

岩溶裂隙型矿区 水害防治技术及 水资源综合利用

王心义 单智勇 编 著

煤炭工业出版社



王心义，河南理工大学教授，博士生导师。1984年毕业于武汉水利电力学院获学士学位，1987年毕业于中国农业科学院北京研究生院获硕士学位，1999年毕业于长春科技大学获博士学位，2002年从北京师范大学博士后流动站出站。主要研究方向有矿床水文地质、地热能工程和水文水资源。作为负责人或主要成员先后完成了原煤炭部年度攻关项目、煤炭科学基金、河南省自然科学基金、国家973项目、国家财政部资助技改项目、河南省重点科技攻关项目共30多项，获河南省、原煤炭部、国家安全生产监督管理局、中国煤炭协会科技进步奖共9项，出版学术专著2部，发表学术论文40多篇。



单智勇，焦作煤业集团总工程师，教授级高工。1987年毕业于中国矿业学院获学士学位，2005年毕业于河南理工大学获硕士学位。作为负责人或主要成员完成了国家财政部资助技改项目、河南省煤炭厅项目、河南省科委项目、河南省重点科技攻关项目共10多项，研究成果分别达到国际先进或国内领先水平，获河南省、国家安全生产监督管理局、中国煤炭协会科技进步奖共4项，发表学术论文10多篇，编写各种课题研究报告8部。2005年获中国煤炭工业杰出科技工作者称号，2006年分别获中国煤炭工业技术创新优秀人才称号和15届孙越崎青年科技奖。

YANRONGLIEXIXINGKUANGQU SHUIHAIFANGZHIJISHUJI SHUIZIYUANYANZONGHELIYONG

责任编辑：陈贵仁

封面设计： 雅格工作室

ISBN 978-7-5020-3309-5



9 787502 033095 >

定价：30.00 元

国家自然科学基金重点项目
“十一五”国家科技支撑计划重点项目
河南理工大学重点学科基金

联合资助

岩溶裂隙型矿区 水害防治技术及水资源综合利用

王心义 单智勇 编著

煤炭工业出版社

·北京·

内 容 提 要

该书以焦作矿区为例,系统介绍了岩溶裂隙型矿井突水水害的基本特征,矿井充水条件,可能的突水水源的探测,岩溶裂隙矿井涌水量、突水量的计算,矿井突水水源的判识,底板含水层改造技术,煤层底板含水层动水注浆技术以及其他防治水技术,矿井排水分质利用方案,以及效益评价等内容。

本书可供矿山水文地质、环境水文地质工程技术人员和矿山企业经营管理人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

岩溶裂隙型矿区水害防治技术及水资源综合利用/王心义,单智勇编
著. —北京:煤炭工业出版社,2008.11

ISBN 978-7-5020-3309-5

I. 岩… II. ①王… ②单… III. ①矿山水灾—防灾 ②裂隙水—水资源—资源利用 ③岩溶水—水资源—资源利用 IV. TD745 F641.13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 059689 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
北京京科印刷有限公司 印刷
新华书店北京发行所 发行

*
开本 787mm×1092mm^{1/16} 印张 12^{1/4}
字数 286 千字 印数 1—1,000
2008 年 11 月第 1 版 2008 年 11 月第 1 次印刷
社内编号 6114 定价 30.00 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

序

近几年来,受岩溶裂隙水理论不完善、矿井老化和部分矿井超设计能力开采、安全防护投入过低、煤炭生产体制改革后矿区水文地质工作和研究有所削弱等诸多因素的影响,矿井突水和透水事故频繁发生,水害已经成了各大水矿区发展生产的严重障碍。为最大限度地抑制煤矿水害事故的发生,保证煤炭安全生产、减少经济损失、消除不良的社会影响,实现水害防治由被动防水向主动治水的战略转变并降低因矿井大量排水而导致的环境污染程度,开展矿区水害防治技术及水资源综合利用的研究,有十分重要的意义。

华北型煤田西起贺兰山构造带、东至海岸线,南到秦岭构造带、北至阴山构造带,是我国重要的产煤基地,年产煤炭 6×10^8 t。因其储量丰富、产量大、交通便利及紧临经济发达的华东、华南地区,在我国能源工业中占有举足轻重的地位。但极其不利的是,蕴藏在煤系地层中的灰岩,特别是煤系地层下的巨厚奥陶系(或寒武系)石灰岩中的高水压岩溶水,给煤炭安全生产带来了严重的威胁和危害。具体表现为:突水淹井、经常性排水量过大和水害压煤等,严重地制约了这一类煤田中的众多煤矿区充分发挥效益,甚至造成巨大的经济损失以致人员伤亡。水害已经成了华北型煤田各矿区发展生产的严重障碍。

焦作矿区位于华北型煤田的中部,是著名的大水矿区,仅1958~1985年焦作矿区就发生突水淹井事故17次,占华北各矿区总突水次数的50%,造成直接经济损失3亿多元,底板奥灰突水点最大涌水量 $19\,200\text{ m}^3/\text{h}$,居全国前列,年排水量居全国之首,在世界上也只有匈牙利、俄罗斯等国家中的一些矿区才有如此大的涌水量,突水事故的频发严重威胁着煤矿的安全生产。焦作矿区底板临界突水系数为 $0.06 \sim 0.1\text{ MPa/m}$,计算的突水系数在 $0.071 \sim 0.142\text{ MPa/m}$ 之间,均大于临界突水系数,因此才导致近几年焦作矿区小规模突水不断发生,虽然未造成淹井事故,但一直影响着焦作矿区生产规模的扩大。

本书作者针对矿井突水可能性预测、涌水量计算和突水量预测、突水水源识别、超前探测、防治水技术和矿井水分质利用等生产中亟待解决的问题,以焦作矿区为示范点研究了以下几方面的内容:(1)在分析地质和水文地质条件的基础上,研究了焦作矿区突水水害的基本特征;(2)针对采煤巷道和工作面,利用现代物探方法探测了可能的突水水源;(3)针对岩溶裂隙水运移的实际情况,提出了基于Chezy定律的计算矿井涌水量Lagrange法和计算矿井突水量的Benoulli方程;(4)分别用水动力场法、特征组分分析法、特征曲线法、模糊聚类法、环境同位素法对突水水源进行了判识;(5)选择典型矿井,实施了浅帷幕注浆截流、疏水降压强排、底板含水层注浆改造、注浆堵水技术和工程,取得了显著的经济效益;(6)在部分矿井建立了井下水位自动监测系统,实现了水位的自动监测;(7)针对焦作东部矿井的排水水质和水量特征,按照不同部门的用水水质和水量要求,设计了合理的矿井排水处理方案和分质利用方案,建立了排供水结合示范工程。总之,本书的研究内容紧密结合生产实际,围

绕大水矿区亟待解决的问题开展工作,具有重要的实际意义;同时相关成果对指导华北型煤田其他大水矿区水害的防治也有重要的理论意义,具有较好的推广应用前景。

河南理工大学王心义教授和焦作煤业(集团)有限责任公司单志勇高级工程师是长期从事矿井水文地质研究和实践的青年学者。在原煤炭工业部的资助下,完成了年度攻关项目《基岩矿坑突水条件及突水量》及煤炭科学基金项目《裂隙水的壁间运动理论研究》研究工作,以后陆续承担了国家财政部资助的技改项目《焦作矿区煤层底板含水层注浆改造技术》、河南省科委项目《煤矿突水点井下动水注浆封堵技术研究与应用》、河南省重点科技攻关项目《大水矿区水害控制技术及水资源综合利用》及焦作煤业集团、郑州煤业集团、义马煤业集团、平顶山煤业集团委托的等 30 多个科研项目的工作。在水害防治技术及工程试验研究方面,先后在著名的焦作富水矿区开展了疏水降压、“天窗”漏斗的黄土注浆、构造断裂水的注浆截流、控放水试验、底板含水层注浆改造、煤矿突水点井下动水注浆封堵等研究工作。已完成研究成果经鉴定达国际先进水平和国内领先水平,并分别获河南省、原煤炭工业部和国家安全生产监督管理局科技进步二等奖和三等奖等多项。以已完成的研究成果为基础,在《水利学报》、《煤炭学报》、《水文地质工程地质》等核心刊物和国内外学术会议上发表相关领域学术论文 40 多篇、出版学术专著多部,具有较独到的见解和较高的理论水平;在矿井水超前探测、疏排水和注浆堵水方案设计及施工等方面积累了较丰富的实践经验,获得了一些重要的技术指标,为指导矿井水害防治奠定了理论基础。

至此本书出版之际,我向所有作者表示衷心的祝贺!同时也相信本书的有关内容对指导矿井水害防治有所帮助。

中国工程院院士 张铁岗

2008 年 5 月于平顶山

前 言

针对华北型煤田区岩溶裂隙型矿床底板水害威胁严重、压煤量大、经常性排水量过大和突水淹井频繁,在河南省科技厅的支持下,课题组以焦作煤矿区为典型,开展了《大水矿区水害控制技术及水资源综合利用》项目(编号:0323030200)的研究工作,本书以项目研究成果为基础撰写而成。

本书依据已有的资料和专门投入的检测资料,在分析地质和水文地质条件的基础上,研究了焦作矿区突水水害的基本特征;针对采煤巷道和工作面,分别利用地质雷达、瞬变电磁仪、瑞雷波仪、无线电波坑透仪、音频电透仪、直流电法等现代物探方法探测了可能的突水水源;针对以 Darcy 流为基础的孔隙介质理论或双重介质理论不完全适应岩溶裂隙水运移模拟的情况,提出了基于 Chezy 定律的计算矿井涌水量 Lagrange 法、计算矿井突水量的 Benoulli 方程;在分析顶底板含水层水化学特征的基础上,分别用水动力场法、特征组分分析法、特征曲线法、模糊聚类法、环境同位素法对突水水源进行了判识,说明了其差异程度;以九里山和演马庄矿典型,开展了浅帷幕注浆截流、疏水降压强排、底板含水层注浆改造等技术的研究;在九里山矿、演马庄矿、朱村矿、中马村矿、古汉山矿、韩王矿 6 对矿井,实施了煤层底板含水层注浆改造系统注浆堵水技术、壁后注浆堵水技术、建水闸墙堵水或建水闸墙注浆堵水技术、钻孔动水注浆堵水技术、打止浆垫注浆堵水技术等井下动水封堵突水点工程,堵水率达 92.5% 以上,取得了显著的经济效益;在演马庄矿建立了煤矿井下水位自动监测系统,实现了水位的自动监测;针对演马庄矿、中马村矿、九里山矿的矿井排水水质和水量特征,设计了合理的矿井排水处理方案,并按照不同部门的用水水质和水量要求,设计了矿井水质利用方案。

本书在水害防治方面提出了一些新观点并开展了富有成效的实践。①治水思路发生了根本性的转变。以往矿井水害治理以被动防水为主,如今通过采用含水层注浆改造及井上下联动堵水等多种水害控制技术和治理措施,把水害控制在萌芽状态,使水害治理变被动为主动。②在焦作矿区首次应用同位素技术研究了不同含水层水质的差异,为突水水源适时识别奠定了基础。③创立了井上和井下联合堵水的新思路。在地面利用大直径钻机打深孔对含水层的主要富水区域和补给通道进行注浆封堵,具有成孔快、注浆量大等优点;同时在井下利用小型钻机对较小的和分散的突水点进行封堵,具有离突水点近、命中率高、工程量小、费用低等优点,二者相辅相成,有机地结合起来,为井下突水点的封堵探索出了新的途径。④开发了以黏土水泥为主的浆液和由粗到细、由软到硬一系列的注浆骨料。⑤在注浆孔成孔工艺方面,研制开发了高压止水器、防卡钻装置和孔内岩粉捞取器等,共获得三项国家专利。⑥在井下堵水过程中为了避免浆液大量漏失,研究制造了高压骨料注入器,并获得国家专利。⑦在提高微裂隙含水层注浆量方面,首次在实验室对不同盐酸浓度对石灰岩的

溶解程度进行系统的酸溶实验,找到了最佳的石灰岩酸溶浓度,并在井下注浆孔进行试验,取得了理想的效果。⑧采用井上下联合物探技术,多方面多方位对水害进行探测,提高了水害探测精度。

全书共13章,其中第1章、第2章、第3章、第5章、第6章、第7章、第13章由河南理工大学王心义、刘小满撰写,第4章、第9章、第10章、第11章由焦作煤业(集团)有限责任公司单志勇、刘白宙撰写,第8章由王心义、单志勇、林建旺撰写,第12章由单志勇、王心义撰写。撰写过程中得到焦作煤业(集团)有限责任公司张占全高级工程师、邢文平高级工程师、郭纯高级工程师的帮助,同时北京师范大学杨建博士、煤科总院西安分院王世东博士和河南理工大学赵明坤硕士、吕东亮硕士也给予了大力的支持,在此一并表示感谢。

中国工程院院士张铁岗教授在百忙之中亲自审阅书稿并作序,提出了许多宝贵的意见,反映了学术前辈对年轻学人的关怀和技持,在此表示深深的敬意和感谢!另外,本书撰写过程中参考了很多老师、专家和同行的研究成果,参考文献中已一一列出,在此表示感谢!

本书出版得到国家自然科学基金重点项目(编号:40638040)、“十一五”国家科技支撑计划重点项目(编号:2007BAK24B04)、河南理工大学重点学科基金的联合资助。

受时间和经费的限制,书中所涉及的一些方面仅是作者的初步研究成果。由于作者水平有限,书中一定存在一些错误和缺点,敬请广大读者批评指正,深表谢意!

编 者
2008年5月

目 次

1 绪 论	(1)
1.1 我国矿井水害分区及类型	(1)
1.2 研究的必要性	(4)
1.3 国内外研究现状	(6)
1.4 存在问题	(8)
1.5 研究内容	(9)
2 焦作矿区水文地质特征及水害特征	(10)
2.1 概况	(10)
2.2 煤系地层与含水层	(10)
2.3 构造展布及其水文地质特征	(13)
2.4 区域地下水的补径排条件	(15)
2.5 焦作矿区突水特征	(16)
3 矿井充水条件	(20)
3.1 基本概念	(20)
3.2 矿井充水水源	(23)
3.3 矿井涌水通道	(30)
3.4 矿井充水强度	(35)
3.5 矿井水文地质类型	(37)
4 矿井突水水源探测	(39)
4.1 巷道探测	(39)
4.2 工作面探测	(48)
4.3 矿井探测技术的特点及存在问题	(53)
5 岩溶裂隙型矿井突水可能性预测	(55)
5.1 巷道掘进中的突水预测	(55)
5.2 工作面回采的突水预测	(56)
5.3 矿井突水预兆及应急方案	(60)
6 岩溶裂隙型矿井涌水量计算	(62)
6.1 基本数学模型	(62)
6.2 数学模型求解方法	(67)
6.3 以 Chezy 公式为基础的计算矿井涌水量方法	(68)
7 岩溶裂隙型矿井突水量计算	(73)
7.1 矿井突水量估算	(73)

7.2 以 Chezy 公式为基础的计算矿井突水量方法	(74)
8 矿井突水水源识别	(85)
8.1 水动力场法	(85)
8.2 特征组分分析法	(85)
8.3 聚类分析法	(87)
8.4 标准曲线法	(91)
8.5 同位素法	(102)
9 底板含水层改造技术	(114)
9.1 地面注浆站工程建设	(114)
9.2 输浆管路系统	(118)
9.3 底板含水层注浆改造工程设计	(120)
9.4 注浆孔的施工	(129)
9.5 底板含水层注浆	(132)
9.6 酸溶法扩大岩溶裂隙增加注浆量	(134)
9.7 注浆改造效果检验	(138)
9.8 应用实例	(138)
10 井下突水点动水注浆技术	(140)
10.1 底板含水层注浆改造注浆堵水技术	(140)
10.2 壁后注浆堵水技术	(141)
10.3 建水闸墙堵水或建水闸墙注浆堵水技术	(142)
10.4 打钻动水注浆堵水技术	(143)
10.5 打止浆垫注浆堵水技术	(144)
11 其他防治水技术	(146)
11.1 矿井防水技术	(146)
11.2 矿井探放水技术	(151)
11.3 浅帷幕注浆截流	(159)
11.4 疏水降压	(161)
11.5 井下强排水技术	(165)
11.6 井下水位自动监测系统	(166)
12 矿井排水分质回用	(169)
12.1 矿井排水来源及水质特征	(169)
12.2 矿井排水处理	(171)
12.3 城市供水及需水预测	(174)
12.4 矿井排水可利用方向	(182)
13 效益分析及结论和建议	(185)
13.1 效益分析	(185)
13.2 结论	(185)
13.3 建议	(186)
参考文献	(187)

1 绪 论

地表水、大气降水、矿井老塘水及赋存于岩体空隙中的地下水,通过一个或数个通道突然涌入井下的过程,称为矿井突水。矿井突水由于来势猛、水量大,一旦防范不力或排水能力不足,往往造成严重的经济损失以至人身伤亡事故,因此成为制约许多矿区安全生产和可持续发展的重要因素,也是我国煤矿开采中重点防治的四大地质灾害之一。

地下水埋藏深和运移复杂,以其为水源的突水最难预测和防治。因此,以地下水为突水水源的矿井突水预防与治理已成为政府和有关部门、企业亟待解决的问题,也是矿井水文地质工作者十分关注的问题。

1.1 我国矿井水害分区及类型

1.1.1 煤矿水害现状

凡影响生产、威胁采掘工作面或矿井安全、增加吨煤成本、使矿井局部或全部被淹没的矿井水,都称为矿井水害。我国不仅是世界主要产煤国,而且也是受水害危害最严重的国家之一。据新中国成立以来的资料统计,1955~1985年30a内全国统配煤矿共发生突水769次(其中老窑水198次),淹井事故218起,且有逐年增长的趋势。20世纪80年代与50年代相比,突水频率增长257%,淹井事故增长96%;突水水量方面,1956~1960年,突水涌水量 $5\sim 20\text{ m}^3/\text{min}$,个别达到 $50\text{ m}^3/\text{min}$;60年代后,突水涌水量上升到 $20\sim 40\text{ m}^3/\text{min}$,个别达到 $140\text{ m}^3/\text{min}$;70年代后,一般涌水量都在 $50\text{ m}^3/\text{min}$ 以上。80年代的开滦范各庄矿的突水淹井事故最大涌水量高达 $2\,053\text{ m}^3/\text{min}$,为有记载的世界采矿史上突水水量之最。

在突水形式方面,由断层引起的采掘工作面的突水占突水总数的80%以上。也就是说,煤矿开采的突水事故主要是由构造原因引起的,而且滞后型突水多于突发型突水,工作面回采突水多于巷道掘进突水。

煤矿突水事故所造成的经济损失也是巨大的。如我国焦作矿区,突水量在 $60\text{ m}^3/\text{min}$ 以上的重大事故就有9次之多,全矿区总排水量在 $540\text{ m}^3/\text{min}$,含水系数 $63\text{ m}^3/\text{t}$,吨煤排水成本5元,占原煤成本20%,年排水费高达2000万~2500万元,是该矿区长期处于亏损的原因之一;开滦范庄矿1984年特大突水事故造成经济损失近5亿元,损失煤炭产量近8.5Mt。据统计,目前受水害威胁的矿井222处,核定生产能力占有国有煤矿矿井总产能的48%以上。其中,受水患威胁比较严重的矿井有171处,煤炭储量有 $66.6\times 10^8\text{ t}$,占有国有煤矿总储量的18%,有51对矿井随时都有突水的可能。这种局面严重阻碍着煤炭生产和发展,影响矿井的生产接续。华北的一些主要矿区,如焦作、峰峰、邯郸、邢台、井陉、淄博、肥城、韩城等矿区,受水威胁的储量占矿井总储量的45%以上。因此,如不迅速解决水害问

题,将会出现煤炭产量下降趋势。此外,目前不少矿井已进入深部开采,有些矿井下组煤开采标高已达到 -600 m ,最深的已超过 $-1\,000\text{ m}$ 。煤层底板承受岩溶承压水的水压已达 $2.0\sim 6.5\text{ MPa}$,而下组煤层与其下伏的灰岩岩溶含水层之间的隔水层厚度一般只有 $10\sim 20\text{ m}$,最大可达 $50\sim 60\text{ m}$,突水的概率大增,淹井事故也逐年上升。由此可见,煤矿水害已成为影响煤炭安全生产的重大关键问题之一,对其进行防治工作具有现实意义和长远的意义。

1.1.2 矿井水灾分区

根据我国聚煤区的不同地质、水文地质特征,并考虑到矿井水对生产的危害程度,将我国煤矿划分为6个矿井水害区,如图1-1所示。



图1-1 中国煤矿水害分区示意图

1. 华北石炭二叠系岩溶、裂隙水害区

该区位于阴山构造带以南、昆仑秦岭构造带东段以北、贺兰构造带以东地区,属亚湿润、亚干旱气候区。该区矿井出水、突水较频繁,涌水量大或特大,常影响生产或淹井,排水费用负担巨大,采煤和矿井安全都受到严重威胁。区内中深部下组煤因受底部强含水层威胁有几百亿吨煤不能开采。

2. 华南晚二叠统岩溶水害区

位于昆仑—秦岭构造带东段以南、川滇构造带以东地区,属湿润气候区,年降水量 $1\,200\sim 2\,000\text{ mm}$ 。该区矿井出水、突水频繁,经常影响生产或淹井。突水量大($2\,700\sim 27\,000\text{ m}^3/\text{h}$),矿井正常涌水量也大($3\,000\sim 8\,000\text{ m}^3/\text{h}$),负担巨额排水电费($400\times 10^4\sim$

1 500×10⁴元/a)。地面塌陷严重,井下黄泥突出常堵塞井巷。矿井安全受到严重威胁,雨季更危险。

3. 东北侏罗系裂隙水水害区

位于阴山构造带以北地区,属湿润—亚湿润气候区,年降水量 400~800 mm。该区矿井水一般不影响生产,部分矿区受地表水和第四系松散层水的危害较重,有时造成淹井事故。

4. 西北侏罗系裂隙水水害区

位于昆仑—秦岭构造带西段以北、贺兰构造带以西地区,属干旱气候区,局部为亚干旱区,年降水量 25~100 mm。本区严重缺水,存在供水问题,仅部分地区有地表水和老窑水构成的煤矿水害。

5. 西藏—滇西中生代裂隙水水害区和台湾第三系裂隙、孔隙水水害区

该区中新生代煤田储量仅占全国储量 0.1%,水文地质条件比较简单,水害也不严重。

综上所述,我国矿井水害主要分布在华北和华南两个区,矿井水文地质条件极为复杂,水害十分严重。另外,第四系水、地表水所造成的水害,不同程度地存在于各大类型区内。其中,黄淮平原煤田(属华北水害类型区)第四系水造成水害较为严重,在煤田开采过程中流砂溃入并淹没矿井事故很多。例如,1963 年 7 月徐州新河煤矿 502 工作面突然溃入冲积层水、流砂和黄泥,淤塞巷道 1 200 m,停产 58 d。

1.1.3 矿井水害类型

造成矿井水害的水源有大气降水、地表水、地下水和老窑水。其中地下水按储水空隙特征又分为孔隙水、裂隙水和岩溶水等。由于多数矿井水害往往是由 2~3 种水源造成的,单一充水水源的矿井水害很少,故矿井水害类型是按某一种水源或某一种水源为主命名的。按水源分类,把我国矿井水害共分为地表水、老窑水、孔隙水、裂隙水和岩溶水水害五大类,其中岩溶水害又按含水层的厚度细分为薄层灰岩和厚层灰岩水害两类。

1. 地表水水害

水源是大气降水、地表水体(江河、湖泊、水库、坑塘、泥石流)。水源通过井口、采后冒裂带、岩溶塌陷坑、断层带及封闭不良钻孔充水或导水进入矿井。发生过此类水害的矿井有:因特大暴雨、山洪、泥石流冲毁工业广场,洪水从井口直接溃入井下的贵州山脚树矿;因工作面超限回采,破坏冲积层下防隔水煤柱,导致冲积层水和地表水溃入采面的江苏青山泉矿等。

2. 老窑水水害

水源是老窑、小窑、废巷及采空区积水。当巷道接近或遇到老窑积水区时,往往在短时间内涌出大量老窑水,来势凶猛,具有很大的破坏性,常造成恶性事故。如山西陵川县关山岭煤矿、江苏徐州权台矿、山东枣庄矿等,都发生过老窑水水害。

3. 孔隙水水害

水源是第三系、第四系松散层中的孔隙水。当煤层被第四纪松散含水的流砂层、砂层、砂砾层、卵石层、黏土砂层所覆盖,在开采第一水平时,煤岩柱留得不够,往往是冒落带直接进入松散层;或是松散层底部存在富水含水层,开采前水文地质情况不清,没有按含水层下回采条件留设煤柱,回采后水、砂或泥溃入井下;三是超限出煤,破坏煤岩柱或在煤岩柱中开

拓巷道、硐室,破坏了隔水煤岩柱的完整性,年久渗水,冒顶坍塌,使冲积层水或流砂、流泥溃入井下,淤塞巷道甚至造成淹井。发生此类水害的矿井有吉林舒兰煤矿、淮南孔集矿、徐州新河煤矿。

4. 裂隙水水害

水源为砂岩、砾岩等裂隙含水层的水。这种水害发生在开采北方二叠纪山西组煤层和侏罗纪煤层,以及开采南方侏罗纪的煤层中。这些煤层顶部常有厚层砂岩和砾岩,其中裂隙发育,如与上覆第四纪冲积层和下伏奥陶系含水层有水力联系时,可导致大突水事故,以及建井时期发生淹井事故。若砂岩层缺乏补给水源时,则涌水很快变小甚至疏干。发生过此类水害的矿井有徐州大黄山煤矿、韩桥煤矿等。

5. 薄层灰岩岩溶水害

水源主要是华北石炭二叠纪煤田的太原群薄层灰岩岩溶水,以河南、河北、山东、江苏居多。这些地区太原群煤层的顶底板均有薄层灰岩含水层存在,在开采中必然要揭露这些含水层并予以疏干。在一般情况下,这些含水层是可以疏干的。但是,当这些薄层灰岩含水层与地表水体发生水力联系时,或被地质构造切割、造成垂向的导水通路和横向与厚层灰岩含水层对接水力联系时,这些含水层的富水性便大大增加。因此,在具有强水源补给和接近导水通道的部位,常发生较大灾害性突水事故。典型矿井有徐州青山泉矿二号井、淮南谢一矿、肥城大封矿、新密芦沟矿等。

6. 厚层灰岩岩溶水水害

厚层灰岩岩溶水水害可分为南方型和北方型两种。南方型厚层灰岩赋存于主采煤层顶底板,几乎无隔水保护层可利用,故一旦发生溶洞突水、突泥,往往来势凶猛。此种厚层灰岩含水层岩溶系统发育与当地侵蚀基准面高低有关,其充水水源亦与大气降水和地表水系有关。位于当地侵蚀基准面以下,随深度增加,岩溶发育程度明显减弱。北方型煤田厚层灰岩主要是奥陶系灰岩含水层,一般构造正常地区均赋存于主采煤层之下。主采煤层与厚层灰岩含水层之间,常有不同厚度的煤系隔水保护层和灰岩顶面;常有一定厚度的风化残积铝土存在,亦起着隔水保护层的作用。所以,此类奥灰突水常与构造有关,常见的有四种情况:(1)断层使开采煤层与厚层灰岩对接,当巷道掘进至断层带或断层附近,断层另一侧奥灰含水层水便大量溃入矿井;(2)小断层带垂向导水裂隙使主采煤层之下的隔水保护层失去隔水作用而转化为通道,使下伏奥灰含水层水突水突入矿井;(3)个别在无构造破坏的地区也有因隔水层经采动破坏后,由于含水层水压高而发生突水;(4)奥灰岩溶陷落柱造成突水。前两种情况是常见的,约占此类水害的80%以上,后两种虽少见,但危害很大,难于预测预防。

需要说明的是,除地表水直接溃入井下和不良钻孔引起的突水水害外,其他的矿井突水水害均是突水水源通过孔隙、裂隙或溶隙突入矿井。目前,关于孔隙水水位和流量预测的理论已比较成熟。但是,对裂隙(岩溶)水,由于其复杂性,目前尚无成熟的理论预测其运移规律,因此其突水规律仍难以准确预测,一旦发生此类突水将是灾害性的。

1.2 研究的必要性

近几年来,受岩溶裂隙水理论不完善、矿井老化并超设计能力开采、安全防护投入过低、煤炭生产体制改革后矿区水文地质工作和研究有所削弱等因素的影响,矿井突水和透水事

故频繁发生。2000年以来,水害事故数、死亡(含失踪)人数分别为:2000年,3起、48人;2001年,8起、145人;2002年,17起、159人;2003年26起、269人;2004年,39起、274人;2005年,46起、452人。显然,水害事故数、死亡(含失踪)人数逐年递增,特大型突水水害时有发生。特别是2005年8月7日广东大兴煤矿特大突水事故,高峰期最大突水量竟高达 $13\,600\text{ m}^3/\text{min}$,是我国有采矿史记录以来最大的一次突水事故,死亡人数达123人,社会影响巨大。为最大限度地抑制该类事故的发生,保证煤炭安全生产、减少经济损失、消除不良的社会影响,国家及有关管理部门对煤矿水害防治的问题极为重视。

华北型煤田西起贺兰山构造带、东至海岸线,南到秦岭构造带、北至阴山构造带,是我国重要的产煤基地,年产煤炭 $6\times 10^8\text{ t}$ 。因其储量丰富、产量大、交通便利及紧邻经济发达的华东、华南地区,在我国能源工业中占有举足轻重的地位。但极其不利的是,蕴藏在煤系地层中的灰岩,特别是煤系地层下的巨厚奥陶系(或寒武系)石灰岩中的高压岩溶水,给煤炭安全生产带来了严重的威胁和危害。其具体表现为:突水淹井、经常性排水量过大和水害压煤等,严重地制约了这一类煤田中的众多煤矿的发展,甚至造成巨大的经济损失以至人员伤亡。灰岩水害已经成了华北型煤田各矿区发展生产的严重障碍。对于此类岩溶裂隙型矿区,除需防止突水造成恶性淹井事故外,过高的矿坑排水费用也增加了煤炭的成本(华北矿区吨煤排水电费达10~30元,每年排水费用需约100亿元);同时,大量矿井水的不合理抽排,不但使宝贵的岩溶水大量浪费,还常造成矿区周围城乡的严重缺水。因此,扼制矿井以岩溶地下水为突水水源的恶性突水事故及降低矿坑涌水量,已成为大水矿区亟待解决的问题。

河南省煤田位于华北型煤田南端,同样受底板灰岩水害威胁。近几年相继发生多起底板灰岩水突水水害,造成了重大的人员伤亡和经济损失。例如,2001年12月23日巩义市西村镇西洼煤矿发生透水淹井,造成15人死亡;2002年8月10日,郑州煤电集团弋湾煤矿新平井发生透水淹井,造成10人死亡;2003年9月2日洛阳市伊川县奋进煤矿黄村分矿发生突水事故,造成16人死亡;2004年4月11日郑煤集团超化煤矿发生透水事故,至今尚未恢复生产;2005年12月2日洛阳新安县寺沟煤矿突发透水,42名矿工遇难。另外,国家投资40亿元的永煤集团,目前矿井涌水量已达到矿井设计排水能力,矿井安全受到严重威胁。

焦作矿区位于华北型煤田的中部,是著名的大水矿区,主要受煤系地层下的巨厚奥陶系灰岩水威胁,自开采以来曾发生 $1.0\text{ m}^3/\text{min}$ 以上的突水511次, $10\text{ m}^3/\text{min}$ 以上的突水67次,占华北各矿区总突水次数的50%。已有的突水中发生淹采区14次、淹井事故17次,造成直接经济损失3亿多元。最大一次突水 $320\text{ m}^3/\text{min}$,居全国前列;全矿区总涌水量高达 $400\sim 500\text{ m}^3/\text{min}$,年排水总量居全国之首,在世界上也只有匈牙利、俄罗斯等国家的一些矿区才有如此大的涌水量,突水事故的频发严重威胁着煤矿的安全生产。焦作矿区底板临界突水系数为 $0.06\sim 0.1\text{ MPa/m}$,而计算突水系数在 $0.071\sim 0.142\text{ MPa/m}$ 之间,均大于临界突水系数,因此才导致近几年焦作矿区小规模突水不断发生,虽然未造成淹井事故,但一直影响着焦作矿区生产规模的扩大。另外,随着排水量的增加及电价的提高,2003年焦作煤业集团公司所属的8对生产矿井,总涌水量达 $282\text{ m}^3/\text{min}$,排水费用高达8000万元,吨煤排水电费高达20~30元,这是焦作矿区连年亏损、经济效益差的重要原因。

另外,我国又是一个水资源贫乏的国家,随着城市化和工业化进程的加快,工业用水将大幅度增长,水资源供需矛盾将更加突出。而在华北型煤矿区,人均水资源占有量不足

500 m³,为全国平均水平的 1/5~1/4,是我国严重缺水地区,也属国际上公认的水资源极度贫乏地区之一。造成这种状况的原因,一方面是严重的水资源短缺,另一方面大量的矿井排水不加以利用就排掉,无疑是资源的极大浪费,并导致环境污染。

为降低严重的底板奥灰水水害威胁,焦作矿区开展了一系列的防治水理论研究工作并采取了多项防治水措施,同时也已将疏水降压、矿井排水和城市供水结合起来。因此以焦作矿区为基地,开展突水预测理论研究、突水水源识别、防治水技术与工程、矿井水分质回用的研究,既具有坚实的工作基础,也具有重要的理论意义和实际意义。

1.3 国内外研究现状

1.3.1 矿井突水预测理论

模拟岩溶裂隙水运移规律主要有以 Darcy 定律为基础的理论 and 以 Chezy 公式为基础的理论。Barebbkatt(1960)、Warren(1963)、Streltsova(1976)、Duguid(1977)的“双重介质”模型,Dommm 和 Snow(1972)等学者提出的各向异性孔隙介质渗流模型,Wittke(1966)、Louis(1968)、Wilson 和 Witherspoon(1974)、王恩志(1991)的裂隙网络数值模型和王恩志(1991)的裂隙-孔隙渗流模型,田开铭(1987)的偏流理论等,均属于以 Darcy 定律为基础模型。Va'clav-Ha'lek 把裂隙岩石的空间结构比拟成一个管道网络,首先利用 Chezy 公式及水均衡原理来解决裂隙水流问题;孙峰根等(1994)通过大量试验证实,Chezy 公式适用于紊流状态下裂隙水的运移,并依此提出突水量预测的公式。矿井突水量的预测目前多采用以 Darcy 流为基础的孔隙介质理论或双重介质理论,而实际上矿井突水时地下水多数处于紊流状态,Darcy 流已不完全适用。因此,给定岩溶裂隙水的临界雷诺数,依据地下水流速判断其流态,选择切合实际的突水量预测模型,是突水量准确预测的关键。

1.3.2 矿井突水水源识别

目前常用的突水水源判别的方法主要有:Piper 三线图法、不同标型组分含量相关关系法、单个标型组分含量值域法、多元统计分析法、人工示踪法、Q 型群分析法、同位素法、模糊综合评判法、灰色关联度评价法、灰色聚类法、人工神经网络识别技术、灰色权距分析法、Fuzzy-Grey 决策法、多类函数聚类函数和环境同位素法等。

李世峰通过水化学常规的方法进行分析,对太行山中段奥陶系岩溶含水层地下水水化学特征进行了系统研究。葛中华运用水化学常规的方法对徐州某矿井地下水系统中的奥陶系灰岩含水层、太原组灰岩含水层、山西组砂岩裂隙含水层、第四系及煤系含水层水文地球化学特征进行了分析。成春奇、李明、汪世花等利用常规水化学特征判别突水水源取得了良好的效果。张许良等运用数量化理论,针对焦作矿区各主要含水层 35 个水样的水质资料,建立了该矿区判别突水水源的数学模型,并对新的突水水样进行了检验。在渭北地区,研究者应用水化学样品数据建立了澄合矿区、韩城矿区奥灰水和煤系水的判别函数,并结合溶解氧、氨含量及温度等指标对该两矿区的突水点水源进行了判别。李彩惠、姜长友利用模糊数学法,完成了水质快速分析与水源快速判别的计算机管理系统,对邢台矿务局所辖 5 个矿水样资料进行分析、判别,获得了满意的效果。张永泰、孙本魁等以皖北矿区为例,应用贝叶斯

准则下的多组逐步判别分析方法,判识第四系水、煤系砂岩水和灰岩水等突水水源。在邢台矿务局东庞矿,姜长友应用人工神经网络的基本原理,建立了一个对矿井水源进行判别的多层前传网络数学模型,通过实际数据的检验,取得较为理想的判别效果。高卫东等应用灰色系统关联理论,对徐州矿区董庄煤矿发生的一次突水进行了分析计算,判定突水水源为矿区老窑水。胡友彪、郑世书等根据徐州矿务局新河矿各含水层水样的常规离子浓度资料,用灰色关联度方法建立矿井突水水源判别模型,与其他方法对比其效果较好。

由于环境同位素的守恒性,地下水中稳定同位素所反映的是大气降水进入地下之前的信息,而在进入地下水后,其平均含量不会随时间而变化,借此可以推断地下水的来源、现代入渗雨水和古沉积地下水及蒸发水体的混合作用及程度。因此,许多学者应用环境同位素判别矿井突水水源,并取得不少研究成果。庄稼通过对鹤壁矿区五个主要含水层地下水环境同位素组成特征的研究,建立了主要含水层地下水的同位素鉴别标志,从而达到快速、准确判定矿井突水水源的目的。成春奇等分析百善矿区地下水含水层环境同位素组成特征,找出标型组分作为天然示踪剂判别矿井突水水源。

1.3.3 矿井防治水技术

煤矿防治水技术主要包括水文地质条件探查、底板突水和顶板溃水预报、水害治理。

1. 水文地质条件探查

水文地质条件探查是包括矿床水文地质在内的一切水文地质工作的重要基础。自 20 世纪 80 年代中期以来,随着生产发展的需要,煤矿矿床水文地质条件探查工作较以往出现了两个较大的转变:一是研究对象从大到小,即从区域、矿区到采区、工作面的转变;二是研究工作从地面到井下的转变。随着这些转变而来的是探查内容的变化和相应的技术方法的变化。这些转变和变化的重要性在于:探查工作从“宏观”到“微观”,即从面到区段到点上的变化,使人们能更精确、更深的水平和层次去研究认识问题;从井上到井下的转变,使得探查工作更具专门目的和实用性,可以直接服务于煤矿井下生产,从某种意义上来说,这是一次“质”的飞跃。到目前为止,煤矿防治水工作者在水文地质条件探测方面已积累了一些经验,形成了一些成熟的探查技术方法。这些方法可分别或配套使用于不同类型水文地质体的探查工作中。

2. 底板突水预报

底板突水预测预报一直是煤矿防治水工作的重点之一。我国从 20 世纪 60 年代就开始研究底板突水问题。30 多年来开展的研究工作主要有底板突水机理的试验与理论研究,以及研制和开发用于底板突水的预测预报技术(包括用于信息获取、信息处理及信息解译的仪器、设备及计算机软硬件技术)。

根据目前国内外学者的研究,一般都认为底板含水层的水压和保护层厚度是确定是否突水的主要原因,因此研究重点放在矿压、水压的变化及在它们联合作用下断层、裂隙等的力学性质及变形方面,即采动岩体应力场和渗流场的耦合分析。“岩水应力关系说”、“递进导升说”就是这些研究中形成的两种典型理论。两种方法已形成了各自的突水预测预报系统,并已应用于实际生产,取得了良好的效果。

“突水系数法”是 20 世纪 60 年代就提出的一种突水预测方法。七八十年代考虑到矿压、岩性组合及导升高度等因素的影响,对突水系数进行了两次修改;90 年代初期又提出了