



压力容器

YALIRONGQIJIANYAN

检验

强天鹏 编著

新华出版社

压力容器检验

强天鹏 编著

新华出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

压力容器检验 / 强天鹏编著. —北京: 新华出版社, 2008.5

ISBN 978-7-5011-8374-6

I. 压... II. 强... III. 压力容器—检验 IV. TH490.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 070688 号

压力容器检验

作 者: 强天鹏

责任编辑: 刘广军 白玉

封面设计: 李建波

出版发行: 新华出版社

网 址: <http://www.xinhupub.com>

<http://press.xinhuanet.com>

地 址: 北京石景山区京原路 8 号

邮 编: 100040

经 销: 新华书店

印 刷: 北京鑫瑞兴印刷有限公司

开 本: 787mm×1092mm 1/16

印 张: 35

字 数: 900 千字

版 次: 2008 年 5 月第一版

印 次: 2008 年 5 月第一次印刷

书 号: ISBN 978-7-5011-8374-6

定 价: 98.00 元

社购书热线: (010) 63077122 中国新闻书店电话: (010) 63072012

图书如有质量问题, 请与联系调换

前言

压力容器检验是一项复杂的、高难度的工作，其复杂性和难度体现在压力容器材料、结构、介质和运行状态的多样化，检验知识涉及多个专业领域，检验过程采用多种技术和方法，检验数据的分析和评定需要广博的知识和深厚的经验。

压力容器检验同时又是严谨的、需要高度责任心的工作，之所以提出严谨和高度负责的要求，是因为该项工作具有高风险性质，工作上的微小不慎和失误就可能导致巨大损失和灾难性后果。

“法规”和“技术”是压力容器检验工作的两个主要支撑点。法规是检验工作的准则，是安全的基本保证，需要始终贯彻，严格遵守。而掌握有关知识和技术则是正确理解和应用法规的前提。

基于上述认识，针对压力容器检验工作的特点，并围绕压力容器检验师培训考核的要求，提出本书的编写思路如下：

1. 内容以讲述专业知识和技术为主，融合法规和标准，并结合典型压力容器进行了细致讲解。压力容器相关法规和标准是检验人员必须掌握的，在本书的附录中列出了必备法规和标准目录。

2. 参加压力容器检验师考试的人员是具备一定压力容器检验工作经历和经验的人员，已经基本掌握了压力容器检验有关的基本理论知识，了解和熟悉压力容器法规和技术标准。因此本书的编写不局限于标准条文，而是基础理论、专业知识和法规、标准内容综合与融会，目的是提高实际应用能力。对检验专题的内容，例如检验方案的制订、检验方法的选择、检验检测技术和工艺的应用等，并不给出刻板的模式或直接答案，而是提供广泛的背景资料和适当提示，要求学习人员根据具体情况进行分析、比较，通过类似训练掌握选择更佳的能力。

本书受全国特种设备检验人员考核委员会委托编写，自 2001 年开始动手编写，2003 年起作为全国压力容器检验师培训的教材使用，受到广泛好评。强天鹏担任本书的主编，

并承担了主要编写工作。其他参与编写人员和编写章节为：尹侠，第二章 2.1 和 2.2；程磊，第三章 3.2；王一宁，第八章 8.1；李东升，第十二章；张辉，第十三章；袁素霞，第十四章。

为适应技术进步和法规标准的变化，按照出版社的要求，自 2007 年 5 月开始对本书进行全面修订。修订工作由郭伟灿、程茂、张文斌承担。修订后的主要变化有：书中涉及法规和标准的内容均按最新版本（截止 2008 年 3 月的现行版本）改写，其中钢铁材料、无损检测、定期检验、安全阀、氧舱等部分作了较大改动；订正了原稿中一些错误和疏漏；增加了一些内容，其中在应力分析部分增加了有限元强度理论介绍；在材料部分增加了有色金属、复合材料与非金属材料内容；在检验测试技术部分增加了金相知识内容；在检验专题部分中增加了螺纹锁紧环式高压换热器知识，以及氨合成塔、尿素合成塔、焦炭塔检验等内容。

在本书的编写和修订过程中，中国特种设备检验协会、江苏省特种设备检验研究院、浙江省特种设备检测研究中心给予了有力的支持。沈钢对编写指导思想提出有益的建议，并仔细审查了编写提纲；秦晓钟、顾言如、徐宁家、耿建新、阮和生提供了重要资料，在此一并表示感谢。

还有两点提请阅读本书时注意：

1. 为了便于检索，在本书附录 D 中列出各章引用的法规标准目录，包括版本名称和日期，而在书中正文的引用就不再注明日期了。

2. GB/T 228—2002《金属材料 室温拉伸实验方法》中力学性能的符号和单位与 GB/T 228—1987 比较已发生变化。旧版标准中力学性能的符号，如屈服点或屈服强度 σ_s ($\sigma_{0.2}$)、抗拉强度 σ_b 、伸长率 δ 、断面收缩率 ϕ 已分别变为 R_{eL} ($R_{p0.2}$)、 R_m 、 A 、 Ψ ；屈服强度和抗拉强度的单位也由 MPa 变为 N/mm^2 。对本书中多处涉及到材料的力学性能内容是否改用新的符号和单位颇费斟酌，鉴于目前还有许多材料标准仍沿用旧的力学性能符号和单位，为统一起见，本书中没有采用新符号和单位。希望读者注意新版和旧版标准中力学性能符号和单位的變化。

由于编者水平有限，书中涉及的专业领域较广，错误和不当之处难免，欢迎批评指正。

编 者
2008 年 5 月

目 录

第一章 压力容器检验总论	1
1.1 概述	1
1.2 压力容器的定义与分类	2
1.3 压力容器运行特性	4
1.4 对容器的基本要求	5
1.5 容器的失效	6
1.6 容器检验工作的实质	8
1.7 容器法规标准体系	8
1.8 检验人员的工作内容范围和职责	10
第二章 强度、结构与应力分析	11
2.1 容器强度计算概述	11
2.2 容器一般结构	34
2.3 容器应力分类和局部应力	45
2.4 容器分析设计概述	59
第三章 金属学、热处理与容器材料	65
3.1 金属学基本知识	65
3.2 容器热处理知识	76
3.3 容器常用钢材	88
3.4 低合金高强度钢的进一步知识	100
3.5 容器用有色金属、复合材料与非金属材料	104
3.6 容器材料脆化	109
3.7 容器材料性能的劣化	122

第四章 压力容器制造与焊接..... 124

4.1 压力容器制造概述..... 124

4.2 焊接专业知识..... 130

4.3 焊接质量控制..... 149

4.4 压力容器常用钢材的焊接..... 162

第五章 压力容器腐蚀..... 173

5.1 金属材料腐蚀知识概述..... 173

5.2 压力容器应力腐蚀..... 179

5.3 奥氏体不锈钢焊接接头的腐蚀..... 192

第六章 压力容器检测试验技术..... 197

6.1 压力容器宏观检查与测量技术..... 197

6.2 压力容器物理、化学性能测试..... 206

6.3 压力容器力学性能试验..... 220

6.4 耐压试验..... 231

6.5 气密试验、爆破试验..... 239

第七章 压力容器无损检测..... 242

7.1 概述..... 242

7.2 射线检测..... 243

7.3 超声检测..... 252

7.4 磁粉检测..... 263

7.5 渗透检测..... 269

7.6 其他无损检测方法..... 274

7.7 无损检测方法的应用选择小结..... 276

7.8 压力容器缺陷的种类及产生原因..... 277

第八章 压力容器检验与失效分析知识..... 287

8.1 压力容器产品安全性能监督检验..... 287

8.2 现场组焊压力容器安全质量监督检验..... 293

8.3 进口压力容器的安全性能监督检验..... 296

8.4 压力容器定期检验..... 297

8.5 失效分析基本知识..... 307

第九章 压力容器的安全装置	319
9.1 安全装置分类及选用原则	319
9.2 安全阀	321
9.3 爆破片、爆破帽、易熔塞	336
9.4 压力表	342
9.5 液面计	344
9.6 减压阀	346
9.7 温度计	347
9.8 其他安全装置介绍	349
第十章 检验专题：低合金高强度钢球罐	350
10.1 概述	350
10.2 国产 WDL 系列低合金高强度钢	351
10.3 07MnNiCrMoVDR 低温球罐的制造和现场组焊	359
10.4 07MnCrMoVR 球罐检验案例	368
第十一章 检验专题：加氢裂化装置	374
11.1 概述	374
11.2 热壁加氢反应器的定期检验	383
11.3 加氢反应器安全分析	386
11.4 螺纹锁紧环式高压换热器	387
第十二章 检验专题：移动式压力容器	389
12.1 概述	389
12.2 移动式压力容器的法规标准	389
12.3 常温液化气体汽车罐车	390
12.4 常温液化气体铁路罐车	397
12.5 低温移动式压力容器	399
12.6 液化气体罐车的使用管理要点	405
12.7 移动式压力容器的定期检验	407
第十三章 检验专题：气瓶	411
13.1 气瓶的分类	411
13.2 气瓶的典型结构	413

13.3	气瓶的主要技术参数	415
13.4	气瓶附件	417
13.5	气瓶使用安全特性	420
13.6	气瓶检验技术	428
13.7	钢质无缝气瓶定期检验与评定	439
13.8	钢质焊接气瓶定期检验与评定	453
13.9	溶解乙炔气瓶定期检验与评定	458
13.10	液化石油气钢瓶定期检验与评定	465
第十四章	检验专题：医用氧舱	472
14.1	医用氧舱的用途及分类	472
14.2	医用氧舱的特点及构成	472
14.3	医用氧舱制造与安装的监督检验	475
14.4	医用氧舱的定期检验	483
14.5	检验中的常见问题	486
14.6	医用氧舱的检验案例	489
第十五章	其他特定类型压力容器或结构的检验技术要点	492
15.1	低温压力容器	492
15.2	奥氏体不锈钢压力容器	498
15.3	钛制压力容器	501
15.4	快开端盖式压力容器	504
15.5	超高压容器	513
15.6	分析设计压力容器制造特点	536
15.7	氨合成塔、尿素合成塔的检验	538
15.8	焦炭塔的定期检验	544
附录 A	中国特种设备法规体系表	549
附录 B	压力容器法规标准目录	550
附录 C	压力容器结构不连续的应力分布图	555
附录 D	本书中引用法规与标准现行版本索引	572
参考文献		

第一章 压力容器检验总论

1.1 概述

压力容器是具有爆炸危险性的承压类特种设备，它承载着高压、高温、低温、易燃、易爆、剧毒或腐蚀介质，一旦发生爆炸或泄漏往往并发火灾、中毒等灾难性事故，造成严重的环境污染，给社会经济、企业生产和人民生活带来损失和危害，直接影响社会安定。

压力容器广泛地应用于石油、化工、机械、冶金、轻工、航空、航天、国防等工业部门的生产以及人民的生活。在化肥、炼油、化工、农药、医药、有机合成等行业，压力容器是主要的生产设备，例如在年产 30 万吨的乙烯装置中，压力容器约占设备总量的 35%。据国家质检总局统计：我国现有压力容器约 147 万台，其中固定式压力容器约 145 万台，移动式压力容器约 2 万台，另有气瓶约 1 亿只。压力容器每年增加 25 万台，气瓶每年增加 2 000 万只。随着我国国民经济的发展，我国压力容器的数量将日益增多。

压力容器承受各种静、动载荷或交变载荷，有些还有附加的机械或温度载荷。其运行温度和压力变化范围相当宽广：从 -100°C 以下的低温到 1000°C 以上的高温；从真空到 100MPa 以上的超高压，有时运行条件甚至达到苛刻的地步，如合成氨的操作压力为 10~100MPa，高压聚乙烯装置的操作压力为 100~200MPa。内部介质为气体、液化气体或最高工作温度高于或等于标准沸点的液体，多达数千个品种，有些是易燃、易爆、有毒、腐蚀等有害物质。上述因素使压力容器从设计、制造到使用、维修都不同于一般机械设备，所以压力容器比一般机械设备有更高的安全要求。

当前，我国对压力容器的安全管理推行的是国家监察全过程控制的管理方法，即把容器设计、制造、安装、改造、使用、检验检测、维修、事故调查处理等各个环节作为一个系统实施管理，防范事故，确保压力容器安全、经济地运行。自 1982 年国务院颁布《锅炉压力容器安全监察暂行条例》以来，尤其是 2003 年国务院颁布《特种设备安全监察条例》后，我国进一步加强对压力容器的安全监察与检验工作，万台压力容器事故率从 1978 年的 2 台降到现在 0.8 台。但由于我国压力容器安全监察始于 1956 年，落后于发达国家近 50 年，与世界发达国家相比，我国特种设备事故发生率至今仍是这些发达国家的 5~10 倍。可见，加强压力容器安全监察与检验工作，可有效地降低压力容器事故，但与发达国家相比较差距仍较大。我国压力容器安全监察与检验工作的确任重而道远。

按照压力容器的安全管理的规定，我国对设计资格、制造资格和安装资格的审核发证实行控制，以保证容器的质量。容器在使用前，使用单位应向设区的市级特种设备监察部门办理登记手续，确定容器的安全状况等级，领取压力容器使用证，操作人员取得上岗证，严防不合格压力容器投入使用。容器投入运行后，要求认真维护并定期进行检验。对其修理改造和报废均严格控制。

检验是压力容器安全管理的重要环节。按工作性质，压力容器检验可分为产品安全性能监督检验和在用压力容器定期检验两大类。

安全性能监督检验的任务是保证压力容器产品质量。产品质量是安全的基础，是保证容器安全投入运行、发挥经济效益的先决条件。压力容器产品质量的任何失控都可能产生安全隐患和发生事故，给使用管理带来麻烦，甚至会导致容器过早失效和报废。

在用压力容器定期检验是指压力容器使用期间的定期检验，它是保证设备长期运行和安全生产的有力措施。通过定期检验及时发现使用中的压力容器的新生缺陷和制造安装过程中漏检的缺陷，

根据检验结果重新确定其安全状况等级，以决定继续使用、监控使用、修复后使用或判废。

为保证压力容器检验工作质量，实施压力容器产品安全性能监督检验和在用压力容器定期检验的单位必须具备相应的单位资格，从事压力容器检验工作的检验人员、无损检测人员必须具备相应的专业资格。

《锅炉压力容器压力管道及特种设备检验人员资格考核规则》规定：压力容器检验人员分检验员、检验师、高级检验师三个等级，各自从事不同内容和性质的工作并承担相应的责任。压力容器检验人员必须通过考核才能取得相应的资格。

1.2 压力容器的定义与分类

1.2.1 压力容器的定义

从广义上说，凡承受流体介质压力的密闭壳体都可称作压力容器。

按 GB 150《钢制压力容器》的规定，设计压力低于 0.1MPa 的容器属于常压容器，而设计压力大于或等于 0.1MPa 的容器属于压力容器。

从安全角度看，单纯以压力高低定义压力容器不够全面，因为压力不是表征安全性能的唯一指标。在相同压力下，容器的容积越大，其积蓄的能量就越多，一旦发生破裂造成的损失和危害也就越大。此外，容器内的介质特性对安全的影响也很大，气体的危害程度大于液体，尤其易燃易爆的气体或液化气体，如果容器发生事故，除了爆炸造成的损失外，由于介质泄漏或扩散而引起的化学爆炸、起火燃烧、中毒污染，导致的后果极其严重。因此，压力、容积、介质特性是与安全相关的三个重要参数。

《压力容器安全技术监察规程》（以下简称《容规》）从安全管理角度出发，将同时具备下列三个条件的容器称为压力容器：

- ① 最高工作压力（ p_w ）大于或等于 0.1MPa（不含液体静压力）；
- ② 内直径（非圆形截面指其最大尺寸）大于或等于 0.15m，且容积（ V ）大于或等于 0.025m³；
- ③ 盛装介质为气体、液化气体或最高工作温度高于或等于标准沸点的液体。

2003 年 3 月公布的《特种设备安全监察条例》附则中规定，压力容器的含义是：盛装气体或液体，承载一定压力的密闭设备，其范围规定为最高工作压力（ p_w ）大于或等于 0.1MPa（表压），且压力与容积的乘积大于或等于 2.5MPa·L 的气体或液化气体和最高工作温度高于或等于标准沸点的液体的固定式容器和移动式容器；盛装公称工作压力大于或等于 0.2MPa（表压），且压力与容积的乘积大于或等于 1.0MPa·L 的气体、液化气体和标准沸点等于或低于 60℃ 的液体的气瓶；医用氧舱等。

可以认为，这个规定是对压力容器作出的最权威的定义，只要符合上述规定的容器即为压力容器，其设计、制造、安装、使用、检验、修理、改造和管理都必须接受安全监察。

1.2.2 压力容器的分类

压力容器的形式、品种繁多，其分类方法有很多种：

- ① 按材质分类：分为钢制压力容器、铝制焊接容器、钛制焊接容器和非金属容器等。
- ② 按制造方法分类：分为板焊容器、锻焊容器、铸造容器、包扎式容器、绕带式容器等。
- ③ 按壳体承压方式分类：分为内压容器、外压容器。

④ 按壁厚分类：分为薄壁容器（容器外径与内径之比小于或等于 1.2）和厚壁容器（外径与内径之比大于 1.2）。

⑤ 按压力容器的设计压力（ p ）分类：

- a) 低压（代号 L） $0.1\text{MPa} \leq p < 1.6\text{MPa}$ ；

- b) 中压 (代号 M) $1.6\text{MPa} \leq p < 10\text{MPa}$;
- c) 高压 (代号 H) $10\text{MPa} \leq p < 100\text{MPa}$;
- d) 超高压 (代号 U) $p \geq 100\text{MPa}$ 。

⑥ 按压力容器在生产工艺过程中的作用原理分类: 分为反应压力容器、换热压力容器、分离压力容器、储存压力容器。

- a) 反应压力容器 (代号 R)。主要是用于完成介质物理、化学反应的压力容器, 如反应器、反应釜、分解锅、聚合釜、高压釜、超高压釜、合成塔、变换炉、蒸球、煤气发生炉等;
- b) 换热压力容器 (代号 E)。主要用于完成介质的热量交换的压力容器, 如管壳式余热锅炉、热交换器、冷却器、冷凝器、蒸发器、加热器、消毒锅、烘缸等;
- c) 分离压力容器 (代号 S)。主要用于完成介质的流体压力平衡缓冲和气体净化分离的压力容器, 如分离器、过滤器、集油器、缓冲器、洗涤器、吸收塔、干燥塔、分汽缸、除氧器等;
- d) 储存压力容器 (代号 C, 其中球罐代号 B)。主要是用于储存和盛装气体、液体、液化气体等介质的压力容器, 如各种型式的储罐。在一种压力容器中, 如同时具备两个以上的工艺作用原理时, 应按工艺过程中的主要作用来划分品种。

⑦ 按《压力容器安全技术监察规程》的规定分类:

《容规》将适用范围内的压力容器划分为三类:

第三类压力容器 (为下列情况之一的)

- a) 高压容器;
- b) 中压容器 (仅限毒性程度为极度和高度危害介质);
- c) 中压储存容器 (仅限易燃或毒性程度为中度危害介质, 且 pV 乘积大于或等于 $10\text{MPa} \cdot \text{m}^3$);
- d) 中压反应容器 (仅限易燃或毒性程度为中度危害介质, 且 pV 乘积大于或等于 $0.5\text{MPa} \cdot \text{m}^3$);
- e) 低压容器 (仅限毒性程度为极度和高度危害介质, 且 pV 乘积大于或等于 $0.2\text{MPa} \cdot \text{m}^3$);
- f) 高压、中压管壳式余热锅炉;
- g) 中压搪玻璃压力容器;
- h) 使用强度级别较高 (指相应标准中抗拉强度规定值下限大于或等于 540MPa) 的材料制造的压力容器;
- i) 移动式压力容器, 包括铁路罐车 (介质为液化气体、低温液体)、罐式汽车 [液化气体运输 (半挂) 车、低温液体运输 (半挂) 车、永久气体运输 (半挂) 车] 和罐式集装箱 (介质为液化气体、低温液体) 等;
- j) 球形储罐 (容积大于或等于 50m^3);
- k) 低温液体储存容器 (容积大于 5m^3)。

第二类压力容器 [为下列情况之一的, 以上第 a) 款规定的除外]

- a) 中压容器;
- b) 低压容器 (仅限毒性程度为极度和高度危害介质);
- c) 低压反应容器和低压储存容器 (仅限易燃介质或毒性程度为中度危害介质);
- d) 低压管壳式余热锅炉;
- e) 低压搪玻璃压力容器。

第一类压力容器

- a) 低压容器为第一类压力容器 [以上第 a) 款、第 b) 款规定的除外]。

关于压力容器的类别划分的归纳见《容规》附录 A 表 A-1。

1.3 压力容器运行特性

压力容器是在特殊条件下运行的特种设备,所谓特殊条件,主要是指压力、温度等介质的物理特性,以及介质的化学特性。

1.3.1 介质的物理特性

压力参数是压力容器运行最主要的特性参数,容器内部的压力使容器承受载荷,主要是在壳体中产生一次拉应力,当一次拉应力超过壳体材料强度极限时会导致容器破裂,发生爆炸事故。压力容器的压力变化与温度和介质的物理特性紧密相关,所以在研究压力时,必须同时考虑温度条件和其他介质的物理特性。

压力容器的压力来源于多方面,可归纳为以下几种:

1. 来自容器以外

① 由各类气体压缩机泵供给压力。例如贮气罐、缓冲罐、压缩机的各段分离容器等,这些容器的工作压力取决于压缩机出口和泵出口的压力。

② 由蒸汽锅炉、废热锅炉供给的压力。工作介质为蒸汽的压力容器,例如蒸汽加热器、蒸发器、夹套容器加热的夹套等,这些容器的压力取决于锅炉的蒸汽压力或经减压后的蒸汽压力。

2. 在容器内产生或增大

① 密闭容器中的气态介质,由于温度升高导致体积膨胀,但受到容器内空间的限制而产生压力或压力增大。如果容器内的气体满足理想气体的条件,则压力变化遵守理想气体方程:

$$p_1 V_1/T_1 = p_2 V_2/T_2 = \cdots = R$$

(T 为绝对温度; R 为摩尔气体常数)

如果按真实气体考虑,则需在公式中增加一修正系数 Z :

$$p V/T = Z R$$

② 密闭容器中的液体介质,当容器工作温度高于标准沸点时,液体沸腾汽化,体积膨胀,但受到容器内空间的限制而产生压力或压力增大。此时容器的压力取决于该温度下的饱和蒸汽压。以水为例,当工作温度为 120°C 时,容器内的压力约为 0.20MPa ,当工作温度为 200°C 时,容器内的压力约为 1.56MPa 。

③ 密闭容器中的液化气体介质,以气液两相共存,在有足够的气相空间条件下,容器内的压力就是随温度变化饱和蒸气压。各种不同液体在不同温度下有不同饱和蒸气压,例如液氨 20°C 时的饱和蒸气压是 0.75MPa , 50°C 时的饱和蒸气压是 1.93MPa ; 丙烷 50°C 时的饱和蒸气压是 1.704MPa 。

④ 密闭容器中如果充满液态介质,由于温度升高导致液体体积膨胀,但受到容器内空间的限制而产生压力或压力增大。此时容器的压力取决于液体的体积膨胀系数。有必要指出的是液化石油气的体积膨胀特性,液化石油气的体积膨胀系数是水的 $10 \sim 16$ 倍,当液化石油气以液态充满整个容器时,压力随温度上升十分迅速。在有气相空间时,温度每上升 1°C ,压力只上升约 0.03MPa ,而没有气相空间时,温度每上升 1°C ,压力将上升 $2.18 \sim 3.18\text{MPa}$,因此在容器内过量充装液化石油气是十分危险的。

⑤ 由于化学反应产生压力或压力增大。反应容器中两种或两种以上的单体化学物质在一定的温度和压力条件下进行化学反应,生成聚合物或另外一种单体化合物,这类反应一般在反应器和聚合釜中进行。由于反应物体积和温度的变化,会使反应器内的压力增加。此外,固态或液态高分子聚合物如在容器内受热解聚,变成了单分子的气体,也会因为体积膨胀而在容器内产生气体压力。例如聚甲醛(固体)的比容约为 0.7L/kg ,当它的解聚变为甲醛气体时,其比容为 746L/kg ,体积增

大上千倍，在容器内会产生很高的压力。有的聚合反应会放出大量反应热，如果控制一旦失灵，温度和压力会骤然剧烈升高，为保证这类容器的安全，应装设安全阀、爆破片和爆破帽等安全泄放装置。

1.3.2 介质的化学特性

从安全方面考虑，检验人员对介质的关注主要在三个方面，一是介质与温度和压力相关的物理特性，有关内容已在 1.3.1 节中叙述；二是介质对材料的腐蚀性，有关内容将在材料和腐蚀等章节叙述；三是介质的化学特性，主要是易燃易爆性质和毒性。

压力容器的介质是由用途和生产工艺决定的。介质品种繁多。介质化学特性知识在压力容器分类、设计审查、以及检验工作中都要用到。关于介质的化学特性分类，按易燃易爆性质分，可分为易燃、可燃、惰性和助燃四种；按毒性程度分，又可分为极度危害（Ⅰ）、高度危害（Ⅱ）、中度危害（Ⅲ）、轻度危害（Ⅳ）四级。

《容规》规定：关于介质易燃、易爆、毒性程度的分类执行 HG 20660《压力容器中化学介质毒性危害和爆炸危险程度分类》的规定。分类的主要用途是：确定压力容器类别；确定化工压力容器的致密性、密封性技术要求。

HG 20660 中，将毒性危害程度中的极度危害（Ⅰ）、高度危害（Ⅱ）、中度危害（Ⅲ）三级列入标准中，而毒性危害程度分级中的轻度危害（Ⅳ）的化学介质标准未予列入。介质毒性依据以下六项指标分级，即：急性毒性、急性中毒发病状况、慢性中毒患病状况、慢性中毒后果、致癌性、最高容许浓度。

标准中的毒性分类表用于压力容器分类的用途时，主要是依据事故状态下，介质与人体大量接触引起的危害进行毒性危害程度分级，以急性毒性和最高容许浓度两项指标为主，并考虑其他指标的归属，综合分析，全面权衡后进行分类。常见的毒性程度为极度危害、高度危害和中度危害的化学介质见该标准的表 3.0.3-1 ~ 表 3.0.3-3。

用于压力容器的致密性和密封性技术要求时，除应根据事故状态外，尚应计及经常性的泄漏引起的慢性潜在危害，为此，以急性毒性、最高容许浓度和致癌性三项指标为主，并考虑其他指标的归属，综合分析，全面权衡后进行分类。对某些介质，则按其某一突出危害（如致癌性）进行分类。所以表 3.0.3-1 ~ 表 3.0.3-3 所列的少数介质的类别归属有所调整，详见表中的注解。

HG 20660 中未使用《容规》中“易燃介质”术语，而是用“爆炸危险介质”一词，两者定义相同，都是指：气体或液体蒸气、薄雾与空气混合形成爆炸混合物，且其爆炸下限小于 10%，或爆炸上限与下限的差值大于、等于 20% 的介质。标准认为“爆炸危险介质”比“易燃介质”更与定义相确切。爆炸危险介质见该标准的表 3.0.3-5。

使用中涉及多种化学介质时，应按介质组分中毒性危害或爆炸危险程度最大的介质考虑：当某一危害性物质在介质中含量极少时，应按其危害程度及其含量综合考虑，由设计单位的工艺设计或使用单位的生产技术部门按照标准的分类原则，决定类别。

HG 20660 中未作规定的介质，可在 GB 5044《职业性接触毒物危害程度分级》、GBZ 1《工业企业设计卫生标准》、《劳动卫生与职业病学》、《化学危险品手册》等资料中查找。

1.4 对容器的基本要求

对压力容器最基本的要求是在确保安全的前提下有效运行，保证生产的长期稳定。这就需要压力容器必须具备生产工艺要求的特定使用性能：安全可靠，容易制造安装，结构先进，维修方便，经济合理等等。

从大的方面说，压力容器至少应保证以下性能：

1. 强度

强度是指容器在限定的压力条件下抵抗破裂或过量塑性变形的能力。如容器设计时强度不足,筒体在压力作用下会产生塑性变形,直径增大,壁厚变薄,最后导致容器破裂失效。

2. 刚度

刚度是指容器或容器的受压部件在限定的载荷条件下抵抗弹性变形的能力。与强度不同,容器或容器的受压部件刚度不足不会发生破裂和过量的塑性变形,但却会由于弹性变形过大丧失正常的工作能力。如容器法兰和接管法兰由于刚度不足而变形可能导致密封垫片发生泄漏,使密封结构失效。

3. 稳定性

稳定性是容器在外载荷的作用下保持其几何形状不发生突然改变的性能。常见的例子是薄壁圆筒在外压作用下,可能会突然被压瘪,使容器丧失工作能力。

4. 耐久性

耐久性是指容器的使用寿命。压力容器的使用年限由设计确定,一般为8~15年,对重要的容器可以按20年设计。容器的设计使用年限与容器的实际使用年限是不同的,如果检验维护和保养得好,实际使用年限可以比设计使用年限长得多。压力容器的实际使用年限取决于容器的疲劳、腐蚀或磨蚀速率等。

5. 密封性

压力容器的密封不但指可拆连接处,如反应釜搅拌轴密封处的密封,而且也包括各种母材和焊缝的致密程度。对易燃、毒性程度为高度危害和极度危害介质的容器,其密封性能要求更加严格。对盛装这类介质的容器不但要求采用可靠的密封结构,要求进行整体气密性试验,而且对制造和检验有更多、更高的要求。

1.5 压力容器的失效

压力容器在规定的使用期限内,因设计结构不合理、制造质量不良、使用维护不当或其他原因而失去按原设计参数正常工作的效能,称为压力容器失效。一般工业设备失效的后果是设备无法使用,导致生产不能正常运行。但压力容器失效不仅于此,由于使用工况和介质的特殊性,其失效的后果可能更严重,包括快速破裂引起的爆炸、有毒物质或易燃物质的泄漏引起的中毒、燃烧或爆燃,往往危及人身和财产安全,甚至发生巨大的灾害性事故。

压力容器失效大致可分为强度失效、刚度失效、失稳失效和泄漏失效四大类。其中强度失效是压力容器最主要的失效形式。

1.5.1 强度失效

强度失效是指因材料屈服或断裂引起的压力容器失效,包括韧性断裂、脆性断裂、疲劳断裂、蠕变断裂、腐蚀断裂等。

1. 韧性断裂

韧性断裂是压力容器在载荷作用下,产生的应力达到或接近所用材料的强度极限,即由于一次应力过高引发的断裂。其特征是断裂后的容器有肉眼可见的宏观变形,如整体鼓胀,周长延伸率可达10%~20%。导致一次应力过高的主要原因有两个方面:厚度过薄和内压过高,可能的情况是:

- ① 厚度未经设计计算或强度计算错误,例如非法设计制造的容器;
- ② 制造时用错材料,把低强度等级材料当作高强度等级材料;
- ③ 使用过程中厚度减薄,包括因腐蚀、冲蚀、机械磨损等原因而减薄;

- ④ 操作失误超压且安全装置未起作用,包括运行操作失误或耐压试验操作失误;
- ⑤ 液体受热膨胀,例如液化气体过量充装后温度上升导致容器破裂;
- ⑥ 化学反应失控引起超压;
- ⑦ 压力较高的气体进入设计压力较小的容器,容器内产生的气体无法排出等。

压力容器若能严格按照规范进行设计、选材,配备相应的安全附件,且运输、安装、使用、检修遵循有关的规定,在设计寿命内避免韧性断裂是可以保证的。

2. 脆性断裂

脆性断裂是指变形量很小、且在壳壁中的应力值远低于材料的强度极限时发生的断裂。这种断裂是在较低应力状态下发生,故又称为低应力脆断。其特征是:断裂时容器没有鼓胀,即无明显的塑性变形,其断口齐平,并与最大应力方向垂直;断裂的速度极快,常使容器断裂成碎片。由于脆性断裂时容器的实际应力值往往很低,爆破片、安全阀等安全附件不会动作,其后果要比韧性断裂严重得多。

材料自身脆性和缺陷,这两种原因都会引起压力容器脆性断裂:

- ① 材料选用不当;
- ② 焊接与热处理不当使材料脆化;
- ③ 低温条件下材料脆化;
- ④ 长期在高温下运行材料脆化;
- ⑤ 应变时效导致材料脆化;
- ⑥ 存在严重的原始缺陷、制造缺陷,或使用中产生危险缺陷,在较大的应力条件下,也会发生脆性断裂。

3. 疲劳断裂

使用中的压力容器,在交变载荷作用下,经一定循环次数后产生裂纹和突然发生断裂失效的过程,称为疲劳断裂。交变载荷是指大小和(或)方向都随时间周期性(或无规则)变化的载荷,它包括压力波动,开车停车,加热或冷却时温度变化引起的热应力变化,振动引起的附加交变载荷等等。需要指出的是,原材料或制造过程中各种缺陷,会在交变载荷的作用下产生裂纹及裂纹扩展而加速压力容器疲劳。

疲劳有裂纹萌生、扩展和最后断裂三个阶段,因而疲劳断口一般由裂纹源、裂纹扩展区和瞬时断裂区组成。裂纹源往往位于高应力区或有缺陷的部位。随着交变载荷反复作用次数的增加,疲劳裂纹不断扩展,当疲劳裂纹扩展到一定值时,才会发生疲劳破坏。因此,疲劳破坏需要有一定时间。但由于疲劳源于局部应力较高的部位,破裂在压力容器工作时发生,破坏时容器总体应力水平较低,没有明显的变形。导致疲劳断裂的原因有:

- ① 结构设计不良。例如半顶角很大的锥形封头、大开孔未补强、不焊透的焊接结构等等;
- ② 不正常的操作。例如未按疲劳设计的容器承受过多次数的应力循环、工作压力或温度不正常的周期性大幅度波动;
- ③ 制造质量差。例如焊缝错边或棱角度超差、余高过高且过渡不圆滑、存在严重焊接缺陷等等。

4. 蠕变断裂

压力容器在高温下长期受载,随时间的增加持续发生蠕变变形,造成厚度明显减薄与鼓胀变形,最终导致压力容器断裂的现象,称为蠕变断裂。按断裂前的变形来看,蠕变断裂具有韧性断裂的特征;但从断裂时的应力来看,蠕变断裂又具有脆性断裂的特征。

压力容器蠕变断裂的较少见,主要是因为材料、设计或工艺上采取了适当措施。压力容器蠕变变形的典型例子是焦炭塔,由于高温及温度压力周期性波动,导致筒体变形。

5. 腐蚀断裂

因为均匀腐蚀导致的厚度减薄,或局部腐蚀造成的大面积凹坑,所引起的断裂一般有明显的塑性变形,具有韧性断裂特征;而因晶间腐蚀、应力腐蚀等引起的断裂则没有明显的塑性变形,具有脆性断裂特征。

1.5.2 其他失效

1. 刚度失效

由于构件弹性变形过度引起的失效,称为刚度失效。例如,露天立置的塔在风载荷作用下,若发生过多的弯曲变形,会破坏塔的正常工作;管板或法兰的弹性变形过大导致无法密封。

2. 失稳失效

在压应力作用下,压力容器突然失去其原有的规则几何形状引起的失效,称为失稳失效。容器弹性失稳的一个重要特征是弹性挠度与载荷不成比例,临界压力与材料的强度无关,主要取决于容器的尺寸和材料的弹性性质。只有当容器中的应力水平超过材料的屈服点而发生非弹性失稳时,临界压力才与材料的强度有关。

大直径薄壁的外压容器、夹套容器设计和检验时都需要考虑失稳失效问题。夹套容器耐压试验时,为防止容器筒体失稳,在夹套试压的同时往往需要在内筒保持一定内压。

3. 泄漏失效

由于泄漏而引起的失效,称为泄漏失效。泄漏不仅有可能引起中毒、燃烧和爆炸等事故,而且会造成环境污染。设计压力容器时,应重视各拆式接头和不同压力腔之间连接接头(如换热管和管板的连接)的密封性能。

需要指出,在多种因素作用下,压力容器有可能同时发生多种形式的失效,即交互失效,如腐蚀介质和交变应力同时作用时引发的腐蚀疲劳,高温和交变应力同时作用时引发的蠕变疲劳等。

1.6 压力容器检验工作的实质

压力容器检验的基本目的就是防止压力容器失效事故,特别是危害最严重的破裂事故发生,因此,在某种程度上可以说,压力容器检验的实质就是失效的预测和预防。

压力容器产品安全性能监督检验工作是一种预防——采用监督方法,通过验证性检验和抽查等手段来保证压力容器产品安全性能,在压力容器出厂或投用以前就发现问题,从而杜绝因质量不符合规范标准要求而在使用时失效的可能性。

在用压力容器定期检验的性质不仅仅是预防,还包含有预测的成分——在用压力容器品质不能按制造规范规定的项目来衡量和验收,其安全性不能用制造时的质量指标判定;另一方面,在用压力容器的检验和检测不可能做到百分之百。因此,在用压力容器定期检验的两个方面需要检验师作出预测:一是运用所掌握的知识、经验,通过资料审查和现场观察分析,预测压力容器使用中可能产生的缺陷种类和易发生部位,从而在检验项目、方法、比例、重点部位等方面作出正确的选择;二是根据检验结果对压力容器继续使用的安全性的预测,包括对发现的问题和缺陷进行修复的可能性的预测,修理后的压力容器的使用安全性预测,以及对无法修复的缺陷不作修理的压力容器在限制使用条件和限定使用期限的前提下继续使用是否会失效的安全性预测。

1.7 压力容器法规标准体系

正因为特种设备具有危险性,而且在社会和经济生活中广泛使用,如果设计、制造、安装、使用或管理不当发生事故,不仅会造成严重人身伤亡及财产损失,也会对正常的社会经济秩序产生重