

封闭采空区顶板垮落-空气冲击耦合模型与差分解法

顾铁凤¹, 宋选民²

(1. 太原理工大学 理学院, 山西 太原 030024; 2. 太原理工大学 采矿工艺研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 基于牛顿第二定律和空气动力学原理, 分析了矿山开采中突发性顶板垮落所伴随的飓风冲击灾害, 建立了封闭采空区条件下顶板垮落-空气冲击的耦合模型, 讨论了差分数值解法。借助数值解研究了封闭采空区条件下顶板块体运动速度的变化规律、冲击过程的作用时间, 以及采空区所带巷道内压缩空气风流的速度变化规律。

关键词: 封闭采空区; 顶板垮落-空气冲击耦合模型; 差分解法; 飓风灾害规律

中图分类号: TD823.85 **文献标识码:** A

The air impulsion coupling model with roof caving and its difference solution under closed goaf

GU Tie-feng¹, SONG Xuan-min²

(1. College of Science, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Institute of Mining Technology, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Based on Newton secondary law and air dynamics principle, the incidental hurricane disaster caused by abruptly roof caving over extent in mine mining process was analyzed, the air impulsion coupling model with roof caving under closed goaf was built, and its difference solution was discussed. With the help of numerical solution, roof movement law, impact time, and the varying one of compressed air flow within roadways under closed goaf were studied.

Key words: closed goaf; roof caving-air impulsion coupling model; difference solution; hurricane disaster law

大同、京西坚硬顶板坚硬煤层开采, 神东矿区浅埋煤层开采及旺格维利联采条件下, 均会发生大规模采空区顶板垮落所形成的飓风灾害威胁^[1]。在采矿工程实践中, 主要限于顶板断裂和垮落机理^[2-3]研究, 对顶板垮落伴随的飓风灾害研究成果较少^[4-5], 且仅分析顶板冲击载荷和空气的冲击压力, 未将其作为一个关联的灾害系统, 分析灾变过程规律、采空区压缩空气的冲击波规律和飓风灾害的最大临界参数。对大规模顶板垮落伴随的飓风灾害影响评价、人员抗灾能力、防灾工程的结构参数设计及飓风发生过程中因顶板离层真空负压所造成的风流反向使采场人员摇摆不定的综合影响等几乎空缺。在神华集团神东煤炭分公司和大同煤业集团的项目研究中, 大规模顶板垮落所伴随的飓风灾害防治与关键控制技术迫切需要解决。在此, 分析研究飓风灾害的正灾变过程, 以促进飓风灾害理论的研究和防治技术的发展。

收稿日期: 2007-11-28 责任编辑: 柴海清

基金项目: 山西省自然科学基金资助项目 (200601047); 山西省科技攻关项目 (200631118-02)

作者简介: 顾铁凤 (1961—), 女, 辽宁北镇人, 副教授, 硕士。Tel: 0351-6047867, E-mail: Gutiefeng1@163.com

1 大规模顶板垮落伴随飓风灾害的理论模型

大规模顶板垮落伴随的飓风灾害理论分析模型如图 1 所示。先分析采场顶板大面积整体切断垮落时飓风灾害的正灾变过程。

1.1 顶板垮落伴随飓风预测的理论模型^[6-7]

基本假设：① 飓风冲击过程中，巷道很远的出口被封闭，以便计算飓风冲击压强和冲击载荷；② 飓风过程时间很短，视为采空区内的等热过程，即温变 $\Delta T = 0$ ；③ 顶板块体垮落为重力与采空区气压控制的落体运动；④ 因飓风灾害历时很短和气体黏滞性影响，认为采空区空气来不及流向上部空间，全部参与采空区的下部灾变过程；⑤ 为使预测模型能获得封闭解，设回采巷道长度 $L_3 \rightarrow \infty$ ，并且在无限远处封闭巷道，如此飓风灾害发生时对巷道的风速影响很小，等同于巷道不封闭的情况。

为此，顶板块体的重力 $W = \rho_d g L_1 L_2 h_1$ ，其中， ρ_d 为顶板岩层的密度， kg/m^3 ； g 为重力加速度； L_1 ， L_2 ， h_1 分别为顶板块体的长、宽和厚， m 。

作用在块体的气体压力（向上） $F_1 = L_1 L_2 p_z$ ，其中 p_z 为飓风灾害发生过程中采空区的空气压强， Pa ，是顶板下落高度 z 或体积 V 的函数。

建立垂向坐标系，块体下落过程为 $z \in [0, M]$ ，故块体下落运动方程为 $W - F_1 = ma$ 。由此，可得块体下落的加速度为

$$a = g - \frac{p_z}{\rho_d h_1}, \quad (1)$$

式中， m 为顶板块体的质量， kg 。

由飓风灾害的等温过程，从顶板块体下落起始 $z = 0$ 到任一位置 z ，有 $p_0 V_0 = p_z V_z$ ；在顶板块体刚开始下落瞬间，采空区体积为 $V_0 = V_0 + M L_1 L_2$ ；当下降距离 z 时，采空区的体积为 $V_z = V_0 + (M - z) L_1 L_2$ ，将 V_0 与 V_z 代入式 (1)，解出 p_z 为

$$p_z = \frac{V_0 + M L_1 L_2}{V_0 + (M - z) L_1 L_2} p_0. \quad (2)$$

式中， V_0 为飓风灾害结束时刻的体积，其主要是回采巷道的体积， m^3 ； M 为采高，即顶板块体的垂直下落距离， m ； p_0 为灾害发生前采空区的气体压强， Pa 。

根据加速度与速度的关系，有 $a = \frac{dv_z}{dt}$ ，将式 (2) 代入式 (1)，再将式 (1) 代入 $a = \frac{dv_z}{dt}$ ，可得

$$\frac{dv_z}{dt} = g - \frac{V_0 + M L_1 L_2}{\rho_d h_1 [V_0 + (M - z) L_1 L_2]} p_0. \quad (3)$$

式 (3) 即为顶板块体下落过程中，有采空区空气参与的飓风灾害数学模型（控制方程）。该模型为与气体压强关联的变加速运动问题。

顶板块体下落速度 v_z 不仅与采空区高度、采空区面积和空气压强有关，同时还与顶板块体质量和块体下降高度有关。由式 (3) 可计算出顶板不同时刻的速度 v_z 。

1.2 巷道内飓风速度的预测

顶板块体下降时，因巷道出口与采空区相比面积要小得多，故巷道内飓风速度要急剧升高，且存在空气的压缩过程。此时，为简化计算，设有 n 条断面和支护形式相同的巷道，各巷道风速相同，依据无黏性

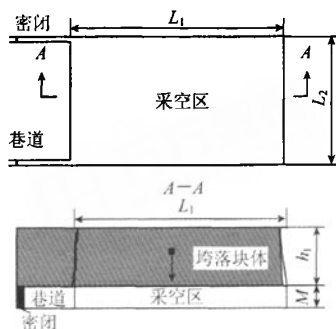


图 1 顶板垮落的飓风灾害预测模型

Fig. 1 Hurricane disaster forecast model with roof caving

可压缩流体的质量守恒(连续性)方程^[5], 对于采空区断面 1 与巷道断面 2, 有 $\rho_1 A_0 v_z = \rho_2 n A_1 v_2$, 则巷道内的风速为

$$v_2 = \frac{\rho_1 L_1 L_2 v_z}{n \rho_2 A_1}, \quad (4)$$

式中, ρ_1, ρ_2 分别为采场和巷道空气的密度, kg/m^3 ; A_0, A_1 分别为采空区面积和巷道断面积, m^2 ; n 为巷道数目; v_2 为巷道内飓风速度, m/s 。

依据式(4), 发生大面积顶板垮落时巷道内飓风速度就可惟一确定。

巷道内飓风速度确定后, 根据飓风冲击平面防灾结构(或人员设备)的冲力计算公式^[5-6], 其断面 A_2 上飓风的冲击力为 $F = k_d \rho_2 v_2^2 A_2$, 其中 k_d 为飓风灾害发生过程中巷道风流的阻力系数, 对平板可取 2。

本文飓风冲击力不是研究重点, 仅考虑巷道内飓风速度的变化规律。

2 大规模顶板垮落伴随飓风灾害的差分分解法

在式(3)中, 欲解出 v_z , 进而求出 v_2 是非常困难的。原因在于 v_z 不仅是时间 t 的函数, 而且还是顶板块体下落位置 z 的函数, 但 z 为下沉速度 v_z 、加速度 a_z 与时间 t 的函数, 是一个泛函, 即 $z = f(v_z, a_z, t)$ 。由此, 只能采用差分数值解法^[8]。

在微时段 $\Delta t \in [t_n, t_{n+1}]$ 内, 块体速度增量为 Δv_z , 将式(3)中微分用差分增量替代, 注意到 $\Delta v_z = v_{z,t_n} - v_{z,t_{n-1}}$, 则有

$$v_{z,t_n} = v_{z,t_{n-1}} + \left\{ g - \frac{V_0 + M L_1 L_2}{\rho_d [V_0 + (M - z) L_1 L_2]} p_0 \right\} \Delta t. \quad (5)$$

因式(5)涉及变数 z , 在微时段 $\Delta t \in [t_n, t_{n+1}]$ 内, $dz/dt = v_z$, 亦用增量替代微分, 则有 $z_{t_n} = z_{t_{n-1}} + v_{z,t_{n-1}} \Delta t$ 。

考虑初始时间和边界条件, $v|_{t=0, z=0} = 0, z|_{t=0} = 0$, 用 $v_{z,t_1} = g \Delta t$ 估算 t_1 时刻的块体下降速度, 即可完整地按照上述差分方法求解其余时刻的下落位置 z_{t_n} 和 v_{z,t_n} , 再据式(4)计算具体条件下不同时刻的巷道飓风速度。

3 大规模顶板垮落伴随飓风灾害的算例分析

依据神东煤炭分公司大柳塔矿活鸡兔井 1^{-2} 煤长壁综采工作面的布置与顶板情况, 预测采空区大面积顶板垮落时飓风灾害的相关情况。

1^{-2} 煤层地质柱状和开采技术条件: 顶板高度 $M = 5 \text{ m}$, 厚度 $h_1 = 10.30 \text{ m}$, 工作面长度 $L_1 = 240 \text{ m}$, 初次来压步距 $L_2 = 85 \text{ m}$, 则采空区面积 $A_0 = 20\,400 \text{ m}^2$, 采空区体积 $M L_1 L_2 = 102\,000 \text{ m}^3$ 。取顶板岩层密度 $\rho_d = 2\,600 \text{ kg}/\text{m}^3$, 空气初始密度 $\rho_0 = 1.205 \text{ kg}/\text{m}^3$, 空气初始压强 $p_0 = 101\,324.96 \text{ Pa}$, 巷道位置选在 10 m 处, 高度 4.5 m , 宽度 5.4 m , 则巷道断面积为 $A_1 = 24.3 \text{ m}^2$, 因工作面有 3 条巷道, 故巷道总体积为 $V_0 = 729 \text{ m}^3$ 。

按前述飓风灾害理论模型, 可预测巷道内飓风速度 v 与灾害发生时间 t (图 2) 及顶板下落位置 z 的变化关系曲线(图略)。

3.1 飓风灾害时间分析

顶、底板高度 5 m 的下落距离, 顶板大面积垮落-飓风灾害历时很短, 但因采空区气压的联合作用, 比自由落体模型历时要长。算例中, 依自由落体规律, 用时

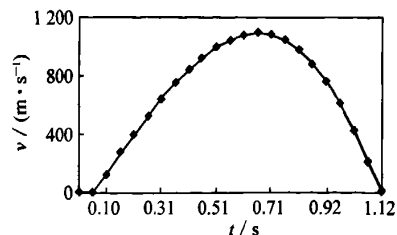


图 2 巷道内飓风速度与时间的关系
Fig. 2 The relation between hurricane velocity within mining roadways and time

1.020 4 s, 而耦合模型发生飓风灾害时, 用时 1.122 s, 增加 0.101 6 s.

3.2 巷道内飓风速度的变化规律分析

在采场顶板大面积垮落所伴随飓风灾害过程中, 可分为 2 个不同阶段 (图 2): 飓风速度显著增加阶段和飓风速度的迅速降低阶段. 在飓风速度显著增加阶段, 从 0 增加到最大值 1 089.65 m/s, 为声速的 3.2 倍, 属于流体压缩所造成的超声流动, 其形成的冲击动载非常大, 对采场和巷道人员与设备的损害程度超乎想像. 在飓风速度显著降低阶段, 风速从 1 089.65 m/s 迅速降低到最小速度 13.70 m/s, 此阶段属于飓风灾害的逐渐减弱过程, 大面积顶板垮落结束巷道内尚有 13.7 m/s 的压缩风流流动, 并非以往推测的巷道风速^[9-10]为 0. 飓风灾害结束时巷道风速要比《煤矿安全规程》规定安全风速数量大的多, 产生进风巷风流反向、回风巷风速升高及巷道扬尘等现象是自然的.

3.3 巷道飓风速度最大临界值的分析确定

因采空区压缩空气的耦合作用, 顶板块体下落速度将有最大值, 然后随 p_x 的增加, 顶板块体下落速度将减小, 如此相耦合的巷道飓风速度将随之降低. 将飓风灾害发生过程中, 飓风速度最大值称为最大临界值. 分析确定该值, 对灾害程度评估及灾害最危险时刻的预防均有实际意义. 依据预测结果, 用插值方法将巷道内飓风速度按小于声速、1~2 倍声速及大于声速约 3 倍 (1 000 m/s) 的界限进行划分.

顶板大面积垮落的飓风灾害过程中, 时间 0.180 s 和下落 0.053 m 时, 巷道内飓风速度已达 340 m/s; 时间 0.324 s 和下落 0.293 m 时, 速度已达 2 倍声速; 时间 0.533 s 和下落 0.989 m 时, 速度为声速的 3 倍; 时间 0.663 s 和下落 1.622 m 时, 速度达最大值 1 089 m/s, 是声速的 3.20 倍; 时间 0.781 s 和下落 2.342 m 时, 速度又降为声速的 3 倍; 时间 0.946 s 和下落 3.551 m 时, 速度降为声速的 2 倍; 时间 1.041 s 和下落 4.349 m 时, 飓风速度降为声速; 时间 1.122 s 和下落终了时, 飓风速度小于声速, 为 13.696 m/s.

根据分析, 飓风达到声速的时间为 0.180 s, 顶板下降距离 0.053 m; 从声速达到 2 倍声速的时间为 0.144 s, 顶板下降距离 0.240 m; 达到 3 倍声速的时间为 0.209 s, 顶板下降距离 0.696 m; 大于 3 倍声速且有最大值的时间为 0.248 s, 顶板下降距离 1.353 m; 在飓风灾害减弱阶段, 由 3 倍降为 2 倍声速的时间为 0.165 s, 顶板下降距离 1.209 m; 降为 1 倍声速时间为 0.095 s, 顶板下降距离 0.798 m; 从声速降为灾害结束的 13.696 m/s, 时间仅有 0.081 s, 顶板下降距离 0.751 m.

在飓风灾害过程中, 速度增加阶段在各个速度区段的持续时间均大于速度降低阶段的持续时间, 而飓风速度增加阶段的各区间下降距离则均小于速度降低阶段. 这是由于采空区内空气压缩的静压作用所导致的必然结果.

单对飓风灾害而言, 其巷道内飓风速度的峰值为 1 089 m/s, 是声速的 3.2 倍; 发生飓风灾害的最严重时刻为 0.663 s, 即基本在灾害总时间 1.122 s 的中期偏后时区; 临界下落位置为 1.622 m, 即顶板下落位置约为总高度 5 m 的 1/3 时巷道内飓风速度最大.

3.4 飓风灾害时顶板垮落速度特征

与一般的自由落体相比较, 因采空区空气的压缩耦合作用, 使顶板块体的下落速度出现差异 (图 3). 封闭采空区条件下, 飓风灾害过程中顶板下落速度比一般自由落体运动的速度低, 相同时刻的下降距离小, 其原因均是气体的反作用所致.

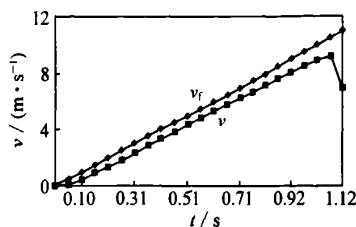


图 3 顶板下落速度的比较

Fig. 3 Comparison of roof caving velocity

4 结 论

建立了封闭采空区条件下飓风灾害的理论模型, 给出了差分解法. 针对具体的现场条件, 探索了灾害发生全过程, 研究了巷道内飓风的两阶段速度变化规律; 给出了最严重的灾变时刻为 0.633 s, 临界飓风

速度 1 089 m/s. 比较了飓风灾害时, 顶板块体运动与一般自由落体速度的差异性, 并找出了差异的原因.

参考文献:

- [1] 靳钟铭, 徐林生. 煤矿坚硬顶板控制 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1994: 154 - 158.
Jin Zhongming, Xu Linsheng. Hard roof control in coal mine [M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1994: 154 - 158.
- [2] 熊仁钦. 顶板大面积来压破坏的机理研究 [J]. 煤炭学报, 1995, 20 (Sup.): 38 - 41.
Xiong Renqi. Investigation of mechanism of roof failure due to weighting over great extent [J]. Journal of China Coal Society, 1995, 20 (Sup.): 38 - 41.
- [3] 熊仁钦. 采场顶板大面积冒落的破坏性与防治机理 [J]. 矿山压力与顶板管理, 1995, 12 (3/4): 35 - 38.
Xiong Renqi. Roof caving destructive over great extent and its control mechanism in faces [J]. Ground Pressure and Strata Control, 1995, 12 (3/4): 35 - 38.
- [4] 宋选民. 活井旺采空区飓风灾害的理论预测与防灾工程设计 [J]. 太原理工大学学报, 2006, 37 (1): 35 - 37.
Song Xuanmin. Theory forecast of Hurricane disaster of goaf-roof caving under pillar-mining and disaster-prevention project design in Huojitu Mine [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2006, 37 (1): 35 - 37.
- [5] 周光炯, 严宗毅, 许世雄, 等. 流体力学 (第二版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 165 - 167.
Zhou Guangjiong, Yan Zongyi, Xu Shixiong, et al. Fluid mechanics (2nd) [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 165 - 167.
- [6] 息金波. 采场顶板大面积垮落的飓风灾害理论研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2006: 12 - 20.
Xi Jinbo. Theory study of hurricane disaster caused by roof caving over great extent in mining faces [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2006: 12 - 20.
- [7] 顾铁凤. 采场飓风冲击灾害分析 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 37 (1): 10 - 14.
Gu Tiefeng. Analysis of hurricane impact disaster in mining faces [J]. Journal of Liaoning Technical University, 2007, 37 (1): 10 - 14.
- [8] 郑志辉, 查支祥. 地下空间顶部塌落产生高压气浪的理论分析 [J]. 隧道建设, 2004, 24 (1): 15 - 16.
Zheng Zhihui, Cha Zhixiang. Theory analysis of high - pressure air - fluid due to roof caving under mine [J]. Tunnel Construction, 2004, 24 (1): 15 - 16.
- [9] 赵文, 任凤玉. 哑铃状两大型联通采空区岩石冒落与冲击气浪的预防 [J]. 中国矿业, 2000, 9 (3): 76 - 79.
Zhao Wen, Ren Fengyu. Roof caving of two great connected goaf similar to dumbbell-shaped and prevention of impact air-fluid [J]. China Mining Magazine, 2000, 9 (3): 76 - 79.
- [10] 郑志辉, 王秉正, 周立端. 矿石垫层消波分析实验 [J]. 中国矿业, 2004, 13 (5): 47 - 50.
Zheng Zhihui, Wang Bingzheng, Zhou Liduan. Analysis of clipped experiment by mineral cushion [J]. China Mining Magazine, 2004, 13 (5): 47 - 50.

本刊讯 根据 Ei 中国信息部发布的最新收录结果, 《煤炭学报》2008 年 6 ~ 8 期共刊出论文 73 篇, 被 Ei 收录 71 篇.