

# 复合材料输电杆塔浅析

严夏军

(南京电力工程设计有限公司, 江苏 南京 210009)

**摘 要:** 杆塔是输电线路中的重要支撑结构物, 其结构性能直接影响线路的安全性、经济性和可靠性。复合材料因其优异的性能被应用在杆塔结构中, 大大改善了杆塔的性能, 减少了输电线路的建设成本。本文从复合材料的特性、复合杆塔的结构受力分析及电气性能进行分析, 展望了复合杆塔的广阔未来。

**关键词:** 纤维增强复合材料; 输电线路; 杆塔结构

## 0 引言

电杆、电塔结构是输电、通讯、铁路、机场、市政等基础设施中一类重要的特种支撑结构物, 其结构性能直接影响线路的安全性、经济性和可靠性。传统输电杆(包括木杆、水泥杆、钢杆及铁塔)在长期运行中各种各样的缺陷正逐步暴露出来。由于纤维增强树脂基复合材料(以下简称复合材料)具有轻质高强、耐腐蚀和电绝缘性好、性能可设计等特点, 是输电杆及杆塔结构材料较理想的选择, 已经开始并日益受到国内外电力行业的关注。传统的输电杆塔普遍存在质量重、易腐烂、锈蚀或开裂等缺陷, 耐久性差, 使用寿命较短, 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, 复合材料近年在国外已逐步应用于输电工程中。复合材料电杆具有传统电杆不具备的特殊优势, 在国外已经具有相当规模, 在中国市场的主要意义将在于运输、安装成本的大幅降低, 其开发应用将成为输电行业基础设施建设的一大趋势。但是因为钢制电杆初装费用低廉, 用户比较熟悉, 而对于复合材料还比较陌生, 所以复合材料电杆早期推广应用较慢。总结起来, 复合材料电杆及杆塔的开发应用存在两个制约问题即: 制造成本与耐候老化问题。若这两大问题能够得到解决, 复合材料电杆将会替代传统材料电杆, 成为未来新一代输电线路支撑结构。复合材料电杆在输电线路上的应用是电力工业基础设施建设的一次革命, 为复合材料大规模进入电力行业领域起到推动作用, 具有不可估量的社会效益。

## 1 国内外复合杆塔使用情况

国内外架空输电线路中使用较为广泛的杆塔主要有木质杆、混凝土或预应力混凝土杆、钢管混凝土杆、钢管杆和铁塔等几类。在国外(主要集中在北美和欧洲地区)复合材料杆塔得到较为广泛的应用, 大多数使用聚氨酯树脂作为基本材料, 已形成系列化的产品。见图 1、2。

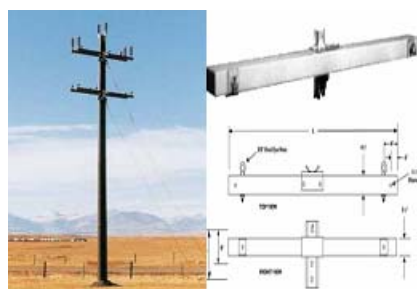


图 1 英国莎士比亚复合材料杆塔和横担样品



图 2 美国亨斯迈公司复合材料横担

另外, 奥地利, 比利时, 芬兰, 德国, 英国, 澳大利亚, 埃及, 巴西, 智利等国家都已开展了复合材料杆塔的研究。

我国基本不再使用木质杆, 钢管杆和钢管混凝土杆在近年的城市电网建设和改造中应用较多, 而在 220 kV 及以上的线路中, 多采用格构式铁塔。传

统的输电杆塔普遍存在质量重、易腐烂、锈蚀或开裂等缺陷，耐久性差，使用寿命较短，施工运输和运行维护困难，容易出现各种安全隐患。由国家电网公司组织，我国也开展了复合材料杆塔的应用技术研究，复合材料近年在国外已逐步应用于输电工程中。

2 复合杆塔的优势

复合材料杆塔具有强度高、质量轻、耐腐蚀以及耐疲劳性能、耐久性能和电绝缘性能好等特点，非常适于制造输电杆塔。目前国外复合杆塔在输电杆塔上的应用形式主要有变截面单杆和直管装配式塔架两种。与木质、混凝土和钢质杆塔相比主要在集中在以下几方面：

2.1 复合材料生产的能耗低、排放小

据统计，生产 1 吨钢材，需消耗 0.6 t 煤、5 t 水，并排放 290 g 粉尘、1450 g 二氧化硫和 85 g 二氧化碳。而化工行业每排放 1 吨温室气体，可以为其他行业减排 2.1~2.6 t 温室气体，净减排量为 1.1 t~1.6 t。可见钢铁的冶炼过程能耗高、污染重。而复合材料原材料的生产能耗及温室气体排放量相对较低，复合材料杆塔的应用对建设绿色环保型输电线路意义重大，符合我国发展节能减排高新技术产业的策略。

2.2 强度高

聚氨酯的分子结构的复合材料的纵向抗拉强度为 800~1200 MPa，远高于普通钢材的抗屈服强度。同时具有优良的耐疲劳性能。

2.3 耐腐蚀

聚氨酯的分子结构的复合材料杆塔对酸、碱、盐及有机溶剂等腐蚀介质的耐腐蚀性能和耐候性能优良，因此特别适合沿海地区、内陆盐渍土地区以及工业区和酸雨多发地区等对混凝土和钢质杆塔有特殊防腐要求的环境。

2.4 电绝缘性能好

复合材料杆电气绝缘性能优良，可避免铁塔易出现的雷击事故发生，还可以设计减少导线与塔身间隙，使输电线路结构更为紧凑，可减少线路走廊宽度，这有利于节约土地资源稀缺，且使杆塔底座的电磁场更低。而且复合材料杆本身具有绝缘性能，减少甚至不用绝缘子。同等电压下课缩减线路走廊宽度，并提高防风偏效果；杆塔的绝缘性还可改善

输电线路电磁场对周边环境的影响。

2.5 防冰闪优势

复合材料良好的疏水性使得杆塔具备一定的防覆冰特性；复合杆塔已在北美中部地区应用，该地区输电线路覆冰一直是世界难题。

2.6 安装和维护成本低

采用多种安全系数来进行设计比较，得出以下结论，见表 1。

表 1 复合材料杆塔和钢管塔的比较

110kV	安全系数	底径/mm	锥度	质量		挠度千分比/%
				杆身	横担	
复合材料杆塔	6	800	1/60	2063	212	2.08
	5	750	1/60	1874	212	2.96
	4	700	1/60	1554	212	4.04
	3	700	1/60	1226	212	6.73
钢管杆		700	1/67.5	3495		0.73

根据表 1 可知，全复合材料杆塔在安全系数为 4、允许挠度千分比为 4‰的设计条件下，整杆质量约为钢管杆的 57%，可大幅度降低运输和施工安装成本，尤其是在人难以到达的山林和偏远地区。复合材料电杆的轻质特点使其可用直升机运载，轻质还意味着安装速度加快和节省人力。复合材料电杆是一种免维护或低维护结构，以保障线路安全和降低输电线路的维护成本。易于修复，可在恶劣天气条件下现场修复。

3 结构设计及试验

复合杆塔的设计较木质杆和混凝土杆复杂，一般应满足强度、抗变形、抗剪、抗疲劳等综合力学性能要求。变形量大小决定于复合杆塔中纤维方向和纤维用量的大小；而强度则通过纵向纤维满足抗弯曲荷载和抗受压屈曲失稳的要求；抗剪性能通过以一定倾斜角度进行缠绕的纤维来满足；抗疲劳性能可以通过减小内应力和纤维之间的相互作用来实现。

从结构的角度来讲，复合杆塔的承载能力主要由结构刚度决定，而不由结构强度决定。因此，增强纤维的缠绕角度对杆的刚度影响较大，杆体的刚度由占 80% 的纵向纤维提供。横担、拉线、紧具等附件增大了结构荷载，在杆内产生较大的纵向压力。因此，应增加斜向的纤维以满足抗压屈失稳的要求。

输电杆塔必须满足强度、刚度、抗疲劳、耐久性等性能要求。同时，输电杆塔作为输电导线的支

撑结构，必须满足必要的电气性能要求。因此，复合杆塔在用于输电线路时有以下几个问题需要特别注意：

1) 刚度问题。由于复合材料的弹性模量在 25~50GPa 之间，与混凝土相近，但比钢材低得多，因此，受弯曲荷载作用下变形较大。杆塔过大的变形将影响输电线的电气安全距离。因此，应在设计过程中考虑电杆的刚度问题。

2) 节点连接问题。节点连接是复合材料应用于塔架结构的关键问题，应研究开发有效的节点连接技术。

3) 热稳定性问题。输电杆塔运行的环境一般比较恶劣，尤其在高热与高寒地区，树脂材料的热稳定性非常重要。

4) 老化问题。输电杆塔老化破坏可能引起输电线路的停电事故。复合杆塔的树脂基体受紫外线影响容易老化，这是制约复合杆塔应用的重要因素。

5) 环境问题。复合杆塔尽管是一种性能优越的产品，但其生产和报废处理面临一定程度的环境污染问题，因此，在对待复合杆塔时，宜视其为盐渍土地区、沿海地区、山区、高寒高湿和人为破坏严重地区等特殊地区传统输电杆塔的理想替代产品。

## 4 电气试验

### 4.1 复合材料杆塔性能分析

常规铁塔线路在运行中受到恶劣气象条件的影响，会发生风偏、污秽、覆冰、雷击闪络等故障和事故。通过以上试验研究可知，利用复合材料的绝缘性将其应用于输电线路杆塔，当采用合适的接地方式，可以有效提高线路绝缘水平，显著减少输电线路运行故障。

### 4.2 杆塔防风偏性能分析

本项目 110kV 复合材料杆塔采用复合绝缘子横担代替铁横担和悬垂绝缘子串，由于取消了悬垂绝缘子串，当线路在大风作用下时，杆塔相地间隙基本不变，由复合材料杆塔整塔电气性能试验可知，塔头相地间隙满足最大工频电压和系统最大操作过电压要求，杆塔不会发生风偏放电故障。因此，采用复合绝缘子横担，取消或减少悬垂绝缘子串，即可以消除杆塔塔头风偏放电故障。

### 4.3 杆塔防污性能分析

输电线路采用复合绝缘子横担及复合材料杆塔，当接地线悬空引下接地时，其防污性能大幅提高，主要表现在以下几个方面：

(1) 在相同爬电距离情况下，由于复合绝缘子表面硅橡胶具有良好的憎水性及憎水迁移性，使得复合绝缘子防污特性优于常规玻璃及瓷绝缘子串，提高了杆塔的防污性能；

(2) 复合绝缘子横担水平布置，具有一定的自洁性，表面的积污在雨水冲刷下容易脱落，其防污性能要优于悬垂绝缘子串。

(3) 复合材料杆身的绝缘性，大幅增加了相地的绝缘爬距，本文中的复合材料杆塔比常规铁塔线路绝缘子串的爬电距离增加了 40% 以上，提高了杆塔的防污水平。

本文中 110kV 复合材料杆塔，按 III 级污秽条件进行试验，对地爬电距离最小的上相可以耐受住约 180 kV 的工频电压。由于输电线路污闪故障是由工频电压引起的，而 110 kV 线路相地最高工频运行电压约为 70 kV，复合材料杆塔的污秽耐受电压远大于系统最高运行电压，因此杆塔的防污水平大幅提高，发生污闪的概率大幅降低。由于绝缘子覆冰也是一种特殊的污秽，采用复合材料杆塔增大了相地爬距，也减少了杆塔发生冰闪的概率。

### 4.4 杆塔防雷性能分析

增大杆塔相地间隙和减小杆塔接地电阻可以有效提高杆塔耐雷电水平，减小线路雷击跳闸率。由杆塔整塔电气性能试验可知，本项目中 110kV 复合材料杆塔，杆塔相地空气间隙可达到 1.7m，比常规铁塔 1.0 m 的间隙距离大幅提高，相地雷电冲击放电电压比常规铁塔提高了约 75%。在塔头尺寸相当的情况下，采用复合材料杆塔增大了相地间隙，提高了整塔的绝缘水平，有利于线路雷击跳闸率的降低。

## 5 结论

(1) 利用复合材料的绝缘性将其应用于输电线路杆塔，当采用合适的接地方式时，可以有效增加杆塔的相地空气间隙距离及绝缘爬距，增大杆塔的绝缘水平。

(2) 复合材料杆塔在减少输电线路风偏、污闪、冰闪、雷击跳闸等运行故障上具有较大的优势。

(3) 本文中的复合材料杆塔强度满足杆塔各

典型工况的要求,但其挠度比铁塔要大,主要原因是因为复合材料的强度与钢铁相当,但其弹性模量只有钢铁的 1/5 左右。

总结起来,复合材料电杆及杆塔的开发应用存在以下两大制约问题:制造成本与耐候老化问题。若这两大问题能够得到解决,复合材料电杆将会替代传统材料电杆成为未来新一代输电线路支撑结构。复合材料电杆在输电线路上的应用将是电力工业基础设施建设的一次革命,为复合材料大规模进入电力行业领域起到推动作用,具有不可估量的社会效益。但新事物的产生和被接纳以至广泛应用必然要经历一段较长的时间,难度也是相当大的,这还需要复合材料研究机构、复合材料制造行业和电

力部门的相互配合,共同努力。

#### 参考文献:

- [1] 胡毅,刘庭,刘凯,等. 110kV 输电线路复合材料杆塔特性试验研究[J].高电压技术, 2011, 37(4):801-808.
- [2] 刘汉立. 复合材料输电杆塔的研究与应用[J]. 纤维复合材料, 2011(1):38-40.
- [3] 方东红,韩建平,曹翠玲. 复合材料输电杆塔应用进展[J]. 玻璃纤维, 2008(6):31-35,39.

#### 作者简介:

严夏军 (1981-), 男, 江苏昆山人, 工程师, 从事输电线路设计。