

高精度瞬变电磁方法在运营隧道采空区的探测应用

胡 赟

(重庆渝蓉高速公路有限公司, 重庆市 401331)

摘 要: 进入 21 世纪以来,随着国家综合实力的提高,经济的迅速发展,便捷的交通是我国迅速发展的一个主要工作。逢山挖隧,遇水架桥,使得我国基建水平遥遥领先世界。然而,由于国内地域广阔,东西部地区地理位置相对悬殊,特别是西南区域由于地理位置较复杂,修建高速公路大多位于崇山峻岭中,使得工程建设难度较大,特别是一些超长隧道大多数隧道穿越溶洞、煤矿采空区、高浓度瓦斯区、岩爆以及富水区等复杂地质,给施工及后期运营养护带来了诸多的难题。在国内部分长隧道在运营过程中时常发生衬砌掉块、路面拱起、结构变形等危及行车安全的病害。以渝蓉高速巴岳山隧道为背景,通过采用 OCTEM 对隧道衬砌掉块区域背后煤矿采空区具体范围的探测,有效的解决了传统顺变电磁法由于受现场条件、地形、环境等影响,导致探测效果不理想的状况。

关键词: 高速公路;超长隧道;煤矿采空区;OCTEM

中图分类号: U446.1

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)10-0234-05

0 引 言

进入 21 世纪以来,随着我国综合实力的提升,国民经济进一步快速发展,工业技术逐渐增强,尤其是在基础建设领域,已经遥遥领先,位于世界前茅。伴随着我国交通强国的进一步实现,一大批的高速公路、高速铁路相继建成通车。

特别是在我国西南地区修建高速公路时,由于地形起伏较大、地形地貌复杂,在选线时为保证行车的安全和舒适性,往往诸多的高速公路都存在较高的桥隧比,甚至部分高速公路的桥隧比高达 80% 以上。然而尤其是部分高速公路特长隧道的施工过程中,会遇到各种不良的地质状况,如岩爆、涌水、高应力、瓦斯、煤炭采空区等。

目前国内针对隧道建设期不良地质灾害的调查,主要是采用钻探、物探以及变形测量等方法为主要探测手段。常用的物探方法主要有反射波法、地质雷达法、瞬变电磁法、直流电阻率法、激发极化法等。

煤炭采空区作为一种对隧道结构安全存在较大影响的不良地质现象,不仅在施工期对隧道安全存在影响,运营期同样存在一定的影响。

这主要是由于采空区地质条件复杂。矿石开采后,岩石失去原有的支护系统,导致地质平衡破坏,纵横向剧烈变化,岩层不再均匀分布。地震反射法基

于层状非均质地地质模型,适用于层状非均质地地质条件下的采空区探测。基于高频电磁波理论的探地雷达(GPR)是一种利用高频无线电波确定地下介质内部分布的地球物理方法。确定探测目标的埋深。由于探地雷达采用高频电磁波,根据表皮深度公式,最佳探测深度在 10 m 以下,特别是在覆盖层电阻率低的地质条件下,探测深度最小(通常为 2~5 m),对采空区的探测有很大限制。高密度电阻率法是探测岩溶、断层等采空区的最佳地质方法之一,但受场地条件限制。传统的瞬变电磁法在采空区探测中发挥着重要作用,但在初始阶段(过渡阶段),发射线圈和接收线圈之间存在耦合,导致探测不稳定。早期采集的探测数据造成了瞬变电磁探测的盲区,影响了浅层采空区的探测。

上述常规物探方法的不足之处和地质灾害调查过程中遇到的民房建筑、交通道路、复杂山体以及电磁干扰等因素制约这些物探方法的开展,有必要发展采空区探测新技术。等值反磁通瞬变电磁技术的出现,解决了传统瞬变电磁法中过渡过程的影响,消除了瞬变电磁探测盲区。高精度瞬变电磁法突破了高密度电阻率法、地质雷达以及浅层地震探测地质灾害技术瓶颈,有效解决了浅层煤炭采空区探测的技术问题。

1 探测原理

1.1 瞬变电磁法

瞬变电磁法属时间域电磁感应方法,其数学物理

收稿日期: 2022-06-09

作者简介: 胡赟(1993—),男,学士,工程师,从事隧道养护工作。

基础是基于导电介质在阶跃变化的场激发下引起涡流的问题。其测量的基本原理是:利用不接地回线发送一次脉冲磁场,即在发射的基本原理是:利用不接地回线发送一次脉冲磁场,即在发射回线上供一个电流波形,脉冲应该下降的瞬间,向地下传播的瞬变一次场。在该一次场的激励下,地下导体中将产生涡流。一次场消失后,这种涡流不会立即消失,它将有一个过渡过程。随之将产生一个衰变的电磁场(二次场)向地表传播;在地表用线圈或磁探头观测到的二闪场随时间变化,将反映地下导体的电性分布情况,不均匀体的赋存位置,形态和电性特征,见图 1。

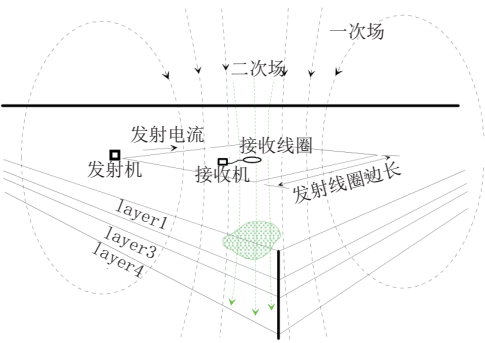


图 1 瞬变电磁法探测原理

瞬变电磁法测量系统主要由发射回线和接收回线两部分组成,工作过程主要分为发射、电磁感应和接收三部分,见图 2。

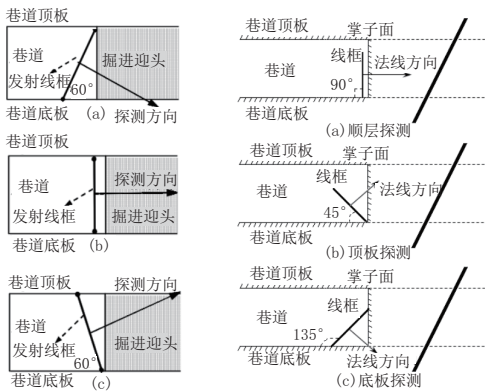


图 2 瞬变电磁法工作方式

由于传统的瞬变电磁发在浅层地质勘探存在一定的不足,致使部分区域不能准确探测,其次是由于抗电磁干扰能力不强,容易受电磁场的干扰等问题,使得对一些存在电磁干扰的浅层地质探测变得较为困难,近年来随着技术的进一步提升,采用等值反磁通瞬变电磁法原理研制的 HPTTEM 高精度瞬变电磁系统的出现很好的解决了这一问题。

1.2 等值反磁通瞬变电磁法

等值反磁通瞬变电磁法 (Opposing-coils tran-

sient electromagnetics 简写: OCTEM) 是采用上下两个相同且平行共轴的反向串联磁性源为发射源,其对地产生的磁场矢量叠加为一次场,接收天线位于上下磁性源等距共轴的水平面上,上下两个磁性源在接收水平面上产生的磁场具有等值反磁通特性,接收天线处于一次场零磁通面。在瞬态脉冲断电瞬间,近地表的磁场最强,感应涡流的极值圆环聚焦于近地表,随着关断间歇的延时,又产生新的涡流极值圆环,并逐渐向远离发射源的方向扩散,扩散速度和极值的衰减幅度与介质电阻率有关,随着衰减时间的增加探测深度增大,这种消除收发天线互感的聚焦瞬变电磁测深方法称为等值反磁通瞬变电磁法^[1-7],见图 3。

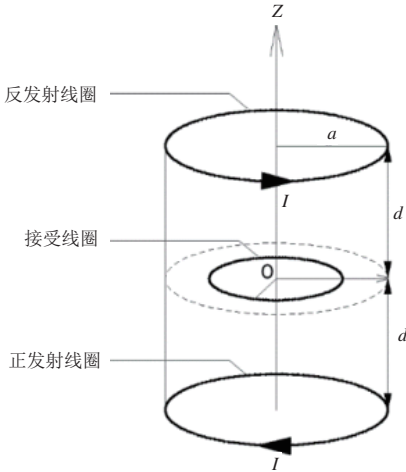


图 3 等值反磁通瞬变电磁装置示意图

2 工程实例

巴岳山隧道是国家高速 G5003 渝蓉高速重庆段一座特长隧道,为该线路重要控制性工程之一。隧道采用分离式设计,左、右洞轴线距离为 18.8~44.6 m,设计隧道建筑限界宽 16.25 m,限高 8.20 m。左、右洞纵断面设计为人字坡,左洞变坡点为 K33+214.248;右洞变坡点为 YK32+214.248。设计参数见表 1。

隧道自 2013 年 12 月份运营通车后多次发现混凝土衬砌表面存在超限裂缝、局部混凝土掉落等危机行车安全的病害。其中在 2014 年 9 月 4 日发现巴岳山隧道左线 K35+168 行车方向右侧衬砌出现由拱脚向上延伸至拱腰处的竖向裂缝,裂缝宽 10.00 mm,长 4.00 m,现场病害照片见图 4、图 5。

同年 11 月 15 日,右隧 YK35+268 处行车方向右侧衬砌也出现由拱脚向上延伸至拱腰处的竖向裂缝,裂缝宽 30.00 mm,长 6.00 m。

2015 年 6 月 29 日、2016 年 7 月 7 日、2016 年 7 月 15 日在左隧 ZK35+220 处、右线 YK35+268 处衬

表 1 巴岳山公路隧道设计相关参数

线路	进口桩号	进口路面标高 /m	出口桩号	出口路面标高 /m	隧道长度 /m	设计纵坡
左线	K32+065	342.11	K35+335	304.57	3270	K32+065~K33+214.248: 0.350% K33+288.055~ K35+300: -1.960%
右线	YK32+066.15	342.12	YK35+368.15	303.95	3302	YK32+066.15~YK32+214.248: 0.350% YK32+214.248~YK35+368.15: -1.960%



图 4 K35+168 段衬砌开裂



图 5 K35+168 段衬砌开裂处观测玻璃条断裂

砌均再次出现沿拱腰延伸至拱顶的竖向裂缝, 且存在混凝土局部掉块。具体见图 6、图 7。

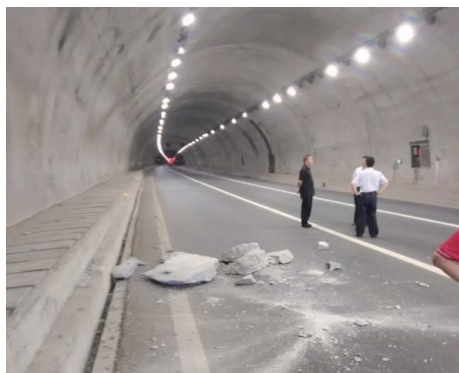


图 6 ZK35+220 左洞二衬混凝土掉块

因巴岳山隧道修建时穿越煤矿矿区范围, 且煤矿在 2013 年前后一年内对隧道下方的矿区存在采掘活动, 根据地表移动盆地的形成、地表移动盆地的特征、地表移动的影响因素、地表移动持续时间等因素综合分析, 隧道衬砌产生开裂、掉块的主要原因是煤矿地下开采活动造成地表沉陷和水平位移所致。为进一步查明 K34+900 ~ K35+600 隧道范围内采空



图 7 YK35+268 右洞二衬混凝土掉块

区的分布情况以及隧道洞身与煤层位置关系, 采用高精度瞬变电磁法进行探测^[10-12]。

3 探测方案

3.1 仪器设备

探测采用湖南五维地质科技有限公司生成的 HPTEM-18 型高精度瞬变电磁系统, 该系统运用等值反磁通法消除收发线圈之间的耦合; 利用对偶中心耦合原理提高横向分辨率; 采用统一标准的微线圈对偶磁源、高灵敏磁感应接收传感器、高速采集卡以及高密度测量技术实现浅层高精度瞬变电磁法勘探。

HPTEM-18 型高精度瞬变电磁系统由 HPTEM 天线、仪器主机、12V 外接电池和 PC 控制交互平台四个部分组成, 见图 8。系统参数与性能指标见表 2。



图 8 HPTEM-18 型高精度瞬变电磁系统

3.2 测线布置

HPTEM 测线按任务要求布置物探测线(见图 9):

表 2 系统参数与性能指标

天线技术指标	主机技术指标
①输入电源:12~12.5V; ②天线类型:收发一体反磁通天线,具备零互感特性; ②接收等效面积:165 m ² ; ③接收天线谐振频率不小于 220 kHz; ⑤工作温度:-40℃~+70℃; ⑥重量:19 kg; ⑦体积:直径 59 cm,高度 38 cm,场地适应性强; ⑧有效探测深度:250 m	①发送波形:占空比 50%的双极性方波; ②发送电压:12~12.5V; ④发送电流:9.5~11.5A; ⑤发送频率:0.1~250 Hz; ⑥发射基频:0.1、0.25、0.625、1、2.5、6.25、12.5、25、62.5、237.5 Hz; ⑥接收分辨率:24 位; ⑦接收采样率:625 kHz; ⑧时间道:最大 1 250 时间道; ⑨电源:内置 12 V 锂电池,工作时长 8~12 h

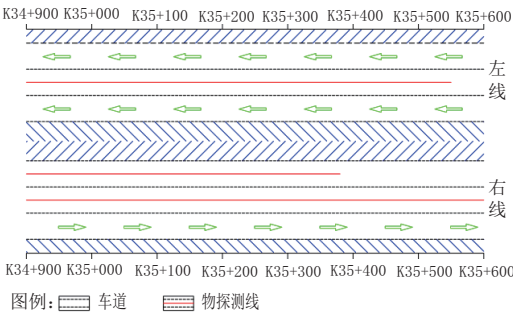


图 9 测线布置示意图

- (1)左隧道(中间行车道)K34+900~K35+550 段点距 5 m;
- (2)右隧道(中间行车道)YK34+900~YK35+600 段点距 10 m;
- (3)右隧道(超车道)YK34+900~YK35+380 段点距 10 m。

3.3 数据质量评价

在野外正式开展工作前要对测区进行试验工作:首先进行自检调平,然后再发送不同频率,进行数据观测。根据试验结果,选定工作参数。按照测深控制范围在 0~400 m 的原则,本次工作中采用的发射频率为 2.5 Hz,发射电流 10.2A,叠加次数 100 次。然后根据实测点与检查点制作衰减曲线对比图,见图 10。

图 10 中黑色线条为原始曲线,彩色线条为检查点曲线。由图 10 可见,除初期个别数据点外,检查点曲线与原始曲线基本重合。即在本段开展的 HPTEM 电磁测深数据采集是可靠的。

3.4 数据处理解释

(1)处理流程

针对 HPTEM 数据,采用 5DEM 数据处理系统对高精度瞬变法资料进行处理。在处理过程中,首先对野外数据进行剔飞值、去噪、静态校正及近场校正等处理,然后进行一维及二维反演成像,再计算出视电

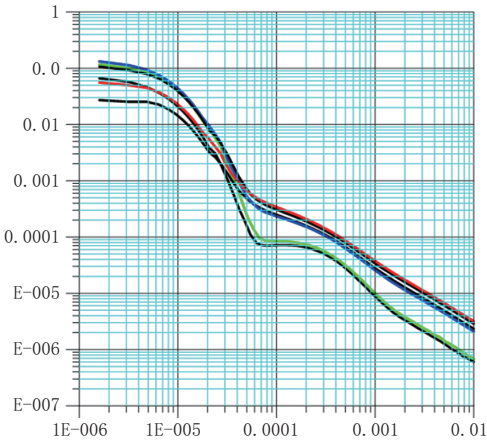


图 10 检查点曲线与原始曲线对比图

阻率,生成视电阻率断面图,具体操作流程见图 11。

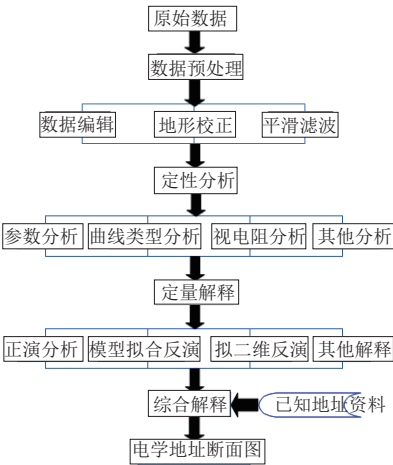


图 11 HPTEM 资料的处理解释流程

(2)全区视电阻率计算

从瞬变电磁场的传播过程来看,存在早期、晚期场之分,早期瞬变电磁场是内近地表的感应电流产生的,反映浅部电性分布;晚期瞬变电磁场主要是由深部的感应电流产生的,反映深部的电性分布。由于地磁场性质的不同,早期或者晚期定义之公式也不相同。常用的重叠回线装置若采用晚期场计算公式,会造成中早延时段视电阻率增大,产生很大误差,造成浅部勘探盲区很大,所以一般采用全区视电阻率的计算公式。

a. 早期视电阻率计算公式

$$\rho_r \left(\frac{\partial B_z}{\partial t} \right) = \frac{a^3}{3I_0} \frac{\partial B_z(t)}{\partial t}$$
$$\rho_r(B_z) = \frac{a^3}{3I_0} B_z$$

式中: a 为回线源接收半径; B_z 为磁场强度; I_0 为发射电流; $\frac{\partial B_z}{\partial t}$ 为感应瞬变值。

b. 晚期视电阻率计算公式

$$\rho_r \left(\frac{\partial B_z}{\partial t} \right) = \frac{\mu_0}{4\pi t} \left\{ \frac{2\pi I_0 a^2 \mu_0}{5t \left[\frac{\partial B_z(t)}{\partial t} \right]} \right\}^{2/3}$$

$$\rho_r(B_z) = \frac{\mu_0}{\pi t} \left[\frac{\pi I_0 a^2 \mu_0}{30 B_z(t)} \right]^{2/3}$$

式中: I_0 为电流; ρ 为均匀半空间电导率; a 为圆回线半径, 对于矩形回线, $a = \sqrt{L_1 L_2 / \pi}$; L_1 、 L_2 分别为矩形回线的边长; μ_0 为磁矩。经处理得到视电阻率后, 可以做出视电阻率断面等值线图, 根据图件结合地质资料进行解释^[13-14]。

3.5 结果资料解释

根据地质勘探资料巴岳山隧道的煤层主要为三叠系上须家河组 (T3xj5) 第五段的煤层与第三段 (T3xj3) 的煤层。两层煤均发育在泥岩、页岩中, 在分析中, 如果能找到低阻的泥岩和页岩层, 就可以确定煤层的位置。结合已知资料综合分析可得到煤层采空的范围; 根据岩性产状, 如有大面积垂直性低阻, 有可能为采空区后发生的岩层塌落。

从 HPTEM 视电阻率断面图可见, 向右倾斜的三处低阻, 推断为 T3xj3 的采空区, 用红色网格标注; 向右倾斜的较低阻, 推断为 T3xj3 的疑似采空区或者煤层, 用黑色实线和黑色网格标注; 以 K35+360 为中心的里程附近地, 基岩中局部有断开现象, 推测为煤层采空后引起的岩体塌落, 用红色线表示。

根据以上解释原则, 并结合隧道地勘资料, 对巴岳山隧道范围内的煤层、采空区及地层岩性做出了综合解释, 分别形成了隧道左、右线的物性地质断面图, 见图 12 ~ 图 14。

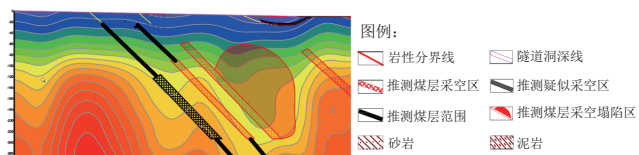


图 12 巴岳山左隧道 K34+900~K35+550 视电阻率断面图

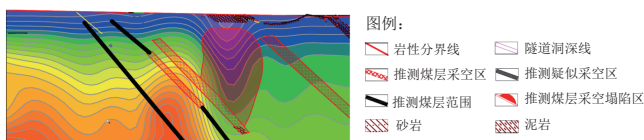


图 13 巴岳山右隧道 K35+050~K35+140 视电阻率断面图

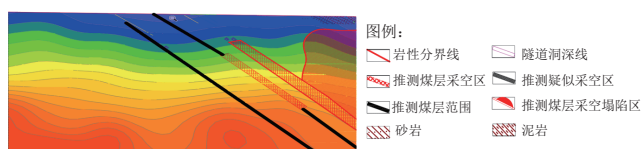


图 14 巴岳山右隧道 K35+050~K35+140 视电阻率断面图

根据电阻率断面图分析, 推断此断面上有处疑似采空区 (或煤层)、三处采空区; 以 35+360 为中心

的里程附近地, 基岩中局部有断开现象, 推测为煤层采空后引起的岩体塌落。

4 结论

4.1 结论

(1) 采用高精度瞬变电磁系统在运营隧道煤矿采空区位置的探测项目中, 取得良好的效果。

(2) 对运营隧道由于受现场条件的限值, 传统的物探方法施展起来存在一定的困难, 且探测效果也不是很理想。而高精度瞬变电磁系统由于设备体积小, 重量轻、便携方便等特点, 适合野外作业。其次采用微线圈收发一体天线、抗干扰能力强、系统分辨率高、能够很高的解决了统 TEM 法探测存在浅层盲区的难题, 有效的提高了探测精度^[6]。

(3) 由于物探技术属于无损检测, 在具体项目实施中应将采集成果结合钻探结果综合分析, 以便才能得到更为准确的勘探结果。本项目根据物探结果并结合钻孔验证, 结果显示采用 HPTEM-18 型高精度瞬变电磁系统探测结果与实际情况较为一致。

(4) 可用于其它类似项目的探测。

4.2 建议

由于采用 HPTEM-08 型高精度瞬变电磁系统进行作业一般都是在野外进行, 为保证数据的准确性, 在野外作业时做好如下措施:

(1) 野外探测过程中, 要将天线水平放置, 以便保证数据的有效性;

(2) 天线与仪器主机放置相距大于 4 m, 在保证连接线够长的情况, 距离尽量远;

(3) 天线与操作笔记本电脑保持 5 m 以上距离, 避免电脑对数据的干扰;

(4) 操作电脑与仪器主机在水平通视状态下, 距离不超 30 m;

(5) 现场人和动物远离天线, 传输线缆不缠绕或绕圈。

参考文献:

- [1] 李青, 周胜, 肖晓, 任政勇, 等. 基于等值反磁通瞬变电磁法的公路路基病害探测研究[J]. 工程地球物理学报, 2019, 16(1): 90-96.
- [2] 陈雪梅. 浅谈某矿床在找矿中物探技术的应用效果[J]. 新材料新装饰, 2014(8): 286.
- [3] 解康, 李星, 谢益民, 等. 高密度电法与瞬变电磁法在工程勘察中的应用和对比分析[J]. 云南冶金, 2018, 47(5): 89-92.
- [4] 周超, 乔汉青, 赵思为, 等. 浅层瞬变电磁法在地铁工程隐伏断层探测中的应用[J]. 工程勘察, 2018, 46(8): 74-85.
- [5] 吴嵩, 刘传逢, 张云霞. 非开挖施工管道探测方法研究[C]//2016 中

(下转第 241 页)

加大交通节能减排领域科研投入,提高行业科研人员待遇,加快研发成果转化,推动节能环保先进技术运用和新产品的推广应用,从源头上减少碳排放。

(2)加强技术改进,做好过程监管

严格落实交通行业准入机制,探索实施节能减排、环境治理第三方监管机制,借助第三方在技术、人才等方面的优势破解监管难题。加强交通行业运行状态在线监测,提升多维监测、精准管控、协同服务能力。

(3)加强数字赋能,做好效率提升

紧跟时代潮流,推进车路与智慧城市协同发展,鼓励无人驾驶、新能源汽车应用,构建综合交通大数据中心体系,实现系统运行效率最优。

3.4 细化工作举措,推动绿色低碳发展

(1)推动绿色交通基础设施建设

将绿色低碳理念贯穿交通基础设施规划、建设、运营、管理、维护的全过程,打造绿色交通基础设施体系,综合统筹运输路线、土地、空间等资源,加大资源整合力度,提高利用效率。充分开发利用地下空间资源和新能源,打造绿色出行全产业链,促进绿色低碳健康发展。

(2)凝聚社会共识

一方面,在行业准入方面,实行生命全周期低碳制度,构建一个完整的交通低碳战略体系;另一方面,探索实施碳普惠激励机制,建立个人碳资产银行,使用电动汽车或者公共交通出行的碳减量累积计入个人的碳资产银行,达到一定积分可兑换对应

的实体奖励,通过政策的正向激励,引导社会各界参与到低碳行动中来。

(3)加快转变发展方式

统筹好经济发展和绿色低碳的关系,坚决摒弃交通行业“先污染、后治理”“边污染、边治理”的传统模式、粗放方式,更加注重交通行业发展的质量和业态,不断优化交通运输、能源消耗、设备装置结构,促进交通行业绿色低碳、可持续、高质量发展。

4 结 语

“群之所为事无不成,众之所举也无不胜”。实现“双碳”目标并非一蹴而就,必须坚持系统观念,久久为功,善作善成。交通领域作为碳排放大户,对于“双碳”目标能圆满完成至关重要,必须深入贯彻落实习近平总书记关于交通工作的有关重点论述精神,进一步深化顶层设计、优化运输结构、强化科技创新、细化工作举措,积极探索建立最有效的统筹协调机制,加快形成整体联动、高效协作的强大合力,在实现“双碳”目标的征程中贡献交通力量。

参考文献:

- [1] 王慧.低碳经济背景下交通运输业发展研究[J].投资与创业,2019(3):236-237.
- [2] 胡敏.2020年《BP世界能源统计年鉴》正式发布[J].炼油技术与工程,2020,50(8):55.
- [3] 李慧明.绿色“一带一路”建设与中国在全球气候治理新形势下的国际责任[J].阅江学刊,2020(4):16-26.
- [4] 阙有俊.低碳公路交通运输体系发展研究[J].中国航务周刊,2021(10):56-57.
- [5] 郑锋.煤矿采空区对巴岳山隧道的影响评估与病害处治技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2017.
- [6] 周超,赵思为.等值反磁通瞬变电磁法在轨道交通勘探中的应用[J].工程地球物理学报,2018,15(1):60-64.
- [7] 杨彦成,郭君婷.煤田水文地质调查中电性源瞬变电磁法的应用[J].中国石油和化工标准与质量,2013,34(6):180.
- [8] 周楠楠,薛国强,陈卫营,等.铁矿采空区的地球物理探测[J].地球物理学进展,2011,26(2):669-674.
- [9] 李志华.铁路煤矿采空区综合物探技术研究[J].铁道工程学报,2014(10):26-31.
- [10] 刘士洋,高峰.采空区沉陷对运营隧道结构的影响[J].筑路机械与施工机械化,2019,36(2):102-109.
- [11] 孙浩轩,李培现,崔希民,等.巴岳山隧道受煤矿采动影响分析[J].现代隧道技术,2019,56(6):99-106,120.
- [12] 李杰强.瞬变电磁法(TEM)和高精度磁法在新疆某金矿勘探中的综合应用[J].新疆有色金属,2015,38(5):5-10.
- [13] 裴肖明,冯国瑞,戚庭野.瞬变电磁法探测复杂状态下煤矿充水采空区物理模拟实验[J].物探与化探,2021,45(4):1055-1064.

(上接第238页)

国(北京)国际地下管线大会暨中国城市规划协会地下管线专业委员会2016年年会,2016.