

文章编号: 1000-1964(2007)04-0473-05

采空区顶板大面积冒落的空气冲击波

吴爱祥^{1,2}, 王贻明¹, 胡国斌^{1,3}

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083;

2. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 3. 铜都铜业 冬瓜山铜矿, 安徽 铜陵 244031)

摘要: 为了解决采空区大面积冒落所产生空气冲击波的问题, 以冬瓜山铜矿西山特大采空区为例, 建立了简化的物理模型, 采用 Lagrange 法, 从理论上计算采空区顶板大面积冒落所产生空气冲击波的强度; 同时, 采用激波管实验, 研究垫层的削波效果. 理论计算结果表明: 西山采空区顶板大面积冒落不会产生空气冲击波, 只会形成高速气流, 垫层表面最大风压为 0.139 MPa, 最大风速为 53.09 m/s, 接近自由落体的速度. 激波管实验表明: 当垫层厚度不小于 12 m 时, 出口风速和风压可降到安全范围内.

关键词: 特大空区; 顶板冒落; 空气冲击波; 垫层厚度

中图分类号: TD 327.2⁺3; TD 853.391 **文献标识码:** A

Air Shock Wave Induced by Roof Falling in a Large Scale in Ultra-Huge Mined-Area

WU Ai-xiang^{1,2}, WANG Yi-ming¹, HU Guo-bin^{1,3}

(1. School of Resource and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. School of Civil & Environment Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China;

3. Dongguashan Cooper Mine, Tongdu Copper Co. Ltd, Tongling, Anhui 244031, China)

Abstract: In order to solve the problem of air shock wave induced by the potential falling roof in a large scale in the ultra-huge mined area, taking the ultra-huge mined areas of Xishan section in Dongguashan Cooper Mine as example, a simplified physical model was built, and the intensity of air shock wave was calculated theoretically by the Lagrange method, meanwhile the weakening effect of ore cushion was tested by shock wave tube test. The results show that there is not air shock wave but airflow with high velocity during the roof falling in Xishan mined area, which the maximum wind pressure was 0.139 MPa and the maximum wind speed was 53.09 m/s on the surface of ore cushion according to the free fall law. The wind velocity and pressure in the outlet would fade down to the safety range on the condition that the thickness of ore cushion is more than 12 m.

Key words: ultra-huge mined-area; roof fall; air shock wave; thickness of ore cushion;

据调查研究^[1-3], 在矿山安全事故中, 因顶板冒落所引起安全事故排在前列. 因此, 各国矿业科技工作者都投入了很大的精力研究采空区的顶板安

全问题, 从采空区围岩的工程地质特性出发, 研究顶板围岩的破坏形式、地压活动规律, 监控顶板的稳定性等^[4-7]. 对于井下空气冲击波, 主要研究井下

收稿日期: 2006-12-11

基金项目: 国家“十五”科技攻关项目(2004BA615A-04); 国家杰出青年基金项目(50325415); 国家自然科学基金项目(50574099)

作者简介: 吴爱祥(1963-), 男, 湖北省仙桃市人, 教授, 博士生导师, 工学博士, 从事矿业工程与岩石力学等方面的研究.

E-mail: zhywang@126.com Tel: 0731-8830851

爆破所产生的空气冲击波极其防护技术^[8-13],而对于因采空区顶板大面积冒落所产生的空气冲击波则研究不多.由于采空区围岩的差异及所处环境的多样性,顶板大面积冒落多难以准确预测,其造成的破坏往往很大^[14-15].

冬瓜山铜矿西山矿段,在回采过程中未对空区进行充填或放顶处理,但采取了封闭空区、开天窗、监测地压等安全技术手段,回采矿石 600 多万 t,形成了走向长 300 多 m,水平投影宽 200 多 m,高 140 余 m,总容积达 340 万 m³ 的特大采空区.在空区的中部预留下 No. 17 矿柱支撑顶板,积压矿量 90 多万 t.在矿体回采接近尾声时,先回收 No. 17 矿柱,然后对采空区进行全尾砂充填处理.

设计采用暂留矿石垫层的阶段空场法回收矿柱,人员和设备不必进入采空区,因此,安全防护的重点是采空区顶板大面积冒落所产生的空气冲击波.西山采空区的规模很大,是研究因采空区顶板大面积冒落所产生的空气冲击波的理想场所.预测采空区顶板大规模冒落所产生的空气冲击波或气浪的强度,确定最小安全垫层厚度,对于矿柱安全回采及矿山安全生产具有重要的意义.

1 理论研究

1.1 物理模型

冬瓜山铜矿西山矿段空区顶板围岩较完整,整体块状冒落的可能性较大,为计算处理方便,进行必要的简化,简化物理模型见图 1.

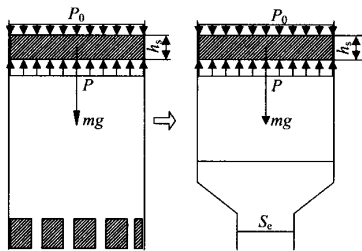


图 1 物理模型

Fig. 1 Physical model

1) 岩体大面积冒落时,周边被同时剪断,不考虑周边摩擦力对冒落岩体运动的影响,冒落岩体下落过程中不破碎,顶板冒落岩体的运动可以视为一个全重力作用的活塞运动.

2) 在采空区的下部存在一定数量的巷道,一旦发生顶板大面积冒落,必然导致大量的压缩气体以一定的风速与风压自下部巷道喷出.模型可简化为按一定断面收缩比变化的泄漏边界.

3) 岩体冒落过程时间短,温度变化不大,可以

认为采空区内的空气满足一维气体动力学的理想气体条件,可概化为一维非定常气体动力学的气体活塞运动模型来计算.

1.2 计算方法

本次计算采用 Lagrange 一维人工黏性差格式,研究冒落体在空区的运动方程及其对空区内空气的压缩作用,在考虑初始边界条件和运动条件的基础上,研究冒落体下落过程中空区内气体的最大压力和流速.

1.2.1 基本方程

速度方程

$$U = \frac{\partial r}{\partial t}, \quad (1)$$

质量守恒方程

$$\frac{\partial r}{\partial R} = \frac{\rho_0 A_0}{\rho A}, \quad (2)$$

动量守恒方程

$$\frac{\partial U}{\partial t} = -\frac{A}{\rho_0 A_0} \frac{\partial P}{\partial R}, \quad (3)$$

能量守恒方程

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \frac{P}{\rho^2} \frac{\partial P}{\partial t}, \quad (4)$$

状态方程

$$E = \frac{1}{r-1} \frac{P}{\rho}, \quad (5)$$

式中: R 为拉格朗日坐标; ρ 为气体密度; A 为横截面积; r 为竖向坐标; A_0 为初始横截面积; U 为空气质点速度; P 为气体压力.

对方程进行无量纲化处理.

取基本长度: $\bar{d} = 1.0 \text{ m}$;

基本速度: $u_0 = \sqrt{\frac{P_0}{\rho_0}}$.

则有, $r = \frac{\bar{r}}{\bar{d}}$; $R = \frac{\bar{R}}{\bar{d}}$; $A = \frac{\bar{A}}{\bar{d}^2}$; $U = \frac{\bar{u}}{u_0}$; $P = \frac{\bar{P}}{P_0}$; $\rho = \frac{\bar{\rho}}{\rho_0}$; $E = \frac{\bar{E}}{(\frac{P_0}{\rho_0})}$; $t = \frac{\bar{t}}{\bar{d}} \frac{1}{u_0}$.

1.2.2 差分格式

将式(1)~(5)进行差分处理得

$$r_i^{n+1} - r_i^n = U_i^{n+\frac{1}{2}} \Delta t, \quad (6)$$

$$\frac{r_{i+1}^{n+1} - r_i^{n+1}}{R_{i+1} - R_i} = \frac{\rho_{0,i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} A_{0,i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\rho_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} A_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}, \quad (7)$$

$$U_i^{n+\frac{3}{2}} - U_i^{n+\frac{1}{2}} = -\frac{A_{i+1}^{n+1}}{A_{0,i} \rho_{0,i}} \frac{P_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i-\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{R_{i+\frac{1}{2}} - R_{i-\frac{1}{2}}}, \quad (8)$$

$$E_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} - E_{i+\frac{1}{2}}^n = \frac{P_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}}{\rho_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \rho_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}} (\rho_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - \rho_{i+\frac{1}{2}}^n), \quad (9)$$

$$P_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = f(E_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}, \rho_{i+\frac{1}{2}}^{n+1}), \quad (10)$$

式中: $P_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} = (P_{i+\frac{1}{2}}^{n+1} + P_{i+\frac{1}{2}}^n)/2$; $R_{i+\frac{1}{2}} = (R_{i+1} + R_i)/2$.

1.2.3 人工黏性

$$q_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \begin{cases} \frac{a^2(\rho_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} + \rho_{i+\frac{1}{2}}^n)}{2[(\delta_u)_{i+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}}]^2} & (\delta_u < 0) \\ 0 & (\delta_u \geq 0), \end{cases} \quad (11)$$

式中: $(\delta_u)_{i+\frac{1}{2}} = U_{i+1} - U_i$; a^2 为公式系数, 一般取 $1 \sim 4$.

加入人工黏性时, 只需把式(6)~(10)中的 P 换为 $P + q$ 即可.

1.3 稳定条件

一维变截面拉格朗日差分格式在不考虑人工黏性时, 稳定条件讨论仍按 Courant(库朗)条件: $\Delta t \leq \Delta r/a$. 但由于再加上人工黏性, 则有: $\Delta t = 0.6 i^{\min(\Delta t_i/a_i)}, i = 1, 2, \dots$.

1.4 边界条件

1.4.1 上边界岩体的运动条件

顶板冒落岩体的受力如图1所示, 设 P_0 为大气压力; P 为空区内气体的压力; m 为顶板冒落岩体质量; h_s 为顶板冒落岩体厚度; S 为顶板冒落岩体横截面积; U 为空气质点速度; t 为时间, L_0 为基本长度. 则有

$$m = \rho_s h_s S.$$

根据牛顿第二定律 $m_0 \frac{du}{dt} = mg - (P - P_0)S$, 对上述方程无量纲化得基本方程

$$\frac{du}{dt} = \frac{\bar{L}_0 \bar{g}}{\bar{u}_0^2} \left(1 - \frac{\bar{P}_0}{\rho_0 \bar{L}_0} \frac{P - 1.0}{\rho_s h_s} \right). \quad (12)$$

当初始时刻取 $U = \frac{1}{2} g \Delta t$,

$$\text{无量纲化 } U_{\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \frac{\bar{L}_0 \bar{g}}{\bar{u}_0^2} g \Delta t, \quad (13)$$

式(12)~(13)中的 u, t, P, ρ_s, h_s 都是无量纲参量, $\bar{P}_0, \bar{\rho}_0, \bar{L}_0, \bar{u}_0, \bar{g}$ 都为常数项.

1.4.2 下边界泄漏条件

已知介质的透气常数即孔隙率: 透气巷道总截面积与整体面积之比, 即 $K = s_e/s$. 由此, 根据一维气体非定常流动的动力学方程, 在不同的拉格朗日坐标下代入不同的截面积, 就可解得结果.

1.4.3 计算参数

空区的高度 $L_{\text{空}} = 140$ m; 顶板岩石比重 $\rho_s = 32.4$ kN/m³; 落体厚度 $H_s = 70$ m; 空区横截面积 $S = 3848.5$ m²; 空区底部泄漏面积 $S_e = KS, 0 < K < 1$; 重力加速度 $g = 9.8$ m/s²; 声速 $A_0 = 341$

m/s; 空气密度 $\rho_0 = 12.021$ N/m³; 基本压力为 0.10336 MPa; 基本长度为 1.0 m; 基本速度 $u_0 = \sqrt{P_0/\rho_0} = 288.2$ m/s; 基本横截面积 $S_0 = 3846.5$ m²; 基本时间 $t_0 = L_0/u_0 = 0.00347$ s.

1.5 计算结果

1) 底部风压值

在孔隙率(收缩率)为 0.5 , 空区冒落厚度为 70 m, 空区高度 140 m 的情况下, 空区底部(即垫层表面)风压值随时间的变化规律近似为抛物线, 最大风压值为 0.139 MPa, 它出现在冒落的岩体到空区底部的时刻($t = 5.332$ s).

2) 底部风速值

在同样条件下, 计算空区底部的最大风速为 53.09 m/s, 非常接近自由落体的速度.

3) 在上述条件下, 当孔隙率在 $0.45 \sim 0.50$ 区间变化时, 计算所得各参数近似是孔隙率 K 的线性函数, 但 K 对速度影响甚微.

计算结果表明, 在空区高度为 140 m 的情况下, 空区的气流不能形成激波, 只为高速气浪.

2 试验研究

对空气冲击波的防护, 采取暂留矿石垫层的方法. 为了确定在空区顶板大规模冒落时矿石垫层的最小安全厚度, 本次采用激波管试验, 研究在高速气流作用下, 不同垫层厚度的消波作用.

2.1 试验装置

试验装置由 12 根长 2 m, 内径 $\Phi 150$ mm 两端带联结法兰的钢管连接而成的管体, 4 m³ 的高压贮气罐及压力为 22 MPa, 流量为 180 m³/h 的空气压缩机所组成, 管体前段 1 m 长为加载段, 其上设有测压孔, 以测定气流通过垫层之前的超压, 端部密闭, 端盖上有进气孔, 用软管经控制系统与高压气罐相连, 消波段长 10 m, 根据试验要求, 填充一定长度的碎石垫层, 垫层两端有筛板固定. 出口段长 11 m, 尾端开口, 其上有测压孔与测速孔, 以测定气流通过垫层后的超压与流速, 其试验装置见图2.

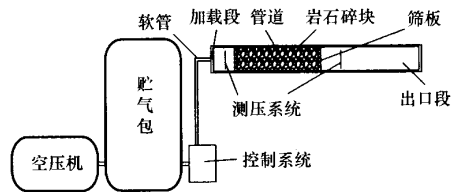


图2 试验装置

Fig. 2 Sketch of test apparatus

2.2 试验压力与测定参数

根据理论计算结果,确定试验压力 0.14 MPa.

在加载段(即垫层前)与出口段(即垫层后)各布置一个测压点,以测定垫层前后的气流超压.

在出口段布置一个测速点,以测定通过垫层后的气流速度.

2.3 试验程序

1) 加工垫层材料,加工数种不同粒度的碎石,进行选配,直至其孔隙满足要求,所选用的碎石配料,其现场实测孔隙率为 48.5%.

2) 填充垫层,根据试验要求,逐段向消波段内填充碎石垫层,并进行振捣,使其在管内的密度与实测密度基本一致,垫层两端用筛板固定.

3) 加载,操纵控制系统向管内充气,测量垫层前后的超压值及垫层后的风速.

4) 继续向管内填充垫层材料,而后充气加载,并测量以上参数,直至所测定的垫层后的风速为 10~12 m/s 为止.

2.4 气浪压力与速度测定

1) 压力测量

气浪压力(超压)的测量利用应变测压系统,该系统由应变式空气压力传感器、动态电阻应变仪与 SC16 线光线示波器联成.

2) 风速测量

风速测量是用皮托管与 Y-16 倾斜微压计测量气流的动压从而换算出风速值 V .

$$V = 4 \sqrt{0.3 p_{\text{动}}}.$$

测定方法是在管内径为 $\Phi 150$ mm 的横断面上布置 5 个测点位置,如图 3 所示,分别测出各点风速值,取其平均值为该截面所处位置的风速值.

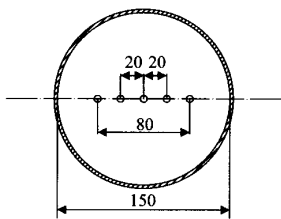


图 3 测压系统测点布置

Fig. 3 Monitoring system arrangement

2.5 试验结果与分析

1) 巷道内压力与垫层厚度的关系

试验表明,气浪通过矿石垫层,其压力衰减明显,垫层愈厚,压力愈低.随着垫层的加厚,衰减速率变小,实测压力随垫层厚度的变化关系曲线见图 4a.

2) 巷道内风速与垫层厚度的关系

试验表明,气浪通过矿石垫层后,其风速降低,垫层愈厚,风速愈低.在上面压力为 0.14 MPa 垫层孔隙率为 48.5% 的条件下,巷道内气浪风速 V 与垫层厚度 δ 的变化关系曲线见图 4b.

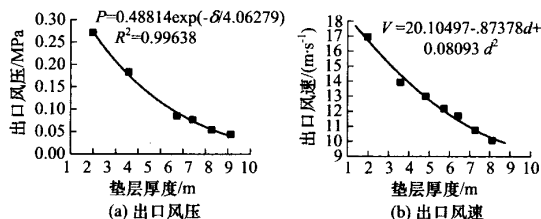


图 4 垫层厚度与出口风压和出口风速的关系

Fig. 4 Variations of rock cushion thickness with wind pressure and velocity of outlet

3 结 论

1) 理论计算表明,冬瓜山铜矿西山特大采空区顶板大规模冒落时,不会产生空气冲击波,只会产生高速气浪,空区底部即垫层上表面最大风压值为 139 kPa,最大风速值为 53.09 m/s,接近自由落体的速度.

2) 垫层削波实验表明,空区顶板大规模冒落时,在垫层厚度为 12 m 下巷道内的作业人员就是安全的,因为按试验数据结果,在 12 m 厚垫层下的压力为 1.2 kPa,而人员的安全指标为 3 kPa.冬瓜山铜矿西山采场垫层厚度一般保持在 20 m 以上,垫层下作业人员的安全是有保障的.

3) 本次研究成果也为 No. 17 矿柱的安全回收提供了有力的安全技术保障,安全回收矿石约 50 万 t,研究方法和成果可用于类似矿山矿体或矿柱的回收.

参考文献:

- [1] DUZGUN H S. Analysis of roof fall hazards and risk assessment for Zonguldak coal basin underground mines[J]. International Journal of Coal Geology, 2005(64):104-115.
- [2] MITCHELL R J, DRISCOLL T R, HARRISON J E. Traumatic work-related fatalities involving mining in Australia[J]. Safety Science, 1998(29):107-123.
- [3] LARSSON T J, FIELD B. The distribution of occupational injury risks in the state of Victoria[J]. Safety Science, 2002(40): 419-437.
- [4] DAS S K. Observations and classification of roof strata behavior over long-wall coal mining panels in India[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000(37):585-597.
- [5] 吴 侃,王悦汉,邓喀中. 采空区上覆岩层移动破坏

- 动力学模型的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2000, 29(1):34-36.
- WU Kan, WANG Yue-han, DENG Ka-zhong. Application of dynamic mechanics model of overlying strata movement and damage above goaf[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2000, 29(1):34-36.
- [6] 方新秋, 窦林名, 柳俊仓, 等. 大采深条带开采坚硬顶板工作面冲击矿压治理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(5):602-606.
- FANG Xin-qiu, DOU Lin-ming, LIU Jun-cang, et al. Manage of rock burst in mine with great mining depth partial extraction and strong roof face[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(5):602-606.
- [7] 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.
- ZHAO Wen. The rock failure and fall of the large underground mined-out area[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2006, 35(5):602-606.
- [8] 庞伟宾, 何翔, 李茂生, 等. 空气冲击波在坑道内走时规律的实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6):573-576.
- PANG Wei-bin, HE Xiang, LI Mao-sheng, et al. The formula for air-blast time of arrival in tunnel[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6):573-576.
- [9] 王飞, 王伟策, 王耀华, 等. 挡波墙对空气冲击波的削波作用研究[J]. 爆破器材, 2004, 33(1):1-5.
- WANG Fei, WANG Wei-ce, WANG Yao-hua, et al. Research on the role of gear wave wall for air shock wave cut[J]. Explosive Materials, 2004, 33(1):1-5.
- [10] JANOVSKY B, SELESOVSKYB P, HORKEL J, et al. Vented confined explosions in Stramberg experimental mine and Autoreagas simulation[J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2006(19):280-287.
- [11] SHEN Yu-ling, NING Jian-guo. Numerical simulation of the 2-D explosive field for the effect of protective wall's shape[J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 2001, 10(1):39-44.
- [12] RODRIGUEZ R, TORANO J, MENENDEZ M. Prediction of the air-blast wave effects near a tunnel advanced by drilling and blasting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2007(22):241-251.
- [13] 萨文科, 古林, 马雷. 井下空气冲击波[M]. 龙维祺, 于亚伦, 译. 北京:冶金工业出版社, 1979:92-112.
- [14] 郑怀昌, 李明, 张军, 等. 采空区顶板大面积冒落危害预测[J]. 化工矿物与加工, 2005, 34(11):9-11.
- ZHENG Huai-chang, LI Ming, ZHANG Jun, et al. The prediction of the hazard caused by weighting over great extent of top layer in mine worked-out section area[J]. Industrial Minerals and Processing, 2005, 34(11):9-11.
- [15] 周崇仁. 矿柱回采与空区处理[M]. 北京:冶金工业出版社, 1989:239-332.

(责任编辑 王继红)