



GUOLU YUYALI  
RONGQIYONGGANG

# 锅炉与压力容器用钢

章燕谋

50.4

西安交通大学出版社

# 锅 炉 与 压 力 容 器 用 钢

章 燕 谋

江苏工业学院图书馆  
藏书章

西安交通大学出版社

## 内 容 简 介

本书着重阐述了金属材料的脆性性能、高温性能、抗腐蚀性能、疲劳性能等，并就合金元素对钢材性能的影响进行了比较详尽的分析。同时，本书还结合各种钢材的性能以及高温下钢材组织结构的变化，对锅炉与压力容器常用的钢材作了比较全面的介绍。

本书可作为高等院校动力、化工类专业的教学用书，也可供锅炉制造厂、火力发电厂、压力容器厂、化工机械厂以及锅炉与压力容器安全监察等有关部门的科技人员参考。

### 锅 炉 与 压 力 容 器 用 钢

编 著 章 燕 谋

责任编辑 早 雪 赵孝昶

\*

西安交通大学出版社出版

(西安市咸宁路 28 号)

西安交通大学出版社印刷厂印装

陕西省新华书店发行·各地新华书店经售

\*

开本 787×1092 1/16 印张 16.25 字数 393 千字

1984 年 12 月第一版 1984 年 12 月第一次印刷

印数: 1—8,000

统一书号: 15340·016 定价: 3.40 元

# 目 录

|                          |        |
|--------------------------|--------|
| 第一章 绪 论                  | ( 1 )  |
| 第二章 金属材料的变形与再结晶          | ( 6 )  |
| 第一节 单晶体金属的变形             | ( 6 )  |
| (一) 单晶体金属的弹性变形           | ( 6 )  |
| (二) 单晶体金属的塑性变形           | ( 7 )  |
| 第二节 多晶体金属的变形             | ( 11 ) |
| (一) 晶界的作用                | ( 11 ) |
| (二) 各晶粒间位向差别的影响          | ( 11 ) |
| 第三节 塑性变形对金属组织和性能的影响      | ( 13 ) |
| (一) 塑性变形对金属材料组织的影响       | ( 13 ) |
| (二) 塑性变形对金属材料性能的影响       | ( 13 ) |
| 第四节 塑性变形后的金属在加热时组织和性能的变化 | ( 14 ) |
| (一) 回复与再结晶               | ( 15 ) |
| (二) 金属的再结晶温度             | ( 16 ) |
| (三) 再结晶后的晶粒度             | ( 17 ) |
| 第五节 金属材料的塑性变形抗力          | ( 18 ) |
| (一) 温度对变形抗力的影响           | ( 18 ) |
| (二) 变形程度对变形抗力的影响         | ( 19 ) |
| (三) 变形速度对变形抗力的影响         | ( 19 ) |
| (四) 确定变形抗力的经验公式          | ( 20 ) |
| 第三章 金属材料的脆性              | ( 22 ) |
| 第一节 金属材料的断裂              | ( 22 ) |
| (一) 断裂的类型                | ( 22 ) |
| (二) 断裂的方式                | ( 23 ) |
| (三) 断裂的形式                | ( 23 ) |
| (四) 断口分析                 | ( 23 ) |
| 第二节 脆性破坏事故的实例及分析         | ( 26 ) |
| 第三节 韧——脆性转变温度            | ( 29 ) |
| 第四节 无塑性温度(也称无韧温度)        | ( 31 ) |
| 第五节 金属材料产生脆性断裂的条件        | ( 34 ) |
| (一) 温 度                  | ( 34 ) |
| (二) 缺 陷                  | ( 34 ) |
| (三) 厚 度                  | ( 35 ) |
| (四) 加载速度                 | ( 35 ) |
| (五) 微观组织                 | ( 36 ) |
| (六) 残余应力                 | ( 37 ) |

|                                          |        |
|------------------------------------------|--------|
| 第六节 金属材料的脆化现象                            | ( 37 ) |
| (一) 冷脆性                                  | ( 38 ) |
| (二) 热脆性                                  | ( 39 ) |
| (三) 红脆性(亦称赤热脆性)                          | ( 40 ) |
| (四) 回火脆性                                 | ( 40 ) |
| (五) 苛性脆化                                 | ( 41 ) |
| (六) 氢脆                                   | ( 43 ) |
| <b>第四章 金属材料的断裂韧性参量</b>                   | ( 53 ) |
| 第一节 概 述                                  | ( 53 ) |
| (一) 低应力脆性断裂对传统的强度设计观点提出的问题               | ( 53 ) |
| (二) 冲击韧性值( $a_K$ )不能确切地表征材料的韧脆性能         | ( 54 ) |
| (三) 断裂力学的任务                              | ( 55 ) |
| 第二节 线弹性断裂力学的断裂韧性参量                       | ( 55 ) |
| (一) 能量分析法                                | ( 56 ) |
| (二) 应力场强度分析法                             | ( 61 ) |
| (三) 线弹性断裂力学的适用范围                         | ( 68 ) |
| 第三节 弹塑性断裂力学的断裂韧性参量                       | ( 69 ) |
| (一) 裂纹顶端张开位移(Crack Opening Displacement) | ( 70 ) |
| (二) $J$ 积分理论                             | ( 74 ) |
| 第四节 金属材料断裂韧性参量的测试                        | ( 77 ) |
| (一) 平面应变断裂韧性 $K_{Ic}$ 的测试                | ( 77 ) |
| (二) 临界裂纹顶端张开位移 $\delta_c$ 的测试            | ( 78 ) |
| (三) 临界 $J$ 积分值的测试                        | ( 79 ) |
| 第五节 提高金属材料断裂韧性的途径                        | ( 81 ) |
| (一) 合金元素的作用                              | ( 81 ) |
| (二) 晶粒度对 $K_{Ic}$ 的影响                    | ( 82 ) |
| (三) 金相组织对 $K_{Ic}$ 的影响                   | ( 82 ) |
| 第六节 断裂力学参量在压力容器中的应用                      | ( 83 ) |
| (一) 鼓胀效应                                 | ( 83 ) |
| (二) 表面裂纹和深埋裂开面的应力场强度因子                   | ( 83 ) |
| (三) 压力容器用钢的选择依据                          | ( 85 ) |
| (四) 确定构件中允许存在的临界裂纹深度(对于非贯穿型裂纹)           | ( 86 ) |
| <b>第五章 金属材料的高温机械性能</b>                   | ( 90 ) |
| 第一节 金属材料的蠕变                              | ( 91 ) |
| (一) 蠕变现象                                 | ( 91 ) |
| (二) 蠕变曲线的表示方式                            | ( 93 ) |
| (三) 金属材料在蠕变中的组织变化                        | ( 95 ) |
| (四) 金属材料的蠕变断裂特征                          | ( 96 ) |
| (五) 金属材料的蠕变理论                            | ( 97 ) |

|                                |         |
|--------------------------------|---------|
| (六) 评定材料抵抗蠕变能力的指标——蠕变极限        | ( 99 )  |
| 第二节 评定材料抵抗高温断裂能力的指标——持久强度      | ( 100 ) |
| (一) 金属材料的持久强度                  | ( 100 ) |
| (二) 金属材料的高温断裂理论                | ( 101 ) |
| 第三节 蠕变和持久强度的推测方法               | ( 103 ) |
| (一) 等温线法                       | ( 103 ) |
| (二) 时间——温度参数法                  | ( 106 ) |
| (三) 最少约束法(简称 <i>MCM</i> 法)     | ( 110 ) |
| (四) 状态方程法                      | ( 111 ) |
| 第四节 钢的持久塑性                     | ( 111 ) |
| 第五节 影响钢材高温强度性能的因素              | ( 113 ) |
| (一) 化学成分                       | ( 114 ) |
| (二) 冶炼方法                       | ( 114 ) |
| (三) 金属材料的组织结构                  | ( 115 ) |
| (四) 热处理方法                      | ( 115 ) |
| (五) 温度波动对钢材高温强度的影响             | ( 116 ) |
| 第六节 金属材料的松弛                    | ( 116 ) |
| (一) 金属材料的松弛特性                  | ( 116 ) |
| (二) 松弛的塑性应变速度                  | ( 118 ) |
| (三) 再紧固对松弛的影响                  | ( 119 ) |
| <b>第六章 长期在高温条件下金属材料组织结构的变化</b> | ( 120 ) |
| 第一节 珠光体的球化                     | ( 120 ) |
| (一) 球化对金属材料性能的影响               | ( 120 ) |
| (二) 影响珠光体球化的因素                 | ( 121 ) |
| (三) 珠光体球化的级别                   | ( 122 ) |
| (四) 材料发生球化后的恢复处理               | ( 123 ) |
| 第二节 石墨化                        | ( 124 ) |
| 第三节 合金元素在固溶体和碳化物相之间的重新分配       | ( 125 ) |
| (一) 固溶体和碳化物中合金元素成分的变化          | ( 126 ) |
| (二) 碳化物结构类型、数量和分布的变化           | ( 127 ) |
| <b>第七章 金属材料的氧化与腐蚀</b>          | ( 129 ) |
| 第一节 金属材料的高温氧化                  | ( 129 ) |
| (一) 高温氧化过程的机理                  | ( 129 ) |
| (二) 高温氧化的动力学规律                 | ( 133 ) |
| (三) 氧化的温度规律                    | ( 137 ) |
| (四) 金属材料的耐热性(高温抗氧化性)指标         | ( 138 ) |
| (五) 计算金属材料耐热性的方法               | ( 139 ) |
| 第二节 金属材料的电化学腐蚀                 | ( 145 ) |
| (一) 金属的电极电位                    | ( 145 ) |

|            |                  |       |
|------------|------------------|-------|
| (二)        | 金属材料的钝化          | (145) |
| (三)        | 金属元素耐蚀性的评定       | (149) |
| (四)        | 金属材料的耐蚀合金化途径     | (150) |
| 第三节        | 金属材料的应力腐蚀        | (151) |
| (一)        | 金属材料应力腐蚀的特征      | (151) |
| (二)        | 应力腐蚀破裂机理         | (152) |
| 第四节        | 蒸汽腐蚀             | (153) |
| 第五节        | 硫的腐蚀             | (154) |
| (一)        | 高压锅炉水冷壁管的硫腐蚀     | (154) |
| (二)        | 锅炉过热器管的高温硫腐蚀     | (155) |
| (三)        | 含镍合金钢的硫腐蚀        | (156) |
| (四)        | 硫的低温腐蚀           | (156) |
| 第六节        | 钎的腐蚀             | (156) |
| <b>第八章</b> | <b>金属材料的疲劳现象</b> | (158) |
| 第一节        | 交变载荷的特性          | (158) |
| 第二节        | 高周疲劳的特点          | (159) |
| (一)        | 疲劳曲线             | (159) |
| (二)        | 疲劳断裂的宏观断口特征      | (160) |
| (三)        | 疲劳抗力指标           | (161) |
| 第三节        | 疲劳断裂的机理          | (163) |
| (一)        | 疲劳裂纹的产生          | (163) |
| (二)        | 疲劳裂纹的扩展          | (166) |
| (三)        | 疲劳裂纹扩展速率         | (167) |
| 第四节        | 影响材料疲劳抗力的因素      | (172) |
| (一)        | 化学成分和夹杂物的影响      | (172) |
| (二)        | 热处理和显微组织的影响      | (172) |
| (三)        | 表面加工、尺寸、应力集中的影响  | (173) |
| (四)        | 温度的影响            | (174) |
| 第五节        | 低周疲劳(应变疲劳)       | (174) |
| (一)        | 低周疲劳与高周疲劳的联系与区别  | (174) |
| (二)        | 低周疲劳的循环硬化与软化     | (176) |
| (三)        | 低周疲劳曲线           | (177) |
| (四)        | 影响低周疲劳的主要因素      | (178) |
| 第六节        | 热疲劳              | (179) |
| (一)        | 热疲劳现象            | (179) |
| (二)        | 热疲劳的应力—应变曲线      | (179) |
| 第七节        | 腐蚀疲劳             | (180) |
| (一)        | 腐蚀疲劳破坏及其机理       | (180) |
| (二)        | 影响腐蚀疲劳的主要因素      | (181) |



|                                                                |         |
|----------------------------------------------------------------|---------|
| 第八节 接触疲劳·····                                                  | ( 182 ) |
| 第九节 提高材料与机件疲劳强度的途径·····                                        | ( 183 ) |
| (一) 合理的疲劳设计·····                                               | ( 183 ) |
| (二) 高疲劳抗力材料的选择·····                                            | ( 183 ) |
| (三) 表面强化·····                                                  | ( 184 ) |
| <b>第九章 高温承压元件的工作寿命</b> ·····                                   | ( 185 ) |
| 第一节 国内外试验研究工作概述·····                                           | ( 186 ) |
| 第二节 各项技术指标的分析·····                                             | ( 193 ) |
| (一) 机械性能·····                                                  | ( 193 ) |
| (二) 蠕变性能·····                                                  | ( 193 ) |
| (三) 高温持久强度·····                                                | ( 193 ) |
| (四) 组织结构的变化·····                                               | ( 194 ) |
| 第三节 高温断裂力学参量·····                                              | ( 196 ) |
| (一) 蠕变裂纹的扩展过程·····                                             | ( 197 ) |
| (二) 蠕变裂纹扩展速度与应力场强度因子的关系·····                                   | ( 197 ) |
| (三) 蠕变裂纹扩展速度与裂纹尖端张开位移的关系·····                                  | ( 199 ) |
| 第四节 延长高温承压元件工作寿命的措施·····                                       | ( 199 ) |
| <b>第十章 合金元素在钢中的作用</b> ·····                                    | ( 201 ) |
| 第一节 合金元素在钢中的存在形式·····                                          | ( 201 ) |
| (一) 合金元素与钢中的碳相互作用, 形成碳化物存在于钢中·····                             | ( 201 ) |
| (二) 合金元素溶解于铁素体(或奥氏体)中,<br>以固溶体形式存在于钢中·····                     | ( 202 ) |
| (三) 合金元素与钢中的氮、氧、硫等化合, 以氮化物、氧化物、<br>硫化物和硅酸盐等非金属夹杂物的形式存在于钢中····· | ( 202 ) |
| 第二节 合金元素对钢平衡组织的影响·····                                         | ( 203 ) |
| (一) 合金元素对钢临界温度的影响·····                                         | ( 203 ) |
| (二) 合金元素对钢共析点( $s$ 点)位置的影响·····                                | ( 204 ) |
| (三) 合金元素对奥氏体相区大小的影响·····                                       | ( 204 ) |
| 第三节 合金元素对热处理的影响·····                                           | ( 204 ) |
| (一) 合金元素对奥氏体化的影响·····                                          | ( 204 ) |
| (二) 合金元素对奥氏体分解转变的影响·····                                       | ( 205 ) |
| (三) 合金元素对马氏体转变的影响·····                                         | ( 206 ) |
| 第四节 合金元素对机械性能的影响·····                                          | ( 207 ) |
| (一) 金属材料的强化方法·····                                             | ( 207 ) |
| (二) 合金元素对正火(或退火)状态钢机械性能的影响·····                                | ( 211 ) |
| (三) 合金元素对调质钢机械性能的影响·····                                       | ( 212 ) |
| 第五节 合金元素对钢的工艺性能的影响·····                                        | ( 212 ) |
| (一) 合金元素对焊接性能的影响·····                                          | ( 212 ) |
| (二) 合金元素对切削加工的影响·····                                          | ( 214 ) |



|                         |       |
|-------------------------|-------|
| (三) 合金元素对冷加工变形性能的影响     | (214) |
| 第六节 几种常用合金元素在钢中的作用      | (215) |
| (一) 硅在钢中的作用             | (215) |
| (二) 锰在钢中的作用             | (215) |
| (三) 铬在钢中的作用             | (216) |
| (四) 镍在钢中的作用             | (217) |
| (五) 钼在钢中的作用             | (217) |
| (六) 钨在钢中的作用             | (218) |
| (七) 钒在钢中的作用             | (218) |
| (八) 钛在钢中的作用             | (218) |
| (九) 铌在钢中的作用             | (218) |
| (十) 硼在钢中的作用             | (219) |
| (十一) 铝在钢中的作用            | (219) |
| 第十一章 锅炉与压力容器常用钢材        | (220) |
| 第一节 锅炉与压力容器对钢材性能的要求     | (220) |
| (一) 用以制造室温及中温承压元件的钢板与钢管 | (220) |
| (二) 用以制造高温承压元件的钢管       | (221) |
| 第二节 锅炉与压力容器用钢的分类        | (221) |
| (一) 工作温度低于 500℃ 的钢材     | (221) |
| (二) 工作温度高于 500℃ 的钢材     | (222) |
| 第三节 碳素钢                 | (222) |
| (一) 碳素钢中主要成分对性能的影响      | (222) |
| (二) 碳素钢的分类              | (223) |
| (三) 碳素钢的牌号及其应用          | (223) |
| (四) 锅炉与压力容器常用的碳素钢       | (225) |
| 第四节 普通低合金结构钢            | (226) |
| 第五节 低合金热强钢              | (230) |
| (一) 提高钢材热强性的合金化原理       | (230) |
| (二) 锅炉与压力容器常用的低合金热强钢    | (231) |
| 第六节 不锈钢                 | (236) |
| (一) 合金元素在不锈钢中的作用        | (237) |
| (二) 铬不锈钢                | (240) |
| (三) 铬镍不锈钢               | (240) |
| 第七节 低温用钢                | (248) |
| (一) 合金元素在低温用钢中的作用       | (248) |
| (二) 热处理对钢的低温机械性能的影响     | (249) |
| (三) 低温用钢的分类             | (249) |
| (四) 常用的低温用钢             | (250) |

# 第一章 绪 论

所谓“压力容器”通常泛指各种承受压力的贮存器，种类繁多。例如，化学工业用以存放各种高压气体或液体的容器，核能工程用以承受高温、高压的容器等。锅炉的主要部件（锅筒、集箱、管件等）工作时承受着水或蒸汽的高温、高压，因此也是一种压力容器。

随着科学技术和工业的发展，各种压力容器日趋大型化和高压、高温化，加之一些压力容器中的介质对金属材料具有腐蚀、脆化等作用，使压力容器的工作条件更趋恶劣。特别是随着厚壁及超厚壁压力容器的增多，高强度钢材的广泛使用，压力容器的破坏事故（尤其是脆性破坏事故）有所增加。鉴于压力容器的破坏会导致十分严重的后果，因此世界各国都非常重视压力容器的安全问题，并对压力容器的破坏事故进行了大量的调查、统计和分析。

英国原子能局卫生与安全处曾对压力容器进行了广泛的调查，按其破坏发生的原因，发现的方法、工作条件（介质性质、压力和温度）以及使用年限等方面进行了分门别类的整理，统计出其损坏的几率，并于1968年发表了调查报告。

对总计为12700台制造中的压力容器，以及100300台容器运行年记载的损坏事故进行分析，大致可以分为二类：灾难性破坏事故和损伤事故。其发生几率如表1-1所示。

表 1-1 压力容器破坏几率

|                 | 损 伤 事 故               | 灾 难 性 事 故            | 总 计                   |
|-----------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 使用前(12700台)     | $5.5 \times 10^{-4}$  | $2.3 \times 10^{-4}$ | $7.8 \times 10^{-4}$  |
| 使用后(100300台运行年) | $12.5 \times 10^{-4}$ | $0.7 \times 10^{-4}$ | $13.2 \times 10^{-4}$ |

由表1-1可知，在制造过程中发生损坏的几率为千分之0.78，在使用过程中发生损坏的几率为千分之1.32。

对于100300台容器运行年的调查中所报道的132件损坏事故（其中有7件是灾难性破坏事故），按其破坏原因分类如表1-2所示。

表 1-2 使用期间压力容器损坏事故统计表

| 序 号 | 事 故 原 因    | 件 数 | 百分率(%) |
|-----|------------|-----|--------|
| 1   | 裂纹         | 118 | 89.3   |
| 2   | 腐蚀(包括应力腐蚀) | 2   | 1.5    |
| 3   | 使用不当       | 8   | 6.1    |
| 4   | 制造缺陷       | 3   | 2.3    |
| 5   | 蠕变         | 1   | 0.8    |
| 总 计 |            | 132 | 100    |

表1-2表明压力容器的损坏事故主要是由裂纹引起的。各种裂纹所占的百分率详见表1-3。按照裂纹发生的位置分类，如表1-4所示：

表 1-3 裂纹的分类

| 序号  | 裂 纹 的 种 类      | 件数  | 占 118 件裂纹事故<br>中的百分率(%) | 占全部事故中的<br>百分率(%) |
|-----|----------------|-----|-------------------------|-------------------|
| 1   | 疲劳裂纹(机械的, 热的)  | 47  | 40                      | 35.5              |
| 2   | 腐蚀裂纹(包括应力腐蚀裂纹) | 24  | 20.3                    | 18.2              |
| 3   | 制造时产生的裂纹       | 10  | 8.4                     | 7.6               |
| 4   | 未确定的*          | 35  | 29.6                    | 26.5              |
| 5   | 不好分类的          | 2   | 1.7                     | 1.5               |
| 总 计 |                | 118 | 100                     | 89.3              |

\* 所谓未确定系调查不充分所致。

表 1-4 裂纹所在位置的分类

| 裂纹发生的<br>位 置          | 发现方法         | 原 因    |               |                |                 |                 | 小计     |
|-----------------------|--------------|--------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|--------|
|                       |              | 疲 劳    | 腐 蚀           | 制造时的<br>裂 纹    | 未确定的            | 耐火材料损坏<br>产生的事故 |        |
| 锅炉壳体与<br>管板联接处<br>的裂纹 | 宏观检查<br>泄漏   | 8(火)*  |               | 1(火)           | 1(火)            | 1(火)            | 11     |
|                       |              | 6(火)   |               |                |                 | 1(火)            | 7      |
| 焊缝交叉部位<br>和角焊缝裂纹      | 宏观检查         | 8(非火)* | 12(非火)        | 3(非火)          | 6(非火)           |                 | 29     |
|                       | 泄漏           | 5(非火)  |               |                |                 |                 | 5      |
|                       | 无损探伤<br>破坏事故 |        | 2(非火)         | 1(非火)<br>1(非火) | 1(非火)           |                 | 4<br>1 |
| 焊缝上的<br>裂 纹           | 宏观检查         | 9(非火)  | 2(非火)         |                |                 |                 | 11     |
|                       | 泄漏           | 4(非火)  |               |                |                 |                 | 4      |
|                       | 无损探伤<br>破坏事故 |        | 1(非火)         | 2(非火)          | 3(非火)           |                 | 5<br>1 |
| 母材裂纹                  | 泄漏           |        |               | 1(非火)          |                 |                 | 1      |
|                       | 破坏事故         | 1(非火)  |               |                |                 |                 | 1      |
|                       | 水压试验         | 1(火)   |               |                |                 |                 | 1      |
| 管板孔桥带<br>的裂纹          | 宏观检查         | 1(非火)  | 4(非火)         |                | 1(火)            |                 | 12     |
|                       | 泄漏           | 1(火)   |               |                | 6(非火)<br>12(非火) |                 | 13     |
| 开孔处的放<br>射状裂纹         | 宏观检查         |        | 1(非火)<br>2(火) |                |                 |                 | 3      |
| 接管裂纹                  | 宏观检查         | 1(非火)  |               |                | 2(非火)           |                 | 3      |
|                       | 泄漏           | 2(非火)  |               | 1(非火)          | 3(非火)           |                 | 6      |
| 小 计                   |              | 47     | 24            | 10             | 35              | 2               | 118    |

附注: \* (火)指直接受火部分; (非火)指非直接受火部分及非火类容器。

由表 1-3、表 1-4 可知, 压力容器中最容易发生的是疲劳裂纹和腐蚀裂纹。

对 132 件损坏事故按所用材料、工作压力及温度、介质进行分类详见表 1-5。

表 1-5 按使用因素对事故分类

| 因 素              | 使用中的事故 (共 132 件) |      |             |     |
|------------------|------------------|------|-------------|-----|
|                  | 损伤事故(共 125 件)    |      | 破坏事故(共 7 件) |     |
|                  | 件 数              | %    | 件 数         | %   |
| 软钢               | 105              | 79.5 | 5           | 3.9 |
| 合金钢              | 20               | 15.1 | 2           | 1.5 |
| 使用 10 年以上        | 64               | 48.5 | 1           | 0.7 |
| 使用 10 年以下        | 59               | 45.0 | 6           | 5.1 |
| 使用年数不明           | 2                | 1.5  |             |     |
| 介质: 气体、蒸汽        | 69               | 52.2 | 4           | 3.1 |
| 介质: 液体           | 14               | 10.6 |             |     |
| 介质: 混合物          | 42               | 31.8 | 3           | 2.3 |
| 直接受火             | 29               | 22.0 | 4           | 3.1 |
| 非直接受火            | 96               | 72.0 | 3           | 2.3 |
| 使用温度在 315 ℃ 以上   | 69               | 52.2 | 1           | 0.7 |
| 使用温度在 315 ℃ 以下   | 15               | 11.4 | 1           | 0.7 |
| 使用温度不明           | 41               | 31.1 | 5           | 3.9 |
| 使用压力在 3.43MPa 以上 | 84               | 63.5 | 3           | 2.3 |
| 使用压力在 3.43MPa 以下 | 41               | 31.1 | 4           | 3.1 |

综上所述, 在压力容器的损坏事故中, 相当大的一部分是由于所用材料及制造过程所引起的。

日本曾对 1965 年以来十年间所发生的压力容器的破坏事故, 按其所用材料及破坏的种类进行整理, 其结果列于表 1-6。由表可以看出每种材料所易于发生的破坏事故。例如, 对于不锈钢, 经常发生应力腐蚀裂纹和点腐蚀; 而均匀腐蚀大多发生在普通钢上。各种破坏现象的出现, 可以认为是材料与其工作条件综合影响的结果。表 1-7 列出了化工压力容器在使用中破坏的一些例子。

表 1-6 化工压力容器破坏事故的统计

| 事 故 分 类 | 不锈钢 | 普通钢 | 铜合金 | 其 它 | 合 计 | 百分率(%) |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|--------|
| 应力腐蚀裂纹  | 64  | 9   | 3   |     | 76  | 45.6   |
| 点腐蚀     | 23  | 11  | 1   |     | 35  | 21.0   |
| 均匀腐蚀    | 4   | 10  |     |     | 14  | 8.5    |
| 晶间腐蚀    | 5   | 1   | 2   |     | 8   | 4.9    |

(接上表 1-6)

| 事 故 分 类 | 不 锈 钢 | 普 通 钢 | 铜 合 金 | 其 它 | 合 计 | 百分率(%) |
|---------|-------|-------|-------|-----|-----|--------|
| 裂隙腐蚀    | 1     |       |       |     | 1   | 0.6    |
| 疲劳裂纹    | 7     | 5     | 1     | 1   | 14  | 8.5    |
| 高温氧化腐蚀  | 2     | 6     |       |     | 8   | 4.9    |
| 热应力裂纹   | 1     |       |       |     | 1   | 0.6    |
| 细菌腐蚀    |       | 1     |       |     | 1   | 0.6    |
| 气蚀、脱锌腐蚀 |       |       | 2     |     | 2   | 1.2    |
| 氢脆性     |       | 5     |       |     | 5   | 3.0    |
| 低熔点腐蚀   |       | 1     |       |     | 1   | 0.6    |
| 合 计     | 107   | 49    | 9     | 1   | 166 | 100    |
| 百分率(%)  | 64.5  | 29.5  | 5.4   | 0.6 |     |        |

表 1-7 化工压力容器在使用中破坏的实例

| 材 料                   | 工作条件          | 设 备 及 其 破 坏                                                   |
|-----------------------|---------------|---------------------------------------------------------------|
| 高合金钢<br>(如不锈<br>钢等)   | 高温干性          | 重油炉上的氧化钒浸蚀、高温氧化等。                                             |
|                       | 常温或高<br>温 湿 性 | 石油精炼设备上的硫酸腐蚀、氯化物应力腐蚀；发电设备上的高温、高压水的应力腐蚀裂纹；制造浆料用的容器上苛性钠应力腐蚀裂纹等。 |
| 低合金钢<br>(如一些<br>高强度钢) | 高温干性          | 在合成氨塔上由于高温、高压氢所造成的氢致破坏等。                                      |
|                       | 常温湿性          | 液化石油气球形贮罐上的应力腐蚀裂纹；液态氨容器上的应力腐蚀裂纹等。                             |

上述压力容器的各种破坏事故，大致可以分为三类：

1) 容器强度被削弱而引起的破坏，如均匀腐蚀、晶间腐蚀、点腐蚀、裂隙腐蚀、高温氧化等。这类破坏是在使用过程中构件全部或局部的尺寸损耗，使容器强度降低所引起的。因此，选择抗损耗性能好的材料及焊接接头，对预防这种破坏是十分重要的。

2) 脆性破坏，如氢脆、 $\sigma$ 相脆化、碳化物析出脆化、晶粒长大引起的脆化等。这类破坏主要是由于冶金学变化而产生的。因此，主要预防措施应根据使用温度和介质性能，选择恰当的材料及焊接接头形式。

3) 裂纹扩展破坏，如应力腐蚀裂纹，氧化钒浸蚀、疲劳裂纹等。这类破坏是由于裂纹扩展造成的，在一定程度上，可用选择合适的材料予以防止。

由上可知，选择恰当的材料是保证化工压力容器安全运行的一个重要措施。

对于锅炉的主要承压元件，可能出现的失效形式有下列几种：

1) 由于元件产生的弹性变形过大，使介质向外泄漏。这种情况主要发生在法兰联接及胀接处。

2) 由于元件产生的弹性变形过大,使之失稳。例如受外压作用的炉膛的塌陷就属于这种情况,严重时会发生撕裂现象。

3) 低周疲劳引起的破坏。这种情况,主要发生在高应力集中区或有缺陷存在的部位。

4) 由于交变热应力引起的热疲劳破坏。它主要发生在受热面元件的汽水分层界面、喷水减温器的雾化区段等部位。

5) 由于元件承受的压力过高引起的塑性破坏。这种现象主要发生在安全阀及燃烧自动控制设备同时失灵或操作不当的情况下。

6) 脆性破坏。这往往是由于材料或制造时产生的裂纹等缺陷,以及运行时产生的苛性脆化等原因造成的。

7) 因超温引起的塑性破坏(短期内超温严重时)或持久破坏(在较长时间内超温引起的蠕变破坏)。这种现象主要发生在过热器等承受高温、高压的部件上。

上述任何一种形式的失效都会造成经济上的损失,甚至危害人身安全。据记载,自1870年到1910年的四十年间,北美洲地区有记录的锅炉爆炸事故约有10000件。1905年,美国某鞋厂一台火管锅炉爆炸造成58人死亡和117人受伤的重大事故。1963年,苏联一台0.78 MPa的立式火管锅炉因下脚圈开裂爆炸,锅炉飞出300米之远。1955年,我国某纺织厂一台2.16 MPa、10 t/h的蒸汽锅炉,由于下锅筒爆炸,使锅炉由基础上腾空而起,飞至75米以外的另一厂房内。1975年,我国某小型电站的一台压力为1.03 MPa、7 t/h的蒸汽锅炉,因提高出力而在超过额定压力的1.37 MPa条件下运行,由于锅筒铆接接缝处发生苛性脆化而爆炸,锅筒飞出40米以外,使厂房受到严重破坏。

随着工业技术的发展,锅炉的容量愈来愈大,参数愈来愈高,如果发生破坏事故,其危害性也将更加严重。为了防止因锅炉受压元件失效所引起的严重破坏,必须从多方面予以重视。例如,锅炉结构与材料的合理选择,制造及安装质量的严格要求,以及制订科学、合理的运行操作规程等等。

综上所述,由于各种压力容器中都贮存着具有一定压力的介质,一旦发生破坏,就会产生相当大的爆炸力。而且有些介质是有毒、有腐蚀性或易燃的,则将造成更严重的恶果。特别是近年来高压容器和超高压容器的广泛使用,对压力容器安全性的要求就更加高了。为了确保压力容器的安全性,根据各种压力容器的实际工作条件,选择适当的材料是很重要的一环。另一方面,材料的性能往往又限制了压力容器技术的发展。从锅炉技术的发展过程可以明显看出,每当采用了一种性能更好的新材料,锅炉的参数就能得到进一步的提高,从而促进了锅炉技术的发展。

## 第二章 金属材料的变形与再结晶

金属材料在受到外力作用时，会发生变形，随着外力的增加，变形的形式可能有三种，即弹性变形、塑性变形和破裂。

金属材料的变形性能在工程技术上是十分重要的，我们往往就是利用金属材料的这种特性，把材料制作成所要求的形状。那么，金属材料在外力作用下是怎样发生变形的呢？由于金属材料都是具有多晶体的构造，所以我们要对金属材料在加工变形时的行为有正确的理解，就必须首先了解一下单个晶体的变形情况。

### 第一节 单晶体金属的变形

单晶体金属在受到正应力作用时的变形过程，如图 2-1 所示，受切应力作用时的变形过程如图 2-2 所示。

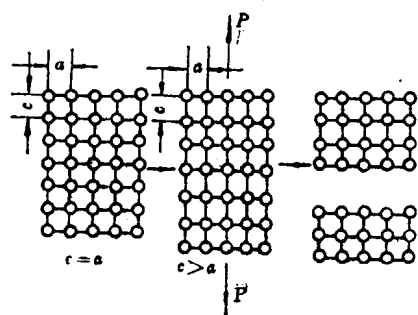


图 2-1 单晶体金属晶格受正应力作用时的变形示意图

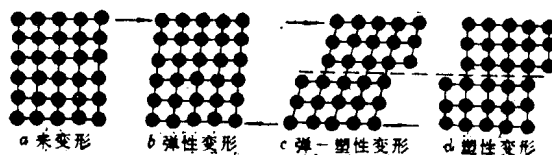


图 2-2 单晶体金属晶格受切应力作用时的变形示意图

#### (一) 单晶体金属的弹性变形

由图 2-1 及图 2-2 可知，当作用在单晶体金属上的外力不大时，金属发生弹性变形。此时，晶格被拉长（图 2-1）或歪曲（图 2-2）。由于所加之外力未超过原子之间的结合力，所以在去除外力后，晶格便会由变形状态恢复至其原始状态。

由此可知，在同样外力载荷的作用下，由于金属内部原子结合力的大小不同，产生的弹性变形量也不相同，亦即其弹性模量( $E$ )不同。金属内部原子之间结合力的大小与晶格内原子之间的距离有关。由于在晶格中沿各个晶向上的原子密度不同，所以单晶体的弹性性能在各方向上表现出各向异性。表 2-1 列出一些金属的弹性模量。由表 2-1 可知，单晶体金属的弹性模量在不同方向上是不同的，有的甚至相差几倍。



表 2-1 金属单晶体和多晶体的弹性模量

| 金属及晶系 | 弹性模量 ( $E$ ) MPa |        |        |
|-------|------------------|--------|--------|
|       | 单晶体              |        | 多晶体    |
|       | 最大值              | 最小值    |        |
| 立方系   |                  |        |        |
| 铝     | 75540            | 62780  | 70630  |
| 铜     | 190300           | 66700  | 11870  |
| 铁     | 284500           | 132400 | 210000 |
| 六方系   |                  |        |        |
| 锌     | 123900           | 34920  | 98100  |
| 镁     | 50420            | 42870  | 44150  |

## (二) 单晶体金属的塑性变形

如图 2-1 所示, 单晶体金属的晶格受正应力作用是不会发生塑性变形的。当正应力的值大于金属内部原子之间的结合力时, 便发生断裂。亦即由弹性变形直接过渡到脆性断裂。塑性变形只有在受到切应力时才会发生。

将一个表面经过良好抛光的纯锌单晶体进行拉伸试验, 可以看到, 当试样发生一定的塑性变形之后, 在其表面上出现了许多互相平行的倾斜的线条状痕迹。由此可以看出, 锌单晶体塑性变形是沿着某一结晶平面发生的, 是位于晶面两侧的两部分晶体的相对滑移。图 2-3b 是把这种滑移的情况画成明显的示意图。锌单晶体受拉伸时, 在其滑移面上的应力情况如图 2-3a 所示。在滑移面上拉伸载荷  $P$  可分解为正应力分量  $\sigma$  和切应力分量  $\tau$ , 在正应力  $\sigma$  的作用下, 锌单晶体的晶格被拉长, 产生弹性变形; 在切应力  $\tau$  的作用下, 锌单晶体发生相对位移, 产生塑性变形。

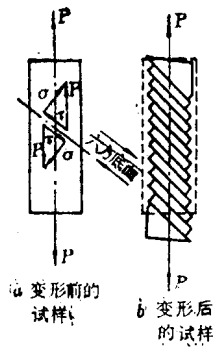


图 2-3 锌单晶体拉伸试验的示意图

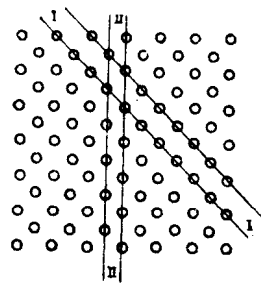


图 2-4 滑移面示意图

由上所述, 单晶体的塑性变形主要是以滑移的方式产生的。

滑移是指晶体的一部分沿着一定的晶面和晶向相对于另一部分发生的相对滑动。滑移的距离是原子间距的整倍数。滑移停止后, 在滑动平面的上下两部分的晶体仍保持一致的方向。

一般来讲, 在各种晶格中, 滑移并不是沿任意晶面和晶向发生的, 而总是沿着该晶格中原子排列最密的晶面和原子排列最密的晶向发生。其原因可由图 2-4 来说明。

图 2-4 中 I—I 面的原子密度最大, 原子间距最小, 原子间的结合力最强; 同时, 其面间的距离也最大, 即面与面之间的结合力最弱。而图中其他种类的晶面, 都不是如此。例如, 如果沿着 II—II 面发生滑移, 则不仅由于它们面与面之间的结合力较强, 而不易发生相对滑移, 而且由于它们之间一旦发生相对滑移就要破坏 I—I 晶面, 这显然是不可能的。反之, 由于 I—I 面的面与面之间的结合力较弱, 容易发生相对滑移, 而且一旦发生滑移之后所破坏的只是原子结合力弱的 II—II 晶面。与此相似, 同样也可以解释滑移是沿着原子密度最大的晶向发生的。

因此, 金属在发生塑性变形时, 总是沿着原子密度最大的晶面——“滑移面”及原子密度最大的晶向——“滑移方向”发生滑移的。滑移面数与滑移方向数的乘积称为“滑移系”。滑移系的数值愈大, 则金属滑移的可能性也愈大, 即金属的塑性愈好。

三种常见金属晶格的主要滑移面及滑移方向列于表 2-2。

表 2-2 三种常见金属晶格的滑移系

| 晶格   | 体心立方晶格     | 面心立方晶格     | 密排六方晶格          |
|------|------------|------------|-----------------|
| 滑移面  | (110) × 6  | (111) × 4  | 六方底面 (0001) × 1 |
| 滑移方向 | [111] × 2  | [110] × 3  | 底面对角线 × 3       |
| 滑移系  | 6 × 2 = 12 | 4 × 3 = 12 | 1 × 3 = 3       |

由表 2-2 可知, 体心立方晶格中共有六个 (110) 滑移面, 每个滑移面内有二个滑移方向。总的滑移系的数目是 12 个。此外, (112) 和 (123) 晶面也有可能成为滑移面。具有这种晶格的金属有: 铁 ( $\alpha$ -Fe)、铬、钨等。因为这种晶格具有 12 个滑移系, 故它们具有良好的塑性。

在面心立方晶格中共有四个滑移面, 每个滑移面内有三个滑移方向, 总的滑移系是 12 个, 因此也具有很好的塑性。具有这种晶格的金属有: 铜、铝、金、银等。

单从上述两种晶格的滑移系来看, 两者相等, 似乎体心立方晶格的金属与面心立方晶格的金属具有同样的塑性。但实际上, 金、银、铜的塑性比铁、铬、钨的塑性高。可见, 单从晶格滑移系数目的多少还不能完全确定金属塑性性能的高低。进一步的研究证明, 滑移方向在金属的塑性变形中所起的作用比滑移面的作用大。在面心立方晶格中, 滑移方向有三个, 而体心立方晶格中只有二个滑移方向。滑移方向愈多, 适应外力的能力也愈大, 因而越容易发生塑性变形。

由表 2-2 可知, 在六方晶格的金属中只有一个滑移面, 即六方晶格的底面。在此底面内有三个滑移方向, 因此其滑移系的数目为 3。所以, 这种晶格的金属塑性变形的能力很低, 例如镁、锌、镉等。

金属晶体内虽然存在着可以滑移的晶面和晶向, 但是, 只有当晶体在外力作用下, 使它们产生滑移的切应力超过某一定值时, 它们才会起作用而开始滑移, 产生塑性变形。能够引起滑移的最小切应力称为临界切应力 ( $\tau_K$ )。临界切应力是标志晶体特性的一个物理量。各种金属都有它自己的临界切应力值。临界切应力值愈大, 则金属抵抗塑性变形的能力愈大, 即金属的屈服极限愈高。