

高忠白 邱清宇 王志文 编
琚定一 审

压力容器安全管理工程

中国石化出版社

压力容器安全管理工程

高忠白 邱清宇 王志文 编

琚 定 一 审



中国石化出版社

(京)新登字048号

内 容 提 要

本书以压力容器安全为中心,从容器的应力分析、设计、制造、使用、管理诸方面,分析了容器可能产生的不安全因素,以及应采取的安全技术措施;阐述了压力容器破坏的形式和原因,缺陷的检查和处理;深入浅出地介绍了在役压力容器缺陷的安全评定原理和方法。

本书可供从事压力容器设计、制造、安装、使用的工程技术人员、管理人员和安全监察人员阅读,并可作为压力容器安全技术及安全管理教育的教材。

压力容器安全管理工程

高忠白 邱清宇 王志文 编

骆定一 审

中国石化出版社出版

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码:100029)

海丰印刷厂排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 15⁵/₈印张 1插页 332千字 印1—5000

1992年3月北京第1版 1992年3月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-192-4/TH·027 定价:7.25元

前 言

压力容器是工业生产和民用生活设施中的常用设备，又是具有潜在爆炸危险的特殊设备，这类设备一旦发生事故将造成严重的后果。因而，如何保证压力容器的安全运行已为工程技术界所关注。自《锅炉压力容器安全监察暂行条例》与《压力容器安全监察规程》颁布以来，如何尽快理解和掌握《条例》和《规程》，已成为广大压力容器工程技术人员、安全管理人员及安全检验人员的迫切要求。编者曾应有关部门的要求举办过数期短期培训班，讲解压力容器的安全和破断分析、安全和事故管理等，同时也向大专院校化工机械专业的学生开设“压力容器安全管理工程”选修课。本书就是以这类教材为基础而编写的，并增加了为安全管理服务的应力分析、缺陷检查和管理的内容，以及吸收了《钢制压力容器》国家标准和专业标准中有关容器安全的最新内容。

本书绪论、第一、二、三章由高忠白编写；第四、五章由邱清宇编写；第六、七、八章由王志文编写。全书由高忠白统稿，由中国机械工程学会压力容器学会理事、华东化工学院琚定一教授审阅。

本书可供从事压力容器设计、制造、安装、使用的工程技术人员、管理人员和安全监察人员阅读，也可作为压力容器安全技术及安全管理教育的教材。

本书内容与我国压力容器现行条例、规程、标准等文件若有不相符合之处，应以条例、规程、标准为准。

绪 论

压力容器又称受压容器，广泛应用于工业、农业、军工及民用等许多部门，并在科学研究的许多领域都起着重要的作用。其中又以石油化学工业应用最为普遍，约占压力容器总数的50%左右。在石油化学工业中，许多化学反应过程都需要在有压力的条件下才能进行，或者要用加大压力的方法来提高反应速度，因此，反应设备多半是压力容器。此外，用以精制或加热、冷却反应介质和反应生成物的各种工艺装置也往往是压力容器。

石油化学工业中的压力容器可以作为简单的盛装容器，用以贮存有压力的气体、蒸气或液化气体，如液氨贮罐、乙烯贮罐等。压力容器也可以作为其它化工设备的外壳，为各种化工单元操作（传热、蒸馏、吸收、沉降等）提供必要的压力空间，并将该压力空间与外界大气隔离。这时压力容器不能单独地构成一台设备，它内部必须装入为完成某一化工单元操作所需的内件。例如：化肥工业中的氨合成塔，尿素合成塔，二氧化碳吸收塔，氨分离器，冷热交换器；石油精炼装置中的加氢裂化反应器和各种分离塔、热交换器；乙烯装置中所用的各种低温压力容器，以及聚乙烯装置中的超高压反应釜等。这些设备的外壳都是压力容器。

在民用工业中城市居民或企业用的液化石油气罐；工业机械所用的各种蓄能器，如水压机的蓄势器；各种动力机械和制冷机械的辅机——换热器、分离器等，都是压力容器。

航天和军事上所用的各类动力火箭的外壳都是高温、高压容器。深海探测的潜艇是典型的外压容器。在海洋和地球物理研究中，为模拟深海和地壳深层的情况，需要不同规格的内压容器。如美国在1968年研制了操作压力为70.5MPa的深海试验容器，其内径为3400mm，壁厚为304mm，总重750t，该容器可模拟7000m深海的压力条件。作为武器的大炮筒也是一台承受瞬时高压的敞口高压容器。

压力不仅能促进化学反应，还能改变一些物质的物理性能。某些物质经超高压挤压处理，分子间的距离缩小，密度增大，甚至产生分子与原子的变形，使物质的物理性能产生根本的变化。如不导电、无金属光泽的白磷，经1200MPa液压挤压后，就变成能导电、有金属光泽的黑磷。某些金属经超高压处理，其屈服强度、导电、导热性能都大大提高。木材经超高压挤压处理，也会具有象金属一样的强度与硬度。总之，超高压技术可以把某些性能低劣的廉价物质转变为性能优良的昂贵物质，大家所熟知的人造金刚石和人造宝石，都是采用超高压技术制成的。

面临世界性的能源危机，许多国家正一方面加紧煤和天然气的开采以代替石油，另一方面则积极发展核能、太阳能等新能源。上述能源装置均需要大量的压力容器，预计在不久的将来，这些新兴的能源工业将成为压力的主要用户。

近30年来，在发达的工业国家，核能容器获得了迅速的发展。核能容器的出现，标志着压力的设计、制造技术达到了一个新的更高的水平。核能容器不仅是同时承受高压高温的厚壁容器（如压水堆容器其工作压力一般为14~16MPa，工作温度250~330℃），而且容器本身还要承受堆芯

核裂变时产生的强烈中子流和 γ 射线辐照，导致材料的冲击韧性和延性的显著下降，使容器发生脆性破坏的可能性增加。此外，为防止容器内的放射性物质泄漏污染环境，对密封结构的可靠性也提出了更为苛刻的要求。总之，核能容器在设计、选材、制造、检验和使用维护等方面，都比一般压力容器有更高的要求。

天然气、石油气液化处理装置中的气体分离、精炼及液化、再气化过程，需要很多的压力容器。由于整个过程几乎都在低温下进行，因此在液化处理中所用的压力容器大多是大型厚壁低温容器。煤加氢气化或液化的装置，虽然目前尚处于生产性试验阶段，但是不少煤炭蕴藏量很大的国家，如美、苏、澳大利亚等都在大力研究。气化或液化装置中的压力容器大多处于高温、高压、氢介质的工作条件下，其设计压力 $17.5\sim 25\text{MPa}$ ，设计温度 $450\sim 550^{\circ}\text{C}$ ，个别的温度更高。上述高温高压容器不但工况十分苛刻，由于处理量大，其尺寸也大得惊人，其内径可为 $3000\sim 5000\text{mm}$ ，壁厚 $200\sim 400\text{mm}$ ，单机重量可达千吨以上。

蒸汽锅炉也属压力容器，但它是用直接火焰加热的特种受压容器，其设计、选材、运行及维护管理另有专门规定，通常不包括在一般压力容器的范畴之内。

一、压力容器的安全问题

压力容器使用广泛，它不仅是工业生产中常用的设备，同时也是一种比较容易发生事故的特殊设备。和其他生产装置不同，压力容器发生事故时不仅本身遭到破坏，往往还会诱发一连串恶性事故，给国民经济造成重大损失。因此它的安全问题就特别值得注意。我国和许多工业国家都设有专门的机构，对它进行安全管理和监督检查，并要求按规定的技

术规范进行设计、制造和使用管理。一般情况下，压力容器的结构并不复杂，承受的又多为静载荷。之所以要特别重视其安全问题，原因之一是，压力容器内部所容纳的是压缩气体或饱和液体。容器一旦破裂，介质卸压膨胀，瞬间所释放的能量不但将容器炸飞，还会产生冲击波破坏周围设备和建筑。例如一个压力为1MPa、容积为10m³的压缩空气贮罐发生爆炸，它所产生的冲击波可破坏距其30m之外的门窗玻璃。石油化工生产中使用的压力容器大多是盛装易燃、易爆或有毒介质，常常还伴随着化学反应。如果发生破坏事故，则不仅容器本身爆炸破裂，还会由于内部介质外泄引起二次爆炸、着火燃烧或毒气弥散的厂毁人亡的恶性事故。如1964年6月日本川崎市化工厂发生一起环氧丙烷贮罐爆炸事故，伤亡135人。该贮罐直径为2.98m，容积14m³，由于罐内的环氧丙烷发生聚合，大量的聚合热致使罐内介质温度升高，压力增大，引起贮罐破裂。贮罐破裂后，罐内液体迅速蒸发，罐体进一步爆破，因而造成严重伤亡。

压力容器破坏事故率较高的另一方面原因是，容器上某些局部地区的应力状态复杂而恶劣，其使用条件和制造要求苛刻。如容器的开孔、接管处和某些结构不连续处的受力状态恶劣、应力水平较高。这些部位常常容易萌生疲劳裂纹，成为脆性破坏的发源地。至于使用条件，除承受介质压力外，常伴随着高温、低温或介质腐蚀的联合作用。温度、压力的波动或短期超载又常常是不可避免的。如遇频繁开停工或温度、压力波动，则会使容器部件疲劳。近年来，由于设备大型化而越来越多地采用中、高强度钢制造压力容器。制造中较易产生焊接裂纹，如果再加上疲劳和介质腐蚀等恶劣的操作条件，就会使这些原始裂纹扩展，以致容器破坏。1979年12

月吉林市煤气公司所属液化石油气厂的石油气球罐爆炸，就是先因一只 400m^3 球罐裂纹穿透、破裂，液化气泄出，遇明火燃烧。大火使邻近的球罐温度升高后产生超压爆炸。这次事故使整个罐区破坏，伤亡近百人，直接经济损失数百万元。

为提高压力容器的安全可靠，英国原子能局及联合部技术委员会联合对使用年限在30年以内，且符合英国压力容器规范的12700台压力容器和大型管道系统。进行了事故调查，并于1968年发表调查报告。在这12700台容器中，有10例事故是在使用前进行水压试验时发生的。这10例事故不包括按工艺规程进行无损探伤，发现缺陷后加以修补的产品。这些容器在100300台·运行年（容器台数和运行年数的乘积）的使用记录中，就记载有132例事故。按事故严重程度可分为损伤事故和灾难性的破坏事故（指返修工作量很大或要报废的，以及灾难性破坏事故），详见表1。

表1 英国调查的压力容器破坏率

容 器 数	损 伤 事 故		灾 难 性 事 故		总 计	
	次 数	破 坏 率	次 数	破 坏 率	次 数	破 坏 率
12700台 (使用前)	7	5.5×10^{-4}	3	2.3×10^{-4}	10	7.8×10^{-4}
100300台·运行年 (使用后)	125	12.5×10^{-4}	7	0.7×10^{-4}	132	13.2×10^{-4}

表1示出，10000台压力容器在使用过程中发现的损伤事故，每年有12.5次，而达到破坏的事故为0.7次，破坏事故的几率为 1.32‰ 。在这些事故中由裂纹而引起的有118例，约占总事故的90%，其中一半以上为使用中产生的疲劳裂纹

和腐蚀裂纹。在使用后发生的 7 件破坏事故中，有 4 件是由于操作不当引起的。

这个调查以及日本、美国对压力容器和配管的事故调查统计，都说明按规范设计、制造和检验的压力容器，不论使用前或使用中事故率仍是可观的。如果是粗制滥造或违章操作，破坏率更无法估计。

为提高压力容器的安全可靠，减少事故，各国对断裂力学方面的研究已相当重视。有关压力容器低周疲劳、应力腐蚀、制造材料的正确选择和处理，以及设计、制造、检验、操作控制技术等诸多方面也在进行研究。对压力容器破坏形式及事故原因的调查剖析，则是从另一角度提出减少事故的措施。综上所述，提高压力容器的安全可靠牵涉到较多的理论和技术。而本书仅从压力容器安全分析和管理的需要出发，阐述压力容器的受力状态，设计、制造、使用中的安全技术措施；讨论容易产生的缺陷及其处理，以及其主要破坏形式和事故管理分析的方法。对在役压力容器缺陷的安全评定也将作简单介绍。

二、压力容器及其分类

(一) 压力

在工程上，习惯于将垂直作用于单位面积上的力称为压力。但是，按照物理学的概念，压力只是指垂直作用于物体表面的力，而垂直作用于物体单位面积上的力则应称为压力强度或压强。

压力的单位是由力和面积的单位导出的。在 MKS 制和 SI 制中，面积的单位同为平方米(m^2)，力的单位同为牛顿(N)，所以压力的单位就同为牛顿/米²(N/m^2)，或称帕斯卡(Pa)。它的 10^6 倍即兆帕($\text{MPa} = 10^6 \times \text{Pa} = 10^6 \text{N}/\text{m}^2$)也较常

用。

目前，我国规定采用以国际单位制(SI制)单位为主的国家法定计量单位，压力的单位用帕或兆帕。工程上原来习惯于MKFS制，即用公斤力(kgf)作为力的单位，用公斤力/厘米²(kgf/cm²)作为压力的单位。应该注意：力的单位“kgf”和质量的单位“kg”是完全不同的。所谓1kgf就是质量为1kg的物体在纬度为45°的海平面上所受到的重力，其大小为

$$1\text{kgf}=1\text{kg}\times 9.81\text{m/s}^2=9.81\text{N}$$

因此， $1\text{kgf/cm}^2\approx 0.1\text{MPa}$ ，或 $10\text{kgf/cm}^2\approx 1\text{MPa}$ 。此外，工程上过去还用大气压和毫米汞柱或米水柱作为压力的单位。1个标准大气压（或物理大气压）等于 1.033kgf/cm^2 或760mmHg，或4℃时10.33mH₂O的压力，它是纬度为45°的海平面上的大气压力。工程上为了计算方便，取1工程大气压= 1kgf/cm^2 作为压力单位。

容器中的压力是用压力表来测量的，压力表上所指示的压力称为表压力，它是容器中介质的压力和周围大气压力的差值。实际作用于容器器壁的绝对压力应该是表压力值加上容器周围的大气压力。表示绝对压力时，常在压力单位后加“绝对”二字。如压力表上指示的压力为0.6MPa，其绝对压力即近似为0.7MPa(绝对)。

(二) 压力容器

压力容器由字面来看，凡是容纳(含有)压力介质的密闭容器都可称为压力容器。但是实际上，压力容器仅指其中一部分比较容易发生事故，且事故危害性较大的特定设备。对其界限范围，目前国际上虽无统一规定，但各国都按发生事故的可能性和事故的严重性来划分。具体的说，也就是规定工作压力、容器的容积和工作介质的范围。

工作压力越高或容器的容积越大，则容器爆破时释放的能量也越大，事故危害性也越严重。但究竟承受多大压力就该看作压力容器，没有明显的界限。因此，一般都是人为地规定一个下限值，如规定0.1MPa表压力作为压力容器的压力下限。某些采用英制的国家，则常用0.07MPa(10lbf/in²)表压力作为下限。

容器容积的下限值，不少国家常不是单独规定其容积下限，而是以容器的工作压力和容积的乘积为0.02MPa·m³作为压力容器的下限。这一界限值实际上是容器盛装介质的内能，它能反映容器一旦发生事故时将释放的能量。用它作为划分压力容器范围的界限是比较合适的。

工作介质是指容器所贮存的或在容器中进行化学反应、化工过程的物质。压力容器爆破时所释放的能量与其工作介质的物理性态有很大关系。气体具有很大的可压缩性，因而工作介质是气体的压力容器，在爆破的瞬间，由于气体迅速膨胀做功，会释放大量的能量。而液体则由于基本上属于不可压缩介质，容器爆破时所释放的能量要小得多。容积和压力都相等的两个压力容器，盛装气体要比盛装液体的爆破能量大数百倍至数万倍。例如一个容积为10m³，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约为 $13.3 \times 10^6 \text{J}$ ；如果盛装的是水，则其爆破能量仅为 $2.16 \times 10^3 \text{J}$ ，前者约为后者的6200倍。由此可知，工作介质为液体时，即使容器爆破，其破坏性也较小。所以一般都不把工作介质为液体的容器列入压力容器的范围之内。应该注意的是，这里所说的液体只指常温下的液体，而不包括温度高于其标准大气压下沸点的饱和液体（如锅筒中的高温饱和水）和液化气体。因为这些由于容器中压力较高而绝大部

分呈液态的介质，一旦容器破裂，它们就立即沸腾蒸发，体积急剧膨胀，发生所谓“蒸气爆炸”或称“爆沸”。这时所释放的能量要比盛装饱和蒸气时大得多。因此，一般仅将工作介质为压缩气体、水蒸气、液化气体和工作温度高于其标准沸点（指在一个大气压下的沸点）的饱和液体的容器称为压力容器。

我国国务院发布的《锅炉、压力容器安全监察暂行条例》中规定，一个表压以上的各种容器都属压力容器，均在该条例管辖的范围之内。并对压力、容积乘积小于 $20\text{L}\cdot\text{MPa}$ 或工作介质为液体的容器定名为低级压力容器。

我国国家劳动总局颁发的《压力容器安全监察规程》（以下简称《监察规程》）中规定，只有同时符合以下三个条件的容器才属于该规程的管辖范围。

(1) 最高工作压力(p_w) $\geq 0.1\text{MPa}$ （不包括液体静压力，下同）；

(2) 容积(V) $\geq 25\text{L}$ ，且 $p_w \times V \geq 20\text{L}\cdot\text{MPa}$ ；

(3) 介质为气体，液化气体和最高工作温度高于标准沸点的液体。

以上三个条件也正是包括了容器的工作介质、压力和容积三个方面。

此外，我国机械工业部、化学工业部和中国石油化工总公司联合颁发的1985年版《钢制石油化工压力容器设计规定》中，为了区分常压容器和压力容器而规定：设计压力低于 $\frac{10}{(Dg+10)^2}\text{MPa}$ 或真空度低于 $\left(\frac{310}{Dg}+8.2\right)\text{cmH}_2\text{O}$ （ Dg ——公称直径，m）的作为常压容器；设计压力或真空度分别等于或高于上述两个数值时才要按压力容器设计。

(三) 压力容器的压力来源

压力容器的压力来源可以分为两类，一类是压力在器外产生或增大的；另一类是压力在器内产生或增大的。

在器外产生或增大压力的压力源一般为气体压缩机或蒸汽锅炉。压缩机通过机械方法提高气体压力。容积式压缩机通过缩小气体体积、增加气体密度来提高气体的压力，如活塞式或螺杆式压缩机即属于此类。速度型压缩机则通过增加气体的流速，并将其动能转变为静压能来提高气体的压力，如离心式或轴流式压缩机等。因此工作介质为压缩气体的压力容器，其最高工作压力一般不会超过压缩机出口压力。蒸汽锅炉将水加热并蒸发为水蒸气。由于蒸汽的比容要比水的比容大得多，如常压下的水转变为相同压力的饱和水蒸气时，体积约增大1700倍。当水在密闭的锅筒内蒸发时，蒸汽压力将不断增大，直至达到锅炉的排汽压力。因此，工作介质为水蒸气的压力容器，其最高工作压力也只限于锅炉的排汽压力。如果压力容器所需的蒸汽压力小于锅炉的排汽压力，则可通过蒸汽减压阀减压。这种由器外压力源产生的压力，一般不会突然增大。

压力容器在器内产生的压力，一般是由于器内介质的聚集状态发生改变、介质在器内受热温度剧烈升高，或者是介质在器内发生体积增大的化学反应。

介质的聚集状态变化，一般为液态或固态物质受热蒸发或分解为气体。蒸发或分解出来的气体，体积大大增加，但因受到容器容积的限制，则使器内气体压力升高。例如液氨，在0℃时的饱和蒸气压为4.4绝对大气压，温度40℃时压力即升高至17绝对大气压。某些高分子化合物本来为固体，如果受热“解聚”，变为气态的单体分子，也会因体积膨胀而压力

急剧升高。例如固态聚甲醛的比容约为 0.7L/kg ，当它解聚为气态甲醛时比容为 746L/kg ，即体积约增大1065倍。如果在一个密闭的容器内发生这种聚集状态的改变，则会产生很高的气体压力。

气体因温度升高而产生或增大压力的情况相对较少。对理想气体而言，一定质量的气体在体积不变的情况下，温度每升高 1°C ，压力仅增加它在 $^{\circ}\text{C}$ 时压力的 $1/273$ 。因此，当气体温度少量升高时，压力增加并不明显。但是，如果由于特殊的原因，使气体温度剧烈升高，则它的压力仍然会大幅度增加的。如盛装某些容易产生聚合反应的碳氢化合物的容器，在某一适当的条件下发生聚合反应，产生大量的聚合热，器内温度大幅度上升，压力也剧烈增高。

如果在密闭的容器内进行体积增大的化学反应，一旦反应失控，反应生成物又未能及时排出，容器内压力就会增高。常见的如碳化钙加水产生乙炔的反应，碳化钙是固体，水为液体，反应生成物乙炔是气体，随着反应的进行，气体体积将迅速增加。该反应假如在密闭的容器内进行，排气管又未打开，器内压力必将快速上升，甚至会产生超压爆炸。

常用压力容器的介质压力多产生于器外，即以压缩机或蒸汽锅炉作为其压力来源。压力在器内产生的压力容器虽用得较少，但由于这种容器的压力是在器内产生的，危险性较大，因而对其压力的控制也应该更严格。

(四) 压力容器的分类

压力容器型式多样，为了便于对不同类型的容器进行研究、计算、制造或管理，常将容器按不同方法分类。

为了便于设计计算，常按容器壁厚的不同而分为薄壁容器和厚壁容器，以及按承压方式的不同而分为内压容器和外

压力容器。为便于制造，按制造方法的不同，可将压力容器分为焊接容器、铆接容器、铸造容器及锻造容器等；根据制造容器的材料来分类，又有钢制容器、有色金属容器和非金属容器。此外，按容器的外形，可分为球形容器、圆柱形容器、锥形容器和组合容器等。

压力是压力容器最主要的工艺参数之一，从安全技术角度来看，容器的工作压力越高，发生爆炸事故的危害性也越大。为便于对压力容器进行分级管理和技术监督，按其工作压力分级是必要的。《监察规程》附件一中提出，按容器的压力分为低压、中压、高压、超高压四个等级，其中：

(1) 低压容器： $0.1 \leq p < 1.6 \text{MPa}$ ；

(2) 中压容器： $1.6 \leq p < 10 \text{MPa}$ ；

(3) 高压容器： $10 \leq p < 100 \text{MPa}$ ；

(4) 超高压容器： $p \geq 100 \text{MPa}$ 。

为了有利于安全技术管理和监督检查，《监察规程》第4条规定，根据容器的压力高低、介质的危害程度^①以及在生产过程中的重要性等，从安全监督管理角度将容器划分成三类，随后对其设计、选材、制造检验及使用管理分别提出了不同的要求。这三类压力容器具体划分如下：

1. 属于下列情况之一者为一类容器

(1) 非易燃或无毒介质的低压容器；

^①剧毒介质：是指进入人体量 $<50(\text{g})$ 即会引起肌体严重损伤或致死作用的介质，如：氟、氢氟酸、氢氰酸、光气、氯化氢、碳酰氯等；

有毒介质：是指进入人体量 $\geq 50(\text{g})$ 即会引起人体正常功能损伤的介质，如二氧化硫、氨、一氧化碳、氯乙烯、甲醇、氧化乙烯、硫化乙烯、二硫化碳、乙炔、硫化氢等；

易燃介质：是指与空气混合的爆炸下限 $<10\%$ ，或爆炸上限和下限之差值 $>20\%$ 的气体，如：一甲胺、乙烷、乙烯、氯甲烷、环氧乙烷、环丙烷、氢、丁烷、三甲胺、丁二烯、丁烯、丙烷、丙烯、甲烷等。

(2) 易燃或有毒介质的低压分离容器和换热容器。

2. 属于下列情况之一者为二类容器

(1) 中压容器；

(2) 剧毒介质的低压容器；

(3) 易燃或有毒介质的低压反应容器和贮运容器；

(4) 内径小于 1 m 的低压废热锅炉。

3. 属于下列情况之一者为三类容器

(1) 高压、超高压容器；

(2) 剧毒介质且 $p_w \times V \geq 200 \text{ L} \cdot \text{MPa}$ 的低压容器或剧毒介质的中压容器；

(3) 易燃或有毒介质且 $p_w \times V \geq 500 \text{ L} \cdot \text{MPa}$ 的中压反应容器，或 $p_w \times V \geq 5000 \text{ L} \cdot \text{MPa}$ 中压贮运容器；

(4) 中压废热锅炉或内径大于或等于 1 m 的低压废热锅炉。

以上分类中提到的反应容器、换热容器、分离容器及贮运容器，是按生产工艺过程划分的容器类别。《监察规程》附件一中具体规定为：

(1) 反应容器。主要是用来完成介质的物理、化学反应的容器。如：反应器、发生器、反应釜、分解锅、分解塔、聚合釜、高压釜、超高压釜、合成塔、变换炉、蒸煮锅、蒸球等；

(2) 换热容器。主要是用来完成介质的热量交换的容器。如：废热锅炉、热交换器、冷却器、冷凝器、蒸发器、加热器、硫化锅、消毒锅、蒸压釜、蒸煮器、染色器等；

(3) 分离容器。主要是用来完成介质的流体压力平衡和气体净化分离等的容器。如：分离器、过滤器、集油器、缓冲器、贮能器、洗涤器、吸收塔、铜洗塔、干燥塔等；