



爆炸物化学

(第3版)

The Chemistry of Explosives, 3rd Edition

[英] Jacqueline Akhavan 著

肖正刚 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

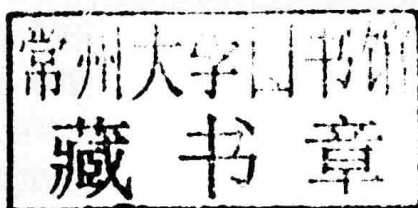
爆炸物化学

(第3版)

The Chemistry of Explosives, 3rd Edition

(英) Jacqueline Akhavan 著

肖正刚 译



国防工业出版社

• 北京 •

著作权合同登记 图字：军-2015-57 号

图书在版编目 (CIP) 数据

爆炸物化学：第 3 版/ (英) 杰奎琳·阿哈万 (Jacqueline Akhavan) 著；
肖正刚译. —北京：国防工业出版社，2017.4

书名原文: The Chemistry of Explosives, 3rd Edition

ISBN 978-7-118-11098-2

I. ①爆… II. ①杰… ②肖… III. ①爆炸物

IV. ①TQ560.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 008097 号

The Chemistry of Explosives, 3rd Edition

Translation from the English language edition:

The Chemistry of Explosives, 3rd Edition

by Jacqueline Akhavan

© J. Akhavan 2011

Published by the Royal Society of Chemistry, www.rsc.org

All rights reserved.

本书简体中文版由 RSC Publishing 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有，侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 10½ 字数 186 千字

2017 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 80.00 元

(本书如有印装错误，我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777

发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755

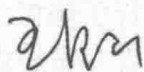
发行业务: (010) 88540717

中译本序

含能材料是涉及炸药、发射药、推进剂、火工和烟火药剂等相当宽泛的一类特种化学材料,除了在军事上有着不可或缺的作用之外,在众多民用领域,如航天、采矿、探测、控制,乃至医学等领域也获得了越来越广泛的应用。正是在这种背景下,近年来国内含能材料学科的研究生培养有了长足的发展,这对于促进我国含能材料学科的发展和技术进步发挥了重要作用。

含能材料具有燃烧和爆炸特性,化学是含能材料最为重要的学科基础之一。如何引导具有一定化学基础的本科毕业生尽快进入含能材料学科的知识世界和研究领域,是提高含能材料学科研究生培养质量和效率的重要实践课题。肖正刚老师翻译的这本《爆炸物化学》,既比较系统、全面地介绍了含能材料所涉及的共同的化学理论和原理,也归纳总结了不同类别含能材料的理化性能和能量释放的特点、规律及其相应的机理。原著内容安排系统完整,条理清晰,阐述严谨。译文经过译者的反复认真斟酌,可读性也比较强。可以期望这本《爆炸物化学》中译本能成为含能材料学科领域研究生的入门基础教材或参考书。

应当提到的是,由于历史的原因以及含能材料学科领域的特殊性,我们对西方该领域的知识和理论体系尚缺乏系统深入的学习和了解。《爆炸物化学》中译本的出版也可以为国内从事含能材料学科领域的教学、科研和工程技术人员在这方面提供有益的借鉴和参考。



中国工程院院士、南京理工大学教授 王泽山

译者前言

译者在为研究生新生讲授含能材料相关课程和指导研究生开展该领域方向的实践中,深感国内缺乏涵盖该学科比较系统全面,内容又比较新的专业基础知识的合适教材。为夯实研究生学科专业基础,开拓视野,提升课程国际化水平,特引进了英国 Cranfield 大学 Akhavan 教授著的《爆炸物化学》作为教学参考书之一。为更好地帮助学习和参考,特将它全文翻译。

本书是 Akhavan 教授多年讲授和研究爆炸物化学的著作,是面向爆炸物化学学习和研究的高年级本科生和研究生的入门教科书。本书通过介绍典型化学爆炸物的发展、基本门类及不同门类代表性的化学爆炸物的理化性能,为读者提供了化学爆炸物的基本概念和性能方面的必要知识。重点阐述了化学爆炸的基本过程,化学爆炸物点火、引发、热分解、燃烧和爆炸等各阶段的特征和机制;介绍了控制和决定化学爆炸物燃烧或爆轰过程和性能的基本理论,即爆炸物化学、爆炸化学反应平衡及化学动力学。对各类军用和民用爆炸物的组成、制造方法及其应用,以及爆炸物的分类也作了简要的介绍。

原著内容全面、系统,结构新颖,简明易懂,可读性较强,基本构建了爆炸物化学研究领域的框架。特别值得一提的是,作者对相关概念和原理的阐述十分清晰,且富有前瞻性,在不少方面还反映了国外本领域关注的前沿问题及其最新研究进展,对含能材料研究和学科发展具有较好的参考价值。

译者在翻译过程中,遵循“忠实与通顺”的基本原则,在正确理解和表达原文思想、写作风格和修辞的基础上,充分照顾到中文的语言习惯和阅读体验。一些较难翻译的概念、术语和句子,译者联系上下文力求充分理解作者的原意,并查找相关文献反复求证。在翻译过程中,对原著中的一些明显错漏之处进行了修正。

译者衷心希望该书译文的出版对从事爆炸物化学研究的师生开阔学术视野,夯实学科专业基础,推动该领域的教学和科研起到促进作用,对从事与化学爆炸物相关的科技与管理人员也能有实用的帮助。

由于译者能力有限,书中错误在所难免,诚望读者不吝指正。

本书在翻译过程中得到了译者的研究生以及周新利老师的大力协助,对错漏之处提出了许多宝贵的建议。徐复铭教授十分仔细地审阅了全书,为本书译文质量的提升作出了重要的贡献,本书承蒙中国工程院院士王泽山教授作序推荐,译者在此对他们表示衷心的感谢,同时感谢装备科技译著出版基金的资助和国防工业出版社的大力支持。

前言

PREFACE

自从 12 年前撰写第 1 版《爆炸物化学》以来，爆炸物领域的研究已经转向了爆炸物的安全性，而不是继续研究其性能，该书的第 3 版反映了这一趋势。第 1 章主要介绍新一代爆炸物——不敏感炸药 (IHE)，第 2 章则更详细地讲述了其性质。由于近年来法规和环境意识的增强，爆炸物对环境造成的影响是该领域显现出来的另一个趋势。相关法规的细节和影响在第 1 章中也进行了讨论。在第 3 版中，利用多种渠道对爆炸物的性质进行了更新，这一点在热化学计算方面已得到了反映。

基于以上所述的主要修订和细微处的更新，第 3 版能使读者对爆炸物化学有基本的理解。本书主要适用于本科生和之前未接触过爆炸性材料的研究生，然而，我希望本书对在爆炸物工业界工作的更多的有经验的化学专家也能有所裨益。

在此书写作过程中，我采用了许多书本、杂志上的资料，为此我向在本书撰写准备过程中所列入参考资料的作者表示感谢。最后感谢我的丈夫 Shahriar 一直对我工作的支持。

目 录

CONTENTS

第 1 章 爆炸物导论	1
1.1 黑火药的发展	1
1.2 硝化甘油的发展	2
1.3 硝化纤维素的发展	3
1.4 代那买特炸药的发展	4
1.5 工业炸药的发展	5
1.5.1 许用炸药的发展	5
1.5.2 铵油、浆状和乳化炸药以及爆破炸药的发展	6
1.6 军用炸药的发展	7
1.6.1 苦味酸的发展	7
1.6.2 特屈儿的发展	7
1.6.3 TNT 的发展	8
1.6.4 硝基胍的发展	8
1.6.5 PETN 的发展	9
1.6.6 RDX 及 HMX 的发展	9
1.6.7 高分子粘结炸药	11
1.6.8 最近的发展	14
1.6.9 不敏感弹药和不敏感炸药	20
1.6.10 爆炸物与环境	21
第 2 章 爆炸性材料的分类	24
2.1 爆炸	24
2.1.1 原子爆炸	24
2.1.2 物理爆炸	24
2.1.3 化学爆炸	25
2.2 化学爆炸物	25
2.3 起爆药	27
2.4 猛炸药	27
2.5 发射药及推进剂	28
2.6 爆炸性材料的化学数据	28
2.6.1 起爆药	28

2.6.2 猛炸药	33
2.7 用于混合炸药的其他化合物	52
第3章 燃烧、爆燃和爆轰	54
3.1 燃烧	54
3.1.1 燃烧的物理和化学特点	54
3.1.2 炸药与发射药、推进剂的燃烧	55
3.2 爆燃	55
3.3 爆轰	56
3.3.1 燃烧转爆轰	57
3.3.2 冲击转爆轰	58
3.3.3 爆轰冲击波的传播	58
3.3.4 密度对爆轰速度的影响	60
3.3.5 爆炸物直径对爆轰速度的影响	61
3.3.6 爆炸性材料对爆轰速度的影响	62
3.4 爆炸物的分类	63
第4章 点火、引发和热分解	64
4.1 点火	64
4.1.1 热点	65
4.1.2 热点形成机理	65
4.2 撞击和摩擦点火	66
4.2.1 摩擦	66
4.2.2 撞击	66
4.3 爆炸物的分类	67
4.4 起爆技术	70
4.4.1 爆炸链	70
4.4.2 雷管	70
4.4.3 点火具	71
4.5 热分解	71
第5章 爆炸物热化学	73
5.1 氧平衡	73
5.2 分解反应	76
5.2.1 Kistiakowsky - Wilson 规则	77

5.2.2	改进的 Kistiakowsky - Wilson 规则	78
5.2.3	Springall Roberts 规则	79
5.3	生成热	80
5.4	爆热	82
5.5	爆炸气态产物体积	86
5.6	爆炸威力、威力指数及 TNT 当量	88
5.7	化学爆炸的温度	89
5.8	混合炸药组成	91
5.8.1	混合炸药的原子组成	92
5.8.2	氧平衡	92
5.8.3	分解反应	92
5.8.4	爆热	93
5.8.5	气态产物体积	94
5.9	高能炸药	94
5.10	爆炸力和爆炸压力	95
第 6 章	爆炸反应平衡和动力学	98
6.1	平衡	98
6.1.1	分解产物	99
6.1.2	水煤气平衡	99
6.1.3	爆热	100
6.1.4	爆温	103
6.2	爆炸反应动力学	103
6.2.1	活化能	104
6.2.2	反应速率	104
6.2.3	热分解反应动力学	105
6.3	动力学参数的测量	106
6.3.1	差热分析	106
6.3.2	热重分析	107
6.3.3	差示扫描量热分析	108
第 7 章	爆炸物的制造	109
7.1	硝化反应	109
7.2	C - 硝化反应	110
7.2.1	苦味酸	110

7.2.2	特屈儿	111
7.2.3	TNT (2, 4, 6-三硝基甲苯)	111
7.2.4	TATB (1, 3, 5-三氨基-2, 4, 6-三硝基苯)	112
7.2.5	HNS (六硝基芪)	113
7.3	O-硝化反应	115
7.3.1	硝化甘油	115
7.3.2	硝化纤维素	116
7.3.3	PETN (季戊四醇四硝酸酯)	118
7.4	N-硝化反应	118
7.4.1	RDX (环三亚甲基三硝胺)	118
7.4.2	HMX (环四亚甲基四硝胺)	122
7.4.3	硝基胍	123
7.4.4	硝酸铵	123
7.5	起爆药	124
7.5.1	叠氮化铅	124
7.5.2	雷酸汞	124
7.5.3	四氮烯	125
7.6	工业炸药	126
7.6.1	硝酸铵	126
7.6.2	硝酸铵浆状炸药	126
7.6.3	硝酸铵乳化炸药	127
7.6.4	代那买特炸药	127
7.7	军用混合炸药	128
7.7.1	铸装	128
7.7.2	压装	128
7.7.3	柱塞挤出和螺杆挤出	130
第8章	发射药、推进剂与烟火药导论	132
8.1	发射药及推进剂导论	132
8.2	枪炮发射药	132
8.2.1	性能	132
8.2.2	组成	133
8.2.3	单基发射药	134
8.2.4	双基发射药	134

8.2.5	三基发射药	134
8.2.6	发射药添加剂	134
8.2.7	高能发射药	135
8.2.8	液体发射药	135
8.2.9	复合发射药	135
8.3	火箭推进剂	136
8.3.1	性能	136
8.3.2	组成	136
8.3.3	双基推进剂	137
8.3.4	复合推进剂	137
8.3.5	液体推进剂	138
8.4	气体发生剂	139
8.5	烟火药导论	139
8.6	产热烟火药	139
8.6.1	底火和点火剂	140
8.6.2	产热装置	141
8.7	延期药	141
8.8	发烟剂	142
8.9	发光剂	142
8.9.1	彩色光	143
8.9.2	白光	143
8.10	发声剂	144
8.10.1	砰响剂	144
8.10.2	哨音剂	144
参考文献		145
后记		147
主题索引		148

爆炸物导论

1.1 黑火药的发展

黑火药又名火药，极可能是最早的爆炸物。据记载，公元前 220 年，中国的炼丹师们在低温反应条件下将金从银中分离时，发生了一起事故，从而偶然地发现了黑火药。根据海佐·马波（Heizo Mambo）博士的记录，炼丹师们将硝酸钾（又称硝石）和硫磺加入到熔炉里的金矿石中，却忘记了在反应的第一步加入木炭。他们试图纠正其失误，在最后一步反应时将木炭加了进去。他们不知道的是，他们恰好制造出了黑火药，导致了巨大爆炸。

直到 13 世纪，黑火药才被引入欧洲。1249 年，英国修士罗杰·培根（Roger Bacon）用硝酸钾进行试验并制造出了黑火药。1320 年，德国修士伯特霍尔德·施瓦兹（Berthold Schwartz）（尽管此人存在与否仍有争议）研究了培根的文章，开始制造黑火药，并研究其性能。施瓦兹的研究结果很可能加速了黑火药在中欧的采用。到 14 世纪末，许多国家将黑火药作为军事辅助手段去攻破城堡及城市的围墙。

黑火药由燃料及氧化剂组成。燃料是由木炭和硫磺组成的粉状混合物，它们与作为氧化剂的硝酸钾混合。1425 年，随着造粒工艺的发展，黑火药的混合工艺取得了极大的改进。用沉重的碾轮将燃料和氧化剂研磨粉碎并把它们压成固体药饼，随后再将这些固体药饼粉碎成较小的药粒，这些小药粒中包含彻底混合好的燃料和氧化剂，从而获得了物理及弹道性能优异的黑火药。15 世纪时，粒状的黑火药逐渐用于小口径枪炮及手榴弹，到了 16 世纪被用于大口径火炮。

1554—1603 年间，在英格兰的罗瑟希德（Rotherhithe）、沃尔塞姆阿

比 (Waltham Abbey) 等地建立了采用造粒工艺的黑火药工厂。

有记载的黑火药首次用于民用工程是在 1548—1572 年间, 黑火药被用来疏通位于北欧的涅曼 (Niemen) 河。1627 年, 匈牙利采用黑火药作爆破辅助手段回收矿石。不久, 德国、瑞典等其他一些国家采用黑火药进行爆破。1670 年, 英国首次将黑火药用于康沃尔 (Cornish) 铜矿的爆破。1646 年, 瑞典建立了博福斯 (Bofors) 工厂, 成为了欧洲商用黑火药的主要制造商。

1.2 硝化甘油的发展

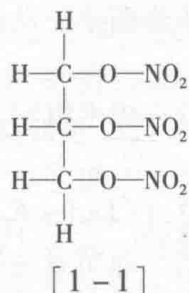
到 19 世纪中叶, 黑火药用作爆破炸药的局限性变得明显。难度较大的采矿、开挖隧道的工程需要性能更好的炸药。1846 年, 意大利教授阿斯卡里奥·索布雷罗 (Ascanio Sobrero) 发现了液态的硝化甘油 $[\text{C}_3\text{H}_5\text{O}_3(\text{NO}_2)_3]$, 他马上意识到硝化甘油爆炸性的本质, 并中止了他的研究。几年后, 瑞典发明家伊曼纽尔·诺贝尔 (Immanuel Nobel) 研制了硝化甘油生产工艺, 并于 1863 年与他的儿子阿尔弗瑞德 (Alfred) 在靠近斯德哥尔摩 (Stockholm) 的海伦堡 (Helenborg) 建立了一个小型工厂。他们最初的生产方法是在石罐中将甘油与冷却的硝酸、硫酸混酸进行混合, 利用手工搅拌并用冰水冷却该混合物, 反应完成之后, 将此混合物倒入过量的冷水中。第二种工艺是将甘油及冷却的混合酸注入到圆锥状铅制容器中, 此容器的收缩段开有孔, 硝化甘油产物通过收缩段流入冰水浴中。两种工艺都采用温水洗涤硝化甘油, 并用热碱液除去酸。因为运输液态硝化甘油容易造成人员伤亡和财产损失, 诺贝尔通常在很靠近硝化甘油需求场所的地方建立其生产工厂。

诺贝尔家族在销售硝化甘油时遇到了许多挫折, 因为硝化甘油很容易意外引爆, 并且在炮孔中用黑火药引爆不可靠。在此期间出了很多意外爆炸事故, 1864 年的一次事故摧毁了诺贝尔工厂, 阿尔弗瑞德的兄弟埃米尔 (Emil) 也死于事故中。1864 年, 阿尔弗瑞德·诺贝尔 (Alfred Nobel) 发明了金属起爆雷管, 它极大地改善了黑火药的引爆。这种雷管含有雷酸汞 $[\text{Hg}(\text{CNO})_2]$, 能够在炮孔中取代黑火药引爆硝化甘油。该起爆雷管产生初始冲击波, 并通过导爆索传递至盛有硝化甘油的独立容器并将其引爆。

在 1866 年发生的另一个重大爆炸事故完全摧毁了硝化甘油工厂之后, 阿尔弗瑞德进而将注意力转移到硝化甘油运输的安全性问题上来。为了降低硝化甘油的感度, 阿尔弗瑞德将其与具有吸附性能的黏土——硅藻土混合, 这种混合物便是硅藻土代那买特 (dynamite) 炸药, 并于 1867 年获得了专利。

硝化甘油 $[1-1]$ 与黑火药相比具有极大的优点, 因为其同一分子中

既含有燃料又含有氧化元素，这使得这两种组分之间能充分接触反应。



雷酸汞的发展

17 世纪时，瑞典籍德国炼金术士约翰·孔克尔男爵（Baron Johann Kunkel von Löwenstern）首次制备了雷酸汞。他用硝酸及乙醇处理水银获得了这种危险的炸药。当时，孔克尔（Kunkel）及其他炼金术士们没有发现这种爆炸物的用途，直到 1799—1800 年间，英格兰的爱德华·霍华德（Edward Howard）再次发现了雷酸汞，人们才想起了它。霍华德研究了雷酸汞的性质，并提出把它用于黑火药的撞击起爆装置。1807 年，苏格兰牧师亚历山大·福赛思（Alexander Forsyth）获得了该装置的专利。

1.3 硝化纤维素的发展

1845—1847 年间，在硝化甘油被制备出来的同一时期，不同的人将纤维素硝化处理制得硝化纤维素（又称火棉），较为著名的是巴塞尔的 Schönbein 及美茵河畔法兰克福的 Böttger。1833 年初，布雷克诺（Braconnot）硝化了淀粉。1838 年，珀卢兹（Pelouze）继续了布雷克诺的试验，也进行了纸、棉花等其他各种材料的硝化。但是，此时他并没有意识到自己制得的是硝化纤维素。1846 年，Schönbein 及 Böttger 同年宣布制得了硝化纤维素，从此，两人的名字便与硝化纤维素的发现及利用密不可分。然而，在 Schönbein 的方法被知晓之前，已有几位研究者发表了关于纤维素硝化的论文。

在硝化纤维素的制造过程中发生了许多的事故，法国、英国及奥地利的工厂都曾被炸毁。在此期间，弗雷德里克·阿贝尔（Frederick Abel）在伍尔维奇（Woolwich）和沃尔瑟姆阿比为英国政府研究硝化纤维素的不安定性问题。1865 年，他公布了一种将硝化纤维素变成浆状的解决方案。阿贝尔采用将硝化纤维素制浆、煮沸并清洗的工艺，大幅度提高了硝化纤维素的安定性。直到 1868 年，当阿贝尔的助手布朗（E. A. Brown）发现干燥、压缩并高度硝化的硝化纤维素可以被雷酸汞雷管引爆，而湿的、经压

缩过的硝化纤维素可以被少量的干燥硝化纤维素引爆（传爆管原理）后，硝化纤维素才被用于军事及工业炸药中。从此，就可以比较安全地使用大量的潮湿硝化纤维素了。

海军舰艇现在采用将大部分火棉水雷用水饱和的方法，实现了火棉水雷的运输。

1888 年，查尔斯·E·门罗（Charles E. Munroe）发现，将一块压印有制造商名称的火棉，有字母的一面贴着金属板放置，然后引爆，在金属板上会留下字母凹印。如果字母凸起在火棉上，那么字母也会凸起在金属板上，这就是门罗效应。门罗效应是指由预制于炸药块的空腔或孔隙引起的爆炸能量的部分集中。

1.4 代那买特炸药的发展

1875 年，阿尔弗瑞德·诺贝尔发现将硝化纤维素与硝化甘油混合在一起，会形成一种凝胶。这种凝胶被用来生产爆胶、胶质代那买特炸药，随后在 1888 年，被用于制作巴立斯太无烟火药，这是第一种无烟火药。巴立斯太药是硝化纤维素、硝化甘油、苯及樟脑的混合物。1889 年，一种在组成上类似于巴立斯太药的竞争性产品获得了英国政府的专利，此项专利发明人是阿贝尔和杜瓦（Dewar），产品称为柯达药。直到 19 世纪 30 年代，不同形式的柯达药一直是英国军队使用的主要发射药。

1867 年，瑞典化学家奥尔松（Ohlsson）和诺尔宾（Norrbin）发现添加硝酸铵后，代那买特炸药的爆炸性质会增强。随后，阿尔弗瑞德·诺贝尔取得了奥尔松和诺尔宾有关硝酸铵的专利，并将此用于他制造的炸药中。

硝酸铵的发展

1654 年，格劳伯（Glauber）第一次制得了硝酸铵，但是，直到 19 世纪初，硝酸铵才被格林德尔（Grindel）和罗宾（Robin）用作黑火药中硝酸钾的替代物。1849 年，赖泽（Reise）和米隆（Millon）报道了硝酸铵的爆炸性质，在将粉状硝酸铵和木炭的混合物加热时发生了爆炸。

虽然有关硝酸铵的小型火灾及爆炸在全世界都有发生，但当时硝酸铵还没有被当成一种炸药。

第二次世界大战结束后，美国政府开始装运称作肥料级的硝酸铵（FGAN）到欧洲，它是一种表面包覆有大约 0.75% 的蜡，并用 3.5% 的黏土改性后的粒状硝酸铵。因为它没有被当成一种炸药，所以在搬动及装运

过程中没有采取特别措施，甚至有工人在装载这种材料时吸烟。

1947年4月16~17日，在这种肥料装运过程中发生了一场可怕的爆炸，而在这之前这种肥料已进行过多次的装运，从未有任何问题。那次事故中，停泊在得克萨斯州港口装载着这种肥料的SS Grandchamp及SS Highflyer两艘货船都发生了爆炸。这些灾难发生后，美国就造成爆炸的可能原因进行了一系列调查。与此同时，对硝酸铵及其与有机及无机材料的混合物的爆炸性质开展了更全面的研究。得克萨斯城的爆炸事故刚刚发生后，7月28号法国布雷斯特港口的“海洋自由”号上也发生了同样的爆炸。

事故调查结果表明，硝酸铵远非以前认为的那么安全。因此，美国立即实施了更为严格的指导硝酸铵储存、装载和运输的规范。

1.5 工业炸药的发展

1.5.1 许用炸药的发展

1870年之前，黑火药一直是唯一用于煤矿开采的炸药，其间发生了一些灾难性的爆炸事故。许多人企图改良黑火药的配方，包括将黑火药与“冷却剂”如硫酸铵、淀粉、石蜡等混合，或将装有水的圆筒塞入装有黑火药的炮孔中，但所有的这些方法都没有成功。

随着硝化纤维素及硝化甘油的发明，人们试图将它们用作矿用炸药的组分以替代黑火药。但是发现这并不适合用于含有瓦斯气体的煤矿中。直到诺贝尔发明代那买特炸药和爆胶，硝化甘油基炸药才开始主导工业爆破及采矿业。在煤矿开采中，炸药使用量的日益增长，带来了瓦斯及粉尘爆炸数量的相应增加，并伴随着巨大的人员伤亡。一些欧洲政府因此考虑禁止在煤矿中使用这些炸药，转而采用水力或压缩空气设备。在实施这项严厉措施之前，一些政府决定指派科学家或由科学家牵头的委员会来研究这一问题。1877—1880年间，法国、英国、比利时、德国等都成立了委员会。根据法国委员会的调查结果，在岩石爆破及含瓦斯煤矿开采时设置最高爆炸温度可解决这一问题。而德国及英国认为，控制爆炸温度只是确保爆破安全的一个因素，也应考虑其他的措施。因此，1880年，为了测试新研发的炸药，在德国的盖尔森基兴（Gelsenkirchen）建设了试验巷道。这个巷道旨在尽可

能接近地模拟采矿条件。1888年，英国组成了委员会，并于1890年左右在 Hebburn 煤矿建成了一条试验巷道。在测试了各种不同的炸药后，推荐了几种适于煤矿爆破的炸药，它们大多是基于硝酸铵的炸药。通过测试的炸药称作“许用炸药”。代那买特炸药及黑火药均未通过测试，它们被基于硝酸铵的炸药取代。该委员会的结论促成了1906年的煤矿规章法案。遵照这一法案，在英格兰的伍尔维奇兵工厂和罗瑟汉姆（Rotherham）建设了试验巷道。

1.5.2 铵油、浆状和乳化炸药以及爆破炸药的发展

1913年，英国的煤矿开采量达到历史最高点2.87亿t，每年消耗5000t以上的炸药。1917年之前，这些炸药的92%都是基于硝酸铵的。为了降低混合炸药的成分，炸药工业在配方中添加更多廉价的硝酸铵化合物，但是其令人遗憾的副作用是降低了炸药的抗水性。由于煤矿及采矿场经常是潮湿的，且装填炸药的炮眼中经常填满了水，所以这是一个严重的问题。化学家们在硝酸铵与代那买特炸药混合之前，使用各种无机粉末包覆硝酸铵，并改善炸药的包装以防止水渗入来克服这一缺点。但是矿用炸药仍然发生意外爆炸。1950年，制造商开始开发既能防水又只含有危险性较小的硝酸铵的炸药，其中最有名的是铵油炸药（ANFO）。20世纪70年代，美国的 Ireco 和 DuPont 公司开始将涂料级的铝粉和硝酸甲胺加入到配方中，生产出了更易引爆的凝胶炸药。近年来发展的产品是乳化炸药，它是由油包硝酸铵溶液的液滴形成的乳液。由于其连续相是油层，故这些乳化炸药具有抗水性；又因为硝酸铵与油能充分接触，所以它们很容易引爆。乳化炸药比代那买特炸药更加安全，工艺简单且价格低廉。

第一个乳化炸药是由伊格利（Egly）和内克尔（Neckar）于1964年制得的。他们通过高速剪切搅拌器将硝酸铵水溶液、油及一种乳化剂混合，然后将结晶硝酸铵加入乳液中，这种乳化炸药溶液具有较为有限的寿命。此后，1969年，Bluhm发明了一种改进的、性能稳定的乳化炸药，称为阿奎拉姆（Aquaram）。Bluhm将热的硝酸铵和硝酸钠溶液加入到包含乳化剂的矿油中乳化，然后通过下述任一方法敏化此乳液：在高剪切搅拌机中充气敏化；加入化学成气剂敏化；加入空心玻璃微球。1978年，克莱（Clay）首次将ANFO加入到乳化炸药中，从而制得一种爆破炸药，其优点是不含敏化剂和气泡。