DOI：10.13890/j.issn.1000-128X.2023.02.018　　文章编号：1000-128X(2023)02-0151-06

一种基于导电混凝土的接触网支柱基础接地方法

常占宁[1]，张一平[1]，余姝丹[2]，谢子宁[3]，卢伟楠[3]，程宏波[3]

（1.中国铁路兰州局集团有限公司，甘肃 兰州 730000；
2.南昌理工学院 电子与信息学院，江西 南昌 330044；
3.华东交通大学 电气与自动化工程学院，江西 南昌 330013）

摘　要：为解决高土壤电阻率地区牵引供电系统的接地问题，文章提出一种基于导电混凝土的接触网支柱基础自然接地方法。围绕机械强度和导电性能进行导电混凝土的配比优化，筛选出20%石墨+2.5%钢纤维的复合导电相材料；对导电混凝土接触网支柱基础自然接地方案和接地效果进行了分析，发现该方案的接地电阻降低了73.16%，将相邻的多个接触网支柱基础相连时，可满足牵引供电系统接地电阻的要求。对雷电冲击下导电混凝土支柱基础的电热特性进行了分析，发现导电混凝土接触网支柱基础在泄放雷电流时温升较小，内部温度分布均匀，不易受到结构应力的影响。文章所提基于导电混凝土的牵引供电系统接地方法，只需将施工时的浇筑材料由普通混凝土替换成导电混凝土即可，实施简单便捷，为高土壤电阻率地区电气化铁路的接地提供了一种新的方法。

关键词：牵引供电；接地电阻；导电混凝土；接触网；支柱基础

中图分类号：U225.4+2　　**文献标识码：**A

A grounding method of OCS pillar foundation based on conductive concrete

CHANG Zhanning[1], ZHANG Yiping[1], YU Shudan[2], XIE Zining[3], LU Weinan[3], CHENG Hongbo[3]

(1. China Railway Lanzhou Bureau Group Co., Ltd., Lanzhou, Gansu 730000, China;
2. School of Electronics and Information, Nanchang Institute of Technology, Nanchang, Jiangxi 330044, China;
3. School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang, Jiangxi 330013, China)

Abstract: A grounding method of OCS pillar foundation based on conductive concrete was proposed to solve the grounding problem of traction power supply system in areas with high soil resistivity. The proportioning of materials for conductive concrete was optimized from two aspects: mechanical strength and conductivity, and the composite conductive material composed of 20% graphite + 2.5% steel fiber was selected. By analyzing the natural grounding scheme and effect of conductive concrete OCS pillar foundation, it was found that scheme could reduce the grounding resistance by 73.16%. If the adjacent foundations were connected, it could meet the requirements of grounding resistance of traction power supply system. The electrothermal characteristics of conductive concrete foundation under lightning impulse were analyzed, and it was found that the temperature rise of conductive concrete OCS pillar foundation was small. The internal temperature distribution was uniform, and it was not easy to be affected by structural stress. The proposed grounding method of traction power supply system based on conductive concrete only needs to replace the ordinary concrete with conductive concrete during construction, which is simple and convenient to implement. It provides a new method for the grounding of electrified railway in areas with high soil resistivity.

Keywords: traction power supply; grounding resistance; conductive concrete; OCS; pillar foundation

---

基金项目：江西省自然科学基金项目（20212ACB204004）；江西省重点研发计划项目（2019BBH80005）
通信作者：常占宁（1971—），男，正高级工程师，主要从事铁路牵引供电系统的研究；E-mail: 2307079891@qq. com
引用格式：常占宁, 张一平, 余姝丹, 等. 一种基于导电混凝土的接触网支柱基础接地方法[J]. 机车电传动, 2023(2): 151-156.
Citation: CHANG Zhanning, ZHANG Yiping, YU Shudan, et al. A grounding method of OCS pillar foundation based on conductive concrete[J]. Electric Drive for Locomotives,2023(2): 151-156.

0 引言

随着我国铁路运输业的蓬勃发展，西部地区铁路网规模不断扩大，铁路线路走廊的可供选择范围越来越小，建设条件越来越恶劣。西部地区有较长的铁路线路通过贫瘠荒芜的沙漠戈壁地带，此类地区的土壤条件较差，很多地方的土壤以沙土、岩石为主，土壤中的导电离子和水的含量较低，电阻率非常高；同时，此类地区的建设条件往往较差，可供施工的范围受限，导致其线路的接地电阻较难达到建设标准的要求。

电力机车的速度快、功率高、供电电流大，因此对牵引供电系统的接地提出了更高要求[1]。接地效果不佳的系统将出现较高的过电压，进而对连接在接地系统上的智能电子设备产生干扰，而这些干扰可能会影响电子设备自身功能的实现，严重时还将导致拒动、误动的发生，影响铁路运输[2]。

目前常用的降阻方法有两种：一种是通过增大接地网络面积、增设垂直接地极、增加接地放射线长度[3]等手段来减小接地电阻，该方法建设成本高，且因施工困难地段存在大量坚硬岩石、陡坡峭壁，导致铺设大面积接地网和埋设大深度垂直接地极的施工难度大；另一种是化学降阻[4]，虽然化学方法可以在短时间内减小接地电阻，但容易对接地金属造成腐蚀，同时会对土壤产生较大污染，而我国西部地区有众多自然保护区，若使用化学降阻的方法则容易破坏当地生态环境。因此，包含西部戈壁沙漠在内的高土壤电阻率地区的接地问题成为我国铁路建设发展面临的重要问题。文献[5]分析了在戈壁沙漠的高土壤电阻率环境下，采用不同材料的接地导体、加长加密垂直接地体、局部换土、添加降阻剂等常用降阻措施的效果，发现上述常规方法在这种特殊环境下的降阻效果都不够理想。文献[6]针对高寒冻土地区的牵引供电接地系统进行了分析，认为在高寒冻土地区的系统其接地电阻阻值较难达到标准要求。因此，需要寻找更加有效的办法以实现此类特殊地段的牵引供电系统接地。

混凝土广泛应用于铁路施工，其价格低廉。通过添加一定量的导电组分可使混凝土形成具有导电性能的导电混凝土，目前该技术受到不少学者的关注。研究人员常通过在混凝土中掺入石墨来提升其导电性能[7]。石墨虽然能够提升混凝土的导电性能，但由于其良好的润滑性，掺入量过多会降低导电混凝土的强度，因此，加入了碳纤维作为掺料，在实现导电性能提升的同时保持较好的机械强度，但这种方法存在碳纤维成本较高的问题[8]。为取得较好的综合性能，研究人员采用多种材料组成的复合导电相材料来制备导电混凝土[9-10]。合适配比的钢纤维石墨基导电混凝土，其抗压强度高达 58.02 MPa[11]。文献[12]发现石墨含量为 5%~10%时，钢纤维的加入对导电混凝土强度的影响比较明显。以上这些研究提供了成熟的导电混凝土制备方法，并明确了采用合适配比的导电混凝土兼具良好的导电性能和机械强度，这为导电混凝土的应用奠定了基础[13]。

目前围绕基于导电混凝土的接触网支柱基础的研究较少。文献[14]针对碳纤维导电混凝土支柱基础，利用 CDEGS 软件搭建了电力高压输电线路杆塔接地系统的仿真模型，并对其工频接地电阻进行仿真计算，发现在地理环境较差的山区，采用导电混凝土杆塔基础来降低接地电阻是一种有效的方法。但牵引供电系统的接地要求、接地形式与高压输电线路存在较大区别，因此基于导电混凝土的接触网支柱基础接地的应用方式、应用效果还有待研究。

本文从对土壤电阻率高、西部地区接触网杆塔接地效果不好、施工环境恶劣等问题出发，采用接地分析软件 CDEGS 进行建模计算，结合具体工程环境、最新研究成果，对比多种方案下的接地系统的接地效果以及进行经济性的比对，提出一种在西部地区采用导电混凝土来降低杆塔接地电阻的优化方案。

1 采用导电混凝土的接触网支柱基础降阻原理

接地电阻是电流由接地装置流入大地，再经由大地流向另一接地体或向远处扩散所遇到的电阻，反映的是电气装置与大地接触的良好程度。计算接地体的接地电阻的简化公式为[6]

$$R=\frac{\rho}{4}\sqrt{\frac{\pi}{A}}+\frac{\rho}{H} \tag{1}$$

式中：R 为接地体的接地电阻，Ω；ρ 为杆塔所在土壤的电阻率，Ω·m；A 为接地体的面积，m^2；H 为接地体埋设深度，m。

由式(1)可知，影响接地体接地电阻的主要因素为土壤电阻率 ρ、接地体的面积 A 和埋设深度 H。在传统降阻工程中，降低接地电阻的主要方法有两种：一种为增大接地面积，另一种为增加埋设深度。在西部地区铁路沿线，戈壁覆盖层厚度较深，底层土壤电阻率较高，加深接地极埋设深度的效果不明显，且由于线路限制，直接加大接地网的面积受限。

本文的接地方法是在现有条件的基础上，通过增大牵引供电系统与地之间的等效接触面积来降低接地电阻。使用导电混凝土替换普通混凝土后，接地系统不再只是单纯依靠接地金属进行电流泄放，而是让整个支柱基础成为一个具有良好导电效果的接地体，从而在不铺设接地网和接地极的情况下，大幅增加牵引供电系统与土壤之间的直接接触面积，从而提升降阻效果。

2　导电混凝土接触网支柱基础接地方案

2.1　导电混凝土的机械强度及导电性能

牵引供电系统经由接触网支柱基础直接接地时，支柱基础除完成承受接触悬挂和支持装置负荷的传统功能之外，还需完成电流对地泄放功能，以此实现良好的接地，上述功能对支柱基础的机械强度和导电性能提出要求。

接触网支柱常用C30混凝土，为保证承载能力，所用导电混凝土的强度应不低于该标号混凝土的强度，即抗压强度不小于30.0 MPa，抗折强度不小于4.5 MPa。同时，考虑其导电性能，对于接地系统来说，导电混凝土的电阻率越低越好，但低电阻率可能导致成本增加，因此，需综合考虑机械强度、导电性能和经济性。

石墨具有良好的导电性能且价格便宜，因此在导电混凝土中较为常用。在混凝土中掺入石墨，可大幅提升导电性能，但随着石墨含量的增加，混凝土的机械强度也会降低。因此，可将石墨和钢纤维混合使用，利用石墨高导电性、低价格的优势和钢纤维导电、能增加强度的优点，实现混凝土导电性能的提升和机械强度要求的满足。

为测试不同导电相材料掺量下导电混凝土的导电性能和力学性能，进而确定最佳的导电混凝土制备方案，分别以石墨、不锈钢纤维、石墨+不锈钢纤维作为导电相材料，制备不同质量掺量的导电混凝土试样，并对其机械强度和导电性能进行测试。

不同材料掺量的导电混凝土的机械强度和导电性能曲线如图1、图2所示。由图1可知，随着石墨含量的增加，导电混凝土的电阻率降低，导电性能增强，机械强度降低。特别是石墨添加初始时导电性能的改善尤为明显，当石墨含量增加到20%之后，其导电性能基本趋于稳定，此时石墨含量的增加对导电性能的影响变得微乎其微。由图2可知，不锈钢纤维在改善混凝土导电性能的同时，还可增加其机械强度，当不锈钢纤维含量增加到2%之后，其导电性能基本趋于稳定，抗折强度的增加趋势也变得缓慢。

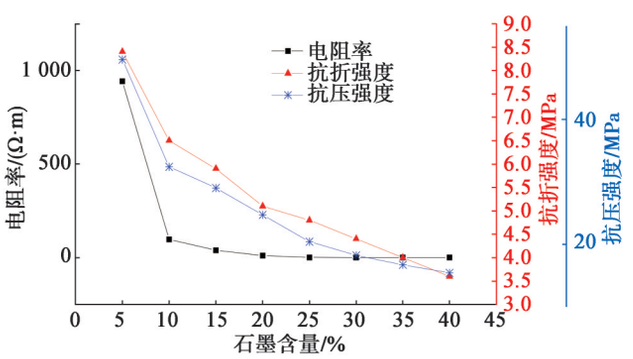


图1　不同石墨含量下导电性能及机械强度变化

Fig. 1　Changes of conductivity and mechanical strength under different graphite contents

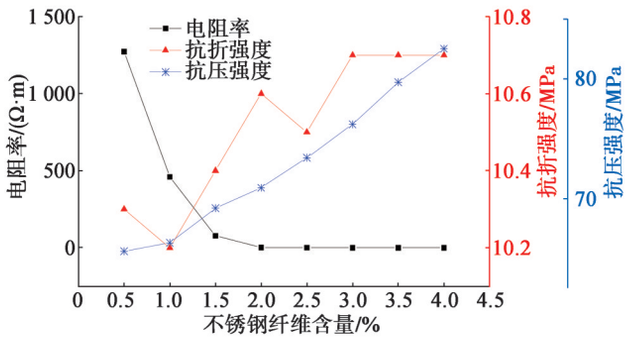


图2　不同不锈钢纤维含量下导电性能及机械强度变化

Fig. 2　Changes of conductivity and mechanical strength under different stainless steel fiber contents

根据上面的分析，分别在20%石墨含量的混凝土中添加不同含量的不锈钢纤维，在2%不锈钢纤维含量的混凝土中添加不同含量的石墨，所得的混合导电相材料的导电性能和机械强度如图3所示。由图3可知，20%石墨+2.5%不锈钢纤维所得复合相导电混凝土的导电性能和机械强度最好。

从图3可以看出，利用20%的石墨和2.5%的不锈钢纤维作为导电相材料所制备的导电混凝土的抗压强度为38.7 MPa，抗折强度为5.3 MPa，均高于C30混凝土的强度要求，同时其电阻率为0.12 Ω·m，可用于接触网支柱基础的施工，从而能在保证支柱基础强度的前提下，达到好的接地效果。

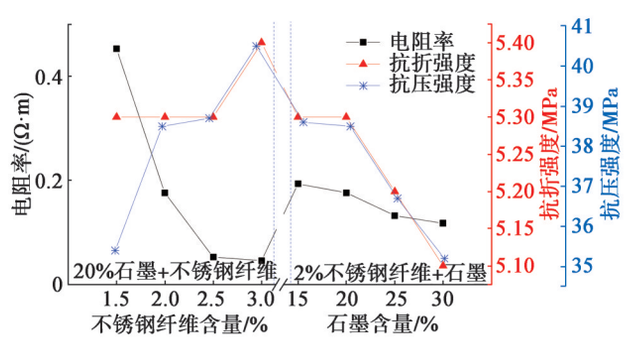


图3　石墨+不锈钢纤维复合导电相下导电性能及机械强度变化

Fig. 3　Changes of conductivity and mechanical strength of graphite + stainless steel fiber composite conductive phase

2.2　采用导电混凝土的接触网支柱基础接地方案

接触网支柱基础的作用主要是承受接触悬挂和支持装置负荷，当被用作自然接地时，除了承受强度负荷外，还需承受接地电流负荷并将电流传导至大地，因此，接触网支柱基础和土壤之间需要有良好的电流泄放通道。

利用导电混凝土替代普通混凝土浇筑接触网支柱基础时，导电混凝土和四周的土壤之间良好接触，由

于导电混凝土的电阻率低，入地电流可自由地向土壤泄散，因此，采用导电混凝土制备接触网支柱基础时无须额外增设接地极，也无须另行设计和增加额外的施工，只需采用导电混凝土，实施简单便捷。接地方案如图4所示。

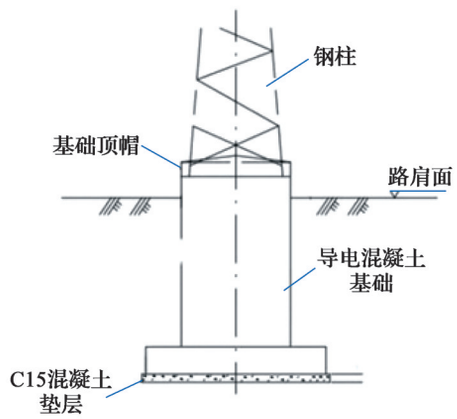


图4　采用导电混凝土的接触网支柱基础接地方案

Fig. 4　Grounding scheme of OCS pillar foundation with conductive concrete

与电力输电杆塔不同，接触网支柱沿铁路线路分布较为密集，两支柱间的间隔一般50 m左右，便于利用贯通地线将铁路沿线的接触网支柱基础连接起来。基于此，多个支柱基础可形成相互并联的“支柱基础–地”的电流泄放通道，从而有利于减小整体接地电阻。

3　导电混凝土接触网支柱基础接地效果分析

为验证导电混凝土支柱基础的接地效果，采用CDEGS软件建立导电混凝土接触网支柱基础的仿真模型，分析接地电阻的大小和地电位的分布情况。

根据接触网支柱基础的结构搭建的CDEGS仿真模型如图5所示，模型由两部分组成：一部分为支柱基础的结构钢筋，主要包括横筋和竖筋，用于增强承载能力，在通过支柱基础接地时也可用于泄放电流；另一部分为导电混凝土，胶结硬化后可用于泄放电流。

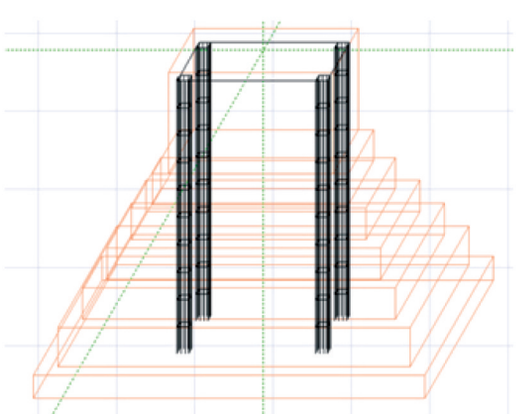


图5　导电混凝土支柱基础的接地模型

Fig. 5　Grounding model of conductive concrete pillar foundation

以实际接触网支柱基础为参考，模型中的材料参数设置如下：支柱基础中的钢笼采用环状闭环连接方式，钢笼中心之间横向间隔分别为1 770 mm和970 mm，纵向主筋采用直径24 mm的圆钢。支柱基础四周的土壤电阻率设为1 500 Ω·m，导电混凝土的电阻率设为0.12 Ω·m；为便于对比，分析了普通混凝土的接地效果，普通混凝土的电阻率设为15 000 Ω·m。

接地电阻是反映系统接地效果最直观的指标，而地电位的分布反映的是电流的扩散效果和接地系统周围的安全性。对仿真模型添加1 000 A的激励源，分析其接地电阻和地电位的情况如表1所示。

由表1可知，导电混凝土支柱基础的接地电阻由原来普通混凝土支柱基础的301.33 Ω降低到80.88 Ω，降低了73.16%，跨步电压降低了92.33%，说明导电混凝土支柱基础具有良好的泄导电流作用，可以产生较好的接地效果。该方案通过导电混凝土支柱基础实现了传统方案沿4个方向额外敷设4根12 m左右的水平接地极才可实现的接地电阻阻值，极大减少了工程施工量。

表1　导电混凝土支柱基础的接地效果

Table 1　Grounding effect of conductive concrete pillar foundation

项目	导电混凝土	普通混凝土
接地电阻/Ω	80.88	301.33
跨步电压最大值/V	15 793	206 038

将铁路沿线3个以上的接触网支柱基础连接起来，即可满足《铁路电力牵引供电设计规范》规定的高土壤电阻率地区接地电阻应小于30 Ω的要求。

4　导电混凝土接触网支柱基础的雷击热特征分布

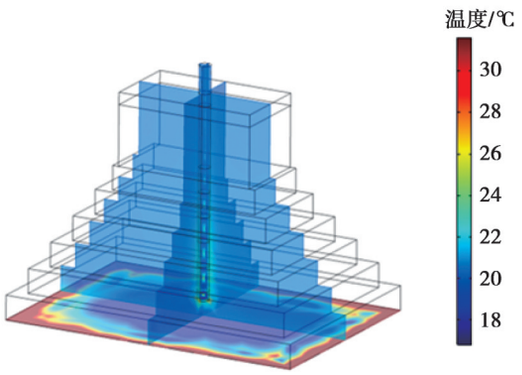
接触网支柱基础接地主要用于泄放接触网上的短路电流和雷击电流，避免对设备造成危害。由于雷击电流的破坏作用远大于短路电流，雷击电流的冲击将在接地的支柱基础中产生巨大的热量，热量的分布将在支柱基础内部产生梯度应力[15]，影响其工作状态和工作寿命，因此研究认识热特性分布具有重要意义。

利用多物理场耦合软件COMSOL建立电–热耦合下导电混凝土支柱基础的雷电流冲击模型如图6。根据工程实际，支柱基础的底层底板尺寸为5 000 mm×3 500 mm×400 mm，主柱尺寸为2 300 mm×1 300 mm×1 300 mm，取支柱基础的所有侧面及垫层底面的电势0 V作为电边界条件。电阻率设为0.12 Ω·m，导热系数为1.53 W/(m·K)，比热容为0.91 kJ/(kg·K)，密度为2 412 kg/m^3。仿真的时间步长设定为0.1 μs，雷电流采用双指数模型，具体如下：

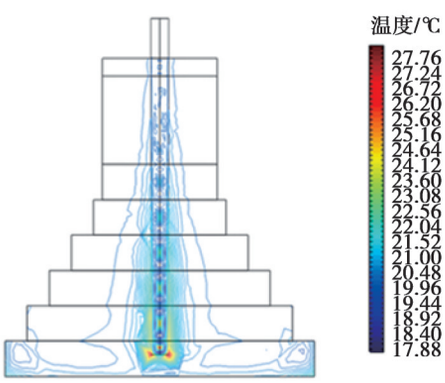
$$I(t)=\frac{I_0}{k_0}(e^{-\alpha t}-e^{-\beta t}) \tag{2}$$

式中：I_0为雷电流峰值，kA；k_0为电流峰值校正系数；α、β分别为电流衰减和上升时间常数（$\alpha=1/t_2$，$\beta=1/t_1$，t_1、t_2分别为波头、波尾时间常数，μs）。

本文选用30 kA峰值的雷击电流，t_1=8 μs，t_2 =20 μs，$\alpha=5\times10^4$，$\beta=1.25\times10^5$，k_0=0.429 184 6。在此雷电流作用下，支柱基础内的温度分布如图6和图7所示。



(a) 24 μs时的温度切面图

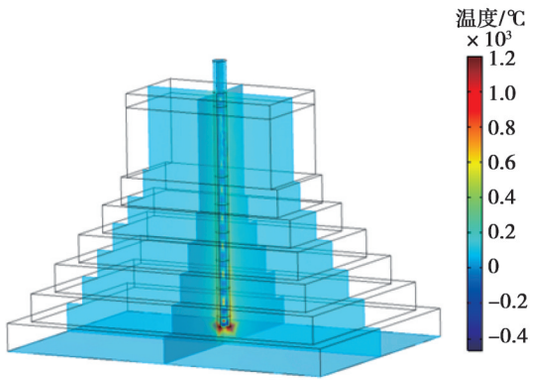


(b) 24 μs时的温度等值线图

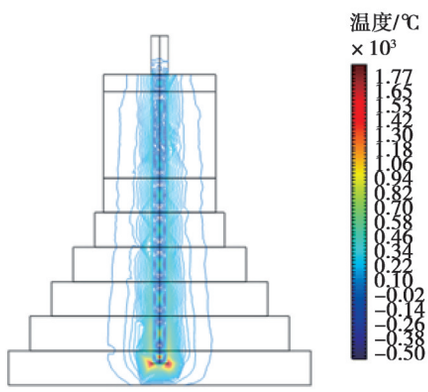
图6　导电混凝土支柱基础的温度分布情况

Fig. 6　Temperature distribution of conductive concrete pillar foundation

由图6和图7可知，普通混凝土导电性较差，而雷击时间极短，因此热量分布基本集中在导体周围来不及扩散，接地金属与混凝土接触面附近有明显的高温区域，支柱基础内的最高温度出现在金属极的下端面处；且支柱基础内的热量扩散范围小，混凝土内部温差较大，温度梯度大。导电混凝土具有良好的导电性能，可以把雷电流引导至大地，因此热量主要集中在支柱基础与土壤的下端面附近；且土壤的导热性好，热量扩散较快，因此导电混凝土内部的温升较小，温度分布更均匀，温度梯度很小。温度梯度大会使得支柱基础内部产生较大的应力，进而导致混凝土内部几何结构剧烈膨胀产生形变，影响支柱基础的使用寿命，因此采用导电混凝土的接触网支柱基础的使用寿命相对更长，经济性更好。



(a) 20 μs时的温度切面图



(b) 20 μs时的温度等值线图

图7　普通混凝土支柱基础的温度分布情况

Fig. 7　Temperature distribution of ordinary concrete pillar foundation

5　结论

本文分析了基于导电混凝土接触网支柱基础的牵引供电系统接地方法，得出如下结论：

①作为一种新型复合材料，导电混凝土既有普通混凝土的胶结功能，又有良好的导电性能，用于接触网支柱的基础可实现牵引供电系统的自然接地，无须另外设置接地网和接地极，在土壤电阻率高的戈壁和高原地区具有较好的应用前景。

②基于20%石墨+2.5%不锈钢纤维的复合导电相材料而制备的导电混凝土其机械强度可满足接触网支柱基础对强度的要求，同时具有良好的导电性能，用其浇筑的接触网支柱基础比普通混凝土支柱基础的接地电阻降低了73.16%，且将相邻多个导电混凝土支柱基础相连即可满足《铁路电力牵引供电设计规范》对接地电阻的要求。

③导电混凝土接触网支柱基础在遭受雷电冲击时内部温度较低，支柱基础内部温度分布均匀、温度梯度小，结构应力小，使用寿命相比普通混凝土更长。

参考文献：

[1]　冯江华, 张志学. 轨道电力牵引中高效友好的电能利用

[J]. 机车电传动, 2012(5): 5-9.
FENG Jianghua, ZHANG Zhixue. High-efficient and friendly energy utilization of rail electric traction[J]. Electric Drive for Locomotives, 2012(5): 5-9.

[2] 黄硕, 吴命利. 电气化铁路牵引供电系统可靠性评价系统研究[J]. 机车电传动, 2020(1): 85-90.
HUANG Shuo, WU Mingli. Evaluation of reliability for traction power supply system of electric railways[J]. Electric Drive for Locomotives, 2020(1): 85-90.

[3] 杨波, 陈宇燕, 陈明华. 基于CDEGS的变电站接地网接地电阻的仿真与研究[J]. 红水河, 2021, 40(4): 97-101.
YANG Bo, CHEN Yuyan, CHEN Minghua. Simulation and research on grounding resistance of substation grounding grid based on CDEGS[J]. Hongshui River, 2021, 40(4): 97-101.

[4] 陈高岩. 浅析新疆戈壁地区降低接地电阻的方法[J]. 科学技术创新, 2018(34): 19-20.
CHEN Gaoyan. Analysis of the method of reducing grounding resistance in the Gobi region of Xinjiang[J]. Scientific and Technological Innovation, 2018(34): 19-20.

[5] 丁峰. 戈壁沙漠地区牵引变电所接地电阻值探讨[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(12): 100-106.
DING Feng. Exploration on the grounding resistance reduction measures of traction substation in Gobi desert area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(12): 100-106.

[6] 丁峰. 高寒冻土地区牵引变电所接地系统设计探讨[J]. 铁道标准设计, 2012(11): 95-98.
DING Feng. Discussion on grounding system design of traction substation in severe cold and frozen soil area[J]. Railway Standard Design, 2012(11): 95-98.

[7] 史延田, 张俊才, 廉璟坤. 石墨导电混凝土的制备与性能[J]. 黑龙江科技大学学报, 2014, 24(5): 503-506.
SHI Yantian, ZHANG Juncai, LIAN Jingkun. Preparation and properties of graphite conductive concrete[J]. Journal of Heilongjiang University of Science and Technology, 2014, 24(5): 503-506.

[8] 程育林, 周迁, 刘宇彬, 等. 基于振动搅拌技术的碳纤维接地导电混凝土制备及性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2021(2): 61-64.
CHENG Yulin, ZHOU Qian, LIU Yubin, et al. Study on preparation and performance of carbon fiber grounded conductive concrete based on vibration mixing technology[J]. China Concrete and Cement Products, 2021(2): 61-64.

[9] 樊晓苓, 秦志桂, 毛仙鹤. 石墨导电混凝土在接地工程中的应用[J]. 建筑技术开发, 2011, 38(7): 30-32.
FAN Xiaoling, QIN Zhigui, MAO Xianhe. Application of graphite electrically conductive concrete in grounding engineering[J]. Building Technique Development, 2011, 38(7): 30-32.

[10] 方鹏, 贾永兵, 刘宇彬, 等. 雷电冲击下导电混凝土基础接地电阻及其安全性研究[J]. 湖南电力, 2021, 41(2): 15-19.
FANG Peng, JIA Yongbing, LIU Yubin, et al. Research on grounding resistance and its safety of conductive concrete foundation under lightning impact[J]. Hunan Electric Power, 2021, 41(2): 15-19.

[11] 陈洋臣. 钢纤维石墨导电混凝土电热性能及工程应用研究[D]. 广州: 广州大学, 2017.
CHEN Yangchen. Electrical-heating properties and engineering application of steel fiber graphite electric conductive concrete[D]. Guangzhou: Guangzhou University, 2017.

[12] 谭宏斌, 冯小明, 郭从盛, 等. 不锈钢纤维石墨导电混凝土的研究[J]. 混凝土, 2006(9): 35-37.
TAN Hongbin, FENG Xiaoming, GUO Congsheng, et al. Study on stainless steel fiber and graphite electrically conductive concrete[J]. Concrete, 2006(9): 35-37.

[13] 胡天文, 张佩浩, 黄贵涛, 等. 机场用碳纤维导电混凝土特性研究[J]. 中外公路, 2019, 39(1): 238-242.
HU Tianwen, ZHANG Peihao, HUANG Guitao, et al. Study on characteristics of carbon fiber conductive concrete in airport[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2019, 39(1): 238-242.

[14] 刘宇彬, 周伟, 李兴泽, 等. 导电混凝土技术对山区输电线路接地降阻作用研究[J]. 山东电力技术, 2020, 47(4): 33-38.
LIU Yubin, ZHOU Wei, LI Xingze, et al. Research on the effect of conductive concrete technology on ground resistance reduction of transmission lines in mountainous areas[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(4): 33-38.

[15] 惠胜达, 魏冲, 张鹏举. 关于雷电冲击电流对采用导电混凝土杆塔基础热稳定影响的计算[J]. 电瓷避雷器, 2021(1): 138-144.
HUI Shengda, WEI Chong, ZHANG Pengju. Calculation of influence of lightning impulse current on base thermal stability of conductive concrete towers[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(1): 138-144.

收稿日期：2021-11-18
修回日期：2022-09-10