

上普遍采用一种特制的铂浆制造薄膜, 由于禁运, 我们无法得到这种材料. 便改用蒸发溅射制造薄膜, 虽然麻烦但形成的薄膜品质更高.

问: 在自制薄膜电阻温度计的时候, 当时没有条件使用国际上的特制商品铂浆制造金属薄膜, 采用真空溅射工艺, 请问这种工艺怎样制成当时研究所需薄膜电阻温度计?

俞: 薄膜电阻温度计是自己制作的, 到现在为止也是自己做. 因为性能不够稳定, 很难成为商品. 我们选定首先发展瞬态表面热流率测量技术. 当时国外都采用特制的铂浆制造金属薄膜: 就是把白金溶化后刷在玻璃底座上, 再经过烘烤, 金属膜便制成了. 我们无法得到这种材料, 只好采用真空溅射工艺. 这种工艺是将白金放在真空里面, 在高电势差条件下, 让白金的分子溅射在底座上形成薄膜. 用这种方法制作电阻温度计工艺比较麻烦, 但膜厚可控, 均匀性好, 品质更好.

电阻温度计输出的信号, 需要数值计算才能得到表面热流率, 我们自主研发成热电模拟网络, 从而可以实时测出表面热流率. 为满足各种需求, 我们接着又在实验室内研制成耐冲刷的快速反应铜箔量

热计和小尺寸同轴热电偶. 以后我们的经验推广到国内有关单位, 90 年代我将这种制造工艺介绍给德国亚琛激波实验室, 他们现在将自己制成的传感器卖给许多实验室使用.

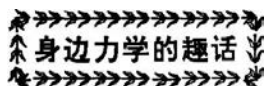
问: 这个溅射的工艺有什么特点呢?

俞: 最突出的特点在于薄, 因为做的这个薄膜, 分子是一个一个打上去的. 薄膜电阻温度计开辟了激波管和激波风洞在气动加热环境测量应用的途径. 但多年使用过程中也发现一些问题. 最近几年我建议做点改进工作, 或者创制另一种新传感器替代它.

### 参 考 文 献

- 1 涂元季. 人民科学家钱学森. 上海: 上海交通大学出版社, 2002
- 2 俞鸿儒. 为航天事业铺路, 科学的道路 (下卷). 上海: 上海教育出版社, 2005
- 3 俞鸿儒. 氢氧燃烧及爆轰驱动激波管. 力学学报, 1999, 31(4): 389-397
- 4 Yu HR, Esser B, Lenartz M, et al. Gaseous detonation driver for a shock tunnel. *Shock Wave*, 1992, 2(4): 245-254
- 5 陈宏, 冯珩, 俞鸿儒. 用于激波管/风洞的双爆轰驱动段. 中国科学 G 辑, 2004, 34(2): 183-191

(责任编辑: 胡 漫)



## 多彩斑斓诚可爱

### —— 漫话肥皂泡

王振东<sup>1)</sup>

(天津大学力学系, 天津 300072)

**摘要** 从散文《肥皂泡》和世界名画《吹肥皂泡的少年》谈起, 漫谈了肥皂泡的形成、色彩和破裂, 介绍了与肥皂泡有关的科学技术问题, 并以北京奥运游泳馆水立方为例, 讨论了肥皂泡和建筑的关系.

**关键词** 肥皂泡, 软物质, 表面张力, 最小曲面, 仿生建筑

中图分类号: O37 文献标识码: A

doi: 10.6052/1000-0879-13-470

“那一个个轻清脆丽的球儿, 是我们自己小心地轻轻吹起的.

本文于 2013-11-04 收到.

1) E-mail: wangye@tju.edu.cn

吹了起来, 又轻轻地飞起, 是那么圆满, 那么自由, 那么透明, 那么美丽.

我想借着扇子的轻风, 把她们一个个送上天去, 送过海去. 到天上, 轻轻地挨着明月, 渡过天河, 跟着夕阳西去. 或者轻悠悠地飘过大海, 飞越山巅……目送着她们, 我心里充满了快乐、骄傲和希望.”

这是著名作家冰心 (谢婉莹, 1900—1999) 的散文《肥皂泡》的一段, 已收入在中国的小学语文教科

书中,既生动展现了她儿时吹肥皂泡的欣喜,也描述出了当今儿童吹肥皂泡游戏的情景(图1)。

世界名画《吹肥皂泡的少年》(图2)也生动地表现了吹肥皂泡的情景。



图1 小女孩在吹肥皂泡



图2 吹肥皂泡的少年

油画《吹肥皂泡的少年》(88 cm×70 cm)现收藏于纽约大都会博物馆,是法国画家夏尔丹(让·巴蒂斯特·西蒙·夏尔丹, Chardin, Jean-Baptiste-Siméon, 1699—1779) 1739年的一幅风俗画:一个衣着破旧但不失为整洁的少年正在从室内向室外吹着肥皂泡,他聚精会神小心翼翼地将肥皂泡越吹越大,越吹越大……还有一个孩子,看上去仅有三四岁,正踮着脚扒着窗台使劲从室内向室外观看……题材非常普通,情境极为单纯,表现一种清闲、安逸的生活情趣,反映了下层平民的孩子们自然、俭朴、醇厚、善良的美好情感。

肥皂泡是一种软物质<sup>[1]</sup>,1991年诺贝尔奖获得者、法国物理学家德·热纳(皮埃尔-吉勒·德·热纳, Pierre-Gilles de Gennes, 1932—2007),在诺贝尔

奖授会上曾以“软物质”为题目发表演讲。他在演讲中也引用了一幅关于吹肥皂泡的图片(图3),图上画着一名美丽的青年女子,在玩吹肥皂泡的游戏,身边一个男人,捧着一坛肥皂水供她使用。图画下面的法文标题是“吹肥皂泡的姑娘”。



图3 吹肥皂泡的姑娘

德·热纳对图画《吹肥皂泡的姑娘》标题下的法文诗给了如下的英文译文:

*“Have fun on sea and land  
Unhappy it is to become famous  
Riches, honors, false glitters of this world  
All is but soap bubbles.”*

中文大意是:

“到海洋和大地去寻找乐趣吧  
世上的名利、财富和虚假的光耀  
都让人不开心  
通通不过是肥皂泡”

肥皂泡是很薄的肥皂水的膜,是带虹彩表面的空心形体。肥皂泡的存在时间通常较短,会因触碰其他物体或维持于空气中太久而破灭。由于肥皂泡很脆弱,也成为了美好但不实际东西的隐喻。诺贝尔奖获得者德·热纳在软物质的演讲中正是利用肥皂泡容易破灭一事,阐发了其人生感悟,也给了人们启示。

## 1 肥皂泡的形成与多彩

肥皂泡的形成是因为液体(通常是水)的表面层

有表面张力, 它导致该层的行为像弹性膜. 一个常见的误解是以为肥皂增加了水的表面张力, 实际上肥皂将表面张力减少到大约是纯水的  $1/3$ <sup>[2]</sup>. 肥皂泡的膜是类似于三明治的三层结构 —— 一层薄薄的水夹在内外两层肥皂分子中间. 肥皂并不增强, 它只是稳定它们, 通过马拉高尼效应 (Marangoni effect), 即当一种液体的液膜受外界扰动 (如温度、浓度) 而使液膜局部变薄时, 它会在表面张力梯度的作用下形成马拉高尼流, 使液体沿最佳路线流回薄液面, 进行“修复”的作用. 随着肥皂膜的拉伸, 肥皂的密度减小, 使得表面张力增加. 这样, 肥皂选择性加强了泡的最弱部分并倾向于防止它们被进一步拉伸. 同时, 肥皂又减少了蒸发, 使得肥皂泡维持更久.

肥皂泡的球形形状是由于表面张力造成的. 不论肥皂泡的初始形状是什么, 它总是试图变回球形, 因为在同等体积下, 球形具有最小的表面积, 维持球形结构所需要的能量是最少的, 所以表面张力导致肥皂泡形成一个圆球. 如果一个肥皂泡在静止空气中下沉, 它会比雨滴更加接近球形. 当一个下沉物体接近它的极限速度时, 作用在其上的拉力等于其重量, 而肥皂泡的重量和同体积的雨滴相比要小得多, 所以其形变也要小得多.

肥皂泡的虹彩颜色 (图 4) 是光波的干涉造成的<sup>[3]</sup>. 当光撞击在膜上, 其一部分被外表面反射, 而另外一些穿过薄膜并在内外两个表面间来回反射后重新穿出. 最后观测到的反射为所有这些反射的干涉所决定. 因为每段在薄膜中的行程会导致一些相位偏移, 它和薄膜的厚度成正比而和波长成反比, 干涉的结果依赖于这两个量. 而相对一个给定的厚度, 干涉对于某些波长是增强的, 而对另外一些则是减弱, 所以白光射在膜上总会带着随厚度改变的色调被反射回来.



图 4 多彩的肥皂泡

随着肥皂泡由于蒸发而变薄, 可以看到色彩的变化. 厚一些的壁消去红 (长一些) 的波长, 从而导致蓝-绿反射. 后来, 更薄的壁会消去黄, 然后绿, 然后蓝. 最后, 当肥皂泡的壁变得比可见光的波长要薄很多时, 所有可见频段被消去, 就看不到反射了. 当达到这个状态时, 肥皂泡的壁薄大约为 25 nm, 这时肥皂泡可能就快爆了.

干涉现象也依赖于光线射到膜上的角度, 即使肥皂泡壁的厚度均匀, 依然可以看到由于曲率或运动带来的色彩的变化. 但是, 壁的厚度会由于重力将液体往下拉时而持续改变, 因而肥皂泡的色彩总会不断的变化.

当两个肥皂泡合并时 (图 5), 由于同样的物理原理, 仍会采取最小可能表面积的形状. 因为小的肥皂泡有更大的内压力, 它们的公共壁会凸向大的肥皂泡.



图 5 两个正在合并的肥皂泡

有的艺术家能融合娱乐和艺术进行创作, 产生出巨大的肥皂泡 (图 6), 将其提升为一种魔术表演艺术, 一些高难度的表演甚至还申请了吉尼斯世界记录. 他们需要特殊配制的溶液和高度的技巧. 为增加视觉效果, 有时还用氦气填充并配以激光进行表演.



图 6 艺术家的肥皂泡表演

## 2 肥皂泡的破裂

要让肥皂泡破裂是很简单的事情,只需伸出一根手指,砰!肥皂泡便会在瞬间消失.但是肥皂泡的破裂过程究竟是怎样的呢?

据英国《每日邮报》2009年7月12日的报道,英国摄影师 Richard Heeks 使用一个超慢动作相机用  $1/500\text{s}$  的快门,记录下了肥皂泡破裂的瞬间.下面的几张图片(图7~图11)就是 Richard Heeks 所拍摄的,其夫人用手指触碰肥皂泡时,肥皂泡的破裂过程.



图7 尚没用手指触碰的肥皂泡



图8 用指尖轻轻一触,肥皂泡精细的表面就开始裂开了



图9 裂纹开始朝另一侧扩散,原本光滑的表面变成了无数悬在空中的肥皂液滴,但仍分布在原球面位置



图10 由于重力的作用将使液滴下坠,还未破裂的表面已所剩无几



图11 一眨眼的工夫,光彩夺目的肥皂泡变成了一团下坠的水雾

当看到这组绚丽多彩的肥皂泡破裂图像时,才体会到这个破裂过程是何等奇特、壮观.据了解,至今尚无人能从计算流体力学的角度,重现这个破裂过程.这里还有许多事情有待年轻的力学工作者去研究和探索.

## 3 肥皂泡的科学技术问题

肥皂泡不仅是文学和艺术喜欢讨论的话题,也是科学技术研究的对象.英国著名的物理学家开尔文(Kelvin, Lord William Thomson, 1824—1907)爵士说:“吹一个肥皂泡并且观察它,你会用毕生之力研究它,并且由它引出一堂又一堂的物理课程.”

物理学家的兴趣,在于通过它可以研究表面张力、研究光在薄膜上的干涉作用、研究物质的吸附作用等等.

丹麦科技大学的一个小组在肥皂膜上方拍打一个金属薄片形成微风,让肥皂膜的流动呈现出“美丽的蝴蝶形状”(图12),美国物理学会2009年举行的流体运动作品展上,这幅美丽的作品曾获2009年度最佳作品大奖.

数学家对肥皂泡的兴趣,在于可以通过它研究最小曲面,研究泛函的极值.肥皂泡总是试图极小



图 12 肥皂膜上泛起涟漪

化他们的表面积, 总会找到点或者边之间的最小表面, 即极小化他们的表面能量. 数学家 1884 年就已知球形肥皂泡是包容给定体积的空氣的极小面积, 但直到 2000 年才对两个合并的肥皂泡, 找到证明包含两团给定体积的空氣表面积极小的最佳办法.

对于一个孤立的肥皂泡, 极佳形状是一个球, 而很多聚集在一起的肥皂泡则会有复杂得多的形状. 这方面的研究情况, 可参看下面一节“肥皂泡与建筑”中所讨论的开尔文问题和 Weaire-Phelan 的泡沫结构.

力学家和工程师受肥皂泡的启发在研究薄膜结构时, 先后提出了充气式、张拉式和索穹顶 3 种形式, 由高强度的柔性薄膜材料和加强构件组合, 成为各种各样的薄膜结构 (图 13 和图 14).

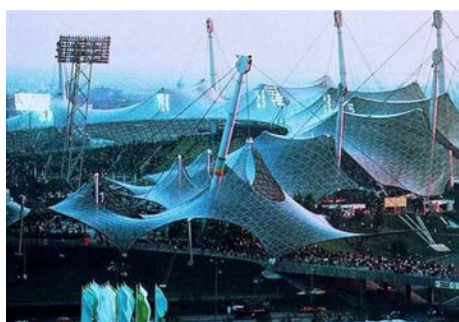


图 13 慕尼黑奥运会 (1972 年) 主场馆



图 14 韩国丽水世博会 (2012 年) 主题馆

#### 4 肥皂泡与建筑

在洗泡泡浴或洗衣服时, 容易看到许多肥皂泡聚集在一起的情况, 如图 15 所示.



图 15 肥皂泡聚集时的图象

英国物理学家开尔文 19 世纪末提出问题: 把空间划分成相同体积的小单元, 怎样划分所需要的界面最小? 与此等价的问题就是: 什么样的泡沫结构效率最高? 因为自然界总是遵循最有效率的 (或者说能量最低的) 结构, 这个问题实际上就是: 最好的泡沫结构是什么样子的. 这个问题后来被称为“开尔文问题”. 开尔文自己提出的理想泡沫结构 (图 16), 是由相同的十四面体组成, 每个泡泡的十四个面中有 6 个正方形和 8 个正六边形.



图 16 开尔文理想的泡沫结构

1993 年, 爱尔兰的 Denis Weaire 和 Robert Phelan 用计算机模拟, 找到了比开尔文泡沫结构更理想的泡沫结构, 被称为 Weaire-Phelan 结构 (图 17). 这个结构由两种相同体积的泡泡组成. 一种是正十二面体, 每面是正五边形; 一种是十四面体, 其中 2 个正六边形, 12 个正五边形.

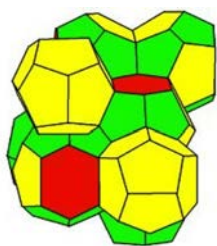


图 17 Weaire-Phelan 的泡沫结构

Weaire-Phelan 的泡沫结构把空间划分成相同体积的小单元,比开尔文结构所需要的界面少 0.3%。就是这 0.3%,花费了人类一百多年的时间去寻找。直到现在,人们也尚无法证明这就是最优的泡沫结构,只是说“很有可能”是最优的。从某种程度上说,开尔文问题至今还没有得到最后的答案。

北京 2008 奥运游泳馆水立方的图案(图 18 和图 19),正是采取了 Weaire-Phelan 的泡沫结构。

肥皂泡一直是仿生建筑学研究的热点之一,因



图 18 北京水立方游泳馆



图 19 水立方的外墙图案

为肥皂泡体现了最小化的原则,非常符合仿生建筑所追求的,以最小最经济的材料消耗得到最有效空间的理念。

西班牙泡泡形淡水工厂(图 20)由一系列堆叠在一起的生物圈构成,从外观上看,它好像是一堆肥皂泡。据报道,这座奇特的高塔,其玻璃圆顶结构扮演着至关重要的角色,能够利用红树过滤海水以获取淡水。红树可吸收咸水中的物质并渗出淡水。宝贵的淡水钻出红树体外后蒸发并凝结成露水,工厂内的淡水池则负责收集露水。



图 20 西班牙泡泡形淡水工厂

## 参 考 文 献

- 1 王振东,姜楠.软物质漫谈.力学与实践,2014,36(2):249-252
- 2 王振东.露珠不定始知圆——谈润湿现象与表面张力.力学与实践,1994,16(3):74-76
- 3 武际可.从吹肥皂泡说起.力学与实践,2005,27(6):86-88
- 4 波易斯 CV 著.肥皂泡和形成它们的力.谈镐生,李荫亭,岳曾元等译.北京:科学出版社,1974
- 5 郑融.肥皂泡断想. <http://blog.sciencenet.cn/blog-38063-50011.html>
- 6 水立方的图案来自何处. <http://blog.sciencenet.cn/blog-72090-247656.html>

(责任编辑:胡漫)