

冰膜下蒸气泡的发现——兼论结冰过程的“沸腾”现象

江正杰

山东工商学院人文与传播学院，山东烟台

摘要：基于液相整体蒸发定律对于蒸发的解释，实验发现蒸发过程的本质是缓慢的沸腾现象，进而可以预期：冷却结冰过程中会不断析出水蒸气，形成蒸气泡。实验事实发现，在液面先开始冻结的冰膜中和冰体中都会出现被冻结的蒸气泡现象。刚开始结冰不久的冰膜下会累积未冻结的小蒸气泡，将容器稍微倾斜就会发现小蒸气泡会汇集成较大的蒸气泡，而且初温较高的热水比之初温较低的冷水，其冰膜下出现的气泡更大。冰膜和冰体中都会发现大量的小气泡和较大的气泡。封口的水罐中在冷却的条件下结冰的结果，冰体除了有大量被冻结的小气泡，还有大量的大气泡。这显然不是空气泡，而是被冻结的蒸气泡。由于结冰过程中液相水分子要先结冰，这样气相自由水分子就可能被析出，因此在液面结冰过程可以观察到类似“沸腾”的冒泡现象，特别是在快速冻结过程中会在冰膜上出现冒泡现象，并在液面留下冻结的痕迹。热水结冰过程留下的这个冒泡的痕迹比之冷水要明显得多。自然的湖中和海边也会出现冰面气泡现象和结冰过程中的“沸腾”现象，这些现象都需要一个新的解释理论。油滴界面出现静电场现象是由油滴的油水界面之间因水的蒸发而累积的一层水蒸气造成的，由此导致介观界面新特性（氢键弱化、四面体无序）和电场增强化学活性。

关键词：整体蒸发定律；姆潘巴效应；缓慢沸腾现象；蒸气泡现象；冰面气泡现象

The Discovery of Vapor Bubbles under Ice Film——On the “Boiling” Phenomenon of Icing Process

Zhengjie Jiang

School of Humanities and communication, Shandong Technology and Business University, Yantai, Shandong

Abstract: Based on the explanation of evaporation according to the law of liquid-phase overall evaporation, experiments have revealed that the essence of the evaporation process is a slow boiling phenomenon. It can thus be anticipated that during the cooling and freezing process, water vapor will continuously separate out, forming vapor bubbles. Experimental observations have confirmed the presence of frozen vapor bubbles both in the initially frozen ice layer and within the ice mass. Shortly after freezing begins, unfrozen small vapor bubbles accumulate

* 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，物理化学，引力学，中国文化经典研究、经典教育学。

beneath the ice layer. Tilting the container slightly causes these small vapor bubbles to coalesce into larger ones. Moreover, compared to water with a lower initial temperature, hot water with a higher initial temperature produces larger bubbles beneath the ice layer. Numerous small and large bubbles are observed both in the ice layer and within the ice mass. In sealed water containers frozen under cooling conditions, the ice mass contains not only a large number of frozen small bubbles but also many large bubbles. This is clearly not merely an air bubble, but rather a frozen vapor bubble. During the freezing process, liquid water molecules freeze first, which may cause gaseous free water molecules to separate out. As a result, a “boiling”-like bubbling phenomenon can be observed during the surface freezing process. Particularly in rapid freezing, bubbling occurs on the ice layer, leaving frozen traces on the surface. The traces of bubbling left during the freezing of hot water are much more pronounced than those left by cold water. Similar phenomena of ice surface bubbles and “boiling” during freezing also occur in natural lakes and coastal areas, all of which require a new theoretical explanation. The electrostatic phenomenon observed at the oil-droplet interface arises from a layer of water vapor that accumulates between the oil and water phases as water evaporates. This gives rise to novel mesoscopic interfacial properties—such as weakened hydrogen bonding and tetrahedral disorder—and enhances chemical activity through the interfacial electric field.

Keywords: Integral evaporation law; Mpamba effect; Slow boiling phenomenon; Vapor bubble phenomenon; Ice bubble phenomenon

1 常温常压下水的缓慢“沸腾”现象的发现

笔者已经论证了一项新的发现：一般的蒸发过程的本质是缓慢的沸腾现象——常温常压下也会发生的水的缓慢“沸腾”现象[1]。这样的缓慢“沸腾”现象与水达到100℃时发生的沸腾现象相比，除了气泡微小之外，没有任何本质性的区别，两者一样是在整体发生的蒸发行为，而不是前者在液面发生，后者在水体内部发生。这个是液相水整体蒸发定律所告诉我们的。

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[2,3]，也可以通过蒸发过程通常会生成可见的蒸气气泡现象来验证[4]。笔者的蒸发实验还发现，在量筒或其它容器内水的蒸发过程中，从液相水内部发生的蒸发过程会形成微小的气泡，并上升到液面，这些小气泡也常常会停留在量筒或容器壁形成更大的气泡。这样的气泡要是想当然，就会认为是空气

泡，实际上只要想到以上液相水整体蒸发定律，就会发现不可能全是空气泡，而应该主要是水蒸气气泡。为了验证是蒸气气泡还是空气泡，笔者还在蒸气气泡消失的量筒里冲空气，试图增加水中的空气含量，结果并没有发现新的气泡生成。这个现象说明不能想当然地纯粹用空气来解释蒸气气泡现象[5,6]。

另外，笔者在冷却过程中也发现了蒸气气泡现象。根据液相水整体蒸发定律，冷却过程也是整体同步的冷却，空气在水中的溶解度是随着温度的降低而增大的，因此水的冷却过程是不可能析出空气的，所以蒸发过程产生的气泡只能理解为主要是水蒸气气泡。

蒸发作为极为缓慢的沸腾现象也可以从以下实验中得到验证：如果我们将充满水的量筒底部放在低于100℃的温热底座上加热，使得量筒的上下液面存在较大的温差，这样的缓慢沸腾现象将更加明显，即可以观测到更多更快上升的小蒸气气泡。这个

现象除了气泡比较小和温度较低外，与100℃的沸腾比较起来没有任何其它区别，因此，可称之为“低温水的缓慢沸腾现象”没有任何不妥之处。所以，蒸气气泡的发现实质上可以说是“常温常压下水的缓慢沸腾现象”的发现[7]。

就蒸发过程必然伴随着蒸气气泡现象而言，与沸腾没有实质上的区别。因此，结论是常温常压下的液相水也会有极为缓慢的“沸腾”现象。这是许多人不愿意承认的，可是这是一个简单的实验现象。

2 冰膜和冰体中的蒸气气泡现象

从以上实验现象出发，我们可以从理论上推测：在冷却环境下热水结冰时应该是从液面先结冰，冷水也是如此。液面先结冰的原因在于液面积积了一层蒸气气泡。至于在姆潘巴效应实验中热水先于冷水结冰的原因，笔者想到的一种可能在于，热水的液面比冷水的液面先结冰，进而在于热水的液面比冷水的液面积积了更多的蒸气气泡。因为热水液面积积了更多的蒸气气泡，其所形成的液面层中气泡含量就更大，因而密度（或热容量）也更小，其在接触冷空气的情况下就更容易结冰，因此冰点可能更高。姆潘巴效应的一种可能就是由这样造成的。这种情况下的姆潘巴效应可能不仅热水液面先结冰，而且水体本身也会有更多的水蒸气含量，也可能更早结冰。

这样的推测能不能得到实验验证呢？以下图1中各图是笔者曾经做的四个姆潘巴效应实验出现的液面冰层和水体冰层中出现小蒸气气泡的现象。

以上图2中冰体含有气泡的地方大多呈现白色。有的地方显得比较透明，是因为靠近容器壁的地方先结冰，而内部没有结冰。即使是显得比较透明的边层的冰的内部，细看也可以看到含有大量的小气泡。

3 冰膜层下和冰膜层中的蒸气气泡现象

由以上这些现象我们可以推测，这些蒸气气泡最初是先累积在冰膜层下，然后才随着结冰进入冰膜，因此不仅冰层内部累积了大量蒸气气泡，而且在

这些已经结冰的冰膜层下也会累积大量的蒸气气泡。这个现象是笔者偶然发现的。



图1. 冰膜与冰体内的小气泡

一次在姆潘巴效应实验出现冰膜之后几十分钟，将容器拿出来微微倾斜之后发现有大气泡的生成。这个现象引起了笔者的注意，以后一旦出现冰膜实验结束之后，都会观察到冰膜之下是否还有气泡，结果发现没有例外（见图2a、b、c、d）。虽然最初观察的时候没有发现气泡，但是在微微倾斜的情况下就出现了气泡，说明这个气泡是由冰膜之下最先看不见的小气泡汇集起来的。汇集起来的气泡一般都是热水杯的气泡大于冷水杯的气泡。这个现象足以证明热水杯的水的液面之下有更多气泡。笔者将汇集起来的气泡又放入冰柜之中继续冷却，可以发现这个大气泡会被冻结在冰层里不动了（见图2f、g）。

4 冰体中的大蒸气气泡现象

在以上实验结束的时候，结冰过程通常并没有结束，常常只是在出现冰膜后就结束实验。一次，笔者将正在结冰的容器盖好盖子放入冰柜，直至其彻底冻结以制作冰块。后来没有使用这些冰的时候要加以处理，笔者将这些容器内的冰倒出来，发现其内部也存在大量冰冻住的较大的气泡，稍微融

化部分之后，整个冰体呈现出极为不规则的冰渣状，显示内部气泡留下的空洞很大（见图3）。说明在结冰过程中内部形成了大量气泡，而且还有小气泡合成较大气泡的现象。应该正是这些大小气泡减小了水在结成冰后的密度。正是因为因为在结冰过程中没有蒸发的出口，才导致小蒸气泡累积成大气泡。

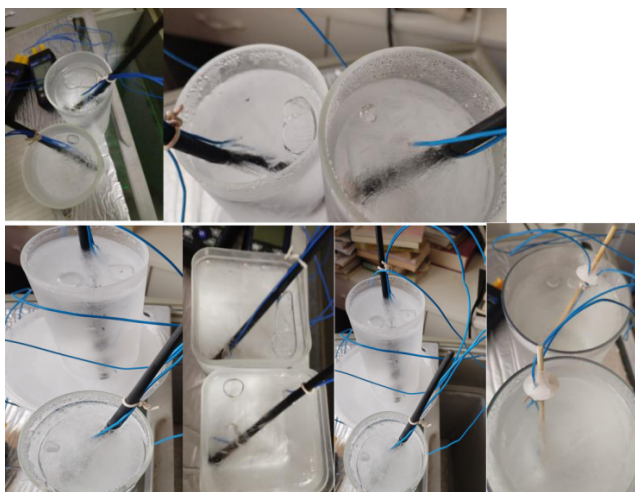


图2. 冰膜下小气泡汇集起来的大气泡（从左到右从那个上到下a、b、c、d、e、f、g）



图3. 这封口后结冰的冰体内的大蒸气泡现象



图4. 结冰过程中的类似“沸腾”现象（a、b、c、d）

5 结冰过程中的“沸腾”现象

我们在前文已经提出了基于物态相变过程中高低动能水分子的分化模型，这个模型对于结冰过程的描述是这样的：结冰并非只是单纯的高动能水分子的减速过程，而同时应该是高低动能水分子的分化过程。结冰开始之后，首先与冰核结合的是最低动能的水分子。其实它们也可能包含作为液相单元结构核心的强氢键水分子，是本质上的液相中的固相水分子结构。这样结冰过程就会在一段时间内析出剩余的较高动能的水分子，它们包括自由态的液相水分子和气相水分子。其结果将会呈现两个现象：

一是水温会在结冰过程中显示短暂的升温现象。这一个现象在笔者进行的任何姆潘巴效应的实验中通过测量上下液面的温度都观察到了。

二是这些聚集的高动能的气相水分子会在一段时间内聚集，密度加大，进而形成蒸气泡，形成一个短暂的类似于沸腾的蒸气泡生成现象。

由此我们可以预期，在冰膜生成之后，其下将在短时间内累积大量生成的蒸气泡，这些气泡累积到一定程度可能冲破冰膜层，形成“类沸腾”现象。这个现象将会在完全冻结后留下其痕迹，即冰面将会显示凹凸不平的状态，而且更多和更明显的“类沸腾”现象和及其结冰后留下的痕迹情况将会在更热的水更急剧降温的冰面上出现。

笔者带着这个预期真的观察到了这个现象。在姆潘巴效应实验结束之后，果然发现了这样的现象：冷水的冰面较为平坦，而热水形成的冰面则可

以看到许多突起点，这可能是因为冒泡留下的痕迹。这个就是结冰过程中的“沸腾”现象的一个实验验证。（见图4ab、c两组对比，两组冷热水结冰冰面的对比显示：冷水结冰冰面较光滑（a、c左），热水结冰冰面显得凹凸不平（b、c右），说明后者在冰面结冰过程中可能经过了冒泡的过程）。

6 自然中的冰面气泡现象和结冰过程中的“沸腾”现象

冰面气泡现象不仅可以在实验中产生，还可以在自然中发现。如下图5可以说的结冰过程中的“沸腾”现象的经典图片。图5（a、b）是自媒体博主自拍的冻结的冰面气泡现象。不仅靠近冰面处有气泡，甚至于其下深处也有整个正在上升中的气泡被冻结的景观（图5c）。

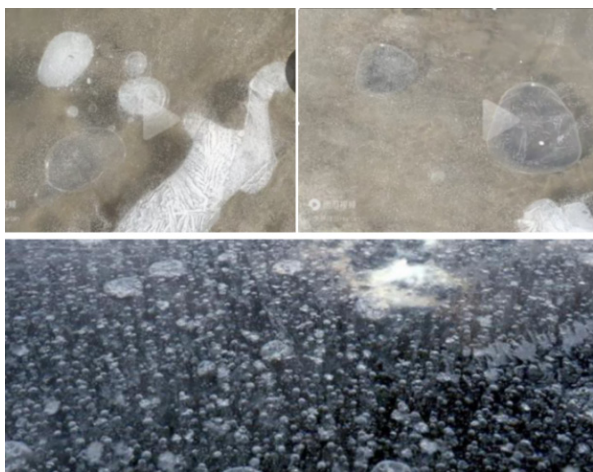


图5. 自然中的冰面气泡现象和结冰过程中的“沸腾”现象
(a、b、c)

进入天气寒冷的秋冬季节，俄罗斯贝加尔湖上和我国黑龙江的漠河上以及新疆博尔塔拉蒙古自

治州的赛里木湖等地方都会出现一年一度的冰气泡景观，冰面下出现一大片多层气泡，隔着冰面反射出白色和银色的奇异光芒，看起来甚是壮观，犹如人工雕刻一般（见图6）。

对于图6这个现象的流俗的解释是：尽管看起来很像是空气泡，但实际成分并非如此简单，气泡中的物质是高浓度的甲烷气体，还掺杂着少量二氧化碳气体，所以才会形成层叠结构。冰面气泡比较多说明下面有鱼，有些气泡是水池散发出来的沼气泡。贝加尔湖周围的伊尔库茨克当地人将它称为“甲烷气泡”。

有的网友这样解释上述现象：（1）冻结成冰后，形成晶体，使冰中出现了空隙，故使冰的密度变小；（2）水冻结成冰后，水中溶解的气体被迫析出，形成微小的气泡，出现在冰中，使冰的密度变小。如果你将自来水装入矿泉水瓶中，然后再放到冰箱里，现象就很明显；（3）河水冻起来是从上往下的，先是河面冻了，有鱼吐气，气出不去，河面开始冻了，下去就会有气泡了。

但是，关于气泡是甲烷气体或是水中溶解的气体被迫析出的说法，这样的解释似乎没有得到科学研究的证实，笔者没有查到这方面的文献。是否笔者基于物态相变过程中高低动能水分子的分化模型更为合理一些，留待更专业的实验研究确定。

7 冰面气泡现象与结冰过程发生的“沸腾”现象的解释

笔者认为可以专门对这个问题展开科学研究。依据笔者本文的观点，冬天湖面出现这些现象并非



图6. 自然中的冰气泡景观

偶然，应该与结冰过程发生的“沸腾”现象有关。如果仅仅是与“甲烷气泡”相关，为什么只是在冬天发现呢？按理说冬天气温最低，有机物的化学反应处于最低水平，一般不至于在这个时候观察到大量的气泡。如果认为是空气的析出，更是没有道理。因为随着温度的降低，空气的溶解度升高，怎么可能析出空气呢？

我们现在看到的图4的现象是临近结冰过程会有类似沸腾的现象发生，而且是越是从高温的热水开始冷却，这样的现象越是明显。这是因为结冰过程中，首先固化的是缔合分子或分子团形式的水分子，这类分子本质上已属于固相，而自由气相水分子就被析出成为水蒸气。这就是说，生成水蒸气的不一定就是高动能的水分子，也可能是最自由的气相水分子，这样自由的水分子聚集起来就会形成水蒸气。

这样我们也就找到了结冰时的沸腾现象与100℃时的沸腾现象之间的区别在于，前者不要求达到沸腾的温度，而只是要求液相内部的自由气相水分子的聚集。由此可知，这样的自由水分子自然在处于液相水分子之中时就是气相的水分子了。

8 关于液相水中水分子基本结构的 basic 解释模型

笔者从整体蒸发定律和姆潘巴效应的研究中总结出的关于液相的一般结构是：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。更具体地说，从液相单元结构的核心沿着水分子链和水线，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。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，液相水中存在越多自由液相水分子，其过渡转化到气

相水分子的速率就会越大，进而整体蒸发速率也越大[8-13]。

可以用这个解释模型来理解冰面气泡现象与结冰过程的“沸腾”现象：液相内的气相水分子主要是以自由水分子的形式存在，随着温度变化，液相水分子与气相水分子的数量比例也发生变化。温度升高，越来越多的液相水分子转化为气相水分子，气相自由水分子数量不断增加，故蒸发加强。液相中气相自由水分子增加的底线是与一定温度对应的饱和蒸气压的水蒸气含量相等。与温度升高的同时，液相水分子含量降低，液相水分子的四面体结构逐渐瓦解，结果是留下的弱氢键和无氢键液相水分子含量还是相对增加，转化为气相自由水分子的数量也不断增加，故蒸发加强。

随着温度降低，液相水分子转化为气相自由水分子的数量也不断减少，气相自由水分子也相应地减少，蒸发减慢。气相自由水分子减少的底线也是与一定温度对应的饱和蒸气压的水蒸气含量一致。与温度降低的同时，处于液相单元结构核心的液相水分子的四面体结构不断增长，导致液相水分子含量也减小，结果是转化为自由气相水分子的数量也相对减小，故蒸发减缓。如果降温的速度太快，如进入结冰的过程，液相水分子与气相水分子发生分化，气相水分子将会被快速析出，形成蒸气泡，甚至可能发生类似沸腾的现象。

9 油滴界面水的静电场揭秘

水在疏水界面处的行为是困扰科学家上百年的基础科学问题，涉及化学、生物学、材料学、地质学、气象学和工程学等多个领域。近年来发现的水微滴上的奇妙化学和接触电催化就明显跟界面水有关。

最近网上有一篇题为《水最熟悉的陌生面：闵玮团队及合作者揭秘油滴界面水的超常活性》报道说：

2025年3月19日，来自哥伦比亚大学闵玮教授团队与加州大学伯克利分校Teresa Head-Gordon教授团队在Nature上发表了文章《Water structure and

electric fields at the interface of oil droplets》[9]（油滴界面处的水结构与电场）。报道说：“该研究系统揭示了油-水介观界面水分子的微观无序结构及其伴随的超强静电场效应，在光谱观测技术上破解了困扰学界三十余年的困局，挑战了传统教科书中对疏水界面‘惰性’属性的固有认知，为化学催化、生物医药、绿色能源，环境工程等领域开辟了新的思路。”

“物理化学界在过去三十余年间一直使用和频生成光谱（SFG）技术来研究界面水，但此法有诸多固有缺陷，以至于对界面水的行为一直存在争论。闵玮团队大胆摒弃了SFG,开创性地将高分辨率拉曼光谱与多元曲线分解算法（Raman-MCR）相结合——通过将光谱信号以极高的信噪比分解为溶剂本底与溶质相关（SC）成分，首次实现了对油-水乳液体系中仅纳米厚界面层的精准测量。”

“实验数据显示（图7），油滴界面处 3250cm^{-1} 的OH伸缩振动特征肩峰几乎完全消失。该峰位通常对应强氢键网络与高度有序的水分子四面体结构，其消失直接证明界面水呈现显著无序化。分子动力学模拟进一步证实，界面处约25%的水分子存

在未成键的‘自由’悬挂OH基团。这种结构特征与经典疏水界面理论预测的‘类冰有序层’形成鲜明对比。”

“研究中最具冲击力的发现来自对界面静电场的定量测量。通过分析自由OH键 3575cm^{-1} 的共振红移现象，团队计算出油滴界面存在 $40\text{-}90\text{MV/cm}$ 的极端静电场，其强度甚至接近生物酶活性位点的典型电场强度（约 100MV/cm ）。这种超强电场被发现与油滴表面 ζ 电位直接相关。油滴带电是一个普遍存在的物理现象，其机理可能与摩擦起电有关。当研究人员调节将油滴 ζ 电位从 -60mV 降至 -20mV 时，红移量随之减少，证实电荷分布是电场产生的核心机制。尽管具体分子起源仍需深入探索，现有证据指向界面氢氧根吸附、油-水电荷转移等多重因素的协同作用。”

我们现在专心注视上文中说的这一句话“研究中最具冲击力的发现来自对界面静电场的定量测量”。由此笔者就立刻判断，这个现象是由油滴的油水界面之间因水的蒸发而累积的一层水蒸气造成的。水因蒸发后在向界面移动与液相发生摩擦的过程中生成了电荷，从而累积在界面的水蒸气（也含

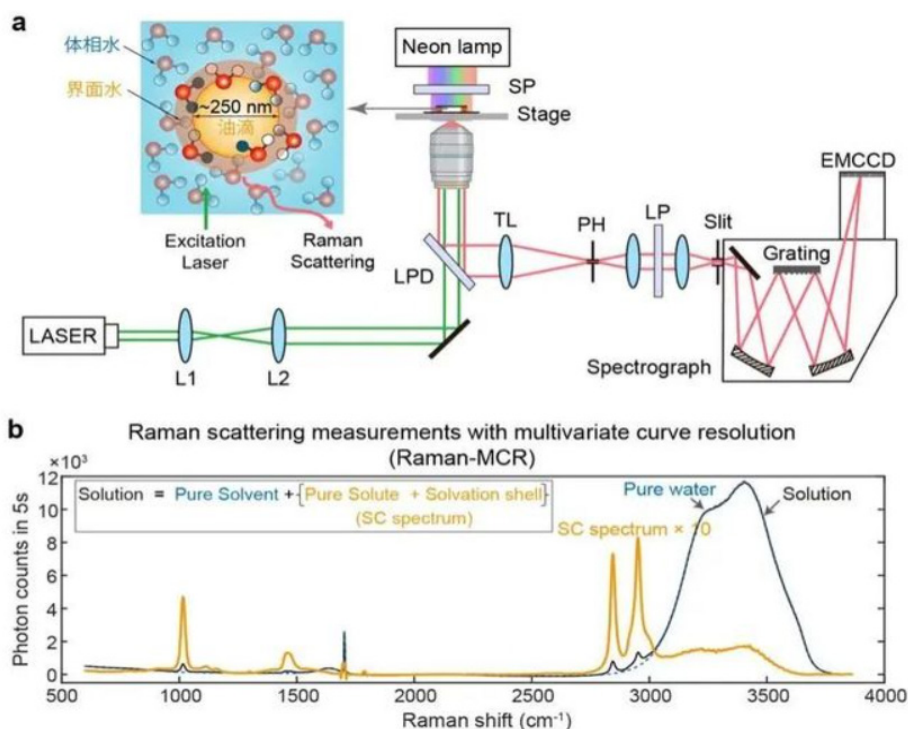


图7. 油滴界面静电场的定量测量

空气)层两端的油水层生成了静电场。另外,因为水、空气和油的介电常数差异(水约80,油2-5,空气 ≈ 1),空气的介电常数最小,故会隔离电荷,导致界面极化,产生局部电场。

在液相油与液相水之间生成水蒸气和空气混合的气相层的证明就是:“实验数据显示(图7),油滴界面处 3250cm^{-1} 的OH伸缩振动特征肩峰几乎完全消失。该峰位通常对应强氢键网络与高度有序的水分子四面体结构,其消失直接证明界面水呈现显著无序化。”

高度有序的水分子四面体结构是液相单元结构(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)核心的固相分子一层的结构特征,而界面水呈现显著无序化则是液相单元结构外层——气相分子的结构分布。由于实验对象就是一个类球体的油水液滴,与液相单元结构类似,所以有可能两者发生同构的结构调整,即液滴中心更多聚集核心固相分子结构的质量比重更大的液相单元结构,另一方面,液滴边缘则分布更多作为液相单元结构的外围——气相分子结构的质量比重更大的液相单元结构。这样的液滴结构分布也同时是液滴发生内部整体蒸发的自然结果。即导致:

(1) 介观界面新特性:与小分子疏水界面(氢键增强、四面体有序)相反,油滴界面($\sim 250\text{nm}$)表现出氢键弱化、四面体无序。

(2) 电场增强化学活性:50MV/cm电场可使

反应速率加速3000倍以上,可能解释微液滴化学中 10^3 - 10^6 倍的反应加速现象。

(3) ζ 电位起源:虽分子机制未明(氢氧根吸附?接触起电?),但电场主要作用于自由OH,氢键水分子受其影响较小。

参考文献

- [1]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.
- [2]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.
- [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,2017,30(4): 16-22.
- [4]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.
- [5]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): 16-22.
- [6]江正杰.基于液相水内部存在空气和水蒸气气相空间的假定定量解释水的反常膨胀现象[J].环球科学与工程,2025,2(7):1-8.
- [7]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.
- [8]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(8).
- [9]Min W, Head-Gordon T. Water structure and electric fields at the interface of oil droplets[J]. Nature. 2025,3:1-14.

