

国家自然科学基金面上项目（51374203）资助

江苏高校优势学科建设工程资助项目资助

构造型导水通道 活化突水机理及防治技术

许进鹏 桂 辉 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press



国家一级出版社
全国百佳图书出版单位

Gouzaoxing Daoshui Tongdao
Huohua Tushui Jili Ji Fangzhi Jishu

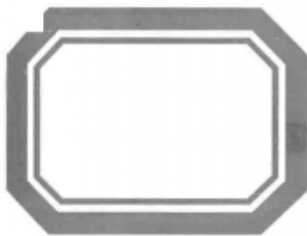
责任编辑 姜 华
封面设计 肖新生

ISBN 978-7-5646-2099-1



9 787564 620998

定价：38.00 元



国家自然科学基金面上项目（51374203）资助
江苏高校优势学科建设工程资助项目资助

构造型导水通道 活化突水机理及防治技术

许进鹏 桂 辉 著

中国矿业大学出版社

China University of Mining and Technology Press

图书在版编目(CIP)数据

构造型导水通道活化突水机理及防治技术 / 许进鹏, 桂辉著. — 徐州: 中国矿业大学出版社, 2013. 10
ISBN 978 - 7 - 5646 - 2099 - 8

I. ①构… II. ①许… ②桂… III. ①矿井突水—防治 IV. ①TD742

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 254679 号

书 名 构造型导水通道活化突水机理及防治技术
著 者 许进鹏 桂 辉
责任编辑 姜 华
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 徐州市今日彩色印刷有限公司
开 本 787×1092 1/16 印张 15.25 字数 300 千字
版次印次 2013 年 10 月第 1 版 2013 年 10 月第 1 次印刷
定 价 38.00 元

(图书出现印装质量问题,本社负责调换)



许进鹏

博士，副教授，硕士研究生导师，矿山安全评估师。

1970年出生，1994年本科毕业于中国矿业大学煤田地质系，2006年从山东科技大学获博士学位，2009年从中国矿业大学地质资源与地质工程博士后流动站出站；现为中国矿业大学教师，曾长期在生产一线从事矿井水文地质和矿井地质工作，主要从事矿井水灾害的理论及防治的研究工作。主持国家自然科学基金项目一项，负责江苏博士后基金支持课题一项，参与“十二五”国家重点支撑项目、国家自然科学基金重点项目等多项纵向项目。负责包括水害预测预报、水害监控预警、注浆堵水、放水试验、地质报告编制、水文地质补勘等横向课题30多项，参与陷落柱治理、提高上限回采等多项重大工程和科研项目。出版专著2部，以第一作者发表论文20多篇，其中SCI、EI收录5篇。获国家实用新型专利3项、发明专利1项。获省部级科技进步奖三等奖2项（均排名第二）、二等奖1项。

自序

矿井水害中,陷落柱和断层是两个极其重要的通道。陷落柱突水,以其突水量大、来势凶猛,往往导致矿井淹井而令人谈之色变;断层突水,又以其类型多样、防不胜防,让人头疼不已。

我于1994年大学毕业后到安徽省皖北矿务局任楼煤矿工作。1996年3月4日,任楼煤矿首采工作面 7_222 工作面发生陷落柱突水事故。当日下午5点左右,我和一名同事到井下测量水量,但见主石门(约6~7 m宽巷道)已成一条河流,景象十分骇人,此时突水量已达到 $11\,854\text{ m}^3/\text{h}$ 。后主泵房被淹,仓皇爬梯子间逃至地面。此情此景,现在回想令人后怕。

任楼煤矿突水后,经济损失自不必说。突水后大部分职工疏散至其他矿井,矿淹人散,景象凄凉。作为地质工作人员,更感到责任重大,心中惶惶。

所幸,任楼煤矿 7_222 陷落柱很快得到治理。全矿职工经历此次突水后防治水意识有了很大提高。1998年, 7_218 工作面机巷成功预警陷落柱突水并及时治理,避免了一次灭顶之灾。这也使我们认识到陷落柱突水也是可以预防的。

2003年,我离开工作9年的任楼煤矿到山东科技大学攻读博士学位。在宋扬教授、程久龙教授指导下开始对陷落柱突水机理开展研究。身处斗室,查资料找文献,搞模拟做计算,有时觉得豁然开朗,有时觉得迷雾重重。在似知非知的情况下,完成了博士论文,主要是对陷落柱的导水机理做了一些阐述。

2006年,我到中国矿业大学工作。在科研工作中,我开始接触到断层水害问题。2008年,我在山东省葛亭煤矿开展了断层活化导水研究。该矿断层众多,又曾有断层活化导水案例,断层突水问题严重制约着矿井的生产。为解决葛亭煤矿断层突水问题,我们开展了大量的室内试验和井下试验。从理论上对断层活化导水机理进行了分析,在实践中提出断层活化导水的监测方法,这种监测方法后来在其他矿井也得到了应用。更进一步,我们提出了断层对盘注浆治理方案(此工作还在进行中,本书没有记录)。这些工作虽不能完全解决断层突水问题,但总归是在这方面有一点点前进。

后来在其他煤矿的防治水研究工作中,我更加感到断层导水问题的重要性,也开展了相关资料收集、整理、分析和研究工作。

屈指算来,我从事矿井防治水工作近20年了。这期间大部分时间是和断层、陷落柱打交道。虽然感觉断层、陷落柱突水机理还是“雾里看花”,但即使看到的是“水中月,镜中花”,我还是觉得有必要将这朦胧认识写出来,其作用主要

在于抛砖引玉。书中如有谬误,读者可一笑置之,也可如孔子云“其不善者而改之”,更欢迎读者来函批评指正,共同探讨。

本书第二作者桂辉博士,不仅与我共同开展了断层活化导水的研究工作,在本书的编写过程中,更是付出了大量辛勤的工作。

本书的许多成果,是众多从事矿井水文地质工作者共同努力的结果。如任楼煤矿的吴玉华高工、段中稳高工、童宏树高工等对本书中陷落柱方面的内容都有重大贡献;淄博矿业集团及葛亭煤矿的孙希奎高工、马光军高工、张福成高工、张统俊高工等对本书断层水害有关方面也有重大贡献。本书中监测方法凝聚了中国矿业大学刘盛东教授大量心血。本书中所涉及的断层监测、井下试验等工作,研究生张朋、杨圣伦、路拓等付出了大量辛苦劳动。本书的断层导水的数值模拟工作主要由研究生张玉东完成。王飞等研究生参与了断层活化导水的室内试验工作。还有许多为本书作出贡献的同仁,由于人员较多,在此不再一一列出,只是发自内心地说:“谢谢你们了。”

感谢国家自然科学基金面上项目(51374203)对本书的资助,感谢江苏高校优势学科建设工程资助项目(A Project Funded by the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions)对本书资助。

书稿初成,感触很多,特写小诗一首以记之:

十年汗水十年心,
几页荒唐几页真;
倘有片言益读者,
莫谓无聊写书人。

许进鹏

2013年9月

目 录

第一编 断层突水机理及防治方法

1 绪论	1
1.1 断层水害	1
1.2 陷落柱水害	4
2 断层突水类型及影响因素	9
2.1 我国断层突水现状及特点	9
2.2 断层突水影响因素	20
2.3 断层突水类型	23
3 采动影响下断层活化导水机理	29
3.1 断层活化导水理论分析	29
3.2 断层活化导水影响因素	32
3.3 断层活化导水及突水量的演化过程	37
3.4 统计分析研究	39
3.5 断层活化导水室内试验研究	42
3.6 断层活化导水数值模拟验证	52
4 断层突水的防治方法	65
4.1 水文地质条件探查	65
4.2 留设防隔水煤(岩)柱	66
4.3 注浆加固	67
4.4 优化开采方式	69
5 断层突水的电法监测	70
5.1 含水层及断层视电阻率的影响因素	70
5.2 充水裂隙电阻率试验研究	72
5.3 断层活化导水井下电法监测试验——葛亭煤矿 F6 断层	78

5.4	工作面开采过程电阻率变化频律	99
5.5	断层活化导水时空位置及监测标准建立	101
6	断层突水及防治经典案例	103
6.1	滞后突水典型案例——开滦赵各庄矿 F _{II} 断层活化突水	103
6.2	突水量反复变化典型案例——平顶山八矿东风井井底车场 北石门突水治理	106
6.3	断层活化监测案例——济宁葛亭煤矿 2313 _{外下} 工作面现场 监测	111

第二编 陷落柱突水机理及防治方法

7	陷落柱突水概况	137
7.1	我国陷落柱分布概况	137
7.2	我国陷落柱突水现状及特点	139
8	采动影响下陷落柱活化导水机理	143
8.1	陷落柱柱体阻水性能分析	143
8.2	陷落柱柱体及其周边裂隙带应力分布研究	145
8.3	陷落柱柱体活化导水的力学判据	153
8.4	陷落柱柱体活化导水的必要条件	158
9	陷落柱周边裂隙带活化导水的力学判据	160
9.1	陷落柱周边裂隙带的成因及特征	160
9.2	陷落柱周边裂隙带活化导水的力学判据	163
9.3	陷落柱周边裂隙渗流与应力耦合作用下的水力学模型	170
9.4	陷落柱周边裂隙导水对陷落柱柱体导水的影响及二者的比较	173
10	陷落柱活化导水的数值模拟研究	176
10.1	陷落柱柱体及其周边原始应力分布的数值模拟	176
10.2	在水压力作用下的陷落柱活化导水的数值模拟	180
10.3	开采作用对陷落柱活化导水影响的数值模拟	185
10.4	陷落柱周边裂隙带应力强度因子的数值方法计算	191

11	陷落柱突水的预测、预警及防范方法	198
11.1	陷落柱探查与预测	198
11.2	陷落柱突水预警探讨	200
12	陷落柱突水的治理方法	202
12.1	注浆封堵前的探查	202
12.2	注浆封堵位置的选择	202
12.3	注浆钻孔布置及结构	205
12.4	陷落柱注浆的一些特殊技术	205
12.5	注浆效果的检验	206
13	陷落柱突水及治理的经典案例	208
13.1	采动活化突水案例——任楼煤矿 7 ₂ 22 工作面陷落柱	208
13.2	预警成功案例——任楼煤矿 7 ₂ 18 工作面陷落柱	213
13.3	治理成功案例——张集煤矿陷落柱	223
	参考文献	227

1 绪 论

矿井水害是煤矿五大自然灾害中人员伤亡仅次于瓦斯、财产损失居第一的重要灾害类型。矿井充水条件包括充水水源、充水通道和充水影响因素。其中,充水通道是水害中的关键因素。充水通道包括断层、陷落柱、采场、采动裂隙带、封闭不良钻孔等多种形式。这些通道中,又以断层引发的水害事故最多,以陷落柱引发的水害事故最为严重。

1.1 断层水害

断层是矿井充水的重要通道之一。从过去大量突水事故分析,底板突水绝大多数是与断层有着直接关系的^[1-12]。在井陘矿区,直接沿断层发生的突水占74%,断层影响带(距断层带15 m范围)内的突水占23%^[13]。在肥城矿区,与断裂构造有关的突水占72.6%,其中5次大于1 000 m³/h的突水均与断裂构造有关^[14]。

根据中国统配煤矿总公司生产局和煤炭科技情报研究所1992年编写的《煤矿水害事故典型案例汇编》^[15]和赵铁锤主编的《全国煤矿典型水害案例与防治技术》^[16]中收集的案例并参考其他文献,我们收集整理了我国因断层突水造成淹井事故的18起案例,见表1-1。

表 1-1 我国煤矿断层突水淹井事故一览表(部分)

序号	时间	地区	矿井名称	最大突水量 /(m ³ /h)	水源与通道	伤亡损失情况
1	1935. 5. 13	山东	淄博北大井	26 580	奥灰水, 断层	死亡 538 人
2	1960. 6. 4	河北	峰峰集团一矿	4 212	奥灰水, 断层	淹井, 停产 9 年 零 5 个月
3	1971. 10. 17	河南	平顶山矿务局八矿东 风井	4 300	寒武灰岩水, 断层	淹井 7 年
4	1973. 11. 29	河南	焦作矿务局冯营矿	5 082	石炭系灰岩水, 断层	淹井
5	1976. 8. 6	陕西	韩城矿务局马沟渠矿	12 000	奥灰水, 断层	淹井

续表 1-1

序号	时间	地区	矿井名称	最大突水量 /(m^3/h)	水源与通道	伤亡损失情况
6	1980.12.26	河南	鹤壁矿务局九矿	4 090	奥灰水,断层	淹井
7	1985.5.18	河南	焦作矿务局演马庄矿	19 200	石炭系灰岩水, 断层	淹井
8	1985.5.27	山东	肥城矿务局杨庄矿	4 409	奥灰水,断层	淹井
9	1985.8.6	山东	肥城矿务局陶阳矿	17 940	奥灰水,断层	淹井
10	1985.11.12	河南	焦作矿务局中马村矿	7 200	石炭系灰岩水, 断层	淹井
11	1993.1.5	山东	肥城矿务局国庄矿	32 970	奥灰水,断层	淹井
12	1995.11.5	河南	义马矿务局新安矿	4 260	奥灰水,断层	淹井
13	1995.12.3	河北	峰峰集团梧桐庄矿	34 000	奥灰水,断层	死亡 17 人,淹井
14	1996.11.24	河北	峰峰集团孙庄矿	9 000	奥灰水,小煤矿 开采断层煤柱	淹井
15	1997.5.3	河南	郑煤集团芦沟煤矿	7 680	奥灰、寒武灰岩 水,滑动构造	淹井
16	2004.9.26	河北	峰峰集团牛儿庄矿	5 160	奥灰水,相邻小 矿底板突水	淹井
17	2004.10.20	河北	邯郸武安市德胜煤矿	7 000	奥灰水,断层	死亡 29 人,淹井
18	2010.10.15	山西	大运煤业公司	1 390	奥灰水,断层	淹井

在断层突水中,又有许多是采动影响下断层活化导水。据统计,在全国范围内突水量大于 $600 \text{ m}^3/\text{h}$ 的突水案例中,导水断层引起的占 38.7%,采动断层(一般为采动作用下活化导水)引起的占 20%^[17]。例如,盐城矿务局南庄矿的韩 1 断层,开采前专门进行的抽水试验和对相邻矿井的观测都表明断层不导水,并留设了远大于《煤矿安全规程》规定的防水岩柱,但还是发生了大型滞后突水^[18]。淮南谢一矿在分析研究其出水机理过程中认为,采煤工作面顶板应力场的变化引起断层“活化”,是工作面出水的主要原因^[19]。潘西矿^[20]发生的 11 次与断层有关的突水中,只有 2 次断层直接导水,5 次是采动影响导水,4 次是断层尖灭端导水。

与一般的导水断层相比,断层活化导水更加难以防范,主要原因有:

(1) 断层活化导水由于具有较大隐蔽性,勘探工作中无法查明断层是否具有活化导水趋向,也难以对断层是否会发生活化导水进行预测;

(2) 防范断层活化导水的煤柱难以留设,如按不导水断层不留设煤柱,难以

保证矿井安全;如按导水断层留设防水煤柱,将造成大量煤炭资源无法开采。

正是由于断层活化导水致灾在矿井生产中时有发生,断层活化导水又难以防范,所以研究断层活化导水的机理具有重要现实意义。

在工作面底板突水的一些理论中,不少理论也提到了断层突水问题^[21-24]。如在下三带理论中,特别提到了在断层附近,无论是原始导升带的值还是底板破坏带的值,都较正常底板大,断层处易于突水^[25-31]。中科院地质所提出的“强渗通道”说着重强调了突水通道的作用,认为底板是否发生突水关键在于是否具备突水通道,也就是断裂构造是突水的主要原因^[32]。在关键层理论中,将完整的底板关键岩层看成是四周固支的薄板,而对于有断层的底板,则将断层看成一个自由边,形成一个三边固支一边自由的薄板模型,并解出相应的底板破断公式和断层张开度公式^[33-37]。武强教授提出的工作面底板突水的“脆弱系数法”中,将工作面底板断层作为影响工作面底板突水的一个重要因素。他还阐述了断层滞后突水的弱化机理和主要控制因素,提出了煤层底板断裂构造突水时间弱化效应的新概念^[38,39]。

也有不少学者专门研究了断层突水问题,如谭志祥^[40]利用力学平衡的原理,计算底板断层在垂向方向承受的压力,当垂向方向的压力不平衡时,可能发生突水事故,并给出了底板及断层附近是否突水的判别公式。

高延法、罗国煜^[41]等提出了底板突水的优势面理论,认为煤系地层构造是控制突水的关键因素,根据优势面理论,在众多构造中,对突水起决定性控制作用的当属优势断裂。

施龙青、尹会永^[42,43]从断层表面的切应力分析入手,认为当断层面的切应力大于断层面的抗剪强度时,断层上下盘会产生相对运动,由此得出了断层活化判据;并分析了采场断层突水的条件,说明水对断层突水的促进作用,且通过数值模拟表明,在断层附近应力集中,易发生破坏导水。

张文泉^[44]以断裂的结构为切入点,从断裂产生的裂隙、节理的角度,运用断裂力学论述了裂隙、节理的扩展和贯通是底板突水的必要通道条件,提出了“贯通性断裂结构面条件下底板突水机理”。郑纲^[45]博士也运用断裂力学理论分析了底板裂隙突水,并进行了室内试验。

周瑞光、武强等^[46]对断层带内的断层泥和糜棱岩进行了力学试验,分析了它们在不同的含水状态下的蠕变规律,提出了防突水潜能和突水潜能概念,并将其比值称为防突水比值。

刘启蒙等认为,断层突水过程存在着一个渗流转换的过程,即由突水初期的孔隙流(符合达西定律)向裂隙流和管道流的转换,从而全面揭示了高承压水上断层突水的“渗流转换”机理;并采用相应的理论对不同阶段、不同流态的突(涌)水量进行了研究,得到了三个阶段的突(涌)水量计算公式^[47]。

谢和平、于广明利用分形理论研究了断层活化问题^[48,49]。邱秀梅、王连国^[50]研究了断层采动型突水的自组织临界特征。潘岳^[51]根据 Mises 增量理论,对岩体断层破裂进行理论分析,获得了在非均匀围压下断层释放弹性能的数值表达式;此外也分析了岩石破裂时,断层围岩所施加的负载和约束的影响。

李利平、李术才^[52]考虑充填介质的压剪和拉剪双重破坏准则,引入适合描述充填介质损伤前后阶段的应力-渗流-损伤耦合方程,采用有限元数值仿真真实再现采动应力扰动和高压承压水双重作用下底板采动裂隙演化、断层介质活化直至突水通道形成的灾变演化过程,归纳出断层活化突水的 4 种典型破裂通道类型。

桂辉等^[53]通过室内及井下试验分析断层活化导水过程中的影响因素、相关参数的变化规律,室内试验验证了断层活化导水的必要条件:“地下水有效压力大于断层面的法向应力”;同时,井下试验利用网络并行电法及角位移技术对断层活化过程中的渗流及底板变形进行了监测,并总结了规律。

胡东祥^[54]对断层的导水性进行了定量研究,他依据断层的断面性质、力学性质、断距、距含水层的距离等因素对断层进行了定量赋值,根据赋值总和确定导水性不同。

实际工作中,不少技术人员已尝试对工作面底板突水和断层活化导水问题进行原位测试。如吴基文教授对断层在采动影响下导水性能的变化进行了原位测试。朱弟植、李杭杭等认为工作面底板的水压力大于地应力的最小应力值时,裂隙张开导水,并对淮北杨庄矿工作面底板进行了地应力原位测试^[55,56]。

由于断层类型的多样性、所处环境的复杂性、人类认识水平的有限性,断层突水机理方面还存在一些问题尚未解决,主要表现在断层活化导水判据的准则上,目前还没有统一而准确的标准。有人认为当断层发生错动了,就是导水了;也有人认为,只有当断层两盘间的张开度增大了,才是活化导水了;还有人认为当断层内的充填物质被冲蚀掏空了,才是断层活化导水了。因此,如何寻找一个岩体导水的标准,仍是目前需要研究的一个难题。

1.2 陷落柱水害^[57]

我国岩溶陷落柱多发育于北方石炭二叠系煤田,在山西、河北、河南、陕西、山东、江苏、安徽等 20 多个煤田中,已发现有陷落柱的煤田 45 处,陷落柱总数已接近 3 000 个。特别是山西、河北较多,以汾河沿岸及太行山东、西麓矿区最为发育,如西山、汾西、霍州、阳泉、井陉等矿区^[58],其中西山矿区已发现陷落柱 1 300 多个,密度可达到 70 个/km²^[59]。

陷落柱作为一种强导水通道,常导致奥陶系灰岩突水事故,已经造成我国矿

山多次淹井和淹工作面灾害。受灾煤矿从华北型煤田北部的开滦矿区到南部的平顶山、两淮矿区,从西部的渭北矿区到东部的肥城、淄博矿区,几乎涵盖了整个华北煤田,陷落柱突水已成为近30年来煤矿最严重的灾害之一。

在我国煤矿开采中,陷落突水次数最多、损失最大的是开滦范各庄煤矿。1983年6月3日,范各庄矿2176工作面遇到一条0.2~0.5 m落差的小断层,此断层切过陷落柱北部,奥陶系灰岩水经陷落柱通过断层突水。此次突水最大突水量 $14.08 \text{ m}^3/\text{min}$,稳定水量 $12 \text{ m}^3/\text{min}$ 。1984年6月2日10时20分,2171工作面(-313~-343 m)由于陷落柱而发生突水,18时实测涌水量 $93.5 \text{ m}^3/\text{min}$,6月3日4时45分突水点发生巨响,涌水骤增,随后淹没了整个矿井,经计算平均突水量为 $2\,053 \text{ m}^3/\text{min}$,为南非德律芳金矿突水量的5倍以上,为我国1935年淄博北大井突水量 $443 \text{ m}^3/\text{min}$ 的4.63倍,突水量之大是国内外空前的。这次突水殃及4个大矿,直接损失约5亿元,间接损失之大无法估量^[60-61]。

1996年3月4日,皖北矿务局任楼矿井在试产时,首采区的 7_222 工作面在一370 m水平处遇到一个隐状导水构造,突水量最高达 $576.17 \text{ m}^3/\text{min}$,水位上升至15.59 m才稳定,矿井受淹,直接经济损失3.5亿元^[62]。

1997年2月18日,张集煤矿-300 m太原组轨道下山掘进过程中,因陷落柱原因发生底板奥灰岩溶含水层突水,最大涌水量达 $401.6 \text{ m}^3/\text{min}$,水压3.1 MPa,致使一个年产80万t的中型矿井被淹^[63]。

2003年4月12日8:47,邢台矿业公司东庞矿二水平(-480 m)南翼的2903工作面下巷掘进至750 m处时,巷道迎头突然出现来压片帮和涌水,水势迅猛,到10:00巷道已被淹350 m,此时测算水量约为 $2\,500 \text{ m}^3/\text{h}$ 。二水平(-480 m)泵房水泵虽全部开启,到13:20二水平(-480 m)泵房进水,随即被淹。17:30副井井筒水位淹至-424 m,经测算此时突水量为 $30\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右。此后突水量继续迅猛增加,到19:00井筒水位迅速升至-351.8 m,此时最大峰值突水量达 $70\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 。19:00以后突水量开始减小,到23:30突水量减至 $7\,000 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右。4月16日16:45,一水平(-300 m)西码进水,当天17:34,一水平(-300 m)中央泵房开启第一台水泵排水,至17日9:13,11台水泵全部开启,排水量达 $4\,300 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右,但终因突水量过大,水位仍然上升,-300 m水平井底泵房进水。17日18:54,井下人员被迫撤离,矿井被淹^[64]。

2009年1月8日12时25分,峰峰集团九龙矿开采北二采区15423N野青保护层时,发生采空区底板奥灰水突出。据当时计算,最大突水量约为 $15 \text{ m}^3/\text{min}$,但随后衰减为 $7\sim 3 \text{ m}^3/\text{min}$ 。至1月11日1时40分,该工作面突水量开始逐步增大。11日6时50分,北二采区泵房6台水泵全部启动进行排水。11日10时58分,由于该工作面涌水量瞬时增大,初始突水量约 $50 \text{ m}^3/\text{min}$,8 h后水量猛增至 $120 \text{ m}^3/\text{min}$,超过了6台水泵的实际排水能力,随即北二采区泵房

电机浸水。11 日 11 时,北二采区泵房被淹,泵房人员被迫撤离^[65]。

2010 年 3 月 1 日 7 时 29 分,神华集团骆驼山基本建设煤矿 16 号煤层 870 m 水平面回风大巷掘进工作面突然大量涌水,最大突水量达 1 000 m³/min,造成该矿井被淹。

2011 年 12 月 11 日凌晨 4 时许,峰峰集团黄沙矿 1102106 工作面发生突水,最初出水量为 3~4 m³/min,及时利用水泵进行抽排。但是 12 月 14 日 9 时许,出水量突然增大,达到了 380 m³/min,致使一个年产 120 万 t 的矿井被淹。

表 1-2 我国煤矿陷落柱突水淹井事故一览表

序号	时间	地区	矿井名称	生产能力 (万 t/a)	最大突水量 (m ³ /min)	水源与通道	伤亡、损失情况
1	1965.8.25	河南	安阳铜冶矿		25.3	陷落柱	淹井
2	1967.3.29	河南	焦作李封矿		53	陷落柱	淹井
3	1984.6.2	河北	开滦范各庄矿		2 053	奥灰水,陷落柱	淹 4 井,直接经济损失 5 亿元
4	1993.1.5	山东	肥城国家庄矿		550	奥灰水,陷落柱	淹井
5	1996.3.4	安徽	皖北任楼矿		576	奥灰水,陷落柱	淹井,经济损失 3.5 亿元
6	1997.2.18	江苏	徐州张集矿	80	400	奥灰水,陷落柱	淹井
7	1999.11.25	河南	辉县吴村矿		40	陷落柱	淹采区
8	2003.4.12	河北	邢台东庞矿	240	1 167	奥灰水,陷落柱	淹井,直接经济损失 3 亿元
9	2009.1.8	河北	峰峰九龙矿	150	120	奥灰水,陷落柱	淹井
10	2010.3.1	内蒙古	神华集团乌海能源公司骆驼山矿	150	1 000	奥灰水,陷落柱	死亡 32 人,淹井
11	2011.12.11	河北	峰峰黄沙矿	120	380	奥灰水,隐伏陷落柱	淹井

关于陷落柱的研究,目前已取得以下成果:

(1) 基本上明确了陷落柱空间形态^[66-68],即陷落柱在横切面上呈圆形或椭圆形,在空间上呈柱状或圆锥状,环陷落柱周边伴生有节理和小断层,部分陷落柱顶部有空腔,柱内为松散岩石,但在压实作用下,局部层段已胶结成块。

(2) 对陷落柱的形成机理有了初步认识,确定了陷落柱是由可溶性岩溶洞发育而成,并形成了重力塌陷说、石膏溶蚀说、真空吸蚀说、热液成因说等多家学说^[69-76]。

(3) 对陷落柱的导水、突水机理进行了一定研究,分析了陷落柱柱体的阻水性能,认识了奥灰强径流对陷落柱的活化导水作用,对已充水的陷落柱在采动过

程中的突水机理进行了理论分析和数值模拟,建立了一些陷落柱突水的力学模型,得出了相应的突水判据^[77-78]。对原始状态下不导水的陷落柱在采动作用下活化导水机理进行了研究,得出了陷落柱柱体破坏突水的判据和陷落柱周边裂隙带导水的判据^[79]。

(4) 对陷落柱的分布规律进行了一些研究探讨,得出了陷落柱分布和构造与地下水径流相关的结论。

(5) 对陷落柱突水预报预警工作,个别矿井有了成功的经验。对陷落柱突水后的治理方法,主要是注浆封堵的方法,使用诸如全柱灌浆、建立止水塞、建立止水帽等多种注浆方法,已经在各突水矿井得到了较好应用。对陷落柱防水煤柱的留设做了初步分析计算,并在一些矿井有了应用^[80]。

但是,目前煤矿对陷落柱突水的防治仍然处于事后治理阶段,这是因为突水理论及防治方法研究不足,已有的理论也未能很好地推广应用。这一方面造成陷落柱突水事故仍时有发生,另一方面许多煤矿不合理地留设陷落柱保护煤柱浪费了大量煤炭资源。因此,对陷落柱导水、突水机理进行深入研究,仍是矿井防治水工作的重要任务,已有的陷落柱研究成果也有必要加以整理综合、推广应用。