

•科普•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202303051

www.dxhx.pku.edu.cn

阻燃剂的消防宣传日

吴秋锦[†], 张来英^{*}, 朱亚先^{*}

厦门大学化学化工学院, 福建 厦门 361005

摘要: 阻燃剂在人类的生活中和生产中都发挥着重要作用。本文以模拟火灾为背景, 通过拟人化的手法, 介绍常见阻燃剂的性质及应用, 让读者以生动活泼的方式了解常见的阻燃剂。

关键词: 阻燃剂; 性质; 应用

中图分类号: G64; O6

Fire Awareness Day of Flame Retardants

Qiujin Wu [†], Laiying Zhang ^{*}, Yaxian Zhu ^{*}

College of Chemistry and Chemical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian Province, China.

Abstract: Flame retardants play an important role in human life and production. The background of this paper is set up in a simulated fire. Through anthropomorphic methods, the properties and applications of common flame retardants are introduced, so that readers can understand common flame retardants in a lively way.

Key Words: Flame retardants; Property; Application

今天是消防中心的开放日, 主题是阻燃剂的作用, 嘉宾是阻燃剂一族。小化拉着大华走进消防站, 开启了今天的体验之旅。

1 卤系阻燃剂

刚来到第一站, 就听到模拟火焰燃烧的噼啪声。仔细一听, 有一个声音喊道: “快快撤离, 我们为你拖延了至少30 min的逃离时间^[1]!”

小化和大华意识到是阻燃剂们在喊话, 于是决定前去一探究竟。大华拿起一旁被水润湿的毛巾捂住口鼻, 并示意小化也用湿毛巾捂住口鼻, 这是模拟火灾中预防口鼻吸入浓烟的手段。

正当他们迎着烟雾行进, 两个小精灵一蹦一跳地走过来。

“你们是谁呀?” 小化好奇地问。

“我们是人类的隐形守护神——阻燃剂的一员, 都属于卤系阻燃剂, 我是溴系阻燃剂, 旁边是我的弟弟氯系阻燃剂。”

说着便拉起了旁边一个小精灵的手: “我们同属于有机阻燃剂的部下, 性格沉稳、价格低廉、添加量少, 与合成树脂材料是好朋友, 科学家叔叔把生产技术开发得非常成熟, 因此, 我们是世界上产量和使用量最大的有机阻燃剂, 广泛应用于塑料、橡胶、纺织品和电子产品中^[2]。”

收稿: 2023-03-15; 录用: 2023-03-27; 网络发表: 2023-04-06

[†] 2020级本科生

^{*} 通讯作者, Emails: wuzhly@xmu.edu.cn (张来英); yaxian@xmu.edu.cn (朱亚先)

基金资助: 化学类专业基础理论课程虚拟教研室

小化走上前握着小精灵的手：“久闻大名，认识你们很高兴！”

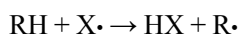
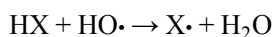
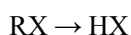
两个小精灵顾不上寒暄，溴系阻燃剂双腿一蹦跳上小化的肩膀，说：“火灾中逃命最要紧，我们帮助你们逃到屋外，先跟着我的弟弟跑吧！”话音刚落，氯系阻燃剂就跳到地板上，开辟了一条道路。

他们终于到达安全区域，小精灵说：“我们阻燃剂是用于减缓或阻止火势蔓延或降低其强度的物质^[3]，会拼尽全力呵护你们安全。”

大华向小化补充道：“添加阻燃剂并不能让材料获得完全抵抗烈火的能力，但是可减少火灾发生，并为身陷火场的人们赢得宝贵的逃生时间，他们是‘隐形守护神’^[1]。”

“但是，你们是如何发挥阻燃作用的呢？”小化好奇地问两个小精灵。

“我们卤系阻燃剂降伏火焰的武器有两个，一个是我们分解产生卤化氢，并攻击高分子材料燃烧反应产生的活性自由基坏蛋，使HO·浓度降低，从而减缓或终止燃烧的链式反应，火焰就不得不投降了^[2]。小精灵手一挥，一组化学反应方程式出现了：



“我们的第二个武器是让聚合物材料变身，在燃烧时分解出卤化氢后，其他残留物可促进聚合物材料脱水形成难燃的炭化层，这就像给材料穿上了一件盔甲，增强了对火焰的抵挡能力^[2]。”

小精灵手再一挥，把大家带到燃烧试验室：“前方左右各有一堆材料，一边的材料含卤素阻燃剂，另一边的材料没有添加阻燃剂，麻烦小化和大华分别上前点火。”

小化和大华接上火源，小心翼翼地走上前去，生怕大火烧着自己。

“呼呼——”大华刚把火源接触到材料，火焰就窜出来了，不一会儿，材料就淹没在熊熊大火之中。

小化这边的材料只是有点冒烟，烧不起来。

“大华这边的材料是没有添加阻燃剂的，小化这边的材料由于有我们的保护，就不易燃烧了。”小精灵解释道。

“哇！本领不小！”小化不由地伸出大拇指。

溴系阻燃剂摇了摇头，眼神中透露出一股内疚之情：“虽然我们的本职工作做得很好，但在环保方面却是个问题儿童。我们工作时会放出卤化氢等有毒气体，并产生浓烟，对人体和环境很不利；还有可能从水和食物进入人体，进一步产生毒性作用^[4,5]。对此我真地感到非常抱歉！”溴系阻燃剂都快哭出来了。

看着他伤心的样子，大华轻轻地抚摸着他的头安慰道：“你们已经为人类的生命安全做出了很大贡献，多亏了你们的默默付出，很多人才能在火灾中存活下来。”

两个小精灵含泪笑着点了点头，目送大华和小化走向下一站。

2 磷系阻燃剂

下一站是个仓库，里面有大量的塑料、橡胶制品。眼看要起火了，一个全身都是红棕色的小精灵奋不顾身地站了出来，阻止了火灾的发生。

“你就是红磷阻燃剂吧？”大华问道。

“对！我就是独一无二的红磷阻燃剂，你认识我吗？”红色小精灵双手叉腰，一脸疑问。

“你是无机磷系阻燃剂的一员，相比起上一站卤系阻燃剂的小精灵们，你对环境的危害小，业务范围也更广泛，工作能力也很优秀！”小化回想着出发前在网上查阅的资料，一字一句地说道。

红磷阻燃剂得意地说：“我碰到火焰时产生的磷酸酐或磷酸对环境危害很小。别看我身子小，本领可大啦！”

“不过，你似乎也有着自己的缺点哦。”

红色小精灵脸上骄傲的神情消失得无影无踪，双手不安地拉着裤腿，说：“你说的很对，别看我的衣服那么亮眼，也正因为此，我失去了与很多材料合作的机会；另外，我的加工特性比较差，与树脂的关系不够融洽，材料力学性能也不咋的，工作过程中还有独特的味道，搞得我很难进入高端材料领域。还好，人类科学家为我量身打造了胶囊外套，让我变身为‘白度化红磷阻燃剂’，迎来了新的发展契机。”话音刚落，红磷阻燃剂小精灵就穿上了一件包裹全身的外套，面部留有一个透明的头盔方便行动。

这时，旁边的小精灵走过来：“你们好！我是有机磷系阻燃剂，常常被称作磷酸酯小姐或麟酸酯小姐。我跟红磷阻燃剂妹妹一样，也具有减少烟尘、无卤环保的优点。我的岗位主要在天然高分子材料中，还能帮助材料宝宝们增塑^[6]。”

“不好！仓库里出现了火情。”

只见一个胖墩墩的小精灵冲出来，在高温中它的周围生成了一堆泡沫层，面对惊讶的大华和小化，小精灵说：“我是聚磷酸铵，外号APP，也是无机磷系阻燃剂的一份子。别看我身材比较胖，我工作起来可是得心应手，这些泡沫是我膨胀形态的武器，能阻止火焰的攻击，可以很好地延长耐火时间^[7]。”

APP指挥着精灵部队，有条不紊地开展阻燃工作，他们像流水线上的工人，各司其职，紧张地忙碌着……

“真了不起！可是，磷系阻燃剂的作战武器又是什么呢？”小化好奇地问道。

大华不假思索地说：“他们有三大法宝，第一是磷酸小姐和磷酸酐先生，磷酸小姐怕冷，喜欢吸收热量，这样CO就没有足够的热量氧化成CO₂；磷酸酐先生可以促使燃烧物穿上一层碳盔甲，阻止火焰的肆意妄为，还可以变成熔融状态覆盖在物质表面呢。你看！”大华指了指正在一旁认真工作的小精灵们，各个都像魔术卫士，守护着物品不被燃烧。

不等小化拍手叫绝，大华就继续说：“第二个法宝与卤系阻燃剂类似，小精灵们受热分解出挥发性磷化物如PO·等自由基宝宝，可以捕获H·，产生HPO，降低了氢原子的浓度，就阻断了燃烧的链反应。第三个法宝是难燃气体把可燃气体挤到一旁，同时稀释了空气中氧的浓度，让可燃物想燃也燃不起来^[8]。”

APP对大华竖起了大拇指，补充道：“我们还经常与卤素、氮元素和硼元素一起并肩作战，工作起来比单枪匹马作战时轻松很多，这就是协同阻燃^[8]。”

红色小精灵又神气地跳过来：“我们磷系阻燃剂经常与塑料和织物合作，建筑、家具和公共交通中的塑料制品、衣物等纺织品中都有我们的身影！我们和人类也是好朋友，不会攻击人类，所以也是远近闻名的灭火小英雄^[6]。”

APP碰了一下红色小精灵，说：“现在可不是显摆的好时候，快来帮大华和小化一起找逃生通道吧。”

他边说边拉住小化的手背，触摸了一下房门，小化满脸疑惑。

“突发火灾时，如果我们待在未燃烧的房间内，逃离前应先用手背去触摸房门，看看房门是否已经变热，如果很热，千万别打开门，否则烟雾和火就会冲进来。现在房门不热，我们赶紧离开吧。”

走出仓库，小化伸手正要按电梯键，小精灵忙阻止道：“火灾逃生时千万不要乘坐电梯！应该通过逃生通道往楼层下面跑，如果通道被烟火封阻，就要往背向烟火的方向撤离，逃往天台或者阳台等空旷的地方。”

小化听后恍然大悟，谢过精灵们，和大华通过逃生通道前往下一站。

3 氢氧化铝和氢氧化镁阻燃剂

前往下一站的路上，小化不禁问大华：“下一个会是更安全环保或应用更广的阻燃剂吗？”

说话间，两个“庞然大物”——氢氧化铝和氢氧化镁阻燃剂闪了出来。

“哇，你们长得好高呀！”小化惊讶地说。

哥哥氢氧化铝阻燃剂轻笑，说：“因为我们俩是阻燃剂里的两大巨头呀！早期，我因为价格低廉且对环境无毒无害，在阻燃界打遍天下无敌手呢！”

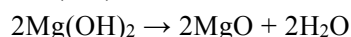
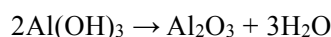
弟弟氢氧化镁抢着说道：“我也性能优异，性情比哥哥更温顺，跟高温热塑性材料合得来！但我的热分解温度较高，所以我需要与哥哥合作，互为补充，以达到更好的阻燃效果^[4]。我们哥俩的消耗量加起来占了添加型阻燃剂的半壁江山呢^[9-11]……”

“着火了！”突然看见前方办公桌上的纸燃烧了起来，大华和小化惊叫道，“马上要烧到旁边的电脑啦！”

氢氧化镁阻燃剂气定神闲地说：“放心吧，两分钟内这台电脑是不会燃烧的！我们阻燃剂潜伏在各种电子电器的电路板、手机和电脑的塑料外壳中，使它们变为难燃材料。我们受热时，使用‘脱水’魔法，吸收掉大量的热量，给聚合物打一剂‘退烧针’，降低他们的表面温度，就烧不起来啦。”

“脱水？脱水了不就是生病了嘛，生病了还怎么工作呢？”小化惊奇地问道。

两兄弟相视一笑，氢氧化铝阻燃剂回答说：“哈哈，我们的脱水和你们人类的脱水可不是一回事儿。”说着在地上写出了相应的方程式：



“脱水是我们的核心技术。我们变身成氧化物后，就像给可燃物穿上了防火服，阻止他们与空气接触，还能吞下烟尘颗粒；同时，召唤出的水妹妹帮忙赶走可燃气体。所以脱水只是变了个身，完全不影响到工作。”

“原来如此！”小化兴奋地说道。他的眼前浮现出未来的场景：没有了火灾，大家都会生活在安全之中……

弟弟打断了小化的畅想：“我们也不是十全十美的。我表面的正电荷宝宝喜欢亲水的物质，但一碰到亲油性的聚合物就哇哇大哭；另外，我的晶粒喜欢聚在一起，分散性不好，会降低高分子复合材料的力学性能……^[10]”两个精灵不好意思地低下了头。

小化抱住他们，看着大华说：“应该会有解决办法吧？”

大华挠挠头，思考了片刻：“肯定有，我们到实验室看看。”

“想要解决第一个问题，用这台超重力机就可以实现。”大华熟练地操作起来，将小精灵们请到机器里面去，过了一会儿，两兄弟竟然变得非常娇小。

“通过颗粒超细化将他们变瘦一些，就能够改善阻燃剂小精灵与材料之间的关系，让他们和睦相处^[10]。”大华对小化说。

“第二个问题也不难，你们看，谁来了？”

实验室入口走来了一群小蝌蚪模样的物质——表面活性剂，他们一头亲水、一头亲油。只见他们走过来拉起阻燃剂形成复合体，阻燃剂表面的正电荷宝宝们遇到非极性材料时不再哭泣了。

大华看着这温馨和睦的一幕，解释说：“加入表面活性剂、偶联剂等具有两性基团的物质，使它们具有‘疏水亲油’的表面性质，可以增强他们的阻燃性能呢。”

两兄弟开心地向大华道谢，互相牵起手来转了个圈，渐渐融为了一体：“还有一个办法，就是合成镁铝复合阻燃剂，再与磷系阻燃剂小精灵合作，就可以变成镁铝水滑石基复合阻燃剂，也可以一并解决之前的问题啦^[12]。”

4 铋系阻燃剂

大华和小化来到了最后一站。只见卤系阻燃剂与氢氧化镁弟弟又出现在了眼前，他们身着空乘人员的服装，手牵着一个白净的小精灵。

“欢迎乘坐本次航班！我是本次航班的乘务员三氧化二铋，请系好安全带，确认手机和各种电子

设备处于关机状态或者飞行模式。”白色小精灵微笑着说道，并指引大家入座。

大华说：“这个白色的小精灵三氧化二锑是锑系阻燃剂一族中应用最广泛的一员，主要用于塑料制品和纺织物。此外，胶体五氧化二锑也是锑系阻燃剂的主要产品。”

“可是，其他阻燃剂兄弟怎么也在这里呢？”小化不解地问。

溴系阻燃剂小精灵走过来说：“小锑妹妹比较文弱，她需要我们的帮助，构成强有力的锑/卤阻燃协效体系，一起擒拿火焰。比如，三卤化锑可以捕捉气相燃烧中的 $\text{OH}\cdot$ 和 $\text{H}\cdot$ 自由基，阻止燃烧继续；例如，十溴二苯基乙烷颗粒与三氧化二锑以及氢氧化镁混合，能显著降低烟气的释放量，这样大家就更安全啦^[13,14]。”

“小锑妹妹，除了与卤素合作外，你还跟谁一起共事呢？”大华问道。

“硼化锌小姐也是我们的合作伙伴，我们联手添加到环氧基膨胀型阻燃剂中，帮助塑料穿上炭质泡沫层作为防护服，有隔热、隔氧、抑烟的功效；此外，我们还会吸收大量的热量，与炭化后的材料相结合，形成玻璃状保护层，进一步起到隔热的效果。”

“你有缺点吗？”小化抛出了疑问。

“当然有！”小锑精灵接过话，“我与聚丙烯关系不好，形成的复合物力学性能会下降^[12]；此外，我还有一个致命的缺陷，我已经被世界卫生组织国际癌症研究机构列入2B类致癌物清单中，但如果小心使用，我是不会造成危害的。”

小化悬着的心总算落了下来，和大华一起走出了飞机的舱门。

今天的学习之旅可真是收获颇多啊！

参 考 文 献

- [1] 百度百科. 阻燃剂. [2022-08-20]. <https://baike.baidu.com/item/%E9%98%BB%E7%87%83%E5%89%82/3529317>
- [2] 百度百科. 卤系阻燃剂. [2022-08-20]. [https://baike.baidu.com/item/%E5%8D%A4%E7%B3%BB%E9%98%BB%E7%87%83%E5%89%82/9588529#reference-\[1\]-3327779-wrap](https://baike.baidu.com/item/%E5%8D%A4%E7%B3%BB%E9%98%BB%E7%87%83%E5%89%82/9588529#reference-[1]-3327779-wrap)
- [3] 维基百科. 阻燃剂. [2022-08-20]. <https://encyclopedia.thefreedictionary.com/fire+retardant>
- [4] 李佳佳. 科技视界, **2013**, No. 16, 2.
- [5] 薛姗, 夏华南, 卢雨萱, 聂艳, 王念, 刘嘉宇, 田磊. 绿色科技, **2022**, 24 (2), 6.
- [6] 刘晓双. 山东化工, **2022**, 51 (13), 83.
- [7] 吴华东, 陈华, 张林锋, 郭勇, 周玉新, 李丽, 郭嘉, 高辉华. 无机盐工业, **2018**, 50 (2), 8.
- [8] 张雪, 张园, 叶斐斐, 杨勇, 钱运华. 工程塑料应用, **2015**, 43 (11), 112.
- [9] 刘立华, 贾俊芳. 化工科技市场, **2008**, 31 (4), 6.
- [10] 谢超飞. 有色金属材料与工程, **2018**, 39 (6), 44.
- [11] 周产力, 王犇. 无机盐工业, **2004**, No. 3, 11.
- [12] 李冉冉. 镁铝水滑石基复合阻燃剂的制备和表征[硕士学位论文]. 大连: 大连交通大学, 2018.
- [13] 鲍志素. 塑料助剂, **2006**, No. 4, 34
- [14] 米鹏, 朱军伟, 陈琦, 张烨, 舒永, 姚斌, 邢文国, 魏凤, 冯维春. 精细与专用化学品, **2021**, 29 (7), 21.