

Development Law of Water Flowing Fractures in Fully Mechanized Coal Mining Face Beneath Gully in Mulun Coal Mine, Ulan

Guoen ZHANG

Wulanmulun Coal Mine, Shendong Coal Group, National Energy Group, Ordos, Inner Mongolia, 017205

Abstract

Based on the engineering background of Wulanmulun Coal Mine and around the feasibility of fully mechanized mining face under ancient gully, the development law of water-conducting fracture zone in 31410 working face under ancient gully was studied by theoretical analysis, numerical simulation and field measurement. The results show that the height of water-conducting fracture zone is about 61m in 31410 working face, and the sandstone stratum in 17m plays an important role in controlling the stability of unconsolidated aquifer in Quaternary system below the ancient gully. The study can provide reference and guidance for similar mining face.

Key Words

Gully Gully, Water Flowing Fracture, Numerical Simulation, Aquifer

DOI:10.18686/mkaqhb.v1i2.599

乌兰木伦煤矿古冲沟下方综采工作面导水裂隙发育规律

张国恩

国家能源集团神东煤炭集团乌兰木伦煤矿,内蒙古鄂尔多斯,017205

摘要

以乌兰木伦煤矿为工程背景,围绕古冲沟下方综采工作面回采的可行性,通过理论分析、数值模拟和现场实 测研究了古冲沟下方 31410 工作面开采导水裂隙带发育规律。研究结果表明,31410 工作面开采导水裂隙带发育 高度约 61m,17m 中砂岩岩层对控制古冲沟下方第四系松散层含水层稳定性具有至关重要的作用,该工作面开采 尚未沟通该含水层,配合现场疏放水措施,保证了安全生产。研究可为相似工作面开采提供借鉴和指导。

关键词

古冲沟;导水裂隙;数值模拟;含水层

1.引言

煤炭采出必然导致覆岩自下而上依次发生冒落、断裂、弯曲等移动变形,形成导水裂隙带,成为矿井突水的主要通道。若导水裂隙沟通矿井突水水源,将会造成矿井突水灾害,带来巨大损失,一直困扰着煤矿安全生产[1]。要判断矿井突水发生条件、进行突水预测和防突水措施,就要对采动裂隙发育及演化规律进行研究。

2.工程概况

乌兰木伦煤矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市南部, 距鄂尔多斯市 41 km,行政区划属伊金霍洛旗布尔台 乡。井田南北长约 10 km,东西宽约 7 km,井田面积为 44.8 km2。井田西邻寸草塔煤矿和柳塔煤矿,井田南部 为石圪台煤矿等,井田东南侧与赛蒙特煤矿相邻,东部 与呼氏淖尔壕煤矿接壤。如图 1 所示。目前该矿开采 31 煤,采用长壁综合机械化一次全高开采,工作面长 325 m。31410 工作面煤层的柱状图如图 2 所示。 根据矿井地质报告,开采 31 煤层时,第四系松散层含 水层为矿井的主要充水水源,基岩孔隙-裂隙水和采空 区积水为次要充水水源。第四系含水层储水条件较好, 多为透水层,而含水层较厚,在井田内主要分布在母花 海子和廉家海子古冲沟,松散含水层厚度较大,水位埋



深不稳定,富水性中等。



图 1 乌兰木伦煤矿四邻关系

柱状	层厚(m)	累厚(m)	岩性描述
	<u>0-66.00</u> <u>33</u>	33	风积砂:黄色,第四系松散堆积物,松散。
	<u>0-3.66</u> 1.83	34.83	砾石层:砾径小于0.5cm。
	<u>0-3.32</u> 1.60	36. 43	黄土:土黄色,含少量浅灰色砂岩
	<u>2.02-19.0</u> 8.31	44. 74	粉砂岩:灰色,泥质胶结,见植物叶片化石。
	<u>1.21-19.43</u> 8.73	53. 47	砂质泥岩:灰黄色,泥质胶结,分选较差,夹薄层泥岩,较松散,弱风化
	<u>4.60–12.54</u> 8.57	62.04	中粒砂岩:灰白色,泥质胶结,以长石为主,颗粒次圆状,分选中等
	1.65-29.06 17.29	79.33	粗砂岩:灰色,泥质胶结,以石英为主,含少量云母,分选、磨圆较差。
	0.50-4.66 3.42	82.75	细粒砂岩:灰白色,泥质胶结,水平层理,成分以石英、长石为主,局 部含中砂岩。
	0.58-9.49 4.22	86.97	中粒砂岩:灰白色,泥质胶结,以长石为主
	0.88-2.88 2.42	89.39	细粒砂岩:灰白色, 泥质胶结, 含炭屑, 局部为砂质泥岩。
	0.17-2.14 1.08	90.47	砂质泥岩:灰色,泥质胶结,平坦状断口,具近水平层理。
	<u>0.0-2.8</u> <u>1.67</u>	92.14	1-2煤:黑色,弱沥青光泽,条带状结构,半暗煤。
	0.65-1.35 1.05	93.19	砂质泥岩:灰色,泥质胶结,含煤线,植物根茎化石发育。
	5.96-12.41 8.45	104.64	细粒砂岩:灰白色,泥质胶结,局部夹砂质泥岩,含植物化石及煤屑。
	2.24-9.8 7.01	108.65	砂质泥岩:深灰色,泥质胶结,贝壳状断口,夹薄层细砂岩。
	0.80-1.10	109.57	2-2煤:黑色,弱沥青光泽,条带状结构,半暗煤。
	2.15-12.62 5.98	115. 55	细粒砂岩:灰白色,泥质胶结,局部为砂质泥岩。
	4.86-11.66 7.9	123.45	砂质泥岩:灰色,泥质胶结,平坦状断口,滑面发育,夹薄层细砂岩。
	4.3-13.72 10.09	133. 54	细粒砂岩:灰白色,泥质胶结,分选中等,含石英,具近水平层理。
	0.0-8.8 5.45	138.99	砂质泥岩:灰白色,泥质胶结,含植物根茎化石。
	0.0-0.16 0.08	139.07	泥岩:灰色,泥质胶结,近水平层理。
	<u>3.6-4.29</u> 4.0	143.07	31煤:黑色,弱沥青光泽,以暗煤为主,亮煤次之,条带状结构,半暗煤。
	0.06-14.1 5.46	148.53	砂质泥岩:灰色,泥质胶结,夹薄层粉砂岩。

柱状	层厚(m)	累厚(m)	岩性描述
	0-66.00	33	风积砂:黄色,第四系松散堆积物 ,松散。
	<u>0-3.66</u> 1.83	34.83	砾石层:砾径小于0.5cm。
	<u>0-3.32</u> 1.60	36. 43	黄土:土黄色,含少量浅灰色砂岩
	<u>2.02-19.0</u> 8.31	44. 74	粉砂岩:灰色,泥质胶结,见植物叶片化石。
	<u>1.21-19.43</u> 8.73	53. 47	砂质泥岩:灰黄色,泥质胶结,分选较差,夹薄层泥岩,较松散,弱风化
	4.60-12.54 8.57	62.04	中粒砂岩:灰白色,泥质胶结,以长石为主,颗粒次圆状,分选中等
	1.65-29.06 17.29	79.33	粗砂岩:灰色, 泥质胶结, 以石英为主, 含少量云母, 分选、磨圆较差。
	0.50-4.66	82.75	细粒砂岩:灰白色,泥质胶结,水平层理,成分以石英、长石为主,局 部含中砂岩。
	0.58-9.49 4.22	86.97	中粒砂岩:灰白色,泥质胶结,以长石为主
	0.88-2.88 2.42	89.39	细粒砂岩:灰白色,泥质胶结,含炭屑,局部为砂质泥岩。
	0.17-2.14 1.08	90.47	砂质泥岩:灰色,泥质胶结,平坦状断口,具近水平层理。
	0.0-2.8 1.67	92.14	1-2煤:黑色,弱沥青光泽,条带状结构,半暗煤。
	0.65-1.35	93.19	砂质泥岩:灰色,泥质胶结,含煤线,植物根茎化石发育。
	5.96-12.41 8.45	104.64	细粒砂岩:灰白色, 泥质胶结, 局部夹砂质泥岩, 含植物化石及煤屑。
	2.24-9.8 7.01	108.65	砂质泥岩:深灰色,泥质胶结,贝壳状断口,夹薄层细砂岩。
	0.80-1.10 0.92	109.57	2-2煤:黑色,弱沥青光泽,条带状结构,半暗煤。
	2.15-12.62 5.98	115.55	细粒砂岩:灰白色,泥质胶结,局部为砂质泥岩。
	4.86-11.66 7.9	123.45	砂质泥岩:灰色,泥质胶结,平坦状断口,滑面发育,夹薄层细砂岩。
	4.3-13.72 10.09	133. 54	细粒砂岩:灰白色,泥质胶结,分选中等,含石英,具近水平层理。
	0.0-8.8 5.45	138.99	砂质泥岩:灰白色,泥质胶结,含植物根茎化石。
	0.0-0.16	139.07	泥岩:灰色,泥质胶结,近水平层理。
	<u>3.6-4.29</u> 4.0	143.07	31煤:黑色,弱沥青光泽,以暗煤为主,亮煤次之,条带状结构,半暗煤。
	0.06-14.1	148.53	砂质泥岩:灰色,泥质胶结,夹薄层粉砂岩。

图 2 柱状图

3.导水裂隙发育分析

在缓倾斜或近水平煤层长壁冒落开采条件下,随着 回采工作面从开切眼开始推进,上覆岩层将会相继垮 落、开裂及弯曲下沉,并自下而上逐层扩展,一般可形 成冒落带、导水裂缝带和弯曲带。在顶水或薄基岩厚含 水层下采煤时,导水裂缝带的发育范围及程度将直接决 定着水体下安全采煤的可能性及合理性。

由于采煤方法的变革,尤其是综合机械化一次采全 高对导水裂缝带的发育范围及程度产生了十分明显的 影响,因此,研究掌握不同采煤方法尤其是综采开采条 件下的导水裂缝带发育高度、分布形态及其影响特征, 对于水体下安全采煤将具有非常重要的现实意义。

采煤方法不同,导水裂缝带的发育高度及其变化规 律也随之改变,其原因主要在于初次或一次开采厚度、 分层重复开采厚度以及重复开采次数等随着所用采煤 方法的不同而相应变化,如炮采的采厚一般多在 2m 左 右,综采的采厚一般多在 2~5m,综放开采的采厚一般 可达 5~10m,从而使得导水裂缝带发育高度及其与采厚 的关系也随之出现明显差异。

4.经验公式计算

对开采水平及缓倾斜煤层而言,如排除地质异常 (如断层破碎带、陷落柱等因素)的影响,开采产生的导 水裂缝带高度的最大值主要与采厚和顶板岩性有关。大 量的实际观测和理论研究表明:采厚越大,覆岩岩性越 坚硬,抗压强度越大,其脆性破坏增强,相应的导水裂 缝带高度越大;相反,其脆性破坏将减弱,而蠕变性增 强,对应的导水裂缝带高度将随之减小。

薄基岩富水区下采煤时,为了合理地确定开采上限,必须先确定顶板导水裂缝带高度。确定导水裂缝带高度可 以采用计算法,计算法又可分为理论计算和经验公式计 算。

理论计算主要是指建立在固体力学基础上的解析 法和数值法。理论计算法由于模型的建立过于理想化, 且岩体的真实力学参数又较难获得。因此,用理论计算 法获得的导水裂缝带高度受人的影响很大,因而误差 大。经国内外大量的现场观测和理论研究表明:开采引 起的导水裂缝带高度主要与煤层的开采厚度和相应的 覆岩岩性及其结构有关。我国几十年来积累了大量珍贵 的顶板导水裂缝带高度观测资料和覆岩岩性测试资料。 利用优化方法和数据处理分析技术,找出顶板导水裂缝 带高度与煤层开采厚度及顶板岩体力学性质的最佳关 系式,具有良好的现实意义和理论研究价值。

对水平及缓倾斜煤层而言,目前普遍使用的预计项 板导水裂缝带高度的经验公式主要有两种形式,从表1 中不难看出,此两种计算公式,由于在考虑影响导水裂 缝带高度的一个重要因素一岩性时,是按顶板分类中的 软或硬这一模糊指标来衡量的,但有时顶板类型是不易 确定的,此时公式选择亦有困难,并且公式(1)中的中 误差也较大。在复杂水文地质条件下预计导水裂缝高度 确定开采上限时,即使有几米的误差,也会造成大量煤 炭资源的丢失。

根据前文所述,乌兰木伦煤矿 31 煤层顶板为中等 坚硬顶板,采高为 4.0m,带入表 1 公式(1)及得到导 水裂缝带高度为 34.4~45.6m;带入公式(2)得到导水 裂缝带高度为 50m。

5.数值模拟

数值模拟软件采用 FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua,即连续介质快速拉格朗日分析), 它是一种基于拉格朗日差分法的一种显式有限差分程

序,利用三维快速拉格朗日算法和三维显式有限差分程 序对连续介质进行非连续大变形分析,对于求解岩土工 程问题中的大变形问题有很好的实用性^[2]。

表1 导水裂缝带高度计算公式

岩性硬度	公式(1)H/m	公式(2)H/m		
坚硬(f=4~8)	$H = \frac{100 \Sigma M}{1.2 \Sigma M + 2.0} \pm 8.9$	$H = 30 \sqrt{\Sigma M} + 10$		
中硬(f= 2~ 4)	$H = \frac{100 \Sigma M}{1.6 \Sigma M + 3.6} \pm 5.6$	$H = 20 \sqrt{\Sigma M} + 10$		
软弱(f= 1~ 2)	$H = \frac{100 \Sigma M}{3.1 \Sigma M + 5.0} \pm 4.0$	$H = 10 \sqrt{\Sigma M} + 10$		
极软弱(f < 1)	$H = \frac{100 \Sigma M}{5.0 \Sigma M + 8.0} \pm 3.0$			

岩性硬度	公式(1)H/m	公式(2)H/m		
坚硬(f=4~8)	$H = \frac{100 \Sigma M}{1.2 \Sigma M + 2.0} \pm 8.9$	$H = 30 \sqrt{\Sigma M} + 10$		
中硬(f= 2~ 4)	$H = \frac{100 \Sigma M}{1.6 \Sigma M + 3.6} \pm 5.6$	$H=20~\sqrt{\SigmaM}+10$		
软弱(f=1~2)	$H = \frac{100 \Sigma M}{3.1 \Sigma M + 5.0} \pm 4.0$	$H = 10 \sqrt{\Sigma M} + 10$		
极软弱(f < 1)	$H = \frac{100 \Sigma M}{5.0 \Sigma M + 8.0} \pm 3.0$			

模拟中计算采用 Hoek-Brown 模型,即[3]:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \tag{1}$$

式中, **o**1 为破坏时的最大主应力; **o**3 为破坏时的 最小主应力(或是三轴试验中的围压); **mb** 为岩体的 H-B 常数; **s** 为与岩体特性有关的材料常数,反映岩体破碎 程度,其取值范围 0~1; **a** 为表征节理岩体的常数; **o**ci 为完整岩石的单轴抗压强度(UCS)。

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \tag{2}$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \tag{3}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$
(31)

式中,D 为节理岩体弱化因子,主要考虑爆破破 坏和应力松弛对节理岩体的扰动程度,取值为 0~1; GSI 为地质强度指标,由工程岩体的岩体结构、结构面 特征等因素综合确定。

要得到岩体广义 H-B 强度参数(mb, s 和 a), 需要 各岩层的以下参数: 完整岩石单轴抗压强度σci; 完整 岩石参数 mi; 地质强度指标 GSI; 扰动系数 D。RocData 能够通过实验室数据拟合或通过软件内置典型岩层参 数范围表估算σci, mi.和 a 并得到广义 H-B 强度参数 mb, s 和 a^[4]。 模型如图 3 所示。通过 RocData 软件(图 4)得到各 岩层 H-B 参数如表 1 所示。模型尺寸为 725.4m (长) × 500m(宽)×150m(高)。因为工作面长 325m,左右两侧各预留 200m以消除边界效应。模型底部约束横向和 纵向位移,两边约束纵向位移^[5-6]。

岩性	σ_{ci} (MPa)	GSI	m_i	m_b	S	а
泥岩	40	70	6	2.055	0.0357	0.5014
砂质泥岩	35	72	8	2.943	0.0446	0.5012
粉砂岩	70	75	16	6.552	0.0622	0.5009
粗砂岩	75	77	18	7.371	0.0622	0.5009
煤	18	75	4	1.638	0.0622	0.5009
黄土层	5	70	2	0.685	0.0357	0.5010
砾石层	5	70	3	1.028	0.0357	0.5010
风积沙	0.1	40	1	0.117	0.0013	0.5110
泥质砂岩	35	72	8	2.943	0.0446	0.5012
中砂岩	65	75	15	6.142	0.0622	0.5009

表1H-B准则岩体力学参数









模拟结果显示,初始平衡状态理想,证明模拟较合 理。三带发育高度可通过塑性区发育情况来间接反映。 数值模拟结果显示 17m 粗砂岩全层尚未发生塑性 破坏,因此对保护上覆岩层至关重要,而此关键层上方 岩层及松散层均发生破坏,原因是关键层发生挠曲引起 其上方岩层同步弯曲下沉,由于这些松散层前度很低, 即使是弯曲下沉也可导致发生塑性破坏。同时,覆岩主 应力分布结果也表明,应力拱的拱路径为煤层开采范围 的两帮,沿岩层断裂线呈"八"字向上发展,通过该关键 层及其上部两层岩层形成应力拱闭环,成为采场围岩的 拱形主承载体。可见,导水裂隙带发育高度为 61m,17m 粗砂岩为主关键,对控制第四系含水层的稳定性具有关 键作用。



(c) 主应力分布图 5 模拟结果

6.现场实测

为研究 31410 导水裂隙带发育实际数据,并对数值 模拟结果进行验证,指导 31410 工作面的开采和制定相 应的防治水措施,陕西煤田地质局 185 地质队,在临近 的地质条件较相近的工作面上布置 WM1、WM2 两个 冒裂带观测孔。WM1 孔揭露风积沙 29.3m,基岩厚度 87.54m,煤层顶板岩性也主要以粗砂岩、中砂岩为主; WM2 孔揭露风积沙 42m,基岩厚度为 68.94m,煤层顶 板岩性主要以细砂岩、砂质泥岩为主。钻孔观测结果表 明,WM1 孔导水裂隙带高度为 62.89m; WM2 孔导水 裂缝带高度为 35.74m。

本方法是钻孔双端封堵测漏装置在井下下垂孔中

应用于导水裂缝带高度的探测研究,同时,为适用于垂 孔作业要求,在仪器装置上进行改进和完善,可以使其 具有更广泛的适用范围和条件,推广应用前景更广阔。 观测结果准确可靠,观测效果明显。

6.1 观测系统

采用钻孔双端封堵测漏装置进行钻孔分段注水观 测系统,主要由孔内封堵器和孔外测量仪表两部分构 成。孔内封堵器是一个带有双端封堵胶囊的注水探管, 用于对所测试孔段两端严密封堵;孔外测试仪表主要包 括流量表、压力表及相应的阀门,用以控制封孔注水压 力和测量注水流量的大小。两者之间通过两种管路连 接:一是使胶囊起胀封孔的充水或充气高压软管;另一 是向封堵孔段注水并兼作封堵器支撑杆的钢管。钢管由 多根 2m 长的 3/4。自来水管用快速密封接头连接而成。

6.2 观测方法

观测时,封堵器在观测孔内按一米一段进行观测, 以保证整个钻孔观测段的连续性。

在每个孔段上,要首先将高压水或气充入胶囊,使 之膨胀封孔,然后才能向孔段注水。注水压力要小于封 孔压力,以保证封孔严密,同时注水压力要保持定值, 以防止注水流量因压力不同而变化。在下垂孔中测试 时,当孔内有水时,一般采用传统的充水法起胀胶囊, 以抵消孔内静水压力;当孔内无压水时,则用充气法起 胀胶囊,以便于胶囊卸压时收缩。封堵孔段后,如果封 堵段的岩层有裂缝,则注水孔段的水将从裂缝漏失,此 时通过孔外测试仪表,可测出规定注水压力下每米孔段 每分钟时间内的漏失量,并由漏失量大小反映出封堵孔 段岩层裂缝的发育程度。测出整个钻孔各段的漏失量 后,由漏失量的变化情况确定导水裂缝带高度,并由采 前采后观测结果的对比分析,获得开采引起的导水裂缝 带高度发育情况。此类方法虽比较可靠,但往往工作量 大,花费高,且只能结合并下开采进行。

6.3 冒裂带高度确定

WM1 孔, 钻进至 53.95m 时, 钻孔冲洗液漏失量 开始急剧增加, 钻孔冲洗液消耗量从 0.062 L/s·m 迅速 升至 1.5 L/s·m, 孔内水位则从 4.2m 瞬间漏失至孔底 55.80m, 至此钻孔冲洗液全部漏失,将水泵提高到最大 效率孔内也没有出现返水现象,说明 WM1 孔导水裂缝 带顶点的孔深为 53.95m(距煤层顶板 62.89m); WM2 孔钻进至 75.20m 时,钻孔冲洗液漏失量开始急剧增加, 钻孔冲洗液消耗量从 0.046 L/s·m 迅速上升至 0.07 L/s·m, 孔内水位则从 4.37m 瞬间漏失至孔底 79.20m, 至此钻孔冲洗液全部漏失,将水泵提高到最大效率孔内 也没有出现返水现象,说明 WM2 孔导水裂缝带顶点的 孔深为 75.2m(距煤层顶板 35.74m)。

数值模拟结果显示导水裂隙带高度为 61m,与实测数据也具有较好的一致性。证明数值模拟结果除了导水裂隙带发育结论外其他的模拟结果也具有一定的指导意义。

虽然研究结果显示,第四系含水层水未予导水裂隙 带导通,但各个地点的地质条件变化较大,在未探测区 或许存在陷落柱,断层等地质构造,都会成为未知的突 水点,为此,同时进行了含水层的疏放水工作。乌兰木 伦煤矿在井下 31 煤施工 3 次疏放廉家海子古冲沟水, 施工钻孔进尺 3378.6m,累计疏放水量 188512.92m³。 由于上覆第四系松散含水层主要分布在 31410 工作面 初采段,31410 工作面切眼一段和 31410 切眼二段就位 于廉家海子古冲沟下方,为了安全回采工作面,防止工 作面初采段发生溃水溃沙事故,减小工作面涌水量,在 31410 工作面切眼施工探放水孔,降低含水层厚度,疏 放含水层水。探放水钻孔主要布置在切眼部位,如图 6 所示。其中,在古冲沟下方施工钻孔 14 个,累计放水 量 13147.44m³,单孔最大用水量 1.0m³/h。

2017年11月底各探放水孔累计泄水量曲线图如图 7所示。探放钻孔涌水量稳定,大致可以推测探放水所 形成地下水流场基本保持供需平衡,降落漏斗没有扩 大,泄水总量稳步增加,增加幅度不变。截至目前,该 工作面涌水量正常,未发生水害事故。



图 6 31410 工作面疏放松散含水层水钻孔布置图



图 7 31410 工作面疏放松散含水层累计泄水量曲线图

8.结论

7.工程措施

以乌兰木伦煤矿为工程背景,通过理论分析、经验 公式计算、数值模拟和现场实测研究了古冲沟下方 31410工作面开采导水裂隙带发育规律。研究结果表 明,31410工作面开采导水裂隙带发育高度约61m,17m 中砂岩岩层对控制古冲沟下方第四系松散层含水层稳 定性具有至关重要的作用,该工作面开采尚未沟通该含 水层,配合现场疏放水措施,保证了安全生产。研究可 为相似水文地质条件工作面开采提供借鉴和指导。

参考文献

[1]范立民. 保水采煤的科学内涵[J]. 煤炭学报, 2017, 42(1):27-35.

[2]Itasca Consulting Group Inc. Fast Lagrangian Analysis

of Continua in 3 dimension, Version 5.0, User'sGuide. Minneapolis, minnesota, USA, 2012.

[3]HOEK E, CARRANZA T, Corkum B. Hoek-Brown criterion-2002 edition. [C]// Proceedings of NARMS-TAC Conference. Toronto: [s. n.], 2002: 267 - 273.

[4]Available at: https://www.rocscience.com/

[5]王朋飞,赵景礼,王志强,等.非充分采动采空区与 煤岩柱(体)耦合作用机制及应用[J]. 岩石力学与工程学 报,2017,36(05):1185-1200.

[6]Pengfei Wang, Jingli Zhao, Yoginder P. Chugh, Zhiqiang Wang. A novel longwall mining layout approach for extraction of deep coal deposits[J]. Minerals. 2017, 7(4), 60.