

TK 22  
0043

163327

# 锅炉与压力容器用钢

(修订本)

章燕谋

西安交通大学出版社

## 内 容 提 要

本书是1984年出版的《锅炉与压力容器用钢》的修订本。本书与原书在体系上仍保持一致,但在内容上作了较多的补充、更新和修改。

本书全面系统地阐述了金属材料的脆性性能、高温机械性能、抗腐蚀性能、疲劳性能等,并就各合金元素对钢材性能的影响进行了较详尽的分析。还对钢在制造加工过程中易发生的过热与过烧现象进行了较系统的分析。同时,还针对生产中常用的各种锅炉与压力容器钢的机械性能、加工工艺性能以及一些特殊性能(如高温特性、抗蚀特性等)作了比较全面的阐述。

本书可作为高等院校动力、化工、劳动保护类有关专业的材料,也可供锅炉制造厂、火力发电厂、压力容器制造厂、化工机械及设备厂以及锅炉与压力容器安全监察等有关部门的工程技术人员参考。

(陕)新登字 007 号

锅炉与压力容器用钢

(修订本)

章燕谋

责任编辑 谭小艺

责任校对 郭丽芳

\*

西安交通大学出版社出版发行

(西安市咸宁西路28号 邮政编码710049 电话:(029)3268316)

陕西省轻工印刷厂印装

各地新华书店经销

\*

开本:787×1092 1/16 印张:20.75 字数:498千字

1997年1月第1版 1997年1月第1次印刷

印数:1—3000

ISBN7-5605-0782-4/TK·59 定价:18.00元

---

若发现本社图书有倒页、白页、少页及影响阅读的质量问题,请去当地销售部门调换或与我社发行科联系调换。发行科电话:(029)3268357,3267874

# 前 言

“锅炉用钢”是热能工程专业的一门专业课程。根据教学大纲的要求,于1984年编写出版了《锅炉与压力容器用钢》作为该课程的教材。

由于国内外锅炉与压力容器用钢方面的发展以及多年来的教学实践,该教材需进行修订。本书与原书在体系上仍保持一致,但在内容上作了更新和适当的修改。

全书共11章,全面系统地阐述了金属材料的脆性性能、高温机械性能及组织状态、抗腐蚀性能和疲劳性能,并就各合金元素对钢材性能的影响进行了较详尽的分析。此外,对钢在制造加工过程中易发生的过热与过烧现象进行了较系统的分析。同时还针对锅炉与压力容器常用的各种钢的机械性能和加工工艺性能以及一些特殊性能(如高温特性、抗腐蚀性等)作了比较全面的阐述。

本书可作为高等院校动力、化工类有关专业的教材,也可供锅炉制造厂、火力发电厂、压力容器制造厂、化工机械厂以及锅炉与压力容器安全监察等有关部门科技工作人员参考。

国内外在锅炉与压力容器用钢领域的发展很快,由于作者水平有限,本书不可能都反映出来,书中错误和不足之处在所难免,敬请读者批评指正。

章燕谋

1996年6月于西安交通大学

# 目 录

|                          |      |
|--------------------------|------|
| 第1章 绪 论                  | (1)  |
| 第2章 金属材料的变形与再结晶          | (6)  |
| 2.1 单晶体金属的变形             | (6)  |
| 2.1.1 单晶体金属的弹性变形         | (7)  |
| 2.1.2 单晶体金属的塑性变形         | (8)  |
| 2.2 多晶体金属的变形             | (12) |
| 2.2.1 晶界的作用              | (13) |
| 2.2.2 各晶粒间位向差别的影响        | (15) |
| 2.3 塑性变形对金属组织和性能的影响      | (15) |
| 2.3.1 塑性变形对金属材料组织的影响     | (15) |
| 2.3.2 塑性变形对金属材料性能的影响     | (16) |
| 2.4 塑性变形后的金属在加热时的组织和性能变化 | (17) |
| 2.4.1 回复与再结晶             | (18) |
| 2.4.2 金属的再结晶温度           | (19) |
| 2.4.3 再结晶后的晶粒度           | (20) |
| 第3章 金属材料的脆性              | (22) |
| 3.1 金属材料的断裂              | (22) |
| 3.1.1 断裂的类型              | (22) |
| 3.1.2 断裂的方式              | (23) |
| 3.1.3 断裂的形式              | (23) |
| 3.1.4 断口分析               | (23) |
| 3.2 脆性破坏事故的实例及分析         | (28) |
| 3.3 韧-脆性转变温度             | (31) |
| 3.4 无塑性温度(也称无韧温度)        | (33) |
| 3.5 金属材料产生脆性断裂的条件        | (36) |
| 3.5.1 温 度                | (36) |
| 3.5.2 缺 陷                | (37) |
| 3.5.3 厚 度                | (38) |
| 3.5.4 加载速度               | (39) |
| 3.5.5 微观组织               | (40) |
| 3.5.6 残余应力               | (42) |
| 3.6 金属材料的脆化现象            | (42) |
| 3.6.1 冷脆性                | (42) |
| 3.6.2 热脆性                | (44) |

|            |                                       |       |
|------------|---------------------------------------|-------|
| 3.6.3      | 红脆性(亦称赤热脆性).....                      | (45)  |
| 3.6.4      | 回火脆性.....                             | (45)  |
| 3.6.5      | 苛性脆化.....                             | (47)  |
| 3.6.6      | 氢脆.....                               | (48)  |
| <b>第4章</b> | <b>金属材料的断裂韧性参量</b> .....              | (60)  |
| 4.1        | 概 述.....                              | (60)  |
| 4.1.1      | 低应力脆性断裂对传统的强度设计观点提出的问题<br>.....       | (60)  |
| 4.1.2      | 冲击韧性值( $a_K$ )不能确切地表征材料的韧脆性能<br>..... | (61)  |
| 4.1.3      | 断裂力学的任务.....                          | (62)  |
| 4.2        | 线弹性断裂力学的断裂韧性参量.....                   | (62)  |
| 4.2.1      | 能量分析法.....                            | (63)  |
| 4.2.2      | 应力场强度分析法.....                         | (67)  |
| 4.2.3      | 线弹性断裂力学的适用范围.....                     | (75)  |
| 4.3        | 弹塑性断裂力学的断裂韧性参量.....                   | (76)  |
| 4.3.1      | 裂纹顶端张开位移.....                         | (77)  |
| 4.3.2      | $J$ 积分理论.....                         | (80)  |
| 4.4        | 金属材料断裂韧性参量的测试.....                    | (83)  |
| 4.4.1      | 平面应变断裂韧性 $K_{Ic}$ 的测试 .....           | (83)  |
| 4.4.2      | 临界裂纹顶端张开位移 $\delta_c$ 的测试 .....       | (85)  |
| 4.4.3      | 临界 $J$ 积分值的测试 .....                   | (86)  |
| 4.5        | 提高金属材料断裂韧性的途径.....                    | (88)  |
| 4.5.1      | 合金元素的作用.....                          | (88)  |
| 4.5.2      | 晶粒度对 $K_{Ic}$ 的影响 .....               | (89)  |
| 4.5.3      | 金相组织对 $K_{Ic}$ 的影响 .....              | (89)  |
| 4.6        | 断裂力学参量在压力容器中的应用.....                  | (90)  |
| 4.6.1      | 鼓胀效应.....                             | (90)  |
| 4.6.2      | 表面裂纹和深埋裂开面的应力场强度因子.....               | (91)  |
| 4.6.3      | 压力容器用钢的选择依据.....                      | (93)  |
| 4.6.4      | 确定构件中允许存在的临界裂纹深度(对于非贯<br>穿型裂纹) .....  | (94)  |
| 4.6.5      | 一些压力容器用钢的断裂韧性数据.....                  | (97)  |
| <b>第5章</b> | <b>金属材料的高温机械性能</b> .....              | (99)  |
| 5.1        | 金属材料的蠕变 .....                         | (101) |
| 5.1.1      | 蠕变现象 .....                            | (101) |
| 5.1.2      | 蠕变曲线的表示方式 .....                       | (103) |
| 5.1.3      | 金属材料在蠕变中的组织变化 .....                   | (105) |
| 5.1.4      | 金属材料的蠕变理论 .....                       | (107) |

|            |                                  |              |
|------------|----------------------------------|--------------|
| 5.1.5      | 金属材料的蠕变断裂机理 .....                | (110)        |
| 5.2        | 金属材料的高温强度 .....                  | (114)        |
| 5.2.1      | 条件蠕变极限( $\sigma_n$ ) .....       | (114)        |
| 5.2.2      | 高温持久强度( $\sigma_D$ ) .....       | (115)        |
| 5.3        | 蠕变和持久强度的推测方法 .....               | (116)        |
| 5.3.1      | 蠕变曲线方程的分析 .....                  | (116)        |
| 5.3.2      | 高温强度的外推方法 .....                  | (117)        |
| 5.4        | 钢的持久塑性 .....                     | (125)        |
| 5.5        | 影材料高温强度性能的因素 .....               | (128)        |
| 5.5.1      | 化学成分 .....                       | (128)        |
| 5.5.2      | 冶炼方法 .....                       | (129)        |
| 5.5.3      | 金属材料的组织结构 .....                  | (130)        |
| 5.5.4      | 热处理方法 .....                      | (131)        |
| 5.5.5      | 温度波动对钢材高温强度的影响 .....             | (131)        |
| 5.6        | 金属材料的松弛 .....                    | (132)        |
| 5.6.1      | 金属材料的松弛特性 .....                  | (132)        |
| 5.6.2      | 松弛的塑性应变速度 .....                  | (134)        |
| 5.6.3      | 再紧固对松弛的影响 .....                  | (134)        |
| 5.6.4      | 应力松弛与蠕变的关系 .....                 | (135)        |
| <b>第6章</b> | <b>长期在高温条件下金属材料组织结构的变化 .....</b> | <b>(138)</b> |
| 6.1        | 珠光体的球化 .....                     | (138)        |
| 6.1.1      | 球化对金属材料性能的影响 .....               | (138)        |
| 6.1.2      | 影响珠光体球化的因素 .....                 | (140)        |
| 6.1.3      | 珠光体球化的级别 .....                   | (140)        |
| 6.1.4      | 材料发生球化后的恢复处理 .....               | (142)        |
| 6.2        | 石墨化 .....                        | (143)        |
| 6.3        | 合金元素在固溶体和碳化物相之间的重新分配 .....       | (144)        |
| 6.3.1      | 固溶体和碳化物中合金元素成分的变化 .....          | (145)        |
| 6.3.2      | 碳化物结构类型、数量和分布的变化 .....           | (146)        |
| <b>第7章</b> | <b>钢的过热与过烧 .....</b>             | <b>(149)</b> |
| 7.1        | 概述 .....                         | (149)        |
| 7.2        | 钢在高温加热中的变化 .....                 | (150)        |
| 7.2.1      | 奥氏体晶粒的长大 .....                   | (150)        |
| 7.2.2      | 钢在高温加热时的成分和组织变化 .....            | (153)        |
| 7.3        | 高温加热后的冷却 .....                   | (153)        |
| 7.3.1      | 第一阶段加热后的冷却 .....                 | (153)        |
| 7.3.2      | 第二阶段加热后的冷却 .....                 | (154)        |
| 7.3.3      | 第三阶段加热后的冷却 .....                 | (156)        |

|            |                          |       |
|------------|--------------------------|-------|
| 7.4        | 钢的过热现象 .....             | (156) |
| 7.4.1      | 钢的过热温度 .....             | (156) |
| 7.4.2      | 过热钢的特征 .....             | (157) |
| 7.4.3      | 过热钢的机械性能 .....           | (158) |
| 7.4.4      | 钢发生过热后的补救措施 .....        | (159) |
| 7.5        | 钢的过烧现象 .....             | (160) |
| 7.5.1      | 钢的过烧温度 .....             | (160) |
| 7.5.2      | 过烧钢的特征 .....             | (160) |
| 7.5.3      | 钢的过烧过程 .....             | (161) |
| 7.5.4      | 过烧钢的机械性能 .....           | (161) |
| <b>第8章</b> | <b>金属材料的腐蚀现象</b> .....   | (162) |
| 8.1        | 概述 .....                 | (162) |
| 8.2        | 金属材料的高温氧化 .....          | (163) |
| 8.2.1      | 高温氧化过程的机理 .....          | (163) |
| 8.2.2      | 高温氧化的动力学规律 .....         | (167) |
| 8.2.3      | 氧化的温度规律 .....            | (171) |
| 8.2.4      | 金属材料的耐热性(高温抗氧化性)指标 ..... | (173) |
| 8.3        | 金属材料的电化学腐蚀 .....         | (174) |
| 8.3.1      | 金属的电极电位及腐蚀电池 .....       | (174) |
| 8.3.2      | 金属的极化与钝化 .....           | (177) |
| 8.3.3      | 金属元素耐蚀性的评定 .....         | (183) |
| 8.3.4      | 金属材料的耐蚀合金化途径 .....       | (184) |
| 8.4        | 金属材料的应力腐蚀 .....          | (185) |
| 8.4.1      | 金属材料应力腐蚀的特征 .....        | (185) |
| 8.4.2      | 应力腐蚀破裂机理 .....           | (188) |
| 8.5        | 蒸汽腐蚀 .....               | (188) |
| 8.6        | 硫的腐蚀 .....               | (189) |
| 8.6.1      | 高压锅炉水冷壁管的硫腐蚀 .....       | (189) |
| 8.6.2      | 锅炉过热器管的高温硫腐蚀 .....       | (190) |
| 8.6.3      | 含镍合金钢的硫腐蚀 .....          | (191) |
| 8.6.4      | 硫的低温腐蚀 .....             | (191) |
| 8.7        | 钒的腐蚀 .....               | (192) |
| 8.8        | 氧腐蚀(氧去极化腐蚀) .....        | (192) |
| 8.8.1      | 氧腐蚀的特征 .....             | (193) |
| 8.8.2      | 影响氧腐蚀的因素 .....           | (194) |
| <b>第9章</b> | <b>金属材料的疲劳现象</b> .....   | (195) |
| 9.1        | 交变载荷的特性 .....            | (196) |
| 9.2        | 高周疲劳的特点 .....            | (197) |
| 9.2.1      | 应力-应变曲线 .....            | (197) |

|       |                         |       |
|-------|-------------------------|-------|
| 9.2.2 | 金属材料的疲劳特性曲线 .....       | (197) |
| 9.2.3 | 疲劳断裂的断口特征 .....         | (199) |
| 9.2.4 | 金属材料的疲劳抗力指标 .....       | (199) |
| 9.3   | 疲劳断裂的机理 .....           | (202) |
| 9.3.1 | 疲劳裂纹的产生 .....           | (203) |
| 9.3.2 | 疲劳裂纹的扩展 .....           | (206) |
| 9.3.3 | 疲劳裂纹扩展速率 .....          | (206) |
| 9.4   | 影响材料疲劳抗力的因素 .....       | (212) |
| 9.4.1 | 化学成分和夹杂物的影响 .....       | (212) |
| 9.4.2 | 热处理和显微组织的影响 .....       | (212) |
| 9.4.3 | 应力集中的影响 .....           | (213) |
| 9.4.4 | 试件尺寸的影响 .....           | (213) |
| 9.4.5 | 表面加工的影响 .....           | (215) |
| 9.4.6 | 温度的影响 .....             | (216) |
| 9.5   | 低周疲劳(应变疲劳)特性 .....      | (216) |
| 9.5.1 | 低周疲劳时的应力-应变曲线 .....     | (217) |
| 9.5.2 | 材料的低周疲劳特性曲线 .....       | (218) |
| 9.5.3 | 锅炉与压力容器用钢的疲劳设计曲线 .....  | (221) |
| 9.5.4 | 影响低周疲劳的主要因素 .....       | (224) |
| 9.6   | 热疲劳 .....               | (224) |
| 9.6.1 | 热疲劳现象 .....             | (224) |
| 9.6.2 | 材料在承受热疲劳时的应力-应变曲线 ..... | (226) |
| 9.6.3 | 热疲劳与机械疲劳的区别 .....       | (227) |
| 9.6.4 | 影响热疲劳的主要因素 .....        | (227) |
| 9.6.5 | 热疲劳破坏的断口特征 .....        | (230) |
| 9.7   | 腐蚀疲劳 .....              | (231) |
| 9.7.1 | 腐蚀疲劳特性 .....            | (231) |
| 9.7.2 | 腐蚀疲劳的机理 .....           | (232) |
| 9.7.3 | 腐蚀疲劳裂纹的扩展 .....         | (234) |
| 9.7.4 | 影响腐蚀疲劳的主要因素 .....       | (235) |
| 9.8   | 接触疲劳 .....              | (236) |
| 9.8.1 | 接触疲劳的类型和破坏过程 .....      | (237) |
| 9.8.2 | 影响材料接触疲劳抗力的因素 .....     | (238) |
| 9.9   | 提高材料与机件疲劳强度的途径 .....    | (239) |
| 9.9.1 | 合理的疲劳设计 .....           | (239) |
| 9.9.2 | 高疲劳抗力材料的选择 .....        | (240) |
| 9.9.3 | 表面强化 .....              | (240) |

|                                                                      |              |
|----------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>第 10 章 合金元素在钢中的作用 .....</b>                                       | <b>(242)</b> |
| 10.1 合金元素在钢中的存在形式.....                                               | (242)        |
| 10.1.1 合金元素与钢中的碳相互作用,形成碳<br>化物存在于钢中.....                             | (242)        |
| 10.1.2 合金元素溶解于铁素体(或奥氏体)中,以<br>固溶体形式存在于钢中.....                        | (243)        |
| 10.1.3 合金元素与钢中的氮、氧、硫等化合,以氮化物、氧<br>化物、硫化物和硅酸盐等非金属夹杂物的形式存<br>在于钢中..... | (243)        |
| 10.2 合金元素对钢平衡组织的影响.....                                              | (244)        |
| 10.2.1 合金元素对钢临界温度的影响.....                                            | (244)        |
| 10.2.2 合金元素对钢共析点( <i>S</i> 点)位置的影响.....                              | (245)        |
| 10.2.3 合金元素对奥氏体相区大小的影响.....                                          | (245)        |
| 10.3 合金元素对热处理的影响.....                                                | (246)        |
| 10.3.1 合金元素对奥氏体化的影响.....                                             | (246)        |
| 10.3.2 合金元素对奥氏体分解转变的影响.....                                          | (246)        |
| 10.3.3 合金元素对马氏体转变的影响.....                                            | (248)        |
| 10.3.4 合金元素对回火转变的影响.....                                             | (249)        |
| 10.4 合金元素对氧化与腐蚀的影响.....                                              | (250)        |
| 10.5 合金元素对机械性能的影响.....                                               | (251)        |
| 10.5.1 金属材料的强化方法.....                                                | (251)        |
| 10.5.2 合金元素对正火(或退火)状态钢机械性能的影响<br>.....                               | (258)        |
| 10.5.3 合金元素对调质钢机械性能的影响.....                                          | (259)        |
| 10.6 合金元素对钢的工艺性能的影响.....                                             | (260)        |
| 10.6.1 合金元素对焊接性能的影响.....                                             | (260)        |
| 10.6.2 合金元素对切削加工的影响.....                                             | (262)        |
| 10.6.3 合金元素对塑性加工性能的影响.....                                           | (263)        |
| 10.6.4 合金元素对铸造性能的影响.....                                             | (263)        |
| 10.7 几种常用合金元素在钢中的作用.....                                             | (263)        |
| 10.7.1 硅在钢中的作用.....                                                  | (263)        |
| 10.7.2 锰在钢中的作用.....                                                  | (264)        |
| 10.7.3 铬在钢中的作用.....                                                  | (264)        |
| 10.7.4 镍在钢中的作用.....                                                  | (265)        |
| 10.7.5 钼在钢中的作用.....                                                  | (266)        |
| 10.7.6 钨在钢中的作用.....                                                  | (266)        |
| 10.7.7 钒在钢中的作用.....                                                  | (267)        |
| 10.7.8 钛在钢中的作用.....                                                  | (267)        |
| 10.7.9 铌在钢中的作用.....                                                  | (267)        |

|               |                           |              |
|---------------|---------------------------|--------------|
| 10.7.10       | 硼在钢中的作用 .....             | (268)        |
| 10.7.11       | 铝在钢中的作用 .....             | (268)        |
| <b>第 11 章</b> | <b>锅炉与压力容器常用钢材 .....</b>  | <b>(269)</b> |
| 11.1          | 锅炉与压力容器对钢材性能的要求 .....     | (269)        |
| 11.1.1        | 用以制造室温及中温承压元件的钢板与钢管 ..... | (269)        |
| 11.1.2        | 用以制造高温承压元件的钢管 .....       | (271)        |
| 11.2          | 锅炉与压力容器用钢的分类 .....        | (272)        |
| 11.2.1        | 工作温度低于 500℃ 的钢材 .....     | (272)        |
| 11.2.2        | 工作温度高于 500℃ 的钢材 .....     | (272)        |
| 11.3          | 碳素钢 .....                 | (272)        |
| 11.3.1        | 碳素钢中主要成分对性能的影响 .....      | (272)        |
| 11.3.2        | 碳素钢的分类 .....              | (274)        |
| 11.3.3        | 碳素钢的牌号及其应用 .....          | (275)        |
| 11.3.4        | 锅炉与压力容器常用的碳素钢 .....       | (280)        |
| 11.4          | 普通低合金结构钢 .....            | (283)        |
| 11.5          | 低合金热强钢 .....              | (293)        |
| 11.5.1        | 提高钢材热强性的合金化原理 .....       | (294)        |
| 11.5.2        | 锅炉与压力容器常用的低合金热强钢 .....    | (294)        |
| 11.6          | 不锈钢 .....                 | (301)        |
| 11.6.1        | 合金元素在不锈钢中的作用 .....        | (301)        |
| 11.6.2        | 铬不锈钢 .....                | (204)        |
| 11.6.3        | 铬镍不锈钢 .....               | (305)        |
| 11.7          | 低温用钢 .....                | (314)        |
| 11.7.1        | 合金元素在低温用钢中的作用 .....       | (314)        |
| 11.7.2        | 热处理对钢的低温机械性能的影响 .....     | (314)        |
| 11.7.3        | 低温用钢的分类 .....             | (315)        |
| 11.7.4        | 常用的低温用钢 .....             | (315)        |

# 第 1 章 绪 论

所谓锅炉用钢,通常是指制造锅炉本体所用的各类钢材。锅炉用钢主要包括锅筒、集箱、水冷壁、锅炉管束、过热器、再热器、省煤器、空气预热器、锅炉范围内管道、锅炉构架及阀门等零部件用钢。

根据锅炉各零部件的工作条件及其结构特性,锅炉用钢的主要特点为:

(1) 用钢量大。制造一台锅炉需要消耗大量的钢材。各种电站锅炉用钢量如表 1-1 所示。

表 1-1 各种电站锅炉的用钢量

| 锅炉蒸发量(t/h)          | 130    | 220    | 400         | 410     | 670     | 1 000   | 2 000    |
|---------------------|--------|--------|-------------|---------|---------|---------|----------|
| 每台锅炉用钢量(t)          | 约 520  | 约 900  | 1 270~1 540 | 约 1 300 | 约 3 600 | 约 4 000 | 约 19 600 |
| 每吨蒸发量的耗钢量(t/t)      | 约 4.0  | 约 4.09 | 3.18~3.85   | 约 3.17  | 约 5.37  | 约 4     | 约 9.8    |
| 产生每兆瓦电力的锅炉耗钢量(t/MW) | 约 20.8 | 约 18   | 10.2~12.3   | 约 13    | 约 18    | 约 13.3  | 约 32.7   |

对于工业锅炉,由于种类很多,即使是同一容量的锅炉,因结构不同,其耗钢量也就不同。一般按每小时产生一吨蒸汽量计算,其耗钢量约为 2.5~10t。

(2) 所用钢材的种类、品种、规格多。锅炉所用钢材的种类很多,包括碳素钢、低合金结构钢、低合金热强钢、中合金钢、高合金钢、不锈钢等,约有 50 多个钢种。锅炉用钢的品种有板材、管材、棒材以及各类型钢等,以 600MW 锅炉为例,所用板材量约占总用钢量的 10%,管材用量约 50%,型钢用量约 35%。此外,锅炉用钢的规格很多,例如所用板材中有薄板、中板、厚板、特厚板等;所用管材中有薄壁管、厚壁管、小口径管、大口径管、鳍片管、螺纹管等。

(3) 锅炉用钢的要求高。锅炉主要部件均为承压件,有的还要承受高温,如果钢材质量不好,会造成严重后果,将给人民生命和国家财产带来重大损害。因此,锅炉主要承压部件用钢均为专用钢,对其质量和检验均有严格的要求,以确保锅炉用钢使用安全。

所谓压力容器通常是指各种承受介质压力的贮存器。劳动部颁发的《压力容器安全技术监察规程》,从安全监察和方便管理的角度出发,规定了压力容器和一般常压容器的分界为:

- (1) 最高工作压力 $\geq 0.1\text{MPa}$ (不含液体静压力);
- (2) 内直径(非圆形截面指断面最大尺寸) $\geq 0.15\text{m}$ ,且容积 $\geq 0.025\text{m}^3$ ;
- (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。

同时满足以上三个条件的容器即属于压力容器,否则属于常压容器。

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加恶劣。特别是随着厚壁、超厚壁压力容器的增多和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)明显增加。

锅炉和压力容器的共同特点是具有爆炸的危险性,一旦发生事故,其破坏力是很大的,加之其中工作介质的特性,往往会伴随燃烧、中毒、窒息、腐蚀、烫伤的发生,对人身造成直接危害,对国家财产造成严重损失。所以世界各国都十分重视锅炉、压力容器的安全性,并对所发生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,并发表了调查报告。

对总计为 12 700 台制造中的压力容器,以及 100 300 台容器运行年记载的损坏事故进行分析,大致可以分为两类:灾难性破坏事故和损伤事故,其发生几率如表 1-2 所示。

表 1-2 压力容器破坏几率

|                   | 损伤事故                  | 灾难性事故                | 总计                    |
|-------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|
| 使用前(12 700 台)     | $5.5 \times 10^{-4}$  | $2.3 \times 10^{-4}$ | $7.8 \times 10^{-4}$  |
| 使用后(100 300 台运行年) | $12.5 \times 10^{-4}$ | $0.7 \times 10^{-4}$ | $13.2 \times 10^{-4}$ |

由表 1-2 可知,在制造过程中发生损坏的几率为 0.78‰,在使用过程中发生损坏的几率为 1.32‰。

对于 100 300 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 1-3 所示。

表 1-3 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 1-3 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 1-4。按照裂纹发生的位置分类,如表 1-5 所示。

表 1-4 裂纹的分类

| 序号  | 裂 纹 的 种 类      | 件数  | 占 118 件裂纹事故中的百分率(%) | 占全部事故中的百分率(%) |
|-----|----------------|-----|---------------------|---------------|
| 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          |

注: \* 所谓未确定系调查不充分所致。

表 1-5 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<br>定的        | 耐火材料损坏<br>产生的事故 |         |
| 锅炉壳体与管板联<br>接处的裂纹 | 宏观检查<br>泄漏   | 8(火)*<br>6(火) |               | 1(火)           | 1(火)            | 1(火)<br>1(火)    | 11<br>7 |
| 焊缝交叉部位和角<br>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      |
| 开孔处的放射状裂<br>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     |

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 1-4、表 1-5 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 1-6。

表 1-6 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           | 48              | 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 10 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 1-7。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 1-8 列出了化工压力容器在使用中破坏的一些例子。

表 1-7 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    |
| 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 |        |
| 百分率(%)  | 64.5 | 29.5 | 5.4 | 0.6 |     | 100    |

表 1-8 化工压力容器在使用中破坏的实例

| 材料                | 工作条件    | 设备及其破坏类型                                                     |
|-------------------|---------|--------------------------------------------------------------|
| 高合金钢<br>(如不锈钢等)   | 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。这类损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胆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。

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,其危害性将更加严重。例如,一台 300MW 电站锅炉,每停启一次,直接经济损失达几十万元。若停电 24h,将损失工业产值 3 000 多万元。同样,工业锅炉若因事故停炉所造成的损失也是很大的。造成事故停炉的原因是多方面的,根据国内 30 台高、中压锅炉的 356 次事故的调查分析表明,由于焊接质量造成的事故占 45.4%;设计制造原因占 26.4%;材料本身原因占 21.2%;阀门事故占 6.46%;由于错用钢号引起的爆管事故占 0.57%。

前苏联一台 300MW 电站锅炉,投入运行后半年多的时间内运行一直不正常,其中由于材料本身质量和焊接质量引起的占 60%;美国燃烧工程公司统计的锅炉事故中,过热器和再热器占 55%,其中 16%是由于材质不佳所致。

综上所述,由于各类压力容器和锅炉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。特别是近年来超高参数锅炉和高压、超高压容器的广泛使用,对锅炉和压力容器安全性的要求更加高了。为了确保锅炉和压力容器的安全工作,根据其各元部件的实际工作条件,选用适当的材料是十分重要的一环。另一方面,材料的性能往往限制了锅炉和压力容器技术的发展,从其技术发展过程中,可以明显看出,每当采用了一种性能更好的新材料,就可使锅炉和压力容器技术得到进一步提高。

## 第 2 章 金属材料的变形与再结晶

金属材料在承受外力时,会产生一定的变形,随着外力的增加,其变形将由弹性变形转变为塑性变形,直至断裂。金属材料的变形特性在工程技术上是十分重要的,人们就是利用这种特性,把材料制作成所要求的形状。

在工业生产中所用的各类金属材料,绝大部分都是多晶体组织,为了更好地理解多晶体材料在承载时的变形行为,必须首先了解单晶体材料的变形特性。

### 2.1 单晶体金属的变形

单晶体金属材料在正应力作用下的变形过程,如图 2-1 所示;在切应力作用下的变形过程,如图 2-2 所示。

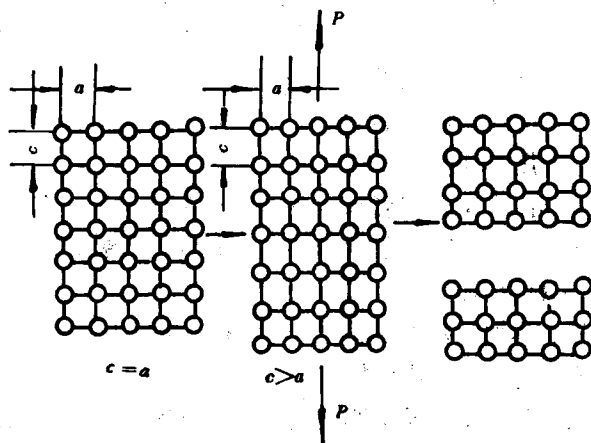


图 2-1 单晶体金属在正应力作用下的变形示意图

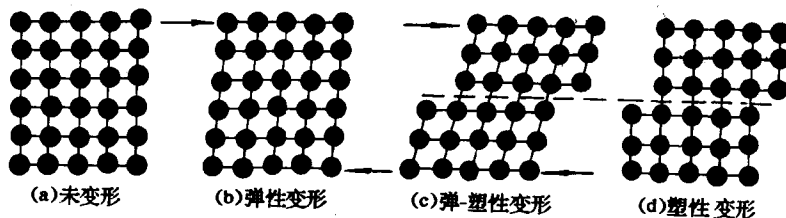


图 2-2 单晶体金属在切应力作用下的变形示意图

### 2.1.1 单晶体金属的弹性变形

众所周知,在晶体中相邻两原子间存在着吸引力和排斥力,金属原子间的结合正是这两种力相互作用的结果,通常认为原子间的吸引力是金属正离子与自由电子相互作用形成的,原子间的排斥力则是由同性电荷(正离子与正离子、电子与电子)相互作用所造成的。当吸引力与排斥力之和为零时,原子即处于平衡位置,此时两相邻原子间的距离即为晶格常数。

当金属受到拉伸正应力作用时,相邻两原子间的距离增大(参看图2-1),使两原子间的吸引力增大,排斥力降低,原子力图恢复到原先的平衡位置,当外力与原子间的作用力相互平衡时,原子便稳定在新的平衡位置,即金属产生了一定的变形量。在外力去除后,原子间的吸引力,使原子回复到原始平衡位置,变形消失,这就是弹性变形。

同理,当金属受到切向应力时,相邻两原子间的距离也会发生改变,晶格歪曲(参看图2-2),在去除外加切应力后,晶格也能恢复原状。

金属因内部原子偏离平衡位置所产生的内力就是弹性力。归纳起来,金属的弹性变形主要有下列特点:

- (1) 具有可逆性:即去除外力后,变形便完全消失。
- (2) 金属的弹性变形量很小,一般约在1%以下。
- (3) 金属在弹性变形时,应变与应力成正比,比例常数即为弹性模量。

金属的弹性模量值愈大,在相同应力下产生的弹性变形愈小。因此,弹性模量表明了金属对弹性变形的抗力。

一般来说,弹性模量  $E$  与原子半径  $r$  之间存在下列关系

$$E = \frac{k}{r^m}$$

式中  $k, m$ ——常数,  $m > 1$ 。这表明弹性模量随金属原子半径增大而减小,亦即随原子间距增大而减小。

由于在晶体的不同结晶方向上原子间距不相同,则在原子间距较小的结晶方向上,弹性模量值较高;反之,则较小。这表明单晶体金属的弹性变形具有各向异性的特征。表2-1列出了单晶体金属弹性模量的最大值与最小值。

表 2-1 一些常用金属的弹性模量

| 晶格类型 | 金属 | 正弹性模量 $E(\text{MPa})$ |         |         | 切变模量 $G(\text{MPa})$ |         |         |
|------|----|-----------------------|---------|---------|----------------------|---------|---------|
|      |    | 单晶体                   |         | 多晶体     | 单晶体                  |         | 多晶体     |
|      |    | 最大值                   | 最小值     |         | 最大值                  | 最小值     |         |
| 面心立方 | Al | 76 100                | 63 700  | 70 300  | 28 400               | 24 500  | 26 100  |
|      | Cu | 191 100               | 66 700  | 129 800 | 74 500               | 30 600  | 48 300  |
|      | Au | 116 700               | 42 900  | 78 000  | 42 000               | 18 800  | 27 000  |
|      | Ag | 115 100               | 43 000  | 82 700  | 43 700               | 19 300  | 20 300  |
| 体心立方 | Fe | 272 700               | 125 000 | 211 400 | 115 800              | 59 900  | 81 600  |
|      | W  | 384 600               | 384 600 | 411 000 | 151 400              | 151 400 | 160 600 |
| 六 方  | Mg | 50 600                | 42 900  | 44 700  | 18 200               | 16 700  | 17 300  |
|      | Zn | 123 500               | 34 900  | 100 700 | 48 700               | 27 300  | 39 400  |