

[英] 凯思·顾根 著

容器外可燃蒸气云爆炸

4

化学工业出版社

容器外可燃蒸气云爆炸

[英]凯思·顾根 著
孙方震 侯耀先 译
梁光兴 校

化学工业出版社

内 容 提 要

本书收录了1921~1977年间发生的一百次较大的容器外爆炸事故。分析了若干有详细记录的事故实例,介绍了有关的实验工作。此外还提供了不少照片。除去资料丰富以外,本书还力图根据TNT当量来定量地评价各次事故。书中讨论了判断、预测、预防和防护的方法,也讨论了影响死亡率的各种因素。进一步的理论分析和计算公式则汇集在附录中。

从事石油开采、油气储运、炼油、化工等行业的安全技术人员、工程技术人员、科研人员、消防人员和管理人员,以及工会、保险、城市规划、城市煤气和液化气、运输等行业的有关人员,大专院校的教师、学生等都可以从本书得到借鉴和启发。

Keith Gugan.

Unconfined Vapour Cloud Explosions

The Institution of Chemical Engineers

George Godwin Limited, 1979

容器外可燃蒸气云爆炸

孙方震 侯耀先 译

梁光兴 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787×1092¹/₃₂印张8字数180千字印数1—2,590

1986年5月北京第1版1986年5月北京第1次印刷

统一书号15063·3803定价1.70元

译者序

本书收集了大量珍贵的容器外可燃蒸气云爆炸*事故资料，时间到1977年为止。鉴于事故的发生一般总是出人意外的，而能在事故发生的当时用红外照相之类的技术手段作出较完整的记录就尤其难能可贵。

统计结果表明，液化石油气等轻质烃类是大部分容器外爆炸事故的罪魁祸首，而不饱和轻质烃的强烈喷泄尤其危险。另外，从开始喷泄到引燃之间时间拖得越长，爆炸的总能量就越大，后果也就越严重。

装置发生火灾虽然也很危险，但其威胁比爆炸要小。因为爆炸是在瞬间发生的，一旦发生爆炸根本来不及逃避，更不要说采取措施了。另一方面，现代化大型石油或化工装置一般都与人口稠密的居民区毗连，在我国尤其是如此。应该认识到以前未酿成更重大的恶性事故是侥幸的。最近墨西哥发生的惨案**令人触目惊心，却未必代表破坏规模的上限。

我们不可能为了防范这类爆炸而把居民区建成要塞，那样做既不经济又未必有效。此外，本书介绍的情况表明，目前被广泛采用的水幕只有在极大的喷淋密度下才可能防止爆炸的发

* Unconfined vapour cloud explosion意指可燃物不慎泄出到容器外所形成的云团的爆炸现象。可燃物在云团中可为气态或雾沫等高度分散体系。由于不受容器壁的惯性限制（约束），这种爆炸具有其特点。又由于这种爆炸常常具有巨大的规模，其危害值得警惕。Unconfined一词在文中某些地方译作“无约束”——译者。

** 死亡人数达五、六百以上——译者。

生。因而它也不是一种经济实用的措施。

那么出路何在呢？除了在每一个具体工作环节上时刻谨慎以外，根本出路是减少系统中易燃物的存存量，以及缓和反应条件*。亦即提高单程转化率、降低活化能。这实际上是一个反应动力学和催化问题。

在做规划时应避免把新的石油或化工装置建在窝风的山沟里。某些滨海地区常年风速较大，对防止容器外爆炸显然较为有利。厂区内不宜种植高大的乔木，以免影响可燃气体逸散。如能在低浓度下发现可燃泄出物想必有助于尽快采取防范措施，这是监测仪表研制部门的任务。还可以研究一下向已泄出的可燃气体团中喷入水蒸汽、二氧化碳、极细的水雾或卤代烃（作为游离基捕集剂）的效果，看看是否能阻抑链反应、提高活化能或缩窄易发生爆炸的可燃气体浓度范围。

在石油化工装置附近建设高层建筑会使容器外爆炸变为有约束爆炸，估计爆炸波能量将集中作用于这些建筑物。另一方面从理论力学上说，楼房可看成高开孔率的中空悬臂梁，楼越高其根部越易形成更大的弯矩。因此，当装置中没有大量有毒气体时，在其附近的居民采用半地下式建筑似乎较为可取。当然防水、通风、采光应妥善安排。比如可用蒸镀铝的聚酯膜**敷于管道内以“引入”阳光。应避免将不同弹性模数的建材搭配使用，避免间歇施工和留马牙接口。在这些地区的建筑物窗框面积宜小，玻璃宜厚，且应使用防碎膜。玻璃和灯柱是判断爆炸烈度的两个最直观而又便于比较的判据。

本书为解释爆炸中的“取向”、“聚焦”等反常现象介绍了声波折射聚焦假说。但据知当把炸药做成带凹坑的形状时，在

* 见Hydrocarbon Processing, 1980(8), p.137——译者。

** 上海有生产。

凹坑方向上破坏作用最大。因此推测当可燃云团呈“飞旋镖”之类的不规则形状时会按同一机理发生取向现象。这些现象的解释或者有待于爆炸力学专家的指导。

本书是一本偏重于实用的技术著作。读者范围已如内容提要所述。希望这本书的出版有助于促进工业安全工作。

本书前五章和词汇解释由孙方震同志译出，其余各章和附录由侯耀先同志译出。全稿由孙方震同志整理，并在适当地方加了译注以方便读者。全书由沈阳化工学院梁光兴副教授审校。贾春厚同志对其中的附录部分作了审校工作。

鉴于时间仓促，水平有限，书中肯定存在不少缺点，望读者提出宝贵意见。

译者 孙方震 1984年12月

序 言

我为被聘请来给这本非常重要的书写序言而感到十分荣幸。我不能推托，因为我是化学工程师学会指导委员会的主席，而正是化学工程师学会安排自己的正式会员顾根博士从事这个领域的研究工作的。已经说过，必须明确这是顾根博士的著作，而不是与他有关的委员会的著作。我们所作的一切不过是提示指导方针、通过联系提供帮助，以及对他所提出的各种草稿进行评论。他被委托来对于容器外可燃蒸气云爆炸问题作彻底的和全面的严格考察。他在这项指定工作中出色地完成了任务，本书就是见证。

这本概论如此适时，以至无需为它做任何辩解。这样说并非过甚其辞。作为对化工文献的重大贡献，这本著作应当占据它应有的地位。本书收集并分析了到1977年初为止的所有已知事故资料。在这方面没有哪本别的著作能与本书相提并论。它的新奇之处还在于用平易的理论叙述为预测由容器外可燃蒸气云爆炸引起的损失后果提供了实用的方法。如顾根博士自己在谢辞中所说的那样，这仅仅是开始。不仅在理论预测方面，而且在预防和保护等有关方面，还有更多的规律有待探索。从属于这个题目的整个新领域正在被开发。在这一开发过程中化学工程师将跻身于开路先锋之列。同时他们将用这本书作为他们开始工作的指南。我确信这本书很快会成为标准参考书。然而在迅速增多的论著中它无疑地又将被新的发展所超过，但本书却仍不失为一个里程碑。我代表指导委员会为顾根博士的这一

著作向他表示祝贺。

最后，我要称赞化学工程师学会、特别是研究委员会和出版委员会在决定全部出版这本书方面所表现出的远见卓识和勇于进取的精神。当这个国家中的许多公众团体都表现得谨小慎微的时候，面对这种事业心是令人深受鼓舞的。我确信这将被证明是有充分根据的评价。

D. C. 福莱施沃特 教授

1978年9月于洛克堡

目 录

第一章 前言	1
第二章 绪论	5
第三章 燃烧及其物理学基础	8
一般概念	8
气态混合物的燃烧	9
爆燃	11
爆轰	15
火球	17
非均匀系统	17
大气的作用	19
第四章 对所有主要事故的回顾	24
例15和例48,新泽西州珀思和费津的情况	51
例53,宾州海湾炼油公司	53
例85,巴塞罗那事故	54
例38,杜兰事故	56
例49,隆海姆事故	59
例54,查理斯湖事故	60
第五章 有详细记录的容器外可燃蒸气云爆炸	63
例42,杰克斯滩事故	64
例55,帕尼斯事故	71
例66,哈得逊港事故	74
例81,弗里堡事故	80
例92,毕克事故	97
短评	103

第六章 实验工作	106
第七章 判断	137
第八章 各种各样的问题	142
死亡率	142
异常效应	146
气象条件的影响	147
第九章 预测、预防和防护	151
预测	152
预防	156
防护	158
第十章 总结和结论	162
附录	173
蒸气云的形成	173
爆炸波	181
能量释放模型	194
爆炸效应	203
常规凝聚相爆炸物	204
容器外可燃蒸气云爆炸	214
本书所使用的符号说明	225
参考文献	230
词汇解释	236

插图目录

图1	评价22次容器外可燃蒸气云爆炸效率的4阶对4阶对数标绘图	50
图2	评价20次容器外可燃蒸气云爆炸效率的4阶对4阶对数标绘图	51
图3	杰克斯滩事故的现场平面图——实例42 ⁷⁹	65
图4	受帕尼斯事故影响的主要区域的平面图——实例55	72
图5	哈得逊港事故影响区平面图 ¹¹ ——实例66	77
图6	弗里堡事故中直接涉及环己烷泄出的几个容器的俯视图和区域立面图——实例81	83
图7	弗里堡厂区平面图——实例81	88
图8	参数 $\frac{p(at_0)^3}{E_0}$ 和 $\frac{\phi(at_0)^3}{E_0}$ 随 τ/t_0 而变化的情况	92
图9	弗里堡事故中6号反应器(图6中的R2526)内部发生的破坏	95
图10	毕克事件的装置平面图 ⁹⁷ ——实例92	98
图11	毕克事件中泄放丙烯的工段流程图	101
图12	本报告中考察的压强形成及随后消失的模式的情况	183
图13	由于燃料/空气混合物内外声速不同引起的空气动力学加速效应(文中所谓“箍缩效应”)的图示	198

照片目录(见117~135页)

照片 1——大量燃料急剧地泄出到现存的火源处的情景(实例
15——加利福尼亚炼油公司)

照片2和3——帕尼斯事故爆炸中心附近的炼油厂设备和建筑物的
破坏情况

照片4,5和6——表示哈得逊港事故中爆炸中心的不同方位和距离
上的破坏程度

照片7——弗里堡爆炸在莱斯特大学电离层反射记录中引起的扰动

照片8和9——这两张照片显示出大范围的灯柱变形情况,它指出
了冲击波袭来的方向

照片10到15——表明弗里堡事故中压力对中空容器的作用

照片16到17——这两张照片表示位于照片12所示的反应器和照片
15中所示的槽车中间的铸铁人孔盖。这个人孔盖是单纯被
压力的作用所打碎的

照片18和19——这两张照片表示弗里堡的6号反应器中的破坏情
况,其轮廓在图9中有显示

照片20到25——弗里堡现场上灯柱的情景,偶数号码的照片相应
于变形平面内的视图,而奇数号码的照片相应于垂直于变
形平面方向上的视图

照片26——紧挨着爆炸中心处的一根灯柱的情景,它指出从两个或
多个不同方向上袭来的冲击波的不均匀的特性

照片27——距离爆炸中心象照片26中所示灯柱一样近的一根灯
柱,它所受到的几个力的净合力造成了最小的变形

照片28到31——在图10中所指出的地点上工厂设施的破坏情况

第一章 前 言

杰里·约翰逊·布莱门 (Gerry Johannsohn Bremen) 说*：“当现在进行的第三代燃料/空气爆炸物的开发工作完成时，以500公斤甲烷装药就能在距离爆炸边缘**100~130米的地方得到0.9公斤/厘米²的超压**（这么大的超压能造成严重的损坏和坍塌）”。

这段话提出了对于燃料/空气爆炸装置性能的期望，而一般来说这种期望还是符合实际的。它的基础是现有武器的实际性能。这篇文章接着说：“甲烷的可测超压峰仅为（原文如此）22~24公斤/厘米²。同时，若与环氧乙烷相比，甲烷是一种反应缓慢的气体”。

对于在日常工作中会接触到可燃蒸气云爆炸危险（尽管实际上并不那么密切）的一些工程师、计划工作者和其它人所面临的问题，在结合上述情况作出评论之前，进一步扩大论述范围还是有益的。就燃烧而言，甲烷是最不活泼的烃类之一，它的燃烧速度低而引燃温度又高。在标准的温度、压强条件（NTP）下，需要有7000米³的空气才能与500公斤甲烷形成等当量的混合物。这相当于一个直径23.7米的球体、或者一个直径29.9米的半球的体积。在这些情况下，烧着了的云团边缘（爆炸边缘?）***大约应该分别位于从对称中心算起25米和30米

* 见“International Defence Review”，(1976)，6，992~996——译者。

** 这类专门词汇的含意可参见书末“词汇解释”——译者。

*** 问号是原有的——译者。

远的地方。在发生爆炸的云团中心出现的最大超压为21~23大气压。同时，在距离中心125~160米处的压强要比正常大气压强高0.9大气压。

当然，上文所涉及到的是一些武器，它们被尽力设计得使其破坏威力最大。所列举的效能是通过存在于全部可燃空间中的炸药（detonator）来达到的。它们未必能自发地转化为爆轰。尽管如此，这个效能或许还是表现了目前所能预期达到的最大燃烧限度。虽然燃料/空气类型的炸药大部分是由烃类和烯烃氧化物*所组成的，但我却知道另外一种非军用方面的实例，其燃烧作用显然是与此类似的¹。这就是（主要是）温度大大超过其自燃点的高压 H_2 -CO混合物泄漏入空气的情形。下面将详述此事。

只是到了最近，因为容器外可燃蒸气云爆炸问题成了剩下的不多几个能使工艺装置及其周围环境被全部破坏的威胁之一，才对它引起了注意。1970年以前出版的关于燃烧学的教科书^{2~11}和1970年以后出版的少数几种教科书¹²均未提及在敞口大气中进行“正常”的燃烧作用可能伴有任何规模的危险的压缩效应。一些包括设计和安全问题的化工手册和教程（如参考文献13）都忽视了这种潜在危险。虽然早在1946年就出版过供学习用的文件，来讨论一般说来是相似的（然而人工的）模型中的大气扰动流体力学¹⁴，却未能确定火焰的基本特性和流体力学之间的决定性的联系。

这并不能认为是一种无足轻重的疏忽，而是在希望把事情搞清楚的时候却在理论上和概念上留下了一些难题。但更重要的是，直到取得这种爆炸现象的可靠经验之前，缺少承担必要

* 指环氧烷类——译者。

工作的推动力。进一步说来，不言自明、且已为实验工作所启示，为模拟无约束的可燃气体中的真实过程，所需要的实验规模不可避免地会是巨大的。

关于燃烧过程的正确表述方法即使在专家中间也还存在着争论。这些过程包括爆燃或爆轰。或者还有是否可以算作第三者都还不一定的、尚且不可名状的那些气体动力学事故 (gas dynamic event)。爆燃和爆轰的燃烧机理已经了解得相当清楚，并且已在实验室中被广泛地研究过，虽然这主要是在一维的或单轴几何对称的系统中进行的。在无约束爆炸的场合下与前述情况的主要区别在于，火焰的运动是在三维空间中进行的，并且惯性因素对于引起冲击波效应很可能是重要的。

甚至对于现象的表述方法也还有争论。拉斯巴什 (Rasbash¹⁵) 教授指出，他还不知道有什么例子是在完全没有约束的条件下造成了爆炸后果的。“约束”可以是化工厂的建筑物、植物群落和常规建筑物。说实在的，为写本报告所做的预备性研究仅举出了两个真正的无约束爆炸实例。两例均涉及从一开始就处于高度湍动状态的气体。当然这种效应通常是发生在“约束”型可燃蒸气云爆炸之中的。

可燃蒸气云*这个词的用法也可能成为问题。这个词给人的印象似乎应当包括那些在常温常压下作为永久气体 (permanent gas) 而存在的化合物**。然而本书所说的“可燃蒸气云”也应包括可燃液体的雾 (“fog, mist”) 和雾沫 (“spray”)。但不知道是否存在一个蒸气压下限，当超过这个下限时必然会

* 原文为 “Vapour cloud”；为避免与水蒸气混淆而又形象地暗示可能有雾滴存在，并考虑到本书主题所涉及的都是易燃物，故选择了“可燃蒸气云”这个名称——译者。

** 当是指临界参数比常温常压低得多的物质，见词汇解释——译者。

出现可燃液体的雾滴；甚至可燃粉尘的烟云能否产生爆炸效应也是不明确的*。

只要把上述这些保留条件铭记在心，并且不对“容器外可燃蒸气云爆炸”（Unconfined vapour cloud explosion）这种称呼作过于死板的理解，它就能为这种现象提供一个可以接受的（并且希望是可以被普遍接受的）摹状词。

* 原文如此——译者。

第二章 绪 论

写这篇报告的目的是给对这种现象感兴趣的人提供迄今为止有关经验的概述，并对于在技术出版物和近期会议、通信的讨论中所反映出来的流行思想作出评论。为此目的我曾恳请全世界每家主要石油化学公司和化工厂承包商提供事故细节，或在其事故评价过后作出的理论说明（rationales）。在同样基础上也与顾问们和大学各系进行了接触。因而我希望本书能成为以最近期资料为基础的权威论文。

尽管由于这个学会的方针所限不可能去从事实验工作，但在准备写这本书的时候还是引伸出了许多关于实验工作的想法。现论述于本书中。

许多有机会参考本书的人可能既没有燃烧方面的经验又没有适当的技术基础知识。因而本书的文体力求平易，而将大段的理论放在附录中去论述。同样，对较基本的概念作了解释以期能增进理解。这将意味着那些有一定技巧和经验的人可以找到能帮助他们理解基本术语的段落。我恳请他们谅解。我的做法实质上是实用主义的：即严密的理论总有一天会使我们能够有把握地事先估计事故的危险性的，尽管目前尚未做到这一点。

本研究的精髓是（使事故损失预测）定量化，并将发生破坏的可能性与事故造成的实际破坏相比较，再进一步把它与死亡率和普通炸药肇事所招致的损失统计相比较。我认为这样做避免了常规危险分析方法中使人生厌的争论。这是由于本方法