

高压容器事故与分析

卓震 奚桂明 编著



中国劳动出版社

高压容器事故与分析

卓 震 奚桂明 编著

江苏工业学院图书馆
藏书章

中国劳动出版社

(京)新登字114号

高压容器事故与分析

卓震 奚桂明 编著

责任编辑: 张秉淑

中国劳动出版社出版

(北京市朝阳区惠新东街1号)

北京地质印刷厂印刷

新华书店科技发行所发行

787×1092毫米 16开本 11印张 268千字

1994年10月北京第1版 1994年10月北京第1次印刷

印数: 3000册

ISBN 7-5045-1558-2/T·027 定价: 10.00元

内 容 提 要

本书对近20年来国内外高压容器发生的重大事故及原因作比较详细的分析,并提出防止事故发生的措施,以期作为高压容器选材、设计、制造、操作和管理方面的借鉴。

本书还就安全工程学中值得重视的故障树分析方法和缺陷评定方法作了简要的论述和解释,并提供了应用范例。

本书可供化工和石油等方面从事高压容器研究、设计、制造、安装、检验和管理的工程技术人员参考,亦适用于高等院校和中专院校有关专业师生。

本书由卓震、奚桂明编著,林均富审稿。

前 言

在石油、化工、核能及动力等工业中，许多生产过程是在高压和超高压下进行的，高压容器则是实现这些工业过程的必不可少的关键设备。近年来，由于高压容器逐渐趋于单系列大型化，高压容器的尺寸越来越大，操作压力和温度越来越高，对安全可靠性的要求也越来越严格。然而，国内外的统计数字表明，压力容器虽然不像一般转动机械那样容易磨损，但它的破坏率还是相当高的，高压容器更由于其价格昂贵，在工业中的地位重大，并且隐藏着巨大的破坏力，高压容器的破坏事故已成为急待解决的一个严重问题，也是压力容器安全工程学中的一个重要的课题。

高压容器发生爆炸事故，不仅使设备自身遭到毁坏，而且还将破坏周围的设备装置和建筑物，甚至造成人身伤亡。高压容器由于种种原因发生爆破时，内部的介质即卸压膨胀，瞬间便释放出巨大的能量，它不仅可使碎块以很高的速度向外飞散外，而且在大气中产生的冲击波还将产生更大的破坏。根据高压容器周围的条件，有时只发生爆炸；也有时这个爆炸继而引起可燃物的燃烧而酿成火灾。诚然，爆炸与高压容器破坏是两回事，应加以区别。

高压容器的事故总是在意想不到的情况下突然发生的，但这并不是说，高压容器的事故是不可避免的。随着压力容器安全工程学的兴起，各有关学科研究的进展，对已发生事故进行分析并探索其防止的方法，已成为可能。这种分析不仅涉及到高压容器的选材、设计、制造、检验及水压试验等环节，而且关系到吊装、运输乃至使用操作和管理等各有关过程。可见，对高压容器的事故进行综述、分类和分析发生事故的原因，是十分细致的工作。本书将以七个章节分别论述高压容器的概况、高压容器破裂爆炸与危害、高压容器破坏形式与分析方法、高压容器的事故与分析 and 防止高压容器发生事故的主要措施。

对高压容器事故进行探讨和分析，是压力容器安全工程学的重要课题，其分析方法将涉及许多理论和学科。本书在论述高压容器破坏事故的同时，拟引用与之有关的分析方法、科技成果和相应理论，指出发生高压容器事故的原因与防止措施，使高压容器得以安全可靠地运行。

目 录

第一章 高压容器概论.....	1
一、高压容器在工业装置中的地位.....	1
二、国内外高压容器概况.....	1
三、高压容器的可靠性.....	2
四、高压容器的安全分析.....	3
第二章 高压容器破裂爆炸与危害.....	6
第一节 高压气体的爆炸能量.....	6
第二节 高压气体爆炸的冲击波及其破坏能力.....	7
一、冲击波及其破坏作用.....	7
二、冲击波的超压.....	8
三、高压容器破裂的破坏作用.....	9
第三章 高压容器的破坏形式.....	12
第一节 过度的塑性变形.....	12
第二节 过度的弹性变形.....	13
第三节 大应变疲劳.....	14
第四节 腐蚀疲劳.....	16
第五节 应力腐蚀.....	16
第六节 脆性破裂.....	18
第七节 氢腐蚀破坏.....	21
第四章 高压容器事故的分析方法.....	25
第一节 宏观检查.....	25
一、对断口进行宏观检查必须注意的要点.....	25
二、拉伸断口特征的三要素.....	25
三、裂缝源宏观位置的确定.....	26
四、裂缝源区宏观位置的确定.....	27
五、断口表面的宏观分析.....	28
第二节 微观检查.....	29
一、试样的制备与保存.....	29
二、光学显微镜分析法.....	31
三、电子显微镜分析法.....	31
四、其它测试技术的应用.....	32
第三节 化学成分复查.....	34
第四节 机械性能复查.....	36

一、机械性能测定的目的	36
二、按机械性能评定金属材料的内容	36
三、测定机械性能数据的注意事项	36
四、压力容器材料的机械性能指标	37
第五节 疲劳分析方法	39
一、概述	39
二、容器是否要作疲劳分析的判断	44
三、疲劳分析的步骤	45
四、断裂力学在高压容器疲劳分析中的应用	47
五、环境的疲劳破断	49
第六节 断裂力学分析方法	52
一、概述	52
二、断裂力学的基本概念	54
三、断裂力学在压力容器破坏事故分析方面的应用	66
四、疲劳寿命	71
五、压力容器的应力腐蚀断裂	74
第七节 蠕变分析方法	75
一、蠕变现象的特点	75
二、影响蠕变速度的因素及蠕变速度方程	75
三、压力容器的蠕变应力与变形计算	76
四、高温密封螺栓的应力松弛	78
第八节 档案文件的审查	79
一、容器原始技术资料	79
二、容器使用记录	79
第五章 高压容器事故与分析	81
第一节 高压容器事故实例	81
第二节 高压容器发生破坏事故的原因	93
一、高压容器的材料	94
二、高压容器的设计	95
三、高压容器的制造	96
四、高压容器的疲劳	98
五、高压容器的温度	99
六、高压容器的介质	100
七、高压容器的操作	101
八、高压容器的安全技术	102
九、高压容器的管理	102
第六章 防止高压容器发生事故的主要措施	105
第一节 防止脆性断裂事故的建议	105
一、设计合理结构, 减少应力集中	105

二、选择适宜材料, 保证足够的抗脆断的断裂韧性值	106
三、充分消除残余应力, 保证材料的断裂韧性大于裂纹尖端附近的应力强度因子	106
四、加强对压力容器的技术检验, 保证缺陷裂纹在允许的安全范围内	106
第二节 防止产生疲劳破坏、蠕变破坏和腐蚀破坏的措施	107
一、防止产生疲劳破坏的措施	107
二、防止产生蠕变破坏的措施	108
三、防止腐蚀破坏的措施	108
第三节 改进并发展无损检验及事故分析的方法	109
一、概述	109
二、高压容器的无损探伤技术	110
三、无损探伤方法的发展	110
四、断裂力学方法在事故分析中尚待完善的几个问题	112
第四节 高压容器使用和管理的原则	114
第七章 压力容器缺陷评定规范及其在高压容器事故分析中的应用	115
第一节 概述	115
第二节 我国《压力容器缺陷评定规范》(CVDA—1984) 简要解释	115
一、《规范》适用范围	116
二、评定所需资料	116
三、无损检测	116
四、评定顺序	117
五、关于缺陷的简化	117
六、关于裂纹群的处理	118
七、等效裂纹尺寸 $\bar{a}$	119
八、应力和应变值的确定	120
九、材料性能数据的确定	121
十、脆断评定	122
十一、疲劳评定	123
十二、其它失效形式的评定	125
第三节 CVDA—1984应用实例	126
第八章 故障树分析及其在高压容器事故分析中的应用	130
第一节 概述	130
第二节 故障树形图	131
第三节 最小割集的求取	132
第四节 顶事件的发生概率	134
第五节 结构重要度	134
第六节 应用范例	135
附录	140
参考文献	167

第一章 高压容器概论

一、高压容器在工业装置中的地位

随着化工、炼油、原子能、重型机械等工业的迅速发展，高压技术在现代工业技术中获得愈来愈广泛的应用。在化学、石油工业中，合成氨、合成尿素、合成甲醇、高压聚乙烯和石油中的重油加氢等，都是将不同的介质在高压下借助温度和催化剂生成重要的产品。如合成氨工业中的高压设备压力为 15~60 MPa；合成尿素工业中的高压设备压力为 15~20 MPa；合成甲醇工业中的高压设备压力为 15~30 MPa；石油加氢工业中的高压设备压力为 8~70 MPa；高压聚乙烯装置的设备压力为 150~250 MPa；重型机械工业中，蓄力器的压力约 30 MPa；原子能工业中的核反应堆钢制容器则是高温高压容器等等。在化学、石油工业中使用的高压容器，其操作条件随工艺过程的变化而不同，不仅承受高压，而且有高温和低温，并往往伴随有介质的强烈腐蚀，这就对高压容器的设计、制造与检验等，提出了更为严格的要求。可以说，高压设备作为强化生产工艺过程，往往是主体的、关键的设备，在工业装置中处在至关重要的核心地位。

从安全技术方面来看，容器的工作压力越大，发生爆炸事故的破坏也越严重。为了便于对压力容器的分级管理和进行技术监督，我国《压力容器安全技术监察规程》规定，当容器的最高工作压力为 $10 \leq P < 100$ MPa（表压）时为高压容器；100 MPa（表压）以上的为超高压容器，对上述容器，国家劳动部门负责实施严格的监督检查。

高压容器中的工作介质，有许多是易燃或有毒的，这些容器如果在运行中发生事故，除了由于容器本身破裂爆炸所造成的破坏以外，还会由于内部介质的向外扩散而引起化学爆炸、着火燃烧或恶性中毒等连锁反应，造成更严重的破坏。从这方面来看，差不多所有的国家都把高压容器作为一种特殊的设备。

二、国内外高压容器概况

高压容器作为强化生产工艺的重要设备，其发展是相当迅速的。我国除了国产的高压容器外，近几年来亦引进了为数可观的高压装置。我国高压容器制造业，尽管起步晚，但在高压领域的许多方面，也居于领先的地位，如倾角错绕扁平钢带式高压容器，它代替了轧制困难的槽形钢带，解决了深环焊缝焊接和检验的困难，广泛应用于化肥和重型机械等工业上。

高压容器的安全分析，总是与高压容器的结构特点、用材情况和制造技术紧密联系在一起，这样才有可能对发生事故的高压容器进行最初步的分析，而后运用高压容器理论及其相应的方法，才能作深入的探索，分析发生事故的根本原因，提出防止事故的措施。

近代高压容器结构有如下特点：

1. 由于承受较高的压力载荷，壁厚较大。而且随着单系列、高参数化的结果，容器的直径增大，因而器壁也增厚。为了保证容器的强度，同时减轻其重量，常采用高强度材料；
2. 随着新型高压密封技术的采用和制造水平的提高，高压顶盖的造型已有所改变，

即除平端盖外,在较大直径的高压容器上,大都采用半球形端盖,这给高压容器的应力分析带来新的课题;

3. 在特定场合下,为了保证足够的反应空间,常追求大数值长径比的优化目标,这就给高压容器的制造、热处理的检验带来了新的要求。

高压容器由于结构上的一系列特点,对材料的要求也有所不同。近期高压容器在选材方向上主要围绕以下三方面进行:

- (1) 技术经济效果;
- (2) 工艺性能;
- (3) 钢材质量。

从高压容器使用的安全性来选材,对钢材的韧性提出更严格的要求,已引起越来越多的重视。正因为如此,与50年代和60年代重大不同的是,近代高压容器用钢的屈服点均在700 MPa级以下,而广泛使用的钢种屈服点则在500 MPa级以下。如单层卷焊容器用钢板的屈服点一般在450 MPa级以下;多层包扎容器层板的屈服点多为500~630 MPa;多层热套容器广泛采用屈服点580 MPa级以下的钢号。这些情况都说明了近期高压容器用低合金钢不再向高强度方向发展,而重视于韧性的选择;不再偏重于钢材的合金化,而对热处理特别是冶金质量的作用给予了足够的重视。

从高压容器的筒体结构来看,我国在役的国产和进口高压容器,主要是以下几类:

第一、单层筒体结构:锻造式、单层卷焊式;

第二、多层筒体结构:多层包扎式、多层卷板式(多层绕板式)、螺旋包扎式、多层热套式;

第三、绕制筒体结构:型槽绕带式、倾角错绕扁平钢带式、绕丝式。

此外,国外还有一些特殊的筒体制造方法。上述不同结构的筒体,使得高压容器在以下诸方面都有不同的要求和特点,即材料选择、制造、焊接、焊后热处理、耐蚀性和抗氢性、耐压强度、破坏特性、热应力和热疲劳等各不相同,因此它们的安全性也不同,必须对发生事故的高压容器作具体的安全分析。应当看到,这些高压筒体的安全性将随研究与制造技术的提高,检测和操作水平的进步也将日益增大。

三、高压容器的可靠性

可靠性分析起源于电子工业,可对产品作出定量分析。对压力容器的可靠性进行分析,

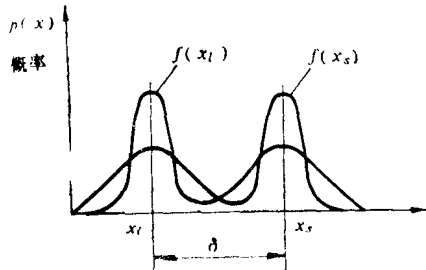


图 1-1 可靠性概率(两个参数)干涉模型

则是可靠性工程学在这一领域的突破。利用近代数理统计方法全面评价容器的安全程度和经济合理性,这种概率设计是容器可靠性设计的重要组成部分。利用这一成果,可对产品的各影响因素在规定的时间内完成功能的概率作出定量的回答;将其应用在容器的安全分析上,便可查出发生事故的主要因素,这就从根本上变革了事故的分析方法。诚然,这种数理统计的分析方法对压力容器来说,应具备载荷图谱等必要的基础数据,它是建立在容器的

科学管理和准确记录的基础上获取的。

失效可能性大小可用概率设计计算。现以两个参数的简单情况为例。如图1-1所示,

以正态分布的曲线 $f(x_r)$ 、 $f(x_i)$ 分别代表容器材料性能和外加载荷变化特性的函数, 其均值 $\bar{x}_r$ 和 $\bar{x}_i$ 之比 $\frac{\bar{x}_r}{\bar{x}_i}$ 就是安全系数 n , 两曲线相交部分的面积即为失效概率 P , 可靠性概率

则为 $(1-P)$ 。提高安全系数, 则 $f(x_i)$ 曲线向左移, 相交面积减小, 直至两曲线不相交, 失效概率则为零。当然, 也可以用改善曲线的离散度来减小失效概率。在一具体问题上由于因素较多, 要全面考虑以决定采用何种方法。如过分提高探伤的灵敏度, 将使产品合格率大大降低, 但对产品安全性的改善并不显著, 不如提高材料韧性来得有利。

可靠性 (Reliability) 表示是否足以信赖的程度, 即表示不易发生故障的意思。用于定性时, 称可靠性; 用于定量时, 称可靠度。

现代化学工业, 由于设备大型化、单机化、高性能化、连续化与自动化的程度愈来愈高, 设备的故障停产损失愈加巨大; 生产的总经济效益对设备的依赖性愈来愈大, 对设备可靠性的要求更高。所以, 不论是设计工作还是采用科学方法分析设备故障原因, 都必须考虑可靠性的问题。上述所指的可靠度, 是表示系统或设备在规定的时间内不发生故障的概率。可靠性技术在高压容器事故分析上最为重要的是设备的可靠性设计、可靠性预测和平均寿命的估算等。

可靠性设计是可靠性技术的首要工作。因为设计将决定每台设备固有的可靠性。设计上的先天失调, 在以后的制造、使用和维修上, 不管采取什么良策, 除非更新改造, 是极难加以改进的。从经济观点看, 消除可靠性不佳而导致资源浪费与危害的最佳对策, 是在设计阶段选择合理的可靠性。

可靠性预测是根据设备的零件或系统组成要素的功能、工作环境及其相互关系, 推测设备或系统的未来性能的技术。运用这种技术, 已成功地对高压容器的一些严重事故作出故障分析。可以断言, 这种可以定量地回答设备或零部件在操作运行中的失效概率或可靠性, 将在压力容器事故分析中发挥重要的效能。

四、高压容器的安全分析

高压容器发生事故的具体分析技术, 本书在第三章中要作详细的讨论。这里要加以说明的是事故分析的意义, 进行事故分析的条件和事故分析的基本方法。

1. 事故分析的意义

不论什么工厂和装置, 总是力图把发生事故的次数降低到最低限度, 以便获取最高的经济效益, 因此事故率是和设备的运转率相关连的。据有关资料报导, 我国七个化肥厂关于尿素和合成氨生产的运转率分别由65.7%和60.3%提高到88.45%和86.06%, 产量则分别提高了90.67万吨和158.9万吨, 每吨成本分别降低了6.1元和25.2元, 消耗也相应下降, 经济效益相当显著。

现代化工和石油工业装置, 广泛采用了高温、高压技术, 并使之设备大型化, 其工艺条件随着装置的开停车发生很大的变化, 这种大起大落很容易产生极严重的后果, 即疲劳破坏, 或由于应力水平的提高而缩短设备的寿命。某化肥厂一段转化炉, 由于两次突然停车和处理不当, 使261根 HK 40 炉管过早发生裂纹破坏, 导致了重大损失。

事故分析是作为降低设备事故率的一种行之有效的科学方法。运用事故分析法可以对已发生的事故作出定量的分析, 找出原因, 而后寻求对策加以排除, 保证装置、设备的安全运行。

2. 进行事故分析的条件

进行事故的安全分析，首先必须有可靠的、完整的设备运转记录、检修记录及其它设备档案资料，其中包括设计资料、制造工艺和检验等基础档案。可以设想，如果没有这些资料，就不可能对事故作出合理的、全面的分析。这些资料主要有以下几项：

(1) 主要设备档案、记录、设计、制造和安装时的有关数据，包括设备图纸、计算书、各种检验记录及投产日期；

(2) 设备运行记录。如设备运行中的温度、压力、流量等数据，累计运行时间和异常现象；

(3) 定期检查和检修记录；

(4) 设备事故记录。如发生事故的详细过程、原因及事故处理方法等。

3. 事故分析的基本方法

事故分析的方法一般有统计分析法、分步分析法和典型事故分析法等。

(1) 统计分析法

通过统计的手段，找出某事故占该设备总事故的百分比，然后分析事故产生的主要症结所在，称为统计分析法。

工业发达国家通过对设备腐蚀事故作统计分析看出，应力腐蚀和疲劳腐蚀是占第一位的破坏形式。即在腐蚀介质中，材料在拉应力状态下，便有可能发生应力腐蚀，产生裂缝或微裂缝，而外表往往没有被腐蚀的现象，有的甚至还有金属的光泽。这种破坏常常突然出现，因此必须采取相应的对策。例如，对于遭受应力腐蚀的设备，必须加强探伤检查其裂缝和微裂缝；如果设备尚未投入使用，对于可能遭受应力腐蚀的设备，要作消除应力的处理等。

(2) 分步分析法

分步分析法是对设备的事故进行由大到小而逐步进行的，最后找到产生事故的原因，进而采取对策。这种方法对于大型化、连续化的系统分析是很有益的，对于单独的设备事故，在寻找事故原因过程中，仍不失为一种较好的方法。

(3) 典型事故分析法

典型事故分析法是一种可靠的专题分析方法。事故的调查可按下述的程序进行，这种方法为高压容器事故分析所经常采用。

① 迅速调查事故现场，获取充分的、可靠的、原始的第一性资料；

② 搜集现场的技术资料。如拍照、绘图、记录等，以便作进一步的细微的研究；

③ 事故调查。如弄清事故发生前的操作内容和操作方法，力求把事故全过程的真相搞准确；

④ 模拟实验、分析化验；

⑤ 按科学方法作出准确判断；

⑥ 建立档案，采取对策。

事故的调查分析，不仅是为了查出事故发生的原因，更重要的是据此订出防止事故发生的措施。正如可靠性分析所指出的，设备事故发生的原因往往不只一个，因此预防措施也往往有几种，不过从概率可以清楚看出，数值较大的总是发生事故的主要原因。可靠性分析作为高压容器安全分析的重要一环，正在展示与过去不同的分析技术的发展前景。

本书在第四章里列举的高压容器事故实例，就是运用典型事故分析方法寻找发生事故的原因，亦即按照上述六个步骤进行。有关事故调查时的各种技术处理，本书在第三章第二节中逐项予以论述。可以看出，不论事故的形式多么不同，而其分析步骤基本上是相似的，当然，由于高压容器破坏的形式不同，具体的技术处理细节是不可能一样的，这一点在典型事故实例的比较中可以清楚看出。按科学的方法对事故作出准确的判断，是事故分析的关键所在，它的准确性完全取决于技术处理是否正确和据此作出判断的理论基础是否可靠。近代压力容器事故分析的技术与理论在日臻完善，在这一部分，本书就目前工程技术界认为广泛采用的方法，亦在第三章里给予论述。而在第七章里，将较详细论述故障树分析方法及其应用范例。

第二章 高压容器破裂爆炸与危害

爆炸是一种极其迅速的物理的或化学的能量释放过程，是系统的内在势能转换为机械能及光和热的辐射等。高压容器破裂时，器内的高压气体冲破了维系其约束的外壳，迅速膨胀，并以很高的速度释放其内能，这是一般所指的物理爆炸现象的特征。

如果高压容器的工作介质是可燃或易爆的，在容器破裂后，它迅速与周围的空气形成可爆性的混合气体，此时若有容器碎片撞击设备而发生火花，或由于高速气流导致的静电作用，会立即发生化学爆炸，这就是通常导致又一次破坏的二次爆炸。此时可燃气继续向四周扩散，引起周围的大面积的可燃物燃烧，造成火灾损失。

高压容器的工作压力在10MPa以上，容积较大，其爆炸能是很大的，它所产生的危害是多方面的。一方面，高压容器破裂时，气体急速膨胀所释放的能量使容器进一步开裂，并使容器的碎片以较高的速度向四周飞散，造成人身伤亡或撞坏周围的建筑与设备等。另一方面，释放能量的更大一部分产生为冲击波，发生更大的破坏作用。因此，研究高压容器的爆炸，是分析高压容器事故的一个重要方面。

第一节 高压气体的爆炸能量

高压容器破裂爆炸时，气体膨胀所释放的能量不仅与气体的压力与容器的容积有关，而且与器内介质的物性集态有关，但大部分压力容器内的介质都是以气态存在的，是一种压缩气体。这种气体在容器爆炸时，不产生集态的变化，而只是降压膨胀的一种简单膨胀过程。由容器破裂前的高压下降至大气状态的压强，这一过程所经历的时间是极短的，不论与周围大气的温差多大，都可以认为气体的膨胀过程是在绝热状态下进行的，即认为爆炸的热力过程是绝热过程。所以，研究高压气体的爆炸能量就是确定气体绝热膨胀所作的功。

根据气体热力学原理，理想气体进行绝热膨胀所作的功为

$$U_g = \frac{pV}{K-1} \left[1 - \left(\frac{1}{10.2P} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right] \times 10^4 \quad (2-1)$$

式中 U_g ——气体膨胀所作的功，N·mm；

p ——器内气体的绝对压力，MPa；

V ——容器的容积，m³；

K ——气体的绝热指数。

气体的绝热指数，是气体的定压比热与定容比热之比，可按气体的分子组成确定。压力容器中常用的压缩气体绝热指数的精确值可从表2-1查得。

若令气体的绝热指数均为1.4，代入(2-1)式即得这些气体的爆炸能量为

$$U_g = 2.5 pV [1 - (p)^{-0.2857}] \times 10^4 \quad (2-2)$$

令

$$C_g = 2.5 p [1 - (p)^{-0.2857}] \times 10^4$$

表 2—1 常用压缩气体绝热指数

气体名称	空气	氮	氧	氢	甲烷	乙烷	一氧化碳	二氧化碳
绝热指数	1.4	1.4	1.397	1.412	1.315	1.18	1.395	1.295

则 (2—2) 式可简化为:

$$U_g = C_g V \quad (2-3)$$

式中 C_g ——压缩气体爆炸能量系数, $\text{N}\cdot\text{mm}/\text{m}^3$ 。

由上可见, 压缩气体爆炸能量系数随绝对压力而定, 即 C_g 是 p 的函数, 只要知道压缩气体的绝对压力, 即可算出压缩气体爆炸能量系数, 进而由 (2—3) 式计算出气体的爆炸能量。

工作介质为可燃气体的压力容器破裂时, 除了器内气体膨胀释放能量以外, 往往还会发生器外二次爆炸, 放出更大的能量。高压容器破裂时, 器内的可燃气体大量流出, 并迅速与外面的空气相混合, 形成一团可爆性混合气体, 由于气体高速流出产生的静电或容器碎片撞击设备产生的火花为这团可爆性混合气提供了爆炸条件, 于是在容器爆炸后很快又发生化学爆炸。这两次爆炸往往是相继发生的, 中间的间隔时间很短, 以致往往不能从音响上加以辨别, 而且第二次化学性爆炸的能量常要比第一次气体膨胀的能量大得多。

然而, 要准确地计算这部分爆炸性混合气体的爆炸能是比较困难的。虽然容器内的可燃气体量是已知的, 而且在容器爆炸时又几乎全部流出, 但由于这些气体在向大气空间扩散中, 只有外围一部分可燃气体与大气中的氧混合形成爆炸性气体, 并非全部可燃气体参加反应。而参与可燃气体反应的量却与很多因素有关, 例如容器周围的气流情况、气体的爆炸极限范围、出现火源的时间等, 因此一般只能是估算, 即假定参与爆炸反应的气体所占的百分比, 然后按这些气体的燃烧热计算其爆炸能量, 因此这种估算只能用以确定一个大致的破坏范围, 作出概略地估计。

第二节 高压气体爆炸的冲击波及其破坏能力

一、冲击波及其破坏作用

高压容器破裂时气体爆炸能量只有很少一部分将容器进一步撕裂和将容器或其碎片抛出, 其余大部分产生冲击波。据估算, 前者所消耗的能量只不过占爆炸能量的3%~15%。

冲击波是一种介质状态突跃变化的强扰动传播, 这种突跃变化是介质受到外界的作用而产生的。必须清楚, 冲击波可以在各种介质内传播。高压容器破裂时, 器内的高压气体大量冲出, 使它周围的空气受到冲击而发生扰动, 使其压力、密度、温度等发生突跃变化, 这种扰动在空气中的传播就成为冲击波。

空气冲击波中状态的突跃变化最明显地表现在压力上。离爆炸中心一定距离的地方, 空气压力会随时间发生迅速而悬殊的变化。开始时, 压力突然升高, 产生一个很大的正压力, 接着又迅速衰减至零, 然后还要继续下降至小于大气压力的负压。如此反复循环数次, 使压力的变化一次比一次小得多, 而且, 最大负压值要比最大正压值小得多 (仅为最大正压力的几分之一)。所以, 在大多数情况下, 冲击波的破坏作用主要是由波阵面上的超

压引起的（即冲击波开始产生时的最大正压力）。

空气冲击波波阵面上的超压 Δp ，对建筑物将产生不同程度的破坏，如表2—2所示。实际上有些建筑物的破坏程度，主要决定于冲击波的冲量，即冲击波的平均正压力与持续时间的乘积（MPa·ms）。在一般情况下都以超压的大小来作为破坏程度的基准。

表 2—2 不同超压对建筑物的破坏作用

超 压 Δp MPa $\times 10.2$	破 坏 情 况
0.05~0.06	门窗玻璃部分破碎
0.06~0.10	受压面的门窗玻璃大部分破碎
0.15~0.20	门框损坏
0.20~0.30	墙裂缝
0.40~0.50	墙大裂缝，屋瓦掉下
0.60~0.70	木建筑厂房房柱折断，房架松动
0.70~1.0	砖墙倒塌
1.0~2.0	防震钢筋混凝土破坏，小房屋倒塌
2.0~3.0	大型钢架结构破坏

冲击波除了破坏建筑物以外，它的超压还会直接危害在它所涉及范围内的人身安全。例如冲击波超压大于0.1MPa时，大部分人员会死亡；0.05~0.1 MPa的超压可以使人体的内脏严重损伤或引起死亡；0.03~0.05MPa的超压会损伤人的听觉器官或产生骨折；超压为0.02~0.03MPa时也可以使人体受到轻微的损伤。只有在小于0.02 MPa的冲击波超压时才能保证人员的安全。

二、冲击波的超压

如何确定容器破裂爆炸所产生的冲击波超压是一个比较复杂的问题。

冲击波波阵面上的超压首先与产生冲击波的能量有关。在其它条件相同的情况下，气体爆炸能量越大，冲击波强度就大，波阵面上的超压也越大。其次，波的强度随着传播距离的增加而逐渐衰减。爆炸气体产生的冲击波是立体形的冲击波，它以爆炸点为中心，以球面状向外扩张。随着球半径的增大，波阵面的表面积不断增大，此时即使没有其它的能量消耗，通过波阵面单位面积上的能量也会逐渐减小。另外，冲击波的正压区随时间的增加而不断变宽，压缩区的空气量也不断增大，因此，单位质量空气的平均能量也要下降，何况在冲击波传播过程中存在不可避免的能量消耗，所以冲击波在空气中传播的波阵面的超压是不断下降的，到最后超压 $\Delta p \rightarrow 0$ 时，冲击波就变成声波。

压力容器爆炸时所产生的冲击波，由于情况很复杂，目前对压力容器爆破产生的冲击波超压测定困难较大，一般都是按同能量的梯恩梯的爆炸所产生的超压来确定。

在相同的爆炸条件下，距离爆炸中心越近，波阵面上的超压也就越大。表2—3是100千克的梯恩梯炸药在空气中爆炸时，在离爆炸中心不同距离处所测得的冲击波超压。

由表2—3中的数值可以看出，冲击波的超压随着距离的增大而迅速衰减。冲击波的超压主要取决于药量 q 和距离 R ，即 $\Delta p = F(q, R)$ 。对于这种函数关系目前还缺乏一个既简单又精确的方程式，而是由试验确定，并按比例法则进行。实验表明，不同数量的同类炸药发生爆炸时，如果距离爆炸中心的距离 R 之比与炸药量的 $1/3$ 次方之比相等，则所产

表 2-3 离爆炸中心不同距离处的冲击波超压

距 离 R (m)	15	16	20	25	30	35
超 压 Δp (MPa $\times 10$)	0.93	0.768	0.521	0.330	0.192	0.129

生的冲击波超压相同,可用下式表示:

$$\text{若令 } \frac{R}{R_0} = \left(\frac{q}{q_0} \right)^{\frac{1}{3}} = \alpha, \text{ 则 } \Delta p = \Delta p_0 \quad (2-4)$$

式中 $\alpha = (q/q_0)^{\frac{1}{3}}$, 称为炸药爆炸试验的模拟比, 故 (2-4) 式也可改写为

$$\Delta p(R) = \Delta p_0(R/\alpha) \quad (2-5)$$

由公式 (2-5) 可以从某些已知药量的试验中所测得的超压来确定任意药量爆炸时在各种相应距离下的超压值。表2-4是 1 吨梯恩梯炸药在空气中爆炸时所产生的冲击波超压值。

表 2-4 1 吨 TNT 爆炸时的冲击波超压

距 离 R_0 (m)	5	6	7	8	9	10	12	14	16	18	20
超 压 Δp_0 (MPa $\times 10$)	30	21	17	13	9.1	7.8	5.1	3.4	2.4	1.74	1.29
距 离 R_0 (m)	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75
超 压 Δp_0 (MPa $\times 10$)	0.81	0.59	0.44	0.34	0.28	0.24	0.21	0.184	0.164	0.146	0.132

压力容器爆炸时所产生的冲击波, 远比上述情况复杂, 因为冲击波超压除受爆炸能量和距离的影响以外, 还与爆炸气体的压力有一定关系。而压力容器的爆炸气体压力变动范围很大, 高压容器与超高压容器的气体压力为从一百大气压至几千大气压。所以爆炸时产生的冲击波超压除上述气压之外, 还应该与爆炸能释放的时间有关, 而且, 压力容器爆炸时, 由于破裂形式不同, 因此气体膨胀所经历的时间就不一样, 这些复杂的情况给通过模拟试验按比例法则确定任意爆炸能量所产生的冲击波超压带来了较大的困难。由于上述这些原因, 目前对压力容器爆破所产生的冲击波超压都是按同能量的 TNT 的爆炸所产生的超压来确定, 这种方法不可避免地存在一定的误差, 特别是距爆炸中心的距离较小时误差更大。然而, 冲击波所产生的超压在很小的距离内即衰减至几个大气压, 当距离超过几米以外时, 同能量的压力容器气体爆炸与炸药爆炸所产生的超压还是相近似的。为此, 先要把爆炸能 U 换算成 TNT 当量 q' 。一千克炸药爆炸时产生的热量, 即 TNT 的平均爆热约为 4230kJ, 则:

$$q' = 9.8U / 427 \times 4230 = 5.43 \times 10^{-6} U \quad (2-6)$$

然后按公式 (2-4) 求出模拟比, 即 $\alpha = (q'/1000)^{\frac{1}{3}}$, 并以此值代入公式 (2-5) 求得距离为 R 时的超压 $\Delta p(R) = \Delta p_0(R/\alpha)$ 。

三、高压容器破裂的破坏作用

高压容器破裂时, 高压气体高速喷出的巨大反作用力可以把整个高压容器壳体推倒,