

# 中国开创的抗爆钢复合材料压力容器技术

朱国辉

(浙江大学过程装备研究所, 杭州 310027)

**[摘要]** 压力容器是一种应用广泛的重要工程装置。大型压力贮罐、氨合成塔、尿素合成塔、石油加氢反应器、导弹壳体和液氢、液氧燃料压力容器, 以及核堆压力壳等是国际上公认的高科技重大承压装备。纤维复合材料和普通钢制是当今世界压力容器技术的两大种类。作者开创了一种新的具有优良综合特性, 已含国家发明奖励和 18 项中美专利成果的抗爆钢复合材料压力容器技术, 使压力容器的使用安全性和制造经济性发生了极大的变革; 其典型代表钢带缠绕式压力容器, 已被美国机械工程师学会正式列入 ASME 标准, 居国际领先水平, 将为 21 世纪国际压力容器的设计、制造和安全保障技术的发展开创出新的局面。

**[关键词]** 压力容器技术; 纤维复合材料; 钢复合材料; 复合薄内筒; 交错缠绕; 全双层结构; 抑爆抗爆

## 1 压力容器的重要应用和基本特点

压力容器在压力、温度、介质和长期操作循环作用下, 应力状态十分复杂<sup>[1]</sup>, 主要有:

环向应力为轴向应力的 2 倍, 解决其轴向强度问题却十分困难, 因容器往往长达 40 m 或更长;

内壁环向应力总是大于外壁, 壁厚大时内壁会先行屈服失效;

筒壁裂纹尖端的应力强度因子或裂纹张开位移可能超过材料的断裂韧性而扩张和失稳断裂;

随着使用时间的推移, 容器材质性能指标有恶化倾向, 尤其在腐蚀或辐射介质作用下, 断裂韧性甚至可能严重丧失。

压力容器是当代化工、炼油、石化、冶金、轻工、食品、宇航、海洋以及核站等广泛应用的关键设备。其中, 诸如大型压力贮罐、氨合成塔、尿素合成塔、石油加氢反应器, 以及核堆压力壳等都是国际上公认的高科技重大装备<sup>[2]</sup>。

应力状态复杂, 使用条件苛刻, 大型化, 制造运输困难, 安全状态难以实现自动监控, 潜在断裂爆破危险等, 是当代压力容器技术的基本特点。

国际上压力容器单台造价超千万美元和发生突然断裂、泄漏、爆炸、燃烧、中毒等严重后果的事例常见, 因此, 发展科学合理的压力容器技术关系重大。

## 2 压力容器技术未来发展的根本要求和方向

笔者认为, 对 21 世纪压力容器工程科技提出长远发展的根本要求, 以为评价各种压力容器技术提供客观依据标准, 主要方向应该如下:

材质自然可靠, 各种缺陷, 特别是隐藏在原材料和焊缝中的裂纹等缺陷应少且小, 最终又能被容器结构本身自然分散;

容器环向与轴向承压和温差应力状态均安全合理, 抗疲劳强度、刚度均足够可靠, 能实现较为理想的等强度优化设计;

根本消除厚环焊缝或贯穿焊缝, 避免单向缠绕的复杂型槽扣合或庞大的轴向承力框架;

根本改变容器突然断裂爆破的失效破坏方式, 具有“自我抑爆”保护功能, 在操作压力条件下; 即使发生腐蚀、疲劳等各种裂纹严重扩展, 容器结

构本质上不会发生突然断裂爆破的严重后果；

能实现经济可靠的失效报警，内部介质泄漏能自动收集与排放处理，在线安全状态及腐蚀状态能自动监控诊断；

制造过程避免使用大型、贵重设备和困难的制造技术，以根本避免制造过程产生裂纹等缺陷，并降低制造成本和提高生产效率；

能实行设备的预知维修，延长停产开罐检查的使用周期，减少频繁停产检查的重大经济损失；

具有耐高温、耐低温、耐腐蚀、耐辐射，以及较好的抗地震、飓风等突然冲击破坏的性能，结构设计灵活，限制条件少，适应范围广。

### 3 现有国际压力容器构造技术的两大类别与其基本特点评价<sup>[3]</sup>

一类是现有各种钢制压力容器，应用普通钢板、特厚钢板、锻造筒节以及钢丝、复杂型槽钢带等为主要原材料，通过以锻压、弯卷、套合、缠绕等为主的成型与焊接联接技术，构成各种单层、多层以及缠绕的主体结构，广泛应用于包括核压力容器在内的广大工业技术生产领域，具有韧性好、经久耐用、可以开孔、适用性广等特点。虽然极大多数压力容器设备都可安全运行，但都是建立在利用安全系数和频繁停产检查等高昂代价基础上的，而非出于容器结构本身的自我抑爆属性，且大量设备几乎都处于无保护状态。

另一类是现有各种纤维缠绕的复合材料压力容器，应用比强度和比刚度高的玻璃、碳、硼等纤维材料，通过两端挂颈缠绕和树脂增强技术，构成缠绕复合主体结构，具有缺陷分散、质量轻、耐腐蚀等优良复合特性，主要应用于宇航工程的导弹壳体 and 液体燃料压力容器及其他某些特殊场合。然而各种纤维材料的脆性，较低的疲劳强度，老化现象，绕层壳体不可开孔接管，以及高昂的产品成本等弱点，又使其在广大工业技术生产领域很难与钢制压力容器技术竞争。

### 4 钢复合材料压力容器技术的提出及其新体系广阔的适用范围

笔者提出的钢复合材料压力容器技术，应用结构离散、分层成型、复合承力、自我抑爆理论，即以扁平钢带或简单 U 型钢带与较薄钢板为主要原材料，综合钢制与纤维复合材料压力容器技术的优

势，去开发各种钢质压力容器，使其具有细薄材料、强韧兼备、材质可靠、构造灵活、逐步成型、简化制造、均匀应力、分散缺陷、层间止裂、整体抑爆、失效报警等基本特性。这就是笔者近年在美国讲学时所定义的钢复合材料压力容器技术，并以单层或多层薄内筒，扁平钢带倾角错绕，单 U 型钢带扣合错绕，堆焊或特殊结构薄内筒，端部斜面分散焊缝联接，全双层错开焊缝，泄漏检测系统安全状态自动监控，轴向全自紧扁形抗剪螺钉等发明特征技术，从构造技术本质上，创造并成功通过各种实验研究，形成了含国家发明奖励和 18 项中美专利成果的钢复合材料压力容器技术。

新型钢复合压力容器技术可复盖的应用设计参数范围归纳如下：

容器内径/mm	200~3 600 或更大
设计内压/MPa	0.1~300
容器壁温/℃	-253~+450
容器长度/m	~40
容器总厚/mm	10~400
内筒厚比	1/6~1/3
绕带层数/层	2~30
绕带角度	15°~30°
筒壁开孔率/d·D <sup>-1</sup>	≤1/4
原材料	各种压力容器用钢及铝合金、钛等材料
工作介质	各种腐蚀与非腐蚀性气态与液态压力介质

可应用于包括化工、炼油、石化、轻工、宇航等及其筒壁开孔场合，并具有材质可靠、制造简化、成本降低、整体抑爆、失效报警等突出性能。

### 5 典型钢复合材料压力容器

薄内筒扁平钢带高压容器技术特性<sup>[1]</sup>，可由图 1 所示堆焊内筒绕带式石油加氢反应器结构予以简要说明<sup>[5]</sup>：

这是一种与现有其他钢制压力容器完全不同，在我国已成功推广应用 7000 多台和已创 10 亿元以上的直接经济效益，并先后获国家发明三等奖等重大奖励的钢复合材料压力容器，主要由薄内筒，扁平钢带绕层，顶部法兰，双层球盖，外保护薄壳和高压密封装置，以及开孔接管等构成，其发明技术特征主要如下：

**薄内筒** 厚度只需约占容器总厚的 15%~30%，可为单层或多层组合结构，包括不同材料、耐腐蚀内层或内壁堆焊层，腐蚀状态检漏监测系统，以及辐射阻隔层等，功能扩大，设计灵活，制造根本简化。

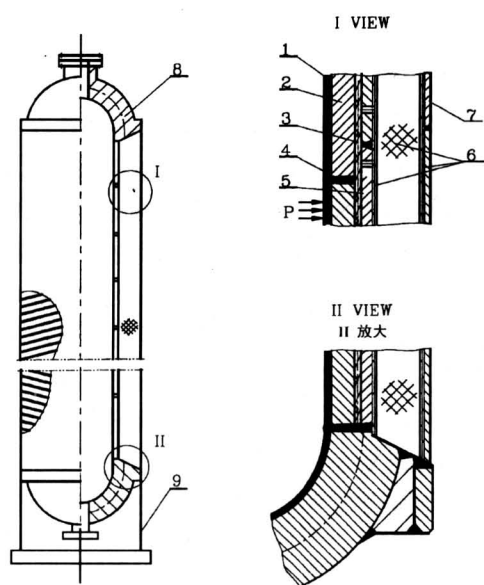


图1 新型堆焊薄内筒绕带式热壁石油加氢反应器

Fig.1 Unique thin layered inner shell and flat steel ribbon wound hot wall high pressure hydrogenation reactors

1-内壁堆焊层; 2-抗热变形刚性层; 3-腐蚀泄漏检测层; 4-薄内筒环焊缝; 5-附设强度层; 6-倾角错绕钢带层; 7-外保护薄壳; 8-半球形双层封盖; 9-裙座

**预应力钢绕层** 预应力扁平钢带倾角错绕(或U型钢带扣合错绕),采用厚2~8 mm、宽32~80 mm的热轧钢带(或其他材料),倾角 $15^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 各层(或每两层)绕向交错,使绕层受力均衡静定,并与内筒一起合理承担内压环向和轴向作用力;既是容器优化设计的主要承压强度层,也是确保容器安全使用的抑爆保护层。

**端部斜面分散焊缝联接** 每层钢带仅将其两端与顶部法兰或双层底盖的 $35^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 的斜面部分逐层相焊与检验,全长其余带间不需焊接,根本避免深厚焊缝,焊接工作可减少达80%。

**外保护薄壳** 绕层外部设置3~6 mm厚满焊检漏的保护薄壳,既使绕层免受雨水侵蚀,又是容器内部介质万一泄漏时的收集器,并可在其上装接在线介质泄漏报警处理与容器安全状态自动监控装置。

**局部带间加焊筒体开孔接管** 开孔部位局部每层带间加焊处理后,即可如其他多层筒体整体补强开孔接管,开孔率( $d/D$ )可达 $\leq 1/4$ 。

**全自动快速装拆高压密封结构** 容器顶部法兰

的大开盖可采用锻件质量可减轻40%,成本可降低40%的扁形抗剪螺钉全自紧快速装拆高压密封装置;当容器端部不需开大盖时,则采用双层钢箍加强的球形封盖。

## 6 突出的钢复合特性

理论研究与应用实践充分证明,上述压力容器技术长远发展的根本要求,对新型钢复合压力容器全部都能满足,主要表现在如下方面:

1) 较薄钢板尤其窄薄钢带,明显具金属纤维特性;所构成的容器缺陷必然少而小,且能最终被自然分散。价格通常可比厚钢板便宜25%。

2) 钢带各层(或每两层)预应力交错缠绕,容器内筒受力静定平衡;环向与轴向可以等强度设计,横向和径向刚度都很强;钢材的纤维特性和合理的应力分布使其疲劳强度更得以提高;筒壁内外的温差应力在通常都设置外保温层的条件下,和厚壁单层容器一样可忽略不计。

3) 容器全长均无贯穿爆缝和深厚焊缝;薄内筒质量可靠,构成容器筒体约80%份额的绕层,室温条件下实施机械化绕带,因而约80%的卷板、焊接、机械加工、质量检测,以及热处理等工作量均被取消。

4) 由于细薄截面钢材当量裂纹尺寸量显著减小,即使相同材料的断裂韧性也已得到显著提高;由于容器两端斜面分散焊缝钢带斜边的放大作用与斜面焊缝主应力方向发生改变等因素而使其成为联接最可靠的一种焊接结构;而交错缠绕离散化的绕带层,既是承压强度层,也是保障容器安全使用的非常可靠的抑爆保护层,所以即使内筒发生腐蚀、疲劳等裂纹严重扩展,只要法兰和多层封头等局部结构也设计合理,在使用压力条件下,容器绝不会发生突然断裂爆破事故;其整体爆破失效概率小于 $10^{-10}/\text{台}\cdot\text{年}$ ,比国际上公认可靠性最高的锻焊结构核堆压力壳的失效概率要求(如 $10^{-7}/\text{台}\cdot\text{年}$ )还可低三个数量级。

5) 即使由于意外因素内筒发生了泄漏,容器内筒与绕层也有天然“透气孔”,使其外泄卸压而被外保护薄壳自然收集,因而为各种压力容器杜绝易燃、易爆、有毒介质泄漏引起严重后果提供了合理可靠保障,且可实现泄漏介质自动排放(如返回生产工艺管线)与安全状态及腐蚀状态在线自动监控。这样全面的在线安全保障技术是现有其他钢制

压力容器和监控技术难以做到的。

6) 通常条件下易于制造的较薄内筒, 室温条件下缠绕的绕带过程, 和大约 80% 复杂困难的焊接、检验、机械加工、整体热处理等工作被革除, 以及大大简化了的频繁起吊过程等, 使其制造工效可提高近 1 倍, 生产成本可降低 30% ~ 50%, 这是当代国际压力容器制造技术上的一个重大变革。

7) 在有多层多根 (或外层) 绕层充分抑爆保护的前提下, 绕层外保护薄壳的设置和介质泄漏收集处理与安全状态在线自动监控技术的推广应用, 就尤其为各种特殊大型压力容器设备实现预知维修, 避免频繁定期停产检查及简化检查, 避免相应的重大经济损失创造了可靠条件。

8) 结构设计灵活的单层或多层结构薄内筒, 以及以薄攻厚、以简攻难的钢带缠绕技术对厚壁筒节锻焊或厚板卷焊或多层包扎、热套以及型槽绕带等复杂困难技术的取代, 将为各种耐高温、低温、耐腐蚀、辐射以及耐冲击、疲劳等压力容器与贮罐设备技术的发展开辟广阔的前景。如图 1 所示, 像石油加氢反应器那样的低温回火脆性, 内壁堆焊层氢剥离, 以及内壁腐蚀状态无法诊断和造价高昂等国际性难题都将迎刃而解<sup>[5]</sup>。

## 7 被列入 ASME 标准的中国技术<sup>[4,6]</sup>

ASME (美国机械工程师学会) 规范是国际上最具权威的标准规范, 是压力容器推广于世界的通行证。

绕带技术以其独特的结构特点, 完善的理论研究, 以及 30 多年的安全运行实践, 免除在美国作任何验证试验, 于 1997 年获准正式列入 ASME 规范标准, 允许在世界上推广制造内径达 3.66 m 的各种重大承压装备。这是中国第一项进入 ASME 的重大技术, 也是继日本、德国之后第三项 ASME

的外国技术。

## 8 结 语

按照未来压力容器技术长远发展的根本要求, 根据薄内筒扁平钢带倾角错绕高压容器优异钢复合特性的分析以及 30 年来的实际应用考核验证, 均表明钢复合材料压力容器技术是国际压力容器工程科技一个前景广阔的发展方向。笔者所开创的以扁平绕带、U 型绕带和全双层化等技术为主体的钢复合材料压力容器技术, 具有设计灵活, 制造简便, 使用安全, 便于开孔接管, 适应性广和易于实施在线安全状态自动监控等方面的独特优势, 构成了国际压力容器技术新的发展体系, 笔者愿与国内外科技专家、企业家和有关方面的领导者, 密切合作, 继续奋斗!

### 参考文献

- [1] 朱国辉, 郑津洋. 新型绕带式压力容器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1995
- [2] Fryer D M, John F, Harvey J F. High pressure vessels [M]. US, Chapman & Hall, 1997
- [3] Manesh Shah, Zhu Guohui. Burst resistant ribbon wound pressure vessels for ammonia plants [J], Process Safety Progress, AICHE, 1998, 17
- [4] Fryer D M, Zhu Guohui, Lee Shihming. Applying recent ASME BPV code case 2229 for flat-ribbon wound layered pressure vessels, PVP, 344, ASME, 1997
- [5] Zhu Guohui, Wu Hongmei. A unique hot wall hydrogenation reactors, PVP, 265, ASME, 1993
- [6] ASME BPV code case 2229 and ASME BPV code case 2269, Design of layered vessel using flat steel ribbon wound cylindrical shells, Section VIII, Division 1, 2. 1996, 1997

## Future Development Analysis of Chinese Burst Resistant Steel-Composites Structural Pressure Vessel Technology

Zhu Guohui

(Process Equipment Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

[Abstract] Pressure vessel technology is an important engineering scientific technology used widely in various industrial and high technologic fields.

(cont. on p.15)

甲车辆, 1999, (6): 10~11

克装甲车辆, 1999, (8): 11~14

[2] 庞宝文. 未来主战坦克电炮的发展与探索 [J]. 坦

## Consideration About Further Development of Firepower System of Next Generation of Tank Gun

Meng Shenfei

*(Plant 447 of the Ordnance Industries Group Corporation, Baotou, NeiMonggol 014033, China)*

**[Abstract]** Main battle tanks will still be one of the principal weapons used in army operations in the 21 st century. Up to now, the general concept on the next generation of tank has not been obvious and also there are much difficulty for all people to develop the firepower of tank. Nevertheless, both today's world situation and the setup of the arms rivalry from the military powers do bring about an appropriate condition on which the basic technology of the next generation of tank weapons will be formed and developed. Confronting with such a challenge. China should try its best to find and make a new breakthrough in the field of tank attack-defence confrontation and to strengthen the basic research of firepower technology and the advanced research of design in structure so as to lay a foundation for the research and manufacture of the next generation of tank with new features of firepower.

**[Key words]** tank gun; firepower system; proposal for further development

~~~~~  
(Cont. from p.11)

The so-called high technologic pressured equipment includes large pressure storage tanks, ammonia synthetic reactors, urea synthetic reactors, petroleum hydrogenation reactors, large rocket shells, liquid hydrogen and oxygen pressure vessels, nuclear power station pressure vessels and so on.

“Filament-Composites structural pressure vessel technology” and “General-Steel structural pressure vessel technology” are the two main sorts of the contemporary pressure vessel technology in the world.

A unique sort named “Steel-Composites structural pressure vessel technology” with several unique structural technologic system from low to high pressure application field, which has included China National Invention Prize and 18 Chinese and US patents in its system has been developed in China mainly by the author during past 30 years. This unique sort of pressure vessel technology has the excellent burst resistant and manufacturing cost reduced up to 40% etc. outstanding structural technologic characteristics. This will lead a radical reformation of pressure vessel technology in the world.

A typical technology of this unique sort named “flat steel ribbon cross-helically wound pressure vessel technology” used widely in China during past 30 years has involved officially in the ASME BPV Code as code number 2229 and 2269 for Section VIII, Division 1 and 2 in 1997 respectively for manufacturing various important large industrial pressured equipment in the world with internal diameter up to 3.66 m by American Society of Mechanical Engineers as the first instance of significant technology from China.

The unique pressure vessel technology was assessed an advanced high technology in the world. This will surely open a new development prospect in designing, manufacturing and safe protective technical aspects of the 21 st century by using the special Steel-Composites structural technologic nature.

**[Key words]** pressure vessel technology; filament-composites structure; steel-composites structure; compound thin inner shell; cross-helical wound; total double layered; burst arrested and burst resistance