

实用压力 容器知识

马秉骞 赵忠宪 编



中国石化出版社

TH49
23



00012951

实用压力容器知识

马秉骞 赵忠宪 编

HK85/24



中国石化出版社



C0489243

内 容 提 要

本书以现行的最新国家和行业标准为依据,结合生产实际,对压力容器及与其相关的基本知识,从技术和管理方面作了简明、通俗、实用的阐述。书中内容包括压力容器的范围、类型及基本要求;压力容器常用钢材的类型、焊接及管理;中低压容器的强度计算;塔式容器及卧式容器的校核;压力容器常用零部件及相关标准;压力容器的检验等。

本书适用于中小型石油化工和压力容器制造企业的工程技术人员和从事生产管理的人员阅读,也可供化工机械专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

实用压力容器知识/马秉睿,赵忠宪编著. —北京:中国石化出版社,2000
ISBN 7-80043-803-1

Ⅰ. 实… Ⅱ. ①马… ②赵… Ⅲ. 压力容器-基本知识 IV. TH49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 29870 号

中国石化出版社出版发行

北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271859

<http://press.sinopec.com.cn>

金剑照排厂排版

京丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所经销

*

787×1092 毫米 16 开本 13.5 印张 342 千字印 1—3000

2000 年 3 月第 1 版 2000 年 3 月第 1 次印刷

定价:25.00 元

前 言

石油化工设备按其所实现的工艺过程来划分，有反应设备、分离设备、换热设备及储运设备等。这些设备的用途和结构虽各不相同，但都是在一定的压力、温度及不同特性的介质等条件下工作的压力容器。为了确保压力容器的安全运行，压力容器的设计、制造、安装、使用、维修、检验、更新等方面应符合我国有关压力容器的法规、规范及标准的要求。

本书以 GB150—1998《钢制压力容器》、JB4710—92《钢制塔式容器》、JB4730—94《压力容器无损检测》等现行的最新国家和行业标准为依据，结合生产实际，对压力容器及与其相关的基本知识，从技术和管理方面作了简明、通俗、实用的阐述。书中内容包括压力容器的范围、类型及基本要求；压力容器常用钢材的类型、焊接及管理；中低压容器的强度计算；塔式容器及卧式容器的校核；压力容器常用零部件及相关标准；压力容器的检验等。

本书适用于中小型石油化工和压力容器制造企业的工程技术人员和从事生产管理的人员阅读，也可供化工机械专业师生参考。

本书第一、二、三、五章及第六章第一、三、四、五节由马秉骞编写；第四、七、八章及第六章第二节由赵忠宪编写。

由于编者水平所限，疏漏和错误在所难免，对书中存在的错误和不足之处，请读者批评指正。

编 者

目 录

第一章 压力容器概述	1
第一节 压力容器的范围及类型	1
第二节 压力容器的介质特性	6
第三节 容器的基本要求	13
第二章 压力容器用钢材	17
第一节 压力容器常用钢材	17
第二节 压力容器钢材的管理	33
第三章 压力容器设计	37
第一节 设计参数	37
第二节 内压圆筒和球壳的强度计算	49
第三节 封头的设计	52
第四节 容器的开孔与补强	62
第四章 钢制塔式容器	70
第一节 塔的受载分析及计算	70
第二节 塔器应力校核	78
第三节 裙座结构设计	86
第五章 卧式容器	93
第一节 卧式容器的载荷分析	93
第二节 卧式容器的应力校核	95
第三节 卧式容器设计方法的适用范围及合理设计	102
第六章 压力容器零部件	104
第一节 封头	104
第二节 压力容器法兰	112
第三节 人孔与手孔	136
第四节 视镜、液面计	142
第五节 容器支座	146
第七章 压力容器常用钢材的焊接	163
第一节 低碳钢的焊接	163
第二节 低合金高强度钢的焊接	164
第三节 低温用钢的焊接	166
第四节 耐热钢的焊接	167
第五节 奥氏体不锈钢的焊接	170
第八章 压力容器检验	174
第一节 压力容器检验的内容与依据	174
第二节 焊接质量及焊缝缺陷	178

第三节	焊缝的外观检验	182
第四节	渗透检测	185
第五节	磁粉检测	189
第六节	射线检测	193
第七节	超声检测	201

第一章 压力容器概述

“压力容器”作为专用术语是指压力达到一定数值，同时容器的容积超过一定限度、容器所处的工作温度使其内部有呈气体状态介质的密封容器。具备这些条件的容器一旦发生事故，有可能造成严重后果，包括物质财产的破坏和人员的伤害，对环境带来不良影响。因而对这些容器的设计、制造、安装、使用、检修和改造实施严格的管理，采取必要的安全技术监督措施，以保证压力容器除具有所需的适用性，同时还要确保它的安全可靠性。

大多数压力容器从结构看，组成它的各个部分是静止的，只有少数容器有相对运动的构件。从结构上说压力容器是比较简单的，主要和关键的部分是都有一个承压的壳体。从操作时的受载看大多是承受较稳定的静载荷。但从大量统计资料比较，压力容器发生重大事故的几率却比结构和载荷性质更为复杂的其它机械设备为高。究其原因，从操作状况因素分析是压力容器的工作条件较为苛刻。除承受介质的压力外，还常处于高温或低温的状况下，容器内的介质往往存在程度不同的腐蚀性。在这种复杂工况下长期工作，会给压力容器的安全可靠性带来不利影响。但这些因素又是压力容器工艺用途所决定的，无法予以避免。从结构上看，尽管承压壳体的几何形体比较简单，大多为圆筒体和各种凸形封头组合而成，但壳体上还有许多为工艺目的而开的各种孔口，在承受介质压力的状态下，由于几何形体在组合处曲率的不连续及开孔附近的应力集中和结构上的一些其它原因，造成容器在局部区域较其它部分处于较高的应力状态。另外，容器在制造过程中，因焊接而在焊缝和接头处产生残余应力，及在操作状态下因温度分布不均匀而产生的温度应力等附加应力，这种复杂的应力状态也是客观存在而无法避免的，按常规的设计方法难以全面而准确地加以考虑。从承载状态看，一般都是考虑各种静载，即以给定的压力来确定壳体所需的厚度及其它尺寸。但实际操作时压力可能是不稳定的，操作状态的波动反映在壳体中的应力也相应地变化。还有些容器是间歇性操作，使得容器被反复地加载和卸载。有些反应设备，由于操作不当或某些意外原因造成反应过于激烈，使容器内的压力可能在短时间内骤然上升到很高，这是难以预料的因素。还有一些难以完全避免的因素是原材料本身或在加工过程中产生一些微小的或难以发现的缺陷，这往往会在其它意外因素作用下成为事故发生的内在诱因而导致容器的破坏。

由于上述种种原因及其综合作用，所以必须对压力容器从设计、制造、安装及使用等各个环节，按严格的制度和相关的法规进行管理，以保证其安全可靠地运行。

第一节 压力容器的范围及类型

一、压力容器的范围

仅就字而的含义理解，凡承受压力的密闭容器就是压力容器。按这样定义，压力容器所涉及的范围就太宽，数量也极庞大，讨论所有这些容器也是没有必要的。工程上所涉及的压力容器是指压力和容器达到一定数值，一旦发生事故，其后果严重的容器。世界各国对这类

容器都是由专门的机构实施安全监督，制定专门的法规和标准予以管理。

从介质状态看，容器内应为气体或介质的温度高于标准大气压下沸点的饱和液体，以及沸点低于可能达到的最高使用温度或环境温度的液化气体。对于常温下处于液体状态的介质，即使在高压力作用下，几乎是不可压缩的，容器破裂后释放的能量非常有限，破坏性很小，故盛有这种液体介质的容器不在监控范围内。而气体在温度不变的情况下，其体积与压力成反比。换句话说，容器一旦破裂，气体将从压缩状态的压力下迅速膨胀到环境所处的大气压力，体积在瞬间扩大许多倍。如压缩气体的温度高于环境温度，则膨胀的体积更大，此时所释放的能量也十分巨大。容器的容积越大，膨胀功就越大，如膨胀过程的时间极短，则破坏性也就更强。

对于工作温度高于标准沸点的液体或液化气体，虽然工作状态下在容器内呈液态，但容器一旦破裂，这些液体将立即沸腾而被汽化，体积同样会急剧膨胀，其体积增大更多，发生事故的后果也严重得多。

归纳上述分析，压力容器内的介质应该是气体、液化气体或标准沸点小于等于工作温度的液体。

至于多大的压力和容积的容器就划为压力容器没有客观的界限，各国的规定也不尽一致。按照我国《压力容器安全技术监察规程》中受监督的压力容器划定的条件归纳为以下三条：

1. 最高工作压力 $p_w \geq 0.1\text{MPa}$ ；
2. 容器的内直径 $\geq 0.15\text{m}$ ，且容积 $V \geq 0.025\text{m}^3$ ；
3. 介质为气体、液化气体或标准沸点小于等于最高工作温度的液体。

同时具备以上三个条件的压力容器就是受各级劳动部门锅炉压力容器安全监察机构监察范围内的容器。

核能容器、各类气体槽车、罐车和气瓶等经常移动的压力容器，压力超过 100MPa 的超高压容器等，由于它们有各自不同的工作特点，另有专门的规程来管理这些类别的容器，不受《压力容器安全技术监察规程》的管理。

二、压力容器的分类

由于压力容器应用广泛，用途各异，因而有众多的类型和不同的结构以适应不同的使用要求。对压力容器可以从多种不同角度进行分类，分类的目的在于了解不同类型的压力容器有何特点，基本结构是怎样的，适合应用于何种场合，进而能对各类容器的设计、制造及管理方面有一个初步的认识。

从制造压力容器的材料看，压力容器的类型有钢制容器、有色金属容器（铜制、铝制及钛制等）。非金属容器（玻璃钢、工程塑料、搪瓷等）。无论是从应用范围还是从数量上看，钢制容器占绝大多数，本书仅就钢制压力容器的有关问题作较深入的陈述。

对钢制容器而言，按其壳体制造方法来分类有焊接、锻造、铸造、多层包扎、热套、绕带等不同制造方法的容器。其中以钢板为主要材料经成型后组装焊接的卷焊结构容器又占有主导地位，这是因为采用这种加工方法设备较简单、工艺成熟、制造成本较低，制成的容器质量可靠且能满足大多数容器的使用要求，因而应用广泛，故非特别指出时，有关内容均是对钢制焊接压力容器而言。

除按材料和制造方法进行分类外，还可以从以下角度对压力容器进行分类。

（一）按壁厚分类

压力容器的基本几何参数是直径和壁厚。直径与其容积相联系，反映了容器的加工处理能力或储存容量；壁厚的大小则由压力、温度、材料、介质条件等因素来决定。在其它条件一定时，直径越大则壁厚也相应增大。按容器壁厚进行分类，显然不宜孤立地按容器的绝对厚度作为划分的依据。工程上是以容器外径和内径的比值 $K = \frac{D_o}{D_i}$ 的大小来划分，从形式上看， K 值的大小反映的是直径比，但由于内外径之间的区别是两个壁厚之差的关系，故 K 值的大小说明了直径与壁厚的相对关系。

现按习惯规定如下界限：

1. 薄壁容器： $K \leq 1.2$ 的压力容器；
2. 厚壁容器： $K > 1.2$ 的压力容器。

定性地讲，薄壁容器的壁厚相对于直径较小，这种容器在作强度计算时是以旋转壳体薄膜理论为基础。简单地说，它认为器壁内呈两向应力状态，且应力沿壁厚是均匀分布的。这种假设有一定的近似性，但这样可使计算简化，在工程计算上有足够的准确性。 K 值越小，实际应力状况愈接近这种假设。

随着 K 值的增大，器壁内的实际应力状态和薄膜理论所作的假设出入越大，器壁内的三向应力状态愈加明显，且沿壁厚分布是不均匀的，若再按以薄膜理论为基础所确定的公式计算误差就较大，这时需要采用能反映三向应力状态的公式进行强度计算。

归纳起来说，薄壁容器和厚壁容器之分，不是按厚度大小的绝对数值来划分，而是相对于直径的比较，其实质在于两者适用的理论基础不同，而划定的界限则是人为规定的。

（二）按受压状况分类

受压状况指作用于容器内外表面的压力。

1. 内压容器：作用于容器内部的压力高于容器外表面承受的压力；
2. 外压容器：作用于容器内部的压力低于容器外表面承受的压力。真空容器就是一种外压容器。所谓真空容器指操作压力因工艺上的要求低于大气压力，而容器外表面承受大气压力，因而高于容器内部的压力，故属于外压容器。带夹套的容器无论夹套部分的内容器操作压力高于还是低于夹套内的操作压力，从设计的角度考虑，除保证夹套部分内容器在其操作压力下的强度条件外，都要按受夹套内操作压力作用下的外压容器作校核。故夹套部分的内容器在设计时视为外压容器和内压容器双重状况。

将压力容器区分为内压容器和外压容器是基于这两种不同容器在设计时应满足不同的要求。对内压容器而言，器壁是承受拉应力，通过强度条件来确定壁厚；外压容器器壁承受压应力，一般地说，特别是对于薄壁容器，更突出的问题是可能在压应力作用下使壳体丧失稳定性，即壳体失去保持原有形状的能力，故外压薄壁容器常按稳定条件确定壁厚。

（三）按安装方式分类

安装方式是指容器安装后轴线所处的位置，依这一分类方法，压力容器有：

1. 立式容器：容器安装后轴线垂直于地面；
2. 卧式容器：容器安装后轴线平行于地面。

这两种不同的安装位置，除都要承受介质压力外，还因安装位置不同而产生一些其它的载荷，在这些载荷的作用下应满足各自不同的要求。

对立式容器而言，通常有较高的高径比，大多安装于室外。由于受自重（包括介质和水压试验时的充水量）、风力和地震载荷的作用，在器壁、支座、基础等部位需要满足一些特殊要

求。卧式容器同样在自重和内部充液等载荷作用下在壳体一些特殊部位产生各种局部应力,在这些应力的综合作用下,也需要满足一些特殊的要求。总而言之,由于容器安装方式不同,除应满足介质压力作用下的强度或稳定条件外,还要考虑因安装方式不同所产生的特殊问题。

(四) 按容器工作的温度分类

按工作温度来划分容器的类别最主要的出发点是温度对材料的影响很大,在不同温度区间,在选材上要考虑一些特殊的问题。特别是对低温条件下工作的容器,除在选择材料时要考虑其适应低温条件下工作的要求,在制造、检验等方面也要依据专门的技术标准。

按设计温度不同,可将容器按下列温度区间来划分:

1. 低温容器: 设计温度 $\leq -20^{\circ}\text{C}$;
2. 常温容器: 设计温度 $> -20^{\circ}\text{C} \sim 200^{\circ}\text{C}$;
3. 中温容器: 设计温度 $> 200^{\circ}\text{C} \sim 450^{\circ}\text{C}$;
4. 高温容器: 设计温度 $> 450^{\circ}\text{C}$ 。

这种划分的原则没有严格的科学依据,例如低温容器的界限,各国的规定就不尽一致。按我国压力容器标准,设计温度 $\leq -20^{\circ}\text{C}$ 的容器就定为低温容器,其材料、设计、制造、检验与验收应按 GB150-1998《钢制压力容器》中关于“低温压力容器”的要求执行。

对其它温度等级容器的划分,有关标准没有明确规定。将常温容器的温度上限定为 200°C 大体上可以认为在此温度以下,温度对钢材的力学性能没有显著的影响。但在材料的使用上,我国有关标准规定,对设计温度低于 0°C 的容器,其主要受压元件的材料在使用时应增加在该温度下的低温冲击试验。也就是说对设计温度在 $> -20^{\circ}\text{C}$ 至 0°C 的容器,不属于低温容器的范围,在满足以上要求后按常温容器的要求即可。

处于中温容器的温度范围,温度对材料性能的影响就比较显著,不仅要根据不同温度确定材料的力学性能,而且在此温度下要考虑钢材的某些特殊性能,例如有些石油加工设备的工作条件要与氢接触,在此温度范围内和一定压力作用下会出现较严重的氢腐蚀,因而在选材上要求有抗氢腐蚀的能力,故而也有将中温用钢称为抗氢钢,中温范围内工作的容器还有对钢材抗回火脆性等方面的要求。

设计温度大于 450°C 的容器划为高温容器也没有严格确切的界定根据。由于材料的性能不同,各种钢材允许的使用温度上限存在较大差别,但一般来讲钢材的使用温度超过这个界限会产生蠕变、石墨化等新的问题,钢材强度指标急剧下降。在此温度下工作的容器对材料的热强性要求更高,要求有较好的抗蠕变性能,可以归入耐热钢的范畴。如处于更高的使用温度,可能引起钢的氧化,此时选材时要考虑钢材的抗氧化能力。

从上述可知,容器按温度来划分着重于在不同温度下,使钢材受到不同影响,在材料的选用上应充分考虑到这些特殊问题。

(五) 按设计压力分类

按设计压力对容器进行划分类别,主要反映在对不同压力等级实行安全方面的管理有所不同。我国有关压力容器安全监察方面的法规就是以不同的压力等级再结合容器的用途和盛装介质的性质而接受不同级别的安全监察机构的管理和监督。具体划分的界限如下:

1. 低压容器: $0.1\text{MPa} \leq p < 1.6\text{MPa}$;
2. 中压容器: $1.6\text{MPa} \leq p < 10\text{MPa}$;
3. 高压容器: $10\text{MPa} \leq p < 100\text{MPa}$;
4. 超高压容器: $p \geq 100\text{MPa}$ 。

(六) 按容器在生产中的用途分类

每一台压力容器都承担一定工艺用途,从这个角度看有以下几种类别:

1. 反应容器:其主要作用是在容器内完成一定的化学和物理反应,其中化学反应是起主导和决定作用,物理过程是辅助的或伴生的。由于化学反应的条件或对反应速度的要求,往往需要较高的温度或压力,还可能由于反应过程中气体介质体积发生改变,使操作压力在这一过程中出现波动。有些容器本身的工作过程是周期性的间隙操作,这些情况都会造成壳体内部的应力呈交变状态。高温、高压或交变应力等使用条件,使反应容器较其它类型容器在安全可靠性方面的要求更高。

2. 换热容器:其主要作用是完成不同介质之间的热交换,可能同时还伴有物态的变化,如某一介质由气态冷凝为液态或相反。但无论是进行热量的传递还是存在物态的改变,都是一种物理过程,其中换热过程是这种设备的主要功能。这类容器的操作条件取决于系统内的温度和压力,一般说来比较稳定,因而相对较容易满足安全可靠性方面的要求。

3. 分离容器:这类容器也完成一定的物理过程,主要是利用介质之间的某种物理性质不同,如沸点、密度、溶解度等,从处于混合状态的物质中使某一组分分离出来。实现这一过程通常不需要高的温度或压力。甚至过高的温度和压力会不利于分离过程,延缓分离的速度。因而操作条件更为缓和,更易于满足安全可靠性的要求。

4. 储存容器:这类容器是用于储存气体、液化气体和易于气化的液体,也用于储存这类物质的产品。就储存容器的使用温度条件说,也就是当地的环境温度,在设计上按常温考虑或按低温容器考虑,后者根据当地气象记录月平均最低气温的最低值来确定。容器的工作压力取决于介质的性质,也就是取决于最高环境温度下该介质的饱和蒸气压。从上述分析可以看出,工作温度和压力不会很高,但其特点是容量通常都很大,所储介质大多为易燃、易爆和有毒的物质,一旦发生事故,危及的范围和后果较其它类型容器更为严重,因而对安全可靠性要求较高。

综上所述,将容器按用途分类是反映不同用途类型的容器在安全可靠性方面的要求是不尽一致的,因而按不同用途的容器实施不同要求的安全管理。

(七) 按《压力容器安全技术监察规程》分类

将按压力高低和工艺用途这两种分类的办法,再考虑容器的容积和介质的性质,综合起来就构成我国《压力容器安全技术监察规程》所确定的分类方法。按压力和用途分类其实质就是从安全方面考虑。颁发和实施这一规程的目的也就是为了安全技术监督和管理。

具体地说,《压力容器安全技术监察规程》将压力容器分为下列三类:

1. 第一类容器:低压容器。但不包括第二类和第三类中的低压容器。

2. 第二类容器:主要包括中压容器。但不包括在第三类中的中压容器。对易燃介质或毒性程度为中度危害介质的低压反应容器和储存容器以及毒性程度为极度和高度危害介质的其它用途的低压容器也属于第二类容器。

3. 第三类容器:这是安全要求最高的一类,属于这类容器的有以下情况。

(1) 毒性程度为极度和高度危害介质中的中压容器及容器设计压力与容器容积之和,即 $p \cdot V \geq 0.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3$ 的低压容器;

(2) 易燃或毒性程度为中等危害介质且 $p \cdot V \geq 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压反应容器和 $p \cdot V \geq 10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压储存容器;

(3) 高压、中压管壳式废热锅炉。这类锅炉指在结构上类似压力容器,并按压力容器标

准、规范进行设计和制造。

(4) 高压容器。

在上述分类中涉及的“易燃介质”是指与空气混合后发生爆炸的下限小于10%，或爆炸上限与爆炸下限之差大于等于20%的气体。

对介质毒性程度的划分则是依据GB5044《职业性接触毒物危害程度》标准中的规定，以其允许的最高浓度分为四级，各级最高容许浓度分别为：

极度危害(I级) $<0.1\text{mg}/\text{m}^3$ ；

高度危害(II级) $0.1\sim1.0\text{mg}/\text{m}^3$ ；

中度危害(III级) $1.0\sim10\text{mg}/\text{m}^3$ ；

轻度危害(IV级) $\geq 10\text{mg}/\text{m}^3$ 。

属I、II级的常见介质有氢氰酸、光气、氟化氢、碳酰氟、氯等；属III级的介质有二氧化硫、氨、一氧化碳、氯乙烯、甲醇、环氧乙烷、二硫化碳、乙炔、硫化氢等。

上述对压力容器的分类，综合了影响安全性和可能产生的后果等几个主要因素：压力、用途、介质性质和容积，把压力容器分为一、二、三类。对不同类别容器的设计、制造的许可证实行分级审批，对质量管理实施严格程度不同的控制。每一台容器都要根据上述规定的条件确定出它的类别等级并注明在图样和有关设计和制造的工艺文件上。

第二节 压力容器的介质特性

不论何种压力容器，内部总是有一定量呈气态或液态的介质，而这些介质的性质成为压力容器需要考虑的重要因素之一。认识和了解各种介质的某些共同性质是压力容器知识的一项基础，对合理地选用材料、保证容器的安全可靠是十分重要的。现就关系密切的主要物理性质和化学性质的概念介绍如下：

一、介质的一些物理性质

(一) 临界温度与临界压力

一般地说物质具有气、液、固三种状态，在不同的温度和压力下，物态之间可以相互转化。通常说某物质为气体是指在大气压力和环境温度下呈气体，对其施加压力或降低温度可能使其变为液体，但液化受温度条件的限制。当气体温度高于某一限度时，无论施加多大的压力它也不能被液化而只能以气态存在。气体能在一定的压力作用下被液化的最高温度就称为该气体的临界温度。换句话说，超过这个温度气体就不能用压缩体积的办法将它变为液体，因而高于临界温度，该气态物质不能变为液体。

气体在临界温度时使其液化的最小压力称为该气体的临界压力。根据这个概念，要使气体液化必须在低于临界温度和高于临界压力的条件下才能实现。在临界温度和临界压力下，该物质气液两态平衡共存，气液之间也没有分界面，物质处于这种状态时就称为临界状态。

不同气体有不同的临界温度，其数值差别很大。有的临界温度很低，如氧为 -118.6°C ；而有些气体的临界温度在自然环境温度范围内，例如氙为 16.6°C ；还有一些气体的临界温度大大超过自然环境的温度，例如氯为 143.8°C 、氨为 132.4°C 。

临界温度的高低反映了该气体是否易于液化以及在环境温度下以什么状态存在。临界温度很低，说明它不易被液化，要使它液化必须将它降低到很低的温度。这类气体在容器内呈

单一气态，称为压缩气体。临界温度高，说明该气体易于液化，在低于临界温度的条件下，用较小的压力就可使其变为液体，这类气体在容器内可能处于气液两相共存的状态，称为液化气体。

气瓶是用于盛装各种气体的特殊压力容器，我国《气瓶安全监察规程》就是以气体临界温度的高低来划分压缩气体气瓶和液化气体气瓶的，并实施不同的管理要求。具体划分界限为：凡临界温度 $< -10^{\circ}\text{C}$ 的气体使用的气瓶为压缩气体气瓶，如空气、氧、氢、氮、氩、氦、氟、氯、甲烷等气体用气瓶均为压缩气体气瓶；临界温度 $\geq -10^{\circ}\text{C}$ 的气体用气瓶就是液化气瓶，它又根据使其液化压力的高低分为高压液化气瓶（临界温度 $\geq -10^{\circ}\text{C} \sim 70^{\circ}\text{C}$ ）和低压液化气瓶（临界温度 $> 70^{\circ}\text{C}$ ，且在 60°C 时的饱和蒸气压 $> 0.1\text{MPa}$ ）。例如二氧化碳、氧化亚氮、乙烷、乙烯、氙等气体用气瓶为高压液化气瓶；溴化氢、硫化氢、氨、丙烷、丙烯、氯、二氧化硫等气体用气瓶为低压液化气瓶。高压液化气瓶是在低于临界温度，高于临界压力的条件下进行充装，因此瓶内介质呈气液共存状态。但在环境温度下，特别是在炎热季节或在阳光下曝晒时，瓶内介质的温度有可能升高而超过它的临界温度，此时瓶内将为单一气态，瓶内压力也将随温度的升高而增大。低压液化气瓶内的介质由于其临界温度高于 70°C ，一般情况下瓶内介质温度不会超过临界温度，因而它在使用过程中，只要瓶内的压力保持在临界压力以上，它将始终保持气液两相，瓶内介质的压力就是气体在所处温度下的饱和蒸气压。

（二）饱和蒸气压力

液体的气化就是它的分子不断从液体表面逸出形成蒸气的过程，与此同时也会有分子重新又回到液体中去。当在同一时间内逸出液体的分子和进入液体的分子数目相同时，这种液体和它的蒸气就处于平衡状态，这种蒸气就称为饱和蒸气。如果温度保持不变，在单位空间容积内只能容纳一定的气体分子，此时饱和蒸气所具有的压力就称为饱和蒸气压力。常见液化气体在不同温度下的饱和蒸气压力见表 1-1。

表 1-1 几种常见液化气体在不同温度下的饱和蒸气压

名 称	分 子 式	MPa						
		0°C	10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
氨	NH_3	0.328	0.514	0.756	1.058	1.452	1.930	2.511
氯	Cl_2	0.269	0.401	0.564	0.769	1.064	1.330	1.680
丙烷	C_3H_8	0.370	0.536	0.742	0.993	1.278	1.619	2.021
丙烯	C_3H_6	0.481	0.672	0.908	1.196	1.542	1.952	2.435
二氧化硫	SO_2	0.0539	0.1274	0.2254	0.334	0.519	0.726	0.985
氯乙烷	$\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$	0.197	0.266	0.350	0.453	0.578	0.729	0.911
硫化氢	H_2S	0.932	1.276	1.691	2.187	2.765	3.553	4.253
二氧化碳	CO_2	3.282	4.397	5.622	7.104	-	-	-
甲醚	$\text{C}_2\text{H}_6\text{O}$	0.279	0.371	0.488	0.629	0.805	1.033	1.286

表中所列的各种气体，除二氧化碳以外，其它气体的临界温度均大于 70°C ，因此属于低压液化气体。

（三）爆炸极限

物质因物态或压力发生突变而形成的爆炸称为物理性爆炸，这一过程的前后物质的性质和化学成分不变化。例如蒸气锅炉爆炸、惰性气体用气瓶的爆炸等属此类爆炸。如容器内为饱和液体，在容器破裂时由于压力迅速降到大气压力，它将立即蒸发为气体，体积急剧增大，这种现象称为“爆沸”，破坏性很大。在爆炸过程中如伴有化学反应而产生新的反应产物，这种爆炸称为化学性爆炸。所有可燃气体、粉尘与空气或氧混合后而发生的爆炸都是化学性爆炸。

有些爆炸起始是因某种原因使容器破裂而发生物理性爆炸，但容器内的有些介质一旦泄漏出来与空气接触并达到一定的混合比，在与火源接触后就会发生化学性爆炸。例如液化石油气储罐因某种原因发生破裂，先发生液化气的爆沸，这是物理爆炸，继而可能存在明火甚至一个小火星的作用下迅速将石油气引燃，后一过程就是化学性爆炸。石油气与空气中的氧作用后生成了二氧化碳和水蒸气，将后一种爆炸称为二次空间爆炸，其危害和破坏性是最大的。

发生化学性爆炸的条件，除必须有火源引发外，就是可燃气体或粉尘与空气或氧的混合物的浓度必须在一定的范围内，这个范围就称为爆炸极限。通常用该气体或粉尘在空气(氧)中容积的百分比或每立方米中的克数来表示。产生爆炸的最低浓度称“爆炸下限”，最高浓度称“爆炸上限”。只有混合物中该物质在空气(氧)中的浓度在下限与上限之间才可能引发爆炸，低于或高于这一浓度都不会产生爆炸。常见可燃气体与空气或氧混合后的爆炸极限见表 1-2。

表 1-2 常见可燃气体的爆炸极限/(%)

气体名称	在空气中	在氧中	气体名称	在空气中	在氧中
氢	4.0~74.5	4.0~94	乙醇	3.5~19.0	—
一氧化碳	12.5~74.0	15.5~93.9	乙醚	1.7~48.0	—
甲烷	5.0~15.0	5.0~60.0	甲苯	1.2~7.0	—
乙烯	3.1~32.0	3.0~80.0	硫化氢	4.3~45.5	—
丙烷	2.2~9.5	2.3~45.0	氨	15.0~28.0	—
正丁烷	1.8~8.4	1.8~40.0			

二、介质的腐蚀性

介质的腐蚀性是压力容器要考虑的另一重要因素。在用压力容器的破坏，在很多情况下是由于腐蚀后在其它因素的作用下发生的。对石化行业用压力容器破坏事故的统计表明，由于各种形式腐蚀所引起的破坏占有较大的比例。因此，了解腐蚀的类型、机理及防腐蚀的方法是很有必要的。

压力容器的腐蚀是一个比较复杂的问题，这是因为容器内和周围环境接触的介质种类是多种多样的，造成腐蚀性的强弱不一。而某种介质腐蚀性的强弱，即使对同一材料而言，又受诸多因素的影响而表现不一，例如所处的温度、压力、浓度、材料自身的金相组织状态以及结构中的压力水平和性质等因素都会对该材料在这种介质中的腐蚀性产生不同的影响，现就与压力容器有关的腐蚀问题作一介绍。

(一) 腐蚀的机理

从金属腐蚀的机理看不外乎化学腐蚀和电化学腐蚀两种基本形式。

1. 化学腐蚀。金属与非电解质溶液或干燥气体发生化学作用而产生的腐蚀称为化学腐蚀。火焰加热设备受炉膛内高温烟气作用使炉管产生的腐蚀；合成氨和石油加氢设备中，高温高压条件下氢对钢材的作用等都是化学腐蚀。

化学腐蚀将在金属表面形成一层化学反应产生的生成物薄膜。如果此膜致密、完整、又有良好的化学稳定性，随着膜逐渐加厚，它就会很好地覆盖在金属表面起保护作用，从而减缓并阻止内层金属的进一步腐蚀，也就是有保护作用时腐蚀进行到一定深度就会停止。如果膜与金属的膨胀系数相差较大，膜与金属的结合就不好，如膜自身的强度低，塑性差，膜的结构比较疏松，易形成缝隙，裂纹甚至脱落，此时腐蚀性气体就会进一步侵蚀金属内部，如

此循环往复，腐蚀就会进行下去，直至使结构造成破坏而引发各种事故。

2. 电化学腐蚀。这是金属腐蚀的更普通的形式，它是由金属与电解质溶液起电化学作用而发生的一种腐蚀形式。在压力容器中大多存在各种电解质溶液，因而具有产生电化学腐蚀的条件。电化学腐蚀与化学腐蚀的实质性区别在于前者在腐蚀过程中伴有电流的产生而后者没有。

两种不同的金属由于其电极电位不同，构成原电池，处于电解质溶液中时就引起电化学腐蚀。但在实际生产中电化学腐蚀的部位大多为同一材料，此时腐蚀电池的两极是由于钢材内部有微小杂质或钢中的碳和其它合金元素所形成的化合物与钢中主要成分铁有不同的电极电位，而且大多比铁的电极电位高而成为腐蚀电池的阴极，由于夹杂物或碳化物非常微小且数量非常多，因而形成很多小的阴极。每一个小阴极和阳极都构成一个原电池，称为微电池，在内部产生微电流，腐蚀过程也就发生在金属的微观结构中，被腐蚀的将是电极电位较低的铁。

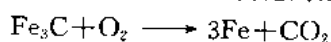
另外，由于压力容器结构上的原因，或在冷热成形加工和焊接时，在容器的局部区域存在较大的内应力或较大的变形，这些部位也是可能形成阳极而成为被腐蚀的区域。在焊缝及其接头附近常受到腐蚀也可能是因为在这个区域存在较高的焊接应力所致。

虽然电化学腐蚀的机理比较明确，但造成电化学腐蚀的实际因素却多种多样，影响腐蚀性强弱的因素也比较多，除容器自身的操作参数，如温度、压力、介质性质和浓度等条件外，容器材料的成分、质量、组织结构以及容器的结构和制造工艺等都会产生影响。

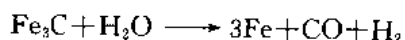
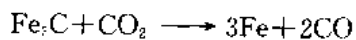
电化学腐蚀的表面特征常表现为局部腐蚀或点状腐蚀，外观形象似乎不明显，但造成的后果较均匀腐蚀严重的多，常常在这些局部区域或点状蚀坑处迅速深入金属内部，甚至形成穿透性蚀孔。还有些电化学腐蚀发生于晶粒内，称为晶间腐蚀，从外观看更不能直觉到被腐蚀的情况，但发生这种腐蚀后，材料的力学性能已显著改变，几乎失去钢材原有的良好塑性，变成脆性材料，在外载荷的作用下极易发生脆性断裂，因而发生晶间腐蚀的容器是十分危险的，应予特别注意。不论何种形式的电化学腐蚀，对容器使用寿命期间的安全可靠都会造成不良影响，减缓和防止电化学腐蚀对压力容器是非常重要的问题。

（二）钢的高温氧化与脱碳

金属在不同温度下都可能与氧发生作用而生成氧化物。例如铝在常温下即可氧化而生成一层坚固而致密的三氧化二铝的膜，它起保护作用，阻止铝进一步氧化。钢铁材料的氧化则发生在较高的温度下，在初始阶段温度不高时形成的产物主要是 Fe_3O_4 。它比较致密，铁原子不易从这层氧化物中扩散，所以可阻止铁进一步被氧化，这说明一般的碳钢用在较低温度下还是可行的。随着温度的升高，氧化膜的主要成分是 FeO ，它较为疏松，保护作用小，形成的氧化皮很容易脱落，造成进一步氧化。当温度超过 700°C 时，除铁的氧化外，还可能引起钢材表面脱碳。在钢内起重要作用的碳与铁的化合物 Fe_3C 是碳在钢中的主要存在形式，钢的脱碳过程实际上是钢中的 Fe_3C 与氧作用使铁还原，碳被氧化的过程，这一过程的化学反应式如下：



除与氧作用造成脱碳外，高温条件下如存在二氧化碳、水蒸气时也会与钢中的 Fe_3C 发生类似反应，其后果也是引起钢的脱碳：



这些反应首先造成与气体接触的钢材表面脱碳，其后果是使钢材强度降低，特别是抗疲

劳的能力将明显下降。

在高温和存在氧化性气体的环境下操作是某些工艺设备的工艺条件所决定的，抗氧化问题只能从材料上着手解决，在钢中加入 Cr、Mo、Ni、Al、Si 等元素可提高钢材的抗氧化性，可根据实际使用温度的不同，选用含有上述元素的各种合金钢。

（三）氢腐蚀

氢腐蚀是发生在高温、高压并与氢接触的条件下。具备这种操作条件的典型用途是石油加工中加氢装置的设备，根据原料和加工目的不同，操作压力 10~15MPa，温度在 370℃~430℃之间。这种操作条件会给设备带来强烈的腐蚀作用，从腐蚀机理看，氢腐蚀属于化学腐蚀，其腐蚀过程首先是氢分子扩散到钢的表面层而被物理吸附，吸附过程表现为氢溶解在铁的晶粒中，使钢材的塑性有所降低，但强度无明显改变，这是氢腐蚀的初始阶段，称为孕育期。随后被吸附的氢分子在高温高压条件下被分解为氢原子，并向钢材内部扩散而被化学吸附，此时晶界上的氢与钢中的 Fe_3C 发生化学变化，铁被还原并生成甲烷，反应如下：



这一反应的后果是造成钢的脱碳，生成的甲烷向钢内扩散的能力低，就聚集在晶界的微观孔隙内。由于靠近晶界的碳化铁与氢生成了甲烷，促使晶粒中心部位的碳化铁或溶解于晶粒内的碳原子向晶界扩散，使氢与碳的反应继续进行，在晶界上生成的甲烷也就愈来愈多，形成局部高压，在此时将出现应力集中。与此同时，碳化铁被还原为铁后体积会缩小，这种组织的变化也会产生应力。在这些应力的作用下将在晶界处发展为裂纹，反过来裂纹的扩展又为氢和碳的扩散提供了有利条件，此时处于氢腐蚀的加速阶段，表现为脱碳加快，裂纹快速扩展。由于裂纹扩展及氢与碳不断扩散，导致氢腐蚀的最后阶段，此时钢中的碳消耗殆尽，裂纹形成网络，使钢材发生脆性断裂。因而这是一种后果非常严重的腐蚀现象。

氢腐蚀的速度与温度和操作状态下氢的分压力有关。显然温度越高反应越快，促进了氢的扩散和钢的脱碳，从而加快了氢腐蚀的过程。而压力的作用不仅取决于操作压力的高低，更直接的是取决于设备内部混合气体中氢所具有的分压力，只有氢分压的高低才能说明设备内氢的浓度。根据道尔顿分压定律，混合气体的总压力应为各组分气体分压力之和。每一组分气体的分压力就等于该气体独占混合气体原有气体体积时的压力，也就是说氢分压取决于它在混合气体中的浓度。在操作状态下，加氢设备内部除氢外还有裂化反应产生的石油气。根据原料油的性质、催化剂的性能及时生成油的要求不同，氢分压可以在很大范围内调整，一般在几个兆帕这一数量级上。根据实际数据，对碳钢而言，只有氢分压在 1MPa 以下，或温度低于 200℃时才不会受到氢腐蚀，而实际上这种条件无法完成所需的化学反应。

由上述分析可见，加氢反应设备的工艺条件总是在碳钢抵御氢腐蚀的温度和压力范围之外，因而碳钢不能直接用于这些设备中。早期是在碳钢制造的反应设备内部加非金属耐热耐磨衬里的办法隔离高温高压氢与金属壳体的直接接触，但这种方式技术陈旧落后，内衬易裂，设备操作周期短，目前已逐步淘汰。所以，抗氢腐蚀从根本上讲还是要从钢材自身的抗腐蚀能力上着手，在钢中加入 Cr、Mo、V、Ti、W 等元素可改善钢的抗氢能力，其机理是这些元素与碳的结合力较强，形成稳定的合金元素碳化物，从而阻止了 Fe_3C 与氢的作用，达到抗氢腐蚀的目的。目前已有多种合金元素含量不等的抗氢钢，具体选用时要由该设备的氢分压确定。纳尔逊(G. A. Nelson)曾根据实验数据绘制了不同温度和不同氢分压下对不同钢材脱碳情况的曲线，工程上称为纳尔逊曲线，可作为选用抗氢腐蚀材料的参考。目前直接与高温高压氢接触的热壁加氢反应器已取代了带内衬的冷壁加氢反应器，其典型材料是用主要合金元素

含量的百分比为 2.25Cr-1Mo 的合金钢制作容器主体，并在内壁用堆焊的办法衬上奥氏体不锈钢覆层，这种结构可有效地解决氢腐蚀问题。

（四）晶间腐蚀

晶间腐蚀是发生在晶粒之间的一种腐蚀形式。出现这种腐蚀的材料最典型的是奥氏体不锈钢。晶间腐蚀常被人们所忽视，其原因有三：一是认为所使用的材料是具有耐腐蚀性能的不锈钢，因而以为在任何情况下均能保持耐腐蚀的能力；二是由于不正确的制造工艺，包括焊接工艺，导致了产生晶间腐蚀的潜在因素，而在产品检验中又无法加以检查；三是因为晶间腐蚀是在长期使用以后才发生并且腐蚀作用产生在材料的微观组织中，不像宏观腐蚀那样锈迹斑斑明显直观。晶间腐蚀的最终后果可能导致容器发生脆性断裂，一旦发生事故往往是破坏性的，因此应引起足够的重视，了解其机理，采取必要的防范措施。

从腐蚀机理上看，晶间腐蚀属于一种电化学腐蚀的特殊形式。容器中有电解质溶液存在是不锈钢设备通常都存在的条件，需要说明的是腐蚀电池的两个电极是如何形成的。

奥氏体不锈钢是一种高铬镍合金钢，由于合金元素的作用，在室温条件下能使铁原子按照一种称为面心立方晶格的形式排列，钢中的碳及铬、镍等合金元素的原子溶解于这种晶格内，这种组织就称为奥氏体。要使钢具有耐腐蚀的性质就必须保证铬在钢中的含量，当奥氏体不锈钢处于 450~850℃ 范围时，（这一温度区域称为“敏化温度”），钢中的铬将与碳结合成碳化铬并从晶粒内部析出到晶粒间的界面上。析出过程首先是从晶粒内靠近晶界周围的部分开始，由于靠近晶界，扩散容易，碳化铬很快析出，使靠近晶界的这一区域中铬的含量低于抗腐蚀所需的有效含量，在晶粒周围形成一“贫铬带”，而靠近晶粒中心部位扩散困难，仍能保持原有的较高含铬量，这将在晶粒内靠近晶界和晶粒中心不同部位因合金浓度不同而形成电位差，也就是说存在构成腐蚀电池所需的两个电极。当容器在使用过程中接触到电解质溶液时，就会在晶粒内产生微电流，在晶界处发生腐蚀，故称晶间腐蚀。

根据以上分析，造成晶间腐蚀既有内因，也有外因。内因可认为是由于钢内存在碳与铬并化合成碳化铬从晶间析出，造成晶粒内局部铬的含量过低所致；从外因说是钢材在加工过程中处于敏化温度范围内，并停留了足够长的时间，为产生碳化铬提供了温度条件，足够的停留时间使碳化铬充分析出。温度低于敏化温度下限时，碳与铬的化合反应不能进行，而高于敏化温度上限时，足以使析出的碳化铬又重新溶解于晶粒中，显然在敏化温度下停留时间越长，晶间腐蚀的倾向也就越严重。众所周知，内因是变化的根据，外因是变化的条件，外因通过内因而起作用。因此从根本上解决奥氏体不锈钢的晶间腐蚀问题是降低钢中的含碳量，由于含碳量的减少也就减少了碳化铬，从而缩小了因合金含量不同产生的电位差，为此目的产生了低碳的（含碳量 $\leq 0.08\%$ ）、超低碳的（含碳量 $\leq 0.03\%$ ）奥氏体不锈钢。有些牌号的奥氏体不锈钢，含碳量上限可达 0.12%，称高碳奥氏体不锈钢，显然这类牌号不锈钢的抗晶间腐蚀能力较低。

增加奥氏体不锈钢抗晶间腐蚀能力的另一途径是在钢中加入一些与碳更容易化合的元素，如钛和铌，其作用是形成钛或铌的碳化物，将钢中的碳夺走，从而阻止了铬与碳的化合，因此也就保持了铬的有效含量，降低奥氏体不锈钢中含碳量。加入钛、铌等稳定剂都是从内因上解决抗晶间腐蚀的问题。从外因上考虑就是如何在容器制造的热加工过程中避免在敏化温度范围内长时间停留，另外就是对这类钢材经加工后进行特殊的热处理：即将需处理的零部件或容器加热到高温然后急冷，使其快速越过敏化温度区。加热温度在 1050~1150℃ 之间，冷却剂用水或油，这种热处理的作用是在高温条件下利用原子扩散能力的增强，使原来在热