

灾变时井下大气性状突变分析^①

钟茂华 温丽敏 陈宝智

(东北大学土木工程学院安全工程系, 沈阳 110006)

陈全

(劳动部劳动保护科学研究所, 北京 100029)

摘要 应用突变理论对火灾灾变时井下大气性状的变化过程进行了研究, 建立了灾变过程大气性状的突变模型。该模型的分析结果与实际情况一致, 利用这一突变模型可确定防治火灾的各种有效措施, 确保矿山安全生产得以顺利进行。

关键词 矿井火灾 大气性状 突变分析

中图法分类号 TD752

目前, 对于灾变时矿井风流调节与控制、灾变时系统动力学特性变化规律、最佳避灾路线的选择以及火灾时矿井的主扇管理等国外已进行了大量的理论和实验研究^[1-9], 一些技术成果已达到实用程度。但对灾变时矿井大气性状突变与致灾各因子的量的关系一直是矿山安全生产急需解决的难题之一, 至今尚未被揭示。本文引入突变理论来尝试解决矿井火灾时, 井下大气性状的突变现象。突变理论是由 Thom R 等人于 1972 年创立的, 至今的 20 多年里, 突变理论已深受学术界的广泛重视, 并渗透到许多应用学科中, 成功地解决了许多用其它手段难以解决的问题(如材料破坏过程^[10], 某些化学反应进程等^[11])。研究表明: 在一定条件下, 矿井大气性状将出现突变过程, 即预示着火灾发生, 根据这一分析结果, 矿山生产过程中可及时采取适当措施使大气性状变化避免突变过程, 从而达到防止火灾发生的目的。

1 井下大气性状突变模型

井下发生火灾时, 可用下列反应式表示:



即井下可燃物 B 在空气中与氧激烈反应, BO_2 为生成物, 可燃物 B 的测量比较困难。井下灾变时反应生成物一般为 CO_2 , SO_2 和 CO 等。在矿井条件下, CO_2 易溶于水和吸附于煤体上, 当温度为 20 °C 时, 1L 水可以溶解 CO_2 873 cm^3 , 且当大气压力下降时, 采空区的 CO_2 也会大量涌出^[12]; SO_2 是不稳定气体, 它很容易与空气中的氧化合生成 SO_3 , SO_3 又很快与空气中的水蒸汽化合生成硫酸雾, 即使在井下烟雾弥漫的总回风道中, 用检知管也测不出 SO_2 , 只有在直接冒烟处才可测出^[13]; 长期的观测表明, 矿井发生内因火灾时, 其空气成分的首先变化是氧含量的减少, CO 出现的时间最晚, 而且内因火灾初期阶段 CO 的生成量较少, 运用一般的手段难以检测出。因此能比较真实反应矿井火灾发生的标志气体是氧气。大量矿井火灾统计表明, 灾变初期烟流温度急剧上升^[14], 故此, 本文选用氧含量的减少量和烟流温度的变化量作为灾变分析的重要指标。

由于井下环境的特殊性, 火区在如图 1 所示的 $O_1O_2O_3O_4$ 范围内, 进风风量为 q , 氧浓度为 c_{Af} , 火灾时火区的 O_2 浓度为 c , V 为 $O_1O_2O_3O_4$ 的体积, 烟流温度为 T_f , 围岩温度为 T_c , 根据物质和能量守恒, 可建立如下方程

① 国家“九五”科技攻关项目(专题编号: 96-918-01-02)和中国博士后科学基金项目(中博基[1996]4号)

收稿日期: 1997-07-28; 修回日期: 1988-05-18 钟茂华, 男, 28岁, 博士研究生

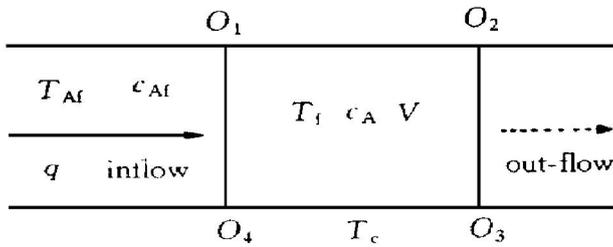


图1 矿井火灾产生区域

Fig. 1 Area of mining fire source

式^[15, 16]:

$$V \frac{dc_A}{dt'} = q(c_{Af} - c_A) - V k_0 c_A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (2)$$

$$c_p \rho V \frac{dT}{dt'} = c_p \rho q (T_f - T) - UA(T - T_c) + (-\Delta H) V k_0 c_A \exp\left(-\frac{E}{RT}\right) \quad (3)$$

式中 E 是活化能, $(-\Delta H)$ 是反应热, R 是气体常数, A 是热交换面积, ρ 是密度, T 是反应温度, t' 是时间, k_0 是反应速率常数, U 是热交换系数。在式(2)和式(3)的右端, 第一项表示进风流所带来的影响, 第二项为反应所带来的影响, 式(3)的第三项为风流与围岩的热交换带来的影响。

2 灾变时大气性状突变分析

引入下列无量纲量:

$$\frac{(c_{Af} - c_A)}{c_{Af}} \equiv x$$

$$\frac{(T - T_f)}{T_f} = y$$

$$k_0 \exp(-\gamma) t' \equiv t$$

$$\frac{(-\Delta H) c_{Af}}{c_p \rho T_f} \equiv B$$

$$\frac{(T_c - T_f)}{T_f} \equiv y_c$$

$$\frac{E}{RT} \equiv \gamma$$

$$\frac{UA}{(c_p \rho V k_0 \exp(-\gamma))} \equiv \alpha$$

$$\frac{q}{(V k_0 \exp(-\gamma))} \equiv \delta$$

式中 $0 \leq x \leq 1$, $y \geq 1$, $\alpha \geq 0$, $B > 0$, $y_c \geq 1$, $\gamma > 0$, x 是反应氧含量减少量($-\Delta O_2$)的指标, y 是反应井下大气温度变化量的指标。

于是, 式(2)和式(3)可分别简化为:

$$\dot{x} = -\delta x + (1-x) \exp\left(\frac{\gamma y}{1+y}\right) \equiv f(x, y, \delta) \quad (4)$$

$$\dot{y} = -\delta y - \alpha(y - y_c) + B(1-x) \cdot$$

$$\exp\left(\frac{\gamma y}{1+y}\right) \equiv g(x, y, \alpha, \delta) \quad (5)$$

根据突变理论可以推导出状态点(x, y)的分叉曲线满足方程(6)和(7)。

$$F(x, \alpha, \delta) \equiv \delta x - (1-x) \cdot$$

$$\exp\left[\frac{\gamma(\alpha y_c + Bx)}{\alpha \theta_c + \delta(1+Bx)}\right] = 0 \quad (6)$$

$$F_x(x, \alpha, \delta) = 0 \quad (7)$$

$$y = \frac{(\alpha y_c + \delta Bx)}{(\alpha + \delta)} \quad (8)$$

式中 $\theta_c = y_c + 1$, 即控制参数(α, δ)的变化一旦越过分叉曲线, 则系统状态将发生突变; 分叉曲线所包含的区域为鞍点集, 是状态变量所不能到达的区域, 鞍点集由式(6)和(9)确定

$$F_x(x, \alpha, \delta) < 0 \quad (9)$$

由突变理论可知, 控制参数的变化在分叉集(分叉曲线及其内部的鞍点集之和)以外的空间变化时, 系统的状态变量处于稳定状态, 系统性状不会发生大的突跳, 运行相当平稳。因此, 研究矿井火灾时, 分析井下大气性状变化越过分叉集的过程以及如何选择控制参数避免灾变发生, 对于矿井防灭火具有十分重要的意义。

由式(6)~(8)很难看出控制参数与状态变量之间的量的关系, 采用降维处理, 即把方程所确定的图形在 $\alpha = \beta \delta$ 的切面对(x, δ)平面进行投影, 如图2所示, 其中

$$\beta_{\min} = [- (8\theta_c + 4B\theta_c - B\gamma) - \sqrt{D}] / (8\theta_c^2) \quad (10)$$

$$\beta_{\max} = [- (8\theta_c + 4B\theta_c - B\gamma) + \sqrt{D}] / (8\theta_c^2) \quad (11)$$

$$D = (8\theta_c + 4B\theta_c - B\gamma)^2 + 16\theta_c^2(B\gamma - 4B - 4) \quad (12)$$

$$x_+ = \frac{[(\beta + 1)\gamma - 2(\beta\theta_c + 1)]/B}{2[(\beta + 1)\gamma + B]B} + \frac{\sqrt{B\gamma(\beta + 1)\Delta}}{2[(\beta + 1)\gamma + B]B} \quad (13)$$

$$x_- = \frac{[(\beta + 1)\gamma - 2(\beta\theta_c + 1)]/B}{2[(\beta + 1)\gamma + B]B} - \frac{\sqrt{B\gamma(\beta + 1)\Delta}}{2[(\beta + 1)\gamma + B]B} \quad (14)$$

$$x_0 = \frac{[(\beta + 1)\gamma - 2(\beta\theta_c + 1)]}{2[(\beta + 1)\gamma + B]} \quad (15)$$

$$\Delta = -4\theta_c^2\rho^2 - (8\theta_c + 4B\theta_c - B\gamma)\rho + B\gamma - 4B - 4 \quad (16)$$

把式(13), (14)和(15)分别代入式(6)可解得相应的 δ_+ , δ_- 和 δ_0 ; 由 $\alpha = \beta\delta$ 可分别解得 α_+ , α_- 和 α_0 。从图 2 中可以得出以下结论:

(1) 当 β 满足条件 $\min(\beta_{\min}, 0) < \beta < \beta_{\max}$ 时, 控制参数 δ 的微小变化将导致状态变量 x 出现一突跳, 突跳值为 Δx , 即井下大气中的氧含量的减少量 $(-\Delta O_2)$ 出现明显的突变,

标志矿井火灾的发生, 这一结果与实际情况完全吻合^[17]。导致火灾发生即 x 产生突跳的控制参数 (α, δ) 的区域(即分叉集)如图 3(a) 的阴影所示, 内弧对应 (α, δ) 的轨迹, 外弧对应 (α_+, δ_+) 的轨迹, 分叉集的左右两个极限点分别记 C_l 和 C_r ; 若 $\min(\beta_{\min}, 0) = 0$ 则右极限点 C_r 消失, 此时分叉集如图 3(b) 中的阴影所示。

(2) 若 $\beta = \beta_{\max}$ 或 $\beta = \beta_{\min}$ 时, 控制参数集 (α, δ) 的变化导致 x 的突跳值 $\Delta x = 0$, 井下大气中的 $(-\Delta O_2)$ 未出现突变; 当 β 的取值为 $\beta > \beta_{\max}$ 或 $0 \leq \beta < \beta_{\min}$ 时, 控制参数集 (α, δ) 的变化无法使 x 产生突跳, 此时 x 的波动相对平稳, 区域 $O_1O_2O_3O_4$ 处于安全状态, 因此 $\beta = \beta_{\max}$ 或 $\beta = \beta_{\min}$ 是井下大气中的 $(-\Delta O_2)$ 出现突变时 β 的临界值。

(3) 灾变时 x 的突量 Δx 不仅与通风条件有关, 还与可燃物性质以及周围环境等有关。井下发生火灾的条件是当 $\min(\beta_{\min}, 0) < \beta < \beta_{\max}$ 且控制参数 (α, δ) 的变化越过分叉集的边界, 因此生产过程中, 可根据这一条件, 选择有关设计参数、工艺条件、开采方案、通风技术, 以及防火措施来防止火灾的发生。

(4) 显然, 由式(8)可知灾变时, 氧含量减少量 $(-\Delta O_2)$ 发生突变的同时, 火区烟流温度

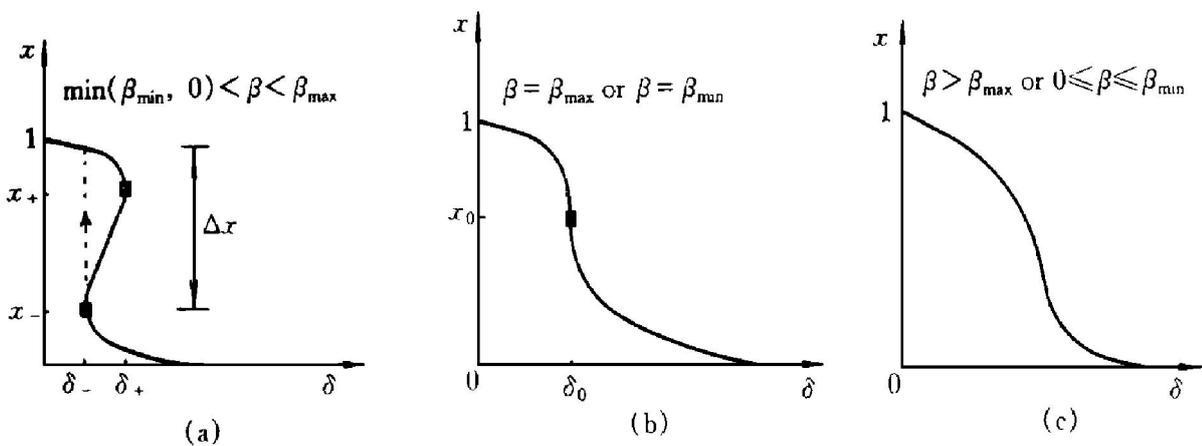


图 2 β 取不同值时的 x 与 δ 关系曲线

Fig. 2 x vs δ curves for various specified values of β

(a) $-\min(\beta_{\min}, 0) < \beta < \beta_{\max}$; (b) $-\beta = \beta_{\max}$ or $\beta = \beta_{\min}$; (c) $-\beta > \beta_{\max}$ or $0 \leq \beta < \beta_{\min}$

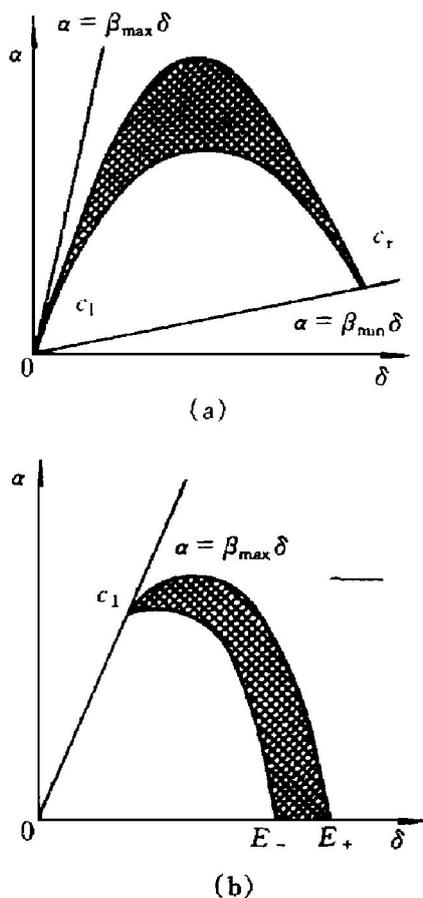


图3 控制参数空间的突变区域

Fig. 3 Catastrophe domain in the control parameter space

- (a) —Double cusp type;
- (b) —Single cusp type

也出现突变，即灾变时火区温度急激增高，温升速率明显变大。因此，生产过程中可根据大气性状突变的条件，在突变到来之前及时采取有效的通风措施，消除导致灾变发生的各种隐患，防治矿井火灾。

3 结束语

(1) 本文应用突变理论分析了灾变时火区大气中氧含量的减少量($-\Delta O_2$) 和风流温度的突变过程，其中结论对于矿井火灾的防治具有重要参考价值。

(2) 引入突变理论研究矿井火灾尚属一种尝试，更深入细致的工作如模型中参数的量化方法等还有待进一步探究。

REFERENCES

- 1 Li Husheng(李湖生). PhD thesis. Beijing: Beijing Graduate School of CUMT, 1995: 46- 66.
- 2 Zhong Maohua(钟茂华), Chen Quan(陈全) and Chen Baozhi(陈宝智). Journal of China Coal Society (煤炭学报), 1998, 23 (1): 58- 61.
- 3 Wang Yun(王云). Prevention and Control of Mine Fire(矿井火灾预防与处理). Beijing: Coal Industry Press, 1992: 319- 354.
- 4 Xie Zhikang(谢之康), Bao Qingguo(鲍庆国) and Zhu Fengshan(朱凤山). Journal of China Coal Society(煤炭学报), 1997, 22 (6): 623- 626.
- 5 Jiang Juncheng(蒋军成) and Wang Xingsheng(王省身). Journal of China Coal Society (煤炭学报), 1997, 22 (2): 165- 170.
- 6 Yuichi Nakugawa and Shir-ichiro. Mining & Safety, 1984, 30 (1): 2- 9.
- 7 Yuichi Nakugawa and Shir-ichiro. Mining & Safety, 1984, 30 (5): 225- 235.
- 8 Kataro Ohga, Kiyoshi Higuchi and Kazuyuki Mukai. Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, 1997, 113 (9): 683- 387.
- 9 Kataro Ohga, Kiyoshi Higuchi and Atsushi Shibahara. Journal of the Mining and Materials Processing Institute of Japan, 1997, 113 (11): 811- 816.
- 10 Deinigo V N and Milenin G V. Engineering Simulation, 1995, 12 (2): 257- 262.
- 11 Krokidis Xenophon, Nouty Stephane and Silvi Bernard. Journal of Physical Chemistry. 1997, 101 - A (39): 7277- 7282.
- 12 Wang Xingsheng(王省身) and Zhang Guoshu(张国枢). Prevention of Mining Fire(矿井火灾防治). Xuzhou: Press of CUMT, 1990: 46- 51.
- 13 Wu Chao(吴超) and Meng Tingrang(孟廷让). Theory and Technology for Control of the Mine Spontaneous Combustion of Sulphide Ores(高硫矿井内因火灾防治理论与技术). Beijing: Metallurgical Industry Press, 1995: 64- 68.
- 14 Zhang Xingkai(张兴凯). PhD thesis. Shenyang: Northeastern University, 1993: 78- 89.
- 15 Uppal A, Ray W H and Poore A B. Chemical Engineering Science. 1976, 31 (2): 205- 214.
- 16 Matusubara M, Watanabe N and Shimizu K. Int J

Systems Sci, 1989, 39 (2): 339– 362.
17 Wu Zhongli(吴中立). Mining Ventilation and Safe-

ty(矿井通风与安全). Xuzhou: Press of CUMT,
1989: 376– 378.

ANALYSIS FOR CATASTROPHE OF MINE ATMOSPHERIC PROPERTIES DURING FIRE

Zhong Maohua, Wen Limin and Chen Baozhi

*Department of Safety Engineering, School of Civil Engineering,
Northeastern University, Shenyang 110006, P. R. China*

Chen Quan

*National Institute for Occupational Safety and Health,
China Ministry of Labour, Beijing 100029, P. R. China*

ABSTRACT Using catastrophe theory, the change of mine atmospheric properties during underground mine fire was studied, its catastrophe model was constructed, and the results of this model correspond with the fact. According to the model many efficient measures to prevent and eliminate mine fire can be chosen so that regular mining production may proceed in safety state.

Key words mine fire atmospheric properties catastrophe analysis

(编辑 何学锋)