

# 深埋土岩接触带下导水裂隙带发育规律\*

白汉营<sup>①②</sup> 李文平<sup>③</sup> 陈学军<sup>①</sup> 黄翔<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>桂林理工大学 桂林 541004)

(<sup>②</sup>桂林理工大学 地质资源与地质工程博士后流动站 桂林 541004)

(<sup>③</sup>中国矿业大学 徐州 221116)

**摘要** 为了探寻深埋土岩界面下压架突水事故的机理,在分析高水压裂隙岩体赋存特征的基础上,基于导水裂隙带高度实测值及钻孔简易水文观测资料,采用理论及主控因素影响分析研究了深埋砂土砂岩界面下导水裂隙带的发育规律。研究结果表明:近深埋土岩界面带煤层开采,裂采比与防水煤岩柱高度符合 Boxlucas1 指数函数模型;当煤层顶板岩层大部分位于风化带深度范围时,风化带岩性的存在对导水裂隙带的高度发育起到了一定的抑制作用;风化带厚度对导水裂隙带的高度起到一定的抑制作用;而砂土砂岩界面下,由于下渗带的存在,水对岩体强度的影响,使得处于下渗带内岩层实际对导水裂隙带高度抑制作用相应的增大。

**关键词** 深埋土岩界面 导水裂隙带 压架突水 下渗带

中图分类号: TD741 文献标识码: A

## DEVELOPMENT RULES OF WATER FLOWING & FRACTURE ZONE AT DEEP BURIED SOIL-ROCK INTERFACE DURING MINING

BAI Hanying<sup>①②</sup> LI Wenping<sup>③</sup> CHEN Xuejun<sup>①</sup> HUANG Xiang<sup>①</sup>

(<sup>①</sup>Guilin University of Technology, Guilin 541004)

(<sup>②</sup>Postdoctoral Station of Geological Resources and Geological Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004)

(<sup>③</sup>China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116)

**Abstract** This paper aims to find the reason for preventing the crushing and water inrush accidents under deep buried soil-rock interface at coal mine in Eastern China. It analyses the geological environment of fractured rock mass with high water pressure under deep buried sand-sandstone interface. It uses the measured data including the height of water flowing fractured zone and simple hydrological observations data of drilling hole. It examines the development rules of the height of water flowing fractured zone during mining under deep buried soil-rock interface using principal component analysis. The results show that: ratio of the height of water flowing fractured zone and mining thickness and waterproof coal pillar fits Boxlucas1 exponential function model. The thickness of weathered zone inhibits the height of water flowing fractured zone to some extent. But for the sand-sandstone interface, as the presence of adown penetration zone, the inhibitory effect of weathered rock on the height of water flowing fractured zone increases.

\* 收稿日期: 2017-05-30; 收到修改稿日期: 2017-07-15.

基金项目: 国家自然科学基金项目(41172290) 桂林理工大学博士(后)启动基金项目资助.

第一作者简介: 白汉营(1978-) 男, 博士, 工程师, 主要从事工程地质、灾害地质和环境岩土工程方面的教学和研究工作.

Email: baihyh@glut.edu.cn

**Key words** Deep buried soil-rock interface , Water flowing fractured zone , Support crushing and water inrush , Adown penetration zone

## 0 引言

深埋土-岩接触带是指厚表土底部土层及其下伏煤系古风化岩组成的土-岩层组合体,是一处于高土压、高水压地质环境,软弱破碎、具有整体不良工程地质性质的地质体。我国东部煤矿早期在预留60~80m垂高的安全煤岩柱情况下开采的同时,随着开采工作面接近深部土-岩接触带,在特定的开采条件下,常有一些突水事故的发生,给安全生产造成巨大威胁(杨本水等,2003;熊晓英等,2004;李俊斌,2005;檀双英等,2006)。传统的水下采煤理论将其归结为:采矿活动诱发煤层顶板采动导水裂隙,沟通了上覆松散含水层而引发。事实上,此类突水灾害常伴随有采场顶板矿压突变剧增、突泥溃砂现象(许家林等,2007a;康永华等,2009),并随工作面推进而呈周期性发生,用传统的松散层水体下采煤理论很难解释。因此,开展深埋土-岩接触带下导水裂隙发育规律的主控影响因素研究,对于近接触带缩小安全煤柱安全开采意义重大。

目前,国内众多学者采用钻孔、钻孔物探、地面物探等传统的探测技术(张玉军等,2005),从最初的现场实测开始,发展到广泛应用各种新理论和新技术对导水裂隙带高度进行了理论研究(武强等,2000;涂敏,2004)。在大量的实测资料基础上,利用关键层理论,考虑硬岩层的影响,从覆岩关键层的位置(许家林等,2007b,2009,2012)、运动特征(朱卫兵等,2009)等角度对导水裂隙发育规律进行分析。本文在上述研究基础上,考虑深埋土-岩接触带内高水压裂隙岩体赋存特征,在钻孔简易水文观测资料基础上,采用指数函数模型拟合的理论分析方法,对深埋砂土砂岩接触带下煤层开采顶板变形破坏特征进行分析,建立导水裂隙带高度与裂采比的关系,阐明深埋土岩接触带下导水裂隙带独特的发育规律。

## 1 深埋土岩接触面下导水裂隙带发育的特殊性

### 1.1 高水压裂隙岩体赋存特征

我国东部矿区在深埋砂土-砂岩接触类型下

(徐洋洋等,2012)易发生压架突水煤矿地质灾害。深埋砂土是一具有较高富水性,且埋深大、水头压力高的松散承压含水层,因与下伏煤系之间无隔水层发育,该含水层水体压力可以直接作用于裂隙岩体之上。煤系砂岩通常发育有较明显的以高角度纵向及岩层面为主的原生裂隙(康永华等,2009)。松散承压含水层水体易沿该裂隙向下渗流从而形成下渗带(白汉营等,2010),当煤层开采后,在高水头压力及采动矿压的叠加作用下,砂岩的原生裂隙极易扩展成为导水裂缝。

综上所述,深埋砂土-砂岩接触带内的砂岩层具有特殊工程地质赋存环境,即:(1)具有较高富水性,且埋深大、水头压力高等特点的松散含水层;(2)具有高角度纵向为主的原生裂隙,且透水的煤系;(3)松散含水层直接作用在煤系之上,其间没有隔水层发育。因此,本文将具有上述3种工程地质赋存因素的煤系砂岩层称为高水压裂隙岩体。

### 1.2 高水压裂隙岩体导水裂隙带高度的异常性

图1为典型高水压裂隙岩体在煤层开采前后钻孔冲洗液消耗量观测结果(康永华等,2009),该结果表明:宿南矿区祁东煤矿7<sub>1</sub>14工作面上覆煤系的原生裂隙较发育,当受到采动影响后,采动裂缝沿着原生裂隙扩展的现象较明显。

高水压裂隙岩体综采垮落带(冒落带)发育高度及导水裂隙带高度与采厚关系(康永华等,2009)图2表明:煤层开采后,分布在高水压裂隙岩体中的垮落带及导水裂隙带发育高度(图2中曲线3)明显大于国内中硬或坚硬覆岩一般炮采的情况(图2中曲线1、2、4),其与采厚的关系已不符合国内中硬或坚硬覆岩的一般炮采时的发育规律。

## 2 岩性对导水裂隙带高度发育的影响

当采用钻探法确定导水裂隙带高度时,应以钻孔开始连续漏失和水位下降的起点作为临界面的位置,即:在分析排除局部裂隙、离层裂隙的干扰影响后,根据钻孔漏失水量、水位变化曲线确定临界面的位置。根据导水裂隙观测孔的简易水文观测曲线分析结果,可将导水裂隙带临界面归纳为3种类型:突变型、渐变型及波变型。

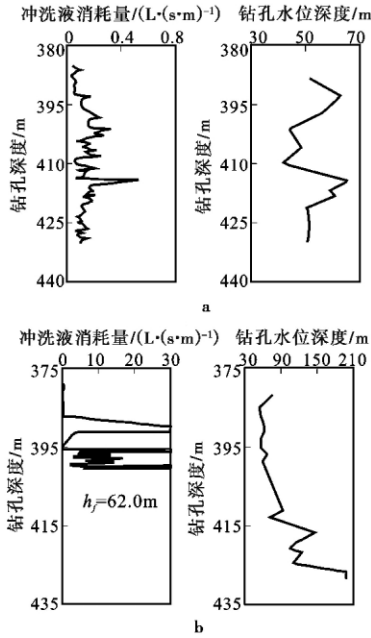


图1 采前和采后实测钻孔冲洗液消耗量及钻孔水位观测曲线

Fig. 1 The observed curves of drilling fluid consumption and water level before and after mining  
a. 采前; b. 采后

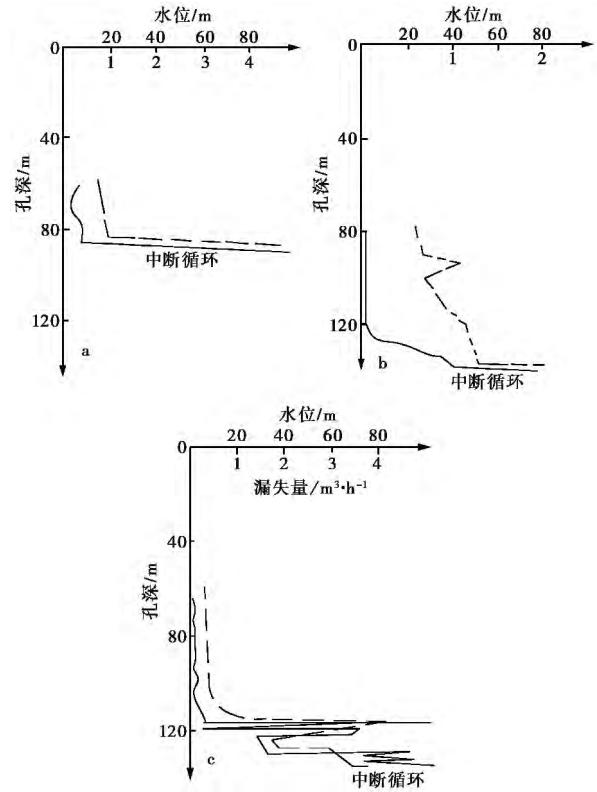


图3 导水裂隙带临界面

Fig. 3 Critical plane of water flowing fractured zone  
a. 突变型; b. 渐变型; c. 波变型

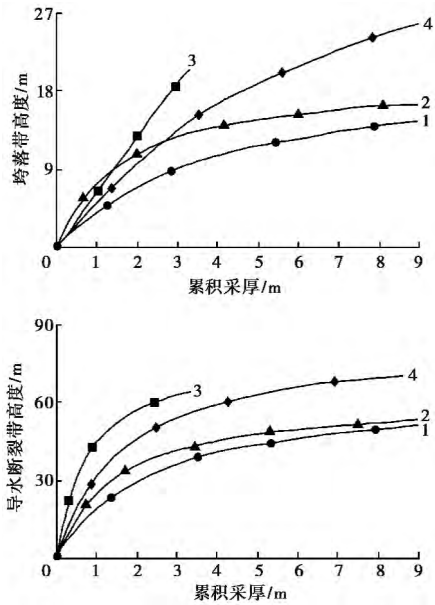


图2 水压对断层的扩张模式

Fig. 2 Expansion mode of the fault under the action of water pressure

当钻进至突变型(图3a)导水裂隙带临界面时,冲洗液突然大量漏失,孔内水位随之大幅度下降,多发生在临界面岩性主要为具有一定原生层理或节理的砂岩中。

当钻进至渐变型(图3b)导水裂隙带临界面时,

冲洗液消耗量随钻进深度增加而逐渐增大,钻孔水位也相应下降,多发生在临界面岩性主要为原生节理裂隙不甚发育的泥岩、粉砂岩中。

当钻进至波变型(图3c)导水裂隙带临界面时,冲洗液消耗量出现波动,水位相应随之波动下降。多发生在临界面岩性为泥岩、粉砂岩、薄层砂岩互层中,或者为粉砂岩、泥岩中。

### 3 煤层顶板类型对导水裂隙带高度发育的影响

#### 3.1 简易水文观测资料

在淮南煤田潘谢矿区布置钻孔,进行基于钻孔简易水文观测法的导水裂隙带高度探测,按照前述导水裂隙带临界面确定方法,确定导水裂隙带高度,同时,收集东部部分矿区的观测资料共40例,其中具有含水层直覆煤系特征的砂土砂岩界面型的17例,具有含水层与煤系之间发育有稳定隔水层特征的黏土砂岩界面型的23例,分别列于表1、表2中。

表 1 东部部分矿区砂土砂岩界面下导水裂隙带高度实测数据  
Table 1 Development rule of water flowing fracture zone under deep buried sand-sandstone interface

矿区	工作面	孔号	采厚 /m	导水高度 /m	裂采比	防水煤岩柱高度 /m	覆岩类型
潘一	2622(3)	冒 13	5.80	65.25	11.25	225.65	软弱
	1421(3)	14-1	3.00	27.59	9.20	97.87	软弱
	1421(3)	14-3	3.00	28.54	9.51	85.30	软弱
	1421(3)	14-4	3.00	26.06	8.69	83.25	软弱
	1421(3)	14-11	2.00	17.61	8.81	55.32	软弱
	1412(3)	14-7	3.40	43.10	12.68	85.92	中硬
	1401(3)	14-10	1.80	22.62	12.57	67.24	中硬
	1121(1)	冒 11-3	1.80	28.92	16.07	155.43	中硬
	1121(1)	冒 11-4(2)	1.80	29.33	16.29	148.14	中硬
	1402(3)	14-9	2.2	35.20	16.00	65.00	坚硬
潘三	1221(3)	冒 4	3.00	40.25	13.42	113.46	中硬
	1211(3)	冒 7	2.80	30.90	11.04	74.78	中硬
兴隆庄	2308-2	带 7	2.80	50.34	17.98	89.00	坚硬
	2306-1	带 4	2.80	45.70	16.32	65.00	坚硬
	2306-2	带 10	2.60	44.43	17.09	75.00	坚硬
	2302-1	带 13	2.60	48.20	18.54	130.00	坚硬
济宁二号井	1301		2.94	57.00	19.39	168.00	坚硬
	2301		2.95	54.50	18.47	167.00	坚硬

3.2 煤层上覆岩层岩性及其顶板类型划分

深埋土岩界面至煤层顶板深度范围内的煤系岩石的力学性质及其组合特征对导水裂隙带形成及发展有一定的影响: 若岩层组合为上硬下软型, 则在覆岩运动过程中易形成离层带, 若岩层组合为上软下硬型, 则在覆岩运动过程中岩层将以相同的曲率一起协同向采空区弯曲; 因此岩层的组合不仅是控制离层带的决定因素, 而且影响到采动覆岩破断裂隙的贯通度。

目前, 我国应用最为普遍的导水裂隙带高度经验公式仅根据岩层类型定性的划分为坚硬、中硬、软弱、极软弱 4 个类型, 未能反映顶板软硬岩层组合类型等问题, 本文采用硬岩岩性比例系数  $b$  (胡小娟等, 2012) 来综合表达顶板组合岩层单轴抗压强度和顶板软硬岩层组合类型两个影响因素。

$$b = \frac{\sum h}{(15 \sim 20) M} \quad (1)$$

式中,  $M$  为煤厚,  $\sum h$  为硬岩累计厚度。

导水裂隙带高度随硬岩比例系数散点分布 (图4) 表明: 煤层开采后导水裂隙带发育受顶板岩性及其组合关系影响较大。在其他条件相同情况

表 2 东部部分矿区黏土砂岩界面下导水裂隙带高度实测数据  
Table 2 Development rule of water flowing fracture zone under deep buried clay-sandstone interface

矿区	工作面	孔号	采厚 /m	导水高度 /m	裂采比	防水煤岩柱高度 /m	覆岩类型
谢桥	1121(3)	冒 1	6.0	67.88	11.31	164.88	软弱
	1121(3)	冒 2	5.0	53.00	10.60	140.36	软弱
	1121(3)	冒 3	4.8	54.79	11.41	125.97	软弱
	1211(3)	冒 5	4.0	38.81	9.70	72.91	软弱
	1211(3)	冒 6	4.0	44.96	11.24	114.15	软弱
	1221(3)	冒 4	5.0	73.28	14.66	127.41	中硬
	1221(3)	冒 1	4.5	57.45	12.77	247.10	软弱
	1212(3)	冒 4	3.9	49.05	12.58	72.04	中硬
	1131(3)	冒 6	4.2	52.00	12.38	61.63	中硬
	1221(3)	冒 2	3.0	60.14	20.05	282.51	坚硬
张集	1212(3)	冒 3	2.5	37.5	15.00	58.55	坚硬
	1215(3)	冒 5	3.0	52.00	17.33	72.69	坚硬
	12027	92-3 裂	2.0	27.25	11.63	50.26	中硬
	12118	91-1 裂	2.0	33.96	16.98	94.14	中硬
	12117	92-2 裂	2.0	40.25	20.13	101.81	坚硬
	1201(1)	92-1 裂	2.0	33.01	16.51	73.57	坚硬
	12128	90-1 裂	2.0	36.99	18.50	74.16	坚硬
	16028	99-2 裂	2.0	35.24	17.62	80.72	坚硬
	6526	c8	2.0	11.45	5.73	28.00	软弱
	662	c11	2.8	14.24	5.09	19.50	软弱
百善	663	c14	3.0	12.35	4.12	17.60	软弱
	664	c17	3.1	9.12	2.94	12.30	软弱

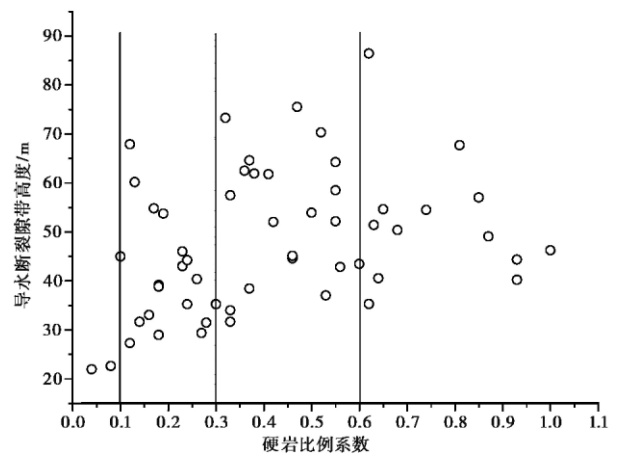


图 4 导水裂隙带高度随硬岩比例系数散点分布图

Fig. 4 Scatter plot of height water flowing fractured zone with hard rock ratio

下, 岩性越硬, 所发育导水裂隙带越高, 顶板越软所发育的导水裂隙带高度越小。结合现有规程中对岩层类型定性划分成果, 可以利用硬岩岩性比例系数将顶板岩性划分为 4 种类型: 即 0~0.1 为极软弱顶

板类型, 0.1~0.3 属于软弱顶板类型, 0.3~0.6 属于中硬顶板类型, 0.6~1 属于坚硬顶板类型。

### 3.3 导水裂隙带高度与防水煤岩柱高度拟合关系式

以防水煤岩柱高度作为煤层顶板厚度的代表量, 综合考虑硬岩比列系数, 将顶板分为软弱、中硬、坚硬 3 类。以裂采比(式 2)为应变量、防水煤岩柱高度为自变量, 可以分析导水裂隙带高度发育规律受顶板类型的影响。

$$k = \frac{H_f}{M} \quad (2)$$

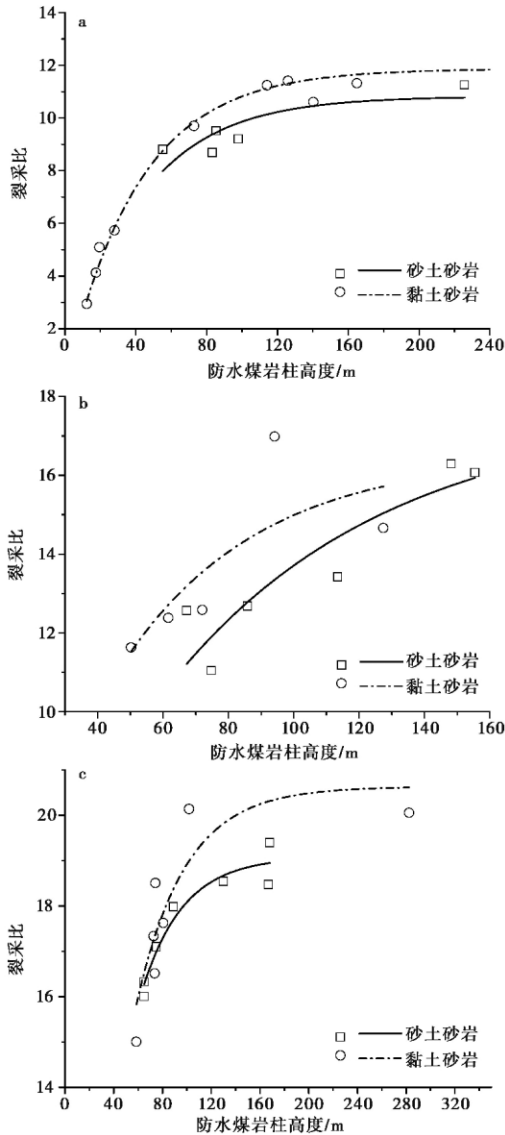


图 5  $k$  随防水煤岩柱高度变化关系图

Fig. 5 Curve of  $k$  change with the height of waterproof pillar  
a. 软弱顶板; b. 中硬顶板; c. 坚硬顶板

东部部分矿区导水裂隙带高度实测数据可采用 Boxlucas1 指数函数模型进行拟合(式 3), 其拟合结

果如式(4)、式(5)所示, 拟合曲线如图 5 所示。

$$y = a(1 - e^{-bx}) \quad (3)$$

式中,  $x$  为自变量;  $a$ 、 $b$  为常数, 且  $0 < b < 1$ ,  $y = a$  是 Boxlucas1 模型基本曲线的渐进线方程。

砂土砂岩界面型下:

$$H_f = \begin{cases} 10.82M(1 - e^{-0.024H_{sh}}) & \text{软弱顶板} \\ 17.65M(1 - e^{-0.015H_{sh}}) & \text{中硬顶板} \\ 19.07M(1 - e^{-0.03H_{sh}}) & \text{坚硬顶板} \end{cases} \quad (4)$$

黏土砂岩界面型下:

$$H_f = \begin{cases} 11.86M(1 - e^{-0.024H_{sh}}) & \text{软弱顶板} \\ 16.51M(1 - e^{-0.024H_{sh}}) & \text{中硬顶板} \\ 20.63M(1 - e^{-0.025H_{sh}}) & \text{坚硬顶板} \end{cases} \quad (5)$$

### 3.4 不同顶板类型下导水裂隙带高度发育规律

#### 3.4.1 裂采比的变化趋势

由图 5 可知, 随着煤层顶板厚度的增加, 裂采比  $k$  呈 Boxlucas1 指数函数式增大, 但增大曲线斜率呈减小趋势; 当煤层顶板厚度小于 40m 时(图 5a),  $k$  值斜率较大, 煤层顶板厚度 40~80m 范围内,  $k$  值曲线斜率逐渐变缓, 煤层顶板厚度大于 120m 范围,  $k$  值趋于稳定, 曲线存在水平渐近线上限。

裂采比的变化趋势说明: 当煤层顶板岩层大部分位于风化带深度范围时, 风化带岩性的存在对导水裂隙带的高度发育起到了一定的抑制作用。

#### 3.4.2 导水裂隙带高度变化趋势

由式(4)、式(5)可知, 在采厚一定的情况下, 导水裂隙带高度总体趋势为: 坚硬顶板 > 中硬顶板 > 软弱顶板; 黏土砂岩界面型下的导水裂隙带高度明显大于砂土砂岩界面型下的高度, 表明相比砂土砂岩界面型下, 黏土砂岩界面型下的导水裂隙带高度受到风化带的抑制作用较小。

这是因为, 在砂土砂岩界面型下, 下渗带深度范围内岩体在复杂的水岩物理化学及力学作用下岩体强度普遍降低, 塑性普遍增强, 从而抑制了岩层采动裂隙的发展, 使得砂土砂岩界面型下渗带内岩层实际对导水裂隙带高度抑制作用相应的增大, 故而导高值变小。

## 4 结 论

(1) 深埋砂土-砂岩接触带内的砂岩层具有特殊工程地质赋存环境, 其原生裂隙较发育, 当受到采动影响后, 采动裂缝沿着原生裂隙扩展的现象较明显。导水裂隙带高度与采厚的关系已不符合国内中

硬或坚硬覆岩的一般炮采时的发育规律。

(2) 钻孔简易水文观测曲线分析结果表明: 砂、砾岩层的导水裂隙带临界面表现为突变型曲线; 泥岩、粉砂岩的导水裂隙带临界面表现为渐变型曲线; 砂、泥岩互层的导水裂隙带临界面表现为波变型曲线。

(3) 利用硬岩岩性比例系数可将顶板岩性划分为4种类型: 即0~0.1为极软弱顶板类型, 0.1~0.3属于软弱顶板类型, 0.3~0.6属于中硬顶板类型, 0.6~1属于坚硬顶板类型。

(4) 近深埋土岩界面带煤层开采, 裂采比与防水煤岩柱高度符合Boxlucas1指数函数模型; 当煤层顶板岩层大部分位于风化带深度范围时, 风化带岩性的存在对导水裂隙带的高度发育起到了一定的抑制作用; 风化带厚度对导水裂隙带的高度起到一定的抑制作用; 而砂土砂岩界面下, 由于下渗带的存在, 水对岩体强度的影响, 使得处于下渗带内岩层实际对导水裂隙带高度抑制作用相应的增大。

### 参 考 文 献

- Bai H Y, Li W P, Li P Q, et al. 2010. Mechanism and applied verification of "Low Penetration Zone" in high pressure bearing loose aquifer[J]. Coal Engineering, **1**(12): 57~59.
- Hu X J, Li W P, Cao D T, et al. 2012. Index of multiple factors and expected height of fully mechanized water flowing fractured zone[J]. Journal of China Coal Society, **37**(4): 613~620.
- Kang Y H, Zhao K Q, Liu Z G, et al. 2009. Devastating laws of overlying strata with fissure under high hydraulic pressure[J]. Journal of China Coal Society, **34**(6): 721~725.
- Li J B. 2005. Practice and understanding of mining in face No.1711<sub>0</sub>(3) with a raise of mining upper limit[J]. Coal Mining Technology, **10**(1): 28~30.
- Tan S Y, Wu J S. 2006. Cause analysis of water bursting in 7<sub>1</sub>14 mining face of 7<sub>1</sub> coal seam in Qidong colliery[J]. Coal Mining Technology, **11**(3): 64~67.
- Tu M. 2004. Study on the growth height of separation fracture of mining rock in Panxie area[J]. Journal of China Coal Society, **29**(6): 641~645.
- Wu Q, Huang X L, Dong D L, et al. 2000. "Three maps-two predictions" method to evaluate water bursting conditions on roof coal[J]. Journal of China Coal Society, **25**(1): 60~65.
- Xiong X Y, Li J B. 2004. A case study of support break-off at 1402(3) fully mechanized mining face[J]. Coal Geology of China, **16**(3): 34~37.
- Xu J L, Cai D, Fu K L. 2007a. Mechanism of supports crushing accident and its preventive measures during coal mining near unconsolidated confined aquifer[J]. Journal of China Coal Society, **32**(12): 1239~1243.
- Xu J L, Chen J X, Jiang K. 2007b. Effect of load transfer of unconsolidated confined aquifer on compound breakage of key strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, **26**(4): 699~704.
- Xu J L, Wang X Z, Liu W T, et al. 2009. Effects of primary key stratum location on height of water flowing fracture zone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, **28**(2): 380~385.
- Xu J L, Zhu W B, Wang X Z. 2012. New method to predict the height of fractured water-conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, **37**(5): 762~769.
- Xu Y Y, Li W P, Bai H Y. 2012. Deep buried coal measures soil and weathered rock contact zone classification and its significance[J]. Coal Geology of China, **24**(4): 52~55.
- Yang B S, Wang C S, Yan C Y. 2003. Cause of water inrush in Qidong coal mine[J]. Coal Geology & Exploration, **31**(1): 41~43.
- Zhang Y J, Kang Y H. 2005. The summarize and estimation of the development on the exploration of overburden failure law[J]. Coal Mining Technology, **10**(2): 10~12.
- Zhu W B, Xu J L, Shi X S, et al. 2009. Research on influence of overburden primary key stratum movement on surface subsidence with in-situ drilling test[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, **28**(2): 403~409.
- 白汉营, 李文平, 李佩全, 等. 2010. 高承压松散含水层“下渗带”形成机理及应用验证[J]. 煤炭工程, **1**(12): 57~59.
- 胡小娟, 李文平, 曹丁涛, 等. 2012. 综采导水裂隙带多因素影响指标研究与高度预计[J]. 煤炭学报, **37**(4): 613~620.
- 康永华, 赵开全, 刘治国, 等. 2009. 高水压裂隙带岩体综采覆岩破坏规律[J]. 煤炭学报, **34**(6): 721~725.
- 李俊斌. 2005. 1711<sub>0</sub>(3) 上提工作面回采实践与认识[J]. 煤矿开采, **10**(1): 28~30.
- 檀双英, 吴劲松. 2006. 祁东煤矿 7<sub>1</sub>14 工作面出水原因分析[J]. 煤矿开采, **11**(3): 64~67.
- 涂敏. 2004. 潘谢矿区采动岩体裂隙发育高度的研究[J]. 煤炭学报, **29**(6): 641~645.
- 武强, 黄晓玲, 董东林, 等. 2000. 评价煤层顶板涌(突)水条件的“三图-双预测法”[J]. 煤炭学报, **25**(1): 60~65.
- 熊晓英, 李俊斌. 2004. 1402(3) 综采工作面压架原因分析[J]. 中国煤田地质, **16**(3): 34~37.
- 许家林, 蔡东, 傅昆岚. 2007a. 邻近松散承压含水层开采工作面压架机理与防治[J]. 煤炭学报, **32**(12): 1239~1243.
- 许家林, 陈稼轩, 蒋坤. 2007b. 松散承压含水层的载荷传递作用对关键层复合破断的影响[J]. 岩石力学与工程学报, **26**(4): 699~704.
- 许家林, 王晓振, 刘文涛, 等. 2009. 覆岩主关键层位置对导水裂隙带高度的影响[J]. 岩石力学与工程学报, **28**(2): 380~385.
- 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 2012. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. 煤炭学报, **37**(5): 762~769.
- 徐洋洋, 李文平, 白汉营. 2012. 深部土煤系风化岩接触带类型划分及其意义[J]. 中国煤炭地质, **24**(4): 52~55.
- 杨本水, 王从书, 阎昌眼, 等. 2003. 祁东煤矿突水灾害成因分析[J]. 煤田地质与勘探, **31**(1): 41~43.
- 张玉军, 康永华. 2005. 覆岩破坏规律探测技术的发展及评价[J]. 煤矿开采, **10**(2): 10~12.
- 朱卫兵, 许家林, 施喜书, 等. 2009. 覆岩主关键层运动对地表沉陷影响的钻孔原位测试研究[J]. 岩石力学与工程学报, **28**(2): 403~409.