

- 国家自然科学基金重大项目“西部能源利用及其环境保护的若干关键问题”(90210012)
- 教育部“新世纪优秀人才支持计划”(JCET-05-973)
- 陕西省重点实验室重点科研计划(ZY02020)

资助

大倾角煤层开采

“R-S-F”系统动力学 控制基础研究

伍永平 著

陕西科学技术出版社

国家自然科学基金重大研究计划“西部能源利用
及其环境保护的若干关键问题”(90210012)
教育部“新世纪优秀人才支持计划”(NCET-04-972)
陕西省重点实验室重点科研计划(ZY02020)

资助

大倾角煤层开采“R-S-F”系统 动力学控制基础研究

伍永平 著

陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

大倾角煤层开采“R-S-F”系统动力学控制基础研究/伍永平著. —西安:陕西科学技术出版社, 2006. 3

ISBN 7-5369-4076-9

I. 大... II. 伍... III. 倾斜煤层—煤矿开采—研究 IV. TD823.21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 018584 号

出版者 陕西科学技术出版社

西安北大街 131 号 邮编 710003

电话 (029) 87211894 传真 (029) 87218236

<http://www.snstp.com>

发行者 陕西科学技术出版社

电话 (029) 87212206 87260001

印刷 陕西丰源印务有限公司

规格 850mm × 1168mm 1/32 开本

印张 6.25

字数 130 千字

版次 2006 年 3 月第 1 版

2006 年 3 月第 1 次印刷

定价 15.00 元

版权所有 翻印必究

摘 要

当煤层倾角大于 35° 且采用走向长壁工作面开采时,顶板冒落矸石沿工作面倾斜方向的非均匀充填和约束作用使得支承压力分布规律和围岩变形、垮落具有明显的非对称性和时序性,同时导致底板出现破坏、滑移和支架与设备下滑、倾倒,由此构成的“R-S-F”(顶板破断岩块-支架-底板破坏滑移体)系统在工作面推进过程中板易出现动态失稳而引发围岩灾变,造成生产或安全事故。当煤层倾角大于 55° 时,“R-S-F”系统的上述特征更加突出,传统意义上的走向长壁开采方法亦不再适用,因此可定义倾角 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 的煤层为大倾角煤层。

大倾角煤层走向长壁工作面开采方法与装备研究由于其矿压显现和围岩破断活动的复杂性而进展缓慢,较少见到国外主要产煤国家在此方面的专门文献,我国目前的研究、试验与使用水平处于国际该领域的前沿。

现场实测、实验室研究和理论分析表明,大倾角煤层走向长壁工作面安全、高效开采的关键是对围岩的有效控制,面围岩控制的难点在于“R-S-F”系统的稳走性,本文通过对引发围岩灾变因素的分析,提出了“R-S-F”系统在工作面推进过程中 R、S、F 之间可能出现的错动、顺向和逆向动态失稳的三种模式,以此为基础建立了“R-S-F”系统动力学分析模型,利用 R-W & Kane 原

理和 Lagrange 理论建立了“R-S-F”系统的动力学一般方程。在研究求解可行性后,对一般方程进行了简化,并根据生产实际中对工作简顶板和支架控制的基本要求给出了初始和边界条件,从而得到了方程的特解。

大倾角煤层走向长壁工作面开采过程中“R-S-F”系统的受载和变形应满足动态耦合方程,由此提出了 R、S、F 相互之间在工作面推进过程中应保持运动速度相等、建度梯度为零的动态稳走性概念,并得到了在不同的失稳状态和接触介质条件时“R-S-F”系统中的主导因子 S 的工作阻力的分析与计算方法。

大倾角煤层走向长壁工作面“R-S-F”系统动态稳走性控制的基础是 F,关键是 S,目的是 R,由于在 R、S、F 之中只有 S 是人为可控且对 R、F 均具有约束(控制)作用的因素,因此,可通过对 S 的设计与调整来实现对“R-S-F”系统的整体稳走性进行控制,从而达到减少或防止围岩灾变,保证安全生产的目的。

书中给出的在陕而省岩层控制重点实验室所进行的实验研究和在四川华蓥山矿务局绿水洞煤矿 6134 和 5634 工作面进行的现场工业性试验实例也表明“R-S-F”系统动态稳走性理论分析的结果与传统分析方法具有很好的耦合性,符合生产实际,取得了良好的技术经济效益。

关键词 稳定性 动力学 “R-S-F”系统 走向长壁工作面 大倾角煤层

研究类型 理论研究

主要符号索引表

- b ——工作面支架宽度, m;
 C_s, C_r ——工作面支架(或支护体)循环滑移、顶板破断岩块沿层面位移控制量;
 D_r ——顶板破断岩块垂直层面方向位移控制量;
 E ——变形模量;
 F ——底板破坏滑移体;
 h ——工作面支架高度, m;
 $\Sigma h_d, \Sigma h_b$ ——工作面直接顶、基本顶厚度, m;
 $\Sigma h'_{\max}, \Sigma h_{\max}$ ——直接顶最大垮落高度, m;
 J_s ——支架翻转(倾倒)转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;
 K ——“R-S-F”系统安全系数;
 k_f, k_s, k_r ——刚度系数;
 L ——工作面长度, m;
 m_f, m_s, m_r ——F、S、R的质量, kg;
 P_0, P ——支架设计初撑力、工作阻力, kN;
 P_j^*, P_s ——S在平行和垂直层面方向的工作阻力, kN;
 $P_j, P_j^*, P_j', [P_j]$ ——支架工作阻力、移架阻力、残余阻力, 实际工作阻力, kN;
 Q_f, Q_s, Q_r ——F、S、R的重量, kN;
 Q_i ——广义力, N;
 R ——顶板破断岩块;
 S ——工作面支架;
 T, T_f, T_s, T_r, T_{st} ——F、S、R的动能(包括转动), J;

$U, U_q, U_f, U_s, U_r, U_{q0}, U_{f0}, U_{s0}, U_{r0}$ ——上覆岩层荷载及 F、S、R 的势能, J;

W_{ij}, W_{ji} ——系数函数;

x_f, x_s, x_r ——F、S、R 在平行岩层层面方向的位移, m;

y_f, y_s, y_r ——F、S、R 在垂直岩层层面方向的位移, m;

$\dot{x}_f, \dot{x}_s, \dot{x}_r (V_f, V_s, V_r)$ ——F、S、R 在平行岩层层面方向的速度, m/s;

$\ddot{x}_f, \ddot{x}_s, \ddot{x}_r$ ——F、S、R 在平行岩层层面方向的加速度, m/s^2 ;

$\dot{y}_f, \dot{y}_s, \dot{y}_r$ ——F、S、R 在垂直岩层层面方向的速度, m/s;

$\ddot{y}_f, \ddot{y}_s, \ddot{y}_r$ ——F、S、R 在垂直岩层层面方向的加速度, m/s^2 ;

$\alpha, [\alpha_r]$ ——煤层倾角和极限倾角($^\circ$);

β ——滑落体与底板岩层夹角, ($^\circ$);

γ ——R、S 与 F 运动方向之间的夹角, ($^\circ$);

φ ——支架翻转(倾倒)角, ($^\circ$);

θ_j ——的空间非均衡运动转角, ($^\circ$);

$\omega, (\dot{\varphi})$ ——支架翻转(倾倒)角速度, rad/s^2 ;

μ ——摩擦系数;

λ, η ——系数;

ζ ——R 与 S 质量之比;

χ ——直接顶与基本顶厚度之和与直接顶厚度之比;

ρ_n ——耦合系数。

ABSTRACT

When coal seam pitch is more than 35° and longwall caving method along the strike is used, the irregular stowing and binding action of waste from breakage roof along face pitch direction of longwall leads not only abutment pressure distribution and surrounding rock deformation and falling have evident unsymmetrical and time sequence, but also floor fracture and sliding, supports and equipments sliding down or rolling - over at the same time, and system "R - S - F" (roof fracture block - support - floor sliding block) which consists of characteristics above appears dynamic destabilization easily, brings about surrounding rock catastrophes, and causes incidents of safety in production. When coal seam pitch is more than 55° , the characteristics of system "R - S - F" above are more conspicuous and traditional regular longwall along strike (slant arrangement) is not applicable. So the coal seam which pitch is between $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ can be defined as steeply dipping seam.

The study on mining methods and equipments of longwall along strike makes less progress in main overseas countries of coal production owing to the complexity of strata be-

haviors and the features of surrounding rock fracture and movements, and we can seldom see the specialized documents or papers in that field recently. Our country's level in research and test as well as application is world advanced at present.

The facts from site test, experimental study and theoretical analysis make clear that the key of longwall mining along strike safely and efficiently is efficacious controlling of surrounding rock, and the difficult points of surrounding rock controlling are dynamic stability of system “R-S-F”. In the monograph author puts forward three patterns may cause system “R-S-F” destabilization, such as dislocation, consequentiality and retrogradation among R, S and F in the process of longwall face advancing. Then based on that, the author sets up analysis dynamic model of system “R-S-F” and obtains general dynamics formulas of system “R-S-F” by the R-W&Kane's principle and Lagrange's theory. After a feasibility study, the general dynamics formulae are simplified, initial and boundary conditions are given according to the basic requirements of roof and equipments controlling and particular solutions of the formulae are gotten.

Because of deformation and load features of system “R-S-F” in longwall face mining of steeply dipping seam should satisfy dynamic coupling equation, the works ad-

vances the dynamic stability concept which keeps their velocity equal and acceleration zero in the mining process, and gets the analyzing and calculating methods of working resistance of S (face supports) which is the leading factor of system "R - S - F" when the system is under different destabilization and contact conditions.

The foundation of dynamic stability controlling of system "R - S - F" of longwall face in steeply dipping seam mining is F, the key is S, and the goal is R. Among R, S and F, not only S is the factor which may be controlled but also has hinding action to R and F, so we can carry out the systemic stability controlling of system "R - S - F" and achieve the goal that cuts down or protects surrounding rock catastrophe and ensures safety in production.

The test example of face 6134 and 5634 of Lushuidong colliery, Huaying Mining Administration, Sichuan province, and the experimental results which obtained in Shaanxi Key Laboratory of Strata Control makes known the results from the theory of system "R - S - F" dynamic stability analysis comple closely with ones of traditional analysis ways, and tally with actual situation in production and win good technology and economic returns.

Key words Stability, Dynamics, System R - S - F, Longwall face along strike, Steeply dipping seam

目 录

摘要

ABSTRACT

主要符号索引表

1 绪论	(1)
1.1 大倾角煤层开采是我国现阶段煤炭工业发展的 重大技术难题	(1)
1.2 大倾角煤层开采对煤矿安全提出了更高的要求 和更深入的问题	(2)
1.3 我国煤矿开采大倾角煤层所付出的艰辛努力	(4)
1.4 大倾角煤层开采的出路在于机械化,机械化开 采的关键是“R-S-F”系统稳定性控制	(10)
1.5 大倾角煤层机械化(综合机械化)开采 “R-S-F”系统研究的主要内容	(21)
1.6 选题的目的与意义	(23)
1.7 研究关键(创新点)	(24)
1.8 研究方法(与实验(试验)方案	(25)
小结	(26)
2 大倾角煤层走向长壁工作面开采矿压显现和围岩破断 活动规律	(27)
2.1 大倾角煤层走向长壁开采矿压显现规律	(27)
2.2 大倾角煤层走向长壁开采顶板活动的新特点	(33)

2.3	大倾角煤层走向长壁开采底板破坏滑移加剧了 “支架-围岩”系统的不稳定性	(40)
2.4	支护体如果不能有效控制底板,反而会使 “支架-围岩”系统更易失稳	(44)
2.5	“R-S-F”系统研究的本质	(44)
	小结	(45)
3	大倾角煤层走向长壁开采“R-S-F”系统稳定性的 基本概念	(47)
3.1	“R-S-F”系统的稳定性是大倾角煤层开采和 岩层控制的技术基础	(47)
3.2	支护系统的静态稳定性及其与围岩相互作用	(48)
3.3	大倾角煤层“R-S-F”系统的灾变因素	(52)
3.4	“R-S-F”系统的失稳类型	(54)
3.5	“R-S-F”系统动力学模型的建立	(58)
	小结	(60)
4	“R-S-F”系统动力学方程的求解与分析	(62)
4.1	系统分析模型	(62)
4.2	系统势能 U	(64)
4.3	系统动能 T	(64)
4.4	系统的动力学方程	(67)
	小结	(82)
5	“R-S-F”系统动态稳定性分析及其控制	(83)
5.1	“R-S-F”系统动态稳定性的模念	(83)
5.2	“R-S-F”系统耦合条件	(84)
5.3	动态控制影响因子分析	(85)
5.4	“R-S-F”系统动态稳定性控制模式与方法	

.....	(98)
5.5 生产实践中需解决的关键技术问题	(103)
小结	(108)
6 “R-S-F”系统动态稳定性实验研究	(109)
6.1 实验模型	(109)
6.2 实验内容	(116)
6.3 实验过程与主要结果分析	(116)
6.4 实验结论	(134)
小结	(136)
7 大倾角煤层走向长壁工作面开采“R-S-F”系统动态 稳定性现场试验	(137)
7.1 绿水洞煤矿大倾角煤层综采的成功实践	(137)
7.2 工作面支护装备选型及工艺特征	(140)
7.3 大倾角煤层综采的关键工艺技术	(142)
7.4 矿山压力监测	(154)
7.5 试验发现与技术和经济效果	(158)
小结	(160)
8 结论及展望	(162)
参考文献	(171)
致谢	

1 绪 论

1.1 大倾角煤层开采是我国现阶段煤炭工业发展的重大技术难题

近年来,大倾角煤层开采在我国越来越引起采矿界的重视,原因有两个方面:

一是我国西部赋存有大量 35° 以上的大倾角煤层。虽然大倾角或急倾斜煤层在全国只占 15% ~ 20% 的储量,但西部矿区 50% 以上的矿井开采有大倾角煤层,如主要产煤省(区)的面川、重庆、云南、贵州、新疆、甘肃、宁夏等,大倾角(急倾斜)煤层是许多矿区或矿井的主采煤层。随着 21 世纪我国矿产资源开采重点西移,煤炭资源开发已成为西部地区区域经济发展的重要支柱,显然,对大倾角煤层开采的研究将是西部煤炭开采的重大课题。

二是多年的开采已经使在东部矿区赋存条件“优越”的煤层储量越来越少,随着煤矿开采强度的不断加大,特别是近年来快速发展的高产高效技术,已经使大部分矿区浅部开采条件好的储量在较短的服务年限内接近枯竭,促使大倾角煤层的开采问题迅速进入人们的视野,

并引起高度重视,如山东兖州矿区、河北邢台矿区和开滦矿区、安徽淮南和淮北矿区、江苏徐州矿区等,在这些矿区内的许多矿并不得不由条件相对“优越”煤层开采转向复杂的大倾角煤层开采,很显然,要保持这些矿区高产高效和可持续发展就必须解决大倾角煤层的开采问题。

由于大倾角煤层开采目前的发展水平远低于缓倾斜煤层,存在着一系列没有解决的基本技术难题,因而研究大倾角煤层的开采方法,特别是岩层控制理论与技术就成为了既非常必要又十分迫切的重大课题。

1.2 大倾角煤层开采对煤矿安全提出了更高的要求 and 更深入的问题

根据目前所掌握的国外文献资料,“大倾角煤层”还没有专门的定义与解释,英文文献中的“大倾角煤层”所使用的关键词为“Steeply Dipping Seam”,较少使用“High Inclined Seam”,俄文文献资料中代表“大倾角煤层”所使用的关键词为“Крутых И Наклониных Пластов”。

我们认为,大倾角煤层是中斜和急斜煤层的一部分,一般是指埋藏倾角为 $35^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 的煤层,之所以这样定义,是因为通过对大量的现场观测资料分析和实验室研究后发现,当煤层倾角大于 35° 时,走向长壁(倾斜布置、走向推进)工作面开采具有以下基本特征:

(1) 工作面开采过程中,顶根的破断岩石(冒落矸石)不能在原地停留(煤层倾角大于矸石堆积自然安息

角),而是沿工作面向下滚(滑),在工作面沿倾斜方向的采空区内形成不均匀充填带(工作面下部填实,中部填满,上部悬空),工作面沿倾斜方向的围岩移动(顶板下沉和底板鼓起)和支承压力分布以工作面走向推进中轴线为界呈现出典型的非对称特征^{[1][2]}。

(2)工作面底板围岩向已成空间的移动加剧,变形和破坏的可能性增大。在非控制状态下,一旦底板出现破坏,就会产生(向下)滑移,而且破坏滑移区还会向上蔓延,造成底板的大范围失稳并引发工作面“顶板(R) - 支架(S) - 底板(F)”系统失稳,导致围岩灾变^{[3][4]}。

(3)由于上覆岩层和自身重力分量的作用,工作面支架和设备下滑、倾倒的可能性急剧增加,目前我国的非专门开采设备(工作面液压支架、采煤机、刮板输送机等)在增加防倒防滑装备后的最大适用倾角小于 35° (板少数矿井使用轻型综采时,煤层倾角曾在工作面局部区域达到 32°)^{[5][6]}。

(4)当倾角小于 55° 时,对于厚度较大(厚度划分中的厚或特厚)的煤层,可以板据条件选择开采方法(倾斜分层开采或水平分段开采),但当倾角大于 55° 时,由于设备能力和工人作业环境等因素的制约,大量的生产实践证明^[7],已经无法使用工作面倾斜布置走向推进的传统开采方法。

从上述四个基本特征可以看出,在目前的条件下,大倾角煤层走向长壁工作面不论是开采设备与工艺还是围岩控制理论与方法的选择都受到很大制约,导致开采大倾

角煤层的矿井几乎都发生过由于开采方法与设备及围岩控制问题引发的安全(人员伤亡)事故,因此从本质上讲,大倾角煤层开采难度大,因而开采中的安全隐患也非常严重,“安全”在大倾角煤层开采中占有更加重要的位置。

1.3 我国煤矿开采大倾角煤层所付出的艰辛努力

我国对大倾角煤层开采的研究源于急倾斜煤层,研究内容涉及开采工艺、设备、开采灾害、围岩控制等各个方面。

1.3.1 大倾角煤层非机械化开采方法研究与变革

20世纪50年代初期,在我国采煤方法改革中,大倾角煤层主要是发层倒台阶采煤法。这种采煤方法的特点是工人在倒台阶的伞檐下工作,防止上部落煤和冒落矸石的窜砸,但一旦下部台阶支护失效、顶板冒落,极易使失效和破坏向上蔓延,引发工作而大而积的垮落,形成灾害性事故^[8]。

20世纪60年代,安徽淮南矿区曾成功地在一部分赋存条件较好的急倾斜和大倾角煤层中研究和试验了柔性掩护支架采煤法。该方法依据掩护支架结构的不同又可分为多种形式,其特点是工作而支架在安装之厝依靠冒落矸石的作用自动调整和前移,劳动强度有所降低。由于掩护支架与矸石充填体共同构成的支护体系分布于