



普通高等教育地矿、安全类“十一五”规划教材

化工安全工程

董文庚 苏昭桂 编著

煤炭工业出版社

普通高等教育地矿、安全类“十一五”规划教材

化工安全工程

董文庚 苏昭桂 编著

煤炭工业出版社

·北京·

内 容 提 要

本书以预防控制危险化学品的火灾爆炸事故为重点,系统阐述了化工过程事故预防的基础理论、危险化学品与单元操作危险性分析、危险化学品及粉尘的燃烧与爆炸、火灾爆炸事故的技术预防措施、限制事故危害范围的工程技术措施、压力容器安全、危险化学品储运安全等7章内容,对与危险化学品火灾爆炸预防控制有关的工程技术措施进行了较系统的介绍。

本书可作为高等院校安全工程专业教学用书和化学工程与工艺等专业的教学用书,也可作为安全生产管理人员的参考资料和培训用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工安全工程/董文庚,苏昭桂编著.——北京:煤炭工业出版社,2007.10

普通高等教育地矿、安全类“十一五”规划教材

ISBN 978-7-5020-3176-3

I. 化… II. ①董…②苏… III. 化学工业-安全工程-高等学校-教材 IV. TQ086

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第136933号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居35号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
煤炭工业出版社印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm×960mm¹/₁₆ 印张 22³/₄
字数 467千字 印数 1—3,000
2007年10月第1版 2007年10月第1次印刷
社内编号 5977 定价 48.00元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

前 言

在化学品的生产、储存、使用、运输过程中，所涉及的化学品多为易燃易爆、有毒有害、腐蚀性的危险化学品，这些过程中集聚的危险化学品数量往往较大，所使用的设备、设施常常处于高温、高压、腐蚀等恶劣运行条件下，物料的性质及状态决定了存在危险化学品的场所、设施等都属于危险源，甚至属于重大危险源，一旦失控将非正常地释放出大量的化学能、“毒能”和热能等。因此，凡是涉及危险化学品的行业都属于高危行业，其建设项目从可行性研究到正常使用的所有阶段都需要预防生产事故的发生，且要设计、准备一旦发生事故时减少事故损失，防止事故扩大化的工程技术措施。

安全工程是进行危险源的辨识、对危险源进行定量与定性评价、研究事故发生的原因与规律、设计并实施危险源控制措施、制定安全管理对策、降低事故风险的一门学科，化工安全则研究在化工过程中火灾爆炸、中毒、灼伤等事故发生的规律和预防与控制措施。

本书主要为安全工程专业的学生和安全管理人員编写，以火灾爆炸事故的预防与控制为主，而有关职业健康安全工程的内容和泄漏、火灾、爆炸事故后果模拟预测等内容将由其他课程完成，本书未作介绍。

书中内容分为化工过程事故预防的基础理论、危险化学品与单元操作危险性分析、危险化学品及粉尘的燃烧与爆炸、火灾爆炸事故的技术预防措施、限制事故危害范围的工程技术措施、压力容器安全、危险化学品储运安全等7章，第1、2、3、4、5、7章由董文庚编写，第6章由苏昭桂编写。无机化学、有机化学、物理化学、化工原理、流体力学、工程力学等课程应作为本门课程的前导基础课程。书中所介绍的基础知识和事故预防与控制措施并不局限于化工过程，凡是涉及危险化学品的领域都基本适用，有利于扩大读者的知识面，也有利于提高学生工作的适应能力。

本书在编写过程中，参阅了大量相关专著、教材、论文和国家标准，吸

收了国内外危险化学品安全的新理论、新原理、新技术等知识，在笔者化工安全讲义的基础上，经多次补充、修改、完善而成。本书编写原则是尽量结合实际、力求通俗易懂且实用。

在此，对引用文献的作者致以真诚的谢意，对编写、出版此书给予帮助、支持、鼓励的专家们致以谢意。

化工安全领域知识浩繁，本书仅涉及“一角”，加之时间不足，书中难免出现不妥或错误，恳请安全工程界的广大同仁不吝指正，以便改正提高。

编著者

2007 年元月

目 次

1 化工过程事故预防的基础理论	1
1.1 危险与危险源	1
1.1.1 危险	1
1.1.2 危险源	1
1.1.3 重大危险源	2
1.1.4 危险有害因素	3
1.2 事故、事故隐患与安全措施	4
1.2.1 事故	4
1.2.2 事故隐患	4
1.2.3 安全措施	5
1.3 风险与风险控制	5
1.3.1 风险	5
1.3.2 风险的管理控制	7
1.4 系统安全及危险控制	9
1.4.1 系统安全	9
1.4.2 系统安全工程的基本内容	10
1.5 事故预防原理	11
1.5.1 海因里希事故法则及工业安全公理	11
1.5.2 事故预防与控制原理	12
1.6 事故预防与控制的安全技术	13
1.6.1 预防事故发生的安全技术	13
1.6.2 降低事故损失的安全技术	15
1.6.3 人员失误的控制措施	16
思考题	18
2 危险化学品与单元操作危险性分析	19
2.1 危险化学品分类	19

2.1.1	爆炸品	19
2.1.2	压缩气体和液化气体	20
2.1.3	易燃液体	22
2.1.4	易燃固体、自燃物品和遇湿易燃物品	23
2.1.5	氧化剂和有机过氧化物	26
2.1.6	有毒品	28
2.1.7	放射性物品	29
2.1.8	腐蚀品	30
2.2	化学品安全技术说明书和安全标签	31
2.2.1	化学品安全技术说明书	31
2.2.2	危险化学品安全标签	33
2.3	典型化学反应及其危险性分析	34
2.3.1	氧化反应	34
2.3.2	还原反应	35
2.3.3	硝化反应	37
2.3.4	氯化	39
2.3.5	裂解反应	40
2.3.6	聚合反应	41
2.3.7	磺化	43
2.3.8	烷基化	43
2.3.9	重氮化	44
2.4	化工单元操作及其危险性分析	44
2.4.1	加热操作及其危险性分析	45
2.4.2	冷却、冷凝、冷冻操作及其危险性分析	45
2.4.3	筛分、过滤操作及其危险性分析	48
2.4.4	粉碎、混合操作及其危险性分析	50
2.4.5	物料输送操作及其危险性分析	51
2.4.6	干燥、蒸发与蒸馏操作及其危险性分析	52
2.4.7	熔融操作及其危险性分析	54
2.4.8	加压、减压操作及其危险性分析	54
	思考题	54
3	危险化学品及粉尘的燃烧与爆炸	56
3.1	燃烧	56

3.1.1	燃烧的定义与本质	56
3.1.2	燃烧的条件	57
3.1.3	燃烧形式与燃烧过程	60
3.2	闪点、燃点与自燃点	64
3.2.1	闪燃与闪点	64
3.2.2	点燃与燃点	67
3.2.3	自燃与自燃点	67
3.3	燃烧理论	71
3.3.1	活化能理论	71
3.3.2	过氧化物理论	72
3.3.3	连锁反应理论	73
3.4	燃烧速度	74
3.4.1	气体燃烧速度	74
3.4.2	液体燃烧速度	76
3.4.3	固体燃烧速度	77
3.5	燃烧热、燃烧温度	77
3.5.1	燃烧热	77
3.5.2	燃烧温度	77
3.6	爆炸的概念及其分类	78
3.6.1	爆炸的概念及其特征	78
3.6.2	爆炸的破坏作用	78
3.6.3	爆炸的分类	79
3.7	危险化学品的爆炸类型	80
3.7.1	简单分解爆炸	80
3.7.2	复杂分解爆炸	81
3.7.3	爆炸性混合气体爆炸	81
3.7.4	粉尘爆炸	83
3.7.5	熔盐池爆炸	83
3.7.6	化学爆炸的三要素	83
3.8	爆炸极限及其影响因素	84
3.8.1	爆炸极限的概念	84
3.8.2	爆炸极限的影响因素	86
3.8.3	爆炸极限参数的作用	89
3.9	爆炸极限的计算方法	89

3.9.1	爆炸极限数据的获取方法	89
3.9.2	爆炸极限的计算方法	89
3.9.3	三元组分爆炸范围图	94
3.10	爆炸温度与爆炸压力	97
3.10.1	爆炸温度与压力	97
3.10.2	爆炸强度与爆炸指数	100
3.11	爆轰	102
3.11.1	爆轰的形成	102
3.11.2	爆轰形成的条件	103
3.11.3	爆轰波的破坏作用	104
3.12	粉尘爆炸	105
3.12.1	粉尘爆炸的机理	105
3.12.2	粉尘爆炸的条件	106
3.12.3	粉尘爆炸指数	107
3.12.4	粉尘爆炸的特点	108
3.12.5	粉尘爆炸的影响因素	109
	思考题	109
4	火灾爆炸事故的技术预防措施	111
4.1	火灾爆炸事故物质条件的排除	111
4.1.1	取代或控制用量	111
4.1.2	防止泄漏	112
4.1.3	通风排气	112
4.1.4	惰性化处理	113
4.1.5	工艺参数的安全控制	116
4.1.6	气体检测与报警	120
4.1.7	排水暗沟爆炸性蒸气	130
4.2	防范明火与高温表面	132
4.2.1	明火	132
4.2.2	高温热表面	133
4.3	消除摩擦与撞击	133
4.3.1	摩擦、撞击及其危害	133
4.3.2	不发火地面	134
4.4	防止电气火花	137

4.4.1	电火花与电弧	137
4.4.2	爆炸危险场所危险区域划定	137
4.4.3	电气防爆的原理	139
4.4.4	防爆电气设备分类、特性及选型	141
4.4.5	动力、电气线路、照明及油开关防火防爆措施	148
4.4.6	变压器防火防爆措施	150
4.5	静电的危害及防范措施	151
4.5.1	静电的产生与静电电荷的积累	151
4.5.2	静电的危害及引发燃烧爆炸事故的条件	154
4.5.3	人体静电	159
4.5.4	粉状物料输送过程中产生的静电	161
4.5.5	液体在管道内流动产生的静电	163
4.5.6	预防和控制静电危害的技术措施	165
4.6	预防雷击的安全技术	172
4.6.1	名词术语	172
4.6.2	雷电的产生、分类及其危害	172
4.6.3	防雷的基本措施	174
4.6.4	化工工艺装置和储罐区防雷的措施	176
	思考题	177
5	限制事故危害范围的工程技术措施	178
5.1	化工企业厂址定位的安全措施	178
5.2	工厂总体平面布置中的安全	180
5.2.1	总体平面布置的基本原则	180
5.2.2	总体平面布置的基本要求	180
5.2.3	石油化工企业的主要功能区	181
5.3	工艺装置间的安全距离——防火间距	182
5.4	生产场所火灾危险性分类	188
5.5	建筑构件耐火极限与建筑物耐火等级	192
5.5.1	建筑构件耐火极限	192
5.5.2	建筑物耐火等级	194
5.6	建筑物设计及装置布置防爆措施	197
5.6.1	有爆炸危险装置的布置	197
5.6.2	有爆炸危险厂房的平面配置	197

5.6.3 防爆墙、防爆门、防爆窗	197
5.6.4 厂房防爆泄压	198
5.6.5 安全疏散	199
5.7 火灾分类和灭火的基本原理及基本方法	200
5.7.1 火灾的定义与分类	200
5.7.2 灭火的基本原理与方法	201
5.8 常用灭火剂与灭火器	202
5.8.1 灭火剂	202
5.8.2 灭火器	207
5.8.3 灭火器的配置	211
5.9 灭火设施及其基本要求	219
5.9.1 消防给水设施	219
5.9.2 消防用水	221
5.9.3 低倍数泡沫灭火系统	221
5.9.4 干粉灭火系统	222
5.9.5 蒸汽灭火系统	223
5.10 危险化学品火灾扑救	223
5.10.1 扑救危险化学品火灾的基本要求	223
5.10.2 危险化学品火灾的扑救要点	224
5.11 爆炸阻隔技术	229
5.11.1 机械阻火器	230
5.11.2 液封阻火器	235
5.11.3 料封阻火器	236
5.11.4 主动式隔爆装置	236
5.11.5 被动式隔爆装置	238
思考题	241
6 压力容器安全	242
6.1 概述	242
6.1.1 压力容器的概念	242
6.1.2 压力容器的分类	242
6.1.3 压力容器的特点	243
6.2 压力容器的结构及其特征	244
6.2.1 压力容器的结构	244

6.2.2 压力容器的结构特征	245
6.3 压力容器的破裂形式	248
6.3.1 韧性破裂	248
6.3.2 脆性破裂	248
6.3.3 疲劳破裂	249
6.3.4 腐蚀破裂	249
6.3.5 蠕变破裂	250
6.4 压力容器的安全装置	250
6.4.1 安全泄压装置	250
6.4.2 安全计量装置	261
6.4.3 安全泄放量的计算	262
6.5 压力容器的定期检验	267
6.5.1 定期检验的周期	267
6.5.2 定期检验的内容	268
6.5.3 耐压试验	269
6.6 常见压力容器安全技术	269
6.6.1 蒸汽锅炉的安全技术	269
6.6.2 气瓶安全技术	275
6.6.3 压力管道安全技术	279
6.7 压力容器事故调查、分析与处理	281
6.7.1 事故分类	281
6.7.2 事故报告	282
6.7.3 事故抢救	283
6.7.4 事故调查	283
6.7.5 事故诊断与分析	286
6.7.6 事故处理	286
6.8 压力容器事故案例分析	287
6.8.1 压力容器结构设计不合理,造成蒸煮锅爆炸	287
6.8.2 美国菲利浦石油公司大爆炸事故分析	289
6.8.3 安全阀失灵,反应釜爆炸	291
思考题	293
7 危险化学品储运安全	295
7.1 危险化学品储运概述	295

7.2 危险化学品储存方式与安全	295
7.2.1 危险化学品储存方式	295
7.2.2 危险化学品储存的安全要求	297
7.3 危险化学品运输方式与安全	302
7.3.1 危险化学品运输方式	302
7.3.2 危险化学品运输安全要求	302
7.3.3 包装分类与包装性能试验	303
7.3.4 包装的基本要求	304
7.3.5 危险化学品的装卸与搬运	305
7.4 危险化学品储运安全管理	306
7.4.1 危险化学品储存的安全管理	306
7.4.2 危险化学品运输的安全管理	310
思考题	315
附录	316
附录 1 化工生产安全常用的国家、部委标准、规范及规章的目录	316
附录 2 工业企业设计卫生标准	318
索引	337
参考文献	351

1 化工过程事故预防的基础理论

安全生产是指在社会生产过程中控制和减少职业危害因素，避免或减小劳动场所的风险，保障从事劳动人员和相关人员的人身安全健康以及劳动场所的设备、财产安全。安全生产应是广义的概念，不仅指企业在生产过程中的安全，还应是全社会范围内的生产安全。

安全生产是一个相对的概念，尽管人类社会采取各种方法、措施避免和消除生产事故的发生，但生产与生产事故总是相伴相生。自从人类进入工业社会后，机器设备的大量使用以及新技术的不断运用，在为人类创造大量社会物质财富的同时，也给人类、企业生产、社会环境带来了工业风险和诸多安全问题。

1.1 危险与危险源

1.1.1 危险

危险（hazard）的定义是可能产生潜在损失的征兆。损失包括人员伤亡和财产损失两个方面，财产损失即经济损失，包括直接经济损失和间接经济损失。征兆可以理解为能力与倾向，也就是能够造成人员伤亡和财产损失的能力与倾向。

与危险相对的另一个概念是安全（safety），其基本含义是使人的身心免受外界不利因素影响的状态及其保证条件。

1.1.2 危险源

危险源（hazard-a source of danger）是导致事故发生的根源，是具有可能意外释放的能量和（或）危险物质的生产装置、设施或场所。

存在危险物质或能量是构成危险源的必要和充分条件；存在危险源是发生事故的必要条件。

主要由动能、热能、电能等物理能量构成的危险源，可称为能量危险源；主要由易燃、易爆、有毒、有害等危险物质构成的危险源，可称为物质危险源。从本质上说，危险物质也是能量，是化学能量，其导致事故的过程，也是化学能量释放的过程。

危险源是由物质、设施、设备、状态等具有的特性决定的。例如，有可燃物存在，就是火灾的危险源；有易燃的气体、蒸气存在，就是火灾或爆炸的危险源；在高空作业，就是坠落的风险源；有毒性物质存在，就是中毒的危险源；有难溶粉尘存在，就是尘肺病的危险源；等等。

众所周知，矿山开采、建筑施工、危险化学品生产使用是三个危险性比较大的生产行业。化工生产过程中所涉及的化学品大部分属于易燃、易爆、有毒的物质，工艺过程参数大多属于高温、高压，设备运转主要靠电能驱动，物料温度控制介质主要是水蒸气、高温导热油、制冷剂，气体物质存在许多情况下是处于压缩和液化状态，高大的化工设备在夏季易遭受雷击，人员在高大设备上巡检或工作属于高处作业，人员进入设备内部维修常遇到缺氧和毒气浓度超标的危险。

可以说，在人们日常的生活和工作中，危险源到处存在，但危险源不能等同于事故，危险源中的能量或危险物质被有效控制的时候就不会出现事故。家庭厨房所用的煤气或天然气是易燃气体，燃气管道和燃气灶就是危险源，在燃气管道和燃气灶没有故障、操作正确的情况下就不会出现事故，假如燃气管道发生泄漏或火焰意外熄灭而没有关闭阀门就可能发生火灾爆炸事故。

1.1.3 重大危险源

重大危险源的概念源自 1993 年国际劳工大会通过的《预防重大工业事故公约》(174 号公约)。重大危险源 (major hazard installation) 是指不论长期或临时地加工、生产、处理、搬运、使用或储存数量超过临界量的一种或多种危险物质，或多类危险物质的设施 (不包括核设施、军事设施以及设施现场之外的非管道的运输)。可以看出，重大危险源是依据危险物质的危险特性及其数量大小来界定的。重大危险源的判定标准都是由政府规定的，我国《重大危险源辨识》(GB 18218—2000) 依据危险物质的危险特性和数量将重大危险源分为生产场所重大危险源和贮存区重大危险源两种，并就危险物质的危害特性分别对爆炸性物质、易燃物质、活性化学物质和有毒物质作了生产场所和贮存区临界量的规定。表 1—1 列出部分有毒物质的临界量。

表 1—1 部分有毒物质的临界量

物 质 名 称	临 界 量/t	
	生产场所	贮 存 区
氨	40	100
氯	10	25
碳酰氯 (光气)	0.30	0.75
一氧化碳	2	5
苯	20	50
甲苯	40	100
二甲苯	40	100

危险物质是指一种物质或若干种物质的混合物，由于它的化学、物理或毒性特性，使其具有易导致火灾、爆炸或中毒的危险。生产场所是指危险物质的生产、加工及使用等场所，包括生产、加工及使用等过程中的中间贮罐存放区及半成品、成品的周转库房。贮存区是指专门用于贮存危险物质的贮罐或仓库组成的相对独立的区域。临界量是指对于某种或某类危险物质规定的数量，若单元中的物质数量等于或超过该数量，则该单元定为重大危险源。单元是指一个（套）生产装置、设施或场所，或同属一个工厂的且边缘距离小于500 m的几个（套）生产装置、设施或场所。

判定重大危险源时，首先应根据实际情况，划分用于判定重大危险源的单元。如果单元内存在的危险物质为单一品种，则该物质的数量即为单元内危险物质的总量；若等于或超过相应的临界量，则定为重大危险源。如果单元内存在的危险物质为多品种时，则按式（1-1）计算，若满足式（1-1），则定为重大危险源：

$$\frac{q_1}{Q_1} + \frac{q_2}{Q_2} + \cdots + \frac{q_n}{Q_n} \geq 1 \quad (1-1)$$

式中 q_n ——每种危险物质实际存在量，t；

Q_n ——与各危险物质相对应的生产场所或贮存区的临界量，t。

每种危险物质实际存在量一般以可能存在的最大的物质质量为计算值，而不是以平时的量为准。比如，一个10 m³储罐平时只用到5 m³，特殊情况下才装满，计算时应该以10 m³为准。

重大危险源与重大工业事故是密切相关的。重大危险源是导致重大工业事故的根源，但可能导致重大工业事故的设施，并不一定是重大危险源。

重大危险源实质上是管理的概念，体现了在事故预防中分清主次、抓住主要矛盾的思想，是国家或地区对于可能发生重大工业事故的设备、设施、场所采取预先、重点、宏观和统一控制的思想。我国对重大危险源的监督管理有强制性的法律要求。

重大危险源主要针对的是物质危险源，是易燃、易爆、有毒、有害等危险物质的客观存在。当危险物质的量超过了规定的临界量时，即构成了应该着重关注、重点管理的重大危险源。

1.1.4 危险有害因素

危险有害因素是导致危险源发生事故的各种因素，包括两个方面：一是导致危险物质和（或）能量意外释放的各种因素；二是各种事故应急措施的缺失，或导致事故应急失效的各种因素。

当危险源的所有危险有害因素都得到有效控制时，即可保证危险源的危险物质和（或）能量不会发生意外释放，即使发生了意外事故，也可通过迅速、有效的事故应急措施，避免人员伤亡，减少事故损失。

除上述定义外，危险有害因素还具有另一种定义：危险因素是指能对人造成伤亡或对

物造成突发性损坏的因素；有害因素是指能影响人的身体健康，导致疾病，或对物造成慢性损坏的因素。危险因素强调突发性和瞬间作用，有害因素强调在一定时间范围内的缓慢、积累作用。

在安全评价中，常常采用后一种定义并结合物质性质的特点，对特定的设施或场所进行与危险物质有关的危险有害因素分析。

1.2 事故、事故隐患与安全措施

1.2.1 事故

事故是造成人员伤亡、财产损失、环境破坏等后果的、违背人们意愿的意外事件。

事故的发生往往伴随着能量和（或）危险物质的意外释放，这是构成一起事故的必要和充分条件。

对于没有导致人员伤亡、财产损失、环境破坏等后果的意外事件，可称为险肇事故（或称为险肇事件），在英文中称为“near-miss”。

在国际劳工组织（ILO）的《预防重大工业事故公约》（174号公约）中，将重大工业事故定义为“在重大危险设施中的一项活动中出现意外的突发性的事故，如严重泄漏、火灾或爆炸，其中涉及一种或多种危险物质，并导致对工人、公众或环境造成即刻的或延期的严重危害”。

重大工业事故具有以下特征：

（1）强调的是在工业活动中、在重大危险设施内发生的事故。

（2）事故类别主要是严重泄漏、火灾或爆炸。

（3）事故中产生危害的是危险物质。

（4）由于是危险物质的严重泄漏、火灾或爆炸事故，因而不但对工人，更重要的是对设施周围的公众或环境造成严重危害。

1.2.2 事故隐患

事故隐患是控制危险源的安全措施失效或缺少的状态。具体地说，隐患是指任何能直接或间接导致伤害或疾病、财产损失、工作场所环境破坏的物的不安全状态、人的不安全行为、有害的作业环境和安全管理缺陷。

物的不安全状态是使事故可能发生的物质条件或不安全物体条件。物质是指火灾、爆炸性物质及毒性物质；物体是指防护、保险、信号等装置缺乏或有缺陷，设备、设施、工具、附件有缺陷，个人防护用品用具缺少或有缺陷，以及生产（施工）场地环境不良。

人的不安全行为是指违反安全规则或安全常识，使事故有可能发生的行为，包括如下13类：操作错误、忽视安全、忽视警告；造成安全装置失效；使用不安全设备；用手代替工具操作；物体（成品、材料、工具等）存放不当；冒险进入危险场所；攀坐不安全位置；在起吊物下停留；机器运转时加油、修理、调整、清扫等；有分散注意力的行为；必