

[日] 北川徹三 著



化 学 工 业 出 版 社

爆炸事故的分析

爆炸事故的分析

〔日〕北川徹三 著

黄九华 刘培德 译

徐 康 校

化学工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了近100例化工、石油等方面的爆炸事故,对其发生的经过和原因,做了比较详细的分析,并提出了把爆炸事故分为六种类型的看法。针对不同类型的事故,提出了适当的预防措施。本书的第一章为一般介绍,主要讨论爆炸事故的分类。第二章介绍各种点火源。第三至五章分别介绍了各种类型爆炸事故的实例。第六章介绍了爆炸事故的预防方法。本书可供从事化工和石油产品的生产、运输、贮存和使用等方面工作的领导干部、科技人员、安全技术员、技术工人以及有关高等和中专院校的师生阅读、参考。

北川徹三 著

爆発災害の解析

日刊工业新闻社 1980年

爆炸事故的分析

黄九华 刘培德 译

徐 康 校

责任编辑: 林晨虹

封面设计: 季玉芳

*

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ 印张 $10^{1/4}$ 字数277千字印数1—7,050

1984年7月北京第1版1984年7月北京第1次印刷

统一书号15063·3596定价1.30元

前 言

爆炸事故是在想不到的时候突然发生的，因此，人们往往认为爆炸的预防好象是不可能的。果真如此吗？

著者认为，爆炸灾害可分为以下的几个级别，加以考察。

一级灾害：该物质所具有的危险性及其发生的条件，在理论上或经验上均为未知，而发生的灾害；二级灾害：该物质的危险性是众所周知的，但其危险性的发生条件为未知，也不能预测，而发生的灾害；三级灾害：尽管全都了解该物质的危险性及其危险性的发生条件，而仍然发生的灾害。

一级或二级灾害，在它们发生的时候，整个社会的知识和经验都不足，不可能预测，因而是一种不可能防患于未然的灾害。

然而，随着从安全工程学角度进行的调查研究的进展，当弄清了这些灾害发生的原因和经过的时候，它们就不再属于一级和二级灾害，而成为可能预测和预防的三级灾害了。不可能预防的一级、二级灾害变为可能预防的三级灾害，这件事本身就是安全工程学上的一大进步。

总之，爆炸灾害，从本质上来说，通过人类的智慧和努力是能够预防的。应该认为，只有防患于未然才是对爆炸灾害最英明的措施。

可是，三级灾害，其发生条件全然周知，预防方法理应清楚，尽管如此，现在这些灾害仍然多次发生。这又是什么原因呢？这难道不是重大事故的当事者，对于灾害的发生条件和预防方法缺乏具体知识的缘故吗？因为，如果充分具备对灾害预防的具体知识的话，是不会有人故意造成爆炸事故的。

从这个意义上讲，本书则力求尽可能多地列举有代表性的爆炸事故实例，以便使读者对爆炸事故的实情能够正确理解。为此，除

掉那些原因不明者外，对 100 多个爆炸事故的实例，就其原因和经过进行了明确的分析。除著者亲赴现场调查所得外，只能采用能够信赖的调查资料，以期内容上的正确。

另一方面，以这些严密分析的事故实例为基础，就它们的共同特性进行整理的结果表明，所有爆炸事故都能分为六种基本类型。本书中的大量爆炸事故事例，均属于这些类型。同时书中还列举了相应于各种不同情况，应该采取的切实可行的预防措施。

在工业界，不能说已经有了充分机会来正确理解爆炸事故的实例。而且，现代社会所关心的是爆炸事故发生后减少损失的措施及应急训练。而对爆炸事故的防患于未然的措施获得具体知识的机会，反而是不多的。这实在是——大憾事。

过去发生的许多爆炸灾害，付出了巨大的牺牲，也可以说这是不能重复的宝贵社会实验。因此，必须使这些事故实例成为对今后的灾害预防十分有用的教训，这就是笔者编写本书的动机。通过本书可以充分认识爆炸灾害的实情，找到具体的预防措施。今后，如果爆炸事故发生的机会哪怕只减少一次，那么就应该说本书的写作目的已经达到了。

在本书完稿之际，对提供资料及给予其他许多帮助的诸位先生，谨表示衷心的感谢。

著 者

1980年6月

译者说明

本书作者北川彻三原为日本横滨大学教授，1973年后为该校名誉教授。1978年起担任日本安全工程学协会会长。他多年来从事有关爆炸和火灾事故的调查分析工作。本书中，著者从收集到的各种有关化工和石油产品的生产、运输、贮存和使用等方面的爆炸事故中，选出了对其经过和原因做过详细分析的近 100 例事故，进行了比较详细的介绍。特别是对事故的原因，做了较为细致的分析，并阐述了预防的措施。在分析这些事故实例的基础上，他提出了把化工和石油方面的事故，分为六种类型的看法，其中也包括在一次事故中，连锁地发生几种类型爆炸的事例。这些都是很有实际意义的。我们认为：本书对从事有关化工和石油产品的生产、运输、贮存和使用等方面的人员，有一定的参考价值。因此将本书译出，供大家阅读、参考。

在本书翻译过程中，承蒙于永忠同志帮助解决了许多疑难问题，在此表示深切感谢。

本书第一、二、三章由黄九华译，四、五、六章由刘培德译，徐康担任校对和最后的校阅工作。由于我们水平不高，翻译中一定会有不少不妥、甚至错误之处，请读者批评指正。

译者

1983年

目 录

第1章 安全工程学和爆炸事故	1
1.1 安全工程学的目的	1
1.2 现代生产和爆炸事故	2
1.3 爆炸的定义	3
1.4 爆炸事故的分类	6
第2章 点火源的种类	9
2.1 八种点火源	9
2.2 电点火源	10
2.2.1 电火花	10
2.2.2 静电火花	10
2.3 高温点火源	11
2.3.1 高温表面	11
2.3.2 热辐射	12
2.4 冲击点火源	13
2.4.1 冲击和摩擦	13
2.4.2 绝热压缩	14
2.5 化学点火源	14
2.5.1 明火	14
2.5.2 自然着火	15
第3章 需要有点火源的爆炸	16
3.1 第I种爆炸	16
3.2 着火破坏型(I-A型)爆炸	17
3.2.1 内压上升的原因	17
3.2.2 快速燃烧引起的爆炸	18
(1) 由于油槽内火灾而产生的冲击波	19
(2) 液化天然气(LNG)罐的爆炸	19
(3) 大型油轮的爆炸	24

(4) 煤油油罐的爆炸	30
3.2.3 粉尘和喷雾的爆炸	31
(1) 饲料工厂的粉尘爆炸	32
(2) 谷物圆仓的爆炸	33
(3) 钙硅的粉尘爆炸	34
(4) 压力油喷雾的爆炸	35
3.2.4 爆炸性混合气体的爆炸	37
(1) 由于混合充气的爆炸	39
(2) 氧气和氮气容器误用而造成的爆炸	39
(3) 碳化钙贮罐的爆炸	41
(4) 电炉排气集尘装置的爆炸	42
(5) 升降叉车装配工厂的爆炸	47
(6) 东京湾中原油油轮的爆炸	48
(7) 熊野海面上原油油轮的爆炸	53
(8) 油槽汽车由于混载而发生的爆炸	56
(9) 喷气燃料油罐的爆炸	56
(10) 苯罐采样中的爆炸	58
(11) 甲苯和二甲苯采样中的爆炸	60
(12) 丙烯酸甲酯贮罐的爆炸	62
(13) 醇蒸气的爆炸	63
3.2.5 气体的分解爆炸	65
(1) 溶解乙炔气瓶的爆炸	65
(2) 高压乙烯的分解爆炸	67
(3) 乙烯基乙炔的爆炸	67
(4) 臭氧的分解爆炸	70
3.2.6 爆炸性物质和混合危险性物质的爆炸	71
(1) 工业炸药运输中的爆炸	72
(2) 惰性气体中敏感物质的蓄积	73
(3) 低温液化分离装置的爆炸	76
(4) 压缩空气管道的爆炸	89
3.2.7 管道材料的燃烧	90
(1) 高压氧气用滑板阀的燃烧	91
(2) 高压氧气管道和阀的燃烧	92

(3) 高压氧气中三氯乙烯的爆炸	93
(4) 平炉氧气输送软管的爆炸	94
(5) 气体切割用氧气软管的爆炸	95
(6) 氯气管道的燃烧	95
(7) 钛管的燃烧	100
3.3 着火破坏型爆炸的预防措施	101
3.4 泄漏着火型 (I-B型) 爆炸	104
3.4.1 泄漏的原因	104
3.4.2 材料强度降低引起的破坏泄漏	105
(1) 硫化氢腐蚀引起气体泄漏	106
(2) 克利夫兰市液化天然气(LNG)罐的爆炸	107
(3) 由于低温脆性而造成的输油管破坏泄漏	109
(4) 裂板式安全装置自然动作引起的泄漏	110
(5) 法兰盘接口螺栓伸长而造成的泄漏	111
3.4.3 外部载荷引起的破坏泄漏	112
(1) 新潟地震引起的石油泄漏火灾	112
(2) 油槽汽车翻倒引起的液化石油 (LP) 气的泄漏	124
(3) 油槽汽车翻倒和跌落引起的LP气的泄漏	126
(4) 墨西哥发生的油槽汽车翻倒而引起的LP气泄漏	126
(5) 船舶摇动引起输油管的折断	128
(6) 原油油轮与码头相撞造成的火灾	129
(7) 汽油油轮的碰撞造成的海面火灾	131
(8) 装载石脑油和LP气的船在海上被撞而造成的火灾	133
(9) 施工引起的汽油管道泄漏	135
3.4.4 内压上升引起的破坏泄漏	136
(1) 液化气容器过量灌装造成的破坏	137
(2) 球形罐耐压试验中的破裂	138
3.4.5 阀门操作引起的泄漏	140
(1) 误开阀门引起的液化丙烯大量泄漏	141
(2) 烧饭器具的气阀泄漏煤气而引起爆炸	142
(3) 试样采集阀不能关闭而引起的LP气泄漏	144
(4) 排泄阀不能关闭而造成的煤油泄漏	146
(5) 从开放着的排泄阀中分解气体的泄漏	146

(6) 把开放的阀误认为关闭而造成硫化氢的泄漏	148
(7) 仪表用空气管道阀门的关闭而引起的乙烯泄漏	148
(8) 阀的破坏而引起的氯乙烯泄漏	149
3.4.6 盖子打开造成的泄漏	151
(1) 油轮灌装中, 由于打开盖子而造成气体泄漏	151
(2) 油轮灌装作业中气体泄漏引起的爆炸	153
(3) 喷气飞机燃料油灌装中的油轮爆炸	159
(4) 打开粗滤器盖子而发生的原油泄漏	162
(5) 松开泵壳螺栓时发生的泄漏	163
3.5 泄漏着火型爆炸的预防措施	165
第4章 化学反应热蓄积引起的爆炸	168
4.1 第Ⅱ种爆炸	168
4.2 自然着火型(Ⅱ-A型)爆炸	169
4.2.1 自然着火现象	169
4.2.2 分解引起的自然着火	171
硝化棉和有机过氧化物仓库的爆炸	174
4.2.3 混合接触引起的自然着火	188
(1) 船舱内亚氯酸钙的爆炸	189
(2) 硝铵肥料货轮的爆炸	190
(3) 梯恩梯(TNT)精制中的爆炸	195
4.2.4 吸水引起的自然着火	196
成为新潟地震第二次火灾原因的自然着火	197
4.2.5 氧化引起的自然着火	202
(1) 煤矿坑中煤的自然着火引起的坑内火灾	203
(2) 棕榈油的自然着火	204
(3) 无水邻苯二甲酸制造过程中副产物的自然着火	204
4.2.6 吸附引起的自然着火	206
丙烯酸甲酯罐的爆炸	206
4.3 自然着火型爆炸的预防措施	206
4.4 反应失控型(Ⅱ-B型)爆炸	207
4.4.1 反应的失控现象	207
4.4.2 聚合反应失控引起的爆炸	210
(1) 环氧丙烷中间罐反应失控引起的爆炸	211

(2) 丙烯腈聚合反应失控引起的爆炸	223
(3) 丙烯酸容器中聚合反应失控引起的爆炸	224
4.4.3 合成反应失控引起的爆炸	224
乙烯基降冰片烯制造中的火灾	225
4.4.4 分解反应失控引起的爆炸	227
(1) 无水马来酸分解引起的爆炸	227
(2) 氨基胍盐酸盐分解引起的爆炸	228
(3) 焦油状废弃物分解引起的爆炸	230
(4) 臭氧化物分解引起的爆炸	233
4.5 反应失控型爆炸的预防措施	234
第5章 过热液体蒸发引起的爆炸	236
5.1 第Ⅲ种爆炸	236
5.2 传热型(Ⅲ-A型) 蒸气爆炸	237
5.2.1 传热引起的水蒸汽爆炸	237
(1) 金属熔化作业中的水蒸汽爆炸	239
(2) 纸浆厂的水蒸汽爆炸	240
5.2.2 传热引起低温液化气的蒸气爆炸	241
LNG流到水面上引起的爆炸	244
5.3 传热型蒸气爆炸的预防措施	246
5.4 平衡破坏型(Ⅲ-B型) 蒸气爆炸	248
5.4.1 蒸气压平衡的破坏	248
5.4.2 高压状态液体的蒸气爆炸	252
(1) 货轮因辅助锅炉的蒸汽爆炸而沉没	252
(2) 以油为热载体的锅炉的蒸汽爆炸	257
(3) 湿式空气氧化装置的蒸气爆炸	259
(4) 环己烷空气氧化反应罐的蒸气爆炸	261
(5) 环氧丙烷中间罐的蒸气爆炸	269
5.4.3 火灾引起被加热的罐发生蒸气爆炸	269
(1) LP气罐的火灾引起的蒸气爆炸	270
(2) LP气油槽货车的蒸气爆炸	274
5.4.4 常温下液化气的蒸气爆炸	277
(1) 常温下LP气油槽货车的蒸气爆炸	278
(2) 西班牙的液化丙烯油槽汽车的爆炸	280

(3) 液氨贮罐的蒸气爆炸	287
(4) 液氨槽车的爆炸	288
(5) 耐压玻璃容器中液化气的蒸气爆炸	288
(6) 液态二氧化碳槽车的爆炸	289
(7) 液态二氧化碳贮罐的蒸气爆炸	289
5.5 平衡破坏型蒸气爆炸的预防措施	290
第6章 爆炸事故的预防方法	293
6.1 爆炸的连续发生	293
6.2 容易发生爆炸事故的作业	296
6.2.1 固定作业中的事故	296
6.2.2 非固定作业中的事故	297
6.2.3 运输作业中的事故	299
6.2.4 贮存中的事故	300
6.2.5 研究实验中的事故	300
6.2.6 气象变化或天灾引起的事故	301
6.3 爆炸的预防措施和减少灾害的措施	301
6.3.1 爆炸的预防措施	301
6.3.2 减少爆炸灾害的措施	304
6.3.3 爆炸原因的调查	306
文献	309

第1章 安全工程学和爆炸事故

1.1 安全工程学的目的

所谓安全工程学，主要是研究有关生产中发生的各种事故的原因、经过和预防措施等系统知识^{1),2)}。

安全工程学有以下三个主要目的：

- (1) 防止生产设备的破坏和原材料及产品的损失；
- (2) 保护生产人员的生命和健康；
- (3) 保护各区域团体的健康和安全。

因此，安全工程学的研究对象，包括以下五个领域：

- (1) 防止爆炸和火灾；
- (2) 防止建筑物的破坏；
- (3) 防止生产事故和其他人身事故；
- (4) 防止工业中毒和职业病；
- (5) 防止环境污染。

这五个领域的各种事故，互为因果，密切相关。因此，不能把五个领域分开来单独进行研究。安全工程学的-一个特点，就是必须将这五个领域综合加以研究。

此外，现实中发生的各种事故和公害，每当调查其原因、经过和考虑对策时，单从以前那种按狭小的、分得过细的学科领域来研究，是不够的。不应局限于各专门学科，必须从广阔的视野着眼，加以综合判断。

与安全工程学有关的学科领域有：物理学、化学、物理化学、工业化学、化学工程学、机械工程学、土木工程学、电工学、人机工程学、劳动卫生工程学、毒性学、公共卫生学、传染病学等。安全工程学与上述学科领域有着深远的关系。但是，从防止事故这个

观点来看，又必须把与此相关的所有专门知识，系统地归纳为新的综合学科。充分认识这一点是重要的。

1.2 现代生产和爆炸事故

在现代生产中，诸如：把高压、高温或低温那种苛刻的极端状态引入生产过程中；生产、输送等作业的高速化，促进了所使用的测量仪表的自动化；新的危险物质、有害物质种类的增加，其处理和贮存都达到了很大的数量。上面列举的这些，就是现代生产的特征。伴随着这些因素，生产活动中各种事故和公害发生的危险性将显著增加。

另外，牺牲工厂所在地区居民和生产人员的生命或者损害他们的健康，以发展现代生产，原则上是不允许的。生产活动的目的毕竟是在于提高国民的生活水平和增加福利，那么，生产本身当然应该做到无灾害和无公害。这也应该是赋予企业经营的一项重大社会责任。

然而，整个说来，对生产中发生的事故和公害，要做到防患于未然，达到无灾害和无公害的理想情况，是否可能呢？

灾害，一般可分为天灾（自然灾害）和人灾（人为灾害）两种。例如，象地震那样的天灾，地壳的震动和隆起等自然现象，是人力无论如何也不可能防止的。但是，由于地震造成的房屋倒塌和发生的火灾，通过现代化技术和人们的努力，加以防止，原则上是可能的。因此，对地震来说，地壳的震动和隆起是真正的天灾；但随之而来的建筑物倒塌和火灾等，却是人灾。这两者应加以区别。

前面讲到的生产活动中发生的各种灾害，也就是属于安全工程学研究对象的灾害，都是人灾。人灾，原则上是可以预防的，因此，作为安全工程学研究对象的各种灾害，都可以认为是人力能够预防的。在这些人灾发生之前，找出防患于未然的方法，是安全工程学的重要课题之一。

本书中，在作为安全工程学研究对象的各种灾害里，特别提出以爆炸灾害为主，探索预防爆炸发生的具体措施。

在各种灾害中，爆炸灾害不仅带来的损失最严重，而且常常是完全出乎意料地突然发生，可在一瞬间夺去许多人的生命，把工厂变成一片废墟。

如果是火灾，在发生的初期，只限于小范围内时，灭火比较容易。可是，一旦发生爆炸，将立刻引起破坏，使人们无计可施。对爆炸来说，除了采取预防措施之外，别无其他良策。一旦发生爆炸，接着而来的往往是发生火灾。反之，伴随火灾的发生，也可能引起爆炸。因此，本书中一般提到爆炸灾害时，要想到它也包含伴随爆炸的火灾。

1.3 爆炸的定义

可以用种种观点来看所谓爆炸现象。

爆炸多半伴随燃烧而发生，所以，从燃烧理论的观点出发，说明爆炸现象的方法，至今一直占主要地位。

在基础方面，从化学反应动力学的观点出发，解释爆炸反应机理，这是一种物理化学的方法。在热力学方面，可以从有关火炉或内燃机燃烧学的观点，来解释爆炸现象。此外，还可以象火药学那样，从火炸药应用于爆破和兵器的观点，来处理爆炸现象。

然而，安全工程学，与以上的观点相比较，则是以防止爆炸灾害为主要目的的。它一方面包含了上述各种观点，同时又必须以独特的观点，给爆炸现象下定义。

在爆炸事故实际发生时，人们都经历过这样的情形：首先听到巨大的爆炸声，引起建筑物的破坏，产生激烈的冲击波，喷出高温爆炸气体，火光和黑烟腾空而起，建筑物的破片向远处飞散。根据周围条件，有时只发生爆炸；也有时，这种爆炸继而引起可燃物的燃烧而发生火灾。其结果是，引起生产设备的破坏和原材料及产品的烧毁，使生产活动停止，不仅由于烧伤、负伤、窒息等造成许多操作人员伤亡，而且给该区域的居民留下难以消除的不安感。这就是爆炸引起的损失或受害。

为了防止这种巨大的人和物的损失，本书的重点，是准备对如

何防止爆炸的发生，进行系统的研究。

首先，如果说到爆炸现象与单纯燃烧现象有什么不同点的话，爆炸时，必然伴有压力的急速上升现象；而燃烧则未必与压力变化有关。也就是说，爆炸的本质是压力的急剧上升现象，其结果，建筑物破坏，产生爆炸声和冲击波。换句话说，人们一直把破坏、爆炸声和冲击波作为爆炸的特征来考虑。但这些不过是爆炸的结果所伴随的现象而已；其实，急剧的压力上升现象才是爆炸的本质。

一般说来，引起压力急剧上升的原因，应分为物理和化学两方面。

物理原因造成的压力急剧上升，可以在下列情况下出现。例如：高压气体流入低压容器时；密闭容器中充满的气体或液体发生热膨胀时；或者由于液体流动而引起水流冲击现象时，容器或管道可能由于内压上升而发生破坏。但在这种情况下，虽然也引起了压力的急速上升，但不能称之为爆炸。

化学方面压力急剧上升的原因，或者是由于放热的化学反应所引起，或者是由于急剧的相变所引起。在这些情况下，都会出现所谓爆炸现象。例如：可燃物的燃烧，不稳定物质的分解等化学反应，伴随发热而快速进行时；反应热蓄积而使温度迅速上升，产生的气体压力也迅速上升，而引起爆炸。混合气体的爆炸，气体的分解爆炸，粉尘、喷雾的爆炸，爆炸性物质和混合危险性物质的爆炸等，都属于这一类爆炸现象。

在这些物质中，放热的化学反应，以阵面的形式进行传播时，被称为燃烧波或爆轰波。爆轰波与燃烧波相比，传播速度快得多。由于超过声速，因此形成冲击波。另外，由于波阵面的瞬时高压，使与之接触的金属、玻璃等固体发生严重破坏。这两者在破坏效果上，可以说是有明显差别的，但都包括在压力急剧上升这种爆炸概念之中。

发生急剧相变的场合，例如从液相或固相这样的凝聚相，急剧地变为气相时，由于其密度减少到 $\frac{1}{100} \sim \frac{1}{1000}$ ，所以体积膨胀很

大，压力迅速上升，而引起爆炸现象。例如：金属丝通过大电流时的爆炸；水和高热物接触时，水蒸汽的爆炸；锅炉和液化气容器等的蒸气爆炸等，全都包括在内。由于这些相变通常是吸热的，因此在这种情况下，爆炸后物质的温度，与爆炸将发生前的温度相比，反而低些。这是这种爆炸的一个特征。

总之，爆炸可以作如下的定义：“爆炸是伴随有化学变化而引起压力急剧上升的现象。”这里所说的化学变化，包括发热的化学反应和吸热的相变¹²。

再有，在一个完全密闭的耐压容器内，如果充入爆炸性混合气体，使之着火，则燃烧波的传播将在 $\frac{1}{10} \sim \frac{1}{100}$ 秒的时间内结束。

由于高温，生成气体的最高压力可以达到最初压力的6~7倍，然后随着生成气体的冷却，压力缓慢下降。这时候，由于容器是足够耐压的，容器没有发生破坏，但是，容器内的混合气体发生了爆炸。这个例子说明：爆炸和容器破坏完全是不同的现象，必须加以区别。

在上例中，如果容器耐压不够，在爆炸生成的气体压力达到最高值以前的某个压力时，容器就发生破坏，生成的气体喷出，内压因而迅速下降。这种情况下，能听到爆炸声，产生冲击波和发生破片飞散。

因此，混合气体爆炸和容器破坏，完全是两回事，应加以区别，这一点是清楚的了。容器的破坏，不仅可以由爆炸引起，由其他物理原因而产生的压力上升，也同样可以引起一般的破坏现象。

但是，作为实际问题，发生爆炸事故而造成损失时，容器、管道、塔槽、房屋等建筑物，往往由于爆炸压力上升而被破坏；因此，在爆炸概念中，有时必须同时考虑本来的压力急剧上升和由此而产生的建筑物破坏这两方面的现象。

除上面列举的作为爆炸原因的化学反应和相变外，尚有伴随巨大发热的原子核转变的核爆炸。铀和钚等同位素，如果捕获中子后，能发生连锁核分裂，其质量的一部分将作为巨大能量释放出来。重氢结合成氦也是如此。这时，释放出来的能量，不仅变为热能，加