

## 中波塔高强瓷绝缘柱脚性能研究

方茜<sup>1\*</sup>,孙永良<sup>2</sup>,马人乐<sup>1</sup>,刘玉海<sup>3</sup>

1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092
2. 同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海 200092
3. 东营市河口区水利局, 山东 东营 257200

**摘要:** 本文提出了一种新型柱脚设计方案, 将非金属预应力筋安装在柱脚, 运用施加预应力的方法改变柱脚应力性质, 使其不仅易于抗压, 也易于抗弯和抗拉, 改善了高强绝缘陶瓷的脆性特性, 提高其韧性。针对该新型柱脚设计方案, 以一实际工程为算例, 进行了AFRP张拉锚固方法探究试验以及瓷绝缘柱脚抗弯试验。通过试验, 总结了AFRP筋施加预拉力的方法, 并分析了该新型柱脚的受力性能。

**关键词:** AFRP筋; 绝缘陶瓷; 预应力; 抗弯试验

**中图分类号:** TU359

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-2324(2015)04-0581-03

## Study on the Performance of High-strength Ceramic Insulating Column Foots in Medium Wave Towers

FANG Qian<sup>1\*</sup>, SUN Yong-liang<sup>2</sup>, MA Ren-le<sup>1</sup>, LIU Yu-hai<sup>3</sup>

1. School of Civil Engineering/Tongji University, Shanghai 200092, China

2. Tongji Architecture Design (Group) Co., Ltd., Shanghai 200092, China

3. Water Bureau of Hekou District Dongying City, Dongying 257200, China

**Abstract:** In this paper, a new type of column foot was proposed. The non-metallic prestressed tendons were installed into the column foot, whose stress properties were changed using the prestressed method making it not only easy to resist to pressure, but also easy to resist to bending and tensile strength, and the brittleness of high-strength insulating ceramics was changed, the ductility was improved. Then prestressed test of AFRP tendons and bending tests of the combination of AFRP tendons and ceramics were designed to make and finish towards the new column foot on a practical project. According to the tests, the prestressed methods of AFRP tendons were concluded, and mechanical performance of the new column foot was analyzed.

**Keywords:** AFRP tendons; insulating ceramic; prestress; bending test

一般中波塔的塔体下端必须采用底座绝缘子, 其采用耐高电压的高频绝缘陶瓷制造, 且必须承受塔体的压力及拔力<sup>[1]</sup>。但是, 传统的中波塔塔底绝缘有如下缺点: (1)只能抗压, 抗拉、弯能力较差, 危险系数大; (2)维修费用大, 不经济。针对上述情况, 本文提出了一种新型柱脚, 在对新型材料进行研究的基础上, 将非金属预应力筋中的一种——AFRP 预应力筋<sup>[2]</sup>安装在柱脚陶瓷绝缘子中, 运用施加预应力的方法改变柱脚应力性质, 使其不仅易于抗压, 也易于抗弯和抗拉。

本文分别针对非金属预应力筋及其和绝缘陶瓷的组合物设计、制作一批试件并完成相关的试验工作。其中非金属预应力筋试验为张拉锚固试验, 主要探究对非金属预应力筋张拉锚固的方法; 组合物试验为抗弯试验, 主要探究新型柱脚的受力性能。

### 1 新型高强瓷绝缘柱脚构造特征与组成

新型高强瓷绝缘柱脚由两部分组成: 非金属预应力筋和圆筒形瓷绝缘体。其中, 非金属预应力筋采用聚酯筋的形式。圆筒形高强瓷绝缘体是具有高强度、高电阻率、低高频损耗和高抗电强度的陶瓷材料绝缘体, 较经济。如图 1 所示。

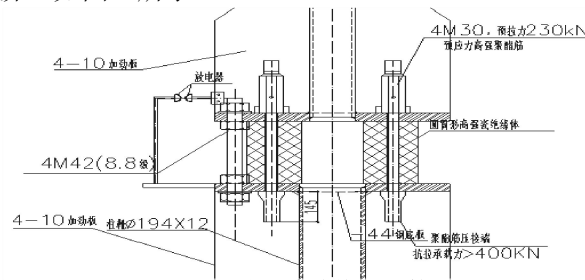


图 1 高强瓷绝缘柱脚简图

Fig.1 High-strength ceramic insulating column foot sketch

收稿日期: 2015-04-02

修回日期: 2015-04-23

作者简介: 方茜(1990-),女,在读硕士研究生,主要从事高耸结构的研究. E-mail:tjfangqian@126.com

\*通讯作者: Author for correspondence. E-mail:tjfangqian@126.com

安装时，首先将带孔的圆筒形高强瓷绝缘子夹在加压板（连同塔柱）和绝缘瓷底板（连同过渡段）之间，并对准孔中心；之后在加压板和绝缘瓷底板之间套入双头螺栓，顶紧绝缘子；再将高强 AFRP 筋穿入高强瓷绝缘体的孔中并使加压板套入上部；然后张拉高强 AFRP 筋并固定即可。

更换该高强瓷绝缘柱脚时，首先安装好 4M42 临时固定螺栓，张拉 AFRP 筋使之松弛，拆卸 AFRP 筋，拆卸瓷体，更换新瓷体及 AFRP 筋，张拉新 AFRP 筋并固定，拆卸临时固定螺栓即可。

## 2 高强瓷绝缘柱脚性能研究

本文提出的新型高强瓷绝缘柱脚主要由 AFRP 预应力筋<sup>[3]</sup>和陶瓷绝缘子组成，对该柱脚的性能的研究主要有两方面：对 AFRP 筋张拉锚固方法的探究试验<sup>[4]</sup>和对瓷绝缘柱脚的抗弯试验。

### 2.1 AFRP 筋张拉锚固方法探究试验

AFRP 筋是一种可施加预拉力的筋材。由于国内外关于 AFRP 筋的张拉体系研究很不成熟，所以本文提出一种新的张拉设计方法，为钢套管加胶、加销轴型张拉设计方法。

图 2 为钢套管加胶、加销轴型张拉设计方法。预拉力试验最终加到约 272 kN，筋材张拉端滑移。试验结果见图 3。

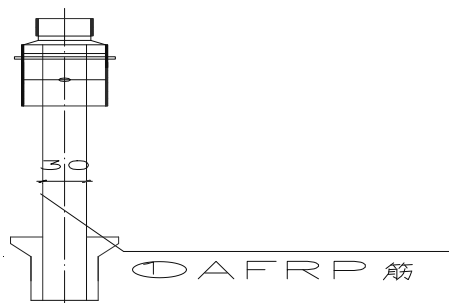


图 2 AFRP 筋示意图  
Fig.2 AFRP tendon



图 3 相对滑移图  
Fig.3 Relative slip

根据试验的结果，可得出如下结论：(1)AFRP 筋钢套管加胶、加销轴型张拉方法最大可以张拉到 272 kN；(2)该方案安装简单、制作费用较低，但是工厂加工技术性较强。从实验数据来看，该方法基本达到本文所需要的预拉力要求，后续可以再对该方法进行适当调整后可以达到更高的要求。

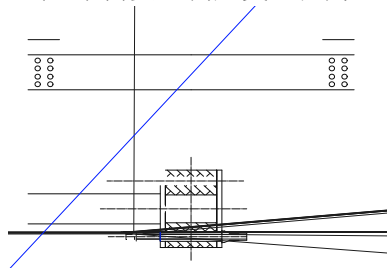
### 2.2 瓷绝缘柱脚抗弯试验

实际工程中，瓷绝缘柱脚处于拉-剪复合作用以及压-剪复合作用的情况下，同时由于受剪力的作用，绝缘柱脚底部出现受弯的情况。对构件施加的荷载根据实际工程中一高 76 m、基本风压 $\omega=0.45 \text{ kN/m}^2$ 的三边塔在柱脚所受力施加，根据实际情况，塔底受拉 625 kN，受压 730 kN，受剪 30 kN(均为设计值)。

试验时，将柱脚横放，两端和反力架铰接，模拟一简支梁。在跨中施加一集中荷载，力为柱脚所受剪力的两倍。根据力传递原理，绝缘子两侧面受力为实际剪力大小。此时瓷绝缘子整体受弯。根据瓷绝缘子的设计荷载进行竖向集中力（剪力）加载，观测瓷绝缘子的受力情况和变形特性<sup>[5]</sup>。

试验的试件包括陶瓷绝缘子和工厂加工的钢套管加胶、加销轴型的 AFRP 筋。其中，陶瓷绝缘子已经事先做过抗压试验，试验结果表明，当压力达到 1800 kN 时陶瓷仍未损坏。采用一个反力架，顶部设一个 50 t 的千斤顶，施加竖向集中力(图 4)。

试验中需要量测应变。在陶瓷绝缘子顶部、侧面和底面中心，布置单向应变片 A1/A2/A3(图 5)。



先进行 AFRP 筋材的张拉, 需要对称分级张拉 AFRP 筋, 防止受力不均。实际工程中对 AFRP 筋施加预拉力为 230 kN, 柱脚拉力为 625 kN, 由于试验设备限制, 考虑抵消该外拉力引起的绝缘瓷体的预压紧力, 则本实验单根筋材需要施加的预拉力为:

$$P = \left( \frac{F_{\text{张拉}} \times 4 - N_t}{4} \right) / 0.8 = \left( \frac{230 \times 4 - 625}{4} \right) / 0.8 = 91 \text{ kN} \quad (1)$$

则每根筋加 95 kN 预拉力。绝缘陶瓷上 A1、A2、A3 各点荷载-应变最终拟合曲线如图 6 所示。

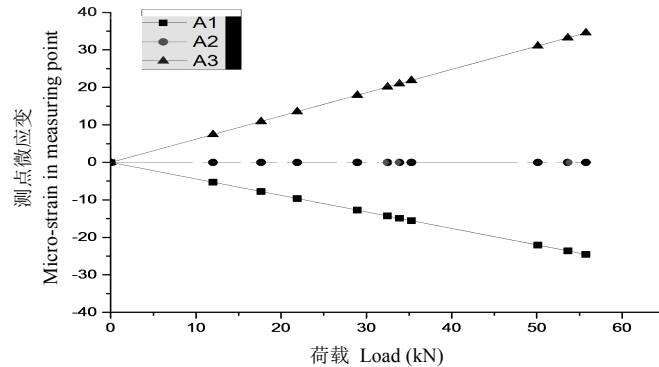


图 6 绝缘陶瓷各测点荷载-应变曲线

Fig.6 Load-strain curve of every point on the insulating ceramic

可见该瓷绝缘子符合平截面假定原则, 在受力状态下上下钢板始终紧贴中间绝缘瓷体, 陶瓷受力面(顶面)受压, 对立面(底面)受拉, 侧面因为位于中性轴上, 应力始终为 0。并且瓷绝缘柱脚在此纯弯状态下应变较小, 受力性能良好。需要注意的是, 图 6 中陶瓷的应变为相对应变, 由于筋材施加了 95 kN 的预拉力, 在陶瓷相对应变为 0 时, 其绝对应变为负值, 即受压, 压应变约为:

$$\varepsilon = \frac{F}{AE} = \frac{95 \times 4 \times 10^3 \times 10^6}{159592 \times 4.5 \times 10^4} = 53 \mu\varepsilon \quad (2)$$

将该应变值和图 6 中应变值进行叠加, 发现陶瓷在力施加过程中始终处于受压状态, 可见 AFRP 筋施加预应力后可以压紧陶瓷, 抵消其拉应力。

### 3 结论

本文分别针对 AFRP 筋, AFRP 筋和陶瓷绝缘子的组合体设计、制作了一批试件并完成了相关的试验工作。其中 AFRP 筋试验为张拉锚固方法探究试验, 组合体试验为抗弯试验, 更能反映构件的本质受力特性。本文提出的新型高强瓷绝缘柱脚主要有以下优点: 1. 该新型绝缘柱脚在实际受力情况下表现出典型的整体弹性性能, 可以受压, 也可以受弯、受拉, 多向受力; 2. 构造简单, 传力直接, 有抗冲击能力。3. 维修更换方便, 工程经济性强。

通过瓷绝缘柱脚抗弯试验, 验证了本课题提出的新型瓷绝缘柱脚的优点, 即在受压状态下, 依靠陶瓷抗力; 在受拉状态下, 依靠施加了预应力的 AFRP 筋抗力, 保证各材料性能的最优利用。

本文的研究虽然取得了初步的成功, 但依然任重道远, 尚有许多有待进一步深入进行的研究工作, 这里择其要者简要讨论如下: 1. 在瓷绝缘柱脚抗弯试验中以一个实际工程为算例, 今后如果遇到其他工程塔底受力更大, 对筋材的预拉力要求更高, 还需继续做单根筋材的预拉试验; 2. 陶瓷绝缘子的尺寸较大, 可以按照实际受力情况加以减小; 3. 对于 AFRP 筋的预应力松弛情况还需要进一步研究, 包括蠕变影响等。

### 参考文献

- [1] 赵玉明.中外广播电视百科全书[M].北京:中国广播电视出版社,1995
- [2] 陶学康.国际预应力材料及体外索新进展[C]//中国土木工程学会.第十一届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会议论文集.贵阳:第十一届全国混凝土及预应力混凝土学术交流会,2001
- [3] 吕志涛.高性能材料 FRP 应用与结构工程创新[J].建筑科学与工程学报,2005,22(1):1-5
- [4] 詹界东,杜修力,邓宗才.预应力 FRP 筋锚具的研究与发展[J].工业建筑,2006,36(12):65-68
- [5] 王兴国,周朝阳,曾宪桃,等.外贴预应力 GFRP 板加固混凝土梁抗弯试验研究[J].哈尔滨工业大学学报,2005,37(3):351-354