



移动扫码阅读

王文才,李俊鹏,王创业,等.边帮煤采动影响下边坡变形演化特征及失稳形态分析[J].煤炭科学技术,2023,51(7):321-336.

WANG Wencai, LI Junpeng, WANG Chuangye, *et al.* Analysis of failure mode and deformation evolution characteristics of slopes under the influence of highwall mining[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(7): 321-336.

边帮煤采动影响下边坡变形演化特征及失稳形态分析

王文才,李俊鹏,王创业,陈世江,王 鹏

(内蒙古科技大学 矿业与煤炭学院,内蒙古 包头 014010)

摘要:边坡在自然和人为因素相互影响下存在典型的变形破坏和失稳特性,在岩土及采矿工程界备受重视,尤其是在边帮煤开采中,受露天和井工双重影响变形演化特征和失稳形态更为复杂。物理相似试验是研究各类岩土体变形演化特征和规律的重要手段,也是对大型岩土体现场研究的重要补充,在矿山和岩土工程领域应用广泛,其中材料相似配比的确定是分析研究的基础和关键环节。由此,首先通过相关文献查阅及本着取材经济、方便的原则,确定以河沙/骨料、大白粉和石膏/胶结材料作为试验材料,采用 2 种配比方案制作标准试件,对其进行单轴压缩试验与原岩强度进行对比分析,确定方案 2 可作为物理试验的研究配比号;其次,在确定材料配比的基础上建立边帮煤开采的物理结构模型,分析得出边帮煤开采过程中边坡变形破坏演化特征按变形阶段可以划分为表生改造阶段、结构改造阶段、时效变形阶段,变形破坏后的岩体可以划分为“竖三带”,分别为垮落带、裂隙带和弯曲下沉带,按工作面开采长度上煤层可以划分为初期、中期、末期 3 个阶段,下煤层可以划分为初期、末期 2 个阶段,上煤层开采至终采线边坡岩体变形演化特征是沿采空区中心向两边形成沉降减弱区,最终形成对称分布半“金字塔”状的下沉盆地,下层煤开采至终采线变形破坏的岩体呈半“类曲线”状;最后,在物理试验和现场监测的基础上分析得出边帮煤上煤层开采至 120 m 左右时,边坡会发生较小的失稳现象,下煤层开采至 120 m 左右时,上下煤层之间的采空区发生贯通,失稳加剧,直至开采至终采线,边坡上部 1400 平盘会形成局部指向露天矿坑的崩塌失稳区,其余平盘均表现为指向采空区的反倾向失稳。

关键词:边坡稳定;边坡失稳;材料配比;沉降减弱区;崩塌失稳;反倾向失稳

中图分类号:TD824.7

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2023)07-0321-16

Analysis of failure mode and deformation evolution characteristics of slopes under the influence of highwall mining

WANG Wencai, LI Junpeng, WANG Chuangye, CHEN Shijiang, WANG Peng

(Institute of Mining, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: The slope has the typical deformation failure and instability characteristics under the interaction of natural and human factors which has been given a lot of attention in geotechnical and mining engineering. During highwall mining, in particular, deformation evolution characteristics and failure mode are more complex under dual influence of open pit mine and underground mine. Physical modelling is an important means to study the characteristics and behavior of deformation and evolution of various types of rock and soil mass, and it is also an important supplement to the field study of large-scale rock and soil mass. It is widely used in mines and geotechnical engineering. The determination of the material used for physical modeling is the foundation and key links of research. Therefore, the article firstly selected river sand/aggregate, lime and gypsum/cemented material as the experimental materials through the relevant literature review and based on the principle of economic and convenience, and adopted two proportioning schemes to make standard specimens. The uniaxial compression test was carried out to compare and analyze the strength of the original rock, and it was determined that the scheme 2 could be

收稿日期:2022-06-27 责任编辑:朱恩光 DOI: 10.13199/j.cnki.cst.2022-0593

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52064043,51764044,51464036)

作者简介:王文才(1964—),男,内蒙古伊金霍洛旗人,教授,博士生导师,博士。Tel:0472-5951557, E-mail:wencai99999@163.com

通讯作者:李俊鹏(1989—),男,山西朔州人,博士研究生。E-mail:m15513345261@163.com

used as the research scaling number of the physical modelling; Secondly, on the basis of determining the material proportion, the physical and structural model of highwall mining is established, and the analysis shows that the evolution characteristics of slope deformation and failure in the process of highwall mining can be divided into superficial transformation stage, structural transformation stage and aging deformation stage, the deformed and damaged rock mass can be divided into "vertical three zones", namely caved zone, fractured zone and continuous bending zone. According to the length of the panel, the coal seam can be divided into three stages: initial stage, middle stage and final stage. The lower coal seam can be divided into two stages: the initial stage and the final stage. The evolution of the slope rock mass due to the extraction of the upper coal seam to the stopping line is characterized by the formation of subsidence faded areas along the center of the goaf to both sides, and finally a symmetrical distribution of semi-"pyramid" shape is formed. The rock mass that is deformed and damaged due to the extraction of the lower seam to the mining stop line is in a semi-curve-like shape; Finally, based on the analysis of physical modelling and field monitoring, it is concluded that when the upper coal seam of the highwall coal seam is mined to about 120 m, the slope shows a slight instability. When the lower coal seam is mined to about 120 m, the goaf between the upper and lower coal seams is connected, and the instability is intensified until the mining reaches the stopping line. In the upper part of the slope, 1 400 step forms a local collapse instability zone pointing to the open-pit, while the rest of the step are anti-dip instability pointing to the goaf.

Key words: slope stability; slope instability; material proportion; subsidence faded area; collapse instability; anti-dip instability

0 引 言

边帮压煤(端帮)是指受露天开采技术和地质条件限制滞留在边坡平盘下和境界外煤炭资源的总称^[1-2]。随着露天开采向深部不断延伸,边坡台阶下滞留的煤炭资源会成倍增加,为减少资源浪费就需要对边帮压煤进行回收^[3]。对边帮压煤进行开采会使边坡平盘和内部岩体受到二次扰动,形成一个动态多元的复合系统,从而引起因露天开采发生变形破坏的边坡进一步发育,最终可能发生变形失稳现象,带来巨大经济损失并影响矿山的生产安全^[4-6]。因此,针对边帮资源开采过程中边坡变形破坏及失稳现状众多学者从以下2个方面进行研究,且取得了相当多的研究成果:①露天转地下开采:孙世国等^[7-9]对露天转地下开采诱发边坡变形破坏进行了研究,得出顺坡开采边坡变形破坏相比逆坡开采优势更大,且提出采用放坡减载、抗滑桩加固、预应力锚索加固3种方式对边坡变形破坏进行控制;李小双等^[10]以某矿山露天转地下开采为背景,研究了不同边坡角影响下采场上覆岩体的采动响应特征,以揭示覆岩采动响应的坡角影响效应,得出坡高一定时,坡角过大或过小都不利于边坡的稳定,而是存在一个较为合适的中间值;朱建明等^[11-12]采用相似模拟和数值模拟方法对露天转地下开采边坡稳定性进行研究,得出井工开采开切眼位置对露天边坡的稳定起到关键作用,且利用数值模拟对边界参数优化过程中发现开切眼与边坡水平距离在原基础上增加20 m时,边坡的整体稳定性将得到明显改善,此方案已在现场验证;蓝航等^[13]通过FLAC^{3D}数值模拟分析了露天转地下开采露天边坡的破坏规律,指出台阶状边坡地表的水平变形仍然呈现出采空区中间受压,两端受拉的特点,并得出了台阶状边坡在地下开采扰

动下的稳定性应考虑采空区的时空效应的规律;宋卫东等^[14]采用物理相似材料模型试验和数值模拟计算相结合的方法,对露天转地下开采过程中围岩的破坏机理及移动范围进行了系统研究,得出随着开采长度的增加,围岩的破坏程度及范围递增、塑性区范围不断扩大,剪切破坏主要集中在两侧边坡的边脚部位;尹光志等^[15]利用底摩擦模型试验仪对露天转地下边坡变形破坏进行了分析,得出边坡的变形破坏特征可分为边坡岩体小范围微破裂和松动、边坡岩体局部范围失稳破坏、边坡岩体整体向采空区滑落失稳破坏3个阶段,边坡岩体变形破坏模式主要是采动边坡岩体向采空的拉裂、破断和转移破坏。②边帮(端帮)开采:殷志祥等^[16-17]为了研究端帮特厚煤层开采引起边坡变形破坏和应力重新分布机理,采用FLAC^{3D}数值模拟手段,以某露天矿为工程背景,分析了煤柱宽高和间距等重要影响参数对边坡稳定性的影响,得出采用端帮采煤机对端帮煤进行开采后边坡角越大,稳定系数越小、煤柱高度越高、宽度越小、间距越大,稳定系数越小;尚涛等^[18]分析了安家岭露天煤矿端帮采煤与露天采排工程及边坡变形破坏之间的时空关系,解释了露天采、剥、排工程如何在时间和空间上影响端帮采煤的强度及边坡变形破坏等;李志鹏^[19]以黑岱沟露天矿留坑平硐开拓回收边帮煤资源为研究背景,采用FLAC^{3D}数值模拟方法分析边帮煤开采不同井巷保护煤柱宽度对煤柱内开拓巷道的保护作用,确定合理的井巷保护煤柱宽度,完善巷道布置图,总结了边帮煤开采留坑边坡破坏和位移规律等,且得出边帮煤开采需对留坑边坡采取一定的治理措施;韩阳^[20]以黑岱沟露天矿边帮煤开采为研究背景,采用相似和数值模拟手段对长壁放顶煤采煤法回收边帮煤引起地表移动规律、矿山压力及边坡变形破坏等问题进行了研究,总结出

采用放顶煤开采边帮煤覆岩破坏及地表沉降变形规律;丁其乐^[21]采用相似和数值模拟方法就端帮压煤井工开采覆岩结构形态及力学行为、覆岩运动诱发坡体损伤演化机制、采动坡体稳定性及其评价方法、覆岩运动及采动坡体变形控制技术进行了系统研究,得出了采动坡体的“横四区”破坏模式;南存全等^[22]采用相似模拟试验和顶板压力计算相结合的方法,以黑岱沟露天矿边帮煤开采为研究对象,分析边帮煤开采中顶板覆岩变形特点及推导建立了边帮煤井工长壁开采工作面3种顶板结构条件下的顶板压力计算解析公式;丁鑫品等^[23]以鄂尔多斯地区端帮采煤为背景,综合考虑“露采”与“巷采”2种采动效应叠加对边坡稳定的影响,构建了近水平条件下端帮采场岩土体变形破坏的3DEC数值分析模型,研究了端帮压煤开采全过程采场覆岩的变形移动和应力分布规律,将采动边坡变形破坏过程划分为表生改造、结构改造、时效变形和最终失稳4个阶段。

综上所述,通过对众多学者研究成果分析发现,边帮资源回收主要从露天转地下和井工开采2个方面进行研究,研究成果主要以理论分析、数值模拟和相似模拟为手段,对边帮资源回收的岩体破坏、应力分布和边坡角、矿柱宽度、间距等对边坡变形破坏及稳定性的影响,虽然已经在边帮资源开采边坡变形破坏和失稳特性等方向取得了较多成果,但针对近水平厚煤层开采边坡变形破坏及失稳特性分析相对较少,且也缺少实际工程佐证。为此笔者提出:首先,通过采用不同相似配比制作标准试件与原岩相似强度进行对比,确定与原岩符合的最终配比;其次,按确定的配比与实际工程成一定比例制作边帮模型分析边帮煤开采边坡变形破坏演化特征及失稳特性;最后,通过实际工程佐证上述分析。

1 相似材料选取及试验分析

1.1 相似模拟试验及材料选取

相似模拟是研究各类岩土体变形破坏规律和现象的试验,相似理论作为相似试验的理论基础,是试验模型和原型之间的桥梁,是自然界各工程状况中不同相似现象的学说,要求试验模型与工程之间满足的相似性质和规律,即相似三定律^[24]。

几何相似

$$C_l = L_p/L_m \quad (1)$$

时间相似

$$C_t = T_p/T_m \quad (2)$$

力相似

$$C_f = F_p/F_m \quad (3)$$

式中: C_l 、 C_t 、 C_f 分别为几何、时间和力相似数; L_p 、 T_p 、 F_p 为原型物理量; L_m 、 T_m 、 F_m 为模型物理量。

根据相似三定律及相关文献^[25-29]总结出在相似材料试验中所使用的材料主要可分为2大类:①石英砂/骨料,石膏和甘油/胶结材^[30-31];②河砂/骨料,石膏和大白粉/胶结材料^[32-33],本着取材经济、环保等原则,确定试验材料为河砂、石膏、大白粉。

1.2 标准试件试验方案设计

在矿山岩石力学指标和文献^[31-34]基础上,按相似试件制取流程制作2组不同配比的标准试件,共计8组24个试件,试件高径比为100 mm×50 mm(图1)。配比1:河沙为定值,大白粉、石膏/胶结材料为变值(表1);配比2:河沙、大白粉、石膏都为变值(表2)。将制作完成后试件进行单轴抗压、抗拉试验,取抗压、抗拉强度均值与原岩相似强度进行对比,确定一组配比作为下文工程模型的最终配比。



图1 试件模型

Fig.1 Specimen model

表1 1号相似材料配比

Table 1 No. 1 similar material ratio

岩性	配比号	材料质量/g		
		河沙	大白粉	石膏
粗砂岩	1037	105	3.15	7.35
中砂岩	1046	105	4.20	6.30
细砂岩	1055	105	5.25	5.25
粉砂岩	1073	105	7.36	3.14

注:1037是指将所有材料分为10+1=11份,其中河沙占10/11,大白粉和石膏占1/11,37是指将1/11的胶结材料分为10份,大白粉占3/10,石膏占7/10。

表2 2号相似材料配比

Table 2 No. 2 similar material ratio

岩性	配比号	材料质量/g		
		河沙	大白粉	石膏
粗砂岩	873	102.9	9.04	3.86
中砂岩	773	101.3	10.13	4.34
细砂岩	673	99.26	11.58	4.96
粉砂岩	564	96.50	11.58	7.72

1.3 试验结果分析

按上述方案进行试验得到不同岩样抗压、抗拉强度值(表3、表4),根据文献[34]研究成果和原岩力学参数(表5),确定试件抗拉、抗压强度与原岩相似比为1:200,计算得出原岩抗压、抗拉的相似数(表6)。

表3 1号相似材料模型试件强度试验结果
Table 3 Strength test results of No. 1 similar material model specimens

岩性	配比号	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
粗砂岩	1037	0.037 4	0.001 8
中砂岩	1046	0.099 1	0.004 6
细砂岩	1055	0.047 8	0.002 6
粉砂岩	1073	0.094 5	0.004 1
平均值	—	0.069 7	0.003 3

表4 2号相似材料模型试件强度试验结果
Table 4 Strength test results of No. 2 similar material model specimens

岩性	配比号	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
粗砂岩	873	0.063 2	0.003 0
中砂岩	773	0.136 5	0.006 3
细砂岩	673	0.098 7	0.005 3
粉砂岩	564	0.146 1	0.006 4
平均值	—	0.111 1	0.005 3

表5 矿山主要岩石力学指标
Table 5 Main rock mechanics indexes of mines

岩性	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
粗砂岩	18.70	0.910
中砂岩	39.60	1.830
细砂岩	28.70	1.550
粉砂岩	42.50	1.850
平均值	32.38	1.540

表6 矿山主要岩石力学指标相似值
Table 6 Similar values of main rock mechanics indexes of mines

岩性	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
粗砂岩	0.093 5	0.004 55
中砂岩	0.198 0	0.009 15
细砂岩	0.143 5	0.007 75
粉砂岩	0.212 5	0.009 00
平均值	0.161 9	0.007 70

通过表3—表6绘制成强度柱状对比图(图2—图4)。可知,配比1中各岩样抗拉、抗压值及均值强度与原岩强度差值较大,呈负相关;配比2差值较小,呈正相关,且拟合曲线与原岩趋势也较为一致,可作为下文工程模型的最终配比。

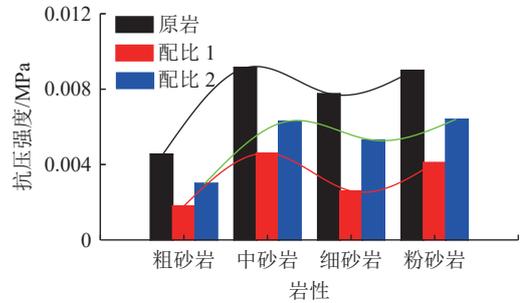


图2 原岩相似抗压强度与不同配比对比

Fig.2 Comparison of similar compressive strength and different ratios of original rock

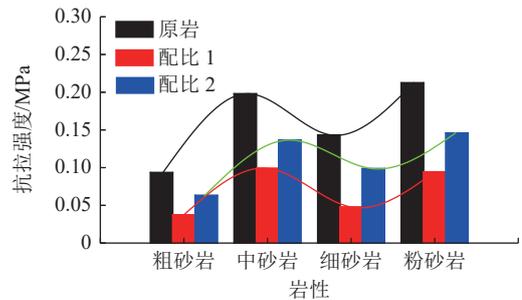


图3 原岩相似抗拉强度与不同配比对比

Fig.3 Comparison of similar tensile strength of original rock and different ratios

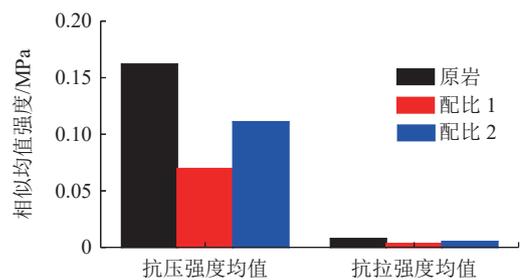


图4 原岩相似均值强度与不同配比对比

Fig.4 Comparison of similar average strength of original rock and different ratios

2 工程概况及研究方案制定

2.1 工程概况

某露天矿东西长4.2~6.9 km,南北长2.7~7.1 km,面积38.6 km²,地质储量39.8亿t,矿区呈北高南低趋势,海拔标高一般为+1 240~+1 420 m,煤层呈近水平分布,主要可采煤层为4号煤(上煤层)和9号煤(下煤层),平均厚度分别为11.6 m和13.0 m,其

中4号煤赋存深度为124.4 m, 9号煤赋存深度为219 m, 露天开采后最终边坡角35°, 边坡主要岩体为

不同粒径的砂岩, 平盘下滞留的煤炭资源总量约为8 700万 t, 煤层和平盘分布如图5所示。

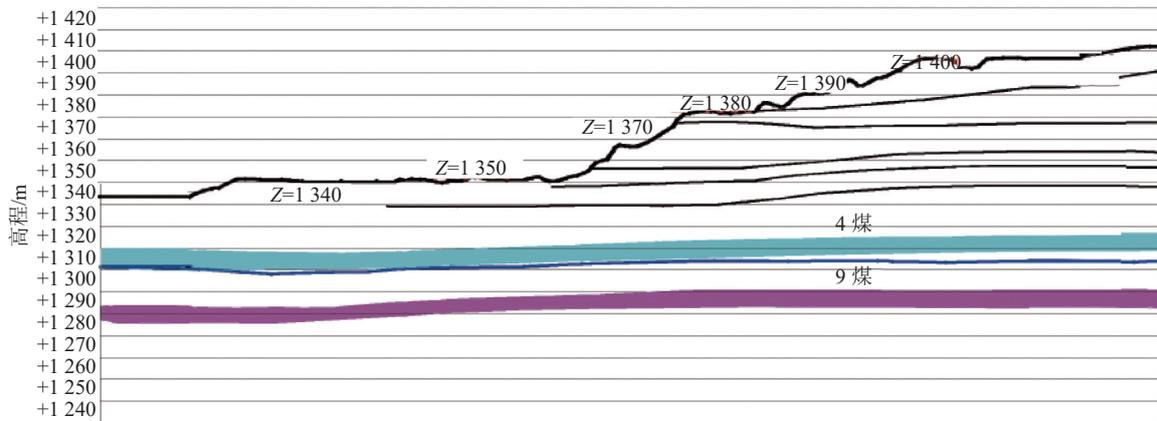


图5 露天矿山地质剖面

Fig.5 Geological section of open-pit mine

2.2 模型构建与研究方案制定

根据所研究矿山工程地质条件, 对边帮煤开采边坡岩层结构进行概化(表7), 结合相似模拟理论和实验室条件采用长、宽、高分别为1.80、0.20、2.00 m的二维模拟试验台搭建边帮煤开采边坡结构模型, 依据文献[35]确定模型与实际工程的几何相似比为1:200。按上述试验分析所确定的最终配比(表8)和几何相似比进行模型铺装, 铺装完成后的模型长、宽、高分别为1.8、0.2、1.35 m, 煤层由上到下依次为4号(上煤层)和9号(下煤层)煤层(图6), 依据文献[24]确定位移相似比同样为1:200。

试验过程采用天远三维摄影机对边坡位移数据进行采集。其中边坡变形破坏演化特征分析测点共布置11行、18列, 由上到下分别为11、10、…、1, 由左向右依次为1、2、…、18; 边坡变形失稳形态分析结构模型共布置6行测点, 每行3个点, 依据矿山地质剖面图平盘分布, 由上到下依次为1 400、1 390、1 380、1 370、1 350、1 340平盘, 其中1 400平盘位于第11行测点, 1 390平盘位于第10行测点, 依次向下, 各平盘变形值取所属3个测点的平均值(图7)。

由文献[22]可知井工长壁采煤法具有安全、高效、高采出率等优势, 特别是长壁综采放顶煤采煤法对近水平边帮厚煤层回采效果很好, 因此采用长壁综采放顶煤采煤法对边帮压煤进行开采, 工作面为倾向布置, 依据实际工程情况预留10 cm(20 m)边界煤柱, 上下煤层均从右向左依次开采, 每次开采长度5 cm(10 m)(对应实际工程每天开采长度), 上煤层设计开采长度115 cm(230 m)、下煤层设计开采长度

160 cm(320 m), 先采上煤层后采下煤层(图6)。

3 边帮煤开采边坡变形演化特征及失稳特性分析

3.1 上煤层开采边坡变形破坏及演化特征分析

上煤层开采边坡受井采扰动影响变形演化特征可以划分为开采初期、中期、末期3个阶段(图8), 特征如下:

1) 开采初期0~45 cm(0~90 m): 因留设保护煤柱和边坡内部岩体承载结构性关系, 工作面开采至35 cm(70 m)前, 采空区上部岩体稳定性较好(图8a、图8b); 随开采长度增加, 在张拉力和岩体自重作用下基本顶最先发生垮落, 从而诱发上部岩体变形破坏向上扩展, 靠近采空区中心的岩体变形破坏特征越充分, 两帮岩体受端头和留设煤柱支撑变形破坏高度较小(图8c、图9); 开采至45 cm, 边坡内部逐步形成悬臂梁、砌体梁、固支梁结构, 悬臂梁结构位于端头工作面后方, 砌体梁结构位于悬臂梁后方, 固支梁位于垮落岩层上方(图10); 此过程可称为边帮煤开采边坡岩体变形破坏的表生改造阶段, 根据采动覆岩“竖三带”理论判别方法^[36-38]也可以将变形垮落的岩层称为“竖三带”中的垮落带。

2) 开采中期45~100 cm(90~200 m): 工作面持续开采, 上覆岩层变形破坏遵循渐进发展和循环往复演化特征, 悬臂梁周期性断裂诱发固支梁周期性垮落, 周期性破坏的岩体形成支撑使工作面端头形成新的悬臂梁结构, 垮落岩体上方形成新的固支梁结构; 开采至60 cm(120 m)时, 因悬臂梁断裂诱发上

表7 岩石力学参数

Table 7 Rock mechanical parameter

岩性	厚度/m	密度/(kg·m ⁻³)	体积模量/GPa	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa
风化砂岩	12.0	2 000	2.4	2.50	38	13.70	0.620
粗砂岩	36.0	2 350	4.2	2.80	38	18.70	0.910
中砂岩	44.0	2 380	4.0	2.90	39	39.60	1.830
细砂岩	28.0	2 400	4.4	3.20	40	28.70	1.550
黏土矿	4.4	2 355	1.2	0.50	40	4.65	0.295
4号煤层	11.6	1 330	1.4	1.62	36	3.98	0.200
砂质泥岩	4.0	2 360	1.3	0.50	39	3.43	0.217
中砂岩	39.0	2 380	4.0	3.10	40	39.60	1.830
粉砂岩	36.0	2 600	4.4	5.00	38	42.50	1.850
灰泥岩	4.0	2 300	1.3	0.40	38	1.80	0.273
9号煤层	13.0	1 330	1.4	1.62	39	3.98	0.200
细砂岩	38.0	2 400	4.1	3.10	40	28.70	1.550

表8 岩石相似材料配比

Table 8 Rock similar material ratio

岩性	配比号	厚度/m	模拟厚度/cm	河沙质量/kg	石膏质量/kg	大白粉质量/kg	分层厚度/cm	次数	密度/(kg·m ⁻³)
风化砂岩	873	12	6.00	9.6	0.84	0.36	1.50	4	2.00
粗砂岩	873	36	18.0	15.04	1.316	564	2.00	9	2.35
中砂岩	773	44	22.0	15.12	1.512	0.648	2.00	11	2.38
细砂岩	673	28	14.0	14.81	1.722	0.738	2.00	7	2.40
黏土矿	40 : 1 : 2	4.4	2.20	17.38	0.435	0.869	2.20	1	2.36
4号煤层	40 : 1 : 2	11.6	5.80	25.83	0.646	1.292	5.80	1	1.33
砂质泥岩	773	4.0	2.00	14.87	1.485	0.637	2.00	1	2.36
中砂岩	773	39	19.5	14.99	1.499	0.643	2.00	10	2.38
粉砂岩	564	36	18.0	15.6	1.872	1.248	2.00	9	2.60
灰泥岩	40 : 1 : 2	4.0	2.00	15.41	0.385	0.770	2.00	1	2.30
9号煤层	40 : 1 : 2	13	6.50	28.95	0.724	1.448	6.50	1	1.33
细砂岩	673	38	19.0	14.81	1.722	0.738	2.00	10	2.40

注：因边坡工程中岩层主要以粗砂岩、中砂岩、细砂岩和粉砂岩为主，所以3.1节分析过程中只选取上述4种岩性岩层，其余岩层与相邻岩层进行统一概化。

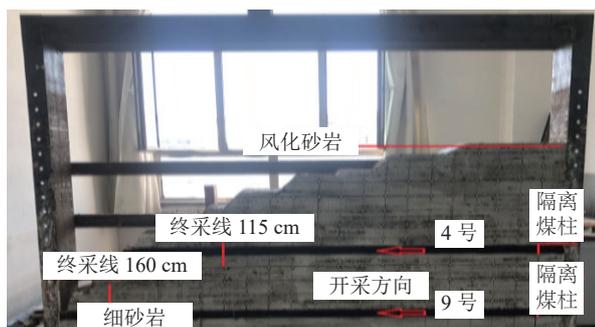


图6 边坡结构模型及开采设计

Fig.6 Slope structure model and mining design

方固支梁发生破坏使得上方关键层断裂，边坡岩体变形破坏发展至边坡上部平盘处，破坏岩层呈“金字塔”状(图11)，使得边坡最上部测点发生移动变化



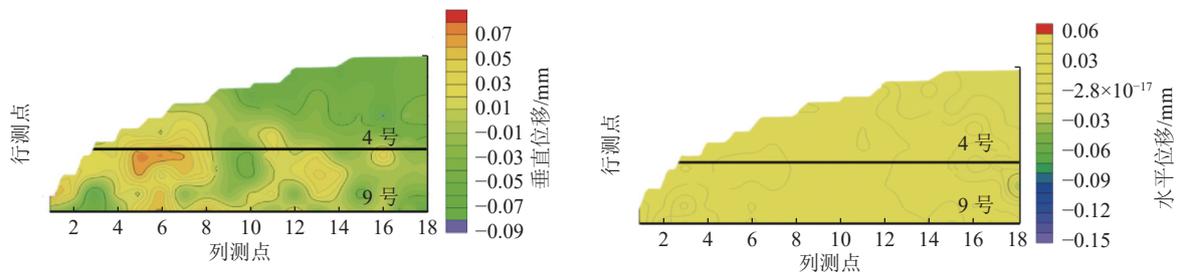
图7 边坡测点布置

Fig.7 Layout of slope measuring points

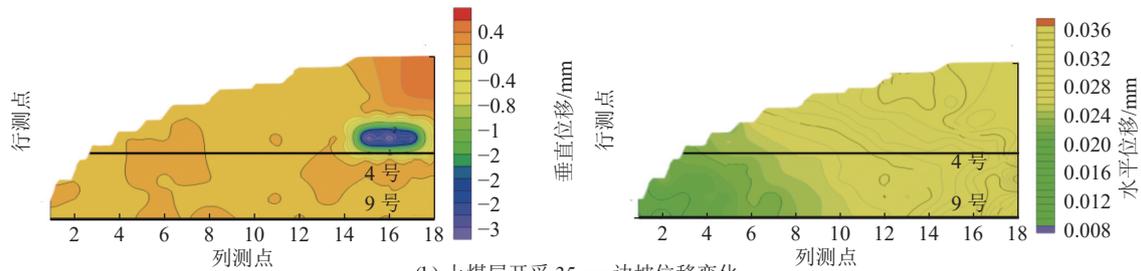
(图 8d), 开采至 65 cm(130 m)时, 变形下沉的岩体使边坡上部测点 11-1、11-2 发生下沉且存在向露天矿坑的横向移动趋势; 开采至 100 cm(200 m)时, 边坡上部平盘岩体变形破坏遵循渐近发展趋势, 随开采长度增加变形破坏加大, 此过程中边坡中部第 9 行测点受扰动也逐步发生沉降和水平移动现象, 变形值较第 11 行测点舒缓(图 8e), 且此过程中变形破坏的岩体由向露天矿坑移动(注: 露天矿坑移动是受露天开采影响)翻转为向采空区移动, 且使边坡发生结构性改变, 强度降低; 此过程为边帮煤开采边坡岩体变形破坏的结构改造阶段, 也可以将变形垮落的岩层称为“竖三带”中的裂隙带。

3) 开采末期 100 ~ 115 cm(200 ~ 230 m): 边坡上

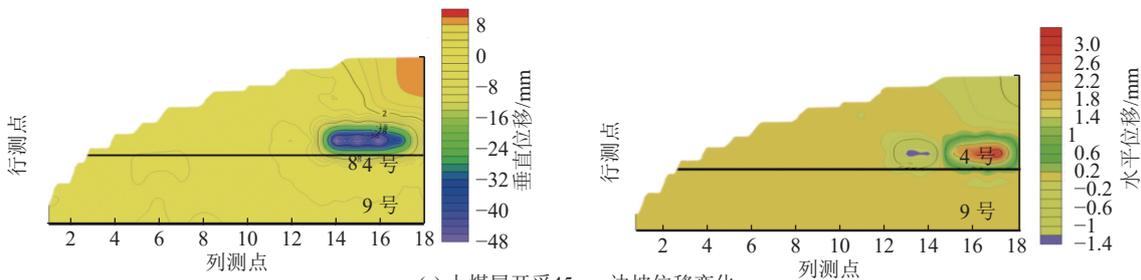
部岩体随开采长度增加变形破坏进一步扩展, 开采至 115 cm(230 m)时, 边坡第 7、5 行测点均发生变形移动现象, 沉降变形较水平变形更为剧烈, 第 7 行测点变形趋势指向采空区, 第 5 行测点因边坡上部岩体向下沉降挤压影响变形趋势指向露天矿坑, 最大沉降变形为第 9 行测点, 变形值为 -41.784 mm (-8.356 m), 最大水平变形为第 7 测点, 变形值为 -2.69 mm (-0.538 m)(图 8f), 且此过程变形沉降的岩体近似沿采空区中心向两边形成沉降减弱区, 未采动区域岩体形成“未影响区”(图 12), 采动区域形成近似的半“金字塔”状的下沉盆地(图 12、图 13); 过程为边帮煤开采边坡岩体变形破坏的时效变形阶段, 变形垮落的岩层为“竖三带”中的弯曲下沉带。



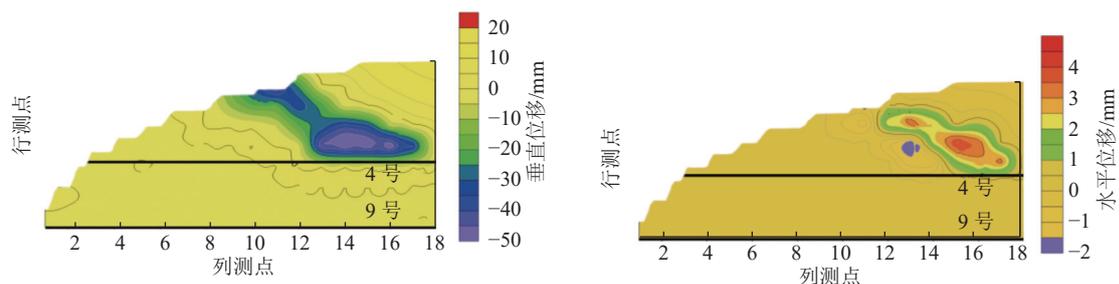
(a) 上煤层开采 5 cm 边坡位移变化



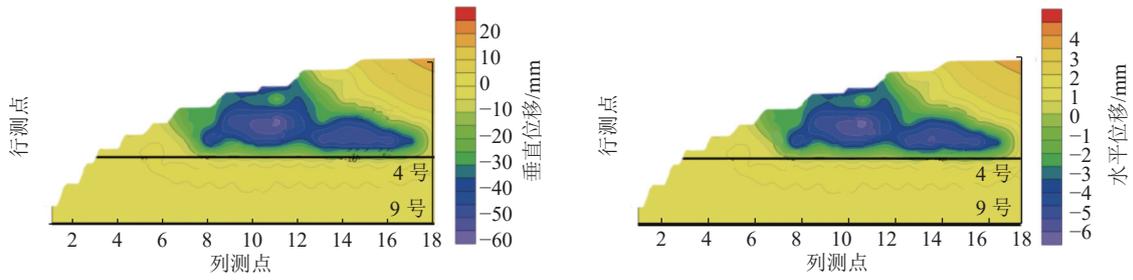
(b) 上煤层开采 35 cm 边坡位移变化



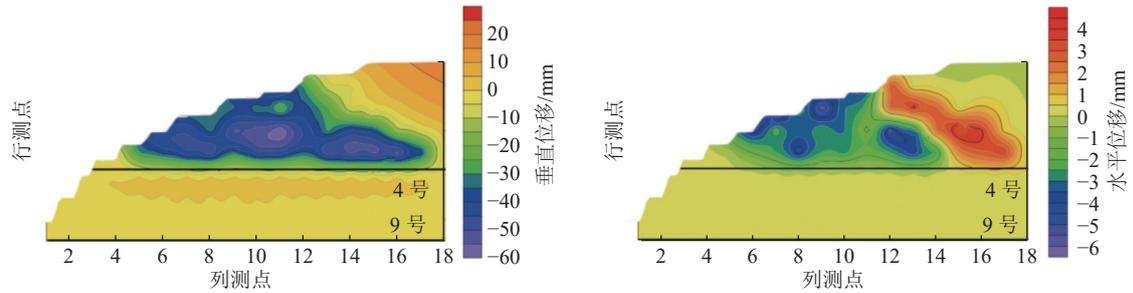
(c) 上煤层开采 45 cm 边坡位移变化



(d) 上煤层开采 60 cm 边坡位移变化



(c) 上煤层开采 100 cm 边坡位移变化



(f) 上煤层开采 115 cm 边坡位移变化

注：水平位移正值表示向露天矿坑移动，负值表示向采空区移动

图8 上煤层开采边坡变形演化位移

Fig.8 Deformation evolution displacement of slope in upper coal seam mining



图9 上煤层开采岩体垮落结构模型

Fig.9 Caving structure model of upper coal seam mining rock mass

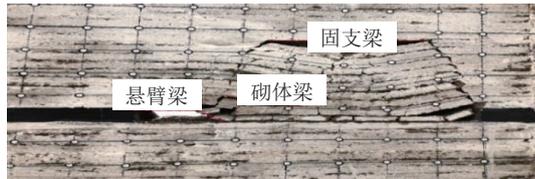


图10 “悬臂梁-砌体梁-固支梁”结构模型

Fig.10 “Cantilever beam-masonry beam-fixed beam” structure model



图11 边坡平盘沉陷结构模型

Fig.11 Structural model of the flat plate subsidence on the upper part of the slope

3.2 下煤层开采边坡变形破坏及演化特征分析

下煤层开采边坡受井采扰动影响变形演化特征可以划分为开采初期、开采末期2个阶段(图14、图15),特征如下:

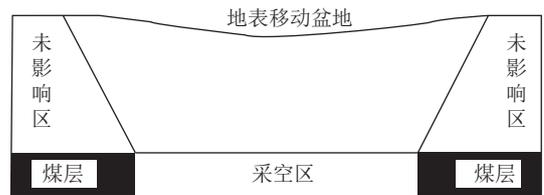


图12 边帮煤开采岩层变形移动模型

Fig.12 Deformation and movement model of rock strata in side coal mining



图13 上煤层开采后边坡破坏半“金字塔”结构模型

Fig.13 The semi-“pyramid” structure model of slope failure after mining of the upper coal seam

1)开采初期 0~50 cm(0~100 m): 同上煤层开采边坡内部岩体变形破坏相同,工作面开采至 50 cm(100 m)前,采空区上部顶板岩体稳定性较好(图16),只有部分泥岩发生沉降破坏(图15a、图15b),边坡上部位移测点维持上煤层开采后状况(图14);开采至 50 cm(100 m)时,采空区上方顶板岩层达到极限跨距向采空区方向发生沉降变形,变形沉降的岩体以采空区为中心向两帮减弱(图15c、图17);此过程为边帮煤开采边坡岩体变形破坏的表生改造阶段,变

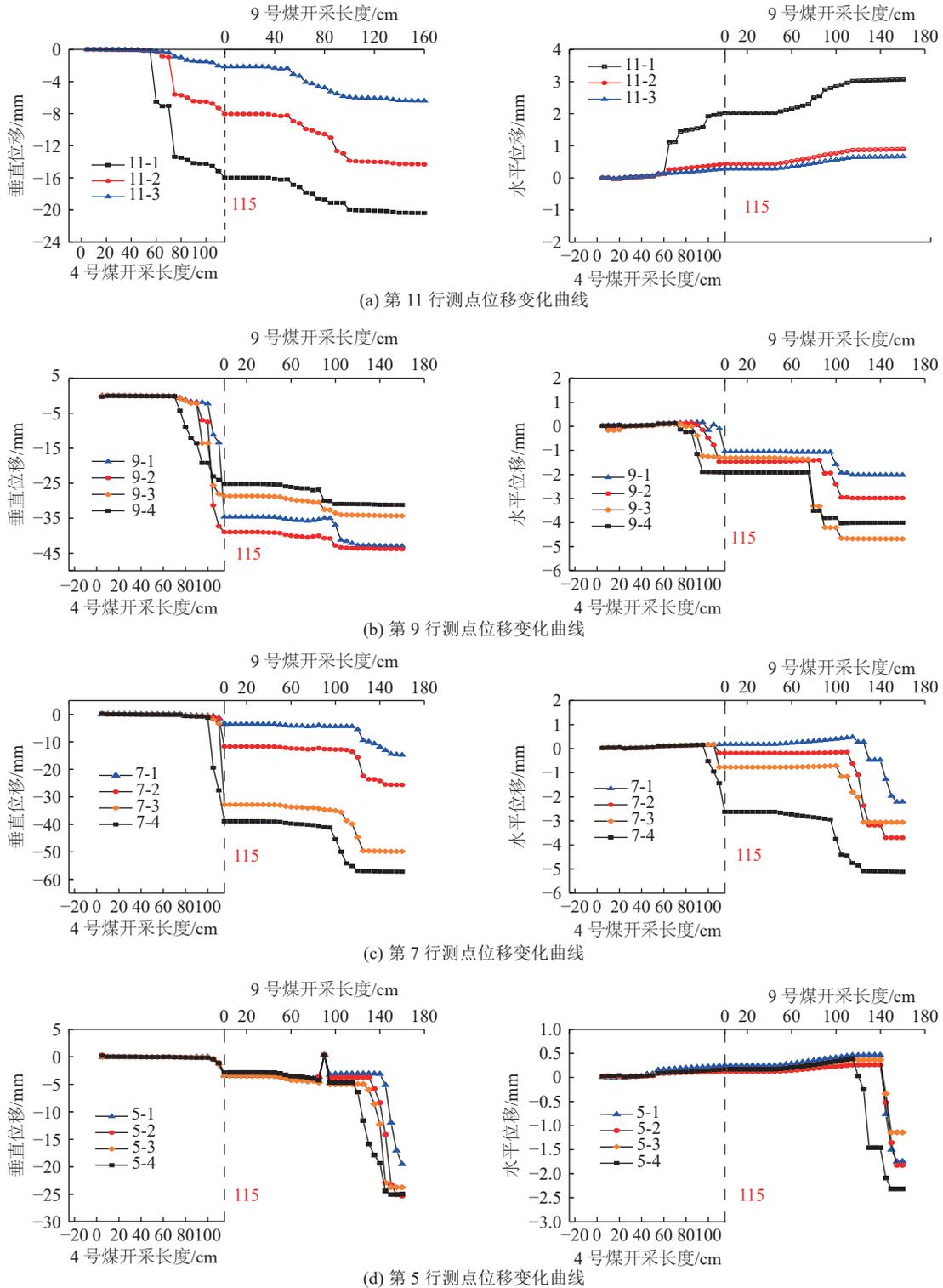


图 14 边帮煤开采上煤层局部测点位移变化
Fig.14 Displacement of local measured points in edge coal mining

形垮落的岩层为“竖三带”中的垮落带和裂隙带。

2) 开采末期 50 ~ 160 cm(100 ~ 320 m): 工作面持续开采工作面端头形成悬臂梁结构, 垮落岩体上方形成固支梁结构; 开采至 60 cm(120 m)时, 上下煤层之间的结构性岩层受下煤层开采影响发生贯通式破坏, 使得因上煤层开采破坏后的岩层重新发生变

形(图 15d、图 18); 开采至 160 cm(320 m), 此过程贯通破坏区持续扩展, 诱发边坡上部第 11 行测点所在岩体重新发生变形现象, 垂直方向保持向采空区的缓慢下沉, 水平方向维持向露天矿坑的缓慢移动, 且使得第 5 行测点所在岩体由指向露天矿坑移动翻转为指向采空区方向的移动, 待开采终止, 最大沉降区

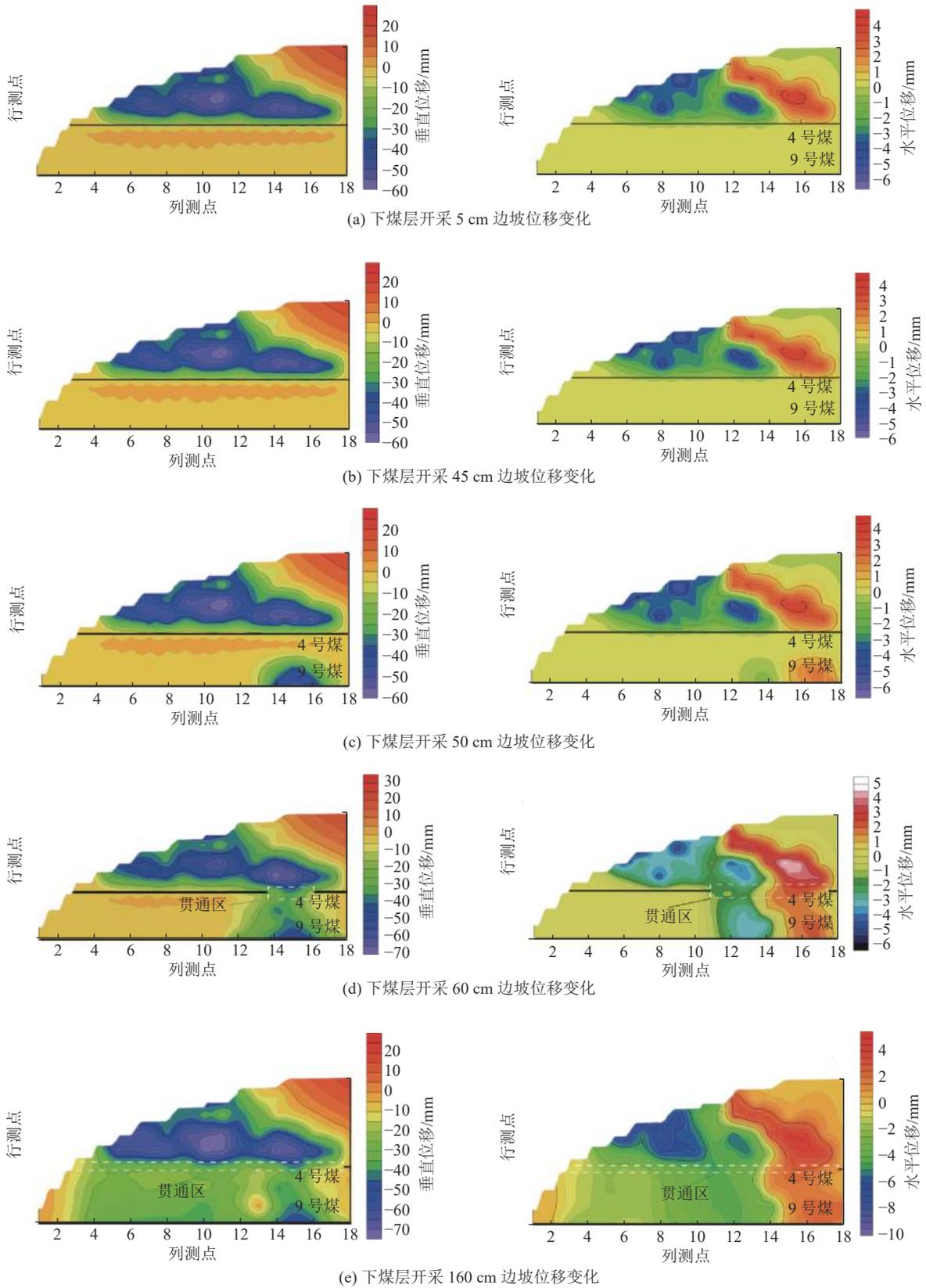


图 15 下煤层开采边坡变形演化位移

Fig.15 Evolution displacement of slope deformation in lower coal seam mining

和水平移动区均为第 7 行测点所在岩体, 分别为 $-58.94\text{ mm}(-11.788\text{ m})$ 、 $-5.27\text{ mm}(-1.054\text{ m})$ (图 14a、c、d), 此时下煤层上方变形破坏的岩体呈半“金字塔”

状(图 19), 根据文献 [39] 岩层移动判别理论也可称为半“类曲线”状(图 20); 此过程为边帮煤开采边坡岩体变形破坏的结构改造阶段, 变形垮落的岩层为



图 16 下煤层开采顶板岩体结构模型

Fig.16 Structural model of roof rock mass in mining of lower coal seam

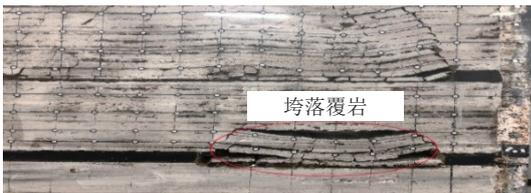


图 17 下煤层开采垮落岩体结构模型

Fig.17 Caving rock structure model of lower coal seam mining



图 18 上下煤层覆岩贯通区结构模型

Fig.18 Structural model of the upper and lower coal seam overlying strata penetration zone



图 19 边坡变形破坏结构模型

Fig.19 Slope deformation failure structure model

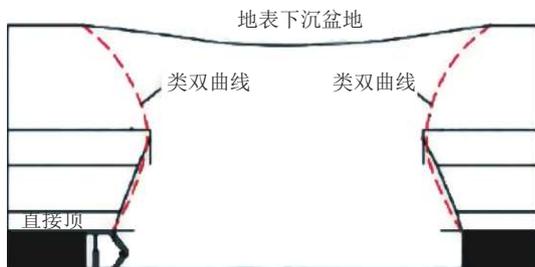


图 20 下煤层开采岩体变形破坏的“类曲线”模型

Fig.20 “Curve like” model of rock mass deformation and failure in mining of lower coal seam

“竖三带”中的弯曲下沉带。

综上所述，边帮煤开采，边坡岩体变形破坏主要

是沿纵向变化，呈破坏下沉，局部呈横向移动，整个开采过程变形破坏可以划分为 3 个阶段，即表生改造阶段、结构改造阶段、时效变形阶段，上煤层开采结束后边坡岩体变形破坏沿采空区中心向两边形成沉降减弱区，形成“未影响区”的小型半“金字塔”状的下沉盆地，下煤层开采结束后边坡岩体呈半“类曲线”的“金字塔”状。

3.3 边帮煤开采边坡失稳形态分析

边坡稳定性是指边坡岩、土体在一定坡高和坡角条件下的稳定程度，是确保露天矿持续、正常生产和周边作业人员及设备安全的前提和基础^[40]。边坡失稳实质上是工作面顶板岩层在受力作用下发生变形扩展造成边坡平盘发生破坏，诱发失稳现象发生。根据边帮煤开采边坡失稳形态可以划分为 2 种情况：①边坡平盘指向采空区的反倾向失稳；②边坡平盘指向露天矿坑的崩塌失稳，指向采空区的反倾向失稳不会对矿山生产造成影响，指向露天矿坑的崩塌失稳对矿山生产存在影响，由此，在边坡变形破坏演化特征分析基础上结合现场监测手段展开对边帮煤开采边坡失稳形态的分析，边坡平盘如图 21 所示。

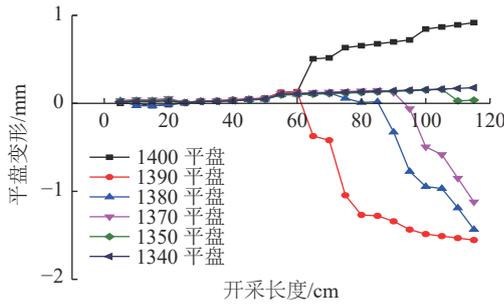


图 21 边坡各平盘物理结构模型

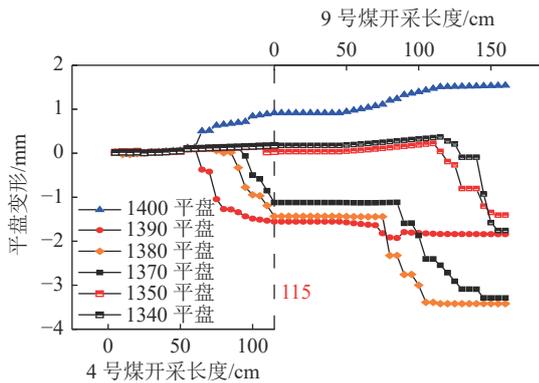
Fig.21 Physical structure model of each flat plate of slope

3.3.1 边帮煤开采边坡失稳形态的物理试验分析

通过边坡变形演化特征分析可知，上煤层开采，边坡岩体变形破坏由基本顶开始逐次向上发育，直到工作面开采至 60 cm(120 m)时，边坡岩体变形破坏发育至边坡上部 1400 和 1390 平盘，边坡稳定性发生改变，处于失稳状况(图 13)；工作面持续开采下边坡失稳状况也在持续扩展，直至开采至 115 cm(230 m)终采线，边坡 1400、1350、1340 平盘存在向露天矿坑局部崩塌失稳可能，最大变形移动平盘为 1400 平盘，变形值为 0.92 mm(0.184 m)，虽变形移动趋势指向露天矿坑，但因变形值较小，故不影响矿山正常生产，1390、1380、1370 平盘发生指向采空区的反倾向失稳现象，变形移动最大的平盘为 1390 平盘，变形值为-1.67 mm(-0.334 m)(图 22a)，此过程中边坡其余平盘均存在裂隙发育现象，裂隙平均宽度 1.2 mm(0.24 m)左右(图 23a)。



(a) 上煤层开采边坡平盘变形



(b) 下煤层开采边坡平盘变形

图 22 上下煤开采各平盘位移变化

Fig.22 Curves of displacement changes of flatplates in upper and lower coal mining



(a) 上煤层开采

(b) 下煤层开采

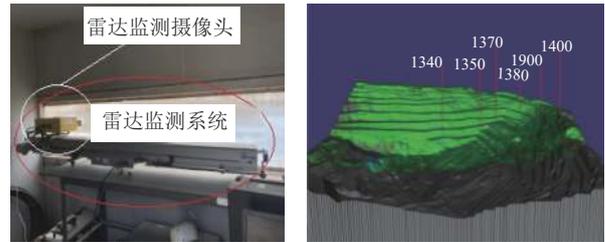
图 23 煤层开采平盘裂隙发育结构模型

Fig.23 Development structure model of flat disc fissures in coal seam mining

下煤层开采初期边坡维持上煤层开采状况, 开采至 60 m(120 m)时, 上下煤层采空区发生贯通, 边坡失稳状况发生改变; 开采至终采线 160 cm(320 m)后, 边坡上部 1400 平盘指向露天矿矿坑变形趋势加大, 变形值增大为 1.72 mm(0.344 m)(图 22b), 局部崩塌失稳征兆加剧; 中部 1390、1380、1370 平盘为指向采空区的反倾向失稳, 最大变形平盘为 1380, 变形值为 -3.41 mm(-0.682 m)(图 22b); 下部 1350、1340 平盘由最初指向露天矿坑趋势转变为指向采空区方向的反倾向失稳, 指向采空区的平盘为 1380, 此过程中边坡平盘裂隙不断扩大, 平均裂隙宽度 5.8 mm(1.16 m)(图 22、图 23b)。

3.3.2 边帮煤开采边坡失稳形态的现场监测分析

边帮煤开采边坡变形失稳的现场监测手段采用 SSR-X 雷达监测系统(图 24), 所监测各平盘变形数据整理后绘制成(图 25、图 26)数据曲线, 此过程可采的上下煤层长度分别为 232 m 和 320 m, 其余可采煤层均位于边坡后方, 开采时对边坡稳定性影响较小, 故不做分析。



(a) SSR-X 雷达监测仪

(b) 雷达监测边坡成像模型

图 24 SSR-X 雷达监测仪及成像模型

Fig.24 SSR-X radar monitor and imaging model

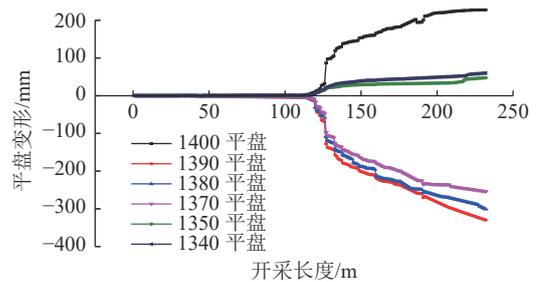


图 25 上煤层开采边坡平盘变形

Fig.25 Deformation curve of upper coal seam mining slope

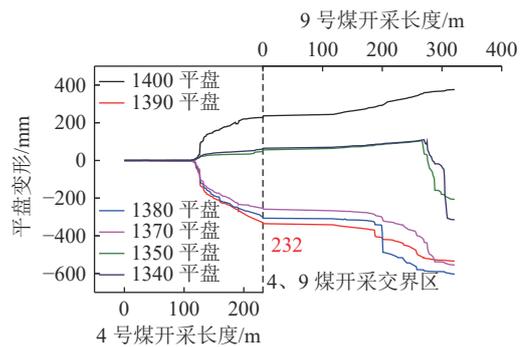


图 26 下煤层开采边坡平盘变形

Fig.26 Deformation curve of slope in mining of lower coal seam

通过现场观测和数据监测可知, 上煤层开采初期边坡各平盘不发生变形移动现象, 直到开采至 115 m 时, 边坡内部岩体变形破坏发育至边坡平盘处, 致使边坡发生变形失稳现象, 上部 1400 和下部 1350、1340 平盘发生向露天矿坑的水平拉伸变形, 下部 1390、1380、1370 平盘发生向采空区的反倾向拉伸移动变

形,此过程中边坡平盘存在局部破坏,烈度较低;开采至 232 m 终采线,此过程边坡各平盘变形移动趋势维持失稳后状况,指向露天矿坑的最大变形平盘为 1400,变形值为 227.5 mm(0.227 5 m),且平盘局部有裂隙衍生,最大裂隙宽度 250 mm(0.25 m)(图 25、图 26),因变形值和裂隙宽度均较小,所以不存在崩塌现象。

同物理试验相同,上煤层开采结束后对下煤层进行开采,开采至 125 m 时,上下煤层发生贯通,使边坡上部 1400 平盘向露天矿坑的邻空移动值不断增长,下部平盘向采空区移动值也在不断增大;继续开采至 285 m 时,下部 1350、1340 平盘发生向采空区方向的翻转变形;直至开采至 320 m 终采线,边坡上部 1400 平盘向露天矿坑的变形值增大到 376 mm(0.376 m)(图 26),且平盘局部区域发生崩塌现象(图 27a)和宽度不等裂隙,最大裂隙宽度接近 900 mm(0.9 m)左右,最小宽度 200 mm(0.2 m)左右(图 27b)。

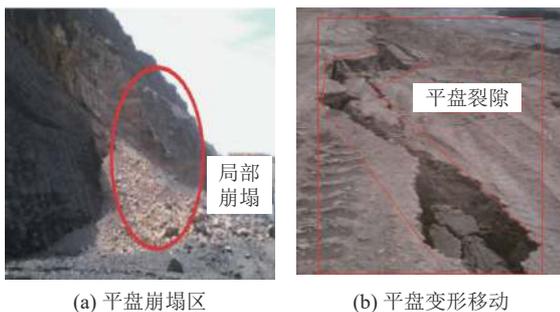


图 27 边坡平盘局部滑移及移动

Fig.27 Local slip and movement of slope flat plate

3.3.3 边坡失稳形态对比

通过上述边帮煤开采边坡失稳形态的物理试验和现场监测分析可知:

上煤层开采至 120 m 左右时,物理试验和现场监测显示边坡上部平盘岩体发生变形移动,由此判定此时边坡发生失稳;上煤层开采至终采线,物理试验和现场监测边坡平盘变形移动趋势均一致。

下煤层开采至 120 m 左右时,上下煤层采空区发生贯通,边坡平盘变形移动重新发生改变;直至开采至终采线,物理试验和现场监测边坡平盘变形移动趋势均一致,但 1400 平盘的变形值存在差异,现场监测变形值为 376 mm(0.376 m),物理模型变形值为 1.72 mm(0.344 m),且均存在局部失稳崩塌现象。

4 结 论

1)通过相似定律引出 2 种相似材料配比方案,针对 2 种方案制作标准试件进行单轴抗拉、抗压试

验,得出 2 种配比试件的抗拉、抗压强度,在通过相似原理对原岩抗压、抗拉强度进行缩放后与两组方案所得强度值进行对比,确定方案 2 的强度值与原岩更为相符,由此将方案 2 的配比作为物理结构模型的最终配比。

2)根据边帮煤开采边坡变形演化特征可以将边坡变形破坏划分为 3 个阶段,分别为表生改造阶段、结构改造阶段、时效变形阶段;变形破坏后的岩体可以划分为“竖三带”,分别为垮落带、裂隙带和弯曲下沉带,表生改造阶段随工作面开采长度增加边坡内部岩体向采空区方向发生垮落,形成“竖三带”中的垮落带,此时边坡稳定性较好;结构改造阶段边坡发生失稳,垮落的岩体形成“三带”中的裂隙带;时效变形阶段边坡延续上一阶段变形特征,最终形成“竖三带”中的弯曲下沉带。

3)按工作面开采长度可以将上煤层开采边坡变形演化特征划分为初期、中期、末期 3 个阶段,下煤层划分为初期和末期 2 个阶段;上煤层开采初期:靠近采空区中心的岩体变形破坏高度较大,两帮岩体受支撑变形破坏高度较小,且会形成悬臂梁、砌体梁、固支梁结构;中期:上覆岩体遵循渐进发展和循环往复的破坏规律,悬臂梁周期性断裂诱发固支梁周期性垮落,直至固支梁上方的关键层断裂,边坡岩体变形破坏会发展至边坡上部平盘处,循环往复规律终止;末期:边坡岩体沿采空区中心向两边形成沉降减弱区,未采动区域岩体形成“未影响区”,采动区域形成对称分布半“金字塔”状的下沉盆地;下层煤开采初期:边坡内部岩体变形破坏以采空区为中心向两帮减弱,变形破坏程度和范围均较小;下层煤开采末期:上下煤层之间的结构性岩层发生贯通式破坏,引发边坡岩体沿垂直方向向采空区下沉,水平方向向露天矿坑的缓慢移动,直至开采终止变形破坏的岩体呈半“类曲线”状。

4)通过物理试验和现场监测手段共同得出上煤层开采至 120 m 左右时,因变形垮落岩体发育至边坡平盘处使边坡发生失稳现象;下煤层开采至 120 m 左右时,上下煤层之间的采空区发生贯通,诱发因上煤层开采变形失稳的边坡重新发生移动,直至开采至 320 m 终采线,边坡上部 1400 平盘存在局部崩塌失稳区,失稳区域较小,其余平盘均表现为指向采空区的反倾向失稳。

参考文献(References):

[1] 刘泽民,王社林,才庆祥.安家岭露天煤矿端帮采煤方法研究

- [J]. 中国矿业大学学报, 2001, 30(5): 515-517.
LIU Zemin, WANG Shelin, CAI Qingxiang. Application of top-coal caving method in Anjialing surface mine[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2001, 30(5): 515-517.
- [2] 周亚博. 黑岱沟露天矿首采区西端帮下煤层开采可行性研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
ZHOU Yabo. Feasibility study on coal seam mining under the western end of the first mining area of Heidaigou Open-pit Mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014.
- [3] 白润才, 刘 闯, 薛应东, 等. 相邻露天矿边帮压煤协调开采技术[J]. 煤炭学报, 2014, 39(10): 2002-2005.
BAI Runcai, LIU Chuang, XUE Yingdong, *et al.* Technology of Coordinated coal mining at the edge of adjacent open-pit mine[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(10): 2002-2005.
- [4] 杨天鸿, 张锋春, 于庆磊, 等. 露天矿高陡边坡稳定性研究现状及发展趋势[J]. 岩土力学, 2011, 32(5): 1438-1452.
YANG Tianhong, ZHANG Fengchun, YU Qinglei, *et al.* Research status and development trend of high and steep slope stability in open-pit mines[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(5): 1438-1452.
- [5] 王云飞, 钟福平. 露天转地下开采边坡失稳数值模拟与试验研究[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S1): 64-69.
WANG Yunfei, ZHONG Fuping. Numerical simulation and experimental study on slope instability in transition from open-pit to underground mining[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S1): 64-69.
- [6] 任高峰. 露井联合开采作用边坡损害机理及控制研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2010.
REN Gaofeng. Study on damage mechanism and control of slope under open-pit combined mining [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2010.
- [7] 孙世国, 易亚楠, 赵雪芳. 露天转地下无保护煤柱开采边坡变形属性[J]. 煤矿安全, 2014, 45(12): 76-78.
SUN Shiguo, YI Yanan, ZHAO Xuefang. Deformation attributes of slopes in unprotected pillar mining from open-pit to underground[J]. Safety in Coal Mines, 2014, 45(12): 76-78.
- [8] 武占东. 露天转地下井工开采对边坡稳定性的影响评价[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2015.
WU Zhandong. Evaluation of the influence of open-pit to underground mining on slope stability [D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2015.
- [9] 王创业, 李俊鹏, 刘 伟, 等. 不同井下开采方向下采动边坡稳定性的研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(5): 61-64.
WANG Chuangye, LI Junpeng, LIU Wei, *et al.* Research on the stability of mining slope under different underground mining directions[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(5): 61-64.
- [10] 李小双, 罗 浪, 王运敏, 等. 露天转地下开采覆岩采动响应的坡角影响效应研究[J]. 矿冶工程, 2021, 41(4): 33-37.
LI Xiaoshuang, LUO Lang, WANG Yunmin, *et al.* Study on the effect of slope angle on the mining response of overburden in open-pit to underground mining[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2021, 41(4): 33-37.
- [11] 朱建明, 刘宪权, 冯锦艳, 等. 露井联合下边坡稳定性及其边界参数优化研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(S2): 3971-3977.
ZHU Jianming, LIU Xianquan, FENG Jinyan, *et al.* Research on slope stability and boundary parameter optimization of open-well combined mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(S2): 3971-3977.
- [12] 冯锦艳, 朱建明, 刘宪权, 等. 井工-露天联采模式下井工开切眼与边坡合理距离的研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2009, 26(1): 65-69.
FENG Jinyan, ZHU Jianming, LIU Xianquan, *et al.* Research on the reasonable distance between the incision hole and the slope in the well-operated-surface combined mining mode[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2009, 26(1): 65-69.
- [13] 蓝 航, 李凤明, 姚建国, 等. 露天煤矿排土场边坡下采动沉降规律研究[J]. 中国矿业大学学报, 2007, 36(4): 482-486.
LAN Hang, LI Fengming, YAO Jianguo, *et al.* Research on surface subsidence of dump slope induced by mining in open colliery[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2007, 36(4): 482-486.
- [14] 宋卫东, 付建新, 王东旭. 露天转地下开采岩体破坏规律的物理与数值模拟研究[J]. 煤炭学报, 2012, 37(2): 186-191.
SONG Weidong, FU Jianxin, WANG Dongxu. Physical and numerical simulation research on the damage law of surrounding rocks in opencast to underground mining[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(2): 186-191.
- [15] 尹光志, 李小双, 李耀基. 底摩擦模型模拟露天转地下开挖采空区影响下边坡变形破裂响应特征及其稳定性[J]. 北京科技大学学报, 2012, 34(3): 231-238.
YIN Guangzhi, LI Xiaoshuang, LI Yaoji. Response characteristics and stability of slope deformation and rupture under the influence of open-pit to underground goaf simulated by bottom friction model[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2012, 34(3): 231-238.
- [16] 殷志祥, 董 慧. 基于边坡稳定性的SHM开采端帮特厚煤层影响参数研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2015, 23(1): 56-67.
YIN Zhixiang, DONG Hui. Study on influence parameters of shm mining end-bang extra thick coal seam based on slope stability[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Sciences, 2015, 23(1): 56-67.
- [17] 董 慧. 端帮采煤对露天矿边坡稳定性影响研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2014.
DONG Hui. Study on the influence of duanbang coal mining on the slope stability of open pit mine[D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2014.
- [18] 尚 涛, 舒继森, 才庆祥, 等. 露天矿端帮采煤与露天采排工程的时空关系[J]. 中国矿业大学学报, 2001, 31(1): 27-29.
SHANG Tao, SHU Jisen, CAI Qingxiang, *et al.* The temporal and spatial relationship between side-assisted coal mining and open-pit mining and drainage engineering in open-pit mines[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2001, 31(1): 27-29.

- [19] 李志鹏. 黑岱沟矿边帮煤井工开采对留坑边坡稳定性影响研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2016.
LI Zhipeng. Study on the influence of side-assisted coal mining on the stability of Liukeng slope in Heidaigou Mine [D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2016.
- [20] 韩阳. 黑岱沟露天矿端帮煤井工开采地表移动规律研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2017.
HAN Yang. Study on the law of surface movement in the Heidaigou open-pit mine in the end-gang coal mining[D]. Fuxin: Liaoning University of Engineering and Technology, 2017.
- [21] 丁其乐. 端帮压煤井工开采覆岩运动规律及控制研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2017.
DING Qile. Research on the movement law and control of overlying rock in Duanbang coal press mining[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2017.
- [22] 南存全, 王礼江, 吕进国, 等. 露天边帮煤井工长壁综放开采工作面顶板压力计算[J]. 煤炭学报, 2019, 44(6): 1753-1763.
NAN Cunquan, WANG Lijiang, LYU Jinguo, *et al.* Calculation of roof pressure of longwall fully mechanized caving mining working face in open-pit side gang coal mine workers[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(6): 1753-1763.
- [23] 丁鑫品, 李凤明, 付天光, 等. 端帮采场覆岩移动破坏规律及边坡稳定控制方法[J]. 煤炭学报, 2021, 46(9): 2883-2894.
DING Xinpin, LI Fengming, FU Tianguang, *et al.* Movement failure law of overlying rock and slope stability control method in Duanbang stope[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(9): 2883-2894.
- [24] 代树红, 王浩然, 韩荣军, 等. 流-固耦合模型试验相似材料研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(8): 1-8.
DAI Shuhong, WANG Haoran, HAN Rongjun, *et al.* Research on similar materials for fluid-solid coupling model test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(8): 1-8.
- [25] 黄庆享, 胡火明. 黏土隔水层的应力应变全程相似模拟材料和配比试验研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2017, 34(6): 1174-1178.
HUANG Qingxiang, HU Huoming. Experimental study on simulation materials and ratio of stress-strain full-process simulation of clay water barrier[J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2017, 34(6): 1174-1178.
- [26] 李光, 马凤山, 郭捷, 等. 大尺寸工程模型试验中的相似材料配比试验研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2020, 41(11): 1653-1660.
LI Guang, MA Fengshan, GUO Jie, *et al.* Experimental research on the ratio of similar materials in large-scale engineering model tests[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science Edition), 2020, 41(11): 1653-1660.
- [27] 刘晓敏, 盛谦, 陈健, 等. 大型地下洞室群地震模拟振动台试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(1): 83-88.
LIU Xiaomin, SHENG Qian, CHEN Jian, *et al.* Study on shaking table test of large-scale underground caverns by earthquake simulation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(1): 83-88.
- [28] 李童悦, 赵佳美, 周洪正. 基于正交设计的岩石相似材料配比试验研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2018, 16(4): 143-147.
LI Tongyue, ZHAO Jiamei, ZHOU Hongzheng. Experimental study on the ratio of rock similar materials based on orthogonal design[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2018, 16(4): 143-147.
- [29] 李术才, 周毅, 李利平, 等. 地下工程流-固耦合模型试验新型相似材料的研制及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(6): 1128-1137.
LI Shucui, ZHOU Yi, LI Liping, *et al.* Development and application of new similar materials for fluid-solid coupling model test of underground engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(6): 1128-1137.
- [30] 张彦君, 年廷凯, 王亮, 等. 岩质边坡物理模型试验相似材料研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(1): 55-61, 72.
ZHANG Yanjun, NIAN Tingkai, WANG Liang, *et al.* Research on similar materials for physical model test of rock slopes[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(1): 55-61, 72.
- [31] 许强, 刘汉香, 邹威, 等. 斜坡加速度动力响应特性的大型振动台试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(12): 2420-2428.
XU Qiang, LIU Hanxiang, ZOU Wei, *et al.* Large scale shaking table test study of acceleration dynamic response characteristics of slopes[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2420-2428.
- [32] 王创业, 李俊鹏, 刘伟, 等. 露井联采下边坡稳定性及时效性研究[J]. 煤矿安全, 2018, 49(8): 258-261, 265.
WANG Chuangye, LI Junpeng, LIU Wei, *et al.* Study on the timeliness of slope stability under open well combined mining[J]. Safety in Coal Mines, 2018, 49(8): 258-261, 265.
- [33] 张强勇, 李术才, 郭小红. 铁晶砂胶结新型岩土相似材料的研制及其应用[J]. 岩土力学, 2008, 39(8): 2126-2130.
ZHANG Qiangyong, LI Shucui, GUO Xiaohong. Research and development of new typed cementitious geotechnical similitude material for iron crystal sand and its application[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 39(8): 2126-2130.
- [34] 宁奕冰, 唐辉明, 张勃成, 等. 基于正交设计的岩石相似材料配比研究及底摩擦物理模型试验应用[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 2009-2020.
NING Yibing, TANG Huiming, ZHANG Bocheng, *et al.* Study on ratio of similar materials in rock based on orthogonal design and application of physical model test of bottom friction[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(6): 2009-2020.
- [35] 王创业, 李俊鹏, 张琪, 等. 地下采动条件下露天矿边帮覆岩移动规律研究[J]. 矿业研究与开发, 2018, 38(4): 75-78.
WANG Chuangye, LI Junpeng, ZHANG Qi, *et al.* Research on movement law of overburden rock on open-pit slope under underground mining conditions[J]. Mining Research and Development, 2018, 38(4): 75-78.
- [36] 李树刚, 王琳华, 林海飞, 等. 采场覆岩“三带”演化特性的相似模拟试验及分析[J]. 矿业安全与环保, 2013, 40(3): 17-20.
LI Shugang, WANG Linhua, LIN Haifei, *et al.* Similar simulation experiment and analysis on evolution characteristics of "three zones" in overburden strata of stope[J]. Mining Safety & Environ-

- mental Protection, 2013, 40(3): 17-20.
- [37] 王志强, 李鹏飞, 王 磊, 等. 再论采场“三带”的划分方法及工程应用[J]. 煤炭学报, 2013, 38(S2): 287-293.
WANG Zhiqiang, LI Pengfei, WANG Lei, *et al.* Method of division and engineering use of “three band” in the stope again[J]. Journal of China Coal Society, 2013, 38(S2): 287-293.
- [38] 范钢伟, 张东升, 马立强. 神东矿区浅埋煤层开采覆岩移动与裂隙分布特征[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(2): 196-201.
FAN Gangwei, ZHANG Dongsheng, MA Liqiang. Overburden movement and fracture distribution induced by longwall mining of the shallow coal seam in the Shendong coalfield[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(2) : 196-201.
- [39] 左建平, 吴根水, 孙运江, 等. 岩层移动内外“类双曲线”整体模型研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 333-343.
ZUO Jianping, WU Genshui, SUN Yunjiang, *et al.* Investigation on the inner and outer analogous hyperbola model(AHM) of strata movement[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(2) : 333-343.
- [40] 马 康. 岩质陡边坡稳定性影响因素敏感性分析及治理对策研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2016.
MA Kang. Sensitivity analysis of factors affecting stability of steep rock slope and study on treatment Countermeasures [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2016.