



新型 绕带式 压力容器

朱国海 著
陈维清

机械工业出版社

227

380056

新型绕带式压力容器

朱国辉 郑津洋 著



机械工业出版社

(京)新登字 054 号

全书系统地介绍了我国首创的扁平钢带倾角错绕式压力容器的结构原理、力学特性、设计方法、制造工艺、开孔补强、在线安全状态监控、端部密封和多项专利技术；对压力容器设计、制造、检验和 CAD 等的近期进展作了简要评述。本书既给出了完整的计算公式，又附有大量实用的图、表和设计实例，可供从事与压力容器有关的工程技术人员和研究人员以及大专院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

新型绕带式压力容器 / 朱国辉, 郑津洋著. —北京: 机械工业出版社, 1995

ISBN 7-111-04340-5

I. 新...

II. ①朱...②郑...

III. 绕带式高压容器

IV. TH49



中国版本图书馆 CIP 数据核字(94)第 05951 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄南街 1 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 王正琼 版式设计: 张世琴 责任校对: 肖新民
封面设计: 郭景云 责任印制: 路琳
机械工业出版社印刷厂印刷 · 新华书店北京发行所发行

1995 年 2 月第 1 版 · 1995 年 2 月第 1 次印刷
850mm × 1168mm $1/32$ · 17.25 印张 · 454 千字
0 001—1 250 册
定价: 28.00 元

序

浙江大学朱国辉教授发明的扁平钢带倾角错绕式压力容器已广泛地用作氨合成塔、铜液吸收塔和水压机蓄能器等压力容器。这种新型绕带式压力容器的绕制工艺和国际上先进的厚板卷焊技术相比,可提高工效一倍、节省焊接和热处理能耗 80%、减少钢材消耗 20%、降低制造成本 30%~50%;在推广应用产生了显著的社会效益和数以亿元计的巨大经济效益,并已发展成为包括高压密封装置和压力容器泄漏检测及在线安全状态监控等 10 余项专利技术的“中国绕带式压力容器技术”,得到了国内外许多同行专家的热情支持和密切关注。但这些丰富多彩的新成果仅散见于各类文献中。本书以阐明思路、介绍原理、展示效果为目的,较为全面系统地介绍了扁平钢带错绕式压力容器技术。这对从事压力容器的工程技术人员、教学和科研人员是一本难得的高学术水平参考书。

本书的一个突出特点是理论分析、数值计算和试验研究紧密结合,各尽其能、互相补充、互相印证。本书在内容编排方面也下了功夫,除用一定篇幅讲述有关压力容器技术及最新进展外,大部分篇幅致力于介绍绕带式压力容器的结构原理、力学特性、设计方法、制造工艺、开孔补强、在线安全状态监控及密封技术,第 9 章专门介绍多项专利技术,颇有代表性地展示了绕带式压力容器的广阔应用前景。

但愿作者的辛勤劳动,能使读者有所得益。愿此书的出版,将促进压力容器设计、制造和监控技术水平的提高,以及绕带式压力容器的研究工作进一步开展,推动有关技术的工程应用,产生更大的社会效益和经济效益。

据定一

1993 年 12 月于华东理工大学

前 言

扁平钢带倾角错绕式压力容器是一种新型的绕带式压力容器，其特点是设计灵活、制造简便、使用安全、适用性广和易于实现在线安全状态监控。它的出现打破了厚壁压力容器技术的传统格局，避免了重型锻焊、厚板卷焊、多层热套、层板包扎、螺旋错绕宽板、型槽绕带以及大型机械加工、深厚焊缝焊接与检验、整体热处理、内壁堆焊和多通道声发射监控等难度大、昂贵而使用安全性并不十分理想的技术，为压力容器，尤其是大型、高压、高温、低温和强腐蚀等特殊压力容器的设计、制造与抑爆监控技术开辟了新的途径。

扁平钢带倾角错绕式压力容器从 60 年代初问世至今，已在各个工业领域中广泛应用，产生了显著的社会效益和数以亿元计的巨大经济效益，并已发展成为包括高压密封和压力容器泄漏检测及安全状态在线监控等 10 余项专利技术的“中国绕带式压力容器技术”^①。目前，在理论分析、试验研究以及工业应用方面都取得了丰硕成果。但这些研究成果均散见于有关杂志和专利文献中，至今还没有一本从结构原理、设计理论、制造工艺到工程应用，系统反映扁平钢带倾角错绕式压力容器研究成果的专著。从事压力容器的科技人员，高等学校的高年级学生、研究生及教师，多年来一直盼望有这样一本专著。为此，著者撰写了本书，力图在书中不仅阐明思路、介绍原理、展示效果，而且要反映目前的最新研究成果，以飨读者。

本书着重于全面阐述扁平钢带倾角错绕式压力容器的结构原理、力学特性、设计方法、制造工艺、开孔补强、在线安全状态

① 英、美同行专家誉称为：Chinese Ribbon Wound Techniques of Pressure Vessel. 见 Proc. Inst. Mech. Eng., 203 (1989)

监控和密封技术。为满足工程设计与制造的实际需要,本书既给出了完整的计算公式,又附有大量实用的图、表和设计实例,并介绍了多项专利技术,如层板—绕带组合式尿素合成塔、筒形分段绕带式压力贮罐、绕带式液氢或液氧深冷高压容器、绕层自保护超高压容器和层板—绕带组合式热壁加氢反应器等。考虑到近年来压力容器技术有了新的突破,本书还介绍了压力容器的应力分析、安全性评估、在线安全状态监控、抑爆防爆、制造工艺和密封等方面的技术进展,力求反映当今这一领域的最新研究成果,以推动有关技术的工程应用。

本书是在朱国辉教授于1990年撰写的浙江大学研究生讲义《新型绕带式压力容器》的基础上,系统地修改、补充和整理而成的。

本书的写作得到了华东理工大学著名压力容器专家琚定一教授的热情支持。浙江大学钱季平硕士、黄载生教授、王乐勤副教授和李桂仙副教授为本书的出版做了有益的工作。在此,著者一并表示感谢。

为了反映压力容器的研究成果,在本书中收集了不少国内外公开发表的论文和资料,这些资料给本书的写作提供了丰富的“食粮”和新鲜“血液”,使著者受益非浅。对这些资料的作者亦一并表示感谢。

在扁平钢带倾角错绕式压力容器的研究和产品开发过程中,支持、指导和资助过的单位和个人有已故著名压力容器专家王仁东教授、浙江大学有关领导,以及浙江大学化工机械研究所、国家科学技术委员会、国家自然科学基金委员会、国家教委博士点科学基金委员会、机械工业部、化学工业部、劳动部、航天工业部、浙江省科学技术委员会、浙江省石油化工厅、上海四方锅炉厂、巨化集团公司机械厂、南京第二化工机械厂、青岛通用机械厂、合肥化工机械厂、杭州锅炉厂、机械部合肥通用机械研究所和化工部兰州化工机械研究院等,在此一并表示感谢。

由于著者水平有限,书中错误之处在所难免,敬请读者指正。

著者 于求是园 1993年12月10日

目 录

第1章 绪论	1
第1节 概述	1
一、高压厚壁容器的应用	1
二、高压厚壁容器的基本特点	1
三、压力容器破坏的主要原因	3
四、压力容器设计技术进展	4
五、压力容器的安全技术	6
第2节 高压厚壁容器筒体结构型式	7
一、单层筒体结构	7
二、多层筒体结构	9
三、缠绕筒体结构	10
第3节 钢带错绕式压力容器	11
一、基本结构	11
二、制造特性	12
三、安全特性	13
四、研究进展	15
五、技术经济性	18
六、发展前景	21
参考文献	22
第2章 绕带筒体的应力和强度	29
第1节 单层厚壁圆筒的强度计算	29
一、弹性应力分析	29
二、弹塑性应力分析	36
三、爆破压力	42
第2节 绕带筒体的承力原理及特点	46

一、错绕钢带轴向承力原理	46
二、绕带筒体的受力特点	50
第3节 绕带筒体内压弹性应力	60
一、不计钢带层间摩擦力	60
二、计及钢带层间摩擦力	74
三、分析与讨论	80
第4节 钢带缠绕预应力分析	84
一、理论分析	85
二、预应力损失	91
三、预应力的基本特点	94
四、内筒的稳定性	97
第5节 钢带层间间隙及其超压处理	99
一、概述	99
二、试验研究结果	101
三、消除钢带层间间隙的压力计算	106
四、钢带层间间隙的影响	107
五、超压处理及残余应力估算法	109
第6节 绕带筒体的热应力	112
一、试验研究	112
二、热传导和热应力分析	115
三、分析和讨论	120
第7节 绕带筒体的爆破特性	123
一、爆破试验	124
二、爆破压力	137
三、分析比较	142
参考文献	150
第3章 绕带筒体设计	155
第1节 常规设计	155
一、常规设计	155
二、壁厚比和钢带缠绕倾角	157

三、焊缝系数	157
四、安全系数	158
五、设计举例	166
第 2 节 爆破失效准则设计	168
一、爆破安全系数	168
二、筒体设计	170
三、设计举例	171
第 3 节 钢带缠绕预应力设计	174
一、等强度设计	174
二、低应力内筒设计	185
第 4 节 优化设计	198
一、高压容器优化设计	199
二、内筒受力状态分析	201
三、钢带等剪切应力缠绕	204
四、数学模型及方法	210
五、设计实例	214
参考文献	215
第 4 章 高压厚壁容器制造工艺和绕带装置	217
第 1 节 厚壁容器制造工艺	218
一、单层厚壁式高压容器	218
二、多层厚壁式高压容器	232
三、缠绕厚壁式高压容器	241
第 2 节 钢带错绕式压力容器制造工艺	246
一、主要工艺流程	246
二、内径 $\phi 600 \sim 2000\text{mm}$ 压力容器制造	249
第 3 节 绕带装置	257
一、工作原理	257
二、动力提供方式及功率计算	259
三、移动小车	260
四、现场绕制	262

第4节 高压厚壁容器制造技术比较	263
参考文献	268
第5章 断裂疲劳和可靠性分析	269
第1节 断裂力学在压力容器中的应用	269
一、压力容器脆性破坏原因	269
二、断裂力学基本理论	271
三、缺陷评定技术进展	277
四、绕带容器防脆断性能	280
第2节 绕带筒体的疲劳强度	283
一、疲劳强度分析	283
二、试验研究	289
三、试验结果分析	293
四、结论	297
第3节 斜面焊缝疲劳断裂性能	298
一、材料性能及试样结构	298
二、疲劳试验结果分析	301
三、结论	303
第4节 绕带筒体可靠性分析	303
一、基本概念	303
二、压力容器可靠性分析	306
三、绕带筒体失效方式	308
四、绕带筒体的可靠性	311
参考文献	316
第6章 绕带筒体的开孔和补强	318
第1节 压力容器开孔补强设计	318
一、受内压圆柱壳体开小孔的应力集中	318
二、开孔并带接管时的应力集中	320
三、设计方法	322
四、结构设计	325
第2节 绕带筒体的开孔和补强	330

一、试验研究	330
二、开孔接管工艺	340
三、等面积补强	342
参考文献	345
第7章 压力容器的防爆抑爆和在线安全状态监控技术	347
第1节 压力容器安全运行的技术关键	347
一、爆炸破裂及其危害	347
二、压力容器的缺陷及修复	350
三、压力容器防爆保护技术	351
四、压力容器安全运行的技术关键	354
第2节 压力容器的裂纹止裂技术	355
一、裂纹止裂的基本原理	355
二、疲劳裂纹扩展的阻滞	357
三、粘接补强止裂	360
四、内压筒体的绕丝止裂	362
五、内压筒体的绕带止裂	367
第3节 压力容器的在线安全状态监测技术	369
一、压力容器诊断技术	370
二、声发射监测技术	371
三、压力容器安全监控保护装置	376
参考文献	381
第8章 高压容器封头和密封结构	383
第1节 单层封头	383
一、平封头	383
二、锻制紧缩口封头	387
三、半球形封头	387
第2节 多层封头	388
一、多层封头的类型和特点	389
二、多层半球形封头的强度	393
第3节 高压筒体联接结构设计	398

一、筒体端部法兰	398
二、多层圆筒和封头的联接结构	403
三、等厚度圆筒间的联接	409
第 4 节 高压密封结构	412
一、强制式密封	413
二、自紧式密封	415
三、自紧密封中的非螺栓联接	422
第 5 节 全自紧高压密封装置	427
一、高压密封装置的基本要求	427
二、全自紧高压密封装置的结构特点	428
三、主要试验研究结果	433
四、强度校核	440
五、设计举例	448
参考文献	453
第 9 章 特殊用途绕带式压力容器	455
第 1 节 自保护超高压容器	455
一、超高压容器典型事故案例	455
二、安全运行的技术关键	457
三、自保护超高压容器	459
第 2 节 绕带式深冷高压容器	461
一、低温高压容器概述	461
二、液氢高压容器	465
三、设计实例	467
四、基本结论	469
第 3 节 多层薄内筒绕带式压力容器	470
一、层板—绕带组合式尿素合成塔	470
二、层板—绕带组合式加氢反应器	486
第 4 节 绕带式锅炉汽包	494
一、绕带锅炉汽包	496
二、绕带汽包汽水循环方案的可行性	497

三、汽包端部开大孔的可行性	498
四、绕带锅炉汽包的经济性分析	502
第 5 节 筒形分段绕带压力储罐	503
一、压力球罐概述	503
二、筒形绕带压力储罐	509
三、设计实例	511
参考文献	515
第 10 章 扁平钢带倾角错绕式压力容器 CAD 及其展望	518
第 1 节 概述	518
一、计算机辅助设计	518
二、压力容器 CAD	522
第 2 节 CAD 软件及系统构成	530
一、软件功能	530
二、系统构成	533
第 3 节 展望	534
一、压力容器技术发展的要求	534
二、单层容器和带深环焊缝多层容器述评	535
三、压力容器缠绕技术的特点和述评	536
四、薄内筒外壁倾角错绕扁平钢带技术	537
参考文献	540

第1章 绪 论

第1节 概 述

一、高压厚壁容器的应用

工程上一般将设计压力在 $10\sim 100\text{MPa}$ 之间的压力容器称为高压容器。这些高压容器的器壁较厚，通常可达 $50\sim 400\text{mm}$ ，因而常称为高压厚壁容器。它们在化工、炼油、轻工、冶金、能源、煤化工、重型机械、宇航工程、石油开采及海洋工程等部门得到了广泛的应用，如氨合成塔、尿素合成塔、甲醇合成塔、铜液吸收塔、石油加氢反应器、核反应堆压力壳、煤液化反应器、水压机蓄能器及液氢液氧高压容器等，都是这些工业生产和科技部门的关键设备。

随着科学技术的进步和工业生产的发展，高压容器越来越多地在高温、低温、强腐蚀、辐照等各种苛刻的条件下操作，其直径、厚度、重量都在不断地增加。如热壁加氢裂化反应器，作为主要生产厂商的日本制钢所，1964年生产的最大单台重量为 325t ，1968年为 550t ，1974年为 850t ，1985年为 1200t ^{〔1〕}；1990年计划建造的煤液化反应器重达 2800t 。这些反应器的直径约为 $2.0\sim 7.6\text{m}$ ，高度为 $20\sim 40\text{m}$ ，壁厚为 $200\sim 400\text{mm}$ ^{〔2〕}。

用于高压厚壁容器设计、制造、检验、使用、维修与安全监督的各种技术极为复杂，涉及到力学、冶金、防腐、焊接、无损检测、计算机技术等学科领域。对高压容器有关技术问题如果处理不当，往往会导致灾难性事故，直接危及人民的生命安全，造成严重经济损失。

二、高压厚壁容器的基本特点

从结构、制造和应用等方面来看，高压厚壁容器具有以下基本特点^{〔3~9〕}：

1) 结构细长且壁厚 容器直径愈大, 壁厚也愈大。这就需要重型锻件、厚的钢板, 相应地需要有大型冶、锻设备, 以及大型轧机和大型加工机械。同时还给焊接及其缺陷控制、残余应力的消除, 以及热处理设备等带来许多不利因素, 并且, 生产成本较高。另外, 因介质对容器端盖的作用力与直径的平方成正比, 直径愈大密封愈困难。因此高压容器的结构外形比较细长, 长径比达 $12 \sim 15$, 有时甚至高达 40 。例如, 某一高压容器内径为 $\phi 1500\text{mm}$ 、壁厚为 200mm 、长度 30m 。制造这样厚的器壁, 显然会给轴向接长和解决轴向强度问题, 带来特殊的困难。

2) 采用平底或球形封头 一般直径较小的高压容器采用平底封头, 因为它制造比较容易, 适用于多种场合。但平底结构受力条件差、费材料、比较笨重, 且大型锻件质量较难保证, 故对直径 1m 以上的高压容器, 常采用不可拆的半球形封头。目前大型高压容器趋向于采用多层球封头。

3) 密封结构特殊且型式多样 高压容器的密封结构是一种特殊的结构。一般采用金属密封圈, 而且密封元件型式多样。高压容器应尽可能利用介质的压力作用来压紧密封圈, 即采用“半自紧”或“全自紧”式密封结构。为尽量减少可拆结构给密封带来的困难, 一般高压容器均设计成仅一端可拆, 另一端不可拆。

4) 使用条件苛刻, 受力状态复杂 高压容器所需处理或贮存的各种气体或液体多为易燃、易爆和有毒介质, 且往往要承受高温、低温、强腐蚀、辐射和载荷波动引起的疲劳作用。此外, 高压容器结构上存在的局部不连续 (开孔、接管、焊缝等), 会引起应力集中, 而使受力状态恶化, 往往成为萌生裂纹和引起疲劳破坏的根源。

5) 潜在爆炸危险 在高温、低温、高压及腐蚀介质条件下运行的高压容器, 一旦发生破坏, 容器内巨大能量瞬间释放, 会产生冲击波、容器碎片猛烈飞出和易燃、易爆、有毒介质喷漏,

将造成惨重的损失。如某厂一台压力容器仅由于连接管焊口破裂，喷出大量液化石油气，导致爆炸和火灾，死亡 7 人，伤 300 余人，相当于里氏 1.2 震级的威力，不仅造成全厂停产，而且使方圆数公里内的企业和建筑物遭受不同程度破坏。又如英国一台厚板卷焊式氨合成塔，内径 $\phi 1.7\text{m}$ 、壁厚 149mm，在 50MPa 水压试验压力下发生了脆断破裂，亦造成了严重的损失^{〔6〕}。

三、压力容器破坏的主要原因

国内外压力容器发生破坏的事故不少，究其原因，基本上可分为两类性质完全不同的破坏方式^{〔10,11〕}：

一类是超强度破坏，即容器因晶间腐蚀、均匀腐蚀和高温氧化等原因，导致材料强度削弱或壁厚减薄引起的破坏，以及操作失误，致使压力、温度超过极限值引起的破坏。从理论上讲，在精确设计、合理选材，以及严格制造，检验和使用操作的同时，通过安装压力表、温度计、安全阀、防爆膜等安全附件，完全可以避免这类事故的发生。

另一类是裂纹扩展破坏，即在正常使用条件或设计条件下，甚至在水压试验时，由于制造和使用中形成的各种裂纹失稳扩展所引起的破坏。若裂纹穿透容器器壁时，缺陷长度低于引起裂纹快速扩展的临界值，或容器结构上有止裂能力，介质就能稳定地泄漏，实现“先漏后破”，或“只漏不爆”。如果缺陷长度大于引起裂纹快速扩展的临界值，裂纹就会发生快速扩展，瞬间内释放容器内的能量，往往引起灾难性事故。这种破坏，由于一般在工作压力下发生，破坏压力明显低于容器的整体屈服压力，而安全阀或防爆膜不起作用，且破坏前未发生明显的塑性变形；破坏后有可能产生一定数量的碎片，危险性很大。随着高压容器向大型化发展，壁厚不断增加，从理论上难以准确控制这类事故的发生，靠提高材料断裂韧度和运用断裂疲劳分析也是有限度的，且代价高昂。这类破坏事故严重地危及人类的经济活动。因此，从根本上防止高压容器发生灾难性破坏事故，始终是高压容器工程科学的重人课题。

四、压力容器设计技术进展

现代高压容器设计技术的发展, 始终围绕着在充分保证其安全运行的前提下, 尽可能经济合理这一核心问题。高压容器大型化的发展, 特别是世界主要工业国家大规模发展核电工业, 对核容器的研究大大促进了高压容器设计技术的发展: 相继出现了新的设计准则, 如疲劳失效设计准则、断裂失效设计准则和蠕变失效设计准则等; 新的设计规范, 如分析设计规范、疲劳设计规范、防脆断设计规范等; 并采用近代设计计算方法, 如可靠性设计、优化设计等。下面对这些新的设计技术作一简要介绍。

1. 分析设计

在对压力容器进行详细的应力分析(包括理论应力分析和实验应力分析)的基础上, 根据: ①应力产生的原因, 是外载荷直接产生的还是在变形协调过程中产生的; ②应力的分布, 是总体范围还是局部范围的, 沿壁厚的分布是均匀的还是线性的或非线性的; ③对失效的影响, 即是否会造成结构的过度变形、疲劳和韧性失效等, 将容器中的应力分为一次应力、二次应力和峰值应力三大类, 按最大切应力理论确定组合应力强度, 并采用塑性分析方法(极限分析和安定性分析)和疲劳分析方法, 给出组合应力强度的限制数值。基本许用应力强度是按材料的短时拉伸性能除以相应的安全系数而得^[12~15]。ASME-VIII-2(1986)中取安全系数 $n_b = 3.0$, $n_s = 1.5$; 我国分析设计的行业标准《钢制压力容器——分析设计标准》中取 $n_b = 2.6$, $n_s = 1.5$ ^[16]。

2. 疲劳设计

容器工作时压力的波动、起动停车时的压力升降、温度交变形成的温差应力交变、外加载荷的交变及强迫振动等, 均会使压力容器承受交变载荷的作用, 且容器结构上存在的局部结构不连续会引起应力集中, 特别是形成局部塑性区时, 该区域往往是萌生疲劳裂纹和引起容器疲劳破坏的源区。由于局部塑性区内存在高应变, 因此, 压力容器的疲劳绝大多数属于受应变控制的低周疲劳, 其循环次数一般为 $10^2 \sim 10^5$ 次。