

The top half of the cover features a stylized illustration of industrial flames in shades of orange and red, rising from a dark base. A dashed orange arc and a dashed circle are superimposed on the background.

工业火灾 预防与控制

舒中俊 徐晓楠 主编

GONGYE HUOZAI
YUFANG YU KONGZHI

化学工业出版社

舒中俊 徐晓楠 主编

工业火灾 预防与控制



化学工业出版社

· 北京 ·

前言

本书所论述的工业火灾主要包括石油化工、机械制造、能源生产、纺织轻工和物流仓储等行业在生产活动过程中所发生的火灾。就国家而言,这些行业都属于国民经济的支柱性产业,不仅是社会物质财富的主要生产者,也是社会物质财富最为集中的行业。由于原料、产品、工艺、环境和管理复杂性与特殊性,使得这些行业具有较大的潜在火灾危险性,一旦发生火灾爆炸事故,往往会造成严重的经济损失,特别是对于劳动密集型生产企业突发性火灾还会对劳动者的生命安全造成巨大威胁。自改革开放以来,我国经济获得了高速发展,工业生产取得了举世瞩目的成就。同时,三十多年来不时发生的重特大工业火灾事故也不断地给我们敲响警钟。从20世纪80年代的黄岛油库火灾,到随后90年代深圳清水湾危险化学品仓库和北京东方化工厂的火灾爆炸,再到2005年吉林双苯厂火灾,无不给我们带来惨痛的教训。因此,在贯彻落实科学发展观、构建和谐社会的新形势下,进一步加强工业火灾发生、发展和熄灭的理论研究以及消防工程技术及应用研究,减轻工业火灾危害具有重要的现实意义。

本书以广义的工业火灾为研究对象,从火灾风险评估管理和工程技术防护两个大的方面对工业火灾预防与控制进行了较为全面、深入的论述。本书由舒中俊、徐晓楠主编。全书共分8章。第1章为绪论,由舒中俊撰稿,重点简述国内外工业火灾爆炸事故的危害、工业火灾爆炸事故的原因分析和工业火灾预防与控制的基本方法。第2章由陈颖撰稿,主要论述了工业火灾风险半定量评估方法。第3章由杨玉胜撰稿,重点讨论化学工业事故风险定量评估方法的内容、程序及应用。第4章由王贤政、李静波、李思成和舒中俊撰稿,主要论述工业建筑防火设计,包括选址布局、结构防火防爆设计和厂房的防烟与排烟设计。第5章由李强撰稿,主要论述工业火灾监控技术的组成及应用。第6章由李智慧、舒中俊撰稿,论述了国内外仓储火灾试验研究和仓库灭火系统的设计。第7章由徐晓楠、杨迎撰稿,主要论述易燃液体不同储存形式的火灾特点和灭火技术的设计应用。第8章由孙青辉、李毅明、舒中俊撰稿,

主要论述工业场所电缆及电气设备的火灾危险及防火设计。本书在编撰过程中，参阅引用了大量国内外文献资料，每章的主要参考文献都在本章正文后单独列出，在此，编著者对文献的作者们表示由衷的谢意。同时，感谢在读研究生潘翀和胡冬冬博士为本书撰写所做的文献查阅与整理工作。

由于水平有限，加之时间仓促，书中难免存在不足之处，敬请读者批评指正。

编者

2010 年 1 月

目 录

1 绪论	1
1.1 工业火灾的危害	1
1.2 工业火灾爆炸事故类型及原因分析	5
1.2.1 工业火灾爆炸原因构成	5
1.2.2 工业火灾爆炸原因类型	6
1.3 工业火灾预防与控制工程	8
1.3.1 性能化防火设计的基本内容	8
1.3.2 火灾爆炸场景辨识	9
1.3.3 后果分析	11
1.3.4 替代方案的评价	13
1.4 工业火灾风险管理	13
参考文献	14
2 工业火灾事故半定量风险评估	15
2.1 风险评估方法概述	15
2.2 风险指数化	17
2.2.1 火灾风险指数	17
2.2.2 Gretener 方法	18
2.2.3 Dow 火灾、爆炸指数法	18
2.2.4 Mond 火灾、爆炸及毒性指数法	19
2.2.5 生命安全评价系统	19
2.3 Dow 火灾、爆炸危险指数评价法	21
2.3.1 资料准备	21
2.3.2 风险分析评价程序	22
2.3.3 生产单元危险分析汇总	27
2.3.4 基本预防和安全措施	28
2.4 蒙德火灾、爆炸及毒性危险指数法	28
2.4.1 蒙德法评价程序	29
2.4.2 单元危险性初期评价	29
2.4.3 单元危险性初期评价结果计算	33
2.4.4 单元的补偿评价	35
参考文献	36

3 化学工业事故定量风险评估 37

3.1 定量风险评估方法概述	37
3.1.1 定量风险评估的基本内容	37
3.1.2 定量风险评估的基本步骤	38
3.1.3 风险评估的作用	39
3.1.4 风险评价模型与软件开发现状	40
3.2 危险辨识与初步筛选	40
3.2.1 危险辨识	40
3.2.2 初步筛选	41
3.3 事故情景分析	44
3.3.1 事故情景分析及其目的	44
3.3.2 事故情景分析方法	45
3.4 事故后果分析	45
3.4.1 概述	45
3.4.2 危险化学品的泄漏	47
3.4.3 危险化学品的扩散	50
3.4.4 火灾事故后果	56
3.4.5 爆炸事故后果	61
3.4.6 中毒事故后果	66
3.5 事故频率分析	68
3.5.1 事故频率分析的概念	68
3.5.2 事故频率分析的方法	68
3.5.3 工艺设施的泄漏频率	69
3.5.4 事故情景频率分析	70
3.6 风险的量化	73
3.6.1 人员死亡概率的计算方法	73
3.6.2 事故风险的计算	75
3.7 风险控制	77
3.7.1 概述	77
3.7.2 风险标准	78
3.7.3 风险控制途径	80
参考文献	80

4 工业建筑防火设计 82

4.1 工厂的选址与布局	82
4.1.1 防火间距	82
4.1.2 工厂消防给水设计要求	93

4.1.3 防火防爆布局一般性要求	96
4.2 结构防火与防爆	96
4.2.1 建筑材料	97
4.2.2 耐火性能的计算	100
4.2.3 耐火试验	102
4.2.4 防火墙	103
4.2.5 防火门和防火卷帘	105
4.2.6 结构防爆	107
4.2.7 现代工业厂房防火分区的设计	110
4.3 防烟与排烟	110
4.3.1 烟气隔离的类型	111
4.3.2 室内火灾烟气控制	111
4.3.3 屋顶排烟	118
4.3.4 装有水喷淋建筑中的排烟	121
参考文献	123

5 工业火灾监控 125

5.1 概论	125
5.2 早期火灾探测预警技术	126
5.2.1 GO-DEX 系统的结构特点	126
5.2.2 GO-DEX 早期火灾探测报警系统工作原理	127
5.2.3 GO-DEX 系统与传统感烟火灾探测系统的性能比较	129
5.2.4 GO-DEX 系统的安装使用	130
5.2.5 GO-DEX 系统工程应用实例——电信机房的早期火灾探测	132
5.3 石油化工储罐区火灾监控技术	133
5.3.1 石化储罐区火灾危险性及监测参数	133
5.3.2 石油储罐区火灾监控系统设计及构成	133
5.3.3 消防设备联动控制及要求	135
5.3.4 石化储罐区火灾监控系统工程实例	135
5.4 基于工业生产过程的综合性火灾监控技术	137
5.4.1 SL-M300 消防安全网络化监控系统	138
5.4.2 SL-C300 远程网络客户服务中心系统	139
5.4.3 SL-S200 工业消防水喷雾灭火	139
5.4.4 SL-D500 工业专用多级报警线型感温探测器	140
5.4.5 综合性工业消防安全监控系统工程实例	141
参考文献	142

6 仓储防火 144

6.1	现代仓库的基本形式及火灾危险	144
6.2	仓储火灾试验	146
6.2.1	仓储货物分级	146
6.2.2	仓储物品的燃烧试验	149
6.2.3	小尺度仓储火灾试验	150
6.2.4	大尺度仓储火灾试验	156
6.3	仓库水喷淋灭火系统的设计要求	157
6.3.1	天花板水喷淋	157
6.3.2	货架内水喷淋系统	159
6.3.3	火灾早期抑制快速反应喷淋系统	161
6.4	设有水喷淋的仓库火灾模型	161
6.4.1	仓库火灾模型分析流程	162
6.4.2	自由燃烧释热速率和火焰传播速率	162
6.4.3	仓库火羽和顶棚射流	163
6.4.4	水喷淋动作模型	164
6.4.5	水流-火羽穿透模型	165
6.4.6	实际喷水强度对释热速率的抑制作用	165
	参考文献	166

7 易燃液体储存防火 168

7.1	易燃液体的着火与灭火	168
7.1.1	易燃液体的着火	168
7.1.2	易燃液体燃烧的特征参数	170
7.1.3	易燃液体灭火原理和方法	177
7.2	储罐防火	180
7.2.1	储罐火灾及分类	180
7.2.2	普通储罐设计	184
7.2.3	油罐燃烧速率和间隔标准	186
7.2.4	储罐内蒸汽的应急泄放	189
7.2.5	储罐火灾控制	194
7.3	桶装储存防火	196
7.3.1	桶形设计和存储方式	196
7.3.2	桶形储罐失效时间和失效模式	197
7.3.3	桶形储罐的灭火控制系统	200
7.4	小包装易燃液体储存防火	201
7.4.1	容器类型	201
7.4.2	小包装易燃液体扑救	202

7.4.3 容器失效时间和失效模式	203
7.4.4 易燃液体小型容器的自动喷淋保护系统	205
参考文献	208

8 电缆和电气设备防火 210

8.1 电缆的构造、类型及使用	210
8.2 电缆燃烧性能试验	211
8.2.1 概述	211
8.2.2 电缆垂直桥架火灾试验	214
8.2.3 电缆水平桥架火灾试验	216
8.2.4 电缆火灾灭火试验	218
8.3 电缆防火设计	220
8.3.1 电缆的耐火保护	220
8.3.2 电缆防火保护指南及工程应用	221
8.4 电子器材及设备防火	222
8.4.1 电子元件的可燃性	222
8.4.2 配电柜的可燃性	223
8.4.3 电子设备的易损性	225
8.4.4 电子设备火灾的探测与扑救	225
8.5 变压器防火设计	226
参考文献	227

1

绪论

1.1 工业火灾的危害

燃烧与火是最常见的自然现象之一。火的利用是人类进入文明时代的开端，在漫长的历史长河中，火的利用极大地促进了人类文明的进程，从钻木取火到飞船上天，人类已将火的利用发挥到了极致；与此同时，由于用火不慎、自燃、雷击以及故意纵火等各种原因造成的火灾爆炸事故也如影随形，一直威胁并危害着人类社会的安全。随着城市形成、工业革命出现到今天信息时代兴起，人类生产、生活和社会的物质财富越来越集中，人类生产、生活中触发火灾的因素也越来越多，火灾对人类的威胁也在不断增大。工业是人类社会全部生产活动的集合体，直接为人类社会的生存与发展提供物质基础，是社会物质财富最为集中的行业，同时也是火灾威胁最为严重行业。历史上国内外的工业火灾爆炸事故已给人类社会造成了惨重的损失，同时也给我们提供了宝贵的经验教训。

美国消防协会（NFPA）每年对美国的火灾情况进行统计并发布年度评述报告。在 NFPA 的统计中，在行业分类时，将基础工业、公用行业、制造业、仓储业都划归为工业类，因此，本文讨论的工业火灾爆炸就是指这些行业发生的火灾爆炸事故。NFPA 曾对 20 世纪 40~90 年代发生的 50 起财产损失均在 3000 万美元（按 1990 年物价计算）以上火灾爆炸事故进行了统计分析。统计数据表明：有 17 起（占总数 27%）火灾爆炸事故发生在仓储场所，其中半数与纸品、塑料和普通货物存储相关。此外，还有几起发生在易燃液体储存场所和冷库之中，调查表明，这些仓储火灾之所以损失惨重，有一共同的原因是这些场所安装的水喷淋系统失效，未能有效地控制和扑灭初期火灾。还有 12 起（19%）发生在炼油厂，在这些场所大量存储和使用的易燃易爆液体原料和产品具有发生重特大火灾事故的潜在危险，一旦发生火灾爆炸事故，由于更换被毁的贵重工艺设备而使财产损失剧增。表 1-1 列出了 1980~2000 年之间总损失超过 1 亿美元的火灾爆炸事故。

英国消防协会每年对损失在 100 万英镑以上的火灾爆炸事故也进行统计分析。1986 年度的统计数据表明，发生在典型工业场所的重大火灾爆炸事故分布情况是：普通仓库 13 起，纺织厂 12 起，木业、家具、纸品和印刷共 12 起。其中三起较重的火灾爆炸事故分别是：一起普通仓库火灾，损失 1000 万英镑；一起地毯仓库火

表 1-1 美国 1980~2000 年重特大工业火灾一览表

年份	地区	场所	火灾爆炸类型	财产损失/百万美元
1989	Pasadena, TX	化工厂	蒸气云爆炸	750
1999	Dearborn, MI	发电站	气体和粉尘爆炸	650
1995	Lawrence, MA	纺织厂	羊毛粉尘爆炸火灾	500
1988	Norco, LA	炼油厂	蒸气云爆炸	330
1999	The Grammercy Works, LA	铝厂	因蒸气超压导致压力容器爆炸	300
1996	LA	普通仓库	纵火火灾	280
1999	Richmond Ca	炼油厂	气体/蒸气爆炸	247
1987	Pampa, TX	化工厂	蒸气云爆炸	160
1995	GA	地毯生产厂	油池火灾	200
1999	Missouri	发电厂	气体爆炸	196
1984	Tinker AFB, OK	喷气发动机维修厂	屋顶火灾	138
1985	Elizabeth, NJ	仓库	气雾剂储存火灾	123
1982	Falls Township, PA	普通仓库	气雾剂储存火灾	100
1984	Remeoville, IL	炼油厂	蒸气云爆炸	100
1988	Henderson, NV	火箭推进剂工厂	高氯酸铵爆炸	103
1994	TX	甲醇生产厂	爆炸火灾	116
1991	Madison, WI	冷库	食品仓储火灾	100
1992	Missouri	冷库	聚丙烯隔热泡沫火灾	100
1995	TX	工业化学品仓库	尚未确定	100

灾, 损失 900 万英镑; 还有一起小工具生产厂火灾, 损失 800 万英镑。

就财产损失而言, 近二十年来, 国际上最严重的工业火灾爆炸事故当属 1988 年发生在北海 Piper Alpha 海上石油平台的气体爆炸火灾事故。据统计, 此次事故造成的经济损失超过 2.7 亿美元, 另外, 事故还造成了 167 名工人死亡。

我国自改革开放以来, 工业生产规模不断扩大, 为经济建设的高速发展提供了巨大的物质基础。与此同时, 在工业生产发展的同时, 火灾爆炸事故也经历了从少到多的快速发展变化, 以 1993 年深圳危险品仓库的特大爆炸火灾事故和 1997 年北京东方化工厂特大火灾爆炸事故为典型代表, 到 20 世纪 90 年代我国工业火灾爆炸事故的危害达到了历史的最高峰。进入 21 世纪以后, 工业火灾爆炸事故总体呈回落趋势, 但危害程度仍不容乐观。表 1-2 列出了最近几年 (2005~2008 年) 我国较大工业火灾爆炸事故的统计情况。

表 1-2 2005~2008 年我国工业火灾事故统计一览表

时间	地区	场所	火灾爆炸类型	直接财产损失(万元) /死亡人数
2005. 1. 28	天津河西	居民楼	燃气泄漏爆炸	111. 6
2005. 2. 6	广东茂名	化工厂	违章操作引起的可燃液体储罐爆炸	171. 4
2005. 4. 14	福建南平	地下仓库	违章操作引起的库房火灾	238. 7
2005. 5. 13	新疆华电	发电厂	焊割导致可燃液体爆炸火灾	428. 8
2005. 5. 14	甘肃张掖	橡胶厂	违章操作引起的厂房火灾	425. 7
2005. 8. 2	安徽马鞍山	冷库	电气故障引起的库房火灾	361. 5

续表

时间	地区	场所	火灾爆炸类型	直接财产损失(万元) /死亡人数
2005.8.4	四川官阙	酒库	静电导致的可燃液体储罐火灾	479
2005.8.14	广东汕头	仓库	电气故障引发的库房火灾	880.2
2005.8.27	河北廊坊	仓储物流中心	电气故障引发的库房火灾	329.3
2005.9.2	四川资阳	工厂	焊割引起的库房火灾	157.8
2005.11.1	河北衡水	仓库	放火引起的库房火灾	109.7
2005.11.13	吉林市	化工厂	误操作导致苯胺装置爆炸起火	6908/8
2005.11.8	陕西安康	仓库	电气故障引起的库房火灾	192.7
2006.1.12	江西赣江	船舶	电气故障引起的船舶火灾	259.7
2006.1.31	海南五指山	淡水净化厂	放火导致工地火灾	137.6
2006.4.3	上海	仓库	违章操作引起的库房火灾	295.2
2006.5.8	新疆乌鲁木齐	仓库	电气故障引发的库房火灾	1413.9
2006.5.18	吉林松江	仓库	烟囱飞火导致的库房火灾	1399.3
2006.5.19	广东汕头	纺织厂	电气故障导致厂房火灾	67.4/13
2006.7.6	广西南宁	物流仓库	电气引发的库房火灾	260
2006.7.7	陕西咸阳	冷库	电气引起的库房火灾	590.4
2006.7.15	广东惠州	发电厂	雷击引起的易燃液体储罐爆炸火灾	207.2
2006.10.3	河北衡水	白酒储罐区	焊割引起的可燃液体爆炸火灾	170.8
2007.1.26	广东东莞	废旧塑料加工厂	照明线路短路引起的厂房火灾	8/13
2007.2.11	广东深圳	电脑配件厂	违章使用易燃易爆液体导致的厂房火灾	587/10
2007.3.23	广东江门	包装制品厂	电线短路引起的厂房火灾	55/3
2007.5.26	上海宝山	木屑加工厂	粉尘爆炸引发的厂房火灾	2/4
2007.8.20	江苏苏州	家具厂	易燃气体爆炸导致的厂房火灾	11.5/3
2007.9.7	天津津南	仓库	原因不明的库房火灾	7.9/4
2007.10.21	福建莆田	鞋面加工厂	疑为放火引起的“三合一”厂房火灾	30.1/13
2007.11.25	广东顺德	家具厂	电线短路引起厂房火灾	20/4
2008.2.27	广东深圳	再生物资回收公司	电线短路引起火灾	927.7/15
2008.5.21	浙江义乌	饰品加工厂	电线短路起火	—/6
2008.5.30	山西大同	木线厂	放火	14/6
2008.7.5	海南海口	卷烟厂	放火	4128
2008.7.17	上海奉贤	半成品仓库	原因不明	1300/3
2008.8.15	广东惠州	鞋业作坊	烘烤箱故障过热引燃箱内可燃物	7.6/6
2008.12.7	上海普陀	物流仓库	电气故障引发火灾	8372.8

在表 1-2 所列 38 起工业火灾爆炸事故中, 直接财产损失约 3.1 亿元, 死亡 111 人。其中仓储(包括冷库、酒库等)火灾共有 16 次, 占总数的 42.1%; 直接财产损失 1.7 亿元, 占总损失的 55%。由此可见, 目前仓储火灾不论是发生的次数, 还是所造成的直接财产损失, 都成为我国工业火灾中最主要的危害形式。需要特别指出的是, 尽管石油化工火灾发生的次数不多(只有 2 起), 但是其中吉林石化分公司双苯厂硝基苯精馏塔发生的爆炸火灾事故造成 8 人死亡, 60 人受伤, 直接经济损失 6908 万元, 并引发松花江水污染事件, 其危害之甚、影响之大, 是近十年来所少见的工业火灾爆炸事故。造成人员伤亡的主要原因是报警不及时, 另外, 将

生产、办公和员工宿舍设置在同一建筑内（俗称“三合一”厂房）也是造成群死群伤的重要原因。如 2008 年 2 月 27 日发生在深圳的某再生物资回收公司的火灾，就是典型的“三合一”厂房火灾，造成 15 人死亡。

从起火原因看，列前三位的分别是：电气故障起火（16 起）、违章操作（包括焊接，共 8 起）和放火（5 起）。可见电气故障也是工业火灾事故的主要起火原因。

从 20 世纪 80 年代以来，国际上仍然不时发生群死群伤的工业火灾爆炸事故。表 1-3 列出了 1980~2000 年之间，国际上有报道的死亡人数在 20 人以上的工业火灾爆炸事故。

表 1-3 国际上死亡超过 20 人的工业火灾爆炸事故一览表（1980~2000 年）

日期	地点	场所	火灾爆炸类型	死亡人数
1982. 12. 18~21	委内瑞拉 Caracas	油罐区	油品沸溢火灾	153
1984. 2. 25	巴西 Sao Paulo	汽油管道	汽油火灾	89
1984. 8. 16	巴西 Rio de Janeiro	海上油气平台	气体火灾	36
1984. 11. 19	墨西哥 墨西哥城	PEMEX LP-Gas 生产厂	BLEVEs	334
1985. 5. 19	意大利 Priola	石油化工厂	乙烯爆炸	23
1985. 6. 25	美国俄克拉荷马州 Jennings	烟火生产厂	烟火爆炸	21
1986. 4. 26	乌克兰 切尔诺贝利	核电站	反应堆爆炸火灾	31
1987	英国 Grangemouth	石油化工厂	碳氢气体爆炸火灾	67
1988. 7. 6	中国北海(North Sea)油气平台	Piper Alpha 油气站	气体爆炸火灾	167
1988. 11. 9	印度 Maharashtra	石油化工厂	石脑油火灾	25
1989. 10. 23	美国 Texas Pasadema	石油化工厂	乙烯蒸气云爆炸	23
1989	比利时 Antwerp	化工厂	乙醛爆炸	32
1990. 11. 5	印度 Maharashtra	石油化工厂	乙烷/丙烷火灾爆炸	35
1990. 12. 27	孟加拉国 Dhaka	制衣厂	服装火灾	23
1991. 1. 5	危地马拉	地热发电厂	—	21
1991. 6. 6	巴西	烟火厂	烟火爆炸	24
1991. 7. 12	印度 Meenampatti	烟火厂	烟火爆炸	38
1991. 9. 3	美国, N Carolina	食品加工厂	压力油喷洒火灾	25
1991. 10. 10	阿尔巴尼亚	食品仓库	仓库火灾	≥60
1991. 10. 15	印度	棉花加工厂	织物火灾	≥22
1992. 4. 22	墨西哥 Guadalajara	未确定工厂	己烷蒸气爆炸	170
1992. 4. 29	印度 New Delhi	仓库	未确定化学品爆炸	43
1993. 5. 10	泰国曼谷	玩具工厂	塑料火灾	88
1997. 9. 14	印度 Visag	炼油厂	LPG 储罐爆炸火灾	34
1998. 12. 11	巴西	烟火厂	烟火爆炸	41
2000. 5. 13	荷兰 Enschede	烟火厂	烟火爆炸	21

在表 1-3 所列特重大事故中，有多起发生在石化企业，如炼油厂。这些灾难性事故包括爆炸、爆燃火灾、沸腾液体膨胀蒸气爆炸（BLEVEs）以及流淌火灾等。在所列 26 起火灾爆炸事故中，报警不及时、人员疏散不畅是导致人员伤亡的主要原因。在表 1-3 中有两起事故发生在油/气生产平台，其中之一就是前面已提到的 Piper Alpha。这两起事故共有 203 人死亡，主要原因是缺乏及时报警、没有足够的

疏散时间，再加上起火平台处于孤立状态，人员无法疏散。此外，平台上的固定防火防爆设施存在缺陷未能发挥有效作用也是重要的因素。

还有五起是发生在烟花生产厂的爆炸事故。造成众多人员伤亡的原因除了保护方法失效外，还包括对危险操作工段没有充分隔离、对爆炸性原料的数量缺乏有效控制。此外，在这五家烟花生产厂中至少有两家紧邻人口稠密的城镇。

在表 1-3 中还有为大家所熟悉的切尔诺贝利核电站爆炸火灾事故。据报道，事故中有 31 人罹难，其中 28 人是受强辐射致病而死，他们中大部分是在火灾扑救和围绕反应堆安装防泄漏约束装置的过程中遭受核辐射的。因此，核电站的消防人员和其他事故应急人员在处理这些特殊事故时一定要做好充分的个人防护。

还有两起事故，大部分死难者出现在远离工厂的地方。其中一起从工厂泄漏的易燃液体流入了下水道，引起下水道大范围的连续爆炸；另一起是工业区汽油管道爆炸。这两起事故的现场都是地面，没有工业设施，但仍有事故发生，具有一定的代表性。这类事故警示我们，对于与工业设施相连的易燃液体管道火灾爆炸的危险要有充分的认识。

1.2 工业火灾爆炸事故类型及原因分析

1.2.1 工业火灾爆炸原因构成

分析火灾爆炸形成的因素可以发现，火灾爆炸多是人的不安全行为、物质的不安全状态、技术的不完全性保障及环境（自然和社会）的不良影响等因素相互作用造成的。一般认为，火灾从初始基因发展成为火灾爆炸灾害，通常有五个原因层次。

（1）基础原因 基础原因是造成事故并可能导致成灾的最原始、最基本的原因，主要包括管理的原因、基础教育的原因、法规制度建设的原因和历史的原因等。基础原因由国家、社会和上级主管部门所负有的责任构成。

（2）间接原因 间接原因是火灾爆炸事故的第二个原因层次，它是火灾爆炸事故的先导基因，主要包括技术的原因、管理的原因、教育的原因和员工的身体及精神状态的原因。间接原因主要由企事业单位和个人所负有的责任构成。

（3）直接原因 直接原因是在间接原因的基础上发展起来的，它直接导致事故的发生，主要包括人的原因（行为失误、行为错误和错误指令）、物的原因（物料和设备）和天灾及第三者行为（人为破坏和战争）。直接原因应由肇事者承担法律责任。

（4）事故扩大原因 事故扩大为火灾爆炸的原因主要包括事故发生不及时、应急处置不得力、防火防爆措施不完善和消防设施不完备等方面。

（5）成灾原因 事故扩大的原因得不到有效控制，就会导致最终火灾爆炸灾害的发生。

发生火灾爆炸灾害便是存在事故的证据，事故的背后必然存在不安全的物的形态和人的行为。即事故表现上是由直接原因造成的，直接原因又是间接原因所导致的必然结果，而间接原因的构成又与基础原因密切相关，这就是火灾爆炸灾害的连锁关系。显然，控制火灾爆炸以外的任何一个原因层次都可防止火灾爆炸的发生。

1.2.2 工业火灾爆炸原因类型

按照火灾爆炸事故的原因和特征不同，火灾爆炸事故基本上可分为由点火源引起和不需要点火源而由蓄热作用及潜热作用引发三种类型，即火源型火灾与爆炸、蓄热型和潜热型蒸气爆炸。每个类型又可细分两种，见表 1-4。

表 1-4 工业火灾爆炸事故分类

类型	种类
I 火源型火灾与爆炸	I-A 燃烧类的火灾与爆炸
	I-B 泄漏类的火灾与爆炸
II 蓄热型火灾与爆炸	II-A 自燃类的火灾与爆炸
	II-B 反应失控类的火灾与爆炸
III 潜热型火灾与爆炸	III-A 热传递类蒸气爆炸
	III-B 破坏平衡类蒸气爆炸

(1) 燃烧类火灾与爆炸 燃烧类火灾与爆炸是指可燃物质在点火源的作用下发生放热的分解、氧化等反应而导致的火灾与爆炸。当燃烧发生在敞开空间时，多以火灾的形式出现；当燃烧发生在相对密封的空间时，则以爆炸的形式出现。常见燃烧类火灾与爆炸的类型有：急剧燃烧引起的爆炸、粉尘爆炸、爆炸性混合气体的爆炸、气体的分解爆炸、爆炸性物质及混合危险物质的爆炸、设备材料类燃烧爆炸等。

预防燃烧类火灾的发生，主要从构成燃烧的三个必要条件考虑，控制住其中一个方面的条件，燃烧就不会发生。对燃烧类爆炸而言，其预防措施关键是破坏相对密闭空间形成爆炸性混合物的条件，并控制点火源的作用。

(2) 泄漏类火灾与爆炸 泄漏类火灾与爆炸是指处理、储存或输送可燃物的容器、机械和设备因某种原因造成开放而使可燃物质泄漏到外部或助燃物进入设备内部，遇点火源后引发的火灾爆炸。

泄漏的形式不仅指经常发生的由容器内部向外部的内压型泄漏，也包括负压状态的容器吸入空气所表现的外压型泄漏。造成泄漏的主要原因有：设备材料机械性能的降低、设备缺陷、人为过错（如误操作、设备缺陷、过量充装、设备维修保养不善）等。

预防泄漏类火灾与爆炸的发生，重点是防止泄漏，即通过防腐、提高设备强

度、防止温度异常、加强设备和附件的维修与检验等措施尽可能避免或延缓设备性能的下降；在设备的设计、制造和安装各阶段避免形成缺陷；通过加强管理、完善制度等措施防止误操作的发生。其次，要加强监测报警，及时发现泄漏并采取措施控制泄漏量的进一步扩大。

(3) 自燃类火灾与爆炸 自燃类火灾与爆炸是指因化学反应热蓄积引起自然发热而导致可燃物温度达到自燃点所引起的燃烧或爆炸。自燃类火灾与爆炸发生的条件是物质在正常条件下存在自发的放热反应，反应放热速度远远超过体系的散热速度，即体系蓄热能力大于散热能力。自燃的类型常见的有分解自燃、氧化自燃、吸水自燃、混触自燃、吸附自燃、发酵自燃以及聚合自燃等。

预防自燃类火灾与爆炸发生的主要措施是破坏反应热蓄积的条件。

(4) 反应失控类爆炸 反应失控类爆炸是指因化学反应热蓄积引起反应物质的蒸气压急剧上升而导致的爆炸。反应失控类爆炸发生的条件是：容器内存在放热的化学反应；反应放出的热量不能及时移出反应系统之外；系统内的低沸点液体在高温下蒸气压急剧上升或反应生成大量的气体；容器的安全泄压装置不能有效泄压。

预防反应失控类爆炸的措施主要是破坏造成反应热蓄积的条件。

(5) 热传递类蒸气爆炸 热传递类蒸气爆炸是指热从高温物体急剧地向与之接触的低温物体传递，使低温液体由液相瞬间转化成气相而引发的爆炸。

热传递引起的水蒸气爆炸虽不产生火焰，但破坏力却很大，有时还能形成冲击波。水蒸气爆炸的条件是少量的水与大量的高温熔融物接触，其爆炸机理是，当炽热的物体与水接触时，高温物体上的薄层水立即发生膜态沸腾，使得大部分水不能与高温物体接触；但当高温物的表面温度降到某一点时，大量的水便可直接接触高温表面，在极短的时间内，接触面上的水被加热成过热状态，随即发生核态沸腾，急剧气化发生爆炸。低沸点的液化气与高沸点液化气相互混溶或与水混合时，因热传递，低温液化气也有发生蒸气爆炸的可能性。

预防水蒸气爆炸的关键是避免水和高温物直接接触；对低温液化气的蒸气爆炸来说，重要的是防止不同种液化气的接触混合，防止二次爆炸的发生。

(6) 破坏平衡类蒸气爆炸 破坏平衡类蒸气爆炸是指因过热液体气-液平衡状态被破坏而造成的急剧相变所引发的爆炸。破坏平衡类蒸气爆炸发生的条件是：密闭容器中存在大量的过热状态的液体；过热状态的液体温度比标准沸点温度高很多；容器气相部分器壁破裂且在靠近液面处出现面积足够大的开口。上述三个条件都满足时，容器内原有的气-液平衡被打破，过热液体急剧气化而使容器破裂爆炸，在此过程中气相的剧烈降压也为爆炸提供了部分能量。按照产生蒸气爆炸前液体状态的不同，破坏平衡类蒸气爆炸可分为高压蒸气爆炸、加热液体蒸气爆炸及常温液化气蒸气爆炸三种。

预防破坏平衡类蒸气爆炸的关键是防止处理储存过热液体的密闭容器出现龟裂开口。

以上六种火灾爆炸事故类型有各自单独出现的情况，也有几种类型连锁复合发生的情况，见表 1-5。这些两种或三种形式的火灾与爆炸连锁发生的情况所造成的危害一次比一次大。

表 1-5 火灾爆炸事故连锁发生常见形式

序号	常见形式	序号	常见形式
1	Ⅱ-B 型→Ⅲ-B 型→Ⅰ-B 型	4	Ⅱ-A 型→Ⅲ-A 型→Ⅰ-B 型
2	Ⅰ-B 型→Ⅲ-B 型→Ⅰ-B 型	5	Ⅱ-B 型→Ⅰ-B 型
3	Ⅰ-A 型→Ⅰ-B 型→Ⅰ-A 型	6	Ⅲ-B 型→Ⅰ-B 型

1.3 工业火灾预防与控制工程

总体而言，工业火灾的预防与控制主要包括消防工程防护和安全管理两大方面。其中，消防工程防护包括主动防火方法（如火灾探测、自动灭火等工程系统）和被动防火方法（如耐火设计、防烟排烟设计等）。安全管理包括日常消防安全管理和火灾爆炸风险管理，下面简要论述工业火灾预防与控制工程的基本内容及过程。

1.3.1 性能化防火设计的基本内容

从前面两节所述内容不难看出，工业火灾爆炸触发因素多，发展快，损失重。特别是现代工业规模更大，工艺设备更复杂，潜在的火灾爆炸风险更高。多年来，人们总认为只要执行通用的由消防部门制定的“处方式”的防火标准和规范就能达到工业消防安全，就日益现代化的工业生产而言，这样的认识越来越具有片面性。传统的“处方式”标准和规范的制定主要依据历史的教训和专家们的实践经验，毋庸置疑，它们对于简单的、不变的工业对象具有很好的针对性，但是，对于发展变化的现代工业而言，其通用性和有效性受到了越来越多的质疑和挑战。因此，面对现代工业的复杂性，就需要采用更有效的方法来应对其所面临的新的消防安全挑战。

目前，行之有效的方法就是在世界范围内正在兴起并快速发展的性能化防火方法。所谓性能化防火方法，简单地说，就是对具体的工业危险和火灾爆炸防护方法的有效性和可靠性进行工程分析与设计的方法。工程分析实质上是一种将相关的科学原理与各种数据相结合所进行的系统计算研究，这里所说的科学原理就是火灾科学以及相关的物理、化学原理，它们直接决定防护方法的设计与运行，所用数据包括火灾爆炸事故数据、试验数据以及工厂运行的具体参数。

使用工程分析方法确定工业火灾爆炸防护措施大致可分三个步骤：①场景辨识；②后果分析（风险分析）；③备选保护方案的评价。针对某一潜在的火灾或爆炸进行的场景辨识包括对火灾或爆炸前的周围环境、引火源、可燃物以及能够传播