



# 压力容器安全

劳动部职业安全卫生监察局 主编

劳动人事出版社

## **压力容器安全**

责任编辑：任萍

劳动部职业安全卫生监察局 主编

劳动人事出版社出版

(北京市和平里中街12号)

北京隆昌印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 11.125印张 247千字

1989年12月北京第1版 1990年3月北京第1次印刷

印数：5000册

ISBN 7-5045-0439-4/TH·038 定价：5.10元

## 内 容 提 要

本书共分七章。第一章介绍压力容器的分类、基本结构、载荷与应力等基础知识。第二章结合近年来国内外发生的各类压力容器事故实例，全面地系统地分析了压力容器破裂爆炸的基本原因。第三章和第四章从加强安全管理、防止发生事故的角度，有针对性地提出了对压力容器在设计制造质量及使用维护等方面的具体要求。第五章论述压力容器的安全装置，着重介绍各种安全泄压装置的工作原理、特点，如何正确选用、安装与维护等知识。第六章和第七章详述压力容器发生爆破事故所产生的各种危害，容器发生事故后如何进行事故分析等。

本书是全国培训劳动保护专业干部和企业安全技术干部的教材，也可供压力容器安全监察、检验人员，有关的科技人员以及中专院校有关专业的师生阅读、参考。

## 前 言

近十年来，劳动保护事业迅速发展，劳动保护、安全生产成为四化建设的重要组成部分。为了适应劳动保护工作的法制化、科学化和标准化的需要，适应劳动保护监察工作的需要，劳动部职业安全卫生监察局组织有关部门的专家编写了一套劳动保护干部培训教材，供全国培训劳动保护专业干部和企业安全技术干部使用，同时可作为大中专院校安全工程专业的学习参考书。

这套教材是以党的劳动保护方针为指导，以国家颁布的劳动安全卫生条例、规程、标准为依据编写的，努力反映国内外劳动保护科学技术的新发展，反映我国劳动保护管理和立法监察工作的新发展，坚持科学性和实用性相结合的原则，力求准确地阐述和介绍劳动保护专业各门学科的基本原理和基础知识。

《压力容器安全》是这套教材中的一种，由吴粤燊、周婉珍编写。

劳动部职业安全卫生监察局

# 目 录

第一章 压力容器基础知识.....	1
§ 1—1 绪论.....	1
§ 1—2 压力容器及其分类.....	10
§ 1—3 容器的基本结构.....	21
§ 1—4 压力容器承载时产生的应力.....	42
练习思考题.....	65
第二章 压力容器破裂的基本原因.....	66
§ 2—1 整体应力过高造成的塑性断裂.....	67
§ 2—2 反复载荷作用下的疲劳断裂.....	78
§ 2—3 应力腐蚀断裂.....	88
§ 2—4 材料或部件缺陷引起的脆性断裂.....	101
练习思考题.....	114
第三章 容器的设计与制造质量.....	115
§ 3—1 对材料性能的要求.....	115
§ 3—2 对承压部件强度的要求.....	126
§ 3—3 对承压部件结构的要求.....	145
§ 3—4 对焊接容器的制造质量要求.....	151
§ 3—5 对容器设计制造管理的有关规定.....	164
练习思考题.....	167
第四章 容器的维护管理.....	168
§ 4—1 容器的管理与操作维护.....	168

§ 4—2 容器的定期技术检验·····	179
§ 4—3 气瓶的使用与检验·····	204
练习思考题·····	229
第五章 容器的安全装置·····	231
§ 5—1 安全泄压装置与容器安全泄放量·····	232
§ 5—2 安全阀·····	240
§ 5—3 爆破片·····	258
§ 5—4 其它安全附件·····	265
练习思考题·····	271
第六章 压力容器事故危害·····	272
§ 6—1 容器的爆破能量·····	272
§ 6—2 冲击波及其破坏作用·····	279
§ 6—3 容器爆破引起的其它危害·····	286
练习思考题·····	292
第七章 压力容器事故分析·····	293
§ 7—1 设备事故分析概述·····	293
§ 7—2 压力容器事故分析方法·····	310
§ 7—3 事故分析的程序、内容与实施方法·····	323
§ 7—4 容器事故分析方法应用实例·····	333
主要参考资料·····	348

# 第一章 压力容器基础知识

## §1—1 绪 论

压力容器是近代工业生产过程中不可缺少的一种设备。随着工业的发展，压力容器的使用数量日益增加，并逐渐趋向容量大型化和结构复杂化。为了适应工程上的需要，近年来，压力容器的设计制造还不断采用新材料、新工艺和新技术。这样，压力容器的安全可靠性问题就显得更为重要和更引起人们的密切关注。

压力容器的安全问题，从一开始就被普遍重视。许多工业国家都先后成立了各种研究机构，从事压力容器的科学研究工作和制订有关技术规范，还设置有专门机构，负责压力容器的安全监督工作。

我国政府历来重视锅炉和压力容器的安全工作。早在1958年，劳动部设立了锅炉安全检查总局。此后在1963年，经国务院批示，成立了锅炉压力容器安全监察局。各省、市、自治区也都设置有锅炉压力容器安全监察机构和检验单位，各县还设有专职的监察人员，从事锅炉压力容器的安全监督或技术检验工作。在安全法规方面，劳动部先后颁布了《压力容器安全监察规程》、《气瓶安全监察规程》和《液化石油气汽车槽车安全管理规定》等。1982年，国务院又发

布了《锅炉压力容器安全监察暂行条例》，进一步明确了对这种有爆炸危险的承压设备进行安全监督检查的机构和职权等重大问题。

压力容器的安全问题之所以特别重要，主要是因为它既是工业生产中广泛使用的设备，又是容易发生事故、而且往往是灾难性事故的特殊设备。

### 一、压力容器在工业生产中的应用

压力容器是工业生产中的常用设备，它在各个工业部门中都得到广泛的应用。

压缩空气是一种使用得最为普遍的动力源。它可以驱动气锤、风铲、风镐、风动砂轮、铆钉枪等风动机械和风动工具，进行金属加工、矿山开采、挖掘隧道、铆接桥梁等。还可以用于喷砂、喷漆、搅拌、输送物料以及控制仪表及自动化装置等。因此在机械制造、交通运输，建筑、采矿、化工、冶金及国防工业等许多部门中都大量使用。特别是煤矿，由于风动机械在使用中不会产生火花，可以防止瓦斯爆炸，因而压缩空气的使用就更为普遍。压缩空气主要来源于空气压缩机，压缩机的一套辅助设备，如气体冷却器，油水分离器，贮气罐等都是压力容器。有些压缩空气要求有较高的干度和清洁度，还需要经过干燥和过滤，这些装置也是压力容器。

除了使用压缩空气以外，在工业生产中还经常使用各式各样的气体作为原料或辅助材料。如制造农药要用氯气；金属的焊接和气割要用氧气、氢气或乙炔等。这些气体从气体制造厂到使用单位，除了相距较近可用管道输送外，大部分



都得用盛装容器。而为了提高设备利用率和运输效率,这些工业用气体往往都经过加压使其成为压缩气体(如氧气、氮气等),液化气体(如液氨、液氯等)或溶解气体(乙炔)。这样,盛装这些压缩气体、液化气体或溶解气体的容器,即气瓶、气桶、液化气体贮罐或罐车等也都是压力容器。

制冷装置是食品工业、化学工业和其它的一些工业用以制造“人工冷”的一种通用设备。因为食品的冷藏运输、某些化工产品的制备等需要在较低的温度下进行,而要获得持续的低温就得采用制冷装置。制冷装置是利用制冷压缩机将气态的致冷剂(最常用的是氨和氟里昂)进行压缩,然后在冷凝器中用水将其冷凝为液体,再把这些液化了的致冷剂通过调节阀节流降压进入蒸发器。由于液化致冷剂的压力降低,因而在蒸发器内不断地蒸发并吸取大量的汽化热,使其周围的介质温度降低。蒸发后的致冷剂再回到压缩机。如此继续循环,在蒸发器中便可以连续获得“人工冷”。制冷装置的多数设备,如冷凝器、蒸发器、液体致冷剂贮罐等都是压力容器。

与上述情况相反,有些工业产品的制备需要在较高温度下进行。因此在生产工艺过程中常常需要将物料加热,而加热又往往使用水蒸气,因为它是一种较易获得的热源。水蒸气是有压力的气体,用它来对物料进行加热的设备,无论是间接式的,如蒸汽夹套、列管式换热器等;或者是直接加热式的,如蒸煮锅、蒸气消毒器等都是一种压力容器。

化工生产中的反应设备大部分都使用压力容器。因为有许多化工生产工艺过程需要在加压的条件下进行,或者需要在较高的压力加速其反应,提高设备效率。例如,用乙烯

和水（高压过热蒸汽）制造乙醇，就要在70个大气压力下进行；用氮和氢合成氨，则要在100~1000个大气压力下才能较好地反应。这样，不但反应器本身需要用压力容器，而且这些参与反应的高压介质往往都先要经过精制、加热或冷却等，这些工艺过程设备也都是压力容器。

随着石油化学工业的迅速发展，高分子聚合物的生产不断扩大。高分子聚合物是由单体分子经过聚合反应而得到的。而大部分聚合反应都要在较高的压力下进行。例如用乙烯气体聚合成固体的聚乙烯，低压法也要在35~100个大气压力下进行，高压法则需要1000~2000个大气压力。因此制取高分子聚合物的设备不仅是聚合釜（进行聚合的设备）需要压力容器，而且这些单体分子在聚合前的一系列工艺处理过程（贮存、精制、换热等）都得用压力容器。

由此可见，压力容器在工业生产中的应用是极为普遍的。尤其是化学工业及石油化工，可以说，几乎每一个工艺过程都离不开压力容器，而且它还常常是生产中的主要工艺设备。

压力容器除了用于工业生产外，还用于基本建设、医疗卫生、地质勘探、文教体育，人民生活等国民经济各部门。

根据有关部门的统计，我国目前用于工业生产的压力容器有数百万台（只）。其中固定式容器超过一百万台。各种工业气体气瓶比固定式容器多一倍以上。此外，我国民用液化石油气气瓶近年来使用量也急剧增加，估计有两千万只。

## 二、压力容器是容易发生破坏事故的特殊设备

许多工业国家都把压力容器作为一种特殊设备，设置专门机构进行安全监督，最主要的原因还是压力容器的事故率

要比一般机械设备高，而且事故的危害往往又特别严重。

### (一) 压力容器事故率

机器设备或装置发生事故的多少，常用设备事故率（或称故障率）来衡量。它是所要调查的某种设备在一定时间内所发生事故的次数与设备运行台年（按设备台数与运行年数乘积进行累计）的比值，表示为（次/台年）。例如所要调查统计的地区每年运行的容器有 $10^6$ 台，在10年内共发生事故15次，则该地区的容器事故率即为 $15/10 \times 10^6 = 1.5 \times 10^{-6}$ 次/台年。从不同的统计目标出发，压力容器的事故率有时又分成一般事故率、重大事故率和爆破事故率。国外也有分成“潜在危险的”和“灾难性的”等等。下面介绍一些国家的压力容器事故率。

德意志联邦共和国技术检验协会积累了大量的有关压力容器运行情况的统计资料。凯勒曼（O. Kellermann）根据其中从1958至1965年期间的 $3 \times 10^5$ 台容器的事故情况归纳整理出表1—1的统计资料。表中的严重破坏事故是指容器爆破（粉碎性破坏）和有可能引起爆破的破坏事故（潜在粉碎性破坏）。前者指容器破裂时伴随有大量的压力流体迅速泄压排放；后者指容器被检查出有严重缺陷，如不采取措施就能导致容器爆破（粉碎性破坏）。

表1—1 联邦德国压力容器破坏事故

分 类	事故率(次/台年)
总的破坏事故	$2.1 \times 10^{-4}$
其中：检查期间发现的 严重破坏事故	$5.56 \times 10^{-5}$ $9 \times 10^{-5}$

英国原子能局与联合部技术委员会为了对核系统容器与非核系统容器的事故率进行比较，先后两次调查统计了从1962年至1972年的容器事故情况。调查统计资料列于表1—2。表中按事故的严重程度分为损坏事故和灾难性事故两类。其中灾难性事故包括容器爆炸(灾难性破坏)和设备存在无法修复或返修工作量很大的严重缺陷，表中的事故次数均没有包括容器在使用前的破坏数(1962~1967年为10次，1967~1972年为19次)。

表1—2 英国压力容器破坏事故

年 份	容 器 运行年	灾难性事故		损坏事故		总 计	
		次数	事故率	次数	事故率	次数	事故率
1962~1967	100300	7	$0.7 \times 10^{-4}$	125	$1.25 \times 10^{-3}$	132	$1.32 \times 10^{-3}$
1967~1972	105400	16	$1.5 \times 10^{-4}$	123	$1.17 \times 10^{-3}$	139	$1.32 \times 10^{-3}$

其他国家(如美国、日本等)也都作过类似的调查统计与分析，但都没有提供过容器运行中发生的爆炸事故统计资料。从所发表的各种统计资料估计，工业发达国家压力容器总的事故率为 $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 数量级，爆炸事故率大约为 $10^{-6}$ 的数量级。

我国压力容器的事故情况(包括一般、严重和爆炸事故)还缺乏准确完整的统计资料。据估计，我国压力容器断裂爆炸事故(不包括一般和严重设备事故)的事故率约为 $(1.5 \sim 2.5) \times 10^{-6}$ 。

## (二) 事故率高的原因

设备事故率的大小，影响因素较多，也十分复杂。它不

但与整个工业领域的各项技术水平有关，而且还与社会与人的因素有关。所以各国的情况也不尽相同。但从总的情况来看，在相同的条件下，压力容器的事故率显然要比其它的一般机械设备高得多。

压力容器大多数是承受静止而比较稳定的载荷，并不象一般转动机械那样容易因过度磨损而失效，也不象高速发动机那样承受着高周的反复载荷。为什么设备事故率比较高呢？从技术条件方面分析，有以下一些主要原因：

（1）压力容器的使用条件比较苛刻。它不但承受着大小不同的压力载荷（在许多情况下还是脉动载荷）和其它载荷，而且有些还是在高温或深冷的条件下运行，工作介质又往往具有腐蚀性，环境比较恶劣。

（2）压力容器比其它设备容易超负荷。容器内的压力会因操作失误或发生异常反应而迅速升高，往往在尚未被发现的情况下，容器即已破坏。

（3）局部区域受力情况比较复杂。例如在容器开孔周围及其它结构不连续处，常因过高的局部应力和反复的加载卸载而造成破坏。

（4）焊接容器常隐藏一些难以发现的缺陷。例如容器制造时留下的微小裂纹会在运行过程中不断扩展，或在适当的条件（如使用温度、工作介质特性等）突然发生破坏。

### （三）容器爆炸的严重破坏作用

压力容器一旦发生爆炸，不仅仅是设备本身遭到破坏，而且常常要破坏周围的设备及建筑物。甚至产生连锁反应，酿成灾难性事故。

压力容器内的介质都是保持有较大压力的气体或液化气

体。当容器爆炸时，介质即卸压膨胀，瞬时释放出很大的能量。这些能量产生空气冲击波，使周围的厂房、设备遭到严重的破坏。例如，1974年1月16日，某煤矿机械厂装在室外的一台空气压缩机储气罐（直径1.6m、全高4.8m），由于焊接质量不良，再加上使用中超压，结果在约1MPa(10kgf/cm<sup>2</sup>)下发生爆炸。爆炸产生的冲击波将附近厂房的砖墙摧毁，整座厂房80%以上玻璃(约2500m<sup>2</sup>)被震碎。冲击波不但破坏建筑物及设备，还会直接伤人。轻的可以震裂耳膜，重的往往伤及内脏。如有的人因肝被震伤而造成昏迷，甚至还会造成粉碎性骨折而死亡。

如果容器是脆性破裂，或者是由于化学反应而产生爆炸，还会产生爆破碎片，特别是化学反应爆炸，常使容器发生粉碎性破裂。大量的碎片飞出，击伤周围的人员或设备。例如，1976年4月20日，某县化肥厂的高压容器（直径274mm）发生爆炸，容器壳体全部碎成铁块（约千余块）飞出，一般距离为400~500m，最远的达1500m。致使周围的人被碎片击伤或致死，甚至祸及厂外行人。造成重大人身伤亡事故。

容器爆破以后，器内介质外泄，还会引起一系列的连锁反应，使事故的危害进一步扩大；介质如果是有毒的气体或液化气体，它在周围迅速扩散后会造大面积的毒害区。例如，1979年9月7日，某电化厂一个容积为415L的液氯瓶发生爆炸，碎片将周围的10个液氯瓶击穿，并引起其中4个装满液氯的气瓶接连爆炸，约有10200kg的液氯外泄扩散，中毒的范围波及7.35km<sup>2</sup>，因中毒而死亡的数十人，轻伤需住院治疗的达数百人。若介质是水蒸气或其它高温流体，则会

产生大量的烫伤事故。例如某柴油机厂职工浴室的一个热水罐（直径1.3m，长3.1m）发生爆炸，浴室内的数十名职工几乎无一幸免伤亡，损失惨重。更为严重的是，器内介质若为可燃气体或液化气体，在容器爆破后可燃介质流出与空气混合，产生二次爆炸，并酿成火灾。例如，1978年7月11日，西班牙一台盛装液化丙烷的汽车槽车，由于充装过量，又在烈日下曝晒，使器内压力急剧升高，槽车在途中爆炸，车体飞离原地140m，厚度为16mm的壳体碎片飞出300m，大量的丙烷（装载量43000kg）泄出后在空间爆炸燃烧，在半径为200m的地区内形成一片火海，火柱升起30m。爆炸产生的冲击波摧毁公路旁的14座建筑物和正在路上行驶的100多辆汽车；死亡150多人，烧伤120多人。1984年11月19日，墨西哥市培麦克斯公司所属的液化石油气供应中心，6台球形贮罐和48台卧式贮罐全部爆炸，大火持续36小时，附近的民宅约1500栋被毁，造成500多人死亡，一千余人下落不明，三万余人流离失所。由于现场工作人员全部遇难死亡，事故原因一直没有查明。我国也发生过由液化石油气贮罐爆破而造成的重大火灾事故，大火持续20多小时，大量建筑物、设备、车辆被烧毁，死亡数十人。

压力容器的事故率虽然较高，事故危害性较大，但也并不是说它事故完全是不可避免的。压力容器安全运行也有它的客观规律，有的容器之所以发生事故，是由于不重视或者不认识因而违反了它的客观规律而造成的。因此，为了防止压力容器发生事故，保证它安全运行，以保障人民生命和国家财产的安全，就必须加强对这种特殊设备的安全工作。

## §1—2 压力容器及其分类

### 一、压力容器

压力容器，或者称为受压容器，从广义上来说，应该包括所有承受流体压力的密闭容器。但在工业生产中，承载压力的容器是很多的，其中只有一部分相对来说比较容易发生事故，而且事故的危害性比较大。许多国家就把这样的容器作为一种特殊设备，由专门机构进行监督，并按规定的技术管理法规进行设计、制造和使用管理。这样的一种作为特殊设备的压力容器，当然须划定一个范围，不可能也没有必要将所有承受压力的容器（例如储水塔那样的设备）都作为特殊设备。习惯上，我们所说的压力容器，就是指这一类作为特殊设备的容器。

关于压力容器的界限，目前各国都有规定，虽然范围划分的大小略有差异，但基本原则是一致的。压力容器既然指的是那些比较容易发生事故、特别是事故危害比较大的特殊设备，那么它的范围就应该从发生事故的可能性和事故危害的严重性来考虑。一般来说，压力容器发生爆破事故时，其危害的严重程度与压力容器的工作介质、工作压力及容积等都有关。

工作介质是指容器内所盛装的，或在容器中参与反应的物质。压力容器爆破时所释放能量的大小首先与它的工作介质的物性状态有关。工作介质是液体的容器，由于液体的压缩性很小，因而在卸压时介质的膨胀也很小，也就是容器爆破时所释放的能量很小。而工作介质是气体的压力容器，则



因气体具有很大的压缩性，所以在容器爆破时，它突然卸压膨胀所释放的能量也就很大。例如一个容积为 $10\text{ m}^3$ 、工作压力为 $1\text{ MPa}$ 的容器，如果介质是空气，容器爆破时所释放的能量（气体绝热膨胀所作之功）约为 $1.36 \times 10^7\text{ J}$ 。而如果介质是水，则其爆破时释放的能量仅为 $2.2 \times 10^8\text{ J}$ 。前者约为后者的6200倍。由此可以看出，容器内的介质若为液体，即使容器爆破，其破坏性也是比较小的。所以一般都不把介质为液体的容器列入作为特殊设备的压力容器范围内。不过应该注意的是，这里所说的液体是指常温下的液体，而不包括高于其标准沸点（在标准大气压下的沸点）的饱和液体（如锅炉气仓中的高温饱和水）和沸点低于常温（包括有可能达到的最高使用温度或周围环境温度）的液化气体。因为这些介质在容器内只是由于压力较高才呈现液态（实际上是气液并存的饱和状态），如果容器破裂，器内压力下降，这些饱和液体即处于过热状态，并立即蒸发气化，体积急剧膨胀，发生所谓“蒸气爆炸”（爆沸），其所释放的能量要比同体积、同压力的饱和蒸汽大得多。所以从物质的集性状态方面考虑，压力容器的工作介质应该包括压缩气体、水蒸气、液化气体和工作温度高于它的标准沸点的饱和液体。

划定压力容器的范围，除了考虑工作介质的性态以外，还应该考虑容器的工作压力和它的容积。一般说来，工作压力越高，或者容器的容积越大，则容器爆破时气体膨胀所释放的能量也越大，也就是事故的危害性越严重。但压力和容积范围的划分，并不象工作介质那样有一个比较明显的界限，一般都是人为地规定一个比较适当的下限值。我国《压力容器安全监察规程》除了规定压力的下限值为 $0.1\text{ MPa}$  ( $1\text{ kgf/cm}^2$ )