

不锈钢内衬纤维复合材料球形高压容器研制

陈晓丽 谭 云 姜一鸣 丰 杰

(中国工程物理研究院结构力学研究所, 绵阳 621900)

摘要 采用高强芳纶Ⅱ和凯芙拉-49 纤维及不锈钢内衬, 研制出小型球形环氧树脂基纤维复合材料压力容器。主要介绍了容器的结构材料、设计、试验方法。通过容器的密封性检验及贮存前后的液压爆破试验, 结果表明, 容器的设计是成功的, 满足了设计使用要求。与同类钢制压力容器相比, 在内径、外径、工作压力、安全系数相同情况下, 该复合材料容器质量可减轻 60% 以上, 漏率小于 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$, 且贮存 3 年后爆破压力不会下降并略有提高。

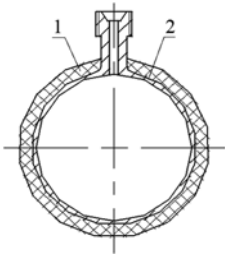
关键词 金属内衬 纤维缠绕 复合材料 压力容器

纤维复合材料因具有高比强度、高比模量等优异特性, 并具有缠绕工艺的许多优点, 已在国内外国防军工及各工业领域获得广泛应用。尤其是纤维缠绕工艺制作的压力容器以其高结构效率和高性价比成为国防军工领域的首选^[1-2]。为了推广其应用, 结合实际需要, 笔者开展了纤维缠绕复合材料小型贮气容器的研制。通过从选材、结构设计、力学分析和复合材料网络设计、制作成型工艺、试验方面开展的一系列研究工作, 使制作出的纤维复合材料压力容器性能指标达到设计使用要求。与同类钢制压力容器相比, 在内径、外径、工作压力、安全系数相同情况下, 质量可减轻 60% 以上, 且密封性能良好, 使用安全可靠。

1 球形容器的选材与结构分析

1.1 球形容器选材

图 1 所示为由金属内衬和复合材料外层组成的球形容器。



1—外层; 2—内衬

图 1 复合材料球形容器结构示意图

根据实际使用的容量、外形尺寸、工作压力、密封性、安全性要求, 金属内衬选用不锈钢, 外层选用环氧树脂(EP)/芳纶Ⅱ和凯芙拉-49 纤维复合材料。

表 1 示出球形容器所用材料的物理、力学性能。由表 1 可知, 两种不锈钢材料的性能指标接近, 而芳纶Ⅱ和凯芙拉-49 纤维除其拉伸强度有明显差异

表 1 容器所用材料的物理、力学性能¹⁾

项 目	内 衬		外 层		
	1Cr18Ni9Ti	316L	EP/芳纶Ⅱ	EP/凯芙拉	EP 体系
密度 / g · cm ⁻³	7.98	7.93	1.45	1.45 [*]	1.16 [*]
拉伸强度 /MPa	≥500 [*]	≥490 [*]	2 800	3 600 ~4 200	70
屈服强度 /MPa	≥200 [*]	≥180 [*]			
断裂伸长率 /%	≥50 [*]	≥40 [*]	2.0 ~3.0	2.0 ~3.0	1.0 ~2.5
拉伸弹性模量 /MPa	1.88 × 10 ^{5*}	1.86 × 10 ^{5*}	1.1 × 10 ^{5*}	1.25 × 10 ⁵	3.2 × 10 ³
泊松比	0.28	0.28 [*]	0.34	0.34	0.30

注: 1) 带“*”数据为热处理后的实测结果, 不带“*”数据由手册查得。

外, 其余性能参数基本相同。

1.2 内衬结构与力学分析

内衬是容器的主要组成部分, 它的主要作用是密封气体或其它介质, 并作为外层复合材料缠绕的支撑体, 同时要求便于与外部系统相连。因此, 不仅应具有良好的密封性, 而且应具有一定的强度、刚度及较好的成型工艺性。由于其工作压力和尺寸大小有一定的要求和限制, 必须选取适宜的壁厚, 并制定可行的成型工艺。

结构设计中, 根据有限元理论进行了力学分析, 针对颈口部位和赤道焊缝处的应力集中, 进行了补强设计。通过力学分析计算, 给出了一定内压下内衬球壳上各特征点的等效应力值, 见表 2。特征点部位如图 2 所示。

表 2 内衬球壳上各特征点的等效应力值(内压 = 10 MPa)

项 目	特征点											
	1	10	15	20	31	33	40	50	55	61	64	74
应力 /MPa	223	220	206	154	153	199	221	222	200	128	105	10

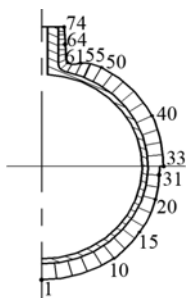


图2 内衬应力特征点部位

从表2、图2可以看出,内衬在压力为10 MPa作用下,其最大应力出现在下半球底部和上半球与轴线约成45°方向处。由此表明,赤道处采取的补强设计是有效的。

1.3 纤维复合材料外层的网络设计

纤维复合材料外层是容器的主承力件,由于纤维具有各向异性,在平行纤维方向具有很高的拉伸强度和拉伸弹性模量,且密度小,因此容器的极限强度主要由纤维强度所决定,其质量可以比同类钢制容器明显减轻。在外层纤维的网络设计和力学性能的理论分析及编程计算中,根据预定的爆破压力、内衬的外径、纤维复合材料的拉伸强度、拉伸弹性模量、断裂伸长率、密度和纤维缠绕时的张力、带宽等参数值,计算确定了纤维缠绕时需控制的主要参数值。根据这些参数值,在球形缠绕机上可缠绕出符合设计要求的复合材料外层。

2 结果与讨论

2.1 密封性试验

采用氦检漏法对两种不锈钢制作的内衬及其复合材料容器进行了密封性检测。结果表明,采用1Cr18Ni9Ti经锻造、热处理工艺制作的内衬球壳因材质缺陷曾出现点漏,而采用316L不锈钢经锻造、热处理工艺制作的内衬球壳无一件点漏,且缠绕后的复合材料容器在工作压力下检漏,其漏率均小于 $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$,这与计算结果基本一致。

2.2 位移及体胀试验

试验前,从0~10 MPa进行了两次循环加载,经检查确认连接部位无渗漏现象、测试数据正常后再进行位移和体胀测试。位移测点主要分布在容器轴线、赤道及45°方向。

试验时,压力从零开始逐渐分级增压,每级压力为10 MPa,每升压一级记录各测点位移值和溢出液体的质量,压力达到150 MPa后卸压至零。由此得到不同测点的压力-径向位移和压力-体胀曲线。

体胀量的测试采用称重法,将试件置于一密封容器内,容器内部充满液体,当试件充压发生体胀时,液体从漏口溢出,滴入电子天平的烧杯内并进行称量。体胀试验示意图如图3所示。

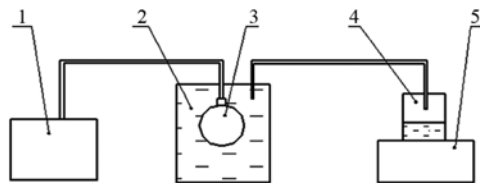


图3 体胀试验示意图

通过试验得出:(1)复合材料容器各测点径向位移随压力的增加而呈非线性递增,其大小因方位不同而有所差异,即赤道部位径向位移小于45°和90°(轴线)方向,这与理论分析计算结果相符合,由此表明金属内衬赤道焊缝处采取的补强设计是有效的;(2)当试件压力增加到150 MPa时,各测点径向位移均小于1 mm,表明高压下容器会有一定变形;(3)容器的体胀随压力增高而呈非线性增大,且各试件的压力-体胀曲线基本一致,说明其试件制作的工艺稳定性较好。

2.3 贮存及液压爆破试验

(1) 贮存前液压爆破试验

爆破试验在液压爆破试验装置上进行。试验装置采用两级增压方法:第一级是手动增压泵,第二级是倍压器,可将压力增加约10倍。增压装置后接一介质更换器,既可用酒精介质又可用油性或其它液体介质,从而扩大其使用范围,试件置于防爆箱内并与压力传感器相通,试验流程示意图如图4所示。

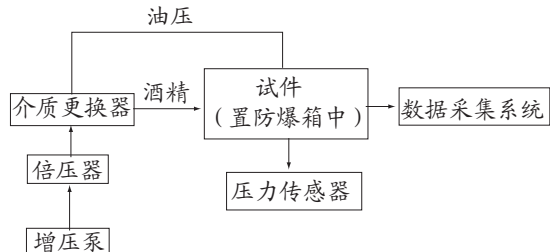


图4 液压爆破试验流程示意图

试验时,压力从零逐渐缓慢升至试件爆破。试验结果表明,用国产的芳纶Ⅱ和进口的凯芙拉-49纤维缠绕的复合材料容器,其爆破压力值相差较大,后者约是前者的1.5倍,这是由于凯芙拉-49纤维的拉伸强度比芳纶Ⅱ高,是前者的1.3~1.5倍。

(2) 贮存后液压爆破试验

复合材料容器先后分两批贮存,其环境条件为

室内自然环境。第一批进行了金属内衬、EP/芳纶Ⅱ复合材料作外层的复合材料容器空载贮存;第二批进行了金属内衬、EP/凯芙拉纤维复合材料作外层的复合材料容器在空载和充压(工作压力下)两种状态下的贮存,贮存后的液压爆破试验结果如下:①芳纶Ⅱ或凯芙拉-49 纤维复合材料容器在自然环境条件下贮存 1~3 年后,其容器的爆破压力不会下降且略有提高。由此表明纤维复合材料在 3 年内自然老化、蠕变不会降低容器的承载能力;②复合材料容器不论是在空载还是充压状态下贮存,其贮存后的爆破压力无明显差异,且贮存前后内压下降很小,由此表明,容器密封性良好。

2.4 与同类钢制容器比较

对同一内径和外形尺寸的钢制压力容器而言,其承载能力大小取决于钢材的力学性能。为了与同类钢制压力容器进行比较,复合材料容器设计时取

其内径、外径、工作压力与钢制压力容器相同,通过爆破试验表明,两种容器的爆破压力相当,均超过 200 MPa。

3 结语

纤维复合材料容器与同类钢制压力容器相比,当其内径、外径、工作压力、安全系数基本相同情况下,质量可减轻 60% 以上,漏率可满足使用要求。在室内自然环境条件下贮存 3 年后,其容器的爆破压力不会下降并略有增加,满足设计使用基本要求。因此可以取代同类钢制压力容器,且可以做到小型、质轻,安全可靠。

参考文献

- [1] 郑津洋,傅强,开方明,等.轻质高压贮氢容器的现状及发展趋势[J].太阳能学报,2004(5):576-581.
- [2] 章伟灿.复合材料的压力容器研究与发展[J].中国化工设备技术,2007(3):44-47.

DEVELOPMENT OF FIBRE COMPOSITE SPHERICAL HIGH PRESSURE VESSEL WITH STAINLESSSTEEL LINER

Chen Xiaoli, Tan Yun, Jiang Yiming, Feng Jie

(Institute of Structural Mechanics, Chinese Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

ABSTRACT By using high strength aramid fibreⅡ and kevlar-49 fibre and stainlesssteel liner, one small spherical epoxy resin matrix fibre composite pressure vessel is developed. The structure material, design and testing methods of the vessel are introduced. Through pressure tests and hydrostatic pressure blast tests of the composite vessel before storage and after storage, the results show that design of the vessel is successful, and it can meet the requirement for use in a certain product. The weight of the composite vessel is over 60% lighter than that of the same kind of steel pressure vessel when the inner and outer diameter, work pressure and safety coefficient are same. The leak rate is lower than $1 \times 10^{-8} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$. After three years' storage of definite environment, the blast pressure goes a little higher instead of decreasing.

KEYWORDS metal liner, fibre winding, composite, pressure vessel

Polykemi 推出汽车用 GF 增强 PP

柏力开米 POLYKEMI 最近推出了一个新的 GF 系增强 PP 系列,此系列能够替代 PA6 及 PBT 在某些产品中的应用。此系列中的低密度 Polyfill 特别适合汽车业使用。该化合物意在弥补 PP 和 PA6 的热物理性能的不足,比如更适合做汽车引擎的盖子和其他零部件。

POLYKEMI 是全球著名的化学公司,总部设在瑞典年销售额 1 亿欧元, POLYKEMI 是北欧最大的工程塑料制造商之一,工程塑料年生产能力为 5 万 t,有 2 个生产基地和 2 个研究开发中心,在全球有商业活动。(工塑网)

和氏璧化工联手埃克森美孚隆重推出 高性能聚烯烃材料

和氏璧化工作为埃克森美孚的一级代理商,推出该公司的高性能聚烯烃材料——Exxtral,该材料以 PP 为基材,广泛应用在汽车外饰(如保险杠、防擦条等)、内饰(如仪表板、AB

柱等)及引擎盖下的部件,并已通过众多主机厂(如通用、大众、福特等)的认证。

同时,该材料也适用于家电领域,如冰箱、洗碗机的部件。(中聚网)

实现低成本生产的新型母料由抚顺石化推出

近日,一种新母料由抚顺石化洗厂研发成功,该母料在保持产品各项技术指标不变的前提下,降低了生产成本,实现了原料配比新突破。

据介绍,这款新型母料增加了增塑剂和抗氧剂成分,使母料添加比例从原来的 1/10 提高到 1/5,降低了主原料使用量。经纬度拉力、显度、重量及附着力实验证明,产品的各项技术指标均达到要求。由于新型母料中减少了碳酸钙等成分,极大降低了生产过程中刀片、刀架的磨损,延长了换网周期,减少了生产过程中的粉尘,预计每年可降低生产成本 12 万元。(中色网)