

# 顾桥矿煤层气地面井稳定性分析及结构优化

路洁心<sup>1,2</sup>, 施式亮<sup>1\*</sup>, 罗新荣<sup>2</sup>, 李贺<sup>1,2</sup>, 鲁义<sup>1</sup>, 徐超平<sup>1</sup>

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201; 2. 中国矿业大学 安全工程学院, 江苏 徐州 221116)

**摘要:** 针对淮南顾桥矿煤层埋深大、地应力高、煤层气地面井易错断、瓦斯抽采效率低等问题, 采用数值模拟方法研究地面井失稳时空演化规律。结果表明: 水平地应力均一性越差, 套管挤压破坏程度越高; 顶板水平速度越快, 套管剪切破坏越严重, 适当减小管径并增大壁厚有利于防止地面井剪切破坏; 将地面井布置在采空区内侧 10~20 m 处, 有利于井身维持稳定及瓦斯抽采。提出在围岩与护壁套管之间、护壁套管与技术套管之间、技术套管与产气套管之间注入 G 级油井水泥固井方案, 该矿采用此方案后, 地面井钻井成功率显著提高, 稳定性增强。

**关键词:** 地面井; 挤压破坏; 剪切破坏; 井身结构优化

**中图分类号:** TD712      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2022)03-0031-08

## Stability Analysis and Structure Optimization of Coalbed Methane Surface Well in Guqiao Mine

LU Jiexin<sup>1,2</sup>, SHI Shiliang<sup>1</sup>, LUO Xinrong<sup>2</sup>, LI He<sup>1,2</sup>, LU Yi<sup>1</sup>, XU Chaoping<sup>1</sup>

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The coal seams in Huainan Guqiao mine are characterized by large buried depth and high in-situ stress. The coalbed methane surface wells are easily broken, and the gas extraction efficiency is low. To solve this problem, the temporal and spatial evolution law of surface well instability is simulated in this paper. Results show that the worse the horizontal stress uniformity is, the higher the damage degree of casing extrusion. The higher the horizontal velocity of the roof is, the more serious the casing shear failure. The arrangement of surface well 10~20 m inside goaf is conducive to not only the stability of well body, but also to the gas extraction. Based on this, G grade oil well cement cementing is proposed. Cement slurry of Grade G oil well cement is injected between the surrounding rock and the casing, between the casing and the technical casing, and between the technical casing and the gas producing casing. After the application in Guqiao mine, the well completion rate increases, and the well stability improves.

**Keywords:** surface well; crushing failure; shear failure; optimization of wellbore structure

瓦斯灾害严重威胁着煤矿安全生产, 强化瓦斯抽采是防止瓦斯灾害最有效的途径<sup>[1-2]</sup>。地面井瓦斯抽采可以实现采前预抽、采动抽采、采空区抽采“一井三用”, 是煤矿时空协调立体式抽采的关键<sup>[3-4]</sup>。淮南矿业集团顾桥矿单井抽采瓦斯量最高达数百万立方米, 然而, 煤层回采导致煤岩移位, 地面井极易发生错断, 抽采效率骤降。因此, 研究顾桥矿煤层气地面井失稳变形规律, 对提高地面井钻井成功率及稳定性意义重大。

李日富等<sup>[5]</sup>认为, 采动影响下岩层交界面附近发生的水平错动, 不利于维持抽采井筒的稳定性, 应优

先保护和监测;刘玉洲等<sup>[6]</sup>研究了钻井围岩变形规律,得出预测采场上覆岩层水平位移、垂直应变的计算公式,并分析了钻井井身所受到的剪切破坏;胡千庭等<sup>[7]</sup>认为地面井应布置在距回风平巷 20~70 m 处,同时考虑到断层和地质构造的影响,应使地面井远离这些地质构造 60~80 m。

煤层采动引发的地表下沉及上覆岩层的变形、移位是相对复杂的力学过程,包含采场围岩应力场、位移场及裂隙场的重分布,采动应力重分布势必会对地面井形成扰动。本文以顾桥矿为研究对象,结合理论分析、数值模拟与工程实践,分析地面井失稳时空演化规律,提出地面井井身结构优化方案。

## 1 钻井套管稳定性分析

### 1.1 挤压条件下的套管响应

地下岩体受到的应力主要来自上覆岩层的重力及构造应力。当套管处于采动扰动区时,其可能受到非均一的压应力而被破坏<sup>[8]</sup>。因此,非均一压应力对套管的挤压是造成其损坏的主要因素之一。

考虑到钢制套管相对较薄,可以用 FLAC<sup>3D</sup> 中的壳结构单元来模拟。建立如图 1 所示的套管挤压数值模型,模型尺寸为 2.0 m×2.0 m×0.4 m,模型顶、右及前边界施加应力载荷,其余边界为滚支边界;护管水泥厚度为 38 mm;套管为 N80 级钢,外径及壁厚分别为 139.7 mm 和 6.2 mm。水泥、套管和岩石的物理力学参数如表 1 所示。材料采用应变-软化本构模型,是基于 Mohr-Coulomb 屈服准则建立的一种本构模型。

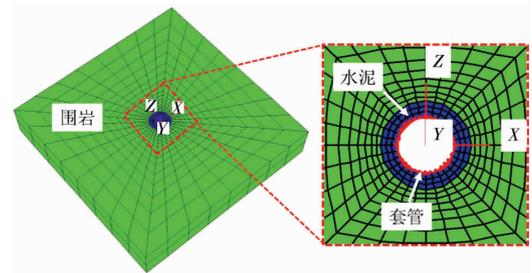


图 1 套管挤压测试数值模型

表 1 水泥、套管和岩石的物理力学参数

材料	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa
套管	7 850	206.00	0.300	689.00	552.00
水泥	2 500	7.00	0.167	2.50	30.00
岩石	2 689	8.12	0.320	0.75	4.21

提出 4 套应力加载方案,方案 a: $\sigma_x$  向水平地应力  $\sigma_x$  为 5 MPa, $\sigma_z$  向垂直地应力  $\sigma_z$  为 10 MPa;方案 b: $\sigma_x$  和  $\sigma_z$  均为 10 MPa;方案 c: $\sigma_x$  为 10 MPa, $\sigma_z$  为 20 MPa;方案 d: $\sigma_x$  为 10 MPa, $\sigma_z$  为 30 MPa。不同应力条件下套管最大主应力分布及水平位移分布如图 2 和图 3 所示。由图 2 和图 3 可知:

1) 当应力均一时,套管断面环向均匀受力,无明显的卸压或应力集中区,所受最大应力为 -112.44 MPa,应力差值仅为 4.90 MPa;套管变形量较小,最大水平变形仅为 0.038 mm,套管稳定性最好。

2) 当  $\sigma_x$  固定时, $\sigma_z$  无论增大还是减小,套管断面环向受力均一性都会被打破,垂直于高应力方向的两侧管壁出现应力集中,而垂直于低应力方向的两侧管壁出现卸压;套管在偏应力作用下沿集中应力方向收缩,这种非均匀变形极易导致挤压破坏;应力均一系数  $\sigma_z : \sigma_x$  越大,套管所受集中应力及变形量越大。

3) 当应力均一系数  $\sigma_z : \sigma_x$  相等时,双向应力分量的同步增大亦会造成套管集中应力及变形量的增大。

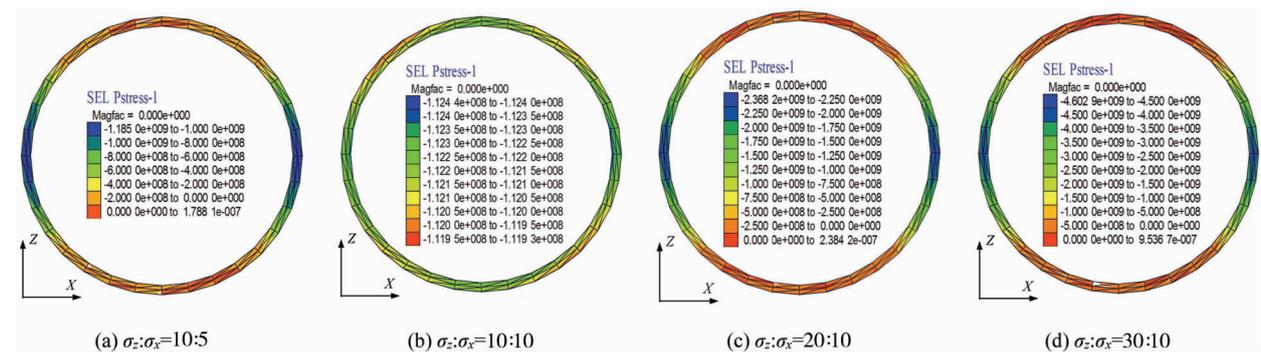


图 2 不同应力条件下套管最大主应力分布

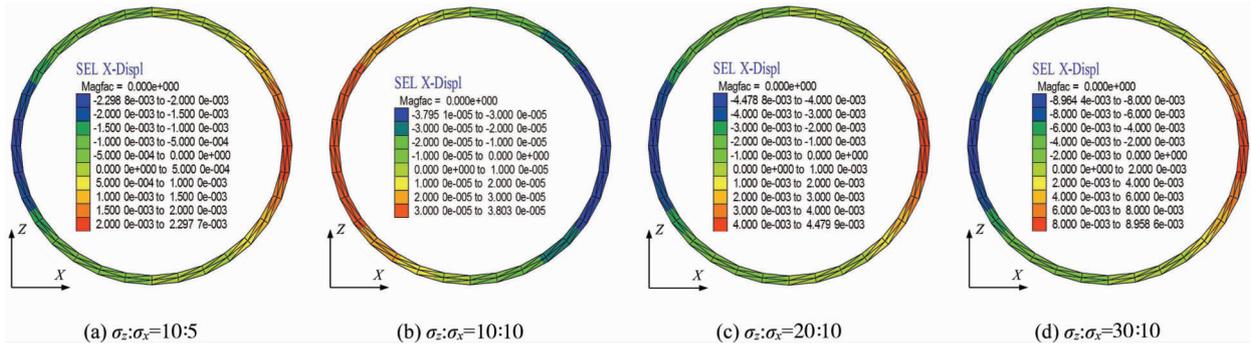


图 3 不同应力条件下套管水平方向位移分布

### 1.2 剪切条件下的套管响应

岩性突变处(软硬岩层交界面)是地面井套管剪切破坏的主要发生位置<sup>[9]</sup>.淮南顾桥矿受层间滑移剪切力破坏严重,90%以上的井孔被直接错断而停止产气<sup>[10]</sup>.为准确模拟套管剪切变形,建立如图 4 所示的套管剪切测试数值模型,模型顶底板为软硬不均岩层,在顶底板界面设置一个滑动“硬”分界面(相对于周围材料,分界面的材料是刚性的,在载荷作用下可以产生滑移和分离).分界面的法向刚度和剪切刚度均为 50 GPa/m,内摩擦角为 25°,黏聚力为 1 MPa.模拟过程中固定底板位移,层间滑动效果通过对顶板施加初始水平速度来实现.模拟结果表明:顶板初始水平速度越高(即层间滑移程度越高),套管与护管水泥环发生的剪切破坏越严重.

剪切条件下套管最大主应力分布如图 5 所示.在岩层滑移过程中,套管在分界面处产生应力集中,套管发生弯曲变形,当集中应力超过套管的极限强度时,套管发生错断.水泥环在套管发生剪切变形时能够起到防护作用,套管加载侧的水泥被压缩,另一侧的应力逐渐降低,拉应力产生并逐渐增大,此区域的水泥和岩石受拉力而破坏.已有研究表明,套管所受的剪切应力大小与套管直径呈正相关,与套管壁厚呈负相关<sup>[11]</sup>.因此适当减小管径并增大壁厚有利于减小地面井发生剪切破坏的可能.

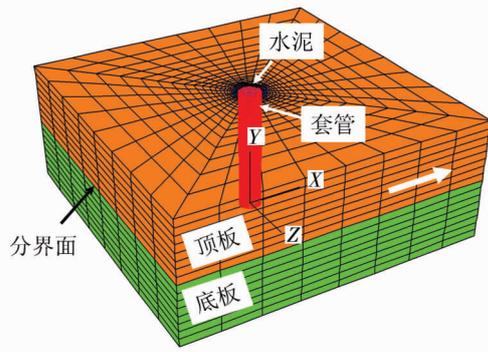


图 4 套管剪切测试数值模型

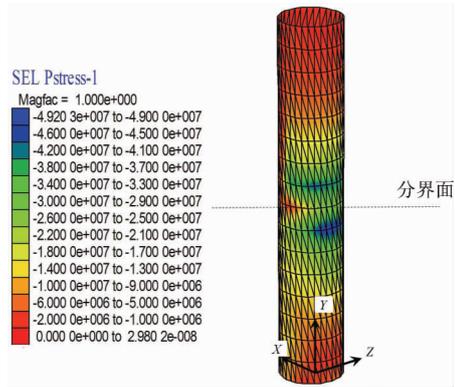


图 5 剪切条件下套管最大主应力分布

## 2 地面井失稳时空演化规律

根据顾桥矿的地质条件,假设煤层沿走向为半无限大平面,建立煤层倾向的模型,利用 FLAC<sup>3D</sup> 模拟上覆岩层在工作面推进过程中的变形和位移规律,揭示钻井在采动影响下的破坏特征,为地面井的位置选择提供可靠依据.相对于采场覆岩的真实尺寸,地面钻井的体积可以忽略不计,因此将地面钻井看作是一条垂直监测线,如图 6 所示.在模型中建立 6 条垂直监测线,相当于 6 口瓦斯抽采地面钻井,根据监测线上的应力和位移演化特性揭示地面井失稳规律.6 条监测线均位于  $x=0$  m 的平面上(距离开切眼 80 m),分别距离模型中轴线 0,8,16,24,32,40 m.

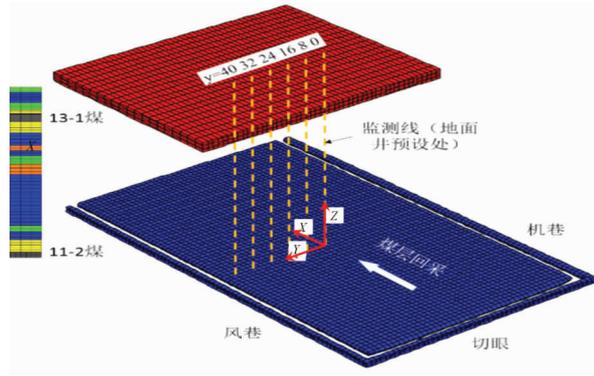


图6 煤层回采过程中预设地面井位置

### 2.1 采动过程中预设地面井的应力响应

地面井发生径向挤压破坏的关键因素为地面井围岩水平应力的不均一性<sup>[12]</sup>.回采工作面推进经过预设地面井前后30 m过程中,不同倾向位置处水平应力比值( $K = \sigma_y / \sigma_x$ ,其中 $\sigma_y$ 和 $\sigma_x$ 分别为倾向和走向应力)的演化规律如图7所示.

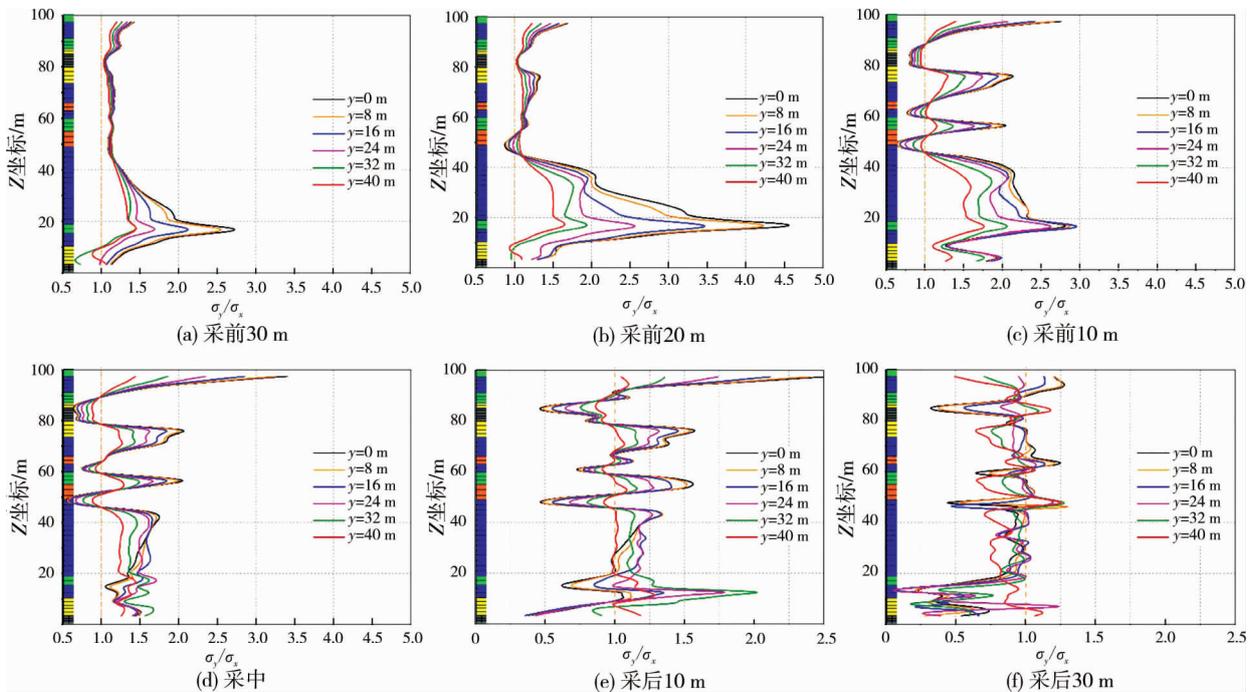


图7 回采过程中地面井水平应力比值演化规律

由图7可知:

1) 在采前30 m时,采动对地面井的影响较小, $K$ 值较低且均大于1,说明应力均一性较好且倾向应力 $\sigma_y$ 占主导,地面井井身均沿倾向受挤;在上覆坚硬厚岩层的底部( $z = 18$  m处)出现 $K$ 值骤增的现象,最大 $K$ 值达2.8,说明地面井在此处受到径向挤压破坏,因为此处岩性发生较大变化;倾向上距中轴线的距离 $y$ 越远, $K$ 值越低,说明地面井在倾向上应布置在靠近工作面顺槽一侧,更有利于防止径向挤压破坏的产生.

2) 随着回采的进行,对上覆岩层的扰动增大,在采前20 m时, $K$ 值普遍增大,最大值达到4.7左右.而在上覆软岩层处( $z = 50$  m)应力出现反转,说明此处走向应力 $\sigma_x$ 占主导,地面井受挤方向不一致;在垂向上距离保护层越远, $K$ 值越低.在采前20 m,地面井的破坏类型是以径向挤压破坏为主,无论水平应力如何分布, $y = 40$  m处的应力均一性都是最好的.

3) 从采前10 m到采中,应力扰动逐渐向上覆岩层传递, $K$ 值减小而波动增强,在上覆坚硬岩层处倾向应力 $\sigma_y$ 占主导,在煤层及松软岩层处走向应力 $\sigma_x$ 占主导;软硬岩层界面处水平应力方向突变,这种突变

极易导致地面井发生剪切破坏.因此随着采动的进行,挤压破坏逐渐减弱,而剪切破坏趋于增强.

4)在工作面推进经过地面井后,水平应力分布以倾向应力 $\sigma_y$ 占主导过渡到以走向应力 $\sigma_x$ 占主导,应力波动幅度减小而频率增强,应力分布对岩性变化的响应更加灵敏.说明该阶段地面井挤压破坏逐渐减弱而剪切破坏逐渐增强,采动卸压区瓦斯流动活跃,应将地面井布置在煤层渗透率高且受破坏程度较小的区域.

## 2.2 采动过程中预设地面井的变形响应

### 2.2.1 采动过程中预设地面井的水平位移响应

回采工作面向前推进,经过预设地面井前后30 m过程中不同位置处水平位移的演化规律如图8所示.由图8可知:

1)在采前30 m时,上覆煤岩体位移方向指向采空区,上覆坚硬厚岩层的底部水平位移大;各地面井的水平位移在竖向上均呈S形分布,曲线波动性小,靠近工作面轴线的地面井弯曲变形幅度远大于工作面两侧.

2)随着煤层的回采,煤岩水平位移及位移波动不断增大.在采前10 m时,软硬岩层分界面处出现位移突变,最大突变量达到100 mm,反映了岩层间的滑移、错动,地面井在岩层错动作用下极易发生剪切破坏;在煤层直接顶0~10 m内出现水平位移骤增现象,因此,地面井终井位置应布置在煤层上方10 m之外,以避免岩层错动引发的剪切破坏.

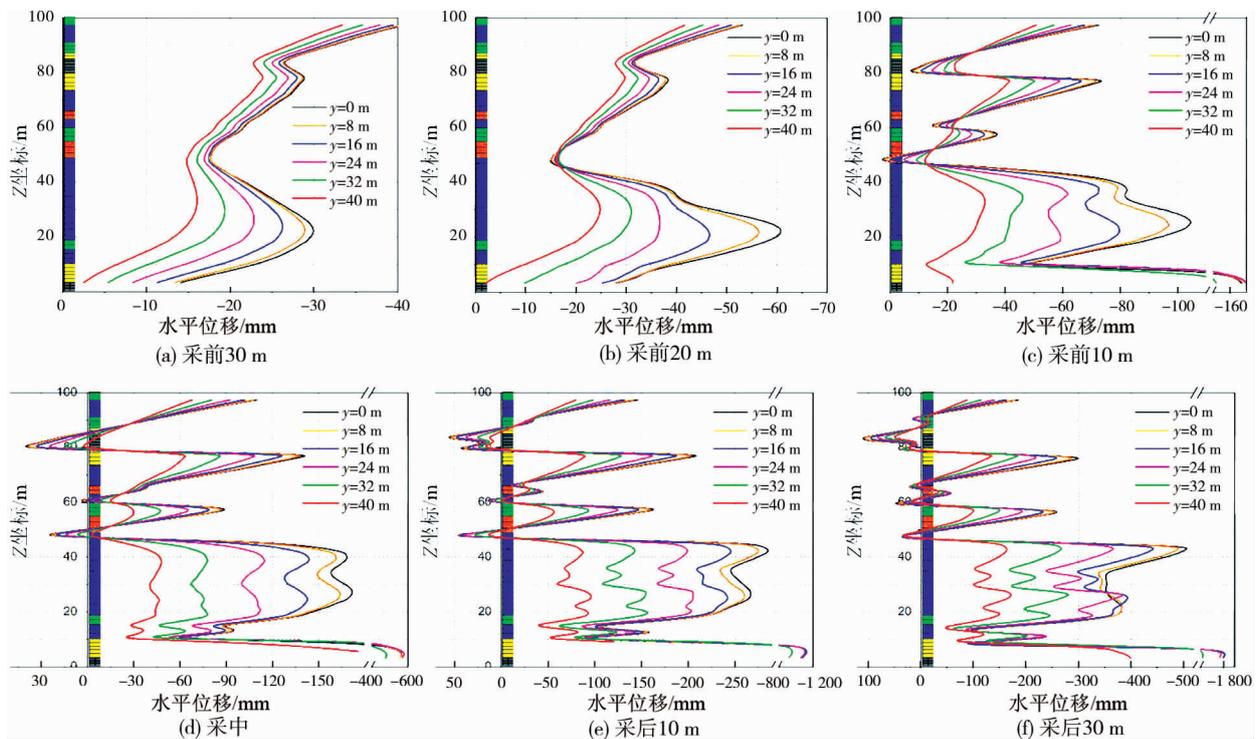


图8 回采过程中地面井水平位移演化规律

3)工作面推进经过地面井位置后,位移及波动还在不断增大,岩层移动逐渐向上传递,上部煤岩体层间滑移加强,位移方向也逐渐趋向煤柱,同时在岩层内部也出现渐强的位移波动.在工作面推进经过地面井前后,地面井井身水平位移出现大幅波动,极易产生层间滑移,进而引起套管剪切破坏,在此阶段应特别注意地面井的保护,地面井在倾向上布置在靠近工作面两侧有利于防止剪切破坏的产生.

### 2.2.2 采动过程中预设地面井的竖直位移响应

工作面推进经过地面井前后30 m过程中的竖直位移演化规律如图9所示.图9中曲线由下而上左倾代表离层,右倾代表压缩.曲线斜率反映覆岩离层程度,斜率越大,地面井套管越易产生轴向拉伸破坏.由图9可知:

1)在采前30 m时,由于受采动影响较小,覆岩竖直位移普遍较低,极限位移仅为77 mm,地面井处的

垂直位移随  $Z$  坐标的增大而缓慢增大,并在距离保护层 40 m 后趋于稳定.由于上覆煤岩体缺乏足够位移空间,垂直位移在垂向上的差异不会导致煤岩大幅移位,而是导致煤岩竖向压缩,此阶段地面井在保护层上部 40 m 范围内易受到压缩破坏,同时,煤岩孔和裂隙由于压缩作用逐渐闭合,透气性降低,这就是采前地面井瓦斯抽采量普遍较低的本质原因.靠近工作面轴线位置的竖向位移及位移梯度较高,岩层压缩作用显著,若将地面井布置在此区域将不利于地面井的采前瓦斯抽采,而在靠近工作面两侧(如  $y=40$  m)的测线处,岩层均匀下沉,不存在显著压缩,更有利于采前瓦斯抽采.

2)随着回采的进行,煤岩竖向位移逐渐增大,煤岩体受压缩程度增强,倾向布置对位移分布的正面影响也愈发显著.采前 10 m 时,在软硬岩层界面处出现竖向位移波动,尤其是保护层上方 10~20 m 内,位移梯度陡增,这种突变特征体现了岩层的不均匀沉降,此阶段地面井在软硬岩层界面处易受到轴向拉伸破坏,在保护层上方 0~10 m 内易受到轴向压缩破坏.沉降速率的不均一性促进了离层裂隙的发育,在工作面推进经过地面井后,地面井瓦斯抽采效率提升.

3)工作面推进经过地面井后,由于采空区的形成,上覆煤岩体得到足够的下向膨胀变形空间,竖向位移曲线指向由右逐渐向左,意味着煤岩压缩逐渐消失,岩层离层普遍出现.在采后阶段地面井极易受到轴向拉伸破坏,将地面井布置在靠近工作面两侧位置处能够最大限度地削弱这种破坏.

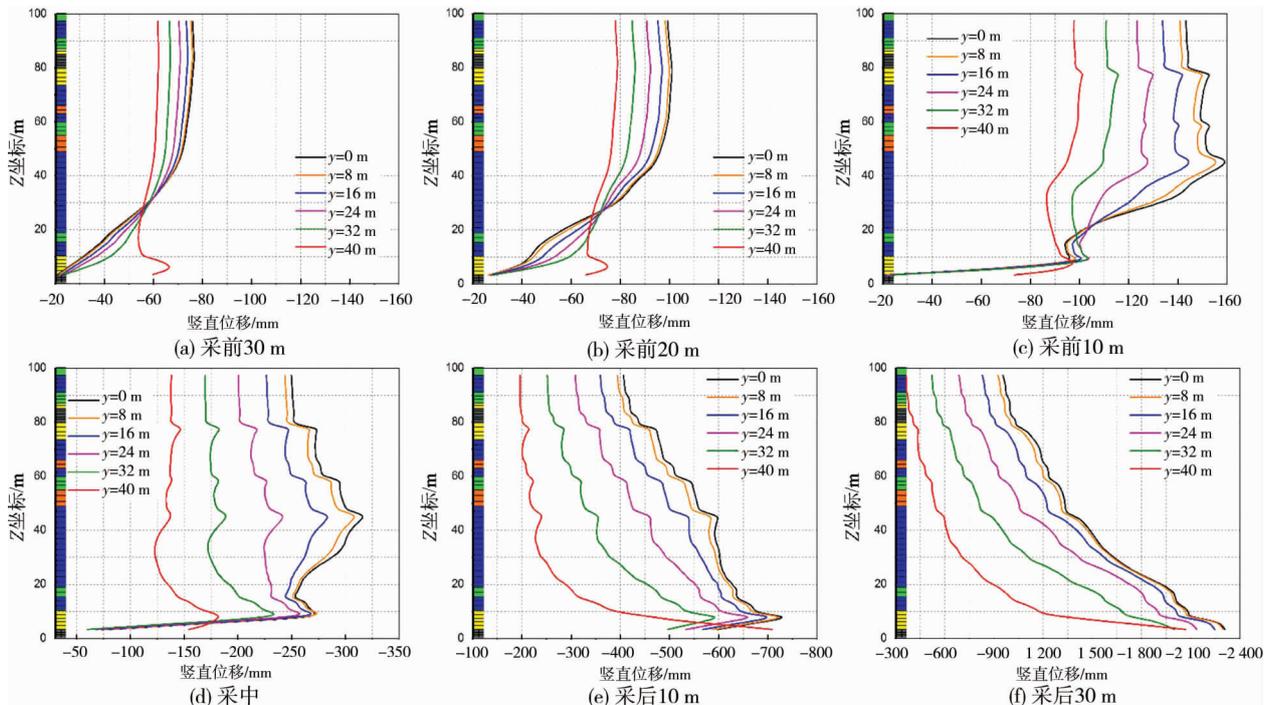


图9 回采过程中地面井垂直位移演化规律

### 2.3 地面井稳定性的工程控制

综合分析采动过程中地面井的应力和变形响应的时空演化机制,可知:

1)地面井的倾向位置越靠近采场中心,受到的径向挤压、轴向拉压及剪切破坏越严重,考虑到采空区内侧 0~20 m 位置为环形膨胀增透带,将地面井布置在采空区内侧 10~20 m 处有利于井身维持稳定和瓦斯抽采.

2)软硬岩层接触面是地面井套管失稳破坏的危险区,因此,此段地面井应减小管径并增大壁厚,使用强化护管水泥可削弱钻井破坏程度,提高钻井寿命.

3)工作面推进前后是地面井瓦斯抽采的黄金时期,是地面井维持稳定的关键阶段.研究表明,工作面推进速度的增大会给地面井带来负面影响,推进加速会缩短离层裂隙滞留时间,不利于瓦斯抽采.在工作面推进经过地面井前后,应适当降低推进速度以达到瓦斯最佳抽采效果.

### 3 地面井结构强化

顾桥矿煤层埋深大、地压高、煤质松软,地面井受到的挤压力也较大,套管的破坏类型复杂.借鉴石油天然气井的成功经验,采用一种适用于地面至2 440 m 井深作业的G级油井水泥固井,以提高地面井固孔质量,增强套管与围岩的整体性和套管的抗挤压能力.G级油井水泥是一种最普遍的固井凝胶材料,来源广泛且成本低廉,水泥流动性好,固结能力强<sup>[13]</sup>.G级油井水泥中的矿物组分有Ca<sub>3</sub>Al<sub>2</sub>O<sub>6</sub>, Ca<sub>3</sub>SiO<sub>5</sub>, Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> 和 Ca<sub>4</sub>Al<sub>2</sub>Fe<sub>2</sub>O<sub>10</sub>,见表2.G级油井水泥在不同温度和不同养护时间下有不同抗压强度,如表3所示.温度低于110℃时,水泥强度随温度的升高而增大;温度高于120℃时,水泥强度随温度的升高而减小,因此将110~120℃作为G级油井水泥的临界温度.淮南矿区顾桥矿井下埋深地层温度为44℃左右,低于临界温度,G级油井水泥强度值稳定,不会发生强度衰减,能够达到固井要求.

表2 G级油井水泥成分

质量分数/%					瓦格纳细度/(cm <sup>2</sup> /g)
Ca <sub>3</sub> SiO <sub>5</sub>	Ca <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Ca <sub>3</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>6</sub>	Ca <sub>4</sub> Al <sub>2</sub> Fe <sub>2</sub> O <sub>10</sub>	Σ	
50	30	5	12	97	1 600~1 800

表3 API-G级油井水泥在不同温度和不同养护时间下的抗压强度

养护时间/h	不同温度下的抗压强度/MPa					
	90℃	100℃	110℃	120℃	130℃	150℃
24	26.80	37.30	43.80	44.13	37.80	29.20
48	31.50	43.50	44.60	43.87	39.00	21.00
72	48.30	46.80	40.12	42.32	37.90	28.00
168	36.00	37.80	41.00	40.28	34.77	25.00

采用G级油井水泥固井的井身结构如图10所示.在围岩与护壁套管之间、护壁套管与技术套管之间、技术套管与产气套管之间注入用G级油井水泥配置的水泥浆,使地面钻井护壁套管、石油套管、产气套管与围岩形成整体固结,实现全井筒注浆封固,地面井整体的抗剪切破坏能力增强,不易发生破断变形,地面井的钻井成功率明显提高,稳定性显著增强.

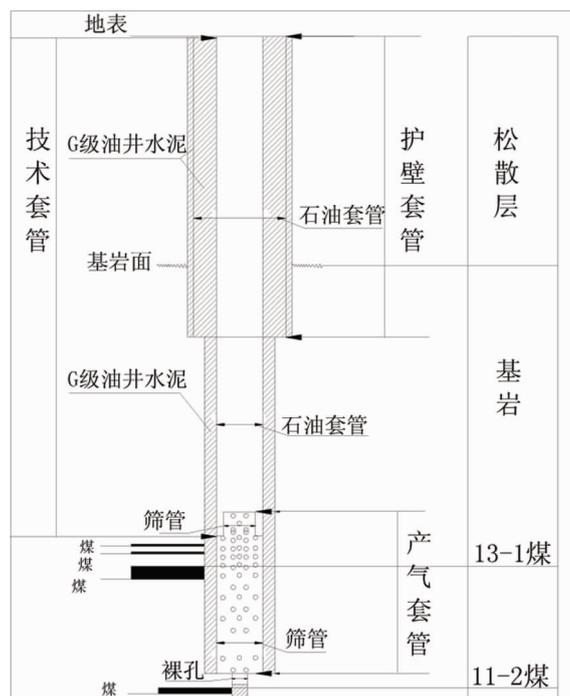


图10 G级油井水泥固井的井身结构

## 4 结论

1) 煤层水平应力越均一,地面井套管挤压破坏程度越低.套管剪切破坏位置主要发生在岩性突变处,减小管径并增大壁厚有利于防止剪切破坏,将地面井布置在采空区内侧 10~20 m 有利于井身维持稳定.

2) 提出采用 G 级油井水泥固井.在围岩与护壁套管之间、护壁套管与技术套管之间、技术套管与产气套管之间注入 G 级油井水泥配置的水泥浆,地面井整体抗剪切破坏能力增强,不易发生破断变形,地面井的钻井成功率明显提高,稳定性显著增强.

### 参考文献:

- [1] 袁亮,王伟,王汉鹏,等.巷道掘进揭煤诱导煤与瓦斯突出模拟试验系统[J].中国矿业大学学报,2020,49(2):205-214.
- [2] 杨鑫,张俊英,王公达,等.瓦斯压力对瓦斯在煤中扩散影响的实验研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(3):503-510.
- [3] 林柏泉,李庆钊,原德胜,等.彬长矿区低煤阶煤层气井的排采特征与井型优化[J].煤炭学报,2015,40(1):135-141.
- [4] 涂敏.低渗透性煤层群卸压开采地面钻井抽采瓦斯技术[J].采矿与安全工程学报,2013,30(5):766-772.
- [5] 李日富,梁运培,欧聪,等.采空区瓦斯地面抽采钻井稳定性因素分析[J].矿业安全与环保,2008(3):11-13.
- [6] 刘玉洲,陆庭侃,于海勇.地面钻孔抽放采空区瓦斯及其稳定性分析[C]//第九届全国岩石动力学学术会议论文集.北京:科学出版社,2005:386-391.
- [7] 胡千庭,梁运培,林府进.采空区瓦斯地面钻孔抽采技术试验研究[J].中国煤层气,2006,3(2):3-6.
- [8] CHEN J H, WANG T, ZHOU Y, et al. Failure modes of the surface venthole casing during longwall coal extraction: A case study[J]. International Journal of Coal Geology, 2012, 90-91:135-148.
- [9] 孙海涛,郑颖人,郭盛强,等.地面井层面拉剪破坏模型及极限分析判识方法[J].中国矿业大学学报,2013,42(1):31-38.
- [10] 梁运培.淮南矿区地面钻井抽采瓦斯技术实践[J].采矿与安全工程学报,2007,24(4):409-413.
- [11] 石佳明.基于有限元强度折减法的地面钻井安全性判识方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2013.
- [12] SANG S, XU H, FANG L, et al. Stress relief coalbed methane drainage by surface vertical wells in China[J]. International Journal of Coal Geology, 2010,82(3/4):196-203.
- [13] 黄守国.适合于深水钻井的低热水泥浆研究[D].荆州:长江大学,2012.