

## 油火克星——神奇的泡沫卫士

孙劭晨, 杨睿宸, 焦浩轩, 倪梅\*, 刘妍岑\*, 高向静\*

中国消防救援学院基础部, 北京 102201

**摘要:** 火灾严重威胁着人民群众的生命财产安全, 提升公众消防素质是预防火灾发生和减少火灾损失的重要途径。本文设计了一个综合性科普实验, 介绍目前广泛使用的水成膜泡沫灭火剂(AFFF)。与普通泡沫灭火剂相比, AFFF中增加了氟碳表面活性剂这一关键成分, 显著降低水的表面张力及其与油的界面张力, 使AFFF水溶液可以在油面上铺展形成水膜, 而且更容易形成泡沫。灭火时, 水膜与泡沫共同起到隔绝空气的作用。在本次实验中, 首先以演示、互动和提问等方式介绍表面张力、氟碳链性质、分子间相互作用和燃烧条件等多个知识点, 随后现场展示AFFF的灭火效果。本实验现象明显, 仪器试剂价廉易得, 科普展示和互动方案寓教于乐, 深入浅出, 可有效提高受众的科学素养和安全意识。

**关键词:** 水成膜泡沫灭火剂; 表面张力; 表面活性剂; 综合性科普实验

**中图分类号:** G64; O6

## The Conqueror of Oil Fires: The Remarkable Foam Guardian

Shaochen Sun, Ruichen Yang, Haoxuan Jiao, Mei Ni\*, Yancen Liu\*, Xiangjing Gao\*

Department of Basic Courses, China Fire and Rescue Institute, Beijing 102201, China.

**Abstract:** Fire poses a severe threat to public safety and property. Enhancing fire safety awareness is crucial for preventing fires and minimizing damage. This paper presents a comprehensive popular science experiment to introduce aqueous film-forming foam (AFFF), which is widely used today. Unlike ordinary foam extinguishers, AFFF contains fluorocarbon surfactants, key components that significantly reduce the surface tension of water and the interfacial tension between water and oil. This allows the AFFF solution to spread over the oil surface, forming a water film and facilitating foam formation. During firefighting, the water film and foam work together to isolate air. In this experiment, several concepts, such as surface tension, the properties of fluorocarbon chains, intermolecular interactions, and combustion conditions through demonstrations, interactions and questioning, have been first introduced. In a live demonstration, the fire-extinguishing effects of AFFF are vividly presented. The experiment is visually impactful, utilizing affordable and readily available instruments and reagents. The educational and interactive aspects of the demonstration effectively combine learning with entertainment, significantly enhancing audience's scientific literacy and safety awareness.

**Key Words:** Aqueous film-forming foam; Surface tension; Surfactant; Comprehensive popular science experiment

### 1 引言

对火的认识和利用是人类文明得以发展的重要因素之一, 然而火一旦失去控制就会带来灾难。

收稿: 2024-04-15; 录用: 2024-08-12; 网络发表: 2024-10-31

\*通讯作者, Emails: nimei@cfri.edu.cn (倪梅); liuyc\_cfri@163.com (刘妍岑); gaoxiangjing11@126.com (高向静)

基金资助: 中国消防救援学院教育教学改革项目(2023KCJS11Y)

据统计, 2023年全国消防救援队伍接报处置城乡火灾87.8万起<sup>[1]</sup>。提升公众消防素质、强化消防安全培训对于保护人民群众的生命财产安全有着非常重要的意义, 已写入《“十四五”国家消防工作规划》<sup>[2]</sup>。根据国家标准《火灾分类》(GB/T 4968-2008), 火灾分为A(固体物质火灾)、B(液体或可熔化固体物质火灾)、C(气体火灾)、D(金属火灾)、E(带电火灾)、F(烹饪器具内的烹饪物火灾)六类<sup>[3]</sup>, 不同类型火灾有不同的处置方法。但由于部分群众对火灾类型和灭火剂的种类不了解, 盲目处置火情导致后果扩大的情况时有发生, 一些质疑消防员处置方法的声音也会在自媒体上出现。例如, 在使用泡沫灭火剂处理油类物质火灾时, 有的群众会提出“这喷的白花花的是什么东西?”“为什么不用水呢? 有水不用非得用泡沫吗?”等问题。

基于这些疑问, 本文设计了一个综合性科普实验, 介绍目前应用最广泛的泡沫灭火剂: 水成膜泡沫灭火剂(aqueous film-forming foam, AFFF, 图1)。AFFF又称轻水泡沫灭火剂或氟化学泡沫灭火剂, 灭火效率高、耐烧, 适用于扑救易燃固体或液体的初期火灾, 既可以装载于消防车中, 也可以制成操作简单、有效期长的水基型灭火器, 被广泛应用于扑灭油田、油库、轮船、工厂、商店等场所的火灾。在2010年大连港火灾中实际调用AFFF近900吨。

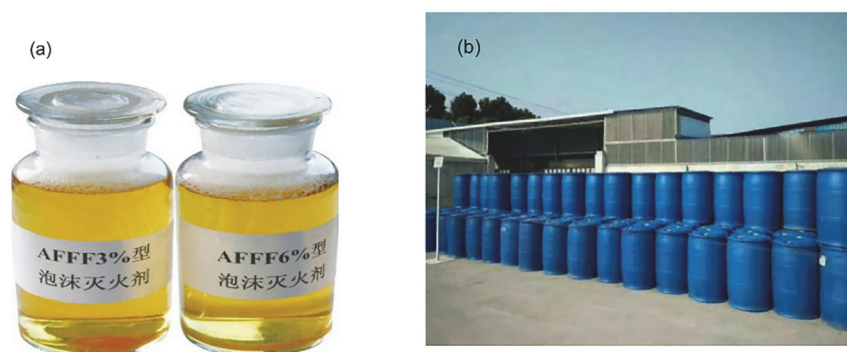


图1 AFFF样品(a)和包装桶(b)

AFFF的成分有氟碳表面活性剂、碳氢表面活性剂和添加剂, 使用时配制体积分数为3%或6%的水溶液。表面活性剂可以排列于水溶液表面, 降低水溶液的表面张力。氟碳表面活性剂更是具有“三高、两憎”(高表面活性、高热稳定性、高化学稳定性, 其中的全氟烷基憎水、憎油)的独特性能, 所以AFFF水溶液不仅容易形成泡沫, 而且能够在油面上铺展形成水膜。泡沫和水膜共同覆盖于油面, 起到隔绝空气、阻止燃烧的作用。

为了向公众介绍AFFF的灭火原理, 我们首先讲解表面张力对于泡沫和水膜形成的影响, 之后通过趣味实验直观展示水的表面张力以及表面活性剂对表面张力的影响, 再用硬币滴液和简易拉脱法比较几种液体的表面张力。为了进一步解释氟碳表面活性剂大幅降低水溶液表面张力的原因, 我们以全氟己烷为例展示氟碳链疏水疏油的特性。最后直观展现用AFFF扑灭油类火灾的过程。该实验涉及物理、化学和燃烧学中的基本原理, 与生活息息相关, 有利于提高公众科学素养、普及消防安全知识。

## 2 实验部分

### 2.1 实验原理

#### 2.1.1 表面张力

如图2所示, 在液体内部的分子(B)受到其相邻分子的作用力是对称的, 即合力为零; 而在液体-空气界面(以下称为表面)上的分子(A)则不然, 表面上的分子受液体内部分子的引力一般大于受空气分子的引力, 合引力方向指向液体内部, 因此液体表面上的分子有向内部收缩的趋势, 这种引起液

体表面收缩的力叫做表面张力<sup>[4]</sup>。生活中的许多现象都是由水的表面张力引起的，例如纸片、回形针等物体可以漂浮在水面上，灌满水杯时会出现凸液面等。

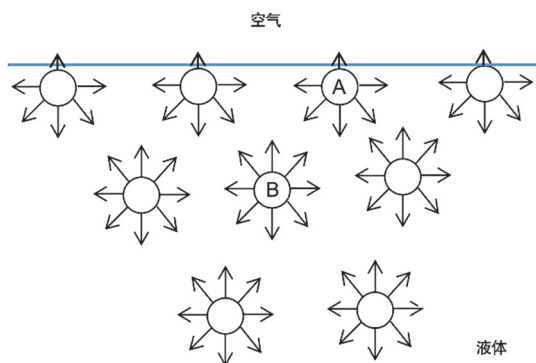


图2 表面张力产生原因的示意图

测定液体表面张力的方法有最大泡压法、毛细上升法、滴外形法和测力法等<sup>[5]</sup>。在本文中，我们简化了滴外形法和测力法，用硬币滴液和简易拉脱法比较了几种液体的表面张力。

硬币滴液的原理如图3所示，设液滴为球缺形，在硬币上滴加液体至刚好溢出时，硬币上液体的体积 $V$ 与液滴和硬币的接触角 $\theta$ 之间的关系为 $V = \pi r^3 (\cos^3 \theta - 3\cos \theta + 2) / 3\sin^3 \theta$ ，其中 $r$ 为硬币半径。该函数在 $0$ 到 $\pi/2$ 区间内单调递增，即 $\theta$ 越大， $V$ 越大。近似认为各种液体与硬币的界面张力相同，根据Young方程， $\theta$ 越大就表明该液体的表面张力越大。综上，相同条件下硬币能承载的液体体积越大，说明该液体的表面张力越大。

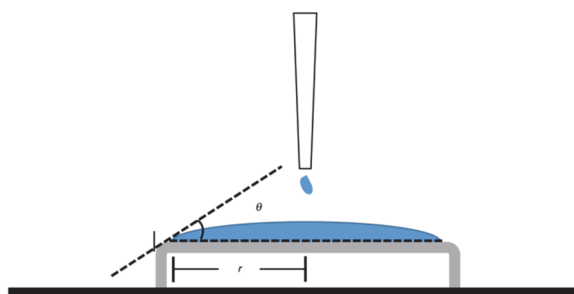


图3 硬币滴液比较表面张力的原理示意图

简易拉脱法的原理如图4所示，将金属丝框浸入液体中，再缓慢拉出液面，金属丝框表面将会带起一层液膜<sup>[6]</sup>。液膜将被拉直时，金属丝框所受拉力 $F = W + 2\gamma l + ldh\rho g$ ，其中 $W$ 是金属丝框所受到的重力和浮力之差； $\gamma$ 为液体的表面张力系数，表示沿液体表面作用于单位长度的表面张力的大小，液膜有前后两个面，故表面张力为 $2\gamma l$ ； $d$ 为细金属丝的直径(也就是液膜的厚度)， $h$ 为液膜恰好被拉断时的高度， $\rho$ 为液体的密度， $g$ 为重力加速度， $ldh\rho g$ 为液膜的重量。对于密度相当的液体，其对金属丝框的浮力和形成液膜的重量均基本相同，此时，拉力越大，该液体的表面张力越大。

### 2.1.2 表面活性剂

表面活性剂是一类能够显著降低水的表面张力的物质，其分子结构包含亲水端和疏水端两部分，如图5a所示。当低浓度表面活性剂溶于水，其分子会排列在表面，亲水端指向水、疏水端指向空气。疏水端与空气之间的引力一般大于水分子与空气的引力，使得表面上的水分子所受的合引力减小(图5b)。表面活性剂和水还可以形成一定强度的双分子薄膜，包围着空气而形成泡沫(图5c)。

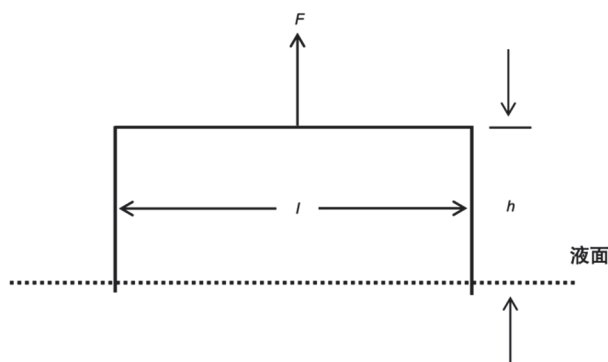


图4 简易拉脱法比较表面张力的原理示意图

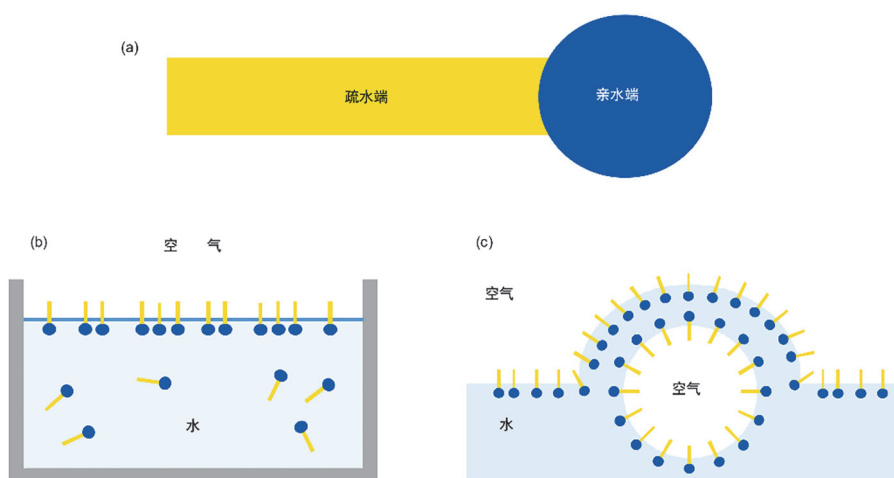


图5 表面活性剂(a)及其在水面的排列(b)和水溶液成泡沫(c)示意图

氟碳表面活性剂是碳氢表面活性剂中碳氢链上的氢原子部分或全部被氟原子取代形成的一类表面活性剂。C—F键键能较大，例如 $\text{CF}_4$ 中的C—F键键能为 $486 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ 。另外，氟的原子半径略大于氢，在全氟烃基中恰好可以包住碳骨架，使得C—C键更牢固<sup>[7]</sup>。牢固的C—C键和C—F键使得氟碳表面活性剂具有非常高的化学稳定性和热稳定性。另外，氟原子的电负性最大、原子半径较小、原子极化率低，使得其电子云分布集中，进而导致全氟烃基自身的相互作用及其与水、油分子的相互作用均较小。所以氟碳链既疏水又疏油，且氟碳表面活性剂能够显著降低水的表面张力。

### 2.1.3 AFFF的成分和灭火原理

AFFF的成分见表1，有氟碳表面活性剂、碳氢表面活性剂和添加剂(泡沫稳定剂等)。

表1 AFFF的成分及质量分数

成分	质量分数/%
氟碳表面活性剂	12.0
苯的硫酸盐表面活性剂	11.0
辛酸钠	13.0
二乙二醇醚	9.0
水	55.0

AFFF中主要使用的氟碳表面活性剂结构如图6所示，季铵盐为亲水端，十七氟辛基为疏水端。同时，十七氟辛基作为氟碳链还有疏油的特性。

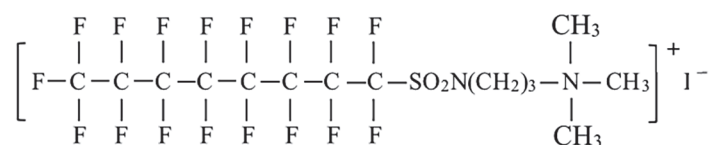


图6 AFFF中氟碳表面活性剂的结构式

如图7所示，AFFF水溶液可以形成能覆盖于油面的泡沫和水膜，扑灭油类火灾。为使水溶液能够在油面上铺展形成水膜，铺展系数 $S_{a/b} = \gamma_b - (\gamma_a + \gamma_{a/b})$ 必须大于零，其中 $\gamma_a$ 为水溶液的表面张力， $\gamma_b$ 为油的表面张力， $\gamma_{a/b}$ 为水溶液与油之间的界面张力。AFFF中的氟碳表面活性剂和碳氢表面活性剂共同作用，在显著降低水溶液的表面张力的同时也降低了水溶液与油的界面张力，相较于其他泡沫灭火剂更易形成水膜。

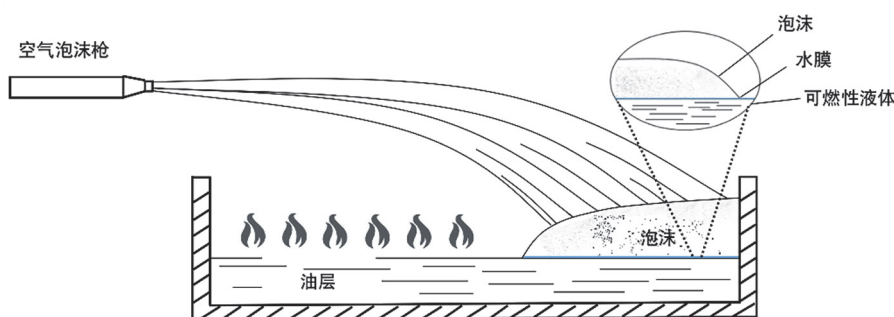


图7 灭火原理示意图

## 2.2 试剂或材料

实验中使用的试剂见表2，使用的仪器有：10 mL滴定管、蝴蝶夹、铁架台、烧杯、试管、滴管、玻璃棒、一元硬币、木筷、细线、回形针、彩色卡纸、剪刀、点火器、升降台、烤盘(高硼硅玻璃材质，2.2 L，34.5 cm × 20 cm × 5.5 cm)、自制发泡器(用橡胶软管将加压式塑料喷壶的喷嘴与玻璃管连接，图8)。

表2 实验中使用的试剂

试剂	纯度或规格	生产厂家
溴百里酚蓝*	分析纯	上海迈坤化工有限公司
罗丹明B*	分析纯	天津市科密欧化学试剂有限公司
全氟己烷	98%	上海麦克林生化科技股份有限公司
牛奶	纯牛奶	光明、三元、蒙牛等均可
洗洁精	高效洗洁精	纳爱斯集团有限公司
AFFF	执行GB 15308-2006标准	-
汽油	车用90#汽油，与国家固定灭火系统和耐火结构件质量监督检验中心实际灭火测试一致	-

\*溴百里酚蓝和罗丹明B可以用其他水溶性色素代替



图8 自制发泡器照片

实验中需配制下列溶液：

- 1) 3%洗洁精水溶液：在15 g洗洁精中加入485 mL水，搅拌至溶解；
- 2) 6%洗洁精水溶液：在30 g洗洁精中加入470 mL水，搅拌至溶解；
- 3) 12%洗洁精水溶液：在60 g洗洁精中加入440 mL水，搅拌至溶解；
- 4) 6% AFFF水溶液：在30 g AFFF中加入470 mL水，搅拌至溶解(消防实战中一般按体积分数配制AFFF水溶液，但为与洗洁精水溶液比较，本实验中采用质量分数配制溶液)；
- 5) 色素水溶液(“舞动”的色彩实验使用)：称取0.2 g罗丹明B或溴百里酚蓝固体溶于80 mL水，搅拌，若不溶解则取清液；
- 6) 稀溴百里酚蓝水溶液(氟碳链性质实验使用)：玻璃棒蘸取少量溴百里酚蓝固体溶于5 mL水，搅拌至溶解。

## 2.3 表面张力与表面活性剂趣味实验

### 2.3.1 “沉没”的回形针

如图9所示，在盛有水的烧杯中缓慢放入2枚回形针，回形针漂浮于水面。随后在液面上滴入一滴AFFF，回形针立刻沉入水中。

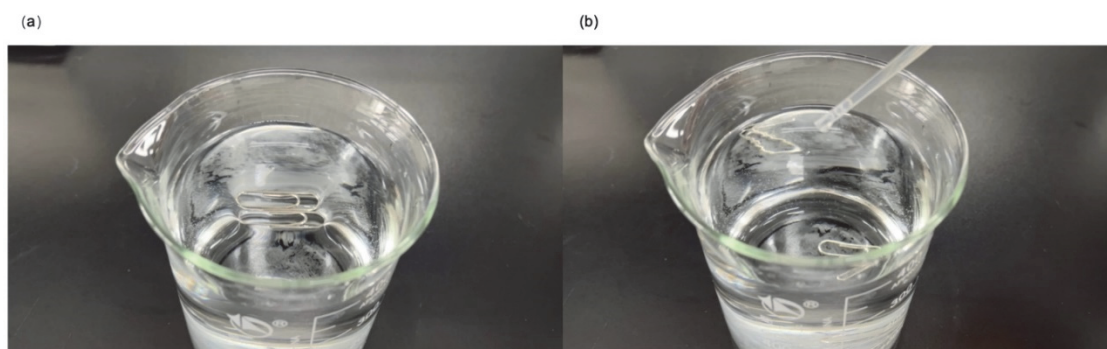


图9 “沉没”的回形针

(a) 漂浮于水面的回形针；(b) 加入AFFF后沉入水底的回形针

### 2.3.2 旋转的“风火轮”

把剪好的螺旋形纸片放置在水面并等待其静止，如图10所示，向纸片中央的水面滴入一滴AFFF，螺旋形纸片绕中心旋转。

### 2.3.3 “舞动”的色彩

如图11所示，在烤盘中倒入牛奶，待液面平静后缓慢滴入两种色素溶液。在中心滴入一滴AFFF，色素溶液迅速呈伞状向两侧散开。扩散至接近容器壁时，再在两侧同时各滴入一滴AFFF，向两侧扩散的伞状色素溶液立刻转换方向。



图10 在螺旋形纸片中央的水面滴入AFFF

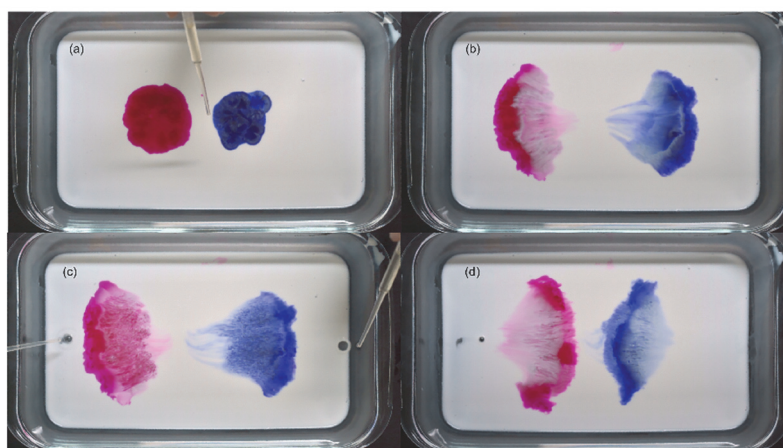


图11 在牛奶液面滴加AFFF使色素溶液扩散

- (a) 在两种色素溶液中间的牛奶液面上滴加AFFF; (b) 两种色素溶液呈伞状向两侧散开;  
(c) 在两侧同时滴加AFFF; (d) 两种色素溶液改变扩散方向。电子版为彩图，下同

按同样操作，用6%洗洁精水溶液替换AFFF重复上述实验，观察到相似的现象，但色素溶液扩散的形状较为不规则(图12)。推测这种不规则的形状是由洗洁精水溶液的不均匀扩散引起。值得一提的是，6%洗洁精水溶液的流动性与AFFF相似，若使用不稀释的洗洁精进行该实验，则色素溶液有明显的“翻滚”现象，即色素扩散的形状更加不规则。

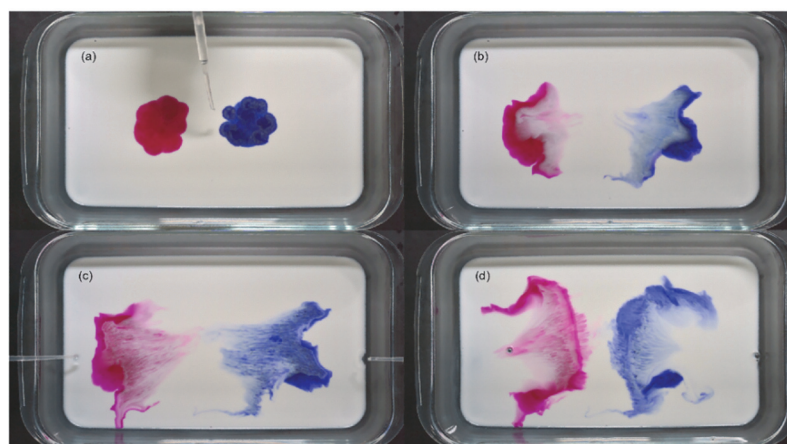


图12 在牛奶液面滴加洗洁精水溶液使色素溶液扩散

- (a) 在两种色素溶液中间的牛奶液面上滴加6%洗洁精水溶液; (b) 两种色素溶液以不规则形状向两侧散开;  
(c) 在两侧同时滴加6%洗洁精水溶液; (d) 两种色素溶液以不规则形状向中心聚拢

将洗洁精水溶液或AFFF直接滴在色素溶液上也有较好的展示效果。在两个烧杯中分别加入等量的牛奶，同时滴入一滴6%洗洁精水溶液(图13a左)和AFFF(图13a右)。色素溶液呈环状扩散(图13b)，片刻后扩散的色素溶液会向中心聚拢(图13c)。重复上述步骤，色素再次扩散和聚拢(图13d–13f)。



图13 在色素溶液上滴加洗洁精水溶液或AFFF

(a) 在色素溶液上滴加6%洗洁精水溶液和AFFF; (b) 色素溶液呈环状扩散; (c) 色素溶液向中心聚拢;  
(d) 再次在色素溶液中心滴加6%洗洁精水溶液和AFFF; (e) 色素溶液再次呈环状扩散; (f) 色素溶液再次向中心聚拢  
红色色素上滴加6%洗洁精水溶液; 蓝色色素上滴加AFFF

### 2.3.4 趣味实验讨论

上述三个趣味实验中，回形针“水上漂”是由于水的表面张力作用。当在水中加入AFFF时，滴加处水溶液的表面张力降低，漂浮的回形针受到的表面张力和浮力不足以抵消重力的作用，回形针沉入水底。

“风火轮”旋转则是由于在其中心滴加AFFF后，纸片内外受到的表面张力不同。

“舞动”的色彩实验中色素溶液的扩散更直观地展示出表面张力的变化。将洗洁精或AFFF滴入时，在滴入位置牛奶的表面张力降低，收缩的趋势减小，因此色素被其他位置牛奶的较高的表面张力“拉”走。当洗洁精或AFFF扩散一段时间，溶液整体的表面张力降低，色素则由浓度高的区域向浓度低的区域扩散。

## 2.4 不同液体表面张力比较

选取5种液体，利用硬币滴液和简易拉脱法对其表面张力进行比较。

### 2.4.1 硬币滴液

如图14所示，用滴定管向一元硬币上滴液至溢出，记录硬币所能承载的液体最大体积。每种液体的实验平行进行5次，结果取平均值。

### 2.4.2 简易拉脱法

实验装置由一次性木筷、回形针和纸片制成。如图15所示，将细线的一端绑在木筷中心位置，另一端绑在铁架台上。木筷一侧绑上用回形针制作的金属丝框，另一侧绑上回形针制作的挂钩。将金属丝框浸入待测液体中，使木筷保持水平。之后在挂钩上依次放置相同大小的纸片(将卡纸裁成1 cm × 3 cm大小，每片质量约为0.5 g)，直到左侧金属丝框完全从液面中拉起，记录纸片数量。每种液体的实验平行进行5次，结果取平均值。

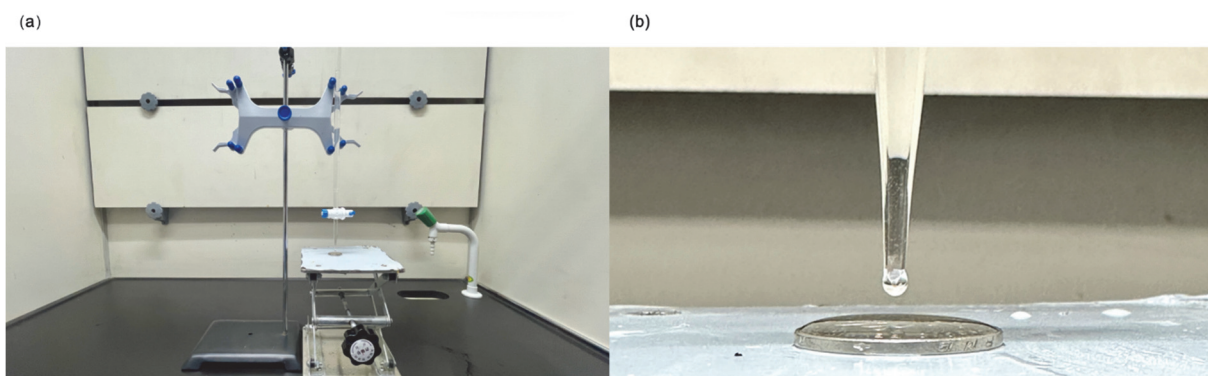


图14 硬币滴液测定表面张力实验的操作照片



图15 简易拉脱法测定表面张力实验的装置照片

### 2.4.3 表面张力比较

从表3可以看出, 5种液体利用硬币滴液和简易拉脱法测得的表面张力大小顺序大致相同: 水的表面张力最大; 6%和12%的洗洁精水溶液的表面张力相近, 且明显小于3%的洗洁精水溶液。可以推测, 在质量分数为6%时, 洗洁精中的表面活性剂已经达到其临界聚集浓度。6% AFFF水溶液的表面张力与6%和12%的洗洁精水溶液相当。

表3 硬币滴液和简易拉脱法测定的表面张力结果

液体	硬币滴液体积/mL	简易拉脱法纸片数量
水	2.18	7.8
3%洗洁精水溶液	1.00	5.6
6%洗洁精水溶液	0.81	5.2
12%洗洁精水溶液	0.82	5
6% AFFF水溶液	0.81	5

## 2.5 氟碳链的疏水疏油性

这里我们以较为常见的全氟己烷来展示氟碳链的性质。在小试管中加入蓝色的稀溴百里酚蓝水溶液(为便于观察分层现象), 将全氟己烷缓慢滴入试管中, 液体分层。由于水的表面张力作用, 全氟己烷尽管密度较大(相对密度1.70), 仍“浮”在水溶液上方(图16a)。振荡试管后全氟己烷沉入水溶液下方(图16b)。

而在汽油中缓慢滴入全氟己烷, 全氟己烷直接沉入汽油下方, 振荡试管后现象不变(图16c、16d)。

将蓝色水溶液、汽油和全氟己烷依次加入小试管中，振荡后，可以观察到液体分为三层(图16e)。由上述实验可以得出，以全氟己烷为代表的氟碳链具有疏水疏油的特殊性质。

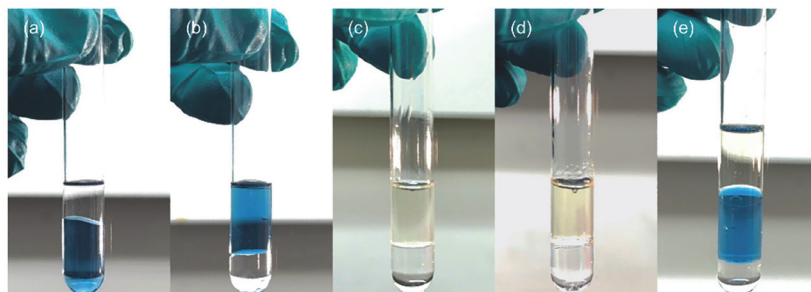


图16 全氟己烷的疏水疏油性展示

- (a) 向稀溴百里酚蓝水溶液滴入全氟己烷所得的混合液；(b) 振荡后稀溴百里酚蓝水溶液和全氟己烷的混合液；  
 (c) 向汽油中滴入全氟己烷所得的混合液；(d) 振荡后汽油和全氟己烷的混合液；  
 (e) 振荡后稀溴百里酚蓝水溶液、汽油和全氟己烷的混合液

## 2.6 扑灭油火实验

将6% AFFF水溶液加入自制发泡器，充分摇晃使其发泡，再将90#汽油倒入烤盘，点燃汽油，等待20 s保证燃烧稳定后，将泡沫管伸入火焰中(烤盘正上方)，对发泡器持续加压使泡沫覆盖在着火油层表面，直到火焰完全熄灭。灭火过程如图17所示。

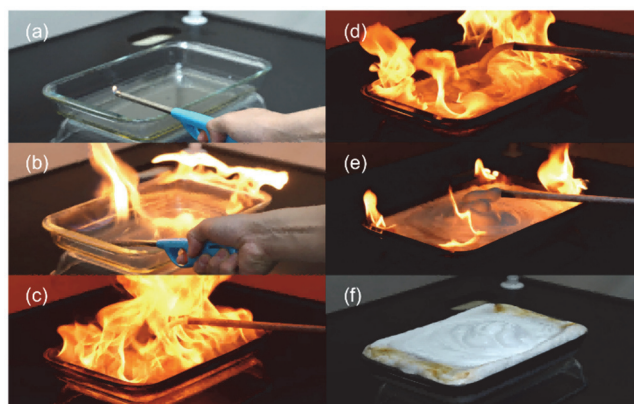


图17 扑灭油火实验

- (a、b) 点燃汽油；(c-e) 对发泡器持续加压让泡沫覆盖在着火油层表面；  
 (f) 泡沫完全覆盖在油表面，火焰熄灭

## 3 科普展示和互动方案

### 3.1 科普地点、受众与形式

地点：实验室通风橱处或室外通风较好的场所。

受众：所有人群，尤其是中小学生。

形式：实验演示、受众操作、提问讲解、互动探究等。

### 3.2 展示内容

首先，由科普人员演示并邀请受众共同完成2.3部分的表面张力与表面活性剂趣味实验，以丰富炫彩的现象激发受众的兴趣，之后开始关于表面张力和表面活性剂的讲解和提问。对于基础相对较

好的受众，科普人员可以引导受众自行设计实验比较不同种类液体的表面张力，参考本文2.4部分。在此基础上，进一步向受众介绍不同种类的表面活性剂，尤其是氟碳表面活性剂，通过文中2.5部分的实验演示氟碳链疏水疏油的特性。最后介绍AFFF的主要成分和灭火原理，通过文中2.6部分的实验展示AFFF水溶液形成的泡沫扑灭油火的过程。实验结束后，再针对火灾分类、火灾成因和灭火剂进行讲解和提问，还可以播放错误处置油火的视频来加深受众的印象。

两次提问环节准备的部分问题如下：

- 1) 表面张力如何影响液体的形态？
- 2) 表面活性剂的分子结构有何特点？它们为什么可以降低水的表面张力？
- 3) 什么是燃烧三要素和着火四面体？
- 4) 火灾类型有哪些？
- 5) 油类起火属于哪类火灾？应该使用哪种灭火剂？
- 6) 泡沫灭火剂的灭火原理是什么？

#### 4 结语

本文围绕AFFF设计了一个综合性科普实验。首先通过趣味实验和自制简易仪器带领受众认识表面张力和表面活性剂，之后用全氟己烷直观展示氟碳链疏水疏油的独特性质，最后展示AFFF扑灭油类火灾的过程。本实验内容丰富，涉及表面张力、氟碳链性质、分子间相互作用和燃烧条件等知识，并在受众设计实验环节融入了科研方法。实验所需的仪器试剂大多取材于日常生活，便宜易得；实验现象明显、丰富，重复性好，趣味性和参与性强，在科普活动和消防宣传中取得了良好效果。

**致谢：**感谢北京市消防救援总队昌平支队十三陵消防救援站、沙河消防救援站。感谢马思远教导员和王满同学的大力支持与帮助。

#### 参 考 文 献

- [1] 国家消防救援局: 2023年共接报处置各类警情213万起. [2024-10-29].  
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1787156040631092864&wfr=spider&for=pc>
- [2] 国务院安全生产委员会关于印发《“十四五”国家消防工作规划》的通知. [2024-10-29].  
[https://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/202204/t20220414\\_411713.shtml](https://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/202204/t20220414_411713.shtml)
- [3] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 4968-2008 火灾分类. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [4] 宋昭崧, 王军, 蒋庆哲, 南北杰, 柯明. 表面活性剂科学与应用. 北京: 中国石化出版社, 2015: 1-2.
- [5] 崔正刚. 表面活性剂、胶体与界面化学基础. 北京: 化学工业出版社, 2019: 15-20.
- [6] 王祥委, 段娟娟, 彭朝阳. 物理通报, 2016, No. 10, 67.
- [7] 梁治齐, 陈溥. 氟表面活性剂. 北京: 中国轻工业出版社, 1998: 77-80.