

抚顺矿区地质灾害 研究与对策

周建军 陈 馈 洪开荣 著

地质出版社

合作专项 (2011DFB71550)

地质研究与开发资金项目 (1301065A) 联合资助

抚顺矿区地质灾害研究与对策

周建军 陈 馈 洪开荣 著

地质出版社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书通过系列地质环境、实验、数值计算分析和多源信息融合的研究,阐述了矿区地质环境、灾害类型和地质灾害形成机理。基于“地质结构控制论”的理念,提出利用矿体周缘分布的花岗片麻岩作为城市发展与建设依托,实施地下矿产资源开采与城市生态环境恢复相结合的综合治理方案。全书共10章,包括矿山城市地质灾害研究进展与方法、矿区地质灾害研究、矿区地质环境和地质结构类型研究、岩石和岩体物理力学性能研究、三维地应力场研究、采煤过程中矿区稳定性数值研究、基于地质信息的深井安全开采控制决策系统、矿区地质灾害评估与对策等内容。

本书具有一定的理论意义和应用价值,对矿业城市地质环境评价及治理恢复提供了研究方法和科学依据,对其他类似矿山的环境评价提供了参考,可供有关工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

抚顺矿区地质灾害研究与对策 / 周建军等著. —北京:地质出版社, 2013. 8

ISBN 978-7-116-08415-5

I. ①抚… II. ①周… III. ①煤矿-矿山地质-自然灾害-灾害防治-研究-抚顺市 IV. ①TD163②P694

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第170565号

责任编辑:李 军 孙亚芸

责任校对:王洪强

出版发行:地质出版社

社址邮编:北京海淀区学院路31号,100083

咨询电话:(010)82324508(邮购部);(010)82324569(编辑室)

网 址:<http://www.gph.com.cn>

传 真:(010)82310759

印 刷:北京地大天成印务有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

印 张:18.75

字 数:450千字

版 次:2013年8月北京第1版

印 次:2013年8月北京第1次印刷

审图号:GS(2013)1366号

定 价:58.00元

书 号:ISBN 978-7-116-08415-5

(如对本书有建议或意见,敬请致电本社;如本书有印装问题,本社负责调换)

序

抚顺是以煤炭资源为基础发展起来的东北老工业基地，素有“煤都”之称，是矿山和城市合为一体的资源型城市，也是一个长期遭受因煤而起的困扰而搬来搬去的移动城市。抚顺市的城市建设呈现为“城中开矿、矿间建城”的特殊格局，城区有两个大型露天矿和三个井工矿。矿区采煤始于1904年，迄今已采出 $10 \times 10^8 \text{ t}$ 优质煤炭（2008年），为我国经济建设和社会发展做出了重要贡献。

但是由于历史的原因，往往仅重视资源的开发和利用，而忽略了采煤对环境、生态的影响，忽略了环境的保护、生态的重建，从而诱发了生态地质环境问题和地质灾害，破坏了人们赖以生存的环境。自1927年西露天矿边坡发生滑坡和1933年胜利矿发生首次矿震以来，因采煤引发的地面沉陷、地裂缝、崩塌、滑坡等地质灾害及土地压占、耕地损毁、地貌景观破坏、地表水污染、空气污染等严重的环境问题日趋严重。目前，这些地质灾害已严重影响抚顺城市居民与矿周边重要工业企业的安全与发展，成为抚顺市经济发展、规划建设的瓶颈，严重制约了城市经济建设和城市可持续发展。

作者及其团队从矿区地质灾害的现状、矿区地质和区域地质出发，开展了矿区地质灾害类型与时空分布、形成背景、成灾机理以及灾害形成原因等研究；从矿区地质演化、煤系地层形成和地质构造控制角度对矿区深层地质结构进行了划分，合理地解释了矿区地质灾害产生机理和发展趋势，地质灾害的受控因素、灾害性质和类型，也宏观地给出了地质灾害最终影响范围。

作者有针对性地开展了矿区岩体地球物理特性研究、岩石（体）力学实验研究与力学参数反演研究、矿区三维初始地应力及其与矿震关系的研究、选择矿区3种不同典型地层结构的区段进行了数值计算和预测，结合多年监测成果就抚顺矿区不同分区给出了稳定性评价和城市开发建议。

作者针对深部的开采矿井，融合了地质多源数据、三维实体建模、空间数据可视化和数据处理功能，建立了三维可视化地质信息模型，通过引入深

井巷道围岩稳定性分析模块和动力灾害预测评估分析模块，开发了深井巷道支护决策子系统和深井动力灾害风险评估与预防控制子系统，进而通过神经网络智能信息分析处理功能及模糊系统的智能决策技术，开发了矿井深部开采安全控制智能决策支持系统。

本书从矿区地质灾害的现状出发，研究致灾机理、灾害影响范围以及存在的地质条件，对于预测、预报和防治地质灾害，最大限度地减小地质灾害造成的损失，合理规划城市具有重要的意义。

本书是矿业城市地质灾害研究与实践的典型实例，行文通俗，图文并茂，是一本不可多得的好书，是从事地质灾害研究，特别是从事矿业城市地质灾害研究人员的较好参考书，也是国土资源、城市规划、矿山生产、岩土工程等专业人员的参考书。

中国工程院院士：王恩敬

2013 年 8 月

前 言

抚顺市地处辽宁省东部，位于长白山余脉与辽河平原的交接处，是以煤炭工业为基础发展起来的重工业城市，煤炭矿山开采已有百余年的历史，素有“煤都”之称。由于历史的原因，抚顺市区形成了“城中开矿、矿间建城”的特殊城市格局。

在煤炭开采过程中，由于历史原因，缺乏矿产资源开采与城市建设、生态与环境保护相结合的理念，诱发了一系列地质灾害：市区大面积地面沉陷、大范围岩移、滑坡、塌陷、地裂缝、环境污染、水土流失以及各种井下灾害（如矿震或冲击地压、突水、煤与瓦斯突出、火灾等）。这些地质灾害在给城市发展和在采矿过程中造成重大经济损失的同时，也对城市的可持续发展形成了制约，同时诱发了一定地质环境问题，引发了一系列社会、经济与生态环境问题。如何协调矿产开发与自然环境保护，使自然生态与人类活动可持续发展，一直是有待解决的重要问题。

抚顺矿区地质灾害防治系列研究始于2006年6月，作者周建军先后3次参加全国政协原副主席钱正英院士委派的专家组，就抚顺西露天矿地质灾害、抚顺采煤沉陷地质灾害进行考察。通过系列研究，查清了矿区地质环境、灾害类型和地质灾害形成机理，认为在浑河南岸有一片软岩分布区，煤系地层等软岩就夹持在花岗片麻岩和火山岩之间的“峡谷内”；提出了充分利用矿体周缘广泛分布的花岗片麻岩（刚性基底）作为城市发展为建设依托，认为城市建设重点应放在浑河北岸为宜。

在辽宁省政府、抚顺市政府主导下，先后开展了一系列的地质灾害专题研究。通过对矿区深层地质结构的研究，根据矿区主要断裂 F_1 与 F_{1A} 交汇位置的不同将矿区地层结构类型进行分类，提出了“地质结构控制论”的理念，查明了地质灾害的受控因素、灾害的性质和类型，划定了地质灾害的多发地段，并给出了城市规划与建设适宜程度分区界线；认为应充分利用矿体周缘广泛分布的花岗片麻岩这个巨大的刚性基底的支撑与保护作用，实施地下矿产资源开采、城市规划与发展、生态与环境恢复并举的综合治理方案。

基于城市减灾、防灾及城市土地合理开发利用等城市公益事业的需要，开展了局部范围的论证，进一步深化和细分了矿区的灾害问题及对建设条件的论证和对策。针对矿区的主要地段进行分区论证，认为老市政府区可以有条件地进行开发，榆林桥南区目前不能进行市政建设与建筑开发，天湖桥南区是一个较为良好的城市建设与开发场地。

本书是在作者及其团队近6年来承担完成的“抚顺矿产资源开采所引发的地质灾害与城市发展生态环境恢复的系列专题研究”的系列研究报告基础上完成的。全书共10章，主要内容包括矿山城市地质灾害研究相关进展与方法、抚顺矿区地质条件和背景、抚顺矿区地质灾害研究、矿区深层地质结构类型研究、矿区主要岩层地球物理力学性能研究、矿区主要岩石和岩体物理力学性能研究、深井老虎台矿三维地应力场研究、采煤过程中矿区稳定性数值研究、基于地质信息的深井安全开采控制决策系统、矿区地质灾害评估

与对策等内容。本书内容具有一定的理论意义和现实的应用价值。研究成果对矿业城市地质环境评价及治理恢复提供了科学依据,对其他类似矿山的环境评价提供了理论支持。全书由盾构及掘进技术国家重点实验室周建军、陈馈、洪开荣共同执笔完成,由周建军统稿。

作者要感谢盾构及掘进技术国家重点实验室(中铁隧道集团有限公司)的资助;还要感谢抚顺矿区地质灾害综合治理项目总负责人、中国工程勘察设计大师徐瑞春以及各子课题研究人员,是他们给了作者很多具体的帮助和精神上的鼓励;感谢长江水利委员会三峡勘测研究院、三峡大学、长江科学院、辽宁省第十地质大队、抚顺市勘察院、煤炭研究院、抚顺市国土资源局、抚顺矿业集团、辽宁省有色地质勘测大队、辽宁省国土资源厅环境监测总队等项目参加单位的支持和资料提供。感谢中国科学院地质与地球物理研究所王思敬院士在百忙中为本书作序。此外,硕士付占岭和邓华参与了资料整理工作,书中还引用了一些尚未刊登和发表的资料,因未公开发表而未列于参考文献中,在此,向拥有这些资料的单位和个人深表感谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评与指正。

作者

2013年2月于郑州

目 录

序

前言

第1章 绪论	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 矿山地质灾害研究进展	(1)
1.2.1 露天矿山边坡稳定性研究	(1)
1.2.2 开采沉陷研究	(3)
1.2.3 露天与井工联合开采的边坡稳定性研究	(5)
1.2.4 井下地质灾害研究	(6)
1.2.5 采矿对水环境的影响	(11)
1.2.6 煤矸石对环境的影响	(12)
1.3 城市地质灾害研究现状	(13)
1.3.1 城市地质灾害的主要类型及危害	(13)
1.3.2 地质灾害评估体系的研究	(14)
1.4 矿山城市危机与转型	(16)
1.4.1 矿山城市所面临的问题	(16)
1.4.2 矿山城市的资源枯竭危机和转机	(17)
1.4.3 矿山城市的再生问题	(17)
1.4.4 矿山城市地质灾害研究方法	(18)
1.5 意义	(18)
第2章 矿区地质背景	(19)
2.1 自然地理	(19)
2.2 区域地质构造与地震	(20)
2.2.1 区域地质构造背景	(20)
2.2.2 地震	(21)
2.2.3 抚顺矿震	(22)
2.3 地形地貌	(22)
2.4 地层岩性	(23)
2.4.1 太古宇 (A_{T_3})	(24)
2.4.2 中生界 (M_z)	(24)
2.4.3 新生界 (K_z)	(29)
2.4.4 侵入岩	(31)

2.5	地质构造	(32)
2.5.1	褶皱	(32)
2.5.2	断层	(32)
2.5.3	节理与裂隙	(34)
2.6	水文地质	(34)
2.6.1	地表水系	(34)
2.6.2	水文地质特征	(35)
2.6.3	地下水动态特征	(38)
2.6.4	水化学特性及侵蚀性	(38)
2.6.5	岩(土)体透水性	(39)
2.7	岩体风化与卸荷	(40)
2.7.1	岩体风化特征	(40)
2.7.2	岩体卸荷特征	(42)
第3章	矿区地质灾害研究	(43)
3.1	矿区井田分布及采煤概况	(43)
3.1.1	古城子井田	(44)
3.1.2	胜利矿和深部井田	(44)
3.1.3	西露天矿	(45)
3.1.4	东露天矿	(45)
3.1.5	老虎台矿	(45)
3.1.6	龙凤矿	(46)
3.1.7	泰和矿	(46)
3.2	地质灾害形成背景	(46)
3.2.1	地质构造背景复杂	(46)
3.2.2	人类工程活动频繁	(47)
3.2.3	城区煤田混而为一	(47)
3.3	地质灾害类型及时空分布特征	(47)
3.3.1	滑坡和泥石流	(47)
3.3.2	地表变形	(49)
3.3.3	地裂缝	(52)
3.3.4	采煤沉陷与地面塌陷	(55)
3.3.5	矿井灾害	(59)
3.3.6	排土场排弃物污染	(63)
3.4	地质灾害致灾机理分析	(65)
3.4.1	采空区致灾机理	(65)
3.4.2	断层活化致灾机理	(66)
3.5	地质灾害成因分析	(67)
3.5.1	边坡滑坡成因	(67)
3.5.2	地面变形成因	(70)

3.5.3	地面沉陷成因	(73)
3.5.4	地裂缝成因	(75)
3.5.5	地面塌陷成因	(77)
3.5.6	煤矿震成因	(78)
第4章	矿区深层地质结构研究	(80)
4.1	地质演化简史	(80)
4.1.1	太古宙阶段 (2500Ma 前)	(80)
4.1.2	元古宙阶段 (2500 ~ 542Ma)	(80)
4.1.3	古生代阶段 (542 ~ 251Ma)	(80)
4.1.4	中生代阶段 (251 ~ 66Ma)	(80)
4.1.5	新生代阶段 (66Ma 至今)	(81)
4.2	煤系地层形成	(85)
4.3	矿区地质结构类型划分	(87)
4.3.1	峡谷型地质结构类型	(88)
4.3.2	深埋插入倾伏型地质结构类型	(89)
4.3.3	不受 F_1 和 F_{1A} 控制的峡谷型地质结构类型	(90)
4.4	小结	(91)
第5章	岩石 (体) 地球物理特性研究	(92)
5.1	概述	(92)
5.1.1	浅层人工地震法	(92)
5.1.2	高密度电阻率法	(94)
5.1.3	声波钻孔数字电视系统	(94)
5.2	声波电视测试工作原理及方法	(95)
5.2.1	全孔壁数字电视成像系统	(95)
5.2.2	声波测试	(96)
5.3	测试成果分析	(97)
5.3.1	岩性分类	(97)
5.3.2	岩体波速特性及分类	(99)
5.3.3	钻孔岩体相对低速带划分	(105)
5.3.4	地质构造产状分析统计	(106)
5.3.5	岩性分层及构造带划分	(107)
5.4	岩石 (体) 地球物理参数	(108)
5.4.1	岩体完整性系数 (K_v) 的确定与分级	(108)
5.4.2	岩体动弹性模量计算	(110)
5.5	小结	(111)
第6章	矿区岩石 (体) 试验研究	(112)
6.1	概述	(112)
6.2	岩石室内试验研究	(113)
6.2.1	室内实验概述	(113)

6.2.2	常规实验成果	(113)
6.2.3	软岩流变特性	(119)
6.3	岩体力学试验	(122)
6.3.1	试验方法简介	(122)
6.3.2	岩体变形特性分析	(129)
6.3.3	岩体直剪试验特性	(137)
6.3.4	结构面直剪强度特性	(143)
6.3.5	试验区(支洞)岩体声学特性	(145)
6.4	工程岩体基本质量评价	(145)
6.4.1	岩体结构分析	(145)
6.4.2	工程岩体基本质量分级	(146)
6.4.3	岩体渗透特征	(149)
6.5	岩石(体)实验成果综合分析	(149)
6.5.1	室内试验与原位试验对比分析	(150)
6.5.2	岩石强度特性与变形特性	(151)
6.5.3	岩体力学参数建议值	(151)
第7章	三维地应力场研究	(154)
7.1	概述	(154)
7.2	地应力的组成和影响因子	(155)
7.2.1	大陆板块边界受压及地幔热对流引起的应力场	(155)
7.2.2	地心引力引起的应力场	(155)
7.2.3	岩浆侵入引起的应力场	(155)
7.2.4	地温梯度引起的应力场	(156)
7.2.5	地表剥蚀产生的应力场	(156)
7.3	地应力场的变化规律	(157)
7.4	我国地应力场的区划	(160)
7.5	抚顺矿区构造应力场分析	(160)
7.5.1	抚顺煤田区域构造应力场分析	(161)
7.5.2	井田范围内不同构造体系相互关系分析	(162)
7.5.3	老虎台矿区构造应力场分析	(164)
7.5.4	采矿区内断裂调查统计与分析	(166)
7.5.5	老虎台矿区主要断裂构造对邻近区域应力分布的影响与分析	(167)
7.6	老虎台矿和龙凤矿地应力测试成果	(168)
7.6.1	测试原理及步骤	(168)
7.6.2	测点布置和测量步骤	(170)
7.6.3	实测资料整理与分析	(171)
7.7	老虎台矿三维地应力场反演	(174)
7.7.1	初始地应力场反演分析法研究	(174)
7.7.2	初始地应力场回归分析原理	(176)

7.7.3	初始地应力场数学模型	(177)
7.7.4	地应力反演及成果分析	(180)
7.8	小结	(184)
第8章	采煤过程中矿区稳定性研究	(185)
8.1	岩石(体)力学计算参数研究	(185)
8.1.1	概述	(185)
8.1.2	BP 人工神经网络	(186)
8.1.3	岩体力学参数反演条件	(188)
8.1.4	矿区岩体力学参数反演	(190)
8.2	数值计算和分析理论	(194)
8.2.1	有限差分元法——FLAC ^{3D}	(195)
8.2.2	有限元法	(199)
8.3	深山峡谷型片区数值分析 (I 型)	(203)
8.3.1	研究内容和计算工况	(203)
8.3.2	材料模型和参数	(204)
8.3.3	大变形数值分析	(205)
8.3.4	分析小结	(207)
8.4	深埋倾斜插入型片区数值分析 (II 型)	(207)
8.4.1	研究内容、计算工况和参数	(207)
8.4.2	U2-2 剖面	(209)
8.4.3	Y4-4 剖面	(214)
8.4.4	分析小结	(221)
8.5	不受 F_1 和 F_{1A} 断层控制的峡谷型片区数值分析 (III 型)	(223)
8.5.1	研究内容、计算工况和参数	(223)
8.5.2	大变形数值分析	(224)
8.5.3	有限元数值分析	(229)
8.5.4	分析小结	(232)
8.6	本章小结	(233)
8.6.1	老市政府片区	(233)
8.6.2	榆林桥南片区	(234)
8.6.3	天湖桥南片区	(234)
第9章	深井安全开采控制决策系统	(236)
9.1	概述	(236)
9.1.1	研究现状	(236)
9.1.2	系统组成与实施	(237)
9.2	三维地质建模及可视化	(237)
9.2.1	三维建模的数据结构	(238)
9.2.2	三维界面的 NURBS 建模	(238)
9.2.3	复杂地质条件煤矿矿区三维实体建模	(240)

9.2.4	基于地质信息的三维可视化实现	(242)
9.3	基础地质信息系统	(248)
9.3.1	三维地应力场系统	(248)
9.3.2	深部巷道围岩分级子系统	(248)
9.3.3	深井突水信息系统	(252)
9.3.4	煤与瓦斯突出信息系统	(254)
9.3.5	冲击地压信息系统	(255)
9.4	深井灾害风险评估与控制决策系统	(256)
9.4.1	巷道围岩分类与支护决策系统	(256)
9.4.2	突水预测决策系统	(258)
9.4.3	煤与瓦斯突出决策系统	(259)
9.4.4	冲击地压预测决策系统	(260)
9.5	小结	(261)
第10章	矿区地质灾害评估与对策	(263)
10.1	老市政府区工程建设条件评价	(263)
10.1.1	基本工程地质条件	(263)
10.1.2	变形监测分析	(263)
10.1.3	地质灾害危险性分级评价	(264)
10.1.4	稳定性分析与评价	(266)
10.1.5	工程建设条件评价	(266)
10.2	榆林桥南区工程建设条件评价	(267)
10.2.1	基本工程地质条件	(267)
10.2.2	变形监测分析	(267)
10.2.3	地质灾害危险性分级评价	(269)
10.2.4	稳定性分析与评价	(269)
10.2.5	工程建设条件评价	(270)
10.3	天湖桥南区工程建设条件评价	(270)
10.3.1	基本工程地质条件	(270)
10.3.2	变形监测分析	(271)
10.3.3	地质灾害危险性分级评价	(276)
10.3.4	稳定性分析与评价	(276)
10.3.5	工程建设条件评价	(277)
10.4	结论与建议	(277)
10.4.1	结论	(277)
10.4.2	建议	(278)
参考文献		(281)

第1章 绪 论

1.1 引言

矿产资源是人类赖以生存、社会赖以发展的物质基础，其作用在国民经济与社会发展中具有不可替代性。人类在开发利用矿产资源的同时，也改变或破坏了矿区的自然地质环境，从而产生众多的地质灾害，影响人类自身的生存环境。

矿山地质环境是指曾经开采、正在开采或准备开采的矿床及其邻近地区，其岩石圈上部与大气、水、生物圈组分之间不断地进行着联系（物质交换）和能量流动，这一部分组成一个相对独立的环境系统。这一系统是以岩石圈为依托，矿产资源开发为主导，不断改变着地球表面和岩石圈自然平衡状态的地质环境，也是一个环境地质问题较多、地质灾害较突出的环境。

矿山城市是指因矿产资源开发而兴起或发展起来的城市，是我国城市群体的重要组成部分，为我国国民经济的发展和城市化进程的推进起到了重要的作用。但随着我国社会主义市场经济的发展，矿山城市发展中的各种深层次矛盾和问题逐步暴露出来，很多城市面临着“矿竭城衰”的危机。众所周知，中国早期的矿山建设忽略了矿产资源开发与环境的协调发展，大多由矿建城，由矿兴城，形成围绕矿山的人居和社会财富聚集，由此成长为一类矿产资源开发型城市。随着矿产资源的日渐萎缩，由于人类工程活动、地质构造条件和气候等综合因素引起的生态地质环境危害将进一步显现和恶化，引发的各类地质灾害日渐突出，它们广泛分布在各个地区，不但严重危害人民生命财产安全，而且破坏农业、工业等各种产业，阻碍社会经济发展。因此，矿山城市地质环境的综合治理是一项“功在当代、利在千秋”的工程，本着对国家和政府负责、对人民和子孙负责的态度进行矿区地质环境的治理是当前一项十分紧迫的任务。

1.2 矿山地质灾害研究进展

1.2.1 露天矿山边坡稳定性研究

露天边坡是矿山开采过程中人类工程活动形成的，是矿山生产活动中最基本的地质环境之一，也是矿山开采中常见的工程形式。边坡的稳定性受到多种因素的影响，主要有地形地貌、岩土体类型及性质、地质构造、水文地质条件、自然地质现象和人类工程活动等。

人们通常将边坡未发生失稳前的变形视为边坡变形，如露天矿台阶面和地表面出现断

续裂缝、运输铁轨出现轻度的弯曲等，此时边坡并不失其完整性。边坡失稳破坏是指边坡变形到一定程度而导致边坡解体、崩落、滑落。边坡变形常是边坡破坏的前兆，但在一定条件下如能加以整治，边坡往往不至于发生破坏。

复杂岩体边坡的变形与稳定性问题一直是岩土和采矿工程领域的一项重要研究内容，大部分的工程活动，需要在复杂岩土体中进行大规模的开挖，形成人工复杂的边坡。为解决复杂岩体边坡的合理设计以及变形与稳定性问题，国内外学者进行了广泛的研究，在理论和实践上都取得了很大的进展。

矿山边坡的稳定性分析始于 20 世纪 50 年代，主要是通过岩体试验及影响因素分析，对边坡稳定性进行评价，为矿山边坡角设计提供依据。在此期间，我国学者继承和发展了前苏联的“地质历史分析”法，并将其应用于我国出现的各种矿山滑坡的分析和研究中，推动了边坡稳定性研究。而且，这个阶段我国学者采用工程地质类比法对边坡稳定性进行了评价，研究了抚顺西露天煤矿、阜新海州露天煤矿和内蒙古平庄西露天煤矿等矿山经常出现的采场下盘软岩边坡稳定性及边坡治理问题。这一阶段的边坡稳定性分析，多以材料力学和均质弹性理论为基础进行计算，促进了边坡理论的形成和发展。

20 世纪 60 年代，世界上发生了两起重大岩体失稳事件：其一是法国 Malpasset 坝左岸坝肩岩体的崩溃造成了巨大的经济损失和人员伤亡；另一起是意大利 Vajont 大坝附近岩体迅速下滑、填满水库，造成严重损失。这些地质灾害使人们对岩体结构的特征、岩体的力学属性、岩体的变形破坏机制与过程的研究愈来愈重视。中国科学院武汉岩土力学所对大冶铁矿边坡进行了系统的研究，通过勘察试验和计算分析，对边坡稳定性进行了评价。中国科学院地质研究所在国内首次应用岩体工程地质力学的理论对金川有色公司露天矿的边坡稳定性和岩体变形进行了深入系统的研究。

20 世纪 70 年代，国内外学者在综合分析了以往大量的实际工作和研究后，逐渐深入到边坡变形破坏的机理分析，边坡稳定性分析逐渐开始规范化。中国科学院地质研究所结合工程地质学和岩体力学研究，强调地质条件和地质构造对边坡稳定的影响和控制作用，并以金川露天矿为典型工程实例，对边坡的变形、破坏进行了长期、全面、系统的研究，形成了岩体结构对边坡的控制理论。此阶段的边坡稳定性分析方法主要是极限平衡法，具有代表性的计算方法有瑞典条分法、毕肖普法、简布法、推力传递法等。

进入 20 世纪 80 年代，随着计算机技术的发展，数值分析方法迅速发展起来，一些新的理论被引入到边坡的研究中，人们从不同的角度对边坡体的稳定性进行分析，极大地推动了边坡稳定性的研究。比较成熟的数值方法有有限单元法、边界单元法、离散单元法和快速拉格朗日法等，比较成熟的软件有 ANSYS, ABAQUS, ADINA, BOUNDT, UDEC, 3DEC, 2D - BLACK, FLAC 等。

20 世纪 90 年代，随着人类工程活动更加频繁，对矿产资源的持续开采导致人工边坡的规模不断增大，使得边坡稳定性问题显得十分突出。在此阶段内，诸如非线性科学理论、非连续介质理论、可靠性分析理论以及计算机技术等学科的不断发展，为研究边坡稳定性问题提供了新的途径和方法，由此边坡稳定性研究步入了定性与定量相结合、概念模型与仿真模拟相结合、监测与反馈分析相结合的新阶段，并取得了许多有意义的成果。我国相继组织了“露天矿边坡工程研究”、“露天矿边坡优化设计方法研究”、“高陡边坡工程及计算机管理技术研究”、“高陡边坡综合治理措施研究”、“采场深部加陡及露天转地

下的边坡稳定性研究”、“露天矿边坡岩体类型的研究”、“露天矿边坡稳定性分析综合集成智能研究”、“高陡边坡变形破坏机理试验研究”等“六五”、“七五”、“八五”国家重点科技攻关研究专题,在解决实际边坡工程难题的同时,也提高了我国边坡工程的研究水平,促进了科技发展与进步。

边坡稳定性分析与评价是边坡研究的核心。近年来,各种露天矿边坡稳定性的分析方法得到了较大发展,提出了岩体强度空间变异性理论与边坡渐进破坏三维随机分析方法、基于 GIS 空间数据库的三维边坡稳定性分析方法;朱大勇等提出了临界滑动场概念,能够方便准确地确定边坡的任意形状与临界滑动面,临界滑动场本身还可同时反映边坡整体和局部的稳定性。同时,数值模拟技术普遍应用于边坡稳定性研究,且逐步从定性过渡到半定性、半定量研究边坡变形破坏过程及内部作用机制过程,并从整体上认识边坡变形破坏机制及边坡稳定性的发展变化。1976 年有限单元法开始应用于研究边坡稳定问题,随后发展了边界元法、离散元法、FLAC 方法、不连续变形分析 DDA 法、数值流形方法、界面元等数值方法。这些方法在我国也得到了广泛应用。

1.2.2 开采沉陷研究

人们对地表沉陷的认识及相关理论的建立是随着生产生活中遇到的相关问题逐步总结发展起来的。在 15 世纪,比利时列日城就对地下开采所导致的问题颁布相关法令,并形成了最初的地表沉陷学假设,即垂线理论。

20 世纪是开采沉陷学大发展的阶段。这个阶段地表沉陷学的研究基本上是沿着经验方法、连续介质力学和非连续介质力学 3 个方向发展的。1903 年 Halbaum 提出了采空区上方岩层为悬臂梁的观点,并导出了地表应变与曲率半径成反比的结论。1913 年艾卡特提出了岩层移动过程是各分层逐层弯曲结果的观点。1919 年莱曼则提出了地面沉陷是类似于一个褶皱过程的观点。嗣后, Schmitz、Keinhost 和 R. Bals 研究了开采影响的作用面积及分带,形成了影响函数的概念。1925 年 Keinhost 提出了水平移动计算公式 $U = W \cdot \tan\varphi$, 其中, W 为地表下沉值, φ 为地表点到开采中心的连线与铅垂线的夹角。

1954 年波兰学者 Litwiniszyn 提出了随机介质理论,该理论把岩层移动视为一个随机过程,推证出地表下沉服从柯尔莫奇罗夫方程,后来被发展为广泛应用的概率积分法。随后,英国学者 Berry 和 Sales 根据弹性理论分别推导出均质各向同性平面、横观各向同性平面和三维条件下的地表移动表达式,将采场顶底板设为不接触、部分接触和完全闭合 3 种形式。在南非, Salamon 应用弹性理论提出的面元原理将连续介质力学与影响函数法相结合,成为后来边界单元法的基础。1978 年德国学者克劳齐总结概括了煤矿地表沉陷的预测方法,发表了专著《采动损害及其防护》。

我国对地表沉陷规律的研究起步较晚,系统的研究是从新中国成立后开始的。1963 年周国铨等根据实测资料分析,建立了地表下沉盆地的负指数剖面函数。1965 年廖国华、刘宝深在《煤矿地表移动基本规律》一书中对波兰学者提出的随机介质理论进行了进一步完善、改进,形成地表移动预计的概率积分法。20 世纪 80 年代到 90 年代,我国基于地表沉陷理论的覆岩理论和实践出现了飞速的发展。1983 年,钱鸣高提出了采场矿山压力与控制理论,并出版了《采场矿山压力与控制》一书。1987 年,宋振骥提出了采场上覆岩层运动的矿山压力和岩层控制理论,并出版了《实用矿山压力控制》一书。邓喀中

等提出了岩体沉陷的结构效应对地表沉降的影响。邹友峰等提出了条带开采条件下地表沉陷预计的三维层状介质理论。吴立新等提出了条带开采覆岩破坏的托板理论。崔希民等对主断面的地表移动与变形进行了实时位移的分析,应用流变模型进行地表沉陷研究。钱鸣高提出了关键层理论,推动了岩层移动理论的发展。赵经彻等从可持续发展角度深入研究了建筑物下煤炭资源的开采战略。于广明从非线性科学角度认识了地表沉陷的复杂性,开始研究覆岩活动的非线性机理和规律。李玉琳等运用流变特性理论分析了地表沉陷机理。宋常胜等对地表沉陷的主控因素和机理进行了理论分析和模拟试验,探讨了巨厚松散层下条带开采岩土层移动的复合介质模型。黄平路等研究了复杂地质条件下矿山地下开采地表变形规律,得出地下采空区的扩大是引起地表塌陷的主要原因。

然而,现有的开采沉陷理论基本上都是以均匀连续介质假设作为研究前提的,不考虑岩层中存在的不连续面,如节理、裂隙以及断层的影响。而实际上岩层中存在大量的节理裂隙和规模不等的断层,这些不连续面的存在对开采沉陷有很大影响,尤其是当开采区域断层比较发育时,断层对开采沉陷的影响非常明显,在这种情况下必须考虑断层等不连续面的影响;另一方面,由于目前的开采沉陷预计理论(如概率积分法)关键参数的获取必须经过现场观测才能确定,因而给实际预测工作造成了一定的难度。鉴于此,国内外一些科研技术人员尝试采用数值模拟方法(如 ANASYS、FLAC 软件模拟等)对煤矿开采沉陷进行预测,并取得了可喜的成绩。

开采沉陷控制技术是“三下一上”开采的关键,通过多年的研究,学者提出了控制地表变形的协调开采、长工作面开采、合理布置工作面等开采措施。对控制地表沉陷的条带开采、房柱式开采、充填开采进行了大量研究,提出了一系列的理论和办法,包括房柱尺寸大小与覆岩结构、采深、采厚等的关系,并研究了矿柱的长期稳定性。对离层注浆减沉的理论和办法进行了理论和实际应用研究。在理论方面,研究了离层裂缝发育位置、大小、工作面最佳开采空间、浆液扩散半径、注浆孔间距等;在实践方面,开展了离层注浆减沉工艺、离层注浆减沉率等的现场研究,取得了离层注浆减沉的效果。有关离层注浆减沉的研究始于前苏联,曾有高压注浆减缓地表沉降和变形的专利;在波兰的文献中也曾经提到过离层注浆减沉率为 20%~30%。我国于 1967~1968 年曾在抚顺胜利矿进行离层注浆减沉试验,注入黄泥 304m³,折合固体形态黄土量 87m³,注浆压力为 2~9MPa,获得减沉率为 67%。但是,也存在一些问题,如减沉率采煤、注浆扩散半径计算、离层注浆减沉后地表移动计算方法等,有待进一步研究完善。

在矿区沉陷区生态治理方面,主要是对矿区环境进行生态开发利用,并取得了一定的成绩,为矿区沉陷区的治理积累了经验。德国通过对科隆矿区的复垦改造,一方面发展淡水养鱼,另一方面围堤、植树、置景,塑造了一个由 40 多个人工湖组成的游览公园,使科隆矿区成为一处秀丽的风景区。捷克从 20 世纪 50 年代初就开始进行煤矿塌陷的生态开发治理工作,其主要途径除复田、复林外,还在塌陷区兴建渔场、游泳场、牧马场、体育场、赛车场、狩猎场以及水上公园、森林公园等,因地制宜地进行生态环境再造和多种经营开发,1952~1985 年累计复田 1 万多公顷,取得了明显的环境效益和经济效益。澳大利亚、美国、英国、加拿大等发达国家广泛开展了矿区复垦和生态恢复,对复垦区的复垦规划、表土剥离与保护、地形设计、尾矿库表层处理、土壤改良、植被恢复与保育等各个环节进行了深入的研究。澳大利亚环保局在总结本国矿区复垦成果的基础上,于 1997 年