

C/ BAN TUSHUI YUCE YUBAO
JI FANGZHI TINGYONG YANJIU

采场底板突水预测预报 及防治应用研究

徐 星 著



黄河水利出版社

国家自然科学基金项目(51604091)、河南省科技攻关计划项目(182102310723、182102310743)、河南省高等学校重点科研项目(17A440002、18A440010)、河南省高等学校青年骨干教师项目(2017GGJS153)、安全生产重特大事故防治关键技术科技项目(henan-0027-2018AQ)资助

采场底板突水预测预报及 防治应用研究

徐 星 著

黄河水利出版社
· 郑 州 ·

内 容 提 要

本书将采场底板突水预测方法及水量估计方法进行合理归纳,力求选择准确、方便、可行的预测预报方法。将 D-S 证据理论应用到底板突水决策中,使突水判断更为准确。根据以上总结的预测预报方法开发“采场底板突水判测系统”。结合工程实例,按照水害防治技术要求,首先使用物探手段进行底板含水层探测,得出含水层异常区,其次使用该系统进行底板突水安全性评价;接着结合物探结果与安全性评价结果给出水害防治措施与建议;最后开展矿井突水水源判别研究,建立多种非线性突水水源判别模型,为水害防治提供理论依据与参考,并对其建立的模型的科学有效性进行验证。

本书可作为矿业工程类专业研究生、本科生以及科研人员研究和学习的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

采场底板突水预测预报及防治应用研究/徐星著. —郑州:黄河水利出版社,2018.7

ISBN 978 - 7 - 5509 - 2077 - 4

I. ①采… II. ①徐… III. ①矿山突水 - 预测 - 研究 ②矿山突水 - 防治 - 研究 IV. ①TD74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 165831 号

组稿编辑:李洪良 电话:0371-66026352 E-mail:hongliang0013@163.com

出版社:黄河水利出版社

网址:www.yrcp.com

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层

邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371-66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:虎彩印艺股份有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:8

字数:200 千字

印数:1—1 000

版次:2018 年 7 月第 1 版

印次:2018 年 7 月第 1 次印刷

定价:35.00 元

前 言

我国的矿井突水事故多数是由煤层底板突水引起的。受承压水威胁的煤矿储量大,特别是华北型煤田,如何进行水害防治,确保安全回采这些煤炭资源是亟待解决的问题。底板突水预测预报目前还很难用一个确定的表达式来表示突水与众多因素的关系,但是,如果对突水预测方法进行合理的归纳,并请教专门从事这方面研究工作的专家,再运用合理的推理方法,能给出具有一定可信度的判断。预测预报是防治水害的有效途径,也是进行水害评价的重要环节。

本书主要开展了如下几方面的工作:

(1)分析煤层底板突水影响六大因素,找出预测和防治底板突水的主要切入点;概述煤层底板突水机制,分析底板突水类型划分方案,找出预测底板突水的理论依据和基本出发方向。

(2)将现有成熟的底板突水预测方法进行归纳分类,并分别给出了突水情况下的涌水量预测,充实水害防治依据。另外将 D-S 证据理论作为二级决策应用于底板突水预测中,使前面预测更为准确可信,在二者基础上开发了采场底板突水判测系统。

(3)将判测系统应用于工程实例,按照矿井水文地质条件探查、矿井水害评价、矿井水害治理三个步骤将其应用于刘庄煤矿 121101 工作面的水害防治,并给出该矿工作面水害防治措施与建议,以确保工作面安全回采。

(4)开展矿井突水水源判别研究,准确判别矿井突水来源,为矿井水害防治提供理论依据与参考,为此,拟建立了多种非线性突水水源判别模型,并对建立的模型的科学有效性进行验证。

由于作者知识水平有限,在本书的撰写中,肯定会有很多错误和不足,敬请各位专家、学者批评指正。

作 者

2018 年 5 月

目 录

前 言

1 绪 论	(1)
1.1 课题研究的目的和意义	(1)
1.2 国内外研究现状	(2)
1.3 主要研究内容及技术路线	(8)
2 采场底板突水预测预报	(10)
2.1 煤层底板突水影响因素分析	(10)
2.2 煤层底板突水机制概述	(15)
2.3 底板突水类型划分	(20)
2.4 采场底板突水预测方法	(22)
2.5 采场底板突水涌水量预测	(27)
2.6 本章小结	(28)
3 基于 D-S 证据理论的底板突水决策技术	(29)
3.1 概述与基本概念	(29)
3.2 合成规则及基本性质	(32)
3.3 基于 D-S 证据理论的底板突水融合决策	(33)
3.4 本章小结	(36)
4 采场底板突水判测系统的开发	(37)
4.1 底板突水预测预报系统概述	(37)
4.2 软件系统分析与设计	(38)
4.3 系统实现	(41)
4.4 本章小结	(44)
5 工程概况	(45)
5.1 矿井地质及水文地质条件	(45)
5.2 121101 工作面地质及水文地质条件	(49)
6 底板水害防治工程应用	(52)
6.1 底板突水评价	(52)
6.2 水文地质条件探查	(53)
6.3 底板突水防治	(69)
6.4 本章小结	(111)
7 主要结论和不足之处	(113)

7.1 主要结论	(113)
7.2 不足之处	(114)
参考文献	(115)

1 绪 论

1.1 课题研究的目的和意义

煤炭一直是我国的主要能源之一,占一次性能源消耗量的 75%,安全高效地进行煤炭开采是关系到国计民生和国民经济发展的 大事。由于埋藏深度和煤层赋存条件的限制,开采煤炭资源以井工开采为主。我国许多煤田的水文地质条件十分复杂,在煤层开采过程中受到多种水体的威胁。对于受水体威胁的煤层而言,井工开采带来的最大安全问题就是矿井突水事故,而矿井突水事故多数是由煤层底板突水引起的。

煤矿水害事故具有预测性难、影响范围大、扩散速度快、经济损失大和人员伤亡多等显著特点,据相关资料统计,2000 ~ 2015 年共发生煤矿水害事故 1 162 起,造成 4 676 人死亡,平均百万吨死亡率为 0.106,平均水害事故起数占煤矿事故起数的 3.3%。据原煤炭工业部统计资料,全国 600 余处重点煤矿中,具有底板突水危险性的有 285 处,占 47.5%,受水威胁的储量达 250 亿 t。华北型煤田水文地质条件复杂,灰岩含水层富水性强,底板岩溶水害严重,有近 1/2 储量的下部煤层难以开采利用,一些老矿区在不同程度上日益受不同形式水的威胁(见表 1-1);从近年的开采情况看,每年采出受水害威胁的煤炭不到总储量的 10%。如果不能解放这些受水害威胁的煤炭储量,不仅影响煤矿的产量,而且一些老矿井还有被迫提前关井的危险。

表 1-1 华北代表性煤矿区总储量与受水威胁储量

煤矿区	总储量 (亿 t)	受水威胁储量 (亿 t)	受水威胁储量/总储量 (%)
峰峰	70	41.86	49
邯郸			59.8
邢台			75
焦作	5.65	4.95	87.6
韩城	12.7	7.83	61.7
澄合	3.26	2.2	67.5
肥城	4	2.5	62.5
霍州南下庄	1.37	0.81	59.1
合计	96.98	57.65	59.4

随着开采深度、开采强度、开采速度的增加以及开采规模的扩大,矿井突水问题日益严重。我国煤矿区主要受三类水害的威胁:第一类是巨厚强含水冲积层对其下伏煤层开

采的威胁;第二类是具有强含水层或地表水体补给的太原群岩溶灰岩含水层对其上下煤层的威胁;第三类是厚层灰岩岩溶强含水层对上覆煤层开采的威胁。防治前两类水害的煤层开采技术已有了一套比较完整及成熟的经验;而治理后一类水害,即底板强岩溶承压含水层对煤层开采的威胁,尚缺乏经验。但其影响范围极广,对煤层开采威胁最大,几乎所有大的煤矿突水及淹井事故都是由这类水害引起的。

煤层底板突水过程是一个复杂的、非平衡、非线性的演化过程,它受到许多因素的影响,其实质是煤层底板含水层高承压水沿采煤工作面底板隔水层岩体内部通道突破底板隔水层的阻隔,以突发、缓发或滞发的形式向上涌入工作面采空区的过程。底板突水是地下水与底板岩层相互作用的结果,底板隔水层在带压开采中起着阻隔灰岩承压水突出的作用。因此,底板岩层阻水能力是合理制订底板水防治方案,有效预防和治理突水灾害的基础。

煤层底板突水是煤矿水害的主要类型之一,给煤矿的安全生产带来严重威胁和经济损失。查清矿井水文地质条件、研究矿井突水机制,进行带压开采底板突水预测研究,采取有效手段,确保安全生产成为带压开采的关键。超前对煤层底板突水进行准确的预测预报研究,有利于矿井防灾设计和措施的制定,是对矿井突水机制及其防治研究的深入和完善,是对采矿理论的发展和补充,对研究承压水上安全开采具有十分重要的现实及理论意义。

1.2 国内外研究现状

几十年来,国内外许多学者对矿井底板突水进行了一些有益的探索,取得了大量的研究成果,对于矿井安全生产起到了积极的指导作用。下面仅就矿井底板突水机制和突水预测方法,以及高密度电阻率法,以时间为主线对国内外历史、现状及应用做评述。

1.2.1 国内研究现状

与国外相比,我国对突水问题的研究起步较晚,进行这一方面的研究工作也较晚。中华人民共和国成立后,随着煤炭工业的发展,我国煤层底板突水理论和实践研究出现了日新月异的发展。

20世纪60年代,当时注意到匈牙利底板相对隔水层理论在实践中的应用,在焦作矿区水文地质大会战中,以煤炭科学研究总院(以下简称煤科总院)西安勘探分院为代表,提出了采用突水系数作为预测预报底板突水与否的标准。

20世纪70~80年代,通过不断深入研究工作面矿山压力对底板破坏作用的影响,煤炭科学研究总院西安勘探分院水文所对突水系数的表达式进行了2次修改。

20世纪80年代以后,随着各矿区开采水平的延伸,突水事故日趋严重,煤炭部门和煤炭科技工作者对突水机制日益重视。除煤矿第一线的工程技术人员不断总结、探索突水发生机制外,山东科技大学(原山东矿业学院)、煤炭科学研究总院北京开采所及西安分院、中国科学院地质所、中国矿业大学等单位深入现场,做了大量探测观测分析和实验研究工作,在此基础上,结合岩体力学理论归纳总结出具有我国特色的突水机制新理论,

主要包括:

(1)20 世纪 80 年代初,由山东科技大学荆自刚、李白英在实践中提出“下三带”理论,并由以李白英为代表的一批科研人员在实践中进行应用和发展。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Ⅰ底板破坏带、Ⅱ完整岩层带、Ⅲ承压水导高带。

(2)20 世纪 90 年代初,由煤科总院北京开采所王作宇、刘鸿泉等人提出“零位破坏”与“原位张裂”理论。该理论认为,矿压、水压联合作用于工作面,对煤层的影响范围可分为三段:超前压力压缩段(Ⅰ段)、卸压膨胀段(Ⅱ段)和采后压力压缩—稳定段(Ⅲ段)。

(3)20 世纪 90 年代,煤科总院北京开采所刘天泉院士、张金才博士等从力学分析角度出发,提出“薄板模型”理论。该理论认为,底板岩体由采动导水裂隙带及底板隔水带组成。

(4)20 世纪 90 年代,由中国科学院地质所提出“强渗通道”说。该理论认为底板是否发生突水,关键在于是否具备突水通道。

(5)20 世纪 90 年代,煤科总院西安分院提出“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。

(6)20 世纪 90 年代中期,中国矿业大学钱鸣高院士根据底板岩层的层状结构特征,提出“关键层”(Key Stratum,可简写为 KS)理论。该理论认为,煤层底板在采动破坏带之下、含水层之上,存在一层承载能力最高的岩层,称为“关键层”。

此外,还有很多利用新方法、新理论、新技术来探讨煤层底板突水的机制及预测预报研究。陈秦生(1990)利用模式识别方法预测煤矿底板突水;李庆广、王延福(1985)对华北类型的岩溶煤矿提出了底板突水量的预测方法。白晨光等(1997)、邵爱军等(2001)利用突变模型预测了矿坑突水。李富平、王延福采用神经网络方法对煤矿回采工作面突水预测方法探讨。张文泉(2004)、杨永国等(1998)利用模糊数学方法对煤层底板突水进行了预测。王延福等(1998~2000)利用动力学和非线性动力学模型对煤层底板突水进行了预测。管恩太等(2001)、孙苏南等(1996)利用 GIS 多元信息拟合方法研究了底板突水预测模型。张文泉(2004)研制了基于高木—关野模糊准则的底板突水预测预报系统;姜福兴等(2008)研制了采用全局寻优定位的高精度微震监测技术,对采动造成的突水危险性进行实时预测预报。山东科技大学施龙青教授针对“下三带”理论的不足,从现代损伤力学及断裂力学理论出发,建立了采场底板突水的“四带”理论。

众多学者从不同角度探讨了底板突水的预测方法,对于指导承压水上采煤起到了重要的指导作用。尤其是近年来研制成功的突水预测专家系统,已较成功地用于底板突水的预测预报。

1.2.2 国外研究现状

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)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,在煤矿开发中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。

从20世纪40年代起,国外就开始注意底板突水理论的研究,并开始用力学的观点探讨突水成因。1944年,匈牙利学者韦格·弗伦斯第一次提出了相对隔水层的概念,认识到煤层底板突水不仅与隔水层厚度有关,而且与水压有关。苏联学者斯列沙辽夫以静力学理论为基础,对底板岩层进行了理论分析,研究了煤层底板在承压水作用下的破坏机制。他假设回采空间的底板岩层为两端固支、受均匀载荷作用的梁,并结合强度理论推导底板理论安全水压值的计算公式,从而提出了预测底板突水的理论公式。

20世纪60~70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。匈牙利、南斯拉夫等国学者提出预测底板突水的“保护层特殊厚度法”,采用的是相对隔水层厚度(相当于突水系数的倒数),作为衡量突水与否的标准。以泥岩抗水压的能力为标准隔水层厚度,将其他不同岩性的岩石换算成泥岩厚度,称换算后的岩层厚度为等效厚度。相对隔水层厚度,即单位水压所允许的等效隔水层厚度。

20世纪70年代至80年代末,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制。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及承受破坏应力前岩石已破裂的程度与岩体指标(Rock Mass Rating,可简称为RMR)相关的无量纲常量M和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制有一定的参考价值。在20世纪80年代末,苏联矿山地质力学和测量科学研究院突破传统线性关系,指出导水裂隙和采厚呈平方根关系。实质上,对煤层底板突水问题的研究与岩体水力学问题的研究密不可分。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Snow D. T通过试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从多孔介质流中转变过来。1974年,Louisc根据钻孔抽水试验得到裂隙中水的渗透系数和法向地应力服从指数关系。以后,德国的Erichsenc又从裂隙岩体的剪切变形分析出发,建立了渗流和应力之间的耦合关系。1986年Oda M用裂隙几何张量统一表达了岩体渗流与变形之间的关系。1992年,Derek Elsworth将似双重介质岩石格架的位移转移到裂隙上,再根据裂隙渗流服从立方定理的关系,建立渗流场计算的固-液耦合模型,并开发了有限元计算程序。目前,在矿井水害研究方面,澳大利亚有些学者主要从事地下水运移数学模型的建立。

1.2.3 高密度电阻率法研究现状

电阻率法勘探约在19世纪末被提出,20世纪初提出了视电阻率的重要概念,并确定了温纳四极和中间梯度装置。随着现代科学技术的发展,特别是计算机的飞速进步,大大促进了电阻率法勘探的新技术、新方法、新仪器的发展,尤其是野外信息的数字化和资料的计算机处理,使得电阻率法应用范围进一步扩大,地质效果更为明显。在仪器方面,智能化、高效化是发展总趋势。中国吉林大学工程技术研究所、日本OYO公司和美国GSSI公司等相继开发出新一代多功能电测系统仪器,以及电阻率成像系统,使得野外数据采集、结果成图一次性完成。

我国电法勘探发展也相当迅速,尤其是在金属矿产勘探中得到有效的应用。此后全国各金属矿、石油、煤田等勘探工作中,广泛地发展了电法工作。虽然电法勘探在国民经济中发挥着重要作用,但常规电阻率法由于其观测方式的限制,不仅测点密度稀疏,而且

也很难从电极排列的某种组合上去研究地电断面的结构和分布。因此,所提供的关于地电断面结构特征的地质信息较为贫乏,无法对其结果进行统计处理和对比解释。由此看来,在物探测试方法中,同地震勘探方法中大数据量、大规律的解析思路相比,电法勘探缺乏其应有的力度,常规的电阻率法已无法满足实际工作的需要。

1989年,在美国的一次专题讨论会上,有人指出:“在过去60年中,反射地震法的数据密度增加了一万倍以上。要改善电法结果的分辨率,应当把它的数据密度成千倍地增大。目前可能的是采用像地震工作那样的传感器阵列。”近年来,在这种思潮的引导下,高密度电阻率法勘探在实际工作中表现出巨大的潜力。

事实上,该方法主要是一种阵列式勘探方法思想。阵列电探思想早于20世纪70年代末有人开始考虑实施,英国学者所设计的电测深偏置系统实际上就是阵列电探的最初模式。20世纪80年代中期,日本地质计测株式会社曾借助电极转换实现了阵列电探的野外数据采集,由于整体设计不完善,这套设备没有充分发挥它的优越性。20世纪80年代后期,我国地质矿产部系统率先开展了高密度电法及其应用技术研究。从理论与实际结合的角度,进一步探讨并完善了方法理论及有关技术问题,研制成了3~5种仪器。其中,1991年长春地质学院的GC-1加HD-1型高密度电阻率采集系统,1992年地质矿产部机电研究所推出了由GC-2型多路转换器和MIR-1B型多功能电测仪组成的系统,1993年该所又推出了由MIS-2型多路转换器和MIR-1C型多功能电测仪配套的系统,1995年,北京地质仪器厂和中国地质大学(北京)合作推出了DUM-1型电极转换器和DDJ-1型多功能电测仪系统。

高密度电法是在常规电法基础上发展起来的,高密度电法仪实质上是一个多电极测量系统,所以,高密度电法仪形式是普通的电测仪+电极转换开关。早期,电极转换由人工进行,后来微型计算机(处理器)的发展,电极转换开关实现了自动化。高密度电法测量系统包括数据收录和资料处理两大部分。高密度电法仪器结构上的主要问题是:如何实现测量主机与众多电极之间的连接。为此,出现两种形式:传统式高密度电法仪和新型分布式智能化高密度电法仪。

(1)传统式高密度电法仪,一般有60根电极,通过60根导线(有的做法是用10芯或12芯的电缆,有的干脆用工程浅层地震仪的检波器电缆,这样势必会造成耐压低、电流小)与电极转换器连接。电极转换器有前述的两种,一种是步进电机驱动的机械触点式电极转换开关,由60路触点底盘、4路触点、电极排列选择开关、驱动隔离电路及步进电机等部件组成,由工程电测仪控制步进电机的转动,以实现不同的电极极距和不同的排列方式。另一种是继电器型电极转换开关,工程电测仪输出一定的控制数码,通过译码电路分别驱动不同的继电器的吸合、释放,达到不同电极、不同极距的切换。这两种转换开关的仪器有两点问题值得注意:机械式电机转换开关的问题主要是机械触点接触的可靠性问题;继电器式电极转换开关主要是连接电线问题(前者同样存在此问题)。

(2)新型分布式智能化高密度电法仪。此电法仪主要由笔记本式计算机(或工控机)、主机、主电缆和电极连接盒等组成。主机包括发送控制命令、接收信号等部分;主电缆由10芯电线组成,主要作用是信号传输;电极连接盒根据主机的命令进行极转换和数据采集、传输。由于是一根电缆覆盖所测量的剖面,并且使用微机进行控制,使得每一个

电极都可能成为 A、B、M、N 极,中国地质大学(武汉)研制的分布式高密度电法仪最多可进行 240 道电极输入,原则上可方便地进行无限扩展(由于受导线电阻、工作电流、工作电压和干扰的限制,所以建议数量不要过分追求),整套仪器体积小、重量轻;再者,电极的连接是任意的,使用十分方便。

国外生产高密度电法仪的公司主要有日本的 OYO 公司、瑞典的 AEBM 公司、法国的 IRSI 公司、美国的 AGI 公司。这些仪器价位在 6 万~7 万美元(60 个电极配置)。国外仪器大多数是将电测仪与电极转换开关分开的。2002 年 12 月,美国的 AGI 公司出品一款新仪器,将电测量主机与开关单元结合在一起。但未见国外仪器中使用 PC 机或类似 PC 机作为仪器主控制器,实现现场测量曲线的报道。

近年来,高密度电阻率法被广泛用于洞体探测,它可采用二极、三极、偶极、单极—偶极、偶极—偶极等,采用重叠单极—偶极观测系统的高分辨电阻率法是由美国的地球物理工作者提出的,起初用于探测军事方面的洞体,后应用于探测废矿巷道、岩溶等地下洞穴。美国西南研究所研制出快速高分辨电阻率资料采集系统,用来采集重叠单极—偶极高分辨电阻率资料。我国吉林大学工程技术研究所也最先研制开发出了多道分布式高密度电法采集系统,并在实际工程中有了广泛的应用。

高密度电阻率法数据采集方式是分布式的,进行野外测量时只需将全部电极设置在一定间隔的测点上,测点密度远较常规电阻率法大,一般为 1~10 m。然后用多芯电缆将其连接到程控式多路电极转换开关上。电极转换开关是一种由单片机控制的电极自动转换装置,它可以根据需要自动进行电极装置形式、极距及测点的转换。测量信号用电极转换开关送入电法仪主机,并将测量结果依次存入存储器。将测量结果导入电脑后,可对数据进行各种处理,给出地电断面分布的各种图示。高密度电阻率法的提出和付诸实施,使电法勘探也可以和地震勘探一样采用覆盖方式更快、更准确的采集信息,更高精度地进行多维反演,使电法解释资料更加直观、明了,可以说,这一新技术的出现是电法勘探的一大进步。

1.2.4 高密度电阻率法主要特点

高密度电阻率法原理上属电阻率法的范畴,但与常规的电阻率法相比,设置了较高的测点密度,在测量方法上采取了一些有效的设计,使得数据采集系统有较高的精度和较强的抗干扰能力,并可获得较为丰富的地电信息。高密度电阻率法既提供地下地质体某一深度沿水平方向岩性的变化情况,也能反映沿铅垂方向岩性变化情况,一次可完成纵、横二维的探测过程,所以观测精度高,采集的数据可靠。

传统的电阻率法勘探时电极数量少,电极的位置需要随时更换,数据密度低、劳动强度大、工作效率低。高密度电阻率法相对于常规电阻率法而言,具有以下特点:

(1) 由于电极的布设是一次完成的,测量过程中无须跑极,因此可防止因电极移动而引起的故障和干扰;

(2) 在一条观测剖面上,通过电极变换或数据转换,可获得多种装置的 ρ_s (视电阻率) 断面等值线图;

(3) 可进行资料的现场实时处理与成图解释;

(4)成本低、效率高、信息丰富、解释方便,勘探能力显著提高;

(5)采集信号信噪比高,高密度电阻率法采用专用电缆,它分为屏蔽供电线和信号线,彻底克服了线间干扰对测量数据的影响,提高了信噪比。

虽然高密度电阻率法有许多优点,但在实际工程应用中也发现了一些问题:

(1)在实际的工程探测中,根据不同的目的选择何种装置形式;如何根据探测要求确定探测范围的大小;选择何种方法对数据进行反演;反演过程中如何选择反演次数。

(2)由于自然界中的地质体都是三维形式的,理论上使用三维模型才能更准确地解释其结构。现在三维高密度电阻率法是一个积极研究的方向,但是由于仪器设备和处理软件都不能满足要求,三维高密度电阻率法还没有达到二维高密度电阻率法的应用水平。现在,两个主要的技术问题得到初步解决:一是仪器可以同时多个读数,这对于节省勘探时间是很重要的;二是计算机运算速度的提高,使得大数据量的反演可以在短时间内完成,三维高密度电阻率法勘探更加实用化。不过在三维情况下,高密度电阻率法对目标体与背景的电率率差异的分辨率和对目标体空间尺寸的分辨率如何变化尚不清楚。

1.2.5 高密度电阻率法的应用情况

1.2.5.1 国内应用

国内自引进高密度电阻率法以来,有不少单位投入了该方法的理论、方法技术和仪器准备的研制。最早的做法是:电极+连接导线或多芯电缆+机械式电极转换开关(由步进电机控制)+工程电测仪。1994年《地学仪器》报道了原地质矿产部机电研究所研制的MRI高密度电法仪,其结构将机械式电极转换开关改进成由单片机控制的电子开关。现在有的仪器厂生产的高密度电法仪就是引用的该技术。1997年12月,《地学仪器》发表了中国地质大学(武汉)在国内首创的分布式智能化高密度电法测量系统的文章。可见,国内高密度电法仪电极转换开关方面分3类:机械式电极转换开关、电子式电极转换开关及分布式智能化电极转换开关。在主机方面,多数仪器使用的是单片机(微处理器),而使用PC机(或工控机)作为主控制器,并在屏幕上进行现场曲线显示的只有中国地质大学(武汉)和原长春地质学院骄鹏公司等研制的少数仪器。

由于高密度电阻率法与常规电阻率法相比有以上一些优点,因此自20世纪80年代初由日本引进该法后,经国内原长春地质学院等单位对方法、仪器的改进、研制开发与生产,很快在水利、工程、环境等领域中得到了推广应用并取得良好效果。据不完全统计,主要有:张献民(1994)应用高密度电阻率法探测煤田陷落柱,表明该法可有效地探测煤田陷落柱;刘康和等(1994)采用高密度电阻率法等查明地表下一定深度的断层;侯烈忠等(1997)通过对某机场主跑道高密度电阻率法实测资料的处理和分析,简述了所探测的异常体在多种图件上的反映特征及高密度电阻率法在地基勘探中的效果;程久龙等(1999)应用高密度电阻率成像法探测回采工作面水害,探讨了高密度电阻率成像法探测回采工作面水害的可行性,并结合具体应用实例证明,高密度电阻率成像法探测回采工作面水害技术可行,准确率高,效果明显;董浩斌和王传雷(2003)将高密度电阻率法应用于长江堤坝坝体电性随长江水位变化研究中,提出使用高密度电阻率法来监测堤坝隐患的发展;李明山等(2000)结合姚桥煤矿矿井找水的实例,阐述了高密度电阻率法在矿井找水中的工

作要点和应用效果;王士鹏在水文地质和工程地质中应用高密度电法,在寻找地下水、查明采空区、探测岩溶发育带和划分地层诸方面得到了应用;王玉清(2001)在高层建筑选址工作中应用高密度电阻率法,对区内浅层溶洞的平面分布情况和空间展布形态,从环境地球物理角度对工程选址及地基处理提出了合理的建议;王文州(2001)将高密度电阻率法用在高速公路高架桥岩溶地区地质勘探中。刘晓东(2001)在管线探测、物探找水、岩溶及地质灾害调查等工程物探中使用了高密度电阻率法;郭铁柱(2001)使用高密度电阻率法在某水库坝基渗漏勘查中收到了良好的效果;刘晓东(2001)将高密度电阻率法用在岩溶灾害调查中,用于划分可溶岩区、勘查基岩断裂构造、了解基岩岩溶发育情况等方面;余京洋等利用高密度电阻率法监测地下介质污染;宋洪柱等使用高密度电阻率法探测古墓,认为高密度电阻率在古墓探测中是一种简单、易行、高效的方法;周俊龙等用高密度电阻率法在红卫水库检测土石坝隐患,发现采用高密度电阻率法检测土石坝缺陷是一种成本低、效率高、确实可行的好方法;汪新凯等用高密度电阻率法探测土堤(坝)渗漏,探测渗漏在土堤(坝)中的赋存形态,结合资料分析和现场情况调查,确定渗漏部位的方法,为土堤坝的安全鉴定和除险加固提供参考;原文涛等用高密度电阻率法探测煤层采空区,以寿阳煤层采空区探测为例,说明高密度电阻率法是寻找煤层采空区的一种行之有效的手段;施龙青等(2008)应用三维高密度电法技术探测岩层富水性,通过改造测线的布置方法,改进仪器设备,开发数据采集与处理软件,提出了三维高密度电阻率法探测技术,将工作面底板富水状态直观地表现出来,并结合实例应用说明该技术的实用性和有效性。

归纳起来看,主要应用领域和解决的问题有:

(1) 水利水电工程:①堤坝探测;②水坝黏土芯墙渗漏检测;③堤坝灌注质量检测;④堤坝结构体探测;⑤水库堤防渗漏检测;⑥水库堤防裂缝检测;⑦堤防隐患探测;⑧堤防垂直防渗墙质量检测。

(2) 环境工程地质:①滑坡调查;②边坡软弱夹层调查;③冻土调查;④岩溶探测。

(3) 工程地质勘查:①基岩面调查;②隧道渗漏探测;③滑坡面调查;④断层探测。

(4) 城市工程勘查:①城市管线探测;②人防工程探测;③城市地下埋藏物探测;④路面塌陷调查。

(5) 工程质量检测:①隧道灌浆质量检测;②堤防灌浆质量检测;③煤田采空区。

1.2.5.2 国外应用

从 AGI 公司公布的资料情况看,高密度电阻率法在国外被广泛应用。如使用拖曳式电极对湖底、浅海海底电阻率分布进行研究,进行堤坝隐患探测、地下水探测、隧道开挖方案确定(尽可能寻找软土层位)、污染物侵蚀分布情况探测、岩溶探测等。

1.3 主要研究内容及技术路线

1.3.1 主要研究内容

预测、预报是防灾减灾中首要和关键的问题,采场底板突水预测预报方法的研究一直是承压水上采煤的重大课题,本书主要研究内容如下:

(1)将底板突水预测方法及水量估计方法进行合理归纳,力求选择准确、方便、可行的预测方法。

(2)将 D-S 证据理论应用到底板突水决策中,目的是使突水判断更为准确。

(3)根据总结的预测与决策底板突水的方法,开发采场底板突水判测系统。

(4)结合工程实例,按照水害防治技术要求,首先,使用物探手段进行底板含水层探测,得出含水异常区;其次,使用采场底板突水判测系统进行底板突水安全性评价;最后,结合物探与安全性评价结果,给出水害防治措施与建议。

1.3.2 研究的技术路线

1.3.2.1 理论分析

首先,对承压水上煤层底板突水影响因素进行分析;其次,基于主要影响因素,对底板突水机制进行分析,确定突水预测的基本出发点:完整底板突水机制和断裂构造底板突水机制;再者,基于两类突水机制,将底板突水类型划分为回采底板破坏型突水预测和回采影响型突水预测;最后,有针对地给出两类突水类型是否突水各自预测方法及其突水时的涌水量预测方法。

将人工智能中的 Dempster-Shafer(简称 D-S)证据理论引用到底板突水决策中进行研究,并建立突水识别框架,确定突水证据体融合模型,最终确定采场底板突水预测和 D-S 证据理论决策的二级判测系统模型与框架。

1.3.2.2 系统开发

以软件工程学作为软件开发的依据和指导,以短时间、高质量、低成本为开发软件目标。按照系统开发程序进行系统分析、系统设计,画出采场底板突水判测系统框架和流程图,使用 Visual Basic 可视化软件编写系统,最后将其打包和发布。

1.3.2.3 工程应用

在水文地质条件探查方面,首先,使用高密度电阻率法对刘庄矿 121101 工作面底板进行探测,找出可能突水的异常区(富水区);其次,在水害评价方面,结合工作面的地质和水文地质条件进行采场底板突水判测系统的底板突水判测,给出是否突水及水量大小预测结果;最后,基于物探结果和系统判测结果,给出该工作面实现安全开采的防治水方案。

1.3.2.4 突水水源判别研究

目前,突水水源判别方法种类繁多,每种方法既有其优越性,也有其局限性,如何选择合适的水源判别方法是需要不断研究的课题;开展矿井突水水源判别研究,准确判别矿井突水来源,为矿井水害防治提供理论依据与参考,为此,拟建立多种非线性突水水源判别模型,并对建立的模型的科学有效性进行验证。

2 采场底板突水预测预报

2.1 煤层底板突水影响因素分析

煤层底板突水是一种复杂的地质及采动影响现象。其突水实质是煤层下伏承压水沿采煤工作面底板隔水层岩体内部通道突破底板隔水层的阻隔,以突发、缓发或滞发的形式向上涌入工作面采空区的过程。下面就突水影响因素做归纳分析。

2.1.1 底板含水层的水压力

位于煤层底板下部的承压含水层,其压力的大小决定着底板是否会发生突水,而其富水性则决定着突水后水害的规模及对矿井的威胁程度。在煤层底板突水过程中,水压力主要表现在以下几个方面:①承压水在水压力作用下不断侵蚀、冲刷底板隔水层,渗透至上覆隔水层的构造裂隙中,降低隔水层的完整性,减弱岩体的抵抗强度,并扩大隔水层内部的裂隙,最终形成突水通道;②当底板岩层存在导水断层时,承压水会沿断层直接进入工作面采空区;③当含水层的上部岩层为透水层时,则承压水会渗透至该岩层内,形成承压水导升裂隙带,造成底板有效隔水层厚度的减小;④当含水层上部岩层为隔水层时,则承压水将作为一种静水压力作用于上覆岩层。当水压力较高或水流速较大时,承压水挤入上覆岩层中,并形成导水裂隙。

2.1.2 底板岩性及其组合特征

底板岩体强度是抑制底板突水的主要因素之一,实践及理论证明,在矿山压力、水压力、隔水层厚度一定的条件下,底板岩体强度越高,突水概率越小。但是在评价底板岩体时,不仅要考虑其强度的高低,而且要考虑其岩性、组合及隔水能力。此外,底板岩层层序排列及岩性组合对底板顺层裂隙的发育也有很大影响。

2.1.2.1 有效隔水层厚度

有效隔水层厚度是底板隔水层厚度减去底板破坏深度和承压水导升带高度。底板隔水层在带压开采中起着阻隔承压水的突出作用。因此,其阻抗水的能力(抗水压大小)是影响煤层底板突水与否的一个重要因素。煤层底板隔水层的厚度越大,其阻抗水的能力越强,这是不容置疑的。其原因除了单位厚度阻水能力叠加,厚度越大,越不利于地质构造的切穿破坏、矿山压力的垂向传递和承压水贯穿。

2.1.2.2 隔水层完整性

煤层底板隔水层的完整性也是影响底板突水的一个因素,底板隔水层越完整,底板阻抗水的能力就越强。

2.1.2.3 隔水层强度

突水机制的力学分析表明,底板隔水层中岩层能否在采动过程中被破坏,岩层中原裂隙能否扩展贯通,产生突水通道导致突水,均取决于岩层强度(包括岩层中原断裂结构面强度),底板隔水层中岩层强度越大,阻止突水通道产生的能力越强。

2.1.2.4 隔水层岩性组合

隔水层越厚越安全,但需要注意的是,在隔水层厚度相同的情况下,不同隔水层岩性组合抵抗水压的能力是不同的。在构造及水文条件、工作面几何尺寸、顶板管理方式等都相似的情况下,有些工作面突水,有些工作面就不突水,甚至突水系数小的工作面反而比突水系数大的工作面突水量还要大。这说明隔水层岩性组合对突水起相当的制约作用。

坚硬性脆的岩层,在矿山压力的作用下易产生裂隙,但不容易被水冲刷扩大。较软岩层,受力后易发生塑性变形,不易形成裂隙;就是形成裂隙,因破裂结构面碎屑物较多,裂隙的透水性也较差,但裂隙易被高压水流冲刷扩大。如果隔水层由软、硬相间的岩层组成,则能相互弥补各自的缺陷,提高岩层抗水压能力。若裂隙较发育的硬岩层在底部,易于将承压水导上来,造成突水,但突水量受其裂隙的限制。若裂隙较发育的坚硬岩层在顶部,矿山压力对底板的破坏深度必将加大,对防突水也不利。对防突水最有利的岩性组合是:顶、底都为相对较软的岩层,中间为软硬相间的岩层。

另外,底板岩层的层序排列及岩性组合对底板顺层裂隙的发育也有很大的影响。下面根据弹性力学理论将该问题分以下两种情况讨论:

(1)当煤层底板隔水层的各层岩性基本相同且厚度不等时,底板弯曲挠度与其厚度的立方成反比,所以岩层的厚度越大,挠度越小;反之,挠度越大。根据底板岩层的不同组合分三种形式:

①自上而下,底板岩层厚度逐渐增加,则各层的挠度越来越小,所以各层的弯曲相互独立,每层间均形成离层裂隙,如图 2-1 所示,这种情况对承压水体上开采最为不利。

②某一层或几层岩层厚度很小,岩层的离层裂隙将终止于较厚的岩层,其隔水能力相当于一层岩层,如图 2-2 所示,由于第 3 层岩层较厚,其弯曲挠度小于第 2 层的挠度,故产生了离层裂隙。

③自上而下,直接底板岩层逐渐变薄,则下部任一岩层产生的弯曲挠度均大于上一层,因此几层岩层像一层完整岩层一样,由于同步弯曲而不产生离层裂隙,如图 2-3 所示,这种层序最利于承压水体上开采。

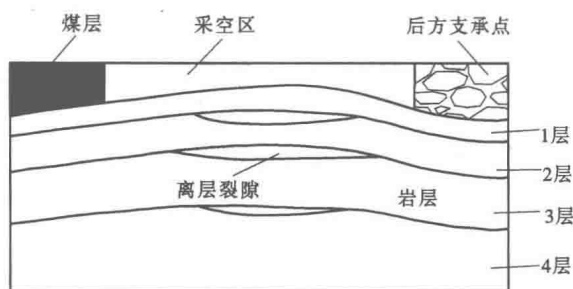


图 2-1 底板岩层厚度自上而下逐渐增厚

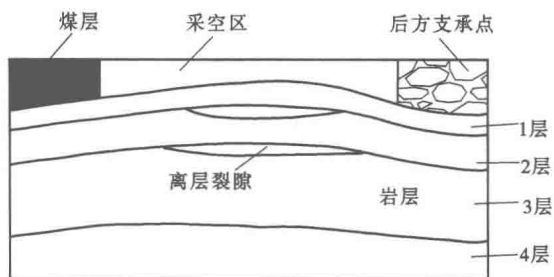


图 2-2 底板岩层第 3 层最厚