

某矿大型采空区顶板冒落危害及处理^{*}

王洋喆, 郭忠林

(昆明理工大学 国土资源工程学院, 云南 昆明 650093)

摘 要:以云南某钨矿 2 280 m 中段采空区为工程背景, 研究采空区冒落所产生的危害影响并进行处理措施。首先通过对“上覆岩层三带理论”以及冒落“空气冲击波”的模型进行分析; 其次对采空区冒落所产生的冒裂带的高度、空气冲击波的速度进行计算。研究结果表明: 2 280 m 中段采空区的冒裂带不贯通地表, 但采空区的冒落产生的空气冲击波对井下的人员生命、生产设备、安全生产造成威胁; 最后通过比较四种基本采空区处理方法优劣, 最终选择封闭隔离法对采空区进行处理。

关键词:采空区; 顶板冒落; 空气冲击波; 封闭隔离法

中图分类号:TD853.391 **文献标识码:**B **文章编号:**1001-0076(2015)03-0010-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2015.03.003

The Detriment and Solution of Roof Caving in the Mined-out Area of a Large Mine

WANG Yangzhe, GUO Zhonglin

(Faculty of Land Resource Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, Yunnan, China)

Abstract: In this paper, a tungsten mine goaf 2 280 meters underground in Yunnan was taken as engineering background and a research on harmful impact of roof caving as well as treatment measures were carried out. The paper analyzed the theory of “overburden three zones” and the model of caving of air shock wave, and calculated the height of crack zone and the speed of air blast wave. The results showed that the goaf had no effect on the surface, but air shock wave threatened life of underground personnel and safety of production equipment and production process. Finally, a closed isolation method was chose to deal with mined-out area by comparing the four basic goaf treatment methods.

Key words: goaf; roof falling; air shock wave; closed isolation method

1 引言

采空区的形成过程主要是: 地下矿山在使用空场法等类似的采矿法回采矿房时, 采场以敞空的形式存在, 仅依靠矿柱和围岩的强度来支撑空区^[1]。一般情况下, 矿房采完后要及时进行矿柱回收和采

空区的处理, 除非矿石品位低、价值不高等条件下, 利用矿柱支撑, 永久保留采空区。若对采空区不进行及时处理, 随着采空区暴露时间或面积的增加、围岩应力的变化、爆破的扰动等因素, 采空区坍塌生成的空气冲击波会造成人员伤害、矿山生产设备损坏、山体滑坡地质灾害等。例如: 1960 年南非的

^{*} 收稿日期: 2015-04-16

作者简介: 王洋喆(1988-), 男, 河南济源人, 在读硕士研究生, 研究方向为采矿理论及应用。

通讯作者: 郭忠林(1963-), 男, 四川广元人, 教授, 研究方向为采矿理论及应用。

Coalbrock North 煤矿发生顶板大规模冒落,造成 432 人遇难的特大安全事故^[2]。可见,采空区已经成为影响矿山安全的重大隐患,是目前影响矿山安全管理的重要因素。因此,对采空区的稳定性以及处理方法研究,成为矿山企业和专家学者研究的重要课题之一。例如:赵文^[3]对地下巨型采空区顶板岩石的冒落与破坏进行研究,采取措施进行空区处理。

由于采空区暴露面积大,暴露时间较长,受到地应力、采高、岩体的物理力学性质、地下水、爆破的扰动等因素影响,可能发生顶板冒落,一旦出现大范围冒落,将产生以下两方面的危害。

(1) 地表发生较大范围的塌陷

冒落带与裂隙带属于破坏性影响区,一般是上覆岩层离采空区距离越大,破坏程度越小^[2]。当采空区顶板距离地表埋深较小时,裂隙带会贯通地表,这时地表就会出现塌陷从而诱导山体滑坡等地质灾害。

(2) 空气冲击波产生的危害

采场顶板发生大的冒落,会衍生冒落空气冲击波。急倾斜的采空区顶板容易发生大范围顶板岩块冒落,由于采空区顶板冒落在短时间内发生大范围的冒落,导致采空区内的空气被压缩产生强烈的冲击波,若没有对采空区进行封闭隔离等措施,空气冲击波以极快的速度涌出巷道,对井下生产设备、人员生命财产、巷道造成严重的危害影响。

本文主要根据上覆岩层“三带理论”及采空区冒落“空气冲击波”的理论进行研究,以云南怒江某钨矿采空区为工程背景,分析 2 280 m 中段采空区对地表以及井下生产设施、人员财产的影响进行分析研究,并提出对采空区处理措施的建议。

2 采空区对地表的影响分析

2.1 矿山概况

云南怒江某钨矿矿体采用平硐—盲斜井联合开拓,主平硐布置在 2 160 m 标高,采用下行式开采,采矿方法以全面采矿法为主,目前开采至 2 110 m 中段。矿体分为四个中段即:2 110 m、2 160 m、2 230 m、2 280 m。矿床成因为岩浆活动后期高温热液充填型矿床,矿石类型为石英型钨锡矿体。矿体平面形似弯月形,总体走向 NE 60°左右,倾角北西,倾角 45°~60°,走向长 220~250 m,沿走向两端

逐渐尖灭分叉,沿倾斜方向则比较稳定。

2.2 采空区现状

由于矿体每个中段存在大量的采空区,本文以 2 280 m 中段采空区为例进行调查分析。通过采空区现场勘查,以及 2 280 m 中段地质平面图(见图 1)可知,2 280 m 中段采场沿走向布置,矿体倾角 39°~66°,走向长 220~250 m,采空区主要分布在 0 至 3 号勘探线,采空区大小不等、形状不规则、暴露面积大。采空区的高度大约 8~15 m 之间,已形成长 100~150 m、宽 30~50 m 不等的大型采空区。1 号勘探线采空区已经发生塌陷,垮塌高度已超过 2 300 m 标高。造成坍塌的主要原因:由于历史原因民采私挖滥采情况严重,矿房采完后未进行处理,也未对矿柱及矿房参数进行合理的优化设计。

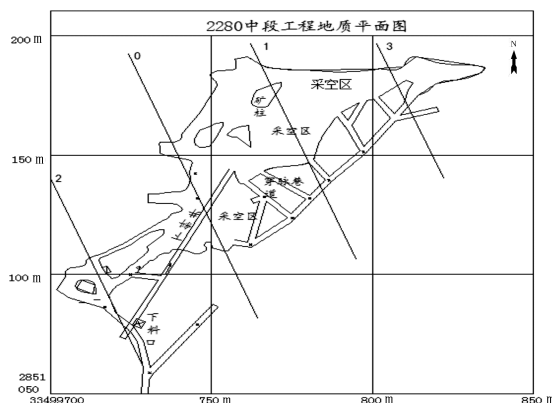


图1 2 280 m 中段工程地质平面图

2.3 上覆岩层“三带理论”及划分

当地下矿体被开采后就形成采空区,采空区顶板由于受到围岩应力与自重共同作用,顶板若满足失稳的力学条件,顶板将发生垮落。周围的岩块体继续冒落,采空区顶板上覆岩层逐渐向上发展,岩层的移动范围逐渐扩大。当采空区垮落冒落岩体充填采空区,采空区空间缩小。上覆岩层由于受拉破坏后,便产生离层、断裂而不产生移动。岩层的位移、断裂、冒落首先是采空区顶板,然后发展到上覆岩层的冒落、断裂、离层与弯曲^[4]。

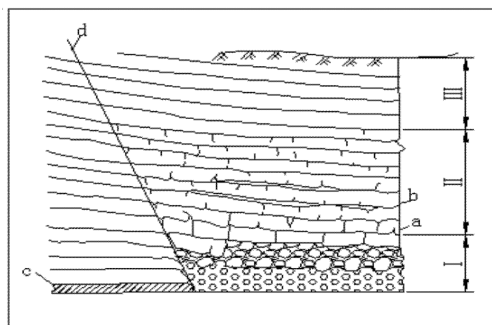
根据采场在地下埋深的不同,如果埋深不是很大,根据损坏变形破坏程度将岩体变形破坏自下而上分为冒落带、裂隙带、弯曲带,见图 2 所示。

(1) 冒落带:由于采空区顶板受到自重力,空区

顶板上覆岩层将发生法向弯曲,当上覆岩层的拉应力大于围岩自身的抗拉强度极限时,导致采场顶板产生断裂、破碎成大小不一形状不规则的岩块冒落下来,堆积在采空区内其断面形状呈拱形的冒落带。冒落带的高度一般不超过开采高度的4~6倍。

(2)裂隙带:采空区上覆岩层由初始弯曲变形,进而发生离层及裂隙,裂隙一般与弯曲层面成垂直或沿层面发展。这些裂隙组成一系列沿层面或者垂直方向的透水通道。裂隙带的高度一般为开采高度的20~30倍。

(3)弯曲带:位于裂隙带之上,在弯曲带范围内岩层受到自重力的作用便产生层面法向弯曲,由于水平方向处于双向受压缩状态,所以压实程度较好,而且保持整体性和层状结构。此带范围内岩层的移动过程有规律且连续,整体性和层状结构保持的完整,不存在离层、裂缝,在竖直方向各部分的移动值相差很小。



I—冒裂带 II—裂隙带 III—弯曲带
a—竖向裂隙 b—离层裂隙 c—矿体 d—移动范围线

图2 上覆岩层“三带理论”移动分带示意图

2.4 采空区冒裂带的计算

冒裂带:冒落带和裂缝带之和,冒落带与裂隙带之间没有明显的分界线,两带都属于破坏影响区域,当采空区顶板岩层距离地表埋深较小时,裂隙带就会贯通地表导致地表出现塌陷。

影响采空区的冒裂带高度的因素主要有:围岩的物理力学性质、采空区的高度、地应力、地下水以及矿体倾角等。地下矿石采出并形成采空区后,由于受到应力的重新分布,超过采空区稳定性的极限时,顶板在短时间内发生大范围冒落并充满空区使采空区处于稳定状态。随着时间的推移,空区内冒落的破碎岩块受到重力作用逐渐下沉压实,采空区空间逐渐变大,若达到失稳条件继续冒落直至冒落

岩块不再压实冒落、断裂岩体^[5]。岩石破碎后,在自重应力或外加载荷作用下逐渐压实使体积减少的性质,这种压实后的体积与破碎前原始体积之比,称为残余碎胀系数。坚硬岩石碎胀体积大,残余碎胀系数大;软弱、松散岩石碎胀体积小,残余碎胀系数小。

压实后的残余碎胀系数,软岩一般为1.02;中硬岩石为1.03~1.05;坚硬硬岩为1.05~1.1,页岩和砂岩硬度较大,为1.1~1.15。岩石越坚硬,碎胀系数也就越大。

云南怒江某钨矿矿体的采空区及上覆岩层所在地层主要为寒武系砂板岩、石炭系灰岩、玄武岩与石灰岩。矿层顶板为较硬层状结构砂板岩,产状较陡,节理裂隙发育,稳定性较差。在矿层顶底板赋存构造裂隙水,为矿床开采的主要充水来源,对矿床开采有一定影响,含矿层主要为辉长岩脉和石英脉,节理裂隙不发育,岩体完整稳定。

综合考虑,云南怒江某钨矿矿体的采空区围岩残余碎胀系数 k 取值为1.06,由于采空区围岩比较坚硬,故选用冒裂带的计算公式:

$$H = \frac{m}{(k-1)\cos\alpha} \quad (1)$$

式中: H —顶板岩层冒裂带高度, m ; m —采空区高度, m ; k —残余碎胀系数; α —矿体倾角(采空区倾角)

此公式主要考虑了矿体倾角对采空区冒落带高度的影响、冒落岩石压实后的残余松散系数,所以计算值为顶板岩层冒落高度与裂隙带高度之和,未单独计算冒落带高度和裂隙带高度。

表1 2 280 m中段采空区高度以及冒裂带高度表

剖面	1#剖面	2#剖面	3#剖面
采空区高度/ m	13.8	8.68	11.72
倾角/ $^{\circ}$	53	66	39
冒裂带高度/ m	382	355.6	251.3
地表到空区顶板的埋深/ m	410	450	350
冒裂带/采空区高度	27.6	29.4	21.4

经过现场勘查测得的采空区高度及矿体倾角,通过“三带理论”运用,计算得出采空区的冒裂带高度见表1、图3,从表1、图3可知:(1)2 280 m中段1#、2#、3#剖面上的采空区冒落带的高度均小于地表到空区顶板的埋深,即采空区对地表不会产生破坏影响。(2)冒裂带与采空区高度的比值为21.4~

29.4,参考其他资料阐述的冒裂带高度为采空区高度的24~35倍之间,可以说明计算数据能够满足对于预测冒裂带高度的要求,从而证明应用该理论的准确性。

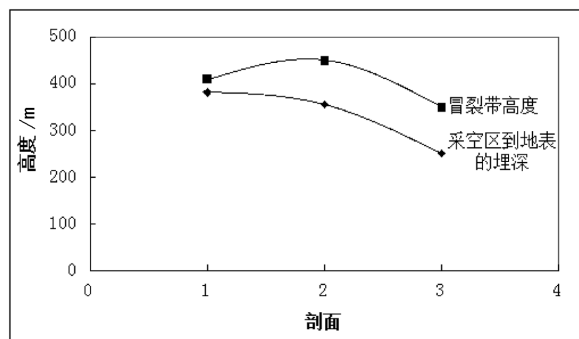


图3 2280 m中段采空区冒裂带、地表到空区的埋深曲线图

3 采空区的冒落空气冲击波对井下的影响分析

3.1 冒落空气冲击波概念

冒落冲击气浪是指采空区顶板在冒落过程中使采区内空气受到压缩,气体气压升高密度上升而产生的高速气流。由于采空区的暴露面积大,发生失稳产生顶板大范围冒落使采区内空气压力越来越高,而巷道的断面积相对于采空区的面积来说很小,顶板冒落产生的压缩空气从巷道涌出,巷道断面积越小喷出速度越来越快^[6],这种冒落空气冲击波会以极快的速度涌出巷道损毁矿山生产设备、造成人员伤亡,从而影响矿山的安全生产。例如2014年10月新疆沙沟煤矿,采空区冒落造成16人遇难,11人重伤,其中冲击波造成死亡6人,8人重伤,矿山生产设备不同程度损坏,可见冒落产生的空气冲击波危害之大,因此应做好预防措施。

3.2 空气冲击波的形成模型

根据空气冲击波的大小与有无外界气体的补给有关,将冒落空气冲击波形成的过程简化为两种数学模型:一种是冒落空区没有外部气体补给(采空区未垮落到地表),另一种是冒落空区有外部气体补给(采空区垮落到地表),见图4所示。

(1)“绕流”模型:当采空区顶板向下发生冒落的过程中,岩块下的压缩气体一部分绕岩块流动,到岩体的上方;一部分气体流向空区四壁,形成环流;

还有一部分气体,通过巷道流出。由于采空区与巷道断面积相差太大,采空区内空气压力越高,而从巷道中喷出的速度越大形成空气冲击波威力也就越大^[6]。

(2)“打气筒”模型:采空区冒落贯通到地表,顶板发生整体垮塌,空区的边壁相当于“气筒”,冒落的岩块相当于“气筒活塞”向下运动,岩块下部的流体由巷道急剧排出,形成强大的空气冲击波。

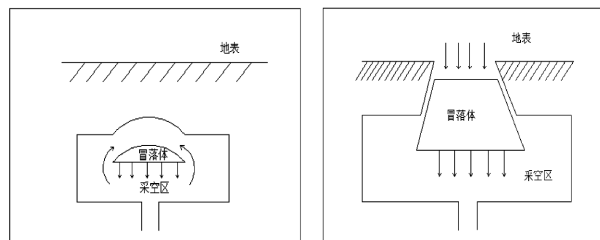


图4 空气冲击波的“绕流”模型与“打气筒”模型

3.3 空气冲击波的计算

依据以上分析可知,云南怒江某钨矿2280 m中段采空区的冒裂带不会贯通至地表,采空区的顶板冒落可看做为没有外界气体补给的“绕流”模型。首先我们建立“绕流”冲击过程中的流速方程,来研究“绕流”模型中冲击波的速度。

通过对岩块冒落过程与空气的能量进行分析,空气在流动中需要克服本身惯性力、摩擦阻力及巷道中的局部阻力等,根据能量守恒原理,气流速度由零增大到最大值的运动中所消耗能量之和应等于岩块下落对空气所作之总功^[7]。由此可建立如下关系式:

$$\int_0^t L \rho \frac{dv}{dt} v dt + \int_0^t \lambda \frac{L}{4R} \frac{v^2}{2} \rho S v dt + \int_0^t \sum \xi \frac{v^2}{2} \rho S v = \frac{1}{2} \frac{C_g \rho S A H^2}{S - A} \quad (2)$$

式中: L —空气流动系统通道换算成断面为 s 的等效长度, m ;

T —空气流动速度由零到最大值的时间, s ;

S —采空区暴露面积, m^2 ; ρ —空气密度, kg/m^3 ;

V —空气的流动速度, m/s ; R —通道的水力半径, m ;

$\sum \xi$ —局部阻力系数之和; C —阻力系数,取4.5;

A —冒落岩块水平投影面积, m^2 ; H —采空区

高度, m。

在上式的基础上若不考虑空气运动阻力与局部阻力的影响因素, 当岩块体以速度 v 下落, 岩块下的空气被快速挤出, 为了方便计算我们将岩块的几何形状简化成椭圆形, 按照质量守恒原理可推导出下列公式:

$$u = \frac{A}{lh} v_{\max} \quad (3)$$

$$A = \pi ab \quad (4)$$

$$l = \pi[1.5(a+b) - \sqrt{ab}] \quad (5)$$

$$v_{\max} = \sqrt{2gH} \quad (6)$$

$$u = \frac{\eta ab \sqrt{2gH}}{h[1.5(a+b) - \sqrt{ab}]} \quad (7)$$

式中: a —椭圆长轴, m; A —椭圆形岩块面积, m^2 ; b —椭圆短轴, m; l —椭圆形岩块周长, m; η —折减系数。

根据云南怒江某钨矿 2 80 中段 1#采空区的现场勘查: 采空区暴露面积 $S = 333.5^2$, 由于 1#采空区高度最高, 取 1#采空区的高度 $H = 13.8$, $a_1 = 3.4$, $b_1 = 2.2$, $a_2 = 45$, $b_2 = 35$, $C = 4.5$, $g = 9.8$ 代入公式 (7) 进行计算,

$$u_1 = \frac{\eta ab \sqrt{2gH}}{h[1.5(a+b) - \sqrt{ab}]} = \frac{0.8 \times 3.4 \times 2.2 \times \sqrt{2 \times 9.8 \times 13.8}}{1.5[1.5(3.4 + 2.2) - \sqrt{3.4 \times 2.2}]} = 11.57 \text{ m/s}$$

$$u_2 = \frac{\eta ab \sqrt{2gH}}{h[1.5(a+b) - \sqrt{ab}]} = \frac{0.8 \times 45 \times 35 \times \sqrt{2 \times 9.8 \times 13.8}}{1.5[1.5(45 + 35) - \sqrt{45 \times 35}]} = 171.99 \text{ m/s}$$

由于安全规程规定, 人体可以抵抗的风速不超过 $12 \sim 15 \text{ m/s}^{[8]}$ 。根据上面空气冲击波速度的计算结果可知: 零星冒落的岩块产生的冲击波对人体造不成伤害; 而大量的岩块冒落产生的冲击波会对人员生命、矿山井下生产设备、安全生产造成威胁。因此, 非常有必要采取措施对采空区进行处理, 从而保证矿山安全生产。

4 采空区的处理

4.1 采空区处理方法的选择

根据国内外采空区处理的方法, 大致概括为“崩”、“充”、“支”、“封”四种基本处理方法和由这四种基本方法演变的“联合法”处理采空区。

由于使用崩落法处理采空区主要适用于: (1) 地表允许崩落; (2) 围岩不稳固或节理裂隙发育的中等坚硬岩石; (3) 低品位价值不高; (4) 大面积连续的采空区的处理。而本矿山地表不允许崩落而且围岩稳固, 钨锡矿石价格也比较高, 因此排除崩落法处理采空区。

充填法处理采空区主要是利用充填体(废石、尾砂、水砂、胶结等)控制围岩石和地表下沉防止采空区塌陷, 主要适用于上部矿体或地表需要保护; 贵重稀有高品位价值高的矿山形成的采空区^[9]。虽然本矿山地表不允许陷落、矿石价值比较高, 但由于采用充填成本太大而且需要提前建立矿山充填系统, 因此不采用充填法处理采空区。

支撑法处理采空区主要利用矿柱或构筑人工矿柱支撑顶板从而使采空区达到稳定状态。这种处理采空区的方法最大优点是投资少, 但实践证明只能暂时维持采空区的稳定, 随着时间的推移采空区最终还会发生失稳情况, 而且本矿山暴露面积较大, 若采用此方法投资成本也比较大, 因此不采用支撑法处理采空区。

封闭隔离墙的作用原理: 当采空区顶板发生大范围冒落时产生空气冲击波, 冲击波以球面波的形式迅速向外传播, 到达障碍物(封闭隔离墙)时, 空气冲击波波阵面处的气流质点即被障碍物阻止, 然后下一层的运动质点亦被阻止, 停止向入射波传播方向的运动, 这时便在封闭隔离墙附近出现高压静止区^[10]。当冲击波与障碍物相遇发生反射, 质点从障碍物返回发生膨胀并产生反射波, 而未和障碍物相遇的冲击波继续沿壁顶部向前传播^[11]。一方面使反射波后面的压强急剧下降, 另一方面封闭隔离墙与入射冲击波一起作用, 使冲击波变成环流向采空区。因此封闭隔离墙对保护井下人员生命、矿山生产设备以及安全生产起到了重要的防护作用。封闭隔离法处理空区主要通过设置封闭隔离墙使采空区与巷道隔绝, 避免采空区发生顶板冒落产生冲击波造成的安全事故, 是一种经济简便的采空区处理方法。上面已经根据“三带理论”计算得出采空区的冒裂带不会贯通至地表, 因此综合考虑, 采用封闭隔离法处理采空区。

4.2 封闭隔离墙的设计

根据现场调查发现矿山采用平硐开拓, 在主平

硐出口附近选厂里大量的废石以及尾砂,因此利用矿车运输部分废石+尾砂到空区附近进行封闭隔离墙的构筑。在构筑封闭隔离墙时,首先利用砖砌筑两个长0.5~1.0 m左右的墙壁,然后在两个墙壁之间进行废石+尾砂充填,主要起缓冲的作用^[12]。通过查阅资料可知,一般封闭隔离墙的长度约7~10 m,其次在原有巷道的两帮及顶底板基础上分别向围岩内嵌入0.5 m,从而产生更大的阻力,如图5所示。

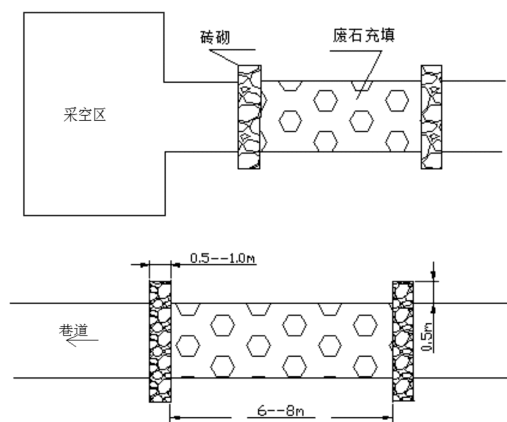


图5 封闭隔离墙的设计

5 结论

(1) 本文通过阐述“上覆岩层三带理论”并利用冒裂带的公式通过计算得出,2 280 m中段1#、2#、3#剖面上的采空区冒落带的高度均小于地表到空区顶板的埋深,即采空区对地表不会产生破坏影响。

(2) 通过对两种空气冲击波模型的分析得出,2 280 m中段剖面上的采空区符合“绕流”模型。根据空气冲击波的计算公式得出:零星冒落的岩块产生的冲击波对人体造不成伤害;而大范围的持续冒落产生冲击波的速度为171.99 m/s,大于人体可以抵抗的风速12~15 m/s,对井下人员生命、生产设备、安全生产造成严重威胁。

(3) 分析“崩”、“充”、“支”、“封”四种基本采空区处理方法的特征,选择隔离封闭法为某钨矿2 280 m中段采空区的处理方法。根据封闭隔离墙的作用原理,设计了废石+尾砂构筑封闭隔离墙。

(4) 由于空气冲击波的计算公式、取值的不确定性对于结果的影响较大,因此在未来还需要对空气冲击波进行更深入的研究。

参考文献:

- [1] 解世俊. 金属矿床地下开采[M]. 北京:冶金工业出版社,2006.
- [2] 盛佳. 崇礼紫金采空区处理及矿柱回采技术研究[D]. 长沙:中南大学,2009.
- [3] 赵文. 地下巨型采空区顶板岩石的破坏与冒落[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2001,20(4):507-509.
- [4] 何国清,杨伦. 矿山开采沉陷学[M]. 北京:中国矿业大学出版社,1991.
- [5] 赵世成,郭忠林. 三带理论在地下开采中对露天矿边坡稳定性的影响[J]. 矿业工程,2010,8(2):20-22.
- [6] 刘畅,覃敏,彭云. 大面积顶板失稳诱发空气冲击波灾害时程特性研究[J]. 中国安全生产科学技术,2014,10(5):49-55.
- [7] 陈庆凯,任凤玉,李清望. 采空区顶板冒落防治措施的研究[J]. 金属矿山,2002,316(10):7-9.
- [8] 季惠龙,侯克鹏,张成良,等. 大型采空区顶板冒落危害预测[J]. 采矿技术,2010,10(2):50-52.
- [9] 石求志. 钨矿床薄矿脉群开采空区及处理研究[J]. 采矿技术,2010,25(3):1-4.
- [10] 朱立新. 挡波墙对空气冲击波的削弱作用研究[J]. 爆破,2003,20(1):78-82.
- [11] 薛冰,魏忠义,宋立勋. 基于格子 Boltzmann 的采空区顶板冒落仿真模型[J]. 纺织高校基础科学学报,2014,27(3):392-397.
- [12] 李大勇,张开智,俞海玲,等. 矿震冲击气浪与防冲密闭研究[J]. 山东科技大学学报(自然科学版),2008,27(2):14-18.