

文章编号: 0253 - 9993 (2005) 06 - 0685 - 05

大倾角煤层开采 “顶板 - 支护 - 底板” 系统的动力学方程

伍永平

(西安科技大学 能源学院, 陕西 西安 710054)

摘 要: 基于 W & Kane 原理, 利用 Lagrange 动力学理论, 得到 “R - S - F (顶板 - 支护 - 底板)” 系统动力学一般方程. “R - S - F” 系统动力学方程中包含了煤层赋存特征、工作面围岩变形与破断特征、支架 (支护系统) 构成特征等主要参数, 利用该方程能够对 “R - S - F” 系统在任意时刻的运动特征进行描述和分析.

关键词: 大倾角煤层; 开采; 动力学方程

中图分类号: TD823.21 **文献标识码:** A

Dynamic equation of system “roof (R) - support (S) - floor (F)” in steeply dipping seam mining

WU Yongping

(School of Energy Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: On the basis of W & Kane's principle, the dynamic equation of system “R - S - F” in general was received by Lagrange dynamics theory. Usually, the main parameters, such as features of coal seam, characteristics of surrounding rock deformation and breakup, traits of support (supporting system) component were included in the equation. So the motion characteristics of system “R - S - F” were analyzed and described in any period.

Key words: steeply dipping seam; mining; dynamic equation

1 动力学模型及其特征

大倾角煤层走向长壁工作面开采时, 由顶板破断岩块 (R)、工作面支架及设备 (S) 和底板破坏滑移体 (F) 构成的 “支架 - 围岩 (R - S - F) 系统” 是一个非稳态系统, 在工作面推进过程中, 该系统会出现 “顺向倾倒”、“逆向侧翻” 和 “错动滑落” 3 种失稳形式, 导致围岩灾变, 引发工作面生产与安全事故. 研究表明^[1], 通过对围岩灾变类型的分析, 结合生产实践, 可以建立 “R - S - F” 系统动力学模型, 如图 1 所示, 图中 Q , Q_r , Q_s , Q_f 分别为上覆岩层重量 (荷载)、顶板破断岩块重量、工作面支架重量 (包括设备分摊重量) 和底板滑移体重量; T_r , T_s 分别为顶板破断岩块、相邻支架间的作用力; R 为顶板破断岩块对深部围岩的作用力; P 为支架 (支护系统) 的工作阻力; h 为支架高度; h_a 为破断顶板厚度. 该模型具有如下特征: R 为直接位于工作面支架之上的顶板 (直接顶或直接顶的大部分), 与顶板

收稿日期: 2005 - 05 - 10

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划项目 (90210012); 陕西省重点实验室研究计划项目

作者简介: 伍永平 (1962 -), 男, 陕西汉中, 教授, 博士生导师. Tel: 029 - 85583272, E - mail: Wuyup@xust.edu.cn

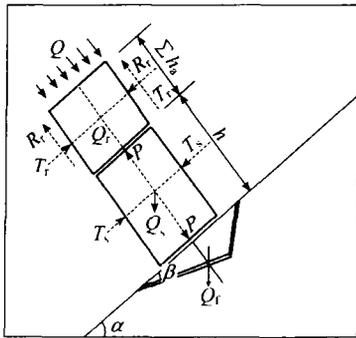


图 1 “R - S - F”系统特征模型

Fig.1 The characteristic model of system “R - S - F”

岩层完全分离且沿岩层面方向上具有产生运动的空间，在沿垂直岩层面方向运动的同时出现沿倾斜方向的运动。顶板上覆岩层（除破断岩块外更深层次的顶板岩层）对 R 的作用以载荷的形式出现，与破断岩块同一层次的相邻围岩对其约束视为弹塑性对称约束^[2]，在工作面正常推进过程中，破断顶板上覆岩层提供的围岩深部荷载由约束产生的约束反力平衡，在初次来压和周期来压期间，这部分围岩荷载由“R - S - F”系统中 S 所提供的支护阻力平衡。S 在工作面沿走向推进过程中出现沿倾斜方向的滑动，当工作面所有支架构成的支护系统表现出相同的运动趋势时，其架间约束可简化为对称约束。R 对 S 施加荷载，S 以工作阻力的方式给 R 提供约束。F 为底板变形

和破坏后产生的滑移体，与底板母体（更深层底板岩体）完全脱离，并沿由结构面形成的滑移面滑移，底板岩体对其作用以弹塑性约束形式表现^[3]。S 给 F 施加荷载，F 提供给 S 约束反力。F 的形状多为楔形体或平行四边形，根据现场观测，取楔形体为底板滑移块（体）形状。R, S, F 系统中的 R 与 S 之间、S 与 F 之间具有位移和荷载耦合效应^[4]（变形与运动协调）。

2 “R - S - F”系统的拉氏函数 L 及其微分

在图 1 中分别取 R, S, F 分离体，利用 Lagrange 动力学理论^[5]，可以得到“R - S - F”系统的 Lagrange 函数为

$$L = T - U = \frac{1}{2}m_f \dot{x}_f^2 + \left(\frac{1}{2} + \frac{2}{3}\cos^2\right)m_s(\dot{x}_f^2 + \dot{x}_s^2 + 2\dot{x}_f\dot{x}_s\cos) + \frac{1}{2}m_r[\dot{x}_f^2 + (\dot{x}_s + \dot{x}_r)^2 + 2\dot{x}_f(\dot{x}_s + \dot{x}_r)\cos] + [(Q_f + Q_s + Q_r)x_f \sin + (Q_r + Q_s)x_s \sin + Q_r x_r \sin + Q_f x_f \sin], \quad (1)$$

式中，T 为“R - S - F”系统动能（包括支架侧翻与倾倒）；U 为“R - S - F”系统势能； m_r, m_s, m_f 分别为顶板破断岩块、工作面支架和底板滑移体的质量。

利用 $\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)$ ($i=1, 2, 3$)，对 L 进行微分（包含求导），可得

$$\begin{cases} \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_f}\right) = m_f \ddot{x}_f + \left(1 + \frac{4}{3}\cos^2\right)m_s(\ddot{x}_f + \ddot{x}_s \cos) + m_r[\ddot{x}_f + (\ddot{x}_s + \ddot{x}_r)\cos], \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_s}\right) = \left(1 + \frac{4}{3}\cos^2\right)m_s(\ddot{x}_s + \ddot{x}_f \cos) + m_r(\ddot{x}_s + \ddot{x}_r + \ddot{x}_f \cos), \\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_r}\right) = m_r(\ddot{x}_s + \ddot{x}_r + \ddot{x}_f \cos). \end{cases} \quad (2)$$

利用 $\frac{\partial L}{\partial q_i}$ ($i=1, 2, 3$) 对 L 进行微分，可得

$$\begin{cases} \frac{\partial L}{\partial x_f} = (Q_f + Q_s + Q_r)\sin + Q \sin, \\ \frac{\partial L}{\partial x_s} = (Q_s + Q_r)\sin, \\ \frac{\partial L}{\partial x_r} = Q_r \sin. \end{cases} \quad (3)$$

3 “R - S - F”系统广义力

(1) 错动滑落失稳 当 S 的运动（趋向）先于 R, F, 系统有可能出现错动（支架超前）型失稳。此

时，组成的“R - S - F”系统的特点是工作面支架的运动超前于顶板破断岩块和底板滑移体，即 $\ddot{x}_s > \ddot{x}_r$, $\ddot{x}_s > \ddot{x}_f$ (图 2 (a)).

(2) 顺向倾倒失稳 当 F 的运动 (趋向) 先于 S, R, 系统有可能出现顺向失稳. 此时，组成的“R - S - F”系统的特点是工作面底板滑移体的运动超前于工作面支架，工作面支架的运动先于顶板破断岩块，即 $\ddot{x}_r < \ddot{x}_s < \ddot{x}_f$ (图 2 (b)).

(3) 逆向侧翻失稳 当 R 的运动 (趋向) 先于 S, S 的运动 (趋向) 先于 F, 系统有可能出现逆向失稳. 此时，组成的“R - S - F”系统的特点是工作面顶板破断岩块的运动超前于工作面支架，工作面支架的运动先于底板滑移体 (块)，即 $\ddot{x}_r > \ddot{x}_s > \ddot{x}_f$ (图 2 (c)).

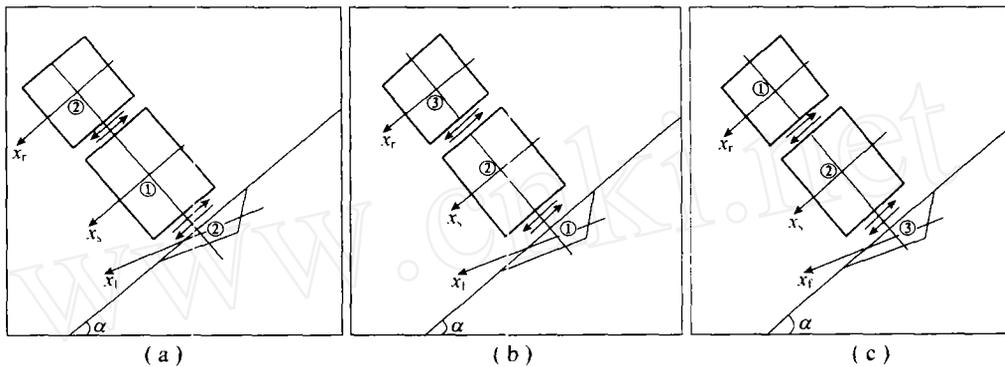


图 2 系统广义力分析模型

Fig. 2 The analysis model of generalized force in system “R - S - F”

(a) 错动滑落失稳; (b) 顺向倾倒失稳; (c) 逆向侧翻失稳

由 Lagrange 理论中的 $Q_i = \frac{1}{r_i} F_i$ 和“支架 - 围岩”相互作用原理，可求得“R - S - F”系统在不同运动状态下 (图 2) 的广义力。

$$\begin{cases} Q_r^1 = \mu (P^* + m_r \ddot{x}_f \sin \alpha), \\ Q_s^1 = -\mu [2P^* + Q_s \cos \alpha + (2m_r + m_s) \ddot{x}_f \sin \alpha], \\ Q_f^1 = [P^* + Q_s \cos \alpha + (m_r + m_s) \ddot{x}_f \sin \alpha] [(1 - \mu_1) \cos \alpha + \mu_2 \sin \alpha] - \mu Q_f \cos(\alpha - \beta). \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Q_r^2 = \mu (P^* + m_r \ddot{x}_f \sin \alpha), \\ Q_s^2 = \mu [Q_s \cos \alpha + m_s \ddot{x}_f \sin \alpha], \\ Q_f^2 = -[P^* + Q_s \cos \alpha + (m_r + m_s) \ddot{x}_f \sin \alpha] [(1 + \mu_1) \cos \alpha - \mu_2 \sin \alpha] - \mu Q_f \cos(\alpha - \beta). \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} Q_r^3 = -\mu (P^* + m_r \ddot{x}_f \sin \alpha), \\ Q_s^3 = -\mu (Q_s \cos \alpha + m_s \ddot{x}_f \sin \alpha), \\ Q_f^3 = [P^* + Q_s \cos \alpha + (m_r + m_s) \ddot{x}_f \sin \alpha] [(1 - \mu_1) \cos \alpha + \mu_2 \sin \alpha] - \mu Q_f \cos(\alpha - \beta). \end{cases} \quad (6)$$

其中， μ_1, μ_2, μ_3 分别为底板滑移体与深层底板岩体、支架与底板滑移体、支架与顶板破断岩块间的摩擦因数； P^* 为支架的 (支护系统) 额定阻力； μ 为系数；其中 $\mu = \mu_2 = \mu_3, \mu = \mu_1$ ；上标“1”为错动滑落失稳状态；上标“2”为顺向倾倒失稳状态；上标“3”为逆向侧翻失稳状态。

4 “R - S - F”系统的 Lagrange 动力学方程

4.1 平行岩层层面向

基于 R - W & Kane 原理，利用 $\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tilde{Q}_i, (i=1, 2, 3)$ ，可得“R - S - F”系统在不同运

动状态下沿层面方向的动力学微分方程.

(1) 工作面支架 (S) 的运动先于顶板破断岩块 (R) 和底板滑移体 (F), 即

$$\left\{ \begin{aligned} & \{m_f + [(1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha) + (-1) \mu \sin \alpha \cos \alpha - \sin^2 \alpha] m_s + [\cos \alpha + (-1) \mu \sin \alpha \cos \alpha - \\ & \quad \sin^2 \alpha] m_r\} \ddot{x}_f + [1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha] m_s + m_r \} \ddot{x}_s \cos \alpha + m_r \ddot{x}_r \cos \alpha = Q \sin \alpha + (Q_r + Q_s + \\ & \quad Q_f) \sin(\alpha - \beta) - \mu Q_f \cos(\alpha - \beta) - (P^* + Q_s \cos \alpha) [(1 - \mu) \cos \alpha + \sin \alpha], \quad (7) \\ & [(1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha) \cos \alpha + \mu \sin \alpha] m_s + (\cos \alpha + 2\mu \sin \alpha) m_r \} \ddot{x}_f + [(1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha) m_s + m_r \} \ddot{x}_s + \\ & \quad m_r \ddot{x}_r = Q_r \sin \alpha + Q_s (\sin \alpha - \mu \cos \alpha) - 2\mu P^*, \\ & (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) m_r \ddot{x}_f + m_r \ddot{x}_s + m_r \ddot{x}_r = Q_r \sin \alpha + \mu P^*. \end{aligned} \right.$$

(2) 底板滑移体 (F) 运动先于工作面支架 (S)、工作面支架运动先于顶板破断岩块 (R), 即

$$\left\{ \begin{aligned} & \{m_f + [(1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha) + (1 + \mu) \sin \alpha \cos \alpha - \sin^2 \alpha] m_s + [\cos \alpha + (1 + \mu) \sin \alpha \cos \alpha - \\ & \quad \sin^2 \alpha] m_r\} \ddot{x}_f + [(1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha) m_s + m_r \} \ddot{x}_s \cos \alpha + m_r \ddot{x}_r \cos \alpha = Q \sin \alpha + (Q_r + Q_s + \\ & \quad Q_f) \sin(\alpha - \beta) - \mu Q_f \cos(\alpha - \beta) - (P^* + Q_s \cos \alpha) [(1 + \mu) \cos \alpha - \sin \alpha], \quad (8) \\ & [(1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha) \cos \alpha - \mu \sin \alpha] m_s + m_r \cos \alpha \} \ddot{x}_f + [(1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha) m_s + m_r \} \ddot{x}_s + \\ & \quad m_r \ddot{x}_r = Q_r \sin \alpha + Q_s (\sin \alpha + \mu \cos \alpha), \\ & (\cos \alpha - \mu \sin \alpha) m_r \ddot{x}_f + m_r \ddot{x}_s + m_r \ddot{x}_r = Q_r \sin \alpha + \mu P^*. \end{aligned} \right.$$

(3) 顶板破断岩块 (R) 运动先于工作面支架 (S)、工作面支架运动先于底板滑移体 (F), 即

$$\left\{ \begin{aligned} & \{m_f + [(1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha) + (1 - \mu) \sin \alpha \cos \alpha + \sin^2 \alpha] m_s + [\cos \alpha + (1 - \mu) \sin \alpha \cos \alpha + \\ & \quad \sin^2 \alpha] m_r\} \ddot{x}_f + [(1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha) m_s + m_r \} \ddot{x}_s \cos \alpha + m_r \ddot{x}_r \cos \alpha = Q \sin \alpha + (Q_r + Q_s + \\ & \quad Q_f) \sin(\alpha - \beta) - (P^* + Q_s \cos \alpha) [(1 - \mu) \cos \alpha + \sin \alpha] - \mu Q_f \cos(\alpha - \beta), \\ & [(1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha) \cos \alpha + \mu \sin \alpha] m_s + m_r \cos \alpha \} \ddot{x}_f + [(1 + \frac{4}{3} \cos^2 \alpha) m_s + m_r \} \ddot{x}_s + m_r \ddot{x}_r = Q_r \sin \alpha + \\ & \quad Q_s (\sin \alpha - \mu \cos \alpha), \\ & (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) m_r \ddot{x}_f + m_r \ddot{x}_s + m_r \ddot{x}_r = Q_r \sin \alpha - \mu P^*. \end{aligned} \right. \quad (9)$$

4.2 垂直岩层层面向

$$\left\{ \begin{aligned} & m_r \ddot{y}_r = - (P^* - Q_r \cos \alpha) = Q_r \cos \alpha - P^*, \\ & m_s \ddot{y}_s = g(Q_s, P^*, K^*, E), \\ & m_f \ddot{y}_f = (P^* + Q_s \cos \alpha) \cos \alpha - Q_f \cos(\alpha - \beta), \end{aligned} \right. \quad (10)$$

式中, K^* 为“R-S-F”系统刚度方程, $K^* = h(k_s, k_r, k_f)$; E 为“R-S-F”系统的变形模量. 式 (10) 为“R-S-F”系统垂直岩层层面的动力学微分方程.

5 讨 论

(1) 式 (7) ~ (10) 为大倾角煤层走向长壁工作面开采的“R-S-F”系统动力学一般方程, 利用该方程, 可以从理论上确定“R-S-F”系统或该系统中某一构成部分在工作面推进过程中任何时刻的位

态(位置与运动状态)。通过对“R-S-F”系统任意时刻位态分析,以稳定性控制为目的,可以得出工作面支护系统(支架)的工作阻力,从而为大倾角煤层走向长壁开采综采支架(支护系统)的设计奠定理论基础。

(2) 由于“R-S-F”系统动力学一般方程中包括了煤层倾角、底板滑移体形状与夹角、工作面上覆岩层荷载、顶板破断岩层、工作面支架与设备、底板滑移体质量,支架(支护系统)工作阻力、支架与顶底板间和滑移体与深部围岩间的摩擦因数,“R-S-F”系统刚度方程和变形模量等诸多参数,其求解在理论上存在,但实际求解难度极大,必须根据生产实际进行必要的简化,求取特解。

(3) “R-S-F”系统的约束条件在动力学模型特征中已经进行了必要的描述,并已经应用于系统模型构成之中。“R-S-F”系统的初始条件则应依据现场实际中对工作面顶板、底板和支护系统(支架与设备)的工况而定,可以是循环条件,也可以是其他时间或空间条件。

(4) 工作面支架(支护系统)工作阻力是动力学方程的主要构成因子之一,由于支架(支护系统)工作阻力是可以通过设计、制造等环节进行调整的因子(变量),故为大倾角煤层走向长壁开采工作面围岩控制(“支架-围岩”系统稳定性)和该类煤层支架(支护系统)设计与分析提供了一种新的方法(该设计方法与其应用将在另文中给出)。

参考文献:

- [1] 伍永平. 大倾角煤层开采“顶板-支护-底板”系统稳定性及动力学模型 [J]. 煤炭学报, 2004, 29 (5): 527 ~ 531.
- [2] 胡振东, 洪嘉振. 刚柔耦合系统动力学建模及分析 [J]. 应用数学与力学, 1999 (10): 5 ~ 8.
- [3] 曾庆元. 弹性系统动力学总势能不变原理 [J]. 华中理工大学学报, 2000 (1): 32 ~ 37.
- [4] 陈守吉, 罗惟德. 基础力学 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1989. 215 ~ 223.
- [5] 王志远. 应用分析动力学 [M]. 北京: 人民教育出版社, 1981. 66 ~ 112.

2006年《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》(《煤炭学报》英文版) 征订启事

《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》是中国煤炭学会主办的刊物,是向国内外公开发行的英文版煤炭科学技术方面的综合性学术刊物。主要刊载煤田地质与勘探、煤矿开采、矿山测量、矿井建设、煤矿安全、煤矿机械工程、煤矿电气工程、煤炭加工利用、煤矿环境保护等方面的科研成果论著和学术论文,以及煤矿生产建设、企业管理经验的理论总结,也刊载重要学术问题的讨论及国内外煤炭科学技术方面的学术活动简讯。

《煤炭学报》英文版《JOURNAL OF COAL SCIENCE & ENGINEERING (CHINA)》是向世界传播我国煤炭科技的重要媒体,对加强中外科学技术交流,宣传我国煤炭科学成就,提高我国煤炭科学技术的国际地位将起到重要的作用。及时报道我国煤炭科技新理论、新技术、新经验也是《煤炭学报》英文版的主要任务。《煤炭学报》英文版和中文版具有不同的刊登内容和各自的特点。

《煤炭学报》英文版是半年刊,每年6月和12月出版。每期112页,每册国内订价20元,全年共收费40元。订阅者可直接和本编辑部联系,订单函索即寄,编辑部随时办理订阅手续。

本刊地址:北京市和平里煤炭科学研究总院内《煤炭学报》编辑部

邮政编码:100013,联系电话:(010) 84262930 E-mail: mtxbjp@126.com, mtxb@vip.163.com