

[美] 弗兰克·T·波德莎著 蒋运茂译 张建英校

INDUSTRIAL EXPLOSION
PREVENTION AND PROTECTION

工业防爆技术



劳动人事出版社

工业防爆技术

〔美〕弗兰克·T·波德莎 著

蒋运茂 译 张建英 校

劳动人事出版社

**Industrial Explosion
Prevention and Protection**
Frank T. Bodurtha
Mc Graw-Hill Book Company 1980

工业防爆技术
〔美〕弗兰克·T·波德莎 著
蒋运茂 译 张建英 校
劳动人事出版社出版
(北京市和平里中街12号)
北京新源印刷厂印刷
新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 7印张 155千字
1987年6月北京第1版 1987年6月北京第1次印刷
ISBN 7-5045-0044-5/TB·003 统一书号: 15238·238
印数: 1—10,200册 定价: 1.75元

前 言

1974年6月1日，一次巨大的爆炸毁坏了英格兰弗莉克斯市的一个化学工厂。当时50兆克环己烷在约40秒内释放到大气中并着火，28人失去了生命。这次和其他工厂的爆炸事故说明，在工业爆炸的预防和防护的原理和实践方面，对工科学生和工程师加强训练的迫切性。为了满足这种需要，写了这本书。一方面，矿山局（美国内务部）的通报和调查报告以及一些书提供了关于爆炸方面的资料和数据；另一方面，为了帮助工程师分析和解决在实践中碰到的爆炸问题，这本书又提供了基础知识和需要的其他知识。当前公众对安全问题愈来愈敏感，工业防爆就显得特别重要。因此，本书是供工科学生和在这方面没有受过正式训练的工程师使用，并且尽可能用定量的方法来研究这个问题。这些资料可以整体作为一个进修教材来应用，也可用于解决某个具体问题。按顺序用合理的方法提出这个课题，为的是简化这个多学科的问题并解决可能的爆炸危险。这个内容是广泛的，但不包括所有的问题，例如不包括挡墙。也不包括危险性的分析，但这是一种正在发展的、对处理和降低可能的爆炸危险有用的工具。虽然对一些项目不能进行详细试验，但是可以提供许多附加参考资料。这些资料帮助人们识别可能的爆炸和火灾以及调查爆炸事故。此外，当预测爆炸的危险不合理时，它能帮助消除人们的恐怖心理。

为了减少爆炸的可能性，应当除去已知的点火源（意外的是，焊接和切割引起火灾和爆炸还在发生）。但是，为了安全不能只相信点火源的预测结果，除非情况异常。所以首先讨论爆炸极限以强调预防爆炸的重要性的方法（为了预防爆炸，常常用惰性气体来排走空气。但是有时要注意防止惰性气体使操作人员窒息，因为惰性气体可能从设备内泄漏出来或人员要进入容器内）。当不能防止爆炸或对于可能的爆炸严重后果需加强安全措施时，必须对爆炸引起的后果提供防护手段。因此，在讨论了点火源之后，还要研究爆炸压力和防护爆炸的方法。随着工厂规模的增大，应急排放气体的安全处置是一个很大的问题。所以，书中评述了大气排放，包括无限制的蒸气云爆炸，如在弗莉克斯市出现的。在第七章中包括危险化合物、反应和操作。随着工厂规模加大，在粉尘操作中使用了复杂的输送系统，这也会带来爆炸危险。所以在最后一章详细地讨论粉尘爆炸。

书中有基本符号表。这个工作涉及众多学科，有时同一个符号必须表示不同含义。例如，在第三章 V 表示电压，千伏，而在其他章中是表示体积的符号。这样，在基本符号表中 V 用于体积，而在第三章中 V 表示电压，千伏。

这本书中全部使用国际单位制 (SI)。作者用了美国试验和材料学会的标准 E 380 作为指南（这等效于美国国家标准 Z210.1）。为了把其他单位换算成 SI 单位，在附录 A 中给出了转换系数。注意，摩尔总是指克分子。

这本书没有列出包括燃烧性和爆炸数据的综合表。这些资料已在通报和标准中发表。例如，国家防火协会发表的可燃液体、气体和挥发性固体的火灾危险特性——NFPA325 M 包含了很多试剂的燃烧性数据。不包括规范和标准或政府法律

和规章，因为这类规定的要求不断增加，其性质也发生变化。尽管如此，还必须研究联邦职业安全与健康署(OSHA)和各个地区的规章，并且在工厂的操作和设计中遵守它。因此，很重要的工作是适应这些规章的变化以便达到统一。

这本书中的技术资料是可信的，并且可供技术熟练的工作人员使用。由于使用的条件是作者、作者的雇主和出版者无法控制的，所以在这些资料的应用方面，他们不承担责任。

弗兰克·T·波德莎

基 本 符 号

- a —— 初始反应物质, 摩尔*
 A —— $SG^{2/3}/(SG-1)^{1/3}$
 A_0 —— 爆炸排放区域, 米²
 A' —— 容器的横截面积, 米²
 A'' —— 表面积, 米²
 C_p —— 恒压比热, 千焦/公斤·开
 C_v —— 恒容比热, 千焦/公斤·开
 C_{st} —— 化学计量浓度, %体积比
 D —— 烟囱出口直径, 毫米
 D_n —— 孔直径, 毫米
 E —— 能量, 兆焦
 E_a —— Arrhenius 活化能, 千焦/摩尔
 F_r —— Froude 准数, 无因次
 g —— 重力加速度, 9.806米/秒²
 h_s —— 烟囱高度, 米
 H —— 羽烟升高, 米
 ΔH —— 热量释放, 兆焦/公斤或千焦/摩尔 (负值 ΔH =热量放出, 正值 ΔH =吸热)
 ΔH_c —— 燃烧热, 兆焦/公斤或千焦/摩尔
 ΔH_d —— 分解热, 兆焦/公斤或千焦/摩尔
 ΔH_f —— 生成热, 千焦/摩尔
 i_r —— 正常的反射压力冲击, 千帕·毫秒

* 在这本书中摩尔总是指克分子。

i_s —— 事故的压力冲击, 千帕·毫秒
 k —— 速度常数, 秒⁻¹
 K —— 阻力系数或速度头损失
 K_G —— 气体常数, 巴·米/秒
 K_{st} —— 粉尘常数, 巴·米/秒
 L —— 爆炸下限, %体积比
 L_t —— 在 $t^\circ\text{C}$ 时爆炸下限, %体积比
 L' —— 爆炸下限, 毫克/升空气
 MEC —— 粉尘的最小爆炸浓度, 毫克/升空气
 MOC —— 燃烧的最小氧气量, %体积比
 MOC_P —— 在 P 兆帕时燃烧的最小氧气量, %体积比
 MW —— 分子量, 克/摩尔
 n_f —— 在燃烧或分解的混合物中气体的最终摩尔数目
 n_i —— 在初始混合物中气体的摩尔数目
 P_b —— 爆破片的爆破压力, 千帕表压
 P_i —— 初始压力, 千帕表压
 P_m —— 最大爆炸压力, 兆帕表压
 P_r —— 峰值正向反射压力, 千帕表压
 $P_{r,o}$ —— 峰值正向事故压力, 千帕表压
 P_p —— 最大排出爆炸压力, 千帕表压
 P —— 绝对压力, 千帕或兆帕
 P_b —— 容器的爆破压力, 兆帕绝对压力
 P_i —— 初始压力, 千帕绝对压力
 P_{ms} —— 最大爆炸压力, 千帕绝对压力
 P_s —— 周围空气的压力, 千帕或兆帕绝对压力
 ΔP —— 两点间*的压差, 千帕
 Q —— 气体或蒸气放出的速度, 在 25°C , 米³/秒

* 如果速度等于音速的话, 管道出口处的压力可大于 101.325 千帕 绝对压力。

Q_D —— 粉尘流量, 公斤/小时
 v —— 爆炸压力上升速度, 密闭容器中的 dp/dt , 兆帕/秒
 v_{av} —— 密闭容器中爆炸压力上升的平均速度, $(dp/dt)_{av}$, 兆帕/秒
 v_m —— 在密封容器中爆炸压力上升的最大速度 $(dp/dt)_m$, 兆帕/秒
 R —— 离爆炸波中心的距离, 米
 R_u —— 普适气体常数, 0.008314 千焦/摩尔·开
 S_u —— 燃烧速度, 米/秒
 SG —— 发射比重 (空气=1)
 t —— 温度, $^{\circ}\text{C}$ 或时间, 秒
 t_a —— 环境温度, $^{\circ}\text{C}$
 t_o —— 正相压力的持续时间, 毫秒
 t_r —— 容器内的温度, $^{\circ}\text{C}$
 T —— 热力学温度, 开
 T_d —— 绝热分解温度, 开 (温度由绝热分解产生)
 T_f —— 最终温度, 开
 T_i —— 起始温度, 开
 T_s —— 烟气温度, 开
 T_A —— 环境温度, 开
 T_R —— 容器内的温度, 开
 u —— 平均风速, 米/秒
 U —— 爆炸上限, % 体积比
 U_t —— 在 $t^{\circ}\text{C}$ 时爆炸上限, % 体积比
 U_P —— 在 P 兆帕时空气中的爆炸上限, % 体积比
 U' —— 传热系数, 千焦/秒·米²·开
 v_s —— 烟气出口速度, 米/秒
 $v_{s, \text{crit}}$ —— 临界烟气出口速度, 米/秒
 v_s —— 颗粒的末速度, 米/秒
 V —— 体积, 米³

V_f —— 大于 L 燃料的体积, 米³在25℃
 w —— 气体流速, 公斤/秒
 W —— 易爆物质的重量, 公斤
 W_G —— 作爆炸源的燃料重量, 公斤
 W_{TNT} —— TNT 当量的重量, 公斤
 x —— 逆风距离, 米
 x_{m_1} —— 对给定 L , 从假想源到最大高度的逆风距离
 x_{m_2} —— 对给定 L , 从真实源到最大高度的逆风距离, 米
 x_L —— 在地面, 对 L 的逆风距离, 米
 y —— 逆风距离, 米
 Y —— 通过小孔、喷嘴或管孔的可压缩流动的可膨胀系数
 z —— 地面以上的高度, 米
 Z —— 定标距离, 米/公斤^{1/3}; Arrhenius 预指数因子, 秒⁻¹
 α —— 蒸气云爆炸的“当量”
 κ —— 比热的比值 C_p/C_v
 λ —— 粉尘层的深度, 毫米
 ρ —— 密度, 公斤/米³
 σ_y —— 羽烟浓度分布的逆风方向的标准偏差, 米
 σ_z —— 羽烟浓度分布的垂直方向的标准偏差, 米
 χ —— 大气浓度, % 体积比
 χ_m —— 最大大气浓度, % 体积比
 χ_i —— 烟气浓度, % 体积比
 χ_D —— 粉尘浓度, 毫克/升

目 录

前言

基本符号

第一章 绪 言

1-1 爆炸的预防和防护中工作人员的任务	2
1. 管理人员的任务	2
2. 工厂工程师的职责	2
3. 个人责任	3
1-2 控制污染造成的危险	4
1-3 专用名词	5

第二章 爆炸极限

2-1 闪点	8
1. 压力的影响	10
2. 有机溶液	10
2-2 爆炸下限 L	12
2-3 里·查特里尔规则	14
2-4 爆炸上限 U	15
2-5 燃烧的最小氧气量(MOC)	16
2-6 燃烧范围图	20
2-7 环境对爆炸极限的影响	24
1. 温度	24

2. 压力.....	24
3. 氧气.....	26
4. 其他氧化物.....	27

第三章 点 火 源

3-1 自燃.....	34
1. 着火延迟	34
2. 蒸气浓度	36
3. 环境影响	37
4. 催化剂	40
5. 流动条件.....	40
3-2 自动氧化.....	40
3-3 电着火	41
1. 电火花最小点火能量.....	46
2. 静电.....	47
3. 静电的产生和控制.....	50
3-4 摩擦.....	55
3-5 压缩.....	57

第四章 爆炸压力

4-1 封闭容器的最大爆炸压力.....	63
4-2 封闭容器中爆炸压力上升速度.....	66
4-3 环境对封闭容器爆炸压力的影响	66
1. 温度.....	67
2. 初始压力.....	68
3. 容器的几何形状.....	69
4. 扰动.....	71
5. 点火源.....	71

4-4	爆轰	74
1.	爆轰压力	74
2.	预防和防护	76
4-5	爆炸波效应	79
1.	能量	79
2.	爆炸波压力	81

第五章 爆炸的防护

5-1	密闭	92
5-2	爆炸的抑制	93
5-3	爆炸泄放	96
1.	爆炸泄放面积	96
2.	爆破片的选择、安装和维修	105

第六章 大气排放

6-1	空气排放	122
1.	逆燃	122
2.	火焰消除器	123
6-2	无空气排放	125
1.	惰性气体清洗	125
2.	浓烟气的性能	127
3.	压力安全阀	131
4.	敞开的蒸气云爆炸	134

第七章 危险的化合物、反应和操作

7-1	蒸气爆炸	150
7-2	危险化合物及其反应	151
1.	资料来源	151
2.	危险的化合物	152

3. 危险的反应.....	156
4. 热爆炸.....	159
5. 试验.....	164
7-3 危险的操作.....	169
1. 压缩机和泵.....	169
2. 观测孔和软管.....	171
3. 精馏柱.....	172
4. 其他.....	172

第八章 粉尘爆炸

8-1 爆炸浓度.....	180
1. 爆炸极限.....	180
2. 粉尘浓度的测定.....	181
8-2 点火.....	183
1. 颗粒大小.....	183
2. 静电.....	183
3. 温度.....	186
8-3 惰性气体.....	190
8-4 爆炸压力.....	191
1. 湿度.....	192
2. 惰性粉尘.....	193
3. 氧气.....	194
8-5 爆炸的防护.....	194
1. 次级爆炸.....	194
2. 粉尘处理.....	195
3. 粉末涂料.....	196
附录 A 转换系数.....	203
附录 B 平衡排放方程	207
附录 C 扩散方程式.....	208

第一章 绪 言

美国的人口，从1800年大约500万增加到1900年的7600万。炸药为这个国家工业前所未有的发展开辟了道路。用炸药开挖了很多条运河如伊利，伊利诺斯和密执安运河，以连接发展中地区的重要水路^{[1]*}。后来，当证明铁路运输是比较优越的时候，炸药促进这些地区用铁道连接在一起。炸药还用于开矿和打油井。从这些和其他很多方面看，炸药是一种恩惠。在二十世纪的工业飞速发展中，炸药的作用在逐渐下降。然而伴随这个世纪工业的迅速发展，事故性爆炸已成为一个重要问题。在化学及有关工业中，大多数财产损失是由于爆炸造成的。虽然没有得到精确的数据，但据统计，在美国，由于工业爆炸造成的财产损失每年超过1.5亿美元（1979年度）。商业停顿的损失也差不多如此。虽然，应用一些安全理论和经验可以使这个数值不致增大，但是仍需要更多地研究现有的工艺和减少爆炸及其影响需要的新知识。在这一章的后部将讨论实现这个方法。政府机关执行部门的有关环境规则已经增加了工业企业的火灾和爆炸的保险金，书中也将讨论这个问题。

• 参考文献在章末。

1-1 爆炸的预防和防护中 工作人员的任务

1. 管理人员的任务

为了减少损失，管理人员坚持履行控制火灾和爆炸的职责是很重要的。安全性是衡量综合性能的良好尺度。安全操作是管理良好的操作。

如果简单从事，高的生产目标有时会造成爆炸；结果耽误时间，违背了生产目标。新工厂的空间和大小要严格监督管理。把工厂的各个装置充分隔开是限制火灾和爆炸损失的最好方法。工厂的设备越大，参数就越大，停工的损失也越大。此外，大设备的火灾和爆炸的可能性增加，如果设备失效，能够着火的可燃性物质的散发机会就多。因此，为了很好控制火灾和爆炸，对操作和维修人员进行专门的训练是很重要的。新的工作人员必须参加操作和维修大工厂的培训。在有些情况下，可能需要定期训练。当存在安全问题时，应支持进行试验和科学研究。

2. 工厂工程师的职责

从生产装置的设计和维修的观点出发，对火灾和爆炸的控制，工厂工程师起很大的作用。

标准。很多国家都有预防火灾和爆炸的标准。国家防火协会每年都发表一卷各种火灾和爆炸控制的规范。一些规范已被职业安全与健康署（OSHA）采用，作为普遍的标准。在爆炸和有关爆炸方面，工厂相关工程公司提供了预防损失的大量数据表。另外，各州和市的职业安全与健康署必须作

相应的工作。因此，地方工厂也要认真发展自己的标准以解决出现的难题。

设计。设计应采用失效安全的原则，即一旦控制系统发生任何类型的失效，设备就自动关闭或者发生其他作用使其避免不安全的操作^[2]。应当检查爆炸发生的可能性并且在一个项目的设计阶段就要有防范措施。不能把安全保证仅寄托在所采用的设计上。当安全的工艺条件确定之后，很重要的就是通过监督确保工厂操作中安全条件的实施。这样，往往需要提供可燃气体的分析仪以便确定工厂设备内不存在可燃的混合物。

故障树分析能够用来揭示迄今未被认识的危险并降低危险性。

维修。对于爆炸控制而言，设备可靠性是很重要的。在操作运行中，为防止爆炸和避免生产设备的损失，应当进行预防性的维修。所以，进行维修时，用合格的材料制造的部件必须按正确的方法进行安装。维修程序本身不应造成火灾和爆炸危险。对于焊接和切削，为了降低着火危险，地方工厂应该取得有关许可证。

首先，应当仔细检查设计的和结构材料的各种变化对安全的影响。其次，应当估价这些变化对整个装置造成的后果。表面上的细小变化可能造成想象不到的和不允许的爆炸危险。在英国弗莉克斯市的一个化工厂，为了更换泄漏的反应器，安装了直径500毫米的临时旁路折形管道，由于这个管道的事故，造成了弗莉克斯市的爆炸灾害。因此，这些变化的经济价值不能作为一个基本尺度来衡量可能产生的危险。

3. 个人责任