



国家自然科学基金委员会资助出版

李 约 瑟

中国科学技术史

第五卷 化学及相关技术

第七分册 军事技术：火药的史诗

李约瑟 著
何丙郁
鲁桂珍 协助
王 铃

科 学 出 版 社
： 上 海 古 籍 出 版 社
北 京

(16) 从爆燃到高爆^①

(i) 硝石含量的增加

现在是需要我们停一下，并回顾我们所走过的道路的时候了^②。从最老的缓燃纵火武器，经过速燃武器如汽油喷火筒，到早期火药混合物的爆燃之间，我们已能表明它们之间在连续性上没有大的间断。硫磺和炭都在很古时用过；加上了硝石使历史有了一个新的转折。但是在很长时期内其成分只不过是较好的纵火剂。后来发现火药被置于薄壁〔密封〕容器里将爆炸，再往后爆炸可能强烈到足以将铁炸弹和手榴弹爆成碎片^③。再往下，爆炸混合物会产生足够的力量，当用作地雷或类似物时，发生的破裂性爆炸能摧毁要塞并粉碎城门。最后在金属管手铳或臼炮膛内快燃便得到真正的推进性能^④，能把一颗射弹送上轨道。不管射弹是单一的或混合的，能完全闭塞住内膛。我们也看到，管子首先是竹管而此后是金属管，长期以来领先于真枪之前，因为发挥了火药混合物纵火性能，这些五分钟喷火筒成为火枪与突火枪，它们分别是枪与炮的祖先。

基于分析，这一切都暗示，一件简单的事物比其余一切更加突出，这就是混合物中的硝石成分的缓步而持续的上升，唯一合理的是，设法以有效的图表来证实这种解释。第一件事要做的，是把任何受西方影响之前的时期我们所得到的资料排成表（表2）。这里重要的资料是1044年的《武经总要》^⑤与《火龙经》^⑥，后者刊于1412年，但它包括大约1350年左右的资料。准确观察时，我们必会想到1290年与1327年分别是中国与欧洲第一批臼砲的年代；之后（正如我们将看到的）佛郎机炮于1511年到达了

345

中国，而1600年，即耶稣会士时期，大大加强东西方关系。上表有两打以上各种不同的火药成分在襄阳本的《火龙经》、《火器图》里，均与卷帙大的南阳本（《火龙经全集》）的第一部分相同，《火攻备要》本亦复如此。最后两者确实甚至在页数上都是准确一致的，它们都比襄阳本印刷精工，虽然也包括了一些勘误。表中没有烟的配方，为《兵录》（1606年）所重述，但新收了一些，把火药成分的数量增加大约三打。《武备志》（1628年）综合了《兵录》里所有火药成分，而

① 如上文（p. 110）的注，近代炸药化学家并不将“高爆”这一词与火药联系。而把它作为燃烧速度达到了超声速程度来接受。其中某些分子中有自供的氧，如三硝基甲苯（TNT），而另一些则不如此，如叠氮铅（ PbN_3 ）或雷酸银，本节另一处都提到这些。乙炔与氧混合严格说也会爆轰，因此，这小节的标题改为《从燃烧，通过爆燃，到爆炸》是可取的。

② 特别参见上文 pp. 117, 248。

③ 这是可能的，一定量的火药放在薄壁铁容器内，在某种情况下会比一定量的高爆药量（以近代观点看）更有效，高爆火药将产生空气震动，而且产生许多的小碎片喷射到坚硬的结构上效果要小。

④ 参见下文 p. 484。

⑤ 见上文 p. 20，那里给出了正确的出处。

⑥ 见上文 p. 25，这节论述火药成分对各种本子共同的。在《火龙经全集》（南阳本）里，它在第一册，卷一，第六页至第十五页，肯定把它放在这部书的最古老层次。在《火器图》或襄阳本里，是在卷一，第三页至第九页。而在《火攻备要》里是在卷一，第六页至第十五页。《武备火龙经》给了6种成分数字，不见于它书，它仅说明成分，但其比例是古老的，因此它必然是抄了早期的资料。

表 2 早期中国火药成分

名称	性质	百分比			其他成分
		硝	硫	碳	
《武经总要》 ^①					
火药法	弱性炸药 含蒺藜的纵火弹, 内部仅为一毯	50.5	26.5	23.0	砷 ^② 、铅盐、干植物材料、油、树脂
蒺藜火毯	外部包着封物	50.2	25.1	24.7	沥青、干植物材料、油
毒药烟毯	毒烟纵火剂, 内部仅为一毯 外包封物	34.7	17.4	47.9	砒 ^② 、植物性毒物、蜡、油、干植物材料
《火龙经》					
神火药	有毒烟的纵火剂	(28.6)	(21.4)	(50.0) ^③	砷、硫化物 ^② 、植物性毒物、粪
毒火药	强力炸药, 有毒烟	(77.5)	(9.3)	(13.2)	砷、植物性毒物
烈火药	可能是纵火剂, 有毒烟		比例未详细说明		砷、植物性和昆虫性毒物
飞火药	中等纵火剂, 有毒烟	(12.3)	(57.5)	(30.2)	砷、植物性和昆虫性毒物
法火药	强力炸药, 有毒烟	(74.7)	(17.3)	(8.0)	石灰 ^③ 、硫化物和干植物性材料
烟火药	砒毒烟混合物, 有与火焰齐射的弹丸		比例未详细说明, 但硝石约占 60%		氯化铵 ^⑤ 、碎瓷片、铁屑、植物性和昆虫性毒物、尿与桐油 ^⑥ 、昆
逆风火药	可能是纵火剂, 有毒烟		比例未详细说明		虫毒、狼粪、海豚油与骨头
飞空火药	用法未定		仅详细说明了附加物的比例		樟脑 ^⑤ 、松脂、雄黄
日起火药	火箭推进剂	50.1	(5.0) ^⑦	44.9	无
夜起火药	火箭推进剂	76.9 (45.5)	3.9 (9.0)	19.2 (45.5) ^⑧	无 (无)
喷火药	火枪发射剂	57.1	5.7	37.2 ^⑨	细沙 (参见上文 p. 234)
爆火药	填硬壳炸弹	91.3	6.9	1.8 ^⑩	无
砲火药	填薄壳炸弹	50.0	30.0	20.0	硫化砷
水火药	用法未定		比例未详细说明		生石灰 (参见 p. 166)、氯化铵 ^⑤ 与干植物材料

表 2 (续)

名称	性质	百分比			其他成分
		硝	硫	碳	
火弹药	从火枪或突火枪掷射纵火毯, 恰好填充铁管	-	39.0	61.0	樟脑 ^⑤ 、松脂
五里雾	纵火剂, 有催泪的烟	27.8	27.8	44.3	砒、木屑、松脂、人发、鸡粪、狼粪和人类
追魂雾	强力炸药, 拌有毒药	83.3	8.3	8.4	硫化砷、动物毒
烟毯毒药	弱性炸药, 拌有毒药	36.4	36.3	27.3	砒、植物性毒物、蜡、桐油
神火	纵火剂成分	26.6	66.7	8.6	氯化铵及铁屑
神烟	炸药或推进剂, 有毒烟	69.6	17.4	13.0	砒、樟脑、甘汞、硅酸钙镁

注意: 除了上述考虑以外, 还有 6 个以上的成分, 大多数用以制蓝青色、红色、紫色、白色与黑色的颜色信号烟。这些在上文 (p. 144) 都考虑过。含硝石平均为 66%。

① 前已指出 (p. 120), 有马 (1), 第 13 页编制的数字较高, 但是依据假定而编。我们以为我们的表较好, 但是一般的争论不会受到很大影响。

② 砒 (也还有汞) 常是早期欧洲火药的成分, 例如: 1405 年的《军事堡垒》, 参见 Partington (5), p. 149。

③ 括号的数字仅来自《武备火龙经》修订本。

④ 参见上文 p. 167 ff.

⑤ 氯化铵 (硝砂) 与樟脑也常用于早期欧洲火药混合物中, 参见 Partington (5), pp. 144, 160。

⑥ 固体的分散成分的存在, 说明此混合物用于火枪。

⑦ 估计数, 因为未给出成分。

⑧ 某些版本对混合物中硫给出不合理的过小含量。

把其制烟配方省去,列出了一个总数达40多的火药成分。给出的唯一新的火药混合物,就是“铅铊火药”,其中包括40两硝石,6两硫和6.8两木炭^①。在此处用的炸药是黑火药。《武备火龙经》包括了比其他各本两倍多的火药成分说明,是包括内容最多的,但这本书编成时间比《武备志》晚,看来表中两打多火药成分均出现在《火龙经全集》、《火器图》及《火攻备要》诸版本里,确实代表编入晚期军事著作中的14世纪中叶的知识。

346 为了从这些数字得到最多的东西,需要将其以图表示。我们首先用费希尔 [Fisher (1)] 的三顶点法^②,但后来我们发觉用三角图(如图122及123)更加方便^③。这里两个重要的参考点是如三种成分是等比例的话,以小点(·)表示,而三种成分接近于理论成分的话(75:13:12),以三角(△)表示^④。还对典型火箭发射剂成分与爆炸火药的最低限,亦即“最慢”的炸药也给出标记^⑤。现在我们马上看到,对该阶段早期中国实验的各点全部散布于图里,《武经总要》数字范围是硝石从27%到50%,而《火龙经》则是12%到91%。它们之间有6种成分达到最大爆炸力的理论成分区域。这就意味着几十年,甚至几个世纪内经过实验与失误,无疑从最简单的等比配比^⑥到缓慢地找到最有效的硝石配比。低硝火药混合物难于爆炸,虽然不是不可能爆炸;高硝火药难于在火枪或火箭中燃烧,但不是不可能的。许多实验必然是失败了,许多是危险的,甚至发生了不幸,实验过程中常遭遇到意外,虽然历史对这些较少记载^⑦。当然我们应该知道,百分比仅是事情的一方面;更大程度上依赖于点火条件和火药的物理性质,如压力情况和密闭程度。一切形式的火药在空旷表面均能引起静静燃烧^⑧。但是当它封闭在容器里,哪怕是纸或纸板做的,将会大声爆炸^⑨。这必定是中国的一项早期发现,347 而从我们已有证据可以相当有把握地把这项发现归入10世纪中期或后半期。等比成分出现于10世纪前半期,而硝石含量高到足以炸毁铸铁或其他金属容器,这已经快要到12世纪末年了。此后,在13世纪高硝火药的充分推力开始应用于第一批金属管手铊和白炮。

现在当我们以同样方式从阿拉伯与欧洲资料^⑩来处理最早的数据时,我们发现

① 即硝:硫:碳为75.7:11.4:12.9,差不多就是理论硝石量,这并不是戴维斯与魏鲁男 [Davis & Ware (1), p. 526] 注意到的,他们没有给出百分比。《武备志》卷一一九,第二十一页。

② 参见 Needham (12), p. 71。

③ 我们要感谢格雷 (Peter Gray) 博士,那时 (1953年) 他还是基兹学院 (Caius College) 的研究员,建议用此法,并且劝我们研究这项课题。

④ 参见 Mellor (1), p. 707。

⑤ Berthelot (13), vol. 2, p. 311; Marshall (1), vol. 1, p. 74; Partington (5), p. 327。

⑥ 布罗克常常相信这点,参见 Brock (1), p. 17。

⑦ 参见上文 pp. 112, 209。

⑧ 无烟线状火药即如此。

⑨ 为了这种效果,硝石含量可能达到50%或更多,参见 Forley & Perry (1)。

⑩ 主要资料中,还可提一下 Anon. (157, 158); Whitehorne (1); Nye (1); Sprat (1); Anon (160); Turner (1); Robins (1); Muller (1); Watson (1)。

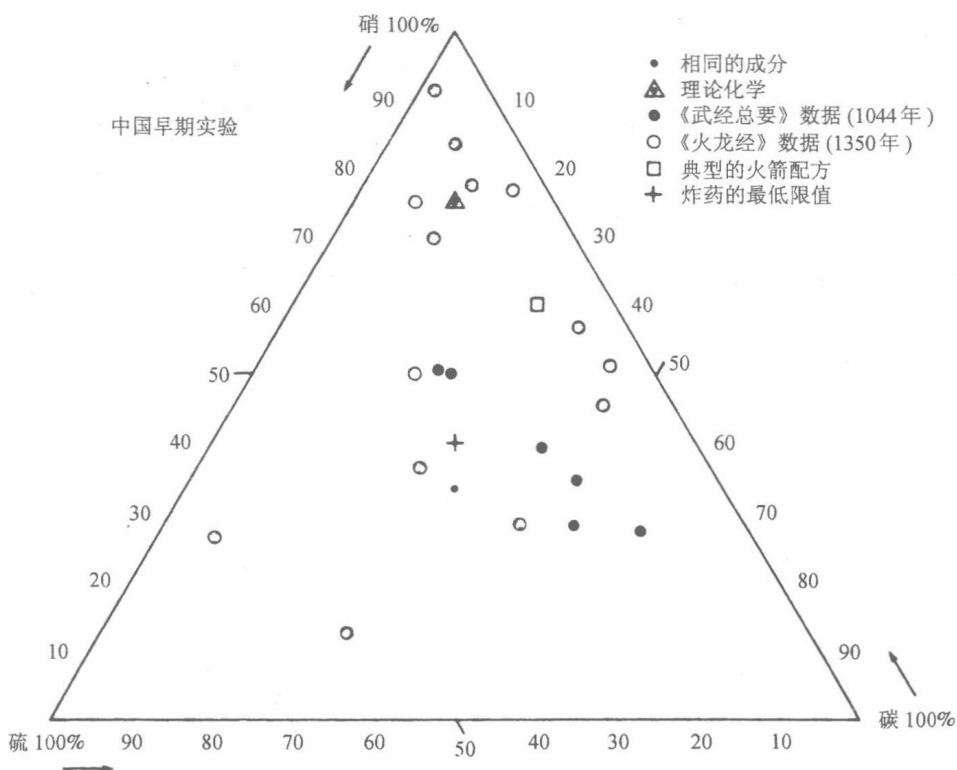


图 122 用三角图画表示的早期中国火药成分；硝石在三角形的顶部，硫在左下角，碳在右下角。这些点全部取之于中国早期实验，而其广泛流传是显然的。时间为 1000—1350 年。

非常显著的不同^①。几乎没有例外^②，都全部集中在高效率区域，介于最低爆药与低于 348 80% 水平（图 123）之间。这必然确切地意味着当火药羽翼丰满时候它的制法传到了西方；正如我们发现用纸板炸弹、火枪、突火枪等做的实验在欧洲没有多长的时期一样，我们也发现火药最适宜的组成成分几乎或完全是确定的。在火药传入欧洲之前，它早已为人所知。确实，假如我们考虑到火药一词西方共同名称为“gun powder”，我们将会很好得出结论说，它在西方兴起只能与枪炮（gun）字有联系。其他地方火药混合物的实验应用在 450 年前业已完成，这难道还不是个无声的语言学指示物吗？

① 第二手资料的数据见于 Partington (5), pp. 42ff., 102, 144, 148—149, 154, 157, 204, 253, 316, 323, 324—327, 338; Sarton (1), vol. 3, p. 1700; Hime (1), pp. 149ff., 168—169, 218; Reinaud & Favé (1), p. 166; 《大砲书》，p. 180; Amiot (2), p. 310—311; Marshall (1), vol. 1, pp. 26—27; p. 74; Spak (1), pp. 62, 66, 157。可比较的中国晚期数据见 Davis & Ware (1), pp. 526—527; Rondot (2); 又见于 Reinaud & Favé 前引文。

② 这是真的，等分配方是由 1437 年的《火攻书》给出，其 1561 年法文译本《大砲书》，与怀特霍恩 [Whitehorne (1)] 同时代。它可能引自《焚敌火攻书》，但是还没有人使用其中的任何叙述。

此后还有一种成分于 1417 年在亚眠 (Amiens) 用过，所含比例为 27.2:26.1:46.7，但叙述并不一致 [参见 Partington (5), pp. 148, 324]。这还必须作更深一步研究。

再有，雷诺与法韦 [Reinaud & Favé (1), p. 166] 给了一个比例，20:40:40，是《大砲书》列出的一个方子，但其用处并未描述。像前者一样，可能是纵火剂。

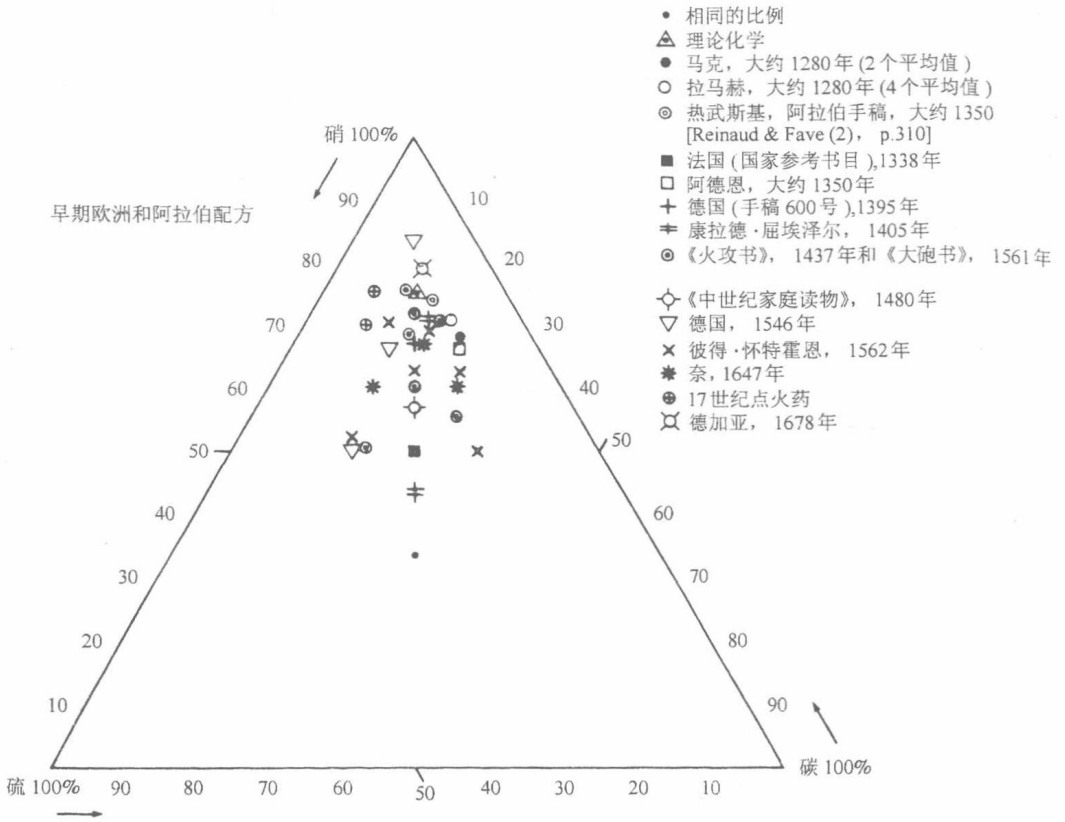


图 123 早期欧洲和阿拉伯火药成分相似的三角图。可以看出它们全围绕硝石占 70% 的数据区内, 亦即十分接近于约 75% 的理论值。这说明那时阿拉伯与欧洲均已熟知火药, 最佳配比也已经知道了。时间为 1280—1700 年。

当硝石增高, 气压也就升到最大量, 而爆炸热也就升高, 例如^①:

% 硝酸钾	最大气压 (气压计)	爆炸热 [卡] / 克
80	98	3.05
75	92	2.87
70	84	2.71
68	78	—

17 世纪欧洲人自己也猜想过去时间里硝石含量逐步上升, 纳撒内尔·奈 (Nathaniel Nye) 在 1647 年选用一系列数据证明这个问题^②, 而我们已经把它放在图 124 里^③。最后我们出示另一个图去说明发展的一般历史 (图 125)。在左边我们指出

① 数值来自近人哈恩 (Hahn)、欣策 (Hintze) 与特罗伊曼 (Treumann) 等人的论文 [Hahn, Hintze & Treumann (1)]。

② 既见于德加亚 [de Gaya (1)] 的福克斯 (Ffoulkes) 版, 也见于奈 [Nye (1)] 的著作。

③ Ayalon (1), pp. 25—26, 42。阿亚隆也观察到硝石普遍上升, 而且也引证了海姆 [Hime (1), pp. 168—169] 的论文。他的数值流传广泛。但显示是确切的。

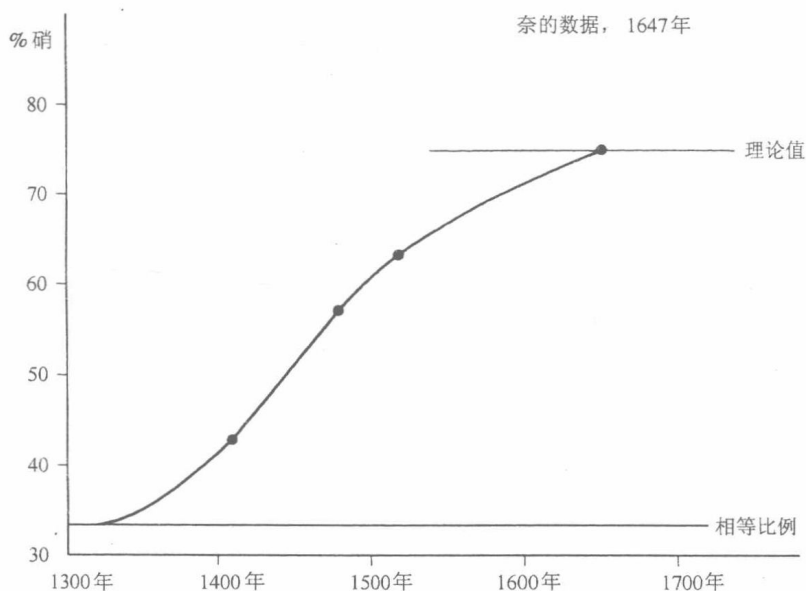


图 124 许多世纪以来硝石含量上升图；数值是纳撒内尔·奈于 1647 年的书里给出的。

《武经总要》的数值范围，然后在《火龙经》里给出的成分异常扩大，希腊人马克的较低数值和拉马赫的较高数值正夹在《武经总要》与《火龙经》之间。接下，图的右边说明从各种用途提炼出来的方法，有些爆炸火药含硝量从 40% 到 65%；有些火箭发射药从 50% 到 70%，即火枪与罗马焰火筒；从 65% 到 85% 是推进剂及其他爆炸或高爆。

全部都是比较框架式的，因此我们感到是有把握的。

火药的易燃性（帕廷顿写道^①），并不受混合物比例的多大影响。推进力主要依靠于燃烧率与空气体积，两者都依赖于混合物的比例。军用火药正确配比是在一大段时间的试验之后发现的；而今天强调的是制造方法，而不是混合物比例。

如有一件事是“造粒”（corning）；造粒形式首先因筛去细小的粉末而获得，以便使空气中的氧可以较好地进入粒子，增强来自火药自身性质的自备氧化能力^②。这似乎在西方第一次于 1450 年完成于纽伦堡（Nürnberg）^③。一位 17 世纪作者做了很好的全面总结。他写道：

全部（制造火药）技术的秘密在于原料的比例以及其正确混合，以便使火药每颗小粒都有全部原料，而且处于正确的比例。然后造粒或使之成为谷粒状，最后晒干并除去灰尘。

在叙述了波尔塔（John Baptist da Porta）、邦法迪尼（Bonfadini）以及杰罗姆·卡丹（Jerome Cardan）这些作者推荐的各种不同的比例后，他继续说：

① Partington (5), p. 328, 易燃性是非常难于确定或定量的。

② Partington (5), pp. 154, 328。

③ Rāthgen (1), pp. 77, 109ff.。

350

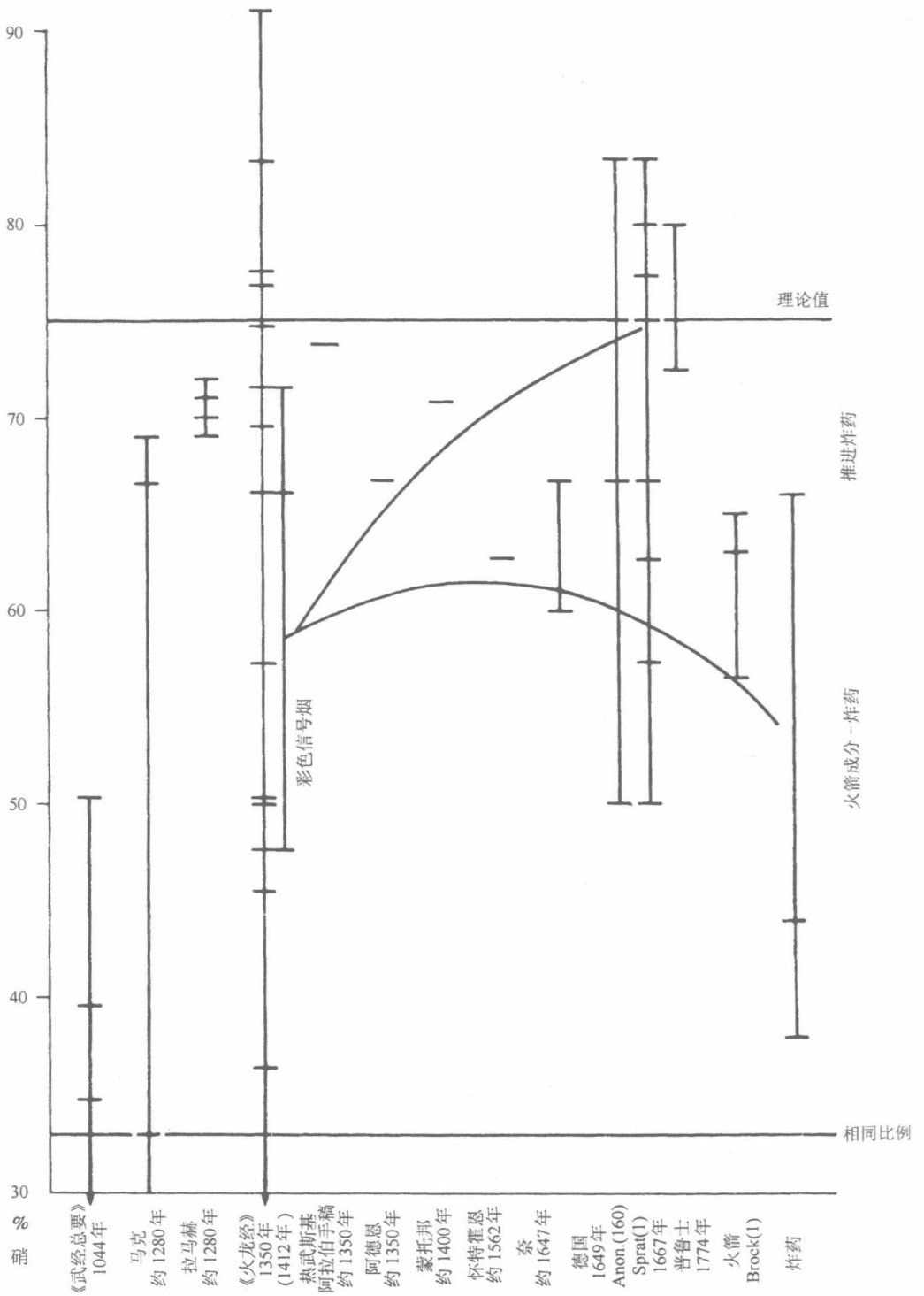


图 125 1044 年至今给出硝酸盐在火药混合物中的百分比明细表。人们可以看到在 72% 的推进炸药的应用如何逐渐使其不同于 55% 的火箭成分——炸药的应用。

这里确实有很大的幅度, 如果原料完全混合, 你可用上述任何比例制造上好火药; 但付出的劳动越多, 火药便做得越好, 直至达到八份为止^①。

颗粒大小的影响可以从下面数据看出来^②:

351

压缩颗粒 平均大小 (毫米)	在测爆仪中爆炸	
	时的转锤 (épreuve) 高度 ^③	
	70% 硝酸钾	75% 硝酸钾
0.75	51.5	65.6
1.75	31.3	38.2
2.60	16.0	30.0
3.10	14.0	19.4
3.75	10.1	16.6

因此, 对较大颗粒而言出现了一组趋于线性的下降曲线。

现在我们想到佛郎机 (Portuguese culverin) 大约在 1511 年的引进 (如果我们可以这样称呼它的话)^④, 需要看看在此年代后兵书中给出的数据, 因为显然欧洲黑火药成分的经验是随着它而来的。拣选出来的中国制法的某些数据可在图 126 上看到, 其中火箭发射药所含硝酸盐都集中向 60% 左右靠拢, 而爆炸火药含量则围绕着 75% 的理论值。这类的 18 种配比见于唐顺之 1550 年编的《武编》^⑤, 而这时期的火药适合于“鸟铳枪”^⑥ 以及臼炮和火炮。这肯定是最早的中国书给出了用于火绳枪的火药一些特点。这种火器是 1548 年取道日本而引进的^⑦。仅有一个配方出现在 10 年后戚继光写的《纪效新书》里, 比例为 75.7:10.6:13.7, 非常接近于化学家们所建立的理论配比。在耶稣会士来此之后, 1598 年出现了《神器谱》, 主要是为滑膛枪写的, 但赵士禎的两个配方中硝酸盐含量颇高^⑧。正如已指出的, 何汝宾的《兵录》(1606 年) 除新加 20 左右新火药混合物外, 还转录了《火龙经》的全部数据。仅有颜色信号烟例外, 而这个例外在茅元仪 1628 年的《武备志》中又重新置入并再记录下来。这类的古方此时在多大程度上仍被运用还不肯定。硝酸盐理论百分比再次在惠麓的同时代的《洪濬百金方》里与另外三者 (没有一个是新的) 一起出现。最后, 1643 年焦勗与耶稣会士汤若望合著的《火攻挈要》, 带来 14 种成分, 包括硝酸盐含量从 33.3% 到 86.4% 全部可能范围, 但是更多的是 70% 到 80% 的推进剂区域^⑨。

352

在一切晚期火药配方中, 有两件事值得注意。第一, 中国人有对高硝酸盐含量的

① Anon. (160) 在 Sprat (1) 文内。他的意思是指在 72% 与 78% 之间。

② 采自 Hahn, Hintze & Treumann (1)。

③ 参见下文 p. 552。

④ 见下文 pp. 367ff。

⑤ 《武编》卷五, 第六十三页至第七十八页。

⑥ 见下文 pp. 432ff。

⑦ 但见下文 p. 440。

⑧ 80.7% ~ 83.3%。

⑨ 除本段所述一切书外, 对火药混合物收罗宏富的还有李槃于 1630 年写的《金汤借箸十二筹》。某些也为有马 [(1), 第 221 页] 所注意。很接近理论值的另一配方曾为吕蟠与刘承恩在 1675 年所著的《兵铃》所记载。这个“军事技艺三钥”属于下一个朝代, 当然, 是明末以后。

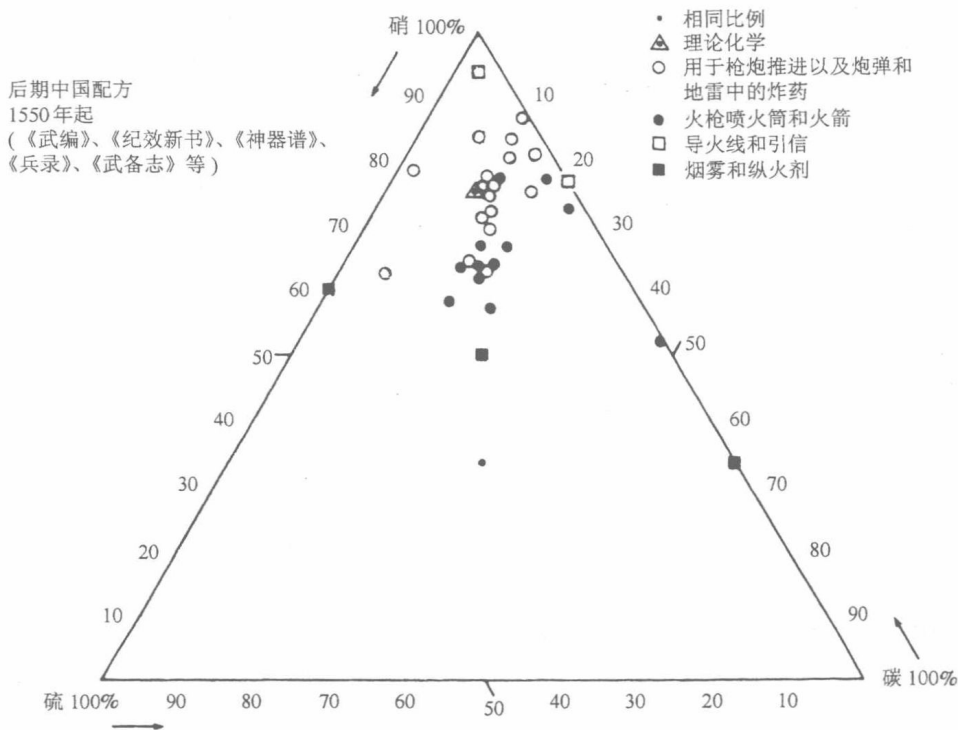


图 126 从大约 1550 年以后，中国晚期火药成分第三个三角图。硝酸盐含量也成群地靠近 75% 区域，这表明已很好地掌握了最佳配比。

古老偏爱，在 80 年代甚至 90 年代还继续与欧洲人习惯所特有的配比一样，无疑欧洲配方是在 1511 年以后随着佛郎机后膛装的枪及鸟铳滑膛枪而来的。这种高含量也会出现在有耶稣会士合写的书中。但比例常常很接近于理论值，例如《兵录》（1606 年）给出大铳（滑膛枪）与小铳（手枪）所用的两种火药成分，分别为 75.1% 与 71.4%^①。当帕廷顿说“从《武经总要》（1044 年）给出的成分发展到《武备志》（1628 年）的近代火药，可能是中国实验的结果，而不是来自欧洲知识的影响”时^②，可谓一语破的，非常中肯。从图 122 所给出的数据我们现在可以相信事实也确是如此。第二，从第 126 图还可以看到中国人的试验还在继续，包括有时不用碳，有时不用硫的稀奇的混合物；这些在以前可能都没有多大前途。

在这些晚期的配方表中，提到的武器的命名与目的，除了火绳枪、滑膛枪与后膛装火炮（下章将考虑）之外，没引起更多注意。许多的名字我们业已遇见过，像“小一窝蜂”（装有与火焰齐射的子弹的火枪）及“净江龙”（水雷），仍在这个表中。但是在《武编》里也有纵火弹，它有个充满水果色彩的名字叫“荔枝砲”；而在《火攻挈要》里有一种地雷用“埋伏走线药”这样一个带说明性的名称^③。

很有趣的是，统观这一系列书籍，都坚持一个古老的信念：将毒剂或不洁物混入

① 《兵录》卷十一，第六页、第七页；卷十三，第二十四页、第二十五页起。

② Partington (5), p. 274.

③ 《火攻挈要》卷二，第十一页。

火药的有用性,甚至有耶稣会士与之合写的后一本书也如此。这些东西有砒霜、水银、各种形式的铅和铜、硒砂(氯化铵)、樟脑^①、硼砂、生石灰、植物和动物毒药^②、人粪和兽粪。但这没有什么大惊小怪的,因为达·芬奇本人也有兴趣在攻击敌人时使用含硫的毒烟^③、烧羽毛的烟、硫磺与砒霜^④,甚至蟾蜍与袋蜘蛛(tarantula)的毒与狂犬病的唾液相混合,然后装入炸弹^⑤。这种事发生在1500年。使用砷化物的信念至少持续到1580年,据冯·森夫滕贝格[von Senfftenberg(1)]^⑥,水银仍然于1620年及1630年在阿皮埃与蒂布雷尔的烟雾弹中露出头角^⑦,这可能相当无效,但却是化学战的史前期。

在离开中国火药百分比这个题目之前,还要注意,这种有价值的信息有时可能从兵工厂当局为制造所需火药而大量采购的记录中获得。我们以前谈到历代发行货币的中国铸币厂对金属及合金的要求时^⑧,遇到这种情况。同样,在何士晋的《工部厂库须知》(1615年)里可发现17世纪早期在国家工厂里制造火药的细节^⑨。它说每年制造火枪与炮需要30万斤火药(大约150吨)。造火枪火药要求硝石100312斤8两,硫19687斤8两,柳炭3万斤;制造火炮的火药则需要硝石106875斤,硫20625斤,柳炭22500斤。这意味着硝:硫:碳的比例,火枪火药是66.9:13.1:20.0;火炮火药是71.2:13.7:15.0^⑩。每项花费的成本也给出了^⑪。原文也说及制造“鸟嘴枪”,即火绳枪的火药费用,但是不幸的是说明里没有给出比例。有趣的是,20万颗铅弹,不仅用作“连珠砲”铅弹,还用作“靶枪”的与火焰齐射的子弹^⑫。

中国谚语说,“百闻不如一见”,而英文意为“解释千次不如亲见一次(a thousand explanations are not as good as one seeing for oneself)”。因此我们决定观察一下用不同比例的硝酸盐所造火药的燃烧,从而阐明历史上实际的试验情况如何。此地我们很幸运地得到了在肯特郡霍尔斯特德要塞(Fort Halstead, Kent)的皇家武器装备研究与发展院(the Royal Armament Research and Development Establishment)人员的合作^⑬,他们为我们制备并燃放一打以上混合物,其结果显示在附表与照片中。

① 在欧洲中世纪,硝石、硒砂(氯化铵)与樟脑的混合物被称为“实验盐”(sal practice,有各种不同的拼写),常把它加在火药里,由于一种时尚观念,它使混合物有更多“挥发性”,参见Marshall(1), vol. 1, p. 25; Partington(5), p. 155等。

② 论述中国毒箭,见比塞特[Bisset(1, 2)]的研究。

③ Partington(5), p. 175; McCurdy(1), vol. 2, p. 198。

④ McCurdy(1), vol. 2, pp. 201, 210。

⑤ McCurdy(1), vol. 2, pp. 217—219。

⑥ Partington(5), pp. 170, 183。

⑦ 关于阿皮埃与蒂布雷尔,见Partington(5), pp. 176, 177。植物与其他种毒物一直用到迟至1782年钱德明[Amiot(2)]写报告补录时;参见Partington(5), p. 253。

⑧ 本书第五卷第二分册, p. 216, 讲唐代的样品。

⑨ 收入《玄览堂丛书续集》。

⑩ 这些数字包括在图126中。

⑪ 《工部厂库须知》卷八,第四页至第六页。

⑫ 《工部厂库须知》卷八,第一页至第二页。每年要造5000支,此卷对许多火器数量与性质作出丰富说明。

⑬ 我们热烈感谢克利夫·伍德曼(Cliff Woodman)先生、奈杰尔·戴维斯博士、约翰·罗伯逊(John Robertson)博士与菲利普·塞思(Philip Seth)先生。为了介绍这些知识,我们要更大地感谢霍华德·布莱克莫尔先生,当时他是陛下任命的伦敦塔军械库副主任。这些实验作于1981年2月20日。

355 表 3 给出的是实验成分^①, 表 4 是燃烧时间和我们所观察到的现象^②。每次实验用相同体积的火药^③, 并点燃不固定的堆。在这些条件下马上就看到, 所有成分都燃烧起来; 但是有的燃得更快、更猛^④。

表 3 在霍尔斯特德要塞研究的成分 (1981 年) 皇家武器装备研究与发展院

实验号	百分比			备 注
	硝酸钾	硫磺	木炭	
1	75	10	15	商业的, 呈柱状 (帝国化学工业, 阿特尔)
2	75	10	15	实验室制备 (细粉), 电引爆
3	90	—	10	电引爆
4	70	10	20	电引爆
5	63	27	10	电引爆
6	42	42	16	电引爆
7	42	16	42	未燃火
8	42	16	42	缓燃引信
9	33	33	33	缓燃引信
10	50	50	—	电引爆
11	50	—	50	电引爆
12	54	23	23	电引爆
13	81	9	10	电引爆
14	81	9	10	手压烛电引爆

最初燃起火焰的 (图 127) 仅是硝酸盐超过 60% 的, 而当成分比例更趋近于理论值时, 则发生最大爆炸速度。较低比例的仅有一火焰柱, 有时还能继续燃烧一段时间, 这很好地说明了发现火药的首先用处是纵火 (图 128)。硝酸盐减低的程度愈大, 则引火愈困难, 缓燃引信有时不得不代之以电火花。含硝石 33% 以下的成分没有试验, 但是低到 12% 将极难引火。硫磺燃成二氧化硫 (SO₂)。爆炸的效果仅出现在火药被封闭时, 如封闭在纸筒里, 而如果纸筒一端开放, 则清晰可见火枪效果。因此说这是慢燃烧, 是十分正确的, 但这里有个大问题, 即早期的炮手如何既避免燃烧太慢而缺乏足够的推力; 另一方面, 燃烧太快而导致枪爆裂。燃烧率到如何程度, 空气的产生、密闭空间内压力升高和推动子弹的运动也至何等程度。

① 硝酸钾是烟火级的, 在 70℃ 时干燥 24 小时, 硫磺是实验室试剂级, 而炭是由鼠木 (*Frangula alnus*) 制备。所有这些试剂均经一位理科学士用 120 号筛子筛去块团, 以保证火药自由流动。被筛过的试剂压入灰尘无法进去的容器, 然后在湍流混合机 (Turbula mixer) 里迅速翻滚 20 分钟, 然后将混合物密封入抗静电塑料袋。商业制剂 (第 1 号) 是可能完全混合的, 因为它在轮转机磨 (edgerunner mill) 中磨的。

② 彩色影片以每秒五百个画面的速度拍摄, 后来以 20 倍慢的速度来研究。

③ 一个松散堆的重量在 100 与 200 克之间。

④ 燃烧的结束很难确定, 把每一种燃烧情况拍成电影, 仅能延续到大约 4 到 8 秒。除第 14 号实验外, 每秒只能摄 100 个镜头, 并持续近 20 秒钟。

表 4 表 3 成分的观察

	% 硝酸钾	实验编号	燃烧时间 (秒)		备注
			首发火焰	火柱长度	
81		13	0.32	3.04	红色闪光, 蓝黑色烟的强火焰柱
75 (商业用)		1	0.16	1.12	火的喷吹声、钝响、白烟、快燃火焰, 有许多炽热的柱子, (可能是碳) 喷出来
75 (实验室用)		2	0.16	2.4	火的喷吹声、白烟、持续较长的火焰。
70		4	0.48	>2.48	斜喷, 强大的火焰柱, 有白烟
63		5	0.56	2.8	强大的火焰柱, 有火花, 接近末尾为蓝烟
54		12	—	3.76	起火慢, 不炸破, 强火焰柱, 白烟中有红棕色条纹 (可能为氧化氮)
42 (高硫)		6	—	>2.88	不爆炸, 慢发动, 弱火, 少许蓝烟, 火焰柱持续长久
42 (高碳)		8	—	>2.56	难于点燃, 不爆炸, 开始火焰强大, 然后变弱, 柱纤细, 有火花, 少许蓝烟, 燃烧时间长
33		9	—	>3.76	难于点燃, 不爆炸, 强火焰柱, 有红棕色条纹
90 (无硫)		3	—	7.52	不爆炸, 火焰喷射稳定, 蓝烟 (钾颜色)
50 (无碳)		10	—	>4.32	不爆炸, 弱黄色火焰, 有许多分离火焰, 几乎无任何烟
90 (无硫)		11	—	4.24	不爆炸, 间歇性火焰, 增大慢, 蓝烟
封闭在直径 0.5 寸蜡烛状纸筒中					
81		14	—	16.0	不爆炸, 稳定火焰像喷火筒, 少烟, 无明显爆炸
75		—	—	—	高声爆炸, 封带破裂后继续燃烧
66		—	—	—	有限爆炸, 封带破裂后有火焰喷射器的效果

357

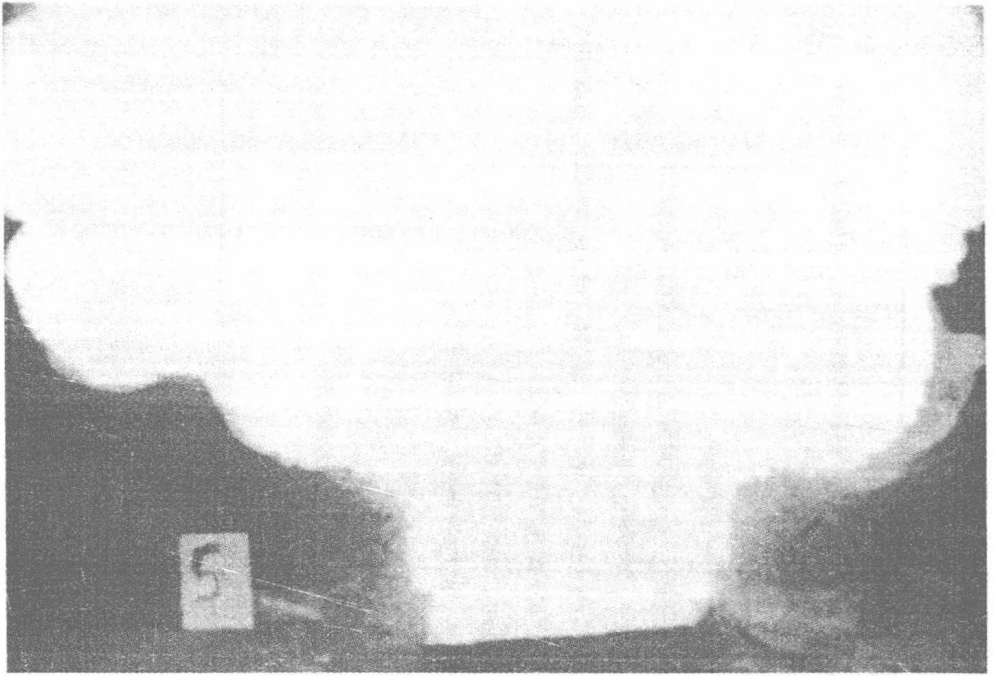


图 127 霍尔斯特德要塞第 5 号试验。含硝酸盐 63% 的首先发出火焰，持续 0.56 秒，然后有强大火柱，且有发火星的烟 2.8 秒。

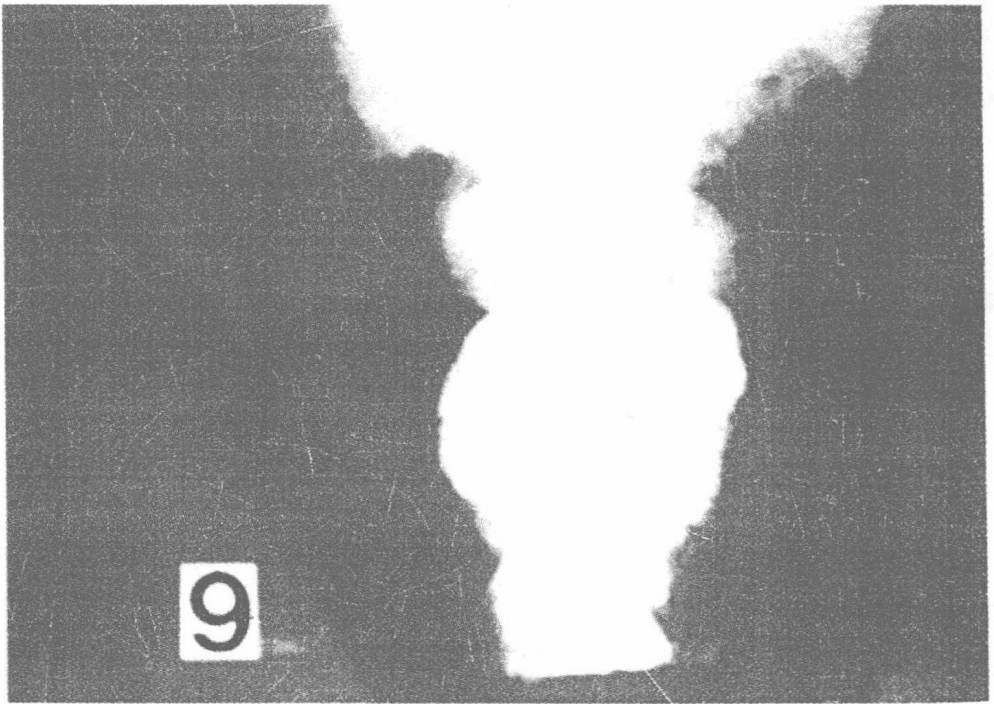


图 128 霍尔斯特德要塞第 9 号试验。含硝酸盐 33% 的很难以点燃，不爆炸，然后燃烧，有强火焰柱，且有棕红色的条纹持续 4 秒钟。

广义地说，从9世纪中叶与14世纪中叶之间的中国火药史上的实验中可以推论说，硝酸盐在混合物中的含量逐步增加。 358

这个现象也曾为文献所指出，它们记载了除我们自己而外的其他人如何在不同时间与地点做的实验。如拉森 [Lassen (1)] 发现 N (硝) : S (硫) : C (碳) 为 35:35:30 的火药成分能从类似 14 世纪手铳的铁管中将一球掷送大约 40 呎远，甚至于发射重量相当于一颗子弹的东西；但它非常难以点燃，而且燃烧缓慢，这不过是一支火枪的效果。威廉斯 [Williams (1)] 用 66.5:11:22.5 成分，有许多次不起火，气体从火门逸出，有时子弹刚好从炮口落下；甚至于飞出去也不能穿透 18 呎远的铁薄片。福利与佩里 [Foley & Perry (1)] 用了一种火药，硝酸盐含量范围为 66.5% ~ 69.2%，能产生爆仗似的爆炸，正如罗杰·培根所知，是一种火箭效应，但在 41:29.4:29.4 时，除有点带烟雾的燃烧外，什么也没有。用模拟手铳做试验，前一种火药仅能弹出管里的纸卷，41% 的成分完全不能燃烧。这些结果同 15、16 世纪欧洲作品许多说明一致，支持了我们的信念，硝酸盐含量随着时间的流逝在 9 及 13 世纪之间逐步增高。

(ii) 火药制造与火药理论

中国制造火药的叙述在几种文献里均可发现，如 1584 年《纪效新书》给出一个成分，含硝石 75.7%、硫 10.6% 及木炭 13.7%，此火药用于“鸟嘴铳”^① 制造这种火药的记载如下^②：

制造火药：每发需要硝石 1 两，硫 0.14 两，柳木炭 0.18 两。

总共取硝石 40 两、硫 5.6 两、柳炭 7.2 两^③及三满杯水，磨春（配料）使之极细，越细越好。最好的方法是将硝石、硫磺及炭分别各自春磨成粉末。然后根据正确比例将其在盛着两碗水的木臼里合起来。用木杵春捣白，决不可用石杵，恐怕发生火（火星）。把料春捣数千次，如果干燥了，再加一碗水，直到春到成为很细为止。如果（火药）半干时，就（从臼里）取出来，放在太阳下晒干。最后 359 把它粉碎，成每颗都像豌豆那样大。

这种火药之所以奇妙，因为春捣得细。[假如换用清水，就会把硝石中的碱质除得干净]。这种春捣的方法就像制造上等墨那样。

如果添十多次水春的，可作点火试验，摊一小撮（火药）在纸上，点燃，应当燃完后而没有伤害纸，否则不敢把它放在铳里使用。或者用 1 钱药放在手掌中燃烧，如果你的手掌不觉得热，就可以在铳里使用了。但如果燃烧之后在手掌上留下黑或白点，而且感觉发热，质量就不好，就要再加水春捣，直到试验成功为

① 这似乎是现存的中国最早的火绳枪火药配方记载。

② 《纪效新书》卷十五，第九页，由作者译成英文。这段差不多与《武备志》（卷一二四，第八页、第九页）容相同，方括号内的话仅见于后来的版本。

③ 对制备炭的木料种类给予很大注意。巴德勒 [Baddeley (1)] 1857 年谈到柳木 (*Salix spp.*)、桤木和黑桤木 (*dogwood*)，像马歇尔 [Marshall (1), vol. 1, p. 67] 所说的那样。格雷 [Gray (1)] 则认为桤木与黑桤木是鼠李木 (*Frangula alnus*)，但真的桤木 (*Alnus glutinosa*) 和小毛榉 (*Fagus sylvatica*) 也应用过。其中的第一个 (有最低的着火温度，还有最高的与甚至最均匀的多孔性) 今天还在应用于燃烧信管，二者则多应用于商业火药，第三者用于无需精确燃烧的场所。

止。

硝一两、磺一钱四分、柳炭一钱八分。

通共硝四十两，黄五两六钱，柳炭七两二钱，用水二钟，春得绝细为妙。秘法：先将硝、磺、炭各研为末，照数合一处，用水二碗，下古木白木杵春之，不用石春者，恐有火也。每一春可万杵，若春干，加水一碗又春，以细为度。

〈至半干取出日晒，打碎成豆粒大块。此药之妙，只多春数万杵也。[如清水春，换出硝石中碱气至尽]，大端如制合好墨法相类。若添水春至十数次者，则将一分堆于纸上，用火燃之，药去而纸不伤，[不]如此者不敢放入铤矣。只将人手心擎药一钱，燃之而手心不热，即可入铤。但燃过有墨星白点，与手心中燃热者即不佳，又当添水春之，如式而止。〉

在这段颇无感情色彩的文字背后，隐藏着更多的东西。首先，它使人想起工人都用手持杵捣料的场面，但中国人有比这更精巧的东西。从更早的研究中使人想到捣谷物的脚踏碓可追溯到周代^①，而用脚在水轮的水平杆上踏动的水碓早就出现于汉代^②。在这段时期筒形碾子已为人所知且在运用^③，而辊碾无疑是从简单的石碓派生的^④，此后不久就发展起来^⑤。因之春捣机械在中国追述起来有很长一段历程，虽然我们现在不知道何时首先用它来春捣火药混合物，但是我们发现应该有可能在《武经总要》时代之前，即至少 1000 年左右能发现这一点。碾子在任何情况下已经用于中国火药制造肯定来自《武备志》另外一段记载，其中点名提到过^⑥。它还提到用强蒸馏酒（烧酒）去提纯和干燥火药^⑦。所有这些都由钱德明于 1782 年记载过，他说及用碾子在大理石平板碾湿的糨糊团，然后干燥，再弄成粒状^⑧。

360 在欧洲，从 14 世纪初以后，有用硬木 (*lignum vilae*) 杵的马力或水力驱动的立式捣碾^⑨，以代替水力驱动的卧式碓，但一般说原理是相同的^⑩。第一个欧洲火药厂建于 1431 年，更早的说法是值得怀疑的^⑪。双辊碾至今还用湿粉火药操作^⑫。

这段记载以对所制火药优良性的粗略试验所做的有趣记录而结束^⑬。用手掌心试验显然与用同样方式试验硝石有联系^⑭。乍看起来，试验似乎自相矛盾，但实际情况并不如此。如果火药因混合不好或另外失误而药力微弱，它将以缓慢火焰燃烧，并不爆炸，因此纸或许变成棕色而不破损，假如混合良好，瞬间就会点燃而且爆炸，使纸上烧起

① 见本书第四卷第二分册，pp. 51, 183—184，图 358、359。

② 同上，pp. 390ff.，图 617。

③ 同上，p. 199，图 453、454。

④ 本书第四卷第二分册，p. 178，图 456。应该很小心地与磨盘 (rolling-mill) 区分开，磨盘是将物质放在两个相连的磨石中间通过。同上书，pp. 122, 204。

⑤ 水力也用于这些，至少是从宋开始。它们名为“水碾”和“水碓”，参见本书第四卷第二分册，p. 403。

⑥ 《武备志》卷一一九，第十页。

⑦ 每 3 磅火药用 1 磅烧酒。

⑧ Amiot (2) 补录，参见 Partington (5)，pp. 253—254。

⑨ 参见 Forbes (8)，p. 69；Gille (14)，图 581 采自《中世纪家庭读物》，大约 1480 年。

⑩ 同时代的火药捣碾磨见于 Davis (17)，p. 44，图 19。参见 Marshall (1)，vol. 1，pp. 23—24。

⑪ Köhler (2)，vol. 1，p. 37；Partington (5)，p. 328。

⑫ 同时代有十吨轮子的样品见于 Davis (17)，p. 46，图 20。今天黑火药几乎全用于烟火。

⑬ 后来兴起了更准确的计量仪器去测其性质，我们下文 (p. 548) 将简短地考虑的一些与火药机械观念有关的一些类型。

⑭ 参见上文 pp. 105—106。