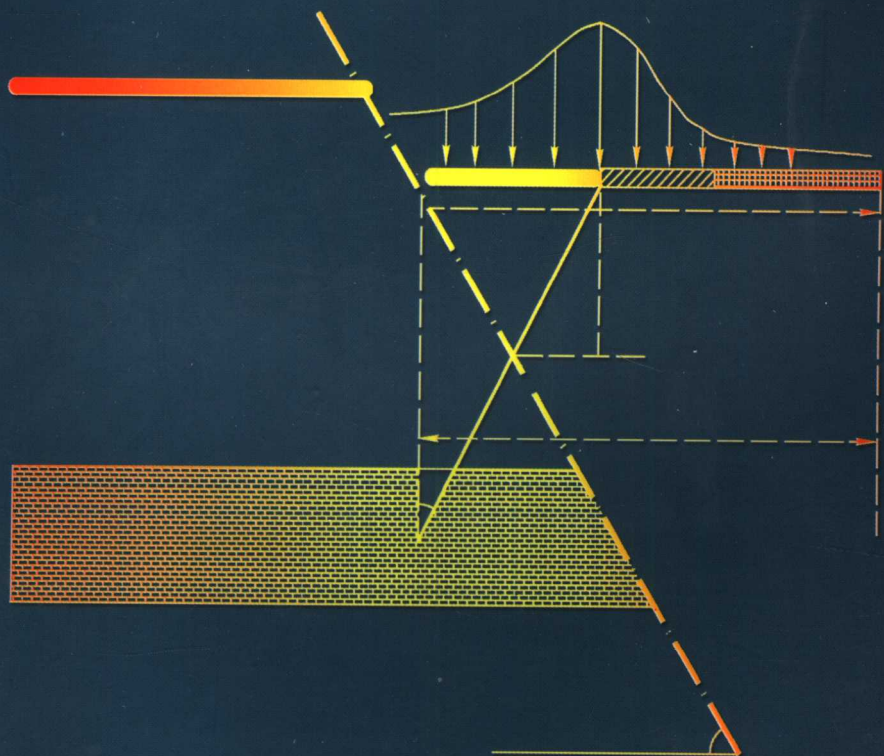


国家自然科学基金资助项目 (No.50374044)

底板突水机理及预测预报

施龙青 韩 进 著



中国矿业大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

底板突水机理及预测预报/施龙青,韩进著. —徐州:中国矿业大学出版社,2004.6

ISBN 7 - 81070 - 882 - 1

I.底... II.①施... ②韩... III.矿山突水—预测
IV.TD742

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 039080 号

书 名 底板突水机理及预测预报

著 者 施龙青 韩 进

责任编辑 朱明华

出版发行 中国矿业大学出版社

(江苏省徐州市中国矿业大学内 邮编 221008)

网 址 <http://www.cumtp.com> E-mail: cumtpvip@cumtp.com

排 版 中国矿业大学出版社排版中心

印 刷 泰安开发区成大印刷厂

经 销 新华书店

开 本 787×960 1/16 印张 12.5 字数 231 千字

版次印次 2004 年 6 月第 1 版 2004 年 6 月第 1 次印刷

印 数 1~1000 册

定 价 40.00 元

前 言

矿井水害是影响和威胁中国煤矿安全、高效生产的主要因素之一。中国煤矿井下水害种类很多,其中底板突水造成的伤亡和经济损失尤为突出。矿井突水机理的研究是水害防治工作的基础,同时也是各种预测预报方法和技术的基石。矿井水害防治技术的发展与水害预测预报准确程度依赖于突水机理研究的深度。在我国,突水机理一直是一个不断深入、不断创新的重大理论和实践研究课题。

本书是作者从事矿井水害防治工作研究成果的总结。主要特色表现在以下几个方面:① 结合实用矿山压力控制理论及几何损伤力学理论,分析了巷道掘进沟通断层型突水宏观预兆和微观预兆产生的机理。② 从“以岩层运动为中心的”实用矿山压力控制理论出发,深入地研究了采场断层在矿山压力作用下活化的力学机理。③ 深入地研究了水在断层突水中的各种作用,从结晶学角度探讨了水对岩石强度的影响机理。④ 根据采场“内、外应力场”理论,分析了采场推进过程中断层活化的规律,以及各个阶段断层突水类型的特点,分析了矿山压力对突水量的影响作用。⑤ 提出了采场底板划分的新理论——采场底板“四带”理论,即采场底板可划分为:Ⅰ矿压破坏带;Ⅱ新增损伤带;Ⅲ原始损伤带;Ⅳ原始导高带。⑥ 从水岩相互作用、断裂力学观点出发,分析了煤层底板隔水层原始导高形成的机制,提出了岩石的应力溶蚀机理。⑦ 根据采场底板应力分布特征,研究了断层突水的条件。⑧ 研究了岩石裂隙对底板高峰应力传播角的影响。⑨ 研究了滑动构造在矿井水害中的作用。⑩ 提出了底板突水预测预报的新方法。

作者在矿井水害防治研究领域得到了国内许多专家和学者的热情关怀和具体指导。如中国科学院院士宋振骥教授;山东科技大学高延法教授、魏久传教授、吕朋菊教授;中国矿业大学武强教授;山东省煤炭工业局卜昌森高级工程师;肥城矿业集团张希平、于树春、张希诚、王则才、尹万才高级工程师;新汶矿业集团孙仲辉、毛仲玉、刘同彬、景继东高级工程师;以及娄华君博士、马贺平、牛建立、王延福、李金凯等高级工程师。在此一并表示深切的感谢。同时感谢逢杰文、苏宝成为本书的出版所做的工作。由于作者水平所限,书中不当和错误之处在所难免,如蒙读者赐教,将不胜感激。

作 者

2004年2月于泰山

目 录

前言	1
1 绪论	1
1.1 中国煤矿水害现状与研究区概况	1
1.2 底板突水机理研究历史及现状	6
1.3 本书出版的目的	13
1.4 研究内容及方法	13
2 突水类型划分及突水资料的统计规律	15
2.1 突水类型的划分	15
2.2 煤矿底板突水资料的统计规律	19
3 断层突水机理	35
3.1 掘进沟通断层型突水	35
3.2 回采影响断层型突水	43
3.3 水在断层突水中的作用	55
3.4 采场断层突水条件分析	64
3.5 采场断层突水最大突水量分析	74
3.6 采场断层活化相似材料试验及有限元分析	78
4 底板破坏型突水机理	85
4.1 采场底板“四带”理论	85
4.2 底板导高形成的应力溶蚀机理	91
4.3 承压水对采场底板损伤破坏过程分析	94
4.4 底板隔水能力影响因素分析	98
4.5 底板破坏型突水相似材料模拟试验及有限元分析	103

5 滑动构造与底板突水	112
5.1 水压作用下的重力滑动构造力学分析	112
5.2 重力滑动运动的表现方式	118
5.3 滑动构造发育强度指数	122
5.4 肥城煤田滑动构造在矿井水害中的作用	124
6 采场底板突水预测预报研究	136
6.1 用突水概率指数法预测采场底板突水	136
6.2 采场底板突水预测预报应用软件的开发	146
6.3 底板突水典型案例分析及突水预测预报软件的应用	152
6.4 肥城煤田深部开采突水评价	166
参考文献	175
English Abstract	186

Contents

1	Introduction	1
1.1	Present Situation of China Mine water and General Situation of Research Area	1
1.2	History and Present Situation of the Study about Water Inrush Mechanism	6
1.3	Goal of Publishing the Book	13
1.4	Research Contents and Methods	13
2	Classification of Water Inrush Type and Statistical Law of Water Inrush Data	15
2.1	Classification of Water Inrush Type	15
2.2	Statistical Law of the Water Inrush Data of Coal Mine Floor	19
3	Mechanical Study of Water Inrush through a Fault	35
3.1	Water Inrush of Driving Passway to Colluding with a Fault Type	35
3.2	Water Inrush of Actual Mining Affecting a Fault Type	43
3.3	Water Function in Water Inrush through a Fault	55
3.4	Conditional Analysis of Water Inrush through a Fault in Working Area	64
3.5	Analysis of maximal Water Inrush Quantity through a Fault in Working Area	74
3.6	Similar Material Test and Finite Element Analysis of Fault Reactivation	78
4	Mechanical Study of Water Inrush through Damaged Floor	85
4.1	Four-zone Theory of Mining Floor	85

4.2	Stress-corrosion Mechanism Forming the Inductive Height of Pressure Water in Floor	91
4.3	Analysis of Pressure Water Damaging and Breaking Floor	94
4.4	Analysis of the Factors Affecting Water-resisting Capability of Floor	98
4.5	Similar Material Test and Finite Element Analysis of Water Inrush through Broken Floor	103
5	Gliding Structure and Water Inrush from Floor	112
5.1	Mechanical Analysis of Gravitation Gliding Structure under the of Pressure Water	112
5.2	Movement Behavior of Gravitation Gliding Structure	118
5.3	Intensity Index of Gravitation Gliding Structure	122
5.4	Influence of Gliding Structure on Water Disaster of Coal Mine in Feicheng Coal Field	124
6	Prediction of Water Inrush from Stope Floor	136
6.1	Predicting Water Inrush from Stope Floor with Water Inrush Index	136
6.2	Applicable Software Predicting Water Inrush from Stope Floor	146
6.3	Analysis of Typical Water Inrush Cases and Application of the Software Predicting Water Inrush from Stope Floor	152
6.4	Water Inrush Assessment in the Deep Mining Coal of Feicheng Coal Field	166
	Reference Documents	175
	English Abstract	186

1 绪 论

1.1 中国煤矿水害现状与研究区概况

1.1.1 中国煤矿水害现状

根据矿井突水水源划分,中国煤矿水害事故分为地表水体水害事故,占中国煤矿突水事故典型案例^[1]的4.9%;冲积层水水害事故,占1.4%;砂岩类含水层水害事故,占1.4%;灰岩类岩溶水水害事故,占92.3%。可见,防治灰岩岩溶类突水是矿井水害工作的重点。

中国具有开采价值的煤层主要集中在晚石炭世—早二叠世、晚二叠世、早侏罗世—中侏罗世、晚侏罗世—早白垩世4个聚煤期^[44-45]。据不完全统计^[22],含煤地层属晚古生代石炭二叠纪的占38%,主要集中在我国北方,通称华北型煤田;属二叠、三叠纪的占30%,主要集中在我国南方,通称华南型煤田;属中生代侏罗纪和白垩纪的占28%,主要集中在我国北方和内蒙地区,通称华北、内蒙煤田;属新生代第三纪的占4%。由于华北型的石炭系及华南型的二叠系多数形成于滨海、潮坪、泻湖等海相环境,含煤岩系中夹有厚度不一的多层碳酸盐岩,主要是石灰岩类和白云岩类。当它们的厚度大于4 m时,就很容易发育岩溶。特别是当它们通过地质构造与煤层底板厚层、巨厚层碳酸盐岩的岩溶,如华南型煤田的早二叠世的茅口灰岩(100~200 m左右)岩溶、华北型煤田的基底奥陶系灰岩(200~800 m左右)岩溶,发生水力联系时,岩溶不仅更加发育,而且岩溶水的动储量会变得十分巨大,从而使煤矿生产的安全性受到重大的水害威胁。

中国煤田经过近一个世纪的开采,多数煤层的开采已进入深层位,特别是华北型煤田,大部分矿井已经开采石炭世煤层^[3]。在中国地质历史演化过程中,华北的石炭—二叠世煤系地层绝大多数是直接沉积在奥陶系灰岩之上的,即缺失了早古生代的志留纪和晚古生代的泥盆纪地层。奥陶纪碳酸盐岩因在地表裸露约9亿年,不仅遭受到不同程度的风化剥蚀,而且发育了程度不一的岩溶。这种初期的岩溶为以后的地下岩溶的发育奠定了基础。由于石炭世煤层距奥陶系近,在构造作用下,底板灰岩的岩溶不仅发育,而且往往和奥陶系灰岩构成统一的水力系统,因此煤矿受岩溶水威胁尤为突出。据不完全统计,自1956年到

1994 年内,中国北方煤矿开采山西组与太原组煤层时,来自煤系夹层灰岩和基底中奥陶统灰岩岩溶水的底板突水 1300 余次,其中淹井 200 余次,造成的经济损失数十亿元,因水害造成的人员伤亡达数千人^{[1-4][6]}。这些矿井底板突水灾害主要来自于华北大水煤矿,包括峰峰、邯邢、渭北、开滦、肥城等矿区(图 1.1)。例如 1984 年 6 月开滦范各庄矿一次突水,突水量达 $2053 \text{ m}^3/\text{min}$,造成淹井,直接损失 5 亿元以上^[3]。目前,北方主要矿区受岩溶水威胁的煤炭储量占 150 多亿吨,如何将这些煤炭从承压水上解放出来,实现安全高效煤矿的生产,一直是中国煤炭行业的主要攻关课题之一。

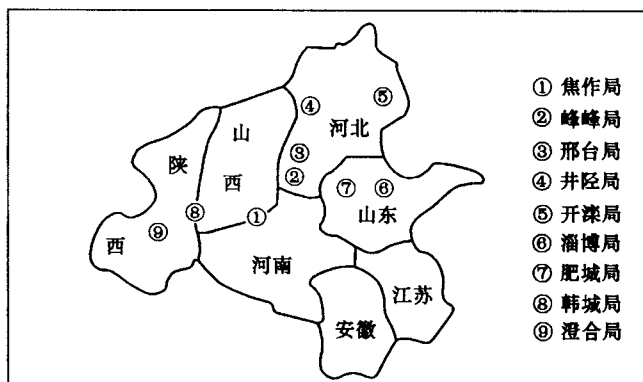


图 1.1 华北大水矿区分布示意图

Fig. 1.1 Sketch diagram of the distribution of much water-rich coal mines in North China

1.1.2 肥城煤田开采现状

1.1.2.1 肥城煤田地质概况

肥城煤田位于山东省西部肥城市境内,京沪铁路的西侧,其地理座标东经 $116^{\circ}30' \sim 117^{\circ}00'$,北纬 $36^{\circ}00' \sim 36^{\circ}20'$ 。东起肥城市老城城东,西至石横附近,走向 22 km,倾斜宽 2~5 km,其面积为 98 km^2 ,煤田有铁路支线与京沪铁路相接,公路四通八达,交通极为方便(图 1.2)。煤田内受肥城矿业(集团)公司管辖的大、中型矿井共有 8 对,从东到西分别为杨庄、曹庄、大封、陶阳、白庄、国庄、查庄和南高余矿。由地方单位经营的小型矿井共有 5 对,东部的五里坨矿,中部的兴隆矿和平阴矿,西部的隆庄矿和聊城矿(参见图 1.4)。

肥城煤田属华北型石炭二叠纪全隐蔽式煤田,含煤地层为石炭系的太原组和二叠系的山西组,煤系地层全厚 280 m,共含煤 18 层,总厚 14.86 m,可采和局部可采 12 层,总厚为 13.79 m,含煤系数为 5.3%,可采率为 92.8%。太原组含

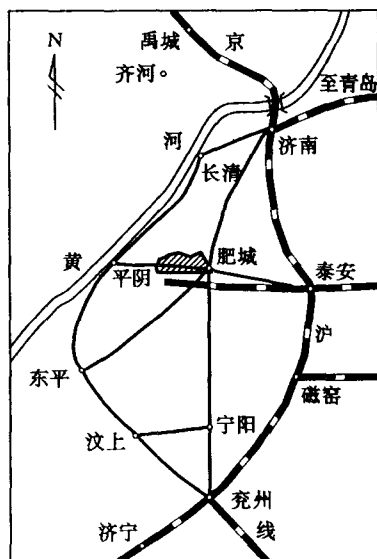


图 1.2 肥城煤田位置交通示意图

Fig. 1.2 Sketch map showing the location and communications of Feicheng coal field

煤 13 层,可采和局部可采 7 层,自上而下为 5、6、7、8、9、10₁、10₂ 煤,其中 7、8、9、10₂ 为全区可采煤层,5、6、10₁ 为局部可采煤层。山西组含煤 5 层,自上而下为 1、2、3₁、3₂、4 煤,其中 3₁ 煤全区可采,其它煤层局部可采。本区太原组地层在煤田浅部保留较为完整,而山西组地层在浅部局部地段遭受剥蚀。煤系地层的基地为太古界泰山群、寒武系和奥陶系;上覆地层为中生界的第三系和新生界的第四系(图 1.3)。

肥城煤田总体上为一单斜构造,地层的基本走向为 NEE,向北倾斜,倾角 6°~10°,煤田内构造以断裂为主,褶皱不发育,中生代断裂十分发育,大小不同的 NW、NE、NNE 和 NEE 向四组断裂纵横交错,组成网络式的构造格架(图 1.4)。在水平和铅直方向上,构造分区性与分层性十分明显。以石炭二叠系和奥陶系假整合面为主滑面的多级重力滑动构造的存在,使煤田的构造面貌更具特色和更趋复杂化^[13]。

1.1.2.2 肥城煤田水文地质概况

在区域地质环境中,肥城煤田处于鲁西肥城断陷盆地北部,四周为寒武系、奥陶系等地层构成的中低山。盆地内有季节性康王河水系。该区为半陆性气候,年平均降水量 650 mm,区域受水面积 1260 km²,其中,寒武系、奥陶系灰岩受水面积为 560 km²(图 1.5)^[7]。

地层系统			煤志层 层及名 标称 (新旧)	综 合 柱 状 1 : 2450	煤层及标志层		地层 厚度 /m	主要岩性特征	
界	系	统			厚 度 /m	间 距 /m			
新 生 界	第四系						10~120	砂质粘土, 粘土质砂砾层等。	
	第三系						363	上部 154 m 为浅灰色粉砂岩、泥岩, 灰—灰绿色砂岩, 其次为杂色泥岩, 少量的粘土岩、泥灰岩。下部紫红色—酱紫色粉砂岩, 泥岩及中细粒砂岩。	
古 生 界	二 叠 系		(1)				80~600	上部杂色粘土质粉砂质泥岩, 中细粒砂岩和杂色砾岩组成, 中夹 1~2 层杂色粘土岩或铝土岩。下部中细粒砂岩、粉砂岩、泥岩。含煤三层。其中以第三层为主, 在煤田西部可分为 2~3 个分层。	
			1(2)		0~1.41				
					0.52				18.34
			2(31上)		0~1.80				
			31(31)		0.42				8.07
			32(32)		0.74~6.84				
	石 炭 系	太 原 统			4.00		1.00	165	深灰至灰黑色粉砂岩, 泥岩为主, 间夹细粒至中粒砂岩和粘土岩, 含厚 2~6 m 的石灰岩四层, 含煤十四层, 其中可采和局部可采者七层, 全区保持稳定可采的为 7、8、9、10 ₂ 层煤。 在大封、陶阳矿交界附近有数条宽 0.25 m~1 m 的火成岩脉侵入煤系。
					0~2.60				
					0.77				
							43.95		
			4(4)		0~1.50				
					0.33		19.89		
					1.55~3.19				
			(5)		2.30				
			(6)				46.72		
			(7)						
			(8)						
			(9)		0~1.56				
			5(10)		0.42		9.90		
			二		0.80~4.20				
			6(11)		2.53		16.05		
					0~1.76				
	石 炭 系	C3			0.41			23.58	上部泥岩, 细砂岩夹两层灰岩, 底部有 G 层铝土和山西式残余铁矿。
			7(12)		0~1.93				
					1.09				
			三		3.80~7.09		20.47		
			四		5.31	0.67~2.56			
			8(13)		1.72	0.50~2.15	9.54		
			9(14)		1.24		4.51		
			101(151)		0~1.76				
			102(152)		0.60	0.84~4.83			
			11(16)		0.84				
奥 陶 系	本 溪 统 C2	五 徐家庄 六 草峰沟		5.83~12.70			±50	上部泥岩, 细砂岩夹两层灰岩, 底部有 G 层铝土和山西式残余铁矿。	
				9.37					
				0~10.00		7.08			
				2.48		7.60			
奥陶系							±800	厚层状白云质致密灰岩。	

图 1.3 肥城煤田地层综合柱状图

Fig. 1.3 Stratum columnar section of Feicheng coal field

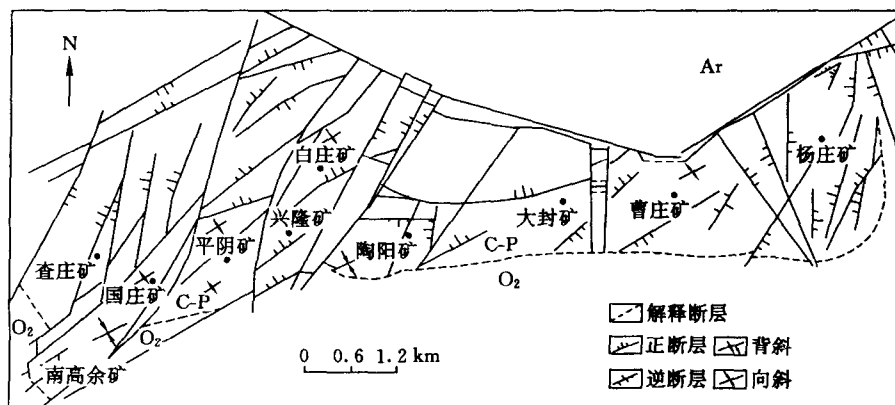


图 1.4 肥城煤田构造纲要图

Fig. 1.4 The structure outline map of Feicheng coal field

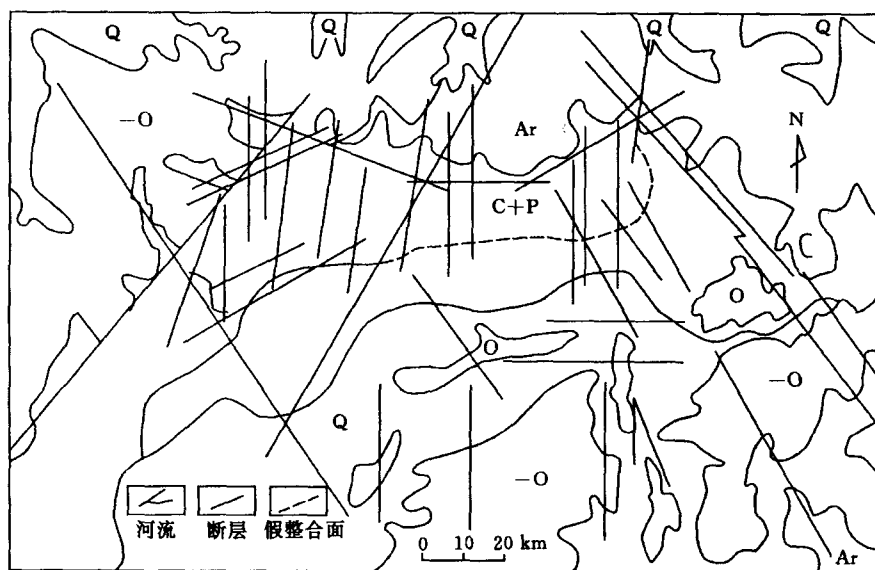


图 1.5 肥城煤田区域地质图

Fig. 1.5 The regional geological map of Feicheng coal field

煤田内主要含水层有:第四系砂砾层;山西组 3 煤顶板砂岩层;太原组一、二、四灰;本溪组五灰(徐家庄灰岩)及煤系基底的奥陶系灰岩(奥灰)。五灰和奥灰是威胁矿井安全生产的两个主要含水层。

奥灰厚约 800 m,以纯灰岩为主,在井田西部、南部均有出露,直接接受大气降水补给,水量丰富,岩溶发育,原始水位标高 +60~+65 m,现为 +32~+36 m,是煤系各含水层的主要补给水源。

五灰厚约 10 m,上距 10₂煤 20 m 左右,下距奥灰一般为 7~16 m,分布稳定,岩溶发育。由于构造原因,与奥灰水力联系十分密切,其水质特征、水位动态基本与奥灰一致,总体上两者可视为同一含水系统。五灰是开采 9、10 煤层时,矿井渗水、突水的直接充水水源。

1.1.2.3 肥城煤田水害现状

肥城矿区受岩溶水水害威胁十分严重,全局有 63% 的可采储量受水威胁。自煤田开采以来,共发生突水 200 余次,其中 98% 是属于底板突水。突水量大于 1000 m³/h 的突水 7 次,造成 6 个矿(井)被淹过。最大的一次为 1993 年元月 5 日,国庄矿-210 m 水平北大巷施工过程中,遇到隐伏的陷落柱,发生的底板奥灰水突水,突水量达 32 970 m³/h,是继开滦范各矿突水事故之后的中国采矿史上又一次罕见的特大型突水,使国庄矿及相邻南高余、隆庄矿被淹,造成了高达 11 017.9 万元的巨大经济损失^[10]。目前,肥城煤田已进入深部开采,有些矿井已开采距奥灰很近的 9、10 煤层,水害影响的严重程度日益加剧。深入地研究肥城煤田底板突水机理,正确地评价该煤田深部开采时底板突水的可能性及进行底板突水预测预报的研究,是肥城煤田防治水工作的主要研究课题之一。

1.2 底板突水机理研究历史及现状

1.2.1 国外

尽管岩溶地层的分布面积占世界大陆面积的四分之一,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,在煤矿开发中都程度不同地受到底板岩溶水的影响^{[24][53][115-125]}。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 年代至 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^[24]。

在这期间前苏联学者 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:

$$H_{\text{理安}} = 2K_{pt}^2/L^2 + \gamma t/10^6 \quad (1.1)$$

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

K_p ——隔水层的抗拉强度,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/m³。

当实际水压 $H_{\text{实}} > H_{\text{理安}}$ 时,底板隔水层就会产生失稳破坏,从而导致底板突水^{[53][4]}。

20 世纪 60 年代至 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》,并对不同矿井条件作了规定和说明。前苏联和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^{[22][24]}。

20 世纪 70 年代至 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。其中最具有代表性的是 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。

1.2.2 国内

我国在底板突水规律研究方面起始于 20 世纪 60 年代,当时注意到匈牙利保护层理论在实践中的应用,提出突水系数概念。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、山东矿业学院及煤炭科学研究总院特采所为代表,在该方面的研究不仅具有各自独特的理论,而且具有一个完整的研究梯队。从资料^{[4-5][21-22][25-29][56-57][63-91][113-115]}可以看出,目前,我国防治水的研究工作处于世界领先地位。

20 世纪 60 年代至 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。突水系数就是单位隔水层所能承受的极限水压值,即:

$$T_S = P/M \quad (1.2)$$

式中 T_S ——突水系数;

P ——含水层水压,MPa;

M ——隔水层厚度,m。

这里的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 年代至 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。因此西安分院水文所对突水系数的表达式经过两次修改后确定为:

$$T_S = P/(\sum M_i a_i - C_p) \quad (1.3)$$

式中 M_i ——隔水层第 i 分层厚度,m;

a_i ——隔水层第 i 分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的日趋严重,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。

1.2.2.1 “下三带”理论

“下三带”的理论观点最早是由山东科技大学(原山东矿业学院)、井陘矿务局、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,最后由山东科技大学的一批科研人员,如荆自刚、李白英、孙振鹏、高航等上升到一定理论高度。

该理论^{[21][64]}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。各带的含义分述如下。

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岩层带。该带的厚度即为“底板破坏深度”。底板破坏带包含有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,并给出了经验公式:

$$h_1 = 1.86 + 0.11L \quad (1.4)$$

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”中的下部影响带以及未变形部分,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。其厚度由下列公式得到:

$$h_2 = h - (h_1 + h_3) \quad (1.5)$$

式中 h 、 h_1 、 h_2 、 h_3 ——分别为隔水层底板总厚度、Ⅰ带厚度、Ⅱ带厚度、Ⅲ带厚度。

当 $h > h_1 + h_3$ 时,则保护层存在;

当 $h \leq h_1 + h_3$ 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。

“下三带”理论比较符合煤层采动条件下底板破坏、突水的规律,以及底板的阻水性能的组成,在生产实践及科研中得到了较为广泛的应用,但在理论上,其研究尚有待于深入。应该在考虑煤层底板原始损伤的基础上,结合“以岩层运动为中心”的实用矿山压力控制理论,确定出 h_1 的理论计算公式。对于承压水导高带的形成的力学机理应从水岩相互作用方面做进一步研究。保护层阻水能力评价需考虑损伤的影响。

1.2.2.2 原位张裂与零位破坏理论

煤炭科学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^{[24][53]}。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Ⅰ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。张裂隙发生在煤层底板的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,在接Ⅱ段处处于稳定。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卸压,围岩的贮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 $+3\text{ m} \sim -5\text{ m}$ 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。

“原位张裂与零位破坏”理论仅仅从矿山压力及承压水压力角度,解释了煤层开采过程中的底板破坏过程,并没有从本质上简明地说明突水发生的机理,而且也没有考虑底板岩体构造特征对岩体力学特性损伤的影响,现场人员极少应用。

1.2.2.3 板模型理论

煤科总院北京开采所刘天泉,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的分布的弹性能,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^[25]。而对隔水带的处理是将其看作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分别得到了的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的破坏规律,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。然后模型的后半部分对隔水带的处理不仅在理论上立足点不对,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该条件的。其次,模型中认为煤层底板除了采动导水裂隙带,剩余的岩层便是隔水带,与现实不符^[53]。因此,这种模型在实际生产中很难推广和应用。

1.2.2.4 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层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^{[53][80]}。所谓的关键层,是指底板中含水层以上承载能力最高的一层岩层^[78]。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。这种理论显然是希望把研究覆岩运动的方法应用于底板突