

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.02.011

FRP 汽车储气罐缠绕参数对力学性能的影响

郭巍^{1,2,3,4}, 黄浩^{1,2,3}, 苑大超¹, 周天平⁵, 谈兴旺⁵

(1. 武汉理工大学, 现代汽车零部件技术湖北省重点实验室, 武汉 430070; 2. 武汉理工大学, 汽车零部件技术湖北省协同创新中心, 武汉 430070; 3. 武汉理工大学, 湖北省新能源与智能网联车工程技术研究中心, 武汉 430070; 4. 武汉理工大学先进材料制造装备与技术研究院, 武汉 430070; 5. 湖北双鸥汽车饰件有限公司, 武汉 430070)

摘要: 在设计商用车所使用的 FRP 汽车储气罐时, 通过选取不同的玻纤缠绕参数、碳纤缠绕参数和胶接接头参数, 运用有限元分析探讨缠绕参数与力学性能之间的交互效应, 为设计新型 FRP 汽车储气罐中相关参数的选取提供参考。结果表明: 筒身的玻璃纤维以及碳纤维缠绕层数推荐布置为 4 到 6 层, 纤维的缠绕角以不同的缠绕次序交叉缠绕较佳; 胶接接头中胶层厚度增加会减缓胶层损伤, 但过厚会使得胶层的刚度下降, 胶接长度推荐设置为 40 mm。

关键词: 纤维增强复合材料; 汽车储气罐; 玻璃纤维; 碳纤维

中图分类号: TB322 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)02-0053-07

Influence of Winding Parameters of FRP Vehicle Air Tanks on Mechanical Properties

Guo Wei^{1,2,3,4}, Huang Hao^{1,2,3}, Yuan Dachao¹, Zhou Tianping⁵, Tan Xingwang⁵

(1. Wuhan University of Technology, Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan 430070, China; 2. Wuhan University of Technology, Hubei Collaborative Innovation Center for Automotive Components Technology, Wuhan 430070, China; 3. Wuhan University of Technology, Hubei Research Center for New Energy & Intelligent Connected Vehicle, Wuhan 430070, China; 4. Institute of Advanced Materials and Manufacturing Technology Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 5. Hubei Shuangou Automotive Trim Co. Ltd., Wuhan 430070, China)

Abstract: When designing fiber reinforced polymer (FRP) air tanks for commercial vehicles, different glass fiber winding parameters, carbon fiber winding parameters and glued joint parameters were selected, and the finite element analysis was used to explore the interaction between the winding parameters and mechanical properties. It provides a reference for the selection of relevant parameters in the design of new FRP vehicles air tanks. The results show that the number of winding layers of glass fiber and carbon fiber in the barrel is recommended to be 4-6, and the winding angle of the fiber is better to cross-wind in different winding order. The increase of the thickness of the adhesive layer in the glue joint can reduce the damage of the adhesive layer, but excessive thickness can reduce the rigidity of the adhesive layer. The recommended bonding length is 40 mm.

Keywords: fiber reinforced composite material; vehicle air tank; glass fiber; carbon fiber

储气罐作为可承受内部压力载荷的结构之一, 在汽车行业有着广泛的应用^[1]。目前大量使用的储气罐仍然主要由钢或铝等金属材料来生产制造, 其有着质量大、不耐腐蚀、易渗漏等缺点, 无法满足当前对于汽车零部件轻量化、高结构效率的设计要求^[2]。因此, 新型的纤维增强复合材料 (FRP) 汽车储

气罐具有质量更轻、耐腐蚀以及可靠性更好等优点, 成为当前行业的发展趋势之一^[3]。

对于如何最优地选取 FRP 储气罐结构设计相关参数, 国内外学者在对各构型储气罐的纤维缠绕方面进行了相关研究。M. W. K. Rosenow 等^[4]通过对纤维缠绕角在 15° 至 85° 中取不同值时, 薄壁

基金项目: 新能源汽车科学与关键技术学科创新引智基地项目 (B17034), 中国教育部创新研究团队发展规划项目 (IRT_17R83), 中央高校基本科研业务费专项资金项目 (项目批准号 2019 III 112CG), 国家重点研发计划项目 (2018YFB1106700)

通讯作者: 苑大超, 副研究员, 博士生, 主要从事汽车轻量化研究 E-mail: whutgw@whut.edu.cn

收稿日期: 2019-11-18

引用格式: 郭巍, 黄浩, 苑大超, 等. FRP 汽车储气罐缠绕参数对力学性能的影响 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(2): 53-59.

Guo Wei, Huang Hao, Yuan Dachao, et al. Influence of winding parameters of FRP vehicle air tanks on mechanical properties[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(2): 53-59.

复合材料压力容器的应力应变分布变化情况进行研究,得到轴向应力与环向应力之比为 0.5 的圆筒状容器的最佳缠绕角为 55° 。T. Messenger 等^[5]对复合材料圆柱壳的铺层方式进行优化,得到最优的纤维铺层方式。J. S. Park 等^[6]研究了不同纤维缠绕角对复合材料压力容器的应力分布情况的影响。

但是,目前针对 FRP 储气罐的研究依然不够全面,较少考虑到多种纤维多层缠绕对力学性能的复合影响。笔者以商用车所使用的 FRP 储气罐为研究对象对其结构进行分析,建立储气罐的静力分析有限元模型。通过改变储气罐缠绕参数,探讨其对储气罐力学性能的影响规律,从而开发出更轻质、环保、可靠的储气罐产品,助力轻量化储气罐在汽车行业的推广应用,实现汽车的节能减排^[7]。

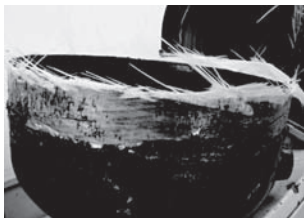
1 爆破试验分析

根据 GB/T 15385-2011《气瓶水压爆破试验方法》进行物理试验,该试验以水作为加压介质,逐步增大受试瓶的压力,直至受试瓶爆破。选取不同结构参数的 FPR 汽车储气罐,其爆破后的断口特征和瓶体破裂形态也各不相同。

图 1 为水压爆破试验结果。



(a)



(b)



(c)

a—筒身破坏断裂; b—筒身与端盖连接处断裂;

c—筒身与端盖粘接处脱粘

图 1 水压爆破试验结果

由图 1 可得,筒身的破坏形式与缠绕角息息相关,破坏断裂路径几乎沿着纤维的缠绕方向而生成。筒身两端与端盖连接处为结构的薄弱环节,在该处容易存在应力集中现象,并可能造成该处筒身结构的断裂。当 FRP 汽车储气罐的筒身与端盖粘接处的接头没有得到合理的设计或是胶接工艺有缺陷

时,会使得该位置发生拉脱。为避免上述现象发生,就有必要进行相关分析试验,以优化 FRP 储气罐的结构参数,提高力学性能。考虑到相关试验样本数量多、工作量大,将采用有限元仿真的方法来对问题展开研究。

2 试验设计

2.1 产品结构与材料

图 2 为所设计的 FRP 汽车储气罐结构,其主要由中部的筒身段及两侧的端盖构成。筒身由缠绕的纤维与树脂基体复合成型,两侧为由短玻纤与热塑性基体经模压成型得到的端盖。端盖内侧布置筋条以起到对端盖进行增强的作用,为满足储气罐的功能要求还需布置三个进排气口,筒身与端盖经树脂粘合连接以保证储气罐的气密性。该款储气罐主要用于商用车的制动、空气悬架以及其它需要压缩空气的场合,其工作压力设计为 1 MPa 左右,爆破压力设计为 5 MPa,安全系数为 5,储气罐容积为 55 L。储气罐的筒身段由两种纤维先后缠绕而成,即内衬的玻璃纤维和外部的碳纤维。对于玻纤缠绕层,选取 E-玻璃纤维(E-Galss),基体选取 ARALDITE 公司的 LY556 型号树脂。LY556/E-Glass 复合材料相关材料参数见表 1^[8]。

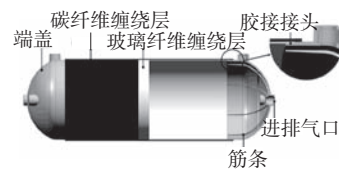


图 2 FRP 汽车储气罐结构示意图

表 1 LY556/E-Glass 单向复合材料性能参数

属性	参数	属性	参数
E_{11} / GPa	45.6	G_{13} / GPa	5.83
E_{22} / GPa	16.2	G_{23} / GPa	5.7
E_{33} / GPa	16.2	X_t / MPa	1280
ν_{12}	0.278	X_c / MPa	800
ν_{13}	0.278	Y_t / MPa	40
ν_{23}	0.4	Y_c / MPa	145
G_{12} / GPa	5.83		

注: E_{11} , E_{22} , E_{33} 分别为沿 1,2,3 弹性主方向上的弹性模量; ν_{12} , ν_{13} , ν_{23} 分别为 1-2,1-3,2-3 平面内的泊松比; G_{12} , G_{13} , G_{23} 分别为 1-2,1-3,2-3 平面内的剪切模量; X_t 为纵向拉伸强度, X_c 为纵向压缩强度; Y_t 为横向拉伸强度, Y_c 为横向压缩强度。

对于碳纤维缠绕层,选取 Hercules 公司的 AS4 碳纤维,基体选取为 3501-6 环氧树脂。AS4/3501-6 单向带的力学性能见表 2。

端盖为片状模塑料 (SMC) 复合材料, SMC 复合材料的相关性能见表 3。

表2 AS4/3501-6 单向复合材料性能参数

属性	参数	属性	参数
E_{11} / GPa	126	G_{13} / GPa	6.6
E_{33} / GPa	11	X_t / MPa	1950
ν_{12}	0.28	X_c / MPa	1480
ν_{13}	0.28	Y_t / MPa	48
ν_{23}	0.52	Y_c / MPa	200
G_{12} / GPa	6.63		

表3 端盖 SMC 复合材料性能参数

密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	拉伸弹性模量 / GPa	ν	拉伸强度 / MPa
1.8×10^3	21	0.3	90

2.2 有限元模型

笔者在有限元分析软件 ABAQUS 中建立如图 3 所示的有限元模型,有限元模型中结构的相关尺寸按照实际的尺寸进行建模。最后划分完成的网格共有 C3D8R、COH3D8、C3D4 等单元 268 114 个,节点 252 498 个,包含 5 层碳纤缠绕层以及 5 层玻纤缠绕层。对于纤维缠绕层部分,需重新定义扫描路径使其与纤维层堆叠方向一致。

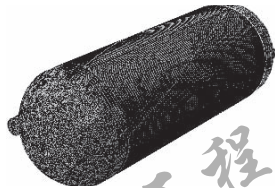


图3 FRP 汽车储气罐有限元模型

2.3 试验方案

(1) 玻纤缠绕参数的影响

FRP 汽车储气罐的筒身先用玻璃纤维进行缠绕。选取三个在玻纤缠绕层中对结构力学性能影响较显著的因素,包括纤维缠绕角、纤维缠绕层数、缠绕纤维单层厚度等^[9],相关设置见表 4。

表4 玻纤缠绕参数

缠绕参数	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 5	水平 6	水平 7
缠绕层数 / 层	2	3	4	5	6	7	8
缠绕角度 / ($^{\circ}$)	0	15	30	45	60	75	90
单层厚度 / mm	0.2	0.26	0.33	0.4	0.46	0.53	0.6

(2) 碳纤缠绕参数的影响。

在筒身外部再缠绕碳纤维时,选取缠绕层的层数、缠绕角度、缠绕长度三个因素,探究其对筒身结构强度的影响,相关参数设置见表 5。

表5 碳纤缠绕参数

缠绕参数	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 5	水平 6	水平 7
缠绕层数 / 层	2	3	4	5	6	7	8
缠绕角度 / ($^{\circ}$)	0	15	30	45	60	75	90
缠绕长度 / mm	610	617	624	630	637	644	650

(3) 胶接接头参数的影响。

选取胶接处粘合剂的厚度以及搭接长度为研究对象,探讨其对结构以及胶接接头力学性能的影响

响^[10],相关参数设置见表 6。

表6 胶接接头参数

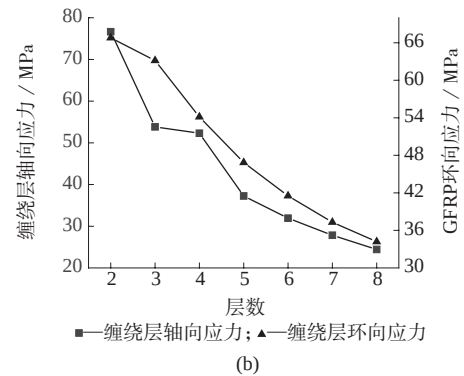
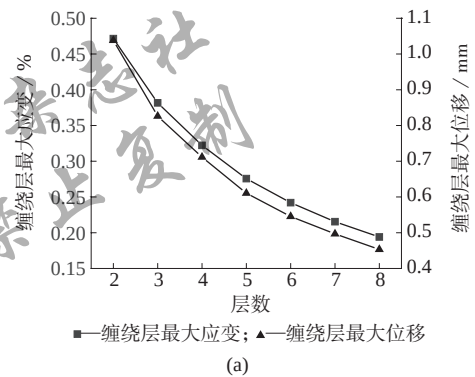
参数	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4	水平 5	水平 6	水平 7
胶层厚度 / mm	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
粘接长度 / mm	25	30	35	40	45	50	55

3 结果与分析

3.1 玻纤缠绕参数的影响

(1) 玻纤缠绕层数。

图 4 为玻纤缠绕层相关性能参数随层数变化情况。由图 4 可知,玻纤缠绕层的位移、应变、轴向应力和环向应力均随着缠绕层数的增加而下降。在缠绕层数较少时,玻纤缠绕层的应变和位移下降较快,当缠绕层数达到 5 层时,下降速率逐渐趋缓,此时的轴向应力为 37.2 MPa,小于复合材料基体拉伸失效应力 40 MPa。



a—玻纤缠绕层应力 / 位移; b—玻纤缠绕层轴向 / 环向应力

图4 玻纤缠绕层相关性能参数随层数变化情况

根据储气罐结构的应力分布情况,结构的最大应力主要分布于筒身靠近端盖的两侧,在筒身与端盖连接处也有应力集中现象出现。筒身中部的应力较端盖大,是整个储气罐的薄弱环节。筒身中部所承受的环向应力较两端大,而两端由于需要与端盖进行粘接,轴向应力相对较大。

(2) 玻纤缠绕角度。

纤维缠绕按角度可分为:螺旋缠绕、纵向缠绕和环向缠绕^[11]。图 5 为玻纤缠绕层相关性能参数

随缠绕角变化情况。由图5可得,当缠绕角小于 45° 时,缠绕角的变化对筒身玻纤缠绕层的应变影响较小;当缠绕角大于 45° 后,缠绕层的应变随着角度的增加而降低。对于缠绕层的位移,由于纤维环向缠绕时其轴向强度低而引起较大的轴向位移,环向铺放时的位移大于纵向铺放。纤维在环向缠绕时环向应力较大,在纵向铺放时轴向应力较大。根据玻纤缠绕层的应力分布情况,纵向铺放时其中部的环向应力较大,两侧由于端盖唇口分担部分载荷,环向应力相对较小;环向铺放时其环向应力的分布较纵向铺放均匀,可以减小应力集中程度。综合起来看,单一的环向铺放、纵向铺放均不是理想的缠绕形式,较优的纤维缠绕结构应该是相互交织的网状结构。

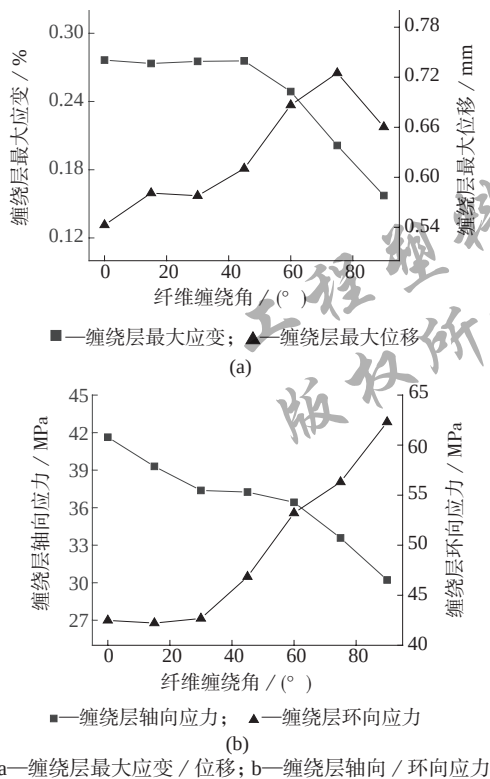


图5 缠绕层相关性能参数随缠绕角变化情况

(3) 玻纤单层厚度。

图6为纤维缠绕层相关性能参数随单层厚度变化情况。由图6可得,筒身纤维缠绕层的应变值、轴向应力和环向应力均随着单层缠绕纤维厚度的增加而下降,下降速率由快渐慢;且在同一层厚下,筒身的环向应力总大于轴向应力。但随着单层厚度的增加,储气罐的质量也会随之增加。

通过有限元分析,在单层厚度为 0.4 mm时,玻纤缠绕层在 1 MPa内部压力加载下,在Z. Hashin^[12]

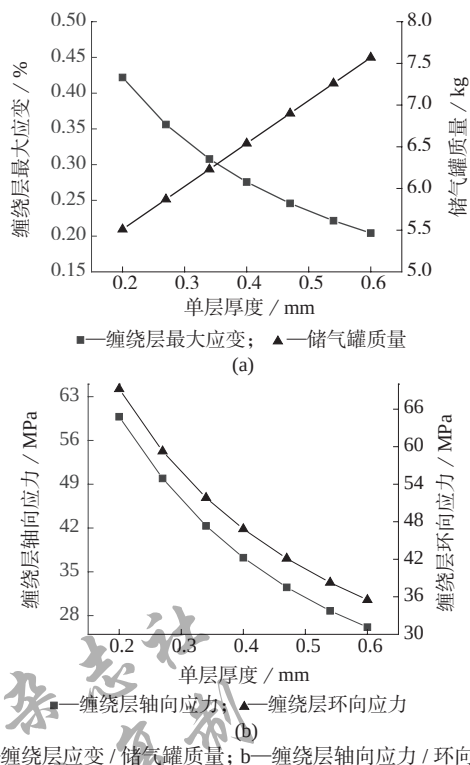


图6 相关性能参数随单层厚度变化情况

失效准则下基体和纤维的损伤主要是拉伸损伤,二者均不承受压缩载荷或压缩载荷极小。基体的拉伸损伤主要分布于筒身的中部,而纤维的拉伸损伤则主要在筒身与端盖的过渡处。

3.2 碳纤缠绕参数的影响

(1) 碳纤缠绕层数。

图7为碳纤缠绕层相关性能参数随缠绕层数变化情况。

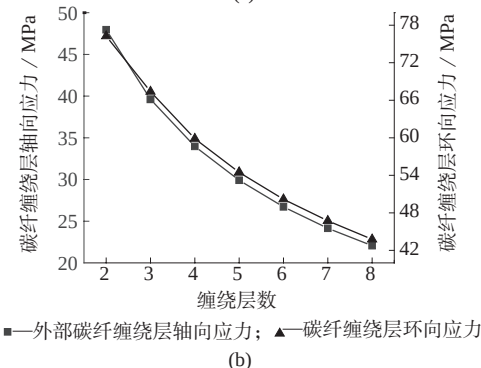
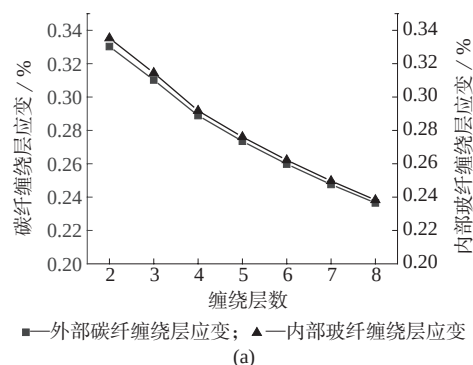
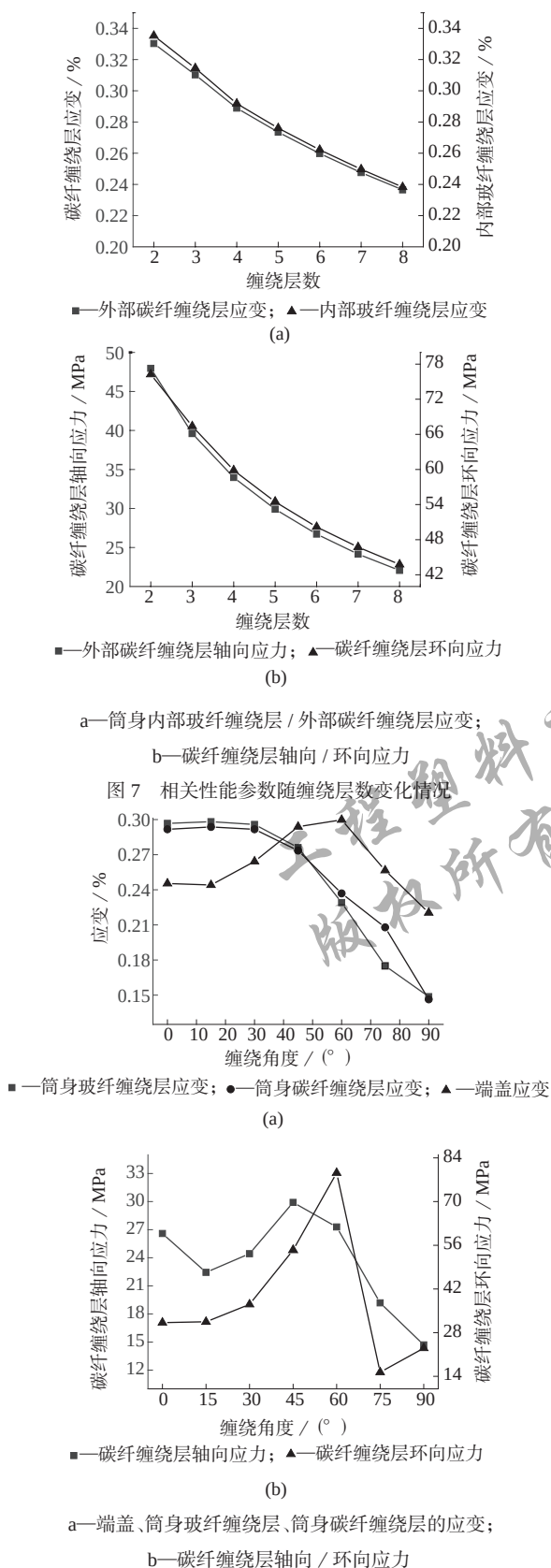
由图7可得,假定玻纤缠绕层的层数固定为5层时,无论碳纤缠绕层的层数如何变化,内部玻纤缠绕层的应变总稍大于外部碳纤缠绕层。筒身外部碳纤缠绕层的轴向应力和环向应力随缠绕层数增加而下降,下降速率由快渐趋缓,且轴向应力总小于环向应力。

储气罐的变形主要集中在筒身与端盖的过渡区域。对于储气罐整体而言,其变形主要是沿轴向和径向的涨开。筒身外部碳纤缠绕层的轴向应力分布较均匀,玻纤缠绕层的轴向应力主要分布于两侧。

(2) 碳纤缠绕角度。

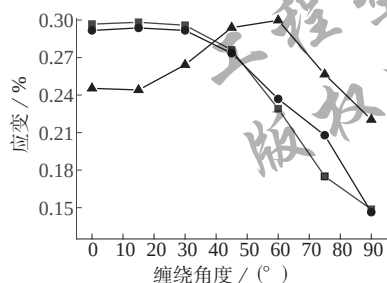
图8为碳纤缠绕相关性能参数随缠绕角度变化情况。

由图8可知,端盖的应变随碳纤缠绕角的增大呈先增大后减小的趋势,其中以缠绕角 65° 时为端

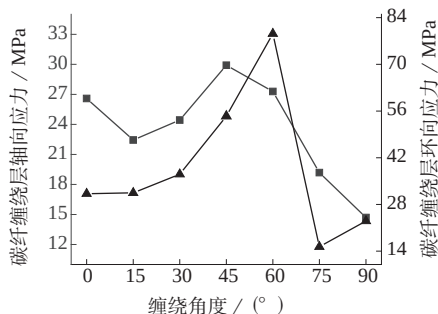


a—筒身内部玻纤缠绕层 / 外部碳纤缠绕层应变;
b—碳纤缠绕层轴向 / 环向应力

图7 相关性能参数随缠绕层数变化情况



■—筒身玻纤缠绕层应变; ●—筒身碳纤缠绕层应变; ▲—端盖应变



■—碳纤缠绕层轴向应力; ▲—碳纤缠绕层环向应力

a—端盖、筒身玻纤缠绕层、筒身碳纤缠绕层的应变;
b—碳纤缠绕层轴向 / 环向应力

图8 碳纤缠绕层相关性能参数随缠绕角度变化情况

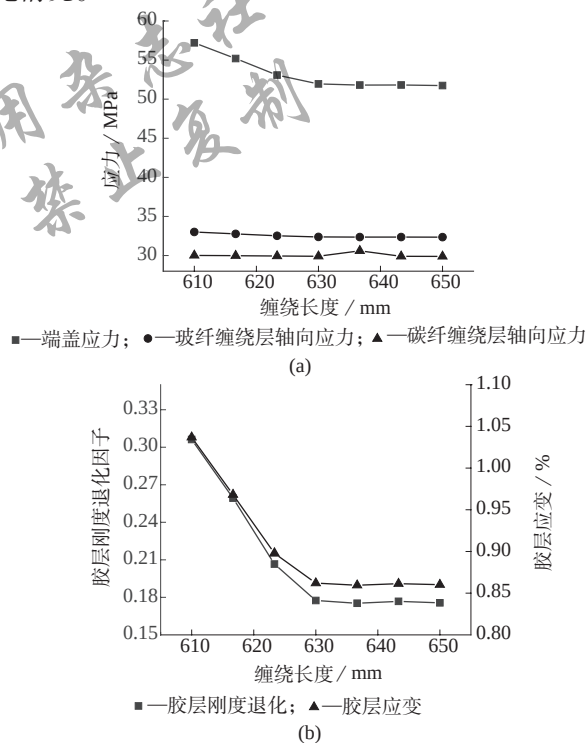
盖应变的峰值。当碳纤缠绕角小于 35° 时,缠绕角的变化对筒身的应变影响较小;当缠绕角大于 35°

时,筒身内外缠绕层的应变均以较快速度下降。对于轴向应力,碳纤维为纵向铺放时的应力大于环向缠绕。对于环向应力,当纤维为螺旋缠绕时较大,而环向缠绕时较小;在 65° 左右发生较大的转折,这表明只有碳纤缠绕角接近于环向缠绕时,筒身的环向强度才会得到较好的加强。

根据碳纤缠绕层的环向、轴向应力分布情况,碳纤维纵向铺放时其环向强度很弱,结构的环向应力大;而碳纤维环向缠绕时其轴向强度弱,结构的轴向应力大。碳纤维环向缠绕时,在缠绕层的两侧有环向应力集中现象。综合来看,筒身碳纤缠绕层较理想的缠绕角亦是相互交织的网格结构。

(3) 碳纤缠绕长度。

图9为碳纤缠绕层相关性能参数随缠绕长度变化情况。



■—端盖应力; ●—玻纤缠绕层轴向应力; ▲—碳纤缠绕层轴向应力

a—端盖应力、筒身玻纤缠绕层轴向应力、筒身碳纤缠绕层轴向应力;

b—筒身与端盖粘接胶层刚度退化 / 胶层应变

图9 碳纤缠绕层相关性能参数随缠绕长度变化情况

通常情况下,外层碳纤缠绕长度应大于内层玻纤,多余部分用于与端盖搭接。由图9可得,筒身外部碳纤缠绕长度的变化对筒身的轴向应力影响不大。在碳纤缠绕层缠绕长度小于 630 mm 时,端盖的应力、胶层刚度退化因子和胶层应变均随着碳纤缠绕长度的增加而下降;当缠绕长度大于 630 mm 后,缠绕长度的增加对其再无影响。这表明碳纤缠

绕层与端盖的搭接增强了筒身与端盖之间的粘接强度。

图 10 为筒身内外部纤维与端盖粘接界面。可以看出,其粘接界面较光滑。

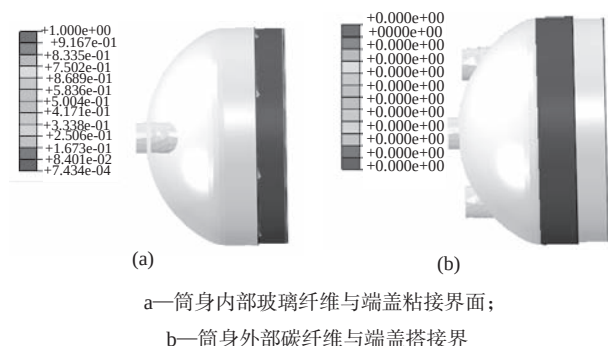
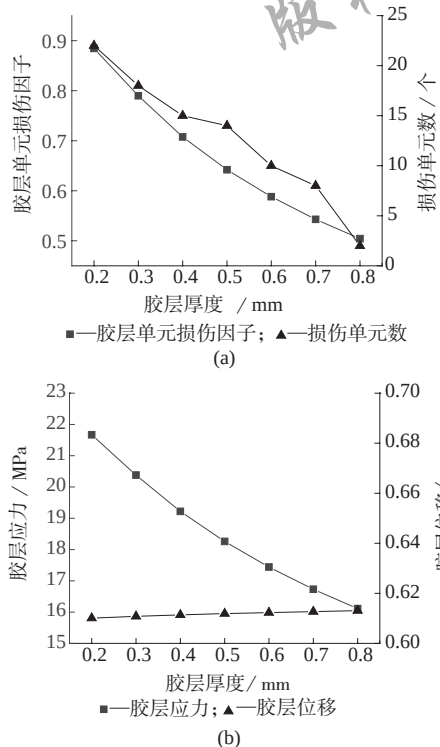


图 10 筒身内外部纤维与端盖粘接界面

3.3 胶接接头参数的影响

(1) 胶层厚度。

图 11 为胶接接头相关性能参数随胶层厚度变化情况。由图 11 可知,胶层单元的损伤因子^[13]、损伤单元数和胶层应力均随胶层厚度的增加而下降,这表明胶层厚度的增加可以有效地减缓胶层损伤的出现。然而,由于胶层厚度的增加会使得胶层刚度的下降,胶层位移随着胶层厚度的增加略有上升的趋势,从而在同一加载下更易于变形。因此,胶层厚度不宜布置得过大^[14]。

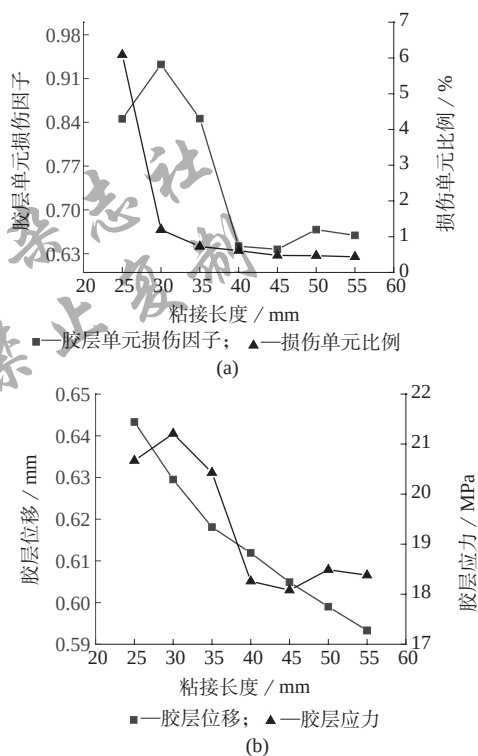


a—胶层单元损伤因子 / 胶层损伤单元个数; b—胶层应力 / 位移

图 11 胶接接头相关性能参数随胶层厚度变化情况

(2) 粘接长度。

图 12 为胶接接头相关性能参数随粘接长度变化情况。由图 12 可得,当粘接长度较小时,胶层损伤单元的比例随着粘接长度的增加而迅速下降;当粘接长度大于 30 mm 后,粘接长度的变化对损伤单元的比例影响较小;当粘接长度达到 40 mm 后,损伤因子、胶层应力均开始趋于较小的稳定值。胶层位移则是随着粘接长度的增加而下降,这表明在同一胶层厚度下,随着粘接长度的增加胶层刚度有所增加。但是,胶层的粘接长度也并非越大越好,因为过大的粘接长度会引起被粘接结构的过度改变。



a—胶层最大损伤因子 / 胶层损伤单元比例; b—胶层应力 / 位移

图 12 胶接接头相关性能参数随粘接长度变化情况

图 13 为 25, 55 mm 胶层单元损伤图。

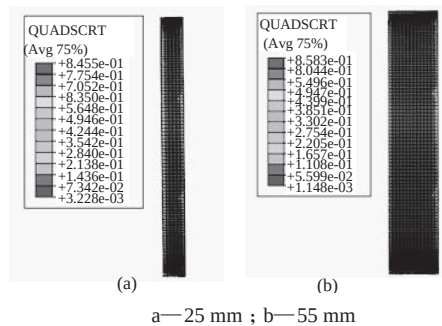


图 13 胶层单元损伤

由图 13 可知,无论粘接长度为最小的 25 mm 或最长的 55 mm,损伤出现的位置基本都是类似的,

由于端盖内部筋条周期性的设置而导致在远离端盖一侧的胶层沿圆周呈现周期性的损伤趋势。另外,25 mm 粘接长度的胶层单元损伤数量以及损伤因子明显大于 55 mm 粘接长度的胶层单元。

4 结论

筒身的玻璃纤维以及碳纤维缠绕层数,不宜布置得过多或过少,推荐布置为 4 到 6 层左右;而纤维的缠绕角不宜采用单一的环向铺放、纵向铺放,应以不同的缠绕次序交叉缠绕较佳。胶接接头中胶层厚度增加会减缓胶层损伤,但过厚会使得胶层的刚度下降;胶接长度不宜小于 30 mm,推荐设置为 40 mm 左右。

参考文献

- [1] 潘红军,薄瑞峰,沈兴全. ANG 汽车储气罐结构优化的研究[J]. 机械设计与制造,2013(11):53-56.
Pan Hongjun, Bo Ruifeng, Shen Xingquan. Research of the structure optimization of ANG auto gas storage machinery[J]. Design & Manufacture, 2013(11):53-56.
- [2] 于斌,刘志栋,靳庆臣,等. 国内外空间复合材料压力容器研究进展及发展趋势分析(一)[J]. 压力容器,2012,29(3):30-42.
Yu Bing, Liu Zhidong, Jin Qingchen, et al. The review of world-wide space system composite pressure vessel and the development trend analysis (1)[J]. Pressure Vessel, 2012, 29(3):30-42.
- [3] Tsai S W. Theory of composite design[M]. 4th ed. Dayton:Think Composites, 1988:15.
- [4] Rosenow M W K. Wind angle effects in glass fiber-reinforced polyester filament wound pipes[J]. Composite, 1984, 15(2):144-152.
- [5] Messenger T, Pyrz M, Gineste B, et al. Optimal laminations of thin underwater composite cylindrical vessels[J]. Composite Structures, 2002, 58(4):529-537.
- [6] Park J S, Hong C S, Kim C G, et al. Analysis of filament wound composite structures considering the change of winding angles through the thickness direction[J]. Composite Structures, 2002, 55(1):63-71.
- [7] 武万斌,年雪山. 汽车轻量化技术发展趋势[J]. 汽车工程师, 2017(1):15-17.
Wu Wanbin, Nian Xueshan. Development of vehicle lightweight technology[J]. Automotive Engineer, 2017(1):15-17.
- [8] Hinton M J, Kaddour A S, Soden P D. Failure criteria in fibre reinforced polymer composites:The world-wide failure exercise[M]. Oxford:Elsevier, 2004:50-69.
- [9] 周吉. 纤维缠绕压力容器的强度分析和优化设计[D]. 武汉:华中科技大学,2015.
Zhou Ji. Strength analysis and optimal design of fiber wound pressure vessel[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2015.
- [10] 叶斐. 碳纤维层合板胶接性能研究[D]. 太原:中北大学,2015.
Ye Fei. Study on the adhesion properties of carbon fiber laminate[D]. Taiyuan:North University of China, 2015.
- [11] 古海波. 全缠绕复合气瓶预紧压力和缠绕层厚度的优化[D]. 大连:大连理工大学,2006.
Gu Haibo. Optimization of pre-tightening pressure and winding layer thickness of fully wound composite gas cylinder[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [12] Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of Applied Mechanics, 1980, 47(2):329-334.
- [13] 曹明. ABAQUS 损伤塑性模型损伤因子计算方法研究[J]. 交通标准化,2012(2):51-54.
Cao Ming. Research on damage plastic calculation method of ABAQUS concrete damaged plasticity model[J]. Highway Engineering, 2012(2):51-54.
- [14] 李龙,胡平,刘立忠. 不同胶层厚度单搭接接头剪切试验与强度预测[J]. 农业机械学报,2010,41(12):17-21.
Li Long, Hu Ping, Liu Lizhong. Strength of adhesively bonded single lap for differential bond line thickness and tension loading prediction[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2010, 41(12):17-21.