

矿产资源高强度开采区 地质灾害与防治技术

范立民 李 成 陈建平 宁建民 等 著



科学出版社



国家重点基础研究发展计划（973）项目（2013CB227901）

中国地质调查“1212011220219”项目

联合资助

陕西省科学技术推广计划项目（2011TG-01）

矿产资源高强度开采区 地质灾害与防治技术

范立民 李 成 陈建平 宁建民 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书运用地质学、水文地质学、工程地质学、环境地质学、地质灾害学、采矿工程、开采损害学、生态与环境修复等多学科的理论和方法,系统调查了陕西省矿山地质环境问题和地质灾害分布规律,提出了矿产资源开采强度的概念、划分指标以及适度开发理念;研究了采矿引发地质灾害的机理,从规划、采矿技术等角度,提出减缓地质灾害的思路和方法;进行了矿山地质环境影响评价和矿山地质环境保护与治理分区;开展实施了开采区地质灾害治理工程,形成了矿山地质灾害防治技术体系。有利于促进矿山地质灾害治理,保护矿山地质环境,建设生态文明矿山。

本书可供地质灾害、地质工程等领域技术人员、大专院校师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

矿产资源高强度开采区地质灾害与防治技术/范立民等著. —北京:科学出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-03-047518-3

I. ①矿… II. ①范… III. ①矿山开采-地质-自然灾害-防治-陕西省
IV. ①TD8②P694

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 044301 号

责任编辑:王 运 韩 鹏 / 责任校对:韩 杨

责任印制:肖 兴 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 3 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 3 月第一次印刷 印张: 12 3/4

字数: 302 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

作者名单

范立民	李 成	陈建平	宁建民
杜江丽	郑苗苗	蒋泽泉	刘 辉
张廷会	郝 业	姬怡微	马雄德
卞惠璞	高 帅	吴 丹	

序一 保护矿山地质环境 建设生态文明矿区

新中国成立以来，特别是改革开放以来，矿产资源开发迎来了历史性的机遇，开发规模、开采强度不断加大，开采深度不断下延，开采矿种日趋增多，矿产品产量呈现几何级数增加，为经济社会发展提供了丰富的原材料和燃料，极大地促进了经济、社会发展。然而，随着矿产资源开采强度的加大，矿区地质环境问题日渐突出，地质灾害频发，给人们生命财产安全带来了许多隐患，矿山地质灾害每年都有人员伤亡，建设生态文明矿区，任重道远。

陕西省矿产资源丰富，矿种齐全，矿业经济活跃，采矿历史悠久，煤炭、金属矿产、石油天然气等已经成为全省国民经济发展的支柱产业，原煤产量从2000年的2767万t跃升到2014年的5.15亿t。其他矿种的产量也直线增长。长期、高强度的采矿，导致了一系列环境地质问题，诱发了多种地质灾害。尤其是矿产开发强度大的区域，以地面塌陷、地裂缝、滑坡、泥石流为主的地质灾害时有发生。矿产开发造成地面沉降，诱发地面建筑物的开裂，严重时还影响人民的和社会稳定。因此，研究和查明矿山地质灾害的分布、成因、成灾模式，并提出防控措施，大幅度减轻矿山开发对地质环境的影响程度和地质灾害发生频次，是保护矿区环境、建设生态文明社会和人民财产的迫切需要。

范立民带领的团队长期从事矿山地质灾害工作，他们全面调查了陕西省矿山地质灾害分布、发育及其与采矿的关系，首次提出了矿产资源开采强度的概念，初步建立了开采强度划分的指标体系，研究了开采强度与地质灾害发育程度的关系，探讨了矿区地质灾害成因模式、致灾模式和防控技术，开展了矿山地质环境治理示范工程建设，有效保护了矿区居民生命安全，恢复了耕地、林地和草地，减轻了地质灾害造成的经济损失，效益显著。

因此，我谨向读者推荐此书，希望能对有关学者和工程科技人员今后的工作有所借鉴。

中国工程院院士
中国矿业大学（北京）教授



2016年元旦

序二 依靠科技创新 防控矿山地灾

长期以来，矿区给人们的印象总是环境污染严重、地质灾害频发，给矿区居民生命、财产造成巨大损失，其中不乏重大伤亡灾害，如1970年5月26日四川省泸沽铁矿盐井沟泥石流，造成104人死亡；1984年5月27日云南东川铜矿因民矿区黑山沟泥石流，造成121人死亡；2002年7月9日该矿区又一次发生泥石流，造成29人死亡；2008年9月8日山西省襄汾县发生尾矿库特别重大溃坝事故，共造成277人死亡；……。陕西是矿山地质灾害的重灾区之一，1994~2011年矿山地质灾害就造成413人死亡。其中1994年7月11日夜，暴雨导致西峪特大矿渣型泥石流灾害，51人死亡，上百人失踪；1996年9月23日西安灞桥区砖厂取土引发黄土滑坡，造成5人死亡；2003年9月23日宁强县黎家营锰矿采空区滑坡造成4人死亡；2003年黄陵仓村金咀沟煤矿黄土崩塌导致4人死亡；2010年10月17日泾阳县采石场滑坡造成4死1伤；2010年7月23日潼关金矿泥石流造成8人死亡；2011年9月17日灞桥区白鹿原砖瓦厂发生滑坡造成32人死亡……。一连串的矿山地质灾害，不停地呼唤着矿山地质灾害防控水平的提高，呼唤着矿山地质灾害治理技术的进步和防治工程的实施。

近年来，陕西省地质环境监测总站范立民同志带领的课题组，先后完成了多项矿山地质灾害项目，在调查各类矿山地质环境基础上，建立了陕西省矿山地质灾害（地质环境）数据库，完成了一系列典型矿山地质灾害治理工程，形成了一整套矿山地质灾害治理技术：提出了矿产资源开采强度的新概念，确定了矿产资源开采强度划分的指标体系，划分了陕西省矿产资源开采强度分区，提出了矿产资源适度开发新理念；系统调查总结了矿产资源高强度开采区地质灾害发育、分布特征及其危害性，划分了地质灾害发育程度、发育类型分区，编制了矿区地质灾害系列图件，发明了矿山地质灾害监测预警仪，并应用于山区、矿区地质灾害监测预报预警工作；研究了高强度采矿诱发地质灾害机理、成因模式和致灾模式；总结提出了四种矿山地质灾害成因模式和致灾模式；提出了高强度开采条件下地质灾害防控措施；结合大型地质灾害治理工程，研发了高强度开采区地质灾害治理技术，形成了矿山地质灾害治理技术体系，开展了治理示范工程，恢复了大量林地、耕地、草地和建设用地，极大地减轻了矿山地质灾害发生数量，有效保护了矿区居民生命安全。

课题组还取得了一批知识产权，促进了矿山地质灾害科技进步。正值此书出版之际，我非常高兴地阅读了书稿，并乐意将此书推荐给广大地质科技工作者，为建设我国西部和谐矿区、文明矿区做出应有的贡献。

2016/11

2016.2.20

前 言

20 世纪 80 年代以来,我国西部矿产资源开发力度不断加大,开采强度加大,矿区地质灾害频发,地质环境恶化,给人民生命、财产造成了巨大损失。据不完全统计,1994~2011 年陕西省因采矿引发的地质灾害造成 413 人死亡、直接经济损失 8.30 亿元。调查、研究矿区高强度开采条件下地质灾害形成机理,提出矿区地质灾害治理技术并进行治理,建设矿区生态文明,刻不容缓!

为此,2012 年以来,以陕西省地质环境监测总站为主的课题组先后承担完成了中国地质调查局专项、中央财政补助地方矿山地质环境恢复治理项目、陕西省公益性地质调查项目、陕西省突发性矿山地质灾害调查以及矿山地质环境保护与恢复治理方案等项目 40 余项,参与了国家 973 计划“西部煤炭高强度开采下地质灾害防治与环境保护基础研究”和陕西省科学技术推广计划项目等。在此基础上,完成了高强度采矿区地质灾害研究工作,建立了陕西省矿山地质灾害(地质环境)数据库。查明了矿山地质灾害发育状况,研究了矿山地质灾害形成机理,预测了矿山开采地质灾害发育趋势,组织开展了典型矿山地质灾害治理工程,形成了多项行业(地方)标准。

本书的主要创新成果包括:①以煤为例,提出了矿产资源开采强度的新概念,确定了矿产资源开采强度划分的指标体系,划分了陕西省矿产资源开采强度分区,据此提出了矿产资源适度开发新理念;②系统调查了陕西省矿产资源高强度开采区地质灾害发育、分布及危害性,划分了地质灾害发育程度、发育类型分区,编制了矿山地质环境、地质灾害系列图件,提出了高强度开采条件下地质灾害防控措施;③研究了高强度采矿引发地质灾害机理、开采强度与地质灾害的耦合关系,提出了高强度开采地质灾害致灾模式;④提出了分区分类治理原则和适宜的治理技术,并开展了地质灾害治理示范工程,形成了一整套矿山地质灾害治理技术体系,恢复了耕地、林地、草地,消除了地质灾害隐患和污染源。

本书是集体智慧的结晶,全书由范立民提出总体思路和基本框架,项目组成员分工完成,各章节的主要执笔人(未注明作者工作单位均为陕西省地质环境监测总站)是:前言范立民;第一章李成、陈建平;第二章陈建平、杜江丽;第三章宁建民、李成、郑苗苗;第四章范立民;第五章第一、二、三节李成、陈建平,第四节范立民、马雄德(长安大学)、卞惠瑛;第六章陈建平、

李成；第七章陈建平、宁建民；第八章第一至四节李成、宁建民、陈建平、杜江丽，第五节刘辉（山东大学），第六节蒋泽泉（陕西省一八五煤田地质有限公司）、陈建平、张廷会（陕西天地地质有限责任公司）；第九章范立民、陈建平。杜江丽、郑苗苗、姬怡微、高帅、吴丹等同志参加了野外调查、资料统计分析、编图等工作，陕西天地地质有限责任公司郝业等同志参加了地质灾害治理的相关工作。全书由范立民统稿、审定。需要说明的是，部分申报了专利的相关内容，未在本书展示。

项目开展过程中，得到了中国地质调查局、中国地质环境监测院、陕西省国土资源厅及陕西各市县国土资源部门、陕西省科学技术厅、陕西省地质调查院、中国地质调查局西安地质调查中心及有关矿山企业的支持，陕西省地质调查院王双明教授、苟润祥研究员、郭三民研究员、白宏高级工程师、黄建军工程师、张晓团高级工程师，陕西省地质环境监测总站贺卫中总工程师、张卫敏副站长、向茂西副总工程师、李永红副总工程师，陕西省国土资源厅宁奎斌处长、王雁林副处长、李仁虎调研员、高刚强副处长、师小龙、孙晓东主任，陕西煤业化工集团有限公司闵龙、王苏建、邓增社、宋飞、王建文教授级高级工程师，煤炭科学研究总院许升阳研究员，中国煤炭地质总局王佟教授级高级工程师，中国矿业大学孙亚军教授、徐智敏副教授，中煤科工集团西安研究院虎维岳、靳德武、靳秀良、刘天林研究员，长安大学彭建兵、张勤、赵法锁、范文教授，西安科技大学李树刚、夏玉成、王英、侯恩科、余学义、杨梅忠、唐胜利教授，中国地质调查局西安地质调查中心李文渊、张茂省、徐友宁、朱桦研究员，陕西省煤田地质有限公司段中会总工程师，陕西省核工业工程勘察院金有生研究员，机械工业勘察设计院李忠明副总工程师，西北有色地质勘查局杨鲁飞、常喜顺教授级高级工程师，陕西地质工程总公司王振福、王武刚教授级高级工程师，陕西工程勘察研究院李稳哲总工程师等专家对本项工作给予了大力支持和帮助，西北大学张国伟院士、中国矿业大学彭苏萍院士、武强院士长期关注我国西部矿山地质环境研究，对本项研究提出了宝贵意见和建议，彭苏萍院士、王双明教授在百忙之中为本书作序，在此一并表示衷心感谢！

地质灾害与地质环境犹如一对孪生姐妹，地质环境的变异，可引发地质灾害；地质灾害的发生，又改变地质环境。因此，尽管本书定名为“地质灾害”，但有很多内容是论述地质环境的，尤其是高强度开采区地质环境演化规律，是本书探讨的重要内容。

限于作者水平，书中难免存在不妥和错误，恳望读者批评指正！

范立民

2016年2月28日

目 录

序一 保护矿山地质环境 建设生态文明矿区

序二 依靠科技创新 防控矿山地灾

前言

第一章 绪论	1
第一节 研究背景及意义	1
一、研究背景	1
二、研究意义	2
第二节 国内外研究现状	2
一、高强度开采研究现状	2
二、高强度开采地表沉陷变形研究现状	3
三、高强度开采引发矿山地质环境问题研究现状	4
四、矿产适度开发理论和矿山地质环境保护与治理技术研究现状	6
第二章 地质环境条件	9
第一节 自然地理	9
一、气象	9
二、水文	9
第二节 社会经济概况	10
第三节 地质环境背景	10
一、地形地貌	10
二、地层	15
三、地质构造	20
四、岩浆岩	24
五、水文地质	24
六、工程地质条件	26
七、环境地质条件	28
第三章 矿产资源及开发现状	30
第一节 矿产资源概况	30
一、矿产资源类型及优势矿产资源	30
二、矿产资源分布特点	30
第二节 矿产资源开发利用现状	32

一、矿山概况	33
二、矿产资源开发利用现状	35
第四章 矿产资源开采强度与地质灾害研究	36
第一节 矿产资源开采强度概念及指标体系	36
一、开采强度概念	36
二、开采强度的指标体系	37
第二节 矿产资源开采强度分区	38
一、矿产资源高强度开采区	39
二、矿产资源中强度开采区	45
三、矿产资源低强度开采区	50
第三节 高强度开采地质灾害的发育机理	50
一、顶板塌陷诱发型	50
二、采空区变形诱发型	54
三、采矿废渣堆积型	54
四、露天采矿边坡诱发型	55
第四节 基于地质环境承载力的煤炭开发规模——以榆神府矿区为例	56
一、榆神府矿区煤炭开发存在问题	56
二、地质环境承载力和适度开发理念	56
三、基于地质环境承载力的煤炭开发规模	59
四、区域性煤炭开发规划问题	61
第五章 矿产高强度开采区地质环境问题与地质灾害	63
第一节 主要地质环境问题及分布特征	63
一、矿山地质环境问题分类	63
二、主要矿山地质环境问题分布特征	65
第二节 矿山地质环境问题及其危害	68
一、矿山地质灾害类型、规模及危害现状	68
二、矿业开发对地形地貌景观破坏	78
三、矿业开发占用破坏土地资源	79
四、矿山废水及废渣对环境的影响	81
第三节 矿山开发对水环境的影响	87
一、矿业开发对地下水的影响与破坏	87
二、高强度采煤对水环境变化的影响分析	89
三、高强度采煤对地表水体、湿地的影响分析	96
第六章 矿产高强度开采区矿山地质环境影响评价	106
第一节 评价方法	106
一、评价模型选择	106

二、评价单元划分和评价因子选择	106
三、矿山地质环境影响评价	107
第二节 矿山地质环境分区评述	112
一、矿山地质环境影响严重区	112
二、矿山地质环境影响较严重区	120
三、矿山地质环境影响轻微区	128
第三节 矿山地质环境问题发展趋势分析	128
第七章 矿山地质环境保护与治理分区	131
第一节 分区原则	131
第二节 分区方法	131
第三节 分区评述	132
一、矿山地质环境保护区	132
二、矿山地质环境预防区	132
三、矿山地质环境治理区	132
第四节 保护与治理对策建议	140
一、加强矿山地质环境保护	140
二、积极推进矿山地质环境恢复治理	141
三、建立完善矿山地质环境保护与恢复治理长效机制	142
第八章 矿山地质环境治理示范工程与成效	143
第一节 矿山地质环境恢复治理保障措施及成效	143
一、矿山地质环境恢复治理保障措施	143
二、矿山地质环境治理项目实施效果	144
第二节 矿山地质灾害防治技术	145
一、矿山地质灾害防治措施	145
二、矿山地质灾害防治效果	148
第三节 生态修复技术及成效	148
一、矿山生态修复技术	148
二、矿山生态修复成效	150
第四节 矿山废水、废渣综合利用技术	152
一、矿山废水综合利用技术及效果	152
二、矿山废渣的综合治理技术及效果	154
第五节 黄土沟壑区地裂缝治理技术及示范工程	158
一、地裂缝治理原则	159
二、超高水材料简介	159
三、超高水材料地裂缝充填系统设计	162
四、超高水材料地裂缝充填治理技术	164

五、示范工程	166
第六节 矿山地质灾害治理示范工程	170
一、铜川市三里洞红矸山矿山地质环境治理工程	170
二、白水县采煤沉陷区矿山地质环境治理重大工程项目	170
三、陕西凤县四方金矿矿区地质环境治理项目	172
四、郭家河煤矿高边坡治理工程	173
五、崔木煤矿工业广场三平台滑坡治理工程	175
第九章 结论	179
参考文献	182

第一章 绪 论

第一节 研究背景及意义

一、研究背景

陕西省矿产资源丰富,长期、高强度的矿产资源开采,在促进矿业经济发展的同时,也产生了一系列矿山地质环境问题,引发了地质灾害,威胁到矿区生命、财产安全。建设生态文明(杜祥琬等,2015),必须处理好矿业开发与地质环境保护的关系。

本书是在陕西省矿产资源集中开采区地质环境调查、西部煤炭高强度开采下地质灾害防治与环境保护基础研究、矿山地质环境保护与恢复治理方案编制、矿山地质灾害治理工程、突发性地质灾害调查等工作的基础上完成的。

中国地质调查局2012年启动了“全国矿山地质环境调查”计划项目,本书主要作者承担了陕西省矿山地质环境调查项目,主要内容是高强度开采区(集中开采区)的矿山地质环境背景、矿山基本情况、矿山地质环境现状,矿山地质灾害分布及发育规律、形成机理,结合省内已实施的治理工程,研究适合西部地区的矿山地质环境治理工程技术。

2012年科学技术部下达了国家重点基础发展研究计划(973)项目“西部煤炭高强度开采下地质灾害防治与环境保护基础研究”(2013CB227901),本书主要作者应邀参加,主要负责煤炭资源开采强度与地质灾害关系的研究,同时对高强度采煤引起的突水溃沙地质灾害进行专题研究,提出了矿产资源开采强度的概念和指标体系,研究高强度采矿引发地质灾害机理、成因模式和致灾模式。

根据《矿山地质环境保护规定》(国土资源部2009年第44号令),本书部分作者参与或指导编制了部分矿山地质环境保护与恢复治理方案,系统研究了全省近千份矿山地质环境保护与恢复治理方案,对全省矿山地质环境、地质灾害进行了系统调查。参与了全省“方案”编制的技术指导等工作。提出矿产资源高强度开采区地质灾害治理技术思路和方法,以渭北煤矿区、秦岭多金属矿区、榆神府煤炭高强度开采区地质灾害治理工程为例,并进行地质环境治理效益分析,形成矿山地质灾害治理技术和矿山地质灾害预防技术。

本书部分作者承担了企业项目、国家十二五科技支撑计划等项目,开展了矿山地质灾害治理工程数十项,研发了矿山地质灾害治理技术,参与了陕西突发性矿山地质灾害调查与成因研究。

二、研究意义

陕西矿产资源丰富,能源矿产、金属矿产、非金属矿产等矿山企业众多。矿业开发在为陕西省经济发展作出巨大贡献的同时,也引发了大量矿山地质环境问题,矿产资源集中连片、高强度开采引发的地质灾害日益严重,查明矿山地质灾害及其形成机理,提出防控措施,减轻地质灾害发育程度,保护地质环境,是实现生态文明矿区建设目标的基础。编写本书的目的是查明陕西省矿产资源及其开发现状,调查矿山地质环境条件,调查矿山环境地质问题和地质灾害发育状况、分布,研究矿山地质灾害发育规律,探讨矿山地质灾害治理技术,为保护矿区人民生命财产安全,建设生态矿山提供技术支撑。其主要任务有:

- (1) 调查陕西省矿产资源及其开发现状;
- (2) 阐述陕西省地质环境条件,调查陕西省矿山地质环境现状、主要环境地质问题;
- (3) 调查陕西省矿山地质灾害类型、分布、规模、危害性并分析其成因模式和致灾模式;
- (4) 研究并厘定开采强度的概念,构建矿产资源开采强度的指标体系,研究矿山开采强度及其与地质灾害发育的关系,划分矿山地质环境影响程度分区;
- (5) 划分矿山地质环境恢复治理分区,结合矿山地质环境治理工程项目,总结适合于陕西矿山地质灾害特点的治理技术体系。

第二节 国内外研究现状

矿产资源高强度开采区地质灾害与防治技术研究,包括矿产资源开采强度、采矿引起的地面塌陷与覆岩移动变形、矿山地质灾害等矿山地质环境问题、矿产资源开采强度与地质环境承载力的关系等研究现状。

一、高强度开采研究现状

近年来,高强度开采逐渐受到关注,尤其是煤炭资源高强度开采,形成了一定的研究基础。高强度开采是近几年随着采煤方法的发展出现的新概念,目前并没有一个严格的定义来界定,泛指综采放顶煤开采、大采高一次采全高综采等开采方式。虽然具体形式不同,但是都具有产煤量大、回采速度快、煤岩层受采动影响大、围岩及地面变形强烈等特点,地面变形的结果形成地质灾害,威胁矿区居民生命安全,恶化矿区地质环境、生态环境。为此,煤炭科技工作者从不同角度研究了煤炭高强度开采诱发的地面变形和巷道围岩控制技术。

缪协兴将煤炭资源高强度开采表述为大采高、大采面和快速推进为主要特征的开采方式,并承担了国家973计划“西部煤炭高强度开采下地质灾害防治与环境保护基础研究”。范立民在该课题中首次将高强度开采定义为以平面上开采面积占比大、空间上工作面开采尺寸大、时间上开采速度(推进速度)快为特点的开采区域和开采方式,提出了高强度开

采的指标体系,并开展了陕西省煤炭资源开采强度分区及与地质灾害发育关系的研究(范立民,2014)。在此基础上,研究了陕西省矿产资源开采强度及其分区,调查了开采强度与地质灾害发育的关系。

滕永海和刘克功(2002)研究了五阳煤矿高强度开采条件下地表移动规律,高强度开采与普通的分层开采都表现出了地表下沉盆地陡峭、地表移动剧烈等特点,高强度开采地表下沉系数相当于初次采动,地表裂缝和破坏要轻得多。张周权(2008)研究了高强度开采区域孤岛回采工作面顶板来压宏观矿压现象显现特点、巷道矿压宏观现象显现特点及巷道矿压显现规律。李亮(2010)研究了高强度开采条件下堤防损害机理及治理对策,分析了高强度开采引起的地表和堤防裂缝的平面分布和深度发育规律,提出了裂缝角、动态裂缝角和裂缝还原角的概念,建立了地表及堤防裂缝动、静态分布范围和裂缝极限发育深度预测模型。王永强(2010)研究了高强度开采条件下采动影响回采巷道围岩变形特点。

彭永伟等(2009)对高强度开采条件的特点进行了分析,他认为高强度开采是以厚煤层开采为主,涵盖一般意义上的综采及综放开采、大采高综采、大采高综放开采等高产高效的综合机械化采煤方法。一般具有以下特征:①工作面割煤高度一般比较大,最大割煤高度可达6m;②工作面日循环次数较多,因而推进速度快,最快每日可推进10m以上,有的甚至达到20m;③为了达到高产高效,减少工作面个数及搬迁次数,工作面长度一般较长,最长可达300m左右;④支护强度高等。通过对高强度开采特点的分析,认为在地质条件一定的条件下,割煤高度、推进速度、工作面长度是影响断裂带高度的主要因素。提出利用单元的状态与位移来综合判断断裂带的发育高度,得到了高强度开采条件下各因素对断裂带高度发育影响程度为:上覆岩层硬度>工作面割煤高度>工作面长度>推进速度。

上述研究,尚未给出矿产资源开采强度的概念,也未就一个矿区(区域)的矿产资源开采强度进行分区。

二、高强度开采地表沉陷变形研究现状

国内外很多专家学者对采动地表变形的预测与规律进行了较为广泛的探讨。19世纪早期国外已开展了煤层开采引起的岩层移动变形方面的研究工作。1825年、1930年比利时形成了最初研究开采造成的岩土体移动的假设:垂线理论(Barry, 1989)。随后以实测资料为基础发展成为“法线理论”(Hoek and Brown, 1980)。德国人Jicinsky通过进一步的研究提出了“二等分线理论”,法国人Fayol提出了拱线理论等,人们对开采影响引起的沉陷变形问题有了初步的认识(Singh, 1986; Kratzsch, 1983)。Bals、Beyer和Brauner等学者基于现场实测数据,从数学建模的角度出发,建立了积分-几何理论,通过近似积分函数,利用现场实测值拟合下沉盆地形状,计算精度受积分式中影响函数形式控制。Litwiniszyn(1953)和Smolarski(1967)等应用颗粒体介质力学行为研究开展引起的岩层及地表移动规律,提出了开采沉陷预计的随机介质方法,确定了全部应力、位移分量的计算方法;Berry(1964)、Yavuz(2004)等学者假设煤层上覆岩以往工作程度层为板或梁的结构,采用弹性力学相关知识,分析了岩体内应力与位移在开采影响下的变化规律。

Alvarez (2005) 结合数学和力学两个方面的知识,建立了考虑重力和岩层力学性质两方面因素的开采沉陷影响函数。Sheorey (2000) 通过对印度二十余个煤矿地表移动观测资料的整理分析,建立了适合印度浅部开采的影响函数。Gonzalez-Nicieza 等 (2007) 建立了基于新的时间影响函数的沉陷预计模型。计算机技术和有限元、离散元、有限差分等数值模拟计算方法均在开采沉陷预计领域获得广泛应用,使得预计计算可以更多地考虑断层、重复采动、多工作面相互影响等复杂开采情况,推动了开采沉陷预计工作的研究,Najjar (1990)、Coulthard (1999)、Alejano (1999, 1998) 和 Fujii 等 (1997) 在数值模拟计算模型建立、边界条件选取及预计计算结果评价方面做了卓有成效的工作。

近十年来,国外学者更多的研究工作重心偏向于对开采沉陷引起的环境问题的评价、治理和老采空区残余变形方面 (Donnelly et al., 2004)。

20 世纪 50 年代,刘宝琛和廖国华 (1965) 引入随机介质理论,发展成为概率积分法,成为我国较为成熟,应用最为广泛的开采沉陷预计方法;何国清 (1988) 将覆岩移动视为碎块体移动,建立了岩层移动的威布尔分布法,发展了随机介质理论;杨硕和张有祥 (1995) 从力学的角度预测了水平移动曲线;李永树和王金庄 (1995) 基于概率积分法,讨论了不同地质地貌条件下地表点任意方向移动变形的预计方法;戴华阳 (2002) 利用 GIS 建立了可视的基于倾角变化的开采沉陷预计模型;姜岩和田茂义 (2003) 将力学方法和概率积分法相结合应用于开采沉陷预计;王华生 (2003) 采用趋势函数对地表移动变形进行预测;郭增长和谢和平 (2004) 研究了极不充分采动条件下地表移动和变形预计的概率密度函数法;肖波、麻凤海 (2005) 等基于遗传算法改进了神经网络在地表沉陷预计中的应用;刘书贤 (2005) 通过数值模拟研究了急倾斜煤层地表沉陷预计模型;任松和姜德义 (2007) 提出了适用于岩盐溶于水地表沉陷预计的概率积分三维预测模型;缪协兴等 (2011) 研究了机械化充填采煤方法,旨在减轻采煤对地面沉陷、地质环境的损害程度。目前我国已形成概率积分法为主体、数学方法和力学方法并进、数值计算等方法为辅的开采沉陷预计方法共同发展的局面。

在动态下沉预计方面,王金庄等 (1995) 通过研究开采过程中最大下沉速度的变化规律推导了地表移动的动态预计模型;郭增长和殷作如 (2000) 根据随机介质碎块体移动概率,提出了地表下沉增量计算方法;Knothe 确定了描述动态下沉的 Knothe 函数;王悦汉等 (2003) 建立了岩体动态移动模型,考虑了变形系数随时间序列的变化情况;李德海 (2004) 研究了覆岩岩性对地表移动过程时间影响参数的影响。

此外,刘辉等 (2013b) 运用基于薄板理论的基本顶“O-X”破断原理,结合岩层控制的关键层理论,分析了薄基岩浅埋煤层开采造成的地表塌陷型裂缝的形成机理,研究了塌陷型地裂缝的动态发育规律,并通过工程实例,验证了模型的可靠性。并采用关键层理论,结合 FLAC^{3D} 数值模拟实验,研究了超高水材料跳采充填采煤法地表变形规律及地表沉陷控制效果 (刘辉, 2013a)。

三、高强度开采引发矿山地质环境问题研究现状

矿产资源高强度开采使矿区环境承载能力急剧下降,引发一系列的矿山地质环境问