

# 耐张杆塔使用硅橡胶复合绝缘子可行性分析

丁祖善, 霍福广, 许可, 何旭, 吕世忠

(徐州供电公司, 江苏 徐州 221000)

**摘 要:** 硅橡胶复合绝缘子从开始使用至今, 因其具备的防污能力强、不需要后期维护等特点得到迅速推广, 但在日常运行工作中主要出现在直线杆塔上作为悬垂绝缘子串使用, 在耐张杆塔上使用的绝缘子串仍旧以瓷质、玻璃绝缘子居多。本文着重从力学性能、经济性、电气性能、抗老化性能等几个方面分析复合绝缘子用在耐张杆塔上的可行性。

**关键词:** 硅橡胶; 复合绝缘子; 耐张杆塔; 力学分析

## 0 引言

复合绝缘子自 20 世纪 50 年代开始研究和使  
用, 并在 20 世纪 80 年代开始迅速推广, 我国也在  
80 年代初开始了复合绝缘子的研制。国产复合绝  
缘子在 1985 年首次挂网试运行至今, 得到了生产  
运行部门的广泛好评。

复合绝缘子是由两种以上的有机材料组成的复  
合结构绝缘子, 主要由芯棒、伞群护套、粘结层、  
金具、均压环等结构部件组成。复合绝缘子质量轻  
(质量仅为瓷质或玻璃绝缘子的 10%~15%)、体积  
小, 因此方便安装、运输和更换。复合绝缘子属于  
棒形结构, 内外极间距离几乎相等, 一般不会发生  
内部绝缘击穿, 也不需要零值检测, 且绝缘子表明  
具有很强的憎水性, 防污性能优良, 可以有效地遏  
制大面积污闪事故的发生, 同时大大延长了清扫周  
期, 大大降低了劳动强度。复合绝缘子也具有  
一些明显的缺点: 抗弯、抗扭能力较差, 承受较大横  
向压力时, 容易发生脆断; 伞盘强度低, 不允许踩  
踏碰触; 伞群容易老化、腐蚀等等。正是由于这些  
缺点的存在, 一些人认为复合绝缘子不适合在耐张  
塔上使用。据统计, 现阶段电网中运行的复合绝  
缘子主要以棒形悬式绝缘子为主, 约占各类运行复  
合绝缘子总支数的 95% 以上。由此可见, 在我国,  
复合绝缘子主要应用在直线杆塔上作为悬垂绝缘子  
使用, 在耐张杆塔上还是使用传统的瓷质绝缘子和  
玻璃绝缘子为主。

## 1 复合绝缘子力学分析

绝缘子在耐张杆塔上组成耐张串, 除承受导线

自重、冰重和风力外, 还要承受正常情况和断线情  
况下顺线路方向导线的张力。因此, 要判断复合绝  
缘子是否可以在耐张杆塔上使用, 首先要判断复合  
绝缘子的轴向拉伸抗张强度以及横向抗剪切强度是  
否可以满足要求。

### 1.1 轴向抗拉伸能力分析

芯棒是复合绝缘子机械负荷的承载部件, 因此  
要求它要有很高的机械强度。芯棒的骨架为玻璃  
纤维, 以环氧树脂为基体材料, 通过硅类表面处理  
剂固化成型, 将玻璃纤维粘合成整体从而组成环  
氧玻璃引拔棒, 以此来承受和传递机械负荷。直  
径小于或等于 10 $\mu$ m 的玻璃纤维的拉伸破坏应  
力高达 1000~1500MPa, 芯棒中玻璃纤维的含量  
一般在 60%~80%, 所以引拔固化后的环氧玻璃  
纤维引拔棒的抗张强度大于 600MPa。

导线瞬时破坏应力  $\sigma_p = \frac{T_p}{A}$ , 其中,  $T_p$  为导

线瞬时拉断力, 取计算拉断力  $T_i$  的 95%;  $A$  为导  
线截面积。

通过 LGJ、LGJF 型钢芯铝绞线的规格和机械  
物理特性 (GB1179-1983) 可以查出各截面钢芯  
铝绞线的计算拉断力和计算截面, 通过编程计算  
出各截面钢芯铝绞线的瞬时破坏应力, 见表 1。

通过表 1 可以汇出瞬时破坏应力曲线图, 见图  
1。

由图中可以查得, 最大瞬时破坏应力  
 $\sigma_{P(\max)} = \sigma_{P(\frac{50}{30})} = 504.096\text{MPa}$  小于环氧玻璃纤

引拔棒的抗张强度大于 600MPa。

表 1 瞬时破坏应力计算表

标称截面 铝/钢/(mm <sup>2</sup> )	计算拉断力 /N	计算截面 /(mm <sup>2</sup> )	瞬时破坏应力 /MPa
10/2	4120	12.37	316.410671
16/3	6130	18.82	309.4314559
25/4	9290	29.59	298.2595471
35/6	12630	40.67	295.0208999
50/8	16870	56.29	284.7130929
<b>50/30</b>	<b>42620</b>	<b>80.32</b>	<b>504.0961155</b>
70/10	23390	79.39	279.8904144
70/40	58300	110.4	501.6757246
95/15	35000	109.72	303.0441123
95/55	37200	113.96	310.1088101
120/7	78110	152.81	485.5997644
120/20	27570	125.5	208.6972112
120/25	41000	134.49	289.6126106
120/70	47880	149.73	303.7868163
150/8	98370	193.4	483.2032058
150/20	32860	152.8	204.2997382
150/25	46630	164.5	269.2917933
150/35	54110	173.11	296.9470279
185/10	65020	181.62	340.1002092
185/25	40880	193.4	200.8066184
185/30	59420	211.29	267.163614
185/45	64320	210.93	289.6885223
210/10	80190	227.83	334.3743142
800/70	207000	879.4	223.6183762
800/100	241100	896.05	255.6163161

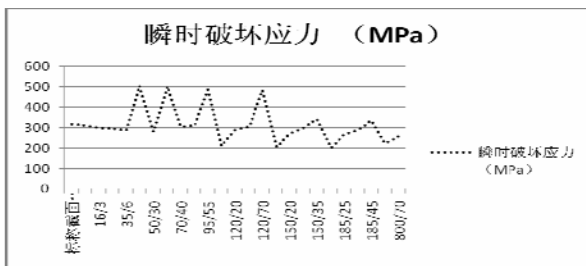


图 1 瞬时破坏应力曲线图

因此，在导线未断线的情况下，复合绝缘子的拉伸抗张强度远大于导线的瞬时破坏应力，满足要求。

## 1.2 横向抗剪切弯曲能力分析

耐张绝缘子串在运行过程中，会受到导线本体及覆冰重力、风力等因素影响，从而出现横向剪应力，如果剪应力过大，会导致复合绝缘子出现脆断的情况。因此，抗剪切应力的能力也是复合绝缘子是否可以在耐张杆塔上使用的必要指标之一。

导线自重比载：

$$g_1 = \frac{9.807G_1}{A} \times 10^{-3} [N/(m \cdot mm^2)], \text{ 其中,}$$

$G_1$  为导线自重。

冰重比载：

$$g_2 = \frac{27.728b(d+b)}{A} \times 10^{-3} [N/(m \cdot mm^2)], \text{ 其}$$

中， $b$  为覆冰厚度， $d$  为导线直径。

覆冰风压比载：

$$g_3 = 0.613\alpha C d \frac{v^2}{A} \times 10^{-3} [N/(m \cdot mm^2)], \text{ 其中,}$$

$C$  为体形系数，取 1.2。 $v$  为设计风速， $\alpha$  为风压不均匀系数。取值见表 2。

表 2 风压不均匀系数

风速 $V/(m/s)$	$<20$	$20 \leq V < 27$	$27 \leq V < 31.5$	$\geq 31.5$
计算杆塔荷载	1.00	0.85	0.75	0.70
设计杆塔	1.00	0.75	0.61	0.61

有冰有风时的综合比载：

$$g_7 = \sqrt{(g_1 + g_2)^2 + g_3^2}$$

由全国典型气象区的气象参数表可查得：1)

当风速  $v=31.5m/s$  时，覆冰厚度  $b=0$ ；2) 当覆冰厚度  $b=20mm$  时，风速  $v=15m/s$ 。

通过 LGJ、LGJF 型钢芯铝绞线的规格和机械物理特性 (GB1179-1983) 可以查出各截面钢芯铝绞线的直径、计算质量、截面积等参数，经过编程可以算出两种情况下的综合比载，见表 3。

表 3 综合比载

标称截面 铝/钢 /(mm <sup>2</sup> )	直径 /mm	计算 截面 /(mm <sup>2</sup> )	单位长 度质量 /(kg/km)	综合比载 (覆冰厚度为 0) /[N/(m·mm <sup>2</sup> )]	综合比载(覆 冰厚度为 20) /[N/(m·mm <sup>2</sup> )]
10/2	4.5	12.37	42.9	188.9537899	1133.971481
16/3	5.55	18.82	65.2	154.4556657	788.3574523
25/4	6.96	29.59	102.6	124.8962795	540.6779835
35/6	8.16	40.67	141	108.003823	419.2958517
50/8	9.6	56.29	195.1	93.53167554	326.8265071
50/30	11.6	80.32	372	86.64848655	264.6809177
70/10	11.4	79.39	275.2	80.86022387	254.4449206
70/40	13.6	110.4	511.3	77.61734401	215.1668783
95/15	13.61	109.72	380.8	71.93864354	204.9433034
95/55	13.87	113.96	408.9	71.45062575	201.0208923
120/7	16	152.81	707.7	70.17672101	176.9163415
120/20	14.5	125.5	379	66.0444393	183.0666154
120/25	15.07	134.49	466.8	66.60591289	179.6077508
120/70	15.74	149.73	526.6	63.83124585	167.7672629
150/8	18	193.4	895.6	65.75520462	155.1432141
150/20	16	152.8	461.4	61.14949761	161.2033683
150/25	16.67	164.5	549.4	61.26644667	157.2718666
150/35	17.1	173.11	601	60.88093604	153.7696813
185/10	17.5	181.62	676.2	61.29317571	151.8555497
185/25	18	193.4	584	56.02006748	139.4293901
185/30	18.9	211.29	706.1	56.23931149	135.6821485
185/45	18.88	210.93	732.6	57.02322591	137.084553
210/10	19.6	227.83	848.2	57.14082504	133.6617391
800/70	38.58	879.4	2791	38.35614436	68.45244784
800/100	38.98	896.05	2991	39.56811327	69.61132981

由表3可以绘出综合比载的曲线图，见图2。

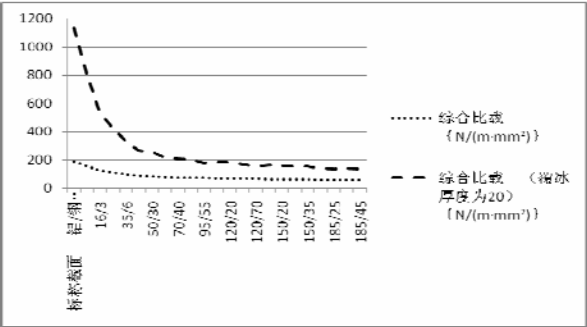


图 2 综合比载曲线图

在 110kV 及以上电压等级的高压输电线路中，导线的截面积不会小于 150mm<sup>2</sup>，因此综合比载不会超过 200 N/(m·mm<sup>2</sup>)，而根据复合绝缘子芯棒的设计数据，芯棒在压缩载荷作用下发生弯曲时，轴向最大耐受压应力为 900 MPa，由此可以得出，如果要达到最大耐受压应力，线路档距需要达到 4500m，这远远大于实际运行中线路所能达到的档距，而且使用环氧玻璃纤维引拔材料作为承力部件的复合绝缘子在其内部已经出现损伤的情况下，芯棒还会有很高的机械强度，短期内并不影响绝缘子的机械强度。

因此复合绝缘子的耐弯曲性能可以满足要求。

1.3 抗扭转能力分析

架空导线在空中始终处在一个非常复杂的力场中，复杂的力场环境致使导线可能出现摆动的现

象，由此可能使绝缘子产生有轻微的扭转负荷。从复合绝缘子的动载试验结果可知，幅度很低的扭转负荷对复合绝缘子的机械性能影响非常小。根据对一支 Φ30 芯棒长达 5.78 m 的复合绝缘子间隔棒的弯曲疲劳试验的结果表明，在最大弯曲挠度达 95cm 时，其循环频率为 27 次/min 情况下达到 20 万次循环后没有任何损伤。

由此可以看出，复合绝缘子的抗扭转能力满足要求。

2 经济性分析

绝缘子的经济性分析，既包括绝缘子的购买费用，还包括在运行使用中进行维护、保养等所投入的附加费用。附加费用主要由绝缘子污秽度测量及清扫、检测及更换零值等所产生的费用组成。

2.1 复合绝缘子与瓷质绝缘子比较

《架空输电线路运行规程》(DL/T741-2010) 中规定瓷质绝缘子与复合绝缘子检测项目与周期见表 4。

表 4 检测项目与周期

绝缘子类型	项目	周期年	备注
瓷质绝缘子	绝缘子污秽度测量	1	根据实际情况定点测量
	绝缘子清扫	1~3	根据污秽度情况、盐密灰密测量、运行经验调整周期
	瓷绝缘子裂纹、钢帽裂纹、浇筑水泥及伞群与钢帽位移	必要时	每次清扫时
	盘形瓷质绝缘子绝缘测试	6~10	330kV 及以上：6 年；220kV 及以下：10 年
复合绝缘子	复合绝缘子伞群、护套、粘接剂老化、破损、裂纹；金具及附件锈蚀	2~3	根据运行需要
	复合绝缘子电气机械抽样检测试验	5	投运 5~8 年后开始抽查，以后至少每 5 年抽查。

由表 4 可以看出，复合绝缘子只需要根据运行需要进行金具锈蚀、伞群老化检测以及每 5 年一次的电气机械抽样检测。相比瓷质绝缘子的维护量，复合绝缘子的维护费用基本可以忽略不计。由此可以推出绝缘子串的综合价格公式：

$$Z = M + W \times T$$

式中：M—绝缘子串的购买价格；

W—平均每年的维护费用；

T—使用年限。

根据《110kV~750kV 架空输电线路设计规范》

(GB50545-2010) 中规定，在海拔高度 1000 米以下地区，操作过电压及雷电过电压要求的悬垂绝缘子最少片数，应符合表 5 要求。

表 5 瓷质绝缘子用量表

标称电压/kV	110	220	500
悬垂绝缘子片数/片	7	13	25
耐张绝缘子片数/片	8	14	27

根据运行单位招标价格，制定了两种绝缘子的价格比较表，见表 6。

表 6 绝缘子价格比较 元

种类	价格		
电压等级/kV	110	220	500
瓷质绝缘子	45*8=360	55*14=770	67*27=1809
复合绝缘子	200	430	820

结合绝缘子的价格公式，汇出价格曲线图，如图 3 所示。

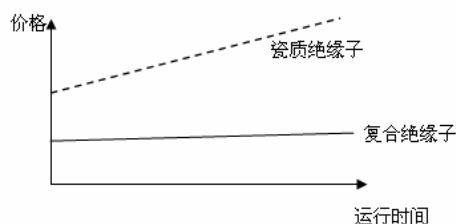


图 3 价格曲线图

从图 3 可以看出，随着运行时间的增加，瓷质绝缘子所需要的费用远远高于复合绝缘子所需费用。

## 2.2 复合绝缘子与喷涂 RTV 的瓷质绝缘子比较

在架空送电线路的实际运行中，为了提高瓷质绝缘子的防污闪能力，常常在瓷质绝缘子表面喷涂 RTV 涂料

以 110kV 架空输电线路为例，RTV 的招标价格为 280 元/kg，而一片瓷质绝缘子需要喷涂 0.35~0.4 kg，这样可以计算出，喷涂一串耐张瓷质绝缘子所需的价格  $S=(0.35\sim0.4)\times280\times8=784\sim896$  元。根据运行单位的运行经验，RTV 一般运行五年之后就开始更换，需要重新涂刷。最近出现一种新型 RTV 材料为 PRTV，可以运行 10 年之久，但是这种 RTV 价格为 480 元/kg，价格太贵。复合绝缘子的招标报价为 200 元左右一串，运行经验是在 10 年之后开始更换。由此可见，即使在线路大修技改中全线更换复合绝缘子，在价格上也存在着巨大的优势。

## 3 电气性能及抗老化性能分析

### 3.1 电气性能比较

复合绝缘子的电气性能优于瓷质绝缘子的实事已经获得业界的普遍认可，在此不再过分赘述，只做简单的数据比较。

复合绝缘子的工频干闪电压略高瓷质绝缘子串的干闪电压，而工频湿闪电压比瓷质绝缘子串高约

15%；雷电冲击 50%放电电压比瓷质绝缘子高约 5%。

另外，由于复合绝缘子的构成材料为硅橡胶，伞群护套表面为低能面，因此具有良好的憎水性和憎水迁移性，及时处于潮湿污秽的环境中，在复合绝缘子伞群表面也不会形成连续的水膜，只有相互独立的水珠颗粒，因此复合绝缘子具有良好的耐污性能。

### 3.2 抗老化性能分析

绝缘子是与外界直接接触的电气绝缘设备，在运行过程中会受到各种复杂环境的影响，如：风霜雨雪、高强电场、高温低温、覆冰、大气紫外线等等。这些恶劣的环境会加速绝缘子的老化。而瓷质绝缘子结构稳定，抗老化能力强，但是复合绝缘子属于有机材料，在运行中受到恶劣因素的影响更容易老化。因此，需要解决绝缘子的老化问题才能在运行中推广使用。

现在我国使用的复合绝缘子的伞群护套主要材料为甲基乙烯基硅橡胶（其分子式见图 4），并在其中添加了偶联剂、阻燃剂、补强剂、抗老化剂等材料经高温硫化而成。

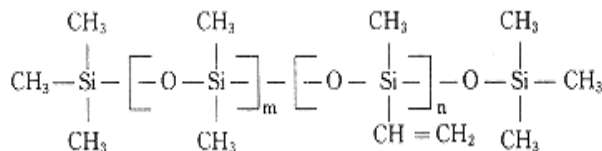


图 4 甲基乙烯基硅橡胶分子结构

通过试验及多年的运行实践经验，可以发现：

- 1) 采取定形生产工艺，利用进口高纯度 D4 来生产硅橡胶，硅橡胶各种性能必然稳定；
- 2) 由甲基封头的硅氧烷分子构成的硅橡胶，有明显的耐老化性能；
- 3) 由分布状态较窄的大分子量硅氧烷分子构成的硅橡胶有良好的耐老化性能。

由此可以看出，甲基乙烯基硅橡胶的具有优异的耐老化性能。

## 4 结论

通过上文的分析，可以得出：

- 1) 复合绝缘子在力学性能上完全可以承受耐张绝缘子的所承受的拉力、扭力、剪切力及弯曲应力；
- 2) 在经济性上优于瓷质绝缘子，运行中基本不需要清扫、测零等维护费用；

3) 电气性能优于瓷质绝缘子, 而且复合绝缘子具有憎水性, 耐污能力强;

4) 硅橡胶复合绝缘子防老化性能较好, 根据运行经验, 可以使用 10 年以上。

由此可以看出, 复合绝缘子相对于瓷质绝缘子有着巨大的优势, 可以在耐张杆塔上全面推广。

#### 参考文献:

- [1] DL/T 741-2010, 架空输电线路运行规程[S].
- [2] 国家电网公司人力资源部. 输电线路运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] GB50545-2010, 110kV~750kV 架空输电线路设计规范[S].
- [4] 阎东, 卢明, 张柯, 等. 输电线路用复合绝缘子运行技术及实例分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [5] 赵宇明, 谢竹青, 傅观君, 等. 大载荷及耐张塔用悬式复合绝缘子机械特性[J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 60-64.

[6] 张秀敏, 张晓东. 高压户外复合绝缘子外绝缘材料的研究与应用进展[J]. 绝缘材料, 2006(1): 46-51.

[7] 赵恒, 韩立奎, 王晓飞. 架空线路耐张杆塔上使用硅橡胶复合绝缘子设计探讨[J]. 科技创新导报, 2009(31): 22-23.

#### 作者简介:

丁祖善 (1987-), 男, 江苏邳州人, 学士学位, 从事输电运检工作;

霍福广 (1987-), 男, 江苏丰县人, 硕士学位, 从事输电运检工作;

许可 (1981-), 男, 江苏徐州人, 工程师, 从事输电运检工作;

何旭 (1968-), 男, 江苏睢宁人, 高级工, 从事输电运检工作;

吕世忠 (1963-), 男, 江苏徐州人, 技师, 从事输电运检工作。