



# 爆炸及其防护简明教程



罗兴柏 张玉令 丁玉奎 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

# 爆炸及其防护简明教程

罗兴柏 张玉令 丁玉奎 编著

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

本书以弹药销毁为应用背景,旨在用较少的学习时间为读者建立爆炸及其防护的知识和方法体系,内容分为概述、爆炸力学基础、破片作用及其防护、冲击波作用及其防护、爆炸热效应危害与防护、废旧弹药炸毁事故案例分析等六章,每章后附思考题。

本书可作为相关专业的本科生学历教育和任职培训、在职轮训的教材,也可供有关人员工作参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

爆炸及其防护简明教程 / 罗兴柏, 张玉令, 丁玉奎编著.

—北京: 国防工业出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-118-11091-3

I. ①爆... II. ①罗... ②张... ③丁... III. ①爆炸 - 安全防护 - 教材 IV. ①X932

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 248632 号

※

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

新华书店经售

\*

开本 880 × 1230 1/32 印张 3 1/8 字数 96 千字

2016 年 10 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 28.00 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

# 前 言

对于将要从事弹药销毁等技术保障工作的读者而言,学习“爆炸及其防护”课程无疑具有重要的意义。鉴于该课程学时较少,现有教材或专著难以满足教学需要,为便于课堂教学和课后自学及工作参考,笔者将近年来的有关讲稿整理成《爆炸及其防护简明教程》。

本书共分六章。第一章概述,以弹药销毁事故案例为引,简要说明本课程学习目的及内容框架,简要回顾爆炸现象与类别,炸药的基本特征与化学变化形式,着重阐述弹药爆炸危害的主要形式及其防护的基本原则与一般措施;第二章爆炸力学基础,主要介绍气体动力学基本概念与基本方程、平面正冲击波和爆轰波 C-J 理论;第三章破片作用及其防护,主要介绍弹药自然破片的形成过程、破片参数的工程计算、破片危害及其防护;第四章冲击波作用及其防护,主要介绍空气冲击波的形成与传播、爆炸相似律与空气冲击波参数计算、空气冲击波的危害及其防护;第五章爆炸热效应危害与防护,主要介绍炸药空气中燃烧产生的热辐射效应,包括瞬变火球的成长、火球热能的传播、接受体破坏判据及热效应危害防护的一般措施;第六章废旧弹药炸毁事故案例分析,以某起弹药销毁事故为背景,在介绍事故经过、销毁弹药与销毁方法的基础上,着重分析和验证事故原因,总结事故结论与教训;每章后附思考题。通过适当调节课堂讲解程度,可以在 20~24 学时内完成课程教学。其中,第一章、第二章、第五章、第六章由罗兴柏编著,第三

章和第四章分别由张玉令和丁玉奎编写,全书由罗兴柏负责统稿和审改。

笔者力求结合弹药销毁工作实际,追求用数学语言阐释建立爆炸及其防护的完整知识体系,以求在提高解决问题能力的同时,增进科学素养。但效果与立意未必相符,敬请读者体察并鉴谅。

限于笔者水平,错误疏漏之处难免,真诚欢迎读者批评指正。



2016年6月2日

# 目 录

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第一章 概述 .....              | 1  |
| 一、引言 .....                | 1  |
| 二、爆炸现象与类别 .....           | 3  |
| 三、炸药的基本特征 .....           | 4  |
| 四、炸药化学变化形式 .....          | 6  |
| 五、弹药爆炸危害的主要形式 .....       | 8  |
| 六、弹药爆炸危害防护的基本原则与措施 .....  | 12 |
| 思考题 .....                 | 15 |
| 第二章 爆炸力学基础 .....          | 16 |
| 第一节 气体动力学基本概念与基本方程 .....  | 16 |
| 一、气体的物理性质 .....           | 16 |
| 二、气体的状态参量与状态方程 .....      | 19 |
| 三、波与声波 .....              | 25 |
| 第二节 平面正冲击波 .....          | 31 |
| 一、平面正冲击波的基本关系式 .....      | 31 |
| 二、多方气体中的平面正冲击波 .....      | 35 |
| 三、冲击波的基本性质 .....          | 35 |
| 四、平面冲击波在刚性壁面的正反射 .....    | 35 |
| 第三节 爆轰波 C-J 理论与参数计算 ..... | 38 |
| 一、起爆现象与稳定爆轰条件 .....       | 38 |
| 二、爆轰波 C-J 理论 .....        | 39 |

---

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 三、爆轰波参数计算 .....           | 40 |
| 思考题 .....                 | 42 |
| 第三章 破片作用及其防护 .....        | 44 |
| 一、弹药自然破片的形成过程 .....       | 44 |
| 二、破片质量分布规律 .....          | 46 |
| 三、破片空间分布规律与密度 .....       | 50 |
| 四、破片初速 .....              | 52 |
| 五、破片存速 .....              | 54 |
| 六、破片对人员的杀伤作用与设防安全距离 ..... | 57 |
| 七、破片的击穿作用与防护靶板设计 .....    | 62 |
| 八、破片的纵火与引爆作用 .....        | 65 |
| 思考题 .....                 | 66 |
| 第四章 冲击波作用及其防护 .....       | 67 |
| 第一节 空气冲击波的形成与传播 .....     | 67 |
| 一、空气冲击波的形成 .....          | 67 |
| 二、空气冲击波的传播 .....          | 69 |
| 三、空气冲击波在刚性壁面上的正反射 .....   | 72 |
| 四、空气冲击波的环流作用 .....        | 74 |
| 第二节 爆炸相似律与空气冲击波参数计算 ..... | 76 |
| 一、量纲理论基础知识 .....          | 76 |
| 二、爆炸相似律 .....             | 79 |
| 三、空气冲击波参数的工程计算 .....      | 81 |
| 第三节 空气冲击波的危害与防护 .....     | 85 |
| 一、冲击波对人员的危害与防护 .....      | 85 |
| 二、冲击波对建筑物的危害与防护 .....     | 88 |
| 思考题 .....                 | 91 |
| 第五章 爆炸热效应危害与防护 .....      | 92 |
| 一、燃烧事故 .....              | 92 |

---

|                               |            |
|-------------------------------|------------|
| 二、瞬变火球的成长 .....               | 93         |
| 三、火球热能的传播 .....               | 97         |
| 四、接受体破坏的判据 .....              | 101        |
| 五、热效应危害防护的一般措施 .....          | 105        |
| 思考题 .....                     | 105        |
| <b>第六章 废旧弹药炸毁事故案例分析 .....</b> | <b>106</b> |
| 一、事故经过 .....                  | 106        |
| 二、炸毁弹药与方法 .....               | 107        |
| 三、事故原因分析与验证 .....             | 109        |
| 四、结论与教训 .....                 | 113        |
| 思考题 .....                     | 114        |
| <b>参考文献 .....</b>             | <b>115</b> |

# 第一章 概 述

本章在简要说明本课程学习目的及内容框架的基础上,简要回顾爆炸现象与类别、炸药的基本特征与化学变化形式,着重阐释弹药爆炸危害的主要形式、防护的基本原则与一般措施,旨在让读者概要了解本课程内容,储备必要的基本知识。

## 一、引言

为什么要学习“爆炸及其防护”这门课程?先让我们了解一个案例。

[案例 1-1]2012 年 4 月 19 日,某地组织销毁收缴的废旧弹药。利用河滩砂地,采用电力法炸毁。弹药品种多样、大小不一(见图 1-1);炸坑采用砂土掩埋,深达 3m,共 4 坑(见图 1-2);炸药为岩石炸药和乳化炸药,采用导爆管和电雷管串并联网络起爆。第一次起爆时,2 号坑和 3 号坑顺利起爆;间隔一定时间后,4 号



图 1-1 待炸毁弹药

坑重新起爆成功。1号坑因5根导爆索均已作用,无法再行起爆,在首次起爆间隔75min后清坑、排除“哑爆”时突然自爆,导致多人伤亡。是何原因在间隔一个多小时后还会自爆?答案待寻。



图1-2 炸坑

众所周知,相对于其他装备工作,弹药工作、特别是弹药销毁和修理工作,具有相对比较高的安全风险,因为弹药内含有能够发生爆炸的炸药;而弹药一旦发生意外爆炸,其后果往往比较严重。

那么,弹药工作,包括直接与弹药接触的弹药销毁和修理工作,是不是就充满危险、以致于没法干了?否!事实上,建国以来、特别是进入21世纪以来,在军队通用弹药保障系统发生的弹药事故数量很少,在军区弹药质量监控、修理销毁、储存保管机构发生的弹药爆炸事故数量更少,且这些事故中多数都是由于违章作业等人为因素所致,由于弹药自身原因而在正常作业条件下发生的事故极少。

这说明了什么?说明弹药工作虽然有一定的危险,但其事故是可以预防的。因此,在弹药工作中,必须树立科学的安全意识,一是始终存在安全风险,难以保证百分之百安全;二是必须切实加强安全防护,严防事故发生;三是弹药事故及其危害完全可以控制在可接受的范围内。

但是,如何预防?这正是我们这门课需要从理论上研究解决

的问题,也就是学习“爆炸及其防护”这门课程的目的,即通过系统学习弹药爆炸及其防护的基本概念、基本原理、主要结论和工程方法,培养解决弹药销毁与修理工作中弹药爆炸防护的工程实践能力,培育良好的安全意识和科学的技术作风。

本课程主要包括概述、爆炸力学基础、破片作用及其防护、冲击波作用及其防护、爆炸热效应危害与防护、废旧弹药炸毁事故案例分析共六章内容。

鉴于本课程概念多、公式推导多,理论性强,要求在本课程学习过程中,应当在理解概念的基础上,掌握重要公式的推导过程、尤其是重要物理量的数学表述及其物理含义;会根据数学表达式,分析相关的基本原理。总之,从方法论的角度,就是要学会将实际问题的物理过程用数学进行表述,又利用数学推导结果,解释物理过程,进而指导实际工作。

## 二、爆炸现象与类别

什么是爆炸?根据《中国大百科全书·力学》,“爆炸”是指“在较短时间内和较小的空间内,能量从一种形式向另一种形式或几种形式转化并伴随有强烈机械效应的过程”。《兵器工业科学技术辞典·火药与炸药》则定义“爆炸”为“在极短时间内发生能量转变或气体体积急剧膨胀的现象”。

措辞虽有不同,意思基本一致。总体上,“爆炸”是物质的一种非常急剧的物理、化学变化形式,在这种快速变化过程中,伴随有物质所含能量的快速释放和转变,即爆炸物质快速释放出的能量快速转变为该物质本身、变化后形成的物质以及周围介质的压缩能或运动能,导致周围介质的运动及其结构形态的变化或破坏。因此,爆炸的本质就是大量能量在有限的体积内突然释放或急剧转变。由于爆炸必然要导致周围介质的不寻常的移动、变形,必然使空气介质发生激烈振动,因此,爆炸的一个显著的外部特征是发生巨大的声响;同时,由于能量快速释放形成的高温物质的热辐射,以及周围介质的高速运动所产生的高温导致周围易燃物质的

燃烧热辐射,会产生强烈的火光。

爆炸类型主要有三种。一是物理爆炸(没有新物质产生、也没有质量变化的物理变化引起的爆炸,如:锅炉爆炸等),二是化学爆炸(原子或分子之间发生化学变化、伴随有新物质产生但没有质量变化的爆炸,如:瓦斯爆炸、炸药爆炸等),三是核爆炸(原子内部发生物理反应、伴随有新物质元素产生且有质量损失的爆炸,如能够发生核裂变的原子弹、核聚变的氢弹爆炸)。

本课程所关心的是炸药爆炸,有必要对炸药基本知识等进行简单回顾。

### 三、炸药的基本特征

《兵器工业科学技术辞典·火药与炸药》定义“炸药”为“在一定的外界能量作用下,能发生高速的化学反应,放出大量热,生成气体产物并对外界做功的化合物或混合物”。并进一步指出,“广义的炸药,包含起爆药、猛炸药、火药和焰火剂”,这个定义太过繁琐,且能否对外界做功与外界条件有关(如刚性容器内爆炸则无法对外界做功),不应作为炸药的限制性条件。有学者定义“炸药”为“是利用化学能发生爆炸的含能材料”,似乎又过于宽泛,根据爱因斯坦质能公式,实际上所有材料都是含能的,能量能否激发取决于外部激励的性质和强度。

我们理解,炸药是指在一定的外能激发下,能够发生化学爆炸的物质。

炸药一般具有下列特征:

(1) 高体积能量密度。所谓体积能量密度,是指单位体积炸药爆炸所释放出的能量。实际上,如以单位质量来考察,炸药爆炸所释放出的能量远不如某些普通燃料高,如1kg汽油-氧(按化学当量比组成)混合物,燃烧所释放的热量(10.03MJ)是1kg TNT爆炸所释放热量(定容爆热)的2.4倍,1kg标准煤燃烧释放的热量(29.31MJ)是TNT定容爆热的7倍多。但若以单位体积考虑,则 $1\text{m}^3$  TNT爆炸所释放热量是 $1\text{m}^3$ 汽油-氧混合物燃烧所释放的热

量的 370 倍,大多数炸药的体积能量密度为上述汽油 - 氧混合物的 130 ~ 600 倍。炸药的体积能量密度一般用炸药的密度与其定容爆热的乘积来表示,表 1-1 给出了几种军用炸药的有关数据。

表 1-1 几种军用炸药的体积能量密度

| 炸药                       | 密度 $\rho$<br>/( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) | 定容爆热 $Q_v$<br>/( $\text{MJ}/\text{kg}$ ) | 体积能量密度 $\rho Q_v$<br>/( $\text{MJ}/\text{m}^3$ ) |
|--------------------------|------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 梯恩梯/TNT                  | $1.65 \times 10^3$                       | 4.18                                     | $6.9 \times 10^3$                                |
| 太安/PETN                  | $1.78 \times 10^3$                       | 6.25                                     | $11.1 \times 10^3$                               |
| 黑索金/RDX                  | $1.79 \times 10^3$                       | 6.32                                     | $11.3 \times 10^3$                               |
| 奥克托今<br>/HMX( $\beta$ 型) | $1.91 \times 10^3$                       | 6.19                                     | $11.8 \times 10^3$                               |
| 汽油 - 氧混合物                | 1.86                                     | 10.03                                    | 18.65                                            |

(2) 自行活化。炸药在外部激发能量的作用下发生爆炸后,无需外界补充能量或物质,爆炸反应仍然可以以极高的速度自行维持,直至反应完毕。这种自行活化的原因主要是炸药本身含有爆炸变化所需的氧化组分和可燃组分,且爆炸时所放出的热量足以提供爆炸反应需要的活化能。但是,一旦这些条件不能满足,炸药的自行活化就不一定能维持,如:长细比过大的炸药柱,一端起爆后并不一定能传播到另一端;火箭发动机的推进剂点燃后,也有可能出现熄火问题。

(3) 自供氧。常用单质炸药的分子内或混合炸药的组分中,不仅含有可燃成分,而且含有氧化成分,在分子间或组分间即可进行化学反应。所以,即使与外界隔绝,炸药自身仍然可以发生氧化 - 还原反应、甚至燃烧或爆轰。

由于炸药具有上述自行活化和自供氧的特性,在炸药已经发生燃烧或爆轰的情况下,靠灭火器或雨淋装置等来扑灭燃烧或爆轰本身,基本上是一种不科学的想法或提法,妄论爆轰一旦发生根本来不及启动这些消防装置。单就燃烧而言,这些消防装置的真正作用也只是防止引起更大范围的火灾;当然,在燃烧尚未转变为

爆轰的不稳定阶段,这些消防装置如能及时启动且有效发挥作用,可以大量消耗热量,使燃烧反应无法维持而不能转变为爆轰。因此,应当正确认识弹药工间内灭火器和雨淋装置的作用。

(4) 亚稳态。炸药在热力学上属于相对稳定又不够稳定的所谓亚稳态物质。相对稳定表现在只有在足够的外部能量刺激下才能发生爆炸。某些工业炸药相当稳定,有时用雷管都难以引爆,需要通过雷管、传爆药等逐级放大后才能可靠引爆。此外,大部分炸药的热分解的速率很低,甚至低于某些化肥和农药。近代战争要求炸药具有低易损性和高安全性,那些不稳定的爆炸物是不能当作炸药使用的。炸药的这一特点,是我们做好弹药安全工作的重要前提和信心源泉。不够稳定表现在一旦外部刺激能量足够,炸药还是要发生化学变化的,否则,就不称其为炸药了。

## 四、炸药化学变化形式

炸药的化学变化有热分解和爆炸两种主要变化形式。

### (一) 热分解

在正常温度条件下,炸药通常以缓慢的速度进行化学分解,包括吸湿后的水解、受热后的分解即热解等。炸药分解一般会产生 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$ 、 $\text{CO}_2$ 等气体产物,难以察觉。但是,随着外部温湿度的提高,这种分解会加速,产生硝胺气味,甚至会发生自燃和自爆。

### (二) 爆炸

#### 1. 爆炸与热分解的区别

在足够的外能激发下,炸药会发生爆炸。炸药爆炸与热分解的主要区别在于:

(1) 热分解一般在整个炸药体内进行,而爆炸则是由起爆点开始,一层一层地、快速地自行传播;

(2) 热分解变化速度很小,爆炸变化速度很大。

#### 2. 爆炸三要素

炸药发生爆炸除了需要一定的外能激发之外,至少还需要具

有下列三个内在要素:

(1) 反应的放热性。吸热反应一般难以自动维持,只有放热反应才有可能发生爆炸。因此,炸药爆炸都伴随有高温爆炸产物的产生,炸药爆炸后的热量如果全部用于加热炸药爆炸产生的物质,温度(爆温)一般都在  $3000^{\circ}\text{C}$  以上。

(2) 反应的迅速性。TNT 的爆炸反应稳定传播速度即特性爆速可达  $7\text{km/s}$ ,RDX 的特性爆速可达  $8.2\text{km/s}$ (见图 1-3)。

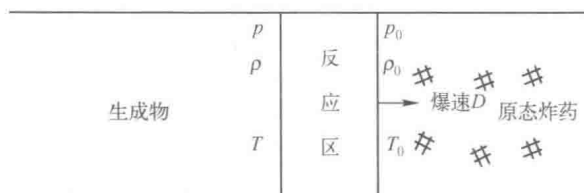


图 1-3 炸药爆炸反应传播示意图

(3) 生成大量气体。只有生成大量气体,在爆炸的高温、高速作用下,这些气体快速膨胀,才能对周围介质做功(抛出弹丸,炸坏弹体,破坏工事等)。没有气体,尽管有高温、高速,也没什么破坏作用。

### 3. 爆炸的两种形式及区别

炸药的爆炸可分为燃烧和爆轰两种形式,也有分为燃烧、爆燃和爆轰三种形式的,它们的主要区别见表 1-2。

表 1-2 炸药燃烧与爆轰的主要区别

| 爆炸形式                            | 燃 烧                                | 爆 轰            |
|---------------------------------|------------------------------------|----------------|
| 反应传播方式                          | 热传导,热辐射,气体流动                       | 爆轰波            |
| 反应传播速度                          | 较小,每秒几毫米到几米<br>(低于声速) <sup>①</sup> | 很大,每秒数千米(高于声速) |
| 对环境敏感程度                         | 易受环境特别是外界气压的影响                     | 几乎不受外界影响       |
| 对周围介质做功形式                       | 抛掷功为主                              | 破碎功、冲击波为主      |
| ① 反应传播速度达到每秒数百米(仍小于声速)时的燃烧称为爆燃。 |                                    |                |

炸药的热分解、燃烧和爆轰既相互区别,在一条件下又会相互转化。如:在高温条件下,热分解速度上升可能转化为燃烧或爆轰;在密闭或半密闭条件下,燃烧可以转化为爆轰;在外界刺激能量不足、非密闭条件下,细长、低密度的炸药的爆轰有可能自动停止(如:火箭发动机自动熄火)。爆炸多特指爆轰,而将燃烧单提。

## 五、弹药爆炸危害的主要形式

### (一) 弹药一般结构

如图 1-4 所示,弹药一般由战斗部和发射部两大部分组成。

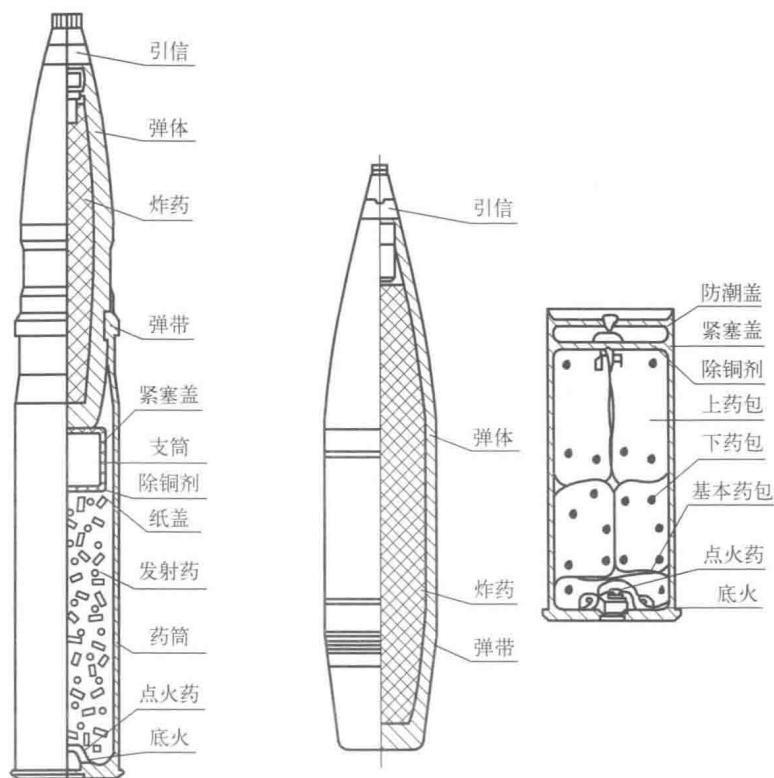


图 1-4 弹药一般构造

战斗部主要用于直接完成各种战斗任务,一般由引信和弹丸两大元件组成。引信的作用主要是保证弹丸在预定的位置(或时间)、以预定的方式起作用;弹丸内装炸药、燃烧剂、照明剂等装填物,在引信的控制下最终实现毁伤目标或其他作用。

发射部主要用于将战斗部推送到预定位置(在武器系统的配合下),一般由发射装药、药筒、底火(或点火具)等三大元件组成。发射装药的主要作用是为弹丸各种运动、包括某些引信解除保险所需要的各种运动提供能量;药筒的主要用途则是盛装并保护发射装药、连接底火等;底火(或点火具)的主要作用是将武器系统中发射用机械能(击针撞击)或电能转化为热能以点燃发射装药。

## (二) 弹药爆炸一般过程

以榴弹爆炸为例。当弹丸装药在引信或其他外部载荷作用下,上层炸药首先起爆。爆炸在炸药内部逐层传播,称为爆轰波。爆炸过程中,炸药本身发生剧烈的化学反应,产生高温、高压气体,称为爆轰产物;爆轰波和爆轰产物作用到弹体或其他与炸药直接接触的物体(如:烧毁炉体、夹具等),对弹体或炉体等起炸碎作用,产生高温、高速破片,破片可对人员、装备起杀伤作用;弹体碎裂后,爆轰产物要对周围空气、土壤等产生强烈压缩,在空气等介质中形成高温、高压的冲击波,冲击波的压力和持续时间随着距离的增加急剧下降。冲击波可以对人员、装备、建筑等起杀伤、燃烧等破坏作用。与炸药直接接触的土壤等密度较高的周围介质,在爆轰波和爆轰产物的作用下被压碎,进而带动与其接触的更多的周围介质被抛出,形成炸坑等爆破作用。如果爆炸点附近还有其他炸药等,这些炸药在破片撞击、空气冲击波的作用下有可能发生新的爆炸,即所谓殉爆,则爆炸作用有可能进一步增强。

应该强调的是,在弹药销毁与修理工作中,不仅仅是弹药爆炸存在上述作用过程,所有存有或附着有火炸药和其他易燃易爆物质的物体,都有可能产生(或部分产生)类似过程。有工厂曾因用焊割方法截断内壁附着有残留炸药的排水钢管、用不适当的工具