



中国煤炭行业知识服务平台 (中国煤炭期刊网)
www.chinacaj.net



您可能感兴趣的文章、专题：

盘点《煤炭学报》2020年热点论文

《煤炭学报》2021年第1期

“新锐科学家”专题

“深部岩体力学与开采理论”专题

“煤加工与洁净化工技术”专题

“黄河流域矿区生态保护与可持续发展”专题

“煤矿热动力灾害防控技术与装备”专题

“煤矿快速智能掘进理论与技术”专题

“煤系天然气聚集理论与勘探开发技术”专题

“低品质煤浮选过程强化”专题

采空区场地高速铁路路基变形控制研究现状与展望

任连伟^{1,2}, 宁浩¹, 邹友峰^{2,3}, 顿志林^{1,2}, 郭文兵^{2,4}, 田忠斌⁵

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 河南 焦作 454000; 2. 河南省采空区场地生态修复与建设技术工程研究中心, 河南 焦作 454000; 3. 河南理工大学 测绘与国土信息工程学院, 河南 焦作 454000; 4. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 5. 山西省煤炭地质物探测绘院, 山西 晋中 030600)

摘要:我国煤炭产量高居世界首位,大量煤炭资源的开采,遗留了大面积的采空区场地。随着我国高速铁路的快速发展,一些关键线路难免会穿越采空区场地。采空区地基变形及高速列车密集动荷载下的活化变形对高速铁路安全运行存在着重大安全隐患。如何保障采空区场地高速铁路的安全运营是关键问题,其中采空区场地高速铁路路基变形控制研究是该类问题的核心内容。首先从理论研究、现场实测、模型试验和数值模拟4种研究手段分别总结了国内外高速铁路路基动力学和采空区地表变形的研究现状;接着重点从高速铁路列车动荷载分布及传递规律、高速铁路路基工后沉降相关要求、采空区地基与高速铁路路基相互作用机理、采空区场地高速铁路路基变形问题的可行性研究等4个方面介绍了采空区场地高速铁路路基变形问题的研究;最后简要总结了高速铁路采空区地基治理技术及采空区场地高速铁路路基抗变形措施等相关内容,并结合太原—焦作高铁和合肥—福州高铁线路穿越采空区场地而采取的实际治理方案及路基抗变形措施加以说明。在现有成果分析的基础上,探究了高速铁路动荷载最大扰动深度如何确定、高速铁路采空区地基本构模型如何选择、相似模型试验列车动荷载如何施加和高速铁路采空区地基治理体系如何完善等相关问题,并展望了该领域的发展方向。

关键词:高速铁路;采空区场地;路基;高铁动荷载;变形控制

中图分类号:TD327 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9993(2021)08-2534-14

Research status and prospect on deformation control of high-speed railway subgrade in goaf site

REN Lianwei^{1,2}, NING Hao¹, ZOU Youfeng^{2,3}, DUN Zhilin^{1,2}, GUO Wenbing^{2,4}, TIAN Zhongbin⁵

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 2. Henan Engineering Research Center for Ecological Restoration and Construction Technology of Goaf Sites, Jiaozuo 454000, China; 3. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 4. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 5. Coal Geological Geophysical Exploration Surveying & Mapping Institute of Shanxi Province, Jinzhong 030600, China)

Abstract: China's coal production ranks first in the world, and the extraction of large amounts of coal resources leaves a large area of goaf site. With the rapid development of high-speed railway in China, some key lines will inevitably pass through some goaf sites. The foundation deformation and the activation deformation under the dense dynamic load of high-speed train have great hidden danger to the safe operation of high-speed railway in goaf site. How to ensure the

收稿日期:2020-03-05 修回日期:2020-05-19 责任编辑:黄小雨 DOI:10.13225/j.cnki.jccs.2020.0499

基金项目:国家自然科学基金山西煤基低碳联合基金重点资助项目(U1810203)

作者简介:任连伟(1980—),男,河南项城人,副教授,博士。E-mail:renhpu@163.com

通讯作者:顿志林(1964—),男,河南杞县人,教授。E-mail:dzl1964@163.com

引用格式:任连伟,宁浩,邹友峰,等.采空区场地高速铁路路基变形控制研究现状与展望[J].煤炭学报,2021,46(8):2534-2547.

REN Lianwei, NING Hao, ZOU Youfeng, et al. Research status and prospect on deformation control of high-speed railway subgrade in goaf site[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(8): 2534-2547.



移动阅读

safe operation of high-speed railway in goaf site is a key problem, and the research on the deformation control of high-speed railway subgrade in goaf site is the core of this kind of problem. First, the research status of high-speed railway subgrade dynamics and ground deformation in mined-out areas are summarized from four research methods: theoretical research, field measurement, model test and numerical simulation. Then, the research on the deformation of high-speed railway subgrade in goaf site is introduced from the following four aspects: the distribution and transmission law of dynamic load of high-speed railway, the requirements of post construction settlement of high-speed railway subgrade, the interaction mechanism between goaf ground and high-speed railway subgrade, and the feasibility study on the deformation of high-speed railway sub-grade in goaf site. Finally, the goaf ground treatment technology and anti-deformation measures of high-speed railway subgrade are summarized, and the field improvement projects and the anti-deformation measures of sub-grade taken by Taiyuan to Jiaozuo and Hefei to Fuzhou high-speed railway line through the goaf site are explained. Based on the analysis of the existing research results, the paper explores how to determine the maximum disturbance depth of the dynamic load of the high-speed railway, how to select the constitutive model of the goaf ground under the action of high-speed railway, how to apply the dynamic load of the high-speed railway in the similar model test and how to improve the treatment system of the goaf ground, and looks forward to the development direction of this research field.

Key words: high speed railway; goaf site; subgrade; dynamic load of high-speed railway; deformation control

采空区是指地下开采空间围岩失稳而产生位移、开裂、破碎垮落,直到上覆岩层整体下沉、弯曲所引起地表变形和破坏的区域及范围^[1]。当采空区场地上建设有高速铁路时,采空区地基在列车密集动荷载的长期作用下会加剧正在发生的沉降,甚至使已稳定的采空区地基重新发生“活化”变形,加剧地基变形。然而高速铁路采空区地基的沉降将会诱发一个严重的工程灾害——高速铁路路基变形,这将会严重影响高速铁路的运行和行车安全。

目前我国正处于高速铁路快速发展的时期,随着合肥—福州、太原—焦作线路的铺设竣工及通车运营,高速铁路采空区场地路基变形问题越来越引发人们的关注。如何精确分析和评价高速铁路采空区场地路基在列车循环动荷载作用下的长期稳定性,是目前面临的重大问题。对于高速铁路采空区场地路基变形控制的研究,在国内外尚属于比较新颖的课题,也是一个世界性难题,对于该方面的研究成果在国内外都比较零散。然而高速铁路路基动力学问题以及采空区地表变形问题的研究比较多,但一直以来二者都是相对孤立的体系。因此,有必要先回顾二者的研究发展历程,对二者以往的研究内容和方法进行总结,然后重点介绍当前采空区场地高速铁路路基变形的研究内容、采空区地基治理技术以及提出存在的问题与展望。

1 高速铁路路基动力学

1.1 高速铁路路基动力学的理论模型

发展至今,高速铁路路基动力学问题的研究不再

是传统的独立系统动力学分析方法,已经基本采用耦合动力学方法,目前常用模型为车辆—轨道—路基垂向耦合模型。

刘学毅等^[2]应用 Winkler 的弹性地基梁模型首先研究了钢轨的动应力问题,然后认为轨枕和道床会随之发生振动响应,综合以上考虑构建了连续弹性支承三层叠合梁模型,如图 1 所示。

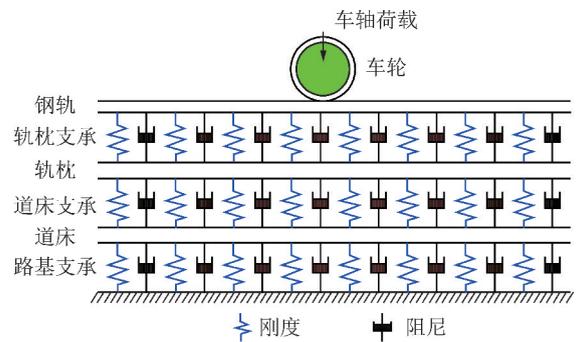


图 1 连续弹性支承三层叠合梁模型

Fig. 1 Three layers-beam model with continuous elastic support

由于现实中钢轨间断支承于轨枕上,轨道简化为连续弹性支承梁不符合实际情况,进而由连续弹性支承梁模型转化成不连续弹性点支承梁模型^[2],如图 2 所示。

后来开始轮轨动力方面问题的研究,为了研究列车的一些基本特性参数对轮—轨动力作用的影响, JENKINS 等^[3]建立了连续弹性基础支撑欧拉梁理论,并在此基础上提出了“轮—轨”动力模型,如图 3 所示。

佐藤裕等^[4]提出了 Sato“半车—轨道”集总参数

模型,如图 4 所示。

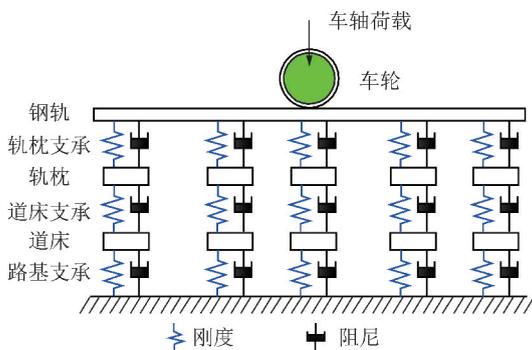


图 2 不连续弹性点支承模型

Fig. 2 Discontinuous elastic point support model

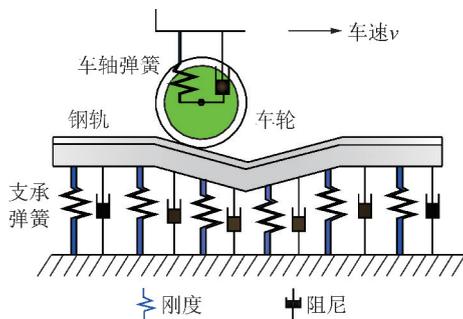


图 3 ‘轮-轨’动力模型

Fig. 3 ‘Wheel-rail’ dynamic model

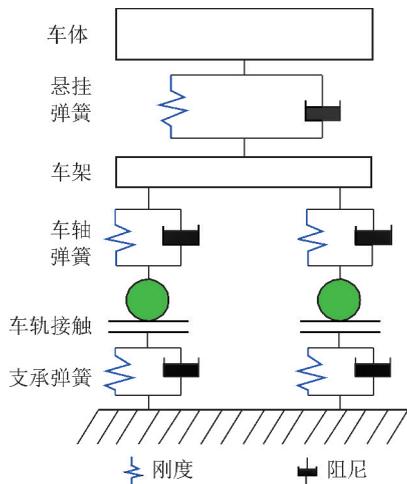


图 4 ‘半车-轨道’集总参数模型

Fig. 4 Half-vehicle/rail lumped parameter model

随着该领域研究的不断深入和计算机技术的不断更新,人们逐渐关注机车车辆与轨道动力的影响。将车辆简化为单轮对,车辆其他元素忽略不计,虽然大幅度降低了计算工作量,但是难免导致分析误差。后来有国外学者分析了车辆相邻轮对之间的动力耦合关系,如图 5 所示。结果表明,相邻轮对相互作用十分明显,对彼此轮位处轨道位移影响较大,所以将车辆简化为单轮对模型是不精确的^[5]。

翟婉明等^[6]通过对轨道使用脉冲激励而引起振动,研究发现了激励作用点位置前后相邻 3 个轨枕范

围内振动明显。至此,从单轮对模型发展为“单侧转向架模型”和“半车模型”^[2],如图 6 所示。

后期考虑到轨面存在连续正弦型不平顺,在“半车模型”的基础上发展了“整车-有砟轨道”垂向统一模型,如图 7 所示。

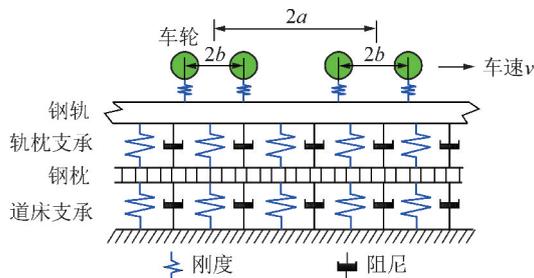


图 5 相邻轮对相互影响的动力模型

Fig. 5 Dynamic model of interaction between adjacent wheelsets

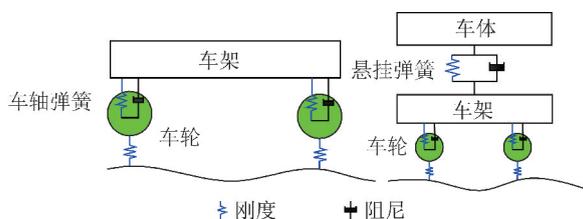


图 6 单侧转向架模型和半车模型

Fig. 6 Bogie model and half vehicle model

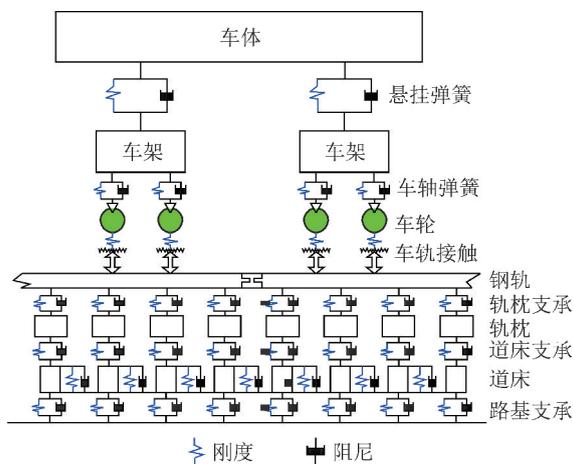


图 7 车辆-有砟轨道垂向耦合模型

Fig. 7 Train-ballast track vertical coupled system

周广新等^[7]回顾了车辆-轨道-路基垂向耦合模型发展历史。总结发现,列车相邻车厢相邻转向架的车轮荷载叠加效果明显,而同一车厢前、后转向架的车轮荷载之间的叠加可以忽略不计^[8],并在此基础上提出了“两车半模型”。

研究发现当列车速度接近瑞利波速时或者车轮重复荷载作用频率与路基固有频率接近时,路基振动有明显加剧现象,因此路基的振动问题理应得到重视^[2];随着高铁线路通过采空区、软土地区等不良地基,人们日益关注路基沉降的影响,在“车辆-轨道模

型”的基础上发展为“车辆-轨道-路基耦合作用模型”^[2](图 8)。

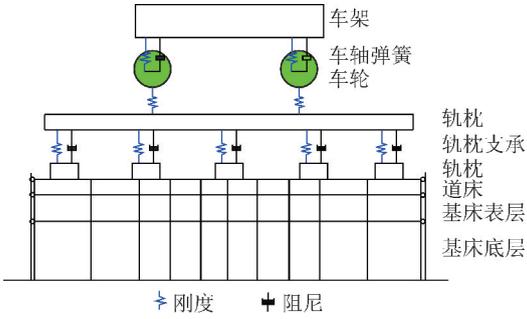


图 8 车辆-轨道-路基耦合作用模型

Fig. 8 Coupling model of vehicle-track-subgrade

1.2 高速铁路路基动力响应现场实测

对于高速铁路路基动力响应的研究,现场实测是最有效、直观的方法。国内外积累了一定的高速铁路路基动力响应实测资料。DEGRANDE 等^[9]对列车以 223~314 km/h 运行时的地基振动进行了现场实测,并结合实测数据绘制了速度时程和频域曲线图,后期获取了地基参数和轨道-地基传递函数等。屈畅姿等^[10]对武广高速某综合试验段路基进行了现场监测,获取了路基在列车动荷载作用下的竖向振动加速度和动应力幅值,得出了该段路基动应力的分布规律。赵国堂等^[11]通过对某新建高速铁路路基 CRTS III 型板式无砟轨道线路进行了现场试验,如图 9 所示。在施工段将测试元件预先埋设于无砟轨道内部,获得了扣件反力以及轨道结构荷载的现场实测数据,并结合试验数据得到了现场无砟轨道车辆荷载横向传递规律。

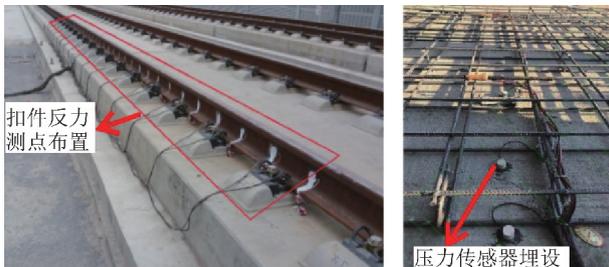


图 9 现场测试元件布置^[11]

Fig. 9 Field test component layout^[11]

1.3 高速铁路路基动力模型试验

在模型试验方面,人们最初是采用等效静荷载代替列车动荷载的。后来随着该领域理论研究的突破和机械制造业的发展,使用激振器来模拟列车动荷载是目前最有效的方式。此外,相似比尺选取的不同将会影响整个试验结果,同时也决定了试验操作的难易程度。

詹永祥等^[12]建立了相似比尺为 1:12 的室内模

型试验,通过激振器来模拟列车荷载,主要研究了无砟轨道桩板结构路基在持续激励荷载下的动力和变形特性。ISHIKAWAI 等^[13]建立了相似比尺为 1:5 的室内铁路路基模型,如图 10 所示。通过模型试验对列车循环动荷载作用下有砟轨道路基的沉降发展规律进行了研究。

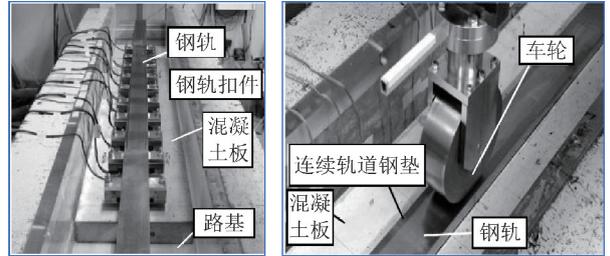


图 10 日本有砟轨道模型试验装置

Fig. 10 Experiment of ballast track in Japan

孔纲强等^[14]建立了相似比尺为 1:5 的桩-筏复合地基模型,如图 11 所示。通过对 X 形桩-筏复合地基施加不同频率的激振力,研究了激振频率对该类型复合地基动力响应。

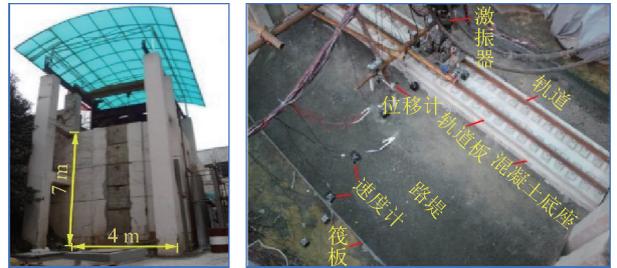


图 11 河海大学 1:5 桩-筏复合地基模型

Fig. 11 1:5 pile-raft composite foundation model of Hohai University

周颖等^[15]建立了相似比尺为 1:4 的轨道-路基模型,如图 12 所示。开展了不同激振频率工况下模型体系的动力试验,测试并分析了路基模型不同位置处的加速度反应等,确定了试验模型体系一阶固有频率。



图 12 同济大学 1:4 无砟轨道路基模型

Fig. 12 1:4 ballastless track subgrade model of Tongji University

SHAER 等^[16]构建相似比尺为 1:3 的室内有砟轨道路基模型,如图 13 所示。试验重点研究了路基的累积沉降与轨枕动加速度的关系。



图 13 法国 1:3 有砟轨道路基模型

Fig. 13 1:3 model of ballasted track subgrade in France

边学成等^[17]创造性地提出了“假车真路”的想法,建立了相似比尺为 1:1 的铁路基试验平台,如图 14 所示。该平台可以模拟最高时速 360 km/h 列车对路基的动力荷载,重点研究了高速铁路基内部动应力放大效应及沿深度衰减规律等。



图 14 浙江大学 1:1 无砟轨道路基试验平台

Fig. 14 1:1 Ballastless track subgrade test platform of Zhejiang University

王启云等^[8]建立了相似比尺为 1:1 的室内高速铁路-路基模型,如图 15 所示。通过采用 5 个作动器联动加载有效地模拟了列车动荷载。为了得到作动器的输入时程曲线,先通过数值模拟计算得到了扣件反力的时程曲线,然后将该曲线通过叠加和傅里叶变换进行导出。



图 15 中南大学 1:1 无砟轨道模型试验平台

Fig. 15 1:1 Ballastless track model test platform of Central South University

1.4 高速铁路路基数值模拟

一般对有条件进行试验的,尽量采用模型试验法,然后利用数值模拟进行对照检验。对于一些受多种因素影响且材料复杂、几何形状不规则的模型往往难以进行试验,对此数值模拟却可以有效地解决。在高速铁路路基动力学问题研究中,数值模拟常常采用有限元法,目前比较流行的有限元数值建模软件有: ABAQUS, ANSYS, FLAC^{3D}, Midas/GTS NX 等。

为了研究高速铁路列车动荷载与路基系统的相互作用机理,董亮等^[18]借助 ABAQUS 有限元软件合理地导入三维一致黏弹性人工边界,建立了无砟轨道-路基三维有限元模型,并将计算结果与现场试验数据对比,验证了人工边界和参数取值的合理性与可靠性。宋小林等^[19]借助 ANSYS 有限元软件建立了高速铁路无砟轨道-路基结构动力三维有限元模型,研究了高铁动荷载作用下轨道和路基垂直位移的分布规律,并比较了轨道不平顺性和断面位置位移分布的影响规律。郭志广等^[20]在武广高速铁路某段无砟轨道路基典型断面进行了动力特性现场试验,并利用了 FLAC^{3D} 软件建立了 CRH2 型列车相邻转向架荷载作用下的无砟轨道-路基三维有限差分模型,结果表明基于该软件的人工边界处理以及使用激振力函数模拟列车的动荷载作用是可行的。何国辉等^[21]利用 Midas/GTS NX 有限元软件建立了高速铁路地基-地裂缝-路堤动力三维动力耦合模型,重点分析了高铁动荷载作用下有、无地断裂带天然地基上的路基动力响应规律。

综上所述,对于高速铁路路基动力学研究,从理论模型上,体系逐渐完善,从最初的最简单轨道模型发展为“车辆-轨道-路基耦合作用模型”;从现场监测上,监测仪器更加多元化、智能化和精确化,监测内容更加广泛;从模型试验上,从开始大比尺的小模型试验逐渐发展成实尺的大模型试验,并且采用更加有效的高铁动荷载加载措施,使得试验结果更加可靠,更接近真实情况;在数值模拟上,各大有限元软件均

可以有效地模拟高速铁路路基的动力响应,并可以得出合理的结果来说明相应的科学问题。

2 采空区地表变形的研究

2.1 采场覆岩及地表移动变形理论

采场覆岩及地表移动变形问题的研究目前主要是理论分析、经验数据和数值模拟三者相结合。实际采场覆岩及地表范围大,且研究的地层人们又难以直接的观测。一般通过一定的假设以及简化来解决实际工程中遇到的问题,其中大部分采取半经验半理论的方法^[22]。

起初,许多国内外学者对开采塌陷进行了大量的调查,并结合自己的调查和研究相继得出了相应的理论,如国外的“垂线理论”“法线理论”“拱形理论”“分带理论”“悬臂梁理论”以及后来的影响函数等。刘宝琛等^[23]在开采沉陷研究中率先引入概率积分法。钱鸣高等^[24]对采场上覆岩层的结构形态进行研究时,提出了采场上覆岩层“砌体梁”结构力学模型,后来发展为“关键层理论”。钱鸣高等^[25]再论煤炭的科学开采时,提到“开采沉陷的本质是力学问题,是块体运动和散体运动综合的结果”。郝延绵等^[26]假设采场上覆岩层为弹性薄板,建立了预计开采沉陷的模型。郭文兵等^[27]提出了基于覆岩破坏传递过程的覆岩破坏充分采动程度判据及其高度计算方法,揭示了高强度开采覆岩“两带”破坏模式的形成机制。

2.2 采空区地表变形现场监测

对于采空区地表变形的研究,为了可以客观地发现采空区地基的变形规律,人们往往会首选现场观测法。相对而言,该方法是最直接和准确的研究方法之一,同时为很多治理措施的实施和研究结论的得出提供了依据。然而该方法也有不足之处,如观测过程复杂、测试成本高、观测周期长等。

国内外学者对于开采所引起的地表沉陷进行了一定的现场监测。20 世纪 50 年代起,为了长期监测由开采引起的地表沉陷,我国相继在各大矿区建立了地表监测站,其中包括阜新、淮南和抚顺等主要矿区。O'CONNOR 和 MURPHY^[28]基于时域反射测量原理(TDR),研制了一种传感器。并用于监测加拿大某废弃金矿顶柱的稳定性,以及美国某废弃煤矿的地层稳定性。该装置还在新校舍选址过程中得到较好的运用。KOHLI^[29]对美国 Mary Lee 废弃煤矿进行了地下调查,通过钻探和地下摄像机技术获取采空区相关地质信息,分析了地表沉降的顺序和影响因素。SHEOREY 等^[30]获取了印度各大煤田的地表沉降结果,基于大多印度煤矿开采处于浅层到中等覆盖

层的情形下,给出了不连续沉降界限;并运用新的一种影响函数法来模拟沉降非对称性和提取边缘的影响。陈盼等^[31]通过对陕西某煤矿工作面地表移动的现场监测数据的分析,对比了工作面覆岩中有无采空区时的地表移动参数的异处,并结合相关理论对该处重复开采下地表移动规律的差异性进行了说明。宋许根等^[32]以程潮铁矿西区为研究对象,采用采场顶板崩落钻孔监测和崩落区高密度电法勘探等手段,分析了该区顶板崩落特征和采矿初期地表塌陷机制,探讨了采空区地表变形规律。

地表变形监测手段由传统的沉降仪、水准仪、地表移动观测站等直接测量仪器逐渐地更新为无线或电磁为媒介的测量手段。於永东等^[33]建立了基于 BDS 和 GPS 双系统的采空区地表沉降远程监测预警系统,主要针对抚顺市采空区地表沉降频发点进行长期监测,该系统达到了设计的 5 mm 沉降的监测指标。BDS 采空区监测系统及监测基站,如图 16 所示。

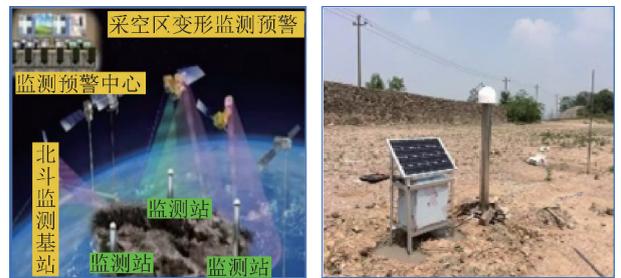


图 16 BDS 采空区监测系统及监测基站

Fig. 16 BDS goaf monitoring system and monitoring base station

2.3 开采沉陷模型试验

对于开采沉陷问题的研究,由于地层的复杂性,相似模型试验往往只能针对某种特定的工况进行模拟,试验过程中往往会简化一些地层模型,忽略一些影响因素。模型试验可以与现场监测数据及数值模拟进行比较分析,不能作为惟一参照。但模型试验可以为研究者提供宏观的自然现象和物理规律,这是其优点所在。

刘义新^[34]采用相似理论和光弹性模拟实验方法,建立几何相似比为 1 : 1 000 相似模型,如图 17 所示。对覆岩弹性模量、松散层厚度、开采厚度、开采深度及条带开采留宽等主要因素与深部条带开采地表移动规律之间的关系分别进行了模拟研究。

赵建军等^[35]以贵州马大岭某处自然边坡为研究原型,建立室内几何相似比为 1 : 200 的假三维地质力学模型,如图 18 所示。研究了缓倾斜煤层采场上覆岩层的变形规律,分析了采动滑坡变形破坏机理。

孙利辉等^[36]通过破碎岩石压缩试验、岩石崩解



图 17 漫射式光测弹性仪及 1 : 1 000 的土层模型

Fig. 17 Diffuse photoelasticity instrument and 1 : 1 000 soil model

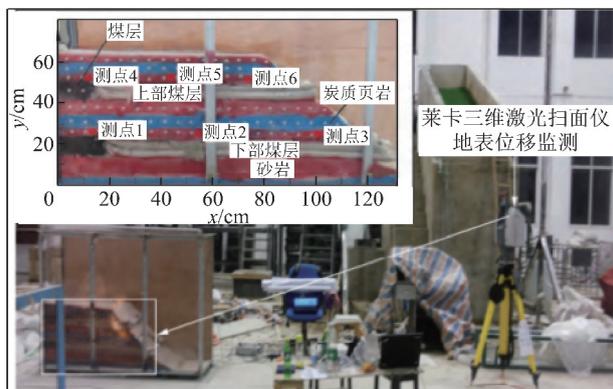


图 18 1 : 200 假三维地质力学模型

Fig. 18 1 : 200 Pseudo 3D geomechanical model

试验以及建立室内几何相似比为 1 : 100 相似模型试验,如图 19 所示。研究了不同类型岩石的破碎、崩解性能,分析了岩石的变形过程和特征,最后通过相似模型试验的结果证明了理论分析的合理性。



图 19 1 : 100 平面模型及三维光学摄影测量

Fig. 19 1 : 100 Plane model and 3D optical photogrammetry

李东阳等^[37]通过建立几何相似比为 1 : 100 的室内三维立体采空区模型,如图 20 所示。采用砌筑法进行铺模,通过对岩层逐级加载并监测岩层地表的位移、顶板与矿柱的应变,同时利用内窥镜拍摄了矿柱与顶板的破坏过程,并得出了相应的变化规律。

2.4 采场覆岩及地表移动变形的数值模拟

对于采场覆岩及地表移动变形的数值模拟常用的是有限元法、有限差分法和离散元法等。汪吉林等^[38]运用 FLAC^{3D} 数值模拟软件建立了多层状、宽缓

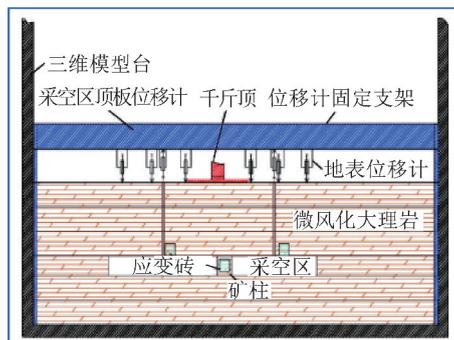


图 20 1 : 100 室内三维立体模型

Fig. 20 1 : 100 Indoor 3D model

褶皱的地质三维模型,通过模拟得到了研究区的垂向位移、隧道径向和切向应力等,并验证了理论计算的结果。韩森等^[39]利用 MIDAS/GTS 有限元软件对近塌陷区矿山公路在地下开采过程中的沉降规律及安全性进行了数值模拟研究,为塌陷区的有效治理提供了理论数据。高建良等^[40]借助基于连续介质力学的离散元软件 CDEM,重点研究了采空区“三带”分布范围及变形规律。张向东等^[41]借助 ADINA 非线性有限元软件建立了公路路基-采空区三维模型,并重点分析了煤层倾角、开采深厚比以及路基与采场空间位置等影响因素对高速公路路基稳定性的影响,最后利用 MATLAB 软件设计出预测程序。黄平路等^[42]结合有限元软件 ANSYS 和离散元软件 UDEC 对金山店铁矿进行了数值模拟,分析了考虑有民采和无民采两种情况下的地表变形规律和矿体围岩移动规律。王树仁等^[43]结合 MIDAS/GTS 和 FLAC^{3D} 两种有限元软件建立了采空区场地桥隧工程三维计算模型,并通过数值计算,研究了下伏采空区桥隧施工过程中的相关力学响应及变形特征。

总之,对于采场覆岩及地表移动变形的研究,从理论解析上,从当初的比较单一、简单的理论基础逐渐发展成更深层、更细化和更统一的科学体系,可以更好地解释实际问题;从现场监测上,发展至今,采空区地表变形监测技术越来越向综合化、智能化、精确化方向发展;从模型试验上,开采沉陷

相似模型试验开始引入光学电子仪器等超高精度测量手段,逐渐从准平面应变二维模型发展为三维立体模型;从数值分析上,随着计算机软件的快速更新,人们开始结合各大数值计算软件的优点来计算相关的数值模型,这在目前是一个比较流行、实用且有效的手段。

3 高速铁路采空区场地路基变形研究

3.1 高速铁路列车动荷载传递及分布规律

3.1.1 车辆荷载纵向分布及传递规律

车轮荷载以集中力形式作用于连续钢轨上,钢轨作用于离散的扣件之上。通过研究扣件作用反力可以有效地说明高速铁路车辆荷载的纵向分布及传递规律。连续梁结构受集中力作用,对于超静定结构体系计算支撑反力,需要知道未知量数量,然后通过相应位移法或力法解析多元平衡方程。计算出承担车轮荷载的扣件数量以及各扣件荷载分担比是研究该问题的关键。车轮集中力作用位置处的钢轨变形最大,主要表现在扣件弹性垫层的压缩量最大,以及正下方或距离最近的扣件所承担的车轮荷载占比最大;钢轨变形量向作用点两侧递减,但非无限传递,研究发现传递到两侧一定数量的扣件出现拐点,有扣件开始受拉力作用^[44]。高铁运行速度快且多车轮作用于钢轨上,相邻车轮荷载的叠加效果非常明显,以单车轮为研究对象很显然不能符合实际工程情况。赵国堂等^[11]通过实测和数值仿真相结合,研究发现同一转向架两车轮荷载叠加效果明显,其主要体现在两车轮之间的扣件反力有所增加。同一车厢相邻转向架车轮荷载叠加效果可忽略不计,但相邻车厢相邻转向架车轮荷载存在一定的叠加效应。

3.1.2 车辆荷载横向分布及传递规律

限于轨道路基结构设计,实际工程高速铁路路基结构几何形状一般成梯形。车辆荷载作用于轨道板及混凝土支座,向下传递至路基结构,最后再作用于地基。由于路基等构筑物几何尺寸的限制,车辆荷载横向分布规律一定且传递是有限的。在轨道板底面,荷载在横向上呈典型的双峰型分布;在混凝土支座板底面,荷载在横向上呈 M 型分布。2 者最大峰值相差较大,但对于混凝土底座板底面压应力大小横向分布相对平缓,在设计相关路基及地基承载力时,一般可以将车辆荷载及基床以上结构自重视为等效均布力考虑。

3.1.3 车辆荷载竖向分布及传递规律

研究路基顶面动应力强度和动应力在路基内部的衰减规律是路基设计的关键所在。对于路基内部各结构层动应力水平的影响,除了高铁车辆设计轴重

以及轨道不平顺性外,主要还有列车运行速度以及轨道路基结构材料的影响。其中列车运行速度的影响效果明显,在一定的速度(150~300 km/h)范围内,路基动应力随车速线性增长,在这范围之外则路基动应力与车速无关^[44]。路基动应力大小受外界因素增大同时,还受路基内在结构的影响向下呈衰减规律。陈云敏院士和边学成教授等研究发现,有砟轨道路基和无砟轨道路基动应力衰减系数相差较大,在深度 3 m 同一位置处,无砟轨道路基动应力衰减 50%,而有砟轨道路基衰减可达 80%。由此可见,无砟轨道路基动应力受车速影响较大,且影响范围更广。一般高速铁路路基结构动应力在其路基内部已经大部分消耗,有一小部分传递至地基一定范围,也就是临界边界。研究表明,高速铁路路基受列车密集动荷载长期作用下,临界边界外部的地基土受到的动应力不会引起土体的过大累积沉降,而且很快能恢复稳定状态^[44]。

3.2 高速铁路路基工后沉降相关要求

我国高速铁路大多使用无砟轨道结构,为了满足相应的结构设计和安全运行的要求,其工后沉降不宜超过 15 mm;路桥和隧道等过渡段处的工后差异沉降严格控制在 5 mm 之内。对于有砟轨道正线路基工后沉降符合表 1 的规定^[45]。

表 1 有砟轨道正线路基工后沉降控制标准

Table 1 Standard for settlement control after subgrade construction of ballasted track

设计速度/ (km · h ⁻¹)	一般地段工 后沉降/cm	桥台台尾过渡段 工后沉降/cm	沉降速率/ (cm · a ⁻¹)
250	≤10	≤5	≤3
300,350	≤5	≤3	≤2

3.3 采空区地基与高速铁路路基相互作用机理浅析

3.3.1 采空区地基“活化”变形对高速铁路路基的作用

采空区地表有“两移动”和“三变形”,其中包括竖向沉降、水平移动、倾斜、曲率和水平变形。随着采空区地表移动和变形发生的同时,也在影响采空区场地高速铁路路基的稳定性。当高速铁路路基处于采空区场地不同位置时,其受到采空区地表变形影响效果不同。

(1) 当高速铁路路基处于采场上方正中间位置时,路基底面中间处相对两侧沉降略大,不均匀沉降相对较小,高铁路基以整体沉降为主;由于弯曲作用会使路基两侧产生相对压应力,可能导致路基或者基床上部结构隆起变形,如图 21 所示。

(2) 当高速铁路路基处于采场上方边缘时,靠近

采场中心路基一侧相对远离采场中心一侧沉降量大,致使高速铁路路基内部结构应力发生变化,表现为路基向采场中心一侧倾斜或者路基整体向该侧滑动,如图22所示。

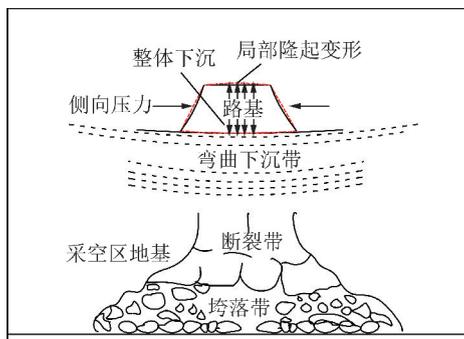


图21 路基位于采场上方正中心位置

Fig. 21 Subgrade is located in the square center of the slope

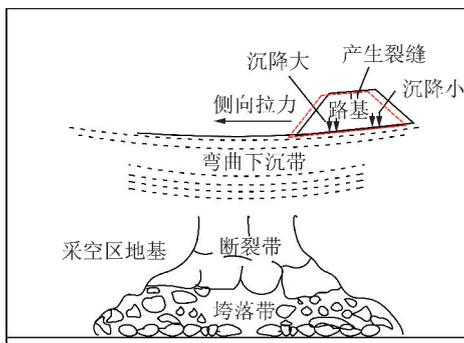


图22 路基位于采场上方边缘位置

Fig. 22 Subgrade is located at the upper edge of slope

以上2种作用致使路基直接发生破坏,然而路基还存在临界状态和稳定状态。采空区地表产生不均匀变形时,路基与地基交界面也可能出现离层现象,此时路基底面可能处于承载能力极限状态,随着伴有列车荷载作用,会打破此时的极限平衡状态致使路基产生移动与变形,从而影响高铁安全运行。当采空区地表变形与列车动荷载同时作用下变形总值不大于路基变形最大允许值时,视路基处于稳定状态,可以正常使用。

3.3.2 高速铁路路基荷载对采空区地基的作用

采空区地基下方存在受开采破坏的垮落带和断裂带,两带岩层的承载力和抗干扰能力相对较差。高铁动荷载在路基内部结构中向下传递且呈衰减规律,大部分动应力被路基消耗,还有一小部分传递至采空区地基。列车密集荷载长期作用下路基及采空区地基难免会发生累积沉降变形,然而采空区地基中的一部分动应力并非无限向下传递,超过一定边界的动应力对地基土不会产生过多的累积变形,土体会很快恢复稳定状态,称该边界为路基土体产生循环累积沉降的临界边界。腾永海等^[46]以建筑物荷载的影响深度

是否达到垮落断裂带的发育高度为原则来确定住宅楼的层数。对于高速铁路路基对采空区地基的作用效果也有类似的如下3种情况:

(1)路基土体产生循环累积沉降的临界边界与垮落断裂带顶边界相离,这种情况路基不会影响采空区地基的稳定性。如图23所示,其中, P 为土的自重应力。

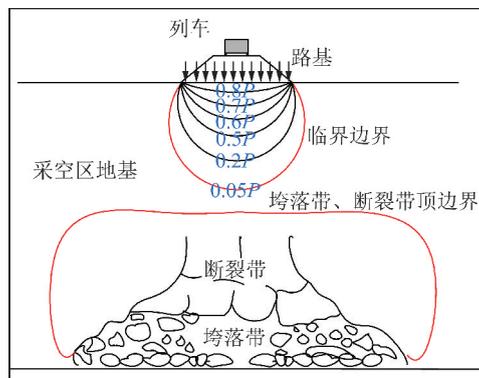


图23 临界边界与垮落带、断裂带顶边界相离

Fig. 23 Critical boundary is separated from the top boundary of the collapsed zone and fracture zone

(2)路基土体产生循环累积沉降的临界边界与垮落断裂带顶边界相切,这种情况采空区地基处于临界平衡状态。如图24所示。

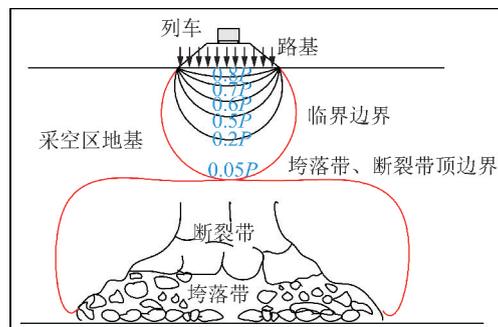


图24 临界边界与垮落带、断裂带顶边界相切

Fig. 24 Critical boundary is tangent to the top boundary of the collapsed zone and fracture zone

(3)路基土体产生循环累积沉降的临界边界与垮落断裂带顶边界相交,这种情况采空区地基产生活化变形,路基会受活化变形的影响。如图25所示。

3.4 采空区场地高速铁路路基变形问题的可行性研究手段

3.4.1 采用综合评价法预先评估采空区场地建设高铁的可行性

在综合评价方面,目前主要采用现代模糊数学理论构建系统安全的评价理论和评价模型框架。韩科明等^[47]基于模糊综合评判方法对姚桥煤矿西三采空塌陷区进行了稳定性评价,通过结合定性和

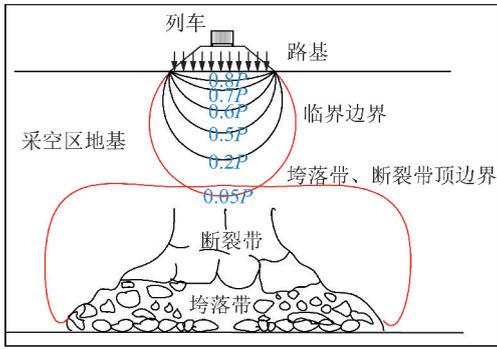


图 25 临界边界与垮落断裂带顶边界相交

Fig. 25 Intersection of critical boundary and top boundary of collapse zone and fracture zone

定量分析使整个评价过程趋向定量化的计算和分析,使评价结果更趋向科学合理;张俊英^[48]将采空区场地建筑物拟建情况视为影响因子,通过模糊数学理论提出了采空区地表建筑物地基稳定性综合评价,并通过 3 个工程实例加以验证;杨峰等^[49]考虑了水文地质和采空区自身因素还考虑了车辆荷载、采空区沉降因素以及停采时间等影响因子,为武云高速采空区建设场地的安全运营提供了科学的 II 级模糊综合评价模型。以上学者分别对煤矿沉陷区、采空区地表建筑物地基以及采空区高速公路建设场地的稳定性进行了综合评价。该评价体系开始逐渐考虑建筑物静荷载和交通动荷载等影响因子,如果考虑高铁动荷载、路基结构和采空区条件等多级影响因素,为此构建多级模糊综合评价模型,对高速铁路采空区场地路基进行稳定性评价不失为一种方便有效的科学研究方法。

3.4.2 运用力学解析法得出采空区场地高铁动荷载最大估计影响深度

相对于采空区地基,假设高速铁路路基可以简化为条形基础,高速铁路车辆荷载可以简化为等效均布力。此类情况可视为采空区地基受条形面积竖向均布荷载作用,该均布荷载为移动均布荷载。

(1)当地基受竖向集中力作用,地基中任一点竖向附加应力为

$$\sigma_z = \frac{3pz^3}{2\pi R^5} \quad (1)$$

式中, σ_z 为地基中深度为 z 、到集中力 p 作用点的距离为 R 处的竖向附加应力。

(2)当地基受到条形面积竖向均布荷载作用,将式(1)进行积分求解得到地基中任一点竖向附加应力为

$$\sigma_z = \frac{2}{\pi} \left(\frac{2n}{1+4n^2} + \arctan \frac{1}{2n} \right) p \quad (2)$$

式中, $n = \frac{z}{b}$, b 为条形基础宽度。

(3)对于采空区地基,当地基中的竖向附加应力为地基土自重应力的 10% 时,则竖向附加应力对该深度处的地基岩土层压缩变形影响很小,该深度为地基受压层深度^[50]。受压层以下的岩土层中竖向附加应力很小,对地基的变形影响可忽略不计。考虑到高速铁路路基工后沉降相关的严格要求以及采空区地基“活化”变形问题的复杂性,建议采用地基中竖向附加应力等于自重应力的 5% 作为附加应力对采空区地基“活化”变形影响可忽略不计的标准,来确定采空区场地高速铁路动荷载扰动深度 D_z 。

(4)设地基岩土容重 γ ,则深度为 z 处的地基岩土自重应力 σ_{cz} 为

$$\sigma_{cz} = \gamma z \quad (3)$$

$$\sigma_z = 0.05\gamma D_z \quad (4)$$

结合式(2)~(4)可推导出最大扰动深度估计 D_z 为

$$D_z = \frac{40}{\gamma\pi} \left(\frac{2n}{1+4n^2} + \arctan \frac{1}{2n} \right) p \quad (5)$$

对于推导采空区场地高速铁路动荷载最大扰动深度估计公式,如何确定高速铁路基底面的动应力是该推导的关键。目前我国现有的标准路基设计动应力幅值 σ_{dl} 计算公式为

$$\sigma_{dl} = 0.26P'(1+\alpha v) \quad (6)$$

式中,车速 v 为 300~350 km/h 时, $\alpha = 0.003$;车速 v 为 200~250 km/h 时, $\alpha = 0.004$; P' 为列车静轴重, $(1+\alpha v)$ 为冲击系数,其中, α 为取值系数, v 为列车速度。客运专线铁路最大冲击系数为 1.9。

3.4.3 现场监测、相似模型试验及数值模拟 3 种研究方法协同论证

对于高速铁路采空区场地路基变形的研究,不仅要考虑列车动荷载的影响,还要考虑采空区地基与路基的相互作用。该问题的研究影响因素众多,很难通过单一的研究手段去做精细化研究。目前除了理论分析外,现场监测、模型试验以及数值模拟该 3 种研究手段受到广大科研人员的青睐。3 种研究手段都有各自的优缺点,只有相互结合才能得到更为科学的结论去说明问题。程谦恭团队的李传宝^[51]、梁鑫^[52]以及郑志龙^[53]为了研究高速铁路采空区桩板结构复合路基的变形问题分别进行了相似模型试验、数值模拟和现场监测。结合 3 种研究手段,得出了该桩板结构在采空区地基中的作用规律和受力机理,并验证了桩加固可以有效的限制采空区巷道顶板的变形,进而控制了上方高速铁路路基的变形。

4 高速铁路采空区地基治理技术

在高速铁路线路进行规划时,一般遵循避开采空区等不良地基的原则。在高速铁路关键线路的铺设不得经过采空区时,必须对高速铁路采空区地基进行预先勘查,对其覆岩稳定性进行分析和评价。然后

针对高速铁路采空区地基的特征、水文地质及工程地质条件、工程类型及其重要程度等,选择合理的高速铁路采空区地基的治理方案。对于采空区地基治理技术目前主要有:强夯法、穿越法、跨越法、砌筑法、注浆法和剥挖法。如图 26 所示,为高速铁路采空区地基治理对策及路基抗变形措施。

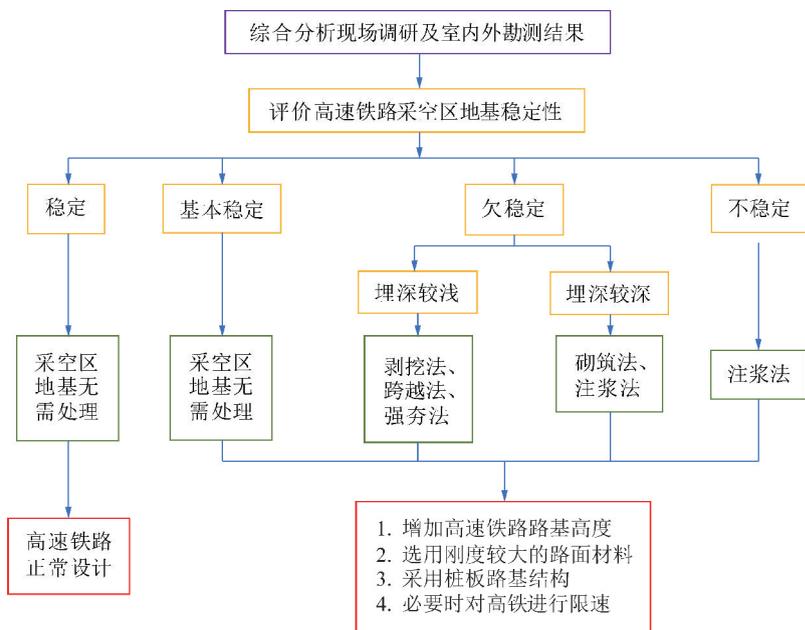


图 26 高速铁路采空区地基治理对策路基抗变形措施

Fig. 26 Subgrade anti-deformation measures for high-speed railway goaf ground treatment countermeasures

在选择高速铁路采空区地基治理时,一般应遵守以下原则:①在保证行车安全的基础上,方案要经济适用;②方案的选取必须综合考虑采空区地质条件、路基结构及现场施工情况等。贵东南某高速铁路 D2K93+300~D2K94+000 段为主要的煤矿采空区影响区域,通过现场勘察,采空区有深度不同,对于浅层采空区以线路中心两侧各 25 m 进行地面浅孔注浆加固。处理深度 20~30 m,形成沿线路两侧浅、中间深的硬壳;对于中、深部采空区则采用石骨料充填及高压注浆加固方法。合肥-福州高速铁路五府山车站段根据现场勘察,该地段有浅层采空区,深度一般为 15~30 m,其中主要为巷道和风井;同时根据历史资料查证,该地段采空区主要从民国时期开始形成。对于现场治理措施,该地段采空区地基主要采用了穿越法,利用钻孔灌注桩穿过采空区巷道。太原-焦作高速铁路 DK259+135.95~DK259+710.00 段,经过现场钻探揭露,发现大面积采空区和岩溶区,勘测采空巷道理深平均 40~50 m,多数采空区为不稳定顶板。现场采用注浆法治理,对于采空区采用水泥粉煤灰浆,岩溶区则采

用水泥浆为主的单液注浆材料,治理后取得很好的效果。

5 问题与展望

5.1 存在问题

综上所述,高速铁路采空区路基变形问题涉及的领域广泛,至今难以形成一个较为完整的体系。针对此方面的研究,虽然国内外研究取得了一定的进展,但依旧还有许多问题亟待解决:

(1) 高铁动荷载作用下采空区路基最大扰动深度尚未得到更合理的预计。采空区场地剩余变形对采空区场地高速铁路路基的作用机理缺乏研究,尚不清晰。

(2) 虽然国内外积累了一定的高速铁路路基动应力现场监测数据和采空区地表沉陷监测数据,但在列车循环动荷载作用下高速铁路采空区地基变形的现场监测资料非常少。

(3) 列车动荷载作用下高速铁路采空区地基的本构模型的研究甚少,国内外一般采用其他方面的本构模型,是否合适并没有做详细的论证。

(4)在模型试验方面,现在多将列车动荷载等效为静力荷载施加,这种方法忽略了列车动荷载的频率特性、时间特性、动荷载使土层发生软化特性等。在制作采空区模型时,由于科研项目时间有限,很多忽略时间效应,忽略采空区场地的剩余变形。

(5)高速铁路采空区地基变形控制技术的实用成果较少,没有形成较为系统的治理体系。一般在实际工程采取经验措施,没有经过详细的论证和计算,缺乏安全性且造成不必要的资源浪费。

5.2 展 望

笔者通过对高速铁路路基动力学和开采沉陷学的研究方法进行了简要回顾,结合 2 者的研究方法和思路总结了高速铁路采空区场地路基变形控制问题研究方法以及治理技术,提出以下研究展望:

(1)采空区场地高速铁路路基变形 s 由 4 部分组成,分别为:采空区地基附加变形 s_1 、工程开工后采空区场地剩余变形 s_2 、采空区地基活化变形 s_3 、高速铁路路基变形 s_4 ,公式为 $s = s_1 + s_2 + s_3 + s_4$ 。开展 4 种变形的精准化、理论化研究,为采空区场地高速铁路路基变形分析提供理论支撑。

(2)基于高速铁路采空区地基的现场调研,应预先提出采空区的地质概化模型,研究采场覆岩及地表移动变形的时空演化规律,形成采空区场地剩余变形的精确预测理论。

(3)利用综合集成研究方法,加强研究列车动荷载作用下高速铁路采空区场地路基变形演化机理与规律,构建采空区地基活化判据及评价体系。

(4)结合 5G 技术构建“天-空-地-深”一体的动态智能预警网络平台,形成高速铁路安全运维预警的理论框架。

(5)由“车辆-轨道-路基”耦合模型发展为“车辆-轨道-路基-采空区地基”耦合模型,加强理论模型的研究。确定高速铁路采空区场地路基变形类型划分标准,提出快捷精准辨识方法,形成高速铁路长期安全运维的有害变形控制方法和灾变防控体系。

参考文献 (References):

[1] 中华人民共和国行业标准编写组. 采空区公路设计与施工技术细则 (JTG/T D31-03-2011) [S]. 北京:人民交通出版社,2011.

[2] 刘学毅,王平. 车辆-轨道-路基系统动力学 [M]. 成都:西南交通大学出版社,2010.

[3] JENKINS H H, STEPHENSON J E, CLAYTON G A, et al. The effect of track and vehicle parameters on wheel/rail vertical dynamic forces [J]. *Railway Engineering Journal*, 1974, 3(1): 2-16.

[4] SATO Y. Abnormal wheel load of test train [J]. *Permanent Way (Tokyo)*, 1973, 14(53): 1-8.

[5] 翟婉明. 车辆-轨道耦合动力学 (第 3 版) [M]. 北京:科学出版社,2007.

[6] 翟婉明,孙翔,詹斐生. 机车车辆与轨道垂向相互作用的计算机仿真研究 [J]. *中国铁道科学*, 1993, 14(1): 42-50.
ZHAI Wanming, SUN Xiang, ZHAN Feisheng. Computer simulation of the vertical dynamic interactions between track and trains [J]. *China Railway Science*, 1993, 14(1): 42-50.

[7] 周广新,周颖. 车辆-轨道-路基垂向耦合模型研究综述 [J]. *结构工程师*, 2015, 31(6): 190-199.
ZHOU Guangxin, ZHOU Ying. State-of-the-art of the vehicle-track-subgrade model of vertical coupled system [J]. *Structural Engineers*, 2015, 31(6): 190-199.

[8] 王启云,张家生,孟飞,等. 高速铁路轨道路基模型及动力加载研究 [J]. *铁道学报*, 2012, 34(12): 90-95.
WANG Qiyun, ZHANG Jiasheng, MENG Fei, et al. Study on track-subgrade model of high-speed railway and dynamical loading [J]. *Journal of the China Railway Society*, 2012, 34(12): 90-95.

[9] DEGRANDE G, SCHILLEMANS L. Free field vibrations during the passage of a Thalys high-speed train at variable speed [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2001, 247(1): 131-144.

[10] 屈畅姿,王永和,魏丽敏,等. 武广高速铁路路基振动现场测试与分析 [J]. *岩土力学*, 2012, 33(5): 1451-1456.
QU Changzi, WANG Yonghe, WEI Limin, et al. In-situ test and analysis of vibration of subgrade for Wuhan Guangzhou high-speed railway [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2012, 33(5): 1451-1456.

[11] 赵国堂,张鲁顺,赵磊. 高速铁路 CRTS III 型板式无砟轨道车辆荷载横向传递规律研究 [J]. *北京交通大学学报*, 2019, 43(1): 7-17.
ZHAO Guotang, ZHANG Lushun, ZHAO Lei. Study on lateral transmission law of vehicle load on CRTS III ballastless track of high-speed railway [J]. *Journal of Beijing Jiaotong University*, 2019, 43(1): 7-17.

[12] 詹永祥,蒋关鲁,牛国辉,等. 高速铁路无砟轨道桩板结构路基模型试验研究 [J]. *西南交通大学学报*, 2007, 42(4): 400-403.
ZHAN Yongxiang, JIANG Guanlu, NIU Guohui, et al. Model test research on pile slab structure Subgrade of high speed railway ballastless track [J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2007, 42(4): 400-403.

[13] ISHIKAWAI T, SEKINEIHA E, MIURA S. Cyclic deformation of granular material subjected to moving-wheel loads [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2011, 48(5): 691-703.

[14] 孔纲强,孙广超,刘汉龙,等. 不同激振频率下现浇 X 形桩桩-筏复合地基模型试验研究 [J]. *岩土力学*, 2017, 38(5): 1379-1384.
KONG Gangqiang, SUN Guangchao, LIU Hanlong, et al. Experimental study of XCC pile-raft composite foundation under different excitation frequency [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2017, 38(5): 1379-1384.

[15] 周颖,陈瑾. 轨道-路基体系一致动力相似设计方法与动力试验 [J]. *同济大学学报 (自然科学版)*, 2019, 47(6): 815-841.
ZHOU Ying, CHEN Jin. Uniform similitude method and experimental study for the track-subgrade system [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2019, 47(6): 815-841.

- [16] Al SHAER A, DUMAHEL D, SAB K, et al. Experimental settlement and dynamic behavior of a portion of ballasted railway track under high speed trains[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2008, 316:211-233.
- [17] BIAN X C, JIANG H G, CHEN Y M, et al. A full-scale physical model test apparatus for investigating the dynamic performance of the slab track system of a high-speed railway[J]. *Journal of Rail and Rapid Transit*, 2016, 230(2):554-571.
- [18] 董亮, 赵成刚, 蔡德钧, 等. 高速铁路无砟轨道路基动力特性数值模拟和试验研究[J]. *土木工程学报*, 2008, 41(10):81-86.
DONG Liang, ZHAO Chenggang, CAI Degou, et al. Experimental validation of a numerical model for prediction of the dynamic response of ballastless subgrade of high-speed railways[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2008, 41(10):81-86.
- [19] 宋小林, 翟婉明, 王少林. 高速铁路无砟轨道基础结构垂向位移分布特性分析[J]. *土木工程学报*, 2012, 45(5):162-168.
SONG Xiaolin, ZHAI Wanming, WANG Shaolin. Vertical displacement distributions of ballastless track infrastructure of high-speed railways[J]. *China Civil Engineering Journal*, 2012, 45(5):162-168.
- [20] 郭志广, 魏丽敏, 周镇勇, 等. 高铁路基动力数值模拟和现场试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2013, 40(5):51-56.
GUO Zhiguang, WEI Limin, ZHOU Zhenyong, et al. Numerical simulation and field test of dynamic stress of high-speed railway foundation[J]. *Hydrogeological Engineering Geology*, 2013, 40(5):51-56.
- [21] 何国辉, 黄强兵, 王涛, 等. 高铁路基正交跨越地断裂带动力响应数值分析[J]. *工程地质学报*, 2019, 28(1):149-157.
HE Guohui, HUANG Qiangbing, WANG Tao, et al. Numerical analysis of dynamic response of high-speed railway subgrade orthogonally crossing ground fissure zone[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2019, 28(1):149-157.
- [22] 高广运, 聂春晓, 周同和. 动荷载作用下采空区地表变形研究综述[J]. *地下空间与工程学报*, 2014, 10(2):1964-1969.
GAO Guangyun, NIE Chunxiao, ZHOU Tonghe. Current research state of ground deformation associated with mined-out regions under dynamic loads[J]. *Journal of Underground Space and Engineering*, 2014, 10(2):1964-1969.
- [23] 刘国琛, 廖国华. 煤矿地表移动的基本规律[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965.
- [24] 钱鸣高. 采场围岩控制理论与实践[J]. *矿山压力与顶板管理*, 1999(3):12-15.
QIAN Minggao. Theory and practice of surrounding rock control in stope[J]. *Mine Pressure and Roof Management*, 1999(3):12-15.
- [25] 钱鸣高, 许家林, 王家臣. 再论煤炭的科学开采[J]. *煤炭学报*, 2018, 43(1):1-13.
QIAN Minggao, XU Jialin, WANG Jiacheng. Further on the sustainable mining of coal in China[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(1):1-13.
- [26] 郝延锦, 吴立新, 戴华阳. 用弹性板理论建立地表沉降预计模型[J]. *岩石力学与工程学报*, 2006, 25(S1):2958-2962.
HAO Yanjin, Wu Lixin, DAI Huayang. Establishing a ground settlement prediction model with elastic slab theory[J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2006, 25(S1):2958-2962.
- [27] 郭文兵, 白二虎, 赵高博. 高强度开采覆岩地表破坏及防控技术现状与进展[J]. *煤炭学报*, 2020, 45(2):509-523.
GUO Wenbing, BAI Erhu, ZHAO Gaobo. Current status and progress on overburden and surface damage and prevention technology of high-intensity mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(2):509-523.
- [28] O'CONNOR K M, MURPHY E W. TDR monitoring as a component of subsidence risk assessment over abandoned mines[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1997, 34(3-4):230.
- [29] KOHLI K K. Investigation of subsidence event over multiple seam mining area[A]. *Proceedings of the 11th International Conference on Ground Control in Mining*[C]. Wollongong: 1992:462-467.
- [30] SHEOREY P R, LOUI J P, SINGH K B, et al. Ground subsidence observations and a modified influence function method for complete subsidence prediction[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2000, 37(5):801-818.
- [31] 陈盼, 谷栓成, 张幼振. 浅埋煤层垂向重复采动下地表移动规律实测研究[J]. *煤炭科学技术*, 2016, 44(11):173-177.
CHEN Pan, GU Shuancheng, ZHANG Youzhen. Study on site measurement of surface movement law under shallow depth coal and vertically repeated mining coal seam[J]. *Coal Science and Technology*, 2016, 44(11):173-177.
- [32] 宋许根, 刘秀敏, 陈从新, 等. 程潮铁矿区西采空区地表塌陷机制与变形规律初探[J]. *岩石力学与工程学报*, 2018, 37(2):4262-4273.
SONG Xugen, LIU Xiumin, CHEN Congxin, et al. Study on the mechanism of surface collapse and ground deformation in western mined area of Chengchao iron mine[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2018, 37(2):4262-4273.
- [33] 於永东. BDS 和 GPS 双系统组合相对定位技术在抚顺采空区地面沉降在线监测中的应用[J]. *测绘通报*, 2013(10):137-138.
YU Yongdong. The application of BDS and GPS combined relative positioning technology in the on-line monitoring of ground subsidence in Fushun goaf[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013(10):137-138.
- [34] 刘义新. 深部条带开采覆岩及地表移动规律研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2007.
LIU Yixin. Study on overburden and surface movement of deep strip mining[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2007.
- [35] 赵建军, 蔺冰, 马运韬, 等. 缓倾煤层采空区上覆岩体变形特征物理模拟研究[J]. *煤炭学报*, 2016, 41(6):1369-1374.
ZHAO Jianjun, LIN Bing, MA Yuntao, et al. Physical modeling on deformation characteristics of overlying rock mass above mined-out area in gently inclined coal seam[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(6):1369-1374.
- [36] 孙利辉, 纪洪广, 蒋华, 等. 弱胶结地层条件下垮落带岩层破碎冒落特征与压实变形规律试验研究[J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10):2565-2572.
SUN Lihui, JI Hongguang, JIANG Hua, et al. Experimental study on characteristics of broken caving and regularity of compaction de-

- formation of rocks in caving zone in the weakly cemented strata [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2565-2572.
- [37] 李东阳, 王杰, 杨韶珺, 等. 城市地下不规则采空区的超载破坏模型试验[J]. *煤炭学报*, 2019, 44(7): 2143-2150.
LI Dongyang, WANG Jie, YANG Shaojun, et al. Overburden destruction model test of irregularly shaped gob in city underground [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(7): 2143-2150.
- [38] 汪吉林, 吴圣林, 陈建, 等. 复杂地貌多煤层采空区的稳定性评价[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(4): 466-471.
WANG Jilin, WU Shenglin, CHEN Jian, et al. Stability evaluation of mine goaf with multi coal seams and complex land form [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(4): 466-471.
- [39] 韩森, 张钦礼, 刘泽洲, 等. 近塌陷区矿山公路开采沉降规律及安全性研究[J]. *中国安全生产科学技术*, 2015, 11(8): 126-131.
HAN Sen, ZHANG Qinli, LIU Zezhou, et al. Settlement property and safety of mine road near subsidence area under mining disturbance [J]. *China Work Safety Science and Technology*, 2015, 11(8): 126-131.
- [40] 高建良, 陈帅. 采空区上覆岩层“三带”划分数值模拟[J]. *安全与环境学报*, 2016, 16(1): 36-39.
GAO Jianliang, CHEN Shuai. Division of “three zones” of overlying strata in Goaf numerical simulation [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2015, 16(1): 36-39.
- [41] 张向东, 张淑坤, 杨奎清. 高速公路与下伏采空区相互作用分析[J]. *科学技术与工程*, 2008, 8(2): 436-440.
ZHANG Xiangdong, ZHANG Shukun, YANG kuiqing. Analysis of influence of freeway GOB interacting [J]. *Science and Technology and Engineering*, 2008, 8(2): 436-440.
- [42] 黄平路, 陈从新. 露天和地下联合开采引起矿山岩层移动规律的数值模拟研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(2): 4037-4042.
HUANG Pinglu, CHEN Congxin. Numerical simulation research on rock movement caused by surface mining and underground mining [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 4037-4042.
- [43] 王树仁, 张海清, 慎乃齐, 等. 下伏采空区桥隧工程变形及受力响应特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2009, 28(6): 1144-1151.
WANG Shuren, ZHANG Haiqing, SHEN Naiqi, et al. Analysis of deformation and stress characteristics of highway tunnels above mined-out regions [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2009, 28(6): 1144-1151.
- [44] 陈云敏, 边学成. 高速铁路路基动力学研究进展[J]. *土木工程学报*, 2018, 51(6): 1-13.
CHEN Yunmin, BIAN Xuecheng. The review of high-speed railway track foundation dynamics [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2018, 51(6): 1-13.
- [45] 中华人民共和国行业标准编写组. 高速铁路设计规范 (TB 10621-2014) [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2014.
- [46] 腾永海, 张俊英. 老采空区地基稳定性评价[J]. *煤炭学报*, 1997, 22(5): 504-508.
TENG Yonghai, ZHANG Junying. Foundation stability evaluation of old goaf [J]. *Journal of China Coal Society*, 1997, 22(5): 504-508.
- [47] 韩科明, 李凤明. 采煤沉陷区稳定性模糊综合评判[J]. *煤炭学报*, 2009, 34(12): 1616-1621.
HAN Keming, LI Fengming. Fuzzy comprehensive evaluation on stability of mining subsidence area [J]. *Journal of China Coal Society*, 2009, 34(12): 1616-1621.
- [48] 张俊英. 采空区地表建筑地基稳定性模糊综合评价方法[J]. *北京科技大学学报*, 2009, 31(11): 1368-1372.
ZHANG Junying. Fuzzy comprehensive evaluation method of the foundation stability of new-buildings above worked-out area [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2009, 31(11): 1368-1372.
- [49] 杨锋, 郭广礼, 万战胜, 等. 煤矿老采空区上方高速公路建设场地稳定性评价[J]. *金属矿山*, 2017(11): 137-144.
YANG Feng, GUO Guangli, WAN Zhansheng, et al. Stability evaluation of the expressway construction site on the old goaf of coal mine [J]. *Metal Mine*, 2004(11): 137-144.
- [50] 郭广李, 张国信, 刘丙方. 地面荷载对地下采空区的临界扰动深度及其影响[J]. *矿山压力与顶板管理*, 2004, 21(1): 72-77.
GUO Guangli, ZHANG Guoxin, LIU Bingfang. The influence of surface load to critical affection depth in goaf [J]. *Ground Pressure and Strata Control*, 2004, 21(1): 72-77.
- [51] 李传宝, 陈谦恭, 梁鑫, 等. 采空巷道上方高速铁路桩板路基模型试验研究[J]. *岩土力学*, 2014, 35(11): 3101-3128.
LI Chuangbao, CHEN Qiangong, LIANG Xin, et al. Model test on pile-plank roadbed of high-speed railway overlying goafs [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2014, 35(11): 3101-3128.
- [52] 梁鑫, 程谦恭, 王长宝, 等. 高速铁路采空区桩板结构复合路基受力机理数值模拟[J]. *铁道标准设计*, 2014, 58(4): 1-5.
LIANG Xin, CHEN Qiangong, WANG Changbao, et al. Numerical simulation on stress mechanism of sheet-pile composite subgrade of high-speed Railway in Goaf Area [J]. *Railway Standard Design*, 2014, 58(4): 1-5.
- [53] 郑志龙. 高速铁路采空区路基变形监测[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
ZHENG Zhilong. Deformation monitoring of Subgrade in goaf of high speed railway [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.