



引用格式:张彩亮, 张玉芳, 姜惠峰. 中国既有隧道下伏煤矿采空区问题研究现状及进展[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2575-2585.

Zhang Cailiang, Zhang Yufang, Jiang Hui-feng. Research status and progress of problems associated with coal mine goaf under existing tunnels in China[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2575-2585.

交通运输

中国既有隧道下伏煤矿采空区问题研究现状及进展

张彩亮¹, 张玉芳^{1,2}, 姜惠峰³

(1. 中国铁道科学研究院研究生部, 北京 100081; 2. 中国铁道科学研究院集团有限公司铁道建筑研究所, 北京 100081;
3. 中国铁道科学研究院集团有限公司标准计量研究所, 北京 100081)

摘要 随着国家交通建设的飞速发展,铁路、公路等线状工程中的隧道将不可避免地要穿越煤矿采空区。采空区上覆岩体的位移和变形直接影响既有隧道结构的整体稳定性,采空区沉降过大时,将导致隧道衬砌开裂、掉块、路面下沉,严重危及行车安全。现对目前隧道下伏煤矿采空区病害的研究进展进行综合评述,在回顾以往研究成果的基础上,对现有研究工作进行深入剖析,分析其存在的问题和局限性。基于当前的技术水平,结合工程实践,对既有隧道下伏采空区病害的探测手段、产生机理和治理方法进行技术展望。

关键词 铁路; 公路; 隧道; 采空区; 煤矿

中图法分类号 U452; 文献标志码 A

Research Status and Progress of Problems Associated with Coal Mine Goaf under Existing Tunnels in China

ZHANG Cai-liang¹, ZHANG Yu-fang^{1,2}, JIANG Hui-feng³

(1. Postgraduate Department, China Academy of Rail Sciences, Beijing 100081, China;
2. Railway Engineering Research Institute, China Academy of Rail Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China;
3. Standards & Metrology Research Institute, China Academy of Rail Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

[Abstract] With the rapid development of national traffic construction, tunnels in linear projects such as railway and highway will inevitably pass through the goaf. The displacement and deformation of the overlying rock mass in the goaf directly affect the overall stability of the existing tunnel structure. If the goaf settlement is too large, it will lead to the cracking of the tunnel lining, the falling of the block and the subsidence of the road surface, thus seriously endangering the traffic safety. A comprehensive review on the research progress of goaf diseases in coal mines under tunnels was made firstly, and an in-depth analysis of the existing research work was made on the basis of affirming the previous research results, then the existing problems and limitations were analyzed. Based on the current economic and technical level, combined with the engineering practice, a technical outlook on the detection means, generation mechanism, and treatment methods of the goaf diseases was made under existing tunnels.

[Keywords] railway; highway; tunnel; goaf; coal mine

既有道路下采煤最基本的要求是保证车辆的安全运营。中国是世界上煤炭资源最丰富的国家之一,煤炭资源储量大,种类齐全,在全国范围内广泛分布。煤炭资源开采引起的地表沉陷易导致出现建筑物(构筑物)开裂倒塌、改变局部水文地质分布等病害,给矿区基础设施建设留下大量安全隐患。作为中国传统能源的煤炭,在为中国经济持续发展提供可靠能源保障的同时,也产生了大量难以治理的采空区。现阶段中国煤炭采空区分布呈现

老采空区、小窑采空大量存在,新采空区和规划中的准采空区覆盖区域不断增加的态势,采空范围的扩大给矿区基础设施建设,尤其是铁路、公路等线状工程的建设造成严重威胁。根据公开数据显示,截至 2018 年底,中国铁路营业里程超过 13 万 km,投入运营的铁路隧道 15 117 座,总长 16 331 km^[1]。同时,得益于中国公路隧道建设的飞速发展,每年新增隧道里程超过 1 100 km,目前中国公路隧道的建设数量、规模、建设速度均居世界首位。据不完

收稿日期: 2020-06-24; 修订日期: 2020-09-02

第一作者: 张彩亮(1985—),男,汉族,河北石家庄人,博士研究生,工程师。研究方向:地质灾害防治及结构设计相关技术。E-mail: zhang-cailiang007@163.com

全统计,截至2019年8月,中国已建、在建、规划中的超长公路隧道总数24座^[2],超长隧道的全长均超过10 km。庞大的隧道数量和全疆域的空间覆盖范围决定了既有和待建隧道均不可避免地要穿越煤炭采空区。中国相关领域的专家、学者对采空区与隧道二者相互影响关系问题进行了一系列的研究,下面从以下几个方面介绍现阶段中国采空区隧道病害处治技术的应用与发展。

1 标准建设

中国在20世纪便认识到采空区的危害性,原铁道部、交通运输部、国家安全监管总局、国家煤矿安监局、国家能源局等部门,颁布实施了一系列行业规范、规程和细则,从国家层面对采空区病害的处治进行了指导和规范。

1.1 铁路隧道压煤开采

铁路压煤开采主要依据《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》规定的建筑物、水体、铁路,即俗称的“三下”采煤技术。“三下”采煤技术的研究历史最先可追溯到19世纪的国外对矿区教堂的保护^[3]。中国“三下”采煤技术的研究始于20世纪50年代,当时中外主要产煤国如中国、苏联、联邦德国、加拿大、波兰和英国等均对三下采煤技术进行了详细研究^[4]。经过60多年的不断实践与发展后,中国的“三下”采煤技术已实现由学习国外先进经验到逐渐形成中国特色的防治技术的转变,其中部分技术的发展已属世界先进,研究的最新成果为基于相关法律法规及规程编制的《建筑物水体铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范2017年版》^[5]。规程中明确了编写目的、适用范围、各方责任划分、适用的保护性开采方法如采取井下充填、地面加固维修、房柱或条带式开采等方面内容。

1.2 铁路隧道建设

国家铁路局2017年1月25日颁布实施的《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2016)中指出,应根据采空区年代、规模、分布范围、与隧道空间关系来评价采空区对隧道的影响程度,并明确应进行采空区处治的预设计。对施工中隧道应进行隐伏采空区的探测,评估其对隧道长期运营的影响,并对采空区段隧道的处治措施给出了设计建议^[6]。对隧道建设过程中瓦斯的治理和防治工作主要依据《铁路瓦斯隧道技术规范》(TB 10120—2019)进行^[7]。新建隧道及运营中发现采空区病害的既有隧道地段,在依据上述规范进行设计和治理前,并应先依据《铁路工程不良地质勘察规程》(TB 10027—2012)查明采空区的规模、范围、隧道病害成因,提

出处理措施,并编制相关勘察资料^[8]。

1.3 公路隧道建设

中国在高速公路建设中同样积累了大量的宝贵经验,结合国内研究成果,针对采空区的勘察、评价和治理方面的特点,编写和颁布了《采空区公路设计与施工技术细则》(JTGT D31—03—2011)^[9]。

上述标准的编制实施为中国建(构)筑物压煤开采,铁路和公路采空区隧道的勘察、设计、病害治理,提供了基本依据,在中国交通运输建设过程中发挥了重要的作用。

2 探测手段

采空区空间位置、范围、边界的确定对于采空区的工程建设和采空区病害治理具有重要意义。由于采空区地质力学条件的复杂性,仅依靠调查访问、既有采空区资料收集、工程地质测绘难以实现对采空区全面和正确的认知,因此常结合物探解译、钻探等勘察方法对上述采空区资料进行更深入的揭示。

物探技术在采空区的勘察工作中发挥了重要作用。在国外,除将物探技术用于采空区的探测外,还在解决废弃矿井陷洞危险性评价,矿区塌陷敏感性分析,废弃矿井巷道和考古工作中古隧道定位,甚至解决矿盘位置冲突引起的诉讼案件等类似工程背景的问题中得到拓展应用^[10-14]。

目前,中国采空区探测常用的物探方法主要有微重力法、放射性法、电磁法、高密度电法、微地震法、地质雷达法、三维激光扫描法等,另外针对地质条件复杂、物探结果呈现多解性的情况,还常采用综合物探法以提高探测精度。上述探测技术在中国的诸多工程项目中均有实践和应用。

2.1 微重力法

郇恒飞等^[15]为查明抚顺煤矿采空区的规模和实际分布范围情况,考虑到勘察区域位于城区存在机电和人文活动、地形地质条件复杂等不利因素,导致电磁法、电法、微地震法等常规物探手段受到局限的情况下,探讨了高精度重力测量方法在城市采空区中的评价作用。张旭等^[16]在研究辽源市区地下采空区分布时,因采空区大部分位于市区内导致无法采用交流电法、微地震法等探测手段,探测过程中选用了微重力法,并采用小子域滤波法进行场分离,然后采用边界识别和聚焦反演的解释方法,实现了采空区位置的确定。王延涛等^[17]在山西中南部铁路通道建设期间,需探明潞安北矿区内峪里、掩村村办小煤矿的采空盲区,但因受王庄煤矿、漳泽电厂、高压廊道影响地电信号干扰大,无法采

用电磁法; 工区距离长(治)邯(郸)高速公路较近, 受来往车辆和王庄煤矿采煤震动干扰, 同时考虑安全因素, 故无法选用微地震法; 项目最终选用仅受高精度地形测量及高精度微伽重力仪影响的微重力法查明了采空区边界, 并进行了现场钻探验证, 经分析, 采空区岩层移动变形规律与勘探成果相符合。

2.2 放射性法

苏彦丁等^[18]利用煤层采空后会导致氡气富集的原理, 采用氡气放射性异常探测法与瞬变电磁法相结合的探测手段, 揭示了山西省吕梁地区临县县城南某工作区采空区的范围。应用经验表明, 氡放射性测量法虽具有探测速度快、资料处理快、费用低的优势, 但其探测结果易受采空区形态、埋深、破碎带等因素影响, 应用中宜作为其他探测方法的辅助手段。张吉振等^[19]认识到小煤窑采空区因历史久远、分布不规律、缺乏可供参考的采空资料对铁路建设和运营威胁大的特点, 研究中采用不受电磁和车辆等因素干扰的测氡法, 并结合少量钻探资料, 确定了小煤窑采空区及其影响范围。该研究成果对解决类似工程问题具有示范和指导作用。刘敦旺等^[20]采用活性炭测氡法和瞬变电磁法相结合的勘察手段对吉交市南岩村山鑫煤矿采空区进行探测, 在证明活性炭测氡法探测煤矿采空区可行性的同时, 指出测氡法虽具有灵敏度高、精度高、抗干扰性强、探测深度大等优点, 但并不能确定产生采空的具体煤层和确定采空区的深度, 如要解决这两个问题则必须同时结合高分辨率电阻率法对采空区进行共同探测。

2.3 瞬变电磁法

徐晓培^[21]为调查山西某煤矿采空区的分布及积水情况, 选用瞬变电磁勘探法进行勘探, 通过对采集数据的整理分析, 查明了采空区范围及积水情况, 并采用钻探对勘察成果进行验证, 证明瞬变电磁勘探法在解决该类问题时具有高效和高精度的优点。孙英峰等^[22]采用瞬变电磁法探测兼并重组整合矿井采空区的方法, 在物探工作开展前, 按基本均匀分布的原则完成了勘探区背景场的测量和调查, 并采用瞬变电磁法分别对通合 2 号煤层工业广场和生产区的采空区进行了探测, 探测数据解译结果表明, 上述二者分别存在 3 处和 8 处采空异常区。王鹏^[23]在认识到将瞬变电磁法应用于埋深小于 50 m 的超浅层采空区时会存在最小深度极限及其导致异常响应等问题, 为论证瞬变电磁法应用于超浅层采空区时的可行性, 以陕北某煤矿为例, 采用与现场监测相结合的方法进行深入研究。经过

钻探验证后的研究结果表明, 瞬变电磁法最小探测深度以外的 K 型地电断面结构能被准确反映, 依据电性标志层特征变化圈定的采空区与钻探结果一致, 该方法可用于探测超浅层采空区, 但最小探测深度极限等技术细节还有待深入研究。

2.4 高密度电法

刘国勇等^[24]调查贵州省六盘水市某煤矿采空区的分布及积水情况, 采用高密度电法进行勘探, 并结合数值模型对采空区的不同填充类型进行分析, 上述二者为高密度电法勘探数据精确解释提供了有效的理论参考。张建强等^[25]为研究内蒙乌海高压供电线路上的小煤窑采空区的分布, 选用高密度电阻率法进行探测, 并对解决该类问题时的观测布置、资料处理和地质解释的基本原则进行说明。探测结果显示对 50 号塔基稳定性产生影响的根源为东北方向 14 号煤层的开采, 并依据该探测结果对塔基的加固处理给出了建议, 论证了高密度电阻率法对探测采空区的有效性。牟义等^[26]为研究浅埋深采空区高密度电阻率法精细探测体系, 以已知采空区分布的鄂尔多斯范家村煤矿为工程背景, 采用分布式高密度电阻率法进行参数优化试验和采空区识别特征研究。研究结果表明, 浅埋深采空区高密度电阻率法精细探测体系对浅埋采空区的探测效果较好。

2.5 微地震法

廉洁等^[27]为查明义马矿区煤层分布及小煤矿采空区位置, 采用槽波地震透射法与反射法对上述煤层条件下的槽波响应进行分析研究。试验结果表明, 槽波地震勘探技术可以准确预测工作面内煤厚变化及确定采空区边界, 同时, 槽波地震透射法与反射法相较于地面地震的方法, 勘测结果的精度和可信度更高。金磊等^[28]考虑到为确保宝日希勒露天矿南帮安全生产, 常规探测手段探测小窑采空区 70% 的准确率已无法满足安全生产的要求, 为提高探测准确率, 提出了井地地震技术。该技术对中国现代化大型露天煤矿的小窑采空区探测提供了一种实用的创新手段, 并在该矿南帮进行了实验验证。苑昊等^[29]认识到现有基于静态时间地震数据的三维地震勘探技术只能定性确定采空区位置, 无法准确圈定采空区的边界和塌陷范围。为了解决这一问题, 利用地下煤层不断开采后的地震反射特征会随之改变的特点与油藏开采过程非常类似的现象, 借鉴现代油气藏动态监测方法中的四维地震勘探技术, 提出了采用四维地震探测方法的煤矿采空区识别方法, 实践证明依据该方法对淮南煤田张集煤矿的地震特征解译可以识别和定量圈定采空范围。

2.6 地质雷达法

王雪涛^[30]在乌东煤矿综放工作面顶板及采空区探测过程中应用地质雷达探测技术,准确探测了采煤工作面0~40 m范围顶板垮冒及采空区的充填情况。李东亮等^[31]认识到地质雷达是一种快速、高效的物探方法,但其探测距离受地质雷达功率和地质条件影响;探测精度则受限于地质雷达主频,主频越大分辨率越高,高频电磁波对水的穿透能力极弱。为充分掌握ZTR 12矿用地质雷达在晋城矿区的适用性,选取了多个矿井进行试用。结果表明,数据反演时采用0.16 m/ns计算精度较高。地质雷达主频分别选用50 MHz和200 MHz时,对应的分辨率分别为2 m和0.6 m异常体,探测距离应分别保持在50 m和24 m内。刘阳^[32]研究了采用探地雷达技术对隐伏采空区目标进行提取的理论,建立了用于分析不同填充条件下采空区的反射和成像特征的采空区正演模型,研究成果为实际工程中的应用提供了重要依据。

2.7 三维激光扫描法

邱建龙等^[33]采用新型三维激光扫描技术对河北省某民采矿山的采空区进行探测,与传统物探技术相比,三维激光扫描技术可实现快速、安全、远距离动态探测,同时三维扫描获得的轮廓数据为后期导入FLAC^{3D}、MIDAS/GTS等数值模拟软件中生成采空区三维模型,进行稳定性计算奠定了基础。王瑞等^[34]为解决传统探测技术难以准确计算采空区体积的技术难题,采用三维激光扫描技术建立采空区的数值模型,理论模型与实际充填量对比计算误差仅3.6%,该方法为采场充填体设计提供了依据。丁鑫品等^[35]采用CALS钻孔式三维激光扫描仪对平朔矿区安家岭露天煤矿和东露天煤矿地下采空区进行探测,与传统物探技术相比,三维激光扫描技术的探测资料更为详尽,可测绘出采空腔体的埋深、形状、走向、面积等参数,提高勘探效率,节约生产成本。

2.8 综合物探法

薛国强等^[36]对近年来常用的煤矿采空区探测技术如地震法、瞬变电磁法、高密度电法、微动法、放射性法和探地雷达法等地球物理方法的发展进行了概括,同时指出由于煤层开采年代常难以确定及地质条件的复杂性,需要根据不同地球物理方法的有效性选择勘探手段,必要时需要采用综合地球物理方法探测,以提高采空区探测的准确性。陈都等^[37]以内蒙古包头至陕西神木县的大柳塔的铁路沿线采空区探测工程为例,在应用瞬变电磁法对该矿区进行初步圈定的基础上,采用共偏移距法、反射波法、天然源面波法以及人工源面波法4种探测

方法结合的综合物探技术进行勘测,实际工作效果证明上述综合探测技术在该煤矿采空区的探测中非常适用,能够比较精确定位采空区的范围。于国明等^[38]在解决某大厂区因煤层采空区充水,引起坡体蠕滑,导致主厂房产生严重的断裂变形问题时,采用高精度微重力法、瞬变电磁法、人工地震法等相结合的综合物探技术对坡体下埋深150~300 m、厚2~3 m的深部煤层采空区的范围和边界及地下水情况进行探测,探测成果为治理坡体蠕滑变形提供了可靠依据。

2.9 物探原理及使用条件

根据上述最新研究成果,对各种物探技术的探测原理和适用条件进行总结,如表1所示。

表1 物探技术汇总及主要特点

Table 1 Summary and main characteristics of geophysical prospecting technology

方法	原理	适用条件
微重力法	地下采空区与围岩之间存在质量变化,在地面上引起重力效应	探测深度大,特别适合岩溶山岭隧道、机电和人文活动较多的城市采空区勘察;仅受限于高精度地形测量及高精度微伽重力仪的影响 ^[15-17]
放射性法	煤层采空后会导致氡气富集	探测深度大、速度快,不受地磁、电磁影响,抗干扰能力强;适用于上覆岩层存在破碎带、裂隙及断层的情况。缺点是无法准确定位煤层采空区和探测采空区积水情况;一般作为其他方法的辅助方法使用 ^[18-20]
电磁法	地体质电阻率的不同	埋深≤500 m,中等深度采空区;可三维空间定位采空区的平面分布和埋深信息,探测地层深部水体,应用前景广 ^[21-23]
高密度电法	煤矿体与采空区电阻率差异	埋深≤100 m,地形起伏小的较浅采空区 ^[24-26]
微地震法	各个地层之间的弹性差异	适用于近地表浅层采空区的探测 ^[27-29]
地质雷达法	高频电磁波在地下传播过程中,遇到采空区时,会产生反射并返回地面	适用于近地表浅层采空区,比地震波分辨率更高 ^[30-32]
三维激光扫描法	可直接测绘采空区空间位置信息和空间形态参数,数据处理后建立三维数值模型	测量速度快、精度高;数字化,自动化水平高;受光学元件本身精度、环境温度、被测物体表面特征影响 ^[33-35, 39]

3 机理分析

目前,对采空区隧道病害产生的机理研究主要包括两方面内容。一方面,常采用数值模拟和室内试验的方法,通过考虑采空区与隧道的空间位置关系,例如距离、隧道下伏煤层倾角等影响因素,来认识采空区隧道病害发生发展过程;另一方面,利用相关理论和探测成果确立采空区稳定性评价方法。

中国工程技术人员针对上述工作开展了大量研究和工程实践。

3.1 数值模拟与室内试验研究

李剑波等^[40]结合某隧道工程实例,采用有限元软件对高速公路隧道穿过采空区时二者的相互影响问题进行深入分析,得出隧道施工对采空区顶板局部应力分布有较大影响,但对采空区顶板整体稳定性影响不大的结论,并根据计算结果得出确保二者稳定性的最小安全距离。符亚鹏等^[41]以达州—万州高速公路天坪寨隧道为工程背景,采用有限元软件针对不同倾角的下伏薄煤层采空区公路隧道施工问题展开研究,得出下伏采空区对隧道洞周位移、初期支护内力、围岩塑性区的分布影响较大,特别是当倾角减小,洞周位移、隧道拱顶轴力均增大,塑性区范围缩小,对隧道开挖稳定性影响不利的结论。方勇等^[42]为研究近接双煤层采空区下隧道开挖引起的冒落带叠加问题,基于第二相似定理建立室内模型试验,试验结果揭示了上述工况施工时采空区地层移动及隧道初期支护内力的分布规律,为评估该类隧道开挖对采空区地层稳定性的影响提供了一种试验模拟手段。张志祥等^[43]针对交通荷载作用下既有隧道下伏采空区的重新“活化”问题,根据实际隧道工程地质条件采用相似定理建立室内模型,总结该类工况下采空区覆岩移动及地表残余变形规律,并参考相关标准进行稳定性评价。Fang 等^[44]采用缩尺模型对临近上覆采空薄煤层的隧道施工对围岩扰动后隧道结构的稳定性问题进行了研究,模型考虑了不同垮落带距离和煤层倾角的影响,试验结果表明垮落带距离对水平煤层的垂向压力影响较大,倾角对倾斜煤层侧压力影响较大。Fang 等^[45]为了研究采空区围岩的变形趋于稳定后,因附近隧道开挖而活化的问题,以关斗山双隧道为例,建立了考虑不同空间尺度效应的老采空区下穿隧道一系列模型试验,研究了采空区对隧道衬砌的受力性能的影响,研究中将不同塌落带-隧道距离和埋深作为重要影响因素,为采用试验手段研究隧道下穿采空区问题提供了重要参考。

刘书斌等^[46]采用 FLAC^{3D}数值分析软件,对小

净距隧道近接下穿 0° 、 15° 、 25° 、 40° 5 种不同倾角薄煤层采空区开挖引起的采空区塌陷问题展开研究,研究结果表明采空区倾角会导致地层产生偏压,该种情况下小净距隧道的开挖易引起采空区塌落,通过先行洞中间断面洞周位移、初期支护内力的数值结果分析,得出采空区地层、后行洞开挖对先行洞初期支护稳定性产生影响的规律。

3.2 稳定性评价方法研究

孔德民等^[47]以山西省张家湾 2 号隧道采空区的勘察治理为例,对于大型煤矿长壁式机械化综采形成的新采空区,依据《矿山开采沉陷学》中的剩余变形预计法,对老采空区依据《采空区公路设计与施工技术细则》(JTG/T D31—03—2011),采用力平衡分析法中的巷道临界采深法,划分采空区冒落带、裂隙带的范围定量地评价了采空区对隧道稳定性的影响。王树仁等^[48]在研究青岛—银川高速公路康家沟大桥与庙梁隧道下伏康家沟煤矿采空区时,为确保隧道工程安全,基于 MIDAS/GTS 有限元程序构建了 FLAC 三维计算模型,对施工过程中地表沉陷盆地特征、地层-隧道初衬结构相互作用等进行了数值模拟分析,并对隧道初衬结构关键部位的变形和受力进行了预测分析。姜绍祖等^[49]通过调查获取基本参数后,采用 ANSYS 有限元分析软件模拟铁路隧道下伏煤层开采后顶板岩体的应力、位移和破坏特征,采用概率积分法预测采空区范围的地表变形、移动,两种结果相互验证后综合评价采空区的稳定性。韩宪军等^[50]在研究下伏采空区新建铁路隧道问题时,认识到隧道围岩的稳定性与地下采空区存在相互作用关系。针对某实际工程,采用 FLAC^{3D}软件建立拟建隧道与下伏采空区三维模型,分析结果表明,下伏采空区对隧道拱顶位置围岩竖向沉降量及水平应力有显著影响。Li 等^[51]针对既有巴岳山隧道受煤矿采动沉陷影响产生严重开裂问题,为评价采空区对隧道现在及其将来稳定性的影响,采用概率积分法对隧道变形和沉降进行了计算,证明 PIM 经验函数法可用于评价地下采煤引起的隧道径向变形。Guo 等^[52]为研究废弃采空区上方高速公路的失稳风险,以模糊理论为基础建立了风险评价模型。为提高评价模型的可靠性和准确度,采用灰色关联分析法对风险评价因子的权重展开研究,并将德尔菲法和建立隶属函数分别用于确定定性和定量因子的隶属度。所建模型在乌云高速公路建设中得到成功应用,两年多的监测结果间接验证了稳定评价结果和路基处理方法的可靠性。

3.3 小结

上述研究虽然增进了人们对于采空区隧道病

害产生机理的认识,确立采空区稳定性评价的基本方法,但相关成果系统性不强,鲜见有将区域工程地质条件、采空区形成历史、地表位移及裂缝展布规律和隧道病害相结合,进行系统性研究的报道^[53]。研究过程中虽然形成了大量的研究成果,但研究过程数据难以直接为病害治理过程中的既有隧道的安全运营提供实时监测和预警信息。

4 治理方法

目前,中国在采空区铁路、公路隧道病害的治理工作方面,取得不少科研成果,并积累了一定的工程经验。采空区采取的处治措施主要包括充填法、注浆法、回填法、跨越法、水诱导沉陷法等,其中对于既有隧道病害的治理仍以注浆法最为常用。

4.1 铁路隧道下伏采空区病害治理

杨征等^[54]以晋煤铁路专用线枣园隧道下伏采空区治理工程为例,在保证隧道运行安全前提下,对注浆充填法施工过程中出现的问题进行深入分析,并提出相应的处理方法,为既有隧道下伏采空区的处治提供成功经验。金鑫光等^[55]分析了采空区对铁路隧道工程的危害,针对晋城市王坡煤矿柏树底隧道下伏规模大小不等、开采时间各异、自然跨落顶板管理方式的6个煤矿采空区,结合隧道下伏采空区的环境和工程地质条件,选用全充填压力注浆的采空区的处治措施,并给出了注浆质量的检验方法。

4.2 公路隧道下伏采空区病害治理

Zhang 等^[56]认识到高速公路经过采空区时二者存在相互作用关系,采用有限元方法对高速公路建成后采空区的应力和变形特征进行研究,并建立了二维有限元模型,研究结果指出高速公路下采空区的变形尚未完成,必须采取相应的治理措施。吴永全^[57]指出对于随意穿越采空区的公路隧道工程,采空区处治措施选定的关键因素是采空区与隧道的空间位置关系,其根据两者的位置关系将采空区分为4类,分别为上位式采空区、侧位式采空区、下位式采空区、重叠式采空区。苟德明等^[58]针对当前按照《采空区公路设计与施工技术细则》进行下伏小煤窑采空区高速公路隧道施工风险治理费用高、施工难度大、治理范围保守的问题。采用数值模拟方法对鱼洞I号隧道洞内注浆的整治效果进行分析,分析和实践结果表明,相较于地表注浆,该措施可控制隧道结构变形,减小整治费用和施工难度。李昌龙等^[59]基于广东省韶关市芙蓉隧道工程,采用MSC-MARC 数值分析软件对采空区段隧道按照不处理、加强隧洞围岩、采空区加强三种处治方案进

行对比分析,最终优选的加强措施为采空区区域40 m左右。

5 既有隧道采空区病害研究不足

中国隧道下伏煤矿采空区病害的研究多集中于新建隧道,虽然取得了显著的成果,但尚未形成系统性的理论,尤其对于既有线隧道下伏采空区病害的研究更是鲜有报道。一方面,既有铁路、公路隧道病害的治理,尤其是正线铁路常有确保正常通车的要求,施工天窗点时间短,现场作业要求高,使病害调查、现场踏勘、病害治理的难度成倍提高。另一方面,既有隧道病害的治理过程常要求为正常通车提供预警信息。但现有隧道监测技术如衬砌应力监测,隧道洞内CPⅢ控制网测量;矿区地表沉陷监测手段如光电仪器测量法、GNSS 测量法、INSAR法等^[60-62],均无法实现预警实时或达到精确性的要求。

既有隧道采空区病害的治理方面。中国对既有隧道采空区病害的治理仍以注浆法为主^[52-53],但治理理念有两种。一种是采用各种探测手段,结合相关资料,查明病害产生的原因。明确病害产生的机理是由新采区采动、老采区活化、复杂山岭隧道山体滑坡或其他原因引起的,然后对症下药进行治理。该种方法更科学规范,但勘察治理周期长,病害彻底治理周期长,需2年以上;另一种方法是对于时间紧迫抢险保通类项目,根据初步踏勘成果分析病害原因,借鉴以往类似工程经验,采取措施进行临时抢救性治理。该类方法作为一种应急处置手段虽可获得一定的治理效果,但选用的临时治理方案主观性高,一般仅作为临时性工程考虑。

6 结论及展望

6.1 结论

煤炭采空区对隧道的影响涉及区域工程地质和水文地质情况、隧道的设计方法和施工工法,隧道工程质量管理和隧道下伏煤矿的开采方法、安全煤柱留设方法、开采范围的大小、有无私挖偷采现象等诸多因素的,其中各因素相互影响,病害生成机理复杂。但随着采空区对隧道建设影响的研究不断深入,目前对采空区在建隧道正在形成可靠的探测手段、分析和试验方法,但对既有隧道病害研究相对较少。常规的研究方法是通过物探确定疑似采空区位置后,科学布设孔位开展工程钻探,通过岩芯揭示采空区地层分布情况。根据钻探结果,验证疑似采空区位置,并对所采岩芯进行力学试验。根据岩性资料和采空区空间位置,利用数值分

析软件分析采空区对隧道的大致影响范围和规律,为病害处理决策提供依据。其中按照相似原理考虑各种影响因素而设计的室内模型试验也得到不断改进和发展。上述探测手段分析和试验方法已被业界广为认可,在隧道采空区病害的探测和治理的应用中取得了相当的工程经验,为认识采空区病害的产生机理提供了必要的技术手段。另外关于采空区隧道建设已形成一系列标准可供工程技术人员选用。

6.2 展望

近年来,随着社会经济的不断发展,煤炭作为传统能源,为人类提供便利的同时,也带来大量的采空区问题。随着大规模开采的进行,采空区对建筑物的不利影响问题日益凸显。

6.2.1 建立健全法律法规

捷克学者 David 等^[63]在研究捷克上西里西亚煤盆地卡尔维纳地区地下煤矿开采引起的地面沉降对教堂的影响时曾发现,位于捷克东北部矿业城市卡尔维纳郊区的阿尔坎塔拉圣彼得教堂,经历 2 个世纪后的最大沉降量高达 37 m,最大竖向倾斜值为 6°47'。教堂原位于一座小山上,墓地位于山下谷底中,但是因地表沉降,目前教堂地面标高已低于墓地标高。由此可见,煤矿开采引起的地面沉降在特定地质条件下引起的地表变化是非常剧烈的。

美国在 20 世纪 80 年代便认识到采空引起地面沉降问题是一个重要的环境问题,同时指出沉降对环境的影响可能是物理的、经济的或心理的,在极端情况下还可能是灾难性的。美国政府基于此进行了采矿有关沉降问题的立法建设^[64]。

对于地面建筑来说,不均匀沉降对建筑的危害一般要大于均匀沉降,以捷克圣彼得教堂为例,教堂宽 12 m、高 17.5 m,教堂 200 年内沉降 37 m 后,最高点偏离垂直线 2.09 m,其建筑用钢带分层加固、基础经注浆加固后,至今仍耸立于地表^[60]。但对于线状地下工程来说,基本上不存在某区间段的均匀沉降,因此该类工程经过煤矿采空区影响范围时,一旦发生沉降,常易超过构筑物抵抗变形的阈值,继而会产生难以修复的病害。

因此在展开采空区隧道病害监控、预警及治理技术研究的同时,根据采空区建筑物的重要性及产生病害后治理的难易程度,制订专门的法律法规以规范煤炭企业、隧道参建各方和运营单位的正常生产和使用维护行为是非常有必要的。

6.2.2 新的探测手段

既有隧道下伏采空区病害的治理过程中常要求保障正常的通车条件,常规简化计算、室内试验

或数值仿真分析虽然可以帮助技术人员正确认识采空区岩土体的变形规律,为病害的治理提供重要的理论依据,但是依赖上述方法的过程数据难以帮助既有线隧道提供实时安全监测的灾害预警信息。此外,由于受复杂工程地质条件的影响,隧道周围深部岩土体位移兼具不确定和突发性的特点,工程技术人员凭借既有监测手段对于采空区病害的治理往往具有滞后性,尤其对于是否正常通车的重大决策难以提供直接技术资料,正常运行的通车风险难以量化,交通中断与否的决策常带有主观性。然而,正常通车又以严苛的安全保障为前提,因此在既有线下伏采空区病害的治理中,为获得直接有效的预警信息,对隧道周围深部岩土体的变形及位移辅以安全监测手段十分必要。一方面实时监测可以为正常通车提供预警保障,另一方面可通过监测数据分析掌握采空区隧道周围岩土体的变形和位移规律,为病害的科学处治提供依据。

通过布设高精度位移传感器对既有隧道周围深部岩土体位移进行实时监测,以获取直接可靠的预警信息必将是未来该研究领域的一个具有重大现实意义的新课题。目前,中国基于阵列式位移传感器的深部位移监测技术在深基坑和边坡工程中得到应用,并收获了良好的效果^[65-66],现阶段已尝试将该技术应用于既有铁路隧道监测预警中。

6.2.3 新设计理念和治理方法

未来采空区隧道病害的治理不能仅着眼于灾后的治理,除在选线阶段尽量绕避不良地质区域,加强隧道周边煤矿开采的监管力度外,可根据采空区变形特征,适当提高隧道基础的自适应能力。例如 Liu 等^[67]在研究位于山区地下煤矿开采区的山西省 1 000 kV 特高压输电线路基础时,采用 FLAC^{3D} 数值模拟软件研究了采空区对输电塔基础稳定的影响问题。研究指出塔基变形主要受采煤影响,受岩石边坡滑动的影响不大。并基于研究结果,对塔式基础设计和构造进行改进,监测数据表明改造后的基础可保证矿区输电塔的安全和稳定性,收获了良好的技术效果。上述理念可供铁路、公路隧道工程设计人员借鉴,即在线路无法绕避采空区时,可通过隧道设计阶段的调整,主动提高构筑物适应不良地质条件的能力。

对于采空区病害治理常采用的注浆法,虽然现阶段的治理效果显著,但是当用于大理深隧道病害的治理时,若采用地表注浆法,不但注浆量耗费大,而且注浆范围不易控制,效费比偏低。目前一种多次分段控制注浆技术被应用于边坡加固工程中并取得了成功,其可以根据地层钻探情况控制注浆实

现对软弱岩土体精确定位加固^[68],该类技术可在既有隧道采空区加固中进行推广应用,特别是对于隧洞内因行车无施工条件采用地表注浆时,该方法在控制注浆位置和范围方面具有明显的技术优势,开展类似精确定位加固技术在采空区病害治理方面的应用性研究工作具有重要现实意义。但注浆加固技术的应用效果,一方面受限于待加固区域的岩土体性质;另一方面该类型注浆加固机理的研究匮乏,注浆方法和范围的控制及注浆后效果的评价,也缺少可供借鉴的先例。

6.2.4 信息化

既有隧道与新建隧道下伏采空区病害采空区的治理存在共性,但又具有明显差异,尤其对于需要保证正常通车运营的线路,除安全性要求更严格外,常需要根据监测情况提供预警功能。监测预警数据具有种类多、数量大、处理过程繁杂的特点。未来建立综合信息平台,将所有监测数据均实时上传,实现病害隧道实时监控预警,一键式生成监测报告,将会是未来研究的重点方向。

参 考 文 献

- [1] 赵 勇,田四明. 截至2018年底中国铁路隧道情况统计[J]. 隧道建设, 2019, 39(2): 324-335.
Zhao Yong, Tian Siming. Statistics of railway tunnels in China as of end of 2018[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(2): 324-335.
- [2] 罗 刚. 中国10 km以上超长公路隧道统计[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(8): 1380-1383.
Luo Gang. Statistics of extra-long highway tunnels over 10 km in China[J]. Tunnel Construction, 2019, 39(8): 1380-1383.
- [3] 姚金鑫,李夕兵,周子龙.“三下”矿体开采研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005(S1): 1073-1075.
Yao Jinxin, Li Xibing, Zhou Zilong. Study of the excavation for the under-three-objects ore body[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2005(S1): 1073-1075.
- [4] 毋存粮,叶雨山,杨利民,等. 下伏采空区道路建筑技术研究与应用[M]. 北京:科学出版社, 2018.
Wu Cunliang, Ye Yushan, Yang Limin, et al. Research and application of road construction technology in the underlying goaf[M]. Beijing: Science Press, 2018.
- [5] 国家安全监管总局,国家煤矿安监局,国家能源局,国家铁路局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[S]. 北京:煤炭工业出版社, 2017.
State Administration of Work Safety, National Coal Mine Safety Administration, National Energy Administration, Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for coal pillar reservation and pressure coal mining of buildings, water bodies, railways and main shafts [S]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2017.
- [6] 国家铁路局. 铁路隧道设计规范: TB 10003—2016[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2018.
National Railway Administration of the People's Republic of China. Code for design of railway tunnel: TB 10003—2016[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2018.
- [7] 国家铁路局. 铁路瓦斯隧道技术规范: TB 10120—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Technical code for railway tunnel with gas: TB 10120—2019[S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.
- [8] 中华人民共和国铁道部. 铁路工程不良地质勘察规程: TB 10027—2012[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2019.
Ministry of Railways of the People's Republic of China. Code for unfavorable geological condition investigation of railway engineering: TB 10027—2012 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2019.
- [9] 中华人民共和国交通运输部. 采空区公路设计与施工技术细则: JTGT D31—03—2011[S]. 北京: 人民交通出版社, 2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Guidelines for design and construction of highway engineering in the mined-out area: JTGT D31—03—2011[S]. Beijing: China Communications Press, 2011.
- [10] Kotyrba, Andrzej K. Sinkhole hazard assessment in the area of abandoned mining shaft basing on microgravity survey and modelling: Case study from the Upper Silesia Coal Basin in Poland[J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 130: 62-70.
- [11] Martínez-Moreno F J, Galindo-Zaldívar L, González-Castillo, et al. Collapse susceptibility map in abandoned mining areas by microgravity survey: a case study in Candado hill (Málaga, southern Spain) [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 130: 101-109.
- [12] Banham S G, Pringle J K. Geophysical and intrusive site investigations to detect an abandoned coal-mine access shaft, Apedale, Staffordshire, UK[J]. Near Surface Geophysics, 2011, 9(5): 483-496.
- [13] Orfanos C, Apostolopoulos G. 2D-3D resistivity and microgravity measurements for the detection of an ancient tunnel in the Lavrion area, Greece [J]. Near Surface Geophysics, 2011, 9(5): 449-457.
- [14] Abdullah K, Tayfun S, Mehmet F I. Detecting the footprint of a longwall mine panel claimed to infringe on a permit boundary at the Soma-Darkale coalfield (Manisa, Turkey) using surface fractures and microgravity measurements [J]. Environmental Earth Sciences, 2013, 70(4): 1895-1902.
- [15] 邹恒飞,高 铁,赵海卿,等. 高精度重力测量在抚顺煤矿采空区探测中的应用[J]. 煤田地质与勘探, 2019, 47(6): 194-200.
Huan Hengfei, Gao Tie, Zhao Haiqing, et al. Application of high precision gravity survey in detecting mined-out areas of Fushun coal mine [J]. Coal Geology & Exploration, 2019, 47(6): 194-200.
- [16] 张 旭,杜晓娟,苏 超,等. 辽源煤矿采空区重力异常解释研究[J]. 工程地球物理学报, 2015, 12(6): 755-759.
Zhang Xu, Du Xiaojuan, Su Chao, et al. Gravity anomaly interpretation of mined-out area in Liaoyuan coal[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 2015, 12(6): 755-759.
- [17] 王延涛,潘瑞林. 微重力法在采空区勘查中的应用[J]. 物探与化探, 2012, 36(S1): 61-64.
Wang Yantao, Pan Ruilin. Application of micro-gravity method in

- survey of goaf [J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2012, 36(S1): 61-64.
- [18] 苏彦丁, 李淑燕, 李建国. 氡气放射性测量在煤矿采空区探测中的应用[J]. 中国煤炭地质, 2015, 27(10): 70-75.
Su Yanding, Li Shuyan, Li Jianguo. Application of Radon radioactivity measurement in coalmine gob area detection[J]. Coal Geology of China, 2015, 27(10): 70-75.
- [19] 张吉振, 王 银, 唐海敏, 等. 测氡法在小煤窑采空区勘察中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(10): 21-25.
Zhang Jizhen, Wang Yin, Tang Haimin, et al. Research on application of Radon measurement in detection of small coal pit goaf [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(10): 21-25.
- [20] 刘敦旺, 刘鸿福, 张新军. 活性炭测氡法在煤矿采空区探测中的应用[J]. 勘探地球物理进展, 2009, 32(3): 220-223, 156.
Liu Dunwang, Liu Hongfu, Zhang Xinjun. Application of active carbon Radon measurement in detection of coal mined-out area [J]. Progress in Exploration Geophysics, 2009, 32(3): 220-223, 156.
- [21] 徐晓培. 瞬变电磁方法在山西某煤矿区水患调查的应用[J]. 地质与勘探, 2019, 55(2): 579-584.
Xu Xiaopei. Application of the transient electromagnetic method to flooding survey in a coal mining area of Shanxi province[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(2): 579-584.
- [22] 孙英峰, 罗 霄, 高艺瑞, 等. 瞬变电磁法在探测采空区中的应用[J]. 煤矿安全, 2020, 51(3): 157-163.
Sun Yingfeng, Luo Xiao, Gao Yirui, et al. Application of transient electromagnetic method in detection of goaf[J]. Safety in Coal Mines, 2020, 51(3): 157-163.
- [23] 王 鹏. 基于瞬变电磁法的超浅层采空区探测[J]. 煤矿安全, 2018, 49(12): 135-138.
Wang Peng. Detection of ultra-shallow gob based on transient electromagnetic method[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(12): 135-138.
- [24] 刘国勇, 杨明瑞, 王永刚. 高密度电法在煤矿积水采空区探测中的应用[J]. 矿业安全与环保, 2019, 46(5): 90-94.
Liu Guoyong, Yang Mingrui, Wang Yonggang. Application of high density resistivity method for water accumulated goaf detection in coal mine[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2019, 46(5): 90-94.
- [25] 张建强, 张全录, 汤跃超, 等. 高压输电线塔基煤矿采空区的高密度电阻率法探查研究[J]. 地球物理学进展, 2004(3): 684-689.
Zhang Jianqiang, Zhang Quanlu, Tang Yuechao, et al. High density electrical resistance exploration on coal mine cavity under the high power tower foundation [J]. Progress in Geophysics, 2004 (3): 684-689.
- [26] 牟 义, 李卫伟, 高卫富. 分布式高密度电法探测浅埋深采空区试验研究[J]. 煤炭工程, 2019, 51(9): 152-157.
Mou Yi, Li Weiwei, Gao Weifu. Shallow-buried goaf detection test using high density resistivity method[J]. Coal Engineering, 2019, 51(9): 152-157.
- [27] 廉 洁, 李松营, 王 伟, 等. 槽波地震勘探技术在义马矿区的应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(12): 162-165.
Lian Jie, Li Songying, Wang Wei, et al. Channel wave seismic exploration technology applied to Yima mining area[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(12): 162-165.
- [28] 金 磊, 张周爱, 鞠兴军. 井地地震技术在宝日希勒露天矿采空区探测中的应用[J]. 煤炭工程, 2017, 49(S2): 91-93.
Jin Lei, Zhang Zhouai, Ju Xingjun. Application of well-ground seismic technology in goaf detection of Baorixile Open-pit Coal Mine[J]. Coal Engineering, 2017, 49(S2): 91-93.
- [29] 苑 吴, 刘佳朋, 姜在兴. 煤矿采空区四维地震特征分析及识别方法: 以淮南煤田张集矿区为例[J]. 现代地质, 2020, 34(6): 1-6.
Yuan Hao, Liu Jiapeng, Jiang Zaixing. Analysis and identification method of 4D seismic characteristics in gob areas of coal mine a case study from the Zhangji coal mine in Huainan coalfield [J]. Geoscience, 2020, 34(6): 1-6.
- [30] 王雪涛. 地质雷达探测技术在乌东煤矿的应用实践[J]. 煤炭科技, 2016, 37(4): 92-95.
Wang Xuetao. Application of geological radar detection technology in Wudong Coal Mine[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2016, 37(4): 92-95.
- [31] 李东亮, 原 静, 窦文武. ZTR12 矿用地质雷达在晋城矿区探测的应用研究[J]. 煤炭科技, 2019, 40(3): 1-4, 8.
Li Dongliang, Yuan Jing, Dou Wenwu. Application research on ZTR12 mining geological radar in Jincheng mining area[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2019, 40(3): 1-4, 8.
- [32] 刘 阳. 基于GPR的隐伏采空区探测正演响应特征[J]. 煤炭科技, 2020, 41(3): 6-10.
Liu Yang. Detection of forward response characteristics of concealed goaf based on GPR[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2020, 41(3): 6-10.
- [33] 邱建龙, 魏 杰, 张 红, 等. 三维激光扫描技术在地下采空区探测中的应用[J]. 现代矿业, 2019, 35(11): 194-197.
Qiu Jianlong, Wei Jie, Zhang Hong, et al. Research on three-dimensional laser scanning technology in the detection of underground goaf[J]. Modern Mining, 2019, 35(11): 194-197.
- [34] 王 瑞, 李 亮, 周大伟. 三维激光扫描技术在采空区探测中的应用研究[J]. 化工矿物与加工, 2018, 47(8): 59-61.
Wang Rui, Li Liang, Zhou Dawei. Research on application scanning technology of mined-out in 3D laser detection area[J]. Industrial Minerals & Processing, 2018, 47(8): 59-61.
- [35] 丁鑫品, 王 俊, 周 游, 等. 激光扫描系统在探测露天煤矿下采空区中的应用[J]. 煤炭科学技术, 2015, 43(10): 46-50.
Ding Xinp, Wang Jun, Zhou You, et al. Application of cavity-autoscanning laser system in surface mine gob detection[J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 46-50.
- [36] 薛国强, 潘冬明, 于景坤. 煤矿采空区地球物理探测应用综述[J]. 地球物理学进展, 2018, 33(5): 2187-2192.
Xue Guoqiang, Pan Dongming, Yu Jingkun. Review the applications of geophysical methods for mapping coal-mine voids[J]. Progress in Geophysics, 2018, 33(5): 2187-2192.
- [37] 陈 都, 彭 枫. 铁路煤矿采空区综合物探技术研究[J]. 建材与装饰, 2017(30): 244-245.
Chen Du, Peng Feng. The research of comprehensive geophysical technology in railway coal mine goaf exploration[J]. Construction Materials & Decoration, 2017(30): 244-245.
- [38] 于国明, 李 静, 韩革命. 综合物探方法在深部煤层采空区检测中的应用研究[J]. 陕西地质, 2003, 21(2): 62-69, 76.

- Yu Guoming, Li Jing, Han Geming. Application of comprehensive geophysics in detection of mined-out area in deep coal-seam [J]. *Geology of Shaanxi*, 2003, 21(2): 62-69, 76.
- [39] 司梦元, 周 银, 郭杰明, 等. 基于三维激光扫描技术的高边坡变形监测分析 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7922-7927.
- Si Mengyuan, Zhou Yin, Guo Jieming, et al. Deformation monitoring and analysis of high slope based on 3D laser scanning technology [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(19): 7922-7927.
- [40] 李剑波, 李 婕. 公路隧道穿越采空区稳定性分析与处治技术研究 [J]. 湖南交通科技, 2007, 33(3): 114-116, 145.
- Li Jianbo, Li Jie. Stability analysis and treatment technology research of highway tunnel crossing goaf [J]. *Human Communication Science and Technology*, 2007, 33(3): 114-116, 145.
- [41] 符亚鹏, 方 勇, 崔 戈, 等. 小规模下伏薄煤层采空区倾角对隧道开挖稳定性的影响研究 [J]. 现代隧道技术, 2016, 53(4): 70-76.
- Fu Yapeng, Fang Yong, Cui Ge, et al. Study on the influence of goaf dip angle on the stability of tunnel excavation in small-scale underlying thin coal seam [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2016, 53(4): 70-76.
- [42] 方 勇, 符亚鹏, 周超月, 等. 公路隧道下穿双层采空区开挖过程模型试验 [J]. 岩石力学与工程学报, 2014, 33(11): 2247-2257.
- Fang Yong, Fu Yapeng, Zhou Chaoyue, et al. Model test of highway tunnel construction under double-deck mined-out area [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(11): 2247-2257.
- [43] 张志祥, 张永波, 赵志怀, 等. 交通荷载作用下隧道下伏采空区稳定性分析的实验研究 [J]. 太原理工大学学报, 2011, 42(5): 534-538.
- Zhang Zhixiang, Zhang Yongbo, Zhao Zhihuai, et al. Experimental study on stability analysis of tunnel goaf under traffic load [J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 2011, 42(5): 534-538.
- [44] Fang Y, Xu C, Cui G, et al. Scale model test of highway tunnel construction underlying mined-out thin coal seam [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, 56: 105-116.
- [45] Fang Y, Yao Z G, Walton G, et al. Liner behavior of a tunnel constructed below a caved zone [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2018, 22(6): 4163-4172.
- [46] 刘书斌, 周超月, 方 勇. 小净距隧道下穿薄煤层采空区地层开挖稳定性分析 [J]. 铁道标准设计, 2015, 59(10): 128-133.
- Liu Shubin, Zhou Chaoyue, Fang Yong. Analysis of excavation stability of twin tunnels under-crossing thin mined-out coal area [J]. *Railway Standard Design*, 2015, 59(10): 128-133.
- [47] 孔德民, 陈亚群, 王少林. 张家湾2号隧道下伏煤矿采空区地基稳定性分析 [J]. 甘肃地质, 2016, 25(3): 86-91.
- Kong Demin, Chen Yaqun, Wang Shaolin. Analysis on the stability of ground in goaf area of Zhangjiawan No. 2 tunnel [J]. *Gansu Geology*, 2016, 25(3): 86-91.
- [48] 王树仁, 张海清, 慎乃齐. 穿越采空区桥隧工程危害效应分析及对策 [J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2009, 10(5): 492-496.
- Wang Shuren, Zhang Haiqing, Shen Naiqi. Numerical analysis of hazard effects and protection measures of highway tunnel and bridge crossing mined-out regions [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 2009, 10(5): 492-496.
- [49] 姜绍祖, 梁庆华. 铁路隧道下伏煤矿采空区稳定性分析 [J]. 煤炭技术, 2018, 37(1): 186-188.
- Jiang Shaozu, Liang Qinghua. Stability analysis of mined out area of coal mine under railway tunnel [J]. *Coal Technology*, 2018, 37(1): 186-188.
- [50] 韩宪军, 朱昌星, 孟小欢, 等. 下伏采空区隧道变形稳定性与治理数值分析 [J]. 广西大学学报(自然科学版), 2016, 41(1): 219-227.
- Han Xianjun, Zhu Changxing, Meng Xiaohuan, et al. Numerical analysis on stability and treatment for deformation of underlying goaf tunnel [J]. *Journal of Guangxi University (Natural Science Edition)*, 2016, 41(1): 219-227.
- [51] Li P X, Yan L L, Yao D H. Study of tunnel damage caused by underground mining deformation: calculation, analysis, and reinforcement [J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019(21): 1-18.
- [52] Guo Q B, Li Y M, Meng X R, et al. Instability risk assessment of expressway construction site above an abandoned goaf: a case study in China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2019, 78: 588. 1-588. 14.
- [53] 韩文斌, 高琨鹏, 王汉斌. 露天铁矿端帮开采诱发的地表及岩层移动规律 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7596-7601.
- Han Wenbin, Gao Kunpeng, Wang Hanbin. The law of surface and rock strata movement induced by open-pit highwall mining in opencast iron mine [J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(19): 7596-7601.
- [54] 杨 征, 程 虎, 李奇相, 等. 隧道下伏采空区治理方法及注浆过程中常见问题的处置实例 [J]. 勘察科学技术, 2017(S1): 36-38.
- Yang Zheng, Cheng Hu, Li Qixiang, et al. Treatment method of underground goaf in tunnel and disposal examples of common problems in grouting process [J]. *Editorial Office of Site Investigation Science and Technology*, 2017(S1): 36-38.
- [55] 金鑫光, 孙兴亮, 贾仁政. 晋城市王坡煤矿铁路专运线柏树底隧道下伏采空区治理 [J]. 地质灾害与环境保护, 2003, 14(1): 61-63, 65-64.
- Jin Xinguang, Sun Xingliang, Jia Renzheng. Jincheng Wangpo coal mine railway transport line cypress bottom tunnel under goaf management [J]. *Journal of Geological Hazards and Environment Preservation*, 2003, 14(1): 61-63, 65-64.
- [56] Zhang Z P, Wang Z Y, Liu X. Stability assessment of the freeway over the gob of coalmine [J]. *Journal of Coal Science & Engineering*, 2005, 11(1): 26-30.
- [57] 吴永全. 公路隧道穿越采空区处治技术探讨 [J]. 北方交通, 2011(12): 52-55.
- Wu Yongquan. Discussion on treatment technology of highway tunnel passing through goaf [J]. *Northern Communications*, 2011(12): 52-55.
- [58] 苟德明, 田 娇, 李佳佳, 等. 高速公路隧道下伏小煤窑采空区洞内注浆处治技术 [J]. 林业工程学报, 2018, 3(5): 142-149.

- Gou Deming, Tian Jiao, Li Jiajia, et al. Grouting treatment technology of small coal mine goaf beneath expressway tunnel [J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(5): 142-149.
- [59] 李昌龙, 吴维义, 姬同旭. 公路隧道下伏水平采空区治理方案数值模拟试验研究[J]. 佳木斯大学学报(自然科学版), 2019, 37(6): 874-877.
Li Changlong, Wu Weiyi, Ji Tongxu. Numerical simulation study on the control scheme of underground level goaf in highway tunnel [J]. Journal of Jiamusi University (Natural Science Edition), 2019, 37(6): 874-877.
- [60] 魏盛昊, 杨更社. 矿区地表沉陷监测技术发展状况[J]. 价值工程, 2019, 38(6): 191-193.
Wei ShengHao, Yang Gengshe. Development of surface subsidence monitoring technology in mining area [J]. Value Engineering, 2019, 38(6): 191-193.
- [61] 代家乐, 陈其明, 于军, 等. 常用金矿采空区地面沉陷监测方法分析[J]. 世界有色金属, 2016, 12(6): 132-133.
Dai Jiale, Chen Qiming, Yu Jun, et al. Methods to analyze common gold mine goaf ground subsidence monitoring [J]. World Non-ferrous Metals, 2016, 12(6): 132-133.
- [62] 陈啟英, 安裕伦, 奚世军. 喀斯特高原区多源遥感数据时空融合模型适用性分析[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(16): 6538-6546.
Chen Qiying, An Yulun, Xi Shijun. Applicability analysis of spatio-temporal fusion model of multi-source remote sensing data in karst plateau [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(16): 6538-6546.
- [63] David L, Marian M, Işik Y, et al. Utilization of engineering geology in geo-tourism: few case studies of subsidence influence on historical churches in Ostrava-Karvina District (Czech Republic) [J]. Environmental Earth Science, 2016, 75: 128. 1-128. 12.
- [64] Karmis N, Chen C Y, Jones D E, et al. Some aspects of mining subsidence and its control in the US coalfields [J]. Minerals and the Environment, 1982(4): 116-129.
- [65] 邱冬炜, 祝思君, 王来阳, 等. 利用阵列式位移传感系统进行地质灾害深部位移动动态监测与分析[J]. 测绘通报, 2018(3): 122-125, 129.
Qiu Dongwei, Zhu Sijun, Wang Laiyang, et al. Dynamic monitoring and analysis of geological disaster deep displacement using SAA [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018 (3): 122-125, 129.
- [66] 王文广, 徐辉. 基于 MEMS 技术的基坑变形监测试验研究 [J]. 工程勘察, 2017, 45(3): 12-16.
Wang Wenguang, Xu Hui. Experimental study on monitoring of foundation pit deformation based on MEMS [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2017, 45(3): 12-16.
- [67] Liu B, Ma Y J, Cao B, et al. Stabilization on 1 000 kV UHV transmission tower foundation influenced by underground coal mining in mountainous areas [C]// Civil Infrastructures Confronting Severe Weathers & Climate Changes Conference. Hangzhou: Springer, 2018: 78-88.
- [68] 袁坤. 多次分段控制注浆钢花管支撑加固技术的研究与应用[D]. 北京:中国铁道科学研究院, 2019: 15-16.
Yuan Kun. Research and application of multi-section control grouting steel tube support reinforcement technology [D]. Beijing: China Academy of Rail Sciences, 2019: 15-16.