

文章编号: 1674—8247(2022)03—0007—05  
DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2022.03.002

# 高速铁路紧邻深厚煤矿采空区和地下水超采 叠加影响规律研究

苏敬强

(山东铁路投资控股集团有限公司, 济南 250102)

**摘 要:**深厚煤矿采空区和地下水超采的叠加影响,对邻近的高铁建设和运营存在较大的风险。本文以某高铁附近的古城煤矿为例进行了研究。在勘察设计过程中,应用概率积分法和手册法,对采空区变形规律进行了时空分析,并评价了其高铁工程的影响。结合 InSAR 监测和地面沉降实测,进一步验证了采空区变形时空特征。研究结果表明:(1)古城煤矿上覆基岩厚度大于 1000m,采后形成的采空区多呈"弯曲型"垮落,中心沉降量小,对地表影响较小;(2)InSAR 监测和实测表明,采空区已进入沉稳阶段,对高速铁路工程安全稳定已基本无影响;(3)地下水开采引起的地面沉降是地表形变的主要因素,其中浅层灌溉抽水引起的局部不均匀沉降对铁路工程的平顺性影响更大,应采取相应的管控措施。

**关键词:**高速铁路;深厚采空区;地面沉降;变形规律;沉降监测

**中图分类号:**U212.22 **文献标志码:**A

## Study on the Law of Cumulated Impacts of Deep Coal Mine Goaf and Groundwater Overexploitation on High-speed Railway

SU Jingqiang

(Shandong Railway Investment Holding Group Co., Ltd., Jinan 250102, China)

**Abstract:** The cumulated impacts of deep coal mine goaf and groundwater overexploitation have great risks to the construction and operation of adjacent high-speed railways. In this paper, Gucheng coal mine nearing a high-speed railway is taken as an example. In the process of survey and design, the space-time analysis of the deformation law of goaf is conducted by using the probability integral method and manual method, and the impacts of the goaf on high-speed railway project are also evaluated. The spatial and temporal characteristics of goaf deformation are further verified through InSAR monitoring and surface subsidence measurement. The findings suggest that: (1) The thickness of the overlying bedrock on Gucheng coal mine is greater than 1000 m, and the goaf formed after mining mostly shows "curved" collapse, with small central subsidence and little impact on the surface. (2) InSAR monitoring and measurement results show that the goaf has been stable and has basically no impact on the safety and stability of high-speed railway project. (3) The surface subsidence caused by groundwater exploitation is the main factor of surface deformation, and the local uneven subsidence caused by shallow pumping for irrigation has a greater impact on the smoothness of railway engineering, so corresponding control measures are required.

**Key words:** high-speed railway; deep goaf; surface subsidence; deformation law; subsidence monitoring

收稿日期:2022-04-12

作者简介:苏敬强(1970-),男,高级工程师。

引文格式:苏敬强. 高速铁路紧邻深厚煤矿采空区和地下水超采叠加影响规律研究[J]. 高速铁路技术,2022,13(3):7-11.

SU Jingqiang. Study on the Law of Cumulated Impacts of Deep Coal Mine Goaf and Groundwater Overexploitation on High-speed Railway[J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(3):7-11.

深厚松散层广泛存在于我国东部兖州、济宁、开滦、焦作等矿区<sup>[1]</sup>。随着东部矿区开采深部化,厚松散层大采深条件采空区大量形成<sup>[2]</sup>,其移动变形规律总体上与一般采空区相似<sup>[3]</sup>,但因厚松散层的存在,表现出地表沉降范围大、移动总量大的特点<sup>[4]</sup>。现有研究成果对高速铁路邻近的超深(大于1 000 m)采空区鲜有研究,同时,中东部平原区是我国地面沉降灾害主要分布区,其中华北平原是最为严重的地区。地下水超采漏斗已有20多个,已形成以天津、北京与沧州3个城市为大中心,保定、衡水与德州为次级中心的地面沉降降落漏斗。区域地面沉降,具有变形范围大、影响时间长、沉降深度大等特点。地面沉降与采空区塌陷的叠加影响是该区域高速铁路建设和运维不得不面临的一个重大且复杂的工程问题<sup>[5-7]</sup>。

本文以某高速铁路线路邻近深厚采空区为研究对象,在勘察成果和相关专题研究<sup>[8-9]</sup>的基础上,通过理论计算研究矿区地表沉降规律,结合考虑区域地面沉降特征,通过INSAR监测和现场实测,综合分析评估其对高速铁路线路的安全性影响。

## 1 工程概况

### 1.1 基本概况

某高速铁路相邻的古城煤矿,矿区内地形平坦,属冲积平原,地势东高西低。古城煤矿58个工作面均采用条带开采、综采放顶开采工艺,平均采厚8.50 m,该矿开采深度达1 200 m,平均倾角7°。煤矿大部分工作面停采已超过10年,部分新近5年内采空区集中在采区南部。高速铁路线路本段以桥梁、路基形式通过。根据采掘工程平面图,3107工作面于2017年1月份开始回采,2018年3月停采,采宽89~118 m,回采长度701 m,边界距高速铁路线路920 m;3209工作面于2017年9月份开始回采,2018年9月停采,采宽174 m,回采长度470 m,边界距高速铁路线路835 m。上述邻近的两个工作面均采用背离线路方向的“条带式”开采。

### 1.2 工程地质与水文地质条件

采区地层自上而下依次为:第四系(Q)松散层、古近系(E)、侏罗系(J)、二叠系(P)、石炭系(C)及奥陶系(O)。上部第四系地层主要为冲洪积粘土和粉细砂,厚约170 m,工程性质较差;下伏岩侏罗系主要以灰绿色细砂岩、砂质泥岩、泥岩组成,厚度变化大,厚0~607 m;含煤地层主要为二叠系山西组及太原组,二者含煤地层平均总厚255.04 m。采空区上覆基岩厚约1 000 m,主要开采煤层直接顶砂质泥岩及粉砂岩的抗压强度为55.10~94.80 MPa,泥岩的抗压强度为

48.14 MPa,多为中硬岩,断裂构造发育,褶曲不发育,地层缓倾,倾向多变。

区域第四系含水层可分为上部潜水,中、下部为两层“承压水”,如图1所示。其中潜水层由灰黄色、黄褐色、粉质粘土及砂层组成,平均厚度49.03 m,本组透水性好,富水性强,水位年变幅2~3 m;为农田供水及临时性水源。基岩裂隙水(偶含岩溶水)不发育,与上部第四系水力联系较弱。

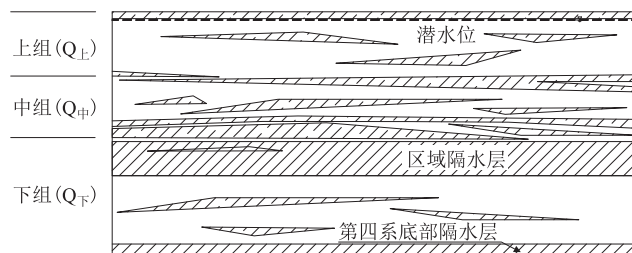


图1 区域水文地质示意图

高速铁路DK 273~DK 280段线路两侧基本位于农田内,为满足生产、生活用水及农业灌溉需要,铁路两侧300 m内浅层(25~50 m)水井密布,平均100~150 m分布1口,每年4~6月、11~12月两个集中抽水灌溉季,漏斗中心水位下降最大可达10 m以上,由于浅层地下水大幅下降引起的地面沉降可达10 mm/年。根据高速铁路沿线的区域地面沉降相关研究成果<sup>[5]</sup>,该区域同时存在生产生活“中深层”承压水的超采,其引起的地面沉降量未来10~20年将达到12.8~12.0 mm/年。高速铁路线路的地面沉降受采空区及区域地面沉降综合影响。

## 2 采空区地表变形调查与分析

### 2.1 采空区地表变形调查

距离高速铁路最近的3107、3209工作面煤层平均采厚约8.5 m,采深约1 200 m,采空区长、宽远小于采深,采深采厚比达140,采空区未达到充分采动,地表移动盆地应为“碗状”,工程地质类比判别其采后形成的采空区多呈“弯曲型”垮落,中心沉降量小,对地表影响较小。根据现场附近地表调查,采区附近未见明显地表塌陷,以地表变形为主,道路可见变形主要为裂缝,裂缝宽度2~30 mm,裂缝长度从几米到几十米不等;房屋主要为竖向裂缝,裂缝宽度1~5 mm。地面调查表明线路位于I级损坏区影响边界外420 m,其形态与位置与2018年底的INSAR解译结论具有较好的吻合性。

### 2.2 采空区地表变形理论分析

概率积分法被业界广泛认可,并且已纳入安监总

煤装〔2017〕66号《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》<sup>〔10〕</sup>及GB 51044-2014《煤矿采空区岩土工程勘察规范》<sup>〔11〕</sup>推荐的采空区地表移动变形计算方法。该方法在本矿区已应用多年,积累了丰富的经验。

(1) 参数选取

采空区覆岩的抗压强度值接近或大于60 MPa,按照规范较硬岩~坚硬岩的区间值,基岩边界角可取为60°。结合古城煤矿及相邻星村煤矿部分工作面实测经验参数及相关规范经验参数,考虑3107及3209工作面煤柱的稳定性、采区积水情况等性质,经综合分析确定,地表移动预计参数选取如表1所示。

表1 地表预计概率积分参数表

参数名称	符号	取值
下沉系数	$\eta$	0.55
主要影响角正切	$\tan\beta$	1.9
水平移动系数	$b$	0.3
拐点偏移距	$S$	0
开采影响传播角	$\theta$	89°

(2) 采空区形变时空分析及其对高速铁路的影响

采用概率积分法分析古城煤矿3107、3209工作面地表下沉如图2所示。

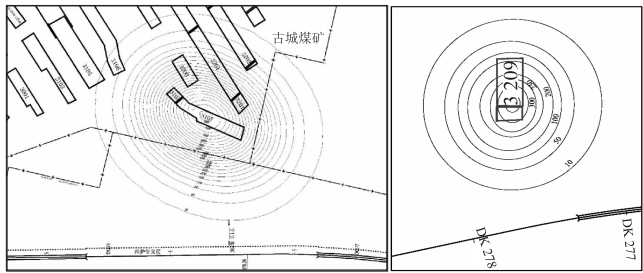


图2 3107、3209工作面地表下沉等值线图

通过对3107及3209工作面采用垂直剖面法计算,获得3107工作面采空区的影响边界距离线路中心155 m;3209工作面采空区的影响边界距离线路中心75 m。3107与3209工作面相距300 m,两者在地表形成的移动盆地存在叠加效应,叠加后如图3所示,影响边界毗邻高速铁路围护带边界,在DK 277+370~DK 278+240段右侧200 m内的影响边界近平行于线路,展布长度将近870 m。总体上分析两个采区的变形影响边界最近距线路中心75 m。当采空区沉降边界不侵入高速铁路围护带边界时,采空区对铁路安全基本无影响<sup>〔12〕</sup>。

当移动盆地沉降中心区下沉点 $V<1.0\text{ mm/d}$ 且连续6个月累计最大下沉值不超过30 mm时,可判定

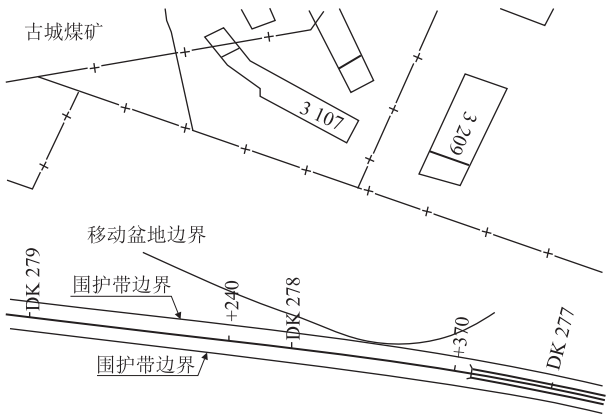


图3 3107、3209工作面影响边界叠加示意图

为地表稳定,移动期结束。根据手册法预测3107及3209工作面的移动盆地稳定时间 $T=2\sim2.5$ 年;通过经验分析,一般2.5~3年能达到稳沉。3107工作面开采时间2017年1月至2018年3月,靠线路侧采区的停采时间至今已有3年6个月。3209工作面开采时间2017年9月至2018年9月,靠线路侧采区的停采时间至今已近3年。两工作面已基本接近终沉,处于衰退~终沉阶段。采空区10 mm残余沉降线已逐渐缩小,外圈已停止下沉,残余变形逐步远离线路。

3 地表变形监测分析

3.1 InSAR 解译

为宏观定性判译采空区地表形变的发展历程,采用INSAR解译了2019-2020年采空区的形变特征如图4所示。InSAR解译地表变形显示,采空区的沉降中心主要位于3107工作面北侧,此采区沉降中心位置未变化。2019年4月后采空区移动盆地影响范围的沉降趋于稳定。2020年InSAR解译显示3107及3209工作面地表变形已趋于稳定,对高速铁路工程影响持续减弱。InSAR所反映的地表变形范围、时程,与两个工作面的开采时空对应性较好,也与上述“采空区形变时空分析”中采后2.5~3年达到稳沉的结果相互印证。

3.2 采空区地表监测

为确保采空区沉降变形不影响高速铁路安全运营,在DK 276~DK 281段线路临近采空区布设3条地表变形监测线(1号、2号、3号);沿线路方向布设1条断面测线(4号),监测点位129个。其中1号、2号测线在线路左侧设置100 m,右侧设置900 m;3号测线左侧设置100 m,右侧设置1 000 m;4号测线沿施工便道外侧设置3.15 km。监测点间距设置为50 m。

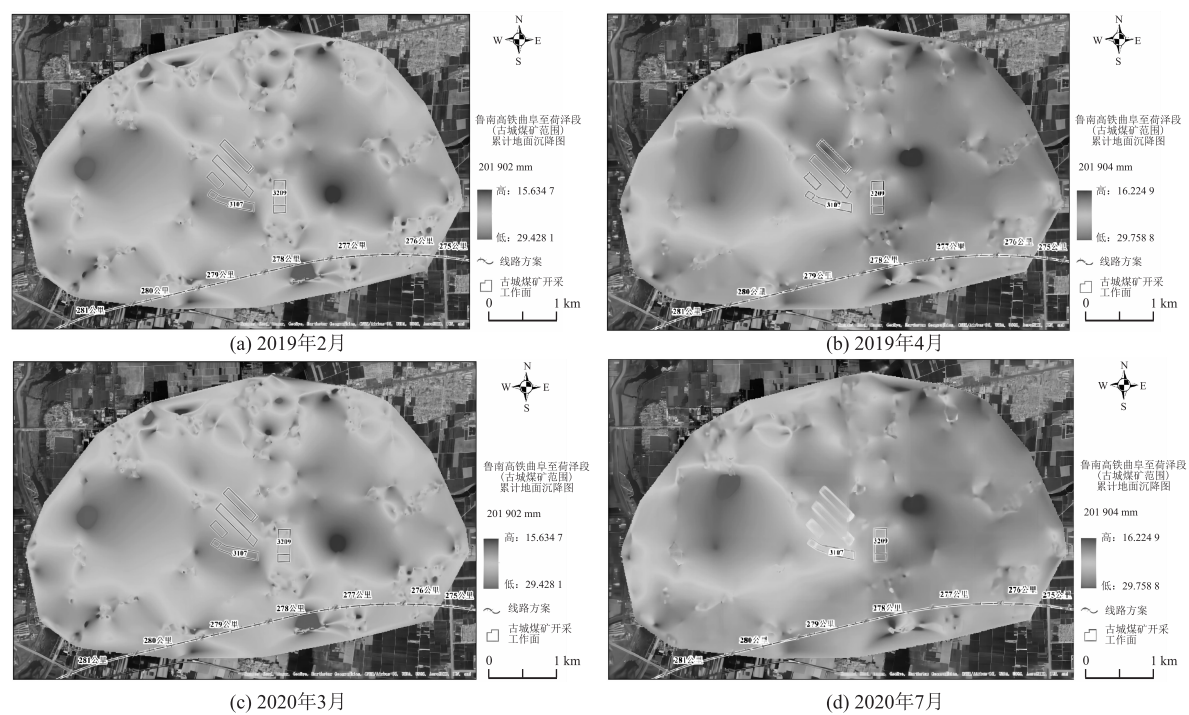


图 4 采空区 2019 ~ 2020 年 Insar 干涉云图

根据 2020 年 9 月 - 2021 年 12 月监测数据分析, 该段地面沉降逐月变缓, 分别选取 4 条剖面沉降最大

点进行纵向分析, 可发现地面沉降变形在逐渐收敛, 沉降速率由 4 ~ 6 mm/月降至 0 ~ 2 mm/月, 如图 5 所示。

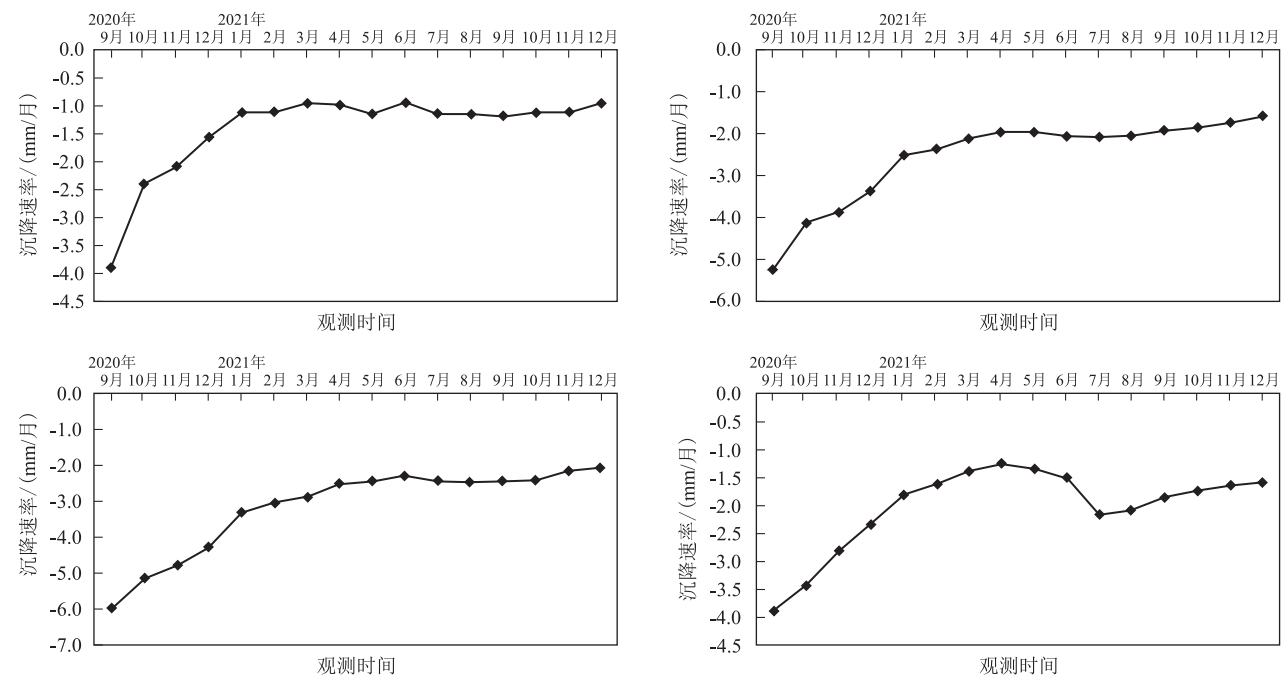


图 5 1 ~ 4 号断面沉降最大值沉降速率曲线图

如前所述, 研究区浅层及“中深层”地下水开采引起的区域地面沉降局部最大可达 12.0 ~ 12.8 mm/年, 与实测月沉降速率基本相当。可见, 研究区地面沉降主要由区域地面沉降引起, 线路附近采空区变形已趋于稳沉, “中深层”承压水引起的区域地面沉降仍将持

续较长时间。“中深层”承压水引起的区域沉降一般表现为大范围的均匀沉降, 对高速铁路的平顺性影响一般不大, 而浅层农业灌溉用水存在前述“三集中”(浅层层位集中、春冬季集中、井群集中)的现象, 其引起的局部不均匀沉降对高速铁路的平顺性影响更大,



应引起足够重视。

## 4 工程对策

本段线路走行于三矿(星村、古城及杨庄)的长条状脊背形的保护煤柱通道之上,同时存在区域地面沉降两大不良地质问题。根据研究区评估结论和地表变形监测分析,邻近高速铁路线路的3107与3209工作面毗邻高速铁路安全围护带,邻近矿区仍在开采服务期,其不利影响将长期存在。线路位于河流冲积平原,第四系地层深厚,工程桩基础处于浅层地下水开采影响范围内,工程承载环境易受环境变化而损伤。综合分析提出工程对策如下:

(1)基于对本段线路环境的不利风险因素和承载环境特征的综合分析,高速铁路线路采用有砟轨道通过是适宜的。

(2)严格按照相关法律法规以及铁路相关评估报告预留保护煤柱,严禁越界开采。在向线位方向开采时,应根据地表变形监测情况,逐步确认安全距离。

(3)按区域地面沉降影响范围及特征,结合采空区分布,针对性制定沿线地下水动态监测和分段禁采、限采与控采实施方案。

(4)建立沿线地面沉降监测控制网和高速铁路工程监测网,实时监测和评估地表形变和工程基础设施服役状态。

## 5 结论

高速铁路对轨道平顺性要求极高、对沉降控制严格,工程地质选线应首先绕避区域沉降中心及采空影响区<sup>[13]</sup>。当设站条件困难,线路经由受限时,应对采空区或区域地面沉降对工程的影响进行充分论证,并针对性采取工程应对措施。本文主要研究结论如下:

(1)根据工程地质类比和地表形变调查,古城煤矿上覆基岩厚度大于1 000 m,多为中硬岩,采深采厚比达140,采后形成的采空区多呈“弯曲型”垮落,中心沉降量小,对地表影响较小。

(2)按现行规范、规程对采空区的时效性分析,并经INSAR监测和实测数据验证,现状条件下采空区已进入沉稳阶段,对高速铁路工程安全稳定已基本无影响。考虑到本段线路受采空区和地面沉降两大不良地质风险因素多重影响,高速铁路应采取稳妥的工程应对措施,并加强对沿线地表形变及高速铁路工程的变形监测,实时掌握线路变形动态状况,为铁路安全运营和运维提供依据。

(3)铁路附近的地面沉降由地下水开采引起的区域沉降占主导,“中深层”承压水超采引起的地面沉降对高速铁路工程有一定影响,但对不均匀沉降影响较小;浅层农业灌溉用水引起的局部不均匀应引起足够的重视,应按相关规定和专题研究成果采取禁、限、控采措施和地下水的动态监测。

需说明的是本文对区域地面沉降的分析主要基于铁路工程专题研究报告,有待进一步针对采空区邻近区域开展水文地质深化研究。

## 参考文献:

- [1] 刘义新. 厚松散层下深部开采覆岩破坏及地表移动规律研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2010.  
LIU Yixin. Overburden Failure and Surface Movement Laws Due to Deep Mining under Thick Unconsolidated Layer[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2010.
- [2] 刘义新, 戴华阳, 姜耀东, 等. 厚松散层大采深下采煤地表移动规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(5): 117-120.  
LIU Yixin, DAI Huayang, JIANG Yaodong, et al. Study on Surface Movement Law above Underground Deep Mining under Thick Unconsolidated Overburden Strata[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(5): 117-120.
- [3] 赵高博, 郭文兵, 姜高中, 等. 厚松散层高强度开采岩层与地表移动模拟[J]. 中国安全科学学报, 2018, 28(1): 130-136.  
ZHAO Gaobo, GUO Wenbing, LOU Gaozhong, et al. Numerical Simulation of Movement of both Rock Mass and Surface under Thick Loose Layer High-Intensity Mining Condition[J]. China Safety Science Journal, 2018, 28(1): 130-136.
- [4] 涂敏, 张东升. 厚松散层下煤层开采顶板垮落规律研究[J]. 矿山压力与顶板管理, 2004, 21(4): 8-11.  
Tu Min, Zhang Dongsheng. Roof Falling Regulation in Mining Seam under Thick Soil Layer[J]. Ground Pressure and Strata Control, 2004, 21(4): 8-11.
- [5] 姚裕春, 袁碧玉. 复杂采空区高速铁路路基关键技术研究分析[J]. 铁道工程学报, 2021, 38(2): 47-52.  
YAO Yuchun, YUAN Biyu. Study and Analysis of the Key Technology of High Speed Railway Subgrade in Complex Goaf[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2021, 38(2): 47-52.
- [6] 赵明东. 地面沉降地区高速铁路工程地质选线[J]. 铁道勘察, 2019, 45(4): 42-45.  
ZHAO Mingdong. Engineering Geology Line Selection of High-speed Railway in Land Subsidence Area[J]. Railway Investigation and Surveying, 2019, 45(4): 42-45.
- [7] 边超. 地下水开采引发地面沉降对鲁南高铁沿线的影响性分析及防治[D]. 济南: 山东大学, 2021.  
BIAN Chao. Analysis and Prevention of the Influence of Ground Subsidence Caused by Groundwater Exploitation on the South Shandong High-speed Railway[D]. Jinan: Shandong University, 2021.

(下转第67页)

Technology, 2017, 8(4): 19–23.

[3] 何正友, 方雷, 郭东, 等. 基于 AT 等值电路的牵引网潮流计算方法[J]. 西南交通大学学报, 2008, 43(1): 1–7.

HE Zhengyou, FANG Lei, GUO Dong, et al. Algorithm for Power Flow of Electric Traction Network Based on Equivalent Circuit of AT-Fed System[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2008, 43(1): 1–7.

[4] LEE Hanmin, LEE Changmu, JANG G, et al. Harmonic Analysis of the Korean High-speed Railway Using the Eight-Port Representation Model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 979–986.

[5] 吴命利. 电气化铁道牵引网的统一链式电路模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 52–58.

WU Mingli. Uniform Chain Circuit Model for Traction Networks of Electric Railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 52–58.

[6] 刘志刚, 郝峰杰, 陈杰, 等. 城轨牵引供电系统车–地配合参数优化方法[J]. 北京交通大学学报, 2019, 43(1): 79–87.

LIU Zhigang, HAO Fengjie, CHEN Jie, et al. Optimization Method of Train-Ground Coordination Parameters for Urban Traction Power Supply System[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 79–87.

[7] 何俊文, 李群湛, 刘炜, 等. 交流牵引供电系统仿真通用数学模型及其应用[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 25–29.

HE Junwen, LI Qunzhan, LIU Wei, et al. General Mathematical Model for Simulation of AC Traction Power Supply System and Its Application[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 25–29.

[8] 崔恒斌, 冯晓云, 王青元, 等. 制动利用率对高速列车节能操纵策略的影响[J]. 铁道学报, 2012, 34(8): 13–19.

CUI Hengbin, FENG Xiaoyun, WANG Qingyuan, et al. Influence of Braking Efficiency on High-speed Train Energy-Saving Driving Strategies[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(8): 13–19.

(上接第 11 页)

[8] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 鲁南高速铁路菏泽至曲阜段地面沉降专题研究报告[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2019.

China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd. Special Research Report on Land Subsidence from Heze to Qufu Section of South Shandong High-speed Railway[R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd., 2019.

[9] 中铁第四勘察设计院集团有限公司. 古城煤矿采空区对鲁南高铁菏曲段安全影响评价[R]. 武汉: 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 2019.

China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd. Safety impact of Gucheng Coal Mine on from Heze to Qufu section of South Shandong High-speed Railway[R]. Wuhan: China Railway Siyuan Survey And Design Group Co., Ltd., 2019.

[10] GB 51044–2014 煤矿采空区岩土工程勘察规范[S].

GB 51044–2014 Code for Investigation of Geotechnical Engineering in the Coal Mine Goaf[S].

[11] GB 51044–2014 煤矿采空区岩土工程勘察规范[S].

GB 51044–2014 Code for Investigation of Geotechnical Engineering in the Coal Mine Goaf[S].

[12] 穆文光, 韩广乐, 高雪莲, 等. 邻近深厚煤矿采空区对鲁南高速铁路的影响分析[J]. 铁道勘察, 2022, 48(1): 29–33.

MU Wenguang, HAN Guangle, GAO Xuelian, et al. Influence Analysis of Adjacent Deep Goaf of the Coal Mine on Rizhao-Lankao High-speed Railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2022, 48(1): 29–33.

[13] 李睿. 铁路选线阶段采空区安全影响距离的研究[C]//2021 年全国土木工程施工技术交流会论文集(下册), 2021: 70–73.

LI Run. Study on Safety Influence Distance of Goaf for Railway Route Selection[C]//Proceedings of 2021 National Civil Engineering Construction Technology Exchange Meeting (Volume II), 2021: 70–73.