

国家自然科学基金项目 (41402265) 资助
中国博士后科学基金项目 (152043) 资助

渭北煤田承压水体上 采煤底板破坏突水机理与应用研究

李 昂 著

Research on Mechanism and Application of Coal Seam Floor Failure
Over a Confined Water Body in Weibei Coalfield

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

国家自然科学基金项目(41402265)资助

中国博士后科学基金项目(152043)资助

渭北煤田承压水体上采煤底板 破坏突水机理与应用研究

李 昂 著

中国矿业大学出版社

内 容 提 要

近年来,随着渭北煤田矿区开采深度的增加,开采环境日趋复杂,水压、地应力等不断增大,太原组下部煤层开采受到奥陶纪灰岩承压水的威胁更加突出,如何有效预防和控制底板奥灰岩溶水害问题已变得十分迫切和重要。本书围绕带压开采条件下煤层底板突水的影响因素分析、采动支承压力和承压水压力数学模型的建立、流固耦合数值模型的建立、底板隔水层突水危险区域等级划分、底板注浆改造工程设计依据等科学问题,综合运用理论分析、数值模拟、现场测试及实验室实验等技术途径,全面系统地研究了双场耦合作用下底板采动破坏特征及突水机理,研究成果可为渭北矿区带压开采水害防治技术提供理论指导和科学依据。

本书可供从事采矿工程等领域的科技工作者和高校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

渭北煤田承压水体上采煤底板破坏突水机理与应用研

究/李昂著. —徐州:中国矿业大学出版社,2015.9

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2795 - 9

I. ①渭… II. ①李… III. ①煤矿—矿井突水—研究
—陕北地区 IV. ①TD742

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 204452 号

书 名 渭北煤田承压水体上采煤底板破坏突水机理与应用研究

著 者 李 昂

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 11 字数 228 千字

版次印次 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

定 价 28.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



前 言

在矿井水害中,特别突出的是煤层底板突水,我国 600 多个国有煤矿中有一半以上处于承压水体上采煤,这些煤矿主要分布于所谓的“华北型煤田”,其范围包括东起徐州、淄博,西至陕西渭北,北起辽宁南部,南至淮南、平顶山一带的广大区域,奥灰水害严重,受水威胁储量达数百亿吨,淹井淹面事故时有发生。近些年来,随着浅部煤层逐渐枯竭,开采强度不断增加,矿井开采向深水平煤层延深,来自煤层底部奥陶纪灰岩高承压水的危害日趋加剧,华北型煤矿的突水频率和强度明显增加。

澄合矿区董家河煤矿属于华北煤田受奥灰岩溶水威胁的矿井,水文地质条件复杂,太原组下部 5 号煤层底板存在奥灰高压水,严重威胁着矿井生产安全。根据董家河煤矿奥灰水淹井淹面事故资料,在建井初期时,由于对奥陶纪灰岩水文地质条件认识不清,将井巷设计于奥灰地层中,设计水平标高+300 m,副井在+338 m 高程见奥灰,当掘进至+315 m 高程时揭露岩溶裂隙,水量骤增,涌水量达到 350 m³/h,淹没井筒巷道,造成停产,实测奥灰水位+380 m,之后将水平提高至+330 m 时,在井底车场及硐室掘进过程中,奥灰水涌水量增大到 887.86 m³/h,造成再次淹井事故。之后,将设计水平提高至现在的+355 m 的煤系地层中,方安全建井。根据调查,副斜井在+338~+335 m 奥陶纪灰岩斜长 57 m 的范围内,共发现岩溶裂隙 15 条,平均每条长 3.8 m。近年来,随着董家河煤矿生产区域向深部延深,底板出水频率增加,若底板太原组灰岩水与奥陶纪灰岩水相互连通,水量较大,可能造成透水事故。董家河煤矿最近 6 年所发生的 5 号煤层底板透水事故有:2006 年 3 月 20 日 22504 工作面回采 7 m 时底板出水,水源为奥灰水,工作面煤层底板出水高程+269 m,水量 120~180 m³/h,淹没范围 220 m;2008 年 8 月 26 日二采区集中运输巷掘进过程中,距掘进头 80 m 处左右,发生底板突水,突水量达 130 m³/h;2009 年 4 月 6 日,煤柱采区煤柱 6 面掘进切眼过程,巷道底板突水,突水量 100~120 m³/h。从这些突水案例可以看出,董家河煤矿历史上最大奥灰突水量为 887.86 m³/h,在矿井生产过程中底板最大突水量 130 m³/h。2003 年以前,董家河煤矿矿井正常涌水量以煤系地层顶底板砂岩裂隙为主,涌水量较小;2003 年以后,矿井涌水量中除煤系地层含水层水和老空水外,主要以底板水为主。目前,董家河煤矿 5 号煤开采受到奥灰水的严重威胁,回采过程所引起的底板岩层破坏导致有效隔水层厚度的减小,直接影响采煤工作面的安全,如何解放澄合矿区

董家河煤矿 5 号煤层这些受承压水威胁的煤炭储量,实现煤矿生产安全高效,及时而准确地预测、预防矿井突水是目前亟须解决的问题。因此,本著作围绕带压开采条件下煤层底板突水的影响因素分析、采动支承压力和承压水压力数学模型的建立、流固耦合数值模型的建立、底板隔水层突水危险区域等级划分、底板注浆改造工程设计依据等科学问题,综合运用理论分析、数值模拟、现场测试及实验室实验研究等技术途径,对渗流与应力耦合作用下底板采动破坏特征及突水机理展开全面系统的分析,并将研究成果应用于董家河煤矿 5 号煤层 22507 工作面底板注浆加固改造工程中,据此提出了煤层底板注浆加固改造技术措施,实现了工作面安全回采,取得了显著的经济效益和社会效益,为今后董家河煤矿乃至澄合矿区太原组下部 5、10 号煤层底板奥灰岩溶水害预测和预防提供宝贵经验。

笔者一直从事矿山压力监测、地表岩层观测、巷道支护稳定性分析与评价、矿井顶底板水害防治与治理等方面的地质工程、岩土工程与岩石力学交叉学科的科学研究工作,主要研究方向为岩石力学、岩体力学、渗流力学、细观力学、工程地质学等,在岩石细观力学理论、渗流力学理论、岩石损伤断裂机理、煤层开采仿真计算与分析、带压开采诱发底板破坏机理及理论、多场耦合作用下的物理模拟及数值模拟分析等方面均取得较好的研究成果。参与完成了“陕煤集团张家峁煤矿 15201 综采工作面矿压规律观测及地表移动观测技术研究项目”、“陕煤集团张家峁煤矿大断面巷道变形监测与锚杆优化设计研究项目”、“澄合矿务局董家河煤矿、二矿、王村矿和王斜矿采场底板破坏深度分布规律及水害防治对策研究”、“董家河煤矿 5 号煤层带压开采底板破坏演化及水害防治技术与评价”、“桑树坪矿 3105 面煤柱支承压力监测及底板破坏深度发育规律数值模拟研究”、“凉水井煤矿二盘区涌水量预测研究”等 20 余项科研项目,2014 年获得国家自然科学基金项目(41402265)资助,获得国家实用新型专利 7 项,在核心学术期刊及国际学术会议上发表论文 10 余篇,其中多篇被 EI 和 CSCD 收录。本著作是笔者和课题组成员对渭北矿井水害防治关键技术研究领域的工作总结和积累,是全体参与人员共同努力的成果。

本著作在撰写初期,承蒙西安科技大学多名教授审阅大纲并予以指导,在撰写过程中得到校、系有关领导的关心和支持。澄合矿务局及董家河煤矿相关领导在本书撰写期间提供了相关素材,为本著作的完稿作了有益贡献。在此对现场监测人员、矿方领导及同行给予的关心、关注、指导和帮助,谨此铭志衷心的感谢!

作者

2015 年 5 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究的必要性及意义	1
1.2 国内外研究现状及评述	2
1.3 研究方法及其内容	15
2 矿区井田概况	17
2.1 矿井工程地质条件	18
2.2 矿井水文地质环境分析	23
2.3 5号煤开采底板水害分析	28
3 煤层底板突水影响因素分析	32
3.1 底板含水层水头高度	32
3.2 底板含水层的富水性	34
3.3 底板隔水岩层性质及其组合特征	35
3.4 地质构造	36
3.5 矿山压力	38
3.6 开采条件	39
3.7 本章小结	39
4 底板岩石物理力学性质及渗透特性试验研究	41
4.1 底板岩石物理力学性质参数试验	41
4.2 岩石渗透性试验方法	47
4.3 岩石渗透性试验条件	48
4.4 岩石渗透性试验结果分析	49
4.5 本章小结	57
5 带压开采下底板采动应力耦合作用机制研究	59
5.1 煤体变形破坏特征及弹塑性应变软化模型的建立	59

5.2	煤层底板支承压力分布规律及力学分析	62
5.3	底板岩体应力解析法分析	77
5.4	带压开采下底板采动破坏塑性力学分析	101
5.5	承压水压力对底板隔水层影响作用机制研究	107
5.6	底板采动应力耦合作用分析	114
5.7	本章小结	115
6	带压开采下底板采动变形破坏实测研究	116
6.1	底板采动变形破坏监测基本原理	116
6.2	底板采动变形破坏监测设计方案	117
6.3	底板采动变形破坏监测及钻探设备	119
6.4	底板采动破坏深度测试结果分析	120
6.5	本章小结	125
7	煤层底板采动破坏特征的渗流与应力耦合数值分析	126
7.1	数值计算基本方程及计算程序简介	126
7.2	数值计算模型的建立	130
7.3	数值模拟计算结果	132
7.4	结果分析讨论	137
7.5	本章小结	138
8	董家河煤矿5号煤层底板带压开采条件评价	139
8.1	底板带压开采条件评价标准	139
8.2	底板带压开采条件评价	140
8.3	本章小结	145
9	董家河煤矿5号煤层带压开采对策研究	146
9.1	工程地质及水文地质条件	146
9.2	煤层底板改造层位数值分析	147
9.3	煤层底板注浆改造技术措施	151
9.4	社会经济效益分析	157
9.5	本章小结	157
10	结论与建议	159
	参考文献	161

1 绪 论

1.1 研究的必要性及意义

1.1.1 研究的必要性

在矿井水害中,特别突出的是煤层底板突水,底板在承压水压力作用下涌入矿井,严重威胁煤矿安全生产。随着浅部煤层的枯竭,开采强度的增加,矿井的开采深度不断延深,来自煤层底部奥陶纪灰岩高承压水的危害日趋加剧,华北型煤矿的突水频率和强度明显增加。据调查,诸如1984年开滦范各庄矿陷落柱突水淹井,最大突水量达 $12.318 \text{ 万 m}^3/\text{h}$,不到21 h就淹没了已生产20年、年产煤300万t的大型矿井,直接经济损失5亿多元;2010年3月1日神华集团骆驼山煤矿16号煤回风大巷掘进时奥灰隐伏构造突水淹井,峰值突水量达 $7.2 \text{ 万 m}^3/\text{h}$;2010年3月28日山西王家岭煤矿老窑透水153人被困,38人死亡。统计显示,与20世纪50年代相比,20世纪80年代之后的突水频率增加了2.57倍,突水强度增大了1.5~410倍,造成40%左右的煤炭储量因严重受水威胁而不能正常开采^[1-12]。

董家河煤矿属于华北煤田受奥灰岩溶水威胁的矿井,水文地质条件复杂,太原组下部5号煤层底板存在奥灰高压水,严重威胁着矿井生产安全。根据董家河煤矿奥灰水淹井淹面事故资料,在建井初期时,由于对奥陶纪灰岩水文地质条件认识不清,将井巷设计于奥灰地层中,设计水平标高+300 m,副井在+338 m高程见奥灰,当掘进至+315 m高程时揭露岩溶裂隙,水量骤增,涌水量达到 $350 \text{ m}^3/\text{h}$,淹没井筒巷道,造成停产,实测奥灰水位+380 m,之后将水平提高至+330 m时,在井底车场及硐室掘进过程中,奥灰水涌水量增大到 $887.86 \text{ m}^3/\text{h}$,造成再次淹井事故。之后,将设计水平提高至现在的+355 m的煤系地层中,方安全建井。根据调查,副斜井在+338~+335 m奥陶纪灰岩斜长57 m的范围内,共发现岩溶裂隙15条,平均每条长3.8 m。近年来,随着董家河煤矿生产区域向深部延伸,底板出水频率增加,若底板太原组灰岩水与奥陶纪灰岩水相互连通,水量较大,可能形成透水事故。董家河煤矿近几年所发生的5号煤层底板透水事故有:2006年3月20日22504工作面回采7 m时底板出水,水源为奥灰水,工作面煤层底板出水高程+269 m,水量 $120\sim 180 \text{ m}^3/\text{h}$,淹没范围220 m;2008年8月26日二采区集中运

输巷掘进过程中,距掘进头 80 m 处左右,发生底板突水,突水量达 $130 \text{ m}^3/\text{h}$;2009 年 4 月 6 日,煤柱采区煤柱 6 面掘进切眼过程,巷道底板突水,突水量 $100 \sim 120 \text{ m}^3/\text{h}$ 。从这些突水案例可以看出,董家河煤矿历史上最大奥灰突水量为 $887.86 \text{ m}^3/\text{h}$,在矿井生产过程中底板最大突水量 $130 \text{ m}^3/\text{h}$ 。2003 年以前,董家河煤矿矿井正常涌水量以煤系地层顶底板砂岩裂隙为主,涌水量较小;2003 年以后,矿井涌水量中除煤系地层含水层水和老空水外,主要以底板水为主。目前,董家河煤矿 5 号煤开采受到奥灰水的严重威胁,回采过程所引起的底板岩层破坏导致有效隔水层厚度的减小,直接影响采煤工作面的安全。因此,如何解放董家河煤矿 5 号煤层这些受承压水威胁的煤炭储量,实现煤矿生产安全高效,及时而准确地预测、预防董家河矿井底板突水是日前亟须解决的问题。

1.1.2 研究的意义

底板突水问题实质上是渗流场与应力场共同作用下流固耦合力学问题,是涉及岩石力学、矿山压力、流体力学、流变力学及工程地质学等多学科交叉的理论问题。底板突水是在特定的地质结构、地下水、原岩应力及回采过程中发生的,不仅仅是单纯的水文地质问题。因此,解决董家河煤矿底板突水问题应在考虑原岩应力、采动影响、地质构造、地下水等因素基础上,从渗流与应力耦合作用的角度出发,研究包含底板岩体在内的采场围岩体的变形与破坏,特别是要研究底板的应力与阻隔水性能相互作用关系以及可能形成突水灾变而导致底板透水事故。

澄合矿区董家河煤矿底板突水频率日趋上升,透水水量日趋增大,造成的损失也日趋严重,如何解放董家河煤矿 5 号煤层这些受奥灰岩承压水威胁的煤炭储量,保障 5 号煤安全开采,是本次研究的难点和重点。

因此,深入揭示带压开采下底板岩体在渗流与应力耦合作用下采动破坏突水规律,对指导本矿区太原组下部 5 号煤层的安全生产及底板水害防治技术,高效开发煤炭资源都具有十分重要的理论意义和现实意义,也为澄合矿区同类型存在底板奥灰岩溶水害的防治提供科学的参考依据。

1.2 国内外研究现状及评述

矿井底板突水灾害是在采矿活动影响下,承压水沿底板隔水层中的突水通道涌入矿井。几十年来,国内外许多学者对矿井突水机理进行了一些有益的探索,取得了大量的研究成果,如“突水系数”^[14]、“强渗通道”^[15]、“水岩应力”^[16]、“零位破坏与原位张裂”、“关键层”及“下三带”^[17]等理论学说,都从各个方面揭示了底板突水发生的机理,对于矿井安全生产起到了积极的指导作用。

1.2.1 底板突水机理理论研究现状

1.2.1.1 国外研究现状

早在 20 世纪初,国外就有人注意到底板隔水层的作用,并从多次底板突水资料中认识到,只要煤层底板有隔水层,突水次数就少,突水量也小,到 20 世纪 40 年代至 50 年代,匈牙利韦格弗伦斯^[7]第一次提出底板相对隔水层的概念,他指出,煤层底板突水不仅与隔水层厚度有关,而且还与水压力有关,突水条件受相对隔水层厚度的制约,相对隔水层厚度是等值隔水层厚度与水压力之比,同时指出,在相对隔水层厚度大于 14.8 m/MPa 的情况下,开采过程中基本不突水,而 80%~88% 的突水都是相对隔水层厚度小于此值。由此,许多承压水上采煤的国家引用了相对隔水层厚度大于 19.74 m/MPa 就不会引起底板突水的概念^[7]。

20 世纪 60 年代至 70 年代,仍以静力学理论为基础,但加强了地质因素,主要是隔水层岩性和强度方面的研究。在匈牙利、南斯拉夫等国,广泛采用了相对隔水层厚度,即以砂岩抗水压的能力作为标准隔水层厚度,将其他不同岩性的岩层换算成砂岩的厚度,以此作为衡量突水与否的标准。该方法不仅考虑了水压对底板隔水层厚度的作用,而且将岩层的岩石力学强度放在重要位置,且计算简便,具有较好的实用性。但同样未考虑矿山压力的影响、平面尺寸效应和岩层的原生破坏^[18-19]。

20 世纪 70 年代至 80 年代末期,许多国家的岩石力学工作者在研究矿柱的稳定性时研究了底板的破坏机理,其中最具有代表性的是 C. F. Santos、Z. T. Bieniawski 等,他们基于改进的 Hoek-Brown 岩体强度准则,并引入临界能量释放点的概念和取决于岩石性质和承受破坏应力前岩石已破裂的程度与岩体指标 RMR 相关的无量纲常数 M 、 S ,分析了底板的承载能力,对研究采动影响下的底板破坏机理有一定参考价值^[20]。

1.2.1.2 国内研究现状

我国对底板突水规律的研究始于 20 世纪 60 年代,借助于匈牙利的研究经验,提出了突水系数概念;70 年代后期,修改了原来的突水系数公式,并应用于实践;80 年代开始,底板突水机理及预测预报的研究开始走上了蓬勃发展的道路,煤矿科研人员相继提出了突水系数公式、下三带理论、原位张裂与零位破坏理论、薄板模型关键层理论、突水概率指数法、模糊数学法、专家系统方法等^[32-35]。

(1) 突水系数法^[3,21]

早在 20 世纪 60 年代,焦作矿区水文地质大会战中,以煤炭科学研究总院西安勘探分院为代表,提出了用“突水系数”作为预测预报底板突水与否的标准。突水系数就是单位隔水层所能承受的极限水压值,即

$$T_s = p/M \quad (1-1)$$

式中 T_s ——突水系数;

p ——含水层水压, MPa;

M ——隔水层厚度, m。

20 世纪 70 年代煤炭科学研究总院西安分院和其他有关单位对式(1-1)所表示的突水系数进行了修正, 提出以下突水系数公式:

$$T_s = p / (\sum M_i a_i - C_p) \quad (1-2)$$

式中 M_i ——隔水层第 i 分层厚度, m;

C_p ——矿压对底板的破坏深度, m;

a_i ——隔水层第 i 分层等效厚度的换算系数。

在引入“下三带”理论后, 突水系数是指每米有效隔水层厚度所承受的水压值, 可由下式进行计算^[22]:

$$T_s = p / (M - M_1 - M_2) \quad (1-3)$$

式中 M ——底板隔水层实际厚度, m;

M_1 ——开采后底板破坏带厚度, m;

M_2 ——奥灰顶界面原始导水带厚度, m。

由于式(1-1)所表示的突水系数在以往的应用中取得了显著成效, 适用范围广, 解放了受水害威胁的大量煤炭资源, 特别是在突水危险性分区上已有了较为明确的界限值, 同时在《煤矿防治水规定》中也采用公式(1-1)。

突水系数公式是基于大量的突水资料的分析而获得的, 在突水系数概念指导下, 我国部分受奥灰水严重威胁的矿区如峰峰、邯郸、焦作、淄博、井隆等安全采出大量煤炭。突水系数概念明确, 公式简便实用, 表达式中虽然只出现水压、隔水层厚度及矿压破坏底板深度等三项简单因素, 但它却反映了各种突水因素的综合作用, 包括矿压破坏底板或促使断裂重新活动的作用, 在煤矿生产中起到了积极的作用, 故一直沿用至今。

然而, 在实际应用中发现突水系数公式存在着一些难以克服的固有缺陷, 尤其随着采煤深度的进一步加大, 这种矛盾更加明显地暴露出来, 这些缺点就给预计工作面是否突水带来较大困难, 该公式虽然考虑了矿压、水压等影响因素, 但未考虑矿压、水压的动态作用以及底板的岩性、岩层结构、断层与裂隙等特征, 会为工作面的安全开采带来错误的判断^[23-29]。

(2) “下三带”理论及“四带”理论

“下三带”理论最早由原山东矿业学院、峰峰矿务局等一批科技人员在实践中提出的, 并在实践中得到应用和发展, 最后由山东科技大学的一批科研人员将其上升到一定理论高度^[30]。该理论认为开采煤层底板也像上覆岩层一样从煤层底面到含水层顶面可分为三带^[31], 即底板导水破坏带、完整岩层带和承压水导升带。

“下三带”理论比较符合煤层底板破坏、突水规律, 在生产实践中得到了较为广泛的应用, 但该理论研究尚有待于深入^[36]。施龙青等^[37]指出, 阻碍这一理论发展和广泛应用的主要原因有两点: 一是基于弹性力学理论推导出底板破坏带的理论

计算公式,而弹性力学是建立在一些基本假定基础上的,所有这些假定是不适合岩体的力学特征的;二是“下三带”理论没有考虑承压水对底板岩层的破坏作用。他从现代损伤力学及断裂力学理论出发,提出了开采煤层底板的“四带”划分理论。即开采煤层底板可以划分出:I 矿压破坏带、II 新增损伤带、III 原始损伤带、IV 原始导高带。推导出开采煤层底板“四带”理论中各带厚度的计算公式,给出了底板突水判别方法,并结合肥城煤田开采煤层底板探测实例,说明开采煤层底板“四带”存在的客观性。

(3) 原位张裂与零位破坏理论

由煤炭科学研究总院北京开采所王作宇、刘鸿泉等^[38]提出的“原位张裂与零位破坏”理论认为,被开采的煤层在矿压与水压的联合作用下,工作面相对于底板的影响范围在水平方向上分为三段:超前压力压缩段、卸压膨胀段和采后压力压缩与稳定段。在垂直方向上同样分为三带,即直接破坏带、影响带和微小变化带。在水平挤压力及矿压与水压的作用下,使直接破坏带内整体上半部分受水平挤压,下半部分受水平拉张,岩体呈整体上凹的形状。在直接破坏带中部附近中和层下面产生张裂隙,并沿着原岩节理、裂隙发展扩大,但不发生岩体之间较大的相对位移,仅在原位形成张裂隙。

杨映涛等^[39]采用 1:100 的平面应力模型,利用物理模拟技术研究煤层底板的突水机理,表明完整底板破坏突水是沿“零位破坏”线发生的。但“原位张裂与零位破坏理论”仅仅从矿山压力及水压力角度,解释了煤层开采过程中的底板破坏过程,并没有从本质上简明地说明突水发生的机理,现场人员较少应用。

(4) 板模型理论^[40-41]

煤炭科学研究总院北京开采所刘天泉、张金才等提出了底板岩层由采动导水裂隙带和底板隔水带组成的概念,并采用半无限体上一定长度上受均匀竖向载荷的弹性解,结合莫尔-库仑强度理论和格里菲斯强度理论分别求得了底板受采动影响的最大破坏深度。将底板隔水层带看作四周固支受均布载荷作用下的弹性薄板,然后采用弹塑性理论分别得到了以底板岩层抗剪及抗拉强度为基准的预测底板所能承受的极限水压力的计算公式,该理论首次运用板结构研究底板突水机制,发展了突水理论。但煤层底板很难满足薄板理论的基本条件(厚宽比小于 1/7~1/5)。由于厚板理论尚不成熟,所以计算时可以选择其中较薄的一层进行分析,应用薄板理论可以得出足够满足精度的解。

(5) 关键层理论^[42-45]

钱鸣高、黎良杰等将采场顶板覆岩关键层理论引入到煤层底板突水研究中,认为关键层是控制突水的主要因素。将煤层底板至含水层之间承载能力最大的一层岩层看作底板关键层,从而将采场底板突水的研究转化为对底板关键层破断机制的研究。将关键层看作受水压等均布载荷作用的弹性薄板,得出了它的极限破断跨距公式。并提出了利用已知突水事故资料反演预测岩体强度的方法,分析了底

板关键层破断后的块体平衡条件,解释了突水点的分布特点与突水时产生的底鼓现象。

尽管底板关键层的力学特征与顶板关键层具有相同的意义,但底板突水与不是由所谓的关键层所控制,恰恰相反是由一些承载能力不很强、但阻水性能很好的岩层所控制,而关键层往往因裂隙闭合度差而成为导水层。因此,该理论模型与实际地质环境相关甚远。

(6) 非线性动力学理论

靳德武等^[86]、王延福等^[46]认为在底板突水的形成中,存在快、慢两种过程。用塞子模型模拟突水岩块,建立了动力学方程,提出突水的物理判据,并对实例进行了检验,其符合率高。周辉等^[47]在薄板理论的基础上,建立了立井井筒底板突水的尖点突变模型。

白晨光^[48]应用突变理论的方法,对底板关键层的力学模型进行分析,推导出了关键层系统的总势能函数表达式,建立了底板关键层的尖角型突变模型,分析了承压水底板关键层失稳的力学机制。王凯^[49]针对煤层底板突水预测指标监测信号,分析了单变量序列尖点突变模型及其稳定判据,提出了煤层底板突水的突变理论预测方法。

邱秀梅等^[50]利用重整化群方法研究了断层单元体破裂的随机性和关联性,在此基础,对断层导水裂隙的扩展规律进行了分析。王连国等^[51-52]得到煤层底板尖点突变模型的突水势函数,发现煤层底板突水具有突变、缓慢两条路径,并在突水临界点附近具有发散性和四模态软化等性质。基于大量实测信息,对承压水上开采煤层底板变形破坏过程中岩移、注水量等矿压显现的观测时序,进行 Lyapunov 指数的提取,并对其混沌性态进行了研究,表明用渗透性指标描述煤层底板变形破坏特征要比岩移量指标更敏感。

郑德志等^[53]、武强等^[54]利用非线性人工神经网络(ANN)与地理信息系统(GIS)耦合技术,建立了煤层底板突水危险性评价的非线性模型,研究结果表明,ANN 与 GIS 耦合技术对煤层底板突水预测具有重要的实用价值。

廖巍等^[55]、靳德武等^[56]、黄莲莲等^[57]、王连国等^[58]、姜成志等^[59]提出并分析了基于小波神经网络的煤层底板突水预测模型及算法,通过实例证明,应用小波神经网络解决煤层底板突水预测的可行性和优越性。

(7) 突水概率指数法

施龙青等^[60]基于大量的采场底板突水案例分析,找出了导致煤矿底板突水的主要因素,根据各种因素在底板突水中所起的作用大小,利用概率统计法及专家经验法确定各种因素在底板突水中所占的权重,建立计算突水概率指数的数学模型;将模型应用到已有的突水案例中,计算出各个突水案例的突水概率指数;再用概率统计的方法,预测某种突水概率指数下突水的可能性及突水程度。然而,应用该方法的前提条件是对研究区的地层、构造及水文特征要有足够的认识和研究,还需有

大量的突水资料。

(8) “岩水应力关系”说^[4, 61-62]

由煤炭科学研究总院西安分院提出,该学说认为底板突水是岩、水、应力共同作用的结果。采动矿压使底板隔水层出现一定深度的导水裂隙,降低了岩体强度,削弱了隔水性能,造成了底板渗流场重新分布,当承压水沿导水裂隙进一步侵入时,岩体则因受水软化而导致裂缝继续扩展,直至两者相互作用的结果增强到底板岩体的最小主应力小于承压水水压时,便产生压裂扩容,发生突水。

(9) 其他力学分析方法

鲁海峰将底板层状岩体视为横观各向同性连续体,根据煤层上覆载荷分布特点,推导出煤层采动后的底板任一点应力解析解,并在此基础上,分析了横观各向同性底板变形参数的各向异性度对应力分布规律的影响。根据应力计算结果,利用 Mohr-Coulomb 屈服准则,试算搜索出横观各向同性岩体危险剪切面并判断该面是否破坏^[24]。

李昂、谷栓成等分析了带压开采条件下煤层底板采动应力耦合作用机制,提出了承压水对底板隔水层的影响主要表现为“顶托”和“导升”作用,研究了承压水压力对底板隔水层作用机理,得出了澄合矿区某矿渗流-应力双场耦合作用下煤层底板最大破坏深度及其演化规律^[63]。

施龙青^[64]把隔水底板作为脆性岩体,认为底板突水是由于岩体沿断裂面发生滑动造成的。考虑矿山压力的作用,修正了莫尔-库仑破裂准则。我国 80% 的突水事故是由于断层引起的,谭志祥^[2]以断层为主要研究对象基于岩体极限平衡理论,采用数学和力学相结合的方法,对正常地质采矿条件下底板很少突水而遇断层时常常发生突水的力学机制进行分析,推导出判别承压水上采煤是否安全的计算公式。张文志等^[65]根据不同的岩体破坏准则,应用于不同的突水机理,基于断裂力学和非线性科学突变论的观点,建立了滞缓型突水及爆发型突水的底板破坏力学模型。

岩体结构非常复杂,地下工程作用下岩体结构的理论解析分析^[40, 66-67]几乎是不可能的或者是过分简化而不精确的。张西民等^[68]利用有限元法模拟了顶板来压和底板破坏及突水之间的关系。结果表明,开采在煤层顶、底板岩层中均引起塑性破坏带,且顶板破坏带比底板破坏带更大,波及范围更远。底板矿压破坏带主要分布于煤壁岩体和原切眼附近,采空区破坏带深度较小,但指向采空区的位移量很大,即底板膨胀作用大,底板变形量大。对承压开采来说,顶板来压过程容易引发突水事故,尤其在底板破坏带附近来压时,突水的危险性更大。

刘红元等^[69]、冯启言等^[70]、T. H. Yang 等^[71]利用自行开发的岩层破断过程分析系统,基于渗流-损伤耦合分析,对承压水底板的破断失稳、裂隙扩展和突水过程进行了数值模拟。郑少河等^[72]针对底板突水大部分是断层突水造成的,根据裂隙发育规模与工程尺度的关系,提出基于应力场与渗流场相互作用的离散介质模型

和拟连续介质模型的耦合模型。吕春峰等^[73]利用 NCAP-2D-W 对淮北杨庄矿某工作面煤层底板突水进行多方案的数值模拟试验研究。吴双宏等^[74]利用 ANSYS 对多因素影响下的底板突水破坏进行数值模拟分析:随着开采的进行,煤层底板采空区中部出现拉应力区;开采区域两侧的底板岩体内,距离岩壁 10~15 m 的范围是应力峰值区;底板岩层内部应力分布随着开采的进行而不断变化。底板塑性区随着开采而向深部发展。

武强等^[75]提出了煤层底板断裂构造突水时间弱化效应的概念,较好地刻画了深部煤层在高岩溶水压作用、并在其底板沉积有大厚度隔水岩体条件下,滞后突水的形成机理。P. A. Cundall 在分析和吸收前人研究成果的基础上^[76-77],采用现场地应力实测、室内不同含水量情况下的断裂带物质的单轴、三轴常规和流变岩石力学试验和弹塑性的三维可视化数值仿真模拟等研究技术路线。尹尚先、武强^[78]对开滦赵各庄矿 13 水平首采区安全回采方案进行评价,分析研究煤层底板断裂构造滞后突水的机理

尹尚先等^[78-80]按照与采煤工作面或者巷道的位置关系,将陷落柱突水模式分为顶底部突水模式和侧壁突水模式 2 种模式,以及薄板理论子模式、剪切破坏理论子模式、厚壁筒突水子模式和压裂突水子模式等 4 种子模式。D. T. Snow 等借鉴裂隙介质的渗流规律^[81-85],建立了范各庄矿井地下水系统广义三重介质渗流模型,采用 FLAC^{3D} 模拟分析了陷落柱影响下采煤工作面推进的全过程。陷落柱的存在使底板的应力应变分布极不均匀,陷落柱顶面上方岩层的应变较大,与周围不协调,容易产生局部剪切变形;陷落柱边壁、工作面底板压缩区与膨胀区的分界线重合在一条线上时,是剪切破坏的最佳状态,最容易发生底鼓突水。陷落柱影响下的底板破坏深度为 15~18 m。

以上提出的几种突水判据及理论在不同时期不同程度上为防治煤矿底板突水起到了积极的指导作用。但不可否认的是上述研究存在着明显的缺点:一是未考虑岩层中裂隙对岩体整体强度和导水性的影响;二是将底板岩层与水分开来研究,较少考虑岩体与水的相互作用;三是断层作为煤层突水的主要因素,始终未对其进行较为全面系统的研究。底板突水是在特定的地质结构、地下水、原岩应力及采掘作用下发生的一项岩石水力学问题,而不仅仅是单纯的水文地质问题。因此,解决煤层底板突水问题应在考虑原岩应力、地质构造、地下水、采动影响等因素基础上,从应力场和渗流场共同作用的角度出发,研究底板采场岩体系统的变形与破坏,特别是控制底板岩层变形与渗透性的变化,将会给底板突水的研究带来更为吻合实际的解答^[72]。

1.2.2 底板突水模拟实验研究现状

1.2.2.1 相似材料模拟

相似材料模拟用于研究矿压现象的较多,用于研究底板突水的较少。20 世纪

70 年代末,原苏联学者采用相似材料立体模型对煤层开采后底板岩层的变形过程进行了研究^[45]。原山东矿业学院特采所李白英、张文泉等进行了室内相似材料模拟^[30,135],得到了顶、底板内应力分布及变形特征等,对断层带附近的应力分布及断层在采动过程中的活动性进行了研究,得出煤柱宽度大于某一临界值时,开采对断层不产生影响的结论。

1.2.2.2 数值模拟

李昂等采用岩石损伤破裂过程渗流与应力耦合分析系统,对渗流场与应力场耦合作用下的澄合矿区某矿 5 号煤层底板采动与渗流影响进行了模拟计算研究,得出了煤层底板隔水层的采动破坏特征、应力分布规律及渗流特征^[63]。

李昂采用大型有限元分析软件(FLAC^{3D})对不同采宽和埋深下的工作面底板采动破坏演化规律进行数值模拟分析,得出底板采动破坏深度随着不同的采面走向长度和埋深变化规律;然后以澄合矿区太原组 5 号煤层为开采背景,运用 FLAC^{3D}分析软件分别建立不同工作面采宽(20~200 m)和煤层埋深(100~650 m)条件下的数值计算分析模型,得到不同参数对应的底板破坏深度最大值,并运用 Matlab 软件拟合分析手段得出澄合矿区 5 号煤层在双因素(埋深、采宽)条件下适合澄合矿区 5 号煤层工作面的临界宽度模拟计算新的拟合公式,所得结果为今后带压开采澄合矿区太原组 5 号煤层底板破坏深度取值提供科学指导和经验参考^[87]。

李昂等针对董家河煤矿 5 号煤层开采引起的底板采动破坏深度开展相关研究,以该矿的 507 综采工作面开采为工程背景,采用理论分析和数值模拟相结合的办法,动态再现了整个底板岩层渐进破坏过程,所得结果为安全开采提供了可靠的技术数据;并由试验结果得出了该矿底板岩层破坏深度与工作面斜长和埋深关系的经验公式^[88]。

此外,肖洪天等对周期来压时不同工作面长度对底板的影响进行三维电算数值模拟^[89]。任德惠等对开采煤层底板进行了有限元分析^[90],凌荣华、许学汉等通过对底板岩层的三维应力数值模拟,分析了底板岩层的采动效应,总结出底板应力变化的一系列规律^[15]。

这些底板突水机理的学说和理论都在底板突水预测预报中得到不同程度的应用,对承压水上带压开采起到了重要的指导作用。

1.2.3 岩体渗流与应力耦合理论研究现状

流固耦合力学是一门力学边缘分支,是流体力学与固体力学二者相互交叉渗透而形成的。它的研究对象是固体在流场作用下的各种行为以及固体变形或运动对流场的影响。流固耦合力学的重要特征是两相介质之间相互作用:固体在流体动载荷作用下产生变形或运动,而固体的变形或运动又反过来影响流场,从而改变流体载荷的分布和大小。

地下流固耦合理论的研究方法主要包括细观尺度水平上的微观研究方法和以连续介质概念为基础的宏观研究方法。前者更侧重于对耦合作用机制研究,后者则借助表观唯象方法^[91],将微观无规则孔隙流动均匀化为宏观连续的渗流场,把固相介质场域和流体孔隙场域处理为相互覆盖的双重数学场,引入表征单元体 REV 概念来刻画场的宏观性质及参数变化。渗流场和固相介质场之间作用则由 K. Terzaghi 有效应力公式来体现^[92]。

根据岩土体的固有性质,从多孔介质和裂隙介质的渗流应力耦合理论两个方面,阐述岩体渗流应力耦合理论的研究现状和进展。

1.2.3.1 多孔介质渗流应力耦合理论

多孔介质的渗流应力耦合模型,是以多孔介质中的流体力学和连续介质力学为基础,建立双场耦合的数学模型。

岩土体渗流场与应力场耦合理论最初由多孔介质的力学特征描述^[93-94]。K. Terzaghi 首次提出饱和土体的有效应力原理,建立了饱和土体一维固结理论。Biot 根据弹性理论提出真三维固结理论,并成功解释了 Mandelwe-Cryer 效应。Verruijt 进一步发展了多相饱和渗流与孔隙介质耦合的理论模型。国外学者^[96]以线性多孔弹性介质方程为基础,引入两个无量纲参数表述渗流应力耦合效应。

在国内,沈珠江首次把 Biot 固结理论的有限元法应用于固结分析。殷宗泽等根据流量平衡的概念推导出 Biot 固结理论的连续性方程。王媛针对以上问题,提出了四自由度全耦合分析方法,其基本思路是:将裂隙岩体渗流场和应力场作为同一场进行考虑,联立裂隙岩体满足的渗流方程和应力方程,建立起同时以结点位移和节点渗流水压力为未知量的耦合有限元方程组,通过求解方程组,同时得到应力场和渗流场,这样避免了两个场之间的迭代。

李培超等^[95]引入基于多孔介质的有效应力原理,建立孔隙度和渗透率动态模型,提出饱和多孔介质流固耦合渗流的数学模型。

1.2.3.2 裂隙介质渗流应力耦合理论

煤层底板突水实质上是岩体水力学问题,它是在构造地应力、上覆荷载和人为干扰的条件下发生的。因此,它是渗流场和应力场耦合作用的结果,该问题可以用岩体水力学的理论加以解决。岩体水力学是一门始于 20 世纪 60 年代末的新兴学科,自 1968 年 D. T. Snow 等^[96-97]通过实验发现平行裂隙中渗透系数的立方定律以后,人们对裂隙流的认识才从多孔介质流中转变过来。

近年来,国内外有不少学者进行了广泛的实验和理论研究。所做的工作主要有:对单一裂隙渗流应力耦合进行机理性研究,这方面主要是从实验入手,总结单一裂隙在应力作用下的理论模型,提出各种经验公式和间接公式;提出各种不同的渗流应力耦合模型并进行相应的数值理论分析,同时用于工程实践。主要在如下几方面:

陶振宇等以 Louls 的经验公式为基础对岩体渗流与应力进行耦合分析以研究