



移动扫码阅读

丁鑫品,李凤明,李宏艳.露天矿井采空区安全顶板厚度及地表危险性分区研究[J].煤炭科学技术,2019,47(8):257-263.doi:10.13199/j.cnki.cst.2019.08.036

DING Xinpin,LI Fengming,LI Hongyan.Research on of safety roof thickness and surface risk zoning in mined-out area of open pit coal mine [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(8): 257-263. doi: 10.13199/j.cnki.cst.2019.08.036

露天矿井采空区安全顶板厚度及地表危险性分区研究

丁鑫品^{1,2,3},李凤明²,李宏艳^{1,2}

(1.煤炭科学技术研究院有限公司,北京 100013;2.煤炭资源高效开采与洁净利用国家重点实验室,北京 100013;

3.煤炭科学研究总院,北京 100013)

摘要:为了实现对露天矿井采空区危险性的三维动态控制,确保过采空区期间露天采矿设备和人员的安全,以平朔矿区和平庄矿区大型露天煤矿采空区隐蔽地质灾害勘查与治理工程实践为背景,综合运用数值分析、物理模拟与现场实测相结合的方法,研究了露天矿剥采作业条件下采空区上覆岩体裂隙发育规律、围岩变形破坏规律和设备对地影响规律。通过研究,建立了基于覆岩“两带”高度与设备对地影响深度的长壁工作面采空区安全顶板厚度确定方法,提出了基于采空区平面投影边界、离层范围边界、“砌体梁”结构区内侧范围边界以及移动盆地裂缝边界的采空区地表危险性分区方法,结合各类露天采矿设备自身的特点及其对安全作业环境需求的差异性,分别确定了对应的危险性分区。

关键词:露天煤矿;井采采空区;安全顶板厚度;危险性分区

中图分类号:TD854

文献标志码:A

文章编号:0253-2336(2019)08-0257-07

Research on safety roof thickness and surface risk zoning method in mined-out area of open pit coal mine

DING Xinpin^{1,2,3},LI Fengming²,LI Hongyan^{1,2}

(1. China Coal Research Institute Co., Ltd., Beijing 100013, China; 2. State Key Laboratory of Coal Mining and Clean Utilization, Beijing 100013, China; 3. China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

Abstract: In order to realize the three-dimensional dynamic control of the risk of mined-out area in open-pit coal mine, and to ensure the safety of open pit mining equipment and personnel during the period of passing through the mined-out area, the hidden geological disaster exploration and control engineering practice in the gob of large open-pit coal mine in Pingzhuang mine area of Pingshuo mining area, the combination of numerical analysis, physical simulation and on-site measurement was used to study the development law of cracks in the overlying rock mass and the deformation and failure of surrounding rock and the influence of equipment on the ground. Through the research, a method for determining the safe roof thickness of the longwall working face mined-out area was established, based on the height of the overburden "two belts" and the influence depth of the equipment on the ground, and a surface hazard zoning method of mined-out area was also proposed, based on the gob plane projection boundary, the separation range boundary, the inner boundary of "masonry beam" structure area and the movement basin fracture boundary. Combined with the characteristics of various open-pit mining equipment and the difference of the requirements for safe operation environment, the corresponding hazard zones were determined.

Key words: open-pit coal mine; mined-out area; safe roof thickness; risk zoning

0 引言

近年来,伴随着煤炭资源整合与煤矿企业重组,

许多小型矿井逐渐被关停,取而代之的是对关闭煤矿剩余资源以及零星边角压滞资源重新规划后的大型露天煤矿^[1-2]。在这种形势下,地下开采转露天

收稿日期:2019-03-06;责任编辑:杨正凯

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51774184);中国煤炭科工集团有限公司创新创业资金专项资助项目(2018-TD-QN005)

作者简介:丁鑫品(1985—),男,山西朔州人,助理研究员,博士研究生。E-mail:ccridxp@163.com

开采、露天井工联合开采等技术得到了快速发展,不但减少了煤炭损失、而且提高了开采效率。然而,露天开采在发挥其明显优势的同时,逐步受到已有地下采空区的威胁,采空区隐蔽地质灾害已经成为许多露天矿面临的首要安全问题^[3-4]。目前国内受地下采空区影响比较严重的露天煤矿包括平朔东露天煤矿、安家岭露天煤矿和平庄元宝山露天煤矿等。根据成因的不同,露天煤矿境界内的采空区可分为巷柱式采空区和长壁工作面采空区两大类,巷柱式采空区主要由炮采等空场类开采方式形成,由于形成时间较早,大部分设计与开采资料不全或丢失,无法准确掌握采空区的位置或边界,而且跨度较小致使上覆岩体多数未完全塌落,对露天开采危害较大,许多学者对此进行了过专门研究,形成了比较丰富的实践成果^[5-10]。长壁工作面采空区由长壁炮采、普采或综采方式形成,由于跨度与开采强度均较大,上覆岩体正常情况下已经塌落,而且具有规则尺寸,平面分布范围比较容易确定,与巷柱式采空区相比,正常情况下危险性相对较小,但是,采空区上覆岩体达到充分下沉需经历较长时间,即使已经实现充分下沉,由于导水裂隙带高度范围内岩体破碎松散、离层裂隙发育,随着露天矿剥采水平的不断延深,在其上部作业的露天采矿设备仍然存在倾斜或倾覆的危险。结合露天矿实际生产特点,深入研究露天采矿条件下采空区上覆岩体变形破坏特征和应力移动规律,针对不同露天采矿设备,在竖直和水平方向上分别提出合理的采空区安全顶板厚度确定方法和地表危险性分区方法,实现对采空区危险性的三维动态控制,对于科学指导露天煤矿分阶段按步骤有计划地开展采空区勘查、评价及治理,建立开采次序合理、时空定位科学,生产安全高效的具有主动防灾、抗灾能力的露天煤矿井采采空区勘查与治理技术体系,不仅具有重要的科学价值,而且在提高煤炭产量,减少煤炭资源浪费以及环境保护与治理方面具有重要现实意义。

1 地质条件与采矿条件

平庄矿区某露天煤矿位于内蒙古自治区赤峰市以东 35 km 英金河河谷平原的下游,核定生产能力 8 Mt/a,主采煤层为 5 号煤和 6 号煤,采用连续与半连续相结合的综合开采工艺。工作帮地层自下而上主要为白垩系下统阜新组含煤地层、第三系上新统地层和第四系地层。白垩系阜新组含煤地层倾向平均为 8° ,厚度为 250~470 m,倾向东北,以泥岩、碳质泥岩、砂岩、煤为主,砂岩多为砂泥质胶结、遇水易

崩解,岩体坚硬程度为较软岩或软岩,完整程度为较破碎或破碎,岩体基本质量等级为Ⅳ级或Ⅴ级。第三系上新统地层不整合于白垩系地层之上,平均厚度为 42 m,主要岩性为紫红色砂岩、砾岩和砂砾层,第四系地层以冲积、洪积圆砾、河泥砾为主,平均厚度为 55 m。由于历史原因,在露天煤矿工作帮留下约 1.3 km^2 的 5 号煤长壁工作面地下采空区(图 1),煤层采出后厚度约为 3~6 m,目前采空区顶板到地表的距离为 160~215 m。典型工程地质断面如图 2 所示。随着剥采作业不断延深,采空区对上部作业设备和人员的安全威胁越来越大,轮斗挖掘机作为表土剥离的主要设备,该设备质量约为 2 475 t,高度约为 30 m,体积庞大、结构复杂,正常工作时的最大允许倾斜角度约为 3° ,若因采空区塌陷发生设备倾覆,极有可能导致设备报废或煤矿停产。

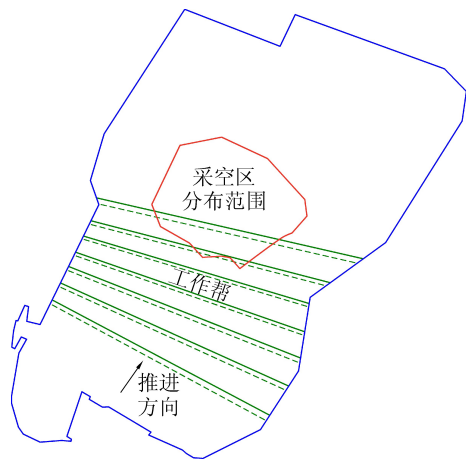


图 1 采空区分布平面示意

Fig.1 Diagram of goaf plane distribution

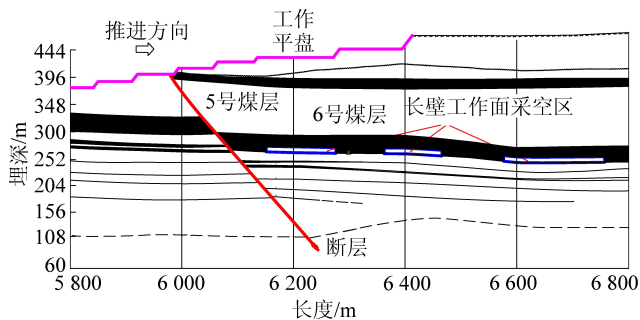


图 2 典型工程地质断面

Fig. 2 Typical engineering geological cross section

2 采空区安全顶板厚度确定的依据

煤层采出后,采空区周围岩体发生了较为复杂的移动和变形,移动稳定后的上覆岩层按其破坏的程度,从下至上大致分为 3 个不同的开采影响带,即

垮落带、裂隙带和弯曲下沉带^[11],如图 3 所示。

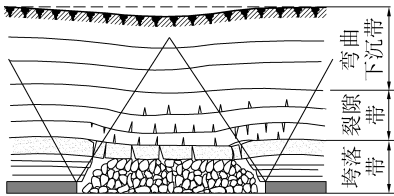


图 3 采空区上覆岩层移动分带

Fig.3 Overburden strata movement zoning in mined-out area

研究表明,垮落带和裂隙带之间没有明显界限,合称为“导水裂隙带”,垮落带范围内岩体破碎,冒落岩块块度大小不一,杂乱堆积,具有分带性、碎胀性和可压缩性等特点。裂隙带范围内岩体虽然整体上保持比较规则的层状结构,但作为破坏影响区内岩体,除了产生垂直或近于垂直层面的裂隙外,还存在大量顺着层面脱开的离层裂缝,同样具有明显的竖向可压缩性,当在导水裂隙带上部施加较大的竖向应力时,垮落带和裂隙带岩体压缩效应叠加,将产生不均匀下沉现象,这是导致露天采矿设备倾覆的根本原因。综上所述,在正常情况下,如果可以准确得到采空区上覆岩体导水裂隙带高度和露天采矿设备对地影响深度,在此基础上结合现场实际情况考虑一定的安全系数,保证露天采矿作业安全所需的采空区安全顶板厚度即可经计算获得。

3 采空区安全顶板厚度确定方法

3.1 采空区上覆岩体“两带”高度确定

3.1.1 理论计算

以平庄矿区某露天煤矿长壁工作面采空区为例,工作帮 5 号煤层采空区的形成方式主要为长壁炮采、普采和综合机械化放顶煤开采。其中长壁炮采和普采方式煤层采出厚度约为 6 m,综放开采方式煤层采出厚度约为 8 m。

关于厚煤层分层开采的垮落带和导水裂隙带高度计算公式在《建筑物、水体、铁路及主要井巷煤柱留设与压煤开采规范》(以下简称《“三下”采煤规范》)中已有明确规定^[12],关于综放开采的垮落带 H_m 和导水裂隙带高度 H_{li} 理论计算公式国内许多学者已进行了比较深入的研究^[13-14]与累计采高 $\sum M$ 有关。根据以上规定及成果,将已知参数分别代入不同开采方式条件下的垮落带和导水裂隙带高度计算公式,得到工作帮 5 号煤层采空区上覆岩体“两带”高度理论计算值分别见表 1 和表 2。

表 1 采空区上覆岩体垮落带高度理论计算结果

Table 1 Theoretical calculation results of caving zone height of overlying rock mass in goaf

开采方式	计算公式	计算结果/m
长壁炮采/普采	$H_m = \frac{100 \sum M}{6.2 \sum M + 32} \pm 1.5$	7.17 ~
		9.67
综放开采	$H_m = \frac{100 \sum M}{-0.93 \sum M + 38.86} \pm 12.87 (\sum M > 3.5)$	12.59 ~ 38.33

表 2 采空区上覆岩体导水裂隙带高度理论计算结果

Table 2 Theoretical calculation results of water flowing fractured zone height of overlying rock mass in goaf

开采方式	计算公式	计算结果/m
长壁炮采/普采	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{3.1 \sum M + 5.0} \pm 4.0$	21.42 ~ 29.42
	$H_{li} = 10 \sqrt{\sum M} + 5$	29.49
综放开采	$H_{li} = \frac{100 \sum M}{-0.39 \sum M + 13.46} \pm 15.96 (\sum M > 3.5)$	61.41 ~ 93.33

3.1.2 现场实测

为了获得相对准确的“两带”高度值,现场分别在长壁炮采、普采和综放开采工作面采空区地表各施工 2 个“两带”高度观测钻孔,采用钻孔电视成像技术与钻孔激光扫描技术对垮落带和导水裂隙带高度进行了实测,通过实测和分析,得到工作帮 5 号煤层采空区上覆岩体“两带”高度现场实测值见表 3。

表 3 采空区上覆岩体“两带”高度现场实测值

Table 3 Field measured height of “two zones” of overlying rock mass in goaf

开采方式	垮落带高度 实测结果/m	导水裂隙带高度 实测结果/m
长壁炮采/普采	12.3	32.5
综放开采	40.4	90.2

通过对“两带”高度现场实测值和理论计算值进行对比分析可知,实测结果均接近或略大于理论计算最大值,主要原因为为在露天矿采矿活动影响下,采空区上覆岩体破碎程度和裂隙发育程度进一步加剧所致。按照《“三下”采煤规范》规定,在有实测数据的情况下,“两带”高度应当依据实测数据分析确定,因此,在长壁炮采或普采条件下,工作帮 5 号煤层采空区上覆岩体垮落带高度为 12.3 m,导水裂隙带高度为 32.5 m;在综放开采条件下,工作帮 5 号煤层采空区上覆岩体垮落带高度为 40.4 m,导水裂隙带高度为 90.2 m。

3.2 露天采矿设备对地影响深度模拟分析

为了模拟分析露天煤矿轮斗挖掘机、电铲和钻机等大型设备对地作用力分布规律及位移分布特征,从而获得这些设备的对地影响深度,建立数值分析模型(图 4)。

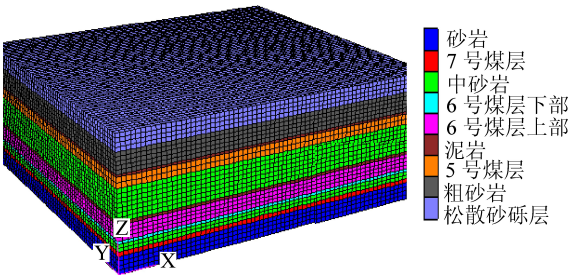


图 4 典型露采设备对地影响深度三维数值分析模型
Fig.4 Three-dimensional numerical analysis model for depth of earth impact of typical opencast mining equipment

模型长度为 700 m,宽度 630 m,垂直高度为 190 m,为了便于分析计算,模型上部松散砂砾层和粗砂岩地层的网格单元尺寸均设置为 4.5 m×4.5 m×4.5 m。各模型的前、后、左、右边界为截离边界,模型前、后边界以 Y 方向位移约束,模型左、右边界以 X 方向位移约束,模型的底部边界以 Z 方向位移约束,从而构成位移边界条件,以保持整个系统的受力平衡。岩体采用理想弹塑性本构模型 Mohr-Coulomb 屈服准则描述^[15-16]。

初始地应力场平衡后,将各个方向的位移和速度清零,然后根据设备实际触地轮廓边长将考虑冲击作用下的对地压力分别施加于模型地表中部区域,同时在设备正下方竖向每隔 1 m 设置一个位移监测点,在 30 m 深度范围内共设置 31 个监测点,用以监测设备对地作用深度。研究采用的岩体物理力学性质指标见表 4。

表 4 岩体物理力学性质指标

岩性	天然密度/ (g · cm ⁻³)	弹性模量/ MPa	泊松比	黏聚力/ KPa	内摩擦角/ (°)	抗压强度/ MPa	抗拉强度/ MPa
粗砂岩	2.13	1 200	0.41	1 410	31.75	18.34	0.97
中砂岩	2.30	1 350	0.53	1 980	29.75	16.80	1.32
细砂岩	2.23	2 210	0.60	1 510	27.49	15.10	1.54
粉砂岩	2.24	850	0.34	120	28.67	11.79	0.96
煤	1.33	600	0.22	60	22.55	5.46	0.11
泥岩	2.36	500	0.28	109	23.12	6.33	0.42
炭质泥岩	2.12	1405	0.23	87	25.35	13.51	0.40

以轮斗挖掘机为例对模拟结果进行分析,轮斗挖掘机对地影响深度模拟结果断面图如图 5 所示。

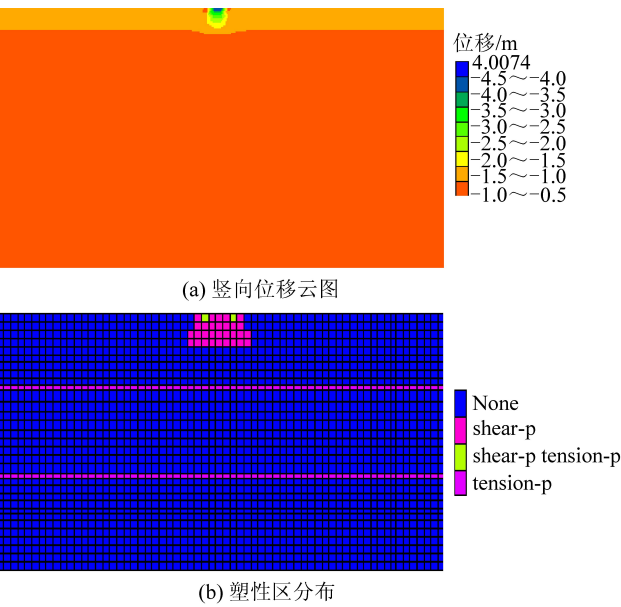


图 5 轮斗挖掘机对地影响深度模拟结果
Fig.5 Simulation results of the influence depth on the ground of bucket wheel excavator

从图中可知,考虑轮斗挖掘机冲击作用下的对地压力影响,地质体竖向位移最大值将达到 4.7 m,设备对地影响深度波及 4 个网格,约为 18 m。通过对不同深度位移监测点全过程位移变化曲线进行分析,获得各点竖向位移最大值,在此基础上绘制出考虑轮斗挖掘机冲击作用下三维地质体不同深度竖向位移变化曲线如图 6 所示,从深度 18 m 开始三维地质体竖向位移减小为零,据此可以判定轮斗挖掘机的对地影响深度为 18 m。

同理,可以得到不同露天采矿设备的对地影响深度见表 5。

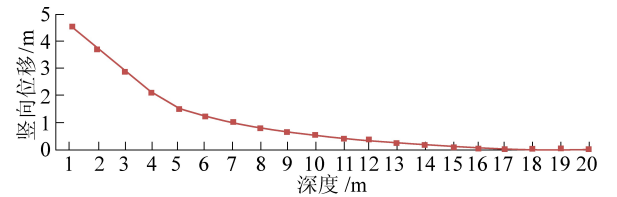


图 6 竖向位移随深度变化特征曲线
(考虑轮斗挖掘机冲击作用)
Fig.6 Vertical displacement variation curves at different depths
(Consider the impact of wheel bucket excavator)

表 5 不同采矿设备对地影响深度值
Table 5 The influence depth on the ground of different mining equipment

设备类型	考虑冲击作用下的 对地压力实际值/MPa	对地影响 深度/m
轮斗挖掘机	0.24	18
电铲(10 m ³)	0.53	27
钻机	0.24	18
91T 自卸汽车	0.24	18
3307W 矿用洒水车	0.15	16

3.3 采空区安全顶板厚度确定

对于轮斗挖掘机而言,确定采空区安全顶板厚度的主要目的是为了防止地表的不均匀沉降引起设备发生倾斜,研究认为,只需要保证轮斗挖掘机站立区域采空区上覆岩体厚度大于导水裂隙带高度与设备对地影响深度之和,发生倾斜的可能性即可降到最低,实际生产中为了确保设备安全,考虑安全系数 1.3。因此,轮斗挖掘机安全顶板厚度计算公式为

$$H=1.3(H_1+H_2) \tag{1}$$

其中: H 为轮斗挖掘机安全顶板厚度; H_1 为导水裂隙带高度; H_2 为设备对地影响深度。基于式 (1),轮斗挖掘机安全顶板厚度推荐值见表 6。

表 7 其他露天采矿设备安全顶板厚度推荐值

Table 7 Recommended safe roof thickness of other open pit mining equipment

开采方式	垮落带 高度/m	对地影响深度/m				安全顶板厚度/m			
		电铲 (10 m ³)	钻机	91T 自 卸汽车	3307W 矿 用洒水车	电铲 (10 m ³)	钻机	91T 自 卸汽车	3307W 矿 用洒水车
长壁炮采/普采	12.3	27	18	18	16	47.2	36.4	36.4	34.0
综放开采	26.4	27	18	18	16	64.1	53.3	53.3	50.9

4 采空区地表危险性分区方法

露天矿过采空区期间需充分重视采空区危险性随上覆岩体厚度变化的动态特性,在竖直方向上,随着剥采水平的延深,采空区上覆岩体厚度逐渐减小,露天采矿设备和人员承受的安全威胁逐渐增大,因此首先需要确定保证设备和人员安全作业所需的极限安全厚度。在水平方向上,由于三维地质体的各向异性和采空区上覆岩体塌落破坏的复杂性,地表不同位置的危险性存在明显差异,因此还需要根据地​​表沉陷规律对采空区上覆岩体进行危险性分区,从根本上实现对采空区危险性的三维动态控制。物理模拟结果表明(图 7),采空区上覆岩体不同区域对露天采矿设备和人员构成不同程度的安全威胁:

表 6 轮斗挖掘机安全顶板厚度推荐值
Table 6 Recommended safe roof thickness of bucket wheel excavator

开采方式	导水裂隙 带高度/m	对地影响 深度/m	安全顶板 厚度/m
长壁炮 采/普采	32.5	18	65.7
综放开采	65.2	18	108.2

与轮斗挖掘机不同,对于其他露天采矿设备而言,确定采空区安全顶板厚度的主要目的是为了防止设备的突然跌落或倾覆,研究认为,导致这类事故发生的根本原因为采空区垮落带内未充分塌落岩体在露天采矿活动的影响下发生突然塌落,因此只需要保证设备站立区域采空区上覆岩体厚度大于垮落带高度与设备对地影响深度之和,实际生产中为了确保设备安全,考虑安全系数 1.2。因此,其他露天采矿设备安全顶板厚度计算公式为

$$h=1.2(h_1+H_2) \tag{2}$$

其中: h 为其他露天采矿设备安全顶板厚度;为垮落带高度。基于以上公式,其他露天采矿设备安全顶板厚度推荐值见表 7。

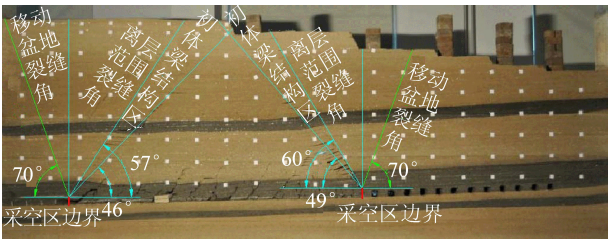


图 7 露天煤矿井采采空区上覆岩体破变形环特征
Fig.7 Deformation and failure characteristics of overlying rock mass about underground goaf in open-pit coal mine

1) 将采空区地表移动盆地最外侧裂缝圈定的地表边界称为移动盆地裂缝边界,该边界上任意一点至采空区边界的连线与水平线在矿柱一侧的夹角称为移动盆地裂缝角。进入移动盆地裂缝边界的露天采矿设备可能存在倾斜或倾覆的危险,也即裂缝

边界圈定的地表范围为威胁露天采矿设备和人员安全的重点范围。移动盆地裂缝角约为 70° 。

2) 将采空区上覆岩体离层裂缝圈定的地表边界称为离层范围边界,该边界上任意一点至采空区边界的连线与水平线在矿柱一侧的夹角称为离层范围裂缝角。进入离层范围边界的露天采矿设备发生倾斜或倾覆的可能性明显增大。离层范围裂缝角为 $57^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 。

3) 受断裂岩块的铰接作用影响,在采空区上覆岩体离层范围裂缝角内侧形成明显的“砌体梁”结构区,在空间上呈倒立的“V”字形,该区域岩体离层裂缝发育且地表倾斜达到最大,进入该区域的露天采矿设备发生倾斜或倾覆的可能性达到最大。采空区上覆岩体“砌体梁”结构区内侧与水平线的夹角约为 $46^{\circ} \sim 49^{\circ}$ 。

4) 从采空区边界向上绘制一系列直线,在地表形成一条闭合曲线,称为采空区平面投影边界。随着采空区顶板厚度的不断减小,平面投影边界内尚未完全塌落的空腔体存在整体切落的可能性,对露天采矿设备和人员的安全威胁明显大于边界范围之外。

综上所述,采空区边界竖向线、离层范围裂缝角和“砌体梁”结构区内侧范围角将移动盆地裂缝角范围内的采空区上覆岩体分割为四个区域,反映至地表,即为移动盆地裂缝边界、采空区平面投影边界、离层范围边界和“砌体梁”结构区内侧范围边界分别圈定的区域。根据其对地表露天采矿设备和作业人员安全的威胁程度大小,将这些区域分别命名为较安全区域、一般安全区域、一般危险区域和较危险区域。对于轮斗挖掘机等特大型设备,是否会因地表不均匀下沉而发生倾斜是安全防范工作的重点,因此较危险区域为离层范围边界和“砌体梁”结构区内侧范围边界圈定的地表区域;对于除轮斗挖掘机以外的其他设备,是否会发生整体倾覆或跌落是安全防范工作的重点,因此较危险区域为“砌体梁”结构区内侧范围边界圈定的地表区域。据此得到采空区上覆岩体危险性分区如图8所示。实际生产中可以根据不同类型设备分析其所处的危险区域,及时采取有针对性的安全技术措施。以上理论与方法在平朔和平庄矿区大型露天矿应用效果显著,值得国内外条件类似矿山借鉴推广。

5 结 论

1) 采用现场实测、物理模拟、数值分析和理论计算相结合的方法,揭示了多因素耦合作用下露天矿采空区围岩裂隙发育规律,探明了露天开采条件

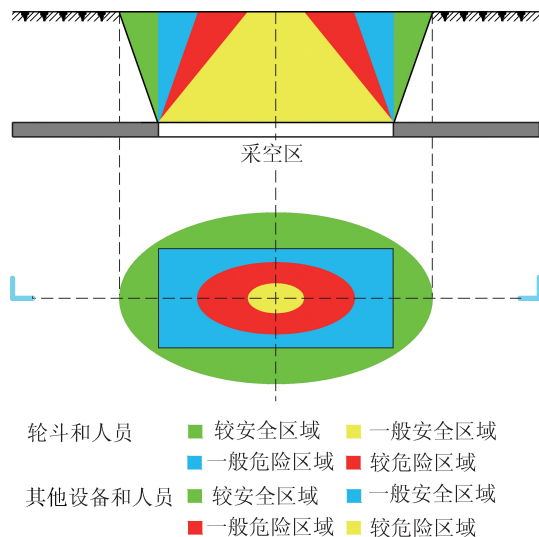


图8 露天煤矿井采空区上覆岩体危险性分区

Fig.8 Risk zoning of overlying rock mass

about underground goaf in open-pit coal mine

下采空区上覆岩体“两带”发育高度。

2) 针对不同露天采矿设备,在纵向维度上提出了采空区安全顶板厚度计算方法,在横向维度上建立了采空区地表危险性分区方法,为露天矿井采空区危险性三维动态控制与最佳治理时间确定提供了理论依据。

3) 相似材料模拟试验结果表明,在露天采矿作业条件下,采空区平面投影边界、离层范围边界和“砌体梁”结构区内侧范围边界将移动盆地裂缝边界范围内的采空区上覆岩体分割为4个区域。

4) 根据露天采矿设备和人员受其威胁程度大小将这些区域分别命名为较安全区域、一般安全区域、一般危险区域和较危险区域,考虑轮斗挖掘机与其他作业设备自身的特点及其对作业环境安全需求的差异性,分别给出了各自危险性分区。

参考文献 (References):

- [1] 李夕兵,李地元,赵国彦,等.金属矿地下采空区探测、处理与安全评判[J].采矿与安全工程学报,2006,23(1):24-29.
LI Xibing, LI Di Yuan, ZHAO Guoyan. Detecting, disposal and safety evaluation of the underground goaf in metal mines[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2006, 23(1): 24-29.
- [2] 丁鑫品,王振伟,李伟,等.露天煤矿境界内地下采空区稳定性影响因素研究[J].露天采矿技术,2016(9):14-17.
DING Xinpin, WANG Jun, WANG Zhenwei, et al. Research on stability influence factors of underground goaf in open-pit coal mine[J]. Opencast Mining Technology, 2016(9): 14-17.
- [3] 丁鑫品,王 俊,周 游,等.激光扫描系统在探测露天煤矿下采空区中的应用[J].煤炭科学技术,2015,43(10):46-50.
DING Xinpin, WANG Jun, WANG Zhenwei, et al. Application of

- cavity-autoscanning laser system in surface mine gob detection [J]. Coal Science and Technology, 2015, 43(10): 46-50.
- [4] 李地元, 李夕兵, 赵国彦. 露天开采地下采空区顶板安全厚度的确定[J]. 露天采矿技术, 2005(5): 17-20.
- LI Diyu, LI Xibing, ZHAO Guoyan. Roof security thickness determination of underground goaf under open-pit mine [J]. Open-cast Mining Technology, 2005(5): 17-20.
- [5] 贺广零, 黎都春, 翟志文, 等. 采空区煤柱—顶板系统失稳的力学分析[J]. 煤炭学报, 2007, 32(9): 897-901.
- HE Guangling, LI Duchun, ZHAI Zhiwen, et al. Analysis of instability of coal pillar and stiff roof system [J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(9): 897-901.
- [6] 范军富, 代光, 程伟. 女家岭露天煤矿采空区上覆岩层安全厚度研究[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2015, 34(10): 1116-1119.
- FAN Junfu, DAI Guang, CHENG Wei. Research on safety thickness of overlying rock in the goaf of Anjialing Open-pit Mine [J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2015, 34(10): 1116-1119.
- [7] 王树仁, 贾会会, 武崇福. 动荷载作用下采空区顶板安全厚度确定方法及其工程应用[J]. 煤炭学报, 2010, 35(8): 1263-1268.
- WANG Shuren, JIA Huihui, WU Chongfu. Determination method of roof safety thickness in the mined-out regions under dynamic loading and its application [J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1263-1268.
- [8] 赵延林, 吴启红, 王卫军, 等. 基于突变理论的采空区重叠顶板稳定性强度折减法及应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2010, 29(7): 1424-1434.
- ZHAO Yanlin, WU Qihong, WANG Weijun, et al. Strength reduction method to study stability of goaf overlapping roof based on catastrophe theory [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(7): 1424-1434.
- [9] 丁鑫品, 李伟, 刘博文, 等. 露天矿地下采空区危险性评价方法与实践[J]. 煤矿安全, 2015, 45(2): 217-220.
- DING Xinpin, LI Wei, LIU Bowen, et al. Risk assessment method and practice for underground gob area in open-pit mine [J]. Safety in Coal Mines, 2015, 45(2): 217-220.
- [10] 林杭, 曹平, 李江腾, 等. 采空区临界安全顶板预测的厚度折减法[J]. 煤炭学报, 2009, 34(1): 53-57.
- LI Hang, CAO ping, LI Jiangteng, et al. The thickness reduction method critical safety roof thickness of gob area [J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(1): 53-57.
- [11] 邹友峰, 邓喀中, 马伟民. 矿山开采沉陷工程[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003.
- [12] 国家安全监管总局等. 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, 2000.
- [13] 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): 4-8.
- XU Yanchun, LI Juncheng, LIU Shiqi, et al. Calculation formula of “Two-zone” height of overlying strata and its adaptability analysis [J]. Coal Mine Technology, 2011, 16(2): 4-8.
- [14] 丁鑫品, 郭继圣, 李绍臣, 等. 综放开采条件下上覆岩层“两带”发育高度预计经验公式的确定[J]. 煤炭工程, 2012, (11): 76-78.
- DING Xinpin, GUO Jisheng, LI Shaochen, et al. Research on “two-zone” height expected formula of sublevel full-mechanized sublevel caving mining [J]. Coal Engineering, 2012, (11): 76-78.
- [15] 张敏思, 朱万成, 侯召松, 等. 空区顶板安全厚度和临界跨度确定的数值模拟[J]. 采矿与安全工程学报, 2012, 29(4): 543-548.
- ZHANG Minsi, ZHU Wancheng, HOU Zhaosong, et al. Numerical simulation for determining the safe roof thickness and critical goaf span [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2012, 29(4): 543-548.
- [16] 孙国权, 李娟, 胡杏保. 基于FLAC3D程序的采空区稳定风险分析[J]. 金属矿山, 2007, 36(2): 29-32.
- SUN Guoquan, LI Juan, HU Xingbao. FLAC3D based stability analysis of mined-out area [J]. Metal Mine, 2007, 36(2): 29-32.