

劳动保护丛书



吴粤燊 编

# 压力容器安全技术

化学工业出版社

10.0  
294

劳动保护丛书

# 压力容器安全技术

吴粤焱 编

化学工业出版社

## 出 版 说 明

建国三十年来，在党的领导下，我国的劳动保护工作取得了很大成绩。企业里劳动条件有了很大的改善，职工伤亡事故、职业病和职业中毒显著下降，从而保障了广大职工在生产中的安全与健康，促进了我国社会主义建设的发展。这充分显示了我国社会主义制度的无比优越性。

1975年全国安全生产会议纪要中指出：为了搞好安全生产，做好劳动保护工作，对职工群众要加强安全教育，“对特殊工种工人，要进行专业安全技术训练”。为了适应这一需要，我们着手出版一套《劳动保护丛书》，这套《丛书》包括《用电安全技术》、《起重机及其安全技术》、《工业锅炉安全技术》、《焊接安全防护技术》、《工业噪声控制》、《通风除尘》、《工业防毒技术》、《压力容器安全技术》等书籍。

《丛书》可作为生产工人和技安人员的安全培训教材，也可供其他工作人员参考。

化学工业出版社  
一九八〇年六月

36655

## 序 言

压力容器是工业生产中的常用设备。特别是化学与石油工业，可以说更是离不开压力容器。因为许多化工、石油的生产工艺过程都需要在“加压”的条件下进行，这些过程所用的设备，特别是其中的主要设备大部分都是压力容器。

压力容器又是比较容易发生破坏事故的一种设备。菲利普斯 (C. A. G. Phillips) 和沃里克 (R. G. Warwick) 根据英国原子能局有关单位的调查资料，统计分析了使用年限在30年以内、符合BS 1500和 BS 1515 等英国压力容器标准的 12700 台压力容器及其连接系统的破坏事故。这些容器累计运行数为100300台·年，共发生破坏事故132次（不包括安装使用前在水压试验中发生破坏的10次），其中“灾难性的”

（指容器报废或返修工作量很大以及造成重大的破坏等）破坏事故 7 次，破坏率为  $13.2 \times 10^{-4}$ （破坏率为破坏事故次数除以容器运行的台·年）。即在 10000 台容器中，每年发生破坏事故 13.2 次。凯勒曼 (O. Kellermann) 和塞佩尔 (H. G. Seipel) 根据德意志联邦共和国技术检验协会的反应堆安全委员会在1950~1965年对一般压力容器破坏事故的调查，统计、分析所调查的240000台容器共发生破坏事故（包括“粉碎性的”、“潜在粉碎性的”和“不危险的”）547次，破坏率为  $1.5 \times 10^{-4}$ 。这些统计资料表明，压力容器的破坏率是相当高的。

压力容器不但比较容易发生事故，更重要的是事故危害

性大。压力容器破裂爆炸，不仅仅是容器本身遭到毁坏，而且还往往会破坏周围的设备及建筑物，并造成人身伤亡事故。因为压力容器内的介质都是有压力的气体或饱和液体，容器破裂时，这些介质即卸压膨胀，瞬间放出较大的能量，这些能量除了可以将整个容器或其碎块以很高的速度飞散外，还会产生冲击波，在大气中传播，造成更大的破坏。特别是化学与石油工业用的压力容器，工作介质有许多是易燃或有毒的气体，这样的一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，还会由于它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。

我国压力容器的事故破坏率虽然还缺乏准确的统计资料，但就近年来国内所发生的压力容器事故情况以及当前压力容器的设计制造、技术检验、使用管理等各个方面的技术水平来看，压力容器的破坏率估计还是比较高的，近两年来，我国还连续发生多次重大压力容器事故，造成了巨大的损失。

由于压力容器发生事故的可能性较大，事故的危害严重，所以它的安全问题就特别重要，目前差不多所有国家都把锅炉和压力容器作为一种特殊设备，由国家设立专门的机构进行安全监督，并制订有专门的安全管理规范严格进行管理。

压力容器与其他的一般设备比较起来，虽然破坏率比较高，但这并不意味着压力容器事故是不可避免的。压力容器的安全运行也有一定的客观规律，有些压力容器之所以发生事故，总是由于对容器的安全不够重视或认识不足因而违反了它的客观规律而造成的。所以要防止压力容器发生事故，保证它安全运行，就需要掌握它安全运行的客观规律，了解

它是怎样发生破坏的和怎样才能防止它发生破坏。

《压力容器安全技术》就是要探讨压力容器的安全运行规律，研究它的各种破坏型式及其产生的原因，研究可能造成各种型式的破坏的不安全因素，以及防止产生这些不安全因素的具体措施和检验方法，以预防压力容器事故的发生。

为了要引起人们对压力容器安全问题的重视，了解它发生事故时可能产生的各种危害，并作好事事故的预防工作，本书最末一章还讨论了压力容器事故及其危害。

编者

一九八一年

# 目 录

<b>第一章 压力容器概论</b> .....	1
<b>第一节 压力容器</b> .....	1
一、压力 .....	1
二、压力容器及其压力来源 .....	4
三、压力容器在工业生产中的应用 .....	9
<b>第二节 压力容器的分类</b> .....	12
一、固定式容器 .....	12
二、移动式容器 .....	16
<b>第二章 压力容器的结构</b> .....	20
<b>第一节 中低压容器</b> .....	20
一、球形容器 .....	20
二、圆筒形容器 .....	22
<b>第二节 容器主要附件</b> .....	28
一、法兰连接结构 .....	28
二、容器的接管、开孔及其补强结构 .....	36
<b>第三节 高压容器</b> .....	41
一、本体结构型式 .....	42
二、高压密封结构 .....	51
<b>第四节 气瓶</b> .....	63
一、结构特点 .....	63
二、各种气瓶的结构 .....	64
<b>第三章 压力容器的载荷、应力及其对安全的影响</b> .....	67
<b>第一节 容器的载荷及应力</b> .....	67
一、应力和形变 .....	67
二、容器承受各种载荷时产生的应力 .....	74

第二节	不同类型的应力对安全的影响及对它们的限制	84
一、	不同类型的应力对容器安全的影响	84
二、	对不同的应力的限制原则	86
<b>第四章</b>	<b>压力容器的破裂型式</b>	<b>90</b>
第一节	韧性破裂	91
一、	金属材料的受力变形	91
二、	压力容器的变形和韧性破裂	96
三、	韧性破裂的特征	99
四、	韧性破裂事故的预防	103
第二节	脆性破裂	105
一、	容器脆性破裂事例	105
二、	钢的冷脆性及其转变温度	109
三、	断裂力学关于金属脆性断裂的判据	112
四、	脆性破裂的特征	119
五、	脆性破裂事故的预防	121
第三节	疲劳破裂	123
一、	金属的疲劳现象	124
二、	压力容器的疲劳破裂问题	129
三、	疲劳破裂的特征	133
四、	关于防止疲劳破裂的设计问题	135
第四节	腐蚀破裂	136
一、	钢的腐蚀破坏型式	137
二、	压力容器的腐蚀破裂及其特征	144
三、	防止压力容器腐蚀破裂的措施	159
第五节	蠕变破裂	160
一、	金属的蠕变	161
二、	压力容器的蠕变问题	163
<b>第五章</b>	<b>对设计与制造压力容器的安全技术要求</b>	<b>166</b>
第一节	对设计容器的要求	166



一、对容器结构的要求 .....	166
二、对选用材料的要求 .....	174
三、容器的壁厚 .....	182
第二节 对制造容器的要求 .....	187
一、容器的制造缺陷及其对安全的影响 .....	187
二、工艺要求与允许偏差 .....	197
三、检查与验收 .....	203
<b>第六章 压力容器的使用管理 .....</b>	<b>209</b>
第一节 容器的管理 .....	209
一、建立容器技术档案 .....	209
二、建立容器管理与操作责任制 .....	211
三、实行定期检验 .....	213
第二节 容器的操作与维护 .....	223
一、容器的安全操作 .....	223
二、容器的维护保养 .....	228
<b>第七章 压力容器安全泄压装置 .....</b>	<b>234</b>
第一节 安全泄压装置与安全泄放量 .....	234
一、安全泄压装置的作用及其类型 .....	234
二、压力容器的安全泄放量 .....	236
第二节 安全阀 .....	241
一、安全阀的工作特性 .....	241
二、安全阀的分类及其结构 .....	245
三、安全阀的排量 .....	251
四、安全阀的使用 .....	266
第三节 爆破片 .....	270
一、爆破片在压力容器中的应用 .....	270
二、爆破片设计 .....	273
三、膜片制造 .....	280
四、爆破帽 .....	283

<b>第八章 压力容器检验</b> .....	286
<b>第一节 容器的缺陷及其检验</b> .....	286
一、腐蚀 .....	286
二、裂纹 .....	292
三、变形 .....	301
四、常用检验方法简介 .....	302
<b>第二节 耐压试验</b> .....	311
一、试验目的 .....	312
二、试验用加压介质 .....	313
三、试验温度与试验压力 .....	317
四、试验程序与方法 .....	320
五、残余变形测定 .....	322
六、试验结果的评定 .....	328
<b>第九章 对气瓶的安全要求</b> .....	330
<b>第一节 设计压力与气体充装量</b> .....	330
一、气瓶的最高使用温度 .....	330
二、压缩气体气瓶的设计压力与充装量 .....	332
三、高压液化气体气瓶的设计压力与充装量 .....	334
四、低压液化气体气瓶的设计压力与充装量 .....	339
五、充满液体的气瓶温度升高时瓶内压力的变化 .....	344
<b>第二节 使用管理</b> .....	348
一、气瓶的安全装置 .....	348
二、气体充装 .....	351
三、使用和维护 .....	356
四、气瓶运输 .....	357
<b>第三节 高压气瓶的耐压试验</b> .....	359
一、容积变形的测定及合格标准 .....	360
二、以容积弹性变形作为主要评定指标的探讨 .....	376
<b>第十章 容器破裂爆炸及其危害</b> .....	380

第一节 气体的爆炸能量 .....	381
一、压缩气体与水蒸汽的爆炸能量 .....	381
二、液化气体与高温饱和水的爆炸能量 .....	384
三、可燃气体器外二次爆炸及其爆炸能量 .....	387
第二节 气体爆炸产生的冲击波 .....	388
一、冲击波及其破坏作用 .....	388
二、冲击波的超压 .....	391
第三节 容器破裂引起的其它危害 .....	396
一、碎片的破坏作用 .....	396
二、有毒液化气体容器破裂时的毒害区 .....	398
三、可燃液化气体容器破裂时的燃烧区 .....	402

# 第一章 压力容器概论

## 第一节 压力容器

### 一、压 力

均匀地垂直作用于单位面积上的力称为压力。它的正确名称应该是压力强度，或简称压强。因为它是单位面积上的作用力。但在工程上都习惯称作压力。

#### 1. 压力的单位

压力的单位是由力和面积的单位决定的。在 MKS 制中，面积的单位为米<sup>2</sup>，力的单位为牛顿，所以压力的单位便为牛顿/米<sup>2</sup> (N/m<sup>2</sup>)，或简称帕斯卡 (Pa)，国际单位制中，就是用它或它的10<sup>6</sup>倍即兆帕 (MPa) 作为压力的基本单位。在 CGS 制中，面积的单位为厘米<sup>2</sup>，力的单位为达因，因而压力的单位便为达因/厘米<sup>2</sup> (dyn/cm<sup>2</sup>)，或简称微巴 ( $\mu$ bar)，由于这个单位太小，故常用它的10<sup>6</sup>倍作为压力的基本单位，称为巴 (bar)。

工程上习惯于用公斤力作为力的单位，因此常用的工程压力单位便为公斤力/厘米<sup>2</sup> (kgf/cm<sup>2</sup>)。

围绕在地球表面上的空气由于受到地球引力的作用，对在大气里面的一切物体都产生压力，这种压力称作大气压力。在不同的纬度和高度上，地面上的大气压力的大小是不同的，在纬度为 45° 的海平面上（即重力加速度为 9.80665

米/秒<sup>2</sup>处), 大气的压力相当于在每平方厘米的面积上作用着1.0332公斤力, 所以有时也用这个大气压力值作为压力的基本单位, 称作标准大气压或物理大气压(atm), 而把与此单位极相接近的、工程上常用的压力单位——公斤力/厘米<sup>2</sup>称作工程大气压(at)。

## 2. 表压力与绝对压力

容器中压力的大小常用测量压力的仪表——压力表来计量。压力表上所指示的压力值是指容器内的压力与容器周围大气压力之差值, 这个压力值称作表压力或计示压力。表压力只是表明容器内的压力比它周围的大气压力大多少, 所以是一个相对的压力值。而实际上作用在容器器壁上的压力应该是压力表上所指示的压力再加上容器周围的大气压力, 这个绝对真实的压力称为绝对压力。在工程计算中, 经常需要采用绝对压力值。绝对压力的表示方法是在压力单位后面加注上“绝对”二字, 如公斤力/厘米<sup>2</sup>(绝对)、工程大气压(绝对)等, 工程大气压(绝对)又常简写作绝对大气压或ata。所以如果压力表上的压力指示值的单位为公斤力/厘米<sup>2</sup>, 则绝对压力值就应为压力表上所指示的压力值加上1.0332(或简略为1)公斤力/厘米<sup>2</sup>的大气压力值。

## 3. 气体压力的形成

压力是单位面积上的作用力。固体和液体的压力是由于物体本身的重量作用于支承面上而产生的。在密闭容器内, 气体的压力则与固体不同, 它并不是产生于气体本身的重量, 而且它的作用力也不仅仅限于作用在容器的底面, 而是遍及容器的整个周壁。气体压力的形成, 用分子论来解释就可以很容易理解。

分子论认为一切物质都是由一种极其微小的粒子构成

的,这种微粒叫做分子。构成物质的分子并不是静止不动的,而是永远处在运动状态中。物质的分子也不是紧靠着排列的,在它们之间存在着一定的间隔距离,分子与分子之间的间隔距离越大,分子力就显得越为薄弱。在气体中,分子之间存有很大的间隙,因此分子引力甚小,于是分子在其中就可以不受分子力的约束而作着无规则的运动。在容器中,运动着的气体分子碰撞在器壁上就对器壁产生一个微小的冲击力,它的反作用力又把这个气体分子弹向另一个方向,于是这个分子就不断地对周围器壁产生冲击力。当然,一个分子的冲击力是很微小的,而且是间断的,但气体中的所有无数个分子都是这样在不断频繁地碰撞着周围的器壁,其结果自然就要对器壁产生一个持续而稳定的作用力。虽然每一个气体分子碰撞器壁的方向和作用力都不一定相同,但无数分子的无规则运动,使它们向各个方向碰撞的机会相等。因此气体分子对器壁任何方向的作用力平均起来也是相等的,而且总的作用力总是垂直地作用于器壁。这样就形成了气体的压力。由此可知,气体压力不仅仅是作用于容器的底面,而是作用于整个周壁。

既然气体的压力是由于气体分子的运动并碰撞着器壁而产生的,因此气体压力的大小,亦即在单位面积的器壁上碰撞力的大小,就决定于在单位时间内气体分子对器壁碰撞的次数和每一个分子对器壁冲击力的大小。分子对器壁的冲击力与分子的质量及它的运动速度成正比,对于同一种气体来说,分子的质量是相同的,因此分子对器壁冲击力的大小就只与它的运动速度有关。至于单位时间内碰撞器壁分子次数,则决定于单位容积内气体的分子数以及分子运动的平均速度。因为单位容积内的气体分子数越多,则在单位时间内

碰撞在器壁上的分子个数也越多；气体分子运动的速度越大，则同一个分子在单位时间内往返碰撞的次数也越多。所以气体的压力与它的分子的平均运动速度的平方以及单位容积内的气体分子数成正比。因此，要增加气体的压力，可以通过加速气体分子运动的速度或增加单位容积内的分子数来达到。

提高气体温度、增大气体密度都可以使气体压力增加。因为物体的温度越高，分子运动就越激烈，也就是平均运动速度越高，而分子运动速度越高，则每一个分子对器壁的冲击力就越大，且同一个分子在单位时间内对器壁碰撞的次数也越多，因而气体压力也就越大。气体的密度越大，则单位容积内气体分子的个数也越多，因而碰撞在单位面积上的分子次数也越多，压力也就越大。

## 二、压力容器及其压力来源

### 1. 压力容器的界限

压力容器，或者叫做受压容器，从广义上来说，应该包括所有承受压力载荷的密闭容器。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地来说比较容易发生事故，而且事故的危害性比较大。所以许多工业国家就把这类容器作为一种特殊设备，需要由专门机构进行监督，并按规定的技术管理规范进行制造和使用。这样的一种作为特殊设备的压力容器，当然需要划定一个界限范围，不可能也没有必要将所有承载压力的容器（例如像贮水塔那样的设备）都作为特殊设备。在工业上，一般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范围，目前国际上也还没有一个完

全统一的规定。不过既然压力容器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，那么它的界限范围就应该从发生事故的可能性和事故危害性的大小来考虑。一般来说，压力容器发生爆炸事故时，其危害的严重程度与压力容器的工作介质、工作压力以及容器的容积有关。

工作介质是指容器内所盛装的、或在容器中参加反应的物质。压力容器爆破时所释放的能量与它的工作介质的物性状态有很大关系。工作介质是液体的压力容器，由于液体的压缩性很小，因此在容器爆破时它的膨胀功也很小，也就是爆破时所释放的能量很小。而工作介质是气体的压力容器，则因为气体具有很大的压缩性，因而爆破时气体瞬时膨胀所释放的能量也就很大。容积和承载压力都相同的压力容器，工作介质为气体的要比介质为液体的爆破能量大数百倍至数万倍。例如一个容积为  $10 \text{ 米}^3$ 、工作压力为11绝对大气压的容器，如果盛装空气，则容器爆破时所释放的能量（即气体绝热膨胀所作之功）约为  $1.36 \times 10^6$  公斤力·米。而如果盛装的是水，则其爆破能仅为  $2.2 \times 10^2$  公斤力·米，前者约为后者的 6200 倍。由此可以看出，容器的介质为液体时，即使容器爆破，其破坏性也是比较小的。所以一般都不把这类介质为液体的容器列入作为特殊设备的压力容器的范围内。不过应该注意的是，这里所说的液体，是指常温下的液体，而不包括温度高于其标准沸点（即在标准大气压下的沸点）的饱和液体（如锅筒中的高温饱和水）和液化气体（指标准沸点在常温——使用过程中有可能达到的最高使用温度或周围环境温度以下的液体）。工作介质为这类高温饱和液体或液化气体的容器仍然属于压力容器的范围。因为这些介质虽然在容器中由于压力较高而绝大部分呈液态（实际上是气、液



并存的饱和状态), 但一当容器破裂, 器内压力下降, 这些饱和液体将立即蒸发汽化, 体积急剧膨胀, 发生所谓“蒸气爆炸”(或称爆沸), 其所释放的能量还是很大的。压力与容积相同的容器, 贮装高温饱和液体时的爆破能量要比装饱和蒸气时大得多。所以从工作介质的性态这一方面来考虑划分压力容器的界限范围, 它应该包括介质为压缩气体、水蒸汽、液化气体和工作温度高于其标准沸点的饱和液体的容器。

划分压力容器的界限, 除了考虑工作介质的性态以外, 还应考虑容器的工作压力和它的容积这两个条件。一般来说, 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。但压力和容积的划分并不象工作介质那样有一个比较明显的界限, 所以一般都是人为地规定一个比较适当的下限值。关于压力的下限值, 按照过去的习惯, 锅炉作为一种特殊设备, 曾规定以0.7大气压(表压)作为下限(现已改为1大气压), 当然压力容器也可以沿用这个规定, 但一般认为, 0.7大气压(表压, 相当于英制的10磅/英寸<sup>2</sup>的表压力)也是一个人为的规定, 并不是一个特定的参数, 不如取1大气压(表压)作为压力容器的压力下限更为合适。至于压力容器的容积, 当然最好也有一个下限, 因为总不能把一些容积很小而贮装有压力的气体的微型容器(如机器或仪表上的附属零件)也作为特殊设备来管理。有些国家不是单独规定容积下限, 而是以容器的工作压力和它的容积的乘积达到某一指定数值作为压力容器的下限条件。例如规定以压力(表压, 以大气压计)与其容积(以米<sup>3</sup>计)的乘积大于或等于0.2大气压·米<sup>3</sup>作为压力容器的下限等, 这样把容器的工作压力与它的容积