

基于液相整体蒸发定律解释水的蒸发引起的上下同步 降温效应实验和上热下冷效应实验

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 扬州市青年科学技术协会 江苏扬州

【摘要】基于液相整体蒸发定律设计了二大类实验,这二大类实验也是对液相整体蒸发定律的进一步验证:实验 1:蒸发引起的上下液面同步降温实验,其中又包含 4 个实验:实验 1.1 室温环境下的开口蒸发引起上下同步降温的实验;实验 1.2 冰柜冷却环境下的蒸发引起上下同步降温的实验;实验 1.3 酒精在冰柜内的冷却过程中蒸发引起同步降温实验;实验 1.4 保温圆塑料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。实验 2:蒸发引起上热下冷的实验,其中又包含 4 个实验:实验 2.1 保温桶水的蒸发引起的上热下冷效应实验;实验 2.2 保温 2 米管水的蒸发引起上热下冷效应实验;实验 2.3 酒精在冰柜内的蒸发引起的上热下冷效应实验。实验 2.4 1 米管水的蒸发引起上热下冷效应实验;以上这二大实验的全部结论都符合基于液相整体蒸发定律的预期,因此也确证了整体蒸发定律是普遍成立的。

【关键词】整体蒸发定律;均温下的同步降温效应;非均温下的同步降温效应;上热下冷效应;热力学第二定律

【收稿日期】2025 年 2 月 15 日

【出刊日期】2025 年 3 月 12 日

【DOI】10.12208/j.pstr.20250005

Based on the law of overall evaporation of liquid phase, the experiment of simultaneous cooling effect caused by water evaporation and the experiment of heating up and cooling down effect

Zhengjie Jiang¹, Yunzhi Zhu², Yuechun Feng³

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

²Yangzhou High School of Jiangsu Province, Yangzhou, Jiangsu

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

【Abstract】Two major categories of experiments were designed based on the bulk evaporation law of liquid phase, and these experiments further verified the law. Experiment 1: Experiments on synchronous temperature reduction of upper and lower liquid surfaces caused by evaporation, which includes four sub-experiments: Experiment 1.1: Experiment on synchronous temperature reduction caused by open evaporation at room temperature. Experiment 1.2: Experiment on synchronous temperature reduction caused by evaporation in a refrigerated environment. Experiment 1.3: Experiment on synchronous temperature reduction caused by evaporation of alcohol during cooling in a refrigerator. Experiment 1.4: Experiment on synchronous temperature reduction caused by open evaporation in a refrigerator of water in a thermally insulated round plastic cup with upper hot and lower cold layers. Experiment 2: Experiments on upper hot and lower cold phenomenon caused by evaporation, which

作者简介:江正杰(1968-),山东工商学院人文与传播学院副教授,工学学士,哲学硕士,研究方向:自然哲学、基础物理等;朱韵之(2008-),扬州第一中学高一学生,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。

includes four sub - experiments: Experiment 2.1: Experiment on upper hot and lower cold effect caused by evaporation of water in a thermos bucket. Experiment 2.2: Experiment on upper hot and lower cold effect caused by evaporation of water in a 2 - meter - long thermally insulated tube. Experiment 2.3: Experiment on upper hot and lower cold effect caused by evaporation of alcohol in a refrigerator. Experiment 2.4: Experiment on upper hot and lower cold effect caused by evaporation of water in a meter - long tube; All conclusions from these two major experiments match the expectations based on the bulk evaporation law of liquid phase, thus confirming the law's universal validity.

【Keywords】 Integral evaporation law; Synchronous cooling effect under uniform temperature; Synchronous cooling effect under heterogeneous temperature; Upper heating and lower cooling effect; Mpamba effect

1 研究背景——液相水整体蒸发定律

依据现有的物理热力学常识, 蒸发从微观上看就是液面的液相分子脱离液面到周围空气中的过程. 江正杰最早提出不同于上述常识的对于蒸发过程的理解, 首次提出液相整体蒸发定律^[1]. 液相或水的整体蒸发定律将水的蒸发不仅理解为是液面的(高动能气态)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. 气体溶质溶于水所得到的水溶液可以分为两种基本形态: 气液相溶态、气液相混态, 气液相溶态是气体溶质和液体溶剂(水)发生极性反应或其他化学反应后得到的液态与液态相溶态, 相溶前后气体溶质经过一个液化放热的过程; 气液相混态是气体溶质和液体溶剂(水)没有发生极性反应、水合反应或离解和缔合现象后得到的气态与液态相混态, 是气体溶质均匀扩散到液体溶剂中的结果, 即水溶液中的气体溶质从气体分子运动能量的角度来看仍然保持特殊的“气态”, 相混前后气体溶质由于温度没有达到液化点, 故没有经过一个液化放热的过程^[2]. 此外, 笔者还得到了一个基于特定情况下的蒸发的定量计算模型^[3].

根据液相整体蒸发定律, 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已经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相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.

江正杰认为液相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], 并且已经做过多个关于蒸发量与水量关系的实验. 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%, 在水量相差更多倍的情况下, 蒸发量高出 50%, 最多也有多出 100% 的例子, 具体数据随着空气湿度的不同而有差别, 湿度越大, 蒸发量高出百分数越小^[3].

液相整体蒸发定律将液相内部的水蒸气看作是一个可以连通的整体, 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的动能而言, 麦克斯韦气体分子速率分布曲线也是成立的, 液相内部存在的那些高动能的水分子已经变成为气相水分子. 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.

朱韵之、冯跃春发现江正杰的以上实验存在的问题在于, 没有看到液面到容器口的距离不同会影响到蒸发速率或蒸发量. 朱韵之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, 在冯跃春老师的指导下重复做了许多液体深度与蒸发速度相关性的实验, 得到更多更为精确的数据, 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. 这项研究成果最后以扬州中学教育集团树人学校初三学生朱韵之同学的名义参与于 2023 年 3 月 31 日—4 月 2 日在苏州市太仓市举办的第三十四届江苏省青少年科技创新大赛, 并且获得一等奖, 参赛题目为《液体深度与蒸发速度相关性的实验研究》之后, 这个实验在 2023 年 8 月 20-26 日在武汉举行的第 37 届全国青少年科技创新大赛中获得二等奖, 参赛题目也是《液体深度与蒸发速度相关性的实验研究》.

近期朱韵之、冯跃春对于液体深度与蒸发速度相关性又进行了重复与扩展实验研究, 完成了三个实验: (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 1.31: 1.17: 1.05: 1.(2)同液面的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.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%.朱韵之最后用经过保温处理的 2 米管和 4.75cm 管重复以上实验的结果,长管中水的蒸发量超出短管中水的蒸发量占短管蒸发量的 97%^[4]。

本文是接着以上实验继续研究整体蒸发引起的各种不同的效应。

2 蒸发引起的上下液面同步降温实验

2.1 液相整体蒸发定律理解的蒸发会引起同步降温效应

依据通常的蒸发理论,蒸发在液面发生,蒸发引起的吸热会导致液面首先降温,然后传导到液面以下顺次降温但是依据液相整体蒸发定律,其是将水或其他液相的蒸发理解为是在液相整体中的气相分子逸出液面的过程,可以预期会引起液相的整体同步降温.这个预期可以通过两种情况下的实验加以验证:一是液相上下均温下的同步降温实验;二是液相上下非均温下的同步降温实验。

笔者根据液相整体蒸发定律进行推论:液相整体下部的气相高动能水分子发生蒸发上移至中部,而中部的气相高动能水分子也发生蒸发上移至上部,上部的气相高动能水分子也发生蒸发逸出液面,这样叠加的结果是从上部到下部原则上可能会形成上热下冷的温差.但是,在液相相较环境从较高温开始冷却的条件下,由于液相液面的温度超过了空气环境的温度,由于存在液体自由表面上下位置的温差散热引起的液面附近的降温,液面附近就有形成上冷下热的趋势.这样分别由蒸发散热和温差散热引起的这两个趋势互相中和的结果,可能会引起同步降温的效应。

首先我们要进行的是液相水的上下等温下的同步降温实验.为了凸显蒸发引起的降温效应,我们需要尽可能将其他可能导致散热的因素屏蔽掉.故我们应该尽可能选择保温效果较好的容器作为实验用容器,特别是容器的内胆应该是导热系数尽可能小的,因为如果导热系数大就可能将产生的温差在很

短时间内抹平。

综合这些考虑,我们选择旧式的真空玻璃内胆的暖水瓶作为容器,并将容器置于常温环境或冰柜内蒸发,观测液相水上下温度的变化。

2.2 室温环境下的开口蒸发引起上下同步降温的实验(实验 1.1)

以下为可 36 小时保温的暖水瓶盛 3 升开水在室内常温条件下的开口蒸发实验,目的在于测量蒸发引起的降温是否遵守整体降温的原则.方法是通过测量随着时间的进程,暖水瓶中水的上液面附近的温度变化与底部水温变化的即时对比(见表 1)。

我们使用的温度计是人民电器生产的带线型探头(探头精度为 $\pm 2.5\%$)的双通道测温仪,分辨率为 0.1°C ,精度为 $\pm 0.2\%+0.7^{\circ}\text{C}$ 。暖水瓶容量 3.2L,36 小时可保温,内直径为 160mm,瓶身高 420mm,水高度约 380mm。

实验时从上下均温开始蒸发,蒸发期间将盖子打开,将双通道温度计探头相隔约 300mm 与一根筷子绑在一起,放入热水中,一头接近于底部中间位置,一头接近于液面中间位置,距离液面约 15mm。每隔 5 分钟记录一次实验数据.从开过水冷却到 83.7°C 时开始测温并记录,持续时间约两个多小时。

表 1 数据显示:每一对的数据大都相同,少数显示上热下冷,相差多为 $+0.1^{\circ}\text{C}$.这些数据或属于仪器本身固有的偶然误差,而非系统误差所致,因为这些误差不会持续,过一段时间又被消除.没有数据显示出上冷下热的温差.这两种情况都与预期一致。

在这个实验中除了存在蒸发散热之外,也存在热水的高温与环境的常温之间的温差散热,这个散热当然是引起液面先降温.可是,因为在高温水之下的蒸发作用很强,蒸发出来的高温蒸气会将环境的空气排除出暖水壶之外,也就是说 83.7°C 的高温水经过 2 个多小时的常温环境下的蒸发,其上下液面的温度仍然完全相同.由于上下液面的测温是同时的,没有显示出上下不同步降温(上冷下热)的任何迹象,可以肯定不存在上液面降温后传导到下液面也降温的迹象。

由此可见,在室温环境下高温液相的蒸发引起的降温完全不存在上液面附近先降温的事实.这个实验充分说明:蒸发只是在液面发生相变的假定是完全站不住脚的。

表 1 暖水瓶内的高温水在室温下从均温开始的开口蒸发引起上下同步降温的实验（实验 1.1）（2024/8/10 星期六）

测温时间 (2024/8/10)	上液面温度 (℃)	底部温度 (℃)	上下温差 (℃)	测温时间 (2024/8/10)	上液面温度 (℃)	底部温度 (℃)	上下温差 (℃)
21:15	83.7	83.7	0.0	22:25	75.7	75.6	+0.1
21:20	83.2	82.2	0.0	22:30	75.3	75.3	0.0
21:25	82.7	82.7	0.0	22:35	74.9	74.8	+0.1
21:30	81.8	81.8	0.0	22:40	74.4	74.4	0.0
21:35	81.0	81.0	0.0	22:45	74.0	73.9	+0.1
21:40	80.2	80.2	0.0	22:50	73.5	73.5	0.0
21:45	79.8	79.8	0.0	22:55	73.0	73.0	0.0
21:50	79.2	79.2	0.0	23:00	72.6	72.6	0.0
21:55	78.6	78.6	0.0	23:05	72.2	72.1	+0.1
22:00	78.1	78.0	+0.1	23:10	71.7	71.6	+0.1
22:05	77.5	77.4	+0.1	23:15	71.3	71.2	+0.1
22:10	76.9	76.8	+0.1	23:20	70.9	70.9	0.0
22:15	76.6	76.5	+0.1	23:25	70.6	70.6	0.0
22:20	76.0	75.9	+0.1				

2.3 低温环境下的蒸发引起的上下液面同步降温实验（实验 1.2）

既然在常温环境下的蒸发引起了上下同步降温效应，那么在温差更大的冰柜冷却的环境条件下的蒸发是否也如此呢？于是，笔者接着用 36 小时可保温的暖水瓶盛 3 升开水，在冷冻冰柜的冷却条件下做开口蒸发实验，目的在于测量蒸发引起的降温是否也遵守整体降温的原则。方法是通过测量随着时间的进程，同时测量暖水瓶的上液面附近的温度变化与底部水的温度变化的对比来判断（见表 2）。

笔者用的温度计还是人民电器生产的带线型探头（探头精度为±2.5%）的双通道测温仪，分辨率为 0.1℃，准确度为±0.2%+0.7℃.暖水瓶容量 3.2L，36 小时保温，双层玻璃真空内胆，内直径为 160mm，瓶身高 420mm，水高度约 380mm.冰柜用的是奥克斯上开口展示冷冻柜，最低冷却温度为-18℃。

实验时将暖水瓶置于隔热泡沫上，从上下均温开始蒸发，蒸发期间将盖子打开，从开水已经在室内降到 70.6℃开始。将双通道温度计探头相隔约 300mm 一起绑在木条上，放入热水之中，一头接近于底部中间位置，一头接近于液面中间距离液面约 25mm 的位置。每隔 5 分钟记录一次实验数据。持续时间约两个多小时。

每一对的数据大都接近于相同，不少读数显示上热下冷相差 0.1℃，也有少数读数显示上冷下热相差 0.1℃至 0.2℃。这些数据或属于仪器本身固有的偶然误差，不是系统误差，因为这些误差不会持续，过一段时间即被消除，或者被反向的温差所取代.也有极少量数据略显上热下冷的温差，最大偏离等温-0.2℃.这两种情况都与预期一致。

2.4 酒精在冰柜内的冷却过程中蒸发引起同步降温实验

笔者还将以上低温环境下的蒸发实验推广到非水的液体中，如酒精。笔者选择的实验用的酒精是纯度为 98%的工业酒精；实验设备包括，奥克斯冰冻展示冰柜，两部人民电器双通道测温仪，容器用 1400ml 的保温罐，为双层玻璃真空内胆。上测温探头距离上液面约 20mm,下探头距离底部液面 15mm，上下探头距离 100mm。

实验时使用两个保温罐分别盛两份不同温度的酒精：一者直接使用在一般家庭室内环境保存的初温为 23.8℃的酒精置于冷柜内冷却，二者是经过加热到约 35℃的酒精，并经过搅拌均匀.同时放入奥克斯冰柜，并同时测量上下部的温度下降进程，数据如下表 3。

表 2 70.6℃开过的水在冰柜内从均温开始的开口蒸发引起上下同步降温的实验（实验 1.2）（2024/8/10 星期六）

测温时间 (2024/8/10)	上液面温度 (℃)	底部温度 (℃)	上下温差 (℃)	测温时间 (2024/8/11)	上液面温度 (℃)	底部温度 (℃)	上下温差 (℃)
23:30	70.6	70.6	0.0	1:50	58.9	58.8	+0.1
23:45	69.3	69.1	+0.2	2:05	57.9	57.8	+0.1
0:00	67.7	67.6	+0.1	2:20	57.0	56.9	+0.1
0:15	66.4	66.4	0.0	2:35	56.0	56.0	0.0
0:30	65.0	65.0	0.0	2:50	55.2	55.2	0.0
0:45	63.6	63.6	0.0	6:15	45.7	45.7	0.0
1:00	62.4	62.3	+0.1	8:00	42.2	42.3	-0.1
1:15	61.3	61.2	+0.1	10:30	38.2	38.2	0.0
1:30	60.2	60.1	+0.1	14:00	33.4	33.6	-0.2
1:45	59.4	59.3	+0.1	21:00	24.4	24.4	0.0

表 3 纯度 98%冷热酒精在奥克斯冰柜内的冷却过程中蒸发引起同步降温过程对比实验（实验 1.3）（2024/9/30 星期一）

热酒精（保温罐 D120mm, H150mm, 1400ml 玻璃真空内胆）				冷酒精（保温罐 D120mm, H150mm, 1400ml 玻璃真空内胆）		
测温时间	上部温度 (℃)	底部温度 (℃)	上下液面温差 (℃)	上液面温度 (℃)	底部温度 (℃)	上下液面温差 (℃)
15:00	32.7	32.7	0.0	17.5	17.5	0.0
15:15	24.1	24.2	-0.1	12.9	12.8	0.1
15:30	19.1	19.2	0.0	9.9	9.8	0.1
15:45	15.5	15.5	0.0	7.9	7.7	0.2
16:00	11.9	11.9	0.0	5.6	5.5	0.1
16:15	8.4	8.4	0.0	3.1	3.0	0.1
16:30	5.8	5.9	-0.1	1.3	1.3	0.0

测量结果：基本显示同步降温。冷酒精还存在微小的上热下冷的效应。这说明根据整体蒸发定律假定的下部酒精蒸气可能上传，对上液面可能造成堆积的效应在一定程度上可能是存在的。

我们做的更多的水和酒精实验也都有类似的结果，在此不一一列举。

以上实验数据都证明液相水整体蒸发定律是正确的。

2.5 圆塑料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

以上是在上下均温的条件下的同步降温实验，那么在上下非均温的条件下，特别是上热下冷的条件下是否也有同步降温效应呢？以下为两个侧面经过隔热膜隔热处理的耐高温的塑料杯的水,在制造出上下不均温的情况下,在冷柜中的蒸发引起上下同步降温的实验.实验目的也在于通过温度变化的

测量来验证,在存在上下温差条件下的蒸发引起的降温是否也遵守上下同步降温的原则。

为了能够制造出上下不均温的情况，就需要有上下部可控的散热条件，为此使用现成保温容器是不合适的。因此笔者设想可以利用塑料杯（或玻璃杯）盛水进行蒸发实验.塑料杯除了开口之外，周围用隔热膜包裹，处于隔热的状态.另一方面在实验开始的时候保持底部不隔热.这个实验的要点在于，在开始的步骤首先应该将容器内液相上下不均温的条件制造出来，于是就需要将塑料杯放在冷柜的冷垫面上冷却，这样可以产生塑料杯水上下部的尽可能大的温差.在这样的温差产生之后再用隔热膜将塑料杯的底面封住。可以设想在这个散热条件变化的温度节点处，由于塑料杯低面的散热通道被堵住，塑料杯内的水温的稳定性或平衡性就可能被破坏，需要建立新的平衡。根据同步降温的预期，在新平

衡建立后, 应该会重新开启同步降温的过程。

本实验选择两个一样的塑料杯, 盛 1 升水, 塑料杯的直径 D80mm,高 H180mm,容积为 1000ml。起始温度分别为 73℃和 63.5℃.我们用的温度计仍然是两部人民电器生产的带线型探头的双通道测温仪, 分

辨率为 0.1℃, 准确度为±0.2%+0.7℃。将双通道温度计探头相隔约 150mm 绑在一起, 放入塑料杯的热水之中, 一头接近于底部中间位置, 一头接近于液面中间位置, 并且深入液面 20mm.每隔 5 分钟记录一次实验数据。持续时间约 6 个多小时, 数据见表 4。

表 4 圆塑料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 (实验 1.4) (2024/8/29 星期四)

高温水 (D80mm, H180mm, 1000ml)					低温水 (D80mm, H180mm, 1000ml)			
测温时间 (2024/8/29)	上液面温度 (℃)	底部温度 (℃)	上液面 5 分钟降温 (℃)	下液面 5 分钟降温 (℃)	上液面温度 (℃)	底部温度 (℃)	上液面 5 分钟降温 (℃)	下液面 5 分钟降温 (℃)
19:30	73.00	73.00	0.0	0.0	63.5	63.5	0.0	0.0
19:35	71.2	62.3	1.8	2.8	62.9	59.8	0.6	3.7
19:40 (读数后加隔热垫)	68.0	56.6	3.2	5.7	61.0	55.0	1.9	4.8
19:45	66.2	56.3	1.8	0.3	59.3	52.4	1.7	2.6
19:50	63.7	55.8	2.5	0.5	57.3	50.9	2.0	1.5
19:55	61.5	54.7	2.2	1.1	55.9	49.9	1.4	1.0
20:00	59.8	53.6	1.7	1.1	54.3	48.9	1.6	1.0
20:05	57.7	52.0	2.1	1.6	52.5	47.6	1.8	1.3
20:10	55.9	50.6	1.8	1.4	51.0	46.4	1.5	1.2
20:15	54.2	49.1	1.7	1.5	49.8	45.2	1.2	1.2
20:20	52.4	47.5	1.8	1.6	48.4	43.8	1.4	1.4
20:25	51.0	46.0	1.4	1.5	47.0	42.6	1.4	1.2
20:30	49.5	44.7	1.5	1.3	45.6	41.4	1.4	1.2
20:35	48.0	43.2	1.5	1.5	44.2	40.0	1.4	1.4
20:40	46.6	41.9	1.4	1.3	43.0	39.0	1.2	1.0
20:45	45.1	40.5	1.5	1.4	41.9	38.0	1.1	1.0
20:50	43.8	39.0	1.3	1.5	40.7	36.8	1.2	1.2
20:55	42.7	37.9	1.1	1.1	39.7	35.8	1.0	1.0
21:00	41.6	36.6	1.1	1.3	38.7	34.7	1.0	1.1
21:05	40.5	35.5	1.1	1.1	37.7	33.7	1.0	1.0
21:10	39.4	34.3	1.1	1.2	36.5	32.6	0.8	0.9
21:15	38.2	33.1	1.2	1.2	35.6	31.7	0.9	0.9
21:20	37.0	31.9	1.2	1.2	34.7	30.7	0.9	1.0
21:25	36.1	31.0	0.9	0.9	33.9	29.9	0.8	0.8
21:30	35.1	30.1	1.0	0.9	33.1	29.1	0.8	0.8
21:35	34.0	29.0	1.1	1.1	32.2	28.2	0.9	0.9
21:40	33.0	28.1	1.0	0.9	31.5	27.4	0.7	0.8
21:45	32.0	27.2	1.0	0.9	30.6	26.5	0.9	0.9
21:50	31.1	26.1	0.9	1.1	29.4	25.4	1.2	1.1
21:55	30.2	25.2	0.9	0.9	28.7	24.4	0.7	1.0
22:00	29.4	24.3	0.8	0.9	27.7	23.6	1.0	0.8
22:05	28.5	23.3	0.9	1.0	26.8	22.7	0.9	0.9

22:10	27.7	22.5	0.8	0.8	26.0	22.0	0.8	0.7
22:15	27.0	21.8	0.7	0.7	25.4	21.3	0.6	0.7
22:20	26.0	20.9	1.0	0.9	24.5	20.5	0.9	0.8
22:25	25.3	20.2	0.7	0.7	23.6	19.8	0.9	0.7
22:30	24.6	19.5	0.7	0.7	23.0	19.1	0.6	0.7
22:35	23.8	18.7	0.8	0.8	22.5	18.4	0.5	0.7
22:40	23.0	17.9	0.8	0.8	21.8	17.8	0.7	0.6
22:45	22.3	17.2	0.7	0.7	21.2	17.2	0.6	0.6
22:50	21.6	16.5	0.7	0.7	20.5	16.7	0.7	0.5
22:55	20.8	15.8	0.8	0.7	19.8	16.2	0.7	0.5
23:00	20.0	15.1	0.8	0.7	19.2	15.5	0.6	0.7
23:05	19.4	14.5	0.6	0.6	18.7	15.0	0.5	0.5
23:10	18.8	13.9	0.6	0.6	18.2	14.4	0.5	0.6
23:15	18.0	13.2	0.8	0.7	17.4	13.8	0.8	0.6
23:20	17.3	12.5	0.7	0.7	16.8	13.2	0.6	0.6
23:25	16.7	12.0	0.6	0.5	16.1	12.7	0.7	0.5
23:30	16.1	11.4	0.6	0.6	15.6	12.1	0.5	0.6
23:35	15.6	10.8	0.5	0.6	14.9	11.5	0.7	0.6
23:40	15.2	10.3	0.4	0.5	14.2	11.0	0.7	0.5
23:45	14.6	9.7	0.6	0.6	13.9	10.5	0.3	0.5
23:50	14.0	9.3	0.6	0.4	13.2	9.9	0.7	0.6
23:55	13.4	8.7	0.6	0.6	12.6	9.3	0.6	0.6
0:00	12.9	8.2	0.5	0.5	12.2	8.8	0.4	0.5
0:05	12.4	7.7	0.5	0.5	11.6	8.3	0.6	0.5
0:10	12.0	7.3	0.4	0.4	11.2	7.9	0.4	0.4
0:15	11.5	6.7	0.5	0.6	10.6	7.3	0.6	0.6
0:20	10.9	6.1	0.6	0.6	10.0	6.8	0.6	0.5
0:25	10.4	5.7	0.5	0.4	9.6	6.3	0.4	0.5
0:30	9.8	5.2	0.6	0.5	9.2	5.8	0.4	0.5
0:35	9.4	4.8	0.4	0.4	8.9	5.4	0.3	0.4
0:40	8.9	4.5	0.5	0.3	8.5	4.8	0.4	0.6
0:45	8.4	4.3	0.5	0.2	8.0	3.5	0.5	1.3
0:50	7.9	4.3	0.5	0.0	7.5	3.5	0.5	0.0
0:55	7.8	4.3	0.1	0.0	7.2	3.6	0.3	-0.1
1:00	6.8	4.1	1.0	0.2	6.5	3.5	0.7	0.1
1:05	6.5	4.2	0.3	-0.1	6.4	3.6	0.1	-0.1
1:10	5.6	4.1	0.9	0.1	5.7	3.5	0.7	0.1
1:15	5.7	3.9	-0.1	0.2	5.5	3.4	0.2	0.1
1:20	4.6	3.9	1.1	0.0	5.1	3.5	0.4	-0.1
1:25	4.3	4.1	0.3	-0.2	4.8	3.7	0.3	-0.2
1:30	2.9	4.2	1.4	-0.1	3.0	3.7	1.8	0.0
1:35	2.1	4.0	0.8	0.2	2.3	3.4	0.7	0.3
1:40	1.6	3.8	0.5	0.2	1.9	3.3	0.4	0.1
1:45	1.1	3.3	0.5	0.5	1.2	2.8	0.7	0.5

1:50	0.7	2.7	0.4	0.6	0.7	2.4	0.5	0.4
1:55	0.7	2.7	0.0	0.0	0.5	2.4	0.2	0.0
2:00	0.4	2.2	0.3	0.5	0.2	1.9	0.3	0.5
2:05	0.4	2.0	0.0	0.2	0.2	1.9	0.0	0.0
2:10	0.3	1.4	0.1	0.6	0.0	1.2	0.2	0.7
2:15	0.3	1.3	0.0	0.1	0.1	1.1	-0.1	0.1

从表 4 实验数据可以发现, 在冰柜的冷却条件下, 在开口蒸发实验的开始阶段, 高温水上下温差急剧扩大, 5 分钟内温差扩大最大超过 10°C 。高温水的底部温度在很短时间内就低于低温水的底部温度。但是在加上隔热膜垫面之后, 高温水的底部温度降温骤减, 之后经过几次读数开始稳定, 高温水的底部降温速度逐渐加大, 逐渐赶上了液面的降温速度, 即上下部在 5 分钟内的降温是基本一样的。有不一样的数据可能是因为温差造成的不稳定或电子温度计本身的不稳定误差造成的。这些数据的误差显然很多是属于仪器本身固有的偶然误差, 或不是系统误差所致。

高温水与低温水从 20.15 到 0.40 时刻的数据显示, 基本上处于均匀降温的状态, 共历时 4 时 25 分。其中高温水液面的温度从 54.2°C 降到 8.9°C , 共降低 45.3°C 。底部的温度从 49.1°C 降到 4.5°C , 共降低 44.6°C 。底部温度的降低幅度少于液面温度的降低幅度 0.7°C 。基本上可以判断属于同步降温。

其中低温水液面的温度从 49.8°C 降到 8.5°C , 共降低 41.3°C 。底部的温度从 45.2°C 降到 4.8°C , 共降低 40.4°C 。也是底部温度降低幅度少于液面温度的降低幅度 0.9°C 。也基本上可以判断属于同步降温。

进一步注意到, 在 20.15 时高温水的底部温度是 49.1°C , 大约相当于低温水的液面温度 49.8°C , 只是低温水略高 0.7°C 。但是, 到达 0.40 时刻时, 高温水的底部温度共降温 44.6°C , 低温水的液面温度共降温 41.3°C , 前者高出后者 3.3°C 。这个差别的原因显然是前者受到高温水的更高液面温度蒸发的影响或带动, 因此有更高的蒸发量, 导致了更快的降温。

所以结论是, 在蒸发引起上下液面同步降温的同时, 底部温度的降温速率在很大程度上取决于液面温度决定的蒸发速率。

3 蒸发引起上热下冷效应的实验

3.1 从整体蒸发推论上热下冷效应的存在

除了以上同步降温实验外, 笔者还有大量实验都观测到了蒸发引起的同步降温效应, 这个效应的普遍性可以说确定无疑地证明了整体蒸发定律的存在。但是, 也有部分实验也观测到了稍微偏离同步降温的现象, 即蒸发引起微弱的上热下冷的实验。

我们假定将液相的水体分为上、中、下相等的三部分。在存在内部整体蒸发的情况下, 那么就必然存在内部向液面的蒸发散热过程, 这样上部的水体在向上蒸发散热的同时, 也得到中部水体的蒸发散热的补充。同样, 中部的水体在向中部蒸发散热的同时, 也得到下部水体的蒸发散热的补充。因此相较于下部水体而言, 中部水体的温度可能较高; 相较于中部水体而言, 上部水体的温度可能更高。依据这样的逻辑推论, 整体蒸发也有可能引起上热下冷的效应。可能仅仅是因为这个效应比较微弱, 可以忽略不计, 我们才观测到了同步降温效应。

也有一种可能是, 上述推理中整体蒸发引起上热下冷的效应, 也有可能被液面的温差散热引起的上冷下热效应所抵消。我们通过简单的实验发现这样一个现象: 在室温的环境条件下, 用保温杯盛满一杯高于环境温度较高的开水, 然后静置降温, 测量液面附近的温度变化, 可以在 2mm 到 10mm 的范围内, 观测到上冷下热的温度梯度, 温差约为 1°C 到 2°C 左右, 由于越靠近液面的温度显示的读数越不稳定, 跳跃很大, 所以难以测得准确的数据。大约在超过 10mm 的深度之后, 温度在随着时间的进程均匀下降的过程中保持稳定相等, 在多种情况下也可能出现小幅度的上热下冷的温差。

笔者认为这个液面附近的温度梯度或主要是由于空气环境与液面之间温差散热造成的, 或主要不是由于蒸发散热造成的, 蒸发造成的结果主要是距离液面 20mm 深度以下的同步降温。这是液相整体蒸发定律可以预期的现象。

可见, 温差散热引起的上冷下热效应或只是在距离液面很短的深度内存在。因为这样, 我们在测

量液面温度的时候通常都避免探头深入液面过浅，而在 20-30mm 的深度测量，以避免温差散热引起的上冷下热效的影响。

尽管如此，笔者还是在一些实验中观测到了蒸发引起上热下冷效应的微弱存在。可以预期，在我们加大液相深度的情况下的类似实验中，可能观测到更加明显的上热下冷的效应。这个也是与液面蒸发理论是矛盾的现象，因为根据液面蒸发的预期，在保温容器中在侧面和底面隔热良好的情况下，无论如何不可能出现上热下冷的效应。如果存在也只是对流引起的暂时性的现象。由此可见，如果我们的实验观测到了上热下冷的效应，就是对存在整体蒸发定律的更进一步的证明。

3.2 酒精在冰柜内的蒸发引起上热下冷效应的实验

笔者在用酒精在冰柜内进行的在冷却条件下的蒸发实验中，发现了蒸发引起的微弱的上热下冷效应。这个实验使用的酒精为纯度为 98%的工业酒精，初温为 23.8℃，测温仪是人民电器牌双通道测温仪，冰柜是奥克斯牌展示柜。容器为圆形保温罐，直径 120mm，高 150mm，容积 1400ml，为双层玻璃真空内胆。实验时探头距离上液面约 20mm,下探头距离底部液面约 15mm，上下探头距离 100mm，实验测量得到的数据见表 5。

表 5 数据显示酒精蒸发引起了明显的上热下冷效应，因为没有一个数据显示存在相反的效应，这说明温差不是随机的。

这个实验数据还显示上热下冷效应有一个逐渐

增大的过程，最后比较稳定在 0.3℃。

之所以酒精蒸发比相同条件下的水蒸发引起了更加明显的上热下冷效应，是因为酒精的蒸发速度是水的 5 到 8 倍。

这个实验又一次证明了整体蒸发定律不仅适用于水的蒸发，也适用于一般的液相蒸发。故整体蒸发定律叫液相整体蒸发定律是完全适当的。

3.3 保温桶水的蒸发引起上热下冷效应实验

笔者用学校（江苏省扬州中学）食堂的保温茶水桶做这个实验，保温桶内径 35cm，外径 36cm，高 35cm，不锈钢材质。最初观测到了微弱的上热下冷的效应。后来考虑到保温茶水桶的不锈钢热传导系数比较大，利于传热，可能会削弱上热下冷的效应。后来就在茶水桶内侧面和底面刷一层隔热油漆。实验时放入自来水搅动均匀后静置 2 小时，用电子温度计测量水温得到一组室温和茶水桶上、中、下部数据，以后每隔 3 小时测温一次，数据结果见表 6。

表 6 数据显示：茶桶密闭（相对密闭，测温孔和水面上的空隙导致少量蒸发）时茶桶内水的表面温度与室温相当，只有微量蒸发，但是依然有水底温度低于液面的现象.说明在茶桶密闭情况下还是存在内部蒸发，气相水分子向上运动导致下部温度降低和上部温度较高。

在盖子打开的情况下，保温茶水桶内水体水面温度与室温相差 1.4℃-2.1℃.盖子闭合与打开时上下温差都为 0.3℃-0.4℃。

表 5 初温 23.8℃的纯度 98%酒精在奥克斯冰柜内的蒸发引起同步降温过程测温数据（实验 2.1）（2024/9/27 星期五）

酒精（保温罐 D120mm，H150mm，1400ml 双层玻璃真空内胆）							
测温时间 (2024/9/27)	上液面温 度 (℃)	底部温度 (℃)	上下液面温 差 (℃)	测温时间 (2024.9.27)	上液面温 度 (℃)	底部温度 (℃)	上下液面温 差 (℃)
20:45	23.8	23.8	0.0	22:15	5.3	5.2	0.1
21:00	19.8	19.7	0.1	22:45	1.4	1.2	0.2
21:15	16.2	16.0	0.2	23:00	0.0	-0.2	0.2
21:30	12.8	12.6	0.2	23:15	-1.9	-2.1	0.3
21:45	10.1	9.9	0.2	23:30	-3.5	-3.7	0.2
22:00	7.5	7.3	0.2	23:45	-5.1	-5.4	0.3
22:15	5.3	5.2	0.1	0:00	-6.3	-6.6	0.3
22:30	3.2	3.0	0.2				

表 6 保温茶水桶水的蒸发引起上热下冷效应实验数据表 (实验 2.2) (2024/8/19 星期一)

8.19 密闭茶水桶	16:00	19:00	22:00	8:20 盖子打开	16:00	18:00	20:00
室温 (°C)	31.0	30.3	30.3	室温 (°C)	31.0	30.5	30.3
上 (°C)	30.5	30.3	30.3	上 (°C)	28.9	29.0	28.9
中 (°C)	30.5	30.2	30.3	中 (°C)	28.8	29.0	28.7
下 (°C)	30.2	30.0	29.9	下 (°C)	28.5	28.7	28.6
上下温差 (°C)	0.3	0.3	0.4	上下温差 (°C)	0.4	0.3	0.3

这个实验结果用液面蒸发理论没有办法解释, 因为液面蒸发只能产生上冷下热的效应, 不可能产生相反的效应, 故这个实验结果只能用整体蒸发定律加以解释。

3.4 2 米管水的蒸发引起上热下冷效应实验

考虑到如果增加水体的高度, 水的蒸发引起上热下冷效应可能更加明显^[4], 故笔者(朱韵之, 冯跃春)想到用 2 米管作为容器做以上蒸发实验。用 108mm pvc 管制作 2 米高的容器, 外径为 108mm, 内径为 105mm。2 米管侧面和底面经过保温加工, 外侧增加一个保温膜层, 内侧面和底面刷一层隔热油漆。

实验分为两种情况读数: 上开口与上封口。封口方法是用塑料袋扎口。封口后在水面与塑料袋之间依然有空间, 实验数据见表 7。

表 7 数据显示, 在两种情况下 2 米管水上部温度都明显高于下部温度。上热下冷效应比保温茶桶的实验明显得多。上开口时上热下冷的温差范围为 0.5°C-1.4°C。封口后, 水的液面温度高于室温, 且上下温度差扩大, 达到 2.0°C-4.8°C。这显然是内部整体蒸发上升的蒸气堆积在液面附近的结果。

3.5 1 米管水的蒸发引起上热下冷效应实验 (实验 2.4)

以上实验是由朱韵之和冯跃春在扬州完成的,

笔者根据以上实验设备重新做了一个同样的设备, 并且采用更加严格的保温措施, 在福州重新做了这个实验。目前为止, 只是用其中的半截(1 米管)重做了这个实验, 用希玛牌(AS887)四通道高精度 K 型热电偶数显温度计测量上下四个位点的温度, 探头精度为±2.5%, 且是在全封闭保温的情况下定位测温。力求保持室内恒温, 且在水温略高于室温的情况下实验, 明显观测到从上到下从高温到低温的温度梯度。在室温与水温在 20°C 附近上下最大温差达到 0.7-0.8°C。由于保温效果不是十分理想, 因此在环境温度升高最大约 5°C 的情况下, 最大温差达到 2.3-2.4°C。无论是环境升温还是降温都没有出现相反方向的温差, 只有上热下冷的温差, 而且这样的温差持续了整个实验过程, 长达 15 天(见图 1)。

4 问题与讨论

4.1 对以上二大实验产生的一个问题的解释和讨论

以上在冷却环境下水的同步降温 and 上热下冷效应的实验, 看起来是互相矛盾的, 实际上并不矛盾, 而是互相补充的。应该说整体蒸发引起的上热下冷效应在逻辑推论上是必然的效应, 但是在实验上未必都能够观测到, 因为这个效应可能比较微弱, 而且受到液面温差散热引起的上冷下热效应的抵消作用, 才表现出更加明显的同步降温。

表 7 保温茶水桶水的蒸发引起上热下冷效应实验数据表 (实验 2.3) (2024/9/22 星期日)

上开口	日期 9/22	16:00	18:00	20:00	22:00	上封口 9/23	11:00	12:00	13:00
室温 (°C)	33.3	31.2	30.4	30.1	30.0	30.0	32.5	32.0	
上 (°C)	33.0	30.4	29.2	29.0	31.3	31.3	34.4	34.6	
中 (°C)	32.3	30.3	28.7	28.6	30.7	30.7	32.5	31.9	
下 (°C)	31.6	29.9	28.7	28.5	29.3	29.3	29.8	29.8	
上下温差 (°C)	1.4	0.5	0.5	0.5	2.0	2.0	4.6	4.8	



图1 实验设备图: a、b、c、d、e、f、g (顺序从上到下从左到右)

对于以上二大实验, 我们在这里可以提出这样一个问题: 在同步降温实验那里, 我们观测到了整体的同步降温效应, 如果存在非同步, 也是比较微弱的。这个现象似乎意味着整体的蒸发速度是均匀的。但是, 我们又在水量与蒸发量的关系实验那里看到, 相同液面的水量与蒸发量或蒸发速度的关系不是等比例的增加。这个现象意味着靠近液面的水量与远离液面的同样高度的水量产生的液面蒸发是不等的, 前者大, 后者小。这两个现象似乎是互相矛盾的, 我们该如何理解和解决这个矛盾呢?

对于这个问题, 可能的答案有两个: 一个是假定整体的蒸发是均匀的; 一个是假定蒸发速度不全是均匀的, 而是随着深度加深和液压加大, 蒸发速度也减小。

如果认为整体的蒸发是均匀的, 那么要产生这样一个现象: 相同液面的水量与蒸发量或蒸发速度的关系不是等比例的增加, 就只能认为远离液面的水量和高度产生的蒸发并没有都逸出液面, 而只是部分逸出了液面, 其余的部分在通过水体的中途重新被液化为液相水分子。且可以肯定, 对于远离液面的水体的蒸发来说, 发生蒸发相变后重新液化的水量要大于逸出液面的蒸发量, 且可能大很多; 越是远离液面的蒸发, 越大得多。但是重新液化的

结果是放出热量, 这个放出的热量会提高上部水体的温度, 其结果应该是水体上部的温度要高于下部的温度, 且这个效应应该比较明显才对。事实上也存在这个效应, 但是, 我们事实上观测到的上热下冷效应是比较微弱的, 主要是同步降温效应, 这个又是为什么呢?

这可能是因为这样的上热下冷效应大部分被由液面与空气的接触产生的温差散热造成的上冷下热效应所中和或部分中和。由此可以推论, 如果由液面与空气的接触产生的温差比较小, 则其温差散热就小, 其造成的上冷下热效应也比较小。相应的, 由内部蒸发产生的上热下冷效应就会比较大。

考察上文的三个蒸发引起上热下冷效应的实验可知: 其中的前两个, 都是在液面与空气的温差很小的情况下产生的。第三个实验——酒精在冰柜内的蒸发引起上热下冷效应的实验, 虽然是在冰柜内进行, 但是所使用的酒精是未经加热的常温以下温度较低的酒精。在这种情况下还是产生了上热下冷效应, 只能说明与酒精的蒸发速度快有很大关系。至于其他的同步降温效应实验, 绝大多数是用加热过的水和酒精做的实验, 其与室温空气以及冰柜环境的空气之间的温差都很大, 所以更明显地看到了同步降温效应。

其次, 如果假定蒸发速度不全是均匀的, 而是随着深度加深和压力加大, 蒸发速度也减小, 即整体蒸发具有非均匀性。这样相同液面的水量与蒸发量或蒸发速度的关系实验就容易理解了。但是, 这样对于同步降温效应的理解又可能会出现困难。

这种理解的整体蒸发的非均匀性可能会弱化上热下冷效应, 因为越是靠近液面的水体蒸发速度越快, 因此降温也越快, 但是由于它得到由下部蒸发传来的蒸气的液化放热的影响, 也会中和上部降温更快的结果, 达到同步降温的效果。

如此看来, 似乎前面两种理解可以兼容, 两种共同作用才产生了蒸发引起的同步降温效应和微弱的上热下冷效应。

4.2 上热下冷效应实验是否违背热力学第二定律

在同步降温效应的实验和上热下冷效应的实验中, 圆塑料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, 和 2 米管水的蒸发引起上热下冷效应实验, 特别值得引起我们的关注。这两个实验明显出现保温容器中底部的低温水的热量因为内部的整体蒸发而自发传给高温水的现象。而根据热力学第二定律, 热量不可能自发地从低温物体传到高温物体。可是我们在整体蒸发定律这里见到的明显事实是, 蒸发引起的热量传导是不以温差方向为转移的, 它的传导方向总是向上并指向蒸发出口。我们知道这里的整体蒸发无疑就是一个自发的过程, 可是这些实验明确显示出热量可以从低温的底部自发传递到高温的上部。这是否意味着在这里不适用于热力学第二定律呢? 由于这个实验中的上热下冷无疑是整体蒸发定律引起的, 这是否也意味着整体蒸发定律允许违背热力学第二定律的现象出现呢? 这是一个巨大的物理理论问题, 值得引起我们的关注。

笔者曾提出过蒸发产生的气泡现象是存在“麦克斯韦妖”的一个明显案例的命题, 也暗示了与整体定律定律相关产生的现象可能违背热力学第二定律或熵增定律的问题^[5]。

在热力学第二定律提出的时候, 只有液面蒸发引起液面降温的想当然理论, 并没有考虑到整体蒸发定律产生作用的这个基本事实, 在这种情况下热力学第二定律的提出留下这么一个漏洞也是可以理

解的事情。

可以肯定的是, 在考虑到以上可能是违背热力学第二定律的明显实验现象的时候, 如果我们基于对于接受传统理论的惯性思维一时难以接受新发现的实验事实, 那至少也应该在我们重新表述热力学第二定律的时候, 在界定其使用条件时要加上新的限定。

5 总结

通过考察总结以上二大类实验以及之前的水量与蒸发速度的实验, 我们可以得出的明确结论是: 液相整体蒸发定律的确得到了十分确定无疑的验证, 是一个明明白白的物理定律。从这个定律回看液面蒸发理论, 就会发现, 严格说那其实并不是一个真正的“理论”, 而只是一个对简单现象想当然的结果, 它实际上并没有得到任何实验的明确验证, 也不曾有人对这个问题发生过疑问, 并试图在对疑问加以验证之后才得到的理论。这可以说是物理学的一个巨大的漏网之鱼, 现在终于被我们捕到了。

鉴于液相整体蒸发定律关系到在地球表面拥有最大存在面积的物质——水, 也关系到与我们生命关系最大的物质之一——水, 而且涉及水的基本性质和结构问题, 因此可以说液相整体蒸发定律的发现是一个重大的物理科学的发现, 比起任何基本物理定律的发现的发现的重要性都毫不逊色。如果将这个发现与我们在接下去的一文《基于整体蒸发定律解开姆潘巴效应之谜》^[6]中所阐述的姆潘巴效应所体现的一般规律的发现结合起来, 其理论意义就更大了。因为姆潘巴效应自从被一个中学生发现以来, 已经困扰物理学界整整 60 年而不得其解。如果考虑到液相整体蒸发定律与经络之谜的紧密联系, 这个发现的意义就更加非同寻常了。因为这个发现太简单, 最后可能会冲破任何人的不承认, 因为他们的反对找不到任何确实的实验证据, 而我们的实验证据和理论证据却不计其数。

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, 2023-02-20(B06).
- [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, 6(2): 26-36.

- [3] 江正杰, 王全杰, 戴振宏, 等. 液态水中含有气态水的实验验证——水的蒸发量与水量的相关性理论的验证实验及其数据分析报告[J]. 大学物理实验, 2017, 30(4): 77-80.
- [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, 2025, 5(1).
- [5] 江正杰. 论蒸发过程产生的蒸汽泡现象是存在“麦克斯韦妖”的一个明显案例[J]. 科技风, 2023(05): 71-75.
- [6] 江正杰;朱韵之;冯跃春.基于整体蒸发定律解开姆潘巴效应之谜[J].环球科学与工程.2025,2 (7) .

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS