

国家自然科学基金资助项目(40572155、51474173)资助

陕西省重点实验室科学研究计划项目(13JS066)资助

陕西省重点科技创新团队计划项目(2013KCT-16)资助

榆神府矿区

保水开采覆岩导水裂缝带发育高度研究

*Study on the Development Height of Fracture zone by
Water Preserved Mining in Yushenfu Coal Area*

● 赵兵朝 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金资助项目(40572155、51474173)资助

陕西省重点实验室科学研究计划项目(13JS066)资助

陕西省重点科技创新团队计划项目(2013KCT-16)资助

榆神府矿区保水开采覆岩导水 裂缝带发育高度研究

赵兵朝 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书以榆神府矿区浅埋开采覆岩导水裂缝带发育高度为研究对象,综合采用现场调研、理论分析、物理模拟、数值模拟和数值计算等研究方法,以基采比和基载比为关键参数,结合关键层位于“三带”的不同位置,给出了关键层结构失稳和隔水土层能够完全隔水的判据;从能量释放角度解释了浅埋煤层条件下采用导水裂缝带的形成机理;得出了浅埋煤层开采覆岩与地表下沉系数为分段函数的结论;给出了浅埋煤层条件下导水裂缝带广义损伤因子的定义,建立了以广义损伤因子为关键参数的导水裂缝带最大高度的预计模型,并研发了相应的软件系统;同时为了方便现场技术人员应用,给出了导水裂缝带最大发育高度与开采参数的简化计算表达式。研究成果将为榆神府矿区煤炭基地生态脆弱区安全、绿色开采提供理论指导与技术支持。

本书可供从事煤矿特殊开采、地表移动变形预计评价和采动损害与环境保护及相关领域科研人员和工程技术人员参考使用,亦可作为普通高校研究生和高年级本科生参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

榆神府矿区保水开采覆岩导水裂缝带发育高度研究/
赵兵朝著. —徐州:中国矿业大学出版社,2016.6

ISBN 978 - 7 - 5646 - 3146 - 8

I. ①榆… II. ①赵… III. ①煤矿开采—断裂带—研究 IV. ①TD82

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 146896 号

书 名 榆神府矿区保水开采覆岩导水裂缝带发育高度研究

著 者 赵兵朝

责任编辑 黄本斌

出版发行 中国矿业大学出版社有限责任公司

(江苏省徐州市解放南路 邮编 221008)

营销热线 (0516)83885307 83884995

出版服务 (0516)83885767 83884920

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

印 刷 徐州中矿大印发科技有限公司

开 本 787×1092 1/16 印张 10.75 字数 268 千字

版次印次 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价 30.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

到“十三五”末,即使煤炭消费比重控制在62%以内,其消费总量控制也在42亿t左右。可见今后一段时期煤炭作为我国主体能源的地位仍不会改变,煤炭的安全绿色高效开采成为我国煤炭行业今后发展的主要方向。从国内环境看,国内煤炭开发布局矛盾加剧:东部资源日渐枯竭,煤炭开发加速向生态环境脆弱的西部转移。煤炭资源的大量开发,给人类社会带来了经济效益和社会效益,但伴随着经济效益和社会效益的同时,其给生态脆弱区的生态环境产生的一系列损害已受到人类极大的关注,其中一个最主要的原因是煤层开采引起地表水和覆岩含水层水源疏漏,这些早已引起国务院和国家领导层的高度重视。与此同时各煤炭高校、科研院所和煤炭企业联合成立多个与煤炭安全绿色开发相关的“2011协同创新中心”。可见,解决矿产资源的开发和人类生存环境损害之间的矛盾已到了刻不容缓的地步,保水开采已成为西部煤炭基地生态脆弱区实现经济发展、社会发展和生态环境保护协调统一亟待解决的重要课题之一。因此,开展保水开采相关课题的研究,具有重大的现实意义和工程实用价值。本著作的研究成果将有利于实现煤炭资源的安全、绿色开采和榆神府矿区煤炭基地生态脆弱区生态环境的保护。

榆神府矿区的显著特征就是浅埋煤层。首先,本著作在浅埋煤层定义的基础上,结合已有的研究成果和现场调研情况,得出浅埋煤层条件下采用不同基采比(基岩与开采高度之比,简称基采比或 J_c)所导致的矿压显现特征不同的结论,进而以基采比为关键参数,结合基载比(基岩与载荷层厚度之比,简称基载比或 J_z)来进一步分析研究浅埋煤层条件下的矿压显现特征;其次,关键层(组合关键层)的破断失稳对覆岩的破坏起着决定性的作用,本著作从开采参数入手,分析了开采参数对关键层的影响,在此基础上进一步研究浅埋煤层条件下关键层和隔水土层对导水裂缝带发育的影响,并给出关键层结构失稳和隔水土层能够完全隔水的判据;同时,结合岩石试件破坏时能量释放过程的实验现象和浅埋煤层条件下的矿压显现特征,从能量释放角度解释了浅埋煤层条件下采用不同基采比对导水裂缝带的影响及其形成的机理,同时也为深部开采研究冲击矿压提供了依据;再次,地下开采引起地表移动和岩层移动属于同一问题的两个方面,本著作在基于概率积分法预计地表移动变形的数学模型基础上,以预计理论为基础,通过分析预计理论参数,建立了基于概率积分法预计导水裂缝带上位岩土层移动变形的数学模型,同时结合现场观测资料和实验室相似材料模拟实验结果进行综合分析,得出了覆岩与地表下沉系数为分段函数的结论;最后,根据理论分析、实验室相似材料模拟实验和数值模拟结果的综合分析,给出了浅埋煤层条件下导水裂缝带广义损伤因子的定义,确定了导水裂缝带广义损伤因子的理论模型,建立了以广义损伤因子为关键参数的导水裂缝带最大高度的预计模型;结合重复采动对导水裂缝带的影响,给出了重复采动广义损伤因子的具体表达式,同时,通过分析地表移动变形分布函数表中下沉函数的分布形态将覆岩导水裂缝带上位岩土层下沉盆地的内外边缘曲线可采用两段椭圆曲线

进行拟合,给出了导水裂缝带最大发育高度与开采参数的计算表达式。本著作研究成果在榆神府矿区煤层开采覆岩导水裂缝带高度的预计方面得到应用,为榆神府生态脆弱区保水开采提供依据。

全书共9章。第1章介绍了本书的研究背景、意义、国内外研究现状及研究领域存在的不足,给出了本书的研究内容与方法。第2章分析了影响榆神府生态脆弱区导水裂缝带发育高度的关键参数,分析了导水裂缝带形成的特征与机理。第3章从分析预计理论参数入手,建立了基于概率积分法预计连续变形带上位岩土层移动变形的数学模型,同时针对浅埋煤层开采条件下地表与覆岩发生突变下沉的现象,得出了以关键层破断为界,导水裂缝带上位岩土层与地表下沉系数 η 为分段函数的结论。第4、5章通过相似材料模拟实验和数值模拟,给出了在同一基载比条件下采用不同的基采比时,覆岩的破断、滑落失稳的过程和导水裂缝带的分布形态。第6章给出了浅埋煤层条件下导水裂缝带广义损伤因子的定义,建立了以广义损伤因子为关键参数的导水裂缝带最大高度的预计模型,同时为了方便现场技术人员应用,给出了导水裂缝带最大发育高度与开采参数的简化计算表达式。第7章研发了浅埋煤层条件下基于概率积分法的保水开采识别模式系统软件。第8章通过工程实例对本书的研究成果进行了验证。第9章对本书的研究成果进行了总结。

本著作是在西安科技大学余学义教授悉心指导和帮助下完成的,在研究过程中,余学义教授给予了作者无微不至的关怀和照顾。值此本著作付梓之际,作者谨向余学义教授致以最崇高的敬意和最诚挚的感谢!感谢西安科技大学黄庆享教授、伍永平教授、李树刚教授、来兴平教授、侯忠杰教授、张杰教授长期以来给予的关心与支持。在现场实测、实验室研究和理论分析过程中,薛庙滩煤矿和榆树湾煤矿的领导及相关技术人员,研究生刘樟荣、王守印、刘宾、刘飞、同超、王春龙、刘阳、杨雷磊和张碧川等均给作者大力支持和帮助,在此一同对他们表示感谢!最后,感谢中国矿业大学出版社相关工作人员为本书的出版付出的辛勤劳动。

影响榆神府矿区浅埋煤层开采覆岩导水裂缝带发育高度的因素较多,本书仅对榆神府矿区部分矿井的覆岩导水裂缝带发育高度开展了相关研究工作。由于作者水平有限,书中难免存在疏漏或谬误之处,恳请专家及读者批评指正。

作 者

2016年3月

主要符号索引

各种符号在本书中出现时都加以定义,以下仅列出书中常见的符号。

- J_c ——基采比;
 J_z ——基载比;
 $E_1, E_2, \dots, E_n$ ——各岩层的弹性模量, GPa;
 n ——岩层数、各岩层趋向断裂的安全系数、与岩土层力学性质有关的指数;
 $h_1, h_2, \dots, h_n$ ——各岩层的厚度, m;
 $\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_n$ ——各岩层的容重, g/cm³;
 r ——土体的密度, kg/m³;
 η ——覆岩或地表的下沉系数;
 $\eta_{(z)}$ ——导水裂缝带发育高度达到最大时上位岩土层的下沉系数;
 τ ——剪应力;
 $[\tau]$ ——抗剪强度;
 $\sigma_{\max}$ ——岩梁产生的最大拉应力;
 $\tau_{\max}$ ——岩梁产生的最大剪应力;
 R_t ——岩层自身的极限抗拉应力;
 R_s ——岩层自身的极限抗剪应力;
 ω ——组合岩梁在上部荷载的作用下发生的挠曲;
 σ_t ——层面张应力;
 q ——载荷;
 $(q_n)_1$ ——第 n 层岩层对第一层影响所形成的载荷;
 L_s ——各岩层的破断距;
 R_t ——各岩层的单轴抗拉强度;
 R_{ti} ——第 i 层岩层的抗拉强度;
 $\sum h$ ——关键层下部岩层的厚度, m;
 m ——开采高度(m)、煤柱高度(m)、材料常数;
 k_s ——残余碎胀系数;
 $f_{\max}$ ——关键层的最大挠度, m;
 α ——煤层倾角, (°);
 M ——横截面上所受的弯矩(N/m)、煤层开采高度(m);
 Q ——横截面上的剪力, N;
 b ——水平移动系数, 截面宽度(m), 岩层呈板状的宽度, 采宽(m);
 I_z ——整个截面对中性轴的惯性矩, m⁴;
 y ——离中性轴的距离, m;
 h ——梁截面的高度、表土层的厚度(m);
 θ ——任一截面的转角、岩土层破断后的回转角, (°);
 L_D ——关键层的极限破断距, m;
 μ ——泊松比;
 w ——关键层破断后的极限下沉量, m;
 f_t ——隔水土层产生的最大挠度, mm;
 Δh ——隔水土层所允许的最大下沉量, mm;
 $r(z)$ ——岩土层影响范围的主要影响半径, m;
 z ——距离地表的深度、地表距导水裂缝带上位岩土层的距离, m;
 H ——开采深度, m;
 $\beta(z)$ ——岩土层主要影响范围角、覆岩导水裂缝带上位岩土层的移动角, (°);
 (x, y, z) ——计算点的坐标;
 C_i ——时间影响系数;
 j ——计算块段数目;
 k ——计算开采任一块段的拐点数;
 q_h ——使用计算的直角坐标系中 x 轴与通过计算点和拐点 h 连线间的夹

- 角, ($^{\circ}$);
- F_1, F_2 —— 运算函数;
- $w_{\max}$ —— 充分采动的最大下沉值;
- c —— 根据开采深度与岩性给出的综合系数;
- (i_x^0, i_y^0) —— 不同层位岩土层的倾斜;
- (K_x^0, K_y^0) —— 不同层位岩土层的曲率;
- (u_x^0, u_y^0) —— 不同层位岩土层的水平移动;
- $(\epsilon_x^0, \epsilon_y^0)$ —— 不同层位岩土层的水平变形;
- $\tan \beta$ —— 地表主要影响角的正切值;
- w_e —— 煤柱宽度, m;
- w_p —— 开采宽度, m;
- α_1 —— 长度相似常数;
- l_p —— 模型原始尺寸;
- l_m —— 模型尺寸;
- ϵ —— 应变(mm)、上位岩土层的总拉伸变形量(mm/m);
- N —— 杆件数, 个;
- y_i —— 在简支梁状态下岩层产生挠曲的曲线方程;
- $y_{\text{固}}$ —— 在固支梁状态下岩层产生挠曲的曲线方程;
- y_0 —— 导水裂缝带上位岩土层产生挠曲的曲线方程;
- C_x, C_y —— 在 x, y 方向的充分采动系数;
- L^N —— 岩层被拉伸的极限长度;
- D^0 —— 浅埋煤层条件下基于概率积分法的导水裂缝带广义损伤因子;
- φ —— 重复采动广义损伤因子;
- Δw_i —— 第 i 次重复采动引起下沉的增量;
- Δl_e —— 覆岩重复采动的变形量;
- r —— 主要影响半径;
- s_0 —— 拐点偏移距;
- ρ —— 煤柱的核区率, %;
- W —— 煤柱的宽度, m;
- r_p —— 煤柱屈服区宽度, m;
- γ_p —— 原型材料密度;
- a —— 煤柱宽度, m;
- d —— 保留煤柱的长度(m)、开采扰动因子;
- F_c —— 煤柱极限承载能力, kN/m;
- F_d —— 煤柱实际承载能力, kN/m;
- T —— 煤柱高度, m;
- β —— 屈服区与核区界面处的侧压系数;
- φ —— 煤层与顶底板接触面的摩擦角、土体的内摩擦角, ($^{\circ}$);
- σ_d —— 煤柱的极限强度, MPa;
- p_x —— 煤壁的侧向约束力, MPa;
- K —— 应力集中系数;
- P_1 —— 支架对煤帮的阻力, MPa;
- C —— 煤层与顶底板接触面的黏聚力(MPa)、土体的内聚力(Pa);
- f —— 煤层与顶底板接触面的摩擦系数、关键层在该条件下的挠度(m);
- ξ —— 三轴应力系数;
- δ —— 坡体的角度, ($^{\circ}$);
- $\Delta w(x)$ —— 黄土沟壑区地表条件下开采引起的地表下沉附加量;
- $\Delta u(x)$ —— 黄土沟壑区地表条件下开采引起的地表水平移动附加量;
- $\Delta \epsilon(x)$ —— 黄土沟壑区地表条件下开采引起的地表水平变形的附加量;
- G —— 坡体自身的稳定性判别系数, mm/m;
- $w(x)$ —— 下沉量, mm;
- $u(x)$ —— 水平移动量, mm;
- $\epsilon(x)$ —— 水平变形量, mm/m;
- $i(x)$ —— 倾斜量, mm/m;
- γ_m —— 模型材料密度;
- α_γ —— 容重相似常数;
- σ_p —— 原型材料密度;
- σ_m —— 模型材料密度;
- α_σ —— 应力相似常数;
- σ_1 —— 最大主应力;
- σ_3 —— 最小主应力;
- σ_{1s} —— 岩石峰值强度时的最大主应力;
- s —— 材料常数;
- σ_c —— 岩石单轴抗压强度;
- L_0 —— 导水裂缝带上位岩土层弯曲变形前

的直线段长度, m;	$\sum h_{yt}$ ——导水裂缝带上位岩土层距煤层顶板的累计厚度, m;
L_1 ——导水裂缝带上位岩土层弯曲变形后的曲线段弧长, m;	l_j ——第 j 层坚硬岩层的破断距, $j = 1, 2, \dots, k$;
$\tan \beta(z)$ ——导水裂缝带上位岩土层主要影响角的正切值;	h_i ——第 i 层岩层的厚度;
$w(z)$ ——导水裂缝带发育高度达到最大时上位岩土层最大下沉值, mm;	$H(z)$ ——覆岩导水裂缝带上位岩土层与煤层顶板的垂直距离, m;
$\sum h_{yr}$ ——亚关键层下部基岩累计厚度;	l_a ——椭圆的短轴长度, m;
f_0 ——亚关键层的挠度;	l_b ——椭圆的长轴长度, m。
$\sum h_g$ ——关键层下部基岩的累计厚度, m;	

目 录

主要符号索引	1
1 绪论	1
1.1 研究的背景和意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 问题的提出	9
1.4 研究方法	9
1.5 研究的主要内容和创新点	10
2 榆神府生态脆弱区导水裂缝带形成的特征与机理	12
2.1 榆神府生态脆弱区地质条件概况	12
2.2 浅埋煤层的定义	15
2.3 导水裂缝带的定义	17
2.4 浅埋煤层条件下关键层对导水裂缝带的影响	18
2.5 浅埋煤层条件下隔水土层的破坏机理	22
2.6 榆神府生态脆弱区导水裂缝带的特征与形成机理	26
2.7 本章小结	28
3 榆神府生态脆弱区导水裂缝带上位岩土层的移动变形预计	30
3.1 连续变形带内岩土层移动变形数学模型的建立	30
3.2 导水裂缝带上位岩土层的移动变形规律	34
3.3 浅埋煤层条件下导水裂缝带上位岩土层移动变形参数的确定	37
3.4 本章小结	41
4 浅埋煤层条件下导水裂缝带特征与机理的物理模拟研究	43
4.1 工作面开采现状	43
4.2 浅埋煤层条件下导水裂缝带的特征与机理的物理模拟	48
4.3 本章小结	64
5 浅埋煤层条件下导水裂缝带特征与机理的数值模拟研究	66
5.1 20601 工作面数值模拟	66
5.2 30301 工作面 FLAC ^{3D} 数值模拟	83

5.3	30301 工作面 UDEC 数值模拟	87
5.4	本章小结	95
6	浅埋煤层条件下基于概率积分法的导水裂缝带最大高度的确定	96
6.1	浅埋煤层条件下基于概率积分法的导水裂缝带广义损伤因子	96
6.2	浅埋煤层条件下基于概率积分法的导水裂缝带最大高度的确定	99
6.3	重复采动对基于概率积分法的导水裂缝带广义损伤因子的影响	101
6.4	浅埋煤层条件下导水裂缝带最大发育高度与开采参数的关系	101
6.5	本章小结	105
7	浅埋煤层条件下基于概率积分法的保水开采识别模式系统	106
7.1	浅埋煤层条件下基于概率积分法的保水开采识别模式系统的特点	106
7.2	浅埋煤层条件下基于概率积分法的保水开采识别模式系统的主体结构	107
7.3	浅埋煤层条件下基于概率积分法的保水开采识别模式系统	118
7.4	基于概率积分法的保水开采识别模式系统的软、硬件要求	119
7.5	基于概率积分法的保水开采识别模式系统的安装及运行界面	119
7.6	本章小结	125
8	工程实例	126
8.1	基于概率积分法的保水开采识别模式系统的应用	126
8.2	基于开采参数确定导水裂缝带高度方法的应用	135
8.3	本章小结	143
9	结论	145
附录		147
参考文献		155

1 绪 论

1.1 研究的背景和意义

1.1.1 研究的背景

2011~2014年,我国煤炭产量(除进口量外)分别为35.2亿t、36.6亿t、37.0亿t和38亿t,其占一次能源消费比重约66%。近年虽然国家对能源结构进行调整,但根据国务院办公厅发布的《能源发展战略行动计划(2014~2020年)》可知:到2020年(“十三五”末),即使煤炭消费比重控制在62%以内,其消费总量控制也在42亿t左右。可见,今后一段时期煤炭作为我国主体能源的地位仍不会改变,煤炭的安全绿色高效开采成为我国煤炭行业今后发展的主要方向。从国内环境看,国内煤炭开发布局矛盾加剧:东部资源日渐枯竭,煤炭开发加速向生态环境脆弱的西部转移。煤炭资源的大量开发,给人类社会带来了经济效益和社会效益,但伴随着经济效益和社会效益的同时,其给生态脆弱区的生态环境产生的一系列损害已受到人类极大的关注。据不完全统计^[1],到2006年年底,榆林市因煤炭开采形成的采空区面积达380 km²。神木县218个煤矿,已形成187 km²的采空区,其中19个煤矿发生塌陷,已塌陷区约50 km²,区域生态环境问题严重。神华集团的大柳塔煤矿和活鸡兔煤矿开采造成的地表塌陷面积分别为17 km²和10.36 km²,榆家梁煤矿造成的塌陷面积为12.6 km²。目前,神华神东煤炭集团公司共形成塌陷面积43.33 km²,占全县塌陷面积的93.3%,已造成14村1861户6194人不同程度受灾,威胁房屋3181间,损毁水浇地3112亩、旱地19587亩、林草地54558亩,地方小型煤矿开采造成塌陷面积3.1 km²,95户393人受灾,威胁房屋347间,损坏54间,损毁旱地50亩,损毁林草地4548亩,上述开采造成的损害直接导致地表水和覆岩含水层水源疏漏,其将给榆神府矿区生态脆弱区的环境破坏更是雪上加霜。这些早已引起国务院和国家领导层的高度重视。早在1996年,原煤炭工业部确定的“九五”重点科技攻关项目“中国西部侏罗纪煤田(榆神矿区)保水采煤与地质环境综合研究”,其就是为了系统地研究榆神矿区开发和保护水资源的问题;近年科技部仍以国家自然科学基金和煤炭联合基金的方式支持了有关保水开采的相关课题;与此同时各煤炭高校、科研院所和煤炭企业联合成立多个与煤炭安全绿色开发相关的“2011协同创新中心”。可见,解决矿产资源的开发和人类生存环境损害之间的矛盾已到了刻不容缓的地步。因此,研究矿区开发和保护水资源的问题迫在眉睫,本著作以榆神府矿区为研究对象,围绕保水开采课题展开相关的基础研究。

1.1.2 研究的意义

研究保水开采相关课题的重要性已经不言而喻,其以开采引起覆岩中关键层“损伤演

化—稳态移动—滑移失稳—断裂破坏”的力学过程与机理为基础建立保水开采的相关识别模式,为保水开采提供可靠的科学依据。本著作在上述科学依据的前提下,通过分析浅埋煤层在各种基载比和基采比条件下的矿压显现特征,结合在同一采矿地质条件下采用不同基采比对导水裂缝带裂缝发育的影响,借助基于概率积分法预计地表和连续变形带内上位岩土层移动变形的数学模型,以关键层的极限挠度和破断后的极限下沉量为判定覆岩是否滑落失稳的判据。通过相似材料模拟实验、数值模拟和现场观测结果进行综合分析,给出了浅埋煤层条件下导水裂缝带广义损伤因子的定义,建立了以广义损伤因子为关键参数的导水裂缝带最大高度预计模型,形成了浅埋煤层条件下基于概率积分法的保水开采识别模式系统;同时,结合岩层中间层和导水裂缝带广义损伤因子的定义,用两段椭圆弧来拟合导水裂缝带上位岩土层的下沉曲线,导出了开采厚度、基岩厚度、载荷层厚度和导水裂缝带广义损伤因子之间的关系,简化了确定导水裂缝带最大高度的计算方法,进一步揭示榆神府矿区浅埋煤层导水裂缝带的发育机理。为解决陕北侏罗纪煤田榆神府矿区浅部煤层开采与保水这一矛盾和保水采煤区实现保水开采奠定了理论和应用基础。

1.2 国内外研究现状

由于课题研究将借助开采沉陷领域的概率积分法来进一步研究覆岩导水裂缝带上位岩土层的移动变形与损伤情况,因此,课题研究涉及两个学科领域(即开采沉陷和岩层控制),书中将从这两个方面分别介绍其研究现状。

1.2.1 开采沉陷的国内外研究现状

从开采沉陷对人们生产和生活的影响历史来说,早在 15 世纪末 16 世纪初开采沉陷已被人们所认识。作为研究岩层与地表移动变形破坏的开采沉陷预计基本理论,迄今已有 100 多年的历史,这里将矿山开采沉陷预计理论研究概括分为以下几个时期^[2,3]:

(1) 从 1838 年对比利时列日城下开采所引起地表塌陷的初步认识到第二次世界大战前夕,属于开采沉陷的认识和初步研究时期,与此同时比利时工程师哥诺特(Gonot)经过对列日城下开采沉陷的调查分析,提出了开采沉陷预计的第一个理论——“垂线理论”,经克诺泰及法国工程师陶里兹改进,发展为“法线理论”,给出了岩体下沉是沿煤层层面并以法线向上传播的直观机理与规律,接着 1876 年依琴斯凯(Jicinsky)提出了“二等分理论”等,这些理论为深入研究开采沉陷预计理论奠定了基础。

(2) 第二次世界大战后到 20 世纪 80 年代末期,属于开采沉陷预计理论研究的形成时期。

(3) 进入 20 世纪 90 年代,随着科学的发展和研究手段的进步,又掀起了矿山开采沉陷预计理论的第三次研究热潮。正如美国机械工程师学会在固体科学研究趋势报告中指出的“由于岩体和土的复杂性,需要发展一些全新的思想和方法……”^[2,3]因此,学者们试图把先进的理论引入到矿山开采沉陷学科中,用来解决矿山开采沉陷预计理论研究和实践中遇到的问题,而分形理论、损伤力学的诞生和发展为其带来了良好的契机^[4]。

开采沉陷预计理论作为一个学科进行系统的研究是从 20 世纪 20 年代开始的,在 1923~1940 年期间,舒密茨、坎因霍斯特、巴尔斯及派茨等人相继提出和发展了开采影响分布的几何开采沉陷预计理论。20 世纪 40 年代,苏联学者阿维尔申对开采沉陷预计理论进

行了细致的研究,出版了《煤矿地下开采的岩层移动》专著,并给出了地表下沉盆地剖面方程和数学塑性理论;接着,沙武斯托维奇提出了岩层下沉的弹性基础梁理论;贝里视岩体为均质线弹性体,提出计算岩体下沉的方法^[5]。20世纪50年代,波兰学者李特维尼申(J. Litwinski)^[6]提出开采沉陷预计的随机介质理论后,中国学者刘宝琛、廖国华在60年代初期,在随机介质理论基础上成功地解决了地表移动的平面预计问题。20世纪80年代至20世纪末,我国开采沉陷预计理论与实践的研究得到了日新月异的发展,吴戈(1981)和何国清等^[4](1991)分别给出了地表下沉盆地剖面的偏态表达式“Γ分布”和“威布尔分布”;于广明等^[7-9](1994~1997)从非线性角度认识开采沉陷的复杂性,开始研究开采沉陷的非线性机理与规律;范学理、赵德深、张玉卓、徐乃忠等^[10-13](1986~1997)着手研究采动上覆岩体离层形成的基本规律和离层注浆控制地表下沉的理论机制,为离层注浆减缓地表沉陷技术的实施提供了有力的理论依据;崔希民^[14,15](1996)对主断面的地表移动与变形进行了实时位形上的分析,建立了开采沉陷的流变模型等。

随着经济的发展和各主要采煤国矿山开采的大规模进行,形成了各种各样的开采沉陷预计理论,其包括影响函数法、经验法和理论模型法三大类^[16]。

(1) 影响函数法

影响函数法是预计采动地表移动变形的一种有效方法,它的理论基础是分布函数,典型的影响函数有巴尔斯(Bals)、培尔茨(Perz)、别耶尔(Beyer)、扎恩(Sann)、布德雷克-克诺泰(Budryk-Knothe)、刘宝琛等理论方法,其对应的影响函数如下^[16]:

巴尔斯(Bals):

$$f(s) = \frac{1}{s^2} \quad (1-1)$$

培尔茨(Perz):

$$f(s) = \frac{1}{s} \quad (1-2)$$

别耶尔(Beyer):

$$f(s) = c \left(1 - \frac{s^2}{R_g^2} \right)^2 \quad (1-3)$$

扎恩(Sann):

$$f(x) = \frac{2.256}{x} e^{-4x^2} \quad (1-4)$$

布德雷克-克诺泰(Budryk-Knothe):

$$f(x) = \frac{1}{r} e^{-\frac{\pi x^2}{r^2}} \quad (1-5)$$

刘宝琛(Liu Baochen):

$$f(s) = \frac{1}{r} e^{-\frac{\pi s^2}{r^2}} \quad (1-6)$$

(2) 经验法

开采沉陷预计理论的经验法是在特定的地质条件下,根据大量的观测数据,得出主断面的移动变形曲线,然后将其理论化,可供在相近的采矿条件下进行开采沉陷预计。典型的经验函数法有^[16]:前苏联应用的负指数函数法;英国煤田法(NBC,1975);波兰学者 Z. Kowal-

czyk(1972)积分网格法;中国学者何国清等^[4]和吴戈(1981)分别提出的“威布尔分布”和“ Γ 分布”以及各矿区通过观测进行拟合的典型剖面曲线法等。

(3) 理论模型法

理论模型法是建立在力学模型基础上,通过弹性或塑性理论进行的计算方法。主要有以 A. Salstowicz(1958)为代表的固体力学理论和以 J. Litwinisz(1965)为代表的随机介质理论等^[16]。建立在弹性或塑性理论基础上的计算方法有:有限单元法、边界元法、离散元法、分形力学法和非线性力学法等。如:谢和平等^[17](1988)的损伤非线性大变形有限元法;张玉卓等^[18](1986)的模糊内时有限元法;何满潮^[19](1997)的非线性光滑有限元法;邓喀中^[20](1993)的损伤有限元法;王泳嘉、张玉卓^[18](1986)和麻凤海(1996)的离散单元法等,这些数值方法为开采沉陷的预计计算拟合和定量预测奠定了基础。

经开采沉陷科技工作者几十年的不断研究,开采沉陷预计方法主要有:概率积分法、负指数函数法、典型曲线法、积分格网法、威布尔分布法、样条函数法、双曲函数法、皮尔森函数法、山区地表移动变形预计法、三维层状介质理论预计法和基于托板理论的条带开采预计法等。在这些预计方法中,积分格网法已很少使用,双曲函数法是基于淮南矿区具有巨厚冲积层时的开采预计方法,皮尔森函数法是基于淮南矿区急斜煤层开采时的预计方法,仅限于该矿区使用,三维层状介质理论和托板理论是针对条带开采提出的新方法,仍待于进一步的实践检验和完善。

对于研究煤层开采后的损害情况,只研究地表还远远不够,仍需将地表与覆岩的移动变形有机地结合起来,进一步研究煤层开采后的移动变形与破坏规律。

1.2.2 岩层控制的国内外研究现状

自 1980 年至今,我国科技工作者在采场围岩控制理论与实践工作中已取得丰硕的成果,具体概括如下^[21]:

(1) “砌体梁”结构力学模型与“关键层理论”研究

众所周知,煤层开采后上覆岩层将形成结构,此结构的形态及稳定性将直接影响采场支架的受力大小以及参数与性能的选择,同时也将影响覆岩岩体内节理裂隙与离层区的分布形态和地表沉陷形态。因此,采场上覆岩层形成结构的特点与形态一直为采矿工作者所重视。具有代表性的有:钱鸣高等^[22](1995)对采场上覆岩层结构的形态与受力进行了分析,提出了关键层理论;缪协兴等^[23,24](2003~2005)研究了在超长综放工作面下采场覆岩厚关键层破断与冒落规律;侯忠杰等^[25-28](2000~2004)对浅埋煤层中的关键层组进行了探讨,并对地表厚松散层浅埋煤层组合关键层的稳定性以及厚松散层浅埋煤层覆岩破断判据及跨距计算进行了分析研究;康建荣等^[29](2002)进行了采动覆岩力学模型及断裂破坏条件的分析;茅献彪等^[30,31](1998,1999)研究了采动覆岩中关键层的破断规律与采动覆岩中复合关键层的断裂跨距计算方法;王悦汉等^[32,33](2001,2003)建立了采动岩体动态力学模型;任奋华等(2004)^[34]进行了采空区覆岩破坏高度监测分析;吴侃等^[35](2000)对采空区上覆岩层移动破坏动态力学模型的应用进行了研究;许家林等^[36](2000)研究了覆岩关键层位置的判别方法;谢胜华等^[37,38](2002,2005)对浅埋煤层组合关键层失稳临界突变和突变理论在浅埋煤层组合关键层中的应用进行了研究;杨双锁等^[39](2004)对巷道围岩控制的波动性平衡理论有所研究;黄庆享^[40,41](2005)对厚沙土层下采场顶板关键层上的载荷传递因子和载荷分布进行了研究等。

(2) “砌体梁”结构的“R-S”稳定性研究^[21,42,43]

煤层开采后岩体内形成的“砌体梁”力学模型是一个大结构,而此大结构中影响采场顶板控制的主要是岩层移动中形成离层区附近的几个岩块(即“砌体梁”中的A、B、C岩块),关键块的平衡与否直接影响到采场顶板的稳定性及支架受力的大小。因此,应在“砌体梁”结构研究的前提下,重点分析其关键块的平衡关系,有关的典型研究论文有“砌体梁结构的关键块分析”,文中提出了“砌体梁”关键块的滑落与转动变形失稳条件,即“R-S”稳定条件。

(3) 岩层控制的发展趋势

为了进一步研究岩层的移动变形和覆岩破断垮落的形态与特征,需进一步完善采场力学模型。同时,要深入研究岩层控制中的关键层理论,以便对上覆岩层内的离层区分布作出定量描述,为发展离层区充填技术奠定基础。在关键层理论中将重点研究坚硬岩层破断的组合效应、关键层与开采高度之间的关系以及关键层破断形态与表土层变形的耦合关系等。

1.2.3 开采沉陷与岩层控制结合研究现状

在煤层开采过程中,采场上部覆岩的矿山压力将重新分布,覆岩应力分布及传递变化导致地表出现移动变形。将采场矿山压力与地表移动变形进行系统、全面的联系,并形成一个统一体,才能进一步更好地研究开采沉陷与岩层控制。近些年我国科研工作者在这方面也取得了卓越的成果。如:杨伦等^[44](1987)提出了岩层的二次压缩理论,将地表下沉直接与岩体的物理力学性质联系起来;李增琪^[45](1993)将采动岩体看成是多层梁板的弯曲,采用Fourier(傅立叶)变换推出岩层与地表移动的表达式;张玉卓等^[46](1987)提出岩层移动的位错理论;郝庆旺^[3](1988)提出了采动岩体沉陷的空隙扩展模型;杨硕等^[47](1995)建立了开采沉陷的力学模式;邓喀中^[20](1993)提出了岩体开采沉陷的结构效应;吴立新、王金庄^[48,49](1994)提出了条带开采覆岩破坏的托板理论;刘天泉^[50](1995)提出和发展了矿山岩体采动影响与控制工程学;余学义等^[51-53](1997)在克诺泰理论基础上推导出地表移动变形的极坐标普适模型表达式;中国矿业大学的吴侃、周鸣^[54](1999)用可视化软件开发了矿区沉陷预测预报系统等。

1.2.4 研究领域的国内外研究现状

近年随着国家对保水采煤的高度重视,国内许多科研院所都开展了与保水开采相关的课题研究,保水开采就是使煤层开采后,采场上部的导水裂缝与地表水或含水岩层不贯通,就可以达到保水开采的目的。可见,实现保水开采的关键技术是能否准确地确定覆岩导水裂缝带的最大高度。如何准确地确定导水裂缝带的最大高度是许多科研工作者所面临的主要难题。目前,现场采场覆岩移动变形及破坏监测常用的方法主要有:钻孔冲洗液法、钻孔电视法、钻孔深部基点法、超声成像及数字测井法、钻孔CT及电法、超声波穿透法和井下仰孔注水测漏法等。保水开采的关键理论主要是研究导水裂缝的发育机理与特征,然而分析导水裂缝带的发育机理需考虑开采厚度、开采尺寸、覆岩类型、顶板管理方法、煤层赋存条件、开采深度、隔水层厚度和松散层厚度等诸多因素。关于研究保水开采和导水裂缝的发育机理与特征方面,国内主要研究成果有:

(1) 煤炭的资源赋存特征方面具有代表性的有:刘天泉^[55](1985)认为岩层与地表的移动变形,首先取决于矿层的开采技术因素,其次水文、地质因素对岩层的移动变形也起着重要的作用。范立民等^[56,57](2003,2005)对榆神矿区资源赋存特征及保水采煤问题进行了探

讨,给出了榆神矿区煤炭、水资源的赋存特征及煤炭开发对水资源的需求和影响,并从保护水资源和尽可能多地开发煤炭资源的角度将榆神矿区划分为三个区域:保水采煤区、采煤失水区和采煤无水区。同时针对陕北沙漠型河流及植被的特点,给出了保水开采至少应考核的两个指标:一是不至于造成泉水的干涸或大幅度减流;二是对植被的生长条件不产生大的影响。李文平等^[58](2000)根据煤层上覆松散含水层、隔水层及上覆基岩的空间分布及其组合形态,将榆神府矿区保水采煤工程地质条件分为:砂土基型、砂基型、土基型、基岩型和烧变岩型。吕玉广等^[59](2013)在分析导水裂缝带的形成过程及其水文地质意义的基础上,总结了导水裂缝带研究各种预测方法,给出了各种方法之间的优缺点,提出了未来研究的难点和研究方向,预测了导水裂缝带研究的发展趋势。

作者在分析影响榆神府生态脆弱区覆岩与地表开采损害特征基础上,结合浅埋煤层覆岩破坏的特征与机理,揭示了影响其覆岩破坏的主要因素:开采深度、开采厚度、基岩厚度、载荷层厚度以及坡体自身稳定性,其为进一步揭示该区域覆岩导水裂缝带的发育机理奠定了基础。

(2) 在理论方面,具有代表性的有:康建荣等^[29](2002)对采动覆岩力学模型及断裂破坏条件进行了分析,其根据覆岩的破坏机理,在考虑覆岩岩性、厚度和埋深等因素的基础上,建立了覆岩岩层断裂时临界开采长度的计算模型;李树刚等^[60](1999)对覆岩采动裂隙带动态分布特征进行了研究,分析了采动后覆岩关键层活动特征对裂隙带分布形态的影响;许家林等^[61](2000)在关键层的运动对覆岩及地表移动影响方面做了探讨,给出了“砌体梁”结构位移曲线的拟合方程,揭示了关键层与表土层间耦合的一些基本规律;王金庄等^[62,63](1997,2003)对巨厚松散层下煤层开采地表移动规律和开采程度对应的地表下沉模式进行了研究,其以岩体力学为工具,以实测资料为依托,给出了断裂临界开采宽度和充分临界开采宽度的计算公式;常占强等^[64](2003)对厚松散层弯曲下沉空间问题进行了研究,其将松散层视为随机介质,将基岩视为弹性板,建立了厚松散层条件下空间问题地表移动与变形的预计模型;吴立新等^[65](1994)对托板控制下开采沉陷的滞缓与集中现象进行了研究;许家林等^[66](2004)就岩层采动裂隙分布在绿色开采中的应用方面进行了探讨,给出了覆岩离层分区隔离充填减沉法,为实现保水开采奠定了理论基础;于广明等^[67](1999)对岩体采动沉陷的损伤效应进行了研究,其研究表明:岩体的采动沉陷量主要取决于岩体中初始损伤在空间中的总占位,其中垂直移动量取决于岩体中初始损伤在垂直平面内的总占位,其占位越大、下沉值越大,水平移动量取决于岩体中初始损伤在水平面内的总占位,其占位越大、水平移动值越大;张玉军等^[68](1999)对岩体渗流与应力耦合理论在近水体采煤的应用方面作了探讨;李白英^[69](1999)在预防矿井底板突水的“下三带”理论及其发展与应用方面作了分析与探讨等。

中国工程院院士刘天泉提出“覆岩破坏学说”,给出了“三带”模型,其根据覆岩变形破坏特征及导水性能,将上覆岩层分为“三带”,是目前国内研究导水裂缝带发育机理的基础;高延法^[70](1996)在原有传统“三带”的基础上,认为采后覆岩结构具有分带性,提出岩层移动“四带”模型,将覆岩划分为破裂带、离层带、弯曲带和松散冲积层带;夏小刚^[71](2012)总结和分析了岩层与地表移动特征和规律,并对各岩层移动带的特征进行了描述,将裂隙带划分为“似连续带”和“块体铰接带”,也提出了“四带模型”(即:冒落带、块体铰接带、似连续带和弯曲下沉带),并给出了各移动带之间的岩移传递条件及各带高度的确定方法;马亚杰、武强

等^[72](2008)通过分析影响导水裂缝带高度的采矿地质因素:开采厚度、采空区面积、顶板岩层结构类型、顶板管理方法、煤层赋存条件和开采深度等,选择具有非线性映射、泛化及容错功能的BP人工神经网络方法,对顶板导水裂缝带高度进行预测研究;高延法、黄万朋等^[73](2012)为研究覆岩导水裂缝带内裂隙岩层导水性与覆岩岩层层向拉伸变形的关系,导出岩层层向拉伸率的计算公式,得出覆岩岩层越坚硬,则裂采比就越大,导水裂缝带顶部岩层层向临界拉伸率值就越小的结论;缪协兴等^[74](2008)建立保水隔水关键层矿压模型,该模型包含软弱岩性隔水、坚硬层结构隔水和裂隙通道弥合隔水等3层含义,将保水采煤分解为隔水关键层位置判别、结构稳定性判别与控制、渗流稳定性判别与控制 and 渗流突变通道控制4个步骤;黄庆享^[75](2010)基于采动裂隙发育程度与采高和隔水岩组的关系,提出以隔采比为指标的隔水性能判据,并将保水开采分为自然保水开采、可控保水开采和特殊保水开采3类,为浅埋煤层保水开采提供可靠依据;刘玉德、张东升等^[76](2011)通过分析浅埋煤层保水开采机理和关键技术,以“综合分类指标分析法”和导水裂缝带高度作为分类的综合指标,以采高、顶板厚度、岩体完整性及强度作为综合分类的相关因素,将沙基型浅埋煤层保水开采适应条件划分为七类,初步形成浅埋煤层保水开采的“分类体系”;宣以琼^[77](2008)以榆阳煤矿为研究基地,通过对地下水动力学参数、覆岩力学组合结构特征与基岩风化带的阻隔水特性实验,给出了薄基岩浅埋煤层覆岩采动破坏“两带”高度的动态变化特征和长壁工作面开采防突水的调控技术,为生态脆弱区实现绿色保水开采奠定了基础;由于隔水层隔水性能及厚度对保水开采导水裂缝带的发育高度也起着关键的作用,王双明、范立民等^[78](2010)认为新近系上新统离石黄土和第三系红土可作为榆神矿区的隔水土层,并对其力学性质与水理性质进行了研究;与此同时,西安科技大学的黄庆享和张杰分别对浅埋局部柔性充填隔水岩组稳定性和浅埋煤层黏土隔水层隔水性采动损害破坏及控制机理也进行了研究。

作者应用概率积分法研究了导水裂缝带的移动变形对其断裂损伤的影响,提出了导水裂缝带广义损伤因子的概念和数学模型,并应用导水裂缝带广义损伤因子确定了导水裂缝带的最大高度;同时结合岩层中间层和导水裂缝带广义损伤因子的定义,假定用两段椭圆来拟合导水裂缝带上位岩土层的下沉曲线,导出了开采厚度、基岩厚度、载荷层厚度和导水裂缝带广义损伤因子之间的关系。

(3) 在数值计算分析方面,具有代表性的有:陈平定等^[79](2005)对保水采煤煤柱稳定性进行了数值模拟,其应用煤柱上的米赛斯应力分布、覆岩的拉应力分布和顶板下沉量来分析研究煤柱与覆岩的稳定性;白矛等^[80](1998)对采动引起的岩体变形及地下水流动的数值分析——非稳定流进行了研究,根据Biot固结原理,建立了非稳定流孔隙弹性有限元模型,并通过计算分析,得出了孔隙相对压缩率对流体压力场的分布有较大影响的结论;武强等^[81](2002)对断裂带滞后突水进行了数值仿真模拟,给出了突水潜能与防突水潜能之比与流动变形之间的关系;侯忠杰等^[82](2005)对砂土基型浅埋煤层保水煤柱稳定性进行了数值模拟等。

(4) 在物理模拟研究方面,具有典型代表性的有:张杰等^[83](2004)进行了浅埋煤层导水裂隙带发展规律物理模拟分析,给出了不同基岩厚度采场实现保水开采的合理推进距离,为通过间歇开采实现保水采煤提供了实验依据。

(5) 在预计预测方面,具有代表性的有:于广明等^[84](2001)对采矿引起地表动态下沉