

原始地应力与煤层底板突水的关系*

李家祥¹ 李大普² 张文泉¹ 刘伟韬¹

(¹山东矿业学院科研处 泰安 271019) (²泰安煤炭局 泰安 271000)

摘要 以某深部矿井水压致裂应力测量资料为依据,分析了煤层底板岩体在矿山压力和原始地应力的联合作用下,在阻抗水能力方面的变化。探讨了隔水层带的阻水机理及构造破碎带易于突水的原因。分析了地应力、水压与裂缝扩展的关系,得出了原始地应力与煤层底板突水之间的关系。

关键词 地应力, 矿山压力, 底板突水, 水压致裂

分类号 TD322.3

1 引言

煤层底板突水严重影响着矿井的安全生产,对于煤层底板突水的研究,已有许多论著,并已得出了水量和水压是突水的前提条件,地质构造是突水的主因及控制因素,采矿活动是突水的诱导和触发因素,隔水层强度是阻抗突水的主要因素等结论。但是,对地应力与底板突水的关系研究较少,本文将利用水压致裂理论,对地应力与底板突水的关系及隔水层的阻水机理进行探讨,并分析断裂破碎带易于突水的原因。

2 水压致裂法基本理论

假定岩石是均质、线弹性、各向同性的,注入的液体在岩石空隙中流动时遵循达西定律,岩石中有一个主应力方向与钻孔轴平行。则水压致裂的力学模型可简化为一个平面问题,相当于两个主应力 σ_1 (最大主应力)和 σ_2 (最小主应力)作用在一半径为 a 的圆孔的无限大平板上,据弹性力学分析圆孔外任一点 M 处的应力为

$$\begin{aligned} r = & [(\sigma_1 + \sigma_2) / 2] [1 - (a^2 / r^2)] + \\ & [(\sigma_1 - \sigma_2) / 2] \cos [1 - (4 a^2 / r^2) + (3 a^4 / r^4)] \\ \theta = & [(\sigma_1 + \sigma_2) / 2] [1 + (a^2 / r^2)] - \\ & [(\sigma_1 - \sigma_2) / 2] \cos [1 + (3 a^4 / r^4)] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} r = & - \quad r = \\ - & [(\sigma_1 - \sigma_2) / 2] \sin 2 [1 + (2 a^2 / r^2) - (3 a^4 / r^4)] \end{aligned} \quad (1)$$

式中: r 为 M 点径向应力; θ 为切向应力; r , θ 为剪应力; r 为 M 点到圆孔中心的距离。当 $r = a$ 时,即为圆孔壁上的应力状态,由式(1)可得出如图1所示的孔壁 A , B 两点的应力集中分别为

$$\sigma_A = 3 \sigma_2 - \sigma_1 \quad (2)$$

$$\sigma_B = 3 \sigma_1 - \sigma_2 \quad (3)$$

使孔壁产生张性破裂的外加液压 P_c 称为临界破裂压力。临界破裂压力等于孔壁破裂处的应力集中加上岩石的抗张强度 T 再减去岩石中的孔隙压力 P_0 ,即

$$P_c = 3 \sigma_2 - \sigma_1 + T - P_0 \quad (4)$$

孔壁破裂后,若继续注液增压,则裂缝将向纵深扩展。若停止注液增压,并保持压裂回路密闭,则裂缝立即停止延伸,趋于闭合。当达到刚刚保持裂缝张开时的平衡压力叫做瞬时关闭压力 P_s ,它等于垂直于裂缝面的最小主应力,即

$$P_s = \sigma_2 \quad (5)$$

如果再次对封隔段注液加压,使破裂重新张开,则可得到裂缝重新张开的压力 P_r 。由于这时岩石已经破裂,所以抗张强度 $T = 0$,由式(4)得

$$P_r = 3 \sigma_2 - \sigma_1 - P_0 \quad (6)$$

由式(4), (6)可得岩石的抗张强度 T 为

$$T = P_c - P_r \quad (7)$$

由式(5), (6)可得最大水平主应力 σ_1 为

1997年3月2日收到初稿,1998年5月27日收到修改稿。

* 国家自然科学基金(5967400)和山东省自然科学基金(Y97E06083)资助项目。

作者 李家祥 简介:男,37岁,硕士,1982年毕业于山东矿业学院采矿工程系采矿工程专业,现任副教授,主要从事矿井特殊开采方面的研究工作。

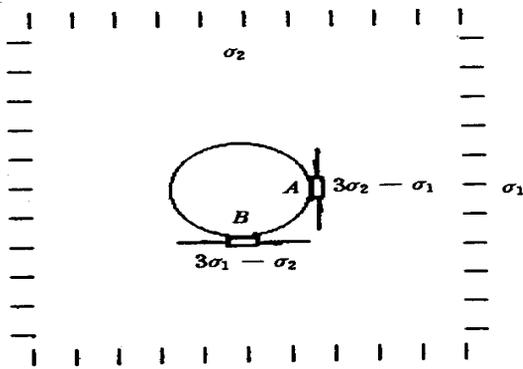


图 1 圆孔壁上的应力集中

Fig. 1 Stress concentrations at the holewall

$$\sigma_1 = 3 P_s - P_r - P_0 \quad (8)$$

铅直应力可据上覆岩石的重力计算,即

$$\sigma_v = \rho g H \quad (9)$$

式中: ρ 为岩石的密度, g 为重力加速度, H 为深度。

3 水压致裂观测数据

3.1 水压致裂观测数据

水压致裂现场位于某矿井下石门巷道内,在巷道底板向下打了 3 个垂直孔,孔径 89 mm,各孔深度分别为: 1 号孔 33 m, 2 号孔 20.3 m, 3 号孔 50.3 m。岩层倾角 $\alpha = 40^\circ$,局部裂隙发育,岩石试件抗压强度为 45.34 ~ 201.27 MPa,弹性模量为 $2.6 \times 10^4 \sim 5.6 \times 10^4$ MPa, 3 个孔共分 7 段压裂,压裂的岩性有泥岩、粉砂岩、中砂岩和铝土岩。

3.2 数据处理

将所测各点的 P_c, P_s, P_r, P_0 及测点附近岩石的平均密度 $\rho = 2.4 \text{ g/cm}^3$ 输入计算机,得出计算结果如表 1 所示,并自动绘出各测孔主应力与深度的关系曲线,见图 2, 3。图 4 ~ 6 为现场压裂曲线及印

模。

4 地应力与煤层底板突水的关系

4.1 承压水沿底板裂缝上升机制及地应力与裂缝扩展的关系

根据水力压裂的力学原理,当裂缝形成后,只要有足够的压裂液及能使裂缝张开并延伸的压力,那么裂缝就会沿着阻力最小的方向延伸。但当岩石是各向同性的、均匀的,那么裂缝就会一直发展下去,直到遇到界面,然后据界面的性质或下一岩层的性质决定裂缝能否发展下去。

考虑到具有原始裂隙的岩层,设在承压水的作用下使裂缝重新张开并得到延伸的最小压力为 P ,据水力压裂理论,应有 $P > P_s$,即欲使裂缝得到延伸,必须有一个能够克服最小主应力的缝内压力才行。但裂缝扩展所需的缝内压力除了取决于最小主应力外,还与裂缝的类型、尺寸以及岩层的性质有关。

根据文[1]的研究表明,当上层岩层中的弹性模

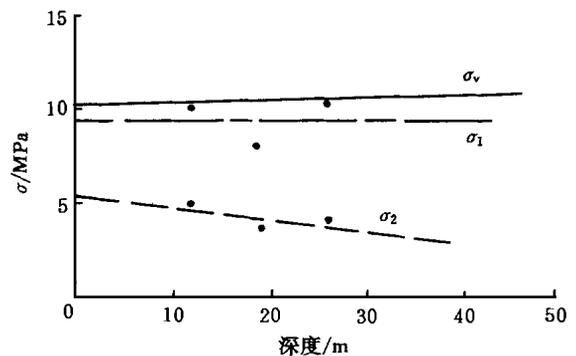


图 2 1 号孔主应力随深度的变化

Fig. 2 The curves of principal stresses varying with depth of hole No. 1

表 1 现场水力压裂应力测量结果

Table 1 The stress results measured by hydrofracturing method

孔号	压裂深度 / m	岩性	P_c / MPa	P_s / MPa	P_r / MPa	P_0 / MPa	H / MPa	h / MPa	σ_v / MPa	T / MPa	H_{max} / MPa	H 方向
1 #	12	泥岩	12.62	5.12	5.06	0.12	10.18	5.12	10.48	7.50	2.53	
	19	细砂岩	10.44	4.07	3.94	0.19	8.08	4.07	10.64	6.50	2.01	
	26	铝土岩	4.98	4.26	2.26	0.26	10.26	4.26	10.81	2.63	3.00	
2 #	19	粉砂岩	7.69	4.31	4.56	0.19	8.18	4.31	10.64	3.13	1.94	N87 度
	19	中砂岩	13.44	4.56	4.56	0.19	8.93	4.56	10.64	8.88	2.19	N87 度
3 #	37	细砂岩		6.00	3.12	0.37	14.50	6.00	11.07		4.25	N87 度
	42	粉砂岩		8.17	9.17	0.42	14.90	8.17	11.19		3.37	

注: 表中所列深度为压裂中心点至巷道底板的深度。巷道底板至地表深 434 m。 H_{max} 为最大水平剪应力。

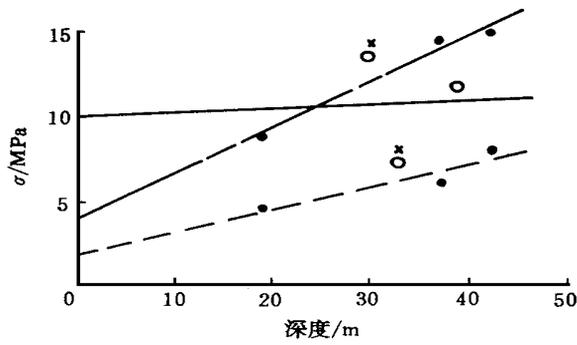


图 3 3 号孔主应力随深度的变化
Fig. 3 The curves of principal stresses varying with depth of hole No. 3

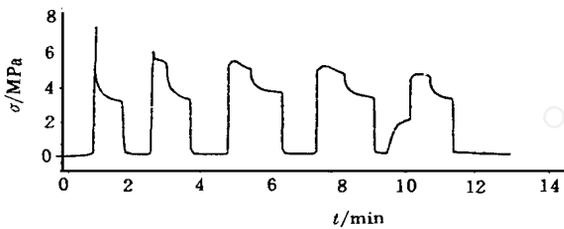


图 4 2 号孔 19 m 段应力-时间记录曲线
Fig. 4 The stress-time recording curve (depth: 19 m, hole: 2)

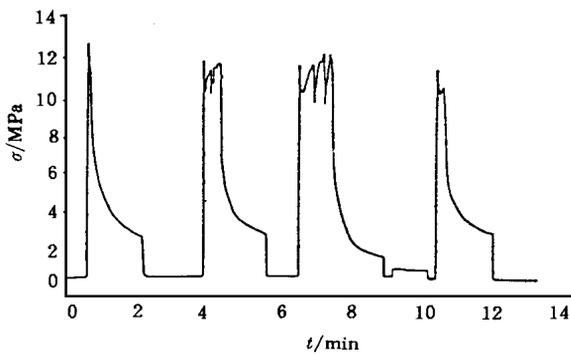


图 5 3 号孔 19 m 段应力-时间记录曲线
Fig. 5 The stress-time recording curve (depth: 19 m, hole: 3)

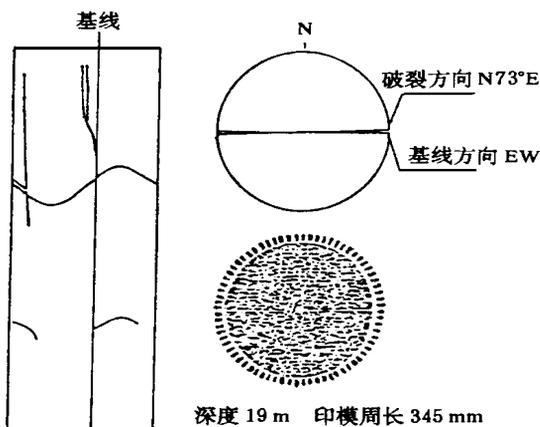


图 6 2 号孔印模图
Fig. 6 The mark of hole No. 2

量 (E_2) 比下层岩层的弹性模量 (E_1) 小得多时, 则在下层岩层中的裂缝愈接近于界面愈易扩展, 最后穿过界面延伸到上一岩层中; 反之, 当上一岩层的弹性模量 (E_2) 比下一岩层的弹性模量 (E_1) 大得多时, 则上一岩层要对下一岩层中的裂缝的扩展起着阻挡作用, 最终使裂缝终止于界面上。

文[7]的研究表明, 岩层界面的性质与裂缝的扩展有很大关系, 弱的界面能阻止裂缝的扩展, 迫使压裂液沿界面扩展而不论界面两边岩层的相对性质如何。联结强的界面最终能使裂缝穿过界面而延伸进弹性模量较小的岩层。然而, 如果在岩层中接近界面处含有天然裂隙, 不论这些裂隙是否与界面连通, 都将使该岩层减小对裂缝延伸的阻挡作用。

下面考虑承压水上升至界面后的情形。可分为 2 种情况: (1) 是裂缝穿过界面继续向上一岩层发展, 使裂缝在上一岩层也得到延伸。其条件是: 水压变化不大, 水量充足, 界面联结强, 上一岩层的弹性模量 (E_2) 小于下一岩层的弹性模量 (E_1), 或者是在上一岩层中接近界面处有裂缝。(2) 承压水不能继续上升。它的条件是: 界面联结弱, 或上一岩层的弹性模量 E_2 大于下一岩层的弹性模量 E_1 , 在界面处没有裂隙, 或水头损失大, 不足以克服最小主应力。在生产实际中由于在界面处不可能没有任何裂隙, 所以只有水压降低到最小主应力以下, 或水压原本就远小于最小主应力, 才能有效地阻止承压水的上升。

4.2 隔水层带的阻水原理

综上所述, 隔水层带主要是依靠其本身的厚度和强度在地应力的帮助下有效地抵抗承压水的突出。只有在隔水层带具有一定的厚度之后, 才有可能使裂隙不连通。这样在地应力的帮助下阻止承压水的上升。有了一定的厚度后, 水对岩层的长期溶蚀作用也不是很可怕的。隔水层带的强度主要是防止由于强大的矿压和水压联合作用将底板剪切破坏。由于岩层的抗张强度较小, 所以只有在地应力的作用下, 才能有效地阻止承压水对裂缝的扩展和延伸, 地应力越大对阻止底板突出越有利。但是事物总是一分为二的, 有它有利的一面, 就必然有它不利的一面。如果底板较薄, 煤层开采后, 在采空区内就会形成周围固支的薄形板, 在强大的地应力作用下, 就有可能产生底鼓、剪切及张裂而突水, 并造成巷道的变形和破坏。在此情况下, 地应力又成了有利于突水的附加因素。据文[2, 3]的研究, 当隔水层带的厚度大于其矿山压力对工作面底板岩体的影响深度时, 则地应力将有利于阻止煤层底板的突水。

设隔水层带的厚度为 h , 采空区底板应力降低区内的最小平面跨度为 L , 则当 $h/L < 1/5$ 时, 隔水层带变成了薄板^[4], 这时地应力的增大将有利于煤

层底板的突水。

有些矿区在地震后，涌水量大增，突水次数明显上升^[5]。其原因是地震后，地应力释放，使地应力值减小^[6]，特别是断裂带中，地应力降低幅度很大，这样在震前不出水的，震后在同样条件下就有可能出水。

4.3 断裂构造区内的突水机理

断裂构造区内易于突水的主要原因有以下 2 点：

(1) 当煤层底板有断裂带或隐伏断裂带时，文 [6, 7] 的研究表明，断裂带附近最大主应力方向在区域地质构造作用控制下，随着断裂产状的不同，与区域构造场的最大主应力方向有着不同程度的偏离，而断裂带附近的 3 个主应力的大小，随着断裂产状的不同，与区域构造场的主应力也有所不同。对于自重应力，一般是随着断裂的存在而减小，其张扭性断裂程度比压扭性断裂程度要大。张扭性断裂一般减小约 1 倍，而压扭性断裂则减小 5 % 左右。对于水平应力，随着断裂带的产状不同有增减作用。对张扭性断裂呈消减作用，对压扭性断裂呈增加作用。消减的幅度变化很大，一般为 40 % ~ 60 %，有的甚至在某一方向上由压应力变为张应力。增加的幅度变化也很大，有的只增加 5 %，有的增大至原先的 2 ~ 3 倍。由于断裂带中地应力值降低，使得承压水的压力有可能大于最小主应力而开裂断裂带中的裂缝，使承压水向上导升而突水。

(2) 断裂带内裂隙发育，岩体破碎，给承压水的

导升和断裂带内裂隙的开裂制造了有利条件。而断裂带中的充填物多为胶结不够紧密的泥质、炭质胶结，在承压水的长期作用下被软化、掏空和侵蚀，形成较高的原始导高，从而降低了隔水层的厚度，给突水造成了有利条件。

以上两个原因是断裂构造区容易突水的最重要的原因。

4.4 岩层不同组合对底板岩体阻水能力的影响

表 2 是室内试验用的岩样物质组成及力学性质鉴定表。表 3 是岩样室内水力压裂试验结果表。

从表 2 和表 3，可以分析出如下结论：

(1) 岩性不同，其阻抗压力水致裂的能力则不同，差异程度与岩石组成成分，颗粒度及胶结物都有密切关系。

表 2 岩样物质组成及力学性质鉴定表

Table 2 The determinate results of rock specimen compositions of material and mechanical properties

岩样	组成成分	胶结物	抗压强度 / MPa	弹性模量 / 10 ⁴ MPa
细砂岩	主要成分为石英 少量植物化石	泥质、 炭质胶结	73.38	3.2
粉砂岩	主要成分为石英 少量杂质	钙质胶结	115.16	4.0
中砂岩	主要成分为石英，少 量长石，部分硅质岩屑	钙质胶结	201.27	5.0

表 3 岩样室内水力压裂试验结果

Table 3 Test results of hydraulic fracture in laboratory

岩样	试验次数	浸水时间 / h	岩石抗裂强度 / MPa				岩样尺度	岩样形状
			最小	最大	平均	下降率 / %		
细砂岩	干	2	5.15	5.39	5.27		70 × 80	断面曲折
	湿	2	2.70	3.19	2.95	47.5	70 × 80	断面曲折
粉砂岩	干	3	15.44	16.42	15.93		70 × 80	呈不同形状断裂
	湿	3	5.88	13.23	9.56	40	70 × 80	
中砂岩	干	4	23.03	27.44	25.24		70 × 100	断面曲折
	湿	1	17.64	17.64	17.64	30	70 × 80	压裂断面平坦
							70 × 80	压裂断面平坦、曲折

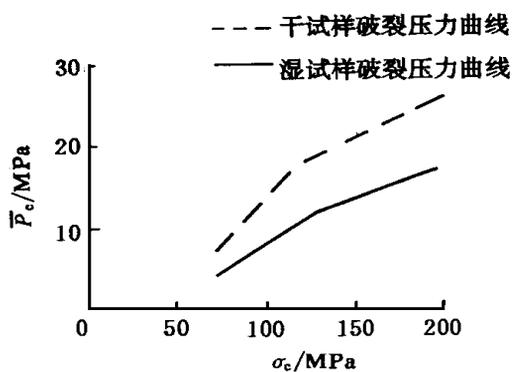
(2) 岩石遇水发生软化，抗破裂能力下降(图 7)，且越软弱的岩石其软化程度越大(图 8)。从断裂形态来看，浸水试样的压裂断面更加曲折不规则，这说明压力水不仅具有力学特征，而且具有软化溶蚀作用，其软化溶蚀是从岩层内薄弱部位开始并改变了岩石结构，从而使弱断面曲折不规则，破裂压力降低。

(3) 参考海姆森、拉松和丹尼斯研究的裂缝扩展与上下岩层弹性模量及岩层界面的关系^[1]以及以

上的一些研究成果，不难得出较优的阻止煤层底板突水的岩层组合形式：即位于承压含水层上的应是 E_t 较大的硬岩层，硬岩层之上是软岩，再上是硬岩，这样交替组合，形成对承压水的上升有较强的阻挡作用的底板岩体组合形式。

5 结 论

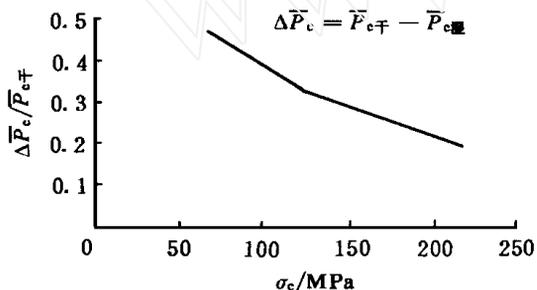
当煤层底板隔水层带较厚时，地应力的增大会有



注: \bar{P}_c —— 平均破裂压力; σ_c —— 岩石抗压强度

图 7 岩样破裂压力曲线

Fig. 7 The fracturing pressure curves of rock test block



注: $\bar{P}_{c干}$ —— 干试样平均破裂压力;
 $\bar{P}_{c湿}$ —— 湿试样平均破裂压力

图 8 岩样浸水后破裂压力降低曲线

Fig. 8 The fracturing pressure reduced curves of rock because of wetting

利于阻止承压水的上升, 而当隔水层带为薄板时, 地应力的增大有利于底板水的突出。决定煤层底板阻水能力的 3 个主要因素是: 隔水层带的厚度、强度和原始地应力。岩层组合形式也是较为重要的因素。

断裂破碎带容易突水的原因是岩体破碎且地应力值降低以及带中充填物易受承压水的掏空和侵蚀造成的。岩石的组成成分及胶结物与其破裂压力密切相关。压力水对岩石不仅具有力学作用, 而且具有软化溶蚀作用。

参 考 文 献

- 1 Haimson M E, Shaffer R J. Some results from continuous mechanics analyses of the hydraulic fracturing process. SPE, 1979
- 2 张文彬. 采煤工作面推进过程中采场围岩的应力分布. 岩石力学与工程学报, 1987, 6(2): 165 ~ 174
- 3 任德惠, 陶连金. 开采层底板应力的有限元分析. 煤炭科学技术, 1988, (9): 6 ~ 9
- 4 黄克智, 夏之熙. 板壳理论. 北京: 清华大学出版社, 1987
- 5 李白英, 沈光寒, 荆自刚. 预防底板突水的理论与实践. 见: 第二十二届国际采矿安全会议论文集. 北京: 煤炭工业出版社, 1987
- 6 季方全, 孙世宗, 季立球. 华北及郑庐断裂带地应力测量. 岩石力学与工程学报, 1982, 1(1): 73 ~ 86
- 7 马启超. 龙羊峡水电站坝区断裂带地应力特征分析. 见: 岩石力学在工程中的应用. 北京: 知识出版社, 1989

THE RELATIONS OF INITIAL GEOSTRESS AND WATER IRRUPTION OF SEAM FLOOR

Li Jiexiang¹ Li Dapu² Zhang Wenquan¹ Liu Weitao¹

(¹ Shandong Institute of Mining and Technology, Tai an 271019 China)

(² Coal Bureau of Tai an, Tai an 271000 China)

Abstract Based on the measured stress results with hydraulic fracture method in a mine, the variation of water resisting ability for floor rock mass under effecting of geostress and rock pressure is analysed and discussed. The water-resisting mechanism of impermeable layer and interferential zone which is easy for water inrush is discussed. The relations of geostress, pressures of confined water and crack propagation are analysed. The relations of initial geostress and seam floor water irruption are obtained.

Key words geostress, rock pressure, water irruption of seam floor, hydrofracture