

# 压力容器

## 国外技术进展

(上册)

通用机械研究所

国外化工与炼油设备发展概况之四

# 压 力 容 器

## —— 国 外 技 术 进 展

(上 册)

全国化工与炼油机械行业技术情报网

上海化工学院

内蒙古工学院

天津大学

浙江大学

广东化工学院

华东石油学院

成都工学院

哈尔滨锅炉厂

河北工学院

甘肃工业大学

上海化工设计院

通用机械研究所

联 合 编 写

# 毛 主 席 语 录

我们必须打破常规，尽量采用先进技术，在一个不太长的历史时期内，把我国建设成为一个社会主义的现代化的强国。

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

对于外国文化，排外主义的方针是错误的，应当尽量吸收进步的外国文化，以为发展中国新文化的借镜；盲目搬用的方针也是错误的，应当以中国人民的实际需要为基础，批判地吸收外国文化。

## 出 版 说 明

遵照伟大领袖毛主席关于“**洋为中用**”的教导，在批林整风运动的推动下，为了了解国外压力容器近年来技术发展概况，我们根据全国化工与炼油机械行业技术情报网会议的决定，由东方锅炉厂、上海锅炉厂、武汉锅炉厂、北京化工学院、太原工学院、南京化工机械厂、浙江化工学院、天津轻工业学院、南京化工学院、上海化工机修总厂、山东化工学院、贵阳化工机械厂、自贡高压容器厂等22个单位，于1973年初共同翻译了约一百篇文章。在此基础上，由上海化工学院、内蒙古工学院、天津大学、浙江大学、广东化工学院、华东石油学院、成都工学院、哈尔滨锅炉厂、河北工学院、甘肃工业大学、上海化工设计院及通用机械研究所，于1973年5月至9月组织编写了这份“压力容器——国外技术进展”，内容涉及压力容器的选材、设计计算、制造、检验及事故分析等方面，共分十章。最后由哈尔滨锅炉厂及通用机械研究所加以整理。

应该指出：资本主义国家出版的一些技术资料，由其社会制度所决定，必然会反映资本主义社会的腐朽与黑暗。例如，资本主义国家的规范，其繁琐的条文成为对工人实行管、卡、压的阶级压迫的工具，这是由于它是为资本家榨取利润服务的本质所决定的。因此，我们必须遵循伟大领袖毛主席关于“**批判地吸收外国文化**”的有关教导，坚持“**自力更生**”、“**艰苦奋斗**”的方针，走自己工业发展道路。

由于我们学习马列主义和毛主席著作不够，水平有限，资料搜集不全，时间较短，未能进行深入分析批判，会有错误和不妥之处，希读者批评指正。

编 者

1974.1.

# 目 录

|                                               |      |
|-----------------------------------------------|------|
| 第一章 国外压力容器规范的概况 .....                         | (1)  |
| 1.1 关于压力容器及其规范方面的国际活动和近期科研动向 .....            | (1)  |
| 1.1.1 概述 .....                                | (1)  |
| 1.1.2 国际标准组织 ISO 关于压力容器规范的近期活动 .....          | (3)  |
| 1.1.3 美国压力容器研究委员会 PVRC 的科研动态 .....            | (6)  |
| 1.2 国外几个压力容器规范的介绍 .....                       | (12) |
| 1.2.1 美国ASME压力容器规范的历史简述 .....                 | (12) |
| 1.2.2 美国ASME锅炉及压力容器规范第Ⅷ篇第1分篇的内容简介 .....       | (14) |
| 1.2.3 美国ASME锅炉及压力容器规范第Ⅷ篇第2分篇的特点及有关方面的反映 ..... | (15) |
| 1.2.4 其它几个国家压力容器规范的概述 .....                   | (19) |
| 1.2.5 其它 .....                                | (25) |
| 1.3 国外几个压力容器规范的许用应力(安全系数) .....               | (27) |
| 1.4 ASME锅炉及压力容器规范第Ⅷ篇第2分篇有关应力分析等的简介 .....      | (38) |
| 1.4.1 概述 .....                                | (38) |
| 1.4.2 应力分类 .....                              | (38) |
| 1.4.3 应力强度 .....                              | (40) |
| 1.4.4 应力强度的限制 .....                           | (40) |
| 1.4.5 应力强度限制的分析 .....                         | (41) |
| 1.4.6 疲劳分析 .....                              | (44) |
| 1.4.7 对材料的一些检验要求 .....                        | (45) |
| 1.4.8 对焊缝的一些检验要求 .....                        | (45) |
| 1.4.9 设计例题 .....                              | (45) |
| 1.4.10 讨论 .....                               | (49) |
| 1.5 ISO 推荐规范内容简介 .....                        | (50) |
| 1.5.1 《压力容器构造规则》草案概要 .....                    | (50) |
| 1.5.2 适用范围 .....                              | (52) |
| 1.5.3 关于材料的规定 .....                           | (52) |
| 1.5.4 关于设计的规定 .....                           | (53) |
| 1.5.5 其它 .....                                | (54) |
| 1.6 结束语 .....                                 | (55) |
| 参考文献 .....                                    |      |
| 第二章 压力容器的疲劳设计 .....                           | (60) |
| 2.1 概论 .....                                  | (60) |

|                                  |       |
|----------------------------------|-------|
| 2.1.1 疲劳问题的提出                    | (60)  |
| 2.1.2 高循环疲劳曲线——持久限               | (61)  |
| 2.1.3 低循环疲劳曲线——应变范围              | (62)  |
| 2.2 几个影响因素                       | (64)  |
| 2.2.1 平均应力对疲劳寿命的影响               | (64)  |
| 2.2.2 平均应变对疲劳寿命的影响               | (68)  |
| 2.2.3 多向应力状态下的计算                 | (70)  |
| 2.2.4 变应力振幅情况下的累积破坏              | (71)  |
| 2.3 缺口对疲劳状态的影响                   | (72)  |
| 2.3.1 应力集中系数概念                   | (72)  |
| 2.3.2 疲劳强度减低系数                   | (73)  |
| 2.3.3 焊接缺陷对疲劳的影响                 | (77)  |
| 2.3.4 裂缝增长速率                     | (78)  |
| 2.4 带接管压力容器疲劳试验研究                | (81)  |
| 2.4.1 接管连接及焊缝型式的影响               | (81)  |
| 2.4.2 接管方位的影响                    | (83)  |
| 2.4.3 几何参数的影响                    | (84)  |
| 2.5 压力容器的疲劳设计                    | (85)  |
| 2.5.1 ASME规范关于疲劳分析与设计的规定         | (85)  |
| 2.5.2 英国标准 B.S.1515 中有关的疲劳分析与计算  | (88)  |
| 2.5.3 ASME 与 B.S.1515 疲劳计算的比较    | (89)  |
| 结语                               |       |
| 附录 1 循环载荷下塑性区的应力——应变关系           | (92)  |
| 附录 2 断裂延性与断面收缩率关系式               | (93)  |
| 附录 3 算法绘制疲劳曲线                    | (94)  |
| 附录 4 平均应力对低循环疲劳的影响               | (96)  |
| 附录 5 高强度钢交变应力幅度 $\sigma_N$ 的修正   | (97)  |
| 附录 6 多向应力状态下应力与应变的关系             | (99)  |
| 附录 7 确定疲劳计算的某些试验及推导              | (101) |
| 附录 8 B.S.1515 疲劳寿命方程式            | (102) |
| 参考文献                             |       |
| 第三章 压力容器的蠕变问题                    | (106) |
| 3.1 概述                           | (106) |
| 3.2 压力容器在蠕变情况下的应力应变关系            | (106) |
| 3.2.1 材料单向拉伸蠕变试验                 | (106) |
| 3.2.2 变应力下的蠕变理论                  | (108) |
| 3.2.3 压力容器在定常压力和定常的温度作用下的蠕变方程式   | (110) |
| 3.3 厚壁圆筒在定常情况下(内压和温度不随时间变化)的蠕变计算 | (111) |
| 3.3.1 基本假设和基本方程的推导               | (112) |

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| 3.3.2 计算 .....                | (115) |
| 3.3.3 厚壁筒的破坏 .....            | (119) |
| 3.3.4 设计公式 .....              | (122) |
| 3.3.5 以扭转蠕变数据为基础的厚壁圆筒蠕变 ..... | (124) |
| 3.4 薄壳轴对称问题蠕变计算的有力矩理论 .....   | (127) |
| 3.4.1 基本方程的推导 .....           | (127) |
| 3.4.2 计算方法 .....              | (131) |
| 3.4.3 计算实例 .....              | (136) |
| 3.5 带接管压力容器的蠕变问题 .....        | (139) |
| 3.5.1 接管的影响 .....             | (139) |
| 3.5.2 焊缝的影响 .....             | (141) |
| 3.6 计算举例 .....                | (141) |
| 3.6.1 蠕变常数的决定 .....           | (142) |
| 3.6.2 应力分布的计算 .....           | (142) |
| 3.6.3 蠕变应变的计算 .....           | (146) |
| 参考文献                          |       |
| 第四章 压力容器的脆裂问题 .....           | (150) |
| 4.1 压力容器的塑性破裂与脆性破裂 .....      | (150) |
| 4.2 塑—脆性转变温度 .....            | (151) |
| 4.3 止裂试验 .....                | (153) |
| 4.4 断裂分析图 .....               | (154) |
| 4.5 线弹性断裂力学的第一模型 .....        | (155) |
| 4.6 线弹性断裂力学的其它模型 .....        | (158) |
| 4.7 塑性区的修正 .....              | (160) |
| 4.8 线弹性断裂力学的第二模型 .....        | (163) |
| 4.9 材料断裂韧性的测定 .....           | (166) |
| 4.10 带有表面裂纹的压力容器爆破试验 .....    | (167) |
| 4.11 全面屈服断裂力学的兴起 .....        | (171) |
| 4.12 COD法的基本理论 .....          | (173) |
| 4.13 COD值的测定 .....            | (175) |
| 4.14 临界裂缝深度 .....             | (179) |
| 4.15 裂缝发展速度与容器寿命的估计 .....     | (183) |
| 4.16 编者结语 .....               | (186) |
| 附录1 线弹性断裂力学的第一模型 .....        | (188) |
| 附录2 有限宽度板中的穿透性裂纹 .....        | (192) |
| 附录3 第二类椭圆积分的计算方法和表 .....      | (194) |
| 附录4 线弹性断裂力学第二模型的基础 .....      | (196) |
| 附录5 COD法的基本公式 .....           | (199) |
| 参考文献                          |       |

|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 第五章 高压及超高压容器的设计 .....          | (206) |
| 5.1 概述 .....                   | (207) |
| 5.2 高压及超高压容器的型式及其设计理论 .....    | (207) |
| 5.2.1 无预应力的厚壁容器 .....          | (207) |
| (1) 单层厚壁圆筒 .....               | (207) |
| (2) 多层厚壁圆筒 .....               | (211) |
| (3) 单层球形容器 .....               | (213) |
| (4) 多层球形容器 .....               | (214) |
| 5.2.2 有预应力的厚壁容器 .....          | (215) |
| (1) 双层缩套配合的圆筒形容器 .....         | (215) |
| (2) 多层缩套配合的圆筒形容器 .....         | (219) |
| (3) 单层自增强容器 .....              | (222) |
| (4) 自增强与多层圆筒相结合 .....          | (235) |
| (5) 球形容器的自增强 .....             | (237) |
| 5.3 自增强处理 .....                | (239) |
| 5.3.1 超应变度的选择及控制方法 .....       | (239) |
| 5.3.2 自增强处理的方法 .....           | (242) |
| (1) 液压法 .....                  | (242) |
| (2) 机械法(型压法) .....             | (242) |
| 5.4 实际材料性能对自增强理论的影响 .....      | (248) |
| 5.4.1 应变硬化 .....               | (249) |
| 5.4.2 鲍辛格(Bauschinger)效应 ..... | (249) |
| 5.4.3 应变时效 .....               | (250) |
| 5.5 超高压容器的疲劳强度 .....           | (251) |
| 5.5.1 交变应力 .....               | (251) |
| 5.5.2 自增强处理对疲劳强度的影响 .....      | (252) |
| 附录1 初始屈服压力的计算 .....            | (256) |
| 附录2 自增强压力的计算 .....             | (257) |
| 附录3 自增强处理时的应力 .....            | (259) |
| 附录4 残余应力的计算 .....              | (263) |
| 附录5 弹性区的径向位移 .....             | (265) |
| 参考文献                           |       |

# 第一章

## 国外压力容器设计规范的概况

### 1.1 关于压力容器及其规范方面的国际活动和近期科研动向

#### 1.1.1 概述

为了避免锅炉和压力容器发生破坏事故,若干年来,各国多制订有工程规范,并有其关于检验方法和技术鉴定的规定。最近几年,由于工程技术的发展,几乎使压力容器工程在学术上成为一门独立的学科,在工业上成为一个单独的部门,因而对于压力容器方面的学术活动已不再局限于某一国家内部。例如国际焊接学会<sup>①</sup>在几年前即已成立各种专题的专门委员会,其中第Ⅺ委员会的活动涉及到压力容器及其管道的各个方面,1968年 Bottema<sup>〔1〕</sup>曾向这一委员会提交一个关于压力容器设计基础的文件。第V委员会曾于1968年制订了关于焊缝检验的文件,其中包括射线检验、超声波检验以及磁粉检验等无损检验方法的规定<sup>〔2〕</sup>。又如国际标准组织<sup>②</sup>ISO的第11及第17技术委员会<sup>③</sup>专门从事于有关压力容器设计以及材料规格要求标准的起草工作<sup>〔3、4、5〕</sup>。(关于ISO的近期活动情况,详见1.1.2。)

1969年9月29日至10月2日在荷兰 Delft 城由美国机械工程师协会<sup>④</sup>ASME 的压力容器分部<sup>⑤</sup>与荷兰皇家工程师学会<sup>⑥</sup>联合召开了关于压力容器工艺的第一次国际会议,参加的计有阿根廷、比利时、加拿大、捷克斯洛伐克、法国、联邦德国、意大利、日本、荷兰、瑞典、英国和美国等二十五个国家的大专院校、工程学术团体以及有关工厂的代表700余人<sup>〔8〕</sup>。会议期间,宣读和讨论的论文计108篇,并由有关方面作了关于压力容器最近动态的报告四篇,介绍了各国锅炉及压力容器设计准则共七篇;会议内容已汇总成为论文集三卷<sup>〔6〕</sup>及小册子一本<sup>〔7、8〕</sup>,由ASME在美国纽约予以出版。

1970年5月10日至15日在英国苏格兰 Aviemore 城由国际高压委员会<sup>⑦</sup>召开了第三次国际高压会议,重点讨论了工程材料在高压下的性能;后于1971年由英国机械工程师学会<sup>⑧</sup>将会上宣读和讨论的而未经其他科技期刊发表的部分论文共29篇,其中包括关于高压容器筒体、封头、蠕变、内部衬里以及密封等方面论文五篇,集成专册,取名《高压下的工程固体材料》<sup>〔9〕</sup>在英国出版。

① International Institute of Welding, 简称 IIW/IIS

② International Standards Organization, 简称 ISO

③ Technical Committees 11 and 17, 简称 TC-11, TC-17

④ American Society of Mechanical Engineers, 简称 ASME

⑤ Pressure Vessel Division

⑥ Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 简称 KIVI

⑦ International Committee for High Pressure

⑧ Institution of Mechanical Engineers, 简称 IME

一些国家设有从事于压力容器技术工作的专门学术团体,有的是民间组织,有的属于国家机关。例如美国压力容器研究委员会<sup>①</sup> PVRC 就是一个专门从事于压力容器科研工作的民间组织,该委员会于 1945 年成立后<sup>[10]</sup>,协调并组织包括加拿大在内的有关方面,参加关于压力容器的设计、材料和制造等方面的科学研究工作。其研究成果除分别发表于各种科技期刊杂志<sup>②</sup>以外,还经常以焊接研究协会<sup>③</sup>会报<sup>④</sup>的形式发行单行本<sup>[11、12、13、14、15、16、]</sup>。这些研究结果是作为 ASME 锅炉及压力容器委员会<sup>⑤</sup>制订及修订锅炉及压力容器规范<sup>⑥</sup>时的理论和实验依据。(关于 PVRC 的科学研究动态,详见 1.1.3。)

英国焊接研究协会<sup>⑦</sup>曾对压力容器接管开孔的非整体补强,尤其是对疲劳强度进行了详细的研究<sup>[17]</sup>。这些研究成果供英国标准学会<sup>⑧</sup>制订及修订压力容器规范<sup>⑨</sup>的有关部分时应用的。

ASME 锅炉及压力容器委员会负责制订及修订锅炉及压力容器规范;该项规范自 1914 年第一次颁发锅炉规范以后,逐年有所补充和修订。1925 年增添了非直接火压力容器规范,这就是现在 ASME 规范第 VIII 篇压力容器规范的前身。近十余年来 ASME 规范基本上每隔三年再版更新一次,现行有效版本是 1971 年版,共十一篇,十四卷<sup>⑩</sup>。ASME 规范内容比较完整,而且修订及时,各国比较重视。(关于 ASME 规范的历史演变,参见 1.2.1。)

ASME 基本上每年都有专题讨论的学术会议。在 1927—1959 年间的历届学术会议中所提的关于压力容器及其管道设计的论文,已由 ASME 锅炉及压力容器委员会择其重要的计 65 篇,分成开孔、螺栓法兰联接、封头、壳体、管道、材料与制造、热应力与疲劳、载荷与支座、外压及其他等十个部分,汇总成册,取名《压力容器及管道的设计》<sup>[18]</sup>,于 1960 年在美国纽约出版。最近于 1971 年 5 月 10 日至 12 日曾在美国旧金山由 ASME 压力容器及管道分部<sup>⑪</sup>召开压力容器及管道的专题学术会议,后由 ASME 将会上提出的论文 64 篇汇编成论文集,分上下两卷<sup>[19]</sup>,于 1971 年在纽约出版。

英国 IME 的自动机分部<sup>⑫</sup>也曾于 1969 年 9 月 3 日至 5 日在英国 Brighton 城召开关于部件的安全与失效问题的专题学术会议,不少论文涉及到锅炉及压力容器的安全及可靠性<sup>[20]</sup>。最近 IME 也增设了压力容器的分委员会<sup>⑬</sup>。

关于压力容器规范的拟订工作,有的由国家的专门机构担任,例如苏联国家锅炉及起重

---

① Pressure Vessel Research Committee, 简称 PVRC

② 例如 Welding Journal, Research Supplements

③ Welding Research Council, 简称 WRC

④ WRC Bulletins

⑤ ASME Boiler and Pressure Vessel Committee

⑥ ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 简称 ASME 规范

⑦ British Welding Research Association

⑧ British Standards Institution, 简称 BSI

⑨ 英国规范 BS1500 及 1515, 参见 1.2.4 (一)

⑩ ASME 锅炉及压力容器规范, 1971 年版, 共十一篇, 十四卷: I. 动力锅炉; II A. 钢铁材料; II B. 有色金属材料; II C. 焊条、电极及填充金属; III. 原子能发电厂组成件; IV. 供热锅炉; V. 无损检验; VI. 供热锅炉维护与操作建议性规范; VII. 动力锅炉维护建议性规范; VIII-1. 压力容器规范; VIII-2. 压力容器另一种规范; IX. 焊接评定; X. 玻璃钢压力容器; XI. 原子能反应堆冷却剂系统现场检验规范

⑪ Pressure Vessels and Piping Division

⑫ Automotive Division

⑬ Pressure Vessel Section Committee

运输设备监察委员会<sup>①</sup>及苏联化工机械研究院<sup>②</sup>；也有在国家标准局或由国家承认的民间标准学会中设立的关于压力容器的专门委员会从事压力容器规范的拟订工作，例如英国 BSI 中即设有压力容器工业标准委员会<sup>③</sup>；不少国家则由民间学术团体承担压力容器规范的拟订工作，再由中央或地方的立法机关通过施行，例如美国的 ASME。压力容器规范在有些国家如澳大利亚、奥地利、加拿大、芬兰、联邦德国、荷兰、印度、意大利、挪威和瑞士等，本身即有其法律地位<sup>[21]</sup>，但有些则否<sup>④</sup>。

关于压力容器的管理权以及在安装使用之前的批准权，不少国家是属于国家专门设立的机关，但也有属于国家所指定或承认的民间组织。所制订的规定，在内容上虽属大同小异，但在细节上往往有不少的出入。

总的说来，由于原子能工业、石油工业、化学工业、空间技术以及水下输送技术等方面的发展，这些工业都涉及到压力空器，其容量及压力范围不断扩大，因而对压力容器的设计、材料、制造、检验以及使用等各方面都不断提出更高的要求。

### 1.1.2 国际标准组织 ISO 关于压力容器规范的近期活动

近年来，由于有关工业对压力容器要求的提高，由于压力容器采用新材料、新工艺、新设计方法以及新检验技术的发展，必然地会导致对压力容器设计及制造规范及有关的材料规范，在范围上要求扩大，在内容上要求深入的趋势。而各国为了适应工业上的这些需要，都不可避免地要经常更新其已有的规范或重新制订新的规范。另外为解决压力容器出口贸易方面的困难，设在日内瓦的国际标准组织ISO的第11及第17技术委员会TC-11及TC-17，近几年来在草拟压力容器设计及制造规范以及压力容器所需要的钢铁材料或制品二种推荐规范<sup>⑤</sup>的工作，已大为加快。

ISO 是为了制订国际规范而于1947年组织设置的国际性机构。目前有65个国家参加，其机关本部设在瑞士日内瓦市。ISO 的主要活动是在各技术委员会中审议规范草案。现在ISO 按专题项目分别设置的技术委员会共约 120 余个<sup>[3]</sup>。

第11技术委员会TC-11是为了制订锅炉的国际规范而于1953年设置的；经过多次的分委员会及TC-11总会的讨论，推荐规范 DR851号《固定式锅炉构造规则》<sup>⑥</sup> 草案的起草工作已于1966年完成。随后，TC-11又同意将其范围扩大以包括非直接火压力容器<sup>[22]</sup>，于1966年秋开始着手制订压力容器的国际规范。1967年10月在美国纽约市召开了TC-11总会后，各分委员会即分头展开活动，对推荐规范草案进行审议；并以这些审议的结果为基础，将上述草案加以修改成为《压力容器构造规则》<sup>⑦</sup> 草案，于1968年10月向各成员国分发，征求意见。经过一系列的在巴黎、海牙、杜塞尔多夫等地召开的分委员会之后，又在1969年10月在里斯本进行工作小组的会议，根据这些会议的结果，对第一次草案作出了修正稿，于1969年12月送交各成员国，再度征求意见。1970年4月，以上述二稿草案为基础，在斯德哥尔摩召开了第五次

① КОТЛОНАДЗОР

② НИИХИММАШ

③ Pressure Vessel Industry Standards Committee

④ 参见1.2.5

⑤ Recommendation

⑥ «Rules for the Construction of Stationary Boilers»

⑦ «Rules for the Construction of Pressure Vessels»

TC-11的总会<sup>〔3〕</sup>。

在斯德哥尔摩会上,关于其适用范围方面决定暂时以A类容器(即高质量容器)为对象,关于国内规范的注册制度方面(参阅ISO文件<R831>1968),会上意见分歧相持不下,最后决定在这一推荐规范中不作规定。这次会议的审议结果,经过干事国美国的整理,成为最终草案稿,在各成员国传阅,作出最后修改送ISO本部审批,最后于1971年,草案稿在ISO理事会等机构中得到通过批准,正式成为TC-11的推荐规范《压力容器构造规则》<sup>〔3〕</sup>。

关于TC-11的组织情况大约如下:TC-11委员会的干事是美国,下设三个分委员会:材料分委员会的干事是联邦德国,设计分委员会的干事是法国,焊接分委员会的干事是荷兰。所有的审议工作事实上都是在这些分委员会中进行的。最近,在分委员会之下又按专题设立不同的工作小组,例如设计分委员会之下,就有18个左右的这种工作小组<sup>〔3〕</sup>。

关于ISO/TC-85原子能压力容器工作组的情况,参阅文献<sup>〔4〕</sup>。

ISO/TC-11《压力容器构造规则》推荐规范的主要内容见1.5。Wilson及Thomas<sup>〔23〕</sup>曾将ISO/TC-11推荐规范与ASME规范第Ⅷ篇第2分篇在许用应力方面作了一些比较。Ferrari<sup>〔24〕</sup>曾根据ISO/TC-11推荐规范提出了今后科研方向以进一步保证容器的质量。

为了解决压力容器国际贸易中的问题,现在ISO的各成员国家都有修改本国的压力容器规范以使其尽量与国际规范相一致的愿望。并有这种趋向,各国修订或更新各自的压力容器规范时,都将以ISO的推荐规范作为最低要求,并以其作为提供设计规范的文件。

ISO推荐规范的另一作用在于对压力容器的有关方面(指用户、制造厂和检验权力机关等)提出明确的职责范围,因而对于按ISO规格制造的压力容器定货的检验工作必将有所简化<sup>〔5〕</sup>。

ISO/TC-17的第10工作小组的工作主要是提供关于制造压力容器所需的钢铁材料或制品规格的最后文件,特别是求得二十余钢种的板材、管材及锻件的高温性能。工作小组已委托干事国英国主办这项工作。成员国家已将有关高温的保证应力值以及应力破坏试验数据提交英国。在英国由英国钢铁公司<sup>①</sup>所领导的英国钢铁研究协会<sup>②</sup>承担这项复杂而繁重的按议定的“直线回归法”<sup>③</sup>分析数据的工作,并由此得到每一钢种在适当温度范围内的性能数据,其中包括碳钢、碳锰钢及奥氏体不锈钢,这一项工作正在进行之中<sup>〔5〕</sup>。

在最后的ISO材料文件中包括了由统计法得到的高温保证应力数值的最低值,并说明及证实高温最低屈服强度或保证应力性质的步骤。除非钢厂能提供确能满足ISO证实性能步骤的充实的试验数据,否则,按ISO推荐标准或按与ISO一致的国家标准进行生产的钢厂必须对其产品进行高温下试验,向用户证实其制品能合乎规定最低值的要求。英国钢铁制品标准BS,现在正在增添ISO方法所得到的性能数值。

利用压力容器材料在实验室中拉伸试验的结果,当作估计设计应力准则的基础的概念,是值得深入评论的。但是从目前的趋势来看,可以预言,在最近期间不会对试验方法方面或是对设计应力准则方面有任何比较显著的改变。英国已提出用扭转试验作为基础,但是现在尚缺乏更多数据;有人估计,要提供足够的数据供设计应用约需十年时间。国际上有关方面对取消蠕变应变准则的呼声较高,这也是由于现在还缺少数据,且因为一般认为在蠕变范围

① British Steel Corporation

② British Iron and Steel Research Association

③ Linear Regression Methods

内破坏应力仍然是有控制性的准则。由碳钢的现存有限数据来看,确是如此。并且蠕变应变对于由延性材料制成的容器来说是较不重要的,因为它可以允许有一定程度的变形。尽管要积累各种材料在 100,000 小时内导致 1 % 蠕变应变的可靠数据为时尚早,但是在国际上比较一致的意见还是倾向于保留以产生 1 % 蠕变应变的应力值作为设计准则。

对于 ISO 来讲,选择合适的所谓“安全系数”确是一件难事;有人认为设计应力的级别一般不应低于过去已经成功地采用的级别之下,但也有人要求予以改变。若将各国对相似材料的许用应力作一次比较,即可看出确有一定的分歧。其原因当然是由于各国用材的化学成份、热处理条件、截面大小、试验技术、数据分析方法以及所选安全系数等的不同所引起的。然而由于利用 ISO 步骤所得到的材料性质有较大的可靠性,对于 ISO 材料的高温性能而言,不论安全系数如何选定,采用这些数据<sup>[5]</sup>,都可以较以往任何时候有更大的可靠性。

现在 ISO 正在考虑用材性能的另一个重要方面的问题,各国规范中所规定的最低材料性能数值与热处理条件有关,但是目前在设计阶段极少或甚至不提在制造时热处理对这些性能的影响。一般仅对厚壁容器或者是单独的热处理次数较多的情况下才予考虑。任何这种性质上的降低一向都是用安全系数来概括的。但是现在已普遍承认,碳钢在 580—620℃ 范围内消除应力后,抗拉强度数值的降低是难以用安全系数来概括的。若能在 ISO 压力容器推荐规范的要求中增加考虑到关于“参考”性能与“制造”性能之间差异的内容,这样对采用的设计应力将更具有较大的可靠性。

ISO 在制订压力容器设计规则的推荐规范时,曾评述了在现在实践中的经验,而特别对主要国家的规范如英国的 BS1515<sup>[46]</sup>、美国的 ASME 规范第 VIII 篇<sup>[37、42]</sup>以及联邦德国的 AD 规范<sup>[50]</sup>等予以深入的考虑,这一比较,发现了各国在设计方法上的重大差别。这些差异不可避免地会导致各国意见的分歧。例如对承受外压的部件的设计,大多数成员国偏向同意以联邦德国的 AD 规范为依据的欧洲大陆各国的实践,而不同意以 BS1515 及 ASME 第 VIII 篇为依据的英美方法。实际上设计工作者早已体会到这两方面的方法在实际使用中都各有其局限性。现在英国方面正在草拟另一种规则,以便提交 ISO 承认<sup>[5]</sup>。

制订法兰的设计规则也碰到一定的困难。这是由于在现存的各国规范的规则中,在应用时,都各有其实际上的局限性,国际上都认为现在迫切需要对法兰设计开展有关的科研工作。

设计换热器管板是目前存在的另一问题。用现存规范的规则设计,在高压高温的情况下往往得到过厚的管板。一般认为按这种设计方法,由于温度梯度所造成的热应力可能是极高的。目前 ISO 正开展工作,对于有显著温度应力的情况草拟合理设计方法的方案<sup>[5]</sup>。

现在 ISO 已提出了开孔及接管补强方法的建议,包括等面积方法,但也注意到有时可能导致设计补强大于实际所需要的补强,故在制造厂、用户以及检验权力机关同意的情况下,也允许用其他设计方法。在 ISO 压力容器推荐规范的附录中,包括对于设计章节正文中未曾包括的载荷的设计要求;也包括大塑性变形的准则以及累积的破坏、屈曲与疲劳;叙述了应力分类、弹性分析的极限;也给出了仅承受液体静压载荷的接管及开孔的极限应力集中系数<sup>[3、5]</sup>。

关于材料与材料的焊接性能、焊前及焊后热处理、许用应力、质量控制及对实际使用的适应性等等之间的理想关系是一个比较混乱的问题。这也是各种设计方法所以相互差异的原因。在 ISO 压力容器推荐规范中关于加工工艺及构造<sup>①</sup>方面所提的建议,在情况趋于合理化

① Workmanship and Construction

方面,与以往相比确有进一步的改变。根据化学分析及规定的最低屈服强度,将材料列成四组,每组规定一个厚度数据,超过了这一厚度即要求焊后热处理。属于简单几何形状的容器可视为例外。这一建议对于规定在焊缝处要作100%无损检验的容器或者对于指定仅需作10%无损检验的特殊容器,已充分利用了许用应力。对于后一种情况是按照材料、材料的厚度以及使用温度作出决定的。也叙述了可以规定减低设计应力值的特殊容器,这是按照材料、材料的厚度、缺口延性以及无延性转变温度<sup>①</sup>的范围决定的。在ISO推荐规范文件中,对完全焊透的对接焊缝要求无损检验时均指应作射线检验,但也允许作超声波检验,条件是在制造厂、用户以及检验权力机关对所采用的技术、步骤以及结果解释均相同意,且对由超声波检验显示出来的有问题的关键部件,再作射线检验<sup>[5]</sup>。

ISO《焊接工艺及生产检验规则》<sup>②</sup>以及对焊工及操作者的评定与大部分国家的现行实践大体相同。对每一容器都要有焊接试板,除非由制造厂、用户以及检验权力机关相互同意下则可不作。ISO对由射线检验所暴露的焊接缺陷的可以接受的标准,与英国的实践比较一致。水压试验的要求,在ISO推荐规范中是难作规定的。水压试验的主要目的是对容器本身施加一次规定的超载,以便确定容器强度的可靠性。对于按高温操作条件设计的容器,要在常温下进行水压试验,欲得到一次真正的超载试验,必须在水压试验压力的公式中考虑到设计温度下许用应力与试验温度下许用应力的比值。事实上对于不少特殊情况,这是难于做到的,例如对于温度极高的容器,或者容器中的静水压力过高;对于由不同材料或同一材料不同厚度所制成的多层容器;或者对于操作温度已在材料的蠕变范围内的高压容器等。各国的现行规范有不同的处理方法,分歧较大。但是最近的ISO推荐规范似乎是采用折中办法,因为它要求许用应力的比值,附加条件是在试验压力下的公称薄膜应力必须不超过材料屈服应力的90%,并对特殊情况必须妥善处理,还提醒在设计阶段必须注意到试验要求<sup>[5]</sup>。

总的说来,ISO/TC-11及TC-17已对压力容器及其材料国际规范的制订作了较多的工作。

### 1.1.3 美国压力容器研究委员会PVRC的科研动态

制订或修改压力容器规范,需要大量的实践经验和科学研究数据。由于压力容器的问题错综复杂,涉及面甚广,所以必须采取由各方面参加的、长期广泛的配合方式,才能收到效果。在美国,在1945年由于压力容器工业的发展,提出了各种各样的问题,焊接研究协会WRC于是组织成立了压力容器研究委员会PVRC。这一委员会由各个方面组成的,声称其目的是组织关于压力容器工程及制订规范单位都感到重要的各项科学研究工作,其中包括对材料的选择和评价、设计方法和制造工艺的改进等提供数据,以便ASME锅炉及压力容器委员会可以不断地修改其压力容器规范,并使压力容器的制造不断吸取新技术成果,以便不断改进压力容器制造工作。

关于PVRC在成立后的十年中对压力容器科学研究工作的进展情况,已于1958年12月进行了总结<sup>[25]</sup>。

当时ASME锅炉及压力容器委员会及压力容器的设计工作者都觉得以抗拉强度为依据

---

① NDT

② «Rules for Weld Procedure and Production Testing»

取安全系数为4的旧的简单的设计习惯已不能满足工业实践的要求,因而有必要根据发展较快的新的理论及实验分析方法,另订压力容器的设计规范。为此ASME于1955年9月专门成立了评述规范应力基准的特种委员会<sup>①</sup>。这一委员会的活动包括了制订、修改设计规范所必需的近期及远期科学研究规划,而与PVRC取得了密切的联系,并于1958年6月由该委员会成立了专门的联络工作小组<sup>②</sup>,旨在与PVRC取得协调。1959年4月这一联络工作小组向PVRC提出了关于压力容器领域内的科学研究选题18个项目的草案,并注明了轻重缓急,以及进行课题的先后次序,使科学研究结果能直接为规范修改工作服务<sup>[16]</sup>。后又于1963年对这一选题草案作了适当的补充<sup>[10]</sup>。至1966年,这些课题虽未全部完成,但基本上可称告一段落,并已予以总结<sup>[26]</sup>。因为当时认为,这一科学研究规划必须予以更新,否则就不能符合工程技术发展的形势<sup>[16]</sup>。

PVRC由总务委员会<sup>③</sup>、执行委员会<sup>④</sup>以及材料、设计和制造三个分部<sup>⑤</sup>所组成。1961年又增添了二个特种委员会,即评议及规划委员会<sup>⑥</sup>(旧名计划评议委员会<sup>⑦</sup>)以及对大截面钢科学研究的计划审查委员会<sup>⑧</sup>,作为执行委员会的咨询机构<sup>[10]</sup>。1961年执行委员会为了使科学研究成果能够为设计工作者和规范修订工作所应用,决定由当时的计划评议委员会负责对PVRC历年来的压力容器科学研究工作予以充分评价且进行总结,并决定出版涉及到压力容器的设计、材料和制造等三方面的总结报告<sup>⑨</sup>,分别于1964年4月<sup>[11]</sup>、1964年11月<sup>[12]</sup>及1971年1月<sup>[13]</sup>刊登于WRC会报。在这三份总结报告中,不仅详细评述了PVRC的科学研究成果,也介绍了其他单位所开展的有关研究,希望能综合地解决压力容器领域内所存在的问题。至于理论分析,则仅就与实验结果相符的,且应用范围广泛的予以推荐。报告仅列出设计步骤及材料的性质和特性数据,但并不涉及设计限制的规定,因为关于这一方面应由制订规范的单位来考虑决定。报告也介绍了大量的参考文献。最后,报告对已有资料进行评述的同时,也指出了压力容器科学研究工作中的空白点,以说明今后科学研究的方向。现将这三份总结报告的内容作简要的介绍于后:

第一份总结报告(1964年4月)<sup>[11]</sup>包括属于设计部分的资料。分成统一符号、封头、爆破强度、外加载荷、内压下的开孔补强、多孔板及孔间带、应力计算值的意义等七个小节。报告还对今后关于压力容器设计方面的科学研究工作,作出了下列建议:

(1) 着重地指出了必须把已得到的科学研究成果总结成为能被一般设计工作者直接采用的形式;

(2) 对壳体、封头、接管等进行极限分析的研究,以决定他们的稳定性极限;

(3) 组织对一次应力、二次应力、峰值应力<sup>⑩</sup>的研究工作,以建立合理的界限;

(4) 延性是材料在操作使用中能承受应力和应变的一种有意义的标志,应发展一以延

---

① ASME Special Committee to Review Code Stress Basis

② Coordinating Task Group

③ Main Committee

④ Executive Committee

⑤ Divisions

⑥ Evaluation and Planning Committee

⑦ Program Evaluation Committee

⑧ Programmatic Review Committee on Heavy Section Steel Research

⑨ Interpretive Report

⑩ Peak stress

性为准则的设计方法。

第二份总结报告(1964年11月<sup>[12]</sup>)包括属于材料部分的资料。分成压力容器用钢的典型机械性能、钢铁材料建立应力数值的基准、基于应力的失效模型<sup>①</sup>的安全指数、热处理对压力容器用钢机械性能的影响、板材厚度对于压力容器用钢机械性能的影响等五个小节。

第三份总结报告(1971年1月<sup>[13]</sup>)包括属于制造部分的资料。报告分成成型加工操作、焊接以及周围环境的腐蚀考虑等三个小节。关于腐蚀方面,涉及到一般腐蚀、应力腐蚀以及氢脆等。

在这三份总结报告中,虽然已经指出了今后科学研究的方向,但还必须加以组织整理并附加说明,使其成为正式科学研究的规划。于是由PVRC的评议及规划委员会决定将未被以前选题草案所包括的,但当前迫切需要解决的问题,以及尚未完成的以前的某些选题,汇总成为一份“PVRC压力容器科学研究长期规划”,于1966年9月以WRC会报的形式予以出版,并公开发行<sup>[14]</sup>。并且为了跟上科学技术发展,满足有关行业的要求,PVRC又决定对这一长期规划每隔三年修订再版一次<sup>[15]</sup>,增加一些新的内容,也淘汰一些过时的项目。该项长期规划的第三版已于1972年9月出版<sup>[16]</sup>,其中课题变动较大,所列项目已均予以重新编号。

由于有关压力容器材料、设计、制造、应用等方面的问题范围广泛,为了使各种问题得到及时的解决,在这份长期科研规划中,他们声称还必须对问题的性质以及对问题在民用工业上、以及军用工业上的重要性,作出经常的、充分的估价,并加以说明。实际上这也是PVRC评议及规划委员会职责之一,即在这份长期科研规划中详细指出在当前形势要求下问题的范围,以便把研究课题放在适当的位置。

1972年版的PVRC压力容器科学研究长期规划共有42个项目,按PVRC的组织形式中的三个分会分成三大类,其中材料部分有17个项目,设计部分有16个项目,制造部分有9个项目。每一项的说明包括:项目名称、问题的提出及研究目的要求、目前现状、具体措施的建议以及有关文献的介绍等五部分。

PVRC在材料、设计、制造三个分部之下,还设有具体负责科学研究项目的分委员会,由其名称即可知这些分委员会的活动范围。分委员会的数目随着科学研究项目的进展和当前科学技术的发展,每年有所增减。材料分部现在设有:压力容器用钢、受压部件材料的无损检验、屈服强度的有效利用、氢脆等分委员会。设计分部现在设有:壳体、孔间带的应力、开孔补强与外加载荷、螺栓法兰联接件、管道及泵以及阀门的应力指数<sup>②</sup>、高温设计、末端强度准则<sup>③</sup>等分委员会。制造分部现在设有:预热处理与后热处理、塑性疲劳强度、加热处理与机械处理、焊缝不连续性的重要性、焊缝金属、焊接步骤等分委员会<sup>[10]</sup>。

PVRC于1945年成立后,1946年起即在美国各高等院校及有关单位(其中也有在加拿大的)中组织或布置科学研究项目。至1969年为止,已完成了100个以上由PVRC组织进行或指导进行的科学研究选题,这些选题的研究结果,已分别写成150篇以上的科学论文在各期刊杂志上(其中也包括WRC会报)发表<sup>[10]</sup>,又在三份总结报告中作了综合性的报导<sup>[11,12,13]</sup>。

现将PVRC压力容器科学研究长期规划(1972年9月版)的内容,作简要介绍于后<sup>[10,16]</sup>:

(一) 属于材料分部的科学研究项目:

自从原子能用于民用工业以来,发展甚快,反应堆的数目及尺寸不断上升,这种工厂逐

① Modes of Failure

② Stress Index

③ Terminal Strength Criteria

渐移向人口稠密地区，为了保证安全，对反应堆压力容器用钢的研究问题便提到议事日程上来了。在这一方面，PVRC曾注意到组织两方面的研究项目：一是喷淋淬火大截面钢的性能及显微组织（材料研究项目4号）；另一是以断裂力学的概念测定压力容器所用的大截面钢的断裂韧性（材料研究项目1号）。

和这两个问题相关联的，引起了下列三方面的问题：

- （1）大截面钢及焊接件的性能与检验技术的效果问题；
- （2）微裂纹及钢材性能变化对大截面钢制造的容器性能的影响问题（材料研究项目5号）；
- （3）对在操作中的容器进行现场检验采用何种检验技术效果最好的问题。

为了解决以上三方面的问题，PVRC组织了一系列的科学研究项目。

大截面钢性能的数据包括了对板材、锻件、铸件、电渣焊缝以及埋弧焊缝等方面的研究的资料，大量的数据汇总之后，将编成计算机程序，使资料成为可以直接采用的形式。

涉及原子能压力容器用钢，PVRC也对经过放射性照射后所产生的性能变化的影响，组织了研究项目（材料研究项目7号）。

受压部件材料的无损检验也是PVRC的一项重要项目（材料研究项目10号）；这一项目的进行虽然比较困难，但是极为重要，特别是由于它涉及到断裂力学设计的观点应用于建立压力容器的操作条件方面将来能否得到成功的问题。目前着重解决如下诸问题：现有的无损检验技术及其步骤对于检查发现大截面钢中微裂纹的能力（指判断微裂纹在大截面钢的板材、锻件、铸件、焊缝中的位置、大小尺寸及方向等）。这些研究结果显然将影响到某些现有规范及规格的重订或修改工作。

对于压力容器在使用前或在二次使用中进行预应力或超应力操作，已在实际的压力容器操作中采用，且有增加的趋势。但是由于预应力可以引起容器内某些位置上的应变，例如在微裂纹或高应力部位早已进入了塑性的范围，所以在预应力过程中很有可能损坏金属组织，减小容器材料的韧性而得到不利的结果。目前主要研究加热预应力对容器材料的强度、延性及缺口韧性的影响（材料研究项目6号）。

低循环速率对压力容器用钢在高温时的疲劳强度的影响是PVRC的另一研究项目（材料研究项目11号），已进行了下列初步研究：在温度范围为400-900°F间，循环速率为每小时12,000、1100、110、次，最低至每小时5次，进行了恒挠度悬臂梁试验<sup>①</sup>。

对于低于-150°F的低温用钢，PVRC对于下列钢种进行了研究，着重注意缺口韧性、焊接性能的变化（材料研究项目3号）：

| 钢种，ASTM编号 | 含 Ni 量，% | 热 处 理 | 最低温度，°F |
|-----------|----------|-------|---------|
| A-353     | 9        | 正火，回火 | -320    |
| A-553-A   | 9        | 淬火，回火 | -320    |
| A-553-B   | 8        | 淬火，回火 | -275    |
| A-645     | 5        | 淬火，回火 | -275    |
| A-203-D   | 3½       | 正火    | -150    |

① Constant-Deflection Cantilever-Beam Tests