

煤矿区构造控灾机理 及地质环境承载能力研究

夏玉成 孙学阳 汤伏全 著



科学出版社
www.sciencep.com

内 容 简 介

本书是作者近年来从事煤矿区构造控灾理论研究的最新成果。全书共分八章,以地质构造控制论为指导,以我国北方典型煤矿区采煤沉陷观测资料为依据,以相似材料模拟和计算机数值试验为手段,系统深入地分析和论证了构造介质(煤层覆岩)、构造形态(单斜与褶皱)、构造界面(节理与断层)、构造应力以及地下水对采煤沉陷的控制作用及其机理。建立了全新的煤矿区构造控灾理论体系;在此基础上,总结了煤矿区地质环境承载能力评价预测理论和方法。本书基础资料数据翔实、试验结果真实可靠。

本书可作为地质工程、采矿工程、矿山测量、环境科学、环境工程等专业高年级学生和研究生选修课教材,也可供相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

煤矿区构造控灾机理及地质环境承载能力研究/夏玉成,孙学阳,汤伏全著.—北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-022586-3

I.煤… II.①夏… ②孙… ③汤… III.煤矿-矿区-地质构造-地质灾害-研究 IV.TD7

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第111838号

责任编辑:陈 迅 / 责任校对:赵 燕
责任印制:吕春珉 / 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>

编 者 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年8月第一版 开本:787×1092 1/16

2008年8月第一次印刷 印张:12 1/2

印数:1—1500 字数:280000

定价:35.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换<环伟>)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62137026

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229; 010-64034315; 13501151303

前 言

国际能源署 (IEA) 2007 年 11 月公布的《世界能源展望 2007》显示, 受油气价格上涨影响, 全球煤炭消费增速加快, 预计 2008~2030 年间, 全球一次能源需求将增加 55%, 其中煤炭消费增长 73%。

我国是煤炭生产与消费大国。2005 年, 煤炭在我国一次能源生产总量和消费总量中的比重分别为 76.3% 和 68.7%, 远远高于全球平均 27% 和 27.8% 的水平。煤炭产量多年来稳居世界第一, 2000 年为 $9.8 \times 10^8 \text{t}$, 2004 年猛增至 $1.96 \times 10^9 \text{t}$, 2007 年已经达到 $2.25 \times 10^9 \text{t}$ 。我国煤炭产量已占到世界总产量的 40% 左右。

矿产资源开发被公认为是对环境破坏最严重的人类工程活动之一。在我国, 由于煤炭开采规模巨大, 且绝大部分煤矿开采埋藏在人类生产、生活区之下的煤炭资源, 所以由井工开采诱发的煤矿区地面沉陷、断陷、开裂 (简称采煤沉陷) 已成为煤矿区土地资源破坏和生态环境恶化的主要人为灾害之一。有统计资料表明, 我国煤矿区万吨采煤塌陷率一般在 $2.80 \sim 6.75 \text{ha}/\text{万 t}$ 之间。即使按 $1 \text{ha}/\text{万 t}$ 的采煤沉陷率估算, 年产原煤 $2.5 \times 10^9 \text{t}$, 将引起采煤沉陷面积 $2.5 \times 10^5 \text{ha}$ 以上。

从构造地质学的观点来看, 以采煤沉陷为代表的煤矿区环境灾害 (environment hazards related to coal-mining) 是由人类地下采矿活动在主采煤层上覆岩、土体 (简称覆岩) 中引起或诱发的一种特殊的变形现象。变形的物理过程在覆岩中进行, 引起变形的力在覆岩中传递, 因此, 覆岩在采煤沉陷过程中扮演着构造介质的角色。大多数煤矿区在地质历史时期曾经受过构造运动改造, 形成单斜、褶皱等构造形态和节理、断层等构造界面。因此, 采煤沉陷是经受过变形、遭受过破坏的煤层及其覆岩, 在环境应力条件改变时, 产生的再变形和再破坏。如果说构造介质本身的特点 (力学特性、构造形态、构造界面) 是地质历史时期产生的影响煤矿区环境灾害的静态因素, 那么, 构造应力就是反映目前覆岩动力学状态且影响煤矿区环境灾害的动态因素。构造介质、构造形态、构造界面、构造应力等要素构成了煤矿区的构造环境 (tectonic settings)。

大量观测资料和实验证明, 在不同的构造环境下, 同样强度的地下采矿活动所造成的采煤沉陷有明显差异。这说明, 虽然采煤沉陷是人类地下采矿活动对煤矿区地质环境 (geological environment) 产生强烈扰动的结果, 但煤矿区地质环境的抗扰动能力是由构造环境决定的。抗扰动能力强的煤矿区可以承受较大的开采强度; 而抗扰动能力差的煤矿区, 同样强度的地下开采, 就会导致严重的地表损害甚至环境灾害。因此, 构造环境的内在结构和特性是采煤沉陷形成与发展的控制性因素。由此可见, 在一定的生态环境质量目标下, 煤矿区地质环境所能承受的最大开采强度 (称为地质环境承载能力), 因其所处构造环境的不同会有明显的区别。研究构造环境对采煤沉陷的控制机理, 对预测采煤沉陷的发生、发展规律, 评价煤矿区地质环境的承载能力, 从而通过给定损害,

限制开采,实现采动损害最小化及煤矿区经济与环境协调发展目标有十分重要的意义。

为此,第一作者在完成博士学位论文期间,应用构造地质学的观点对煤矿区地表沉陷问题进行了系统研究,初步建立了“构造控灾”理论框架。作者提出的构造控灾观点和围绕构造控灾开展的研究工作,得到了我国构造地质与岩层控制专家的热情鼓励。中国科学院院士张国伟教授在评语中写道:“构造控灾是一项学科交叉研究探索的新成果,有新意,有深化发展前景。虽然过去有类似或相仿的研究思考,但作为一个新的整体思维、理念性思考研究,应当说是很少的。不管这一术语是否公认为完全合适,但作为一个研究方向,应予以充分肯定并具有重要创新意义的”。中国工程院院士钱鸣高教授在评语中写道:“应该认为作者在构造环境对采动损害的影响方面做了初步而有益的探索。论文表明作者在地质与采矿两个学科的结合上有新的探索,并表明了作者在基础与专业方面的知识面。”为了进一步深化、细化和完善构造控灾理论体系,第一作者以“地质构造对煤矿区地表环境灾害的控制机理研究”为题申请了国家自然科学基金面上项目,并获得国家自然科学基金委员会批准资助(项目编号:40472104)。

本书是对第一作者博士学位论文和国家自然科学基金项目研究成果的系统总结。全书共分八章。第一章,通过煤矿区采煤沉陷典型实例分析,提出地质构造对煤矿区地表环境灾害具有控制作用的观点,同时引入煤矿区地质环境承载能力的相关概念及其影响因素,介绍本书的研究重点和研究意义,并分析相关学科领域的国内外研究现状与发展趋势;第二章,主要从土地资源、水资源、土壤、建构筑物、次生地质灾害等方面论述采煤沉陷对生态环境的危害,总结开采因素与采煤沉陷的关系,概略分析影响采煤沉陷的各种地质因素;第三章,分析论证与构造介质力学性质相关的覆岩综合硬度、松散层比例、关键层位置等因素对采煤沉陷的控制作用和控制机理;第四章,主要讨论煤层及其覆岩在构造变形过程中形成的单斜构造及背斜和向斜等褶皱构造对采煤沉陷的控制作用和控制机理;第五章,重点讨论近水平岩层中发育的节理和断层等构造界面的力学效应及其对采煤沉陷的影响和控制机理;第六章,在总结我国原岩构造应力场特征的基础上,分析挤压构造应力和拉张构造应力对采煤沉陷的控制作用和控制机理;第七章,从煤矿区地下水系统特点出发,探讨地下水对煤层覆岩抗扰动能力及采煤沉陷的影响,以及覆岩破坏对地下水系统和生态环境的影响;第八章,介绍煤矿区地质环境承载能力评价预测的指标体系、分级标准、方法及主要工作流程、评价预测实例等。

本书从选题、构思到基本观点的形成,从基础理论到实验方法,承蒙第一作者的导师石平五教授的鼓励、启发和悉心指导。作者谨以此书献给导师,以表示衷心感谢和崇高敬意。

研究工作先后得到陕西省自然科学基金、西安科技大学博士研究基金和国家自然科学基金资助;东北大学岩石破裂与失稳研究中心提供了软件支持;陕西省岩层控制重点实验室提供了实验条件;余学义教授、伍永平教授和支剑锋、苏普正等老师曾给予作者很大的帮助;铜川矿务局孔令义高工、惠东旭高工等贡献了他们宝贵的资料 and 实际工作经验;研究生雷通文、白红梅、祁惠敏、高东方、展国伟、贾强、杜荣军等为研究工作做出了重要贡献。在本书出版之际,谨向为本书研究和出版工作给予支持和帮助的所有

单位和个人，以及参考文献作者致以最诚挚的谢意。

“构造控灾”是一个新的研究方向，由于作者水平所限，本书只为“构造控灾”理论体系搭建起一个雏形，希望起到抛砖引玉的作用。书中若有错误或不当之处，真诚欢迎同行专家不吝赐教。

作 者

2008年3月

于西安科技大学

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 煤矿区地质环境承载能力的相关概念与研究意义.....	1
1.2 煤矿区地质环境承载能力的影响因素与研究重点.....	3
1.3 采煤沉陷及其相关领域的国内外研究现状与趋势.....	5
1.3.1 矿产工业正在积极应对可持续发展提出的挑战.....	5
1.3.2 建设“绿色矿区”是矿业可持续发展的必然选择.....	6
1.3.3 研究采煤沉陷控制机理是建设“绿色矿区”的关键.....	7
1.3.4 地质环境承载能力研究将得到进一步加强.....	12
第二章 煤矿区地表环境灾害及其影响因素概述	14
2.1 采煤沉陷对生态环境的危害.....	14
2.1.1 破坏宝贵的土地资源.....	14
2.1.2 破坏水资源且加剧水土流失.....	16
2.1.3 造成地表土壤退化.....	17
2.1.4 破坏地表建（构）筑物.....	17
2.1.5 诱发次生地质灾害.....	18
2.2 地下开采对地质环境的扰动.....	18
2.2.1 开采深度.....	18
2.2.2 开采厚度与采空区面积.....	19
2.2.3 顶板管理与采煤方法.....	20
2.2.4 开采速度.....	20
2.2.5 重复采动.....	21
2.3 地质环境固有的抗扰动能力.....	21
2.3.1 构造介质.....	21
2.3.2 构造形态.....	22
2.3.3 构造界面.....	22
2.3.4 构造应力.....	22
2.3.5 地下水.....	22
第三章 构造介质对采煤沉陷的控制	24
3.1 煤矿区构造介质的地质-力学特征.....	24
3.1.1 沉积岩的地质特征及其对力学性质的影响.....	24
3.1.2 煤矿区常见构造介质的工程地质类型.....	25
3.1.3 构造介质的三个要素.....	25
3.2 不同构造介质采煤沉陷典型实例.....	28
3.2.1 铜川某煤矿 508 工作面.....	28

3.2.2	铜川某煤矿 291 工作面	30
3.2.3	神府 51101 工作面和铜川 905 工作面	32
3.3	覆岩综合硬度与采煤沉陷的关系	34
3.3.1	覆岩类型划分	34
3.3.2	相似材料模拟	34
3.3.3	数值试验研究	35
3.4	松散层比例与采煤沉陷的关系	39
3.4.1	常见松散层及其力学性质	40
3.4.2	数值试验研究	40
3.5	关键层位置与采煤沉陷的关系	42
3.5.1	关键层及其特征	42
3.5.2	数值试验研究	43
3.6	构造介质对采煤沉陷的控制作用	45
3.7	构造介质对采煤沉陷的控制机理	46
3.7.1	岩石的变形破坏机理	46
3.7.2	岩体破坏机制与本构关系	49
3.7.3	覆岩综合硬度和关键层的作用	51
第四章	构造形态对采煤沉陷的控制	55
4.1	单斜构造与采煤沉陷	55
4.1.1	倾角分类	55
4.1.2	建模与试验方法	55
4.1.3	模拟开采试验	56
4.1.4	试验结果对比	67
4.2	褶皱构造与采煤沉陷	68
4.2.1	试验模型与边界条件	68
4.2.2	模拟开采试验	71
4.2.3	试验结果对比	75
4.3	构造形态对采煤沉陷的控制作用	76
4.3.1	单斜构造对采煤沉陷的控制作用	76
4.3.2	褶皱构造对采煤沉陷的控制作用	77
4.4	构造形态对采煤沉陷的控制机理	77
4.4.1	单斜构造对采煤沉陷的控制机理	77
4.4.2	褶皱构造对采煤沉陷的控制机理	80
第五章	构造界面对采煤沉陷的控制	82
5.1	煤层覆岩中的构造界面及其特点	82
5.2	块裂介质采煤沉陷的典型实例	84
5.2.1	河南云盖山井田	84
5.2.2	徐州董庄井田	85
5.3	节理与采煤沉陷的关系	86
5.3.1	节理倾角与采煤沉陷	86
5.3.2	节理发育程度与采煤沉陷	89
5.4	断层与采煤沉陷的关系	92

5.4.1	隐伏断层下采煤引起的地表沉陷	92
5.4.2	断层产状及组合形式与采煤沉陷	95
5.5	构造界面对采煤沉陷的控制作用	103
5.5.1	节理对采煤沉陷的控制作用	103
5.5.2	断层对采煤沉陷的控制作用	103
5.6	构造界面对采煤沉陷的控制机理	105
5.6.1	构造界面的力学性质	105
5.6.2	构造界面的力学模型和破坏准则	107
5.6.3	节理对采煤沉陷的控制机理	109
5.6.4	断层对采煤沉陷的控制机理	112
第六章	构造应力对采煤沉陷的控制	114
6.1	煤矿区原岩构造应力基本状态	114
6.1.1	地应力与构造应力	114
6.1.2	大地构造背景与构造应力概况	117
6.1.3	煤矿区原岩构造应力场的一般特点	119
6.2	构造应力影响采煤沉陷的典型实例	123
6.2.1	陶庄井田	123
6.2.2	台吉井田	124
6.3	构造应力与采煤沉陷关系的实验研究	125
6.3.1	相似材料模拟实验装置	125
6.3.2	相似材料模拟实验结果	128
6.3.3	数值试验软件与建模	136
6.3.4	数值试验结果	137
6.4	构造应力对采煤沉陷的控制作用	139
6.5	构造应力对采煤沉陷的控制机理	139
6.5.1	煤层覆岩单元体平衡理论分析	139
6.5.2	煤层覆岩弯曲变形理论分析	143
6.5.3	构造应力与其他因素的关系分析	146
第七章	煤层覆岩与地下水在采煤沉陷中的互馈效应	148
7.1	煤矿区地下水系统的特点	148
7.2	地下水对覆岩抗扰动能力的影响	149
7.2.1	对岩体力学性质及应力状态的影响	149
7.2.2	地下水对采煤沉陷影响的数值试验	153
7.3	覆岩破坏对地下水系统的影响	156
7.3.1	地下水向煤矿采空区渗流的机理	156
7.3.2	采煤沉陷对地下水系统的改造效应	157
7.4	固液耦合采煤沉陷模拟实验	158
7.4.1	实验目的	158
7.4.2	实验设备及材料	158
7.4.3	实验过程及现象	160
7.4.4	实验结果分析	161
7.5	主要结论	162

第八章 煤矿区地质环境承载能力评价方法与实例	163
8.1 评价指标体系.....	163
8.2 评价分级标准.....	164
8.2.1 建筑物损坏等级.....	164
8.2.2 土地损害等级.....	165
8.2.3 地质环境承载能力等级.....	166
8.3 评价方法及主要工作流程.....	167
8.3.1 煤矿区原岩构造应力状态的确定方法.....	167
8.3.2 地质环境承载能力评价工作流程.....	168
8.3.3 地质环境本身抗扰动能力量化评价方法.....	169
8.4 煤矿区构造应力状态分析实例.....	170
8.4.1 研究区地质概况.....	170
8.4.2 区域古构造应力-应变场演化历史分析.....	171
8.4.3 现今区域构造应力-应变场的 GPS 测量.....	174
8.4.4 井田构造反映的构造应力场特征.....	174
8.5 建筑物下允许开采强度预测实例.....	175
8.5.1 地质与开采条件.....	175
8.5.2 计算机数值试验模型.....	176
8.5.3 计算机数值试验结果.....	176
8.5.4 安全开采尺寸预计.....	178
8.5.5 预计结果验证.....	179
8.6 地质环境承载能力评价实例.....	179
8.6.1 评价区地质概况.....	179
8.6.2 区域构造动力学背景.....	180
8.6.3 矿区构造样式.....	181
8.6.4 地质环境承载能力评价.....	183
参考文献	185

第一章 绪 论

煤炭是我国第一大能源，2007年原煤产量达到25.23亿t。由于煤炭开采规模巨大，且绝大部分煤矿开采埋藏在人类生产、生活区之下的煤炭资源，所以煤炭开采对矿区土地资源的破坏较其他矿产开采更为严重，对矿区生态环境的损害已经到了触目惊心的地步。但在我国目前的经济条件下，不可能为了保护环境而停止煤炭开采活动，同时也绝不能以牺牲环境为代价获取资源。虽然煤炭资源的井工开采引起了煤矿区地质环境的恶化，但不能由此得出“只要开采煤炭就必然破坏环境”的推论。从地质学的角度看，煤矿区特定的地质、水文条件和土地利用类型决定了该煤矿区地质环境的承载能力。只要在开采之前，预先评估煤矿区地质环境可以承受的损害程度，把开采强度限制在煤矿区地质环境承载能力之内，就有可能实现采动损害最小化，达到既合理开发利用煤炭资源，又能将开采对环境的损害减到最小的目标。

1.1 煤矿区地质环境承载能力的相关概念与研究意义

环境通常指环绕人类社会的自然界，主要由岩石圈、水圈、大气圈和生物圈等组成，包括作为生产资料和劳动对象的各种自然条件，形成于漫长的地球历史演化过程，并处于不断的变化之中。地质环境属于自然环境的一部分，指的是岩石圈中与人类社会有特殊联系，且与水圈、大气圈、生物圈密切相关的地球表层^[1]。煤矿区地质环境主要是指煤炭资源赋存、开采区域地表附近的岩土体、水体及其稳定性。

地质环境是在漫长的地质演化过程中，由于各种内、外地质动力作用而形成的。从地质时间尺度来看，地质环境本身的变化是永恒的。但相对于人类活动来说，这种变化就显得极为缓慢，往往要经过上万年甚至几百万年才能表现出来。因此，在考查人类工程活动（采动）对地质环境的影响时，可以认为地质环境自身是稳定不变的。

人类工程活动是对地质环境影响速度最快，影响结果最显而易见的另一种地质作用，称为人为（或人类）地质作用。在矿区建设和矿产资源开发过程中，人为地质作用可以在一定程度上改造恶劣的自然环境，甚至形成某些“沙漠中的绿洲”；另一方面，如果地下采掘工程对地质环境产生的扰动打破地质环境原有的平衡状态，便产生地表裂缝、塌陷以及水资源流失等地质环境灾害^[2]。

煤矿区地质环境灾害主要由煤炭资源的井工开采而引起，但这种地质环境灾害一般出现在采空区达到一定规模之后。这说明，煤矿区地质环境本身具有一定的抗扰动力。另一方面，在不同的煤矿区，同样强度的地下采矿活动所造成的力学效应（地表环境灾害现象）是有明显差异的。有些煤矿区可以承受较大的开采强度，而在另一些煤矿区，同样强度的地下开采，就会导致严重的地表损害甚至地质灾害。这说明，在不同的煤矿

区地质环境本身固有的抗扰动能力是不同的。

例如,在铜川东区,主采煤层上覆基岩层主要是页岩、砂岩及泥岩互层,厚度达 300~400m,黄土层厚约 10~160m,最大采深 400~500m 左右;走向长壁式开采,全部垮落法管理顶板;工作面倾向长度 100~120m,走向长度 400~1000m;采厚 2~3m;地表一般下沉量为采厚的 60%~80%,在某些井田,甚至出现采煤沉陷系数大于 1 的情况。而在铜川北区,主采煤层上覆岩层主要有细砂岩、粗砂岩、页岩,总厚度大于 400m,其中有总厚约 350 余米的高强度洛河砂岩、宜君砂岩和凤凰山砂岩,形成三层较硬的托板;走向长壁式开采,全部垮落法管理顶板;工作面倾向长度 130~160m,走向长度 500~1000m;采厚 3~8m 不等。位于该区的某矿 2111 工作面,开采两层煤,总采煤厚度 6m,工作面倾向长度 130m,沿走向推进 500m,采后三年下沉量仅有 1.8m,不足开采厚度的 30%^{*}。

对比上述两个区的地质、采矿条件可以发现,铜川东区和北区在覆岩厚度、采煤工艺和顶板管理方式等方面是相似或相同的,但从采空区范围及采厚来看,北区的开采强度大于东区,理应出现更为强烈的采煤沉陷。而实际情况却是,铜川北区地表移动变形的程度比铜川东区要轻微得多。惟一合理的解释就是,铜川北区的地质环境比铜川东区有更强的抗扰动能力。

一般说来,任何一个煤矿区的地质环境都具有一定的抗扰动能力,且因地质条件的差异,不同煤矿区地质环境的抗扰动能力有强弱之分。同时,煤矿区地质环境与人类生产、生活关系密切,本质上具有生态环境的性质。因此,为了更有效地协调资源开发与环境保护之间的矛盾,不仅要考虑煤矿区地质环境本身固有的抗扰动能力,还要考虑煤矿区生态系统对环境改变的承受能力。例如,在山东的某些煤矿区,潜水位在地表附近,煤矿深部开采引起地面沉陷,使潜水转化为地表水,大量耕地湖泊化。为了避免这种现象的发生,应将开采引起的地面沉陷幅度控制在包气带厚度以内。而在陕北毛乌素沙漠附近的煤矿区,煤层埋藏较浅,地下开采很容易破坏新近系隔水层,使萨拉乌苏组含水层疏干,加剧地表的荒漠化进程。在这样的地区,应以保水采煤为目标,将开采裂隙带的高度控制在新近系隔水层之下。

就煤矿区的主体(必须留设煤柱予以保护的重要目标以外的广大可开采区域)而言,在一定的生态环境质量目标下,每个煤矿区都可承受一定强度的地下开采活动,且存在一个开采强度极限,当实际开采强度超过这一极限时,会使煤矿区生态环境遭到损害,甚至诱发煤矿区地质环境灾害。本书将这一极限称为煤矿区地质环境承载能力。

如果煤矿区地下开采对地质环境的扰动强度在其固有的抗扰动能力可承受的范围之内,地质环境可以保持原有状态;或者地质环境虽有改变,但在煤矿区生态系统对环境改变的可承受范围之内,不影响人类的各项生产、生活活动,则说明地下开采强度小于煤矿区地质环境的承载能力。如果地下开采引起煤矿区明显的地表移动变形等生态环境问题,并超出生态系统对环境改变的可承受范围,甚至引起地质灾害,严重影响到人类的生产、生活,则说明地下开采强度超过了煤矿区地质环境的承载能力。

* 铜川矿务局地测处,铜川矿区岩移报告,2000。

研究煤矿区地质环境承载能力的根本目的,是为了通过合理规划开采以保护煤矿区的生态环境。煤矿区地质环境承载能力是大型煤矿区合理确定开采强度、对煤炭地下开采诱发的地质灾害进行准确预测预报的理论根据。只有对煤矿区地质环境承载能力进行科学评价和预测,并以此为依据,将地下开采强度控制在该煤矿区地质环境可承受的范围内,才能变“损害后治理”为“损害前防范”,建设“绿色矿区”,促进煤矿区的社会和谐、环境友好和经济可持续发展^[3]。

1.2 煤矿区地质环境承载能力的影响因素与研究重点

煤矿区地质环境承载能力的大小,是由煤矿区地质环境本身的抗扰动能力和煤矿区土地利用类型对环境改变的承受能力共同决定的。但在煤矿区土地利用类型大体相同的情况下,地质环境承载能力的差异主要是由地质环境本身的抗扰动能力引起的。

在前面提到的铜川矿区,由于北区的抗扰动能力比东区强,因而,北区的地质环境承载能力明显大于东区。在这种情况下,煤矿区地质环境承载能力的主要影响因素也就是地质环境本身抗扰动能力的主要影响因素。从铜川矿区实例可见,北区和东区地质环境本身的抗扰动能力之所以不同,主要是因为:①主采煤层上覆岩系力学性质存在明显差异。东区覆岩中缺乏如洛河砂岩、宜君砂岩和凤凰山砂岩这样的关键层,却有较厚的黄土层,因而其综合硬度较北区小。②构造变形历史不同。铜川东区的煤系地层形成于石炭一二叠纪,自从煤系形成以来,经历了华力西运动、加里东运动、印支运动、燕山运动和喜马拉雅等多次构造运动,形成了不同期次、性质、方向的地质构造;而铜川北区的含煤地层形成于早一中侏罗世,燕山运动对其影响轻微,主要表现为整体沉降。③新构造运动背景不同。铜川东区位于汾渭裂陷系北缘,新构造及目前的构造活动主要受汾渭裂陷系伸展构造控制。以位于该区的东坡井田为例,井田受张性或张扭性的大、中型正断层强烈切割,小断层密集成带,节理构造也很发育,煤层覆岩支离破碎。因此,煤层开采对地表地质环境造成的损害十分显著。而铜川北区位于鄂尔多斯盆地中南部,喜马拉雅运动造成盆地周缘裂陷,使这个中生代形成和发育的盆地转变成黄土高原的主体,但盆地内部地质构造特别简单,地层近于水平,没有断裂构造,节理也不发育。在开采过程中,顶板极为稳定,地表移动变形轻微。

从构造地质学的观点来看,采煤沉陷是由人为地质作用(地下开采活动)诱发的主采煤层上覆岩、土体(以下简称覆岩)的一种特殊的表生构造变形。

覆岩是在长达亿年的地质作用过程中,在构造因素影响下形成(建造),尔后又曾经历过多次构造运动改造的具有“构造记忆”的构造岩体。人类在覆岩下开采煤层时,将在覆岩中诱发表生构造变形的物理过程,同时,通过覆岩传递引起变形的应力。因此,覆岩是采煤沉陷这种表生构造变形的构造介质。

在煤系地层形成以后,覆岩在内动力地质作用下遭受构造变形,使原本水平的岩层产生倾斜,形成单斜、背斜、向斜等构造形态;或使原本连续的岩层产生破裂,形成节理、断层等断裂构造。构造变形是地质历史时期构造运动对覆岩进行改造作用的结果。

在岩石力学和工程地质学领域，一般将覆岩中的地质不连续面、软弱面、破碎带等统称为岩体结构面。而实际上，这些岩体结构面有些属于原生构造（如层理），更多的则是后期构造运动的产物，例如节理、断层、不整合面、劈理等，都是地质历史时期构造运动在构造介质中留下的烙印，从成因角度讲，均属于构造界面。

挤压与拉张是煤矿区常见的两种最基本的构造应力状态，由于构造应力的作用，可以改变采动影响下的岩层移动方向和移动量的大小，同时也影响井下巷道的变形破坏模式。如果说覆岩本身的特点（构造介质、构造变形、构造界面）是地质历史时期产生的影响采煤沉陷的静态地质因素，那么，构造应力就是反映目前煤矿区构造动力学状态且影响采煤沉陷的动态地质因素。煤矿区地质条件的不同，最主要的表现就是上述静态地质因素、动态地质因素的差异。正是这种差异决定着不同煤矿区的地下开采环境，同时也影响其采煤沉陷特征。

任何一种采矿活动都是在具有一定力学性质的构造介质中进行的。构造形态决定构造介质中的原岩剩余应力状态，构造界面决定着构造介质的岩体结构，从而影响岩体的变形习性。构造应力则与岩体重力共同构成区域地应力场的主要成分，为岩体发生变形提供了动力学背景。构造介质、构造形态、构造界面、构造应力相互影响，相互制约，协同作用，为人类地下采矿活动营造了一个特殊的环境——构造环境。

构造环境（tectonic settings）是地质环境（geological environment）的重要组成部分，它更多地反映着地球的内动力地质作用。虽然采煤沉陷是由地下采矿活动引起和诱发的对地表生态环境的损害，但这种特殊的“构造变形”与其构造环境有极为密切的关系。在煤矿区土地利用类型大体相同的情况下，地下开采能否诱发表面环境灾害取决于地质环境本身的抗扰动能力（即地质环境承载能力）。抗扰动能力强的煤矿区可以承受较大的开采强度；而抗扰动能力差的煤矿区，同样强度的地下开采，就会导致严重的地表损害甚至环境灾害。另一方面，地质环境本身的抗扰动能力是由构造环境控制的。构造介质（主采煤层上覆岩土体）、构造形态（倾角大小、背斜、向斜）、构造界面（节理、断层）、构造应力（性质、方向、大小）等任何一个构造环境要素的改变，都会使地质环境承载能力有明显的差异^[4~6]。由此可见，构造环境的内在结构和特性是煤矿区地表环境灾害形成与发展的控制性因素。我们将这种关系概括为“构造控灾”，如图 1.1 所示。

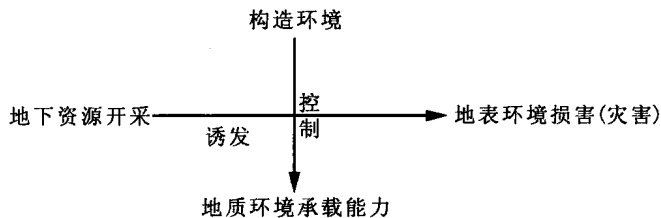


图 1.1 构造控灾示意图

因此，对煤矿区地质环境承载能力的评价，必须从煤矿区构造环境要素的综合分析、评价入手，而且要将其作为整个评价工作的重点进行研究。此外，地下水资源丰富的煤矿区与处于干旱地区的煤矿区，采煤沉陷对地质环境的损害程度及方式也是不同的。由于地下水对岩体的强度具有软化作用，在有地下水存在的情况下，井工开采更容易引起

上覆岩层的移动和变形；另一方面，由于水文地质条件的差异，煤炭井工开采形成的“三带”可能改变煤矿区地下水系统的原始状态，导致水资源流失，或者使潜水转化为地表水，从而给生态环境带来比地表沉陷更严重的后果。因此，在进行煤矿区地质环境承载能力评价时，水文地质条件是必须考虑的另一个重要因素。

1.3 采煤沉陷及其相关领域的国内外研究现状与趋势

1.3.1 矿产工业正在积极应对可持续发展提出的挑战

自从世界环境和发展委员会提出可持续发展的概念以来，可持续发展已成为各国政府制定政策必不可少的观念。20世纪90年代初期以来，全球矿业发生了重大变化，出现了世界范围的矿业法规和矿产资源政策的大调整。这次调整是为了迎接新世纪可持续发展而进行的，其基本目标是促进矿业以环境和社会可接受的方式健康发展。能源、经济和环境的协调发展已成为当今世界各国追求的目标^[7]。

美国能源部1998年制定的《美国国家综合能源政策》为美国能源政策提出了5个常识性的目标。其中目标III是：在重视健康和环境质量的前提下，促进能源生产和利用水平——提高我们的健康水平以及地方、区域和全球环境质量。为达到这一目标，提出了两项任务。任务一：在对环境影响最小的前提下，提高国内能源产量；任务二：加快有益于环境的技术开发和市场转化。

1996年，加拿大联邦政府制定和颁布的最新矿产资源政策文件，取名为《加拿大政府的矿产与金属政策——为可持续发展而合作》。这份文件认为，由于对自然环境改善的关注和实现可持续发展的需要等多方面的挑战，矿产工业正在发生巨变。为了将可持续发展这一概念付诸实际行动，有关各方需要对以前各自的传统观念提出疑问，并从经济、环境、社会目标相协调的角度来考虑矿产*与金属问题。该文件阐明了加拿大矿产与金属可持续发展的作用、目的及战略，明确规定了矿产与金属可持续发展的含义：在勘查、开采、生产等各个环节，使用最有效、最有竞争力、对环境最为负责的最佳方式；保持或提高当代人的生活质量和生活环境。文件还特别强调指出，在确定矿产与金属可持续发展时应当认识到，矿产开发所带来的社会和经济利益并非由当代人独享，目前在人力和财力方面的投资要对后代和当代人都有益处。

1998年，南非矿产能源部发表《南非矿产和采矿政策白皮书》，专列“环境管理”一章。在该白皮书中，南非矿产能源部保证，国家矿产资源必不可少的开发将在可持续发展的框架内，并在与国家环境政策、规范和标准协调一致的条件下进行。按南非《矿业法》规定，如果没有经过当局批准的环境管理计划，找矿和采矿工作不能进行。

《印度国家矿产政策》规定，“预防和减轻因矿产开采和加工所产生的不利环境影响，按规定的标准对受影响的森林地区和林木覆盖地区的复垦和复植应构成任何情况下矿山开发战略的组成部分。”“在已确认的生态脆弱和生态丰富的地区内不应进行矿业经

* 矿产在该文件中被定义为非金属工业矿物和煤炭。

营活动。”

1999年颁布的《坦桑尼亚矿业政策》指出，“矿业部门的所有活动应当在安全和有利于环境保护（可持续发展）的基础上开展”。小型矿山企业对环境的破坏往往最为严重，所以，政府向小型矿业分发斯瓦希里文信息手册，详细说明矿产权所有者的环境义务和不执行这种义务的法律后果。

澳大利亚矿产政策协会（MPI）是澳大利亚一家发展最快、最激进的环境和人权组织，该组织的主要目标是：①确保亚太地区的采矿项目在开发、经营和矿山闭坑方面符合可持续发展的原则和社会公德；②阻止开发对自然意义的地区有负面影响的，或者不符合可持续发展原则和社会公德的项目。有这样一个组织的监督，大大减轻了澳大利亚的矿产工业对环境的影响。

德国政府现行有关环保和空气保护的法律法规严格限制德国煤炭开采业的发展；英国已确定在制定能源政策时应优先考虑环境目标；日本对第二次世界大战以后日本煤炭工业进行了一个总体评估，发现半个多世纪的煤炭开采所获得的收益尚不足以抵消为恢复被破坏的环境所需要的支出，因此，促使日本最后一座煤矿——太平洋炭矿公司于2001年1月30日关闭，日本煤炭采掘业彻底成为历史。除此之外，俄罗斯、捷克和斯洛伐克等国家，也都十分重视矿产资源开发过程中生态环境的恢复治理工作，起步早，起点高，相继颁布了有关工作的法律法规或条例，限制采矿对地表生态环境的破坏，获得了显著的社会效益、经济效益和环境效益。

由上述介绍可见，无论发达国家还是发展中国家，都已经将可持续发展的理念融入其矿业政策，并采取切实有效的措施，将其变为可操作的行动。

1.3.2 建设“绿色矿区”是矿业可持续发展的必然选择

资源、环境、人口、灾害，是21世纪人类面临的四大难题。为了有效遏制环境恶化势头，20世纪90年代初，联合国环境署工业与环境中心正式启动了它的清洁生产计划，其目标是使环境治理与保护工作从末端处理转向源头清洁生产。在联合国环境署的积极倡导下，清洁生产已成为当今的一种世界潮流，被公认为是实现社会可持续发展的唯一途径^[8]。我国积极响应国际社会的号召，在1996年7月国务院召开的第四届全国环境保护大会上，部署了《跨世纪绿色工程规划》，将环境保护推向了新的高度。

煤矿区集煤炭资源开采、利用与土地资源占用与破坏为一体，是资源、环境、人口与灾害矛盾相对集中显现的区域之一。近20年来，煤矿区环境灾害已逐渐成为世界各采矿大国关注和研究的热点课题，在煤矿区推行清洁生产的呼声日益高涨。煤矿清洁生产的目标是变损害后治理为损害前防范，既合理开发利用煤炭资源，又能将开采对环境的损害减到最小，在可持续发展的目标下，取得最佳的社会、环境和经济效益。2000年，中国工程院院士古德生教授提出“生态矿业”的概念；2002年，夏玉成、石平五提出建设“山川秀美、空气清新、水质优良、安全高效”的“绿色矿区”的目标，并提出“给定损害，限制开采，防患于未然”的“绿色矿区”建设基本途径^[3]；几乎与此同时，中国工程院院士钱鸣高教授等于2003年提出了“煤矿绿色开采”的概念、内涵及其技术体系^[3]。反映了研究者从不同研究角度对煤矿清洁生产的追求。

目前,我国对煤炭行业清洁生产水平的评价,还仅仅局限于原材料和产品的毒性及其对环境的影响、煤炭开采中的新鲜水消耗量和耗电量、污染物排放等方面。但是,将煤矿清洁生产的理念延伸到采煤沉陷领域,使其成为一种全新的煤炭生产方式,是我国煤炭工业可持续发展的必由之路。控制采煤沉陷应该作为煤矿清洁生产的重要内容,其基本途径可以概括为:给定损害,限制开采,防患于未然。所谓给定损害,是指预先评估人类和环境可以承受的煤矿开采对环境的损害程度;所谓限制开采,并非禁止开采,而是通过限制开采强度,使地表生态环境不至于因为地下开采而出现灾变。

我国已经加入 WTO,跟世界其他国家一样,我国应当对全球环境保护及人类社会可持续发展承担应尽的义务。从可持续发展的理念考虑,我们今天的矿业不但要为当代人谋福利,而且还不能损害子孙后代的利益。因此,在矿产开发领域,摒弃传统落后的观念,引入清洁生产的理念,建设山川秀美、空气清新、水质优良、安全高效的“绿色矿区”是我们这一代矿业人义不容辞的责任。

1.3.3 研究采煤沉陷控制机理是建设“绿色矿区”的关键

如前所述,矿产资源开采对地表地质生态环境的损害是影响矿业和社会可持续发展的首要问题。要建设“绿色矿区”,必须首先控制采煤沉陷。众所周知,采煤沉陷是由地下开采引起的,开采强度愈大,地表沉陷愈剧烈。相比之下,地质因素,尤其是地质构造对采煤沉陷的控制作用和控制机理尚未引起人们的足够重视,相关研究比较零散,不够深入,且缺乏系统性。尽管如此,以下所列举的部分研究成果,对于全面研究采煤沉陷的控制因素及其控制机理,进而实现采动损害最小化目标,推进“绿色矿区”建设,仍具有重要的启发作用和一定的奠基意义。

1. 煤层覆岩力学性质对采煤沉陷的控制作用

煤层覆岩力学性质对采煤沉陷的影响早已引起人们注意,如吴立新等曾专门针对煤层上覆坚硬厚岩层对地表沉陷的控制作用进行过研究^[10]。最有代表性而且在地矿界影响最大的研究成果是由钱鸣高院士创立的关键层理论^[11]。该理论认为,在煤层覆岩结构中,有一些较为坚硬的厚岩层在采动覆岩的变形和破坏中起着主要的控制作用,并将其称之为关键层。关键层以某种力学结构形式支承着上部岩体的压力,而它们的破断与失稳又直接影响着采场矿压显现和地表沉陷。关键层的变形—破裂—结构—运动将在采场覆岩中引起大范围的岩层活动。这种活动下可影响至采场和支架,上可影响到地表。

梁明、王成绪通过对铜川矿区的 905 山区地表观测站的观测资料的研究,认为山区的厚黄土层影响了地表的变形,变形的分布形态与地貌、地形均有一定关系,同时用影响函数叠加法确定了有关参数和地表下沉表达式^[12]。

许家林等在对山西阳泉矿岩体内部移动与地表沉陷实测资料进行对比分析的基础上,采用物理和数值模拟方法,就覆岩主关键层对地表下沉动态过程的影响进行了研究,进一步指出:覆岩主关键层对地表移动的动态过程起控制作用,主关键层的破断不仅引起地表下沉速度的明显增大,还导致地表移动影响边界的明显变化,一旦主关键层破断,地表移动影响角明显减小,地表移动影响边界明显向外扩大。地表下沉速度随主关键层

周期破断呈跳跃性变化^[13]。

国外学者也十分重视覆岩力学性质对采煤沉陷的影响,在预计矿山压力的大小和影响范围,或预计采煤沉陷时,都将煤层顶板岩性及其物理力学性质作为数学预计模型的重要参数。例如:Kulakov 在研究岩层移动规律的基础上,提出了覆岩结构量化参数与覆岩移动之间的依赖关系^[14]; Singh 等在对不同地区煤层覆岩特征进行研究的基础上,将煤层顶板岩性和沉积条件整合为一个被称为成洞能力(cavability)的指标,并综合各种可能影响矿山压力的地质和开采参数推导出一个经验公式,用来估计在浅埋煤层开采过程中,矿山压力的大小和影响范围^[15]; Pimenov 等基于一个综合考虑岩石物理力学参数(弹性模量、泊松比和密度等)的函数表达式,获得了在横剖面上预计应力和位移的公式^[16]; Luo 和 S.S.彭基于斜坡稳定性分析的概念,提出了预测山区采煤沉陷的数学模型所需要的一个重要参数的确定公式,在此公式中,综合考虑了自然斜坡的几何形态及其物理力学性质^[17]; Begley 等开发了一个被称为 MSPM(mechanistic subsidence prediction model)的软件, MSPM 具有预测最大下沉、塌陷角以及长壁工作面不同位置的走向和倾向断面沉陷剖面的功能,预测所需要的输入数据是:工作面的宽度、开采高度、覆岩厚度、岩性、硬岩层在煤层直接顶、老顶以及整个覆岩中所占的比例^[18]。有些学者也注意到了覆岩中的坚硬砂岩层对地表沉陷的控制作用。例如, Rao 在研究印度煤矿地表沉陷与覆岩岩石学特征之间的关系后指出,大量的地表沉陷研究表明,开采沉陷是一个非连续的发展过程,这是因为在覆岩中存在有坚硬的砂岩地层。当工作面推进到一定长度之前,开采引起的地表沉陷是很小的,以至可以忽略不计;明显的地表沉陷是在覆岩中的坚硬砂岩层开始破断后才突然出现的^[19]。

2. 构造变动对采煤沉陷的控制作用

地层倾角是影响采煤沉陷规律的重要因素之一。目前,开采沉陷学中比较成熟的理论,主要来自对近水平—倾斜煤层开采引起的地表移动变形规律的研究。由于急斜煤层(指赋存角度在 $45^{\circ} \sim 90^{\circ}$ 的煤层)在我国煤炭产量中比例很低,我国煤炭系统对其科研投入相对较低。因此,对急斜煤层的采煤沉陷规律研究相对比较薄弱。但以下成果在该研究领域具有标志性的重要意义:一是在 1985 年,吴绍倩和石平五教授申报并获得第一批资助的煤炭科学基金项目“急倾斜煤层矿山压力研究”,开创了我国较系统、全面地对急斜煤层开采矿压显现和顶板破断规律的研究,首次提出了急斜上覆岩层(老顶)形成沿倾斜平衡铰接岩块结构的理论。二是戴华阳等把煤层倾角作为预计模型的变量,视水平煤层和竖直煤层开采的对称下沉盆地为模型的边界条件,依据随机介质理论,构建了闭区间 $[0^{\circ}, 90^{\circ}]$ 上的岩层与地表移动的矢量预计方法,不仅为解决大倾角煤层开采沉陷问题提供了预计依据,而且构建了从近水平到急倾斜煤层开采中岩层与地表移动的统一化预计模型^[20, 21]。

为了揭示褶皱构造与采煤沉陷的关系,李永树等人以随机介质理论为基础,利用二次曲线来拟合开采煤层分布曲线,以背斜、向斜构造的拐点为界分为两个单斜构造层,利用叠加原理进行地表移动和变形的预计,提高了预计值的精度^[22, 23]。

相比之下,国内外许多学者都已经注意到了断裂构造与采矿和地表环境的关系。