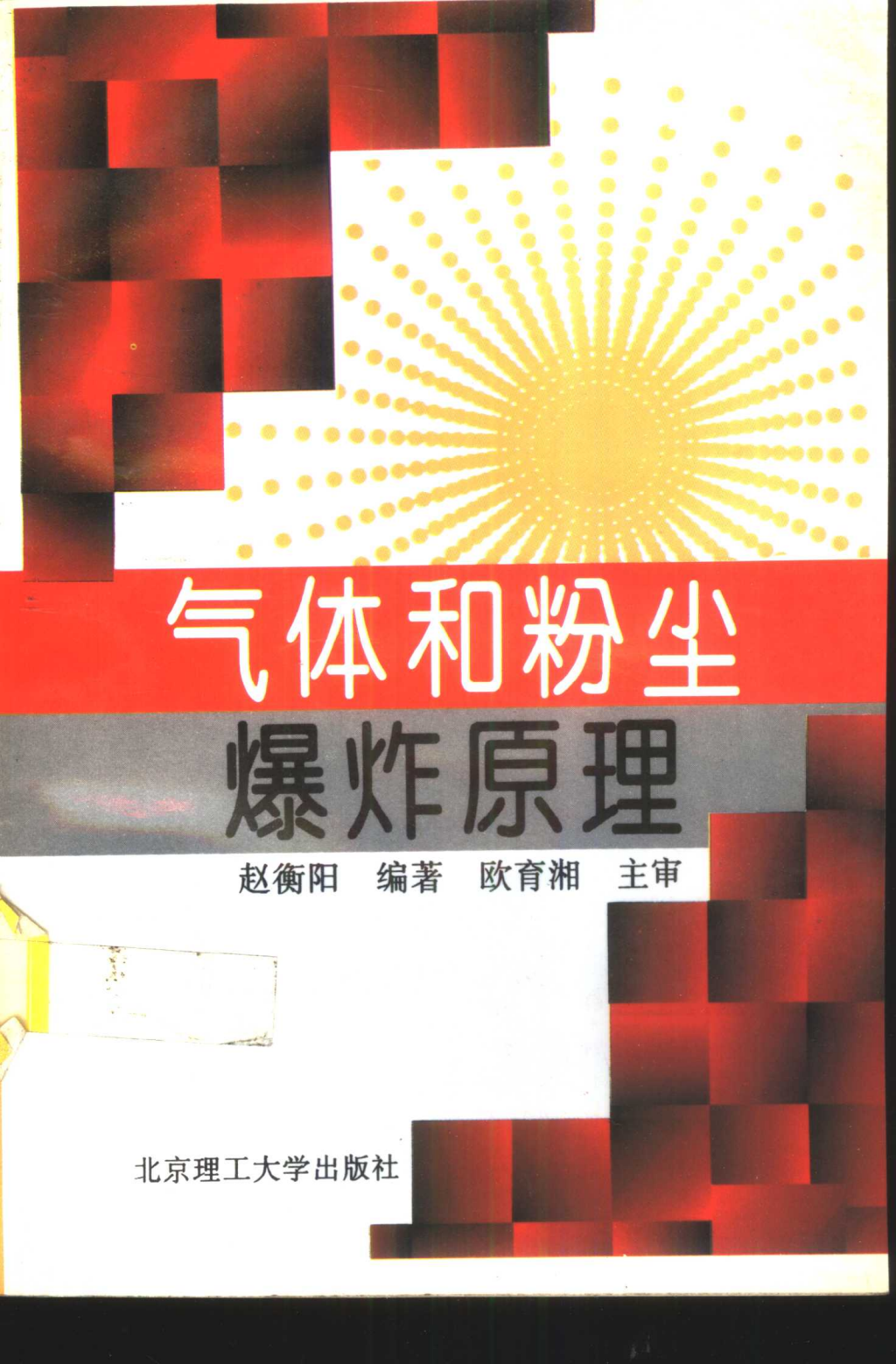




# 气体和粉尘 爆炸原理

赵衡阳 编著 欧育湘 主审

北京理工大学出版社

# 气体和粉尘爆炸原理

赵衡阳 编著

欧育湘 主审

北京理工大学出版社

## 内 容 简 介

本书比较系统地介绍了与气体和粉尘爆炸发生、发展及控制方面有关的基础知识、基本理论、基本参数的测量方法以及对气体和粉尘爆炸事故的预防和防护措施。书中特别对泄压防爆设计原理作了详细分析,讨论了密闭容器、无约束泄压容器和有约束泄压容器中燃料-空气爆炸发展的各种模型及设计计算方法。

本书可作为大专院校安全工程或爆炸理论等相关专业的教材,也可供与防火防爆有关的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

气体和粉尘爆炸原理/赵衡阳编著. -北京:北京理工大学出版社,1996

ISBN 7-81045-079-4

I. 气… II. 赵… III. ① 气体爆炸-高等学校-教材  
② 粉尘爆炸-高等学校-教材 IV. ①038②TD714

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 22128 号

北京理工大学出版社出版发行

(北京市海淀区白石桥路 7 号)

(邮政编码 100081)

各地新华书店经售

北京地质印刷厂印刷

\*

787×1092 毫米 32 开本 11 印张 242 千字

1996 年 2 月第一版 1996 年 2 月第一次印刷

印数:1-2000 册 定价:8.65 元

※图书印装有误,可随时与我社退换※

# 前 言

随着我国工业现代化的高速发展,特别是近年来石油、天然气和粮食、饲料储运、加工的高度现代化发展,重大危险源的燃烧爆炸事故屡有发生,严重威胁着工业生产、交通运输、物资储运的安全,工农业生产的安全性问题愈来愈引人关注。在煤炭、石油化工、粮食加工、纺织、冶金及军工行业中,频繁的工业爆炸事故常常困扰着安全工程师们和社会各界。

在工业爆炸事故中,气体和粉尘爆炸事故占很大的比例。这种燃料和空气混合形成的爆炸源,在工业生产中到处可见,而且工业生产的规模愈大,爆炸的危险性也愈大。我国在 80 年代发生过许多这类重大爆炸事故,包括 1981 年黄埔港进口粮食大型储仓(圆筒仓)大爆炸,1987 年哈尔滨亚麻厂亚麻粉尘大爆炸;1989 年黄岛油库雷击爆炸等。这些爆炸事故都造成了巨大的破坏。

气体和粉尘恶性爆炸事故的频繁发生,已引起了人们的高度重视。由于过去对这种类型的爆炸接触较少,对其发生、发展及其破坏效应等知识缺乏了解,许多人至今还对纺织厂和面粉厂发生爆炸难以想象,因为他们不认为棉花和面粉是爆炸物。即使是安全技术人员,对这一类爆炸事故也比较陌生,一旦出现事故也难以采取有效的处理方法。近来在大专院校安全工程专业开始开设防火防爆方面的课程,但大多属于管理型和经验总结的一些基础知识,缺少对这类爆炸的发生、

发展及效应方面系统和全面的论述,本书正是适应这种需求而编写的。目的是为读者介绍气体爆炸和粉尘爆炸的基本现象、基本理论和基本试验测试方法以及预防和防护的基本方法。

由于气体和粉尘爆炸是一种快速的、非定常的、带化学反应的、受众多物理因素影响的流体力学过程,它比稳态的燃烧或爆轰更复杂,至今,无论在理论上还是实验技术上都没有达到成熟的阶段,有待进一步的研究和发展,加上作者水平有限,编写仓促,在材料选择、编写的系统性和连贯性以及对所理解等方面,均存在很多问题,因此本书不可避免地会有许多缺点和错误,真诚希望读者批评指正。

**赵衡阳**

一九九五年五月

# 目 录

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| <b>第一章 绪 论</b> .....            | ( 1 ) |
| § 1.1 爆炸灾害的基本形式及特点 .....        | ( 2 ) |
| § 1.2 气体和粉尘燃烧爆炸的基本模式 .....      | (13)  |
| § 1.3 气体和粉尘爆炸的特点 .....          | (15)  |
| <b>第二章 气体和粉尘爆炸基础知识</b> .....    | (23)  |
| § 2.1 气体爆炸基础知识 .....            | (23)  |
| § 2.2 粉尘爆炸基础知识 .....            | (45)  |
| <b>第三章 气体的爆燃和爆轰</b> .....       | (72)  |
| § 3.1 气体的爆燃 .....               | (75)  |
| § 3.2 爆燃波和爆轰波的 Hugoniot 线 ..... | (80)  |
| § 3.3 CJ 爆轰和 CJ 爆燃 .....        | (83)  |
| § 3.4 CJ 爆轰参数的近似解 .....         | (89)  |
| <b>第四章 气体和粉尘爆炸热化学</b> .....     | (93)  |
| § 4.1 化学热力学和动力学的基本概念 .....      | (93)  |
| § 4.2 爆炸产物平衡组分的计算 .....         | (101) |
| § 4.3 爆炸热效应计算 .....             | (110) |
| § 4.4 爆温的计算 .....               | (112) |
| <b>第五章 气体和粉尘的点火</b> .....       | (118) |
| § 5.1 气体的热点火理论 .....            | (119) |
| § 5.2 粉尘云点火理论 .....             | (123) |
| § 5.3 层状粉尘的点火 .....             | (126) |
| § 5.4 粉尘云的点火 .....              | (130) |
| § 5.5 粉尘层的点火 .....              | (152) |

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| <b>第六章 密闭容器中的爆炸发展</b> .....     | (161) |
| § 6.1 等温爆炸模型 .....              | (162) |
| § 6.2 绝热爆炸模型 .....              | (170) |
| § 6.3 一般模型 .....                | (172) |
| § 6.4 理论和实验结果比较分析 .....         | (179) |
| <b>第七章 无约束泄压容器中爆炸的发展</b> .....  | (186) |
| § 7.1 气体通过泄压口的流动 .....          | (186) |
| § 7.2 无约束泄压容器中的爆炸发展 .....       | (196) |
| § 7.3 泄压爆炸压力发展的精确解(李克山模型) ..... | (207) |
| § 7.4 Runces 公式 .....           | (220) |
| <b>第八章 有约束泄压容器中的爆炸发展</b> .....  | (230) |
| § 8.1 泄压封口 .....                | (230) |
| § 8.2 有膜片封口的泄压方程 .....          | (235) |
| <b>第九章 气体和粉尘的爆燃转爆轰</b> .....    | (249) |
| § 9.1 概论 .....                  | (249) |
| § 9.2 火焰加速机理 .....              | (256) |
| § 9.3 爆轰的形成 .....               | (261) |
| <b>第十章 气体和粉尘爆炸所形成的爆炸波</b> ..... | (264) |
| § 10.1 引言 .....                 | (264) |
| § 10.2 爆炸波的结构和破坏机理 .....        | (265) |
| § 10.3 描述空气爆炸波的理论方法 .....       | (271) |
| § 10.4 爆炸波理论与实验研究结果 .....       | (285) |
| § 10.5 爆燃模型 .....               | (291) |
| § 10.6 爆炸波破坏准则 .....            | (293) |
| § 10.7 计算实例 .....               | (297) |
| <b>第十一章 爆炸预防和防护</b> .....       | (300) |
| § 11.1 爆炸预防 .....               | (300) |
| § 11.2 爆炸防护 .....               | (313) |
| <b>附录</b> .....                 | (326) |
| 附录 A 爆炸性气体、蒸汽特性表 .....          | (326) |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| 附录 B 易燃易爆粉尘和易燃纤维特性表 ..... | (334) |
| 参考文献 .....                | (340) |



# 第一章 绪 论

爆炸是能量快速释放的过程,因此它是一种高能量密度的能源,在工业上得到了广泛的应用。爆炸常分为物理爆炸和化学爆炸,前者是指爆炸过程中只发生物理状态变化的爆炸,如锅炉爆炸、雷电、地震、高速碰撞等。后者是指爆炸过程中既有物理变化,又有化学变化的爆炸,如炸药爆炸、瓦斯爆炸、粉尘爆炸等。本书所涉及的是气体和粉尘爆炸,它在本质上是可燃气体或可燃粉尘与空气或氧的快速氧化反应,属于化学爆炸。

气体和粉尘爆炸是工业爆炸灾害的重要形式。在实际生产过程中,有很多情况能使气体、液体或粉尘燃料与空气混合,达到可燃浓度,此时若有点火源存在,就能酿成燃烧、爆炸灾害。

常见工业爆炸灾害很多,如气体或液体燃料管道破裂和液化天然气(LNG)储罐、油料储罐、油罐槽车泄漏引起的燃烧爆炸事故;煤矿瓦斯和煤粉爆炸;粮食、饲料、油脂、食品等农产品粉尘的爆炸;冶金系统金属、合金粉尘的爆炸;以至为军事目的的燃料空气分散体系的爆炸等等。如果这种分散系统全由气体组成,则称为均匀相系统,如果燃料以液滴或固体粒子形式存在,则称为非均匀相系统。这种在无限大空间中的分散系统均称为无约束分散系统,因为这种燃料和空气的混合物没有固壁容器包围和限制。与其相反,象煤矿井下坑道中瓦斯或煤粉、粮食提升机中粮食粉尘分散系统等属于有约束

分散系统,因为它们是在矿井或提升机那样特别的固壁约束条件下的分散体系。

工业爆炸灾害中,气体和粉尘爆炸各有其特点和规律,但也有其共性。从安全防爆技术角度来看,必须探索和总结这些特点和规律,分析研究爆炸的引发、形成、扩展和效应的全过程,这样才能有针对性地去预防、抑制、消除这类爆炸,设计制定各种科学而有效的防爆措施,以达到安全生产的目的。

## § 1.1 爆炸灾害的基本形式及特点

### 1.1.1 凝聚相含能材料的爆炸

这是一种人们最为熟悉的爆炸形式,火药、炸药爆炸均属此类。火、炸药在军事、民用上广泛应用是人所共知的,在正常情况下,含能材料按我们所规定的要求,作为一种高能量密度的能源为人类服务;但在某些意外情况下,它们也会酿成危险的事故。历史上,这种事故不胜枚举。象 1947 年 4 月 16 日在美国得克萨斯城的两艘硝酸铵货轮,因吸烟引起燃烧转爆炸<sup>[1]</sup>。在这次灾祸中,有 600 人丧生,损失六千多万美元,岸上一家巨型聚苯乙烯工厂被炸毁。

凝聚相含能材料的爆炸特点是高能量密度,爆炸破坏的主要形式为空气冲击波,所产生的空气冲击波(爆炸波)初始压力为 50MPa 量级,其破坏作用范围可达 50 倍对比距离以上。对比距离  $\bar{R}$  定义为离爆心距离  $R$  与炸药量的  $1/3$  次方的比值,即

$$\bar{R} = \frac{R}{\sqrt[3]{w}} \quad (1.1)$$

1kg TNT(梯恩梯)的破坏作用距离可达 50m 量级,1 吨 TNT 的破坏距离则可达 500m 量级。

炸药爆炸破坏的另一种形式为破片飞散破坏作用。一般有包装的炸药爆炸时,可以产生强烈的破片杀伤作用,军用弹药爆炸就是基于这个原理,但破片的作用范围远小于空气冲击波的作用范围。破片飞散破坏效应也包括冲击波远距离作用产生的二次破片效应,例如玻璃破碎引起的伤害效应,或冲击波使建筑物塌陷所引起的碎片破坏效应。爆炸破坏最强烈,但破坏范围最小的是爆炸直接作用区,这是由于爆炸产物的超高压破坏作用,这种作用距离大约只有装药半径的 5~10 倍。

凝聚相含能材料在起爆后极短时间(微秒量级)内即发展成爆炸的最高形式——爆轰,这是一种定常的稳态流动过程。爆轰过程中的各种参数既可较精确地计算出来,也可通过实验来测量,这方面的研究比较成熟。

对凝聚相含能材料爆炸所产生的空气冲击波(爆炸波),一般在理论上被简化成一种理想点源爆炸,可以用相似理论或点源爆炸理论计算爆炸作用场。工业建筑设计规范中对危险物品生产、储存、运输中规定的安全距离,都是由利用这些理论计算出的结果和不同规模的爆炸破坏模拟试验数据确定的。

### 1.1.2 密闭容器中可燃气体、蒸气或粉尘与空气或氧混合物的爆炸

一般人对凝聚相含能材料,如火炸药的危险性容易理解,但往往忽视气体和粉尘爆炸的潜在危险性,对亚麻、面粉、厨房用天然气等几乎天天接触的可燃物的爆炸危险性和爆炸后

果缺少认识。实际上,无论是从爆炸的危险性,还是从爆炸的破坏效应(后果)来说,这类可燃物均要超过凝聚相含能材料。在工业上,它们引起的爆炸事故的频度远远超过由凝聚相含能材料引起的事故频度。欧共体保险公司的统计资料指出,平均每一工作日即发生一起气体或粉尘爆炸事故。我国自哈尔滨亚麻厂粉尘爆炸事故发生以来,开始重视对此类爆炸事故的防护。在粮食储运加工中,粉尘爆炸的危险性也非常突出,1981年黄埔港粮食筒仓大爆炸,造成巨大经济损失和心理负面影响。北京市粮食系统在1973~1987年期间就发生过七次粉尘爆炸事故。可燃气体、蒸气爆炸事故也屡有发生,据不完全统计,全国工交系统截止1985年已发生油气爆炸恶性事故95起。随着天然气进入居民家庭,天然气泄漏引起的燃烧爆炸事故更是层出不穷。储油罐、储气罐爆炸亦屡见不鲜,如1989年的黄岛油库雷击燃烧爆炸。另外,象煤矿瓦斯突然大量涌出引起爆炸事故等方面也都有非常惨痛的教训。

气体和粉尘爆炸是一种非点源爆炸,与凝聚炸药爆炸有很大的区别,这类爆炸强烈地取决于环境条件。例如,密闭容器中气体爆炸和敞开蒸气云爆炸可以有全然不同的爆炸形式和破坏作用。常见碳氢化合物气体和空气混合点火后,敞开层流燃烧速率仅为 $0.5\text{m/s}$ 左右,但在密闭容器中火焰速度能达到每秒几米至几十米,容器中压力最终能达 $0.7\sim 0.8\text{MPa}$ 。在最危险的条件下,密闭容器中的混合物还能从燃烧转向爆轰,其爆轰阵面速度可达 $2\sim 3\text{km/s}$ ,压力可达 $1.5\sim 2\text{MPa}$ ,产生极严重的破坏作用。在有些情况下,这种非理想爆炸可以经历燃烧、爆燃到爆轰的全过程,火焰速度和爆炸压力等参量可以跨越4~6个数量级。这种非理想爆炸过程的复杂性给研究和控制带来了许多困难,科学工作者们不得不分

门别类地研究这类爆炸。

根据爆炸事故特点,一般可以归纳为以下几种典型情况。

### 1. 燃料蒸气爆炸

当燃料油漏入某一容器内时,便与空气混合形成可燃性混合物。这种混合物一接触到适当的点火源,就会发生有约束爆炸事故。

对油船或储罐的爆炸,这时燃料上方油气挥发空间处在爆炸极限范围内,遇到适当的火源就会引起爆炸。密闭容器中的爆炸有两种性质不同的极端情况。

(1) 纯超压爆炸。实际上这是爆燃的一种形式。一般对长径比  $L/D$  约为 1 的封闭体,如内部没有紧密排列的设备和隔板等障碍物,则该封闭体内通常只受到单纯超压爆炸的破坏。在这种情况下,压力上升速率相对较慢,因为在着火后,火焰以爆燃形式扩展。尽管这种爆炸产生的冲击波相当弱,但往往也能引起封闭体(如厂房、建筑物)的大范围破坏。因为对一般的建筑物、船舱或锅炉在典型的低超压( $7\sim 70\text{kPa}$ )作用下,就有可能发生开裂破坏。这类爆炸的外部爆炸波效应比较小,是一种低能量密度的爆炸源。

(2) 爆燃转爆轰型的爆炸。在长径比  $L/D$  较大( $L/D \gg 5$ )且内部有较密集的隔板和设备等障碍物的密封体内,点火后,火焰的传播会引起火焰前面气体运动,这种气体运动能在障碍物处产生大尺寸的湍流。这种湍流可引起有效火焰面积的迅速扩大,扩大的火焰又会引起压力更快升高和湍流火焰的进一步相互作用。这个过程可以导致封闭体内某些局部气相爆轰,这些局部点的压力会突然升高,可达  $1.5\text{MPa}$  左右,这就可能造成局部性的严重破坏,且这种局部破坏往往发生在离爆点较远处。这类爆炸(爆轰)通常能产生强冲击波和高

速破片,因而对外部环境的破坏比单纯超压爆炸要大。

没有按防爆结构设计的密闭容器,如果充满了可燃蒸气或气体,一旦遇火源就会爆炸。用煤气、天然气或燃料油作燃料的工业炉或锅炉的爆炸事故,基本上都是属于纯超压爆炸。大多数油船的爆炸都是发生在具有低长径比的空间(船舱)内,也属于纯超压爆炸,极个别的情况下也能转成爆轰。如曾有一已经装舱的油船,海面风力很小,从船舱内泄出的可燃蒸气在甲板上形成可燃蒸气云,被火源所点燃,产生的火焰窜进油舱,使爆燃转向爆轰,产生特别严重的破坏,整个船舱甲板和船中部的舱面房间被抛向空中高达 250m, 4km 远的玻璃窗都被震碎, 2km 范围内的房屋都遭到不同程度的破坏。

许多油船或超级油船的爆炸是由静电火花点燃的,而静电火花可由高压水喷射洗舱时产生。商业建筑物、居民住宅区和粮库地下运粮通道等发生爆炸时,往往产生波的传播和火焰在密闭通道中的加速,从而使爆燃转向爆轰,以致事故迅速扩大,波及范围极广,破坏力极强。

## 2. 粉尘爆炸

密闭体内的粉尘爆炸也可能造成相当大的危害。<sup>1</sup>与某些普通的固有观念相反,实际上所有的有机粉尘,还有某些无机物或金属粉尘,在空气中都是可燃的,在密闭体内则能够爆炸。但要使粉尘云成为可爆物,粉尘浓度必须相当高,达到约  $100\text{g}/\text{m}^3$  量级,即远远高于通常环保允许浓度 ( $0.015\text{g}/\text{m}^3$ )。这种粉尘浓度相当于能见距离的数量级为 0.2m 左右,基本上是不透光的。除了在管道内或工艺设备内,一般工作场所在正常条件下很少能达到这种浓度。

粉尘爆炸事故往往是在某个设备内发生小爆炸,然后引起设备爆裂,从而将燃烧的粉尘喷入工作场所。如果工作场所

有堆积层状粉尘,那么“一次爆炸”引起的气体运动和设备振动会使装置上的粉尘层成为空降物,这些粉尘就是灾难性的“二次爆炸”的燃料。“二次爆炸”通过工作场所传播时就造成很大的破坏。有一种情况是一堆粉尘发生较小的着火,这或是由于自发燃烧引起的,或是由于粉尘落在热物体表面上(例如电机外壳或灯头上)引起的。如果此时用化学灭火器或水龙头灭火,会搅起一大片粉尘云。由于它的一部分已经燃烧,所以最终会引起爆炸。

象气体或蒸气爆炸那样,密闭体内粉尘爆炸也呈现两种不同的极端情况。一种是具有低长径比的密闭体内的定容爆炸,它将引起密闭体的单纯超压爆破;另一种是在具有大长径比的结构中发生火焰加速,致使火焰的有效传播速度很高,甚至转变到爆轰速度,从而造成严重的破坏。而且,在这种情况下产生的破片能被抛射到较远的距离,外部冲击波相当强。

密闭体内的粉尘爆炸现象比蒸气或气体爆炸具有更悠久的历史,这是由于气体和蒸气直到近代才广泛当作燃料使用,而在锅炉房、化学工业和制药工业生产车间、煤矿、谷物仓库、食品厂、面粉厂等场所,早就发生过粉尘爆炸。

煤矿爆炸事故从工业革命开始即一直常有发生,大多数工业化国家都对煤矿爆炸进行过广泛的试验研究。采煤过程中,由于工作场地总是积有煤尘,而煤尘爆炸可沿矿井传播很长的距离,瓦斯(甲烷)的释放和被点火,通常都会激发爆燃。美国 1901~1930 年间由于煤矿爆炸死亡的人数平均每年 330 人,1931~1955 年间平均每年 117 人。

在谷物储仓和各式各样的粉尘工业中,粉尘爆炸长期以来都是一个大问题。一般都是一次爆炸搅起粉尘层,随后引起灾难性的二次爆炸。美国每年大约发生 30 至 40 起谷物储仓

爆炸。

化学工业和制药工业中的粉尘爆炸,通常都发生在工艺设备内,因为这类产品一般都很昂贵,因而对粉尘的控制是相当完善的。不过,如果设备不加防护,也有可能造成重大破坏。

### 1.1.3 无约束蒸气云爆炸

大量可燃气泄漏到大气中,与空气混合达到极限浓度时,遇火源即可发生爆炸。此时一般产生一个火球并向外扩展,但在有些情况下也可以形成破坏性的爆炸波,这取决于局部的约束条件。由于局部的约束(障碍物等),引起局部湍流和漩涡,使火焰与火焰相互作用,造成很高的体积燃烧速率,甚至转变为爆轰。强冲击波点火能使蒸气云的爆燃转为爆轰,用高能炸药也可直接激起蒸气云的爆轰,军事上就是利用这种原理,制成“燃料空气炸弹”。将液化燃料装在弹体内,先用几个小药包的爆炸来分散燃料,使液滴撒播在空中,与空气混合成可燃混合物。然后,再用强起爆源起爆,使分散在空间的蒸气云激起爆轰,产生比高级炸药更大面积的杀伤作用。

在一些综合性化工企业中,油气储存、运输过程和远距离输油管道输油过程中,都有可能产生可燃气体的泄漏。可燃气体一旦发生了泄漏,随后就可能发生下面四种情况:

(1) 泄漏的可燃气体在没有着火之前就消散掉,不形成爆炸危险性;

(2) 泄漏的可燃气体在泄放口上高速喷射、磨擦或静电点火。在这种情况下,一般只引起着火而不爆炸;

(3) 泄漏物扩散到广阔的区域,经过一段延滞时间后,可燃蒸气云被点燃,接着发生一场大火灾;

(4) 火焰经过较长距离的传播而加速,使爆燃向爆轰转



变,产生危险的爆炸冲击波。

无约束蒸气云可以扩展到很大范围,因此是很危险的。由于泄漏物进入开放的空气中,遇到适宜的气象条件,发火之前就能产生大面积的可燃蒸气与空气混合形成的云团。1974年6月英格兰的弗里克斯保洛夫附近的一个化学工厂就发生了一起大规模的无约束蒸气云爆炸事故。由于一段直径为0.5m的临时连结管道断裂,引起压力为850kPa和温度为155℃的近45t环己烷泄漏,泄出的燃料急剧蒸发,形成大范围的可燃蒸气云层笼罩着厂区,被离泄漏点相当远的氢气工厂的燃烧炉引燃。开始火焰比较平稳,接着火焰加速,最终发生了爆炸,产生的冲击波对工厂和民房的破坏范围远达一英里以外。事故使28人丧生,89人受伤,造成直接经济损失约1亿美元。

无约束蒸气云爆轰的情况也时有发生,1970年在美国密苏里州的富兰克林县的丙烷蒸气云爆轰就是一例。在这次事故中,一条地下管道爆裂,管道中以7MPa压力输送的丙烷逸出,在管道上方形成“喷泉”,并与空气混合成燃料空气混合物。此混合物随风流动,开始充满大片山谷凹地,蒸气云的厚度达到大约6m。在凹地另一端的泵房——一个强点火源作用下,蒸气云的爆轰被直接触发。爆轰后紧接着形成一个大火球。由于燃料空气混合物中燃料含量太高,所以不能继续爆轰。这次事故的TNT当量大约为燃料完全燃烧时TNT当量的7.5%。在另一次丙烯罐车泄漏造成的燃料空气云爆炸的能量释放率仅为0.2%。根据不太成熟的经验,如要预估无约束蒸气云爆炸的破坏趋势,可按爆源总能量(燃料完全燃烧所放出的热)的0.1~10%来估算TNT当量。