



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 气体和粉尘 爆炸防治工程学

毕明树 李刚 陈先锋 杨国刚 编著



化学工业出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

# 气体和粉尘 爆炸防治工程学

毕明树 李刚 陈先锋 杨国刚 编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要介绍气体和粉尘爆炸防治方面的基本知识与最新研究成果。全书分绪论、基本概念、可燃气体与蒸气的爆炸极限、密闭空间内可燃气体的爆炸强度、开敞空间可燃气体云的爆炸强度、粉尘的爆炸强度、爆炸灾害的防护与控制原理及应用、密闭空间内爆炸的安全泄放原理及应用、可燃气体和粉尘燃烧爆炸过程的数值计算等9章,另有附录。每章开头有内容提要 and 基本要求,结尾有小结,还配备了思考题或习题。

本书仍保持了第1版的特色和体系,注重对基本概念和基本参数或方程的理解和运用,强化对学生分析和解决工程实际问题的能力的培养,增强科学性、启发性和教学适用性,激发学生的科技创新兴趣。

本书可作为安全工程专业教材,也可供从事气体和粉尘爆炸防治理论与技术方面研究的学者或工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

气体和粉尘爆炸防治工程学/毕明树等编著. —2版.

北京:化学工业出版社,2017.5

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-122-29153-0

I. ①气… II. ①毕… III. ①气体爆炸-防治-高等学校-教材②粉尘爆炸-防治-高等学校-教材 IV. ①X932  
②TD714

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第035660号

---

责任编辑:程树珍

装帧设计:韩飞

责任校对:吴静

---

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张11 $\frac{3}{4}$  字数288千字 2017年6月北京第2版第1次印刷

---

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网址:<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

---

定 价:49.00元

版权所有 违者必究

# 前 言

本书第1版自出版以来受到了有关教师和学生的好评,获批“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材,荣获了中国石油和化学工业优秀出版物二等奖。

在总结近年来教学研究与科研成果并收集本书使用者意见和建议的基础上,编者提出了本次教材修订方案。根据气体和粉尘爆炸相关研究进展,本次修订增加了“可燃气体和粉尘燃烧爆炸过程的数值计算”一章,主要介绍数值模拟方法、可燃气体燃烧数值模型、煤粉燃烧数值模型、模拟案例等。通过这章的学习,可以基本掌握气体和粉尘爆炸过程的一般方法。本次还对“粉尘爆炸的强度”一章进行了大量修改,删除了如今很少使用的Hartmann测试装置,对目前最新的测试方法进行了更详细的介绍。

全书共分9章。绪论,概要介绍背景知识、事故划分及防治对策等;第1章基本概念,主要介绍燃烧与爆炸的基本概念,讨论爆炸发生的条件,分析各类爆炸的基本特性及其影响因素;第2章可燃气体与蒸气的爆炸极限,重点介绍爆炸极限相关概念及计算方法,分析影响爆炸极限的主要因素;第3章密闭空间内可燃气体的爆炸强度,主要介绍等温爆炸模型、绝热爆炸模型、几何微元计算方法和实验测试方法,阐述影响爆炸强度的因素和规律;第4章开敞空间可燃气体云的爆炸强度,介绍影响气云爆炸强度的主要因素、预测方法、实验方法等;第5章粉尘的爆炸强度,介绍粉尘爆炸的特点、粉尘爆炸发生条件、影响粉尘爆炸极限和爆炸强度的因素以及粉尘爆炸参数的测试方法等;第6章爆炸灾害的防护与控制原理及应用,主要阐述爆炸灾害的防护与控制原理,介绍一些典型的抑爆和隔爆原理、方法与技术;第7章密闭空间内爆炸的安全泄放原理与应用,主要介绍安全泄放技术的基本概念和基本原理,给出泄放面积的设计方法,分析了安全阀、爆破片、防爆门(阀)的基本特点和选型依据;第8章可燃气体和粉尘燃烧爆炸过程的数值计算,主要介绍数值模拟的一般方法、可燃气体燃烧与爆炸数值模型、煤粉燃烧与爆炸数值模型、模拟案例等。另有附录。每章开头有内容提要 and 基本要求,结尾有小结,还配备了思考题或习题。

本书引用了很多文献资料中介绍的研究成果,已尽力在参考文献中列出,在此对各位作者表示诚挚的谢意。

本书仍保持了第1版的特色和体系,注重对基本概念和基本参数或方程的理解和运用,强化对学生分析和解决工程实际问题的能力的培养,增强科学性、启发性和教学适用性,激发学生的科技创新兴趣。

本书由大连理工大学毕明树教授、东北大学李刚教授、武汉理工大学陈先锋教授和大连海事大学杨国刚教授编写。绪论、第1、第2、第6、第7章由毕明树执笔编写,第5章由李刚编写,第8章由陈先锋编写,第3、第4章由毕明树和杨国刚共同执笔编写。

鉴于作者水平有限,因此本书在材料的选取与把握,内容的安排,语言的叙述等方面,均会存在这样那样的不足,衷心希望读者批评指正。

编 者

2017年1月

# 第 1 版前言

近年来,我国工业一直保持着快速、稳定地增长,为国民经济的发展和人民生活水平的提高做出了很大贡献。与此同时,工业企业各类事故,尤其是危害较大的工业介质爆炸事故,虽然采取种种预防措施,但还是时有发生。工业生产安全问题已成为全社会关注的热点。

所谓可燃介质爆炸,是导致压力快速上升的现象,是一种极其迅速的物理或化学能量的释放过程。在此过程中,物系的体积在极短时间内急剧膨胀而对外界做功,致使周围气压急剧增大并会造成人员伤亡和财产损失。爆炸一直是学术界关注的课题。这方面的研究工作可分为两方面。一方面用于军事领域,主要研究凝聚相炸药和燃料-空气炸药(fuel-air explosive,简称FAE)的爆炸威力,开发先进武器。另一方面用于工业防爆,主要研究可燃气体和粉尘的爆炸威力,以便有针对性地提出防爆措施。可引起爆炸事故的工业介质主要是可燃气体或易蒸发的可燃液体,以及可燃粉尘等。

国内很多院校都设立了安全工程本科专业,迫切需要能系统介绍工业介质爆炸相关知识的教材,让学生掌握工业介质爆炸的相关基础知识、气体与粉尘爆炸的特点、气体与粉尘爆炸的研究方法及进展、目前通常采用的防爆、抑爆措施等。本书就是在此背景下组织编写的。

气体与粉尘爆炸是非常复杂的物理、化学过程。经过几十年的发展,虽然人们对爆炸的发生、发展规律有一定的了解,但也有很多复杂问题没有解决,例如化学反应动力学问题、燃烧模型问题、湍流模型问题等。即使是现有的研究方法,也是处于不断发展之中的。本书主要介绍气体和粉尘爆炸防治方面的基本知识与最新研究成果。全书分绪论、基本概念、可燃气体与蒸气的爆炸极限、密闭空间内可燃气体的爆炸强度、开敞空间可燃气体云的爆炸强度、粉尘的爆炸强度、爆炸灾害的防护与控制原理及应用、密闭空间内爆炸的安全泄放原理与应用 8 章,另有附录。每章开头有内容提要 and 基本要求,结尾有小结,还配备了思考题或习题。

本书引用了很多文献资料中介绍的研究成果,已尽力在参考文献中列出,在此对各位作者表示诚挚的谢意。

本书由大连理工大学毕明树教授和大连海事大学杨国刚副教授编写。绪论、第 1、第 2、第 5~第 7 章由毕明树执笔编写,第 3、第 4 章由毕明树和杨国刚共同执笔编写。

鉴于作者水平有限,因此本书在材料的选取与把握,内容的安排,语言的叙述等方面,均会存在这样那样的问题,衷心希望读者批评指正。

编著者

2012.3

# 目 录

0 绪论 .....	1	思考题 .....	23
0.1 工业生产与安全 .....	1	习题 .....	23
0.2 工业生产中的爆炸事故 .....	1	2 可燃气体与蒸气的爆炸极限 .....	25
0.3 生产中爆炸形式的分类 .....	3	2.1 爆炸极限理论 .....	25
0.3.1 可燃气体和可燃液体蒸气的爆炸 .....	3	2.2 爆炸极限的影响因素 .....	27
0.3.2 可燃固体粉尘与空气混合物的爆炸 .....	4	2.2.1 可燃气体或蒸气的种类及化学性质的影响 .....	27
0.3.3 化学反应失控而引起的工艺设备爆炸 .....	4	2.2.2 混合均匀程度的影响 .....	28
0.4 爆炸灾害防治对策 .....	4	2.2.3 温度的影响 .....	28
0.5 本书的主要内容 .....	6	2.2.4 初始压力的影响 .....	28
思考题 .....	6	2.2.5 惰性介质或杂质的影响 .....	29
1 基本概念 .....	7	2.2.6 实验管径和材质的影响 .....	30
1.1 燃烧的基本概念 .....	7	2.2.7 点火能量的影响 .....	30
1.1.1 燃烧 .....	7	2.3 爆炸反应方程分析 .....	31
1.1.2 闪燃与闪点 .....	7	2.3.1 化学计量浓度 .....	31
1.1.3 自燃与自燃点 .....	7	2.3.2 完全与不完全燃烧 .....	32
1.2 爆炸的基本概念 .....	8	2.3.3 最危险浓度 .....	33
1.3 爆炸发生的基本条件 .....	8	2.4 爆炸极限的计算 .....	33
1.3.1 可燃气体发生爆炸的条件 .....	8	2.4.1 单一燃料在空气中的爆炸极限的估算 .....	33
1.3.2 粉尘发生爆炸的条件 .....	9	2.4.2 多种可燃气体混合物在空气中的爆炸极限的估算 .....	34
1.4 爆炸的基本特性 .....	11	2.4.3 可燃气体与惰性气体混合物的爆炸极限的估算 .....	35
1.4.1 凝聚相含能材料的爆炸 .....	11	2.4.4 可燃气体在氧气中的爆炸极限 .....	39
1.4.2 密闭空间可燃气体或粉体爆炸 .....	12	2.4.5 可燃气体在其他氧化剂中的爆炸极限 .....	39
1.4.3 开敞空间可燃气体或粉体爆炸 .....	12	2.5 含氧量安全限值 .....	40
1.4.4 沸腾液体膨胀蒸气爆炸 (BLEVE 爆炸) .....	14	2.6 其他助燃气体 .....	41
1.4.5 化学反应失控 .....	15	小结 .....	41
1.4.6 物理蒸气爆炸 .....	15	思考题 .....	42
1.5 爆炸参数 .....	15	习题 .....	42
1.5.1 火焰速度和燃烧速度 .....	16	3 密闭空间内可燃气体的爆炸强度 .....	44
1.5.2 理论火焰温度 .....	16	3.1 火焰传播 .....	44
1.5.3 爆炸强度 .....	17	3.2 爆炸过程的解析解法 .....	45
1.5.4 最大试验安全间隙 .....	18	3.2.1 质量速率方程 .....	45
1.6 爆炸波破坏准则 .....	18	3.2.2 压力上升速率和火焰速度方程 .....	46
1.6.1 爆炸波的结构和破坏机理 .....	19	3.3 几何微元方法 .....	50
1.6.2 爆炸波破坏准则 .....	20		
小结 .....	22		

3.4 爆炸强度的测试	56	小结	91
3.5 影响爆炸强度的因素	57	思考题	92
3.5.1 可燃气体活性	57	<b>6 爆炸灾害的防护与控制原理及应用</b>	93
3.5.2 可燃气体的浓度	58	6.1 可燃物质浓度控制	93
3.5.3 点火能量和位置	58	6.1.1 操作参数控制	94
3.5.4 容器形状和容器	59	6.1.2 防止泄漏	94
3.5.5 初始压力	60	6.1.3 除尘	95
3.5.6 初始温度	60	6.2 氧化剂浓度控制	95
3.5.7 湍流状态	60	6.2.1 遇水发生燃烧爆炸的物质	96
小结	61	6.2.2 混合危险性物质	98
思考题	61	6.3 惰化技术	99
习题	61	6.4 点火源控制	100
<b>4 开敞空间可燃气云的爆炸强度</b>	63	6.4.1 防止明火	100
4.1 影响可燃气体云爆炸强度的因素	63	6.4.2 防止静电	101
4.1.1 可燃气体云特性的影响	63	6.4.3 防止自燃	102
4.1.2 周围环境对爆炸的影响	64	6.4.4 防雷	103
4.1.3 天气情况的影响	65	6.5 爆炸抑制技术	104
4.1.4 点火能量、点火位置的影响	65	6.5.1 爆炸抑制技术的有效性和局 限性	104
4.2 气云爆炸强度的研究和预测方法	65	6.5.2 爆炸探测器的工作原理	105
4.2.1 实验方法	66	6.5.3 爆炸信号控制器的工作原理	107
4.2.2 经验与理论研究方法	68	6.5.4 爆炸抑制器的工作原理	107
小结	73	6.6 爆炸阻隔技术	110
思考题	74	6.6.1 阻火器	110
<b>5 粉尘的爆炸强度</b>	75	6.6.2 主动式隔爆装置	113
5.1 粉尘爆炸的特点	75	6.6.3 被动式隔爆装置	115
5.1.1 粉尘的概念	75	小结	116
5.1.2 粉尘爆炸发生的条件	76	思考题	118
5.1.3 粉尘爆炸的特点	77	<b>7 密闭空间内爆炸的安全泄放原理与应用</b>	119
5.2 粉尘爆炸参数的确定	78	7.1 泄放过程理论分析	119
5.2.1 粉尘云浓度的测试	79	7.1.1 泄放能力的计算	119
5.2.2 爆炸下限 (LEC) 的测试	81	7.1.2 泄放面积的理论计算	121
5.2.3 爆炸强度的测试	82	7.2 泄放面积工程设计	121
5.2.4 最小点火能 (MIE) 的测试	84	7.2.1 比例法	121
5.2.5 粉尘最低着火温度 (MIT) 的 测试	85	7.2.2 高强度包围体泄压设计图算法	122
5.3 粉尘爆炸的影响因素	87	7.2.3 低强度包围体的泄压设计	130
5.3.1 粉尘粒度	87	7.2.4 经验公式法	130
5.3.2 粉尘性质和浓度	87	7.2.5 泄放管的影响	132
5.3.3 氧化剂浓度	87	7.3 泄放过程的其他危害	132
5.3.4 点火能量	88	7.3.1 火焰扩展	133
5.3.5 含杂混合物的影响	89	7.3.2 压力扩展	133
5.3.6 爆炸空间形状和尺寸	89	7.3.3 反坐力	133
5.3.7 初始压力的影响	90	7.4 泄放装置的设置与选型	133
5.3.8 湍流度的影响	90	7.4.1 泄放装置的设置原则	133

7.4.2 泄放装置的选型 .....	134	附录 2 常见物质的自燃点 .....	165
小结 .....	141	附录 3 几种典型场合的点火能量 .....	166
思考题 .....	142	附录 4 部分气体最低点火能量 .....	166
习 题 .....	143	附录 5 常见粉尘的最小点火能量 .....	166
<b>8 可燃气体和粉尘燃烧爆炸过程的</b>		附录 6 常见介质的基本燃烧速度 .....	167
<b>数值计算</b> .....	144	附录 7 部分可燃性气体或蒸气的最大试验	
8.1 数值模拟方法介绍 .....	144	安全间隙值 .....	167
8.2 可燃气体燃烧数值模拟 .....	145	附录 8 常见可燃介质的燃烧热和爆炸	
8.2.1 层流预混火焰模型 .....	145	极限 .....	168
8.2.2 层流扩散火焰模型 .....	146	附录 9 可燃气体或蒸气极限氧含量 (以 N <sub>2</sub>	
8.2.3 湍流火焰模型 .....	147	或 CO <sub>2</sub> 稀释) .....	169
8.2.4 化学反应模型 .....	149	附录 10 悬浮可燃粉尘极限氧含量 (以	
8.3 煤粉燃烧数值模拟 .....	150	N <sub>2</sub> 或 CO <sub>2</sub> 稀释) .....	170
8.3.1 气相模型 .....	151	附录 11 悬浮可燃粉尘极限氧含量 (以 N <sub>2</sub>	
8.3.2 颗粒相模型 .....	151	稀释) .....	171
8.3.3 燃烧模型 .....	152	附录 12 典型助燃气体氟、氯、氧、氧化	
8.3.4 传热模型 .....	154	亚氮的性质 .....	173
8.4 模拟案例 .....	155	附录 13 部分与水等发生爆炸反应物质的	
8.4.1 甲烷-空气预混气体爆炸 .....	155	性质 .....	173
8.4.2 煤尘-甲烷预混气体爆炸模拟 .....	160	附录 14 部分遇到空气即自燃的物质的	
小结 .....	161	性质 .....	174
思考题 .....	162	附录 15 常用物质的电阻率 .....	175
<b>附 录</b> .....	163	附录 16 常见物质介电常数表 .....	176
附录 1 常见液体的闪点 .....	163	<b>参考文献</b> .....	177



# 0 绪 论

## 0.1 工业生产与安全

广义来说,生产是指人们创造物质财富的过程,或是将生产要素进行组合以制造产品的活动。从经济学上讲,生产是将投入转化为产出的活动。安全是指生产过程中不存在导致人员伤害和财产损失的危险状态。然而,绝对化的安全是一种无法实现的安全。实际上,通常所说的安全是指生产过程的危险程度能够为人们普遍接受的状态。

在生产过程中,安全与生产既有矛盾性,又有统一性。所谓矛盾性,首先表现为生产过程中的安全事故与生产活动的矛盾;其次表现为采取安全措施时会影响生产,增加成本,降低劳动生产率。所谓统一性,一方面表现为安全可以营造良好的生产环境、条件和氛围,从而使生产有序进行,促进经济效益稳步提高;另一方面表现为生产的不断发展也为安全创造必要的物质条件。安全与生产互为条件,相互依存,本质上是辩证统一的。没有生产活动,安全问题就不可能存在;没有安全条件,生产也不能顺利进行。安全是生产的前提,在生产过程中,必须坚持“安全第一”。当考虑生产的时候,应该把安全作为一个前提条件考虑进去,落实安全生产的各项措施,保证员工的安全与健康,保证生产持续和安全的发展。“安全第一”的目的又是为了有效地保证生产。如果不生产,“安全第一”就失去了存在的意义。

控制工业生产安全事故,一方面要提高安全意识,加强安全管理,强化安全监督;另一方面要重视安全科技研究,提高技术水平,更新安全装备。

值得指出,安全是一个相对的概念,无论采取什么措施,也不能达到百分之百的安全。可燃介质防爆的目的就是使爆炸的风险降低到可以接受的程度。在实际的防爆应用中,应寻求安全和经济的平衡。要采取措施保障人员的人身安全。

## 0.2 工业生产中的爆炸事故

在工业生产,以及原材料、产品的储存或运输过程中,由于人为因素或其他不可预知原因,均可引发工业介质爆炸事故,造成严重的财产损失或人员伤亡。随着现代工业的发展,生产工艺越来越复杂,生产的集约化水平也越来越高。工业介质发生爆炸的危险性与危害性也随之升高。可发生爆炸的工业介质种类很多,例如人们熟悉的易燃易爆品,气态有氢气、瓦斯、液化石油气等;液态有汽油、苯等化工品;固态有火药、炸药等。另外,还有一些平常认为是安全的物质,例如煤粉、铝粉、面粉等与空气混合,也可发生粉尘爆炸。以往发生的爆炸灾害表明,工业介质爆炸中,气体与粉尘爆炸发生的频度最高,造成的损失也最大。1989年,美国一座聚乙烯厂40t异丁烷泄漏引起的爆炸将工厂全部摧毁,造成24人死亡,124人受伤,经济损失7.5亿美元(图0-1)。1988年,英国北海钻井平台爆炸,数百人丧生,损失数亿英镑(图0-2)。前苏联西伯利亚,由于输送碳氢燃料的管道破裂,使大量燃料泄漏于空中形成可燃

悬浮气云，由两列火车交汇时摩擦产生的火花引爆，造成 200 余人死亡、千余人受伤的重大事故。1989 年，中国某油库老罐区 5 座油罐发生一起因雷击引起大火的特大爆炸火灾事故，大火前后共燃烧 104h，烧掉原油 36000t，烧毁油罐 5 座，罐区全部付之一炬（图 0-3）。1887 年德国哈默尔恩新威塞尔面粉厂谷物粉尘爆炸，损失惨重（图 0-4）。1987 年，哈尔滨亚麻厂发生特大粉尘爆炸事故，死亡 58 人，伤 177 人，损坏厂房 1.3 万平方米，设备 158 台套（图 0-5）。1991 年某硝化厂工房发生了爆炸，硝化工房已全部被摧毁（图 0-6）。精制、包装工房，空压站，分厂办公室，硝化棉分厂及废酸处理分厂破坏严重。距爆炸中心 1000m 以内的建筑物受到不同程度破坏，3000m 范围内的门窗玻璃多数被振碎。有  $280 \times 10^3 \text{m}^2$  的建筑物受到不同程度的损坏。其中被炸毁、报废的约  $50 \times 10^3 \text{m}^2$ ，严重破坏的  $58 \times 10^3 \text{m}^2$ ，一般破坏的  $170 \times 10^3 \text{m}^2$ 。设备损坏 951 台套，原材料、半成品及成品也损失较大。爆炸事故中死亡 17 人，重伤 13 人，轻伤 94 人。1989 年 Meleman Protection Consultations 对当时发生的 150 起重大工业灾害事故的统计分析表明，火灾事故占 38%，爆炸灾害占 60%，其他灾害占 2%。据国家安全生产监督管理局网报道，我国 2001~2006 年化工生产、经营企业发生的火灾爆炸事故约 109 起，死亡 440 人。按发生事故的设备对其进行统计如表 0-1 所示。在上述 109 起事故中，对事故起因较明确的 64 起事故介质统计分析，结果见表 0-2。可见爆炸灾害在整个灾害事故中占有很大比重。近年来，瓦斯爆炸事故更加突出，约占重大安全事故的 70%。

上述生产事故是几个比较典型的工业介质爆炸事故。事实上，这类事故举不胜举。据不



图 0-1 美国聚乙烯厂爆炸

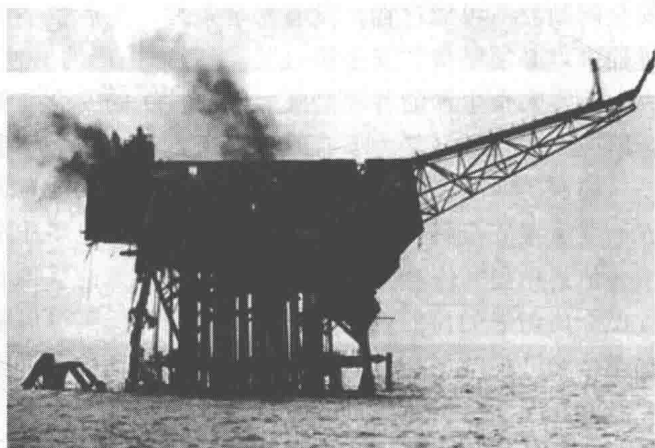


图 0-2 英国钻井平台爆炸



图 0-3 某油库爆炸



图 0-4 德国面粉厂爆炸



图 0-5 哈尔滨亚麻厂粉尘爆炸



图 0-6 硝化厂爆炸

完全统计, 1949 年以来, 我国发生了十余起一次死亡百人以上的瓦斯爆炸事故, 死亡两千余人。2001~2008 年我国化工企业共发生较大及其以上级别爆炸事故 119 起, 其中, 死亡 510 人, 重伤 105 人, 轻伤 377 人。工业介质爆炸灾害已给人类社会带来的严重后果和社会效应已超过了灾害事故本身, 已经成为社会生活、经济发展的一个十分敏感的问题。在高科技越来越密集、经济规模越来越宏大的今天, 爆炸灾害的潜在可能性增加, 事故的危害程度进一步增加, 安全问题往往成为重大社会经济决策的核心问题。

表 0-1 化工企业火灾爆炸发生事故的统计设备统计表

设备	反应容器	储罐	管道	干燥设备	锅炉	气瓶	冷却装置	净化装置	其他	总计
事故数	45	25	7	5	4	3	1	1	18	109
死亡人数	176	115	27	20	24	10	4	4	78	440
火灾事故数	2	2	0	1	0	0	0	0	5	10
爆炸事故数	43	22	6	4	3	3	1	1	12	93

表 0-2 化工企业火灾爆炸介质统计表

介质类别	事故数	死亡人数	主要介质
碳氢类化合物	19	78	石油(5)、汽油(3)、液化石油气(2)、煤气(5)、柴油(2)、天然气(1)、沥青(1)
苯类化合物	11	51	苯(3)、甲苯(2)、二甲苯(1)、叔丁基苯(1)、硝基苯(1)、2-4 二硝基氟苯(1)、间硝基苯甲醚(1)、丙硝基氯化苯(1)
醇类化合物	8	44	乙醇(7)、甲醇(1)
卤化物	5	24	液氯(1)、四溴双酚(1)、氢氟酸(1)、二氯异氰尿酸钠(1)、六氯环戊二烯(1)
胺类化合物	3	10	甲胺(1)、二甲基甲酰胺(1)、甲氧基胺(1)
烯烃类化合物	2	7	乙烯、聚乙烯(1)、四氟乙烯单体(1)
过氧化物	2	6	过氧化钾乙酮(1)、过氧乙酸(1)
酮类	1	3	丙酮(1)
无机类物质	13	45	蒸气(6)、氧气(4)、氨(1)、二氮(1)、锌粉(1)
总计	64	268	

注: ( ) 中的数据代表该类介质发生事故的起数。

## 0.3 生产中爆炸形式的分类

工业生产中发生的爆炸主要有以下几种形式:

- ① 气体或蒸气爆炸;
- ② 粉尘爆炸;
- ③ 化学反应失控而引起的工艺设备爆炸。

而在实际的工业爆炸事故中, 通常是几种爆炸形式并存的。

### 0.3.1 可燃气体和可燃液体蒸气的爆炸

可燃气体和可燃液体蒸气的爆炸实质上是可燃气体本身或与空气或氧的快速氧化反应,

属于化学爆炸。其主要特征是快速燃烧产生的高温产物膨胀从而产生爆炸冲击波，导致被作用物体产生大变形乃至破坏。可燃气体或蒸气爆炸又可分为以下几类。

#### (1) 爆炸性混合气体爆炸

可燃性气体（或蒸气）与助燃性气体混合并达到爆炸极限后遇到火源就会引起爆炸，工业生产中发生的燃烧爆炸事故大多属于这类爆炸。如果燃烧气体能够自由膨胀，且火焰速度较慢，几乎不产生压力波和爆炸声响，即称为常压燃烧，只会形成火灾。而当火焰速度很快时，就会产生爆炸冲击波和声响，对周围造成重大破坏。如果爆炸发生在密闭空间，就会形成高温高压，造成容器破坏或房屋倒塌。

#### (2) 分解性气体的分解爆炸

某些气体即便在没有空气或氧气的情况下同样可以发生爆炸，如乙炔在没有氧气的情况下，若被压缩到 200kPa 以上，遇火星就能引起爆炸。乙烯、氧化乙烯、氧化乙炔、四氟乙烯、丙烯、臭氧、一氧化氮等也具有类似的性质。出现这种情况的原因在于这类气体在分解时能放出大量的热量，使分解出来的气体受热膨胀，造成压力急剧升高。

#### (3) 沸腾液体膨胀蒸气爆炸

当容器中含有高蒸气压液体时，一旦容器破裂，高压蒸气从裂缝喷出，容器内的压力急剧下降，导致液体处于过热状态，从而迅速汽化，体积急剧膨胀，冲击容器壁，致使裂缝扩张，使容器破裂。喷出的液化气又可能急剧燃烧产生火球和热辐射增大了爆炸危害。这种爆炸形式多发于液化气的储罐、罐车等情况。

可燃气体与空气混合物的爆炸和可燃液体的蒸气与空气混合物的爆炸多发生在能源行业（如石油、天然气）及化工行业。气体爆炸不仅会造成重大的人员伤亡，还会造成巨大的财产损失。

### 0.3.2 可燃固体粉尘与空气混合物的爆炸

粉尘爆炸是指悬浮于空气中的可燃粉尘触及明火或电火花等火源时发生的爆炸现象。当在空气中悬浮的可燃粉尘浓度达到一定值，又遇有点火源时，也会造成燃烧爆炸。爆炸冲击波在传播过程中，还会扰动原来处于静止沉积状态的粉尘，使原来不具备粉尘爆炸条件的地区和场所具备了粉尘爆炸的条件，它们在高温和火焰的环境作用下，立刻又会引起二次爆炸。产生爆炸的粉尘包括金属粉尘（如铝粉、镁粉）、可燃矿物粉尘（如煤粉）和有机物粉尘（如麻粉尘、棉纤维尘、烟草、木粉、纸粉、面粉、淀粉、奶粉、糖等、塑料、染料）。

### 0.3.3 化学反应失控而引起的工艺设备爆炸

化学工程很多是在高温高压下进行的化合、分解及聚合反应。如果反应容器内的温度超出正常的规定范围而异常升高，会使反应速度按指数规律增长，即为反应失控，进而导致压力迅速升高，引起爆炸事故。由于化工生产原材料及产品多具有较大的毒性和腐蚀性，如果发生泄漏造成严重的环境污染，其间接损失更是难以估量。

## 0.4 爆炸灾害防治对策

我国是发展中国家，目前经济正处在快速发展时期，由于生产力水平较低，安全生产投入严重不足，安全生产监督管理体制不能适应经济发展的需要，生产安全事故总量在逐年上升，安全生产形势依然相当严峻。分析一幕幕悲惨场景不断上演的根本原因，主要有以下几方面。一是人们的安全观念和意识不强。某些企业片面追求经济效益，安全意识淡漠、安全设施

不健全、安全措施不得力,对安全隐患抱有侥幸心理。二是人们缺乏安全知识,对重大爆炸安全隐患熟视无睹,而一旦发生事故又缺乏救灾减灾和逃生技能,从而使小事故发展为大事故。三是目前科技水平所限,一些潜在的危险人们尚无法认识或不能完全彻底认识清楚。

人类文明和社会进步要求生产过程、科学研究有更高的安全性、可靠性、稳定性,安全已成为人类文明、安居乐业的一种象征。为了适应以经济发展为中心的这一要求,应从以下几方面把握好爆炸灾害防治对策。

#### (1) 加强工业介质爆炸基础数据研究

爆炸灾害都是借助于工业介质形成的。不同的介质具有不同的性质,爆炸范围、燃烧速率、燃烧热值、着火理论、点火能量、爆炸压力、升压速率以及发生爆炸后所造成的危害等都与介质的性质紧密相关,因此必须对易燃易爆物品的理化性质和爆炸特性进行研究,为其爆炸波传播规律研究提供基础。

#### (2) 加强爆炸机理和成灾模式研究

要防治爆炸灾害,首先要弄清爆炸发生发展的规律、特点和成灾机理。对某些情况,虽然也采取了一些防治措施,但爆炸灾害事故却未能得到有效防控,其根本原因之一就是缺乏对爆炸传播规律和成灾模式的正确认识。虽然近些年来这方面的研究取得了很大进展,提出了不少理论模型、分析方法和有效措施,但由于爆炸发生的随机性和复杂性,目前尚未获得准确而通用的规律。因此必须继续加强对爆炸机理的基础研究,弄清爆炸发生的机理和爆炸波传播的基本规律和特点,为提出有效的防治措施提供理论依据。

#### (3) 加强防爆抑爆技术开发

防爆抑爆技术是爆炸灾害防治的关键。目前已有一些比较有效的防爆抑爆措施,如惰化技术、隔爆技术、阻爆技术、泄爆技术等,但每项技术都有其长处和短处,他们大都是针对某些特定情况提出来的。例如,惰化是防止形成可爆性环境的重要措施,煤粉、金属粉尘和塑料类粉尘通常采用气氛惰化的方法进行爆炸防护。部分惰化虽不能完全防止爆炸的发生,但可增加最小点火能量(从而减小了点燃频率),并降低爆炸的猛烈程度。除了采取预防措施,还应采取措施在发生爆炸后降低爆炸的损失。泄爆就是应用最广泛的降低损失的方法之一。因此必须加大安全技术原始创新、引进消化再创新和集成创新的力度,提高生产装置的抵御爆炸灾害的能力和水平。

#### (4) 加强安全法规建设

安全法规是提高人们安全意识的有力工具,也是企业领导人和技术负责人加大安全技术投入的保障。通过建立完善的操作规程和规章制度,消除物品的不安全状态,防止人的不安全行为。近年来,我国在安全法规建设方面取得了重大进展,出台了一系列相关法律,使得设计者有法可依。但这些法规的覆盖面还不够宽,还有些相互衔接不顺畅。因此必须在安全理论与技术研究不断进步的基础上,不断完善相关法规。

#### (5) 加强安全知识普及教育

对广大从业人员,尤其是从事处理易燃易爆介质的人员,必须加强防爆抑爆安全教育,提高他们的安全意识,增强他们的责任心,提升他们使用防爆抑爆装置的技能 and 救灾水平。近年来,我国已有100余所高校设立了安全工程本科专业或研究生专业,国务院学位办已设立安全科学与工程一级学科,这都对我国安全技术及工程人才的培养起到举足轻重的作用。

安全工作人员和研究人员有责任和义务肩负起这个神圣的使命,对这些危险物质的特性进行深入研究并研制相应切实可行的防范设施,采取行之有效的措施,将事故消灭于无形之

中，造福于人类。

## 0.5 本书的主要内容

爆炸一直是学术界关注的课题。这方面的研究工作可分为两方面。一方面用于军事领域，主要研究凝聚相炸药和燃料-空气炸药 (fuel-air explosive, 简称 FAE) 的爆炸威力，开发先进武器。另一方面用于工业防爆，主要研究可燃气体的爆炸威力，以便有针对性地提出防爆措施。本书主要介绍工业可燃介质爆炸防治方面的基本知识与最新研究成果。

工业生产中涉及的爆炸性介质主要是气体 (含蒸气) 和粉尘。本书将主要介绍工业可燃气体和粉尘爆炸的基础理论和工程中实用的防治技术与装备。近年来，这方面的研究成果不断涌现。本书反映了这些最新成果及发展趋势。全书分绪论、爆炸的基本概念、可燃气体与蒸气的爆炸极限、密闭空间内可燃气体的爆炸强度、开敞空间可燃气体云的爆炸强度、粉尘的爆炸强度、爆炸灾害的防护与控制原理及应用、密闭空间内爆炸的安全泄放原理及应用、可燃气体和粉尘燃烧爆炸过程的数值计算 9 章，另有附录。

本书内容涉及热力学、燃烧学、爆炸物理学、气体动力学、固体力学等多门学科以及化工、石油化工、矿山、电力等多个工程领域，显得多而杂乱，因而在学习过程中要注意以下几个方面。

① 本书的主线是气体和粉尘的爆炸过程中热能向压力能转换的规律，进而提出爆炸灾害防治方法，提高预防与控制爆炸的有效性。各种概念、理论、计算方法都是为这条主线服务的。学习时必须时刻抓住这条主线。

② 要注重基本概念和基本理论的理解与应用，死记硬背一些公式是不能解决实际问题的。注意掌握应用基本概念和理论分析处理实际问题的基本方法，学会对实际问题进行“抽象”“简化”“建模”“求解”并提出解决方案的基本方法，从而可以举一反三。

③ 提高工程意识。处理工程实际问题的方法是多种多样的，各种方案之间也只有更好，没有最佳。在基本概念和所用理论正确的基础上，要敢于从不同的角度思考，提出创新性解决方案。

### 思考题

- 0-1 工业生产与安全的辩证关系。
- 0-2 经济效益、社会效益、安全投入之间的关系。
- 0-3 世界的安全生产形势。
- 0-4 我国的安全生产形势。
- 0-5 做好安全生产工作应采取的对策。
- 0-6 工业生产中存在的安全隐患。
- 0-7 工业介质爆炸的主要形式。
- 0-8 安全生产事故的分类管理及其优缺点。

# 1 基本概念

**内容提要：**主要介绍燃烧与爆炸的基本概念，讨论爆炸发生的条件和描述爆炸的参数，分析各类爆炸的基本特性及其影响因素。

**基本要求：**①熟悉燃烧与爆炸的基本概念，理解预混燃烧和扩散燃烧、闪点和自燃点的含义；②了解爆炸的分类；③掌握气体和粉体爆炸发生的基本条件；④了解描述气体与粉体爆炸过程的参数及其影响因素；⑤掌握气体燃烧与爆炸的模式；⑥掌握爆燃与爆轰的联系与区别；⑦熟悉理想爆源与非理想爆源爆炸的显著特征。

## 1.1 燃烧的基本概念

### 1.1.1 燃烧

燃烧是同时伴有发光、发热的激烈氧化还原反应。这里的氧化剂多数情况下是氧气，当然也可以是其他氧化剂，例如氢气和氯气可以燃烧生成氯化氢。燃烧时物质所处状态不同，燃烧特点也不同。气体最容易燃烧，只要具有足够的热量即可迅速燃烧。液体燃烧是在蒸气状态下进行的，即首先是液体受热蒸发，其蒸气与氧化剂反应实现燃烧，通常称为蒸发燃烧。某些简单固体，如硫、磷等，受热后首先熔化，进而蒸发，然后进行蒸气燃烧；而另外一些复杂固体，如木材，受热后分解出可燃气体，然后进行气体燃烧，通常称为分解燃烧。

可燃性气体的燃烧又可分为预混燃烧和扩散燃烧。可燃气体与空气（或氧气）混合后发生燃烧称为预混燃烧，而可燃气体从管内流出后同周围空气（氧气）接触，边混合边燃烧称为扩散燃烧。预混燃烧反应速度快，温度高，极易发生爆炸。

### 1.1.2 闪燃与闪点

液体的表面总有一定量的蒸气存在，可燃液体表面的蒸气与空气接触就会形成可燃混合物，遇到火源就会燃烧甚至爆炸。液体表面蒸气的多少与液体温度有关。温度很低时，液体表面蒸气很少，它与空气的混合物不能被明火点燃；当温度增加到某一值时，混合物的燃烧只出现瞬间的火苗或闪光，称为闪燃，此时的温度称为该液体的闪点。常见液体的闪点见附录1。碳氢化合物的闪点也可根据沸点由式（1-1）估算

$$t_F = 0.683t_B - 71.7^\circ\text{C} \quad (1-1)$$

可燃液体的闪点随其浓度不同而变化。如纯乙醇的闪点为 $9^\circ\text{C}$ ，乙醇含量为80%水溶液的闪点为 $19^\circ\text{C}$ ，乙醇含量为5%水溶液的闪点为 $62^\circ\text{C}$ ，乙醇含量为3%的水溶液不会闪燃。

### 1.1.3 自燃与自燃点

自燃是指在无外界火源的情况下，物质自发着火燃烧的现象。物质自燃可分为受热自燃和自热自燃两种形式。前者是指在外热源的作用下，物质温度不断升高，当达到自燃点时即发生着火燃烧。物质由于接触高温表面、受到加热、烘烤、摩擦、撞击等作用均可能发生

自燃。后者是指在没有外界热源的情况下，由于物质内部发生化学、物理或生化过程而产生热量，是物质温度升高，达到自燃点时发生燃烧。例如处理含硫化氢的设备会发生腐蚀生成硫化铁，而硫化铁与氧气发生放热反应，从而可导致设备自燃；油脂类物质若浸渍在棉纱、木屑等物质中，形成很大的氧化表面时也会发生自燃；干草、湿木屑等会因吸收发酵热而自燃；煤粉会在氧化和吸附的作用下发生自燃。发生自燃时的温度称为自燃点（AIT）。常见物质的自燃点见附录 2。可燃介质的自燃温度也随浓度而变化。通常情况下，化学计量比浓度下自燃点最低。自燃温度还随压力增高而降低。例如苯在 0.1MPa 时，自燃温度为 680℃，而在 1MPa 时为 590℃。

## 1.2 爆炸的基本概念

广义上的爆炸是一种极其迅速的物理或化学能量的释放过程，伴有光、热、声效应，常常导致压力的快速上升。在此过程中，物系的体积在极短时间内急剧膨胀而对外界做功，致使周围气压急剧增大并会造成人员伤亡和财产损失。

从上述定义可知爆炸过程呈现两个阶段：在第一个阶段，物质的潜在能量以一定方式转化为强烈的压缩能；在第二个阶段，压缩能急剧向外膨胀，并对外做功，引起被作用物体变形、移动或破坏。爆炸的主要征象是爆炸点周围介质中的压力急剧上升。它是产生破坏作用的直接因素。爆炸的对外征象是由于介质振动而产生的声响效用。

根据爆炸过程中是否发生化学反应，可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、压力容器因内部介质超压破裂等；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、粉体爆炸等。狭义上的爆炸是指化学爆炸。

按化学爆炸发生时物质的物理状态，可分为气相爆炸、液相爆炸和固相爆炸。气相爆炸是指爆炸发生前爆炸介质完全处于气体状态，如甲烷爆炸、天然气爆炸等；液相爆炸是指爆炸发生前爆炸介质主要处于液体状态，当然爆炸的实质仍是液体上方的蒸气爆炸，如汽油爆炸、酒精爆炸等；固相爆炸是指爆炸发生前爆炸介质处于固体状态，如 TNT 爆炸、黑火药爆炸等。

按化学爆炸发生的场合，可分为密闭空间内爆炸和开敞空间爆炸。前者是指介质的燃烧爆炸发生在封闭的空间之内，如压力容器或管道内的爆炸、厂房内的爆炸等；后者是指可燃介质在室外大气中集聚后发生的爆炸，如工厂罐区内由于可燃气体泄漏形成的气云爆炸、在空间分布的聚乙烯粉体爆炸等。工业实际中还有很多半封闭空间内的爆炸，即某些方向有约束而另外一些方向没有约束的爆炸，如煤矿巷道内的瓦斯爆炸等。

## 1.3 爆炸发生的基本条件

### 1.3.1 可燃气体发生爆炸的条件

可燃气体发生爆炸，必须要满足三个基本条件：i. 有合适浓度的可燃气体；ii. 有合适浓度的助燃气体；iii. 有足够能量的点火源。

这里“合适浓度”指的是可以发生爆炸的浓度。每种燃料气体在氧气或空气中，都有一个可以发生爆炸的浓度范围。这个浓度范围称为爆炸极限。超出气体爆炸极限，即使用很强



的点火源也不能激发爆炸。

通常爆炸都离不开氧气或空气作为助燃气，而氧气的浓度实际上是与可燃气体浓度相对应的，过高或过低都不能发生爆炸。

每种气体都有一个最小点火能量，当点火能量低于这个值时就不会发生爆炸。最小点火能量是工程中防火防爆的又一个基本参数。两个金属电极之间的火花放电点火能量可由式(1-2)计算，静电火花的点火能量可由式(1-3)计算。

$$E_s = 40l_s \int_0^{t_{\max}} I_s^{0.54} dt \quad (1-2)$$

$$E_s = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1-3)$$

式中  $E_s$ ——点火能量，J；

$l_s$ ——火花间隙，mm；

$I_s$ ——火花电流，它是放电时间的函数，A；

$t_{\max}$ ——放电时间，s；

$C$ ——电容，F；

$V$ ——电压，V。

人体的电容约为  $10^{-10}$ F，穿胶鞋脱工作服可产生 10000V 的电压，点火能量达到 5mJ。几种典型场合的点火能量见附录 3。而可燃气体的点火能量很低，只有几十到几百微焦耳量级，因此极易被点燃。常见的碳氢化合物和空气混合气体的最小点火能量见附录 4，一般为 0.25mJ 量级，氢气的最小点火能量为 0.019mJ，所以，这种静电足以引起爆炸。

影响最小点火能量的因素主要有气体温度、浓度、压力和惰性气体含量。气体温度越高、压力越大、越接近最危险浓度、惰性气体含量越小，点火能量越低。

### 1.3.2 粉尘发生爆炸的条件

工业中所说的粉尘一般是指粒径小于  $850\mu\text{m}$  的固体颗粒的集合。在工业历史上，粉尘爆炸事故不断发生。随着工业的迅猛发展，粉尘爆炸源越来越多，爆炸危险性越来越大，事故数也有所增加，几乎涉及各行各业，粮食、饲料、药品、肥料、煤炭、金属、塑料等粉尘爆炸都造成了巨大的人身伤亡和财产损失。粉尘爆炸与可燃气体爆炸要求的条件类似，可以说有 4 个基本条件：i. 粉尘颗粒足够小；ii. 有合适的可燃粉尘浓度；iii. 有合适浓度的氧气；iv. 有足够能量的点火源。

粉尘的粒度是一个很重要的参数。粉尘粒度的大小直接影响固体物料在空气中是否具有足够的分散度。如果没有足够的分散度，例如空气中有一个大煤块，那是不会发生爆炸的。这是因为粉尘的表面积比同质量的整块固体表面积大几个数量级。例如，把直径为 100mm 的球切割成直径为 0.1mm 的球时，表面积增大了 999 倍。这就意味着氧化面积增大了 999 倍，加速了氧化反应，增强了反应活性。因此这里讲的粉尘浓度一定是以足够的分散度为前提的。对于大多数粉尘，其粉尘直径小于 0.5mm 时，才具备了足够的分散度。粉尘的可燃性也与日常生活中的可燃概念不同。例如，用火柴无论如何不能把一根铝棒点燃，但是它可以把悬浮在空气中的铝粉引爆的。值得注意的是，物料处于整体块状与分散状态下的燃烧性能是有很大区别的。对一定量的物质来说，粒度越小，表面积越大，化学活性越高，氧化速度越快，燃烧越完全，爆炸下限越小，爆炸威力越大。同时，粒度越小，越容易悬浮于空气