



焰火背后的科学

(中国科学院物理研究所 厚美琪 编译自 Pierre Thebault. *Physics World*, 2018, (12): 25)

焰火已经成为全世界庆祝活动的标志。作者 Pierre Thebault 通过五光十色的烟花和响亮的爆竹声，把目光投向了焰火技师用来改善烟花安全、对环境的影响和焰火的壮观程度等一系列科学技术问题。

在跨年夜的钟声敲响的时候，夜空被夹杂着噼噼啪啪爆竹声的绚丽多彩的烟花所照亮。虽然我们在家就可以燃放烟花，但是专业的焰火表演更为璀璨壮丽。从全国性庆祝活动到世界杯和奥运会等国际体育赛事，耗资巨大的焰火都是这些庆典最壮观的压轴戏。

关键问题是烟花只能使用一次，是“一次性”产品，专业的焰火技师是如何能不经过实践就制作出如此完美的烟花序列的？在不能事先排练的情况下，他们怎么来预知演出效果呢？答案在于必须对焰

火组分和行为事先有充分了解。幸运的是，这是最古老的行当之一，人们在这方面已经很有经验。

焰火的历史可以追溯到公元前14世纪，那时中国人会把干的竹棍扔到火上以获得震耳欲聋的效果，他们相信这种方式能吓跑恶魔。然而，这种“鞭炮”并不像我们今天认识和喜爱的那些烟花。事实上，直到公元9世纪的唐代，“黑火药”——焰火的基础——是由木炭、硫磺和硝石制成的。这些混合物的性能逐渐优化为75%的硝石、10%的硫和15%的木炭——这些比例

在一千多年之后的今天仍然被沿用。

几个世纪以来，在世界各地，各种各样的烟花被聪明的工匠们通过反复试验设计出来。此时烟花更像是“艺术”而不是“科学”。烟花的效果主要在于它的火花、炮竹声，以及它排出的明亮气体和粒子，然而之前烟花的颜色仅限于暗红及黄色。那时的焰火成份是99%黑色粉末，添加了可以产生想要的视觉效果，诸如铁和木炭之类的添加剂。

真正科学的烟花爆竹制作方法始于有了现代化学的18世纪末。



图1 “星星”的破碎。粉末状的化学物质被压缩成一个个点燃后变成色点的“星星”。一些“星星”混合有额外的焰火化学物质，将它们转化产生微型爆炸

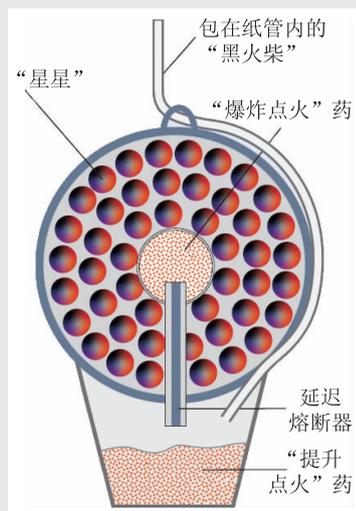


图2 提升和爆炸。除了它们的烟火化学物质外，“弹壳”里还包含了一种提升点火成分、一个延迟引信和一种爆炸点火成分

1770年代，法国化学家 Antoine Lavoisier 通过实验证明燃烧是一种物质与氧气结合的过程。焰火的氧气是由硝石提供的，几年后被鉴定为硝酸钾。1787年，另一位法国化学家 Claude Louis Berthollet 发现了氯酸盐，这意味着硝石不再是唯一可用于焰火组合物的氧化剂。

法国焰火技师 Claude-Fortuné

Ruggieri 在 1811 年出版的 *Elémens de pyrotechnie* 一书中首次报道了硝石与氧进行化学反应的能力。这是焰火科学的里程碑，是第一篇用科学语言解释焰火的论文，完全符合 Lavoisier 的燃烧理论。Ruggieri 也是第一个使用各种氯酸盐和硝酸盐来赋予焰火除了微弱红色和黄色之外的“真实”颜色的焰火技师。之后迅速有了钡盐、锶盐和铜盐分别用于焰火中绿色、红色和蓝色的显示。

焰火里有什么？

焰火效应是通过爆炸物质的化学反应产生、投射和推动的，这些物质被设计成在点火时产生热、光、声、气或烟。

大多数现代焰火的核心都含有一种可燃的非均质混合物，这种混合物由细粉状化学物质根据需要量身定做混合而成，以生产出想要的烟花。这些焰火组合物包括有氧化剂(例如氯酸盐、高氯酸盐、硝酸盐和氧化物)、还原剂(例如金属粉末、木炭、硫、硼和有机化合物)和固体、液体或糊状添加剂。这些添加剂有助于控制焰火燃烧速率，同时又使焰火对可能的意外刺激(如冲击、摩擦和静电放电)不那么敏感。

然后这些混合物会被压制、铸造、模塑、轧制成小球、圆柱体或立方体，以便在空气中燃烧，并在黑暗的天空中作为明亮的彩色星点移动。这些被称作“星星”的物体还可以包含一些额外的焰火化学物质，这种化学物质在燃烧时将它们分解成碎片，并改变所产生的视觉效果(图1)。

“星星”和其他两种粉末一起储存在“弹壳”(图2)中。其中一种粉

末是一种“提升点火”药，将“弹壳”发射到空中。另一种粉末是“爆炸点火”药，它打破“弹壳”，点燃“星星”并把它们向外推。位于这两者之间的是一列压缩的化学物质，它延缓了从提升火药到爆炸火药的火力传递，从而使“弹壳”在其弹道上的预定点爆炸。该延迟熔断器由提升火药点燃，像香烟一样燃烧，再由其燃烧速率确定间隔时间，然后点燃爆炸火药。

所有的烟花还需要一个初始点火来启动整个过程。这是通过一串用黑色粉末覆盖的纺织纱线完成的。这些黑色粉末在外部点火后沿线逐渐燃烧。这种被称为“黑火柴”的导火索通常松散地包在纸管或护套中，其线性燃烧速率可以提高到每秒几米。

焰火的征程

即使是孩子玩的手持闪光炮这样简单的东西也可能有风险，任何涉及火和爆炸的物体都可能会造成一系列的危害和风险。幸运的是，已有许多规范和国际标准来确保那些制作、观看和操作烟花人的安全。这些规定包括对消费者和专业烟花的制造和性能要求，检验是否符合这些要求的试验方法，以及帮助用户安全地和从正确的距离点燃烟花的标签。这些规定不仅仅提高了烟花的安全性——它们还提高了测试设备的精确度，这反过来又使焰火技师提高了他们的技艺。这种设备用于对焰火组合物的成分进行化学表征，并在它们被整合到焰火中之前和之后检查其性能。

焰火化学测试的一个优点是，它可以帮助开发新的成分，和减少对工厂工人及使用者的风险。为了尽可能降低原料和反应产物对环境

的影响，人们也付出了很多努力。一些公司和实验室已经进行了可行性和开发研究来消除重金属和其他有毒物质，并减少烟雾产生和未燃烧的“星球”组分的落尘——在欧盟，这些是由 REACH 环境法规来规范的。焰火技术人员特别感兴趣的是，利用有机化学来发现比传统焰火使用的无机化合物更安全 and 更环保的物质和分子。

但需要严格控制的不仅仅是它们的化学成分。焰火的行为也需要被完全理解。以焰火达到的高度为例——知道焰火将传播多远是决定用户和观众应该在哪里才能保持安全的主要参数之一。测量这种“效果”高度通常要使用包括经纬仪和由可见光或红外相机记录的图像分析。专家也在评估使用雷达和多普勒跟踪获得更准确的高度影响值的可能。

没有排练的演出

为了帮助评估公众在焰火表演期间可能面临的风险，数学家开发了模型来预测空中炮弹的弹道行为。考虑的因素包括例如迫击炮(用于发射炮弹的管道)在垂直方向的偏离角度，以及当地的天气预报，特别是风速。内弹道学软件(专门研究弹丸的推进)使用真实气体状态方程让焰火技术人员得以预测迫击炮口处的炮弹速度。外弹道学软件(如 ShellCalc)让焰火技术人员得以绘制三维炮弹轨迹(图3)。

这种建模程序被设置成设计焰火表演的主要工具，特别是在有人、建筑物和古迹相对接近发射点的地方。它们不仅能建议烟花效应的最佳方向，还可预见到天气情况发生变化时的受影响区域。让烟花

设计师能虚拟演出，做出修改的软件还可以使表演在美学上有所提高，比如能更准确地匹配音乐与烟花效果。能够规划和可视化烟花对于焰火设计师来说是一个巨大的优势，他们因此可以创造出越来越复杂、更加雄心勃勃的表演节目。

对于盛大的演出来说，拥有可靠的点火设备和电子点火线网络就显得尤为重要。它们必须耐电磁环境和恶劣气候，同时符合最新的国际电子标准。还需要以精确的顺序，从不同的距离和时间与音乐一起发射。这些挑战得靠三部分方案解决：计算机控制的发射设备；按子群组织并配备有电子集线器的发射线路网络，这些电子集线器通过精密线路或无线电传输与中央发射单元相连；以及能够在表演期间启动连续发射序列的仿真软件。

这意味着自动发射这一完整序列现在已是可能的。然而，电子时间比焰火时间精确得多，焰火设计师必须在发射程序与表演美学目标

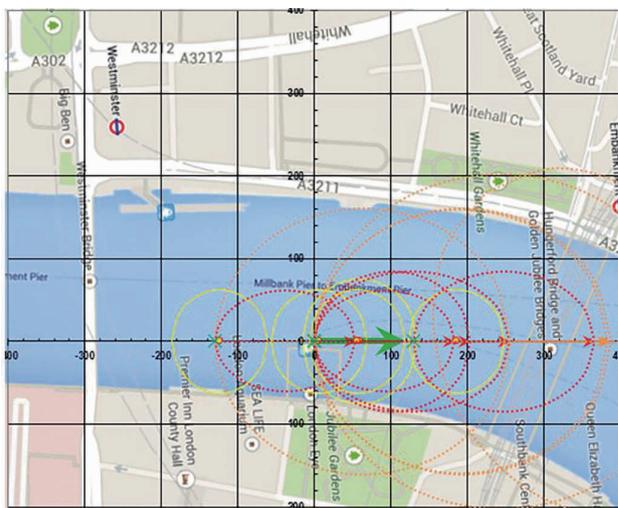


图3 风险的降低。“ShellCalc”是一个允许三维模拟烟花效果的计算弹道轨迹软件，它可以考虑包括人群应该离开多远等重要细节

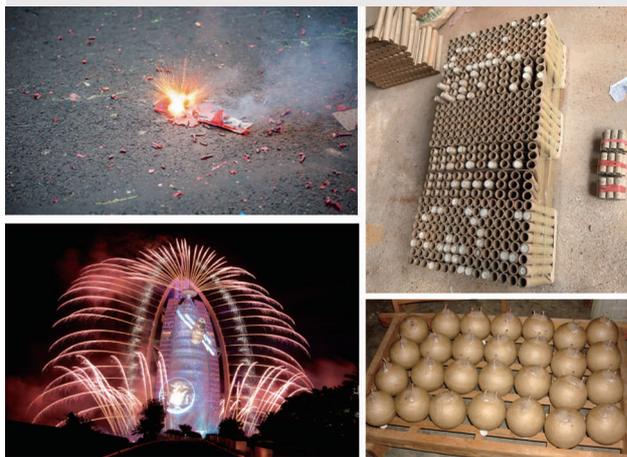


图4 鞭炮可以看成是烟花的前身(左上角)。大多数现代烟花包括一个点火炮(右上角)和一个弹壳(右下角)。左下角是在迪拜著名的帆船酒店燃放的有史以来规模最大的一场焰火表演

的转换循环中不断修正并保持平衡。

科学地分析和理解烟花爆竹给了我们现在所认知和喜爱的壮丽而专业的焰火表演(图4)。即使今年除夕你只是在花园里燃放烟花，了解焰火技师们如何在夜空中带来明亮多彩的烟花以及他们是如何确保焰火对你和环境的安全所做的努力，也是件好事。