.4	8.4
3:15	7.0	7.0	8.1	8.1
3:23	6.6	6.6	7.7	7.7
3:30	6.4	6.4	7.5	7.5
3:38	6.0	6.0	7.1	7.1
3:45	5.8	5.8	6.9	6.9
3:53	5.5	5.5	6.6	6.6
4:00	5.3	5.3	6.4	6.4
4:08	4.9	4.9	6.0	6.0
4:15	4.7	4.7	5.8	5.8
4:23	4.5	4.5	5.5	5.5
4:30	4.3 (冰膜)	4.3	5.3	5.3
4:38	3.6	4.3	5.1	5.2
4:45	3.2	4.1	4.2	5.0
5:30	1.2	3.6	2.0 (冰膜)	4.4
7:30	0.1	3.0	0.3	3.5
8:30	0.0	2.5	0.1	3.0

表2. 浓度为98%的热酒精与冷酒精在奥克斯冰柜内的冷却速度的对比实验

热酒精（伊水保温杯D60mm,H160mm,480mL玻璃真空内胆）				冷酒精（伊水保温杯D60mm,H160mm,480mL玻璃真空内胆）			
测温时间 (2024.10.9.周三)	上部温度 (℃)	底部温度 (℃)	上下液面温差 (℃)	热冷酒精温差 (℃)	上液面温度 (℃)	底部温度 (℃)	上下液面温差 (℃)
21:00	57.0	57.0	0.0	18.0	39.0	39.0	0.0
21:05	51.3	51.3	00	14.5	36.8	36.8	0.0
21:20	41.5	41.5	0.0	8.5	33.0	32.9	0.1
21:28	36.8	36.8	0.0	6.0	30.8	30.8	0.0
21:35	33.7	33.7	0.0	4.2	29.5	29.5	0.0
21:43	30.6	30.6	0.0	2.5	28.1	28.3	-0.2
21:50	27.8	27.8	0.0	1.3	26.7	26.9	-0.2
21:58	24.9	24.9	0.0	0.2	24.7	25.0	-0.3
22:05	22.7	22.8	-0.1	-0.8	23.5	23.7	-0.2
22:13	20.4	20.5	-0.1	-1.4	21.8	22.0	-0.2
22:20	18.6	18.9	-0.3	-1.8	20.7	20.8	-0.1
22:28	16.6	16.6	0.0	-2.7	19.3	19.4	-0.1
22:35	15.0	15.0	0.0	-3.2	18.2	18.3	-0.1
22:43	13.1	13.3	-0.2	-3.6	16.9	17.0	-0.1
22:50	11.8	11.9	-0.1	-4.0	15.9	16.0	-0.1
22:58	10.1	10.1	0.0	-4.5	14.6	14.8	-0.2
23:05	8.8	9.0	-0.2	-4.7	13.7	13.7	0.0
23:13	7.6	7.7	0.0	-5.0	12.6	12.7	0.0
23:20	6.6	6.7	0.0	-5.2	11.8	12.0	0.0
23:28	5.2	5.3	-0.1	-5.6	10.8	10.9	-0.1
23:35	4.0	4.5	-0.5	-5.8	9.8	10.0	-0.2
23:43	3.2	3.3	-0.1	-5.8	9.0	9.0	0.0
23:50	2.6	2.6	0.0	-5.8	8.4	8.4	0.0
23:58	1.7	1.7	0.0	-5.8	7.5	7.5	0.0
0:05	1.0	1.0	0.0	-6.0	7.0	7.1	-0.1
0:13	0.2	0.3	-0.1	-6.0	6.2	6.3	-0.1
0:20	-0.3	0.0	-0.3	-6.1	5.8	5.9	-0.1
0:28	-0.9	-0.8	-0.1	-6.1	5.2	5.2	0.0
0:35	-1.6	-1.4	-0.2	-6.1	4.5	4.7	-0.2
0:43	-2.5	-2.2	-0.3	-6.1	3.8	3.9	-0.1
0:50	-3.3	-2.8	-0.5	-6.1	3.3	3.3	0.0
0:58	-3.7	-3.4	-0.3	-6.1	2.7	2.7	0.0
1:05	-4.3	-4.0	-0.3	-6.2	2.2	2.2	0.0
1:13	-5.0	-4.7	-0.3	-6.2	1.4	1.5	-0.1
1:20	-5.7	-5.3	-0.4	-6.2	0.9	0.9	0.0
1:28	-6.1	-5.8	-0.3	-6.2	0.3	0.4	-0.1
1:35	-7.0	-6.7	-0.3	-6.2	-0.5	-0.5	0.0

样我们就得到了整体蒸发引起的同步降温实验。笔者所累积的这样的同步降温实验数据不计其数，本文不发表，在本文后面的所有姆潘巴效应实验的数据中都包含了整体蒸发引起的同步降温效应实验。这里只给出朱韵之和冯跃春的一个同步降温效应实验结果作为代表。

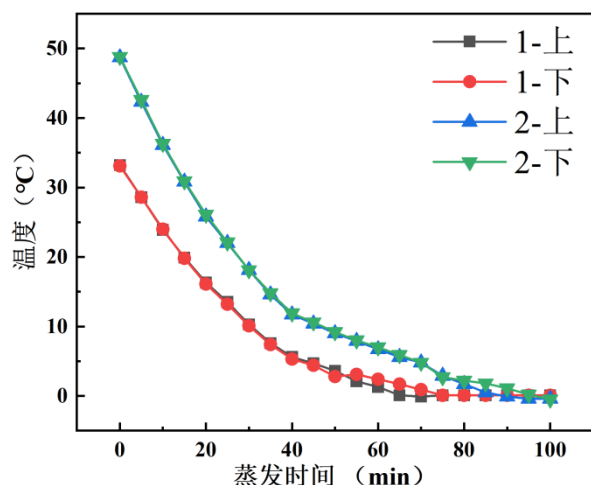


图3. 保温杯冷热水在冷冻室内的同步降温曲线

如图3是根据朱韵之和冯跃春所做的同步降温效应实验结果的数据画出温度随时间的变化曲线（具体数据因篇幅关系从略）。所用冰柜为SD55L直冷冰柜，最低制冷温度-25℃。所用保温杯内径45mm,高度135mm,高硼硅玻璃材质，经过外裹隔热棉，内刷隔热油漆处理。从实验数据结果可以看出，无论热水还是冷水，都是上下同步降温{高（2线）低（1线）温水上下液面读数在曲线上基本重合时表示上下同步降温}。热水降温速率大于冷水降温速率。此同步降温效应实验符合之前江正杰的理论预期和实验，说明水的蒸发并不只是水的液面行为，而是一种上下联动的整体行为。从保温杯冷热水在冷冻室内的降温曲线还可以看出，冷热水降温曲线在末端发生相交，即热水会冷水结冰之前先结冰，即产生姆潘巴效应。这个同步降温效应实验意味着从上下均温开始的冷却过程在4℃之前可以基本上始终保持均温的状态。这个就是整体蒸发定律的最明显表现。于是笔者通过对比热水与冷水在冰柜中的冷却数据得出结论：姆潘巴效应所反映的一般规律就是在同一温度下热水的降温速度比冷水要快，如果不是如此，热水的冷却就永远不可能追

上冷水的温度。这就是说，在上下均温的情况下仍然能够发生姆潘巴效应。至此，笔者也就走出了走出了姆潘巴效应实验的最大误区：将姆潘巴效应与上下温度梯度的存在必然地联系起来。

2.8.2 实验三：高低温酒精在冰柜中的蒸发引起的姆潘巴效应实验结果

容器：玻璃真空内胆伊水牌保温杯
A、B:D60mm,H160mm,480mL。

实验开始时间2024年10月9日周三21:00，热酒精初温57.0℃，冷酒精初温39.0℃。

热酒精从21:28到1:28，共历时3小时，从36.8℃降温到-6.1℃，共降温42.9℃。

冷酒精从21:05到1:05,共历时3小时，从36.8℃降温到2.2℃，共降温34.6℃。

热酒精比冷酒精的降温速度快（42.9-34.6）/3=2.77℃/小时，化成百分数，热酒精比冷酒精的降温速度快=（42.9-34.6）/34.6=24.02%。

2.9 实验四：高低温酒精在冰柜中的蒸发引起的姆潘巴效应实验结果

容器：玻璃真空内胆伊水保温杯
A、B:D60mm,H160mm,480mL。

实验开始时间2024年10月9日周三9:55，热酒精初温60.55℃，冷酒精初温37.5℃。

热酒精从10:26到13:26，共历时3小时，从35.2℃降温到-3.1℃，共降温38.3℃。

冷酒精从10:00到13:00,共历时3小时，从35.2℃降温到0.6℃，共降温34.6℃。

热酒精比冷酒精的降温速度快（38.3-34.6）/3=1.23℃/小时，化成百分数，热酒精比冷酒精的降温速度快=（38.3-34.6）/34.6=10.7%。

2.10 实验五：常温酒精在冰柜中的蒸发引起的姆潘巴效应实验结果

容器：玻璃真空内胆伊水牌保温杯
A、B:D60mm,H160mm,480mL。

实验开始时间2024年9月30日周一9:00，热酒精初温29.1℃，冷酒精初温24.7℃。

热酒精从9:00到13:30,共历时4小时30分,从29.1℃降温到-11.2℃,共降温40.3℃。

冷酒精从9:00到13:30,共历时4小时30分,从24.7℃降温到-11.2℃,共降温35.9℃。

热酒精比冷酒精的降温速度快 $(40.3-35.9)/4.5=0.978^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 。化成百分数,热酒精比冷酒精的降温速度快 $= (40.3-35.9)/35.9=12.26\%$ 。

2.11 实验六: 高低温酒精在冰柜中的蒸发引起的姆潘巴效应实验结果

容器: 玻璃真空内胆北欧蓝牌保温杯 A、B: D120mm, H150mm, 1400ml。

实验开始时间2024年10月3日周四19.05, 热酒精初温56.0℃, 冷酒精初温35.7℃。

热酒精从19:35到21:35, 共历时2小时, 从31.8℃降温到2.7℃, 共降温29.1℃。

冷酒精从19:15到21:15, 共历时2小时, 从31.8℃降温到3.6℃, 共降温28.2℃。

热酒精比冷酒精的降温速度快 $(29.1-28.2)/3=0.3^{\circ}\text{C}/\text{小时}$ 。化成百分数, 热酒精比冷酒精的降温速度快 $= (29.1-28.2)/28.2=3.19\%$ 。

3 整体蒸发定律和姆潘巴效应的微观模型揭秘

以上我们已经完成了液相整体蒸发定律和姆潘巴效应的实验验证, 至此为止可以说液相整体蒸发定律已经在实验上被彻底证明了, 不会有任何疑义。我们也已经找到了姆潘巴效应所反映的一般规律, 因此原则上我们可以在任何热水与冷水的冷却实验中找到姆潘巴效应: 在同样的冷却环境和容器条件下, 从更高温度冷却下来的液相比之从更低温度冷却下来的同温液相具有更大的冷却速度。我们一旦将目光集中在这一点上, 我们就完全没有必要关注热水与冷水哪一个先结冰的问题, 需要关注的只是, 在什么条件下有更强的姆潘巴效应。我们的实验发现的结果是: 无论是水还是酒精, 都存在这样的规律, 越是在高温区域且温差越大的热水与冷水, 在冷却到同温的时候冷却速度的差别更大。这是因为随着温度的升高, 水与酒精的饱和蒸气压呈

现非线性的增大, 酒精的饱和蒸气压曲线曲率比水更大。

既然水和酒精都存在整体蒸发定律和姆潘巴效应, 那么存在这两个规律的微观机理在哪里呢? 显然我们只能从液相的一般微观结构中才能找到其原因。笔者研究的结果找到的液相的这个一般结构就是液相分子的单元结构, 即液体本身是一个短程有序、长程无序的单元结构, 从单元的核心到边缘分别分布着固相-液相-气相的结构, 亦即是从单元核心到边缘的固相分子-液相分子-气相分子的结构分布。

这是笔者根据百度百科液相或液体等条目整理出来的基本知识, 加上笔者关于液相中含有气相分子的基本假定总结出来的新观点和判断。这里的从液相单元结构的核心到边缘的固相分子-液相分子结构是物相科学已有的结论, 笔者所增加的只是在这个结构的外围增加一个气相分子结构层, 它比受到范德华力束缚的液相分子更加处于自由运动态, 由之构成了液相内部的气相空间。简单而言, 这个结构中液相分子与气相分子的互相转化, 就是蒸发和升温、冷却关系的基本机制。除此之外, 液相的升温与降温还与固相分子-液相分子结构的互相转化有关, 至于升温与降温的速度, 除了与温度高低相关外, 还与固相分子-液相分子的数量密度有关。而姆潘巴效应则是在这个随着温度变化而转化的过程中产生的液相分子数量以及其转化为气相分子的速度的滞后效应所产生的结果。

3.1 物相全息论

首先申明, 我们对于整体蒸发定律、姆潘巴效应以及特异相变的解释最终是基于物相全息论[2]。所谓物相全息论是指物质基本的三相事实上不存在单纯的液相、固相与气相, 三相其实是以互相混合的形态存在, 即宏观上表现为液相的物质中也存在固相(如强氢键的四面体结构, 小分子团和大分子团结构等)和气相(气相分子); 宏观的气相中也存在液相、固相, 如空气中存在气溶胶和作为液滴存在的雾; 宏观的固相中也存在液相和气相。从微

观角度看，固体是由大量的原子或分子通过化学键紧密排列组成的。不过，在固体内部可能会有一些微小的空隙，这些地方能够容纳气体分子。例如，如在冰体内部存在的气泡和冰面存在的液体水。同时，固体内部也可能含有液体。比如，在一些水合物晶体结构中，水分子就存在于固体的晶格结构内。还有木材，它是固体，但内部也含有一定水分。这是一个必然的现象，只有这样理解三相，才能理解三相之间为什么会互相转化或发生相变。三相之间的相变其实是从这种内部的混合相开始萌芽的，而不一定是发生于界面。

在此笔者不想全面涉及这个问题，只想涉及液相中存在的固相与气相之间的相变——蒸发问题，这样的相变就产生于液相内部的液相分子向气相分子的转化。

3.2 液体内部的单元结构和长程无序、短程有序性质

如前所述，在可以流动、变形的液体内部存在许多单元组成的结构。我们把能反映出一定的排列规律性的粒子的群体称为一个单元。液体由很多个类似这样的单元组成，同一单元中粒子排列取向相同，相邻单元中粒子的排列取向各不相同。液体的单元结构也具有短程有序、长程无序的特征。

长程无序、短程有序性质是描述物质微观结构的一种特性，尤其在非晶态固体和液体中表现得尤为明显。这种性质意味着物质在小范围内（短程）呈现出一定的有序性，而在大范围内（长程）则缺乏这种有序性。这样的结构与非晶态固体十分相似。在非晶态固体中，也存在长程无序、短程有序现象。非晶态固体的原子排列没有规律周期性，从总体上看是无规则的，但近邻的原子排列有一定的规律，这就是短程有序。例如，在非晶质的硅酸盐玻璃内，如果从每一个硅氧四面体的局部区域来看，离子分布的方式和间距都是一致的，这也是一种有序，即只延伸到每个配位四面体的很短的距离内的短程有序。

3.3 液体内部存在的空隙

液体内部的分子之间的结构既不像气体那样分子之间相互作用较弱；也不像固体那样，分子间有强烈的相互作用，而且由于短程有序性质的不确定性和易变性，很难像固体或气体那样对液体作较严密的理论计算。有关液体的理论至今还不是十分完美的。

但是，我们还是可以判断，因为液体分子排列得较为松散，液体内部就有许多微小的空隙，因而在液体中可溶解或吸收少量气体分子。液体蒸发和沸腾需先在液体内部形成气泡，而气泡又是由溶解在液体内部的气体分子积聚而成的。水生生物就是依靠在水中溶解的空气而得到氧气的。

我们举一个二维系统的例子予以说明。若认为每一个粒子都是大小相同的刚性球，将这些小球密集堆积后的图形如图4(a)所示。这是一种规则的晶体结构。每一个粒子周围有六个最近邻粒子。但是若先在某个中心粒子周围排列五个粒子，然后由里向外，也按每一个原子周围均有五个近邻粒子那样去排列，就得到图4(b)的图形，它是比较疏松的排列，而且离开中心粒子愈远，粒子的排列也愈杂乱，粒子之间的空隙也越大。这样的系统仅在中心粒子周围数个粒子直径的线度内反映出具有排列的有序性。

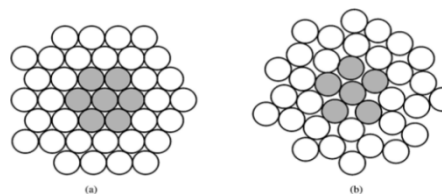


图4. 从固体到液体内部产生的空隙示意图

通常晶体熔解时体积将增加10%左右，可见液体分子间平均距离要比固体约大2%~3%。这说明，虽然液体中的分子也与固体中分子一样一个紧挨一个排列而成，但却不是具有严格周期性的密堆积，而是一种较为疏松的长程无序、短程有序堆积。这是液体微观结构的重要特征之一。

3.4 液态分子间的范德华力

固相分子间主要起作用的力是氢键产生的力。液相分子间主要起作用的力是范德华力。范德华力和氢键是两种不同的分子间作用力。范德华力不像

化学键有固定的角度，范德华力只有个大概的方向。这也是液体为什么会流动而固体不能的原因。范德华力不同于氢键，或也包含弱氢键产生的力，但是主要应该是无氢键的分子之间的互相作用力。范德华力存在于所有的分子型晶体中，与分子间距有关，和分子极性大小和分子质量大小有关。而氢键则是H原子与其他原子结合的力，它不属于范德华力，氢键作用力要强于范德华力而弱于离子键作用力。

范德华力是分子间的一种吸引力，它是由分子间的偶极异极相吸造成的。它包括色散力、诱导力和取向力三种。在非极性分子之间只存在着色散力；在极性分子和非极性分子之间存在着色散力和诱导力；在极性分子之间存在着色散力、诱导力和取向力。色散力、诱导力和取向力的总和叫做分子间力。分子间力没有方向性与饱和性，键力较弱。范德华力束缚的结构或者也可能包括弱氢键束缚的结构，但是决定分子间作用力表现为液态的主要起作用的力是范德华力。在范德华力的作用下，液相分子还受到偶极异极相吸作用造成的影响。

当液态物体分子间的范德华力被打破时，物体由液态变为气态；当液态物体分子间热运动减小，小到分子间化学键可以形成，从而化学键在分子间占主导地位时，液体变为固体。

3.5 液相分子的单元结构是从核心到边缘的固相-液相-气相的分布

以上我们讲的是一般液相的分子结构，结合一开始讲到的物相全息论，归结起来可以认为，处于液相单元结构核心的其实是液相之中的强氢键束缚下的固相。沿着距离这个核心向外的延长线上，存在从短程有序到长程无序的结构，实际上是从固相到液相的过度，也可以说是从强氢键结构到弱氢键结构再到范德华力束缚的结构。

进一步说就是，脱离范德华力影响之外的液相分子可以称为是自由液相分子。可以说越是自由的水分子，其分子之间的距离也一定越大，因此密度也越小。由于范德华力主要是异极相吸作用造成的力，可以设想，由此造成的结果是：其更外围的自

由的液相分子有更多的可能是存在同极相斥的作用力，进而造成了更大的分子之间的距离和更高的分子运动速度，这就可能过渡到比液相分子更自由的气相分子组成的气相空间，即前面讲到的液体内部存在的空隙，处于这样的空间中的分子实质上就是液相内部的气相分子了。

在这样的气相空间中充满的是气相分子，这样的气相分子可能不同于宏观可见的气体，它是液相内部的气相分子。它不同于液相分子的地方在于，其可能在很大程度上摆脱了范德华力的影响，其分子之间的间距也大于液相分子的间距，也有更大的运动速度和动能，故与液相分子比起来处于更加自由的运动状态，可以说是液相内部最自由的分子，因此其密度也更小。但是它与已经离开液相而存在的宏观气相分子比起来，在液相内部的气相分子的密度当然更大，距离液相分子的密度更接近一些。这样的密度分别决定了它具有表现出与液相分子相分离而上升到液面的趋势，这个趋势就是发生蒸发的动力来源。

进一步的研究表明，液相内部的液相分子向气相分子的转化所形成的内部蒸发是一个相变，但是它不是一级相变，而是二级相变。所谓一级相变，是指在发生相变时，有体积的变化同时有热量的吸收或释放，这类相变即称为一级相变。所谓二级相变，是指在发生相变时，在体积不变化的情况下，也不伴随热量的吸收和释放，只是热容量、热膨胀系数和等温压缩系数等的物理量发生变化，这一类变化称为二级相变。发生二级相变时体积的变化不是突变，而是连续的变化。因此，液相内部由纯气相分子组成的气相空间的密度有可能不是如液相水沸腾之后生成的气态水那样体积扩大1244倍，而可能仅仅是稍微有所扩大。

但是，笔者的进一步研究表明，就液相内部的气相分子的总的面积而言，恰好等于同等体积和温度下的空气处于饱和蒸气压时所含的水蒸气的量，或者说液相内部的气相分子的总量的下限是这个量。笔者根据这个假定定量解释了水的空气溶解度随着温度的变化规律，误差精度达到5.5%，笔者将另文披露这个研究成果。

综上所述，液相分子的单元结构是从核心到边缘的固相-液相-气相的分布，其之所以表现出来的是液态，是因为其分子之间形成的短暂的氢键和范德华力所维持的聚集形式占据了主要地位，造成它们的排列方式更加松散，且其内部含有的大小分子团比固态少。而如果这种结构的最外围的气相不断生长，就会形成气泡，并且由于其密度最小，造成其倾向于液面运动的趋势，这个就是液相发生蒸发的微观机理。所以这样的蒸发就不是仅在液面发生，而是在液相整体发生，故叫做液相整体蒸发定律。也就是说，整体蒸发的微观机理在于是液相内部摆脱弱氢键和范德华力作用的自由液相分子向自由气相分子转化并逸出液面的过程和结果。

对于这个液相整体蒸发定律的决定性证明的实验主要是两个：蒸发速率与整体水量或酒精量的相关性实验，在保温容器中的水或酒精在开口冷却过程中发生的整体同步降温效应实验以及上热下冷效应实验。至于姆潘巴效应的所有实验都体现了整体同步降温效应，因此也必须在液相整体蒸发定律之下才能得到解释。

3.6 液相水的微观单元结构

至于讲到液态水的局域微观结构存在不同观点：传统观点认为水是由氢键网络组成的四面体结构；现在也有观点认为液态水的局域结构是由氢键网络组成的圆环、链状结构，这里的水分子之间的氢键被大量破坏（如图5）。

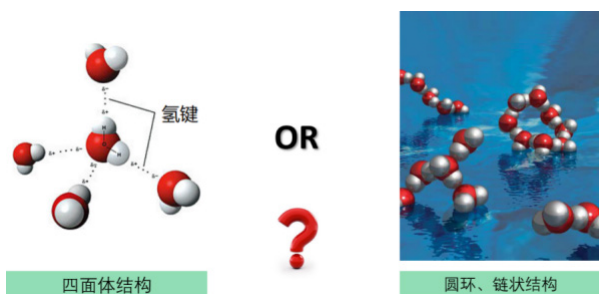


图5. 液态水的局域微观单元结构：四面体结构和圆环、链状结构[11]

我们认为，对于液相水而言，当然也存在上述讲的单元结构，构成液相水的单元结构无疑也

是从核心到边缘的固相-液相-气相的分布。处于液相水的单元结构核心的，一般认为是由强氢键构成的四面体排列结构。在室温和0℃以上，水分子一般呈现由五个水分子组成的典型四面体排列，每个水分子都像搭建金字塔一样与其它四个分子相连组成的四面体群。其中心水分子向顶部和前部提供氢键，并接受来自侧面的水分子的氢键的作用力。这种特殊的四面体排列赋予了水以独特的物理性质。

这样的四面体（或其它结构）群当然是有序的结构，即水分子单元的短程有序结构。至于从这种短程有序结构到长程无序结构过度的结构，应该更多的是由所谓的水分子链与水线或其他水分子结构构成。因为水分子之间形成的氢键还可能生成水分子链和水线，这种结构对于水分子的物理和化学性质也具有重要影响（如图6）。

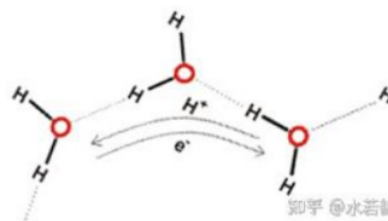


图6. 水分子链和水线[12]

水分子链和水线是指水分子在特定条件下排列成的两种类似的结构形态。水分子链通常是指在水分子之间通过氢键形成的链状结构。例如，在某些化学反应中，水分子会形成链状结构，这种结构有助于保持反应物分子的相对位置，从而促进反应的进行。

水线则是指在某些特定条件下，水分子会形成一条或多条线状结构。例如，在水面上，水分子会形成一条水线，这是由于水分子的极性和表面张力的影响导致的。此外，在毛细管中，水分子也会形成一条水线，这是由于毛细管壁对水分子的吸附作用导致的。

这样的水分子链与水线可以形成复杂的三维网络。在液态水中，网络中的水分子之间的连接在液体中传递结构信息。除了这个复杂的连接系统外，在每个水分子周围局部发生范德华力相互作用，以保持和定向未结合的水分子，静电效应在分子周围

的所有距离（如果随距离衰减）发挥作用，以定向所有水分子。

因此，在液态状态下，水分子之间虽然存在一定的相互作用和氢键，但仍有相当一部分水分子具有相对较高的自由度，可以在液体水内部自由移动和扩散。液体中的自由水分子处于不断的热运动中，它们的位置和速度会不断变化，这种动态的行为使得水分子能够在液体内部自由地穿梭和重新分布。在液体中处于这种自由水分子最外围的应该就是气相水分子。

3.7 液体内部通常存在液相自由水分子和气相自由水分子与整体蒸发的解释

由上可见，从液相单元结构的核心的强氢键结构沿着水的弱氢键结构——水分子链和水线等，是从强氢键结构过渡到弱氢键结构，再过渡到范德华力束缚的无氢键结构的过程，接着就是从自由液相水分子过渡到气相水分子的外围结构。这个链条过程也可以简称为是“强氢键-弱氢键-无氢键范德华力-自由态”的链接过渡结构，或者是“固相-液相-气相”的链接过渡结构水的整体蒸发就是自由液相水分子过渡到气相水分子的转化过程。无疑的，液相水中存在越多自由液相水分子，其过渡到气相水分子的过程的速率就会越大，进而整体蒸发速率也越大。

在这里，我们通常是在没有确凿证据的情况下就假定：在其他条件（如容器的形状、水量和液面积等）一样的情况下，蒸发的速度取决于温度，温度相同，蒸发速率也必然相同。但是在温度与蒸发速率之间并不存在直接的因果关系，温度只有在影响到以上讲的单元结构和相对自由的液相水分子到自由气相水分子的相互过渡状态和自由气相水分子的数量的时候，才会影响到蒸发速率。那么在温度与自由液相水分子到气相水分子的相互过渡和自由气相水分子的数量之间是否存在一一对应的关系呢？事实上在很多情况下是不存在的。从静态来看，长时间处于某一温度的液相，与其内部存在的自由液相水分子到气相水分子的相互过渡状态和自由气相水分子的数量或密度或许存在一一对应的关系。但是自由液相水分子到气相水分子的相互过渡

状态和自由气相水分子的数量或密度当然还受到温度的实时变化速度的影响。

3.8 从整体蒸发的解释看三级姆潘巴效应发生的微观机理

无疑的，温度越高，水分子的运动速度就会越大，这样液相单元结构的固相分子就会有越多的处于单元结构核心位置的分子团瓦解为弱氢键水分子和无氢键的自由液相水分子，进而其转化为气相水分子的速率也越快，即蒸发速率也越快。但是，从温度变化传递到或影响到自由液相水分子到气相水分子的相互过渡状态和自由气相水分子的数量或密度的变化是需要时间的，这样也就可能破坏温度与其内部存在的固相-液相-气相的结构分布之间的一一对应关系。

假定现在存在两份同量和同形状的水，它们在相同的冷却环境下处于冷却的过程中，它们的温度也相同，但是其一是刚刚从更高温冷却下来的，简称热水；其二是从较低的初温开始冷却的，简称冷水。现在我们将冷水的初温状态与热水冷却到冷水的初温时刻（我们称之为“等温时刻”）的状态进行对比。

在这样的等温时刻的对比中，不能认为温度与其内部存在的无氢键自由液相水分子和自由气相水分子的数量或密度之间的一一对应关系还是能够成立的。原因是等温时刻的热水是刚刚从更高的温度冷却下来的，这样当热水到达冷水的初温时刻，其内部的单元结构要能够恢复到与冷水处于等温时刻的相同状态，需要有一个发生延迟效应或滞后效应的时间。亦即在冷却过程中，无氢键自由液相水分子到气相水分子的相互过渡状态和自由气相水分子的数量或密度，在修复到静态状态的过程中有一个滞后效应。而在滞后效应发生结束的时刻之前，热水在刚达到等温时刻的时候，其内部的自由液相水分子到气相水分子的相互过渡状态当然更加活跃，其自由气相水分子的数量或密度无疑都要比等温时刻时的冷水要大得多，因此热水冷却到等温时刻时的蒸发速率就一定要比冷水的蒸发速率快一些。这样根据液相的整体蒸发定律和同步降温的原理，处于等温时刻时的热水

的降温速率也会更快。

这个就是我们在前文所讲的三级姆潘巴效应之所以会发生的微观机理。有这个三级姆潘巴效应，才会有二级姆潘巴效应，即处于冷却中的热水的温度只要持续的时间足够长就会赶上冷水的温度；最后才可能会有一级姆潘巴效应，即热水先于冷水结冰。也就是说，姆潘巴效应的谜底在于，在液相的整体蒸发定律和同步降温的原理基础上发生的，在冷却过程中，无氢键自由液相水分子到气相水分子的相互过渡状态和自由气相水分子的数量或密度，在修复到静态的与温度之间的对应关系的过程中发生的滞后效应。

以上关于姆潘巴效应微观机理的解释表述，主要是以水作为思考的背景，事实上对于非水的液相如酒精，也会有这样的三级姆潘巴效应，其解释的原理也是完全类似的。我们的酒精姆潘巴效应实验只证明了酒精有二级和三级姆潘巴效应，如果我们要验证一级姆潘巴效应，需要把酒精冷却到-114.1℃，这要求的实验条件比较高，笔者个人无法完成。

3.9 解释姆潘巴效应之谜的谜底

归结起来，以上解释姆潘巴效应之谜的谜底在于：姆潘巴效应包括三级：热水比冷水先结冰（一级）；热水的降温赶上冷水的温度（二级）；热水冷却到冷水的初温时比冷水的降温速度快（三级）。任何一级发生了都表明存在姆潘巴效应。三级姆潘巴效应是在液相的整体蒸发定律和同步降温的原理基础上发生的。液相的静态的“固相-液相-气相”结构与温度之间存在一一对应关系，温度越高，固相水分子含量越少，液相分子和气相水分子含量越多；温度越低，固相水分子含量越多，液相分子和气相水分子含量越少。但是在温度变化的过程中，这种液相的静态的“固相-液相-气相”结构与温度之间存在一一对应关系就会被破坏，在修复到静态的“固相-液相-气相”结构与温度之间的一一对应关系的过程中会发生滞后效应。即在冷却过程中到达某个温度值的时候，液相内部从无氢键液相水分子到气相水分子的相互过渡状态和自由气相水分子的数量或密度，在修复到静

态的“固相-液相-气相”结构与温度之间的对应关系之前，有一个滞后效应，即有一个与更高温度值对应的量，在这个情况下的冷却速度当然是更快。如果冷却过程是持续的，滞后效应的量也是会持续的。这个持续的滞后效应导致了姆潘巴效应所反映的一般规律：在同样的冷却环境条件下，从更高温冷却下来的液相比之从低温开始冷却的同温液相具有更快的冷却速度，即三级姆潘巴效应。有三级姆潘巴效应，才会有二级姆潘巴效应，即处于冷却中的热水的温度会赶上冷水的温度；最后才可能会有一级姆潘巴效应，即热水先于冷水结冰。因此姆潘巴效应的发生不依赖于一定要观测到结冰现象。

这个就是三级姆潘巴效应之所以会发生的微观机理。通过本文及其实验可以宣布：液相整体蒸发定律是完全可以成立的，并且宣布困扰物理学界60多年的姆潘巴效应之谜最终得以破解，牛顿冷却定律需要得到修正。

3.10 逆姆潘巴效应的微观机理也是类似的

我们可以根据以上对于姆潘巴效应的这种解释来预期，不仅冷却过程存在姆潘巴效应，在加热升温过程中也会有逆姆潘巴效应。逆姆潘巴效应（Anti Mpemba effect）是指在一定条件下，温度较低的液体比温度较高的液体更快达到更高的温度或沸点。因为在升温过程中同样存在温度与“强氢键-弱氢键-无氢键范德华力-自由态”的链接过渡结构之间的对应关系从瓦解到修复过程的滞后效应。

逆姆潘巴效应也可以分为三级逆姆潘巴效应：一级逆姆潘巴效应，即温度较低的液体比温度较高的液体更快达到更高的温度或沸点。同样，二级逆姆潘巴效应可以理解为：冷水的升温速度赶上热水的时刻。三级逆姆潘巴效应可以理解为：冷水在升温过程中比热水更快达到沸点。

在液相升温过程中，所谓的逆姆潘巴效应所反映的一般规律可以表述为：在同样的加热环境和容器条件下，从更低温度开始加热升温的液相，比之从更高温开始加热升温的同温液相，具有更快的升温速度。这是因为液相从低温开始加热升温，液相的“强氢

键-弱氢键-无氢键范德华力-自由态”的链接过渡结构瓦解到与温度对应的状态,同样有一个滞后效应,在这个滞后效应发生之前,低温液相内部具有更小的液相分子和气相分子数量和密度,因此发生的蒸发速度更慢,丧失的能量也更少,故升温速度也更快。

逆姆潘巴效应的一般理解是:在相同的加热条件下,冷水由于蒸发更慢,故能够将其吸收的热量更多用于升温。而热水由于具有更快的蒸发速度,故在升温过程中将更快耗散热量,故只能将更少的热量用于升温,故可能更慢到达沸点。

作为对于这种解释模式的检验,我们也可以通逆姆潘巴效应实验来进行。这样的实验已经有人做过[12]。

以上这样的思路是非常清晰的。我们还可以用这样的思路来解释所谓的特异相变问题,如所谓的液液相变[13],实际上就是我们在上面讲的自由液相水分子到气相水分子的相互过渡转化状态在特定温度下的凸显,关于这个问题的详细论述笔者将另文进行。

4 结论

最后值得提出的一点是,我们给出的姆潘巴效应实验虽然与通常进行的同类实验不同,区别在于我们用了保温容器,因此冷却过程存在同步降温效应,而任何其他实验都不是这样进行的,其容器的侧面与地面与冷却环境的空气之间都存在热传导。但是,这不等于说我们的实验只是特殊的姆潘巴效应实验,不具有普遍的意义。恰恰相反,我们的姆潘巴效应实验是在把握了导致姆潘巴效应的本质原理之后进行的,因此是在尽可能排除了导致姆潘巴效应实验出现复杂性的无关影响因素之后进行的实验,因此只有我们的实验才是对姆潘巴效应所体现的一般原理和规律的显现,因此其最后给出的解释也就是对姆潘

巴效应之谜的根本破解。

参考文献

- [1]江正杰.从非相平衡下的蒸发打破热平衡的实验预期相平衡下的蒸发打破热力学平衡的实验[J].山西科技报.2023,1:15.
- [2]江正杰,王全杰.论气液相溶态与气液相混态的区分及其验证实验设计[J].物理化学进展.2017(2):26-36.
- [3]江正杰,王全杰.液态水中含有气态水的实验验证[J].大学物理实验.2017,(4).
- [4]朱韵之,冯跃春,江正杰等.同蒸发液面下液体深度与蒸发速度相关性的实验研究[J].物理科学与技术研究(PSTR).2025,(1).
- [5]胡南琦(译者),奥斯玻恩,姆潘巴,姆潘巴的故事[J].物理教学.1984,08(2):34-37.
- [6]杨为民(译者),奥斯玻恩.姆潘巴,姆潘巴的故事(续)[J].物理教学,1984.//译自 LEWIS J L. The Mpemba Effect: The Story of Mpemba[M/OL] // Teaching School Physics—A Unesco Source Book. London: Penguin Books, 1972.
- [7]Burrige, H. C. & Linden, P. F. Questioning the Mpemba effect: Hot water does not cool more quickly than cold. Sci. Rep.6, 37665 (2016). doi:10.1038/srep37665.
- [8]黄景妹等.“姆潘巴现象”分析述评[J].物理通报.2014,8.
- [9]张明元.姆潘巴效应的实验研究[J].首都师范大学学报(自然科学版).2004,12(25):4.
- [10]唐志强,黄卫东,张亚刚等.用水直接观察姆彭巴效应:探索神秘的传热[J].Info Mat(信息垫).2023,5(2):2.
- [11]Lu, Z., & Raz, O. Nonequilibrium thermodynamics of the Markovian Mpemba effect and its inverse. Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.114, 5083–5088 (2017). arXiv:1609.05271v1.
- [12]涂育松,方海平.液态水微观结构研究的新进展[J].物理,2010,39(02):79-84.
- [13]邓耿,尉志武.液态水的结构研究进展[J].科学通报,2016,61(30):3181-3187.

