

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2018.01.022

碳纤维增强 GFRP 输电杆塔结构分析

张磊¹, 赵明珠¹, 李雅泊¹, 李华东², 田超凯³, 宋朝印³, 王志伟³

(1. 北京国网富达科技发展有限公司, 北京 100070; 2. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250002;

3. 中复碳芯电缆科技有限公司, 江苏连云港 222067)

摘要: 将碳纤维层铺于玻璃纤维缠绕层中形成夹芯结构, 以提高玻璃纤维增强树脂基复合材料 (GFRP) 杆塔的刚度。利用有限元分析方法对 GFRP 杆塔的材料和结构设计合理性进行了验证。结果表明, 在满足强度要求的基础上, 碳纤维的加入可以有效提高 GFRP 杆塔的刚度, 减小杆身位移。杆身根部采用等径结构可以有效增加杆塔刚度, 杆身厚度减小使得杆塔变形及杆身质量进一步优化。有限元分析结果显示, 结构优化后 GFRP 杆塔最大位移减小到 0.904 m, 且 GFRP 杆身质量减轻 118 kg, 优化效果明显。

关键词: 碳纤维; 玻璃纤维; 复合材料杆塔; 有限元分析; 结构优化

中图分类号: TB332 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2018)01-0095-06

Structure Analysis of Carbon Fiber Reinforced GFRP Transmission Tower

Zhang Lei¹, Zhao Mingzhu¹, Li Yabo¹, Li Huadong², Tian Chaokai³, Song Zhaoyin³, Wang Zhiwei³

(1. Beijing Guowang Fuda Science & Technology Development Co. Ltd., Beijing 100070, China; 2. Shandong Electric Power Research Institute of

State Grid, Jinan 250002, China; 3. Zhongfu Carbon Core Cable Technology Co. Ltd., Lianyungang 222067, China)

Abstract: To improve the rigidity of the glass fiber resin composite (GFRP) tower of the transmission line, the carbon fiber layer was arranged in the glass fiber winding layer to form a sandwich structure. Finite element method was used to verify the rationality of materials and the structure design of the GFRP tower. The results shows that the stiffness of the GFRP tower and the displacement of the pole can be effectively improved by the addition of carbon fiber based on meeting the requirements of strength. The equal diameter structure at the root of the rod can effectively increase the tower rigidity, the deformation of the tower and the weight of the rod are further optimized with thickness reduced. The finite element analysis results show that the maximum displacement of the GFRP tower decreases to 0.904 m after the structure optimization and the mass of the GFRP tower reduces 118 kg, the effect of the optimization is obvious.

Keywords: carbon fiber; glass fiber; composite tower; finite element analysis; structural optimization

输电线路杆塔是支承架空输电线路导线和地线并使它们之间以及与大地之间保持电气安全距离的杆形或塔形构筑物, 其结构性能直接影响线路的安全性、经济性和可靠性。传统木杆、水泥杆、钢管杆及铁塔在长期运行中存在易开裂或耐候性差、耐腐蚀性差等缺点, 严重威胁着输电线路的安全运行。玻璃纤维增强树脂基复合材料 (GFRP) 杆塔因具有轻质高强、耐腐蚀、绝缘性优良和结构可设计等优势, 已经受到了国内外学者的广泛关注^[1-6]。然而复合材料杆塔存在弹性模量低、载荷作用下变形较大

等问题, 限制了其推广应用。

国内外学者从材料选择、杆塔设计、节点设计、局部加强等方面提出了改善复合材料杆塔结构、提高复合材料杆塔强度、减小复合材料杆塔挠度的方法^[7-9]。吴雄等^[10]通过分子结构设计合成出改性聚氨酯树脂 (PUP), 相比传统的环氧树脂 E51 和不饱和聚酯 196, 合成的 PUP 材料不仅表现出良好的力学性能, 也显示出更佳的电绝缘性。S. Metiche 等^[11]研究使用线性低密度玻璃纤维替代普通玻璃纤维制备复合材料杆塔, 发现使用低密度玻璃纤维可

通讯作者: 赵明珠, 硕士, 主要从事输电线路新材料研发工作 E-mail: 13821805210@163.com

收稿日期: 2017-11-10

引用格式: 张磊, 赵明珠, 李雅泊, 等. 碳纤维增强 GFRP 输电杆塔结构分析 [J]. 工程塑料应用, 2017, 46(1):95-100.

Zhang Lei, Zhao Mingzhu, Li Yabo, et al. Structure analysis of carbon fiber reinforced GFRP transmission tower[J]. Engineering Plastics Application, 2017, 46(1):95-100.

使复合材料杆塔的极限承载能力提高 38%。任宗栋等^[12]通过对比管壁预埋金属螺栓、插接胶粘、金属法兰套筒 3 种复合材料杆塔连接方案,发现金属法兰套筒粘结主杆辅以抗扭销钉的连接方案可以减小塔身结构变形。龚靖等^[13]利用有限元分析方法通过比较等径等壁厚不同截面的复合材料杆塔的杆顶位移及根部最大应力,发现圆环内接三角形肋截面优于其它截面类型,可以有效地降低杆顶位移及杆塔根部最大应力。

碳纤维是一种含碳量在 95% 以上的高强度、高模量新型纤维材料,常用作增强材料。笔者采用两种方法来提高复合材料杆塔的刚度,一是将碳纤维层铺于玻璃纤维缠绕层中形成夹芯结构,二是锥形杆塔的杆身根部采用等径结构。以输电杆塔最大载荷工况建立有限元模型,对复合材料输电杆塔进行结构设计及力学性能分析,验证提高复合材料杆塔刚度的可行性。

1 材料结构设计

1.1 杆身制作工艺

笔者将碳纤维层铺放于玻璃纤维缠绕层中形成夹芯结构,其结构图如图 1 所示。杆身制作采用小角度纤维缠绕和纤维铺放工艺结合的方式,杆身分 3 段缠绕成型。其中顶部两节杆身用聚氨酯和玻璃纤维通过小角度缠绕法制得;底部杆身以环氧树脂为基体材料,内外层用小角度玻璃纤维缠绕法、芯层用碳纤维单向布铺放轴向补强以满足使用要求。

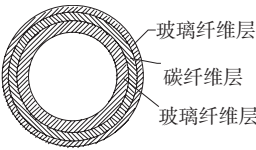


图 1 杆身材料结构

1.2 杆身结构设计

传统的金属材料一般认为是各向同性体,通常在弹性范围内研究其变形和受力,而纤维增强复合材料表现为各向异性,力学分析较为复杂。根据工程经验,杆身采取同结构变尺寸法结合电杆设计规范进行尺寸约束,选取最优值。电杆直径壁厚选取原则为保证运行最大应力小于局部稳定临界力,且顶端位移正好满足运行规范为最佳选型。考虑碳纤维的增强作用,在许用强度范围内采取减小杆身厚度的结构优化形式。另外,根部杆身采用等径结构以增加其截面惯性矩从而减小杆塔挠度,杆塔杆身

具体尺寸如表 1 所示,杆塔结构如图 2 所示。

杆塔杆身	表 1 结构优化尺寸 mm					
	第 1 节		第 2 节		第 3 节	
	直径	厚度	直径	厚度	直径	厚度
原结构尺寸	578 ~ 698	14	710 ~ 816.5	20	824.5 ~ 931	24
优化结构尺寸	570 ~ 755	10	767 ~ 932	16	944	22



图 2 杆塔结构示意图

2 有限元分析

2.1 杆塔设计工况

选择 35 kV 双回路输电线路杆塔作为研究对象,对其进行有限元分析,具体结构参数见表 1。杆塔高 25 m,杆身分 3 段缠绕成型,第 1 节,第 2 节,第 3 节分别为 9,8,8 m,各段杆身以法兰连接,便于安装、运输和储存。

表 2 杆塔设计工况

项目	参数
电压等级	35 kV
回路数	双回
呼高 / m	18
水平档距 / m	220
垂直档距 / m	220
风速 / (m · s ⁻¹)	10
覆冰 / mm	10
导线型号	LJGJ-240 / 30
导线安全系数	4
地线型号	GJ-50
地线安全系数	5

2.2 材料参数

输电杆塔用玻璃纤维、碳纤维复合材料参数如表 3 所示,碳纤维复合材料纵向模量明显优于玻璃纤维,因此笔者以碳纤维作为增强材料来提高 GFRP 杆塔的刚度。复合材料构件在宏观上表现为各向异性,即存在纵向和横向模量两个弹性模量。

采用有限元模拟时,必须考虑其各向异性情况,以表 3 材料参数为基础建立有限元模型,验证上

述材料增强及结构优化的合理性。

表3 杆塔材料参数

材料类型	密度 / ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	纵向模 量 / GPa	横向模 量 / GPa	剪切模 量 / GPa	泊松 比
玻璃纤维复合 材料	1 850	25	10	6	0.36
碳纤维复合 材料	1 600	120	11	9	0.31

2.3 模型建立

结合基本力学理论,采用 ANSYS 有限元分析软件对碳纤维增强 GFRP 杆塔进行计算。采用实体单元建立 GFRP 杆塔结构有限元模型,其中坐标系采用笛卡儿直角坐标系,坐标原点位于杆塔底部中心位置, X 方向为垂直导线方向; Y 方向为沿导线方向; Z 正方向竖直指向塔顶方向。计算模型从零标高处向上分3段建模,分别以刚性节点连接,杆身底部由3层复合材料粘接成整体,模型底部采用刚性支座,即所有自由度全部给定约束。在创建几何模型后,定义各类属性并展开网格划分,复合材料杆塔有限元模型如图3所示。

笔者选取受力最大的工况即10 mm不均匀覆冰以及10 m/s风速状态进行强度校核。输电线路杆塔的荷载主要来源于导线,因此以集中力的方式施加到杆塔的挂线点处,即横担一端与杆身固结在一起,另一端施加集中荷载。

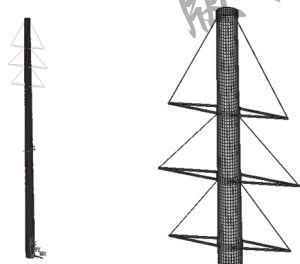


图3 GFRP 杆塔有限元模型

为对输电杆塔的材料设计和结构优化进行分析验证,研究分为以下3种方案进行:

方案一:以 GFRP 杆塔为研究对象,锥形杆塔杆身分3段,从上至下分别为9,8,8 m,壁厚分别为14,20,24 mm,梢外径为578 mm,底外径为931 mm。

方案二:以碳纤维增强 GFRP 杆塔为研究对象,杆身结构与方案一相同,不同的是在根部杆身玻璃纤维缠绕层中铺设6 mm厚的碳纤维层。其截面结构如图1所示,内层为玻璃纤维层厚度16 mm,中间层为碳纤维层厚度6 mm,最外层为玻璃纤维层厚度2 mm。

方案三:将碳纤维增强 GFRP 杆塔进行结构优化设计,杆身材料与方案二相同,但根部杆身采用等径结构来提高杆塔的力学强度,3段杆身壁厚分别为10,16,22 mm,梢外径为550 mm,底外径为900 mm。其结构如图1所示,内层为玻璃纤维层厚度14 mm,中间层为碳纤维层厚度6 mm,最外层为玻璃纤维层厚度2 mm。

3 计算结果与分析

3.1 GFRP 杆塔结构计算结果分析

方案一对 GFRP 杆塔施加覆冰荷载及风载,杆塔杆身会因弯矩影响使得一侧受拉应力,一侧受压应力。图4为 GFRP 杆塔轴向应力云图,图5为 GFRP 杆塔杆身根部及顶部环向应力云图。结果表明, GFRP 杆塔在覆冰荷载作用下,杆身根部轴向最大压应力为60 MPa,根部环向最大应力为3.87 MPa,梢部最大位移为1.26 m。同时,图5b显示横担与塔身连接处的环向应力较大,最大应力达到了61.3 MPa,此处应需要局部补强。

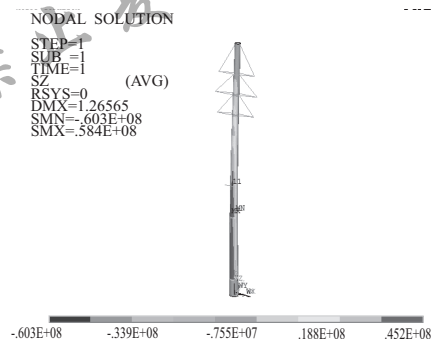


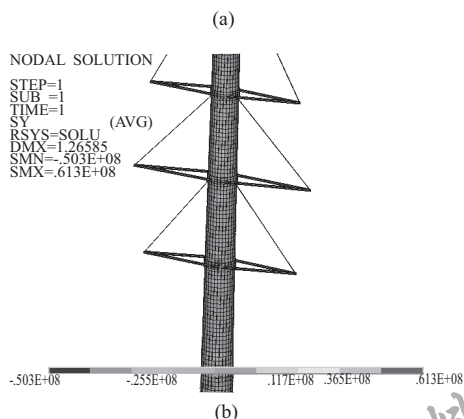
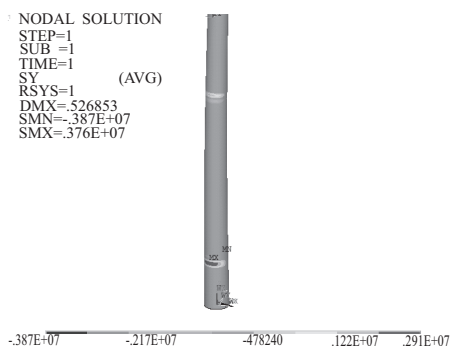
图4 GFRP 杆塔轴向应力云图

综上所述,杆塔各个部位的应力安全裕度均满足要求,杆塔最大位移为1.26 m,占总高的5.04%,塔身复合材料总质量为2213 kg。

3.2 碳纤维增强 GFRP 杆塔结构计算结果分析

方案二对碳纤维增强 GFRP 杆塔施加覆冰荷载及风载,碳纤维增强 GFRP 杆塔整体轴向应力云图如图6所示。

图7为碳纤维增强 GFRP 杆塔杆身各部分轴向应力云图。图6和图7a显示材料优化后杆身第2节最大轴向应力为73.5 MPa,在容许范围内可考虑局部补强。由图7b可见,杆身第3节内层玻璃纤维层最大轴向应力为43.4 MPa,满足强度要求。由图7c可见,杆身第3节碳纤维层最大轴向应力为134 MPa,满足强度要求。由图7d可见,杆身第3节外层玻璃纤维层最大轴向应力为32.9 MPa,满足



a—杆身根部; b—杆身顶部

图5 GFRP杆塔环向应力云图

强度要求。

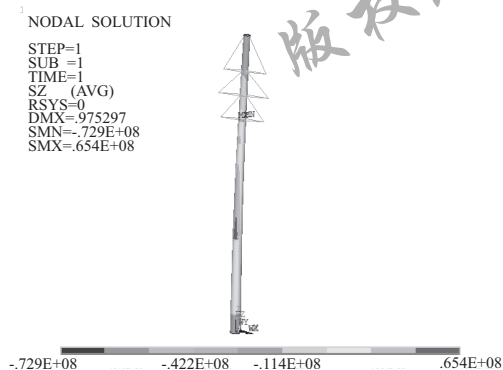
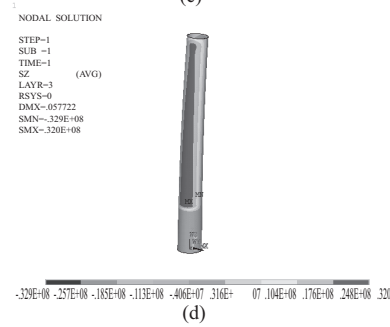
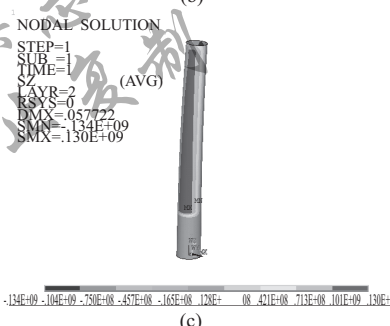
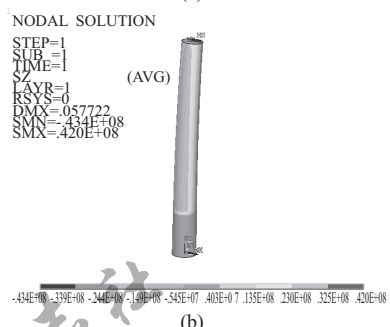
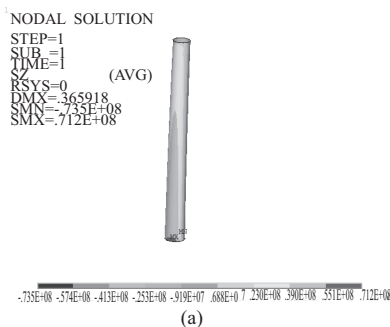


图6 碳纤维增强 GFRP 杆塔轴向应力云图

综上所述,将碳纤维层铺于玻璃纤维缠绕层中形成夹芯结构后,杆塔各个部位的应力均满足强度要求。杆塔最大位移为 0.975 m, 占总高的 3.9%, 相对方案一降低了 22.6%。其中,塔身复合材料总质量为 2167 kg, 质量相对方案一减轻了 46 kg。

3.3 碳纤维增强 GFRP 优化结构计算结果分析

方案三对碳纤维增强玻璃纤维复合材料优化杆塔结构施加覆冰荷载及风载,碳纤维增强 GFRP 优化杆塔整体轴向有限元计算所得应力云图如图 8 所示,图 9 为碳纤维增强 GFRP 优化杆塔杆身各部



a—第2节杆身; b—第3节杆身内层玻璃纤维层;

c—第3节杆身碳纤维层; d—第3节杆身外层玻璃纤维层

图7 碳纤维增强 GFRP 杆塔第2、3节杆身轴向应力云图

分轴向应力云图。图 8 和图 9a 显示结构优化后杆身第 2 节最大轴向应力为 70.2 MPa, 在容许范围内可考虑局部补强。由 9b 可见, 杆身第 3 节内层玻璃纤维层最大轴向应力为 41.4 MPa, 满足强度要求。由图 9c 可见, 杆身第 3 节碳纤维层最大轴向应力为 133 MPa, 满足强度要求。由图 9d 可见, 杆身第 3 节外层玻璃纤维层最大轴向应力为 32.9 MPa, 满足强度要求。

综上所述,在方案二碳纤维增强 GFRP 夹芯结构的基础上,采用优化结构形式后杆塔各个部位的应力均满足强度要求。杆塔最大位移为 0.904 m,占全高的 3.6%,相对方案一降低了 28.6%。其中,塔身复合材料总质量 2 095 kg,质量相对方案一减轻了 118 kg。

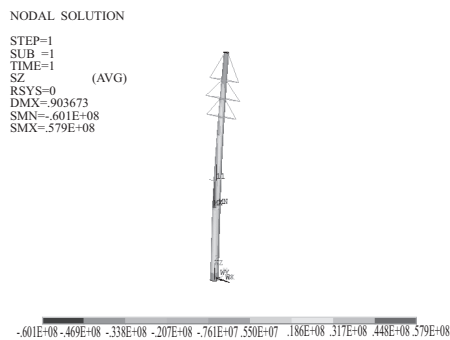


图 8 玻璃纤维与碳纤维混合纤维优化结构轴向应力云图

4 结论

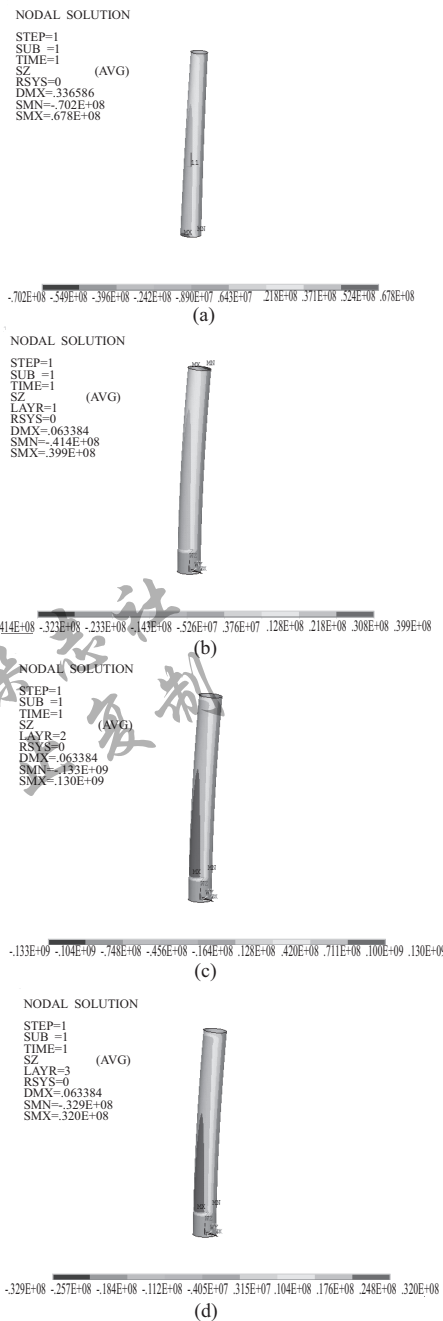
(1) 利用有限元分析方法对 GFRP 杆塔、碳纤维增强 GFRP 杆塔在最大受力工况下的应力、挠度、结构稳定性进行了对比,结果显示碳纤维的加入可以有效提高复合材料杆塔的强度,降低复合材料杆塔的挠度,增强复合材料杆塔的结构稳定性。

(2) 在满足强度要求的基础上,碳纤维增强 GFRP 杆塔杆身刚度明显增强,杆塔最大位移由 1.26 m 减小为 0.975 m,碳纤维的加入使得 GFRP 杆塔相对位移减小了 22.6%,且复合材料杆身质量减轻 46 kg。

(3) 考虑碳纤维的增强作用,在保证原有强度的基础上减小杆身厚度及根部杆身采用等径结构进行结构优化。有限元分析结果显示,结构优化后杆塔最大位移减小到 0.904 m,且 GFRP 杆身质量减轻 118 kg,优化效果明显。

参考文献

- [1] 熊淦辉,刘江钊,林锋,等. 电力输送用复合材料杆塔发展现状[J]. 绝缘材料,2013,46(4):82-85.
Xiong Ganhui, Liu Jiangfao, Lin Feng, et al. Development status of power transmission composite tower[J]. Insulating Materials, 2013, 46(4):82-85.
- [2] 柳伟钧,张锦南,王强华. 复合材料杆塔技术和应用现状[J]. 玻璃钢/复合材料,2014(6):76-82.
Liu Weijun, Zhang Jinnan, Wang Qianghua. Composite pole & tower technology and application status[J]. Fiber Reinforced Plastics / Composites, 2014(6):76-82.



a—第 2 节杆身; b—第 3 节杆身内层玻璃纤维层; c—第 3 节杆身碳纤维层; d—第 3 节杆身外层玻璃纤维层

图 9 玻璃纤维与碳纤维混合纤维优化结构第 2、3 节杆身轴向应力云图

- [3] 梅端,王佳婕,林锋,等. 玻璃纤维在复合材料杆塔中的应用前景[J]. 玻璃纤维,2013(4):14-18.
Mei Duan, Wang Jiajie, Lin Feng, et al. Prospects of glass fiber application in composite poles and towers[J]. Fiber Glass, 2013(4):14-18.
- [4] 王灿灿,岳平,刘宗喜,等. 输电杆塔用环氧树脂复合材料的电气性能研究[J]. 绝缘材料,2014(2):36-40.

- Wang Cancan, Yue Ping, Liu Zongxi, et al. Electrical properties study of epoxy resin composite material applied in transmission tower[J]. Insulating Materials, 2014(2):36-40.
- [5] Prabhu L, Krishnaraj V, Sathish S, et al. Experimental and finite element analysis of GFRP composite laminates with combined bolted and bonded joints[J]. Indian Journal of Science and Technology, 2017, 10(14):1-7.
- [6] 刘泉,任宗栋,默增禄. 纤维增强复合材料在 35 kV 输电杆塔中的应用研究[J]. 电力建设, 2011, 32(4):92-95.
- Liu Quan, Ren Zongdong, Mo Zenglu. Study on application of FRP in 35 kV power transmission towers[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(4):92-95.
- [7] 周柏杰,吴雄,胡虔. 输电杆塔用复合材料性能研究—树脂体系对复合材料性能的影响[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(4):66-71.
- Zhou Baijie, Wu Xiong, Hu Qian. Study on the properties of fiber reinforced polymers (FRP) used in the power transmission poles—influences of the resin systems on the properties of FRP[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014(4):66-71.
- [8] 朱轲,何昌林,马小敏,等. 插接式复合材料单杆塔有限元分析[J]. 玻璃钢/复合材料, 2013(6):31-35.
- Zhu Ke, He Changlin, Ma Xiaomin, et al. Finite element analysis of plug-in composite single pole[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2013(6):31-35.
- [9] Mohamed H, Masmoudi R. Design optimization of GFRP pole structures using finite element analysis[J]. Composite & Polym, 2009, 15(17):1-8.
- [10] 吴雄,胡虔,孟凡卓,等. 玻纤增强复合材料电杆及横担用聚氨酯树脂合成及性能[J]. 塑料工业, 2014, 42(6):121-124.
- Wu Xiong, Hu Qian, Meng Fanzhuo, et al. Synthesis and properties of polyurethane using as glass fiber reinforced polymer transmission poles and cross arms[J]. China Plastics Industry, 2014, 42(6):121-124.
- [11] Metiche S, Masmoudi R. Full-Scale flexural testing on fiber-reinforced polymer (FRP) poles[J]. Open Civil Engineering Journal, 2007, 107(37):37-50.
- [12] 任宗栋,刘泉,默增禄. 纤维增强复合材料输电杆塔节点设计及优化[J]. 电力建设, 2011, 32(4):87-91.
- Ren Zongdong, Liu Quan, Mo Zenglu. Joint design and optimization of FRB tower[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(4):87-91.
- [13] 龚靖,张恩铭,曹帅,等. 110 kV 高性能纤维增强复合材料输电杆塔设计[J]. 水电能源科学, 2012(10):161-163.
- Gong Jing, Zhang Enming, Cao Shuai, et al. Design of 110 kV high performance fiber reinforced composite material transmission poles and tower[J]. International Journal Hydroelectric Energy, 2012(10):161-163.

杜邦 3D 打印线材开始发售

上海一杜邦宣布通过深圳光华伟业股份有限公司(eSUN 易生)向我国客户发售用于 3D 打印的杜邦 Hytrel® 热塑性弹性体和杜邦 Zytel® 尼龙线材。

杜邦 3D 打印产品可让用户享受 3D 打印技术带来的便利,包括更大的产品设计自由度、减重、缩短产品开发周期等,大幅提升功能性样件制作、部件生产、加工和定制的效率。这些可应用于汽车、电子、运动鞋材、耐用消费品等各行业领域。其中 Hytrel® 3D 打印材料有两种不同的硬度规格(Hytrel® 3D4000FL 邵氏 D 硬度 40 和 Hytrel® 3D4100 邵氏 D 硬度 60),该热塑性弹性体具有高柔韧性、高耐热性和耐化学腐蚀性兼具高强度和持久性,供客户灵活制造所需部件。使用 Hytrel® 规格材料打印的部件,其全方面力学性能均可与注塑产品相媲美。客户还能使用 Zytel® 3D1000FL 材料制造高强度的硬质功能性部件。采用 Zytel® 材料打印的部件具有超高的强度及热变形温度,翘曲度和湿度敏感性低,同时表面也相当美观。

杜邦高性能材料事业部大中华区业务总监曾清树先生说道,杜邦最新推出的 3D 打印线材产品能满足我国 3D 打印行业快速增长的需求。杜邦高性能材料事业部致力于成为我国各个行业包括汽车、电子、运动鞋材、耐用消费品等企业的领先合作伙伴。

(工程塑料网)

抚顺乙烯聚丙烯新产品瞄准市场“中高端”供给

抚顺石化与中科院化学所合作,成功在聚丙烯装置试产高熔体强度聚丙烯专用料(HMS1602) 160 t,填补了国内聚丙烯树脂在发泡材料领域的空白。

该产品具有优异的耐热性、抗震性、韧性、耐化学药品性、耐油性、隔热性,在汽车、包装、建筑、工业、体育休闲等领域有广阔的应用前景。

本次高熔体强度聚丙烯新产品 HMS1602 采用中科院专利技术,即催化剂 CFC-A1s 与功能催化助剂 CFC-B1 配合使用,利用聚合法制备得到高熔体强度聚丙烯树脂。HMS1602 新产品工业化生产成功,在国内外尚属首例,具有国际领先水平,是一项具有开创性、颠覆性的工业化成果,不仅意味着抚顺乙烯在国内同类装置率先掌握高熔体强度聚丙烯专用料的工业化生产技术,更丰富了公司聚丙烯产品牌号,大幅度提高了聚丙烯产品的盈利水平,是瞄准“中高端”供给需求最现实最优化的选择。

据悉,当前国内市场对于高熔体强度聚丙烯专用料的需求非常旺盛,初步估计每年仅发泡片材和发泡珠粒的需求量就达到 40 万 t,市场份额 300 多亿元。该产品价格是普通聚丙烯产品的两倍多,目前国内此专用料完全依赖进口。

(石油化工论坛)