

普通高等教育“十三五”规划教材

# 新型火工药剂 理论与技术

The Theory and Technology of  
New Initiating Explosives

杨 利 张同来 ◎ 编著

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



普通高等教育“十三五”规划教材

# 新型火工药剂 理论与技术

The Theory and Technology of New Initiating Explosives

杨 利 张同来 © 编著

版权专有 侵权必究

---

图书在版编目 (CIP) 数据

新型火工药剂理论与技术/杨利, 张同来编著. —北京: 北京理工大学出版社,  
2019. 5

ISBN 978-7-5640-9684-7

I. ①新… II. ①杨…②张… III. ①火工品-药剂学 IV. ①TQ560.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 265424 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 9

字 数 / 209 千字

版 次 / 2019 年 5 月第 1 版 2019 年 5 月第 1 次印刷

定 价 / 38.00 元

责任编辑 / 王玲玲

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题, 请拨打售后服务热线, 本社负责调换

随着武器系统、航空航天系统和民用爆破系统向高可靠性、高安全性的方向发展,要求火工品具有更高的技术通用性和高科技技术应用性。火工品的发展是兵器科学与技术学科的一个重要研究方向,火工药剂是火工品专用的特种含能材料,也是含能材料的首发能源材料。它的作用是接受火工品换能元给出的微弱刺激能量,发生快速化学反应,输出燃烧、爆燃或爆炸能量,使火工品实现点火、传火、引爆、传爆、延期、动力做功及烟火效应。火工药剂是弹药系统中最敏感的化学能源,是一种高敏感性、高安全性、高可靠性和高反应速度的亚稳态材料。

火工药剂技术涉及化学、化学工程、物理学、材料学及力学等诸多领域,具有多学科性特点。本书作为火工药剂领域的一部基础性、专业性书籍,在总结归纳火工药剂发展历史和性能特点的基础上,详细论述了火工药剂的基础知识和综合理论。结合近几年来国内外在火工药剂方面不断推出的新品种,分别从火工药剂的分子结构、物理性质、化学性质、热分解性能、感度性能、起爆性能和销毁方法等方面进行全面阐述。

全书共分8章:第1章概述了火工药剂的概念、种类和发展历史;第2~4章分别阐述了火工药剂的相关基础知识和综合理论;第5~8章分别讲述了叠氮化物类起爆药、硝基酚类起爆药、含能配合物类起爆药、杂环类起爆药4类不同起爆药品种的物理性质、化学性质、制备方法与爆炸性能等。

本书由杨利教授与张同来教授共同撰写完成,全书由杨利教授统稿。第2、3章由佟文超老师负责整理;同时,在素材整理、图表和文字处理等方面,仇好博士、姜雨彤博士、宋乃孟博士、张国英博士、王乾有博士、刘剑超博士、许瑞硕士、王虹阳硕士、荣晶晶硕士给予了大量的帮助;侯佳杏在书稿的修正方面做出了一些工作,在此一并表示衷心的感谢。

本书参考了大量的学术专著和论文,在此对所参考文献的作者致以衷心的感谢。本书的出版得到了爆炸科学与技术国家重点实验室的资助,在此表示感谢!

本书尝试在原有火工药剂的基础知识和综合理论的基础上,增加了新型火工药剂理论与技术的阐述,紧跟火工药剂不断创新的知识体系,为广大读者领会新理论、新技术提供基础帮助,但由于作者的水平有限,加之火工药剂领域不断更新,书中难免有一些缺点和不足,真诚希望读者不吝赐教,提出宝贵的改进意见。

# 目 录

## CONTENTS

<b>第1章 概论</b> .....	001
1.1 火工药剂的概述 .....	001
1.1.1 火工药剂的概念 .....	001
1.1.2 火工药剂的本征特点 .....	001
1.2 火工药剂的种类 .....	001
1.2.1 火工药剂的分类 .....	001
1.2.2 火工药剂的特征基团 .....	002
1.3 火工药剂的发展历史 .....	003
1.4 火工药剂的基础性能 .....	005
1.4.1 起爆药的起爆能力 .....	005
1.4.2 火工药剂的燃烧转爆轰 .....	006
1.5 安全防护措施 .....	007
<b>第2章 火工药剂热分析理论与技术</b> .....	009
2.1 火工药剂的热分析方法 .....	009
2.1.1 热重法 .....	009
2.1.2 量热法 .....	010
2.1.3 量气法 .....	012
2.1.4 快速裂解/红外分析法 .....	014
2.2 火工药剂的热分析理论 .....	015
2.2.1 非定温动力学模型 .....	016
2.2.2 定温动力学模型 .....	017

2.3	火工药剂的安定性 .....	018
2.4	火工药剂的相容性 .....	019
2.5	火工药剂的贮存寿命 .....	021
2.5.1	火工药剂贮存寿命机理 .....	021
2.5.2	火工药剂贮存寿命数学模型 .....	021
<b>第3章</b>	<b>火工药剂感度的特征 .....</b>	<b>023</b>
3.1	感度的基本知识 .....	023
3.1.1	感度的概念及特征 .....	023
3.1.2	感度的评价方法 .....	024
3.2	感度的测试方法 .....	024
3.2.1	热感度 .....	024
3.2.2	机械感度 .....	026
3.2.3	静电感度 .....	029
3.2.4	激光感度 .....	032
<b>第4章</b>	<b>火工药剂晶形控制技术 .....</b>	<b>033</b>
4.1	结晶基本原理 .....	033
4.1.1	晶核生成 .....	033
4.1.2	晶体成长 .....	034
4.2	晶形控制技术 .....	035
4.3	晶形控制剂 .....	037
<b>第5章</b>	<b>叠氮类起爆药 .....</b>	<b>039</b>
5.1	叠氮化铅 .....	039
5.1.1	物理性质 .....	039
5.1.2	化学性质 .....	041
5.1.3	制备方法 .....	043
5.1.4	销毁处理 .....	044
5.1.5	爆炸性能 .....	045
5.1.6	自爆现象与机理 .....	048
5.1.7	改性叠氮化铅 .....	049
5.2	叠氮化铜 .....	050

5.2.1	物理性质	050
5.2.2	化学性质	051
5.2.3	制备方法	051
5.2.4	销毁处理	051
5.2.5	爆炸性能	052
5.2.6	改性叠氮化铜	052
5.3	其他叠氮化物	054
<b>第6章</b>	<b>硝基酚类起爆药</b>	<b>057</b>
6.1	硝基酚的基本知识	057
6.1.1	三硝基苯酚	058
6.1.2	三硝基间苯二酚	060
6.1.3	三硝基均苯三酚	062
6.1.4	硝基酚盐	062
6.2	三硝基间苯二酚铅	064
6.2.1	物理性质	064
6.2.2	化学性质	065
6.2.3	制备方法	065
6.2.4	爆炸性能	066
6.2.5	改性斯蒂芬酸铅	068
6.3	二硝基重氮酚	071
6.3.1	物理性质	071
6.3.2	化学性质	071
6.3.3	制备方法	072
6.3.4	爆炸性能	074
6.3.5	废水处理	076
6.4	二硝基苯并氧化呋咱钾	077
6.4.1	物理性质	077
6.4.2	制备方法	077
6.4.3	爆炸性能	079
<b>第7章</b>	<b>配合物类起爆药</b>	<b>080</b>
7.1	硝酸胛镍	080

7.1.1	物理性质	080
7.1.2	化学性质	081
7.1.3	制备方法	082
7.1.4	爆炸性能	083
7.2	高氯酸三碳酰肼合镉	084
7.2.1	物理性质	084
7.2.2	化学性质	086
7.2.3	制备方法	088
7.2.4	销毁处理	090
7.2.5	爆炸性能	090
7.3	高氯酸三碳酰肼合锌	095
7.3.1	物理性质	095
7.3.2	化学性质	098
7.3.3	制备方法	100
7.3.4	销毁处理	100
7.3.5	热分解性能	101
7.3.6	爆炸性能	103
<b>第8章 杂环类起爆药</b>		<b>108</b>
8.1	CP	108
8.1.1	物理性质	108
8.1.2	制备反应原理	109
8.1.3	制备反应工艺	109
8.1.4	爆炸性能	110
8.2	BNCP	111
8.2.1	物理性质	111
8.2.2	制备反应原理	111
8.2.3	制备反应工艺	112
8.2.4	爆炸性能	112
8.3	四氮烯	113
8.3.1	物理性质	113
8.3.2	化学性质	113
8.3.3	制备反应原理	114

8.3.4 制备反应工艺 .....	114
8.3.5 爆炸性能 .....	114
8.4 四唑起爆药 .....	116
8.4.1 5-氨基四唑 .....	117
8.4.2 5-硝基四唑 .....	118
8.4.3 5-胍基四唑 .....	119
8.4.4 1,5-二氨基四唑 .....	121
8.4.5 5-硝基四唑汞及其金属盐 .....	123
8.4.6 高氯酸氨基四唑二银 .....	125
参考文献 .....	128

# 第1章

## 概 论

### 1.1 火工药剂的概述

#### 1.1.1 火工药剂的概念

火工药剂是指装填于火工品中的具有起爆、点火、延期、做功等功能的药剂总称。火工品是一种小型的爆炸元器件，被广泛地应用于各种武器系统、爆炸成型、航空航天、空间站及民用爆破器材等领域中。它能在一定的外界能量激发作用下，快速发生燃烧、爆炸等化学反应，并对外界释放能量，以获得某种化学物理效应或机械效应。

#### 1.1.2 火工药剂的本征特点

火工药剂由于其自身的作用特点，必须具备以下特点：

- ① 有合适的特定感度性能，能在适当的外界刺激下被激发而产生做功。
- ② 有稳定的基本物理化学性质、高度的安定性和相容性，满足于生产、使用及贮存等条件的要求。
- ③ 具有良好的流散性、均匀性和压药性等装药工艺性能，满足于火工品的装药要求，并保证发火的可靠性。
- ④ 具有可靠的特定输出性能，能够实现下一级装药的点火、起爆、传爆等功能，满足火工品的对外做功要求。
- ⑤ 生产原料易得，制备方法简便，生产操作过程安全，生产工艺满足环保的排放标准。

### 1.2 火工药剂的种类

#### 1.2.1 火工药剂的分类

火工药剂可以根据火工品的性能要求，实现能量转换，输出不同形式的能量，如爆轰、爆燃或燃烧。根据本身发生固体快速反应时进行的能量转换形式的不同，可以分为起爆药、击发药、针刺药、点火药和延期药等。其中起爆药发生快速反应，能量转换做功输出的是爆轰；击发药、针刺药发生快速反应，能量转换做功输出的是爆燃；点火药、延期药发生快速

反应，能量转换做功输出的是燃烧。

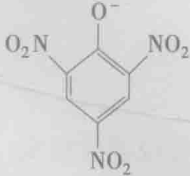
火工药剂根据药剂的组分，分为单质火工药剂和混合火工药剂。单质火工药剂通常指单质起爆药，它是一种单一化学成分的药剂，其分子内部含有特征爆炸基团或敏感的含能基团。传统的单质起爆药一直以来都是火工品的主要应用类型，包括重氮化合物类（如硝基重氮苯、二硝基重氮酚、硝基重氮苯高氯酸盐等）、叠氮化合物类（如叠氮化铅、叠氮化银、三硝基三叠氮苯等）、长链或环状多氮化合物类（如四氮烯、硝基唑、重氮胺基唑等）、硝基酚类的重金属盐（如苦味酸铅、斯蒂芬酸铅等）、乙炔的金属衍生物（如乙炔银、乙炔铜等）、有机过氧化物（如过氧化丙酮、六次甲基二胺过氧化物等）、重金属氯酸盐或高氯酸盐及其与胍络合配位化合物等。其中，叠氮化铅（LA）、斯蒂芬酸铅（LTNR）、四氮烯（TTZ）、二硝基重氮酚（DDNP）、硝酸胍镍（NNH）、高氯酸四氨·双(5-硝基四唑)合铂（BNCP）、高氯酸三碳酰胍合锌（GTX）是最常用的几种单质火工药剂。

混合火工药剂是由几种不同组分的药剂通过干混、湿混等物理方法及包覆、包结、共沉淀、共晶等化学方法制成的一大类火工药剂。按激发方式的不同，混合火工药剂又可分为击发药、针刺药、点火药、延期药，这些药剂可以根据不同的做功能力与装药结构等需求进行组分的调整。在混合火药剂中，以单质起爆药为重要组成部分，辅助的药剂可包括氧化剂、还原剂、可燃剂、敏化剂和黏合剂等。由此可以看出单质起爆药在分子结构上具有明显的爆炸基团，在混合火工药剂中仍然发挥着不可替代的重要作用。

### 1.2.2 火工药剂的特征基团

单质的火工药剂在受外界能量刺激时，引发爆炸反应的本质原因是化学键的断裂，故其分子结构中所含基团的稳定性对火工药剂的感度有着重要的影响。在常规单质火工药剂分子中，大都含有各种不稳定的基团，而它们的性质、数量及所在位置决定着火工药剂的感度。表 1.1 介绍了部分火工药剂中含有的主要特征基团。

表 1.1 火工药剂的主要特征基团

序号	化合物种类	特征基团	典型代表
1	重氮化合物	$\begin{array}{c}   \\ -C-N=N^+X^- \\   \\ N\equiv Cl_3 \text{ 和 } N\equiv I_3 \end{array}$	二硝基重氮酚（DDNP）、卤化重氮盐
2	叠氮化合物	$-N=N=N-$	叠氮化铅（LA）、叠氮化银
3	乙炔的金属衍生物	$(-C\equiv C-)$	乙炔银、乙炔铜
4	硝基酚类 重金属化合物		苦味酸铅（LPA）、 三硝基间苯二酚铅（LTNR）
5	金属配合物	$[M(L)_x]A_y$ $A = ClO_4^-, NO_3^- \text{ 或 } N_3^-$	NHN、BNCP、GTG、GTX

续表

序号	化合物种类	特征基团	典型代表
6	多氮化合物	不饱和氮烯烃或四唑 含杂原子直链或环状结构	四氮烯 (TTZ)、三唑、四唑、 四嗪、咪唑类化合物
7	有机过氧化物	—O—O—O—	过氧丙酮
8	其他类别	—NH—NO <sub>2</sub>	硝胺化合物

### 1.3 火工药剂的发展历史

火工药剂来源于火药，火药的主要成分为“一硫、二硝、三木炭”，并且其中的木炭主要是指来自大自然的柳木、麻秆、柞木和桦木等。火药具有响声清脆悦耳、火花炫目好看、燃烧反应迅速等主要特征。火药是由中国古代的炼丹家发明的，从战国至汉初，帝王贵族们沉醉于神仙长生不老的幻想，驱使一些方士道士炼“仙丹”（图 1.1），在炼制过程中逐渐发明了火药的配方。据史书记载，我国古代的炼丹家在长期的炼制丹药过程中，发现硝、硫黄和木炭的混合物能够燃烧爆炸，由此诞生了中国古代四大发明之一的火药。公元 808 年，唐朝炼丹家清虚子撰写了《太上圣祖金丹秘诀》，其中的“伏火矾法”是世界上最早的关于火药的文字记载，中国学术界由此认为火药的发明不晚于宋朝，且中国是最早发明火药的国家。



图 1.1 方士道士炼“仙丹”

早在 2 000 多年前的春秋战国时期，世界上最早的以抛石块杀伤敌人的兵器就已经由中国人制造出来了，这也是“火炮”的始祖“抛石机”。在《范蠡兵法》中有着关于炮的最早记载：“飞石重十二斤，为机发，行二千步。”在汉代著名的“官渡之战”中，曹操曾用“霹雳车”击败袁绍，这种“霹雳车”就是古代的石炮。但是在宋代之前，石炮的使用规模还是非常有限的。北宋曾公亮等人于 1044 年编著了军事名著《武经总要》，其中就已经记

载了多种火药武器和火炮火药的配制方法。

黑火药是在晚唐（9 世纪末）时候才正式出现的，其主要由 75% 的硝酸钾、10% 的硫黄和 15% 的木炭混合制成的火药，为黑色粒状，如图 1.2 所示。黑火药燃烧发生反应时，硝酸钾分解放出的氧气，使木炭和硫黄剧烈燃烧，瞬间产生大量的热和氮气、二氧化碳等气体。据测，每 4 g 黑火药着火燃烧时，大约可以产生 280 L 气体，体积可膨胀近万倍。在有限的空间里，气体迅速生成并受热膨胀引起爆炸。在爆炸时，固体生成物的微粒分散在气体里，产生大量的烟雾。因此，黑火药主要作为起爆药、点火药、传火药等，被广泛地应用于烟火、导火线、炮膛、弹丸等装置中。



图 1.2 黑火药的外观

1899 年，霍华德制备出了雷汞；1914 年，雷汞开始被用于制造火帽。雷汞是最早被人们使用的起爆药，学名雷酸汞，分子式为  $\text{Hg}(\text{ONC})_2$ 。它是由汞（水银）和硝酸作用生成硝酸汞，然后硝酸汞再与乙醇作用制得的，这样制得的雷汞为灰雷汞。当在反应过程中加入少量的盐酸和铜时，制得的雷汞为白雷汞。雷汞外观为白色或灰色结晶，军用多为纯度高的白雷汞。雷汞比较怕潮，当含水分 5% 的雷汞受撞击时，仅局部爆炸；当含水分 30% 的雷汞受撞击时，则会失效。雷汞热安定性较差，常温下尚安定，在 40 ~ 50 °C 以上时长期库存易分解。当温度高于 100 °C 时，易发生自爆。雷汞对冲击、摩擦、火焰及电火花都比较敏感。5 min 发火点为 170 ~ 180 °C，5 s 发火点为 210 °C。雷汞适合装填在手榴弹、地雷及爆破雷管中，也可以用作火帽击发药。雷汞由于汞污染的存在，目前已经完全被无汞起爆药所替代。

1891 年，T. Curtius 首先制得了叠氮化铅。1907 年，法国 Hyronimlle 获得在工业上应用的专利权。1920 年，叠氮化铅开始在民用方面得到了应用，慢慢取代其他起爆药。1931 年，美国正式将叠氮化铅用于军品。受叠氮化铅晶形与感度的限制，后期逐渐发展了糊精、聚乙烯醇、羧甲基纤维素等包覆或改性的叠氮化铅新品种。各国也纷纷将叠氮化铅加入军事标准或民用标准，其成为当前用于武器系统与民用爆破器材等火工品的主要起爆药品种。与叠氮化铅相比，同期发现的其他叠氮化物，如叠氮化银、叠氮化铜等，由于感度过高、稳定性差或成本因素高等原因，并未得到广泛应用。

三硝基间苯二酚铅于 1914 年由 F. Von Herz 首次制得。1920 年，德国将其作为起爆药，用于雷管装药。苏联将其定名为斯蒂芬酸铅，主要用于击发药组分，该药火焰感度好，机械感度低，特别适用于与叠氮化铅一起作雷管的混合装药。在击发药、针刺药和电点火头中，主要起引燃作用。但是其静电感度极高，给这种药剂的生产与使用带来了较大的安全隐患，在单独使用时，要注意防止静电引起的爆炸。

四氮烯（特屈儿）由 Hoffman 和 Roth 于 1914 年首次制得。1931 年后，W. E. Rinkenback 和 O. Burton 对四氮烯进行了深入的研究，介绍了它的制造工艺和爆炸性能。四氮烯是一种弱起爆药，一般不单独使用起爆猛炸药，它在摩擦时极易起爆，且爆炸产物不留残渣，常在无锈蚀击发药中作为敏感剂和增强剂使用。

高氯酸五氨·[2 - (5 - 氰基四唑)] 合钴和高氯酸四氨·双(5 - 硝基四唑) 合钴

是一类性能稳定的起爆药品种，它们具有较好的热稳定性（前者 270 ℃，后者 237 ℃），且具有较高的能量。高氯酸四氨·双（5-硝基四唑）合钴已被广泛地应用于激光火工品中。

随着对新型起爆药研发力度的增加，广大的科研工作者从分子结构的设计出发，研制不同系列的化合物，希望从中发现高能起爆药新品种。如 2011 年，Michael D. Williams 等人制备了热稳定性良好且具备起爆能力的 4,6-二硝基-7-羟基苯并氧化呋咱钾和 5-硝基四唑亚铜。2014 年，Thomas M. Klapçtke 等人制备的 1,1'-二硝胺基-5,5'-双四唑钾和 1,5-二硝胺基四唑钾都有着较高的感度和良好的爆炸性能。2015 年，Jeanĭne M. Shreeve 等人制备的 4,5-二硝甲基氧化呋咱钾和 3-氨基-5-硝胺基-1,2,4-噁二唑具备合适的感度和氧平衡。新合成的化合物大多具有多硝基多氮杂环结构，该类化合物对外界刺激较为敏感，如何将它们应用于火工药剂中还有待于进一步的研究。

同时，各国研究人员也在对传统的起爆药进行制备工艺的改进。如将晶形控制剂应用于起爆药合成中，以期改变起爆药的晶体形貌，提高装药的流散性，增加药剂的稳定性；将一些碳材料掺杂到传统起爆药中，以期减少静电电荷的积累，保障药剂的安全性。

这些研究极大地推进了火工药剂技术领域的发展，使得火工药剂无论从分子结构上还是性能指标上，都反映了当前技术的革新。火工药剂的新品种研发与起爆性能的改进一直以来都是科学工作者的研究热点。

## 1.4 火工药剂的基础性能

### 1.4.1 起爆药的起爆能力

起爆药需要具有燃烧迅速转爆轰的性能，但能否实际用作起爆药，还取决于它的起爆能力。所谓的起爆能力，就是指起爆药在爆炸后，能够引燃其他猛炸药实现稳定爆轰的能力。起爆药的起爆能力越强，药剂达到稳定爆轰所需爆速成长期越短。起爆过程中消耗药量的多少是衡量一种药剂起爆性能的重要指标。

极限起爆药量指能起爆猛炸药的最小起爆药量。通常以能引爆 20 ~ 30 mg 的结晶黑索金（RDX）且达到稳定爆轰时所需的最小起爆药量，为该药剂的极限起爆药量。具体的试验方法为：① 将被测起爆药、三硝基间苯二酚铅、黑索金分别放入水浴烘箱中，在  $(60 \pm 2)$  ℃ 的温度下烘 2 h，取出，放入干燥器中冷却至室温，备用。② 用分析天平称取经①处理的黑索金 0.030 g，准确至 0.000 2 g，置于铜管壳（直径为 5.1 mm，高为 8.2 mm）中，以 117.6 MPa 的压力压药。③ 分别称取经①处理的三硝基间苯二酚铅（对于直接能被电点火头点燃的被测药剂，可以不用三硝基间苯二酚铅作点火药）0.030 g、被测起爆药和黑索金 0.020 g，准确至 0.000 2 g，依次置于带有绸垫的铝加强帽内，以 49.0 MPa 的压力压药，并做好记录。④ 称取黑索金 0.020 g，准确至 0.000 2 g，并依次将黑索金和经③压好药的铝加强帽装入②铜管壳内，并以 49.0 MPa 的压力压制成试样数发，并编号，记录每一编号的被测起爆药质量，备用。极限起爆药试验装置如图 1.3 所示。

经点火起爆后，测量试样在铅板上的炸孔。炸孔直径不小于试样外径时为全爆，小于试样外径时半爆。若连续试验数发试样均全爆，则需要适当减少被测起爆药的药量再进行试

验；若试样有半爆，应适当增加被测药剂的药量，直至找到数发试样连续试验均为全爆时为止，此时所需要的起爆药药量即为极限起爆药药量。图 1.4 为极限药量测试过程试验图。

起爆能力大的起爆药，适合装填于小型雷管中。如叠氮化铅的爆炸变化加速度大，其起爆能力也大，使用时极限起爆药量小，被广泛用于各种火工品中。影响起爆能力的因素包括内因和外因两个方面，其中内因是由物质本身的性质所决定的，如起爆药内部的分子构成、化学键的性质、晶体结构与结晶形状等，外因是装药密度、壳体材料、起爆条件和环境温度等因素。

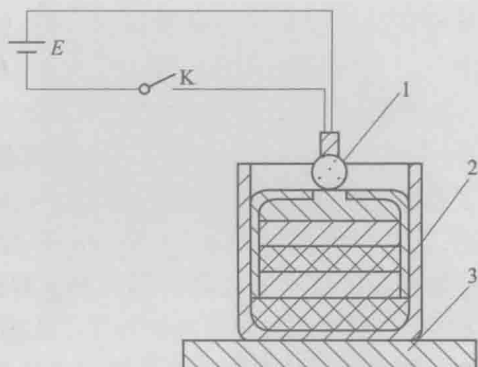


图 1.3 极限起爆药试验装置示意图  
1—电点火头；2—试样；3—铅板

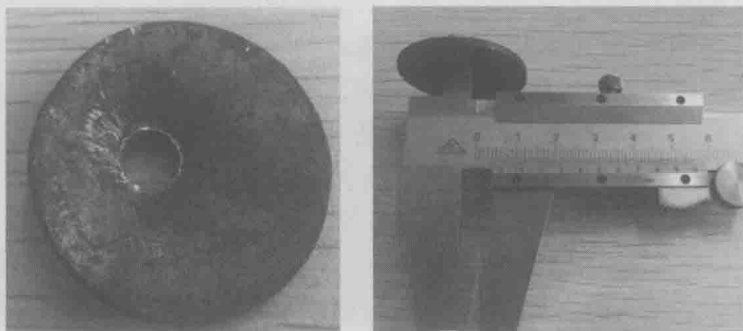


图 1.4 极限药量测试过程试验图

除上述的极限起爆药量外，表征起爆药起爆能力的试验方法还有很多种，如凹痕试验、铅铸试验等。其中凹痕试验已列入标准方法。

### 1.4.2 火工药剂的燃烧转爆轰

燃烧转爆轰（DDT）是一个复杂的物理、化学过程。早在 20 世纪 40 年代，苏联科学家 Andreev 首先开始了对此问题的研究。在理论方法上，有以 Forest Comperthwaite 为代表的“考虑气、固相阻力的单相模型”和以 Krier Bear 为代表的“两相流模型”。在试验方法上，主要分为测压、测速两个方面，测压技术有应变片法、管内刻痕显示法、验证板法、轴向机械探针法，测速技术有高速摄影法、脉冲 X 射线法、光纤记录法、分辐离子探针法和轴向电阻丝法。

燃烧与爆轰是两类不同的化学反应方式，它们的区别主要表现在如下几个方面：① 激发反应的方式。燃烧通过热传导、热辐射方式引起化学反应，爆轰通过冲击波、冲击压缩引起化学反应。② 火焰面传播速度。燃烧速度为每秒数毫米至每秒数百米，而爆轰速度为每秒数千米。③ 质点运动方向。燃烧产物质点运动方向与燃烧界面消失方向相反，爆轰产物质点运动方向与反应界面消失方向相同。④ 波压。燃烧时反应压力较低，而爆轰时反应压力常高达数十万个大气压。所谓燃烧转爆轰，就是研究这两种化学反应的转变过程，以及各种外界条件、装药条件对实现这一过程的影响。

起爆药的爆炸变化过程,是既相互联系又相互区别的两种不同过程——燃烧与爆炸。爆炸变化在起爆药中扩展的过程,在一定条件下可以由燃烧转变为稳定的爆轰。因此,起爆药在受某种初始冲能引爆时的变化过程,可以用爆炸变化速度来表明。爆炸变化速度的快慢,可以用单位质量起爆药爆炸所需的时间表示,或以爆炸变化过程在单位时间内沿药柱传播所经的长度来表示。起爆药通过爆炸变化速度(加速度)的不断增长,在一定的条件下可以达到爆速最大值,实现稳定的爆轰。图 1.5 为常见起爆药的燃烧过程。从图中可以看出,起爆药具有非常明显的快速转爆轰的性能。

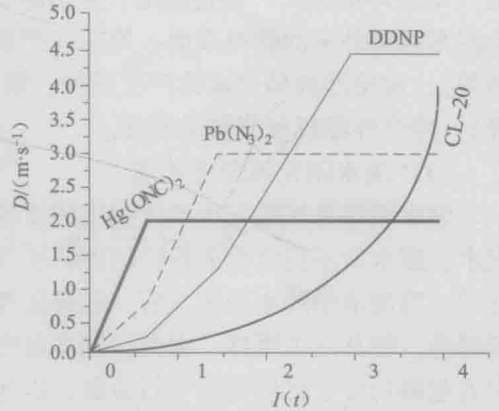


图 1.5 常见起爆药的燃烧过程图

在一定条件下,起爆药受初始冲能引爆,由开始燃烧转变为稳定爆轰,其所需要的时间或药柱长度,较之猛炸药由开始燃烧转变为爆轰所需的时间或药柱长度要短得多。也就是说,起爆药的爆炸变化速度的增长比猛炸药的爆炸变化速度增长要快得多。这是起爆药与猛炸药之间的主要区别之一。

由燃烧转爆轰(DDT)的能力是鉴别和评定能否作为起爆药的爆炸性能的示性参数。但从物理、化学观点分析,起爆药与猛炸药在爆燃转爆轰表现出的差别,只是程度上的不同,而不是本质上的差异。所谓程度上的不同,就是指在正常使用条件下,起爆药的爆燃转爆轰是由点火引起的,起爆药一经点火,即迅速由爆燃转变为爆轰,而猛炸药的爆燃转爆轰是由冲击波引起的。点火时,起爆药的作用是爆轰,借以引爆猛炸药。

影响燃烧转爆轰的因素也很多,如药剂本身的性质、物理状态、装药条件、外界起爆能力的强弱、药柱直径的大小及壳体的坚固程度等。

## 1.5 安全防护措施

火工药剂是弹药系统中最敏感的化学能源,属于最高危险品的范畴。在科研、生产及使用过程中都要有非常好的防范意识与保护措施。

### (1) 限量制备,就地使用

化合物的药量是决定产品在爆炸过程中伤亡情况的重要因素,因此在制备的过程中一定对每批的药量进行控制。通常情况下,实验室的制备药量控制在 5 g 以下,对于性能未知的新药,药量控制在 2 g 以下,采取的保护措施是在防护玻璃板后面进行操作;在中试的过程中,制备药量控制在 100 g 以下,采用的保护措施是钢板防护;在生产过程中,制备药量控制在 5~10 kg 以下,钝感的起爆药可以控制在 10~20 kg 以下,采取的保护措施是在抗爆间内进行操作。

由于起爆药具有非常高的敏感度,不能进行异地运输。在干药粉进行工序间转移时,需要将药剂装盒并置于专用的药剂箱内,限量地由专人手提或用专用索道运输。

### (2) 严格控制环境因素

环境因素对于起爆药稳定性的影响也是非常大的。第一,严格禁止烟火;第二,严防静

电（增加环境湿度、设备接地、穿防静电工服、禁止携带具有信号功能的电子产品等），减小甚至消除外来的静电来源；第三，严防过热（药剂的烘干采用水浴烘干的方法、平摊晾药等），避免药剂局部过热产生爆炸；第四，严防震动（注意轻拿轻放，配套减震缓冲装置等），降低外部机械能量的刺激。

### （3）废水须先销爆再处理

废水销爆是试验与生产过程中的重要环节。制备起爆药的过程中，都会或多或少地产生废水，废水中不仅含有未反应的原料，而且也包含一部分粒度过小或是溶于溶剂中的起爆药分子，当废水中的水分蒸发后，起爆药就会结晶出来。外界一点很小的刺激，可能就会激发起爆药，使其发生爆炸。因此，制备起爆药的过程中，必须对废水进行销爆处理，保证废水中的起爆药分子已经完全进行分解，以达到国家排放的标准，再进行下一步的处理。

起爆药的安全防护问题是一项长期而艰巨的任务，试验者或是操作者一定要时刻提高安全意识，掌握必要的防护措施，在充分了解这类化合物的各种感度与爆炸性能后，再进行其他的分析与测试工作，不能掉以轻心，不能盲目地工作。