

国家自然科学基金资助 (41072212)

国家自然科学基金重点项目资助 (51034003)

长江学者和创新团队发展计划资助

山东省自然科学基金重点项目资助 (ZR2011EEZ002)

973 前期研究专项课题资助 (2011CB411906)

井田深部水文地质条件探查 技术及底板水动态监测

施龙青 魏久传 刘同彬 著
朱 鲁 翟培合 韩 进



煤炭工业出版社

科学基金资助(41072212)

基金重点项目资助(51034003)

长江学者和创新团队发展计划资助

山东省自然科学基金重点项目资助(ZR2011EEZ002)

973 前期研究专项课题资助(2011CB411906)

井田深部水文地质条件探查 技术及底板水动态监测

施龙青 魏久传 刘同彬 朱 鲁 翟培合 韩 进 著

煤炭工业出版社

· 北 京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

井田深部水文地质条件探查技术及底板水动态监测/
施龙青等著. -- 北京: 煤炭工业出版社, 2012

ISBN 978-7-5020-4086-4

I. ①井… II. ①施… III. ①矿井水-动态监测-泰安
市 IV. ①TD742

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 148539 号

煤炭工业出版社 出版
(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)
网址: www.cciph.com.cn
北京房山宏伟印刷厂 印刷
新华书店北京发行所 发行

*

开本 787mm × 1092mm¹/₁₆ 印张 7³/₄ 插页 2

字数 176 千字

2012 年 8 月第 1 版 2012 年 8 月第 1 次印刷

社内编号 6909 定价 25.00 元

版权所有 违者必究

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,本社负责调换

内 容 提 要

本书在充分了解国内外底板水害防治理论和技术的基础上,以良庄井田为例,分析了良庄井田地质及水文地质特征。利用瞬变电磁勘探技术,对深部徐、奥灰富水区域、富水性及 F_{10} 断层含水性、导水性进行了探查,总结了深部水文地质特征,论述了徐灰、奥灰对下组煤开采的影响;运用国际上先进的地下水模拟系统 GMS,对奥灰渗流场进行了数值模拟,并根据模拟结果预计了矿井涌水量;研制了工作面底板水动态监测系统。根据研究成果,结合现场实际,提出了井田深部下组煤开采徐、奥灰水害防治技术。

本书可供煤矿防治水工程技术人员阅读,也可供大专院校相关专业师生参考。



前言

我国内地华北型煤田的绝大多数矿井，经过半个多世纪的开采，都已经进入深部下组煤的开采，受奥陶系灰岩岩溶水底板突水威胁严重。建井初期，煤炭资源的开发主要集中在浅部，煤田地质及水文地质勘探工作主要集中在井田浅部，而井田的深部无论是地质条件还是水文地质条件的勘查程度都明显不足。如何在已有矿井丰富的地质及水文地质资料基础上，结合现代先进的物探技术、数值模拟分析方法，获得井田深部水文地质特征，并提出行之有效的底板突水动态监测技术，是一个值得研究的课题。

良庄井田深部下组煤层的开采受徐家庄灰岩和奥陶系灰岩岩溶水威胁程度日益严重，但井田深部地质勘探及水文勘探程度低。著者在充分了解国内外底板水害防治理论和技术的基础上，深入分析了良庄井田地质及水文地质特征，利用瞬变电磁勘探技术，对深部徐、奥灰富水区域、富水性及井田浅部和深部 F_{10} 分界断层的含水性、导水性进行了探查，总结了深部水文地质特征，论述了徐灰、奥灰对下组煤开采的影响；运用国际上先进的地下水模拟系统 GMS，对奥灰渗流场进行了数值模拟，并根据模拟结果预计了矿井涌水量；研制了工作面底板水动态监测系统。根据研究成果，结合现场实际，提出了井田深部下组煤开采徐、奥灰水害防治技术。

在本书的撰写过程中，得到了郭建斌副教授、李守春副教授、王敏副教授、尹会永讲师，山东新汶矿业集团有限责任公司李子林副总工程师、刘同彬处长、阎勇副处长，以及山东良庄矿业有限公司的贺宪国副矿长、李振国总工程师、李峰副总工程师、范荣庆科长、国秀平副科长等专家和领导的支持，在此表示衷心的感谢。

由于著者水平有限，书中错误在所难免，敬请广大读者批评指正。

著者

2012年6月于青岛

目 次

1 绪论	1
1.1 课题的来源及研究意义	1
1.2 国内外研究状况	1
1.3 主要研究内容	10
1.4 研究方法与技术路线	10
2 研究区地质概况	12
2.1 矿区概况	12
2.2 井田地质	13
3 水文地质特征分析	25
3.1 区域水文地质条件及井田水文地质单元	25
3.2 矿井充水条件	27
3.3 断层含、导水性分析	33
3.4 各含水层之间的水力联系及地下水补给条件	34
3.5 矿井深部下组煤开采的水文地质条件类型	35
4 深部水文地质探查技术	37
4.1 探查手段与工程量概述	37
4.2 瞬变电磁勘探成果分析	44
5 徐、奥灰深部水文地质特征及其对下组煤开采的影响	53
5.1 徐、奥灰水文地质特征	53
5.2 下组煤底板隔水层特征	58
5.3 徐、奥灰水位及其变化特点	70
5.4 下组煤开采受徐、奥灰水影响程度分析	72
6 数值模拟在涌水量预计中的应用	77
6.1 奥灰渗流场数值模拟	77
6.2 矿井涌水量预计	86

7	工作面底板水动态监测技术·····	87
7.1	矿井直流电法勘探原理·····	87
7.2	动态监测系统的关键技术研究·····	93
7.3	良庄矿 51302 工作面底板水动态监测·····	99
8	井田深部徐、奥灰水害防治技术·····	108
8.1	徐、奥灰水害防治技术途径·····	108
8.2	综合防治水技术途径·····	110
9	结论·····	113
9.1	主要结论·····	113
9.2	创造性成果·····	114
	参考文献·····	115

1 绪 论

1.1 课题的来源及研究意义

本课题是在国家自然科学基金(41072212)、国家自然科学基金重点项目(51034003)、长江学者和创新团队发展计划、山东省自然科学基金重点项目(ZR2011EEZ002)、973 前期研究专项课题资助(2011CB411906)及新汶矿业集团有限责任公司资助下完成的。

新汶矿业集团是山东省主要的煤炭生产基地之一,目前集团各矿区的开采已由浅部开采进入深部开采,矿井受水害威胁的程度越来越严重,与此同时,各矿区附近、地方小煤矿不规范开采所产生的各种水害隐患也日益突出。近几年来,工作面滞后突水发生较为频繁,仅新汶矿区自 2002 年以来就出现 6 起工作面滞后突水,其中 2 起发生在开采良庄井田深部 700 m 以下埋深的煤层。滞后突水事故的发生,轻者使突水工作面关闭停产,造成矿井接续紧张,矿井排水费用急增,严重影响矿井正常生产;重者可能会造成淹井事故,危及国家财产和人民生命的安全。虽然国内外许多学者进行了工作面滞后突水机理研究,取得了一些可喜成果,但在工作面开采过程中如何预报突水可能发生的时间和地点,以便有计划、有步骤、有针对性做好防治水工作,最大限度地减小灾害损失,确保矿井安全,是当前急需研究的课题。

本课题研究的目的是:通过对良庄井田深部水文地质条件的补充勘查,研究井田深部水文地质特征,研制和建立工作面网络电法监测系统,实现工作面底板运动的动态监测,通过监测工作面开采过程中底板岩层的破坏及灾害地质体的动态变化来预测预报是否出现底板突水(特别是滞后突水)、突水时间和地点、突水的强度,以期达到早监测、早预测、早防治,保障矿井安全生产的目的。因此,本课题研究具有重要的理论意义和现实意义。

1.2 国内外研究状况

1.2.1 矿井地球物理勘探在煤炭开采中的应用

煤炭开采是一项复杂的系统工程,地质勘探是煤炭开采的基础工作。煤炭生产实现采掘机械化、自动化,迫切需要在开采前查明所采煤层的变化,如断层、褶曲、煤层变薄区、陷落柱等。与此同时,岩、煤采掘引起的岩体应力再分配会诱发岩爆、瓦斯突出、巷道底鼓与突水、顶板冒落、巷道片帮等灾害性地质现象。为了及时采取措施消除或减弱这些地质灾害,需要通过测定岩体应力状态及其物理性质的时空变化,来预测这些动力地质现象是否会发生及会在何处发生。上述地质问题普遍具有空间规模小、时空变化大等特点,仅靠一种或几种传统地质手段已无法达到预期勘探的目的。以先进的地质理论为指导,采用现代化的勘探技术手段,采取井上、井下相结合的立体勘查模式,从“宏观”到“微观”,从区域、矿区到采区、工作面不断细化探查工作,是妥善解决煤矿地质问题

的必由之路（王桂梁，1993；李竞生，1997）。

矿井地球物理勘探，特指在地下巷道、采场中进行的以物性差异为基础，通过观测地下地球物理场分布变化规律来解决地质问题的一类勘查技术。自 20 世纪 50 年代苏联将直流电法应用于煤矿井下，以及 70 年代末联邦德国、英国提取与利用槽波的埃里震相探测巷道工作面前方的地质构造以来，经过多年努力，矿井地球物理勘探现已发展成为包括矿井地震高分辨勘探、矿井直流电法勘探、探地雷达法、无线电波透视法、井下微重力测量、放射性测量和红外测温法等多种分支方法的学科体系（表 1-1）。作为应用地球物理学的一个新学科生长点，矿井地球物理勘探在实践中取得了显著的社会效益和经济效益。

矿井直流电法勘探是矿井地球物理勘探的重要分支。它以岩石导电性差异为基础，通过测量和分析巷道或采场附近稳定电流场的分布变化规律来研究矿井地质问题。由于断裂构造、岩石孔隙度、含水量和矿化度、外界压力、温度等对岩石导电性影响很大，因此矿井直流电法勘探在采区构造探测和矿井突水、瓦斯突出、冲击地压等地质灾害的预测预报

表 1-1 主要矿井物探技术及其应用

方法分类		井下施工方法	主要地质应用
矿井直流电法勘探	巷道顶底板电测深法	(1) 固定和活动 MN 法斯伦贝尔电测深法 (2) 温纳电测深法 (3) 偏置温纳电测深法 (4) 三极电测深法 (5) 断面测深技术	划分底板含水层、隔水层，确定含水层和隔水层的厚度及埋深；调查底板灰岩岩溶水；圈定底板断层、裂隙发育带等垂直导水通道
	矿井电剖面法	(1) 多极距偶极剖面法 (2) 多极距三极剖面法 (3) 单极距偶极法 (4) 复合对称四极剖面法 (5) 微分剖面法	圈定底板断层、裂隙发育带的位置，对其含水性作出评价；探测煤层小构造；确定岩层倾斜或直立接触面的位置
	层测深法	(1) 单侧层测深法 (2) 双侧层测深法	煤层小构造探测及其含水性评价，煤层参数反演
	高密度电阻率法	(1) 温纳对称四极（ α 装置） (2) 温纳偶极装置（ β 装置） (3) 温纳微分装置（ γ 装置） (4) 温纳三极装置（A 装置） (5) 温纳三极装置（B 装置）	探测底板突水构造，评价岩层含水性；划分底板含水层和隔水层；调查灰岩岩溶发育情况
	直流电透视法	(1) 定点二极电透视法 (2) 定点三极电透视法 (3) 定点偶极电透视法 (4) 同步二极电透视法 (5) 同步三极电透视法 (6) 同步偶极电透视法	探测工作面内小构造，探测工作面顶底板内小构造，评价构造含水性

表 1-1 (续)

方法分类		井下施工方法	主要地质应用
矿井高分辨地震勘探	巷道地震勘探	(1) 等 T0 法 (2) 反射法 (3) 折射法	确定底板岩层埋深, 评价隔水层稳定性, 底板小构造探测
	槽波地震勘探	(1) 反射法 (2) 透射法	探测工作面内断层、陷落柱、冲刷带、小褶曲等
	瑞雷波勘探	(1) 稳态法 (2) 瞬态法	划分岩层和探测顶底板小断层及岩溶, 巷道独头超前探测小构造, 探测工作面内小构造
	声波探测	(1) 直达波法 (2) 反射波法 (3) 折射波法 (4) 多孔透射法 (5) 单孔折射波法	测定岩石力学参数; 评估岩体质量、硐室和井巷围岩稳定性, 对岩体进行工程地质分类; 探测井巷、硐室围岩松动圈范围和冻结壁的冻结状态及扩展情况等
	声发射与微震技术	(1) 一般监测法 (2) 定位监测法	研究岩石破坏过程, 预测瓦斯、煤层突出和顶板稳定性, 预测冲击地压等
探地雷达法		(1) 剖面法 (2) 宽角法	探测巷道顶底板及工作面前方小断层、老窑、空巷, 探测煤层残厚、灰岩岩溶、底板隔水层厚度和巷道松动圈等
无线电波透视法		(1) 定点发射法 (2) 正同步法 (3) 斜同步法 (4) 多方位测量法	探测煤层内陷落柱、冲刷带、小断层、小褶曲等
井下微重力测量		(1) 布格重力异常测量 (2) 重力垂直梯度测量	探测底板构造, 确定底板岩层密度分界面起伏形态和地质异常体的空间方位, 预测岩爆
放射性测量		(1) α 卡、 α 杯法 (2) γ 能谱测量	探测小构造, 确定构造含水性和突水异常点
红外测温		(1) 定点测量法 (2) 剖面测量法	探测老空区, 区分水源类型

中具有良好的应用前景(刘天放, 1993; 储绍良, 1996)。以矿井突水预测为例, 我国在实践中形成了“以矿井直流电法勘探为主, 辅以矿井高分辨地震勘探、无线电波透视法、井下微重力测量、放射性测量和红外测温等技术”的综合物探技术体系, 在调查矿井水补给源、导水通道和隔水层稳定性及其厚度大小等方面已取得较好的应用效果。

1.2.2 矿井直流电法勘探的研究历史与现状

1. 井下专用仪器设备

20 世纪 80 年代末, 乌克兰矿山地质力学与测量科学研究所研制生产出第五代矿用防爆型电法仪。90 年代初, 煤炭科学研究总院西安分院与邯郸矿务局合作, 研制出 DZ II 型

矿用防爆数字电法仪。1997年煤炭工业部“煤田地质勘探设备标准化专业委员会”委托煤炭科学研究总院西安分院制定了矿用防爆数字电法仪生产的行业标准。近期煤炭科学研究总院西安分院又推出了专门用于井下直流电透视的新一代防爆数字电法仪，对推动我国矿井电法勘探的发展产生了积极影响。

2. 方法技术及其应用

早在20世纪五六十年代，苏联学者即将直流电法应用于煤矿井下勘探，经过多年探索，积累了关于矿井直流电法勘探工作的丰富经验，采用矿井电法成功解决了与煤矿安全、生产有关的多种地质问题，包括煤层小构造探测，矿井水文地质条件调查，煤层界面起伏和煤层尖灭、冲刷带探测，顶板稳定性评价，矿压监测，岩煤突出预报，以及巷道变形监测等。20世纪80年代初苏联制定了高阻煤层和低阻煤层的矿井直流电法勘探工作规范，并具体规定了矿井对称四极和三极电测深法、矿井电剖面法、巷道间直流电透视法及定点源梯度法的施工方法与技术。1990年以来，俄罗斯莫斯科大学地球物理研究室为探测低阻无烟煤煤层中的小构造，开展了井下矢量电阻率法的研究工作，为判定地电异常体的空间位置探索了一条有效途径，并在非接触式电法测量技术、总场测深技术（TES）、电各向异性特征研究等方面做了大量工作。

匈牙利重工业技术大学J. Csokfis等重点研究了用于探测高阻煤层内小构造的直流层测深技术，在探测煤层含水构造、圈定煤层变薄区等方面取得了成功经验（Csokfis, 1974, 1986; Breitzkt, 1987; Gyulai, 1990）。日本曾应用巷道与地面间的电阻率成像技术研究断裂构造和金属矿床的赋存状态（Sasaki, 1993）。

1958年，煤炭部地勘司在京西矿区万佛堂平硐首次进行了井下电法试验，之后北京、淮北等矿务局相继开展井下试验工作（中国煤田地质总局，1986）。20世纪70年代矿井电法的应用与研究一度中断。直到80年代后期，由于矿井突水问题日趋严重，煤炭科学研究总院西安分院、唐山分院，淮北矿务局，峰峰矿务局，河北煤研所，邯郸矿务局，以及中国矿业大学等才逐步恢复了矿井电法的研究工作。其间，邯郸矿务局获得了矿井电测深技术方面的国家专利；煤炭科学研究总院重庆分院左德坤翻译并发表了许多反映国外矿井电法新进展的文章；中国矿业大学在淮北、徐州两矿区，煤炭科学研究总院西安分院在焦作、肥城等矿区，河北煤研所、煤炭科学研究总院唐山分院在河北省多个生产矿区进行了大量井下技术试验工作（刘天放，1993；储绍良，1996）。1990—1995年，以矿井突水探测为重点，国内各单位在我国东部矿区进行了大量井下技术试验工作，积累了开展矿井电法工作的实践经验。此外，河北煤研所、邯郸矿务局等单位还进行了矿井电法掘进头超前探测试验，地矿部岩溶地质研究所我国南方煤矿进行了矿井水综合物探探测工作（李学军，1992；程久龙，1992；侯克昌，1993；岳建华，1994a, 1994b, 1994c, 1994d；中国地质信息研究院，1995a, 1995b）。铁道部勘查院钟世航教授等在淮北矿务局进行了井下微分测深法探测残留煤厚的试验工作（钟世航，1996）。煤炭科学研究总院西安分院与中国地质大学（北京）合作研究了井下水平钻孔电法测煤厚技术。这一阶段，采前单巷道矿井电法工作渐趋规范，一些具有矿井特色的方法与技术（如岩体电阻率法、层测深法、直流电透视法、超前探测技术等）开始应用于井下实践。岳建华（1996）系统阐述了这一时期矿井电法在煤层底板突水探测中的应用与发展状况。

1995年以后，煤炭科学研究总院西安分院矿井电法研究室开始研究巷道间直流电透

视技术,旨在探测工作面上、下方隐伏突水构造(韩德品,1997;曾方禄,1997);山东科技大学于师建等将矿井电法应用于突水构造优势面理论研究中(1996)。

3. 基础理论和正、反演算法

1993年以前,人们通常以忽略巷道影响的全空间电流场理论或地下半空间电流场理论为基础,建立矿井电法的正演计算模型和反演解释方法。例如,J. Csokfis等在忽略巷道影响的前提下给出了3~5层介质模型巷道顶底板电测深、层测深理论曲线的计算方法,并与德国Ruhr大学地球物理所合作研究了矿井电测深类曲线与VSP资料的联合反演解释方法(Dobroka,1991)。有人曾给出任意多层介质巷道顶底板电测深曲线和煤层层测深曲线的线性滤波正演算法(岳建华,1992,1997)。

1993年,中国矿业大学通过物理模型试验研究了巷道对矿井电法的影响特征,提出了均匀介质中巷道影响的校正公式(岳建华,1993)。但是,由于受试验条件的限制,当时对中、大极距巷道影响规律的认识与实际情况存在一定偏差,致使在此基础上形成的定量解释方法无法反演计算出合理的介质电阻率值(岳建华,1995;刘树才,1996)。

1995年起,煤炭科学研究总院西安分院和中国矿业大学开始进行矿井电法数值模拟技术的研究工作。煤炭科学研究总院西安分院重点研究了水平钻孔电透视曲线的边界元正演计算方法,中国矿业大学则先后研究了考虑巷道影响的矿井电法3D有限差分法、有限元法和边界元法数值模拟技术(赵海峰,1995;岳建华,1998)。

1.2.3 底板突水国内外研究现状

尽管岩溶地层的分布面积占世界大陆面积的1/4,但由于地质条件及煤层赋存状态的差异性,世界上一些产煤大国如美国、加拿大、澳大利亚、德国、英国等国一般都不存在煤矿开采过程中的底板突水问题。只有匈牙利、波兰、南斯拉夫、西班牙等国,在煤矿开发中都不同程度地受到底板岩溶水的影响。由于国外煤矿开采已有100多年的历史,因此对底板突水的研究也是率先进行的。

早在20世纪初,国外就有人注意到底板隔水层的作用,并从若干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;隔水层越厚,则突水次数及突水量越少。

20世纪40—50年代,匈牙利韦格弗伦斯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值之比。同时提出,在相对隔水层厚度大于1.5 m/atm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2 m/atm就不会引起煤层底板突水的概念。

在这其间苏联学者B·斯列萨列夫将煤层底板视作两端固定的承受均布载荷作用的梁,并结合强度理论,推导出底板理论安全水压值的计算公式,即

$$H_{\text{理安}} = 2K_p \frac{t^2}{L^2} + \frac{\gamma t}{10^6}$$

式中 $H_{\text{理安}}$ ——底板所能够承受的理论安全水压值, MPa;

K_p ——隔水层的抗张强度, MPa;

t ——隔水层厚度, m;

L ——工作面最大控顶距或巷道宽度, m;

γ ——底板隔水层平均重力密度, N/m^3 。

当实际水压 $H_{实}$ 大于 $H_{理安}$ 时, 底板隔水层就会产生失稳破坏, 从而导致底板突水。

20 世纪 60—70 年代, 匈牙利国家矿业技术鉴定委员会将相对隔水层厚度的概念列入《矿业安全规程》, 并对不同矿井条件做了规定和说明。苏联、南斯拉夫等国的学者也开始研究相对隔水层的作用, 包括采空区引起的应力变化对相对隔水层厚度的影响, 以及水流和岩石结构关系等。

20 世纪 70—80 年代末期, 很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。其中最有代表性的是 C. F. Santos (桑托斯), Z. T. Bieniawski (宾尼威斯基)。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分析了底板的承载能力。

我国底板突水规律的研究工作始于 20 世纪 60 年代, 当时注意到匈牙利保护层理论在实践应用中提出的突水系数概念; 70 年代中期, 国家派科技人员去匈牙利考察, 带回了匈牙利在该方面的研究资料; 70 年代后期, 修改了原有的突水系数概念, 并应用于实践; 80 年代开始, 底板突水机理及突水预测预报的研究开始走上了蓬勃发展的道路。以煤炭科学研究总院西安分院、山东科技大学 (原山东矿业学院)、煤炭科学研究总院特采所、中国矿业大学为代表, 在该方面的研究不仅具有各自独特的理论, 而且具有一个研究梯队, 为我国矿井水害防治研究作出了重要的贡献。

20 世纪 60—70 年代, 我国主要将匈牙利保护层理论应用于实践, 并进行突水规律总结。在焦作矿区水文地质大会战中, 以煤炭科学研究总院西安分院为代表, 提出了采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

$$T_s = \frac{p}{M} \quad (1-1)$$

式中 T_s ——突水系数;

p ——含水层水压, MPa;

M ——隔水层厚度, m。

式 (1-1) 中突水系数在数值上相当于匈牙利的“相对隔水层厚度”的倒数。

20 世纪 70—80 年代, 人们发现利用突水系数进行突水预测预报不准确, 究其原因, 一个根本问题是未考虑矿压对底板的破坏因素。因此煤炭科学研究总院西安分院水文所对突水系数的表达式进行了修改, 最终确定为

$$T_s = \frac{p}{\sum M_i a_i - C_p}$$

式中 M_i ——隔水层第 i 分层厚度, m;

a_i ——隔水层第 i 层等效厚度的换算系数;

C_p ——矿压对底板的破坏深度, m。

20 世纪 80 年代以来, 因我国煤矿底板突水事故日趋严重, 人们对采场底板突水机理的研究也越来越重视, 许多地质界、采矿界及岩石力学界的科技工作者纷纷加入了该研究领域, 使突水机理的研究向纵深方向发展, 并在实践中形成了一些各具特色的理论。

1. “下三带”理论

“下三带”的理论观点最早是由原山东矿业学院、井陉矿务局、峰峰矿务局等一批科技人员在实践中提出的，并在实践中进行应用和发展，最后由原山东矿业学院的一批科研人员上升到一定理论高度。

该理论认为，开采煤层底板也像采动覆岩一样存在着“三带”，即采动底板破坏带（Ⅰ）、完整岩层带（Ⅱ）、承压水导高带（Ⅲ）。

第Ⅰ带：采动底板破坏带（ h_1 ）是指由于采动矿压的作用，底板岩层连续性遭到破坏，导水性发生明显改变的层带。该带的厚度即为底板破坏深度。底板破坏带包抱层向裂隙带和竖向裂隙带，它们相互穿插无明显界线。层向裂隙主要是底板受矿压作用，底板经压缩—膨胀—压缩产生反向位移所致；竖向裂隙主要是剪切及层向拉力破坏所致。该带的厚度受多种因素影响，但主要受采面斜长的影响，其经验公式为

$$h_1 = 1.86 + 0.11L$$

式中 L ——工作面斜长，m。

第Ⅱ带：完整岩层带（或保护层带， h_2 ）是指底板岩层保持采前的完整状态及其阻水性能的部分。它包含以前所谓采动底板破坏影响带中的下部影响带及未变形部分，其共同特点是保持采前岩层的连续性，其阻水性能未发生变化。其厚度为

$$h_2 = h - (h_1 + h_3)$$

式中 h ——隔水层底板总厚度；

h_3 ——承压水导高带厚度。

当 $h > h_1 + h_3$ 时，则保护层存在； $h \leq h_1 + h_3$ 时，则保护层不存在。

第Ⅲ带：承压水导高带（或隐伏水头带， h_3 ）是指含水层中的承压水沿隔水底板中的裂隙或断裂破碎带上升的高度（即由含水层顶面到承压水导升上限之间的部分）。有时受采动影响，采前原始导高还可再导升，但上升值很小，由于裂隙发育的不均匀性，故导高带的上界是参差不齐的。不同的矿区，因其底部岩层性质及地质构造差异，承压水原始导高大小不一，有的矿区也许无原始导高带存在。

2. 原位张裂与零位破坏理论

煤炭科学研究总院北京开采所王作宇、刘鸿泉提出底板岩体移动的“原位张裂和零位破坏”理论，该理论认为被开采的煤层在矿压、水压的联合作用下，工作面对底板水平的影响范围分为三段，即超前压力压缩段（Ⅰ段）、御压膨胀段（Ⅱ段）和采后压缩到稳定段（Ⅲ段）。矿压作用于煤层底板的影响深度也分为三种情况，即直接破坏带（Ⅰ带）、影响带（Ⅱ带）、微小变化带（Ⅲ带）。在水平挤压力及支承压力和水压的联合作用下，使Ⅰ段内整个结构岩体呈现的矿压水平分量传递深度的全厚的整体上半部分受水平挤压，下半部分受水平拉张的力学性状，岩体呈整体上凹的性状。在段中部的底界上岩体产生张裂隙，并沿着原岩节理、裂隙发展扩大，但不引起岩体之间较大的相对位移，仅在原位形成张裂隙。在底板水压力的作用下，克服岩体的结构面阻力，使张裂隙扩大。同一岩性其张裂度的大小与底板承压水的水压力及支承压力的大小有关。张裂隙发生煤层底板的Ⅱ带范围内，形成煤层开采底板岩体的原位张裂破坏。张裂破坏产生于Ⅰ段中部底面，随着工作面推进逐渐向上发展，在Ⅱ段处于稳定。煤层底板岩体由Ⅰ段向Ⅱ段的过渡引起结构状态的质变，处于压缩的岩体急剧御压，围岩的储存能大于岩体本身的保留能，则以脆

性破坏的形式释放残余弹性应变能,以达到岩石能量的重新平衡,从而引起工作面底板岩体发生自上而下的破坏,其位置一般在工作面附近,靠近工作面零位的 $+3 \sim -5 \text{ m}$ 的范围内,破坏基本上一次性达到最大深度,并很快稳定。煤层底板岩体移动的这种破坏即所谓的“零位破坏”。该理论认为,底板岩体的内摩擦角是影响零位破坏的基本因素,并进一步引用塑性滑移线场理论分析了采动底板的最大破坏深度。

3. 薄板型理论(底板“两带”模型)

煤炭科学研究总院北京开采所刘天泉院士、张金才等从力学分析角度出发,提出了底板岩体“两带”的模型,即底板岩体由采动导水裂隙带及底板隔水带组成。该理论引用断裂力学 I 型裂纹的力学模型,求出采场边缘应力场分布的弹性能,并应用 Comulomb - Mohr 破坏准则及 Griffith 破坏准则,求出矿山压力对底板的最大破坏深度。而将隔水带看做是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得到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的计算公式。这种模型前半部分,即对导水裂隙带的处理,尽管十分简化,但所得的弹性解还是能揭示矿压对底板破坏的规律,如果将岩体损伤特征考虑进去就会较为接近底板岩体的实际情况。模型的后半部分对隔水带的处理不仅在理论上是错误的,而且与工程实际相差甚远。首先,薄板理论的前提是厚宽之比小于 $1/5 \sim 1/7$,模型中的底板隔水带一般是不满足此条件的;其次,模型中认为煤层底板中除了采动导水裂隙带,剩余的岩层便是隔水带,与现实不符。因此,这种模型在实际生产中很难推广和应用。

4. 关键层理论

中国矿业大学钱鸣高院士将采场顶板覆岩运动受关键控制的理论观点引申到底板突水研究中,从而认为关键层是控制突水的主要原因。关键层是指底板中含水层以上承载能力最高的一层岩层。该理论认为,一旦关键层破裂,就会引发突水。由于关键层可以看成薄板,因此在力学研究手段上采用了薄板模型。

5. 采场底板“下四带”划分理论

该理论是由山东科技大学施龙青、宋振骐院士提出的。该理论基于损伤力学、断裂力学和矿山压力理论,在开采煤层底板“下三带”划分理论基础上,将岩层看成非连续的裂隙体,提出了开采煤层底板“下四带”划分理论,即开采煤层底板可以划分出矿压破坏带(I)、新增损伤带(II)、原始损伤带(III)、原始导高带(IV)。

第 I 带:矿压破坏带(h_1)是指矿山压力对底板的破坏作用显著,底板岩石的弹性性能遭到明显伤失的层带。其特点为岩石处于黏弹性状态;各种裂隙不仅交织成网,而且贯通性好、导水性能很强;岩层的连续性彻底破坏,完全伤失了隔水能力;承压水沿该带突出所消耗的能量仅仅用于克服突水通道中的沿程阻力。其计算公式为

$$h_1 = 59.88 \ln \frac{K_{\max} \gamma H}{\sigma_1}$$

式中 $K_{\max}$ ——矿山压力最大应力集中系数;

H ——采深;

γ ——上覆岩层的重力密度;

σ_1 ——底板原始裂隙扩展相互贯通所需的最大主应力。

第 II 带:新增损伤带(h_2)是指受矿山压力破坏的影响作用明显,岩石弹性性能发

生了明显改变的层带。其特点为底板岩层的原有抗压强度明显降低,但岩层的弹性性能尚未完全丧失,即岩石仍处于弹性状态;岩层的原有裂隙得到明显扩展,但尚未相互贯通;岩层具有一定的连续性和隔水能力;承压水要沿该带突出,其消耗的能量主要用于贯通裂隙。其计算公式为

$$h_2 = 59.88 \ln \frac{\sigma_{1c}}{\sigma_1}$$

式中 σ_{1c} ——裂隙尖端初始断裂强度。

第三带:原始损伤带(h_3)是指不受矿山压力破坏作用的影响或影响甚微,岩石弹性性能保持不变的层带。其特点为岩石保持原有弹性性能;岩层内的裂隙保持原先的非相互贯通状态;岩层的连续性和隔水能力良好;底板水要沿该带突出,其消耗的能量主要用于破坏岩石及贯通裂隙。

原始损伤带的确定有多种方法,如钻孔注水法是通过采前和采后同一个底板位置钻孔注水漏失量的比较确定开采煤层底板采后原始损伤带是否继续存在及其厚度的最直接方法。

第四带:原始导高带(h_4)是指不受矿山压力作用的影响,并发育有承压水的原始导高的层带。其特点为因水化学作用,岩石处于弹塑性、塑性状态;裂隙发育参差不齐,并已成为突水通道;岩层的连续性差;底板水从该带突出只需克服沿程阻力。

在生产实践中,原始导高带厚度确定是根据以下方式来进行的:钻孔尚未达到含水层就有一定量的涌水,此时涌水点到含水层的距离即为导高带的厚度。

6. 其他理论和研究

中国科学院地质所提出的“强渗通道”说。该学说认为底板是否发生突水关键在于是否具备突水通道。这分为两种情况:一种情况是底板水文地质结构存在与水源沟通的固有突水通道,当其被采掘工程揭穿时,即可产生突破性的大量涌水,构成突水事故;另一种情况是底板中不存在这种固有的突水通道,但在工程应力、地壳应力及地下水共同作用下,沿袭底板岩体结构和水文地质结构中原有的薄弱环节发生形变、蜕变与破坏,形成新的贯穿性强渗通道而诱发突水。前者属于原生通道突水,后者属于再生或次生通道突水。该理论重视地质构造(包括断层和节理)这一薄弱面对突水的影响,但对采动和水压对其产生的影响,尤其采动矿压的作用缺乏应有的研究。

煤炭科学研究总院西安分院提出的“岩水应力关系”说。该学说认为底板突水是岩(底板砂页岩)、水(底板承压水)、应力(采动应力和地应力)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,造成了底板渗流场的重新分布,当承压水沿导水破裂进一步浸入时,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。其表达式为

$$I = \frac{p_w}{z}$$

式中 I ——突水临界指数;

p_w ——底板隔水岩体承受的水压;

z ——底板岩体的最小主应力。

当 I 小于 1 时不会发生突水, 反之则发生突水。

总之, 底板水害防治的研究在我国是一个值得不断深入研究的复杂问题。

1.3 主要研究内容

1. 研究区地质及水文地质条件分析

包括矿区自然地理特征、气象特征、区域地质特征、煤田地质特征。

2. 煤田深部水文地质基本特征

包括煤田水文地质条件及水文地质单元划分, 矿井充水条件分析 (含水层与隔水层), 断层含、导水性分析, 各含水层之间的水力联系及地下水补给条件分析, 矿井深部下组煤开采的水文地质条件类型分析。

3. 煤田深部水文地质探查

包括深部徐、奥灰富水性探查手段与方法的研究与应用、数据采集、成果分析等。

4. 徐、奥灰水文地质特征及其对下组煤开采的影响

包括徐、奥灰水文地质特征, 下组煤底板隔水层特征, 徐、奥灰水位及其变化特点, 下组煤开采受徐、奥灰水影响程度分析。

5. 深部奥灰渗流场数值模拟及矿井涌水量预计

包括奥灰渗流场数值模拟、矿井涌水量预计。

6. 采煤工作面底板水情动态监测技术研究

包括矿井直流电法勘探原理、工作面底板富水性三维探测技术、工作面底板水情动态监测系统、工作面底板水动态监测实践。

7. 井田深部下组煤开采徐、奥灰水害防治水技术

包括徐、奥灰水害防治的技术途径、综合防治水技术途径。

1.4 研究方法与技术路线

1.4.1 研究方法

本课题采用多学科、多种探测手段综合的研究方法。

(1) 矿区地质、水文地质条件分析: 收集区域地质资料、水文地质资料, 在此基础上总结煤田深部水文地质基本特征。

(2) 矿井水文地质条件探查: 采用电磁法探查徐、奥灰的岩溶裂隙发育情况及富水情况, 圈定其富水区, 查找岩溶水径流带; 探查边界断层的含、导水情况, 查找井田内徐、奥灰水的补给来源。采用井下直流电法, 探查工作面下方徐、奥灰的富水性。

(3) 数值模拟: 以良庄矿深部未采区为例, 利用 FLAC 软件进行深部奥灰渗流场数值模拟及矿井涌水量预计。

(4) 采煤工作面底板水情动态监测技术研究: 采用井下高密度电阻率三极探测技术和井下高密度电阻率工作面偶极探测技术, 开发井下高密度电阻率三维探测技术, 研制监测系统。

(5) 深部水防治技术研究: 基于以上研究结果, 提出矿井水害防治的具体措施。

1.4.2 技术路线

本研究采用的技术路线如图 1-1 所示。