

Four Sort Important Steel Pressure Vessel Engineering Equipments used widely

四种重要类型应用范围宽阔的钢制压力容器工程装备

多功能复合壳 创新技术

Multiple Functional Composites Shell
Unique Created Advanced Technology

朱国辉 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

四种重要类型应用范围宽阔的钢制压力容器工程装备

Multiple Functional Composites Shell
Unique Created Advanced Technology

多功能复合壳 创新技术

朱国辉 著



ZHEJIANG UNIVERSITY PRESS
浙江大学出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

多功能复合壳创新技术 / 朱国辉著. —杭州: 浙江大学出版社, 2013. 11

ISBN 978-7-308-12390-7

I. ①多… II. ①朱… III. ①钢—压力容器—复合材料—研究—文集 IV. ①TH490.4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 247106 号

多功能复合壳创新技术
朱国辉 著



责任编辑 杜希武

封面设计 刘依群

出版发行 浙江大学出版社

(杭州天目山路 148 号 邮政编码 310007)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

排 版 杭州好友排版工作室

印 刷 富阳市育才印刷有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 18

彩 插 2

字 数 438 千

版 印 次 2013 年 11 月第 1 版 2013 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-308-12390-7

定 价 59.00 元

版权所有 翻印必究 印装差错 负责调换

浙江大学出版社发行部联系方式: (0571) 88925591, <http://zjdxcs.tmall.com>

四种重要类型应用范围宽阔的钢制 压力容器多功能复合壳创新 工程装备技术名目

1. 薄内筒钢带交错缠绕大型和超大型特殊贵重高压容器工程装备；
2. 圆直内筒钢带交错缠绕中、低压大型和超大型贵重承压工程贮罐装备；
3. 双层壳壁或微型钢带交错缠绕地上或海洋水下大型油、气长输工程管道；
4. 双层螺旋或直缝连续成型焊接壳壁重要、关键、贵重中、低压承压工程容器与贮罐设备。

全书内容提要

1. 含 10 余项国家发明和专门技术，将对国际四类重要宽阔钢制压力容器工程应用领域，开辟创新变革新局面；
2. 含新型压力容器工程强度优化设计理论和 10 余项专门科技简介与作者“传略”等多项重要内容与重要附录；
3. 重要科技和特别附录所述内容，包括值得一提的 10 余项其他科技创新与社会活动，也都提供了相关工程性值得参考的创造性思维活动的成功实例；
4. 热诚欢迎国内外相关权威专家和科技人士，就多功能复合壳相关发展战略，提出质疑，共作探讨。

(作者八临) 感言★

今生荣幸居钱塘 学府从教桃李香
为人一生为圆梦 求是创新参战场
山高水长多美景 师生合力启远航
多项变革破世艰 抑爆报警显特长
经济安全皆优异 承压装备变中强
壳论余篇奉留念 壳中雏龙将竞翔
中华复兴景壮丽 家国富强多吉祥
高低成败俱过往 八临恋留味天堂

- ★ 1 作者 1935 年初生,1955 年夏浙大机械工程系毕业,浙大化工系化工机械研究所任教 40 余年,现将八临,曾任所长、博导和浙江省压力容器学会理事长等职多年,获我国科技发明与技术进步等多项重要奖励;
- 2 作者的一批博士、硕士和本科生及所内多位同事等众多师生,尤其现任浙大化机所所长、博士生导师、教育部特聘长江学者、国家 863 能源领域主题专家郑津洋教授,都曾和作者共同奋斗,为本项四种重要类型多功能复合壳钢制压力容器工程创新科技的研发与初步推广应用,并获得数以 10 亿元计的重大技术经济效益,作出了重要贡献;
- 3 四种重要类型多功能复合壳钢制压力容器工程已含超 10 项重要创新变革专门科技,其中数项已通过实验室与工程性试验,获得突破性成功;
- 4 《四种重要类型应用范围宽阔的钢制压力容器装备多功能复合壳创新技术》,系作者退休后近年所作的重要创新科技总结,奉君参评留念;
- 5 承压工程需谋“变”发展而变强;雏龙竞翔,指创新技术将会被运用;
- 6 钱塘、天堂——著名浙江省会杭州,其如诗如画的湖(西湖、千岛湖)、江、河、群峰秀丽美景,其山水城市之间非常相宜的布局,真比天堂还天堂。

新型绕带压力容器创新科技的重要评价

(摘 录)

1. 1982 年全国科学奖励大会《奖励项目选编》(摘录)

发明奖励项目:“新型薄内筒扁平钢带倾角错绕式高压容器的设计”:

浙江大学化工系朱国辉等发明的“新型薄内筒扁平钢带倾角错绕式高压容器”,是为在厚度仅佔容器总厚约 20% 的圆直薄内筒外面,在简易钢带缠绕装置上冷态“倾角交错缠绕”佔容器总厚其余约 80% 的轧制简便的扁平钢带绕层,其每层钢带绕层仅需将其两端与容器的封头、底盖斜面相焊而成的一种新型高压容器。可用以制造内径达 3 m、内压达 100 MPa、总壁厚达 300 mm、长度达 30 m 或更大的各种高压容器。和当今世界石油、化工和核反应堆等大型贵重高压容器设备制造中广泛应用具有纵向与环向深厚焊缝的“厚钢板卷焊”、“筒节锻焊”,以及“多层包扎”、“多层热套”和德国的热态缠绕的“复杂型槽绕带”等现有技术相比,可减少大型困难的焊接、质量检验、机械加工和热处理等工作量约 80%,节省焊接与热处理能耗约 80%,节省钢材约 20%,提高制造工效约一倍,降低制造成本约 30%~50% 或更大。容器越大、越厚、越长,效果越显著。而且,该新型绕带高压容器,具有钢带缠绕的“预应力”作用,和特殊的“抗爆”等安全特性,使用安全可靠。值得推广应用。

2. 1995 年机械工业出版社出版发行的专著《新型绕带式压力容器》(朱国辉、郑津洋著)

由我国高校化工机械专业学科泰斗、老一辈著名专家、博士生导师,华东理工大学琚定一教授,为本专著(后被评为机械工业部科技进步二等奖)出版所写“序”的部分摘录:

浙江大学朱国辉教授等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,节省焊接与热处理能耗 80%,减少钢材消耗 20%,降低制造成本 30%~50%,在推广应用中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 余项专门技术的“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。

3. 因科技先进,新型扁平钢带交错缠绕容器,经作者师生共同努力已被正式列入我国压力容器设计规范 **GB150-2011 国标**(详见 GB150.3 附录 B-2011:钢带错绕筒体),并以 2269# 编号,1997 年经美国机械工程师协会两年时间六个层次数百位同行专家严格评审,始终无一人投票反对,终于以免于在美国再做任何核实试验的优惠条件,破天荒地继日本和德国之后,作为来自美国本土以外的第三个国家的重大科技,顺利通过列入了世界上最著名权威的美国 **ASME BPV Code(锅炉压力容器规范)**,可允许在国际上制造内径达 3.6 m、绕带壳壁同样亦可相应开孔接管的各种高温、高压、耐腐蚀等重大承压容器工程装备。

引 言

(关于现代压力容器工程装备的多功能复合壳创新科学理念)

压力容器设备的“壳”,如同通常气球的“膜”,是各种压力容器设备形成包围空间,具有一定强度,以承受内部(或/和)外部介质压力作用的最基本最主要的构造单元。压力容器的壳和通常气球的膜,作用与破坏现象相似,但构造科技和功能特性与破坏后果却截然不同。这里提示的是:压力容器设备的“壳”具有何种“功能特性”,是压力容器设备制造是否简便经济和使用是否安全可靠的本质的关键。现代的压力容器工程装备,有的其“壳”主要只具“承压”作用,使用中可能突然破裂,且制造极为困难昂贵;而有的其“壳”同样“承压”,制造简便经济,且能“分散缺陷”、“止裂抗爆”、“监控报警”,使用非常安全可靠。因而首先让我们共同探讨:当代压力容器装备应如何科学地解决好“壳”的这个本质关键问题。

当代工业生产与工程装备,广泛应用各种筒形或球形压力容器装备。起强度作用始终是各种钢制压力容器设备壳的最基本的功能。因包围空间大小、介质压力高低、温度与腐蚀特性及所用材质性能等诸多因素的不同,对于钢制“多瓣球罐”或“多节筒形与半球形端盖等构成的筒形等组合容器设备”而言,其起强度作用的这种壳所必需的设计“厚度”,通常都在 2~400 mm 之间变化。而其所包围容器空间的内部直径,对球形压力容器设备通常多在 2~35 m 范围内变化;对圆筒形压力容器设备通常多在 0.5~6 m 之间变化,其内部长度则多与其内径大小成正比,多在 2~50 m 之间变化;然更长的可能超过 100 m。所以,就多数重要压力容器设备而言,都是大型或重型承压装备。各种大型、超大型液态或气态压力贮罐、化工反应设备、高压氨合成塔、高温高压热壁石油加氢反应装置、高压尿素合成塔、

高压高温抗辐射核堆压力壳、液氢液氧火箭试验深冷高压容器,以及各种大型油、气长输管道等地面应用的大批压力容器设备,都是钢制压力容器工程装备。

国际上,长期以美国机械工程师协会锅炉压力容器规范(ASME BPV Code)为代表所主导的钢制压力容器设备,主要就是以强度功能作为对其壳应起的主要设计要求。从相关人员通常的主流意识或理念,到国家规定的锅炉压力容器设计规范,不论容器设备大小、长短、厚薄,至今实际上仍只是满足容器壳壁温度和腐蚀性作用条件下最基本的强度功能;而反映在壳的主要构造科技上,从沿续人类最初的只起强度这一最基本功能作用的整体铸造和整体锻造技术开始,先后虽然发明了较为先进的著名的钢板弯卷、冲压或筒节铸钢锻造成筒加工,乃至较薄钢板包扎、热套及薄内筒复杂型槽钢带热态缠绕等技术,然而至今“单层壳壁”和“贯穿焊缝”的构造技术仍始终是当今国际压力容器设备构成“壳”的最基本也是最主要的技术特征。即使像德国先后发明了具有变革意义的“整体包扎”和“单向型槽绕带”厚壁容器,其壳虽似具有优异的安全特性,然却因仍陷于单一的强度功能这一理念,最终又被众多“板间焊缝”或“型槽扣合单向缠绕”等不良的构造技术破坏了。百年来,国际上压力容器设备和输送管道的大量制造应用实践和不时发生的各种安全灾难事故已充分表明,当代国际压力容器设备这种单一的主要以满足强度设计使用要求的“壳”,不仅采用特厚钢板或大型筒节锻件等特殊原材料,焊接制造与在役检测困难,成本高昂,且由于“单层壳壁”或带“贯穿焊缝”等原因,其壳始终存在各种“裂缝扩展”而随时可能引发整体突然断裂及化学爆炸等严重危险,且都很难实施简便可靠的在线安全状态自动报警监控。

为改变这种状况,国际上百年来世界各国所作的各种探求努力与创新变革几乎从未停止过,并也相继创造了国际上如今所见的多种相当著名的壳壁构造技术(请参见图 2“单层化壳”示图)。然至今却未能对当今国际压力容器工程科技中所存在的这些主要困难和问

题取得多少根本性突破!

然而,在满足“强度与刚度”规范设计功能要求的前提条件下,以“窄薄截面”为主要构成原材料,“多层复合”创新(已含多项国家发明和专门技术)构造各种大型高压厚壁压力容器、大型与超大型压力贮罐设备、重要的量大面广的中压或低压容器设备,以及大型油气长输管道等各种重要压力容器设备的“壳”,就可能使其本质上就具有如下优异“功能”,即:原材料简单,成本低廉优质,焊缝少,无贯穿焊缝,焊接、机械加工、热处理等工作量少且容易,制造简便高效,制造成本显著降低,壳壁缺陷自然分散,层间止裂,抑爆抗爆,可实现简便可靠的在线安全状态计算机自动监控报警,在役定期停产安全检测维护简易可靠成本显著降低等突破性的变革(请参见图 1“多层化壳”示图及其说明,这将有助于读者对本书所述命题的初步理解)。(详论请参阅本书第一篇“要论”和第二篇“工程强度优化设计理论”等重要研究分析)。

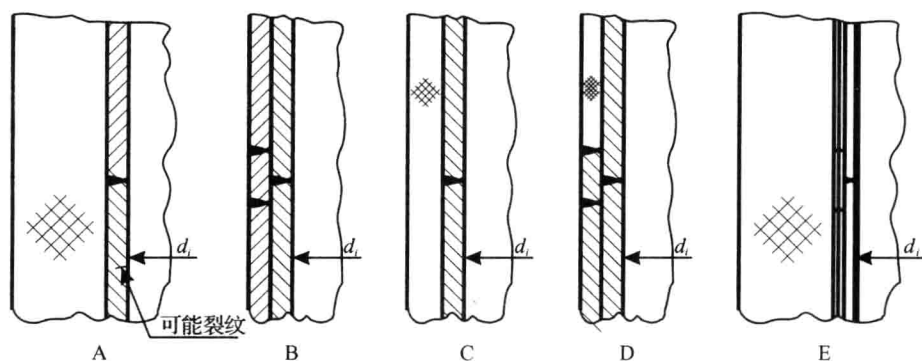


图 1 作者为首创导的“多层化”逐层“复合”“焊缝分散”的“多功能复合壳”

A. 20~400 mm 薄内筒扁平或单 U 槽钢带交错缠绕壳壁,制造简化,工效最高,成本最低(低达 50%);

B. 2~40 mm 双层螺旋或直缝焊管(或板)容器设备和长输管道,工效和成本基本相同,壳壁“层间止裂抗爆”;

C. 较薄内筒单 U 槽钢带交错缠绕大型超大型压力贮罐壳壁,成型简化,成本降低 30%以上,“层间止裂”;

D. 所有绕带壳壁和双层壳壁,“抑爆抗爆”,有“灵性”,可自动收集泄漏介质

和实现简单可靠的在线安全状态自动报警监控,显著降低在役停产安全检测维护成本(降低 50%以上);

E. 较厚第一层组合薄内筒钢带交错缠绕壳壁,具有抗高温失稳、耐腐蚀、抗辐射和自动监控报警等特性。

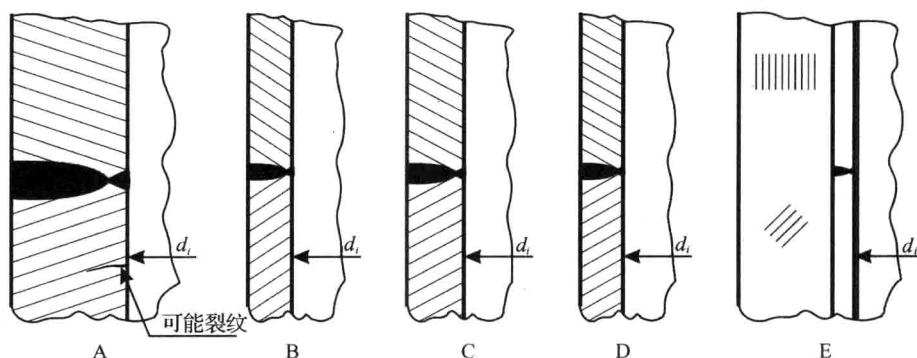


图 2 由 ASME BPV Code 主导的单层厚壁和薄壁带贯穿性焊缝的“单层化壳”

A. 40~400 mm 厚钢板弯卷或厚筒锻造异常困难,装备庞大,工效低,成本高昂,易形成裂纹等各种缺陷;

B. 2~40 mm 单层带贯穿焊缝等容器设备和管道易因腐蚀等扩展裂穿而引发燃烧爆炸中毒等各种灾难事故;

C. 裂纹在单层(薄或厚)壳壁和焊缝材质变脆部位的扩展可能“势如破竹”引发突然“断裂爆破”;

D. 所有单层(薄或厚)壳壁和焊缝部位,在役定期停产安全检测和在线安全状态自动报警监控困难,安全维护成本高昂,尤其大型球形压力贮罐设备;

E. 多层薄板整体包扎(焊缝太多)或复杂型槽钢带单向缠绕(内筒始终受扭)壳壁严重破坏了“多层化”。

图 1 和图 2 显示出压力容器设备两种“功能”特性截然不同的“壳”的构造科技。

显然图 1 所示的变革,是对当代压力容器设备工程科技开创战略性全新局面的一个重大挑战,也应是国际压力容器工程科技百年来所发生的一个根本性变革。这不仅根本简化了制造技术,而且也根本变革了压力容器壳壁止裂抗爆和实现在线安全状态自动报警监控的安全保障“属性”。显然,这是当代国际钢制压力容器工程科技

领域一个新的“创新科学理念”。(纤维缠绕压力容器复合壳的发展,亦有其与此相似又另有其特殊性的“创新科学理念”)。

这种钢制压力容器设备创新复合的“壳”,我们便称其为钢制压力容器设备的“多功能复合壳”。

作者这里慰告世界:以作者和现所长郑津洋教授先后为首的浙大化工机械研究所一批师生,经过 40 余年的创新研究与初步推广应用,正如本书所述,四种重要类型,应用范围宽阔,具“多功能复合壳”优异特性的钢制压力容器设备与油、气长输管道工程的创新科技,有的已初步推广应用,有的已有充分的可行性研究依据,均极具长远战略发展前景!

这里让我们仅举其中一例。请试设想,若需应用内径 3 m、内长 30 m、壳壁厚度 300 mm 的一种高温高压容器装备(如热壁高压石油加氢反应或精炼装备),采用“厚板筒节弯卷焊接”、或“重型筒节锻焊”、或“多层筒节薄板包扎焊接”、或“德国内筒整体精密加工型槽钢带单向扣合缠绕”的设计等制造技术构成带贯穿焊缝或有扭力作用的“单层化壳壁”,其制造与质量检测和抗突然断裂破坏与安全保障等技术会是多么困难!而如采用“多功能复合壳”的“薄内筒钢带交错缠绕”的设计制造技术,其制造与质量检测和抗断裂疲劳与安全保障等重要科技方面,则将会带来多么重大的变革!

目 录

第一篇 多功能复合壳钢制压力容器工程装备创新技术要论	1
一、国际钢制压力容器工程装备技术,对推进人类社会文明进步意义重大	3
二、当代国际重要钢制压力容器装备壳壁构造技术存在诸多不足	4
三、多功能复合壳创新构造技术核心理念	7
四、四种重要类型多功能复合壳钢制压力容器装备创新技术宽阔的基本工程应用设计规格范围	8
五、多功能复合壳的优异特性将对钢制压力容器装备壳壁的制造工程和安全保障技术带来根本变革	12
六、本创新科技的试验研究和成功安全推广应用	19
七、创新复合壳壁压力容器工程强度优化设计理论与相关技术简介	21
八、压力容器和大型长输管道工程长远科学发展的综合评价	24
九、结语:创新工程产业发展条件和从长远发展战略考虑提出的请求	33
第二篇 四种重要类型多功能复合壳钢制压力容器装备壳壁构造和工程强度优化设计理论分析	38
一、四种多功能复合壳压力容器壳壁构造技术的变革	40
二、四种重要类型多功能复合壳压力容器壳壁总厚的工程设计原则与工程强度设计要求	64
三、两种薄内筒钢带交错缠绕式压力容器的工程强度优化设计基本理论分析	66
第三篇 薄内筒钢带交错缠绕压力容器制造技术特性与制造成本分析	77
一、新型压力容器设备突出的简化制造技术(与安全使用可靠)特性	77

二、薄内筒钢带交错缠绕压力容器制造技术及其成本比较分析	79
三、简要结语	87
第四篇 新型钢带交错缠绕压力容器的全面试验和壳壁优异安全使用的可靠特性	89
一、钢带缠绕容器内压环向极限强度爆破试验	90
二、钢带缠绕容器内压轴向强度破坏试验	92
三、钢带缠绕预应力收缩效果测试	94
四、工程应用钢带缠绕容器 40700 次液体内压疲劳循环试验	95
五、工程应用绕带容器抑爆抗爆实例	96
六、绕带容器壳壁温差应力测试	98
七、绕带容器工业生产过程在线安全状态自动监控报警试验	98
八、绕带容器开孔接管测试和工业产品实际长期应用实例	101
九、钢带缠绕容器足够可靠的横向刚度产品实例	102
十、钢带缠绕高压容器工业产品内压疲劳循环实际应用实例	103
第五篇 多功能复合壳压力容器创新工程技术主要专门科技项目简要说明与典型产品系列	105
一、薄内筒扁平钢带倾角交错缠绕高压容器和贮罐设备	105
二、大型和超大型薄内筒对称单 U 槽钢带“扣合交错缠绕”高压容器和贮罐设备	106
三、双层结构壳壁筒型压力容器和贮罐设备	106
四、圆直较薄内筒(约占 30%~40%贮罐总壁厚)扁平或单 U 槽钢带交错缠绕大型和超大型压力贮罐设备	107
五、小顶盖小法兰轴向扁形抗剪螺钉自锁承力和轴向全自紧快速装拆大型高压密封装置	107
六、钢带缠绕和双层结构压力容器与贮罐设备全面在线安全状态自动报警监控装置	108
七、双层结构大型长距离输送管道	110
八、大型和超大型耐腐蚀多层薄内筒钢带交错缠绕高压尿素合成塔设备	112
九、大型和超大型内壁堆焊耐腐蚀抗失稳多层较薄内筒钢带交错缠绕高压	

热壁石油加氢或煤加氢液化炼制装置	113
十、薄内筒扁平或单 U 槽不锈钢带交错缠绕液氢、液氧高压深冷贮罐装备	114
十一、钢带交错缠绕第一层抗失稳内筒带堆焊层的多层薄内筒核动力反应堆压力壳	114
十二、钢带缠绕与双层结构各种抗爆炸高压容器装置	116
第六篇 钢带交错缠绕大型超高压氢气贮罐的基本工程设计对比分析 ...	120
一、内压 68 MPa、容积 28.4 m ³ 大型超高压氢气贮罐的基本设计和构造技术参数	120
二、高压球形贮罐和两端带半球形封盖的钢带交错缠绕筒形贮罐的厚度和重量	121
三、内径 1.5 m、长 15.2 m 钢带缠绕筒形压力贮罐的基本壁厚和重量	122
四、大型钢带交错缠绕筒形压力贮罐工程设计的基本强度校核	124
五、基本构造技术	126
六、制造成本得以大幅降低的基本原因	127
七、几种高压氢气贮罐基本制造成本估算对比	128
八、钢带交错缠绕筒形压力贮罐的主要突出发展优势	129
第七篇 钢带扣合交错缠绕超大型低压贮罐基本工程设计对比分析	145
一、内容积 20000 m ³ 中低压超大型压力贮罐的基本设计和构造技术参数	145
二、超大型压力球罐和两端带半球形封盖的钢带交错缠绕筒形压力贮罐的基本厚度和重量	146
三、基本构造技术	147
四、内径为 17 m、高 77.5 m 单 U 槽钢带交错缠绕筒形压力贮罐的基本壁厚和重量	148
五、超大型钢带交错缠绕筒形压力贮罐工程设计的基本强度校核	149
六、制造成本降低可 30%~40% 的基本原因分析	151
七、三种超大型压力贮罐制造成本的粗略对比估算	152

八、钢带交错缠绕筒形压力贮罐的发展优势	153
第八篇 四种重要类型多功能复合壳压力容器创新技术“创造性思维”过程举例简介	168
一、新型薄内筒钢带交错缠绕大型高压厚壁容器装备	168
二、新型机械化连续化快速成型双层薄壁中、低压容器设备	172
三、新型螺旋或直缝焊管双层壳壁大型特殊油、气长输管道	174
四、新型较薄内筒钢带交错缠绕超大型中、低压贮罐装备	176
第九篇 四种重要类型多功能复合壳钢制压力容器创新技术	
——致美国机械工程师协会总部专家领导的科技报告	180
一、引言	180
二、钢制压力容器设备壳壁构造工程技术的根本创新	181
三、四种重要类型多功能复合壳钢制压力容器装备	183
四、钢制压力容器设备多功能复合壳壳壁的优异特性	186
五、当代国际钢制重要压力容器壳壁构造工程技术的现状	193
六、多功能复合壳新型压力容器技术应用现状与主要成就	199
七、重要结语	202
第十篇 主要参考文献资料	204
特别附录 我这一生	208
后 记	273

第一篇 多功能复合壳钢制压力容器 工程装备创新技术要论

作者在浙大化工系化工机械研究所任教 40 多年,期间,作者 1964 年发明“新型薄内筒扁平钢带倾角错绕式高压容器”,之后又和后来的郑津洋教授等先后为首共同创导发明了“新型薄内筒对称单 U 槽钢带‘扣合错绕’高压容器”和“双层油、气长输螺旋或直缝焊管”与“双层螺旋或直缝焊接,或钢带‘扣合错绕’中、低压重要压力容器与大型贮罐设备”等四种重要类型应用范围宽阔的“多功能复合壳”钢制压力容器工程创新技术,即:

(1) 薄内筒“钢带错绕”大型和超大型特殊贵重高压与超高压容器工程装备;

(2) 圆直内筒钢带交错缠绕中、低压大型和超大型贵重承压贮罐工程装备;

(3) 双层壳壁或微型钢带交错缠绕地上或海洋水下大型油、气长输管道;

(4) 双层螺旋或直缝焊接壳壁中、低压重要关键承压容器与贮罐设备。

这四种重要类型具“多功能复合壳”优异特性的压力容器装备,打破了“单层壳”的传统理念,都是当代国际压力容器工程装备中应用范围宽阔的重要或重大工程装备。

和当代得到广泛应用的现有各种“单层壳”化工、炼油、核站等高压装备、超大型压力贮罐、大型油气长输管道及量大面广的重要中、低压压力容器设备相比,这些具“多功能复合壳”优异功能的创新压力容器装备,在制造科学经济和使用可靠与安全可监控报警等重要