

矿山地质环境保护与治理技术方法系列丛书

广西合山煤矿采空 塌陷机理与风险评价

李远耀 柴 波 唐朝晖 编 著
张 傲 陈仁全 董欣欣



*The Mechanism and Risk Assessment of
Heshan Coal Mining Collapse in Guangxi*



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

矿山地质环境保护与治理技术方法系列丛书

广西合山煤矿采空塌陷机理与风险评价

The Mechanism and Risk Assessment of Heshan Coal Mining Collapse in Guangxi

李远耀 柴 波 唐朝晖
张 傲 陈仁全 董欣欣 编著



中国地质大学出版社
ZHONGGUO DIZHI DAXUE CHUBANSHE

图书在版编目(CIP)数据

广西合山煤矿采空塌陷机理与风险评价/李远耀等编著. —武汉:中国地质大学出版社, 2016.8

(矿山地质环境保护与治理技术方法系列丛书)

ISBN 978-7-5625-3831-8

I. ①广…

II. ①李…

III. ①煤矿开采-地面沉降-风险评价-广西

IV. ①TD327

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 113386 号

广西合山煤矿采空塌陷机理与风险评价

李远耀等 编著

责任编辑:舒立霞

选题策划:毕克成 张晓红

责任校对:张咏梅

出版发行:中国地质大学出版社(武汉市洪山区鲁磨路 388 号)

邮政编码:430074

电 话:(027)67883511

传真:67883580

E-mail:cbb@cug.edu.cn

经 销:全国新华书店

<http://www.cugp.cug.edu.cn>

开本:787 毫米×1 092 毫米 1/16

字数:371 千字 印张:14.5

版次:2016 年 8 月第 1 版

印次:2016 年 8 月第 1 次印刷

印刷:武汉中远印务有限公司

印数:1—1 000 册

ISBN 978-7-5625-3831-8

定价:128.00 元

如有印装质量问题请与印刷厂联系调换

前言

我国煤炭开采量和使用量长期占据世界首位。煤炭亦为我国能源最主要的组成部分,有力保障了我国经济建设和社会发展。然而,在过去技术和管理水平不高的情况下,长期以来大规模的粗放开采,一方面导致诸多煤炭矿山资源迅速枯竭;另一方面矿山闭坑之后,随之而来的地质环境问题日益突出。特别是我国矿山地质环境保护与治理工作相比欧美等矿产主产国起步较晚,许多矿山的地质环境问题得不到有效控制,进而影响到矿区及当地居民的生产生活。其中,在煤炭矿山地质环境问题中最为突出的是采空塌陷,其所带来的环境、建筑和人员损害的灾害性事例屡有发生,为此,开展采空塌陷的风险研究是十分必要的。

广西合山作为我国南方著名的百年煤炭老矿区之一,为我国南方地区经济建设做出过巨大贡献。由于合山市的煤炭资源已接近枯竭,地质环境问题日益突出,2009年3月被国务院批准列为全国第二批资源枯竭城市之一。为推动合山市的可持续发展和城市转型,亟待加强该地区煤炭矿山地质环境的综合治理。同时,我国南方各省总体为贫煤省份,对煤炭矿山地质环境问题的认知深度和治理程度均还不足,对于常见的煤矿采空塌陷地质环境问题的治理缺乏科学有效的指导。为此,以广西合山为例探索我国南方贫煤地区采空塌陷的风险评价与管理,对于南方煤矿地质环境治理工作具有重要的理论和实际意义。

课题组于2010年起积极参与到财政部、国土资源部矿山治理重大专项“广西壮族自治区合山市资源枯竭城市矿山地质环境治理工程”中,经过长达数年的煤炭矿山地质环境问题的野外调查、风险评估、治理工程设计与研究工作,对该地区采空区塌陷发生机理与风险评价也有了较为系统的认识。全书的研究工作主要围绕广西合山煤矿采空塌陷的风险评价进行,野外系统调查了此类南方灰岩地区地质背景下石炭纪和二叠纪煤层采空塌陷,并借助数值仿真方法对其发生机理进行探索,在此基础上对该地区采空塌陷危险性、易损性和风险性均做了详细分析,最后总结目前采空塌陷风险区的治理措施,并运用到广西合山煤矿典型采空塌陷风险区的治理规划。因此,本书可为相关学科的研究技术人员及实际工作者提供

一些帮助和借鉴。

本书共分为七章。第一章,回顾了煤矿采空塌陷研究的历程,并较为全面地梳理了国内外对煤矿采空塌陷发生机理和风险评价及管理的研究现状;第二章,简述了广西合山煤矿采空塌陷所发生的地质与开采背景,并总结归纳了其形态特征与稳定性现状;第三章,建立了典型采空塌陷的地质模型和数值分析模型,并分析了浅埋缓倾斜与深埋急倾斜煤层采空塌陷形成过程中应力与变形特征;第四章,对典型矿区采空塌陷的危险性进行评价;第五章,从采空塌陷灾害强度入手,分析了采空区地面建筑物的脆弱性,并定量评价了采空塌陷区建筑物和人员的易损性;第六章,介绍了煤矿采空塌陷风险等级和风险容许标准,随后建立了风险评价模型,并用于典型矿区采空塌陷的风险评价;第七章,提出了采空塌陷风险管理的总体框架,归纳了目前常见的采空塌陷治理技术与组织管理措施,并介绍了合山市典型矿区采空塌陷风险区的治理案例和治理方案。

本书编写人员分工如下:第一章由李远耀、陈仁全和张傲编写,第二章由柴波、李远耀、陈仁全编写,第三章由唐朝晖、董欣欣和陈仁全编写,第四章由张傲、李远耀和柴波编写,第五章由李远耀、张傲和董欣欣编写,第六章由唐朝晖、张傲和柴波编写,第七章由李远耀、柴波和陈仁全编写。全书由李远耀统稿,柴波、唐朝晖校订。

此外,本书的研究工作得到了中国地质大学(武汉)周爱国教授、蔡鹤生教授、殷坤龙教授、周建伟副教授等的指导和建议。研究生李鑫、补建伟、龙翔、刘爽、盛于蓝、刘楠、马晓峰、杨月、罗超、王汉臣、胡晨、马丽、易红清、李志伟、段恒、苏红瑞、万佳文等积极参与了矿山地质环境问题现场调查工作。在项目执行与资料收集过程中,还得到了广西合山市人民政府和国土资源局的大力帮助,在此对谢东、吴建昆、韦岭春等同志致以衷心的感谢。

最后,煤矿采空塌陷发生与引起的地面变形机理及其灾害风险评价研究,所涉及的学科范围较为宽广,研究手段也有多种,总体而言该研究仍处于发展和完善之中。因此,本书所言之理论与实践探索都可能存在一些局限或不足,衷心希望读者批评指正!

笔 者

2015年12月8日

目 录

第一章 煤矿采空塌陷地质环境问题研究现状	(1)
第一节 广西合山煤矿采空塌陷的研究意义	(1)
第二节 煤矿采空塌陷分类与研究历程	(3)
一、采空塌陷基本概念与主要分类	(3)
二、采空塌陷相关矿山专业术语	(5)
三、采空塌陷机理与风险评价研究	(6)
第三节 煤矿采空塌陷机理研究	(7)
一、采空塌陷经典力学分析理论	(7)
二、采空塌陷变形预测方法理论	(9)
三、采空塌陷稳定性评价方法	(10)
四、采空塌陷机理研究	(11)
第四节 煤矿采空塌陷风险评价研究	(14)
一、地质灾害风险评价理论的建立与发展	(14)
二、采空塌陷灾害风险研究成果	(15)
三、采空塌陷风险评价研究趋势	(15)
第五节 煤矿采空塌陷风险管理与控制研究	(16)
一、资源枯竭型城市的转型探索	(16)
二、采空塌陷地质环境风险控制措施	(17)
三、采空塌陷风险管理措施与发展趋势	(18)
第二章 广西合山煤炭矿山开采现状及采空塌陷特征	(20)
第一节 合山煤矿开采地质背景	(20)
一、自然地理环境	(20)
二、社会经济概况	(21)

三、区域地质概况	(21)
四、工程与水文地质条件	(28)
第二节 广西合山煤炭矿山开采现状	(31)
一、合山煤炭资源开发历程	(31)
二、合山煤田主要可采煤层	(32)
三、合山煤炭矿山发展现状	(32)
四、主要矿山地质环境问题	(33)
第三节 广西合山煤矿采空塌陷特征分析	(35)
一、采空塌陷平面分布特征	(35)
二、采空塌陷规模大小特征	(37)
三、采空塌陷剖面形态特征	(39)
四、采空塌陷平面形态特征	(41)
第四节 广西合山煤矿采空塌陷稳定性现状	(42)
一、采空塌陷上覆岩层破坏特征	(42)
二、采空地表移动及破坏规律	(44)
三、采空塌陷稳定性现状	(45)
四、采空塌陷地质环境问题总体特点	(46)
五、采空塌陷地质环境问题的环境影响	(47)
第三章 广西合山煤矿采空塌陷机理	(49)
第一节 采空区覆岩力学参数统计与岩体质量评价	(49)
一、岩体结构面统计分析	(49)
二、岩体几何参数分布模型与检验	(56)
三、岩体力学参数试验过程与结果	(61)
四、采空区覆岩结构类型及质量评价	(64)
第二节 采空塌陷形成的基本条件及影响因素	(66)
一、采空塌陷形成的基本条件	(66)
二、采空塌陷形成的主要影响因素	(67)
第三节 浅埋缓倾斜煤层采空塌陷三维数值分析	(78)
一、缓倾斜煤层采空区塌陷变形主要特点	(78)
二、离散元法三维数值分析方法基本理论	(79)

三、典型浅埋缓倾斜煤层采空塌陷区	(83)
四、离散元三维数值建模过程	(84)
五、浅埋缓倾斜煤层采空塌陷变形规律	(86)
第四节 深埋急倾斜煤层采空塌陷三维数值分析	(93)
一、深埋急倾斜煤层采空区覆岩变形主要特点	(93)
二、有限差分法三维数值分析方法基本理论	(93)
三、典型深埋急倾斜煤层采空塌陷区	(95)
四、有限差分法三维数值建模过程	(95)
五、深埋急倾斜煤层采空塌陷变形规律	(97)
第五节 广西合山煤炭矿山采空塌陷机理	(97)
一、浅埋缓倾斜煤层采空塌陷破坏机制	(97)
二、深埋急倾斜煤层采空塌陷破坏机制	(103)
三、广西合山煤矿采空塌陷破坏模式总结	(106)
第四章 广西合山煤矿采空塌陷危险性分析	(108)
第一节 合山东矿采空塌陷模拟与变形分析	(108)
一、合山东矿矿区采空区概况	(108)
二、采空塌陷数值模拟建模过程	(110)
三、采空塌陷变形与应力数值分析	(113)
第二节 基于关键层理论的极限平衡模型	(117)
一、关键层基本概念	(117)
二、关键层结构计算模型	(118)
三、极限平衡模型建立	(120)
第三节 采空塌陷可靠度分析	(122)
一、可靠度分析理论背景	(122)
二、可靠度计算方法	(123)
第四节 采空塌陷危险性评价	(124)
一、危险性评价总体思路	(124)
二、初次破断采空塌陷危险性评价	(125)
三、周期破断采空塌陷危险性评价	(126)
第五章 广西合山煤矿采空塌陷易损性分析	(128)

第一节 广西合山煤矿采空塌陷易损性评价模型	(128)
一、煤矿采空塌陷易损性评价内容	(128)
二、基于 Logistic 函数的建筑物易损性评价模型	(129)
第二节 采空塌陷灾害强度评价	(131)
一、采空塌陷灾害强度评价模型	(131)
二、采空塌陷对建筑物的影响特征分析	(132)
三、基于建筑结构有限元分析的地表位移指标	(136)
四、基于时间序列模型的变形速度指标	(153)
第三节 建筑物脆弱性评价	(156)
一、建筑物脆弱性评价模型	(156)
二、建筑物脆弱性评价指标	(156)
第四节 建筑物易损性评价	(158)
一、采空区地面建筑物现状	(158)
二、建筑物易损性评价	(160)
第五节 人员易损性评价	(160)
一、人员易损性评价方法分析	(160)
二、基于建筑物易损性的人员易损性评价	(161)
第六章 广西合山煤矿采空塌陷风险评价	(163)
第一节 采空塌陷风险评价模型与方法	(163)
一、风险评价模型	(163)
二、风险评价方法	(164)
第二节 风险等级划分	(166)
一、风险分级的含义	(166)
二、风险等级划分方法	(166)
第三节 风险容许标准研究	(167)
一、风险容许标准框架	(167)
二、生命风险容许标准	(168)
三、经济风险容许标准	(171)
第四节 广西合山煤矿采空塌陷风险评价	(174)
一、广西合山煤矿采空塌陷风险度评价	(174)

二、广西合山煤矿采空塌陷风险期望评价	(175)
第七章 广西合山煤矿采空塌陷区风险管理对策	(178)
第一节 采空塌陷风险管理总体框架	(178)
第二节 采空塌陷风险控制措施概述	(178)
一、采空区治理技术措施	(178)
二、采空区治理组织管理措施	(192)
第三节 采空塌陷风险区治理规划与主要措施	(194)
一、东矿矿区采空塌陷风险区治理总体规划	(194)
二、东矿矿区采空塌陷风险区治理主要措施	(197)
三、东矿矿区采空塌陷风险区治理效益综合分析	(206)
主要参考文献	(210)

第一章 煤矿采空塌陷地质环境问题研究现状

我国煤炭产量长期处于世界首位,煤炭在我国一次能源的生产和消费中保持在 70% 左右。由于生产力与管理水平的差异,过去较长时间里的粗放开采,一方面导致部分煤炭资源迅速枯竭,另一方面诱发诸多地质环境问题。广西合山煤炭资源为我国西南少数民族地区经济建设做出过巨大贡献,然而,近十年来该地区矿山地质环境问题突出,采空塌陷严重影响了广大群众的生产生活和城市基础建设。本章以广西合山煤炭矿山采空塌陷的研究意义为切入点,对国内外煤炭矿山采空塌陷的机理、风险评价体系研究历程与现状进行了总结,并概述了煤矿采空塌陷风险控制与管理措施。

第一节 广西合山煤矿采空塌陷的研究意义

在矿山开发的生命过程中,从最初的成长期到中间的鼎盛期,再到最后的衰退期经过了漫长的开发阶段。在资源被开采和挖掘的过程中以及矿山关闭以后,造成了许多的次生灾害和地质环境问题,对当地人们的生命财产安全形成了极大的威胁(朱旺喜等,2003)。我国共有 118 座资源枯竭型城市,占全国城市总数的 18%,涉及总人口 1.54 亿,其中煤炭城市 63 座,有色金属城市 12 座,石油城市 9 座,黑色冶金城市 8 座,其他矿业城市 5 座。国务院在 2007 年 12 月制定出台《国务院关于促进资源型城市可持续发展的若干意见》后,先后分 3 批,将阜新、辽源、焦作、合山等 69 座地、县级市区列入资源枯竭型城市名单,其中煤炭资源枯竭型城市有 38 座。为了支持这些资源枯竭城市顺利转型,国家发展和改革委员会采取了多项保障措施,如对废弃矿物的再利用、改善就业条件、开发连续性的顶替产业和构建综合性产业结构。为统筹推进全国资源型城市可持续发展,国务院于 2013 年印发了《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)》,这是我国首部关于资源型城市可持续发展的国家级专项规划。同时,中央对 69 座资源枯竭型城市发展进行专项资金支持(表 1-1),截至 2014 年 6 月,中央财政性转移支付支持资金已达 809 亿元,对于维护国家能源资源安全、促进经济发展方式转变、推进新型工业化和新型城镇化、建设资源节约和环境友好型社会具有重要意义。

大量开采的煤炭资源在为国民经济做出巨大贡献的同时,也带来了严重的环境污染和大面积的地面塌陷问题。我国煤炭产量占全世界的 38.4%,每产 1 万 t 煤将诱发 0.2 公顷(1 公顷=10 000 m²)地面沉陷(Bian et al, 2010)。到 2006 年 12 月为止,煤矿采空区总面积已超过了 70 万公顷,并且仍将以每公顷 0.24 万 t 的速度增加,考虑到矿区的人口总数,人均采空区面积则达到了 1.86 公顷(王录合等,2009)。采空塌陷已造成了严重的地质环境问题,如土地资源占用、地裂缝、农作物减产、崩滑次生灾害和生态环境恶化等。此外,还严重地制约着矿区基础设施的建设和运营安全,如公路、铁路以及输气调查等重大工程。

表 1-1 全国中央财政转移资金支持的 69 座资源枯竭城市名单统计

省(区、市)	第一批(12 座)	第二批(32 座)	第三批(25 座)
河北	—	下花园区(煤)、鹰手营子矿区(煤)	井陉矿区(煤)
山西	—	孝义市(煤)	霍州市(煤)
内蒙古	—	阿尔山市(森工)	乌海市(煤)、石拐区(煤)
辽宁	阜新市(煤) 盘锦市(石油)	抚顺市(煤)、北票市(煤)、弓长岭区(铁)、 杨家杖子(钼)、南票区(煤)	—
吉林	辽源市(煤) 白山市(煤)	舒兰市(森工)、九台市(煤)、敦化市(森工)	二道江区(煤)、汪清县(森工)
黑龙江	伊春市(森工) 大兴安岭地区(森工)	七台河市(煤)、五大连池市(森工)	鹤岗市(煤)、双鸭山市(煤)
江苏	—	—	贾汪区(煤)
安徽	—	淮北市(煤)、铜陵市(铜)	—
江西	萍乡市(煤)	景德镇市(瓷)	新余市(铁)、大余县(钨)
山东	—	枣庄市(煤)	新泰市(煤)、淄川区(煤)
河南	焦作市(煤)	灵宝市(金)	濮阳市(石油)
湖北	大冶市(铁)	黄石市(铁铜煤和硅灰石)、潜江市(石油)、 钟祥市(磷)	松滋市(煤)
湖南	—	资兴市(煤)、冷水江市(锑)、耒阳市(煤)	涟源市(煤)、常宁市(铅、锌)
广东	—	—	韶关市(煤、铁)
广西	—	合山市(煤)	平桂管理区(锡)
海南	—	—	昌江县(铁)
重庆	—	万盛区(煤)	南川区(煤)
四川	—	华蓥市(煤)	泸州市(天然气)
贵州	—	万山特区(汞)	—
云南	个旧市(锡)	东川区(铜)	易门县(铜)
陕西	—	铜川市(煤)	潼关县(金)
甘肃	白银市(银、铜)	玉门市(石油)	红古区(煤)
宁夏	石嘴山市(煤)	—	—

合山煤炭矿山自 1905 年开采至今已逾百年,煤田浅部煤层已全部开采,深部煤层因开采技术要求高、难度大、成本高暂未开采,煤炭可利用资源已基本枯竭。百年采煤活动使得合山市随处可见大面积的采空区,共约 46.82km^2 ,采空区上方及其附近的地面沉降、地面塌陷、地裂缝以及由此带来的次生问题如建筑物开裂、井水枯竭、沟渠错断等问题十分普遍。经调查,由于地面沉降造成下沉的公路、铁路总长达 30 多千米,农田倾斜开裂达 4 万多亩($1\text{亩}=666.6\text{m}^2$),水利干渠遭到破坏 20 多千米,5 座水库、山塘库容共减少 200 多万立方米,导致全市房屋开裂达 45.8万 m^2 ,受损住户达 7630 户,经济损失 1.5 亿多元,农田水利设施遭破坏。造成人员伤亡的采空塌陷事故时有发生,2011 年 7 月 2 日,强降雨诱发合山市樟村矿采空塌陷,塌陷坑直径约 80m,深约 100m,致使井下作业 20 名工人遇难。

合山市于 2009 年 3 月被国务院批准列为全国第二批资源枯竭城市。为推动合山市的可持续发展,需加强矿山地质环境综合治理工作,特别是探索煤炭矿山采空塌陷发生机理和风险评价体系,这将为合山城市转型带来重大的历史机遇。广西合山煤炭矿山地处我国南方,雨水充沛;煤层薄、煤质差,煤层顶板为灰岩和硅质灰岩,上覆岩层以灰岩、页岩为主,部分地区有较厚红黏土覆盖层;喀斯特地貌发育,山区地形,其特殊的地质背景与广泛研究的华北和华东大型煤炭矿山的采空塌陷有区别,与国外许多采空塌陷的沉积盆地地质背景也有区别。为此,本书以财政部、国土资源部的矿山地质环境治理专项“广西壮族自治区合山市资源枯竭城市矿山地质环境治理工程”为项目依托,系统介绍广西合山煤炭矿山采空塌陷地质灾害的特点,科学地探究区内采空塌陷的发生机理,进行煤炭采空塌陷风险评价,以期能为我国南方类似贫煤省份中小型煤炭矿山地质环境治理工作提供参考。

第二节 煤矿采空塌陷分类与研究历程

一、采空塌陷基本概念与主要分类

开采沉陷(mining subsidence)指煤被采出后,采区围岩的原始地应力将重新分布并达到新的平衡,在此过程中,矿体周围岩层或地表将经历一个连续移动变形和非连续破坏(开裂、冒落等)的复杂过程(武强等,2004)。简言之,采矿沉陷被看作是因地下采矿而引发的地表移动后的现象(Bell et al, 2000),有连续变形和非连续变形之分,可划分为冒落式、沉陷式和地壑式 3 种类型(武强,2003)。采矿塌陷(mining collapse)是指采矿使地下矿产(煤层)大面积被采空后,顶部岩层失去支撑,在自重作用下发生弯曲、张裂、冒落,并在地表形成塌陷坑或塌陷洼地而造成的灾害。因而,采矿塌陷是开采沉陷的一种极限破坏状态,广泛分布在采空区域的采矿塌陷可称为采空区塌陷或采空塌陷。采空塌陷的主要特点是分布广、规模大、危害重,在各类矿区中,以煤矿最为突出。

(一)连续式塌陷

连续塌陷是因地下开采而造成地表发生变形和位移,在地表形成盆地式的塌陷,塌陷盆地主断面为一条连续而没有间断的光滑曲线(图 1-1)。对比采空厚度,地表位移观测点所记录的位移十分微小。这种连续式的塌陷变形主要出现于因长时间的沉积活动而形成的矿产资源如煤层,或地层结构较为平缓的地层中。

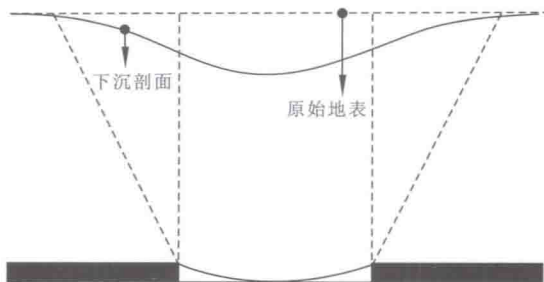


图 1-1 长壁式开采采空区地表移动盆地

当采用长壁法对缓倾斜扁平状的薄矿进行开采时,地表主要表现为产生连续下沉盆地。为了保证地表的稳定性和安全性,需要保持地表下沉连续,因而在开采矿体时必须确保具有一定的开采深度。

(二)不连续式塌陷

不连续式塌陷表现为采空区上方地表局部产生了很大的下沉位移,这种位移一般多为突发性的,使得在沉降断面上发生阶梯变化,形成不连续的间断面。根据剖面形态可分为塌陷坑、筒状塌陷、柱状塌陷、溶洞、矿块崩落、上盘渐进崩落 6 种(图 1-2),或更为简明地归纳分为切冒型和抽冒型两类。

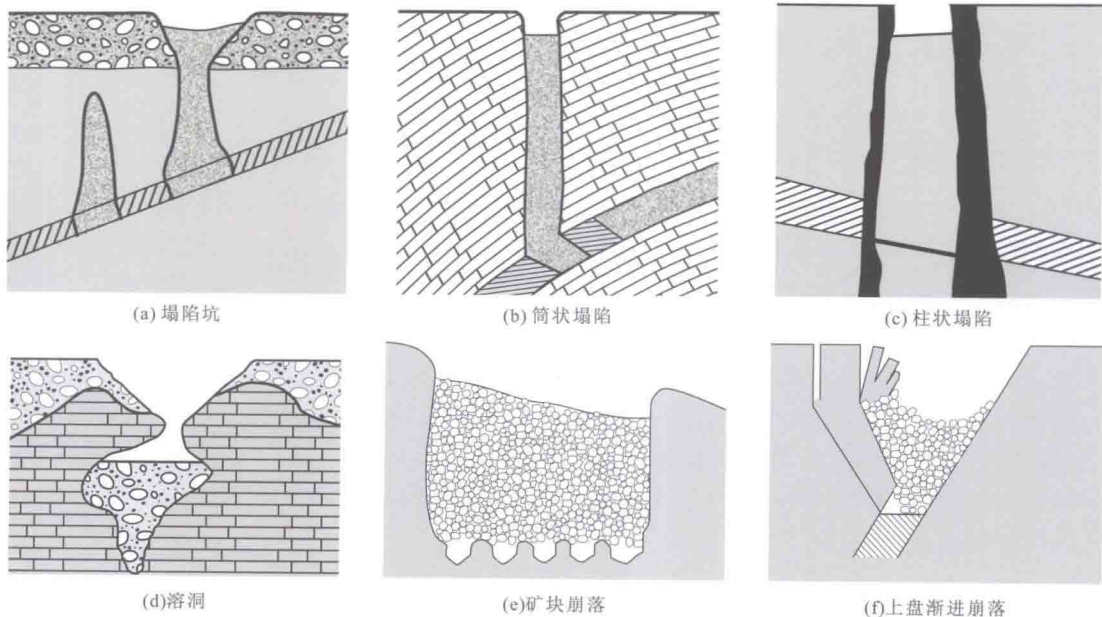


图 1-2 不连续式采空塌陷类型分类(据 Brady et al,2006)

这种不连续式的地表塌陷不仅与采矿方法有关,而且还包括采空区上覆岩体的受力与变形等岩体变形机理因素,一般是由于采空区顶板的突然垮塌而形成的。例如位于美国宾夕法

尼亚州北部的无烟煤矿区,其地表大部分表现为不连续式塌陷,均是由于顶板垮塌而形成的;英国一些闭坑较久的煤矿、铁矿等地下采空区也发生过类似事故。

在一些开采深度较浅的地下采空区,由于矿柱强度的软化,矿柱发生破坏也可能导致不连续塌陷,在地表形成塌陷坑。矿柱的破坏是因地表新建建筑物造成过度的附加荷载或者矿柱在长久支持顶板及岩石自重作用下发生软化,而强度逐渐降低,导致了原来受力状态发生改变,脆性岩体及顶板在突然没有支撑的情况下发生了较大位移而造成地表不连续的塌陷。

二、采空塌陷相关矿山专业术语

(一)采空区类型划分

煤矿采空区(mined-out area in coalmines)是地下煤炭资源开采后的空间及其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地区及范围。狭义的采空区为地下开采空间。规范一般指采空区垮落后反映在地表的最终沉陷区边界与采空区底板边界的连线所圈定的地区和范围。目前,采空区类型划分依据有很多,参考规范主要有按开采时间、开采深度、所采煤层倾角划分等(表 1-2)。

表 1-2 采空区类型划分

划分依据	采空区类型	英文名称	划分类型的简要描述
按开采时间	老采空区	old mined-out area	已停止开采且地表移动变形衰退期已经结束的采空区
	新采空区	new mined-out area	正在开采或虽已停采但地表移动变形仍未结束的采空区
	未来(准)采区	preparatory mining area	已经规划设计,尚未开采的采区
按开采深度	浅层采空区	shallow mined-out area	采深小于 50m 或采深采厚比不大于 30 的采空区
	中深层采空区	middle-deep mined-out area	采深 50~200m 之间或采深采厚比介于 30~60 的采空区
	深层采空区	deep mined-out area	采深大于 200m 或采深采厚比不小于 60 的采空区
按煤层倾角	水平(缓倾斜)采空区	level mined-out area	矿层水平或倾角不大于 15°的采空区
	倾斜采空区	inclined mined-out area	矿层倾角介于 15°~55°之间的采空区
	急倾斜采空区	acute inclined mined-out area	矿层倾角不小于 55°的采空区

(二)开采方式划分

煤炭开采方式种类有很多,最主要有露天和地下开采两类,而地下开采方式可以划分为壁式和柱式等(表 1-3)。壁式采煤法的特点是煤壁较长,工作面的两端巷道分别作为入风和回风、运煤和运料用,采出的煤炭平行于煤壁方向运出工作面,我国多采用壁式采煤法开采煤层。柱式采煤法的特点是煤壁短,呈方柱形,同时开采的工作面数较多,采出的煤炭垂直于工作面方向运出。

表 1-3 煤炭开采方式类型划分

开采方式	英文名称	划分类型的简要描述
长壁采煤法	longwall mining	采煤工作面长度一般在 60m 以上,分走向长壁和倾斜长壁的采煤方法
短壁采煤法	shortwall mining	采煤工作面长度一般在 60m 以下的采煤方法
房柱式采煤法	room and pillar extraction	在煤层中开掘一系列煤房,采煤在煤房中进行,保留煤柱支撑上覆岩层的一种开采方式
条带开采	strip extraction	将开采区域划分成规则条带,采一条、留一条,以保留煤柱支撑上覆岩层的一种开采方式,分充填条带和非充填条带两大类
充填开采	extraction with back stowing	在采空区内充填水、砂、矸石、粉煤灰等充填物的一种开采方式

(三)地表移动变形的术语

随着采空区的覆岩逐步垮塌,引起地面沉降和水平位移变化,导致地面产生一系列的变形表征,如下沉、水平移动、倾斜和弯曲等(表 1-4)。采空区覆岩变形中也有一个很重要的概念,覆岩破坏“三带”(three zone of overburden failure)指矿层开采后,其覆岩在垂直方向上的破坏可分为垮落带、断裂带、弯曲带,简称“三带”。

表 1-4 与采空塌陷有关的术语

与变形有关的术语	英文名称	术语的简要描述
地表移动盆地	subsidence basin	由采矿引起的采空区上方地表移动的整体形态和范围
地表移动盆地边界	boundary of subsidence basin	地表受开采影响的边界,一般以下沉 10mm 确定
地表下沉值	surface subsidence value	地表点移动向量的竖直分量
地表水平移动值	surface displacement value	地表点移动向量的水平分量
地表倾斜	surface tilt	地表两相邻点下沉值之差与其变形前的水平距离之比
地表水平变形	surface deformation	地表两相邻点水平移动值之差与其变形前的水平距离之比
地表曲率	surface curvature	地表两相邻点倾斜差与其变形前的水平距离之比

三、采空塌陷机理与风险评价研究

对于采空塌陷机理研究历程的系统评述,Gray(1990)将其分成 3 个阶段,即 1890 年之前,1890—1990 年之间和 1990 年之后。在 2000 年之后,物理模型试验、现场原位监测和数值仿真技术等都有长足进步,对采空塌陷机理研究有重大的推动作用,后文将详细论述这个过程。采空塌陷研究的历程已有一百多年,特别在西方发达国家的工业革命时期,采矿业飞速发展,

所引起的矿山地质环境问题也日益突显。1825年,比利时列日市的工程师们首次科学研究了采矿沉陷;1839年,在此基础上提出了第一个采矿沉陷理论(Young et al, 1916)。第二次世界大战后,对能源和矿产的需求迅速增加,采矿工程中矿山压力与岩层控制的工程经验不断积累,所带来环境效应方面的研究也逐渐深入。我国在新中国成立以后才开始进行开采沉陷研究。我国的采空区变形研究起步较晚,正式开始于新中国成立以后。1953年,“矿山岩层与地表移动”课程首次由苏联专家在北京矿业学院为矿山专业师生进行讲授(王金庄, 2003)。1954年,开滦矿务局建立起第一个地表移动观测站(赵卫强等, 2010),之后抚顺、淮南、鹤岗、阜新等矿区相继建立起地表移动观测站,获得了大量观测资料,为认识和研究采空塌陷规律提供了重要依据。此后,我国煤炭矿山采空塌陷变形研究才开始稳步发展,其成果为煤炭工业发展也做出了巨大贡献。

地质灾害领域的风险评价是风险学与灾害学相互交叉的前沿课题,针对该课题理论与方法的研究也仅有几十年。由于对风险评价的结果难以验证,地质灾害风险评价的发展过程十分缓慢,直至概率统计和模糊数学等定量方法被大量应用于风险评价研究中(黄崇福, 2004)。对于地质灾害,最初研究多集中在灾害自身的形成机理分析以及对造成的后果进行定性的评价与预测。20世纪70年代后,随着地质灾害频发,造成的影响与损失也急剧增加,使得人们认识到防灾减灾的重要性,将研究重点从灾害机理本身转移到灾害的定量评估上来,以减少灾害造成的损失。1980年以后,英国、美国、澳大利亚等发达国家首先认识到了生态环境修复和灾害治理的投入产出效益问题,政府与相关企业均斥资资助学者对在无法确定的条件下采取怎样合理的投资决策进行研究(Zimmermann et al, 1993)。这样,风险评价针对灾害的不确定性研究,为防灾减灾并减少灾害损失提供了依据且逐渐被系统性研究,并得到了稳定发展。

第三节 煤矿采空塌陷机理研究

一、采空塌陷经典力学分析理论

随着采掘空间的形成,上覆岩层所形成的结构形态及稳定性不仅直接影响到采场,也将影响到开采后上覆岩层运动的形态及地表塌陷形状(钱鸣高等, 2010),形成地质灾害。正因如此,采矿和地质工程师们开始不断总结经验,深入研究塌陷形成的机理。在机理的理论研究中,总体上可将岩体分为3类,即松散介质、连续介质和块体介质(石平五, 1984)。连续介质一般可做弹性理论分析,块体介质可做砌体梁、关键层分析等,但均未形成共识,仍存在争议。具体机理模式,目前主要有后述几种假说。

悬臂梁假说最早由德国人Stoke(1916)提出,该假说将采空区上方顶板视作梁结构,一端固定在岩体内,另一端悬伸,整个变形过程中只发生弯曲而不断裂。当顶板由几个岩层组成时,可形成组合悬臂梁。建立在均匀连续介质力学基础上,不考虑岩体内发生的节理和微裂隙,所计算的沉陷量与实测数据有较大误差(钱鸣高等, 2010)。

库兹涅佐夫(俄)在1950—1954年根据相似材料模型的实验研究和井下实测数据分析,提出采区工作面上覆岩层塌落时,上部规则移动带的岩块互相联系,咬合成类似多环节铰链,而在采空区上方规则地下沉(北京矿业学院等, 1959)。上覆岩层下部的不规则垮落带,可以进一步分成底部杂乱无章的部分,以及其上的垮落较为规则并保持原方向的部分。形成铰链的