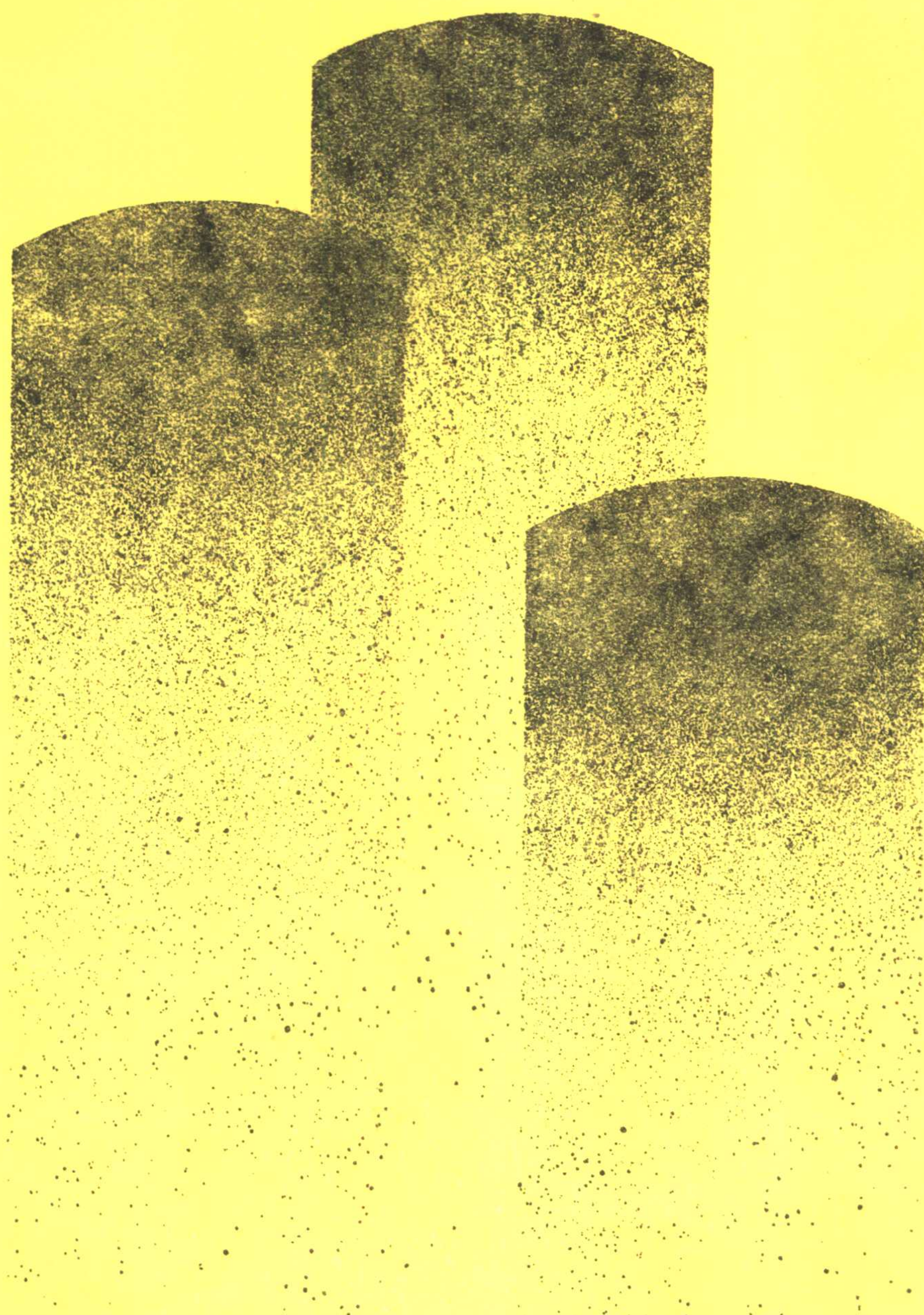


高等学校试用教材

石油化工容器及设备

赵克勤 王秀珍 王正 编



华中理工大学出版社

高等学校试用教材

石油化工容器及设备

赵克勤 王秀珍 王 正 编

华中理工大学出版社

内 容 提 要

本书主要阐述石油、化工压力容器及设备的结构特点与机械设计的基本理论和设计方法。

全书共十章（绪论除外），包括：石油化工设备常用材料、薄壁容器设计的理论基础、内压薄壁容器设计、外压薄壁容器设计、厚壁容器设计、容器及设备的零部件设计、直立设备设计、容器设计的其它问题、压力容器的焊接结构与检验、工艺管线等，并附有例题与习题。书后有附录，包括卧式容器、直立设备计算举例以及有关数据表。

本书可作为高等院校石油、化工工艺类专业及普通机械类专业的教材，也可供从事石化设备设计、制造的工程技术人员参考。

高等学校试用教材

石油化工容器及设备

赵克勤 王秀珍 王 正 编

责任编辑 钟利章

华中理工大学出版社出版发行

（武昌喻家山）

新华书店湖北发行所经销

华中理工大学出版社沔阳印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：15.75 插页：2 字数：377 000

1990年12月第1版 1990年12月第1次印刷

印数：1—1 000

ISBN7-5609-0430-0/TE·1

定价：3.30元

前 言

近几年来，我们在教学上感到困难的是没有一本适合高等院校石油、化工工艺类专业及普通机械类专业“化工容器及设备”课程的教学用书。过去我们曾编写过《化工容器及设备》教材。现在看来，远远不能满足教学要求。因此，编写了这本书。

在本书主审张振华教授指导下，结合我们近年来教学实践中的体会，对编写大纲进行了深入讨论，再三修改，使本教材体现了一定的特色。在讲清化工容器及设备设计的基本理论同时，贯彻理论联系实际的原则，编入了必要的例题和习题；附录中编排了容器设计和立式设备设计举例，并附有装配图，以培养学生分析问题和解决问题的能力；考虑到内容多，学时少，尽量做到由浅入深，简明扼要，加强了专业的针对性，力求符合专业培养目标的要求。

为照顾教材内容的系统性和连贯性，有些章、节编入了一些扩大深度和广度的内容（即带有“*”号的部分），这些内容可根据专业特点作为选学。

本书各章编写人员：绪论、第一、二、三、四章由赵克勤编写；第五、六、七、八章由王秀珍编写；第九、十章和附录由王正编写。全书由张振华教授审阅。

由于编者水平有限，错误之处在所难免，恳请读者批评指正。

抚顺石油学院

赵克勤、王秀珍、王 正

一九八九年十二月

目 录

绪论	(1)
第一章 石油化工设备常用材料	(5)
第一节 常用金属材料的基本性能	(5)
第二节 石油化工设备常用材料	(8)
第三节 提高和改进金属材料性能的途径	(17)
第四节 石油化工设备的腐蚀与防护	(22)
第五节 石油化工设备材料的合理选择	(32)
习题	(33)
第二章 薄壁容器设计的理论基础	(34)
第一节 薄壁旋转壳体的无力矩理论	(34)
第二节 无力矩理论在典型壳体中的应用	(39)
第三节 边缘应力的概念	(45)
习题	(49)
第三章 内压薄壁容器设计	(50)
第一节 内压薄壁圆筒和球壳的设计	(50)
第二节 设计参数的确定	(53)
第三节 内压薄壁容器的封头设计	(58)
第四节 容器的压力试验	(68)
习题	(72)
第四章 外压薄壁容器设计	(74)
第一节 外压容器的稳定性	(74)
第二节 外压薄壁圆筒的设计	(76)
第三节 外压球形容器及封头的设计	(84)
第四节 外压圆筒加强圈的设计	(87)
习题	(90)
第五章 厚壁容器设计	(91)
第一节 概述	(91)
第二节 厚壁容器的结构型式	(92)
第三节 单层式厚壁圆筒设计	(94)
第四节 厚壁容器的失效准则	(103)
第五节 组合式厚壁圆筒设计	(107)
习题	(109)
第六章 容器及设备的零部件设计	(111)
第一节 法兰联接	(111)

第二节 高压容器密封设计.....	(126)
第三节 容器的开孔及其附件.....	(132)
第四节 容器与设备的支座.....	(143)
第五节 典型设备中常用零部件简介.....	(148)
习题.....	(162)
第七章 直立设备设计	(164)
第一节 载荷计算.....	(164)
第二节 直立设备应力合成与校核.....	(169)
习题.....	(175)
第八章 容器设计的其它问题	(176)
第一节 应力分类.....	(176)
第二节 压力容器的断裂失效.....	(181)
第三节 压力容器的疲劳失效.....	(186)
第四节 压力容器的蠕变失效.....	(190)
第九章 压力容器的焊接结构与检验	(195)
第一节 焊接接头的基本形式.....	(195)
第二节 焊接应力与变形.....	(197)
第三节 压力容器的焊接结构设计.....	(199)
第四节 压力容器的焊后热处理.....	(200)
第五节 压力容器的焊缝检验.....	(201)
第十章 工艺管线	(205)
第一节 管子及其选择.....	(205)
第二节 管线的热补偿.....	(209)
第三节 管架.....	(218)
习题.....	(221)
附录 I 计算举例一	(223)
附录 II 计算举例二	(226)
附录 III 数据表	(235)
附表 III-1 筒体的容积、面积及重量.....	(235)
附表 III-2 椭圆形封头的尺寸、面积及容积.....	(236)
附表 III-3 碳素钢、普通低合金钢、复合钢板制椭圆形封头的重量.....	(238)
附表 III-4 钢材的弹性模量.....	(239)
附表 III-5 钢材的平均线膨胀系数.....	(239)
附表 III-6 钢板的许用应力.....	(240)
附表 III-7 钢管的许用应力.....	(243)
附表 III-8 螺栓的许用应力.....	(244)
附表 III-9 筒体、封头的焊缝坡口形式和尺寸.....	(245)
主要参考文献	(246)

绪 论

石油化工工业主要包括炼油、化工、化纤、化肥等部门。石油化工与工业、农业、国防、交通运输及人民生活有着密切的联系，在国民经济中占有重要地位。

石油化工容器与设备，广泛应用于工业、农业及国防等许多部门。目前，在炼油、化工生产中，压力容器正在向高温、高压和大型化及重型化的方向发展。例如：石油加氢精制装置中的加氢裂化反应器；乙烯装置中所用的低温压力容器；聚乙烯装置中的超高压反应釜等。由于近代科学技术的迅速发展，压力容器正在发展成为一门跨学科性质的独立学科。随着石油化学工业、核能、空间与海洋工程等的日益发展，进一步扩大了压力容器的应用范围。推动了压力容器技术的不断革新。近年来，在压力容器的设计、制造、检验等方面进展很快，新的设计方法、新材料、新工艺以及新的制造技术的引用，使压力容器技术更为先进合理。

压力容器不仅是工业生产中常用的一般设备，而且也是一种比较容易发生事故的特殊设备。根据英国对使用年限在30年以内，而且符合英国标准的12700台压力容器进行事故调查统计数字表明，在役使用的每一万台压力容器中，每年发生事故达13.2次，其中重大事故0.7次。所谓重大事故，是指容器破坏后返修工作量很大，或需要报废，或者造成灾难性的破坏。

目前，我国在役压力容器约有94万台，其中相当一部分是50、60年代投入使用的，许多容器与设备已达到或接近设计寿命，甚至有的压力容器正在进行超期服役。况且不少容器与设备由于年久失修，制造质量低劣，以及操作不合理等原因，事故隐患严重，致使爆炸事故时有发生。我国的石化工业正在迅速发展，每年都有许多新的装置投产，并且不断引进外国的炼油化工装置。因此，无论对新的压力容器的设计、制造、检验及验收，还是对在役压力容器的管理与安全评定，都应给予高度重视。

本课程的主要内容是，阐述炼油、化工常用容器与设备，例如薄壁（厚壁）容器、塔器及换热器等的结构、性能、特点，以及设计计算中的基本原理和简要的设计计算方法；同时，介绍工艺管线、压力容器的焊接结构与检验，以及石油化工设备常用材料和腐蚀与防护方法等。本书是石油加工专业、化工工艺类专业及普通机械类专业的教材；同时，对于从事炼油、化工工艺专业的工程技术人员来说，通过对本书的学习，可以掌握本课程内容，拓宽专业知识，提高石油化工容器与设备设计的能力，对于完成炼油化工工艺设计计算、改造与扩建老装置、科学管理生产以及处理生产中发生的问题与进行事故分析等，都是大有裨益的。

一、容器的结构

石油、化工生产过程是用化学或物理的方法将物料转变成所需产品的过程。为了实现这一工艺过程，需要各种类型的石油化工设备。这些设备包括：

（1）换热设备 即主要用于介质的热量交换的设备，如换热器、冷却器、冷凝器、蒸发器、加热炉和废热锅炉等；

（2）反应设备 即主要用来完成介质的化学反应的设备，如反应器、反应釜、聚合釜、发生器、焦炭塔、分解塔、合成塔、交换炉等；

（3）分离设备 即主要用于对混合物料进行分离的设备，如分馏塔、吸收塔、稳定塔等。

(4) 贮运设备 即盛装物料的容器,如卧式圆筒形容器、球形和圆筒形贮罐、槽车等。

这些化工设备虽然尺寸大小不一,操作条件不同,结构型式各异,内部构件的形式多种多样,但就其外壳来讲,从设计角度分析,都属于压力容器范畴。压力容器的机械设计包括筒体、封头、法兰、开孔补强、接管和支座等元件的设计。机械设计通常是在化工设备工艺设计的基础上进行的。常、低压化工设备通用零部件大都已有标准,设计时可直接选用。

二、容器的分类

容器的分类方法很多。这里,主要介绍以下几种分类方法:

1. 按容器形状

常见的容器形状主要有三种:

(1) 方形或矩形容器 它由平板焊成,制造简便,但承压能力差,所以只用作小型常压贮罐。

(2) 球形容器 它由数块球瓣板拼焊而成,承压能力好,但由于安装内件不便及制造较困难,所以一般用作贮罐。

(3) 圆筒形容器 它是由圆柱形筒体和各种成型封头(半球形、椭圆形、碟形、锥形封头等)所组成。作为容器主体的圆柱形筒体,制造容易,安装内件方便,承压能力较好,因此这种容器应用最广。

2. 按承压性质

按承压性质可将容器分为内压容器与外压容器两类。

(1) 内压容器 当容器内部介质压力大于外界压力时,称为内压容器。

内压容器按承受的工作压力大小还可分为:

低压容器 $0.1 \leq p < 1.6 \text{ MPa}$;

中压容器 $1.6 \leq p < 10 \text{ MPa}$;

高压容器 $10 \leq p < 100 \text{ MPa}$;

超高压容器 $p \geq 100 \text{ MPa}$ 。

(2) 外压容器 当容器外界的压力大于容器内部介质的压力时,称为外压容器。它包括减压塔和真空容器等。对于带有夹套加热的设备,当夹套内的介质压力高于容器内的压力时,也构成一外压容器。

在设计时,对于内压容器,主要保证壳体具有足够的强度;而对于外压容器,由于壳体承受压应力,主要考虑的是稳定问题。

3. 按壳壁厚度

按容器壳壁厚度,容器可分为薄壁容器和厚壁容器两种。

当容器外径与内径的比值 $K \leq 1.2$ 时,称为薄壁容器;若 $K > 1.2$,则称为厚壁容器。

中、低压容器常为薄壁容器,而高压与超高压容器一般为厚壁容器。

4. 按监督管理

为了加强压力容器的安全技术管理和监督检查,劳动人事部和国家劳动总局于1981年颁发了《压力容器安全监察规程》,简称《监规》。在该《监规》中,根据容器的压力高低、介质的危害程度以及在生产过程中的重要作用,将压力容器划分成三类:

(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;

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器和贮运容器；

④ 内径小于1m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 $p_n V \geq 0.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3$ 的低压容器或剧毒介质的中压容器 (p_n 表示最高工作压力, V 表示容积)；

③ 易燃或有毒介质且 $p_n V \geq 0.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压反应容器, 或 $p_n V \geq 5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^3$ 的中压贮运容器；

④ 中压废热锅炉或内径大于1m的低压废热锅炉。

三、对化工容器的基本要求

对容器进行机械设计, 要根据由工艺设计人员提出的容器与设备的机械设计委托书。例如需要设计一台板式精馏塔, 则该委托书中应提出该塔器的工况条件和塔的总体尺寸, 如精馏塔的内径与塔高, 塔板层数与板间距离, 开孔接管的数目、方位、标高及尺寸等等。这些尺寸通常称为设备的工艺尺寸, 它们是根据工艺生产要求通过工艺计算决定的。按照设计委托书的要求进行压力容器零部件的机械设计。从机械角度来看, 化工设备应满足下列要求:

(1) 强度 强度就是容器在外载荷作用下, 使其不致破坏的能力。容器应有足够的强度, 以保证安全生产。

(2) 刚度 刚度是容器在外载荷作用下, 保持其原来形状的能力。刚度必须足够, 以防止容器在使用、运输、安装过程中发生不允许的变形。设备要有足够的稳定性, 当设备在外载荷作用下, 如果刚度不够就会丧失稳定, 使容器设备被压瘪或出现折皱。

(3) 耐久性 容器必须具有一定的使用寿命。容器的使用寿命取决于材料选择得是否适当, 防腐蚀措施和施工是否正确, 以及介质对材料的腐蚀情况等。此外, 正确、合理的操作对容器的寿命有很大影响。

(4) 密封性 承压的或处理易燃易爆或有毒介质的容器, 应具有可靠的密封性, 以创造良好的工作环境和维持正常的操作条件。

(5) 经济性 容器设备应具有好的经济效益, 即单位生产能力高 (单位生产能力是指化工设备每单位体积、单位重量或单位面积, 在单位时间内所能完成的生产任务), 材料消耗少, 设备价格低, 管理费用和产品总成本低。

(6) 其他 如制造、安装、操作及维修均应方便。

四、压力容器设计标准

目前, 我国钢制压力容器的设计是根据全国压力容器标准化技术委员会, 于1989年, 在国家技术监督局的指导下编辑并颁布的国家标准GB150-89《钢制压力容器》(以下简称《国标》)。《国标》的内容包括压力容器板壳元件的设计计算、结构要素以及制造和验收的附加要求等。《国标》是压力容器的结构强度、结构稳定和密封等设计所必须遵守的规范。

《国标》是以弹性失效准则为基础制订的,它属于常规设计法。在进行设计时,只考虑静载荷的作用,按照第一强度理论(最大主应力理论)来判断容器构件中的应力,以容器构件中的最大主应力作为主要依据来决定构件的尺寸。这种方法的特点是比较简便易行,但不够精确。

在60年代以前,世界各国的压力容器设计规范基本上是采用常规设计法,如美国机械工程师协会颁发的ASME VIII-1-1983(锅炉及压力容器规范第VIII卷第一册——美国国家标准),日本JIS B8243等,都属于常规设计规范。

随着科学技术的进步,石油、化学工业与原子能工业的兴起,压力容器的尺寸愈来愈大,操作条件愈益苛刻。不仅承受高压,有时伴随着高温或低温,甚至温度和载荷发生波动。如果仍按常规设计法,用单纯提高安全系数或加大壁厚的办法进行设计,显然既不经济,又不安全可靠。因此,常规设计法必须进行改进。由于现代实验技术与弹塑性理论的发展,采用电测、光弹性测量、电子计算机等工具,有可能对压力容器的各零部件中的应力分布作出详尽的测量与计算,从而为新的应力分析设计法提供了条件。于1964年,美国提出了ASME-VIII-2(美国锅炉及压力容器规范——另一规程),它属于应力分析设计法。英国的BS5500-1984,日本JIS B8250-1983,均属于分析设计法。我国将于近年颁布专业标准(ZB)《钢制压力容器——另一规程》,它和ASME-VIII-2相类似,也是应力分析设计规范。分析设计法与常规设计法的主要不同点,在于分析设计法要求以详尽的应力分析作为设计的依据,以严格的选材、制造工艺和可靠的检验为保证,并需以现代化的计算工具和实验技术为手段。分析设计是压力容器设计观点与方法上的一个飞跃,自1964年问世以来,就受到了世界各国的普遍重视,解决了长期以来常规设计难以处理的问题,不仅取得了巨大的经济效益,而且大大增强了压力容器的安全可靠性能。

我国于1989年颁布的国家标准GB150-89《钢制压力容器》,它与专业标准(ZB)《钢制压力容器——另一规程》同时施行。这和美国ASME VIII-1与ASME VIII-2实行双轨制施行是一致的。

标准一般分为国家标准、部标准、专业标准、行业标准和厂标准。

国家标准是由国家标准局颁发的标准,它的适用范围最为广泛,是其它各种同类标准必须遵守的共同准则和最低要求。国家标准用代号“GB”表示。如GB6654-86《压力容器用碳素钢和低合金钢厚钢板》。GB后面的第一、二组数字分别表示标准的编号、实施年份。

部标准是由国务院有关部、委颁发的标准,它只在各部所辖范围内适用。部标准的代号因部而异:如“JB”代表机械部标准;“YB”代表冶金部标准;“HG”代表化工部标准;“SY”代表石油部标准。压力容器方面的部标准有很多,如常用的JB741-80《钢制焊接压力容器技术条件》等。

专业标准是由各部专业局颁发的标准,它只在本专业局所属范围内适用。如TH3009-59无折边球形封头,就是机械部化工通用机械标准。

行业标准,有的行业是跨部门的,其标准只能由几个主管部共同制定、颁发。如《钢制石油化工压力容器设计规定》就是由石油、化工、机械三个部共同颁发的。

厂标准又称企业标准,是只在本厂中适用的标准。它必须经主管部门批准。

在标准中还有一类属于指导性技术文件,如JB/Z105-73《钢制压力容器焊接规程》,就是机械部的指导性技术文件。指导性技术文件属于一种推荐性标准。它适用于生产技术活动和标准化过程中某些具有普遍意义且需要力求统一的程序、规则和方法。

第一章 石油化工设备常用材料

石油化工设备往往在高温、高压、高真空及低温深度冷冻等复杂而苛刻的操作条件下工作，所加工的物料又常常是易燃、易爆、有毒和有腐蚀性的物质。不同的操作条件对材料有不同的要求，所以石油化工设备采用品种繁多的黑色及有色金属和非金属材料。

第一节 常用金属材料的基本性能

金属材料的基本性能包括物理性能、机械性能、耐腐蚀性能和加工工艺性能等。

一、物理性能

材料的主要物理性能有：导热系数 λ 、线膨胀系数 α 、比热 c 、熔点 T 、密度 ρ （或重度 γ ）等。常用金属材料的物理性能可查阅有关手册。

二、机械性能

材料在外力作用下所表现出来的性能，称为材料的机械性能，其主要性能有弹性、塑性、强度、硬度及冲击韧性等。

1. 弹性与塑性

材料在外力作用下产生变形，当外力去除后又能恢复原来形状的性能，称为材料的弹性。

材料在弹性变形阶段，根据虎克定律，其应力与应变成正比，即

$$\sigma = E\varepsilon \quad (1-1)$$

式中， σ 为应力(MPa)； ε 为应变； E 为弹性模量(MPa)，它反映材料对弹性变形的抗力，代表材料的“刚度”。

金属材料依虎克定律而变形的最大应力为弹性极限 σ_e ，其单位为MPa。

压力容器与机械零件在正常工作时，一般只发生弹性变形。

当应力大于弹性极限时，材料不但发生弹性变形，而且还发生塑性变形，即在外力去除后，其变形不能得到完全的恢复，而具有残余变形或永久变形。不能恢复的变形称为塑性变形。材料的塑性主要是指延伸率 δ 和断面收缩率 ψ 。材料的塑性主要反映材料的可塑性。材料的塑性在设备制造和操作运行中具有重要意义。用塑性良好的材料制造压力容器，当局部区域存在高峰值应力时，它容许材料发生小量的局部塑性变形，从而使应力获得更有利的分布，同时又不使整个容器丧失承载能力。一般要求压力容器用钢的 $\delta = 15\% \sim 20\%$ 。

2. 机械强度

材料的机械强度是指材料抵抗外力作用而不破坏的能力，其单位为MPa。

抵抗断裂破坏的能力，用材料的强度极限 σ_b 表示。抵抗发生塑性变形的能力，用屈服极限 σ_s 表示。目前，工程计算上常采用 $\sigma_{0.2}$ ，即残余变形为0.2%时的应力值作为屈服极限。材料的机械强度主要是指静拉伸试验时的强度极限 σ_b 和屈服极限 σ_s 。在工程设计时，

许用应力要根据机械强度来确定。

钢材的机械性能随着温度的升高会发生显著变化。温度对低碳钢机械性能的影响如图1-1所示。一般来说，随着温度的升高，材料的强度（ σ_s ， σ_b ）降低；塑性（ δ ， ψ ）增加；冲击韧性 α_k 则是先上升而后降低。在300°C左右，发现强度增加而塑性降低的区域，称此为兰脆区。在此温度区域内，由于碳素钢的塑性降低，不应进行有塑性变形的加工，以避免出现脆性。

由于在不同的温度下，材料具有不同的强度，所以在进行设计时要采用相应温度下的强度极限（ σ_b ）和屈服极限（ σ_s ）。这些数据可查阅有关手册或在不同温度下进行静拉伸试验取得。

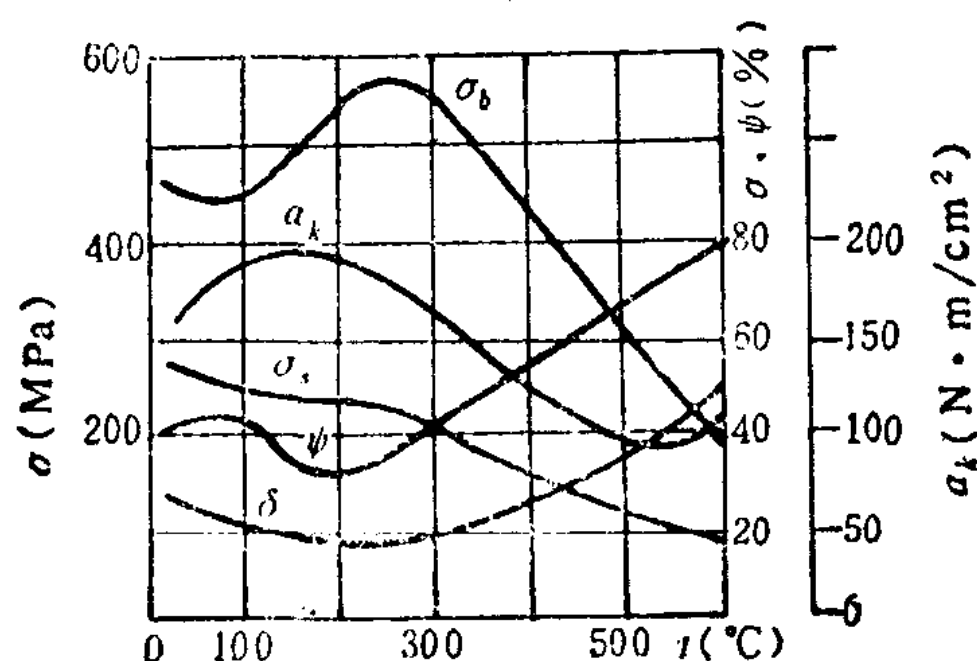


图1-1 温度对低碳钢机械性能的影响

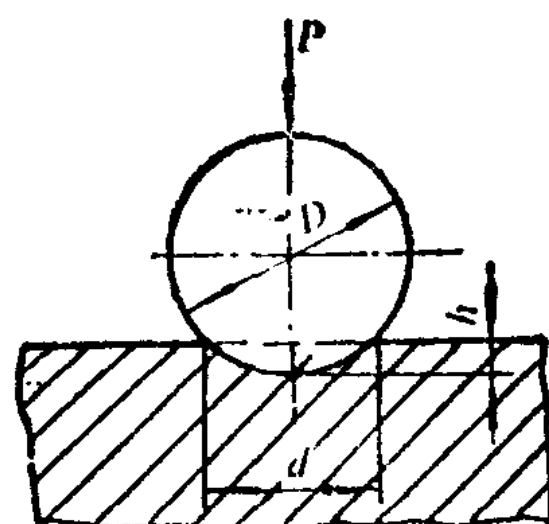


图1-2 布氏硬度测定示意图

3. 硬度

材料的硬度是表示一个物体抵抗另一个较硬物体压入其表面的性能。它表征材料抵抗局部塑性变形的能力。常用的硬度有布氏硬度（HB）和洛氏硬度（HRA、HRB、HRC）。这些硬度值是在相应的硬度试验机上测定的。现将布氏硬度测量法介绍如下：

如图1-2所示，将直径为 D 的硬钢球，用一定压力 P 压入被测定的金属表面，经过 t 秒后卸载，在金属表面留有直径为 d 、深度为 h 的压痕。以压痕面积 F 去除载荷 P 所得之应力值，即为布氏硬度，计算公式为

$$HB = P/F$$

测量压痕深度 h 较为困难，而测量压痕直径 d 比较简单。

由于载荷 P 及钢球直径 D 都是一定的，所以测出压痕直径 d 即可求出HB值。在实用中，根据 P 、 D 及 d 的关系可直接由硬度表中查得HB值。

根据经验，材料的布氏硬度值和拉伸强度极限有如下近似关系：

$$\text{低碳钢} \quad \sigma_b = 0.36HB$$

$$\text{高碳钢} \quad \sigma_b = 0.34HB$$

利用上述关系可以近似确定材料的强度极限。硬度值可用来说明材料的耐磨性和切削加工性，以及当容器设备和管道使用一定时期后，可根据测定硬度值的变化来推断材料的变化情况。

在机械设计手册中，可以查到布氏硬度值与洛氏硬度值的换算关系。

4. 冲击韧性

材料的冲击韧性是表示材料抵抗冲击载荷的能力。冲击韧性 α_k 值的单位是 $N \cdot m/cm^2$ 。

冲击韧性 α_k 值，是在冲击试验机上测得。材料冲击试验的方法是，将材料制成带有缺口的标准试件，把试件放在摆锤式中心试验机的支座上，使摆锤从一定高度落下将试件冲断，如图1-3所示。由试验机可直接测出冲断试件所消耗的冲击功 A_k （单位为N·m），将 A_k 除以试件缺口处的横断面积 F （单位为cm²），所得数值即为材料的冲击韧性，即 $\alpha_k = A_k / F$ ， α_k 值愈大，表示材料抵抗冲击的能力愈强。脆性材料的 α_k 值远低于塑性材料的 α_k 值。

冲击韧性 α_k 值是表征材料脆性的重要依据。对于承受波动或冲击载荷作用的构件及在低温条件下工作的设备，必须考虑材料的抗冲击性能。

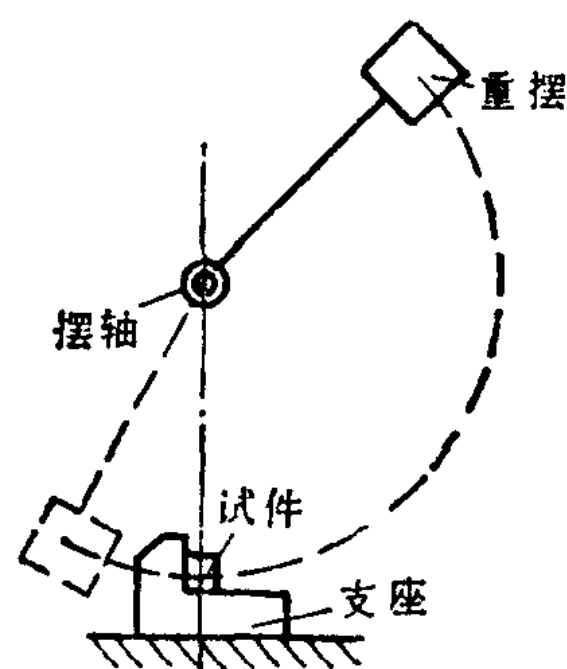


图1-3 冲击试验示意图

表1-1 低温下碳钢冲击韧性 α_k 值(N·m/cm²)

温 度	+20℃	-10℃	-30℃	-40℃	-60℃
钢 号					
A3	140	90	22	10.6	9.8

低温对金属材料的机械性能和物理性能有很大影响，如低温使碳钢的 σ_s 、 σ_b 及HB等提高，而使 δ 、 ψ 及 α_k 等下降，特别是 α_k 值降低更为显著。表1-1所示为低温下碳钢冲击韧性 α_k 值的变化情况。

由此可见，碳钢在低温下的冲击韧性 α_k 值发生陡降，由塑性转变为脆性，这种现象称为冷脆性。大多数金属材料（铜、铝及铬镍不锈钢等除外）都具有冷脆性。

温度是造成金属材料脆性断裂的重要因素之一。通过许多研究表明，大多数脆性断裂事故都发生在低温，其主要原因是由于材料在低温下冲击韧性发生明显下降。每一种材料都有一个无塑性温度（也称无韧温度，简称“NDT”）。高于这个温度时，断裂是塑性的；而低于这个温度时，断裂则完全是脆性的。因此，无塑性温度是一个重要参数。它不仅是压力容器水压试验时水温选择不可缺少的数据，也是评定材料和工艺质量的重要参数。压力容器用钢的无塑性温度列于表1-2。

5. 断裂韧性

材料的断裂韧性是表示材料抵抗裂纹失稳扩展的能力，也是材料抵抗低应力脆性破坏的韧性参数，所以称为断裂韧性。

材料的断裂韧性主要有：临界应力强度因子 K_{Ic} （或 K_{Is} ）、临界裂纹张开位移 COD（即 δ_c ）和 J 积分临界值 J_{Ic} 。

三、耐腐蚀性

材料抵抗周围介质对其腐蚀破坏的能力，称为材料的耐腐蚀性能。

在石油化工生产中，所处理的物料大多数是有腐蚀性的介质，腐蚀问题直接关系到设备的使用寿命、产品质量和环境污染等。因此，在设计时必须根据操作介质选择适当的耐腐蚀材料。

表1-2 压力容器用钢的无塑性温度

材料牌号	热处理状态	板厚 (mm)	试样尺寸 (mm)	无塑性温度 (℃)
A3	热轧	16	16×50×130	-10
20g	热轧	16	16×50×130	-20
16Mn	热轧	25	25×90×360	-25
			19×50×130	-20
		60	25×90×360	-15~-20
15MnVNb	正火	25	19×50×130	-45
		50		-60
	调质	36	19×50×130	-60
		24 20		
15MnV	热轧	20	19×50×130	-15
			16×50×130	-20
14MnMoV	正火+回火	24	19×50×130	-15
			16×50×130	
18MnMoNb	正火+回火	32	25×90×360	+5
			19×50×130	≥+10
		50	25×90×360	0
14MnMoNbB	调质	16	16×50×130	-45
		45	19×50×130	-50
12CrNiMoVCu	调质	24	19×50×130	-65
09MnTiCuRe	正火	20	19×50×130	-25
06MnNb	正火	16	16×50×130	-60
		20	19×50×130	-45
		25	25×90×360	-50

金属材料的耐腐蚀性常用腐蚀速度表示，其单位为mm/a。一般认为介质对材料的腐蚀速度在0.1mm/a以下者，材料是耐腐蚀的。

四、加工工艺性能

材料经过各种加工以后，才能制成设备或机械零件。材料在加工方面的物理、化学和机械性能的综合表现构成了材料的加工工艺性能。

对于化工容器与设备，应该考虑的主要加工工艺性能有：可焊性、可锻性、可铸性、切削加工性、热处理性及冲压性等。它们直接影响容器与设备及其主要零部件的制造工艺、材质的性能和成本。

第二节 石油化工设备常用材料

常用材料一般为金属材料和非金属材料两大类。金属材料又分为黑色金属和有色金属。非金属材料又分为无机材料与有机材料。

金属材料是制造石油化工设备的主要材料，大多数容器由钢材制成。钢材与其它材料相

比，它的强度高、韧性好、耐冲击，可焊性及切削加工性均好，而且采用不同的热处理方法还可以获得所需要的各种性能。

非金属材料具有良好的耐腐蚀性能，它不仅可以单独作为结构材料，还可作为金属设备的涂层、衬里及设备的密封等材料，是一种有广阔发展前途的化工设备材料。

一、碳 钢

碳钢是含碳量小于2.06%的铁碳合金。碳钢中除碳之外，还含有少量的Mn、Si、S、P、O、N等元素，它们通常为杂质，对钢的性能有一定影响。

碳钢是制造石油化工设备的主要材料，它不仅价格低廉，而且其性能在许多场合能够满足使用上的要求。通常碳钢占金属材料用量的80%以上。

1. 碳钢的分类

(1) 按钢的含碳量 根据钢的含碳量的多少可分为三类：

低碳钢 含碳量小于0.25%；

中碳钢 含碳量为0.25~0.6%；

高碳钢 含碳量大于0.6%。

(2) 按钢的质量等级 根据碳钢质量的高低，即主要根据钢中所含有杂质S、P的多少可分为三类：

普通碳素钢 钢中含 $S \leq 0.055\%$ ， $P \leq 0.045\%$ ；

优质碳素钢 钢中含 $S \leq 0.045\%$ ， $P \leq 0.040\%$ ；

高级优质碳素钢 钢中含 $S \leq 0.030\%$ ， $P \leq 0.035\%$ 。

碳钢的分类方法很多，除上述分类方法外，还有按钢的用途，按冶炼方法等。

2. 碳钢的牌号及其应用

碳钢根据用途不同分为如下三类：普通碳素钢、优质碳素结构钢和碳素工具钢。

(1) 普通碳素钢 按照供应条件可分为甲类钢、乙类钢和特类钢三种。

① 甲类钢（或A类钢）是按照机械性能供应的。它主要用来制作钢板、角钢、槽钢及圆钢等，在使用过程中不进行热处理，因此不保证化学成分，只保证机械性能。其钢号以“A”字加上顺序数字表示，分为0~7级，即A0、A1、A2、…A7。

② 乙类钢（或B类钢）是按照化学成分供应的。它主要用来制造承载不大的零件，在使用过程中往往要经过锻造和热处理，机械性能可能会发生变化。因此，原有机性能对用户没有意义，但在制订热加工规范时，其化学成分是必要的的数据。其钢号与甲类钢相类似，以B0、B1、B2、…B7表示之。

③ 特类钢（或C类钢）是按照既保证机械性能又保证化学成分供应的。它符合特定的要求，以供专门之用，其钢号为C0、C1、C2、…C7。

普通碳素结构钢随着钢号顺序的增加，钢的含碳量增加，钢的抗拉强度提高，而塑性下降。

乙类钢和特类钢在化工设备制造中很少应用。

根据炼钢方法的不同，碳钢可由平炉、电炉和转炉冶炼。制造压力容器用的钢材，应采用平炉、电炉或纯氧顶吹转炉钢。由于炼钢工艺的不同，碳钢又可分为沸腾钢、镇静钢和半镇静钢。

所谓沸腾钢，是在炼钢过程末期，脱氧不完全，钢液中保留有相当数量的FeO，在浇注

和钢液凝固时，在钢液中发生如下化学反应： $\text{FeO} + \text{C} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}\uparrow$ ，钢液中不断析出CO，产生沸腾现象，故称之为沸腾钢。其代号为“F”，如A3F即表示普通碳素结构钢，甲类3号沸腾钢。

镇静钢是在浇注前已经过完全脱氧，当凝固时无沸腾现象，故称之为镇静钢（不另加代号），如A3。半镇静钢（其代号为b）介于沸腾钢与镇静钢二者之间。

（2）优质碳素结构钢 这类钢既保证机械性能又保证化学成分。与普通碳素钢相比，这类钢对硫、磷含量控制较严，冶炼工艺要求严格，质量较高。它的牌号是按含碳量的万分之几而定。如20号钢，表示含碳量在0.20%左右。

优质碳素结构钢按其含碳量的不同，分别用于制造各种不同的零件。08、10、15、20、25等号钢，其含碳量低，属于低碳钢，它们的强度较低而塑性好，可焊性良好，多数制成钢板，用于制造各种容器，或用来制造冲压件和焊接结构件。30、35、40、45、50等号钢，其含碳量中等，属于中碳钢，它们的强度较高，韧性及加工性也较好，通常要经过淬火、回火等热处理工艺，常用来制造轴类、齿轮、连杆等。其中以40及45号钢应用最为广泛。60、70等号钢，其含碳量较高，属于高碳钢。这类钢淬火后具有较高的弹性、硬度和耐磨性，但塑性差，常用于制造弹簧、刀具等。

（3）碳素工具钢 这类钢的含碳量较高（在0.7%以上），在淬火和低温回火之后，有很高的硬度和耐磨性，常用于制造刀具、量具和模具等。其钢号为T8、T12等，分别表示平均含碳量为0.8%和1.2%的碳素工具钢。

3. 压力容器常用的碳钢

在压力容器制造中，低碳钢得到广泛的应用，这主要是因为低碳钢具有良好的塑性和韧性，冷、热加工性好，特别是可焊性好，而且价格低廉。低碳钢虽然强度较低，但仍能满足一般压力容器的要求。常用的普通碳素结构钢（甲类钢）有A3F、A3、A4等。优质碳素结构钢有10、20号钢等。一般以板材或管材供应。

锅炉和压力容器所用的专用碳素结构钢都是在一般碳素钢的基础上派生出来的。由优质碳素结构钢派生出来的有20R、20g及22g等（R和g分别表示容器用钢和锅炉用钢），这类钢对化学成分控制严格，尤其是对硫、磷等有害杂质元素的控制比原钢种更加严格，对机械性能必须保证，对冲击韧性有较严格的要求，并要求时效敏感性小。

二、合金钢

为了改善钢材的性能，在碳钢中加入一定量的合金元素，如Cr、Mn、Ni、Si、W、Mo、V、Ti等，所得到的钢统称为合金钢。

1. 普通低合金钢

普通低合金钢（简称普低钢）。是在普通低碳结构钢的基础上加入少量的（低于2.5%）合金元素制成的。由于少量合金元素的加入，大大地提高了钢材的机械强度和耐腐蚀性能，低温性能和耐热性能也有所提高。采用普低钢的目的主要是减轻结构的重量，保证使用可靠、耐久。由于这类合金钢具有较高的屈服极限，故用普低钢来代替普通低碳结构钢可在相同受载条件下使结构的重量减轻20%~30%。例如采用16MnR钢代替碳钢A3制造大型化工容器后，重量可减轻1/3。因此，普低钢在石油化工容器与设备的制造中得到了广泛的应用。尤其是中、高压容器和设备，几乎全部采用普低钢制造。但普低钢也存在一些不足之处，如它与碳钢相比，塑性低而屈服极限较高，因而给冷变形冲压加工带来一定困难；同时，其可焊

性也比低碳钢要差些。

普通低合金钢牌号表示,如16MnR,钢号最前面的数字表示平均含碳量为万分之几,16即表示平均含碳量为0.16%左右。元素符号后的数字表示该合金元素平均含量的百分之几。但规定平均含量小于1.5%时,就不注明数字,如因16MnR含Mn1.2%,所以Mn后未注明数字。R表示容器用钢。

普通低合金结构钢,通常按其屈服极限的高低划分为不同的强度等级。如350MPa级的16Mn,500MPa级的18MnMoNb等。可查阅有关手册。

2. 不锈钢耐酸钢

不锈钢是在空气、水及一些弱腐蚀性介质中能抵抗腐蚀的合金钢。不锈钢耐酸钢是在酸和其它强烈腐蚀性介质中能抵抗腐蚀的合金钢。通常把不锈钢和耐酸钢称为不锈钢耐酸钢,或简称为不锈钢。

在石油化工生产中,与压力容器和设备接触的介质往往具有强腐蚀性,如强酸、强碱等。有些工业产品如锦纶、涤纶、高压聚乙烯、聚丙烯等,在生产中若铁离子含量过高,将使纤维着色影响产品质量,因此也要求采用不锈钢耐酸钢,以防止生锈或铁离子污染。在选用耐腐蚀材料时,应考虑各种因素,保证具有足够的耐蚀性。

常用不锈钢按其化学成分可分为铬不锈钢和铬镍不锈钢两大类。

(1) 铬不锈钢 这类不锈钢是以铬(Cr)含量为主,要求含铬量大于12%。铬钢的耐蚀性是由于铬的钝化作用,一般介质的氧化性愈强,铬钢中含铬量愈高,钢材的耐蚀性愈好。

铬不锈钢的基本型为Cr13型不锈钢,其牌号为0Cr13、1Cr13、2Cr13、3Cr13、4Cr13。其中0Cr13能耐含硫石油、硫化氢、高温氨水等的腐蚀,常用于防腐、防污染而压力不高的设备。1Cr13能耐蒸汽、潮湿大气、淡水及海水等的腐蚀,主要用于制造韧性较高和受冲击载荷的零件,如阀、阀件及热裂设备等。3Cr13、4Cr13主要用于制造弹簧、滚动轴承及量具等。

除Cr13型钢外,常见的铬不锈钢还有Cr17及Cr25等。

(2) 铬镍不锈钢 这类不锈钢以铬(Cr)、镍(Ni)含量为主。其基本型为18-8型铬镍不锈钢。18-8型不锈钢按含碳量的多少,可将其分成高碳级的(含碳量 $\geq 0.08\%$)、低碳级的($0.08\% > \text{含碳量} > 0.03\%$)、超低碳级的($0.03\% \geq \text{含碳量} > 0.01\%$)和超纯级的(含碳量 $\leq 0.01\%$),它们的代表钢号分别是:1Cr18Ni9Ti、0Cr18Ni9、00Cr18Ni9和000Cr18Ni9。

目前,用于制作压力容器的铬镍不锈钢板有:0Cr18Ni9、0Cr18Ni11Ti、0Cr17Ni12Mo2、00Cr19Ni11和00Cr17Ni14Mo2,它们分别相应于美国及日本的304、321、316、304L和316L钢。

不锈钢材料在出厂时已经固溶处理。所谓固溶处理,就是把钢加热至1050~1150°C后进行快速冷却,其目的是获得单一的奥氏体组织。所以18-8型钢又称为奥氏体不锈钢。经过固溶处理的18-8型不锈钢,钢中溶解的碳未能析出,因而碳在奥氏体中呈过饱和状态。当把这种钢在450~850°C温度下短时加热时,碳便会与铁、铬形成 $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ 从奥氏体中析出,并分布在晶粒边界上。由于 $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ 中的铬含量比奥氏体基体中的铬含量多,所以在形成 $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ 时,需从奥氏体晶粒中取得一些铬。如果这些铬能够及时从晶粒内部输送到晶粒边界,那么整个晶粒内部的铬含量虽有降低,但并不会影响耐蚀性。如果加热或冷却通过450~850°C是短时的,则由于晶粒内部的铬扩散很慢,来不及扩散到边界上,于是形成 $(\text{Fe,Cr})_{23}\text{C}_6$ 所需的铬就只能从晶粒的边界获取。这样就造成了晶粒边界附近