

文章编号: 1001-1986(2020)03-0145-07

# 基于覆岩结构效应的导水裂隙带发育特征

曹祖宝<sup>1,2</sup>, 王庆涛<sup>2</sup>

(1. 煤炭科学研究院, 北京 100013; 2. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077)

**摘要:** 为探讨黄陵煤田煤层采动引起的顶板水害问题, 以煤层顶板不同覆岩结构采动导水裂隙为研究对象, 概化了煤-软-硬-软-硬(组合一)、煤-软-软-硬-硬(组合二)、煤-硬-软-硬-软(组合三)及煤-硬-硬-软-软(组合四)4种典型的岩性组合结构, 运用数值模拟和理论计算等方法, 分析了不同覆岩组合采动破坏特征和覆岩导水裂隙与覆岩结构之间的相关关系, 研究了覆岩结构对导水裂隙发育高度(简称“导高”)的影响规律。研究结果显示: 在相同的采高条件下, 煤-软-硬-软-硬型覆岩结构导高最小, 煤-硬-硬-软-软型覆岩结构导高最大; 工程实例表明, 黄陵煤田煤层开采导高与采高之间并非简单线性关系, 利用覆岩结构效应预测的导高更接近实测值。



移动阅读

**关 键 词:** 覆岩组合; 采动破坏; 导水裂隙带; 数值模拟; 黄陵煤田

**中图分类号:** TD163    **文献标志码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2020.03.021

## Development characteristics of water conducted fracture zone based on overburden structural effect

CAO Zubao<sup>1,2</sup>, WANG Qingtao<sup>2</sup>

(1. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China; 2. Xi'an Research Institute Co. Ltd., China Coal Technology and Engineering Group Corp., Xi'an 710077, China)

**Abstract:** In order to study the roof water disaster caused by coal mining in Huanglong coalfield, taking mining failure of layered overburden as research object, four typical composite structural models for coal-soft rock-hard rock-soft rock-hard rock(combination I), coal-soft rock-soft rock-hard rock-hard rock(combination II), coal-hard rock-soft rock-hard rock-soft rock(combination III) and coal-hard rock-hard rock-soft rock-soft rock(combination IV) were generalized. Numerical simulation and theoretical calculation were used to analyze the mining failure characteristics of different overburden combinations and correlation between water conducting fissures and lithologic combination structure of overburden. The law of the effect of overburden structure on the development height of water conducting fracture was studied. The research results show that under the same mining height, the coal-soft rock-hard rock-soft rock-hard rock overburden structure has the minimum conducting height and the coal-hard rock-hard rock-soft rock-soft rock overburden structure has the maximum conducting height. The engineering examples show that the conducting height of the coal seam mining in Huanglong coalfield is not a simple linear relationship with the mining height, and the guiding height predicted by the overburden structure effect is closer to the measured value.

**Keywords:** overburden assemblage; mining damage; water conducted fracture zone; numerical simulation; Huanglong coalfield

近年来, 黄陵煤田巨厚洛河组砂岩含水层频繁造成工作面强涌水事故。顶板水害已成为煤矿安全生产的巨大挑战, 煤层开采覆岩顶板导水裂隙带发育规律及防治技术亟需深入研究。众多学者开展了

关于导水裂隙带发育规律的研究<sup>[1-3]</sup>, 总结出影响导水裂隙带发育规律的主控因素: 覆岩力学性质及结构特征<sup>[4-5]</sup>、采煤方法及顶板管理方法<sup>[6-7]</sup>、煤层采高<sup>[8-9]</sup>、煤层倾角及煤层埋深<sup>[10-13]</sup>等, 取得丰硕的研

收稿日期: 2020-01-18; 修回日期: 2020-05-12

基金项目: 中煤科工集团西安研究院有限公司科技创新基金项目(2019XAYZD05)

Foundation item: Science and Technology Innovation Fund of Xi'an Research Institute of CCTEG(2019XAYZD05)

第一作者简介: 曹祖宝, 1979年生, 男, 安徽淮南人, 博士研究生, 副研究员, 研究方向为矿井水害防治. E-mail: 1014615894@qq.com

引用格式: 曹祖宝, 王庆涛. 基于覆岩结构效应的导水裂隙带发育特征[J]. 煤田地质与勘探, 2020, 48(3): 145-151.

CAO Zubao, WANG Qingtao. Development characteristics of water conducted fracture zone based on overburden structural effect[J]. Coal Geology & Exploration, 2020, 48(3): 145-151.

究成果。许家林等<sup>[14-16]</sup>提出基于关键层位置计算导水裂隙带高度的理论方法，并成功应用于工程实践；杨贵<sup>[17]</sup>对不同岩性组合顶板导水裂隙带发育规律进行了研究；王惠兵等<sup>[18]</sup>认为软弱覆岩对导水裂隙带的发育具有抑制性作用；康永华<sup>[19]</sup>根据现场实测分析了覆岩岩性及其组合结构对导水裂隙带发育高度的影响；许延春等<sup>[20]</sup>依据国内 40 多个综放开采工作面“两带”高度实测数据，拟合得到综放开采条件下中硬覆岩、软弱覆岩的导水裂隙带高度预计公式。

针对黄陇煤田顶板水害问题，顶板涌水水源为巨厚洛河组砂岩孔隙-裂隙水。目前，对覆岩导水裂隙开展了大量的现场实测工作，得到导水裂隙带高度预测的地区经验公式，而经验公式计算结果与实测值常出现较大偏差，其原因之一可能是以往研究较少考虑覆岩岩性及其组合特征对导高的影响，研究成果滞后于工程实践。因此，有必要针对煤层覆岩岩性及其组合特征对导水裂隙带发育高度的影响规律进行研究，为类似采煤条件下的防治水工程提供基础理论依据。

## 1 地质条件及导水裂隙发育特征

### 1.1 地质条件

黄陇煤田位于鄂尔多斯盆地南缘，含煤地层为侏罗系中统延安组。地层由老至新有：侏罗系下统富县组( $J_1f$ )，中统延安组( $J_2y$ )、直罗组( $J_2z$ )、安定组( $J_2a$ )，白垩系下统宜君组( $K_1y$ )、洛河组( $K_1l$ )、华池环河组( $K_1h$ )及新生界( $K_2$ )。

区域主要含隔水层为：① 侏罗系含隔水岩组，侏罗系顶部安定组以泥岩为主，为主要隔水层；中部直罗组及底部延安组中-粗粒砂岩为含水层；② 白垩系宜君组弱含水岩层，以砾岩为主，砂泥质充填；③ 洛河含水层岩组，主要由中砂岩、粗砂岩组成，富水性中等至强，是煤田主要含水层。

根据岩性组合，煤层顶板覆岩按岩性可划分为 3 大类，即砾岩类、砂岩类和泥岩类，该 3 大类岩体普遍分布于黄陇煤田各矿区。煤层顶板覆岩按强度类型可划分为 2 大类，即中硬岩和软岩，其中，砾岩单轴抗压强度一般为 13.24~62.37 MPa，平均 32.25 MPa；砂岩单轴抗压强度为 20.19~29.73 MPa，平均 25.31 MPa，属中硬岩层。泥岩单轴抗压强度一般 5.37~37.28 MPa，平均 15.67 MPa，属软弱岩层。

### 1.2 覆岩采动导水裂隙发育特征

根据黄陇煤田顶板导水裂隙带发育高度统计数据<sup>[9-10]</sup>，绘制导高及裂采比与采高的关系图。由图 1 可以看出，黄陇煤田顶板实测导水裂隙带高度与采

高总体呈正相关关系，但相同采高条件下导水裂隙带高度离散性较大；图 2 可以看出，黄陇煤田顶板实测裂采比与采高总体呈负相关关系，相同采高条件下裂采比离散性也较大。

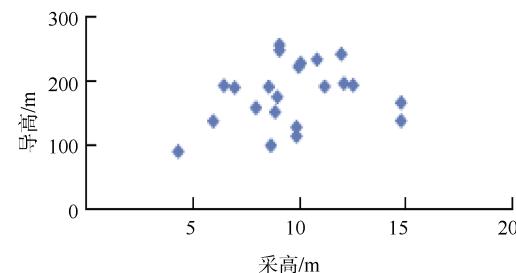


图 1 黄陇煤田矿井实测导高与采高关系

Fig.1 Relationship between the measured conducting height and mining height

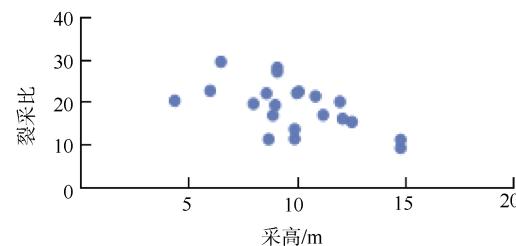


图 2 黄陇煤田矿井实测裂采比与采高关系

Fig.2 Relationship between measured split-mining ratio and mining height

## 2 覆岩组合下采动破坏特征数值模拟

### 2.1 地质模型建立

地质模型的建立，总体原则上依据地层岩性及其强度特征，并以层间界面为基础分类，进行复杂地层结构的概化。黄陇矿区中硬岩层对应砂岩组，软弱岩层对应泥岩组，对两个岩性组合进行模型概化，共设计煤-软-硬-软-硬(组合一)、煤-软-软-硬(组合二)、煤-硬-软-硬-软(组合三)及煤-硬-硬-软(组合四)4 种不同岩性组合类型(图 3)。采用二维离散元模拟软件 UDEC 建立数值模型，并进行开挖过程的模拟计算与分析。模拟煤层为水平煤层，固定采厚 3.5 m，走向长 400 m，顶板厚 100 m，其中，软岩层厚 30 m、硬岩层厚 20 m，松散覆盖层以 2 MPa 均布荷载替代。考虑边界效应，模型开挖总长度 160 m、开挖步距 10 m。底板固定垂直和水平方向位移，左右侧面固定水平方向的位移，岩层顶面为自由边界。

### 2.2 本构模型及材料参数

数值模拟分析采用 Mohr-Coulomb 本构模型。以侏罗系煤层顶板的砂泥岩层典型参数<sup>[8-9]</sup>为基准，从大尺度研究角度分析，对模型中的软岩、硬岩及煤层赋参，各岩层物理力学参数见表 1。

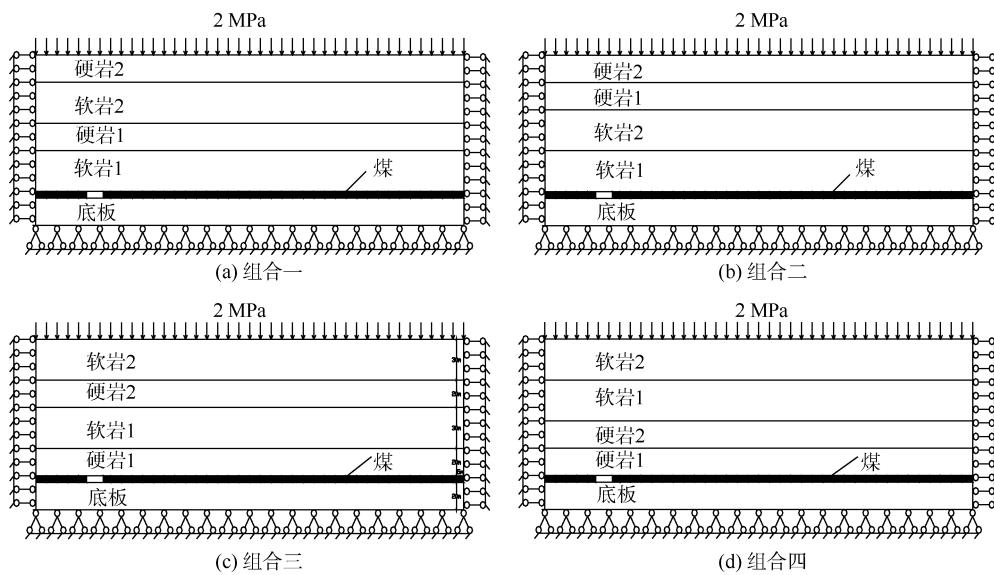


图3 4种不同覆岩组合结构的煤层开采模型

Fig.3 Four kinds of geological models with different overburden structure

表1 数值分析模型各岩层物理力学参数

Table 1 Rock mechanics parameters of numerical models

岩性	容重/(kN·m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗拉强度/MPa	强度划分
软岩	20.2	15	8.33	6.25	2.00	25	2	软岩
硬岩	24.7	32	41.03	11.68	5.50	43	5	中硬
煤层	13.5	12	6.67	5.00	1.25	23	1	软岩

### 2.3 模拟结果及分析

**a. 组合一** 工作面推进 50 m, 顶板软岩 1 发生初次垮落, 软岩 1 内形成贯通的垮落裂隙至硬岩 1 底界面, 并在硬岩 1 底界面处产生离层空间(图 4a)。工作面推进至 110 m 时, 垮落带内局部形成重新压实区。导水裂隙带受硬岩 1-软岩 2-硬岩 2 岩层组结构控制, 导水裂隙带仅发育至软岩 1 顶界面, 发育高度为 30 m(图 5a)。

**b. 组合二** 工作面推进 50 m, 顶板 2 层软岩同步垮落, 离层裂隙产生在软岩 2 顶界面, 2 层软岩层形成协调变形的软-软岩层组(图 4b)。工作面推进至 110 m 时, 垮落带内局部形成重新压实区, 离层裂隙闭合。导水裂隙带受硬-硬岩组结构控制, 仅发育至硬-硬岩层组底界面, 发育高度为 60 m(图 5b)。

**c. 组合三** 工作面推进 50 m, 覆岩顶板变形量较小, 岩体结构未破坏, 未形成贯通性裂隙, 分析是由于硬岩直接顶强度大、极限跨距大, 在未达到极限跨距前变形量较小, 硬岩 1 和软岩 1 形成协调变形的组合岩层(图 4c)。工作面推进至 110 m 时, 由于硬岩 2 与软岩 2 同步弯曲下沉造成离层裂隙消失, 硬岩 2 及软岩 2 的变形特征一致, 形成协调变

形岩组, 导水裂隙带发育至硬岩 2 底界面, 发育高度为 50 m(图 5c)。

**d. 组合四** 工作面推进 50 m, 硬岩 1 局部发生垮落, 其他各层无明显变形, 硬岩 1 和硬岩 2 形成层间水平裂隙, 垂向裂隙不发育, 分析可知, 两层岩层构成岩层组, 但在工作面推进前期变形特征并不一致(图 4d)。工作面推进至 110 m 时, 硬岩 1 和硬岩 2 同步垮落并逐渐压实, 软岩 1 与软岩 2 的变形特征一致, 构成协调变形的软岩层组, 硬岩 1 完全垮塌造成上部所有岩层同步发生垮塌破坏, 垮落带直接贯通至软岩 2 顶部, 导水裂隙带高度为 100 m(图 5d)。

### 3 覆岩组合结构效应实例分析

#### 3.1 覆岩结构及模型概化

为分析黄陵煤田煤层覆岩导水裂隙与覆岩岩性组合结构之间的关系, 以黄陵煤田郭家河煤矿 1305 工作面覆岩导水裂隙带发育规律开展覆岩结构效应研究。郭家河煤矿位于黄陵煤田西南端, 回采 3 号煤层, 煤层平均厚度 16 m, 采用走向长壁综合机械化放顶煤开采方法, 后退式回采, 全部垮落法管理顶板, 工作面内 G-72 钻孔地层参数见表 2。

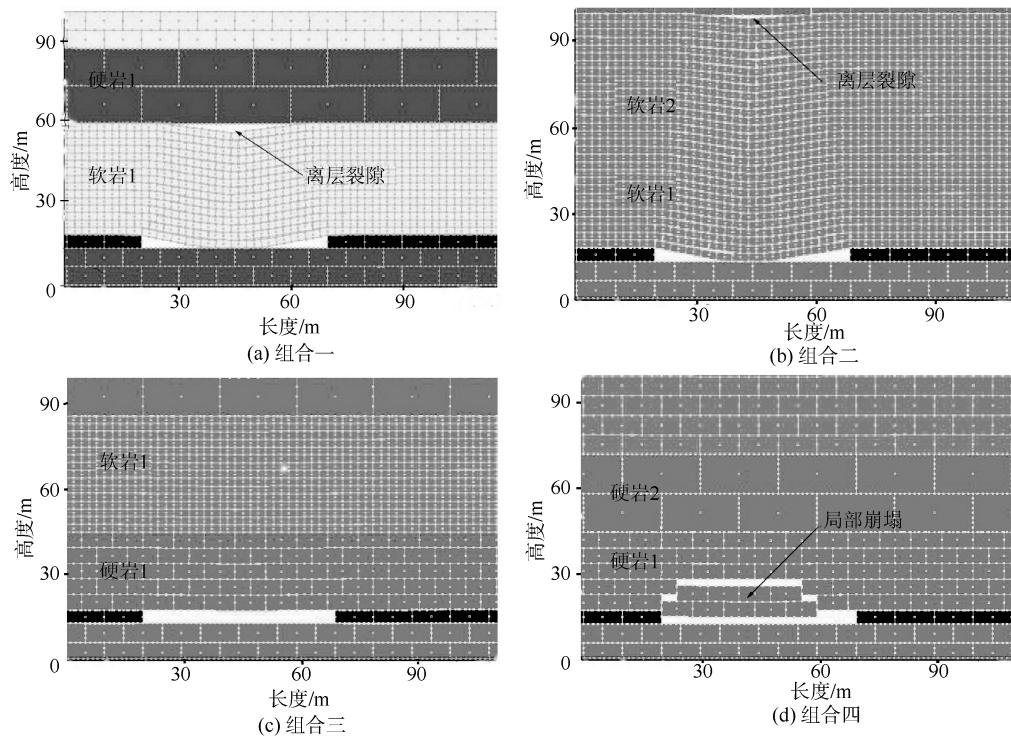


图 4 不同岩性组合模型工作面推进 50 m 覆岩变形破坏特征

Fig.4 Failure and deformation characteristics of overburden with different lithology combination in 50 m advance of a working face

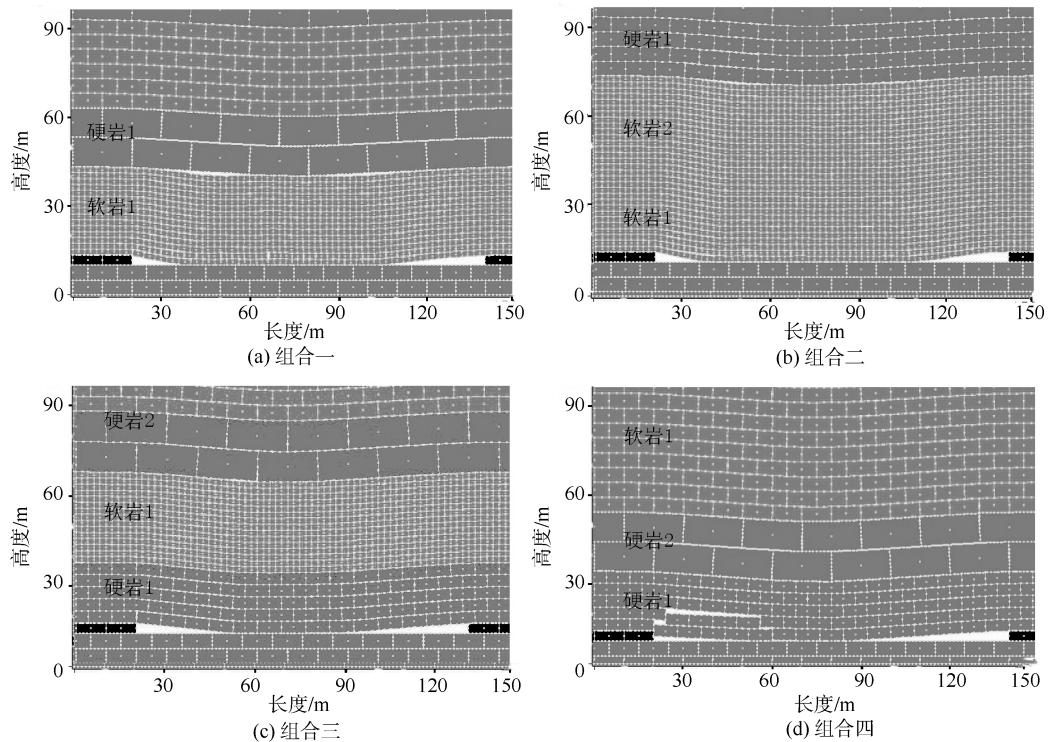


图 5 不同岩性组合模型工作面推进 110 m 覆岩变形破坏特征

Fig.5 Failure and deformation characteristics of overburden with different lithology combination in 100 m advance of a working face

按砂岩层组和泥岩层组进行统计分类, 获得覆岩地层概化模型。延安组及直罗组以砂岩类为主, 归为中硬岩层组, 安定组概化为 3 个软岩组和 2 个硬岩组, 宜君组及洛河组岩性为砂岩类, 归为中硬

岩层组。从大尺度研究角度来看, 顶板覆岩结构归类为煤-硬-软-硬-软型(组合三)。

### 3.2 导水裂隙带发育规律

将郭家河煤矿 1305 工作面概化地质模型, 按照

表 2 地层参数统计  
Table 2 Statistics of formation parameters

地质年代	地层岩性	层厚/m	主要地层岩性统计		地层结构
			岩性	占比/%	
第三系	松散层	174.9	松散层	100	软岩层组
洛河组	粗粒砂岩	113	砂岩	100	中硬岩组
宜君组	砾岩	28.95	砂岩	100	中硬岩组
	粉砂岩夹泥岩	20.07	砂岩(18.87 m)	94	中硬岩组
	泥岩夹粗砂岩	29.44	泥岩(28.14 m)	96	软岩层组
安定组	细粒砂岩	14.56	砂岩	100	中硬岩层
	泥岩夹粉砂岩	69.72	泥岩(51.82 m)	74	软岩层组
	细粒砂岩	18.18	砂岩	100	中硬岩组
	泥岩夹薄层粗砂岩	19.60	泥岩(18.13 m)	93	软岩层组
直罗组	砂岩夹薄层泥岩	49.61	砂岩(48.37 m)	98	中硬岩组
延安组	砂岩夹薄层泥岩	36.86	砂岩(26.83 m)	73	中硬岩组
	煤层	15.70	煤层		

注: 砂岩(18.87 m)表示主要层位岩性(厚度), 其他同; 占比表示主要层位厚度占整层厚度比值。

本文提出方法对工作面导水裂隙带高度进行模拟分析。导水裂隙带高度的数值模拟成果如图 6 所示, 由图 6 可知, 1305 工作面顶板导水裂隙带发育高度随工作面回采呈阶梯式跳跃发展。当工作面回采至 60 m 时, 导水裂隙发育至直罗组中上部, 导高为

76.65 m; 当工作面回采至 80 m 时, 导水裂隙带发育至安定组硬岩底界面, 导高为 105.80 m; 当工作面回采至 120 m 时, 工作面导高达到最大值 193.73 m; 此后导水裂隙带高度不再随工作面推进而增大。

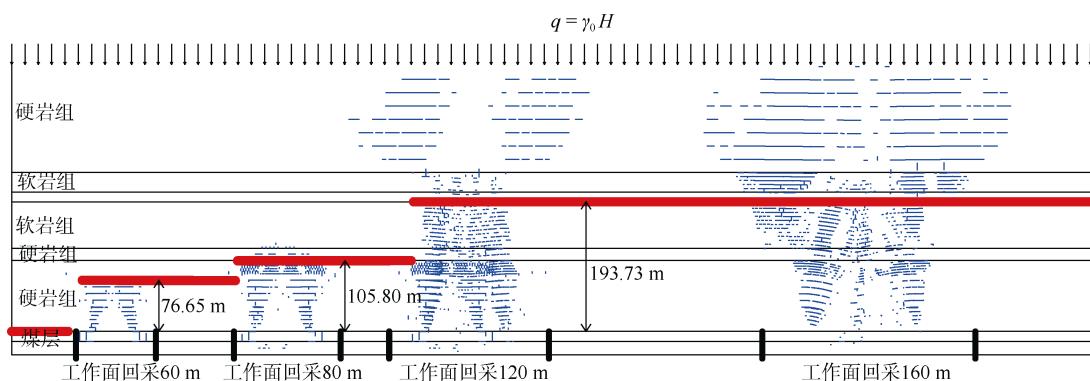


图 6 郭家河煤矿 1305 工作面顶板导水裂隙带发育规律

Fig.6 Development law of water conducting fracture zone in the roof of the working face 1305

对 1305 工作面顶板各岩层组进行力学分析, 各地层受力与变形特征参数见表 3。延安-直罗组中硬岩层组初次垮落的极限跨距为 59.25 m, 岩层组最大下沉值为 0.04 m, 其自由变形高度与采高相等, 为 14.8 m。延安-直罗组中硬岩层组达到极限跨距时, 满足力学破断及变形破坏条件, 导水裂隙在延安-直罗组内开始发育。安定组软岩层组初次垮落的极限跨距为 93.10 m, 该岩层组最大下沉值为 1.32 m,

其下方自由变形高度为 6.15 m, 故安定组软岩层组同样产生破坏, 形成导水裂隙。宜君-洛河组中硬岩层组初次垮落的极限跨距为 101.8 m, 此时拉应力达到极限抗拉强度, 满足受力破坏条件; 但其下方自由变形空间已被下伏垮落岩层充填, 无法满足变形破坏条件。因此, 导水裂隙带发育高度止于安定组中部硬岩底界面, 导水裂隙带最大高度为 193.97 m, 对应裂采比 13.11。

表 3 1305 工作面覆岩受力与变形破坏结果  
Table 3 Deformation and failure of the overburden of the working face 1305

岩层组名称	极限跨距/m		受力分析			变形分析		
	初次垮落	周期垮落	最大拉应力/MPa	最大剪应力/MPa	破坏判定	挠度/m	自由空间/m	破坏判定
延安-直罗组中硬岩组	59.25	24.19	1.08	2.37	拉破坏	0.04	14.80	破坏
安定组中下部软岩组	93.10	39.11	1.02	1.77	拉破坏	1.32	6.15	破坏
安定组顶部-宜君-洛河组中硬岩组	101.80	110.83	1.08	3.28	拉破坏	0	0	不破坏

综合分析数值模拟和理论计算结果, 确定 1305 工作面导水裂隙带高度为 193.97 m, 对应裂采比为 13.11。

表 4 为 1305 工作面导水裂隙带发育高度的本文预测值、相关经验公式预测值和 1305 工作面 2 个不同地质钻孔的实测值。由表 4 可知, 采用《建筑物、

水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》<sup>[13]</sup>经验公式的预测值普遍比实测值小, 其中, 公式一预测值相对误差最大, 达-63.5%; 公式二预测误差最大值为-46.99%。本文对 1305 工作面建立统一地质模型进行预测, 预测导高值较实测值偏大, 预测相对误差最小为 18.23%, 更接近实测值。

表 4 1305 工作面导水裂隙带高度预测误差分析  
Table 4 Error analysis of height prediction of water conducting fracture zone in the working face 1305

采高/m	实测值/m	《规范》公式一			《规范》公式二			本文预测方法		
		预测值/m	绝对误差/m	相对误差/%	预测值/m	绝对误差/m	相对误差/%	预测值/m	绝对误差/m	相对误差/%
14.8	135.78	59.85	-75.93	-55.92	86.94	-48.84	-35.97	193.97	58.11	42.80
	164.00	59.85	-104.15	-63.50	86.94	-77.06	-46.99	193.97	29.89	18.23

## 4 结论

a. 黄陇煤田顶板实测导水裂隙带高度与采高总体呈正相关关系, 但相同采高条件下导高数据离散性较大, 二者之间并非简单的线性关系。

b. 相同采高及开采方式下, 不同覆岩结构顶板采动导水裂隙带发育高度有显著差异。其中, 硬-硬-软-软型覆岩组合导高最大, 软-硬-软-硬型覆岩组合导高最小。

c. 将郭家河煤矿 1305 工作面按硬-软-硬-软型覆岩结构进行模型概化, 计算其导水裂隙带高度为 193.97 m, 误差分析显示, 本文方法的预测导高更接近实测值。

请听作者语音介绍创新技术成果  
等信息, 欢迎与作者进行交流



## 参考文献(References)

OSID 码

- [1] 虎维岳. 矿山水害防治理论与方法[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2005.  
HU Weiyue. Theory and method of mine water disaster prevention and control[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2005.
- [2] 虎维岳. 深部煤炭开采地质安全保障技术现状与研究方向[J].

煤炭科学技术, 2013, 41(8): 1-5.

HU Weiyue. Study orientation and present status of geological guarantee technologies to deep mine coal mining[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(8): 1-5.

[3] 董书宁. 煤矿安全高效生产地质保障技术现状与展望[J]. 煤炭科学技术, 2007, 35(3): 1-5.

DONG Shuning. Current situation and prospect of coal mine geological guarantee technologies to improve safety and efficiency[J]. Coal Science and Technology, 2007, 35(3): 1-5.

[4] 曹海东. 煤层开采覆岩离层水体致灾机理与防控技术研究[D]. 北京: 煤炭科学研究院, 2018.

CAO Haidong. Study on prevention & control technology and disaster-caused mechanism of bed separation water body in overburden strata during coal seam mining[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2018.

[5] 武强, 赵苏启, 董书宁, 等. 煤矿防治水手册[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2013.

WU Qiang, ZHAO Suqi, DONG Shuning, et al. Prevention and control of coal mines[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2013.

[6] 张有喜. 厚表土层下富水顶板特厚煤层集约化开采关键技术与实践[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.

ZHANG Youxi. Key technologies and practice on the intensive mining of extra-thick coal seam under water-rich roofs and thick overburden[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.

[7] 于水. 含水层下特厚煤层综放开采覆岩破坏规律研究[D]. 西

- 安: 西安科技大学, 2012.
- YU Shui. Research on special thick coal seam overburden broken rule in fully mechanized caving under aquifer[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [8] 刘洋. 西部浅埋矿区水沙溃涌灾害防控关键技术研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.
- LIU Yang. Research on the fundamental theory and disasters prevention-control of water-sand inrush in shallowly buried coal seam[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2016.
- [9] 刘英锋, 王新. 黄陇侏罗纪煤田顶板水害防治问题及对策探讨[J]. 西安科技大学学报, 2013, 33(4): 431-435.
- LIU Yingfeng, WANG Xin. Water hazard prevention and control in Huanglong Jurassic coalfield[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2013, 33(4): 431-435.
- [10] 李超峰, 虎维岳, 王云宏, 等. 煤层顶板导水裂隙带高度综合探查技术[J]. 煤田地质与勘探, 2018, 46(1): 101-107.
- LI Chao Feng, HU Weiyue, WANG Yunhong, et al. Comprehensive detection technique for coal seam roof water flowing fractured zone height[J]. Coal Geology & Exploration, 2018, 46(1): 101-107.
- [11] 靳德武, 刘英锋, 刘再斌, 等. 煤矿重大突水灾害防治技术研究新进展[J]. 煤炭科学技术, 2013, 41(1): 25-29.
- JIN Dewu, LIU Yingfeng, LIU Zaibin, et al. New progress in prevention and control technology of major water inrush disasters in coal mines[J]. Coal Science and Technology, 2013, 41(1): 25-29.
- [12] 刘世奇. 厚煤层开采覆岩破坏规律及粘土隔水层采动失稳机理研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2016.
- LIU Shiqi. The law of the overburden failure in thick coal seam mining and instability criterion of the clay aquiclude under the influence of mining[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2016.
- [13] 国家安全监管总局. 建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2017.
- State Administration of Security. Code for coal pillar reservation and pressure coal mining of buildings, water bodies, railways and main shafts[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2017.
- [14] 许家林, 朱卫兵, 王晓振. 基于关键层位置的导水裂隙带高度预计方法[J]. 煤炭学报, 2012, 37(5): 762-769.
- XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen. New method to predict the height of fractured water conducting zone by location of key strata[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(5): 762-769.
- [15] 许家林, 钱鸣高. 覆岩关键层位置的判别方法[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(5): 463-467.
- XU Jialin, QIAN Minggao. Method to distinguish key strata in overburden[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(5): 463-467.
- [16] 许家林, 朱卫兵, 王晓振, 等. 浅埋煤层覆岩关键层结构分类[J]. 煤炭学报, 2009, 34(7): 865-870.
- XU Jialin, ZHU Weibing, WANG Xiaozhen, et al. Classification of key strata structure of overlying strata in shallow coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(7): 865-870.
- [17] 杨贵. 综放开采导水裂隙带高度及预测方法研究[D]. 青岛: 山东科技大学(青岛), 2004.
- YANG Gui. Study on the height of water flowing fractured zone and prediction method in fully mechanized sub-level caving[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology(Qingdao), 2004.
- [18] 王惠兵, 高荣斌, 毛增民. 软弱覆岩的两类结构模式及对导水裂隙带高度的抑制性[J]. 能源技术与管理, 2009(3): 10-12.
- WANG Huibing, GAO Rongbin, MAO Zengmin. Models of two kinds weak strata structure and inhibition to height of water flowing fractured zone[J]. Energy Technology and Management, 2009(3): 10-12.
- [19] 康永华. 覆岩性质对“两带”高度的影响[J]. 煤矿开采, 1998, 3(1): 52-54.
- KANG Yonghua. The effect of overburden strata characteristics on heights of the fractured and caved zones[J]. Coal Mining Technology, 1998, 3(1): 52-54.
- [20] 许延春, 李俊成, 刘世奇, 等. 综放开采覆岩“两带”高度的计算公式及适用性分析[J]. 煤矿开采, 2011, 16(2): 4-7.
- XU Yanchun, LI Juncheng, LIU Shiqi, et al. Calculation formula of “two-zone” height of overlying strata and its adaptability analysis[J]. Coal Mining Technology, 2011, 16(2): 4-7.

(责任编辑 周建军)