

•科普•

doi: 10.3866/PKU.DXHX202302030

www.dxhx.pku.edu.cn

烟花王国奇遇记

郑直¹, 周玮杰¹, 刘淇¹, 管邦同¹, 赵军龙^{2,*}¹ 西北大学化学与材料科学学院, 化学国家级实验教学示范中心(西北大学), 西安 710127² 西北大学医学院, 西安 710069

摘要: 通过虚构小明同学在烟花王国的奇幻旅行, 简述了烟花的前世今生, 并借此展现烟花的安全设计、环保配方和颜色来源, 同时介绍了烟花及其衍生产品在生活中的实际应用, 对人们正确看待和使用烟花起到指导意义。

关键词: 烟花历史; 安全烟花; 焰色反应; 环保; 科普

中图分类号: G64; O6

Adventures in the Kingdom of Fireworks

Zhi Zheng¹, Weijie Zhou¹, Qi Liu¹, Bangtong Guan¹, Junlong Zhao^{2,*}¹ National Chemistry Experimental Teaching Demonstration Center, College of Chemistry and Materials Science, Northwest University, Xi'an 710127, China.² School of Medicine, Northwest University, Xi'an 710069, China.

Abstract: By imagining Xiao Ming's fantastical journey in the Fireworks Kingdom, this paper briefly outlines the history and present situation of fireworks, and showcases the safety designs, environmentally friendly formulae, and color sources of fireworks. At the same time, the practical use of fireworks and their derived products in daily life were introduced, providing guidance for people to have a correct understanding and usage of fireworks.

Key Words: History of fireworks; Safe fireworks; Flame reaction; Environmental protection; Popularization of science

小明是一个十足的烟花迷, 他的书桌上摆满了有关烟花的书籍, 甚至连梦里都常常有烟花。这天晚上, 小明又梦见烟花了, 梦里的烟花是一个小精灵, 他自称烟花王国的使者, 代表国王邀请小明去王国做客。身为烟花迷的小明又怎么会放过这难得的机会? 于是, 在小精灵的带领下, 小明踏上了烟花王国的奇幻之旅……

1 烟花的由来

小精灵带着小明走在通向王宫的大道上, 仔细一看, 烟花王国的居民们竟然是各式各样的烟花: 娇小玲珑的小摔炮、高大威猛的加特林、精致绚丽的仙女棒、轻巧灵动的窜天猴、舞姿轻盈的小陀螺等等。王国的道路上车水马龙, 路边居民们张灯结彩, 商贩们的吆喝声此起彼伏, 非常热闹, 像是在迎接一个盛大节日的到来。

收稿: 2023-02-16; 录用: 2023-03-09; 网络发表: 2023-03-29

*通讯作者, Email: zhaojunlong327@163.com

基金资助: 国家自然科学基金委员会专项项目(22142014); 陕西省提升公众科学素质计划项目(2021PSLK27); 西北大学2021年度本科人才培养建设项目(XM05211697)

“今天是烟火节，烟花王国一年里最重要的节日，所以国王才在今天邀请你来啊！”小精灵开心地介绍道，“晚上会有盛大的烟火庆典，整个王国的居民们都会点上最漂亮最热闹的烟花来庆祝。据说这样可以驱散邪祟，保佑来年平安呢。”

“哇塞！岂不是和我们的春节一样！”小明兴奋地说道。

“是的，烟火节和你们的春节类似，是非常热闹有趣的节日呢。”小精灵笑着说道，“而且烟火节也有着悠久的历史。相传可以追溯到远古时期爆竹的诞生，那时先辈们为了驱赶野兽，在火中燃烧带节的竹竿，因为空气的热胀冷缩使得竹节会突然爆裂而发出响声。后来到了硝磺时代，也就是你们历法的公元八九世纪左右，火药的发明极大地推动了烟花爆竹的进步^[1]。古文献记载道：‘硫二两，硝二两，马兜铃三钱半……将熟火一块，弹子大，下放里内，烟渐起。’马兜铃是一种植物，在高温下碳化并和硫磺、硝石发生如式(1)所示的化学反应：



“后来经历纸爆时期、鞭炮时期(图1)，烟花的制造工艺不断成熟，渐渐发展成今天的烟花王国。”

“没想到烟花还有这样悠久的发展历程呢。”小明感慨道。

“没错，正是无数先辈们不断丰富烟花制作的技艺和技巧，才奠定了今日的烟花王国的繁荣呀。”

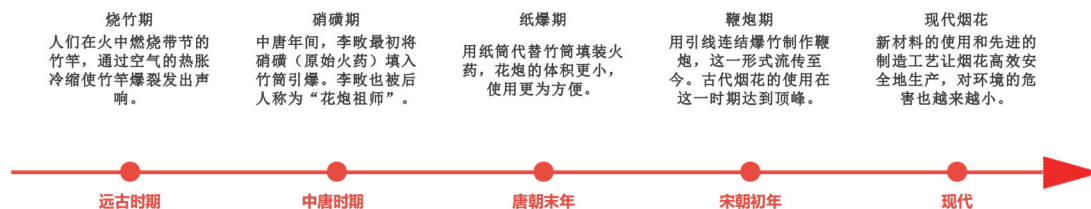


图1 烟花爆竹的演变历程

2 静默无声的守护——引火线

前面不远处有一队王国的士兵严密地守卫在一辆辆装载车旁，另外几支小队小心翼翼地从小车上取下什么东西，然后挨家挨户分发给居民们。

“他们在干什么呀？神神秘秘的。”小明心想。

“那是引火线将军和他的部下们正在给居民们发烟火节要用的引火线呢。”小精灵看出了小明的疑惑，解释道：“烟花王国到处是烟花，为了防止意外发生，王国会统一管理所有的引火线。别看引火线小小一根，里面的学问可多了，没有它，再厉害的烟花也放不了。”

“小精灵、小明同学你们好。烟火节将至，你们也拿一些引火线回去点烟花吧。”将军贴心地取来两小捆引火线，递给小明和小精灵，“这是最新型的高氯酸钾引火线，比之前的引火线更加安全。”“将军，书上说引火线基本都是用氯酸钾作氧化剂，为什么您这里会使用高氯酸钾呢？”小明端详着手中的引火线，不解地问道：“氯酸钾吸湿性小，爆炸性能好，生产工艺简单，成本还低呢^[2]。”

“是的，你说的没错，而且正是出于这些原因，不仅仅是引火线曾经使用氯酸钾，火药里也有普遍使用的情况，”将军顿了顿，正色道，“但是在烟花王国，安全才是最重要的。王国很早就开始禁止在火药里使用氯酸钾，现在引火线也在慢慢舍弃氯酸钾作氧化剂。我们发现，氯酸钾分解温度比较低(360℃)，而且会在分解时放热，这在氧化剂中是非常罕见的，如果用于制作引火线的话会导致其点火温度降低。另外氯酸钾在很低的温度便会出现晶格松弛，在火药中与硫/磷等物质配伍的话会很危险^[3]。”



“晶格松弛？将军，这是什么意思呀？”小明第一次听到这个新的名词，一下子激发了他的求知欲。

“简单来说，化学反应是从分子相遇开始的，但固-固之间分子碰撞的几率很低，难以发生发应。固体的晶格越松弛，分子间的碰撞面积越大，反应也越剧烈。以S-KClO₃为例，42℃左右氯酸钾便会出现显著的晶格扩散现象，硫碎片会侵入氯酸钾晶格内部，从而降低了火药的发火温度，大概只有150–164℃。”

“呀！这么低的温度呀，那岂不是比沸水的温度都高不了多少。”小明感觉到非常不可思议。

“你说的没错，而且最危险的是，氯酸钾一旦与硫磷混合制成火药后，其撞击感度和摩擦感度均在95%左右，几乎像一个肥皂泡一样非常不稳定，轻轻捻一下都有可能燃烧爆炸。”将军还补充道：“王国的安全标准是撞击感度不能高于50%，摩擦感度不能高于60%。相较而言，高氯酸钾就安全多了，混合可燃物后撞击、摩擦感度则分别在25%、35%左右^[4]。”

“原来如此。”小明惊奇地感叹道。

“不仅如此，”小精灵一脸崇拜地说道，“除了氧化剂，将军还改良了引火线的粘合剂、消烟剂、稳定剂(表1)等配方，提高了引火线的稳定性和安全性，可以说没有引火线将军就没有烟花王国的和平安定呢^[5]。”

表1 引火线的常见配方

功能	常用药剂
氧化剂	高氯酸钾、重铬酸钾、重铬酸铵、硝酸钾
还原剂	碳、硫磺、金属粉(铝粉、铁粉、钛粉)
粘合剂	阿拉伯树胶、松香、白乳胶、糯米粉、石蜡、虫胶
消烟剂	八钼酸铵、氢氧化铝、氢氧化镁
防结块剂	聚乙烯醇、聚乙烯吡咯烷酮、十二烷基苯磺酸钠
稳定剂	对叔丁基苯酚、氯乙基醋酸乙烯酯三元共聚树脂、硝化纤维素
钝感剂	硝酸钡、硬脂酸、凡士林、合成树脂、碳酸氢钠
防水剂	石蜡、硬脂酸、虫胶

“呵呵，使者先生过奖了，这些都是我们分内之事，”将军温和地说道，“时候不早了，先生们，该进宫了。”

3 归去来兮——火药的环保之路

“进王宫前，我们需要去火药检察官那里领取通行证。不过检察官的脾气可不太好，咱们得小心一点才行呀。”小精灵调皮地对小明说。

“这次的烟火节事关重大，火药的选择必须慎重考虑！怎么可以用黑火药？！你们的设计工作是怎么做的？”还没进门，小明就被检察官怒不可遏的声音吓了一跳。

“传统烟花用的不就是黑火药吗，为什么检察官会发这么大的脾气呀？”小明悄悄地问小精灵。

“是不是出于安全的考虑呢？你想想，黑火药敏感易燃，实在是太危险了。”小精灵若有所思地回答道。

“不错，但最严重的问题还是对环境的影响太大了。”火药检察官似乎听到了小明他们的谈话，一本正经地补充道，“黑火药做成的烟花，其燃烧产物有CO、SO₂和K₂S等污染物(表2)，这不仅对王国的环境和发展非常不利，还一度引发了周边其他王国的抗议。”

“那么检察官先生，有没有其他既安全又高效的火药可以供我们选择呢？”

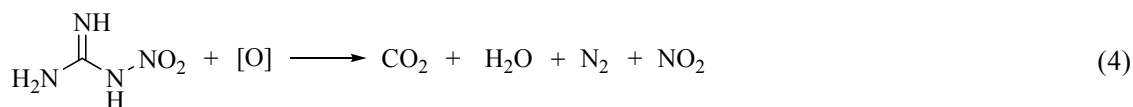
“当然有，例如王国科技部最新研发的无烟烟花，安全性高、药剂安定性和稳定性良好。且配制出的烟花产品燃放时，能达到少烟、无残渣、安全又环保的效果。”介绍起最先进的烟花，检察官非常自豪。

表2 部分烟花燃放产物及其危害

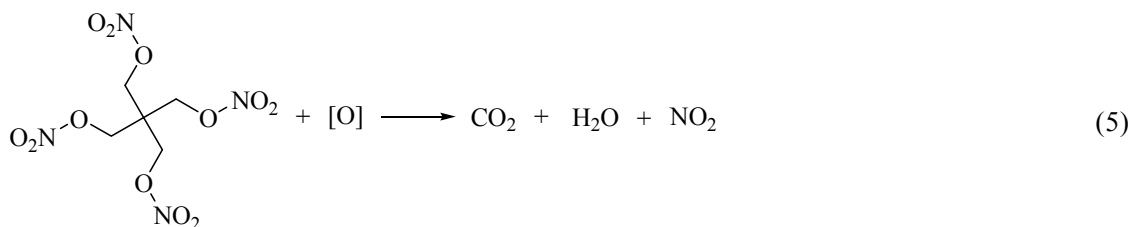
污染物种类	危害
SO ₂ 、CO、NO _x 等	会形成光化学烟雾、破坏臭氧层、加剧温室效应、形成酸雨等； 对呼吸系统造成损伤；对人体蛋白质、酶等物质造成损害，导致免疫系统受损
PM2.5、PM10	能见度变低，影响大气环境质量以及云和降雨过程，降低作物产量； 会吸附有害物质，吸入体内会引起肺部损伤及功能障碍
铅化物、汞化物、砷化物等重金属污染物	在人体的某些器官中富集，使人体内蛋白质及各种酶失活，如果超过人体所能耐受的 限度，会造成人体急性中毒、亚急性中毒、慢性中毒等
残留碎片如金属、玻璃、塑料、未完全燃烧的木炭、纸屑等	垃圾量会成倍增加，严重影响了环境卫生，加重环卫工人的负担； 雨雪天燃放，会进入到周围水体之中，造成水体污染
噪声污染	爆竹爆炸所产生的噪音可以高达90 dB以上，一些燃放核心地区的噪声高达135 dB，可 能会造成急性爆震性耳聋、永久性的听力损害

“这么厉害呀！请问其中的原理是什么呢？”

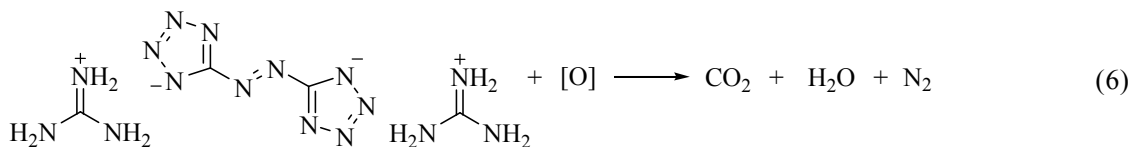
“这其实不复杂，秘密在于火药运用的新型材料，比如硝基胍、季戊四醇四硝酸酯、偶氮四唑二胍等，爆炸时几乎不产生烟尘(式(4)–(6))。更难能可贵的是，这些物质对撞击的敏感度小，在烟花药剂配制和储存中具有更高的稳定性……”关于烟花，检察官似乎有说不完的话题，见小明听得津津有味，他也很高兴，继续说道：“我们还对烟花中的其他功能性材料配方进行了改良(表3)，这样既能进一步提高烟花的效果，又能减少对人体的伤害和对环境的污染，这才是能真正造福王国的东西呢^[6]！”



硝基胍的氧化分解反应



季戊四醇四硝酸酯的氧化分解反应



偶氮四唑二胍的氧化分解反应

表3 环保烟花的部分原料改进

原料类型	传统烟花的配方	高性能环保配方
氧化剂	氯酸钾	高氯酸钾、硝酸胍、硝酸脲、硝酸胍、硝酸酯、硝酸
燃料	铝粉、镁粉、钛粉、硅粉、硫磺、木炭等	硝化纤维素单基粉、硝化纤维素和硝化甘油双基药粉
粘合剂	酚醛树脂	生物聚酯
助色剂	六氯代苯	使用低毒甚至无毒的PVC或者氯化石蜡
爆音剂	Pb ₃ O ₄ + Mg-Al	A型CuO来代替Pb ₃ O ₄

4 五彩斑斓的秘密——焰色反应

“检察官先生，我来给您送这次烟火节特制的五彩药粉啦。”众人谈话间，一位身着王室礼服的女子施施然走进了房间，火药检察官连忙上前迎接公主。她注意到了一旁的小明，亲切地问道：“你好，你就是父王提到的那位客人吧？欢迎你来到烟花王国。”

“谢谢公主殿下。”小明看向公主手中捧着的神秘小匣子，按捺不住好奇心，问道：“请问公主殿下，您手中的匣子里的就是能让烟花变得五彩斑斓的药粉吗？”

“没错，这就是烟花五彩斑斓的秘密所在(表4)。不过只有在烟花绽放的时候，药粉才能发挥它神奇的效果哦。”公主神秘地说道。

表4 烟花中常见的金属化合物添加剂

颜色	常见元素	常见化合物
红色	Sr、Li	SrCO_3 、 $\text{SrC}_2\text{O}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
黄色	Na	NaHCO_3 、 Na_2CO_3 、 NaCl 、 $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$
蓝色	Cu	$\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ 、 $\text{CuCO}_3 \cdot \text{As}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$ 、 CuHAsO_3 、 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
绿色	Ba、Sb	BaCO_3 、 Sb_2S_3
紫色	Sr、K	$\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ 、 SrCl-CuCl

“啊？这是为什么呢？”小明更加好奇了。

见小明如此勤学好问，公主自然也是乐意解答，“药粉其实只是一些普通的金属化合物，但烟花绽放时经过火焰灼烧，金属原子的电子‘吃饱’了能量，变得活泼起来，跃迁到能量较高的轨道。但处于激发态的电子是不稳定的，不一会儿电子再回到低能量轨道。这时电子刚刚‘吃进去’的能量有一部分以可见光的形式发射出去，所以我们能看到发光的现象。不同金属发射的特征波长是不一样的，由此才产生了多彩的颜色^[7, 8]。”

“哇，公主殿下可真是博闻强识呀！”小明由衷地赞叹道。

“你过奖了，我只不过是学习了先辈们的配方罢了，”公主谦虚地说道，“元素周期表中，还有15个镧系元素和同属III副族的铈和钇共17个稀土元素在烟花中尚未启用。稀土元素能级跳跃通道多达20余万个，可以产生多种多样的辐射和吸收，使烟花更加绚丽多彩。如果能成功将其应用在烟花上，那才是真正的了不起呢^[9]。”

“我听说烟花王国蕴藏着丰富的稀土资源，相信通过王国人民的勤劳和智慧，稀土烟花在王国一定会有非常广阔的发展前景。”小明诚恳地说道。

“嗯，真希望能亲眼看到稀土烟花在王国的夜空中绽放，那一定很漂亮！”烟花公主开心地许愿道，“时候不早了，我带你去见父王吧。”

5 润物细无声——烟花与生活

“孩子，旅途如何，喜欢这里吗？”国王和蔼地说道。

“是的，国王陛下，一路走来学到了很多知识。您的王国富饶安定，底蕴深厚，更难能可贵的是王国快速发展的新技术，让烟花更安全、更环保、更美丽。”小明兴奋地回答道。

“呵呵，”看到小明受益匪浅的样子，国王也很高兴，他继续说道：“不过烟花的魅力可远不止你刚刚看到的，在国防、航天、矿业、汽车工业甚至医药等方面，‘烟花’们都发挥了重要的作用。”

“真的有这么厉害吗？”小明深深地被烟花的影响力震撼到了。火药检察官也提到过，新型烟花在研发的过程中曾出现过许多诸如硝化甘油(NC)、三硝基甲苯(TNT)、三亚甲基三硝胺(又名黑索金，RDX)等含能物质(图2)，虽然并不推荐用在烟花的制作上，但在国防、采矿、修路和爆破等方面广泛

使用。小明也很了解航天领域，他知道火箭是从烟花飞天中获得灵感，使用更稳定的偏二甲肼-四氧化二氮/液氧-煤油作为燃料，将卫星送上了太空，这才有了现在方便的导航定位、移动通话、网络电视等。



图2 部分含能化合物结构式

“汽车和医药也用得上烟花吗？”小明嘀咕道。

“哈哈，这些不安分的家伙们却用来做保障安全的事。”国王笑着说。

“安全气囊？”这的确出乎了小明的意料，不过随即他便明白了，“是因为火药能够快速反应并迅速产生大量气体的缘故吧？”

“是的，孩子。当然现在的安全气囊里装的可不是火药，而是后来王国的科学家研究合成的新材料，例如叠氮化钠、碱式硝酸铜、硝酸胍基脲铜等^[10]。至于医药领域，那是偶然发现，用于火药的硝酸甘油、季戊四醇四硝酸酯能在人体内释放一氧化氮以扩张血管，于是便广泛应用于心脏病急救，挽救了万千生命……”

“原来如此，看来烟花虽小，却早已与我们的生活息息相关了。”小明恍然大悟。

不知不觉，天色渐暗。随着一道道尖锐的嘶声穿过天际，时隔多年，灿烂的烟火再次绽放在王国的夜空。

小明受邀跟随国王来到王宫的观景台，他看到万千烟火在天际绽放着，空气中却没有料想中那刺鼻的气味，夜空也是清澈如洗，不见一丝云烟。虽然早有心理准备，但环保烟花的效果还是大大出乎了小明的想象，他不禁感慨道：“国王陛下，这样的烟花真是太不可思议了！”

国王显然也对这次的烟花庆典感到非常满意，不过他还是提醒道：“虽说我们已经取得了一定的进步，但‘行百里者半九十’，烟花王国的创新发展之路还远着呢。后续我们应该更加不断加强安全监管力度、推进烟花行业标准化进程、研发新型环保产品、加强王国居民的安全意识教育，让孩子们开心享受以后的每一个烟火节。”

6 结语——小明的日记

梦醒后，小明觉得这一切都太真实了，烟花王国的种种还历历在目，小明将这一次奇幻的旅行写在了日记本上。文章的最后他这样写道：最美不过人间烟火，一部烟花的发展历史，就是中国传统文化发展史，同时也浓缩了中国古代化学的发展历程，这是我国古代人民智慧的结晶，是中华文化的瑰宝。历史的车轮滚滚向前，烟花发展的接力棒现在来到了我们手里，需要我们在安全、健康、环保的基础上，守住这份从古到今的传承，这份独有的情怀与浪漫。

参 考 文 献

- [1] 潘功配. 花炮科技与市场, 2010, No. 3, 7.
- [2] 范小花, 蔡治勇, 易俊, 鲁宁, 赵一姝. 中国安全科学学报, 2008, No. 6, 81.
- [3] 钱新明, 邓楠. 中国安全生产科学技术, 2008, No. 3, 64.

-
- [4] 张文军. 花炮科技与市场, **2012**, No. 4, 38.
- [5] 刘吉平, 李琪军, 刘克普, 吉伟生, 于保藏, 周天驰. 一种环保型引火线及其制备方法: CN 201911231170.X[P]. 2020.
- [6] 彭克荣, 卫延安. 火炸药学报, **2015**, No. 4, 50.
- [7] Kosanke, K. B.; Kubota, N.; Sturman, B.; Jennings-White, C.; Shimizu, T.; Chapman, D.; Wilson, M. A.; Dillehay, D. R.; von Maltitz, I.; Smith, T.; *et al.* *Pyrotech. Chem.* **2013**, 38–40, 239.
- [8] 陈晓峰, 吴勇. 大学化学, **2013**, 28 (5), 79.
- [9] 潘功配. 花炮科技与市场, **2001**, No. 4, 9.
- [10] 雷晴, 何金选, 卢艳华, 叶丹阳, 任晓婷, 丁宁. 一种硝酸脒基脒铜盐络合物的制备方法: CN 201810463528 [P]. 2018.