

国家自然科学基金 (51109124, 51379119, 41472281) 资助

高等学校博士学科点专项科研基金 (20113718120009) 资助

中国博士后科学基金 (20090461257) 资助

煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金 (JYBSYS2014106) 资助

山东科技大学学术著作出版基金资助

矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室项目资助

基于采动诱发断层活化规律的 断层防水煤柱留设研究及应用

张培森 张文泉 颜 伟 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(51109124,51379119,41472201)资助

高等学校博士学科点专项科研基金(20113718120009)资助

中国博士后科学基金(20090461257)资助

煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金(JYBSYS2014106)资助

山东科技大学学术著作出版基金资助

矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室项目资助

基于采动诱发断层活化规律的 断层防水煤柱留设研究及应用

张培森 张文泉 颜 伟 著

中国矿业大学出版社

内 容 简 介

本书共分为八章,主要包括采动工作面围岩应力及运动规律研究、断层带的力学性质及活化突水机理研究、断层探测及其富水导水性研究、断层突水的固液两相相似材料模拟试验、断层突水危险性的流固耦合模拟研究和断层防水煤柱合理留设。

本书涉及知识面较广,内容丰富翔实,是作者近年来一直在此领域潜心研究的结晶,也是国内又一本关于采动诱发断层活化突水方面的理论研究专著,可供采矿、土木、水利、工程力学等学科的广大科技工作者及相关专业的高校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

基于采动诱发断层活化规律的断层防水煤柱留设研究
及应用 / 张培森, 张文泉, 颜伟著. —徐州: 中国矿业大学
出版社, 2015. 3

ISBN 978 - 7 - 5646 - 2635 - 8

I. ①基… II. ①张… ②张… ③颜… III. ①断裂带
—煤矿开采—防水煤柱—研究 IV. ①TD744

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 045485 号

书 名 基于采动诱发断层活化规律的断层防水煤柱留设研究及应用
著 者 张培森 张文泉 颜 伟
责任编辑 马晓彦 于世连
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 11.25 字数 281 千字
版次印次 2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷
定 价 46.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)

前 言

从过去煤矿底板突水事故中的水文地质结构资料和突水原因分析中可以看出,煤矿采场工作面底板突水事故中,80%左右的事故是发生在有断裂等构造的破裂底板中。破裂底板中的结构面削弱了底板的力学强度,在煤炭井下断裂带开采过程中,常常由于采动引起断裂带附近顶、底板岩体变形和破坏。在采动影响下,原岩应力重新分布,在支承压力的作用下,断层上、下盘相互错动,使得断层面上的胶结物被“剪开”,断层上、下盘呈断开状态,断层活化。对于非导水断层而言,断层“活化”使得非导水断层转化为导水断层,承压水通过活化断层与底板破坏区逐步沟通,并随着采空区应力的释放,承压水通过破坏的岩石裂隙进入工作面,造成突水事故。

断层不仅改变了岩体的力学性质,降低了其强度指标和变形模量,同时也严重影响岩体的渗透性质。断层中的水不仅与断层中岩体发生物理、化学等方面的作用,而且由于断层中水压的变化会引起岩体应力分布的改变,而岩体应力的改变又会引起岩体中孔隙的变化,从而反过来又改变地下水流量与水压力。正确认识和分析采动过程中底板断层活化和突水的力学机理,采取有效手段,合理确定断层防水煤柱、开采方法和回采工艺,不仅关系到矿井的生产安全和经济效益,也关系到煤炭资源回收、矿区水资源保护和煤炭工业的可持续发展。

本书涉及知识面较广,内容丰富翔实,是作者近年来一直在此领域潜心研究的结晶,也是国内又一本关于采动诱发断层活化突水方面的理论研究专著,可供采矿、土木、水利、工程力学等学科的广大科技工作者及相关专业的高校师生、研究生参考。

本书出版获得了国家自然科学基金(51109124,51379119,41472281)、高等学校博士学科点专项科研基金(20113718120009)、中国博士后科学基金(20090461257)、煤矿安全高效开采省部共建教育部重点实验室开放基金(JYB-SYS2014106)、山东科技大学学术著作出版基金及矿山灾害预防控制省部共建国家重点实验室项目的资助。

在项目研究及实施过程中,有幸得到了皖北煤电集团有限责任公司吴玉华总工程师、赵开全总工程师、段中稳副处长,安徽卧龙湖煤矿有限责任公司焦殿志总工程师,安徽五沟煤矿有限责任公司李建矿长、杨耀文总工程师、阳华副总

工程师、吴俊松高级工程师、解健科长、刘小军工程师、刘四方工程师等的大力支持和帮助,且各位专家在试验方案设计时提出了指导性的设计思路和建议。

在现场资料收集、试样制作及工程试验及实践过程中,得到了安徽五沟煤矿有限责任公司、安徽卧龙湖煤矿有限责任公司及兖州煤业股份有限公司杨村煤矿等单位和工程技术人员的大力帮助。

在本书编写过程中,有幸得到了山东科技大学林东才教授、陈绍杰副教授等的大力支持与帮助;研究生杨健、赵凯、王明辉、王浩、阚忠辉、陈阳洋、赵仕钧、苗旺、李凯等做了大量的现场资料收集、文字及图表处理等工作。

借本书出版之际,作者对以上各位专家、老师及朋友们对本项研究及本书出版的指导、支持和帮助表示衷心感谢!在本书写作过程中,参考了大量相关文献资料,由于资料来源广,难以一一予以注明和查实,请相关作者给予谅解,并致以诚挚的谢意!

限于作者的研究水平和条件,书中难免存在不足之处,真诚期望同行专家及阅读本书的读者不吝赐教,提出宝贵的批评与建议。

著 者

2015 年 01 月

目 录

1 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 研究现状	1
1.3 相关研究存在的问题	6
1.4 主要研究内容	7
2 采动工作面围岩应力及运动规律研究	9
2.1 采动覆岩裂隙发育规律研究	9
2.2 煤层底板岩体应力应变规律分析	17
2.3 本章小结	27
3 断层带的力学性质及活化突水机理研究	28
3.1 断层带的力学性质及水文地质特征	28
3.2 断层带突水的影响因素	33
3.3 采场底板断层活化机理的力学研究	40
3.4 本章小结	45
4 断层探测及其富水导水性研究	46
4.1 研究区域地质条件概况	46
4.2 主要研究断层的地质特征	56
4.3 断层富水导水性的试验研究	82
4.4 本章小结	97
5 断层突水的固液两相相似材料模拟试验	98
5.1 相似理论	98
5.2 试验目的	98
5.3 相似模型试验设计	99
5.4 试验结果分析	106
5.5 本章小节	112
6 断层突水危险性的流固耦合模拟研究	113
6.1 数值模拟软件简介与计算原理	113
6.2 双场耦合条件下不同断层防水煤柱的模拟分析	121

6.3 本章小节	159
7 断层防水煤柱合理留设	161
7.1 各断层防水煤柱宽度理论计算	161
7.2 断层防水煤柱合理宽度的综合确定	165
8 结论	167
参考文献	169

1 绪 论

1.1 研究背景

我国是世界上煤炭储量最丰富的国家之一,但是灰岩岩溶分布广,大约 60% 的煤矿不同程度地受底板承压水的威胁,受水害威胁的面积和严重程度均居世界各主要采煤国家的首位。根据新中国成立之后的资料统计,从 1955~1985 年的 30 年里,共发生淹井事故 218 次,突水事故 769 次。在过去的 20 年里,约有 250 个矿井发生突水淹井事故,造成的经济损失达 350 多亿元。进入 21 世纪之后,我国煤矿的水害形势更加严峻,据报道资料的不完全统计:2000 年,我国突水事故 2 起;截至 2010 年 11 月已经发生 17 起;2006~2008 年,共发生突水事故 86 起。2011 年以来,全国煤矿重大水害事故占煤矿重大事故起数和死亡人数的 44.4% 和 45.7%,水害防治形势严峻。资料统计分析表明:煤矿突水事故大约 80% 都和断层有关,而断层突水不仅仅是一个复杂的力学问题,还与断层自身的性质、承压水的水压值以及断层的落差等因素有关。因此,承压水上进行采矿作业,其断层突水问题应该是在采动条件下,围岩的岩性、结构(断层和裂隙)和地质环境(区域构造场、渗流场、温度场、水理作用场等)综合作用的结果。断层在矿压和承压水水压的共同作用下发生断层活化,使得断层带以及两盘靠近断层的部位产生新的裂隙,原有的裂隙进一步扩大,最后形成突水通道,为工作面突水提供了重要的条件。因此,研究断层活化程度与矿压、水压的关系,以此来确定安全的断层保护煤柱留设宽度,具有重要的理论意义和实用价值。

从力学理论的角度分析,破裂底板中的结构面削弱了底板的力学强度,在煤炭开采过程中,常常由于采动引起断裂带附近顶、底板岩体变形和破坏。而大量工程实例又表明,在原始地质条件下断层与含水层直接沟通,构成导水断层的突水事故比例较小,绝大多数是原始地质条件下的非导水断层,在采动影响下发生突水,即断层的活化。许多矿井即使开挖前采取了超前探水措施,确已摸清断层导水性,仍常常不能避免这类突水事故的发生。

解决断层突水问题的传统方法就是留设一定宽度的防水煤柱,保证工作面的安全回采。那么预留断层防水煤柱是否合理? 应该留多少是安全、合理的? 开采后对断层透水性影响如何? 受断层影响煤层与对盘太灰及奥灰邻近工作面如何布置或工作面内断层如何处理? 应采取何种关键的技术对策? 这些问题成为许多有突水威胁的矿井理论上和技术上亟待解决的技术难题之一。综合国内外断层突水的研究现状,展开对采动诱发断层活化突水规律的研究,确定防水煤柱合理留设具有重大意义。

1.2 研究现状

断层突水问题一直以来都是我国煤炭生产过程中要面对的难题,不仅在我国,断层突水

问题同样存在于匈牙利、波兰、西班牙等国,对断层突水机理以及防水煤柱留设的研究,国内外学者都进行了一些理论与试验研究。下面从断层突水机理的理论研究、断层突水相似试验和数值模拟研究以及断层防水煤柱留设的力学解析等方面对其成果作一一评述。

1.2.1 断层突水理论研究的现状

断层的类型有三种划分方式:按照导水性能可将断层划分为导水断层和不导水断层;根据力学特征可将断层划分为压剪断层和张性断层;依据断层上、下盘的运动关系将断层划分为正断层、逆断层和平推断层等。根据突水点与断层空间位置关系可以将采动断层突水类型划分为断层切穿煤层突水、断层接近煤层突水和断层隐伏较远突水三种类型。

学者们大多是利用矿压理论、岩体力学等探讨了断层突水机理,得出了一些有价值的结论和成果。

Galybin 研究了二维弹性问题,认为在煤层开采后当满足莫尔库伦准则时,可求出断层滑动增长量,推测出断层局部的滑动位移可能会较大。

Kim 等在研究断层带长度与位移量之间的关系时,认为位移的最大量与断层带的长度之间存在如下关系: $d_{\max} = CL^n$ 。

Donnelly 对开采引起的断层活化现象进行了研究,并讨论了在煤田开采范围内断层带的不同岩性对开采引起的地面沉降的延迟速度的作用。

Shi. L、杨善安等以矿山压力为基础,分析了断层产状及要素与突水的关系,认为断层面倾向采空区侧时容易发生突水事故,特别是当断层倾角同最大膨胀线相吻合时,突水最容易发生。

黎良杰等把断层分为张开型断层与闭合型断层,认为张开型断层会在承压水作用下产生张开位移,并且对断层带进行渗透冲刷,最后形成导水通道,发生突水;而闭合型断层会使两盘岩层接触部产生挤压破坏,并认为闭合型断层可能在采动影响下转化为张开型断层。

张金才等认为:一是断层是否导水与断层的力学性质有关,正断层比逆断层更容易造成工作面突水;二是工作面遇断层是否发生突水与断层的位置有关系(当采动裂隙与工作面中断层的走向重合或平行时,最容易发生底板突水);三是底板是否突水与断层倾向和工作面推进方向有关,当断层走向平行于工作面而工作面的推进方向与断层倾向相反时,底板易发生突水。

刘燕学探讨了断层带导水的相关因素,通过分析认为在相同的地质条件下,断裂破坏带突水的可能性较正常岩层突水可能性显著提高。

杨新安将断层突水分为大断层突水与小断层破碎带突水,并分析了各自的突水机理。

韩爱民等认为断层两盘岩性,断层的力学性质、时代、规模,断层破碎带特点以及地下径流特征等都是影响断层涌水的因素,张性或张扭性断层更加容易发生涌水;发生在脆性岩石中的断层以及新构造断裂生成的断层更易涌水。

邱秀梅等从断层突水的临界特性方面研究断层突水,利用重整化群方法研究了断层破坏破裂的随机性和关联性,认为当破坏率大于临界破坏率时,本来随机性分布的裂隙逐渐向某一个吸引域集中,并且裂隙之间开始贯通,最后形成导水通道,造成断层突水。

周瑞光等研究断层突水的时效特征,把突水分为瞬时突水和时效突水,提出了突水潜能和防突水潜能的新概念。

李晓昭等提出断层带采动过程中应力传播的“屏障”,会造成应力和变形强烈积聚,使得断层带内产生张性裂隙,最终导致地下水的透入;还提出了断层采动活化与导水的时空效应问题,认为断层采动附加应力、断层活化裂隙扩展以及承压水导升三者之间有时间关系,工作面的推进速度是控制这三者时间关系的关键因素。

彭苏萍等认为突水事故很容易在下列情况中发生:一是导水断层切割底板隔水岩层;二是不导水断层切割底板隔水岩层,但是断层带会受到承压水扩展效应的影响,这种破坏向上扩展并与采动破坏相沟通;三是断层切割底板岩层,但是不受水压扩展效应的影响,由于底板隔水岩层厚度变小,采动破坏与水压破坏更容易相互连通。

朱传峰通过对童亭煤矿 F10 断层涌水和无水两种现象的分析,认为断层两盘均为软岩层或软岩层与硬岩层接触,该断层表现为隔水;若两盘均为硬岩层接触,则该断层表现为导水。

管恩太通过对演马庄煤矿历次断层突水事故的分析,认为断层构造是其突水的主控因素,并分析了它在导水、贮水、缩短煤层与含水层之间的距离等突水因素中所起的作用。

张培森根据弹塑性理论求解了底板岩体在采动条件下的应力场及最大破坏深度,进而采用 FLAC3D 固液耦合模式对采场煤层底板的应力状态及岩层运动规律进行模拟分析,得到了一些有价值的结论。

1.2.2 数值模拟与相似试验在断层研究中的应用现状

谭志祥等运用有限元模拟在中硬覆岩条件下断层对导水裂隙发育情况的影响,研究认为由断层上盘向下盘方向推进时,比反向推进产生的裂隙带(下文又称断裂带或裂缝带)高度增长率大;重复采动条件下,断层引起导水裂隙带高度增长率比初次采动条件下减小一半以上。

李志华等利用数值模拟方法对采动影响下的断层冲击矿压进行研究,提出当工作面由断层下盘向断层方向推进时,工作面支承压力峰值均比没有断层影响时的高,但当工作面由断层上盘向断层方向推进时,断层倾角为 30° 时,工作面支承压力峰值会比没有断层影响时的低;认为断层强度、断层落差对工作面应力峰值影响很小,但会随着老顶(又称基本顶)厚度的增加先增大后减小,随着老顶强度的增大先迅速增大,最后基本保持不变。

武强等在模拟煤层开采时,研究底板的突水情况,提出了煤层底板突水时间弱化效应的新概念并分析了影响时间弱化效应的主要因素,较好地解释了断层滞后突水的形成机理。

李晓昭等研究断层带对采动应力的传递和围岩变形的屏障作用,分析了不同的地质和工程因素对屏障作用的影响。

卢兴利等通过建立二维有限元模型,对断层合理保护煤柱宽度进行数值模拟,研究不同断层保护煤柱下煤层顶板支承压力分布规律,认为:煤层顶板的支承压力随着工作面的推进,应力趋势线也向前移动;断层保护煤柱越短,煤层顶板支承压力峰值越大,更加容易影响到断层的稳定,并提出上盘所需的最小断层保护煤柱大于下盘,而且上盘煤层的开采与断层保护煤柱的留设对下盘煤层开采有较大的影响。

卜万奎采用 RFPA2D-Flow 软件分析了采场向断层接近的过程中底板断层活化特征和渗流变化特征,认为小倾角正断层、大落差的断层及含水层中水压相对较大时,则应留设较宽的防水煤柱。

Islam 等运用边界单元法,根据库伦准则对煤层开采引起的断层活化进行研究,提出断层破碎带应力的重新分布和围岩的变形在很大程度上受到断层岩性的影响。

Y. H. Hao 等运用离散元方法模拟了在不同断层参数的情况下,采动对围岩稳定性的影响,通过试验模拟得出了断层参数、最大位移量以及塑性变形区域之间的关系。

李连崇等通过对含断层的煤层底板的导水通道的形成进行仿真分析,提出无论是导水断层还是非导水断层,其导水通道的形成机制都是在水压的作用下形成岩层裂隙的复杂演化过程的观点;认为断层倾角越小,以及断层断距的加大,都会使断层突水更加容易发生。

贾晓亮在断层的数据模拟研究中,认为断层端部应力主要集中在断层的端部两侧,其应力大小主要受断层内摩擦角和边界应力比的影响。另外,在断层的数据模拟研究中得出断层倾角的一个临界值(45°),认为倾角小于临界值时,应力集中程度随倾角的增大而增大,否则,随倾角的增大而减小,提出了在煤层开采前,对于正断层而言,断层倾角越大,断层面上所受到的剪应力和法向应力也随之变大;煤层开采后,由于断层的活化,其顶底板剪应力均增大,且底板的剪应力变化幅度较顶板变化幅度略大。

郑少河等认为承压水上采煤是应力场和渗流场的问题,利用有限元流固耦合方法进行分析,提出先开采上盘后开采下盘是相对安全的。崔芳鹏等在对断层防水煤(岩)柱安全宽度的分析中,运用经验公式和数值模拟计算方法,得出了合理的煤(岩)柱宽度,发现随着工作面向断层的推进,断层面上位移越来越大,当达到临界防水煤柱值时,岩层破坏的垂直方向的位移将发展到断层面上;提出断层防水煤(岩)柱的留设计算实质是应力—渗流耦合的问题,而不是单纯的水文地质问题。张均峰等利用有限元数值模拟进行流固耦合分析,研究了存在断层时,断层突水的机理和可能的突水点位置,认为当断层为正断层时,如果发生突水,大多发生的是断层破坏型突水;提出防水煤柱的宽度应随断层断距和倾角的增大而增大。

张培森以五沟煤矿 F16 断层的地质条件为背景,采用三维有限差分数值软件 FLAC3D 的固液耦合模式,对断层倾角、断层破碎带宽度及承压水水压不同时,在断层上盘煤层开采过程中断层界面滑移量的变化规律进行了分析。研究得出:断层界面同一标高处的垂向滑移量随断层倾角、断层破碎带宽度及含水层水压的增大而增大;断层界面的垂向滑移量越大,突水危险性越大。

张培森运用数值模拟方法,通过改变断层倾角的大小、断层破碎带厚度以及含水层水压对固液耦合模式下采动诱发断层界面应力变化规律进行了模拟研究,揭示了不同工况条件下断层活化突水的影响规律。模拟结果表明:在相同工况条件下,断层的上盘断层界面所受的正应力及剪应力皆大于下盘断层界面所受的相应应力;在工作面推进相同步距时,断层界面所承受的正应力随断层倾角增大而减小,剪应力在倾角为一定范围内随之增大而增大,但当倾角超过一定角度后剪应力又随之增大而减小;随断层破碎带宽度增加,断层盘界面所受的正应力越大,而剪应力越小;断层界面所承受的正应力及剪应力皆随含水层水压的增加而增加,且水压越大,断层突水危险性就越大。

杨映涛在利用相似模拟试验研究底板突水机理时,得出了在底板有断层时,突水的可能性与断层的位置和角度有关的结论。原苏联学者 A. A. Bopncob 使用相似模拟试验,研究每层开采后底板岩层的变形过程。

唐东旗利用相似材料模拟试验,研究煤层在开采条件下断层带两侧岩体的变化情况和断层下盘含水层的突水可能性,确定各层煤柱宽度。

张培森及杨健以五沟煤矿 F16 断层地质条件为背景,采用相似材料模拟试验,在固液两相相似的基础上研究临近断层时采动对煤层顶、底板以及工作面前方煤柱的塑性破坏规律以及断层的活化突水规律。研究结果表明:由于断层带具有“屏障”作用,在煤柱的顶板和底板形成更高的集中应力;底板岩层渗透率越大,底板突水的危险性越大;在相同的煤柱宽度时,含水层水压越大,突水危险性越大。

周钢等采用相似模拟方法,通过改变上、下盘的开采顺序、推进方向以及煤柱尺寸,来研究它们对断层导水危险性的影响。

彭苏萍等在研究断层对顶板稳定性影响时,借助相似模拟试验的方法提出了在采动影响下的断层“活化”;岩体破碎,断层下盘顶板稳定性更差,靠近断层面附近最易冒顶,认为当工作面通过断层后,顶板岩体中支承压力的峰值减小,甚至比无断层存在情况下的数值还要低。

1.2.3 断层保护煤柱留设的力学解析法研究现状

许多国家在采矿安全规程中都对防水煤柱的最小宽度(20~100 m,甚至更大)作了具体的规定,此规定考虑了采煤地质条件、水文地质条件及采矿技术条件等因素。印度关于防水煤柱最小宽度的规定是:在所有方向上,作业场与水源都要保持 60 m 的距离。

波兰在安全开采有关规程中规定,在含水层下的煤层露头处所留设安全煤(岩)柱的高度应为开采煤层厚度的 8 倍,规定煤(岩)柱的最小垂直厚度为 20 m。

原苏联学者 B. 斯列萨列夫以静力学理论为基础,将煤层底板视为两端固定、受均布载荷作用的梁,并结合强度理论推导出底板安全水压值的计算公式。匈牙利和南斯拉夫等学者提出了相对隔水层厚度的概念,将不同岩性的岩层换算成泥岩的厚度,以此作为承压水上煤层开采底板是否突水的标准。

我国学者们结合现场经验和断层突水案例对断层突水机理进行了长期的研究,在断层防水煤柱留设方面做了大量的研究工作,并取得了丰硕的成果和经验。

营志杰通过对大断层留煤柱问题的研究,根据煤柱的变形特征,将煤柱划分为断层裂隙带、弹性核和屈服带,认为弹性核具有较强的隔水性,煤柱留设时,要在断层裂隙带和屈服带中间保留一定宽度的弹性核,防止构造裂隙和采动产生的裂隙相互沟通导水;并给出了煤柱留设宽度的计算公式。

谭志祥利用岩石的极限平衡理论,推导出在受断层影响时底板破坏的极限水压公式,并给出了底板及断层附近的突水判据。

彭文庆等在针对断层不同倾角防水煤柱留设的研究时,综合考虑煤柱受矿压和水压共同作用,以及煤柱一侧开采后,由采动影响而形成的顶、底板导水裂隙带的高度和深度与断层以及含水层的位置关系之后,运用库伦准则推导出断层倾角临界值,并且推导和分析出了断层倾角较大和较小时的防水煤柱宽度的计算公式。

张文泉以矿井突水灾害的动态机理为基础,确定了突水综合判据,并利用 VB 语言实现了矿井底板突水判测和预报的程序化。

施龙青等在研究采场底板断层防水煤柱留设宽度时,将采场附近煤体划分为弹性区和非弹性区,认为弹性区具有隔水性能,并且根据采场支承压力的分布特征推导出非弹性区范围的计算公式,利用 2D- σ 有限元程序分析了采场底板应力的分布情况,通过对断层突水机

理的分析以及突水条件的判断,推导出采场断层防水煤柱留设计算公式,最后提出断层防水煤柱的留设不仅要考虑断层自身的性质,还应考虑矿山压力的作用。

刘洋等在研究断层上盘防水煤柱留设中,认为断层防水煤柱沿宽度方向分别受矿山压力、断层形成过程中的构造应力和水压力等共同作用,从工作面到断层之间的煤柱形成了3种不同的物性状态,并且分别从矿山压力和断层构造应力两个方面对保护煤柱的破坏和影响进行分析,得出了断层倾角较大或较小时对防水煤柱设计的影响,并推导出断层倾角不同时防水煤柱的计算方法。

黄存捍等在研究断层对底板隔水层稳定性的影响时,根据岩石力学理论和库仑准则,在岩石剪切破坏的极限平衡条件下,推导出隔水层破坏的临界水压力公式和底板突水的判断依据,并以此公式为基础,分析了断层倾角、内聚力和断层煤柱宽度对底板隔水层破坏的影响规律,认为断层倾角越小,断层带内聚力越小,从而使底板临界水压力随之减小,此时底板发生突水的可能性越大;而断层煤柱留设宽度越大,底板越不容易发生突水。

李常文等对采动和承压水作用下断层突水的关键路径进行分析,针对导水断层缩短了煤层和含水层距离的特点,建立了断层突水的关键路径力学模型,并利用极限平衡理论推导出了有效隔水层所能承受的极限水压的计算公式,以及不同倾角断层的保护煤柱计算公式,最后基于尖点突变理论得出了断层突水的充要条件的判断公式。

朱刘娟等在研究深部开采条件下岩层移动角时指出,《煤矿安全规程》中给出的移动角,只是简单地在浅部开采条件下规定一个移动角参数,在进行深部开采时,其移动角不为定值,不能使用《煤矿安全规程》中给出的移动角作为留设保护煤柱时的参数,同时给出了深部开采中移动角的计算公式。王其芳在研究断层保护煤柱留设方法时,分析了断层对开采沉陷规律的影响,认为采用移动角作为计算留设断层保护煤柱的参数,常常会出现异常现象,提出应以开采引起的地表移动变形边界角代替移动角,或者是选用边界角与移动角的平均值来计算保护煤柱宽度。

白峰青等在分析断层防水煤柱留设合理宽度时引入可靠度方法,并且结合实际案例给出了断层煤柱设计的可靠度方法的思路。杜文堂采用可靠度分析的“JC”法,建立极限状态方程,并将可靠度分析结果与安全系数及事故的死亡率进行了对比,认为防水煤柱的失效概率在 $10^{-5} \sim 10^{-6}$ 比较合适。

1.3 相关研究存在的问题

目前对底板岩层应力场及变形破坏特征的研究,无论从理论上还是现场观测与室内模拟等方面,均做了大量工作,取得了很大进展,对承压水上采煤起到了重要的指导作用。但由于采场地质条件的复杂性,煤层底板岩体应力场及变形破坏特征的研究还处在不很完善的阶段,现有的研究成果与实际需要还相差很远,尚有众多的理论和实际问题需要人们进一步更全面、更深入地研究、总结、完善。这主要表现在以下几个方面:

(1) 在底板变形破坏特征研究上,忽视了地下水对底板隔水岩层的破坏作用,对水压对底板岩层阻水性能的影响作用认识不足,只是将水压也作为一种均布载荷,在模拟计算时把水压作为一个定值来对待,而不是随岩体的变形而变化,即不是以固液耦合的方式,因而不符合客观实际。对水、岩石及软弱岩石的软化作用、对裂隙介质岩体的力学作用和对突水通

道的冲刷扩径作用重视程度不够,没有充分体现出采动矿压来压时的动态作用效果以及水压在采动过程中递进破坏作用和在突水通道形成过程中的重要作用。“下三带”理论认识到采动矿压影响下的采动破坏带和水压影响下的承压水导高带,但对采动矿压来压时的动态作用效果以及水压在突水通道形成过程中的重要作用、发育规律未作详细研究。底板隔水层在采动矿压与水压共同影响下的破坏,尤其是失稳破坏对底板突水具有决定性的作用,不研究采动矿压与水压共同影响,就无法认识底板隔水层失稳破坏的力学机制,就不能全面准确地认识底板岩层应力场、变形破坏特征及其阻水性能。

(2) 对底板岩层的不同岩性组合特征、覆岩岩层的不同岩性组合特征、采动覆岩运动来压特点及其对底板变形破坏特征的影响缺乏研究。底板隔水层一般是由多种岩性层组成的,这些不同的岩性层不仅力学强度差异较大,而且在覆岩岩层的不同岩性组合下覆岩运动来压和水压作用下的破坏机制也有很大区别。以往的研究多将注意力放在隔水层厚度及力学强度上,而对岩层本身特征、岩层结构特点、不同岩性层组合关系及矿压与水压共同作用的总体力学效应等方面缺乏总体上的研究。

(3) 以往的研究往往注重对矿山压力造成的断层发生活化的状况的分析,对断层受扰动后,其透水性的变化未进行深入探讨,也忽略了断层面附近的伴生裂隙活动对突水的影响,以及水压对裂隙面和断层面的水楔及高压水的冲刷扩径作用的研究。据统计,华北煤田80%以上的突水与断层有关,断层构造在采动作用影响下会重新活动,断层的重新活动使断层带及其附近的岩体中的伴生裂隙发生再扩展作用,致使其渗透性发生改变,同时高压水的渗透压力也会促使断层带透水能力增强,易于形成突水通道,从而影响底板岩层的应力场及变形破坏形态,原来的非导水断层可能转变为导水断层而发生突水。因此,对因采动而引起的底板应力场及承压水渗流场综合作用下底板岩层的破坏是研究底板岩层应力场及变形破坏形态特征的重要方面之一。

(4) 现有的孔隙体或裂隙岩体渗流理论中孔隙介质的模型都假定孔隙率和渗透系数是与时间无关的材料常数,无法描述采动岩体渗流突变现象。

因此,解决煤层底板断层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,系统全面地研究含断层构造的采动活化及突水问题;从应力场和渗流场耦合作用的角度出发,研究采动影响下底板断层活化特征、渗流变化特征,将会给底板断层活化突水的研究带来与实际更为吻合的解答,对解放受突水威胁煤层的开采具有十分重大的意义。

1.4 主要研究内容

本书主要研究内容包括:

(1) 研究在采动影响过程中工作面覆岩的裂隙发育和应力演化的一般规律,导水裂隙带高度的确定方法以及工作面底板应力分布规律。

(2) 分析地下水对岩体弱化的作用机理以及在水压和围岩压力作用下单一裂隙劈裂破坏的微观机理。

(3) 分析断层带充水特征、断层带导水性影响因素及采矿与断层导水或突水的关系。建立采场底板断层活化突水的力学模型,分析断层带围岩的剪应力分布特征。

(4) 结合现场实际情况,选取地质构造极其复杂的皖北煤电集团五沟煤矿进行试验研

究,对断层的地质特征和富导水性进行现场和实验室试验研究;分别在研究断层带进行了压水试验、水压致裂试验以及岩石渗透特性试验。

(5) 运用相似材料试验方法研究煤层在采动影响下,煤层顶、底板以及工作面前方煤柱的塑性破坏情况;留设不同宽度煤柱时,断层的活化程度以及断层发生突水的可能性;不同的含水层水压情况下,采动对断层的活化程度、对煤柱以及煤层顶底板破坏的影响程度;采动对承压水水压影响的变化规律。

(6) 利用有限差分模拟软件,建立底板断裂—渗流耦合计算模型,补充理论推导中未考虑的影响因素,对采动条件下煤层底板岩体应力状态及岩层运动规律作了进一步分析,研究煤层底板的应力状态及岩层移动随工作面推进的动态变化规律。

(7) 结合防水煤柱宽度计算公式及当前相关研究成果,对断层防水煤柱合理留设宽度进行理论计算,同时结合相似材料试验及相关数值模拟结果,综合确定断层防水煤柱的留设宽度。

2 采动工作面围岩应力及运动规律研究

2.1 采动覆岩裂隙发育规律研究

2.1.1 推进方向上覆岩发展的动态规律

1. 第一次断裂运动阶段(采场第一次来压阶段)

从工作面自切眼开始推进,到断裂拱中最上部一个“传递岩梁”第一次断裂运动完成成为第一次断裂运动阶段,如图 2.1 所示。

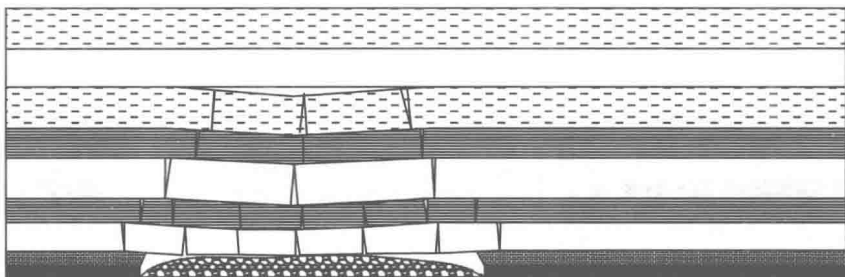


图 2.1 裂隙带覆岩第一次运动阶段

随着工作面的不断推进,覆岩运动范围逐渐扩大。采场上方的压力拱由小到大逐渐向上方岩层扩展。根据前人相关理论研究及模拟试验的结果,当工作面推进距离大约与工作面等长时,覆岩运动范围向上扩展到最高处,高度约为工作面长度的一半。在第一次断裂运动过程中,裂隙带中下位 1~2 个传递岩梁已完成了初次运动和数个周期运动。在此过程中,工作面的推进距离约等于工作面长度。

2. 正常运动阶段(周期来压阶段)

在第一次断裂运动阶段(工作面推进至接近工作面长度位置)之后直到采煤工作面推进结束的全部过程为工作面覆岩正常运动阶段,如图 2.2 所示。在正常运动阶段,压力拱不再向高处岩层扩展,覆岩运动范围的高度基本不再变化,仅是随工作面推进向前方扩展。

2.1.2 纵向上覆岩发展的动态规律

1. 采场顶板悬跨阶段

采场顶板悬跨阶段是指工作面从开切眼开始推进,到煤层上方第一层具有支托作用的岩层(即第一岩梁)第一次垮落为止,推进长度小于第一岩梁断裂步距。

2. 垮落带形成阶段

工作面继续向前推进,部分上覆岩层因采空失去了煤体支承,水平方向同时失去了力的

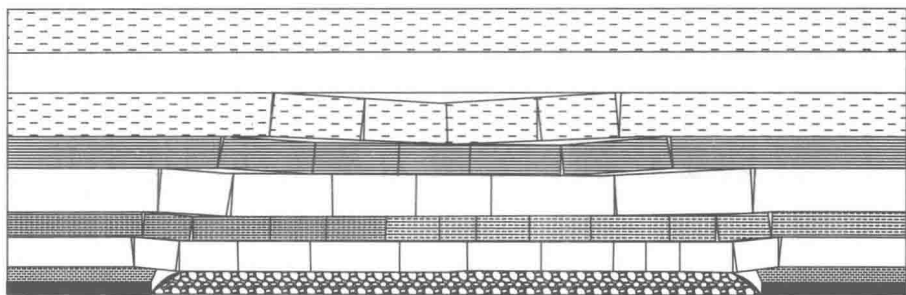


图 2.2 裂隙带覆岩正常运动阶段

传递,导致随工作面推进不断垮落。垮落带形成如图 2.3 所示。

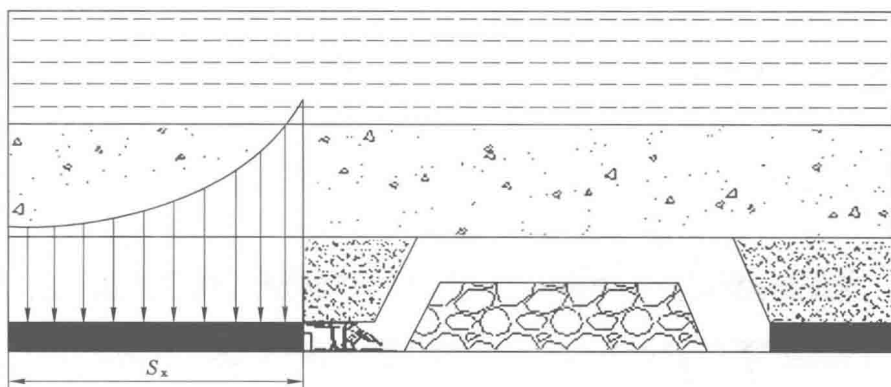


图 2.3 垮落带形成

3. 断裂带形成阶段

从断裂带下位岩梁第一次断裂开始到最上一层岩梁第一次运动结束为断裂带形成阶段。断裂带第一次断裂开始,随工作面推进,断裂带下位岩梁做周期性断裂,岩层的断裂逐渐向地表方向扩展,当工作面推进长度等于工作面面长时,断裂带发展趋于稳定,在工作面方向形成断裂拱结构,如图 2.4 所示。

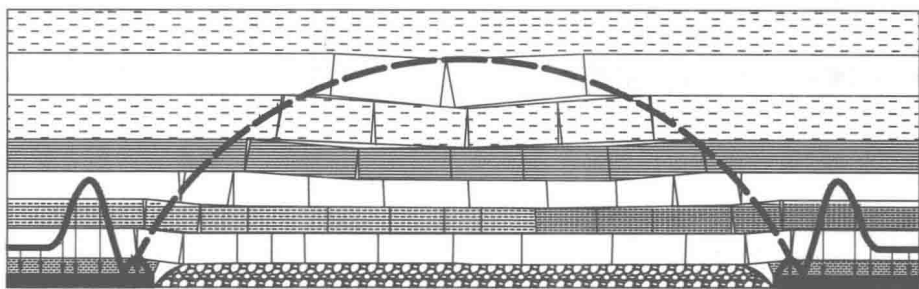


图 2.4 断裂拱结构