



## 基于上覆岩层应力场和裂缝场演化的采动井套管破断特征及防控对策

李延河 倪小明 王保玉 谭学斌

引用本文:

李延河, 倪小明, 王保玉, 等. 基于上覆岩层应力场和裂缝场演化的采动井套管破断特征及防控对策[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(1): 221–231.

LI Yanhe, NI Xiaoming, WANG Baoyu. Breakage characteristics of casing and prevention and control measures in mining wells based on the evolution law of stress and crack fields in overlying strata[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 221–231.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/cst.2023-1571>

### 您可能感兴趣的其他文章

#### Articles you may be interested in

##### 采动巷道矿压显现特征及力构协同防控技术研究

Study on mine pressure characteristics and force–structure cooperative prevention and control on mining roadway with deep thick hard roof

煤炭科学技术. 2021, 49(6): 61–71 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/e685db61-a8d2-4806-83b4-f7b20dc2edeb>

##### 采场覆岩空间破裂与采动应力场分布关联性研究

Study on correlation between spatial fracturing of overlying strata and distribution of mining stress field in stope

煤炭科学技术. 2019(2) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/4daa6d83-fce2-49e9-8fa8-ee39942f405d>

##### 采动巷道侧向高低位厚硬顶板破断模式试验研究

Experimental study on fracture mode of lateral high and low thick and hard roof in mining roadway

煤炭科学技术. 2021, 49(4): 111–120 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.cst.2021.04.014>

##### 采动区瓦斯地面井破断防护研究及应用

Study and application of gas surface well broken protection in mining area

煤炭科学技术. 2018(6) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/9d3e8dc0-5b6e-45f1-9cd0-f70afef680e3>

##### 7.0m大采高工作面覆岩破断及矿压显现规律研究

Study on overlying strata breakage and strata behaviors law of 7.0 m mining height working face

煤炭科学技术. 2017(8) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/c3a5b818-40cd-49e9-8eb4-0ea2ac57b68e>

##### 厚硬岩层下采动应力突变及冲击地压防治研究

Study on mining stress variance and pressure bump prevention and control under thick and hard rock strata

煤炭科学技术. 2017(8) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/697e58fd-f8f5-4164-812f-72beb0a8c592>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

李延河,倪小明,王保玉,等.基于上覆岩层应力场和裂缝场演化的采动井套管破断特征及防控对策[J].煤炭科学技术,2024,52(1):221-231.

LI Yanhe, NI Xiaoming, WANG Baoyu, *et al.* Breakage characteristics of casing and prevention and control measures in mining wells based on the evolution law of stress and crack fields in overlying strata[J]. Coal Science and Technology, 2024, 52(1): 221-231.

## 基于上覆岩层应力场和裂缝场演化的采动井套管破断特征及防控对策

李延河<sup>1,2</sup>,倪小明<sup>3,4</sup>,王保玉<sup>4</sup>,谭学斌<sup>3</sup>

(1. 平顶山天安煤业股份有限公司, 河南 平顶山 467000; 2. 中国平煤神马控股集团有限公司, 河南 平顶山 467000; 3. 河南理工大学 能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000; 4. 河南理工大学 煤系气资源高效开发研究院, 河南 焦作 454000)

**摘要:**准确确定出煤矿采动井套管破断特征并提出相应的防控对策,能为井筒长期稳定提供重要保障。以平顶山矿区的二<sub>1</sub>煤层及上覆岩层为研究对象,采用理论计算与数值模拟软件模拟方法,确定出上覆岩层离层段应力和位移分布规律,分析了上覆岩层高度、距工作面水平距离与应力、位移的相关性,拟合出上覆岩层高度、距工作面水平距离与应力、位移的关系式;根据研究区采动井的实际开发经验,确定出最佳布井区域下的套管主要破断类型,结合常用套管力学参数,得出“两场”演化下的套管破断位置及长度等特征;对常用的采动井局部防护技术进行总结,并提出对应的防控对策。结果表明:工作面推进过程中,上覆岩层应力呈现出“波动-线性降低”的变化规律,位移呈现出“几乎未发生变化-类双曲线型”的变化规律。最佳布井区域下的采动井套管主要以拉伸缩径和剪切破断为主,选择施加套管加强件对采动井套管进行加固。研究区地面采动井三开段采用N80套管时,需在煤层上部46 m亚关键层处、54 m软硬互层处分别加设抗拉伸套管加强件和抗剪切加强件;采用P110套管时,需在煤层上部46 m亚关键层处加设抗拉伸加强件。建议研究区地面采动井三开段均采用P110套管,增加采动井的井筒稳定性。该研究成果为平顶山矿区及相似条件下采动井预防套管破断提供了理论指导。

**关键词:**采动井;套管破断;防控对策;加强件;上覆岩层组合

中图分类号:TD712

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2024)01-0221-11

### Breakage characteristics of casing and prevention and control measures in mining wells based on the evolution law of stress and crack fields in overlying strata

LI Yanhe<sup>1,2</sup>, NI Xiaoming<sup>3,4</sup>, WANG Baoyu<sup>4</sup>, TAN Xuebin<sup>3</sup>

(1. Pingdingshan Tianan Coal Mining Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China; 2. China Pingmei Shenma Energy and Chemical Group Co., Ltd., Pingdingshan 467000, China; 3. School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 4. Institute of Efficient Development and Utilization of Coal-Measure Gas, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Accurately determining the casing breakage characteristics in mining wells and proposing corresponding preventive and control measures can provide an important guarantee for the long-term stability of the wellbore. Taking the No. 2<sub>1</sub> coal seam and overlying strata in the Pingdingshan mining area as the research object, theoretical calculations and numerical simulation were used to determine the stress and displacement distribution law of separation section in the overlying strata. The correlation between the height of the overlying strata, the horizontal distance from the working face and stress and displacement were analyzed, and the relationship between the height of the overlying strata, the horizontal distance from the working face and the stress and displacement were fitted. Based on the actual development experience of mining wells in the research area, the main types of casing breakage in the optimal well layout area were determined. Combined with the commonly used casing mechanical parameters, the casing breakage location and length under the “two field” evolution

收稿日期:2023-10-31

责任编辑:宫在芹

DOI: 10.12438/cst.2023-1571

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41872189);河南省高校创新团队资助项目(21HRTSTHN007)

作者简介:李延河(1973—),河南焦作人,教授级高级工程师。E-mail: 13569998321@139.com

通讯作者:倪小明(1979—),山西临汾人,教授,博士。E-mail: nxm1979@126.com

were characterized. The commonly used local protection technologies for mining wells was summarized and the corresponding preventive and control measures were proposed. The results shown that, in the process of working face advancement, the stress of the overlying strata shown a change pattern of from fluctuation to linear decrease, and the displacement shown a change pattern of from almost unchanged to hyperbolic type. The casing in the optimal well layout area was mainly characterized by tensile shrinkage and shear fracture, and the casing reinforcement was applied to reinforce the casing in mining well. When N80 casing was used in the third section of the ground mining well in the research area, it was necessary to install anti-tensile and shear casing reinforcement in the upper 46 m of the coal seam at the sub-critical layer and in the upper 54 m of the coal seam at the soft/hard interlayer. When P110 casing was used, it is necessary to install anti-tensile reinforcement in the upper 46 m of the coal seam at the sub-critical layer. It is recommended to use P110 casing for all three sections of the surface mining wells in the research area to increase the wellbore stability in mining well. The research achievement can provide theoretical guidance for preventing casing breakage in the Pingdingshan mine and mining wells under similar conditions.

**Key words:** mining well; casing breaking; preventive and control measures; reinforcement; overlying strata combination

## 0 引言

煤层开采过程中上覆岩层受采动影响发生岩层移动,极易引起煤矿地面采动井套管发生破断。因此需要根据套管破断机制提出针对性的井筒增稳措施。目前的井筒增稳措施主要有:煤层薄弱顶板加固技术、井筒环空技术、新型材料加固技术、加强件加固技术等。采用锚杆+锚索+锚网混合方法对煤层薄弱顶板进行加固,该技术施工相对繁琐、井下施工时会影响煤矿生产进度<sup>[1-3]</sup>。采用在井筒内预留环空水泥的方法适用于岩层采动影响较小的层位,当岩层位移超过环空距离时,增稳效果较差<sup>[4-6]</sup>。新型材料加固技术是优化选取具有一定强度和弹性的材料制作套管,同时选取具有一定流塑性的新材料代替传统泥浆固井,提高井筒抗挤压变形能力<sup>[7-9]</sup>,材料成本的高低对其应用前景影响较大。与其他井筒增稳技术相比,加强件加固技术具有施工简便、增稳成本低、不影响井下生产、适用于各种地形等优点<sup>[10-11]</sup>,具有较广阔的应用前景。预防套管破断的关键在于确定采动井套管破断的位置和长度范围。国内外研究者通过理论计算、相似模拟试验、数值模拟等方法研究了特定覆岩组合下的离层应力分布特征<sup>[12-16]</sup>,但针对不同型号下的套管破断层位和长度指示意义不明确。笔者以平顶山矿区为例,基于采煤工作面上覆岩层离层产生机制,采用理论计算与数值模拟相结合的方法,研究上覆岩层离层段应力和位移分布规律,分析最佳布井区域下的采动井套管主要破断类型,结合常用套管力学参数,得出“两场”(煤层采动过程中上覆岩层应力场和裂隙场)演化下的套管破断位置及长度等特征,并提出对应的防控对策,以期在现场地面采动井套管薄弱位置的技术防控提供指导和借鉴。

## 1 平顶山矿区地质概况

平顶山矿区位于河南省中部,东起沙河和汝河

交汇带的洛岗断层,西抵红石山附近的郏县断层,南至湛河北岸煤层露头,北至汝河附近的襄郏断层。主要开采的煤层有二<sub>1</sub>煤和四<sub>2</sub>煤。其中二<sub>1</sub>煤层埋深 160.87 ~ 1 003.85 m,煤厚 0.34 ~ 7.80 m,平均 5.81 m,煤层平均倾角 6°,结构简单,是本次研究煤层。二<sub>1</sub>煤层直接顶板多为泥岩、砂质泥岩,局部为细中粒砂岩。底板以深灰色泥岩、砂质泥岩为主,炭质泥岩伪底常零星分布。采用的地质资料来源于平顶山矿区首山一矿,该矿设计生产能力  $240 \times 10^4$  t/a,采用竖井开拓,走向长壁后退式采煤方法,全部垮落法管理顶板。目前该矿正在开采的已二采区为双翼采区,已二采区东翼布置有 1 个回采工作面、1 个掘进工作面;西翼布置有 1 个准备工作面。矿区位置及矿井含煤地层柱状情况如图 1 所示。

## 2 采动井套管破断位置及防控对策研究流程

采动过程中离层段位置、应力和位移分布特征以及布井位置的不同,导致采动井套管破断类型、破断位置和长度范围存在差异。煤矿地面采动井套管破断位置、长度等特征及防控对策的研究流程可描述为:

1) 根据研究区围岩岩性组合及关键层判别方法确定出关键层。

2) 基于数值模拟技术,研究研究区上覆岩层离层段应力和位移分布规律,分析上覆岩层高度、工作面水平距离与应力、位移关系相关性,并拟合出相关函数。

3) 根据上覆岩层应力、位移函数关系和目前常用套管的力学参数,确定出套管薄弱位置和长度范围,分析薄弱位置处的套管受力情况,判断套管的破断类型,并选择相应的局部防控对策。

将笔者提出的煤矿地面采动井套管破断特征防控政策的具体研究流程进行总结,如图 2 所示。

## 3 基于数值模拟的离层段应力和位移分布

### 3.1 关键层的确定

根据上覆岩层离层段形成机理可知,离层段位

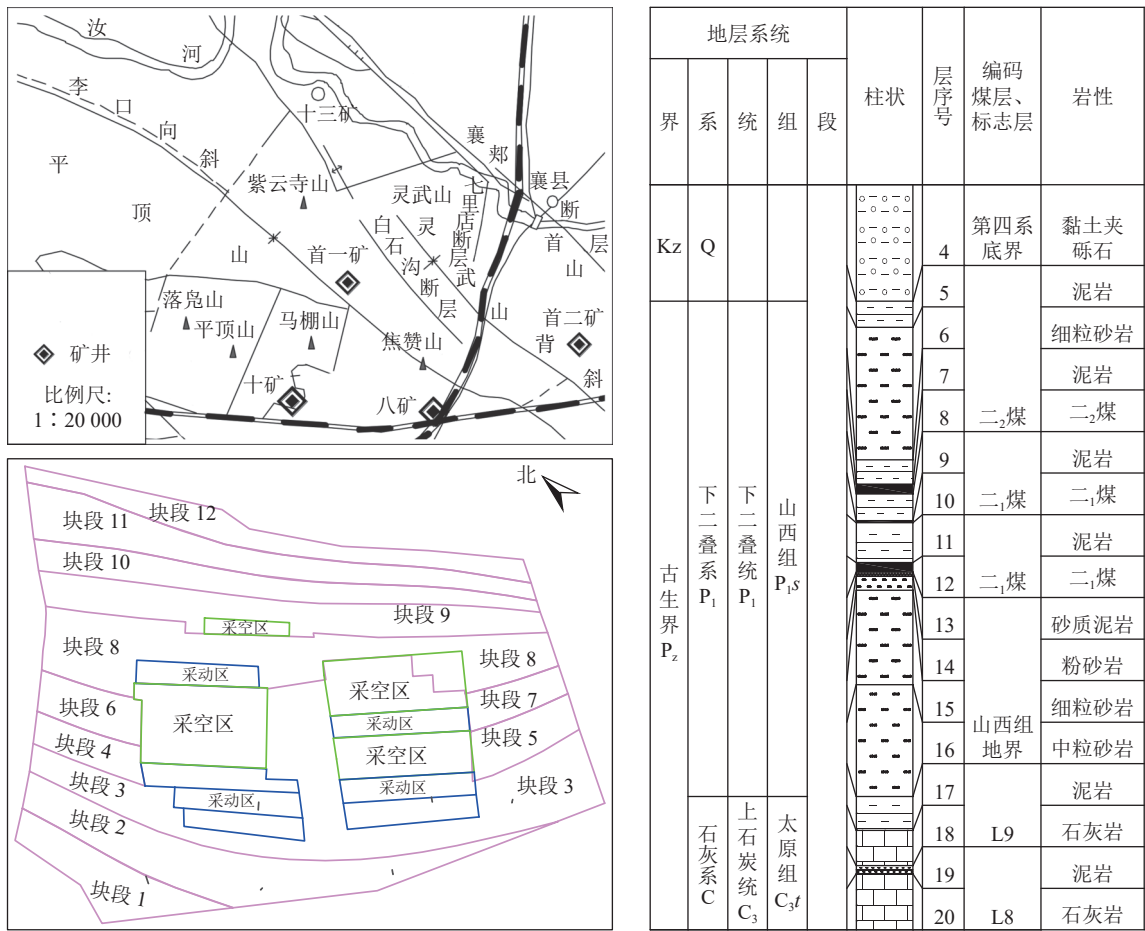


图 1 平顶山矿区地理构造及含煤地层柱状图

Fig.1 Histogram of geographical structure and coal-bearing strata of Pingdingshan mining area

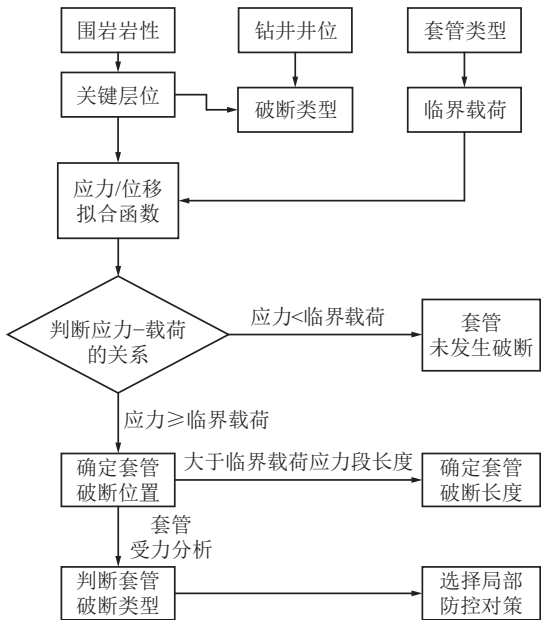


图 2 采动井套管破断位置及防控对策研究流程

Fig.2 Research process on location and prevention and control measures of casing breakage in mining wells

置发育在关键层下部。根据文献 [17] 的关键层判别方法, 结合平顶山矿区钻孔柱状, 对二<sub>1</sub>煤上覆岩层

的关键层层位进行计算。具体方法为

1) 垮落带高度主要与煤层采高、上覆岩性和厚度、上覆岩层垮落后的填充厚度有关, 其关系满足:

$$S_n = h + \sum_{n=1}^k m_n - \sum_{n=1}^k K_A m_{n-1} \quad (1)$$

式中:  $S_n$  为垮落带高度,  $m$ ;  $h$  为煤层厚度,  $m$ ;  $m_n$  为煤层上覆第  $n$  层岩层的厚度 ( $n=1, 2, \dots, k$ ),  $m$ ;  $K_A m_{n-1}$  为第  $n-1$  层岩层垮落后的填充厚度,  $m$ ;  $K_A$  为岩石的碎胀系数, 取 1.4。

当  $K_A m_n > S_n$  时, 则垮落带终止, 第 1 ~  $n-1$  层为直接顶, 第  $n$  层岩层为基本顶。

2) 确定出煤层直接顶和基本顶层位后, 以基本顶为起始硬岩层, 第  $k$  层岩层对  $n$  层硬岩层的载荷作用为

$$(q_n)_k = E_1 h_1^3 \sum_{n=1}^k h_n \gamma_n / \sum_{n=1}^k E_n h_n^3 \quad (2)$$

式中:  $E_n$  为第  $n$  层岩层的弹性模量, GPa;  $h_n$  为岩层厚度,  $m$ ;  $\gamma_n$  为体积力,  $kN/m^3$ 。

当  $(q_n)_{k+1} < (q_n)_k$  时, 第  $k+1$  层岩层对硬岩不起作用, 那么第  $k+1$  层岩层为下一硬岩层。



则第  $n$  层硬岩的累计载荷为

$$q_n = \sum_{k=1}^n (q_k)_k \tag{3}$$

3) 关键层层位可以通过比较各硬岩层间破断距判识<sup>[18]</sup>, 按固支梁计算第  $n$  层硬岩层的破断距和周期来压步距为

$$L_n = h_n \sqrt{\frac{2R_T}{q_n}} \tag{4}$$

$$L'_n = h_n \sqrt{\frac{R_T}{3q_n}} \tag{5}$$

式中:  $L_n$  为第  $n$  层硬岩层的破断距, m;  $L'_n$  为周期跨距, m;  $h_n$  为岩层厚度, m;  $q_n$  为累计载荷, MPa;  $R_T$  为

抗拉强度, MPa。

根据刚度条件, 当  $L_n < L_{n+1}$  时, 第  $n$  层硬岩层为关键层<sup>[19]</sup>。

根据式(3)—式(5)计算累计载荷、破断距、周期来压步距等参数并判断主关键层、亚关键层等, 计算结果见表 1。

从表 1 可看出, 二<sub>1</sub> 煤上覆岩层发育 3 层硬岩。其中厚 45.75 m 的砂质泥岩为主关键层, 厚 21.87 m 的中砂岩为亚关键层。

3.2 上覆岩层应力和位移分布规律

3.2.1 模型的构建

1) 模型结构。采用 3DEC 数值模拟软件, 对不同开采距离下的上覆岩层应力、位移进行研究。根据平顶行矿区钻孔柱状, 建立地层模型。模型尺寸

表 1 关键层位置计算所需基本参数及计算结果

Table 1 Basic parameters and calculated results of key layer location calculation

层号	岩性	计算参数				计算结果			层位判识
		层厚/ m	弹性模量/ GPa	体积力/ (kN·m <sup>3</sup> )	抗拉强度/ MPa	$n$ 层硬岩累计载荷/ MPa	破断距/ m	周期来压步距/ m	
24	砂质泥岩	45.75	6.5	25.48	1.5	19.78	73.40	—	硬层3
23	粉砂岩	1.37	20	25.28	2.8	—	—	—	—
22	粉砂岩	1.37	20	25.3	2.8	—	—	—	—
21	砂质泥岩	1.61	6.5	25.5	1.5	—	—	—	软硬互层4
20	粉砂岩	3.87	20	25.3	2.8	—	—	—	—
19	砂质泥岩	20.07	6.5	25.5	1.5	—	—	—	—
18	中砂岩	3.09	20	24.1	2.8	—	—	—	软硬互层3
17	泥岩	4.14	4.17	24.5	0.8	—	—	—	—
16	砂质泥岩	8.84	6.5	25.5	1.5	—	—	—	—
15	粉砂岩	8.08	20	25.3	2.8	—	—	—	—
14	粗砂岩	3.29	9	24.5	2.8	—	—	—	—
13	砂质泥岩	1.44	6.5	25.5	1.5	—	—	—	软硬互层2
12	粗砂岩	7.20	9	24.5	2.8	—	—	—	—
11	粉砂岩	7.82	20	25.3	2.8	—	—	—	—
10	砂质泥岩	2.00	6.5	25.5	1.5	—	—	—	软硬互层1
9	细砂岩	1.53	29	24.6	2.8	—	—	—	—
8	粉砂岩	2.4	20	25.3	2.8	—	—	—	—
7	粗砂岩	5.43	9	24.5	2.8	—	—	—	—
6	中砂岩	21.87	20	24.1	2.8	2.30	71.29	—	硬层2
5	粉砂岩	2.54	20	25.3	2.8	—	—	—	—
4	中砂岩	8.27	20	24.1	2.8	0.46	43.84	—	硬层1
3	粉砂岩	7.19	20	25.3	2.8	0.18	39.89	16.29	基本顶
2	中砂岩	3.98	20	24.1	1.5	—	—	—	直接顶
1	砂质泥岩	2.24	6.5	25.5	1.5	—	—	—	直接顶
0	二 <sub>1</sub> 煤	5.04	1.3	15.7	0.21	—	—	—	—

为  $300\text{ m}\times 5\text{ m}\times 200\text{ m}$ , 模拟模型的倾角设置为  $0^\circ$ ; 本构模型选取摩尔-库伦模型; 在煤层上部 2、5、12、20、43、50、60、70、86、90 m 高度处分别设置应力、位移测线。模型结构如图 3 所示。

2) 力学参数的确定。离散元模拟需要块体力学参数和节理力学参数 2 部分。根据平顶山矿区地质资料设置模拟力学参数, 模型块体力学和节理力学参数见表 2。

3) 边界条件的确定。完成模型参数赋值后需要对模型边界条件进行设置。根据实际开采情况, 允许模型顶部可以自由移动, 模型底部固定, 侧面限制水平位移, 顶部施加  $19.78\text{ MPa}$  自重应力载荷。模型

边界条件设置如图 3 所示。

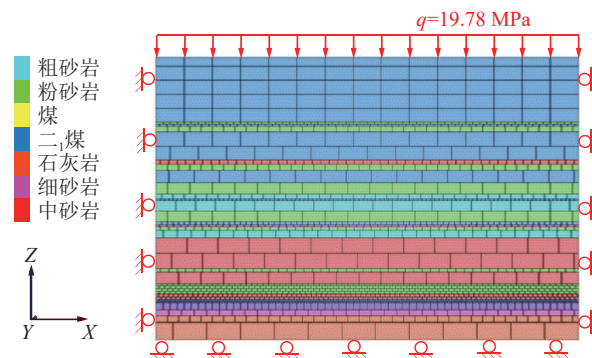


图 3 模型结构及边界条件

Fig.3 Model structure and boundary conditions

表 2 模型的块体力学和节理力学参数

Table 2 Block mechanics and joint mechanics parameters of model

岩性	块体力学参数					节理力学参数			
	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	弹性模量/ GPa	泊松比	体积模量/ GPa	剪切模量/ GPa	法向刚度/ ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	切向刚度/ ( $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$ )	内摩擦角/( $^\circ$ )	黏聚力/ MPa
煤	1 457	1.3	0.30	1.1	0.5	$7.5\times 10^{10}$	$0.01\times 10^{10}$	22.1	1
泥岩	2 670	4.17	0.34	4.3	1.6	$10.5\times 10^{10}$	$0.8\times 10^{10}$	32.1	3.05
砂质泥岩	2 340	6.5	0.32	6.0	2.5	$4.8\times 10^{10}$	$0.1\times 10^{10}$	24.9	4.2
细砂岩	2 680	29	0.26	20.1	11.5	$6.84\times 10^{10}$	$1.8\times 10^{10}$	30	2
中砂岩	2 460	20	0.23	12.3	8.1	$4.46\times 10^{10}$	$2.6\times 10^{10}$	26	3.8
粉砂岩	2 680	20	0.31	17.5	7.6	$1.38\times 10^{10}$	$0.7\times 10^{10}$	30	8.95
粗砂岩	3 300	9	0.32	8.3	3.4	$4.46\times 10^{10}$	$2.6\times 10^{10}$	36	2.8

### 3.2.2 模拟结果

选取煤层上覆 20、60、90 m 处的测线数据, 分别对工作面推进 40、80、120 m 时垂向应力、垂向位移和水平应力、水平位移随上部岩层高度的变化进行模拟, 并对离层发育高度进行分析, 由于条件限制, 未能进行相似物理模拟试验, 因此对比杨兆彪等<sup>[20]</sup>进行的相似物理模拟结果, 从裂隙层位发育规律的角度侧面验证本文的模拟结果, 部分模拟结果如图 4 所示。从图 4 可以看出:

1) 图 4a 为随工作面推进过程中, 离层发育高度的变化曲线。随着工作面的推进, 离层高度呈先增加后减慢的发育趋势。工作面推进 60 m 以内时, 离层高度匀速发育至上覆岩层 20 m 左右, 工作面推进 60 ~ 100 m 时, 离层高度加速发育至 130 m 处, 工作面继续推进, 离层高度不再发育。离层发育速度变化的高度节点与关键层位置相对应, 关键层位置计算结果(表 1), 验证了模拟的正确。

2) 图 4b、图 4c 分别为不同工作面推进距离下, 岩层水平应力和垂向应力随上部岩层高度的变化。

正负号代表了模型模拟的应力和位移的方向; 其中, 水平应力、位移大于 0 为  $x$  轴正方向; 垂直应力、位移大于 0 为  $z$  轴正方向。工作面推进过程中, 上覆岩层应力呈现出“波动-线性降低”的变化规律。煤层上覆 20 m 以内岩层出现周期性应力集中和释放, 20 m 以上呈近似线性变化。

3) 图 4d、图 4e 分别为不同工作面推进距离下, 岩层水平位移和垂向位移随上部岩层高度的变化(图中  $y$  轴负值表示岩层向下移动)。岩层的位移主要以垂向位移为主, 随着工作面的推进, 岩层位移均呈增长趋势。工作面推进过程中, 上覆岩层位移呈现出“几乎未发生变化-类双曲线型”的变化规律。工作面推进距离小于 20 m 时, 上覆岩层基本保持稳定, 没有发生垂向位移; 20 m 以后, 上覆岩层出现向上位移-弯曲下沉-向上位移的变化, 且随着推进距离增加, 范围逐渐扩大, 最终趋于定值。

4) 图 5 为杨兆彪等<sup>[20]</sup>相似物理模拟试验煤层开挖稳定后的结果。对比图 4a, 可以看出, 随着工作面

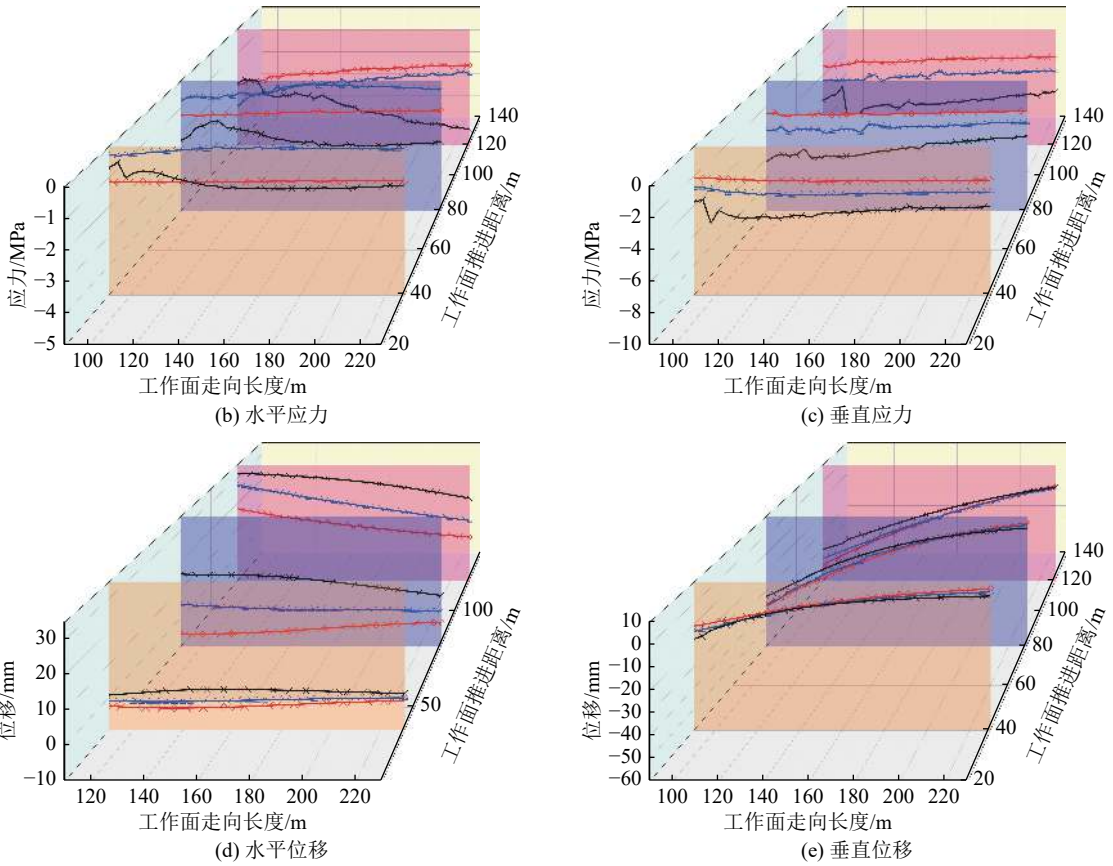
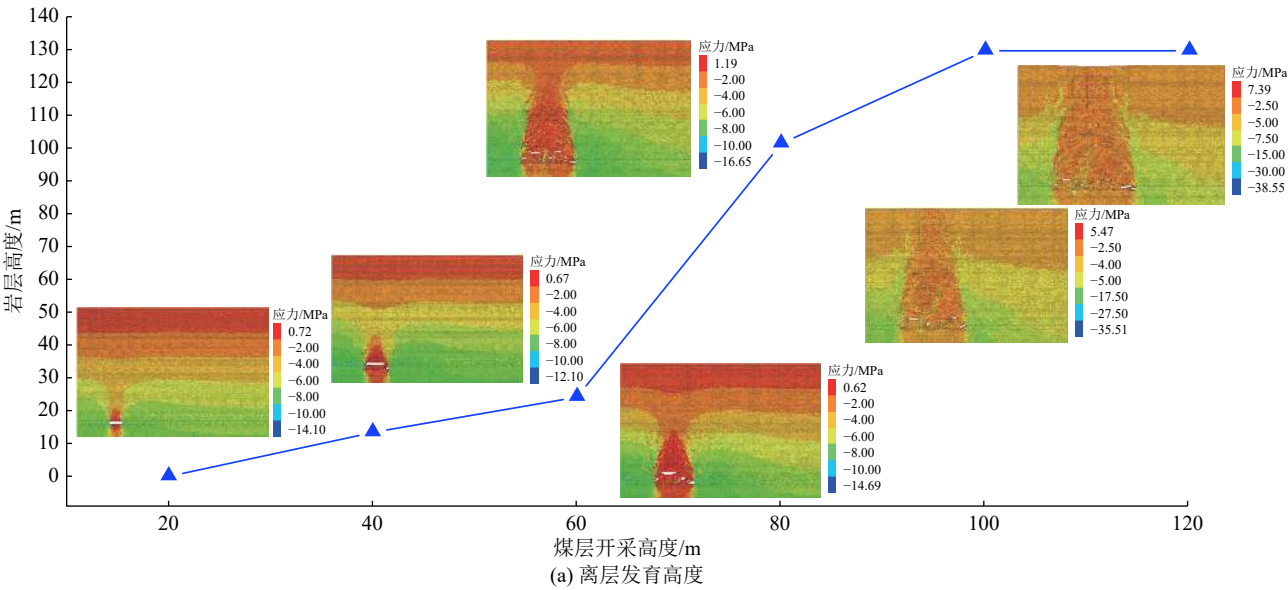


图4 上覆岩层应力和位移分布规律

Fig.4 Distribution pattern of stress and displacement in overlying strata

推进至上覆岩层稳定时,上覆岩层“三带”发育规律与其相似物理模拟结果相似,侧面验证了模拟的准确性。

4 套管破断主要类型及防控对策

4.1 煤矿采动井套管破断主要类型

在煤矿采动区施工煤层气井时,由于采动塌陷

会引起上覆岩层移动,导致井壁错断引起套管失稳变形,降低采动井的使用寿命,目前,常见的煤矿采动井套管破断类型主要包括弯曲破断、压缩破断、拉伸破断和剪切破断4种类型,见表3。

研究表明,岩层位移、破断对套管产生的多为不均匀载荷,不均匀载荷下的套管强度一般为均匀载荷时的5.0%~12.5%<sup>[21-22]</sup>。内压在0.1 MPa时的套

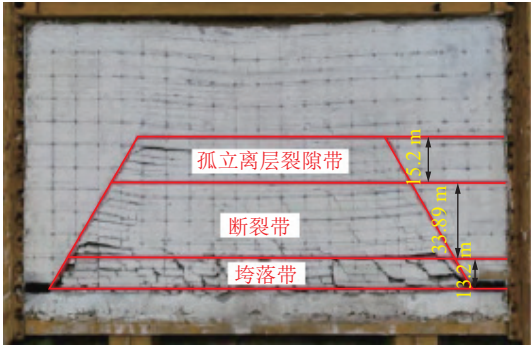


图 5 煤矿采动井套管破断类型及套管加强件

Fig.5 Types of casing breakage and reinforcement components in coal mining wells

管临界载荷见表 4。当套管材质、外径相同时,套管的壁厚越大,其临界非均匀载荷越大。因此,通过在套管关键部位加设套管加强件,可以有效减缓采动应力对采动井套管的损伤。

考虑到套管易变形破断这一在采动区施工煤层气井所面临的主要问题,目前平顶山矿区地面采动井均采用“避、让、防、疏”的设计施工理念(见表 5)<sup>[23]</sup>,分析获得了地面井结构稳定性高、抽采效果好的最佳布井区域;通过“局部固井+悬挂完井”技术,让开岩层移动量(图 6a);三开常采用外径

表 3 采动井套管破断类型  
Table 3 Types of casing breakage in mining wells

破断类型	破断示意	主要作用力	破坏原理
弯曲破断		垂直/斜向外力作用	套管所受的垂直/斜向外力的受力点不在井套管的中心线上,导致套管发生弯曲变形,变形超过其强度极限后发生破断
压缩破断		压力作用	套管在受到上覆岩层或其他物体的压力作用时,受力面积较小,易发生套管压缩破断
拉伸破断		拉伸力作用	套管在受到拉伸力作用时,发生拉伸变形,变形超过其强度极限时,会发生破断
剪切破断		剪切力作用	套管在受到岩体滑移所造成的水平或倾斜方向的剪切力作用时,发生横向错位,当横向位移量超过套管极限时,发生套管错断

139.7 mm、壁厚 10.54 mm 的 N80 或 P110 钢型筛管,增加套管强度。

表 4 煤矿采动井常用套管临界载荷  
Table 4 Critical load of commonly used casings in coal mining wells

序号	钢级	外径/mm	壁厚/mm	径厚比	临界均匀载荷/MPa	最小非均匀临界载荷/MPa	最大非均匀临界载荷/MPa	套管线重/(kg·m <sup>-1</sup> )	抗拉强度/kN
1	N80	139.7	7.72	18.10	43.3	2.165	5.412 5	25.3	1 766
2	N80	139.7	9.17	15.23	60.9	3.045	7.612 5	29.8	2 073
3	N80	139.7	10.54	13.25	76.9	3.845	9.612 5	34.2	2 358
4	P110	139.7	7.72	18.10	51.5	2.575	6.437 5	25.3	2 429
5	P110	139.7	9.17	15.23	76.5	3.825	9.562 5	29.8	2 851
6	P110	139.7	10.54	13.25	100.2	5.010	12.525 0	34.2	3 243

表 5 采动井局部防护技术的技术原理及应用范围  
Table 5 Technical principles and application scope of local protection technology for mining wells

技术理念	关键技术	技术原理	应用范围
避	布井位置优选技术	选取能够兼顾地面井结构稳定区与裂隙空间发育的区域为最优布井区域	通过优化布井位置减少套管变形破坏,当地层应力变化较大时,难以保障套管的稳定性
让	局部固井技术	采用局部固井技术,为地面井下端岩层“让”出移动空间	适用于岩层采动影响较小的层位,当岩层位移超过环空距离时,增稳效果较差
防	局部防护技术	在套管高危位置上安设防护装置,提高套管抗性	施工简便、增稳成本低,但需要根据套管高危位置的受力情况选取相应的防护装置
疏	悬挂完井技术	优化三开筛管尺寸,提高筛管抗性和抽采透气效果	适用于生产过程中存在筛管段泥沙堵孔现象的区域



根据实际开发经验以及采动上覆岩层应力和位移的模拟结果,发现有部分位置的套管仍会发生损毁,井下电视观测表明(图6b),拉伸变形和剪切错断为采动井套管损毁的主要类型,需要对套管破坏安全性进行分析,确定钻井套管易损毁位置和长度,根据套管破断类型加设抗剪切或抗拉伸的套管加强件(图6c),提高采动井寿命。

#### 4.2 套管破断的防控对策

为了确定出研究的各参数与应力、位移关系,采用相同的模拟条件,分别进行采高1、3、5 m情况下的数值模拟,根据相关数值模拟的应力、位移结果,分别进行单一参数与应力、位移拟合,拟合结果如图7和图8所示。

从图6和图7可看出,上覆岩层高度、工作面水平距离与应力、位移关系相关性较好,上覆岩层的应

力和位移与上覆岩层高度有较高的负相关关系,与距工作面的水平距离有较高的正相关关系。为了提高预测精度,进行多参数拟合,拟合结果为

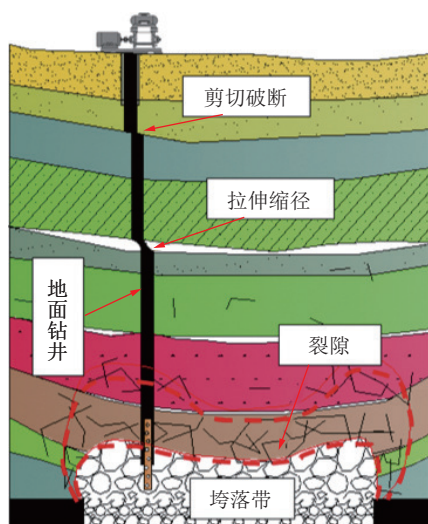
$$D_h = -0.43H_m + 0.22\Delta L - 0.19H + 45.13 \quad R^2 = 0.77 \quad (6)$$

$$D_v = -3.15H_m + 0.59\Delta L + 0.01H - 60.55 \quad R^2 = 0.90 \quad (7)$$

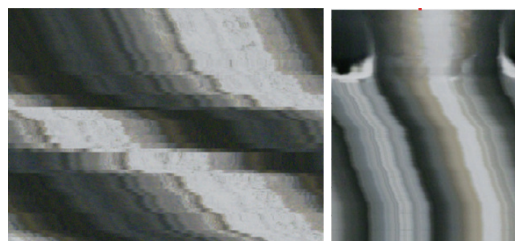
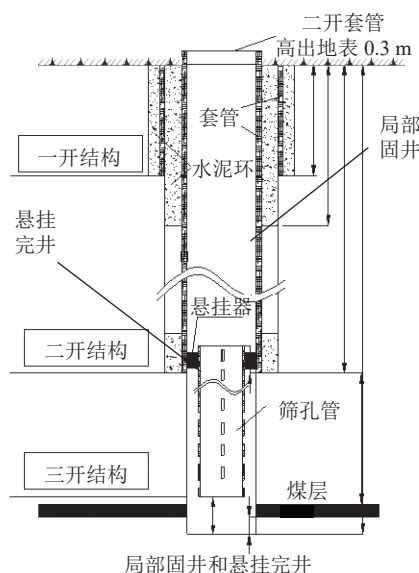
$$P_h = -0.03H_m + 0.02\Delta L + 0.02H - 5.27 \quad R^2 = 0.53 \quad (8)$$

$$P_v = 0.01H_m + 0.01\Delta L + 0.041H - 7.50 \quad R^2 = 0.96 \quad (9)$$

式中:  $D_h$  为水平位移变化量,  $10^{-3}$  m;  $P_h$  为水平应力, MPa;  $D_v$  为垂向位移变化量,  $10^{-3}$  m;  $P_v$  为垂向应力, MPa;  $H$  为上覆岩层距离煤层顶板的高度, m;  $H_m$  为煤层厚度, m;  $\Delta L$  为测点距工作面的水平距离, m。



(a) 采动井结构及覆岩采动影响



剪切破断

拉伸缩径

(b) 套管主要破坏类型



抗剪切加强件

抗拉伸加强件

(c) 套管加强件

图6 煤矿采动井套管破断类型及套管加强件

Fig.6 Types of casing breakage and reinforcement components in coal mining wells

根据多参数拟合式(6)一式(9),以煤层厚度5 m,距离工作面距离50 m为例,对采动井位置的应力和位移进行计算(图6)。

从图8可看出,计算结果与模拟结果基本吻合,可用此公式确定套管破断的位置和长度。

在进行加强件的安装时,需要综合考虑采动过

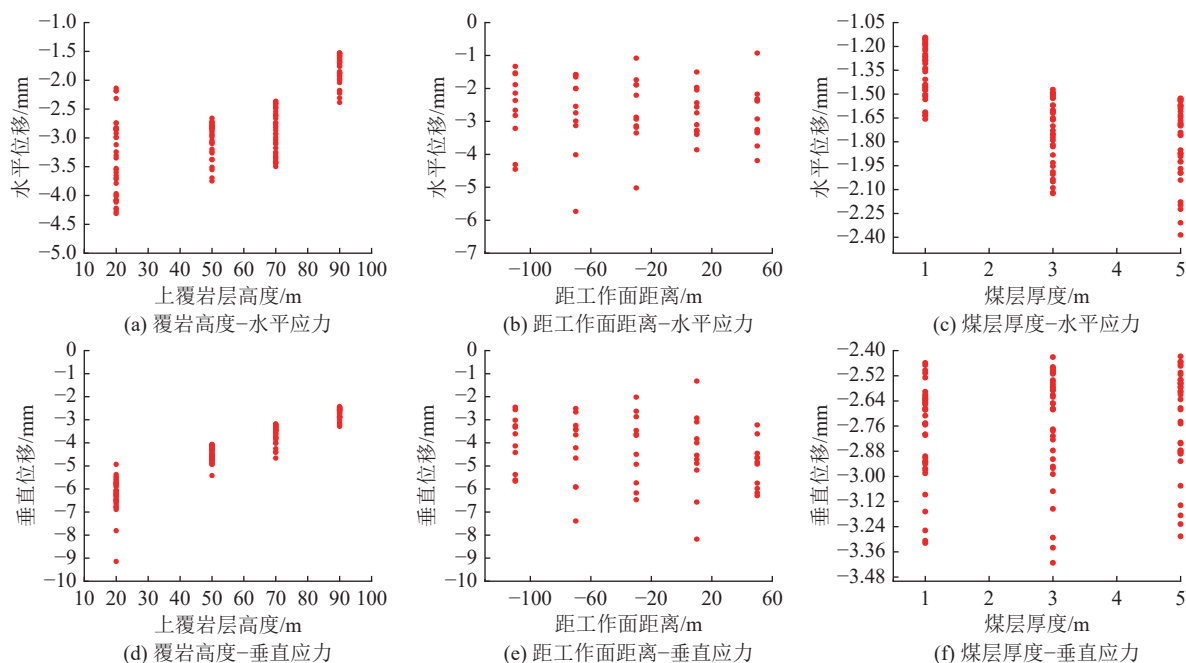


图 7 单一参数与应力相关性分析

Fig.7 Correlation analysis of single parameter and stress

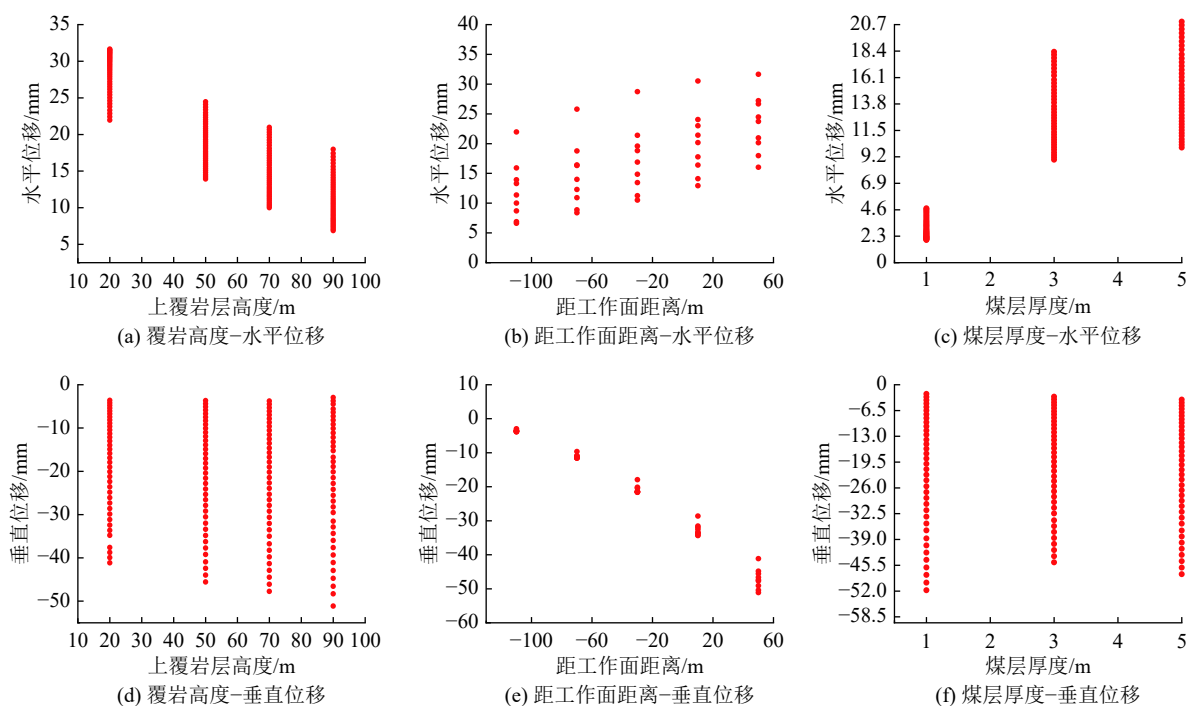


图 8 单一参数与位移相关性分析

Fig.8 Correlation analysis of single parameter and displacement

程中上覆岩层的最大应力和位移, 确定套管薄弱范围, 因此, 通常将抗拉伸的加强件放置在主要离层发育的关键层下方, 抗剪切的加强件放置在主要离层发育的关键层上部软硬岩层互层处。

根据拟合的应力、位移公式, 结合关键层位置、上覆岩性组合和采动井常用套管临界载荷(表 4), 分

别得出采高 5 m 条件下的 N80 和 P110 套管加设抗剪切加强件和抗拉伸加强件的位置和长度, 见表 6。

由图 9 可以看出, 采用 P110 套管的采动井稳定性更高, 建议研究区地面采动井三开采用 P110 套管, 并在煤层上部 46 m 亚关键层处加设抗拉伸加强件, 增加采动井稳定性。

表 6 套管加强件的位置与长度  
Table 6 Location and length of casing reinforcement

覆岩	高度/m	距工作面距离/m	水平应力/MPa	垂直应力/MPa	水平位移/mm	垂直位移/mm	横向滑移量/m	离层量/m	套管类型	加强件类型
硬层1	13.41	120.00	-4.95	-5.70	29.94	-61.95	—	0.04	N80	—
									P110	—
硬层2	46.09	120.00	-3.97	-4.13	22.92	-63.38	—	0.12	N80	抗拉伸加强件
									P110	抗拉伸加强件
硬层3	129.64	120.00	-1.46	-0.12	4.95	-67.06	—	0.24	N80	—
									P110	—
软硬互层1	53.92	120.00	-3.74	-3.75	21.23	-63.73	0.09	—	N80	抗剪切加强件
									P110	—
软硬互层2	72.47	120.00	-3.18	-2.86	17.24	-64.55	0.22	—	N80	—
									P110	—
软硬互层3	94.12	120.00	-2.53	-1.82	12.59	-65.50	0.19	—	N80	—
									P110	—
软硬互层4	121.42	120.00	-1.71	-0.51	6.72	-66.70	0.14	—	N80	—
									P110	—

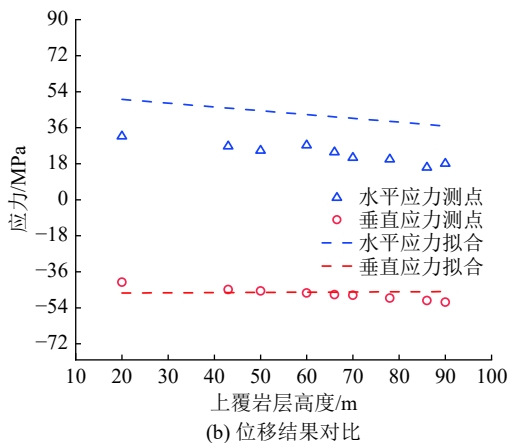
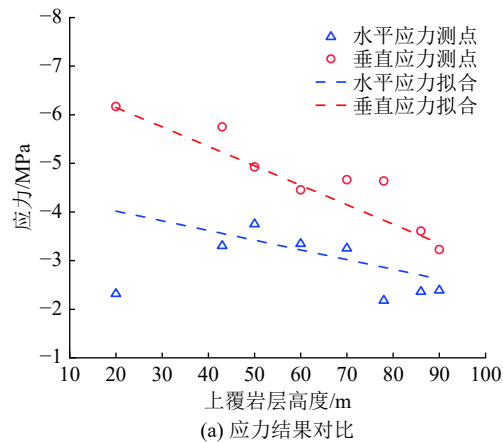


图 9 多参数拟合公式结果对比

Fig.9 Comparison of multi parameter fitting formula results

5 结 论

1)根据研究区围岩岩性组合及关键层判别方法确定出关键层;基于数值模拟技术,得出研究区上覆岩层离层段应力和位移分布规律并拟合出上覆岩层

应力、位移函数。

2)平顶山矿区采动井实际开发经验显示,最佳布井区域下的采动井套管主要破断类型主要以拉伸缩径和剪切破断为主,分别确定出 N80 和 P110 套管的主要破断位置和长度。

3)建议研究区地面采动井三开时采用 P110 套管,并采用套管加强件技术进行套管进行局部加固,在煤层上部 46 m 亚关键层处加设抗拉伸加强件,可以增加采动井稳定性。

参考文献(References):

[1] 郝登云,崔千里,何 杰,等. 锚杆锚索支护巷道层状顶板变形特征及离层监测研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(S1): 43-50.  
HAO Dengyun, CUI Qianli, HE Jie, *et al.* Deformation characteristics and separation monitoring of layered roof roadway supported with bolts and cables[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(S1): 43-50.

[2] 程敬义,万志军, PENG Syd S, 等. 基于海量矿压监测数据的采场支架与顶板状态智能感知技术[J]. 煤炭学报, 2020, 45(6): 2090-2103.  
CHENG Jingyi, WAN Zhijun, PENG Syd S, *et al.* Technology of intelligent sensing of longwall shield supports status and roof strata based on massive shield pressure monitoring data[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(6): 2090-2103.

[3] 谢正正,张 农,王 朋,等. 长期载荷作用下柔性锚杆力学特性及工程应用[J]. 煤炭学报, 2020, 45(9): 3096-3106.  
XIE Zhengzheng, ZHANG Nong, WANG Peng, *et al.* Mechanical characteristics and field application of flexible bolt under long-term load[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(9): 3096-3106.

[4] 王宴宾,曾 静,高德利. 环空带压对深水水下井口疲劳损伤的影响规律[J]. 天然气工业, 2020, 40(12): 116-123.  
WANG Yanbin, ZENG Jing, GAO Deli. Effect of annular pressure on the fatigue damage of deepwater subsea wellheads[J]. Nat-

- ural Gas Industry, 2020, 40(12): 116–123.
- [5] 王黎松, 高宝奎, 胡天祥, 等. 考虑材料非线性的环空增压预测模型[J]. 石油学报, 2020, 41(2): 235–243.  
WANG Lisong, GAO Baokui, HU Tianxiang, *et al.* A prediction model of annular pressure build-up considering material nonlinearity[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(2): 235–243.
- [6] 王海柱, 石鲁杰, 郑永, 等. 基于组合体力学模型的固井水泥石封隔能力分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(9): 1334–1340.  
WANG Haizhu, SHI Lujie, ZHENG Yong, *et al.* Sealing capacity analysis of cement sheath based on combined mechanical model[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*, 2020, 41(9): 1334–1340.
- [7] 刘强, 申照熙, 李东风, 等. 钛合金油套管抗挤毁性能计算与实验[J]. 天然气工业, 2020, 40(10): 94–101.  
LIU Qiang, SHEN Zhaoxi, LI Dongfeng, *et al.* Calculation and experimental studies on the collapse strength of titanium alloy tubing and casing[J]. *Natural Gas Industry*, 2020, 40(10): 94–101.
- [8] 樊金杰, 郭锦棠, 肖明明, 等. 核壳型丁苯胶乳的制备及其对油井水泥石性能的影响[J]. 化工进展, 2018, 37(12): 4845–4852.  
FAN Jinjie, GUO Jintang, XIAO Mingming, *et al.* Preparation of styrene-butadiene latex with core-shell structure and effect on oil well cement[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2018, 37(12): 4845–4852.
- [9] 郭辛阳, 宋雨媛, 步玉环, 等. 基于损伤力学变内压条件下水泥环密封完整性模拟[J]. 石油学报, 2020, 41(11): 1425–1433.  
GUO Xinyang, SONG Yuyuan, BU Yuhuan, *et al.* Simulation of seal integrity of cement sheath under variable internal casing pressure based on damage mechanics[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 2020, 41(11): 1425–1433.
- [10] 孙海涛, 郑颖人, 胡千庭, 等. 地面钻井套管耦合变形作用机理[J]. 煤炭学报, 2011, 36(5): 823–829.  
SUN Haitao, ZHENG Yingren, HU Qianting, *et al.* Surface borehole casing coupling deformation mechanism[J]. *Journal of China Coal Society*, 2011, 36(5): 823–829.
- [11] 于秋鸽, 张华兴, 邓伟男, 等. 采动影响下断层面离层空间产生及其对开采空间传递作用分析[J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3286–3292.  
YU Qiuge, ZHANG Huaxing, DENG Weinan, *et al.* Analysis of fault separation generation and its increasing effect on mining zone[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(12): 3286–3292.
- [12] 杨鹏, 杨伟峰, 张鑫全, 等. 基于信息熵的采动覆岩应力动态演化与水害辨识[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 3006–3014.  
YANG Peng, YANG Weifeng, ZHANG Xinquan, *et al.* Dynamic evolution of overlying strata stress induced by mining and mine water disaster identification based on information entropy[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(9): 3006–3014.
- [13] 柴敬, 杨玉玉, 欧阳一博, 等. 采场覆岩变形破坏模拟试验的光测方法对比[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 154–163.  
CHAI Jing, YANG Yuyu, OUYANG Yibo, *et al.* Comparison of optical measurement methods for deformation and failure simulation test of overburden in working face[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(1): 154–163.
- [14] 许家林, 秦伟, 轩大洋, 等. 采动覆岩卸荷膨胀累积效应[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 35–43.  
XU Jialin, QIN Wei, XUAN Dayang, *et al.* Accumulative effect of overburden strata expansion induced by stress relief[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(1): 35–43.
- [15] 梁涛, 刘晓丽, 王思敬. 采动裂隙扩展规律及渗透特性分形研究[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3729–3739.  
LIANG Tao, LIU Xiaoli, WANG Sijing. Fractal study on the crack network evolution and permeability change in mining rock mass[J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(12): 3729–3739.
- [16] 张鑫, 乔伟, 雷剑利, 等. 综放开采覆岩离层形成机理[J]. 煤炭学报, 2016, 41(S2): 342–349.  
ZHANG Xin, QIAO Wei, LEI Lijian, *et al.* Formation mechanism of overburden bed separation in fully mechanized top-coal caving[J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(S2): 342–349.
- [17] 牛宏伟, 高峰, 韩进利, 等. 巨厚砂岩下厚煤层采动覆岩离层形成机理与探测[J]. 煤矿安全, 2020, 51(11): 150–154.  
NIU Hongwei, GAO Feng, HAN Jinli, *et al.* Formation mechanism and detection method of overburden abscission layer in mining coal seam under thick sandstone[J]. *Safety in Coal Mines*, 2020, 51(11): 150–154.
- [18] 林海飞, 李树刚, 成连华, 等. 基于薄板理论的采场覆岩关键层的判别方法[J]. 煤炭学报, 2008, 33(10): 1081–1085.  
LIN Haifei, LI Shugang, CHENG Lianhua, *et al.* Key layer distinguishing method of overlying strata based on the thin slab theory[J]. *Journal of China Coal Society*, 2008, 33(10): 1081–1085.
- [19] 赵雁海, 周晨华, 张新, 等. 浅埋单一关键层断裂覆岩压力成拱效应及分布特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(S1): 1–11.  
ZHAO Yanhai, ZHOU Chenhua, ZHANG Xin, *et al.* The pressure arching effect and distribution characteristics of fractured strata of single key layer under shallow buried condition[J]. *Journal of China Coal Society*, 2020, 45(S1): 1–11.
- [20] 杨兆彪, 王家琛, 杨彦群, 等. 废弃工作面遗留煤层气扰动储层空间划分: 以屯兰煤矿12501工作面为例[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(2): 243–255.  
YANG Zhaobiao, WANG Jiachen, YANG Yanqun, *et al.* Spatial division of abandoned mine methane reservoir: taking 12501 working face of Tunlan Coal Mine as an example[J]. *Coal Science and Technology*, 2023, 51(2): 243–255.
- [21] 郑俊德, 张艳秋, 王文军, 等. 非均匀载荷下套管强度的计算[J]. 石油学报, 1998, 19(1): 129–133, 10.  
ZHENG Junde, ZHANG Yanqiu, WANG Wenjun, *et al.* Calculation of casing strength under non-uniform load[J]. *Acta Petrolei Sinica*, 1998, 19(1): 129–133, 10.
- [22] 林元华, 邓宽海, 曾德智, 等. 套管在单轴压缩载荷下的失效规律[J]. 天然气工业, 2016, 36(1): 99–105.  
LIN Yuanhua, DENG Kuanhai, ZENG Dezhi, *et al.* Casing failure laws under uniaxial compressive load[J]. *Natural Gas Industry*, 2016, 36(1): 99–105.
- [23] 孙东玲, 付军辉, 孙海涛, 等. 采动区瓦斯地面井破断防护研究及应用[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(6): 17–23.  
SUN Dongling, FU Junhui, SUN Haitao, *et al.* Study and application of gas surface well broken protection in mining area[J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46(6): 17–23.