

石墨基柔性接地体及其在通信基站接地网中的应用

张 艳¹ 张国锋^{2*} 胡松江² 陈彦青² 务孔永² 沈万慈³

(1.国网西安供电局,西安 710000;2.河南四达电力设备股份有限公司,长葛 461503;
3.清华大学材料学院,北京 100080)

摘 要 石墨基柔性接地体相对于传统接地体,接地电阻低,在高低温循环作用下结构稳定,能满足短路故障电流的冲击,保证通信基站系统安全可靠运行、保障运行人员和电气设备安全;又因其基体是鳞片石墨加工而成,保留了石墨的全部特性,耐腐蚀性高、寿命长、无需更换,降低了接地装置的全寿命周期成本;在交通不便、无电、土壤电阻率较高的山区使用时,不需要再搬运焊机笨重设备,埋设更方便,节约了土石方的开挖量,减少了施工强度,且安装流程简化,大大缩短了安装施工时间,降低了施工成本,有着其他接地装置不可比拟的优势。最后,简要阐述了石墨基柔性接地体在中国铁塔 2018 年河南省分公司洛阳市室外站工程中的应用情况,结果表明该接地体可以在恶劣地质环境条件下能满足实际工程的要求。

关键词 石墨接地体,非金属接地,耐腐蚀材料,柔性石墨复合材料,接地装置

Flexible graphite base grounding body and its application in communication base station grounding network

Zhang Yan¹ Zhang Guofeng² Hu Songjiang² Chen Yanqing² Wu Kongyong² Shen Wanci³

(1.Xi'an Power Supply Bureau,Xian 710000;2.Henan Sida Power Equipment Co.,Ltd.,
Changge 461503;3.School of Materials,Tsinghua University,Beijing 100080)

Abstract Compared with the traditional grounding body, the Shi Moji flexible grounding body had low grounding resistance and stable structure under the high and low temperature cycle. It can meet the impact of short circuit fault current, ensured the safe and reliable operation of the communication base station system, and ensured the safety of operating personnel and electrical equipment. All characteristics, high corrosion resistance, long life, no need to be replaced, reduced the life cycle cost of grounding devices. When used in mountainous areas with inconvenient transportation, electricity and soil resistivity, no heavy equipment such as welding machines need to be removed. It was more convenient to lay down the excavation of the earth and rock and reduced the construction strength. And the installation process was simplified, which greatly reduced the installation time and reduced the construction cost, and had the incomparable advantages of other grounding devices. Finally, the application of graphite based flexible earthing in the project of Luoyang outdoor station in Henan branch of China iron tower in 2018 was briefly described. The results showed that the grounding body can meet the requirements of actual engineering under the harsh geological environment.

Key words graphite grounding body, non-metal grounding, corrosion resistant material, flexible graphite composite material, grounding device

接地是防雷的基础,防雷接地装置的接地是否良好,直接关系到防雷系统的防雷效果,而基站防雷接地网是保证通信网络畅通、人员和设备安全的重要环节^[1]。目前通信基站多建在郊区或山区,基站所处的地理环境以及站址所在地区土壤电阻率决定了接地电阻从几欧至几十欧不等(标准要求 $<5\Omega$),

要达到设计要求的接地电阻,必须有足够的接地网面积。传统接地线路接地网通常采用扁钢、圆钢、铜覆钢等接地材料,要降低接地电阻只有扩大接地网面积,导致青苗赔偿、土地征用等费用发生,且开支巨大,而且清障困难导致工期延误;采用金属接地材料运输难度大,施工过程中需要焊接、切割、防

作者简介:张艳(1977-),女,工程硕士,主要从事电力工程方面的研究。

联系人:张国锋(1987-),男,学士,主要从事石墨接地材料性能研究。

腐等工序,施工难度大,安装不方便,且易发生偷盗现象^[2-3]。

金属接地材料最大的瓶颈问题是接地材料的腐蚀,一般金属接地网运行 3~7 年后即发生严重腐蚀,造成接地网的接地电阻达不到系统安全运行的标准要求,而进行接地网改造施工,每次接地网改造施工需投入大量的材料费、机械费、人工费和青苗赔偿费等费用,增大开支^[4-5]。

由于重新铺设接地装置,需要进行开挖、恢复路面和绿化等工作,因此整个改造工程比新建接地装置增加了很多费用。钢接地材料之间的连接均为传统的电弧焊接方式,高温电弧会破坏接地体接头部位的镀锌层,出现点腐蚀现象,严重影响接地材料的寿命。此外,电弧焊接稍有不慎就会在焊接接头产生气孔、夹渣,出现焊接裂纹等焊接缺陷^[6]。

近两年来,柔性石墨接地缆绳是国内电力系统推出的新型接地材料,以柔性石墨为主要材质,抗腐蚀性能良好,且具有良好的柔韧性,运输方便;施工过程中省去了原先采用金属材质作为接地材料时需要的焊接、切割等复杂程序,与土壤有良好的浸润性,降低了接地电阻且对环境不造成污染。但在近期使用中发现,柔性石墨接地缆绳虽然解决了施工中焊接和切割等问题,但其内部的黄铜丝在不均匀的碱性土壤中腐蚀严重^[7],影响了其整体寿命;在实际安装中,其接头连接时,两圆柱状体之间的压接结合面有限,降低了接触面积,加大了接触电阻,影响了接地降阻效果,且其接头依然使用金属件压接,金属腐蚀后存在压接不紧的情况。

本研究主要从通信基站接地网现有接地材料存在易腐蚀、运输及施工困难、开挖受限、与土壤浸润性不好、易偷盗等技术难点出发,研制一种新型带状石墨基柔性接地材料,用于取代通信基站接地网现有的金属接地材料。

1 实验部分

1.1 材料

可膨胀石墨(碳含量 $\geq 99\%$, 80 目),乌兰察布大盛石墨新材料股份有限公司。

可膨胀石墨(灰分 $\leq 1\%$)通过高温膨化^[8]制备柔性石墨^[9],设定一定的辊压力,预压成型,再经过增大辊压力压制成柔性石墨纸,与无碱玻璃纤维以及一定固含量的压敏胶复合^[10],再经过辊压、热塑、复合、分切、捻线合股成型及旋转编织等工艺制备石墨基柔性接地体,并在其内加镂空不锈钢板。

1.2 石墨基柔性接地体的特点

(1)优良的导电性与冲击电流耐受特性。本研究所制石墨基柔性接地体呈带状,采用柔性石墨为主体材料,由柔性石墨线编织而成,导电性能优越。尤其适用于干旱、少雨的山区及高土壤电阻率地区。另外,由于材料准备过程中的高温膨化,使其内部结构具有较多的微观孔隙、较大的比表面积,孔径基本以中、大孔为主,从而具有极强的吸潮保湿作用,即使在干旱季节,也能够保持自身及周围土壤的相对湿润,因而能达到良好的降阻效果。同时,第三方检测机构检测报告显示,其在 200kA 冲击电流作用下电阻变化率小于 10%,能满足雷电流和短路故障电流的冲击。

(2)优良的耐腐蚀性能。石墨化学性质稳定,其在酸、碱、盐等土壤条件下的耐腐蚀性远优于金属接地材料。另外在接地体的生产过程中,配合多种导电防腐蚀手段及工艺,确保材料的防腐蚀性能,降低了接地装置的全寿命周期成本^[11]。

(3)长效性。常规的镀锌钢使用寿命一般为 3—7 年,而石墨基柔性接地体主要以非金属导电炭素材料编织成型,在土壤中不降解、不流失、不受雨水冲刷影响,同时石墨基柔性接地体内部还含有增加强度的玻璃纤维丝,材料性质稳定,使用寿命长,几乎无需维护。

(4)环保性。石墨基柔性接地体无毒、无污染,不生成其它有害物质,且对水资源、植被无影响,安全环保。

(5)运输及施工方便,与土壤浸润性好。石墨基柔性接地体具有柔性可弯、可折的特点,可以根据实际地形条件灵活选择施工方式,合理布置接地网形状,达到降低施工成本的目的。接地体可跟随土壤承受相同的蠕变,降低两者的空气间隙,以达到排出空气,降低接触电阻的目的。

(6)预防偷盗及人为破坏。石墨基柔性接地体无二次利用价值,可有效预防人为偷盗及破坏。

2 结果与讨论

2.1 耐酸碱腐蚀性能分析

腐蚀速率又称腐蚀率,通常表示单位时间的腐蚀程度平均值。常用方法有质量变化表示法、腐蚀深度表示法和机械强度表示法等 3 种。

本研究采用质量变化表示法来测量石墨基柔性接地体的腐蚀率,即通过单位时间单位面积上质量的变化来衡量腐蚀速度。将试品 k_1 称重,记 M_{11} ,

浸泡于 10% 硝酸溶液中; 试品 k_2 称重, 记 M_{21} , 浸泡于 40% 氢氧化钠溶液中, 15 天后, 取出试品 k_1 和 k_2 , 经去离子水清洗后自然晾干, 分别测量试品的质量 M_{12} 和 M_{22} , 按式(1)计算腐蚀率, 结果见表 1。

$$L = \frac{M_1 - M_2}{M_1} \times 36.5 \times 100\% \quad (1)$$

式中, L 为平均年表面腐蚀率, %; M_1 为试品实验前的质量, g; M_2 为试品在酸碱性溶液浸泡 15 天后自然晾干后的质量(清除腐蚀物), g。

表 1 耐酸碱腐蚀记录表

试品 编号	浸泡前质量/ g	浸泡溶液后质量/ g	平均年表面 腐蚀率/%
k_1	2544.653(M_{11})	2544.602(M_{12})	0.07
k_2	2547.218(M_{21})	2547.175(M_{22})	0.06
要求值			0.10

注: 表 1 数据由西安高压电气研究院责任公司, 国家绝缘子避雷器质量监督检验中心提供。

由表可知, 石墨基柔性接地体在酸碱溶液中的腐蚀率极低, 平均年表面腐蚀率 $\leq 0.07\%$, 防腐蚀特性优异, 这是因为其基体主要是膨胀石墨, 保留了石墨的大部分特性, 在石墨晶体中, 碳原子按正六角形排列于各个平面上, 在每一个平面上, 每一个碳原子都与其他碳原子以共价键相连接, 这种共价键是非常牢固的, 其他化学基团难以取代。因此, 石墨基柔性接地体用于通信基站接地, 能适应恶劣地质环境, 即使在盐碱地也保持优良的耐腐蚀性能。

2.2 热循环稳定性分析

采用电阻变化率(K)来考察石墨基柔性接地复合材料在热循环前后的性能变化情况, K 按式(2)计算:

$$K = \frac{R_1 - R_2}{R_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中, R_1 为试样循环前的电阻, $m\Omega$; R_2 为试样循环后的电阻, $m\Omega$ 。

2.2.1 高温耐受性能分析

选取 4 根 $40\text{mm} \times 5\text{mm}$ 带状接地材料, 分别于 200、300、400 和 450°C 下恒温保持 30min 后恢复至室温, 实验前后本体电阻及极限抗拉试验力测量结果见表 2。由表可知, 石墨基柔性接地材料在温度不高于 450°C 的环境下, 其机械性能及电气性能稳定, 老化现象不明显。石墨基柔性接地体在高温耐受实验过程中呈负温度特性。原因可能有两个方面: 一方面由于石墨晶体受热时, 价带上的电子激发跃迁到导带上, 自由电子的数量增加, 降低了石墨的

电阻率; 另一方面, 温度的升高加剧了晶格点阵热振动振幅, 一定程度上增大了自由电子的定向流动阻力, 使得石墨材料的电阻率增加。因此, 石墨电阻率的温度系数取决于电子激发作用于晶格热振动的主导地位, 从而表现为电阻变化温度系数的正负差异。因此, 石墨基柔性接地材料在升温过程中本体电阻呈下降趋势。

表 2 高温耐受性能实验结果

编号	温度/ $^\circ\text{C}$	电阻/ $m\Omega$		电阻 变化率/%	最大 拉力/ kN	断裂 伸长率/%
		前	后			
SP-1	200	50.5	51.8	2.57	3.96	13
SP-2	300	50.1	50.4	0.56	5.325	13
SP-3	400	53.9	52.4	-2.82	4.7	17
SP-4	450	54.6	54.4	-0.44	4.355	16

2.2.2 高低温热循环性能分析

选取 3 根 $40\text{mm} \times 5\text{mm}$ 带状接地材料, 同时启动高温试验箱和低温试验箱, 高温试验箱温度调至 100°C , 低温试验箱温度调至 -45°C , 待试验箱温度达到设定值后, 将其中两根试品(SP-6 和 SP-7)先放置于低温试验箱内, 保温 30min 后取出, 迅速放置于高温试验箱内, 保温 30min 后取出, 再迅速放置于低温试验箱内, 如此进行 5 个周期的高低温冲击循环实验, 结果见表 3。

表 3 高低温循环实验结果

编号	电阻/ $m\Omega$		电阻 变化率/%	最大 拉力/ kN	断裂 伸长率/%
	前	后			
SP-5	44.6	44.60	0	3.76	17
SP-6	47.0	46.84	-0.34	4.19	17
SP-7	46.7	46.92	0.47	4.34	18

由表可知, 高低温循环实验前后电阻变化率均小于 0.5% , 本体的极限抗拉试验力增大。这是因为一方面由于实验设备、量具及测量方法存在不确定度; 另一方面由于石墨基复合接地材料在高低温过程中造成的非弹性结构膨胀和冷缩使接地材料的致密性及石墨基体与骨架玻璃纤维的结合力略有改变, 从而在一定程度上影响了接地材料的极限抗拉性能。

2.3 短时大电流耐受性能分析

石墨基柔性接地体在实际应用时, 需要考虑短路故障产生的短时大电流的冲击作用。短路故障冲击作用时间往往为几十到几百毫秒, 主要与离短路

点最近的断路器的主继电保护装置动作时间及断路器分闸时间有关。

图 1 为短时大电流耐受实验回路原理图,其 SP 为石墨基柔性接地体试品,FC 为变频控制器,Tr 为励磁变频器,A 为电流表。电路发生短路时,故障点的阻抗很小,致使电流瞬时升高,接地体温度升高。实验时将定时器时间设定为 0.5s,电流表调整为峰值模式,点击启动按钮,之后记录峰值电流 I,根据公式 $k=U/I$ 计算出试品的伏安比 k ,逐渐加大电压和电流直至内部的镂空不锈钢板熔断为止,记录此时的电流值,再排除散热条件的影响,根据电功计算公式 $W=I^2Rt$,根据等值发热原理可以推算出加强型接地带 0.1s 最大工频耐受电流为 4282A。

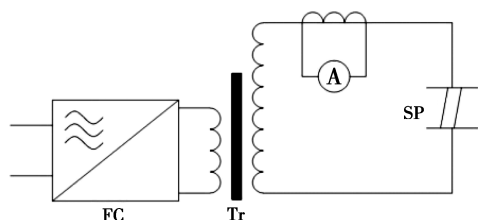


图 1 短时大电流耐受实验回路原理图

2.4 石墨基柔性接地体的降阻效果

在西安高压电器研究院进行材料自身性能实验,发现本材料电阻率为 $2.64 \times 10^{-5} \Omega \cdot m$,其降阻效果系数 ≤ 0.57 。虽然对金属体来说电阻率稍微偏高,但石墨基柔性接地体因是带状,相对于等效半径的圆形来说,与土壤的接触面积更大;且采用专用非金属夹具连接,连接时是面与面之间的接触,而圆形石墨接地材料连接时是圆柱之间的接触。所以,相对于圆形来说接触面积更大,降阻效果更明显;相比于金属接地体,石墨基柔性接地体的使用数量可减少到金属接地材料的 70% 以下,从而减少了青苗赔偿费用。

3 栾川大羊蹄沟羊圈隧道北通信基站应用实例

石墨基柔性接地体实际应用工程为中国铁塔 2018 年河南省分公司洛阳市室外站工程,选用 40m 三管塔塔型,三管塔基础跟开 6600mm,基础埋深 4680mm,机房建筑面积 4000mm × 3000mm,基础跟开 6600mm。根据《通信局(站)防雷与接地工程设计规范》GB 50689—2011 设计,本工程采用石墨基柔性接地体,接地体的埋设为垂直-水平混合式,因放射条件受限,接地网形状为“口”字形分布,在三管塔和机房四角分别打设 4 根 2.5m 深的铠装式柔

性石墨接地极,三管塔与机房通过三条石墨基柔性接地体连接,连接方式为(DMC)非金属压接连接,防雷接地装置见图 2。

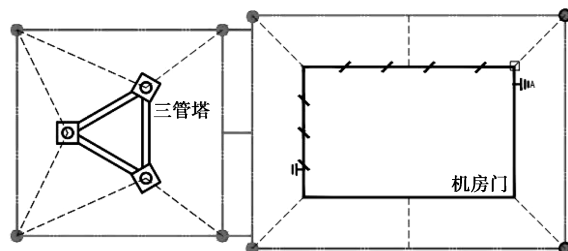


图 2 三管塔及机房防雷接地示意图

本基站始建于 2018 年 3 月,经现场勘测,该处通信基站地形属于山地。根据 GB/T 17949.1—2000 中土壤电阻率的测量标准,依据公式 $\rho=2\pi aR$ (其中, ρ 为测得的土壤电阻率, $\Omega \cdot m$, R 为测得的接地电阻, Ω , a 为电极之间的距离, m),测得该处的土壤电阻率为 $750 \Omega \cdot m$ 。依据《通信局(站)防雷与接地工程设计规范》GB 50689—2011,当土壤电阻率 $\rho < 1000 \Omega \cdot m$ 时,接地网工频接地电阻应 $< 10 \Omega$ 。当地地形及土壤分层地貌见图 3。



图 3 埋设点地形及土壤分层地貌图

3.1 石墨基柔性接地体的连接技术

传统金属接地体在施工时采用焊接、切割等工艺,施工难度大,工艺复杂,投入的人力费用突出。石墨基柔性接地体质量轻便,运输方便,连接时采用专用非金属夹具连接(图 4),通过楔子的挤压作用,使两根柔性石墨基接地带很好地连接在一起,杜绝了电焊和切割等繁重的施工工序,施工便捷,效率高。接续电阻测量按 GB/T 3048.4 规定的测量小

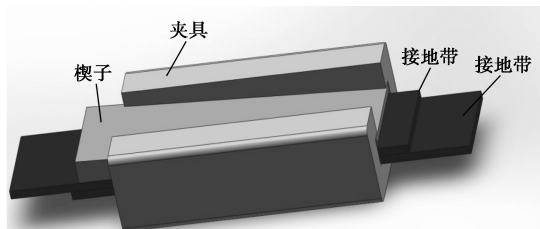


图 4 石墨基柔性接地体连接方式

电阻的要求进行,四极法接线方式测量其接续电阻数值 $\leq 4\text{m}\Omega$ 。

3.2 石墨基柔性引下线施工技术

柔性石墨引下线为经不同编织工艺编织而成的带状非金属材料(图5),该引下线能明显降低工频接地电阻和不受土壤中水分、盐、酸、碱等因素侵蚀,并且通过内加不锈钢板,外层有不锈钢编织层和绝缘热缩管,两头能够方便地连接塔腿和石墨基柔性接地体。

引下线一端连接埋入地下的主网,一端连接地面上的输电杆塔,当雷雨天气发生时,雷击电流先经过杆塔再经过接地引下线接地,接地引下线提供了雷电流泄流通路,避免了因雷击而发生线路跳闸事故。实际工程表明,接地网腐蚀最严重的部位是接地引下线上空气与土壤交界处,部分杆塔接地引下线甚至锈蚀断裂,不得不重新敷设地网,因此对接地引下线需特殊保护。本工程采用的引下线为不同编织工艺编织而成的带状非金属材料,非金属材料为石墨,导电性好,耐腐蚀性能优越。因此该引下线能明显降低工频接地电阻和不受土壤中水分、盐、酸、碱等因素侵蚀,通过内加不锈钢板,外层有不锈钢编织层和绝缘热缩管,不仅提高了引下线的拉伸强度,而且也大大提高了防盗性能。

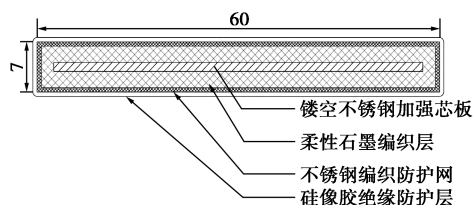


图5 铠装式柔性引下线横剖面示意图(单位 mm)

实际施工时,将石墨基柔性接地体沿三管塔塔基坑底部最外围埋设,并用素土回填100mm厚;沿机房基础梁外1500mm处开挖800mm深300mm宽的接地沟,将石墨基柔性接地体埋设其中,回填时要求均匀、密实;对三管塔三条腿和机房外伸的扁铁分别进行接地电阻测量,工频接地电阻值稳定在 2.59Ω ,降阻效果优异,满足《通信局(站)防雷与接地工程设计规范》GB 50689—2011的要求。

新建通信基站线路采用石墨基柔性接地体的实际应用表明,石墨基柔性接地体在极端土壤条件下能有效降低接地电阻,满足通信基站管塔接地网接地电阻的要求,且能有效预防接地体的腐蚀,因此石墨基柔性接地体能够广泛应用于通信基站线路,具

有实际接地工程应用价值。

4 结语

(1)通过耐腐蚀实验对石墨基柔性接地的耐腐蚀性进行测试,结果表明,石墨基柔性接地体具有天然耐腐蚀性,且耐腐蚀性优异,能够耐受强酸、强碱的侵蚀,平均年表面腐蚀率 $\leq 0.07\%$ 。

(2)石墨基柔性接地体中加入不锈钢板显著提高了接地体的短路电流冲击作用,并且在镂空不锈钢板熔断的情况下,接地体结构稳定。

(3)可膨胀石墨通过微孔束缚、氢键及表面吸附等作用保持了复合材料在温度控制过程中的机械和电气性能,表现出良好的长期使用性能,满足在通信接地系统中温度控制的要求。

(4)石墨基柔性接地材料在通信基站三管塔及机房线路接地工程的应用实例说明,新型接地材料深基坑大开挖及极端环境条件下能够满足实际工程的应用需求。

参考文献

- [1] 杨召绪,黄文高.移动通信基站的防雷地网综合设计[J].气象研究与应用,2006,27(s2):42-55.
- [2] 叶文彬.通信基站接地系统建设中存在的问题及解决方法[J].科技资讯,2009(27):9.
- [3] 吴坤君.移动通信基站接地问题研究[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2006,18(4):485-487.
- [4] 陆培钧,黄松波,豆朋,等.佛山地区变电站接地网腐蚀状况分析[J].高电压技术,2008,34(9):1996-1999.
- [5] 徐航,刘丽娟.变电站地网腐蚀原因分析及改进措施[J].科技致富向导,2011(23):183-183.
- [6] 卢威,陈娜,魏仕勇,等.电弧焊裂纹产生的原因分析及防止措施[J].热处理技术与装备,2016,37(2):71-74.
- [7] 孙成,李洪锡,张淑泉,等.LY11铝合金及H62黄铜的土壤腐蚀行为[J].腐蚀科学与防护技术,1999,11(3):152-155.
- [8] 盛晓颖,刘婷,张学俊,等.膨胀石墨的制备及性能[J].非金属矿,2010,1(1):49-51.
- [9] 康飞宇.柔性石墨的生产和发展[J].新型炭材料,1993(3):15-17.
- [10] 谢苏江,蔡仁良.纤维增强柔性石墨——橡胶密封材料的制备及性能研究[J].新型炭材料,1997(4):56-60.
- [11] 胡元潮,阮江军,龚若涵,等.柔性石墨复合接地材料及其在输电线路杆塔接地网中的应用[J].电网技术,2014,38(10):2851-2857.

收稿日期:2018-05-22

修稿日期:2018-07-02