

高等学校轻工专业试用教材

# 容器设计

吴英桦 俞家梁 主编

中国轻工业出版社

高等学校轻工专业试用教材

# 容 器 设 计

吴英桦 俞家梁 主编

中国轻工业出版社

(京) 新登字034号

### 内 容 提 要

本书共八章, 内容有: 内压薄壁容器的基本理论及设计; 平板理论及平盖设计; 外压容器设计; 容器零部件设计; 厚壁容器设计; 现代压力容器设计中的几个问题; 计算机在压力容器设计中的应用。书中对轻化工、食品容器的结构、材料选用、中低压及高压容器的常规设计方法作了详细的阐述, 对现代应力分析设计方法及计算机在容器设计中的应用作了扼要介绍。内容既侧重基本理论, 又注意联系工程实际, 并辅以适当例题及习题。

本书是高等院校轻化工和食品机械的专业课教材, 对三年制专科学校、业余大学、职工大学也适用, 也可供设计、科研及生产部门的工程技术人员参考。

高等学校轻工专业试用教材

### 容 器 设 计

吴英桦 主编

俞家梁

责任编辑 孟寿萱

中国轻工业出版社出版

(北京市东长安街6号)

北京市卫顺印刷厂 印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

787×1092毫米  $1/16$  印张: 22.25插页: 字数: 504千字

1993年4月 第1版第1次印刷

印数: 1—2000 定价 10.50元

ISBN 7-5019-1353-6/TH·033

## 前 言

本书为高等工科院校轻工类化工机械与设备和食品机械专业的专业课教材，也是适应轻化工、食品工业需要而编写的第一本“容器设计”教学用书。

本书除了对内压薄壁容器、外压容器、厚壁容器、平板、容器零部件的基本理论及设计作了深入介绍外，对轻化工、食品容器的特点，材料选择、结构设计特殊要求，现代压力容器设计中的应力疲劳、蠕变分析及设计方法，计算机在容器设计中的应用，以及压力容器有关标准、规范作了扼要的介绍。编写时，力求做到精选内容，加强基础，联系实际。内容上力求深入浅出，避免繁琐的数学推导，并紧密联系GB150—89《钢制压力容器》国家标准。

本书内容按60课时编写，供四年制轻化工、食品机械专业本科学生使用，如省略部分章节，三年制专科学校或职工大学也可采用，对从事化工、轻工、食品加工等机械设备设计、科研、管理工作及生产部门的工程技术人员亦有参考价值。

本书主编为吴英桦、俞家梁，由吴英桦统稿。第一、二章由成都科技大学吴英桦编写，第三、七章由成都科技大学卢晓黎编写，第四、五章由上海轻工业专科学校俞家梁编写，第六章由上海轻工业专科学校包健行、成都科技大学卢晓黎编写，第八章由成都科技大学柏学遂、李章政编写。全书由天津轻工业学院潘永康、林振德、叶京生、范作芬审阅，潘永康为主审。

本书在编写过程中，成都科技大学孙启才教授、华东化工学院丁伯民副教授提出了不少宝贵意见，成都科技大学张宁宁为第一、二、三、七章描绘插图，上海轻工业专科学校潘国祥为第四、五、六章描绘插图付出了辛勤劳动，在此表示衷心的感谢。

编 者

EAC89/05

# 目 录

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第一章 绪 论</b> .....            | 1   |
| 第一节 轻化工、食品容器的应用及其分类.....        | 1   |
| 第二节 轻化工、食品容器设计的基本要求.....        | 3   |
| 第三节 容器材料的选用及结构特点.....           | 4   |
| 第四节 压力容器发展概况及其规范简介.....         | 17  |
| <b>第二章 内压薄壁容器的基本理论及设计</b> ..... | 21  |
| 第一节 旋转薄壳平衡方程.....               | 21  |
| 第二节 旋转薄壳无力矩理论.....              | 28  |
| 第三节 旋转薄壳的变形与物理方程.....           | 38  |
| 第四节 旋转薄壳中的边缘问题.....             | 47  |
| 第五节 薄壁容器的设计计算.....              | 62  |
| <b>第三章 平板理论及平盖设计</b> .....      | 94  |
| 第一节 平板分类及基本假设.....              | 94  |
| 第二节 圆板轴对称弯曲的基本方程.....           | 96  |
| 第三节 受均布载荷的圆板.....               | 101 |
| 第四节 受轴对称载荷的环板.....              | 108 |
| 第五节 受均布载荷的矩形板.....              | 114 |
| 第六节 平盖设计.....                   | 116 |
| <b>第四章 外压容器设计</b> .....         | 123 |
| 第一节 外压容器的失效方式.....              | 123 |
| 第二节 薄壁壳体的稳定性计算.....             | 125 |
| 第三节 外压圆筒的设计计算.....              | 131 |
| 第四节 外压封头设计.....                 | 138 |
| 第五节 加强圈设计.....                  | 140 |
| 第六节 小 结.....                    | 143 |
| <b>第五章 容器零部件设计</b> .....        | 146 |
| 第一节 法兰设计.....                   | 146 |
| 第二节 容器的开孔与补强.....               | 175 |
| 第三节 容器与设备的支座.....               | 189 |
| <b>第六章 厚壁容器设计</b> .....         | 210 |
| 第一节 厚壁容器圆筒的结构型式.....            | 210 |
| 第二节 厚壁圆筒的设计.....                | 213 |
| 第三节 单层圆筒的自增强概念.....             | 229 |
| 第四节 厚壁容器的密封结构设计.....            | 231 |

|                                 |            |
|---------------------------------|------------|
| 第五节 厚壁容器零部件设计 .....             | 239        |
| <b>第七章 现代压力容器设计中的几个问题 .....</b> | <b>246</b> |
| 第一节 压力容器的失效准则及破坏方式 .....        | 246        |
| 第二节 压力容器的应力分析设计法 .....          | 249        |
| 第三节 压力容器的疲劳问题 .....             | 262        |
| 第四节 压力容器的断裂失效 .....             | 272        |
| 第五节 压力容器的蠕变和应力松弛 .....          | 282        |
| <b>第八章 计算机在压力容器设计中的应用 .....</b> | <b>293</b> |
| 第一节 概 述 .....                   | 293        |
| 第二节 内压圆筒和球壳设计的计算机分析 .....       | 293        |
| 第三节 内压容器封头设计的计算机分析 .....        | 303        |
| 第四节 平盖设计的计算机分析 .....            | 311        |
| 第五节 容器开孔用等面积补强的计算机分析 .....      | 317        |
| <b>附录 .....</b>                 | <b>330</b> |
| 一、常用金属材料机械性能及许用应力值 .....        | 330        |
| 二、按介质选用耐腐蚀金属材料表 .....           | 344        |
| 主要参考资料 .....                    | 348        |

# 第一章 绪 论

## 第一节 轻化工、食品容器的应用及其分类

在轻化工、食品、医药、石油化工以及其他生产过程中，为满足生产过程传热、传质、化学反应、生化反应及物料贮存等需要，使用了大量的各种类型的容器及设备。例如：

**反应设备** 完成各种介质的化学反应或生化反应，如反应器、发酵罐、蒸球，合成塔等。

**换热设备** 实现各种介质的热量交换，如蒸煮罐，浓缩锅，杀菌锅，蒸发器，热交换器等。

**分离设备** 对混合物料进行分离，如分馏塔，吸收塔，洗涤器，分离器等。

**贮运设备** 即盛装物料的容器，主要用于储存气态、液态或固态的原料、中间产品或成品，如圆筒形容器，球形贮罐，椭圆形或矩形壳体贮槽等。

### 一、容器的定义

从狭义上说，容器是指内部不进行化学反应、生化反应或其他物理、化学、生化过程的那些设备，其他如反应设备、换热设备、分离设备可以看成是由外壳和装入外壳内能满足工艺生产要求的内件所组成。实质上，这些外壳本身也是容器。容器的结构设计、强度计算和制造检验要求，对于这些设备的外壳也同样适用。因此，在轻化工、食品以及其他工业领域中，容器的概念应理解为储存设备和其他各种设备的外壳。

### 二、容器的分类

常见的方法是根据压力、压力乘容积、介质特性、用途以及设计、制造特点进行综合分类。

按其承受压力（或真空度）的高低，将容器分为常压容器和压力容器两大类。常压容器由于承受的压力很低，若按强度计算，则壁厚很薄，容器在制造、运输和吊装过程中，往往会因制造困难或刚度不够而产生过大的或不允许的变形。因而，常压容器的壁厚常按刚度和制造要求确定，而压力容器壁厚则根据强度计算确定。

常压容器和压力容器的分界线，若单纯以压力的高低来划分是不够合理的。因为在壳体应力相同的条件下，容器直径越大，其积蓄的能量就越多，一旦发生破坏，所造成的损失和危害也就越大，因而在设计、制造和检验等方面应该比直径小的容器有更高的要求。我国劳动人事部颁发的《压力容器安全技术监察规程》[劳锅字(90)8号]（简称《监察规程》），从安全监察和方便管理的角度出发，规定了压力容器和常压容器的界线：

(1) 最高工作压力  $P_w \geq 0.1 \text{ MPa}$  (不含液体静压力)；

(2) 内直径 (非圆形截面指断面最大尺寸)  $D_i \geq 0.15\text{m}$ , 且容积  $V \geq 0.025\text{m}^3$ ;

(3) 介质为气体、液化气体或最高工作温度高于、等于标准沸点的液体。

以上三个条件同时满足的容器即属于压力容器, 否则为常压容器。

根据《监察规程》附件一《压力容器的压力等级和品种划分》, 按容器的设计压力大小, 将压力容器分为低压、中压、高压和超高压 4 个压力等级。

(1) 低压容器 (代号 L)  $0.1\text{MPa} \leq P < 1.6\text{MPa}$

(2) 中压容器 (代号 M)  $1.6\text{MPa} \leq P < 10\text{MPa}$

(3) 高压容器 (代号 H)  $10\text{MPa} \leq P < 100\text{MPa}$

(4) 超高压容器 (代号 U)  $P \geq 100\text{MPa}$

国际 GB150-89《钢制压力容器》全面考虑了容器破坏及破坏造成的危害大小各种因素, 取消了单纯按压力将容器分级的规定。对于设计压力  $P \leq 35\text{MPa}$  ( $350\text{kgf/cm}^2$ ) 的容器给出了统一的设计准则, 将该压力范围内的高、中、低压容器统称为压力容器, 并按照同一规则和要求进行设计制造、检验和验收, 避免人们只重视高压容器产品, 而忽视中、低压容器质量现象, 有利于全面提高压力容器产品质量。中、低压容器通常为薄壁容器, 高压容器一般为厚壁容器。

按承压方式的不同, 压力容器又可分为内压容器和外压容器两大类, 如减压塔, 真空容器, 夹套加热设备等为外压容器。对于内压容器, 主要是保证其壳体具有足够的强度, 而外压容器, 由于壳体中存在的是压应力, 故保持壳体的稳定性 (不被压瘪) 是保证其正常工作的必要条件。

按照容器承受压力、生产过程的重要性以及介质的危害程度等原则, 《监察规程》将压力容器分为三类:

(1) 低压容器 (下面第二、三类压力容器除外) 为第一类压力容器。

(2) 下列情况之一为第二类压力容器:

① 中压容器 (下面第三类压力容器除外);

② 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;

③ 毒性程度为极度和高度危害介质的低压容器;

④ 低压管壳式余热锅炉;

⑤ 搪玻璃压力容器。

(3) 下列情况之一为第三类压力容器:

① 毒性程度为极度和高度危害介质的中压容器和  $P \cdot V \geq 0.2\text{MPa} \cdot \text{m}^3$  的低压容器;

② 易燃或毒性程度为中度危害介质且  $P \cdot V \geq 0.5\text{MPa} \cdot \text{m}^3$  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、中压管壳式余热锅炉;

④ 高压容器。

对于上述不同类别的压力容器, 在设计、选材、制造和检验、使用和管理、安全附件等方面, 《监察规程》分别提出不同的要求, 并有明确规定, 必须严格遵照执行。

## 第二节 轻化工、食品容器设计的基本要求

在轻化工及食品工业中，生产过程日益连续化。生产过程中任何一个容器或设备出了事故，都会使生产能力降低，产品质量下降或使生产无法继续进行，严重时，甚至会危及设备和人身安全。因此，设计容器时，尤其是压力容器，一般应有如下基本要求。

### 一、满足生产工艺条件

各种容器都是根据一定的操作条件、处理特定的物料、完成一定的生产量而设计的。因而，生产中的容器必须能承受生产工艺要求的压力、温度。容器的材料、结构能适应物料的特性要求（如对物料无毒、无污染、耐腐蚀等），并能保证一定的生产能力，具有一定的容积。如各种反应器、发酵罐，若不能保证一定的生产工艺要求，将使化学反应或生化反应条件恶化，产品产量和质量下降，具有生物活性的动植物原料变性，在微生物和酶的作用下发生腐败变质，营养成分遭到破坏，产品的色、香、味发生变化。

### 二、运行安全可靠

在轻化、食品生产中，各种容器或设备已成为实现生产过程的重要装置，不少容器是生产中的关键设备。在使用过程中，容器在一定操作条件下，一旦丧失其正常工作能力，出现失效而破坏，不仅造成容器本身的损坏，往往会危及其他装置的安全，造成连锁性的破坏，甚至造成人身伤亡。因此，确保各种容器运行安全可靠，保证长期安全运转，具有非常重要的意义。

实践表明，多数容器的破坏，常是因产生过量的弹塑性变形，进而发生断裂，即出现强度破坏。外压容器如果刚度不够将出现失稳而破坏。有的容器在高温或低温下可能发生高温蠕变或低温脆断。有的由于介质腐蚀作用可能出现各种应力腐蚀破坏。当温度压力波动时，在高的应力集中处也会出现疲劳破坏。还有由于容器工作条件苛刻、磨损严重、密封失效，造成介质泄漏的情况，这不仅造成损失，而且给环境带来严重污染。因此，不仅要求对容器进行强度和稳定性设计，而且对某些重要容器还需进行疲劳断裂蠕变分析和特殊的密封设计。

食品容器在生产过程中还应满足无毒、无污染的特殊要求。

### 三、经济合理

对容器设计既要保证安全可靠，又要尽量做到经济合理。为此，对容器操作条件和作用的载荷（如压力、自重、风载和地震载荷等）应进行正确的估计，对容器零件的总体应力、局部应力以及温差应力等应进行全面的分析和评价，并采用合适的安全系数。设计时要选用适宜的耐蚀、耐磨、无毒材料，在结构设计中采取防腐减磨措施，以达到预定的使用寿命，并尽量做到结构简单，重量轻，制造、检验、安装方便，节约贵重材料，降低制造成本和维修费用。

## 四、易于清洗杀菌,满足卫生要求

轻化工、食品用容器,尤其是食品容器,设计时不仅要选用对介质耐蚀、耐磨、无毒、无污染的材料,而且在结构上应具有清洗和消毒杀菌的条件,并易于拆装。不允许有任何清洗不到的死角,或存在过于粗糙的表面,以避免物料的积存,防止微生物在这些部位生长繁殖。容器外表面也要尽量做到平整光滑,以利清洗。容器的工作环境应清洁卫生,防止有害致病微生物的污染,并要求容器密封可靠。容器或设备的污水、废气、废烟的排放指标,应符合国家劳保和环保部门有关规定。

## 五、容器设计主要依据——《钢制压力容器》

容器设计,必须以国标《钢制压力容器》为主要依据,并接受《监察规程》的监督。所用材料应符合《钢制压力容器》和食品卫生标准的要求,以及相关的国家标准或部颁标准规定。压力容器的制造和检验应遵守有关技术条件。

## 第三节 容器材料的选用及结构特点

### 一、选材的基本原则

在轻化工及食品容器中,由于容器的工作条件多种多样,食品用容器对卫生要求又尤为突出,因此如何正确选用容器材料,具有极为重要的意义。选择容器材料时,应掌握材料的基本性能,并从使用上满足容器操作条件要求,同时应具有良好的制造加工工艺性,在经济上合理,材料容易获得,并符合有关设计与材料标准的规定。

#### 1. 机械性能

材料的机械性能是指材料在外力作用下的特性,常用以下特性指标来衡量材料在不同受力条件下的性能:

(1) 强度指标:表示材料抵抗变形和断裂的能力。对于容器,主要强度指标是屈服极限  $\sigma_s$  和抗拉强度  $\sigma_b$ 。前者表明材料抵抗塑性变形的能力,后者为抵抗断裂的能力。

(2) 塑性指标:表示材料断裂前发生塑性变形的能力。容器用材料主要塑性指标参数是延伸率  $\delta$ , 断面收缩率  $\psi$  和屈强比  $\nu$ 。延伸率和断面收缩率用材料断裂后的伸长变形和截面积变形大小表示,数值愈大,塑性愈好。屈强比是屈服极限与抗拉强度极限之比值,即  $\nu = \sigma_s / \sigma_b$ ,  $\nu$  愈小,表明材料塑性愈好。

(3) 韧性指标:表示材料弹塑性变形和断裂整个过程中吸收能量的能力,它是强度和塑性的综合指标。抵抗冲击破坏的能力,常用冲击值  $\alpha_k$  表示。

(4) 硬度指标:表示材料抵抗硬物压入的能力,它表明材料的耐磨性和切削加工的可能性。金属中较软材料常用布氏硬度 HB, 较硬材料用洛氏硬度 HR, 非金属材料用摩(莫)氏硬度、布氏硬度或邵氏 A (度)表示。

高温时还应考虑蠕变极限  $\sigma_r$  和持久极限  $\sigma_D$ , 分别表示在高温长期负荷作用下材料对塑性变形、断裂的抵抗能力。

低温时，材料一般都表现为强度提高，而延伸率、断面收缩率、冲击韧性降低，产生冷脆，韧性材料变为脆性材料。容器的破坏常是在小变形或无变形情况下突然地发生破裂。

常见钢材的机械性能见附录中的一。

## 2. 耐腐蚀性能

耐腐蚀性能指材料在使用工艺条件下抵抗腐蚀性介质侵蚀的能力。在轻化工、食品工业中，多数物料都具有腐蚀特性，设计时必须根据使用介质及操作条件选择适当的耐腐蚀材料。同一种材料，其耐腐蚀性能随其工作条件而变化。如铁在干燥空气中的耐蚀性比在潮湿空气中好；碳钢在浓硫酸中耐蚀，而在稀硫酸中则不耐蚀；不锈钢总的来讲有较高的耐蚀性，而在盐酸中耐蚀性就差；铜在大气中非常耐蚀，但在含氧的氨溶液中却会遭到强烈腐蚀等。

材料耐蚀性的表示方法与腐蚀破坏的类型有关。对于均匀腐蚀，通常以腐蚀速率来衡量材料的耐蚀性能，即用每年腐蚀掉多少毫米厚的金属来表示 (mm/a)。按腐蚀深度评定材料的耐蚀性有三级标准，见表1-1。

表 1-1 金属耐蚀性能的三级标准

| 耐 蚀 性 能 | 腐 蚀 深 度 (mm/a) | 耐 蚀 级 别 |
|---------|----------------|---------|
| 耐 蚀     | $<0.1$         | 1       |
| 可 用     | $0.1 \sim 1.0$ | 2       |
| 不 可 用   | $>1.0$         | 3       |

在确定容器尺寸时，先按强度计算壁厚，然后再加上由腐蚀速率、容器使用年限得出的腐蚀裕量即为容器设计壁厚。

当金属材料发生如点腐蚀、晶间腐蚀、应力腐蚀、氢腐蚀等非均匀性腐蚀时，大多数都是在无明显的腐蚀深度或重量损失情况下遭受突然破坏，因而若采用平均腐蚀来衡量材料的耐蚀性能就不适宜了。对于这种具有局部腐蚀倾向的容器材料，必须从选择相应的耐腐蚀材料及防护措施着手，而绝不能用增加腐蚀裕量的方法来解决。

常用材料的耐腐蚀性能见附录中的二。

## 3. 物理性能

材料的主要物理性能参数通常是弹性模量  $E$ ，密度  $\rho$ ，熔点  $T_m$ ，比热容  $c$ ，导热系数  $\lambda$ ，线膨胀系数  $\alpha$  等。

容器在不同的场合使用，对材料的物理性能就有不同的要求，如模热用容器，要求材料有较高的导热系数；高温容器需用耐高温氧化的材料；带衬里的容器，要求衬里材料与基体材料的线膨胀系数比较接近，避免温度变化时，由于两种材料的线膨胀量不一致，衬里发生开裂等。

常见金属的物理性能见附录中的一。

## 4. 加工工艺性能

容器材料的主要加工工艺性能是可焊性、可铸性、可锻性、切削加工性、热处理性以及冲压性能等。设计时应根据容器的加工工艺特点，选择具有相应良好加工工艺性

的容器材料，不然设计出的容器就很难加工，甚至不能加工。因此，了解材料的加工工艺性能，对正确选材是十分重要的。

#### 5. 组织与成分

材料的金相组织与化学成分对机械性能、耐蚀性能、热处理工艺以及制造方法均有一定的影响。所以，选择材料时应考虑组织、成分与材料性能间的关系有足够的了解。

#### 6. 材料价格及获得的可能性

材料的价格和来源，也是选择材料的重要因素，因为它直接影响到容器的成本。但是，材料本身的价格还不足以表明采用此种材料在经济上的合理性。有时昂贵的材料比价廉的材料更为合适，因为用它可以制成壁薄、使用年限较长、加工费用较低的容器。

综上所述，容器选材考虑的各种因素之间，往往既相互联系，又相互矛盾。选材时，只能考虑最主要的要求，而对其他方面要求仅作适当考虑。例如，若介质的腐蚀性较强，则首先考虑材料对该介质的耐蚀性；高压容器的材料首先应具备足够的强度；容器视镜的材料首先要透明等。

## 二、轻化工、食品容器常用材料及结构特点

轻化工、食品容器常用材料，归纳起来可分为金属材料和非金属材料两大类。

### (一) 金属材料

#### 1. 碳钢

碳钢是指含碳量大于0.05%而小于2.06%的铁碳合金。按钢中的含碳量，碳钢可分为低碳钢 ( $C < 0.25\%$ )、中碳钢 ( $C = 0.25 \sim 0.60\%$ )、高碳钢 ( $C > 0.60\%$ )。碳钢中主要成分是铁和碳。铁和碳在钢中的存在形式，一种是以纯铁体（即铁素体）方式存在，只固溶甚少的碳，另一种以铁与碳的化合物  $Fe_3C$ （即渗碳体）方式存在。当含碳量低时，铁素体起支配作用，低碳钢材料软，强度低，塑性好。随着碳含量增加，渗碳体增加，强度提高，塑性下降。由于低碳钢有一定强度，塑性好，价格低廉，冷冲压及焊接性能也好，便于加工制造，因而成为中低压容器的主要材料。

碳钢按质量要求不同可分为普通碳钢和优质碳钢。普通碳钢含硫、磷杂质较多，按供货时保证的指标不同，这类钢又可分为三类：甲类钢——只保证机械性能；乙类钢——只保证化学成分。特类钢——既保证机械性能又保证化学成分。

普通碳钢的标号方法用2~4位字符表示。第一个字符是钢类，甲、乙、特三类钢分别用A、B、C三个字母表示。第二个字符表示冶炼方法，平炉钢不加字符，氧气转炉钢加Y（氧），碱性空气转炉钢加J（碱）。第三个字符表示普通钢的序号，按含碳量由小至大用1，2，3……7等7个阿拉伯数字表示，但数字并不直接表示含碳量的多少。第四个字符表示脱氧程度，镇静钢不加字符，沸腾钢加F（沸），半镇静钢加b（半）。例如AY3是氧气转炉冶炼的3号甲类镇静钢；A<sub>3</sub>F是平炉冶炼的3号甲类沸腾钢；AY3F是氧气转炉冶炼3号甲类沸腾钢等。

优质碳钢，其中含硫、磷量较少，质量较好，且强度较高，成本比普通碳钢高，其标号用钢中平均含碳量的万分数表示。如平均含碳量为0.20%的优质碳钢，标号为20。制造容器和制造锅炉用的专用碳钢，分别在钢号尾部再标上“R”（容）或“g”（锅），如

A3R (甲类三号容器用碳钢), 20g (20号锅炉用碳钢) 等。

容器用钢, 首先要求保证足够的机械强度, 因而甲类普通碳钢、优质碳钢应用较多, 常用的牌号有A3, AY3, A3F, AY3F, 20R, 20g等。由于普通碳钢质量较差; 因此对其使用范围在容器设计压力、温度等方面应加以限制。高温下碳钢强度下降, 塑性提高, 普通碳钢超过 350℃, 优质碳钢大于 400℃就要考虑蠕变影响。由于碳钢在570℃以上会被显著氧化, 而在 0℃以下塑性与冲击韧性又急剧下降, 因此, 根据碳钢中硫磷含量控制的严格程度不同, 普通碳钢使用温度范围比优质钢窄, 一般在-20~+400℃范围中使用。优质碳钢可扩大到-40~+450℃。《钢制压力容器》对一定使用条件的容器用钢作了明确规定, 设计时必须遵守。

碳钢的耐蚀性较差, 在大气中容易生锈, 在盐酸、硝酸、稀硫酸、醋酸、氯化物溶液及浓碱液中均会遭受较强烈的腐蚀, 不宜直接接触具有腐蚀性的食品介质。铁质本身对人体无害, 但会污染食品的色泽, 大块剥落于食品中也会造成对人体的机械损伤。并且食品中的铁含量也有限制, 因此钢铁作为食品容器必须采用表面涂层, 常用镀锡作为保护层。钢铁表面涂搪瓷也用作食品原料容器, 对有机酸和无机酸都能耐腐蚀, 并且搪瓷表面光滑, 易于清洗和保持卫生。但是在碰撞、压力或温度作用下, 釉可能破裂, 只要极少量碎片落入食品物料中, 就可能造成严重后果。因而, 只在少数情况下用来盛装常温液体或浆料物料。但是碳钢在温度不高的浓硫酸 (重量浓度>78%) 和稀碱液 (重量浓度<30%) 中, 却能生成化学性能稳定的表面膜而显示较高的耐蚀性能。

碳钢具有较好的制造工艺性能, 它可以进行铸造、锻压、焊接及切削等各种形式的冷、热加工。压力容器一般采用钢板卷焊或冲压后进行焊接制成, 因此, 碳钢容器设计时, 选择合理的焊接结构就显得十分重要。

## 2. 低合金钢

低合金钢是在碳钢的基础上加入一种或数种合金元素, 以提高钢材的强度和耐高温、耐低温、耐腐蚀与耐磨损等性能。低合金钢的标号方法用平均含碳量的万分数加合金元素符号、再加该合金元素含量的百分数表示。其后若带有拼音字母字头, 则表示该钢号的特殊用途。如16MnR, 其中16表示平均含碳量为0.16%, Mn表示该钢号中含有锰元素, 其平均含锰量<1.5%, 故在Mn后不加注数字, R表示容器用钢。钢中若含有微量的硅、钒、钛、铝、铌、硼、稀土 (Xt) 等元素, 则钢中仍应标以元素符号, 如09Mn2VDR, 09表示平均含碳量为0.09%, Mn2表示平均含锰量为2%, V表示含钒微量, DR表示低温容器用钢。

目前, 国内外对耐腐蚀性能要求不很高的压力容器, 都采用低合金钢, 如耐大气腐蚀的含铜、磷、钒、稀土的低合金钢, 耐硫化物腐蚀破裂的含铬、铝、钼、钒、钨的低合金钢等。但是, 制造压力较高而又要求耐腐蚀的压力容器却很少采用。

## 3. 不锈钢

不锈钢是指钢中合金元素总量超过2.5%并具有抵抗大气、水和弱腐蚀性介质腐蚀能力的合金钢。对于合金元素含量较高, 并在酸和其他强烈腐蚀性介质中具有抗腐蚀能力的合金钢, 一般称为耐蚀耐酸钢。习惯上, 这两种钢统称为不锈钢。

不锈钢按其化学成分可分为铬钢 (以铬为主) 及铬镍钢 (以铬镍为主) 两大类。按

其金相组织分为：马氏体、铁素体、奥氏体和奥氏体-铁素体四大类。马氏体和铁素体钢均为铬钢。马氏体钢含铬量较低（13%左右），含碳量较高，虽然强度高，但耐蚀性能较差，在压力容器中使用较少。而铁素体钢含铬量较高（13~30%），含碳量较低，但耐蚀性较好，一般用于制作压力不大于0.3MPa的薄壁容器。目前，常用的铬钢有 0Cr13, 0Cr17Ti, 在大气、湿蒸汽、低浓度硝酸和某些有机酸中具有较高的耐蚀性，在常温以上有较高的强度、塑性、韧性和良好的切削加工性能，并且 0Cr13 的焊接性能也好。但是，铬钢低温韧性差，不能作低温容器材料。

在轻化工、食品工业中，使用较多的是奥氏体不锈钢，其中 18-8型铬镍不锈钢应用极为广泛，几乎能抵抗轻化工及食品生产中绝大部分介质的腐蚀，而且可以获得光洁表面，以确保容器卫生方面的要求。

奥氏体不锈钢的含碳量对耐腐蚀性能，特别是耐晶间腐蚀性能的影响很大。当不锈钢的含碳量大于 0.03% 时，在一定的加热温度状态下，碳的扩散量增大，形成的碳化物增多，铬的消耗量大，使晶界区域含铬量减少，即出现贫铬现象，使得焊缝附近发生晶间腐蚀。为了减弱或避免晶间腐蚀，常采用下面两种方法：

(1) 加入铌或钛等稳定化元素，以防止碳化铬的析出，如 1Cr18Ni9Ti, 1Cr18Ni-12Mo2Ti 等由于铌较钛贵，故一般用含钛的不锈钢。

(2) 冶炼低碳和超低碳级不锈钢，使含碳量降至奥氏体室温溶解度(0.02%) 以下，避免碳化物析出，如 0Cr18Ni9, 0Cr17Ni12Mo2, 和 00Cr18Ni10, 00Cr17Ni14Mo2 等。

目前，我国仍以使用含钛不锈钢为主，但从发展趋势看，应推广低碳级、超低碳级不锈钢。由于冶炼技术的发展，生产低碳、超低碳不锈钢的成本，在先进国家中已低于含钛不锈钢。同时，钢中碳化钛的存在会降低材料的塑性、韧性和冲压性能，降低抗点腐蚀和抗腐蚀疲劳性能以及造成表面质量、抛光性能差，成材率低等，因而以 1Cr18Ni-9Ti 为代表的含钛不锈钢，今后在应用中会逐渐减少。

常用的铬镍钢有 0Cr19Ni9, 0Cr18Ni11Ti, 0Cr17Ni12Mo2, 0Cr19Ni13Mo3, 00Cr19Ni11, 00Cr17Ni14 Mo2 和 00Cr19Ni13Mo3 等。这类钢不仅对很多介质有优良的耐蚀性能，而且有良好的冷热加工性能和焊接性能，在常温 and 低温下有很高的塑性和韧性，在高温下(<870℃) 有很好的抗氧化性和耐热强度。这类钢是综合性能比较好的合金钢。但是，对硫酸、盐酸、氢氟酸、氯、溴、碘、浓度大于 50% 的热磷酸以及草酸、高浓度 (50%) 乳酸、工业铬酸，浓碱液等的稳定性较差，使用时要加以重视。由于这种钢成本较高，使用时应尽量注意节约。

不锈钢的标号方法是用平均含碳量的千分数加合金元素符号，再加该合金元素含量的平均百分数表示，并按不锈钢含碳量的不同而分为几个等级。含碳量大于 0.08% 为高碳级，如 1Cr18Ni9Ti, 含碳量小于或等于 0.08% 为低碳级，钢号前以“0”表示，如 0Cr-19Ni9; 含碳量小于或等于 0.03% 为超低碳钢级，钢号前以“00”表示，如 00Cr19Ni11; 含碳量小于或等于 0.01% 为超纯级，钢号前以“000”表示，如 000Cr18Ni9 等。

奥氏体-铁素体型不锈钢，是一种以锰代镍的新钢系列，是根据我国丰富的合金元素锰而建立起来的，其特点是在室温下钢中存在奥氏体和铁素体的复相组织，各方面的综合性能较好。其中 1Cr18Mn8Ni5N, 1Cr18Mn10Ni5Mo3N, 0Cr17Mn13N, 0Cr17Mn13-

Mo2N等性能良好的铬锰钢，在醋酸、硝酸、尿素等生产中已成功地代替铬镍钢及铬镍钼钢。但是，由于钢中具有两相组织，其加工性能比奥氏体钢稍差，目前使用得较少。

对于既要求优良的耐蚀性，又要求较高强度的压力容器，可采用不锈钢复合钢板制造。它是由复层（不锈钢）和基层（碳钢或低合金钢）组成，一般复层厚度为基层厚度的 $\frac{1}{3} \sim \frac{1}{6}$ 。这样不仅可以大量节约贵重的不锈钢，使容器成本降低，而且又可获得优良的综合性能。如制造需要耐腐蚀的换热容器，其导热系数可为单一不锈钢的1.5~2倍。

不锈钢复合钢板容器的制造工艺较复杂，最易腐蚀的地方是焊缝区，因此，对焊缝尺寸精度要求较严格。对于小直径容器，由于只能单面焊接，不易保证焊接质量，也不易进行焊缝质量检查，这样，内径小于600mm的容器最好不采用复合钢板结构。

#### 4. 低温用钢

低温容器在轻化工及食品工业中应用也相当广泛。按照我国习惯，常将低于 $-20^{\circ}\text{C}$ 下使用的钢材称为低温用钢。对低温用钢主要应考虑的问题是低温脆性。

在低温下铁素体钢的韧性明显下降。为了提高其低温韧性，应尽可能降低钢中的碳、硅和磷、硫等杂质，以提高钢在低温下的抗开裂能力。并通过加入合金元素锰、镍、钒、钛、铌、稀土等细化晶粒，提高低温韧性。奥氏体钢在低温下韧性变化很小，具有优良的低温韧性性能。

材料由韧性状态向脆性状态转变的温度称为脆性转变温度 $T_k (^{\circ}\text{C})$ ，它可用不同的准则来确定。在落锤试验方法中，以试样断裂时塑性变形趋近于零，相应的断口为100%结晶区的温度来确定脆性转变温度 $T_k$ ，由此而求得的这种温度又称为无塑性转变温度(NDT)。

派林尼(W. S. Pellini)首先提出无塑性转变温度(NDT)的概念，他认为每一种材料都有一个无塑性转变温度，高于这个温度时断裂是塑性的，而低于该温度时断裂则完全为脆性的。因此NDT温度是一个重要参数。一些压力容器用钢的NDT值见表1-2。

表 1-2 某些钢材的NDT值

| 钢 号      | NDT温度( $^{\circ}\text{C}$ ) | 钢 号           | NDT温度( $^{\circ}\text{C}$ ) |
|----------|-----------------------------|---------------|-----------------------------|
| A3F      | -20                         | 14MnMoNbB     | -45                         |
| A3       | -10                         | 12Cr2Ni4MoVNb | -85                         |
| 16Mn     | -20                         | 12CrNiMoVCu   | -65                         |
| 16MnRe   | -25                         | 09MnTiCuRe    | -25                         |
| 15MnV    | -15                         | 06MnNb        | -45                         |
| 15MnVN   | -45                         | 06AlNbCu      | -65                         |
| 14MnMoV  | -15                         |               |                             |
| 18MnMoNb | +5                          |               |                             |

常用低温钢：如16MnDR用于温度不低于 $-40^{\circ}\text{C}$ 的低温压力容器。09MnTiCuXt-DR用于温度不低于 $-60^{\circ}\text{C}$ 的低温容器。06MnNbDR用于温度不低于 $-90^{\circ}\text{C}$ 的低温容器。当温度更低时，一般推荐使用高铬镍奥氏体钢或其相应的代用材料。如0Cr19Ni9等，可

用于 $-196^{\circ}\text{C}$ 。

### 5. 有色金属及其合金

(1) 铜和铜合金：铜具有高的导热性和良好的塑性，并在低温下也能保持较高的塑性及冲击韧性，所以常用于制造各种换热容器及低温容器。

铜具有良好的冷压及热加工性能，而且对许多食品介质具有高的耐蚀性能。铜能抗大气、水、中性盐、碱液、非氧化性酸的腐蚀。对于有机化合物，如醋酸、草酸、甲醇、乙醇等各种醇类也有良好的抗蚀性。但是，在氯、溴、二氧化硫、硫化氢等气体，以及潮湿大气中铜易受到腐蚀，在氧化性酸中也不耐蚀。在氨和铵盐溶液中，当有氧存在时铜也会受到强烈腐蚀。

在食品中，铜不适于制作乳制品容器，否则牛乳中会出现带有异味现象，奶油会很快酸败，加热时氧化剧烈。铜对维生素C也会促成自动氧化，铜制加热容器会使维生素C很快分解，所以处理富含维生素C的蔬菜汁和水果汁，忌用铜制容器，必要时可采取在铜制设备表面镀锡。但是，由于铜的耐蚀性和加工性好，易于保持表面光洁和清洁，因而在食品工业中广泛应用于煮果酱、果汁、香精、糖果点心等容器中。

黄铜是铜和锌的合金，在该合金中加入少量的硅即硅黄铜，具有良好的浇注性能和冷热冲压性能，在低温下也有较好的塑性，耐腐蚀性也高。再加入1%锰的硅黄铜，焊接性能良好，可用来制造压力容器。

(2) 铝及铝合金：铝的密度小，导热系数高，耐蚀性能好，并具有塑性、焊接性、冷热冲压性均好的特点，常用在强度要求不高的容器中，如各种贮槽及食品容器、换热器、塔等。

铝在许多有机酸中，如醋酸、柠檬酸、酒石酸、苹果酸、葡萄糖酸、脂肪酸以及酸性的水果汁、葡萄酒中，都具有较好的耐蚀性。在大气（干和湿）中有高的耐蚀性。在含硫化物的水中也能耐蚀。铝的一般腐蚀产物 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，白色无毒，因而铝在轻化工及食品工业中得到广泛应用。

防锈铝主要有Al-Mn和Al-Mg合金，具有较高的耐腐蚀稳定性，经过退火或时效的防锈铝塑性和焊接性良好，并且疲劳强度高。当其耐腐蚀性和强度要求不太高时，可用防锈铝代替高价的不锈钢。

### (二) 非金属材料

非金属材料具有耐蚀性好、资源丰富、品种多、成本低等优点。但是，非金属材料由于强度低、塑性和耐热性差、导热性小、对温度波动敏感、易于渗透等缺陷，因而在压力容器，尤其是压力较高的容器中使用受到限制。目前常用来制作容器的非金属为硬聚氯乙烯和玻璃钢。

硬聚氯乙烯是一种具有良好耐蚀性能和一定机械强度的材料，除了强氧化剂（如浓硝酸、发烟硫酸等）、芳香族碳氢化合物和氯碳氢化合物外，对于其余大部分酸、碱、盐、碳氢化合物及有机溶剂均能耐蚀，而且加工成型方便，可进行机械加工，焊接性能也很好，所以，适宜制作低压容器，用以代替不锈钢。一般使用温度为 $-15\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。在硬聚氯乙烯容器外面，用玻璃钢增强后，可提高容器的使用温度和压力范围。

玻璃钢又叫玻璃纤维增强塑料，它是以合成树脂为粘合剂，以玻璃纤维制品（玻璃

布、玻璃带、玻璃丝等)作为增强材料,按照一定的成型方法(模压、缠绕等),在一定温度及压力下使树脂固化而成。它具有良好的耐蚀性能,也易于加工成型,并具有相当高的强度,可用于中低压容器。但由于成本较高,目前应用不多。

非金属材料作为钢制容器的保护层,也广泛应用了各种塑料衬里,搪玻璃,化工陶瓷,砖板,不透性石墨,橡胶,涂层等。

### (三) 常用材料焊接容器结构特点

#### 1. 焊接结构

碳钢焊接容器常用的接缝有:对接,角接,丁字接和搭接,其中对接接头受力好,强度大,节省金属,因而应用最为广泛。

将两块钢板或一块钢板的两个端面(如卷制圆筒)对在一起焊接即对接接头。为便于焊接,保证焊透,在施焊前一般需将钢板接头处加工成各种指定形状,即焊缝坡口,如图1-1所示。

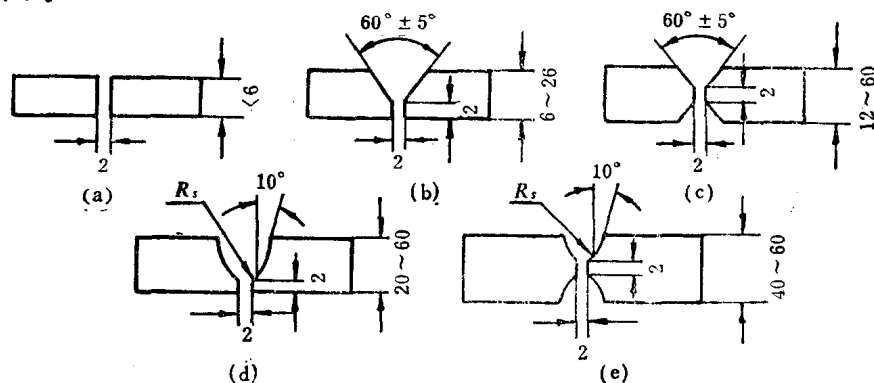


图 1-1 对接接头的坡口型式

(a) 不开坡口 (b) V型坡口 (c) X型坡口 (d) 单U型坡口 (e) 双U型坡口

为了避免焊接时产生过热现象,并减小残余应力,应尽量采用等厚度对接。薄钢板(厚度在6mm以下)的对接焊缝可不开坡口,厚钢板对接焊,为了防止未焊透现象,根据不同厚度开不同形式的坡口。

对于容器内侧无法进行焊接的结构,采用单面坡口。当板厚 $\delta < 20\text{mm}$ 时,采用V型坡口,当板厚 $\delta > 20\text{mm}$ 时,采用U型坡口。无论哪种坡口型式,都有间隙、坡口角度及钝边高度等参数。间隙是用来保证焊透要求的,不可太大,以防液态金属从间隙处漏出。坡口角度用以保证较厚钢板易于施焊,并消除根部焊接缺陷,但也不可太大,否则填充金属量大,既影响生产率,又易产生较大的角变形和焊接应力。底部钝边高约2mm,以便托住熔化了了的钢水,避免烧穿,若太大不易焊透。为了确保焊透,有时在正面焊完后从背面再焊一道封底。背面无法施焊时,可在背面加一垫板,以便更有效地托住正面施焊时的钢水,以提高焊缝质量,如图1-2所示。垫板材料一般用钢或紫铜,垫板与焊接材料要注意密合,焊后设法将垫板除去。

当钢板较厚或为了减小焊后变形和应力,当其双面都可进行焊接时,可采用对称的X型或双面U型,从两面施焊。这种坡口结构得到的焊缝质量最好,焊条耗量也少。