

综合技术

采空区顶板冒落形成冲击气浪的研究

Research on the Shock Wave Caused by Goaf Roof Caving

项宇¹, 邹雄刚² (1. 安徽金日晟矿业有限公司, 安徽六安 237000; 2. 赣南科技学院, 江西赣州 341000)

摘要:因采空区顶板冒落产生冲击气浪,以某矿为例,研究顶板冒落的两种方式,即“打气筒”型和“绕流”模型。通过对空区顶板冒落方式的分析,顶板冒顶方式为“绕流”模型,以理论计算方式,算出顶板块体冒落和整体冒落产生的最大气流速度分别为0.47 m/s,37.77 m/s。采场零星冒落条件下距离块石边缘处4 m,气流不会对人体产生危害。以此分析,可以对空区顶板冒落问题进行指导。

关键词:顶板冒顶; 模型; 理论计算; 最小安全距离

中图分类号: TD853 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-609X(2022)05-0059-04

Abstract: As shock wave is formed due to the roof caving in goaf, a research was carried out based on a mine to analyze the two types of roof caving, namely, “inflator” and “surrounding flow”. By analysis, the goaf roof caving was determined to be “surrounding flow” type, the maximum airspeeds caused by block caving and overall roof caving were calculated to be 0.47 m/s and 37.77 m/s respectively in theory. It was found that the airflow 4m from the edge of collapsed blocks did no harm to human body. The above analysis has provided guidance for addressing goaf roof caving.

Key words: roof caving; model; theoretical calculation; minimum safety distance

1 前言

矿山采用无底柱分段崩落法回采时,空区顶板未完全崩落,形成采空区,随着空区暴露时间延长、下部回采扰动,空区顶板自身应力降低,会发生大面积冒落,形成较大气流,影响人身及财产安全。为防止顶板冒落产生强气流,在空区底部留设一定厚度的缓冲层,减少气浪对封闭墙冲击的危害。目前国内研究如董川龙^[1]研究的缓冲垫层对冲击气体的减弱。黄平路^[2]研究的空区内厚覆盖层下地表塌陷的影响。吴爱祥^[3]对顶板大面积冒落形成气体冲击波采用 Lagrange 法及激波管法研究。曹建立^[4]对空区垫层厚度的研究。陈赞成^[5]研究大型空区顶板垮落冲击波进行研究。李永斌^[6]空区顶板冒落气体冲击危害的分析。王文健^[7]分析空区大冒落空气中冲击波的危害。苗胜军对高断面煤层放顶气体流动进行了研究。

查阅相关资料,空区内部覆盖层对气流冲击波研究较少,较多是研究空区稳定性的文章。本文研究空区内岩石覆盖层对空区顶板冒落产生气浪的影响,因矿山前期采用无底柱分段

崩落法采矿,在回采矿石时空区未完全处理,形成空区。顶板始终存在安全隐患,所以对采场顶板进行研究,减少因冒落产生气流对井下人员及设备进行的伤害,在处理采空区时,因空区顶板岩石坚硬,对采空区顶板进行诱导冒落,在空区下部形成缓冲垫层,防止空区大面积冒落形成气浪对人身及设备造成损害。

2 模型建立

将空区顶板冒落的方式简化为两种模型,一是空区顶板大面积冒落时,空区内气流会沿着空区出矿巷道流出,像“打气筒”形式,另一种空区小冒落时,空区内气流会形成“绕流”模型。提出了顶板冒落的方式,对冒落方式进行假设,根据假设进行理论计算机分析,顶板的冒落方式有大面积垮塌及小范围冒落等形式。如图1所示,空区顶板大面积冒落时,顶板冒落压下部空区气体,空区内气体随着压力变大,冲破空区封闭墙,造成破坏。如图2所示,当空区顶板小面积冒落时,空区内部分气体,一部分气

[作者简介] 项宇(1990-),男,硕士研究生,从事矿山开采方面研究。

[引用格式] 项宇,邹雄刚.采空区顶板冒落形成冲击气浪的研究[J].中国矿山工程,2022,51(5):59-62.

体因扰流运动进入冒落的新空区内,另一部分气体从出矿口排出,因空区埋深较深,冒落状体符合第二种冒落模型,即“绕流”模型。

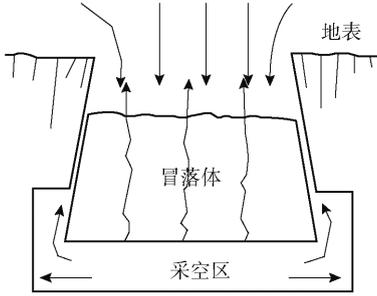


图1 空区顶板冒落“打气筒”模型



图2 空区顶板冒落“绕流”模型

3 “绕流”模型冲击气浪计算

1) 顶板在冒落过程中与气流的能量交换

空区顶板冒落过程中,其岩石表面与空气接触,形成摩擦力,岩石受到因空气造成的阻力的影响,空气阻力与采场内空气密度、冒落高度、冒落体的水平面积相关,根据以上参数计算出采场顶板冒落所受的力,并计算出岩石冒落对空气所做的功,阻力计算为

$$F = \frac{1}{2} C \rho v^2 \frac{A}{S-A} \quad (1)$$

式中: C ——阻力系数取值为4.5;

ρ ——空气密度;

v ——自由落体时冒落体速度, $v = \sqrt{2gh}$, h 为
空区顶底板高度差;

A ——冒落体水平投影面积;

S ——空区面积。

则岩石在冒落过程中对空气所做的总功为

$$W = \int_0^h \frac{1}{2} C \rho v^2 \frac{A}{S-A} S dh = \frac{1}{2} \frac{C g \rho S A}{S-A} h^2 \quad (2)$$

式中, W 为空气通过岩体下降获得的总能量。

2) 冲击气浪的运动规律

在顶板岩石下降的过程中,空区及周边范围内的气体有静止状态变化到气流最大值,采区内空气缓慢恢复到原来静止状态,气流在变化过程中,克服自身惯性力及空气通过出矿口时的局部应力和摩擦力。冒落体下落获得动能的气流,气流的加速度为 dv/dt 时,需要克服惯性取得的能量为

$$E_1 = \int_0^t L S \rho v \frac{dv}{dt} dt = \int_0^{v_{\max}} L S \rho v dv \quad (3)$$

式中: t ——空气从静止状态增加到最大值时的时间;

L ——假设空气在断面为 S 的通道内流动,流动的距离为 L, m ;

v ——空气流动速度。

空气在巷道内流动的阻力为

$$F_2 = \lambda \frac{v^2}{2} \frac{L}{4R} \rho$$

气流在克服巷道的摩擦阻力时获得的能量表达式为

$$E_2 = \int_0^t \lambda \rho \frac{v^2}{2} \frac{L}{4R} S v dt \quad (4)$$

式中: λ ——摩擦系数;

R ——通道的水力半径。

通道内的局部阻力为

$$F_3 = \sum \xi \rho \frac{v^2}{2}$$

则为克服局部阻力所需能量为

$$E_3 = \int_0^t \sum \xi \frac{v^2}{2} \rho v S dt \quad (5)$$

式中: $\sum \xi$ ——系统的局部阻力系数之和。

冒落体下落过程中空气获得的总能量与气流在出矿巷道内运动获得的总能量相等,冒落体下落过程中对空气所做的功与气流在出矿巷道内运动所做的功相等表达式为

$$\frac{1}{2} \frac{C g \rho S A}{S-A} h^2 = \int_0^{v_{\max}} L S \rho v dv + \int_0^t \lambda \rho \frac{v^2}{2} \frac{L}{4R} S v dt + \int_0^t \sum \xi \frac{v^2}{2} \rho v S dt \quad (6)$$

4 冲击气浪的估算

1) 冒落体冒落产生气流速度的最大值

不计算空气的摩擦阻力,则式(6)可以表达为

$$\frac{1}{2} \frac{C g \rho S A}{S-A} h^2 = \int_0^{v_{\max}} L S \rho v dv$$

通过对式(6)进行计算,得到顶板在冒落时产生的最大气流速度为

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{CgAh^2}{L(S-A)}} \quad (7)$$

通过对采区内覆盖层岩石现场块度测量,从2022年1月到2022年6月的调查结果,发现采场内岩石主要为小块零星冒落,冒落的岩石最大块度尺寸为1.5 m × 1.1 m × 0.8 m,采区内岩块最近几年冒落方式为零星冒落。以冒落体水平面为3.0 m × 2.2 m水平投影计算顶板冒落气流产生的最大速度,冒落体冒落高差为56.5 m。将 $h = 56.5 \text{ m}$, $S = 76\,000 \text{ m}^2$, $A = 6.6 \text{ m}^2$, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$, $C = 4.5$, $L = h = 56.5 \text{ m}$ 代入式(7)计算得

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{4.5 \times 9.8 \times 6.6 \times 56.5^2}{(76\,000 - 6.6) \times 56.5}} = 0.47 \text{ m/s}$$

根据《地采矿山安全生产管理规定》,人在井下所能承受的最大风速为12 m/s左右;通过上面计算可知:当顶板零星冒落时,因空气压缩产生的气流不会对人体造成伤害。

2) 顶板块状冒落造成的冲击气流计算

冒落体下落过程中为自由落体运动,速度为

$$v = \sqrt{2gh}$$

式中: h ——下落高度。

当岩体冒落到地板的瞬间,空气受挤压向两边流出,导致空气以瞬时速度 v 坠落,冒落体空气受到挤压速度为 u 快速流出,造成冲击气流,具体如图3所示。

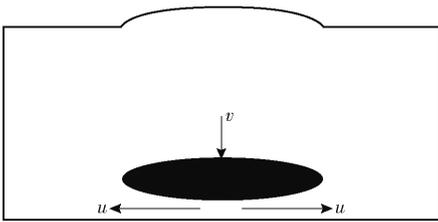


图3 冒落体坠落形成冲击气流图

根据质量守恒定律: $lh'u = Av$,可得冲击气流速度为

$$u = \frac{A}{lh'}v \quad (8)$$

式中: l ——冒落体水平投影曲线的周长,m;

h' ——冒落体周边最厚的垂直矿柱距离地板的距离,m。

冒落体最大快的岩体近似为椭球形,则冒落体的水平最大投影为 $A = \pi ab$;周长 $l = \pi [1.5(a + b) - \sqrt{ab}]$,代入式(8)得

$$u = \frac{ab \sqrt{2gh}}{h' [1.5(a + b) - \sqrt{ab}]} \quad (9)$$

式中: a ——椭圆长半轴;

b ——椭圆短半轴。

将 $a = 3.0 \text{ m}$, $b = 2.2 \text{ m}$, $h = 56.5 \text{ m}$, $h' = 1.6 \text{ m}$ 代入式(9)得

$$u = \frac{3.0 \times 2.2 \times \sqrt{2 \times 9.8 \times 56.5}}{1.6 \times [1.2 \times (3.0 + 2.2)] - \sqrt{3.0 \times 2.2}} = 37.39 \text{ m/s}$$

根据计算,该矿山岩体以块体方式冒落时,冒落形成的冲击气流为37.39 m/s,气流的流速大于国家规定的最高气流,冒落的瞬间产生的冲击气流,形成冲击气浪;当顶板岩石冒落垂直气流转化为水平气流时,会消耗能量,根据相关研究,能量消耗会使速度降低20%,即有垂直方向转化为水平方向,气流降低0.8倍。顶板大块冒落产生的冲击气浪大小为

$$v = u + 0.8 \times v_{\max} = 37.77 \text{ m/s}$$

5 安全距离分析

冒落体冒落产生的冲击气流向四周扩散,在距离冒落体边缘4.0 m,扩散面积为

$$\Delta A = \pi(a + 4)(b + 4) - \pi ab = 115.552 \text{ m}^2$$

可供继续向前流动的面积为

$$\Delta S = 1.6\pi [1.2(3.0 + 4 + 2.2 + 4) - \sqrt{(3.0 + 4)(2.2 + 4)}] = 46.48 \text{ m}^2$$

冲击气流向上扩散面积为向前扩散面积的2.5倍。空气惯性力及扰动气流的影响,假设单位面积上转向上升气流为向前气流的0.5倍,则空气的气浪速度为

$$u' = 2 \times 0.25 \times \frac{1.2 \times (3.0 + 2.2) - \sqrt{3.0 \times 2.2}}{1.2 \times (7.0 + 6.2) - \sqrt{7.0 \times 6.2}} v = 7.49 \text{ m/s}$$

计算出空区冲击气流为7.49 m/s,小于规定的最大安全风速(12 m/s)。当空区顶板零星块状冒落下,远离冒落点4 m以上,气浪不会对人身安全造成伤害。

6 采空区顶板冒落的防治措施

通过以上计算分析得出,在空区小面积冒落时,远离冒落地点4 m以上,不会受到气体冲击波危害。采场顶板如发生大面积冒落,根据以上公式可知,冲击气浪会对采场出矿巷道口人员造成危害,对于采

场要有一定措施,减少对人体及设备造成的伤害。

(1)采场出矿完成后及时对采场进行封闭处理,做封闭墙,保证采场不漏气。减少顶板冒落产生从出矿进路产生的气体对井下作业人员造成的伤害。

(2)崩落法处理采空区,对岩石顶板进行崩落处理,崩落岩石充满采空区,减少岩石冒落产生的冲击波,在地表允许塌陷的区域,可进行顶板崩落,充满采场。

(3)充填法处理采空区,通过尾砂充填、或者尾砂胶结充填,充填体充满采场,充填进行接顶后,采场顶板岩层无冒落空间,保证采场回采后因冒落产生气流危害。

(4)采场矿石不进行完全回收,预留一部分矿石当做采场的覆盖层,可对顶板冒落产生的气流具有阻波作用,保证作业人员安全。

7 结论

(1)根据对该矿山空区的调查,结合理论方式分析,得到矿山空区顶板冒落产生两种气流模型,即“打气筒”型和“绕流”两种模型。通过对矿山空区实际情况的调查结合两种理论模型分析,得到矿山空区顶板冒落产生的气流模型符合“绕流”模型。

(2)根据能量交换定理,即顶板冒落对空气产生压力与空气通过压力产生气流所获得的能量相等,推导空气在顶板冒落产生气流的极大值公式,根据公式计算出岩体零星冒落块体产生的最大气流。

(3)通过假设顶板冒落岩块大小,最大冒落岩

块到达空区底部时,对空气产生压力,并产生冲击气流最大为 37.77 m/s 。根据国家安全规定的最大气流为 12 m/s ,上述气流将对身体造成伤害。

(4)通过计算顶板岩块冒落产生的冲击气流的大小和矿山规定的最大安全风速,计算出有气流作用下的最小安全距离为 4 m 。

(5)当空区顶板岩块冒落时,空区内部有部分覆盖层,岩石在冒落的瞬间产生的冲击气流为最大,因覆盖层表面岩块高低不平,对气流产生阻力作用,从而降低气流速度,提出了相关措施减少对人体的伤害。

[参考文献]

- [1] 董川龙,乔元栋,彭英健,等.基于动力冲击灾害的缓冲垫层厚度研究[J].中国安全科学学报,2016,26(10):110-114.
- [2] 黄平路,陈从新.厚覆盖层矿山地下开采地表塌陷机制分析[J].岩土力学,2010,31(S1):357-362.
- [3] 吴爱祥,王贻明,胡国斌.采空区顶板大面积冒落的空气冲击波[J].中国矿业大学学报,2007(4):473-477.
- [4] 曹建立,任凤玉.诱导冒落法处理时采空区散体垫层的安全厚度[J].金属矿山,2013(3):45-48.
- [5] 陈赞成,余斌,刘建东,等.特大型采空区围岩意外垮落冲击波分析[J].有色金属(矿山部分),2012,64(6):27-30.
- [6] 李永斌.采空区顶板大面积冒落空气冲击灾害分析[J].山东煤炭科技,2016(8):64-66.
- [7] 王文健,学锋.一次采场大冒落空气中冲击波的分析[J].世界采矿快报,1993(23):15-16.