

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.08.022

涤纶纤维增强聚乙烯复合管承压性能模拟

张学敏¹,周腾¹,李厚补²,王品¹,袁战伟¹,肖春红¹

(1. 长安大学材料科学与工程学院, 西安 710064; 2. 中国石油集团石油管工程技术研究院, 西安 710077)

摘要: 针对纤维增强塑料复合管实物承压性能测试工作量大、成本高以及影响因素不明确等问题,采用有限元模拟分析法研究了复合管生产工艺对承压性能的影响。依据公称直径 150 mm、公称压力 2.5 MPa 涤纶纤维增强塑料复合管的结构及材料特征,采用 Halpin-Tsai 模型法建立了复合管的有限元模型,研究了纤维铺层数量、纤维缠绕角度以及内衬层壁厚等工艺参数对复合管承压性能的影响。结果表明,采用建立的复合管模型模拟计算的管材爆破压力为 11.105 MPa,与实物管材水压爆破值 10.75 MPa 的相对误差仅为 3.302%。增加纤维层的数量、纤维缠绕角度以及内衬层壁厚均可提高复合管的承压性能。综合考虑制造成本和生产效率,分析获得涤纶纤维增强聚乙烯复合管最佳生产工艺参数为纤维铺层数为 4 层、纤维缠绕角为 56°、内衬层最小壁厚为 9 mm。

关键词: 涤纶纤维; 柔性复合管; 爆破压力; 有限元模拟; 缠绕角度

中图分类号: TE832 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)08-0118-05

Simulation of Pressure-bearing Performance of Polyester Fiber Reinforced Polyethylene Composite Pipes

Zhang Xuemin¹, Zhou Teng¹, Li Houbu², Wang Pin¹, Yuan Zhanwei¹, Xiao Chunhong¹

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China)

Abstract: Aiming at the problems such as heavy workload, high cost, and unclear influencing factors of pressure-bearing performance test of fiber-reinforced plastic composite pipes, the influence of composite pipe production process on pressure-bearing performance was studied by using finite element simulation analysis method. Based on the structure and material characteristics of polyester fiber reinforced polyethylene composite pipes with the nominal diameter of 150 mm and the nominal pressure of 2.5 MPa, a finite element model of the composite pipe was established by the Halpin-Tsai model method. The effects of process parameters such as the number of fiber layups, the fiber winding angle, and the wall thickness of the inner liner on the pressure-bearing performance of the composite pipes were studied. The results show that the bursting pressure of the pipe calculated by the established model is 11.105 MPa, and the relative error with the real pipe hydraulic blasting value of 10.75 MPa is only 3.302%. Increasing the number of fiber layers, the fiber winding angle, and the wall thickness of the inner liner can improve the pressure-bearing performance of the composite pipes. Considering the manufacturing cost and production efficiency comprehensively, the optimal production process parameters of the polyester fiber reinforced polyethylene composite pipe are obtained as follows, the number of fiber layers is 4 layers, the fiber winding angle is 56°, and the minimum wall thickness of the inner lining layer is 9 mm.

Keywords: polyester fiber; flexible composite pipe; burst pressure; finite element simulation; winding angle

相比于传统钢制管道质量大、柔性小以及耐腐蚀性差等缺点,增强热塑性塑料(RTP)管凭借其强度高、柔性好、耐蚀性优、运输安装方便等一系列优点在石油天然气领域的应用越来越广泛^[1-2]。RTP

管通常分为三层结构,内外层为耐腐蚀的热塑性塑料管,中间层一般是由涤纶纤维、芳纶纤维、聚乙烯纤维等缠绕而成的增强层^[3]。生产工艺一般为先挤出内衬层,然后交错缠绕纤维增强材料,最后再挤出

基金项目: 长安大学中央高校基本科研业务费专项基金项目(300102310201),中石油超前储备研究基金项目(2017D5008),国家级大学生创新创业训练计划项目(202010710156)

通讯作者: 李厚补,高工,主要研究方向为油气田用非金属与复合材料管材 E-mail: lihoubu@cnpc.com.cn

收稿日期: 2020-05-18

引用格式: 张学敏,周腾,李厚补,等. 涤纶纤维增强聚乙烯复合管承压性能模拟[J]. 工程塑料应用,2020,48(8):118-122,129.

Zhang Xuemin, Zhou Teng, Li Houbu, et al. Simulation of pressure-bearing performance of polyester fiber reinforced polyethylene composite pipes[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):118-122, 129.

覆盖外保护层。其中,内衬层壁厚、纤维缠绕角度、纤维铺层数量等工艺参数直接影响着 RTP 管的使用性能^[4-8]。为了建立工艺条件与 RTP 管使用性能之间的影响关系,必须进行大量的试验,这必然导致生产周期和制造成本的增加。目前国内 RTP 管的生产制造大多仍停留在一定经验基础上,缺乏系统的理论指导;对于复合管使用性能的测试大多只关注宏观结果,无法有效分辨材料、结构、工艺等因素对复合管性能的影响。因此,系统研究生产工艺参数对 RTP 管性能的影响,对于保障产品质量及其稳定性,避免 RTP 管生产制造及性能测试的盲目性具有重要意义。

有限元技术的飞速发展,为建立复合管生产工艺参数与使用性能的关系提供了有效途径。它能够依据产品的工艺设计精确预测出其使用性能,从而获得最优工艺,降低材料的消耗和试验成本。Xia M 等^[9]对内压载荷下纤维缠绕管进行了应力应变分析,认为纤维缠绕管的应力和变形与各层的缠绕方式密切相关,确定了缠绕角度变化对轴向应变的影响。张尹^[10]利用纤维缠绕增强复合管有限元模型对 RTP 管在三种轴对称载荷(拉伸、内压、拉伸与内压)下的受力状态进行了分析,得到管道拉伸载荷位移曲线、Kevlar 纤维应力变化情况以及管道的截面变形,并且结合理论方法验证了所建模型的可靠性。熊海超^[11]通过有限元方法研究了钢丝缠绕增强塑料复合管的极限强度,分析了管道生产制造及运行过程的缺陷对其力学性能的影响,结果表明在钢丝断裂处会出现明显的鼓包现象且爆破内压值显著降低;外层聚乙烯的轴向和环向破损缺陷基本对内压爆破值没有影响,但随径向缺陷的加深其爆破值会减小。郑津洋等^[12-13]研究了钢骨架复合管在内压荷载下的破坏行为,并指出对于带有多层增强层的复合管,最内层增强层上的应力状况可作为判定管道破坏的标准。

虽然国内外利用有限元法对复合管在内压载荷^[14-15]下的力学响应有所研究,但对影响管道使用性能的因素讨论较少,且未将复合管设计参数与使用性能联系起来,无法有效指导 RTP 管的生产制造。因此,笔者基于有限元分析系统建立了涤纶纤维增强聚乙烯复合管模型,模拟分析了涤纶纤维铺层数量、纤维缠绕角度以及内衬层壁厚等生产工艺参数对管材承压性能的影响规律,确定了公称直径 150 mm (DN150)、公称压力 2.5 MPa (PN2.5 MPa)

涤纶纤维增强聚乙烯复合管最佳生产工艺参数,从而为 RTP 管的生产制造提供一定的理论依据。

1 有限元模型建立和验证

1.1 模型建立

(1) 几何及材料参数。

选取 DN150 / PN2.5 MPa 的涤纶纤维增强聚乙烯复合管为研究对象,具体几何参数见表 1。内衬层和外保护层材料分别为中密度聚乙烯和低密度聚乙烯,增强层是涤纶纤维合股丝,其性能参数分别见表 2 和表 3。

表 1 涤纶纤维增强聚乙烯复合管几何参数

项目	内径 / mm	外径 / mm	内层厚度 / mm	外层厚度 / mm	涤纶纤维层数	纤维缠绕角度 / (°)
数值	148	180	10	4	4	± 55

表 2 内外层材料参数

材料	弹性模量 / MPa	屈服强度 / MPa
内衬层	403.1	17.33
外保护层	300.8	8.66

表 3 涤纶合股纤维参数

项目	线密度 / dtex	断裂强力 / N	断裂强度 / (cN · dtex ⁻¹)	断裂伸长率 / %
数值	20 370	1 650	8.1	15.2

(2) 建模方式。

依据涤纶纤维增强聚乙烯复合管的实际尺寸及结构特征,并按照某工厂传统的生产工艺:涤纶纤维以 ± 55° 由内向外螺旋缠绕形成增强层、铺层数量为 4 层,建立复合管的有限元模型如图 1 所示。

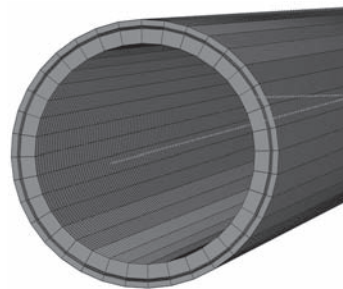


图 1 纤维增强聚乙烯复合管有限元模型

管道整体采用 C3D8R 单元划分网格。采用复合材料均质化 Halpin-Tsai 模型法^[16]模拟增强层,即将整个增强层视为一种正交各向异性的均值材料交错缠绕而成,4 层涤纶纤维以缠绕角度 55° 由内向外堆叠,如图 2 所示。

(3) 边界条件与载荷确定。

研究涤纶纤维增强复合管道在内压载荷作用下的力学性能,需对复合管模型进行一定的边界约束。在复合管两个端部圆心处建立参考点,将管道

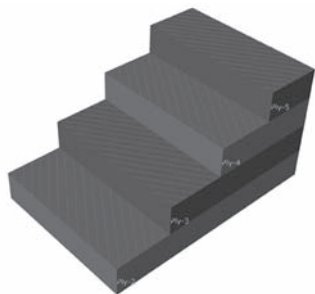


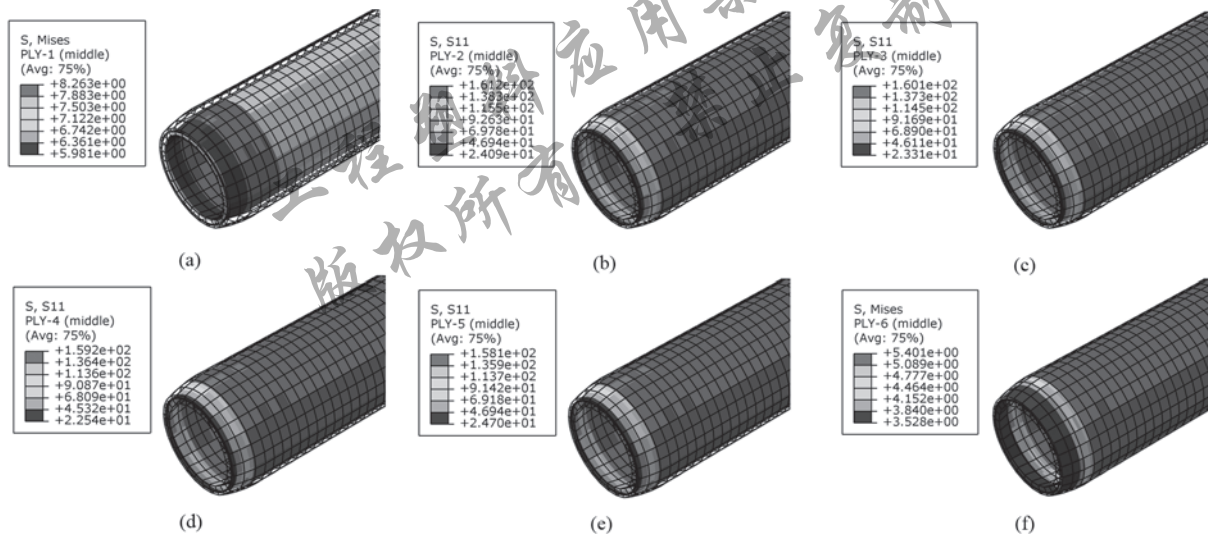
图2 涤纶纤维铺层模型

端部的三个圆环截面全部节点与圆心参考点进行耦合。固定约束管道其中一端的参考点,另一端参考点限制5个自由度仅开放轴向自由度。在管道内表面施加均匀的内压载荷,载荷大小从零逐步增大。

1.2 模型验证

基于以上所建立的复合管模型,对其经受内压载荷作用下的力学行为进行了有限元模拟,获

得 3.75 MPa (1.5 倍公称压力) 内压下 DN150 涤纶纤维增强聚乙烯复合管各结构层的应力云图,见图 3。可以看出,在内压载荷作用下,复合管各结构层受力均匀且横截面仍保持圆形。该内压载荷作用下,模拟计算的复合管外径增加 3.156 mm,与实测的 1.5 倍公称压力下保压 4 h 后的实物管材外径增加 3.24 mm 极为接近,初步表明建立的复合管模型是准确的。进一步对比各层应力云图发现,四层涤纶纤维的应力随铺层顺序的增加依次略有降低,如第一层与第四层的应力分别为 161.2 MPa 和 158.1 MPa,但均远大于内外聚乙烯层的应力 8.263 MPa 和 5.401 MPa,这是由于内衬层和外保护层聚乙烯材料的弹性模量远小于涤纶合股纤维的弹性模量,涤纶纤维增强复合管在承受内压载荷时,纤维增强层是主要承载部分,且纤维层的承载力自内向外逐步减小。



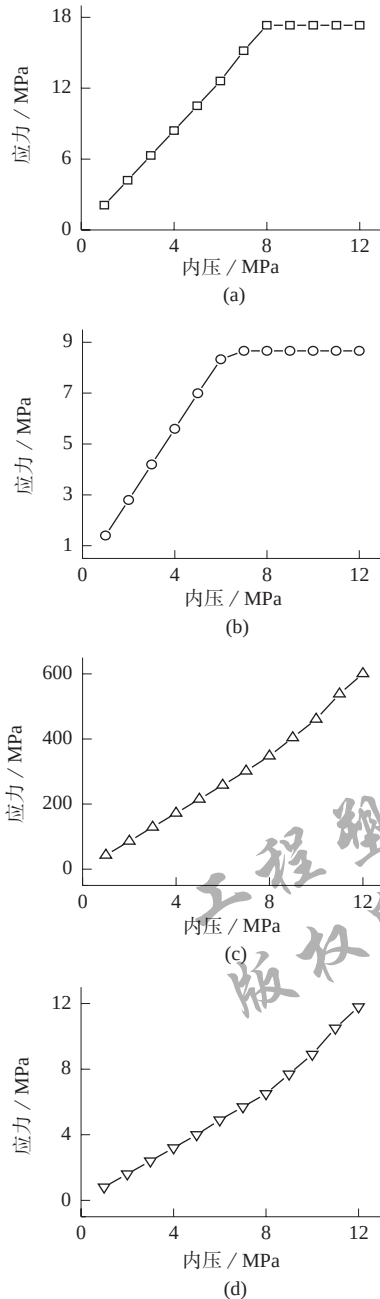
a—内衬层;b—增强层第一层;c—增强层第二层;d—增强层第三层;e—增强层第四层;f—外保护层

图3 内压 3.75 MPa 下各结构层的应力分布

不同内压载荷下复合管各结构层的应力变化见图 4。从图 4 可以看出,复合管各结构层的应力值均随着内压载荷的增加而上升。并且,随着内压载荷的增大,首末纤维层应力差也逐步增大,说明最内层纤维承受的应力总是大于最外层纤维,是复合管受载最大的部分,也是最易破坏的部分,因此以最内层纤维的 Mises 应力值作为管道破坏的判断依据。

为了确定复合管所能承受的最大压力(即爆破压力),采用最大应力准则作为涤纶纤维合股丝的

失效判据,即只要涤纶纤维材料主方向上任何一个应力分量达到其极限强度时,纤维材料便断裂破坏,此时的内压载荷即为复合管的爆破压力。如图 4 所示,当涤纶纤维合股丝所受应力达到其拉伸强度 525.2 MPa 时,计算得出此时的涤纶纤维增强聚乙烯复合管的内压载荷为 11.105 MPa,即复合管的爆破压为 11.105 MPa,该结果与实物管材实测平均值 10.75 MPa (某工厂提供的 3 个样品) 基本一致,相对误差仅为 3.302%,进一步表明所建模型对复合管爆破压力的预测是准确的。



a—内衬层;b—外保护层;c—增强层第一层;d—首末纤维层应力差

图4 不同结构层应力随内压载荷的变化曲线

2 工艺参数对复合管承压性能的影响

2.1 纤维层数对复合管承压性能的影响

由模拟结果可知,涤纶纤维层是复合管的承压主体,因此采用上述模型研究了不同纤维铺层数量对复合管爆破强度的影响。图5为复合管内径保持148 mm不变的条件下,爆破压力随纤维层数的变化规律。可以看出,复合管的爆破压力随纤维层数的增加逐步上升。当纤维层数由2层增加到8层时,复合管的爆破压力由6.677 MPa上升到

20.78 MPa。依据SY/T 6662.2-2012标准要求,复合管的爆破压力应大于等于3倍公称压力。当纤维层数为4层时,该复合管的爆破压力为11.105 MPa (大于3倍公称压力7.5 MPa),综合考虑制造成本和生产效率,确定选择4层纤维铺层即可满足DN150/PN2.5 MPa复合管的制造要求。

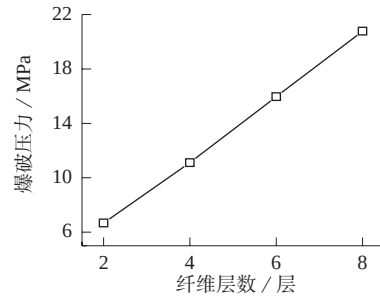


图5 不同纤维层数复合管的爆破压力

2.2 纤维缠绕角度对复合管承压性能的影响

纤维增强塑料复合管设计中另一重要指标是增强层纤维的缠绕角度,即纤维缠绕方向与复合管轴向的夹角。图6为不同纤维缠绕角度时复合管的爆破压力。随着缠绕角度增加,爆破压力不断增加。缠绕角在 $45^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 之间时,爆破压力增加缓慢;在 $55^{\circ} \sim 80^{\circ}$ 之间时,爆破压力迅速增长; 80° 之后增加趋于平缓。为了确定增强层纤维的最佳缠绕角度,图7示出了内压为10 MPa作用时,不同缠绕角度复合管轴向应变与环向应变的变化规律。可以看出,

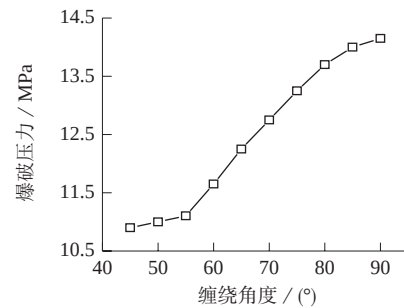


图6 不同纤维缠绕角度复合管的爆破压力

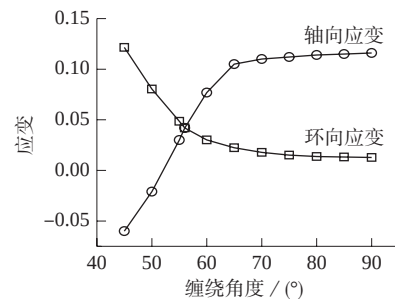


图7 不同纤维缠绕角度复合管的轴向应变和环向应变

随着纤维缠绕角度增加,轴向应变呈逐渐上升趋势,而环向应变则呈逐步下降,65°之后两者变化均趋于平缓。当纤维缠绕角度为56°时,复合管的轴向应变和环向应变相同,说明此时管道变形最为均匀。因此,可确定56°为涤纶纤维缠绕的最佳角度。

2.3 内衬层壁厚对复合管承压性能的影响

以建立的有限元模型为基础,在保持复合管内径、增强层壁厚和外保护层壁厚不变的情况下,研究了内衬层壁厚对复合管承压性能的影响。内衬层壁厚为8~12 mm(复合管整体壁厚14~18 mm)时,复合管在7.5 MPa内压载荷作用下的内衬层应力变化如图8所示。在相同内压载荷作用下,当内衬层壁厚小于8.5 mm时,内衬层应力已达到所采用聚乙烯材料的屈服强度17.33 MPa,而壁厚增加至12 mm时,内衬层承受的应力降至15.26 MPa,表明增大复合管内衬层的厚度可以一定程度降低内衬层所受应力,进而提高复合管的承压性能。图9为不同内衬层壁厚时的内衬层应力云图。从图9可以

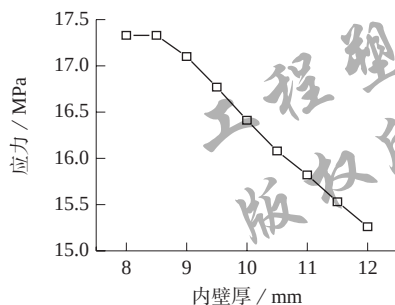
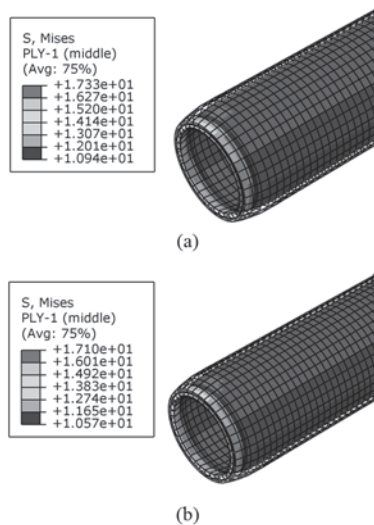


图8 内压7.5 MPa下不同内壁厚复合管内衬层应力变化



a—8.5 mm ; b—9 mm

图9 内压7.5 MPa下不同内壁厚复合管内衬层应力分布

看出,当内衬层壁厚为8.5 mm时,所采用聚乙烯材料已达到屈服状态,而内衬层壁厚为9 mm时,其应力大小为17.1 MPa,接近但小于聚乙烯材料的屈服强度17.33 MPa。因此,在满足涤纶纤维增强聚乙烯复合管承压性能的基础上,综合考虑生产成本等因素,内衬层的最小壁厚应为9 mm。

3 结论

(1) 采用 Halpin-Tsai 模型法,建立了 DN150 / PN2.5 MPa 涤纶纤维增强聚乙烯复合管的有限元模型,利用该模型计算得出的复合管静水压尺寸变化及爆破压力与实测值基本一致。

(2) 通过复合管有限元模型,分析得出 DN150 / PN2.5 MPa 涤纶纤维增强聚乙烯复合管的最佳生产工艺参数为:采用4层纤维铺层,纤维缠绕角度为56°,内衬层最小壁厚为9 mm。

参考文献

- [1] 潜凌,李培江,张文燕. 海洋复合柔性管发展及应用现状[J]. 石油矿场机械,2012,41(2):90-92.
Qian Ling, Li Peijiang, Zhang Wenyan. Development and applications of marine composite flexible pipe[J]. Oil Field Equipment, 2012, 41(2):90-92.
- [2] 王大鹏,刘美玲,姜焕英,等. 油气产业用增强热塑性复合管研究进展[J]. 中国塑料,2017,31(7):16-22.
Wang Dapeng, Liu Meiling, Jiang Huanying, et al. Research progresses of reinforced thermoplastic composite pipes used for oil and gas industry[J]. China Plastics, 2017, 31(7):16-22.
- [3] 李小平,李愚,王菲玺,等. 非金属复合材料管道综述[J]. 石油工业技术监督,2017,33(10):1-4.
Li Xiaoping, Li Yu, Wang Fuxi, et al. Overview of nonmetallic composite pipes[J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2017, 33(10):1-4.
- [4] Kruijier M P, Warnet L L, Akkerman R. Analysis of the mechanical properties of a reinforced thermoplastic pipe (RTP)[J]. Composite Part A: Applied Science & Manufacturing, 2005, 36(2):291-300.
- [5] 刘昊. 深海复合材料立管力学特性分析与优化设计研究[D]. 上海:上海交通大学,2013.
Liu Hao. Mechanical performance analysis and optimization design study of deepwater composite riser[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2013.
- [6] 曾季芳. 海洋复合材料柔性管的力学性能和优化设计[D]. 大连:大连理工大学,2013.
Zeng Jifang. Mechanical behavior and optimum design of ocean flexible pipes[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.

(下转第129页)

- 2020,49(2):152–155.
- [9] 杜强. 石墨烯/聚丙烯纳米复合材料流变和力学性能及增强增韧机理研究[D]. 广州:华南理工大学,2017.
- Du Qiang. Research on mechanical, rheology properties and reinforcing & toughening mechanisms of graphene reinforced polypropylene nanocomposites[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2017.
- [10] Kumar V, Kim K, Park J, et al. Graphene and its nanocomposites as a platform for environmental applications[J]. Chemical Engineering Journal,2017,315:210–232.
- [11] Geim A K, Novoselov K S. The rise of graphene[J]. Nature Materials,2007(6):183–191.
- [12] Du J H, Cheng H M. The fabrication, properties, and uses of graphene / polymer composites[J]. Macromolecular Chemistry and Physics,2012,213:1060–1077.
- [13] An J E, Jeon G W, Jeong Y G. Preparation and properties of polypropylene nanocomposites reinforced with exfoliated graphene [J]. Fibers and Polymers,2012,13:507–514.
- [14] Zhao S Y, Zhao Z, Yang Z C et al. Functionally graded graphene reinforced composite structures:A review[J]. Engineering Structures,2020,210:110339–110354.
- [15] 赖永健,张婧婧,何穗华,等. 不同片径石墨烯微片/PP复合体系导电导热和力学性能[J]. 塑料,2018,47(4):103–125.
- Lai Yongjian, Zhang Jingjing, He Suihua, et al. Electrical, Thermal conductivity and mechanical properties of graphene nanoplatelet (GNP)/PP hybrid system with different GNP size[J]. Plastics,2018,47(4):103–125.
- [16] 王乐天. 石墨烯及其复合材料的制备[J]. 当代化工研究,2019(10):164–165.
- Wang Letian. Preparation of graphene and its composites[J]. Modern Chemical Research,2019(10):164–165.
- [17] Yan L, Feng Z Y, Huang L J, et al. Additive manufacturing high performance graphene-based composites:A review [J]. Composites Part A,2019,124:105483–105504.
-
- (上接第122页)
- [7] Bai Yong, Tang Jiangdong, Xu Weiping, et al. Collapse of reinforced thermoplastic pipe (RTP) under combined external pressure and bending moment[J]. Ocean Engineering,2015,94:10–18.
- [8] Yu K, Morozov E V, Ashraf M A, et al. Analysis of flexural behaviour of reinforced thermoplastic pipes considering material nonlinearity[J]. Composite Structures,2015,119:385–393.
- [9] Xia M, Kemmochi K, Takayanagi H. Analysis of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermomechanical loading[J]. Composite Structures,2001,51(3):273–283.
- [10] 张尹. 纤维缠绕增强复合管在轴对称载荷下的力学行为研究[D]. 杭州:浙江大学,2015.
- Zhang Yin. Investigation on mechanisms of filament-wound fiber-reinforced composite pipe under axisymmetric loads[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2015.
- [11] 熊海超. 钢丝缠绕增强塑料复合管道的极限强度分析与研究[D]. 杭州:浙江大学,2016.
- Xiong Haichao. Analysis on ultimate strength of the plastic pipe reinforced by cross helically winding steel wires (PSP)[D]. Hangzhou:Zhejiang University,2016.
- [12] 郑津洋,李翔,朱彦聪,等. 钢丝缠绕增强塑料复合管外压失稳试验研究[J]. 中国塑料,2008,22(2):62–66.
- Zheng Jinyang, Li Xiang, Zhu Yancong, et al. Experimental research on buckling of plastic pipes reinforced by winding steel wires under external pressure[J]. China Plastics,2008,22(2):62–66.
- [13] Zheng Jinyang, Gao Yongjian, Li Xiang, et al. Investigation on short-term burst pressure of plastic pipes reinforced by cross helically wound steel wires[J]. Journal of Zhejiang University Science,2008,9(5):640–647.
- [14] Arikan H. Failure analysis of ($\pm 55^\circ$) 3 filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure[J]. Composite Structures,2010,92(1):182–187.
- [15] Bai Yong, Chen Wei, Xiong Haichao, et al. Analysis of steel strip reinforced thermoplastic pipe under internal pressure[J]. Ships and Offshore Structures,2016,11(7):766–773.
- [16] 孟祥剑,王树青,姚璐. 玻纤增强柔性管等效简化模型研究[J]. 海洋工程,2017,35(6):71–83.
- Meng Xiangjian, Wang Shuqing, Yao Lu. Research on equivalent simplification model of glass fiber-reinforced flexible pipes[J]. The Ocean Engineering,2017,35(6):71–83.