

# Design and Development of a Composite Utility Pole with Sandwich Structure

Xiao-ping Cao<sup>1</sup>, Zong-dong Ren<sup>2</sup>, Liang-quan Hu<sup>1</sup>, Xiong-jun Zhang<sup>1</sup>,  
Ji-min Li<sup>1</sup>, Shu Chen<sup>1</sup>, Yu-gang Peng<sup>1</sup>, Wei Jia<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Beijing Composite Material Co., Ltd, Beijing, China

<sup>2</sup>State Grid Corporation, Beijing, China

Email: <sup>1</sup>caoxiaoping251@126.com, <sup>2</sup>rzdkl@yahoo.com.cn

**Abstract:** An introduction is given about a composite utility pole with sandwich structure in electric transmission systems, which is designed, manufactured and tested with civil composite materials, based on domestic technology. the major process of sandwich structure design, parameter analysis, material research and preparation, product manufacturing and tests are described. A discussion is also presented in the paper concerning some typical problems and their solutions during the development.

**Keywords:** Composite materials; Structure design; Utility pole; Finite element

## 夹层结构复合材料杆塔设计与研究

曹小平<sup>1</sup>, 任宗栋<sup>2</sup>, 胡良全<sup>1</sup>, 张雄军<sup>1</sup>, 李济民<sup>1</sup>, 陈澍<sup>1</sup>, 彭玉刚<sup>1</sup>, 贾伟<sup>1</sup>

<sup>1</sup>北京玻璃钢院复合材料有限公司, 北京, 中国, 102101

<sup>2</sup>国核电力规划设计研究院, 北京, 中国, 100032

Email: <sup>1</sup>caoxiaoping251@126.com

<sup>2</sup>rzdkl@yahoo.com.cn

**摘 要:** 本文介绍了输电线路中某型复合材料杆塔设计与研制, 立足国内设计、材料、工艺及试验等技术, 开展自行设计与研制, 包括杆塔设计参数配置、铺层结构设计、材料工艺、产品试制及试验验证的主要过程; 概括描述了这种轻质夹层结构复合材料杆塔的技术特色; 总结和讨论了在设计与工程研制中所遇到的一些典型问题及其处理方法。

**关键词:** 复合材料; 结构设计; 杆塔; 有限元分析

## 1 概述

### 1.1 复合材料杆塔设计研制概况

杆塔是输电线路中一类重要的特种支撑结构物, 其结构性能直接影响输电线路的安全性、经济性和可靠性。传统的输电杆塔一般采用混凝土杆或热浸镀锌的角钢、钢管, 普遍存在自重大、易锈蚀或开裂等缺陷, 由此导致输电线路杆塔耐久性较差、后期维护费用较高, 施工运输和运行维护困难, 容易出现各种安全隐患。随着新材料技术及其制备工艺的发展, 用于高端应用领域的先进复合材料, 近年在国外已逐步应用于输电线路工

程中。Strongwell 公司、Shakespear 公司、Newmark 公司等纤维增强复合材料制品厂家都开发了自己的复合材料电杆产品, 并得到了比较广泛的应用。目前, 美国已制定了相关的产品标准, 美国土木工程师学会也已经制定了输电杆塔中纤维增强复合材料产品的应用标准<sup>(1)</sup>。我国在国家电网公司的积极倡导下已经积极开展这方面的研究工作, 并在 220kV、110kV、35kV 等各电压等级的线路杆塔上应用了复合材料, 形成了一定的科研成果。

### 1.2 本复合材料杆塔主要设计参数

本文针对 35kV 复合材料杆塔进行了设计, 杆塔典型结构图见图 1。主要设计参数在如表 1 中列出:

作者简介: 曹小平(1965-), 男, 陕西渭南人, 教授级高工。主要研究方向: 结构与功能复合材料。电话: 010-61161187。

Table 1. The design parameters of composite pole  
表 1 杆塔材料主要设计参数

|             |                      |                          |    |
|-------------|----------------------|--------------------------|----|
| 导线型号        | 1×<br>LGJ-24<br>0/30 | 使用环境                     | 平丘 |
| 地线型号        | GJ-50                | 设计大风 (m/s)<br>(基准高10m)   | 27 |
| 水平档距<br>(m) | 300                  | 覆冰相应风速 (m/s)<br>(基准高10m) | 10 |
| 垂直档距<br>(m) | 450                  | 导线覆冰 (mm)                | 10 |
| 转角度数<br>(°) | 0                    | 地线覆冰 (mm)                | 15 |

## 2 设计特点与创新

本工程采用的复合材料杆塔为全复合材料杆塔,在国内35kV电压等级的线路上尚属首次使用。本复合材料杆塔在设计过程中着眼于原理性研究,最大可能地应用了新的研究成果与技术,并与已经完成或正在进行研制的杆塔相比,具有几大创新特色。

### 2.1 新型轻质复合材料杆塔构型

传统的复合材料电杆采用拉挤结构或缠绕结构型式,成型工艺相对简单。由于复合材料具有弹性模量低的固有特性,其弹性模量只有钢材弹性模量的 1/5~1/4,导致复合材料杆塔抗弯性能差,在大风、断线等工况下挠度大。如果应用国外的杆塔结构(如 RS 公司,带有拉线结构杆塔)势必增加输电线路走廊,应用复合材料杆塔来减少线路走廊就显得意义不大。参照自立式角钢铁塔的设计经验,本项复合材料杆塔一般按照自立杆塔结构设计,控制杆塔在正常运行条件下顶端挠度在 3% 以内。在不增加结构重量前提下,以全新轻质夹层结构,增加主杆壁厚(钢杆塔壁厚的 4~6 倍),提高杆塔结构的转动惯量,降低因复合材料模量低带来的杆塔挠度问题,同时大幅度减轻结构重量,减小线路走廊与降低杆塔综合费用的完美统一。

### 2.2 新型复合材料横担结构配置

现有的拉挤结构复合材料横担,在使用过程中,由于缺少环向纤维缠绕层,在长期疲劳弯曲与扭转应力作用下,单向纤维容易分层,在 750kV 雷电冲击作用下,芯棒材料易于被击穿,并且裂纹顺纤维方向扩展,导致结构失效。本设计采用单向拉挤芯材作为弯曲载荷的承

载体与纤维交叉缠绕层承担扭转载荷的复合结构,可以有效提高横担的综合承载能力。

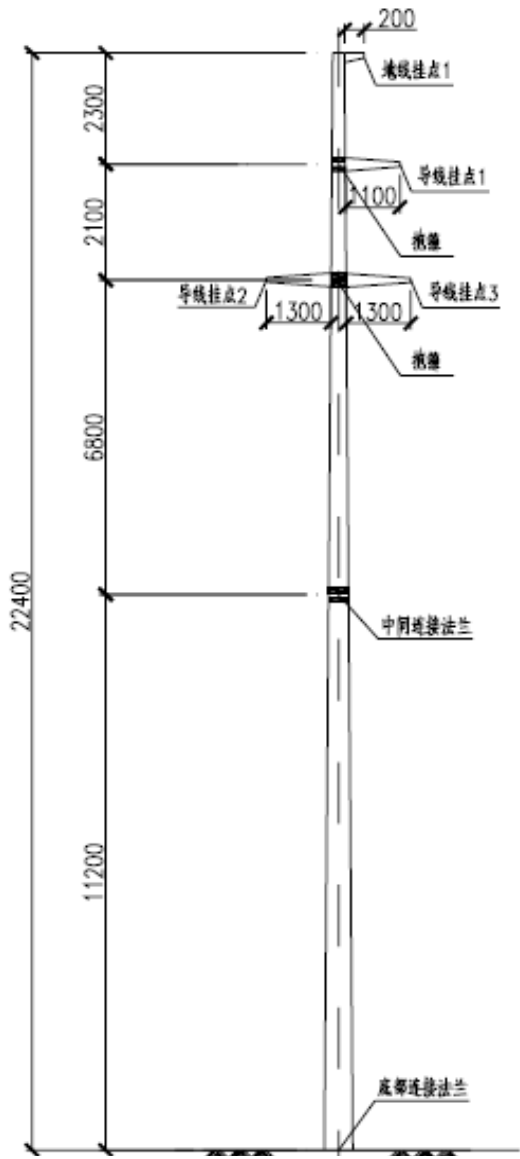


Figure 1. The structure of 35kv electric transmission pole  
图 1 35kV 单回路杆塔典型结构

### 2.3 国产化复合材料在杆塔设计中的应用

国内复合材料在缠绕、拉挤产品方面的研究已取得了不少成果,尤其是在环氧树脂、乙烯基树脂、不饱和树脂等基体研究与材料性能测试等方面积累了大量数据。但是,国产材料一直未能应用于输电线路杆塔,主要是材料的特性与国外杆塔的复合材料仍有差异,无法替代进口材料用于杆塔生产。本工程确立了以国内复合材料的性能特征为立足点的选材设计原则,并进行材料

性能数据全面测试,满足杆塔设计和生产的要求。在国产复合材料的应用中,研制人员成功地解决了从铺层设计、工艺试制到试件交付等阶段的工程技术问题,开辟了国内复合材料在杆塔工程化研制中应用的先导。

## 2.4 杆塔铺层结构优化设计

复合材料杆塔的结构设计除需要满足在给定荷载条件下杆件的强度、刚度、稳定性的要求外,还必须满足塔架正常运行下的挠度、横担抗扭转等要求,同时还有降低结构重量和制造成本、缩短周期短要求,从而使得杆塔的结构设计过程更为复杂。而对于无成熟经验可借鉴的新型复合材料杆塔,其结构设计的难度和风险很大。为了获得比较理想的杆塔方案,设计与工艺人员在广泛调研国外技术资料的基础上,首先充分运用已有的设计分析软件进行优化计算,获得了比较理想的质量、刚度分布特性;采用了 $\pm 45^\circ$ 玻璃纤维交叉缠绕与 $0^\circ$ 铺层复合结构,提高杆塔主体结构的综合力学性能。

## 3 杆塔主要设计结构

材料性能是杆塔设计研制的重要基础,为此,按照设计的需要进行了相关材料的一些补充研究。表2给出了杆塔材料主要性能数据。

Table2 The key properties of composite pole  
表2 杆塔材料主要性能数据汇总

| 材料种类    | 材料指标类别                      | 设计使用值  |
|---------|-----------------------------|--------|
| 玻璃粗纱缠绕层 | E (GPa)                     | 34.0   |
|         | G (GPa)                     | 5.2    |
|         | $\sigma$ (MPa)              | 1500.0 |
|         | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.9    |
| PU中密度泡沫 | E (MPa)                     | 70.0   |
|         | G (MPa)                     | 27.0   |
|         | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 0.08   |
| 玻璃粗纱拉挤杆 | E (GPa)                     | 45.0   |
|         | G (GPa)                     | 30.0   |
|         | $\sigma$ (MPa)              | 1200.0 |
|         | $\rho$ (g/cm <sup>3</sup> ) | 1.9    |

采用优化后 35KV 的杆塔缠绕/铺层结构,应用 ANSYS 进行分析,并与钢管杆结构进行了比较。不同设计结构的杆塔的应力及挠度情况见表3。复合材料杆

塔的应力与位移见图2、图3所示。

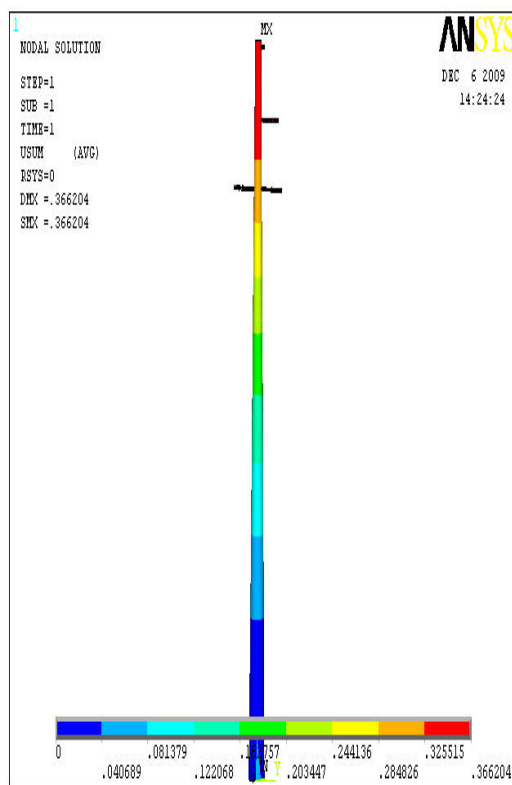


Figure 2. The stress of composite pole  
图2 复合材料杆塔应力分布图

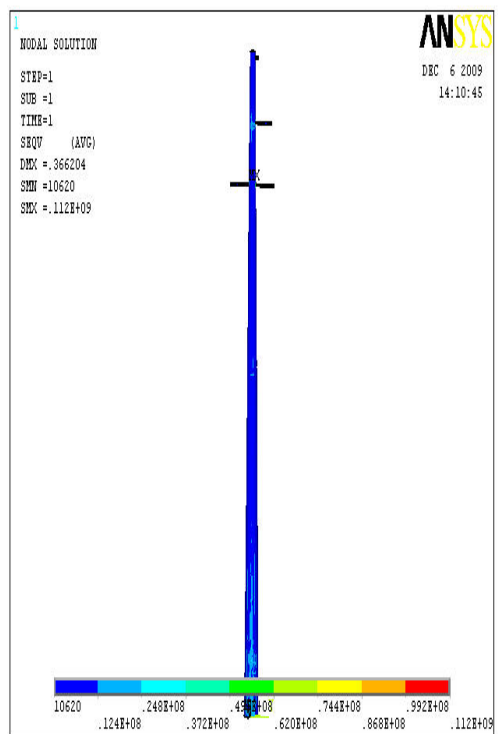


Figure 3. The deflection of composite pole  
图3 复合材料杆塔位移分布图

4 杆塔材料、工艺及试制

在杆塔缠绕工艺试验与产品试制中，设计、工艺和材料三方的技术人员充分协商，共同合作。着重从材料性能入手，改进了树脂基体配方，采用了宽纱带缠绕工艺，提高了缠绕效率；调整泡沫材料的密度,提高了杆塔的抗压性能；同时完善了结构图纸的细节设计，并在不影响杆塔整体结构特性的前提下对缠绕铺层方式做了优化。 夹层结构的杆塔成型工艺是在借鉴国内已有

技术的基础上，结合现有材料的特点形成的。杆塔采用了一次缠绕共固化成型技术，其中夹层中的PU泡沫预先组合成型。

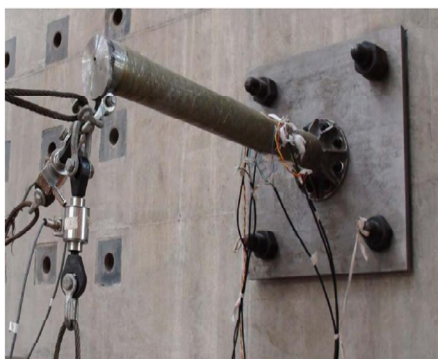
在杆塔的整个研制过程中，通过努力先后攻克了许多技术难关，如泡沫材料预成型、蒙皮结构缠绕成型、泡沫夹层与蒙皮粘接定位、复合材料横担套接环固定等，为杆塔进一步工程化研制提供了技术基础。

Table 3 The maximum deflection and the stress level of different design structures  
表 3 不同设计结构下最大挠度与应力水平

| 结构类别       | 钢结构     | 实心缠绕结构 | 夹层缠绕结构   |
|------------|---------|--------|----------|
| 材质         | Q3451   | 玻璃钢    | 玻璃钢+PU夹层 |
| 全高（m）      | 22.7    | 22.7   | 22.7     |
| 稍径（mm）     | 240     | 240    | 238      |
| 根径（mm）     | 576     | 576    | 539      |
| 主杆重量（kg）   | 1621.2  | 1950   | 1170     |
| 90度大风挠度（‰） | —       | 165    | 16.2     |
| 正常工况挠度（‰）  | 4.2     | 15.0   | 14.3     |
| 最大应力水平（%）  | 83.5，断导 | —      | 22.4，大风  |

Tble 4 Test result of composite pole  
表 4 复合材料杆塔性能试验情况

| 试验类型   | 试验项目     | 参考标准           | 验证情况               |
|--------|----------|----------------|--------------------|
| 基本材料性能 | 密度       | GB/T1463       | 符合要求               |
|        | 拉伸强度及模量  | GB1447         | 符合要求               |
|        | 压缩强度及模量  | GB/T1448       | 符合要求               |
|        | 弯曲强度及模量  | GB1449         | 符合要求               |
|        | 剪切强度及模量  | GB1450.1       | 符合要求               |
|        | 纤维体积含量   | GB/T2577       | 符合要求               |
|        | 阻燃性能     | GB/T8924       | 符合要求               |
|        | 固化度      | GB/T2576       | 符合要求               |
| 电气性能试验 | 热膨胀系数    | GB/T2572       | 依据设计要求确定           |
|        | 干、湿表面电阻率 | GB/T 1410      | 符合要求               |
|        | 干、湿体积电阻率 | GB/T 1410      | 符合要求               |
|        | 耐电痕化     | GB/T 6553      | 1A2.5级,需要改进        |
|        | 渗透试验     | GB/T 19519     | 符合要求               |
|        | 水扩散试验    | GB/T 19519     | 符合要求               |
|        | 1h淋雨     | GB/T 13398     | 需要改进               |
| 老化性能   | 紫外老化     | GB/T16422-2004 | 符合要求               |
|        | 酸老化      | GB/T 3857-2005 | 符合要求               |
|        | 碱老化      | GB/T 3857-2005 | 符合要求               |
|        | 盐雾老化     | GB/T 3857-2005 | 符合要求               |
|        | 臭氧老化     | GB/T 7762-2003 | 符合要求               |
|        | 湿热老化     | GB/T 2573-2008 | 符合要求               |
| 真型试验   | 复合横担     | 大风超载300%       | 符合要求               |
|        | 实心缠绕主杆   | 90度大风超载150%    | 杆体未断，仅杆体根部粘接胶层局部开裂 |



(a) 横担



(b) 整塔

Figure 4. True-type test of the 35kv electric transmission composite pole

图 4 35kV 复合材料杆塔真型试验

## 5 试验验证

本项目对复合材料杆塔的基本材料性能、电气性能、老化性能与真型试验进行试验与验证，结果列于表4。

从表4可知，复合材料杆塔的主要性能均能满足输电线路对复合材料的要求，但耐电痕化与淋雨性能需要提高。图4为正在试验的缠绕复合材料杆塔。

## 6 结论

复合材料杆塔的探索研制表明，只要有正确的指导思想和科学的决策，脚踏实地、勇于创新，立足于国内的复合材料设计研制技术，完全可能尽快缩短同国外先进技术的差距。本研究的最终成果将成为一个新的起

点，为新型复合材料杆塔设计研制提供直接而宝贵的工程经验。

## 7 致谢

本项目是在国家电网公司大力支持下，山东电力公司、中国电科院、国网电科院、聊城电力设计院、国核电力设计院的领导与技术人员大力协作下完成的，在此深表感谢！

## References (参考文献)

- [1] ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No.104: Recommended Practice for Fiber-Reinforced Polymer Products for overhead Utility Line Structures, 2003