

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2015.03.001

## 煤层自燃防治与高温爆破安全 技术中的若干力学问题\*

李世海<sup>1</sup>,王理想<sup>1</sup>,冯春<sup>1</sup>,郑炳旭<sup>2</sup>,李战军<sup>2</sup>

(1. 中国科学院力学研究所,北京 100190;2. 广东宏大爆破股份有限公司,广州 510623)

**摘 要:** 煤层自燃已经是我国大规模煤矿开采不可避免的问题。在高温环境下的煤矿爆破开采,既涉及到爆破的高温环境也需要改进高温爆破技术,其中认识高温爆破中的工程规律,是解决高温爆破技术的关键。首先对煤层自燃的条件进行了量纲分析,说明了煤层中裂隙对流比热传导更容易诱发煤层自燃;煤体中的破裂场、气流场是煤层自燃的条件,单纯封堵裂缝隔绝空气的方法有短期效果,但地质体因煤层燃烧力学特性改变产生变形和破裂后,会死而复燃。讨论了井工开采诱发煤层自燃的机理以及相关科学问题,对井工开采分析了采空区上方冒落带、破裂带、沉降带与煤层自燃的关系,提出了地表长期封闭覆盖与自适应循环注水相结合的综合灭火方法。进而分析了露天矿开采高边坡稳定性与煤层自燃环境的关系,边坡开挖引起山体变形、开裂,形成破裂场是产生煤层自燃的基本要素。最后,分析了深孔爆破中,爆破技术可靠性中涉及的科学问题,介绍了利用循环水降温的方法。

**关键词:** 煤层自燃; 高温爆破; 量纲分析; 连续-非连续单元法(CDEM); 数值模拟; 防治措施

**中图分类号:** O389 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2015)03-0001-09

## Several Mechanical Problems on Prevention of Spontaneous Combustion of Coal and Safety Controlling in High-temperature Blasting

LI Shi-hai<sup>1</sup>, WANG Li-xiang<sup>1</sup>, FENG Chun<sup>1</sup>, ZHENG Bing-xu<sup>2</sup>, LI Zhan-jun<sup>2</sup>

(1. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Guangdong Hongda Blasting Co Ltd, Guangzhou 510623, China)

**Abstract:** Spontaneous combustion of coal has been an inevitable problem in large-scale coal mining in China. Mine blasting under high temperature involves not only the high temperature environment itself, but also the improvement of high-temperature blasting technology. The understanding of engineering regulations is the key to improving high-temperature blasting technology. Firstly, the paper performs dimensional analysis on spontaneous combustion conditions of coal. The analysis shows that convective heat transfer in fracture is more likely to cause spontaneous combustion of coal than heat conduction. The fractures and air in coal are necessary conditions. Although the method of blocking fractures to insulate the air makes short-term effects, the combustion of coal will start again after deformation and cracking due to changes of mechanical properties of coal. The mechanisms and scientific problems on spontaneous combustion in terms of underground mining are also discussed. The relationship is pointed out between caving zone, fracture zone, sedimentation zone and spontaneous combustion of coal. A method combining long-period ground sealing and covering with adaptive cycled water injection is proposed to prevent spontaneous combustion of coal. Secondly, the relationship is analyzed between high slope stability in opencast mines and spontaneous combustion environment. Slope excavation causes deformation and cracking of rock, forming fracture field which is necessary for spontaneous combustion. Finally, some scientific problems involved in blasting technology reliability and cooling method

with cycled water are analyzed in deep-hole blasting.

**Key words:** spontaneous combustion of coal; high-temperature blasting; dimensional analysis; Continuous-Discontinuous Element Method(CDEM); numerical simulation; safety measures

中国煤炭产量和消费量均居世界首位,占国内一次能源生产和消费总量的85%左右<sup>[1]</sup>。但是,我国煤层自燃现象却比较严重,已经成为大规模煤矿开采不可避免的问题。煤层自燃是一个自加速的氧化放热反应,它是煤长期与空气中的氧接触,发生物理、化学作用的结果<sup>[2]</sup>。煤层自燃造成巨大的资源浪费、环境污染、人员和财产的损失,严重制约了高产高效矿井的安全生产与发展。此外,处于高温环境下的煤矿露天爆破开采,亦涉及到煤层自燃问题。煤矿露天爆破开采中,需要改进高温爆破技术,防止煤层自燃发生,确保煤矿生产安全。

目前,国内外对于煤层自燃现象以及煤炭高温安全爆破开采技术已有一定研究。

胡社荣与蒋大成从遥感技术调查、煤岩学和地球化学类方法、火灾预测预报和综合防治等三个层次,阐述煤层自燃的研究现状和进展,提出了煤层火灾综合防治的对策<sup>[3]</sup>。束学来等对现今常用煤层灭火降温方法进行分类和比较分析,提出了液氮降温用量的计算方法,对炮孔进行注水降温实践,初步解决了水源和注水方式等问题<sup>[4]</sup>。文虎等提出联合使用黄泥灌浆和胶体防灭火技术,建立多功能灌浆注胶防灭火系统,用于防治煤层自燃问题<sup>[5]</sup>。雷学武等根据野外调查的煤层自燃情况,结合地质资料和煤质资料的分析,总结了乌达矿区煤层自燃的状况,初步分析了该煤田煤层严重自燃的原因。具体的灭火技术都会有一定的效果,真正实现大范围长期灭火还需要认识煤田自燃的基本规律,进而有可靠、经济的方法<sup>[6]</sup>。

许晨等探究了露天煤矿高温火区爆破的安全技术,归纳了几种灭火方法及其在露天煤矿应用的配合使用<sup>[7]</sup>。束学来等针对煤矿火区存在的测温不准确问题,分析和比较了现今的测温方法,并用工程实例进行验证,最后展望了火区测温方法<sup>[8]</sup>。蔡建德分析了几种常用的高温爆破方法,对常规深孔爆破的施工工艺进行了优化,探索出了进行深孔高温爆破的反程序爆破方法<sup>[9]</sup>。周名辉等研发出了水

中加CaCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub>的炮孔注水降温方法,满足了安全生产要求<sup>[10]</sup>。

上述学者通过实验、理论、调查等方法对煤层自燃现象以及煤炭高温安全爆破开采技术进行了研究。本文着眼于提炼煤田自燃和高温爆破涉及的关键的科学问题,通过量纲分析确定煤层燃烧重要的物理量,说明煤层裂隙中空气对流起到重要作用,因此,必须深入开展煤体破裂场的研究。进一步建立了破裂场、裂隙渗流场和应力场耦合的基本方程,并借助于连续-非连续数值模拟方法,说明全尺度定量化分析煤层燃烧规律的可行性,可以建立燃烧-热-岩体破裂相互作用关系。然后,通过数值模拟典型算例,分析井工露天联合开采高边坡稳定性与煤层自燃环境的相互作用关系。最后,给出基于地表封闭、注水自循环联合作用的煤层自燃防治措施以及高温爆破中炮孔降温新方法。

## 1 煤层自燃的物理量

煤层和岩层中的温度是高温爆破的温度环境,认知环境温度及其规律不仅仅是高温爆破安全所需要的必要条件,对煤层灭火十分重要。

### 1.1 与煤层自燃相关的物理量

(1)煤层的几何参数:地下采空区的范围 $R_g$ 、采空高度 $H_g$ 、采空区的深度 $D_g$ 、煤层厚度 $t_c$ 、煤层的倾角 $\theta_c$ 、边坡的高度 $H_s$ 、坡脚 $\theta_s$ 、不同地层的厚度 $H_1$ 、 $H_2$ 、 $\dots$ 、 $H_n$ 、采空区的初始燃烧位置 $(x_b, y_b, z_b)$ 、区域 $R_b$ 。

(2)煤的物理参数:燃烧前后的弹性模量 $E_{cb}$ 、 $E_{ca}$ 、泊松比 $\nu_c$ 、煤体的强度 $c_c$ 、 $\varphi_c$ 、 $T_c$ 、渗透率 $K_c$ 、煤的热传导系数 $\lambda_c$ 。

(3)煤的燃烧参数:燃烧温度(燃点) $T_c$ 、燃烧释放热量 $Q_c$ 。

(4)研究区域内岩石的力学参数:弹性模量 $E_r$ 、泊松比 $\nu_r$ 、强度 $c_r$ 、 $\varphi_r$ 、 $T_r$ 、热传导系数 $\lambda_r$ 。

(5)与空气流通相关的物理量:空气的密度 $\rho_a$ 、热传导系数 $\lambda_a$ 、井下大气压力 $p_{au}$ 、地表大气压力 $p_{ag}$ 、地表风速 $v_{wg}$ 。

### 1.2 高温爆破的物理量

(1)炮孔参数:炮孔内温度 $T_h$ 、炮孔壁的最高温度 $T_{h\max}$ 。

(2)炮孔爆破设计参数:孔径 $r$ 、深度 $h$ 、孔间距

收稿日期:2015-07-15

作者简介:李世海(1958-),男,研究员,从事爆炸力学方面的研究,  
(E-mail)shli@imech.ac.cn。

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项(XDB10030303);国家自然科学基金项目(51374196);国家自然科学基金青年基金项目(11002146,11302229)

$a$ 、排距  $b$ 。

(3) 炸药及火工品的参数: 燃烧温度  $T_{be}$ 、起爆温度  $T_{de}$ 、药包长度  $l$ 、直径  $d$ 。

(4) 药包在炮孔内存放的时间  $t$ 。

### 1.3 煤层自燃防治措施相关的物理量

煤层自燃防治可能涉及到隔热、隔绝空气及降温措施, 涉及以下物理量:

(1) 隔热材料: 隔热材料的空间位置  $(x_{ii}, y_{ii}, z_{ii})$  以及隔热结构的几何尺寸  $s_{ii}$ 。

物理参数: 热传导系数  $\lambda_{ii}$ 、弹性模量  $E_{ii}$  及强度  $c_{ii}$ 、 $\varphi_{ii}$ 、 $T_{ii}$ 。

(2) 隔绝空气材料: 隔绝空气材料的空间位置  $(x_{ai}, y_{ai}, z_{ai})$  以及隔绝空气结构的几何尺寸  $s_{ai}$ 。

物理参数: 热传导系数  $\lambda_{ai}$ 、弹性模量  $E_{ai}$  及强度  $c_{ai}$ 、 $\varphi_{ai}$ 、 $T_{ai}$ 。

(3) 降温材料: 液化热  $H_l$ 、汽化热  $H_e$ 、流动粘性系数  $\mu$ 、固体材料的摩擦系数  $f$ 。

### 1.4 认知煤层自燃及高温爆破的基本规律的学科定位

煤体燃烧的基本条件是煤的可燃性、煤层中的温度和煤层中的空气。煤层中温度传播包括热在煤层中的传导和煤层裂隙中空气的对流; 煤层中空气的流动包括孔隙渗流和裂隙流动; 煤层中的裂隙除了既有的天然裂隙还有大量的人工裂缝, 这是由于地下开采和边坡开挖所致, 形成裂隙分布场。高温爆破是在认知环境温度场的基础上, 掌握炮孔内的温度场分布、炸药药包内的温度场, 进而进行爆破设计和施工, 保证施工安全。

由此可以看出, 煤层的自燃及高温爆破问题, 从爆破环境及爆炸条件的方面的认识, 需要知道煤层中和炮孔内的温度场、破裂场、空气流场以及药包内的温度场。高温爆破是以降低地层中的温度、实现高效开采、保护环境为目的的, 研究煤层和炮孔内的温度场、破裂场、空气流场及药包内温度变化规律。涉及到采矿工程、地质调查和力学多个学科。其中, 地质调查是煤层自燃的基础; 自燃防治的目的是保护煤层和高效的采出煤, 所采用各种措施均来自于采矿工程; 力学是为解决问题提供的一种方法。

## 2 量纲分析与几个关键因素的比较

### 2.1 与温度场分布规律相关的要素比较

主要讨论热传导与空气对流对温度场的影响。这里需要比较热传导与空气对流的热量传递大小, 因此需要比较以下几个方面。

#### (1) 空气与煤热物理性质比较

常温常压下, 空气热传导系数值<sup>[11]</sup>:  $\lambda_a = 0.026 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; 比热容  $C_a = 1.01 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 密度  $\rho_a = 1.1774 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

常温下, 无烟煤的热传导系数值:  $\lambda_c = 0.26 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ; 比热容  $C_c = 1.00 \sim 1.26 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , 取中间值  $1.13 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ; 密度  $\rho_c = 1.40 \sim 1.80 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ , 取中间值  $1.60 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

$\lambda_c/\lambda_a = 0.26/0.026 = 10$ , 说明煤的传导系数是空气的 10 倍。

$C_c/C_a = 1.13/1.01 = 1.1$ , 说明煤与空气的比热容比较接近。

$\rho_c/\rho_a = 1600/1.1774 = 1359$ , 密度之比说明, 两者相差较大。

#### (2) 孔隙渗流速度与裂隙渗流速度比较

##### ① 孔隙渗流速度估算

据文献 [12] 测得煤的渗透率:  $K_m = 3.8 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2 = 3.8 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ ; 空气的动力粘度:  $\mu = 1.846 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ; 压力差估计为一个大气压:  $\Delta p = 1 \text{ atm} = 101 \text{ kPa}$ ; 渗流长度估计为煤层厚度:  $\Delta L = 100 \text{ m}$ 。则孔隙渗流速度约为

$$v_m = \left| \frac{K_m \Delta p}{\mu \Delta L} \right| = \frac{3.8 \times 10^{-15} \times 101000}{1.846 \times 10^{-5} \times 10} = 2.1 \times 10^{-6} \text{ m/s}$$

##### ② 裂隙渗流速度估算

取  $0.1 \text{ mm}$  的裂隙为例, 其渗透率:  $K_f = 8.3 \times 10^{-10} \text{ m}^2$ ; 空气的动力粘度:  $\mu = 1.846 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ; 压力差估计为一个大气压:  $\Delta p = 1 \text{ atm} = 101 \text{ kPa}$ ; 渗流长度估计为煤层厚度:  $\Delta L = 10 \text{ m}$ 。则裂隙渗流速度约为

$$v_f = \left| \frac{K_f \Delta p}{\mu \Delta L} \right| = \frac{8.3 \times 10^{-10} \times 101000}{1.846 \times 10^{-5} \times 10} = 0.46 \text{ m/s}$$

由此可看出, 裂隙渗流的速度远远大于孔隙渗流的速度。

#### (3) 热传导与空气对流热量传递比较

##### 空气热传导热流密度

$$q_a = \left| \lambda_a \frac{\Delta T}{\Delta L} \right| = 0.026 \times \frac{200}{10} = 0.52 \text{ W}/\text{m}^2$$

##### 煤热传导热流密度

$$q_c = \left| \lambda_c \frac{\Delta T}{\Delta L} \right| = 0.26 \times \frac{200}{10} = 5.2 \text{ W}/\text{m}^2$$

单位体积内热传导传递热量分别为空气

$$\frac{q_a}{\Delta L} = \frac{0.52}{10} = 0.052 \text{ W}/\text{m}^3$$

煤

$$\frac{q_c}{\Delta L} = \frac{5.2}{10} = 0.52 \text{ W/m}^3$$

孔隙渗流对流产生的单位体积内传递热量为

$$\rho_a C_a v_m \frac{\Delta T}{\Delta L} = 1.1774 \times 10^3 \times 2.1 \times 10^{-6} \times \frac{200}{10} = 0.050 \text{ W/m}^3$$

裂隙渗流对流产生的单位体积内传递热量为

$$\rho_a C_a v_f \frac{\Delta T}{\Delta L} = 1.1774 \times 10^3 \times 0.46 \times \frac{200}{10} = 1.1 \times 10^4 \text{ W/m}^3$$

由此可看出:孔隙中,热量传递主要以热传导为主( $0.52 \text{ W/m}^3 > 0.050 \text{ W/m}^3$ );裂隙中,热量传递主要以热对流为主( $1.1 \times 10^4 \text{ W/m}^3 \gg 0.050 \text{ W/m}^3$ )。

## 2.2 与燃烧氧气供给相关的要素比较

### (1) 燃烧面的推进速度和氧气需要量

燃烧面的推进速度估测值为  $0.001 \text{ m/s}$ 。考虑  $1 \text{ kg}$  的煤燃烧需要氧气量。煤炭中各物质含量:  $C = 65.7\%$ ,  $S = 1.7\%$ ,  $O = 2.3\%$ , 灰分 =  $21.3\%$ , 水分 =  $9\%$ 。根据质量分数可得

$C = 0.657 \text{ kg}$ ,  $S = 0.017 \text{ kg}$ ,  $O = 0.023 \text{ kg}$ , 灰分 =  $0.213 \text{ kg}$ , 水分 =  $0.09 \text{ kg}$ ;

$C + O_2 = CO_2$  需要  $O_2$  质量为  $0.657 \text{ kg} \times 32/12 = 1.752 \text{ kg}$ ;

$S + O_2 = SO_2$  需要  $O_2$  质量为  $0.017 \text{ kg} \times 32/32 = 0.017 \text{ kg}$ ;

$1 \text{ kg}$  煤燃烧氧气需要量为  $1.752 \text{ kg} + 0.017 \text{ kg} - 0.023 \text{ kg} = 1.746 \text{ kg}$ 。所需氧气体积为  $1.746/1.429 \text{ m}^3 = 1.22 \text{ m}^3$ ; 所需空气体积为  $1.22 \text{ m}^3/21\% = 5.82 \text{ m}^3$ 。

$1 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  煤炭燃烧空气(21%为氧气)需要量:  $1.60 \times 10^3 \times 5.82 \text{ m}^3 = 9.31 \times 10^3 \text{ m}^3$ 。这些氧气需要在  $1000 \text{ s}$  内传递到煤层中。假设裂隙传递面积为  $1 \text{ m}^2$ , 则需要传递速度为  $9.31 \text{ m/s}$ ; 假设裂隙传递面积为  $10 \text{ m}^2$ , 则需要传递速度为  $0.931 \text{ m/s}$ ; 假设裂隙传递面积为  $20 \text{ m}^2$ , 则需要传递速度为  $0.465 \text{ m/s}$ 。

### (2) 空气补给速度

空气补给速度,即为空气对流速度  $0.46 \text{ m/s}$ 。从上述计算可看出,如果裂隙面积足够大,则空气完全可以补给给煤炭燃烧。因此,防治措施应该根据减少破裂面,切断氧气供给量为原则。

## 3 地质勘探

无论研究煤层自燃防治的工程技术还是工程设

计依据和方法都需要深入了解矿区的地质条件,开展地质调查的工作<sup>[13]</sup>。地质调查的种类繁多,这里特别提出分析方法所需要地质勘探内容。

地形与地貌:主要用于矿区地下力学分析的边界条件;特别提出要调查地表裂缝的分布,是研究矿区当前状态的重要参数。

地质构造:主要用于建立地质模型、力学模型和计算模型,是进行定量化分析必须的条件。当然,通常的地质调查获得的信息并不完全,需要借助力学分析进行补充和反分析。

地层及材料参数:主要包括煤层分布、煤层力学和物理参数,用于给出数值模拟中材料的基本假设值。由地质勘探获得的力学参数通常是局部的,个别点的,不代表整体参数值。因此需要借助数值模拟和现场观测的现象和监测的结果进行校核和重新确定。

风速与风场环境:是进行隔绝空气设计和自然原因分析的重要参数。

## 4 描述温度场、应力场及破裂场、空气流场的基本方程

### 4.1 温度场控制方程

热传导满足傅里叶定律

$$\begin{cases} q_x = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \\ q_y = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \\ q_z = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \end{cases} \quad (1)$$

温度场满足能量守恒方程

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left( \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right) + H \quad (2)$$

将式(1)带入式(2),可得热传导-对流方程

$$\rho c \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \lambda \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + H \quad (3)$$

在孔隙基质中,因为渗流速度较慢( $v_x, v_y, v_z \approx 0$ ),所以不考虑热对流,只考虑热传导,控制方程为

$$\rho_m c_m \frac{\partial T_m}{\partial t} = \lambda_m \left( \frac{\partial^2 T_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_m}{\partial z^2} \right) + H_m \quad (4)$$

在裂隙中,因为渗流速度较快,热对流占据主导作用,因此控制方程为

$$\rho_f c_f \left( \frac{\partial T_f}{\partial t} + v_{fx} \frac{\partial T_f}{\partial x} + v_{fy} \frac{\partial T_f}{\partial y} \right) = H_f \quad (5)$$

式中: $q$ 为热流密度; $\rho$ 为密度; $c$ 为体积热容; $\lambda$ 为热传导系数; $T$ 为温度; $t$ 为时间; $x,y,z$ 为整体坐标系下坐标; $v$ 为渗流速度; $\xi,\eta$ 表示裂隙局部坐标系坐标; $b$ 为裂隙的等效水力开度; $H$ 为热源项; $\xi,\eta$ 分别为裂隙局部坐标系下坐标;下标“ $m$ ”代表孔隙基质,下标“ $f$ ”代表裂隙中流体(以下同)。

#### 4.2 应力场控制方程

爆破是个动态过程,符合以下控制方程

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{xz}}{\partial z} + f_x - \rho \frac{\partial u_x}{\partial t^2} - \alpha \frac{\partial u_x}{\partial t} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{yz}}{\partial z} + f_y - \rho \frac{\partial u_y}{\partial t^2} - \alpha \frac{\partial u_y}{\partial t} = 0 \quad (6) \\ \frac{\partial \sigma_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + f_z - \rho \frac{\partial u_z}{\partial t^2} - \alpha \frac{\partial u_z}{\partial t} = 0 \end{cases}$$

式中: $\sigma$ 为应力; $f$ 为体力; $\rho$ 为密度; $\alpha$ 为阻尼系数; $u$ 为位移; $x,y,z$ 为坐标; $t$ 为时间。

#### 4.3 渗流及裂隙流动控制方程

孔隙渗流是三维流动过程,裂隙渗流是二维流动过程,均符合达西定律<sup>[14]</sup>

$$\begin{cases} v_{mx} = -\frac{K_m}{\mu} \frac{\partial p_m}{\partial x} \\ v_{my} = -\frac{K_m}{\mu} \frac{\partial p_m}{\partial y} \\ v_{mz} = -\frac{K_m}{\mu} \frac{\partial p_m}{\partial z} \\ v_{fx} = -\frac{K_f}{\mu} \frac{\partial p_f}{\partial \xi} \\ v_{fy} = -\frac{K_f}{\mu} \frac{\partial p_f}{\partial \eta} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} v_{fx} = -\frac{K_f}{\mu} \frac{\partial p_f}{\partial \xi} \\ v_{fy} = -\frac{K_f}{\mu} \frac{\partial p_f}{\partial \eta} \end{cases} \quad (8)$$

孔隙渗流和裂隙渗流都满足连续性方程

$$S \frac{\partial p}{\partial t} = -\left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) + Q \quad (9)$$

将式(7)和式(8)分别带入式(9)可得

$$S_m \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K_m}{\mu} \left(\frac{\partial^2 p_m}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p_m}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p_m}{\partial z^2}\right) + Q_m \quad (10)$$

$$S_f \frac{\partial p}{\partial t} = \frac{K_f}{\mu} \left(\frac{\partial^2 p_f}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 p_f}{\partial \eta^2}\right) + Q_f \quad (11)$$

式中: $v$ 为渗流速度; $K$ 为渗透率; $\mu$ 为动力粘度; $p$ 为压力; $S$ 为储水系数; $Q$ 为源汇项; $x,y,z$ 为整体坐标系下坐标; $\xi,\eta$ 表示裂隙局部坐标系坐标。裂隙渗透率为

$$K_f = b^2/12 \quad (12)$$

式中: $b$ 为裂隙的等效水力开度。

#### 4.4 初始条件与边界条件

初始条件:

(1)温度初始条件

$$T(x,y,z,t) = T^0(x,y,z), (x,y,z) \in \Omega \quad (13)$$

(2)位移与速度初始条件

$$\begin{cases} u_i(x,y,z,0) = u_i^0(x,y,z) \\ u_{i,t}(x,y,z,0) = u_{i,t}^0(x,y,z) \end{cases}, (x,y,z) \in \Omega \quad (14)$$

(3)压力初始条件

$$p(x,y,z,t) = p^0(x,y,z), (x,y,z) \in \Omega \quad (15)$$

边界条件:

(1)温度边界

$$T = \bar{T}, (x,y,z) \in \Gamma_T \quad (16)$$

(2)热流量边界

$$v_i^T n_i = \bar{H}, (x,y,z) \in \Gamma_H \quad (17)$$

(3)位移边界

$$u_i = \bar{u}_i, (x,y,z) \in \Gamma_u \quad (18)$$

(4)应力边界

$$\sigma_{ij} n_j = \bar{t}_i, (x,y,z) \in \Gamma_\sigma \quad (19)$$

(5)压力边界

$$p = \bar{p}, (x,y,z) \in \Gamma_p \quad (20)$$

(6)水流量边界

$$v_i n_i = \bar{q}, (x,y,z) \in \Gamma_q \quad (21)$$

#### 4.5 煤层的本构方程与破坏条件

应变强度分布准则表达式如下<sup>[15-18]</sup>

$$\begin{cases} \sigma_n = I_e(2G\varepsilon + \lambda e) + \begin{cases} D_b(2G\varepsilon + \lambda e), & \varepsilon < 0 \\ 0, & \varepsilon \geq 0 \end{cases} \\ \tau = I_e G\gamma + \begin{cases} D_b G_\lambda, & G_\lambda < \sigma_n \tan \varphi, \varepsilon < 0 \\ D_b |2G\varepsilon_n + \lambda e| \tan \varphi, & G_\lambda > \sigma_n \tan \varphi, \varepsilon < 0 \\ 0, & \varepsilon \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $\lambda, G$ 为拉梅系数,分别表示材料的体积模量和剪切模量; $e, \varepsilon_n$ 和 $\gamma$ 分别表示材料的体积应变、正应变和剪切应变; $\varphi$ 为材料断裂后的摩擦角; $\varepsilon$ 为名义正应变,有 $E\varepsilon = 2G\varepsilon_n + \lambda e, \varepsilon < 0$ 表示材料受压, $\varepsilon > 0$ 表示材料受拉; $I_e$ 和 $D_b$ 分别为介质的完整度和破裂度,具体表述如下

$$I_e = \alpha_l \beta_l \quad (23)$$

$$D_b = 1 - I_e \quad (24)$$

式中: $\alpha_l$ 和 $\beta_l$ 分别表示代表性体积单元的拉伸完整度和剪切完整度,它们的表达式分别如下

$$\alpha_l = \begin{cases} 0, & \varepsilon \geq \varepsilon_{\min} \\ \frac{\int_{\varepsilon}^{\varepsilon_{\max}} f(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon}, & \varepsilon_{\min} < \varepsilon < \varepsilon_{\max} \\ \frac{\int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} f(\varepsilon) d\varepsilon}{\varepsilon_{\min}}, & \varepsilon \leq \varepsilon_{\min} \end{cases} \quad (25)$$

$$\beta_l = \begin{cases} 0 & , \gamma \geq \gamma_{\max} \\ \frac{\int_{\gamma}^{\gamma_{\max}} g(\gamma) d\gamma}{\int_{\gamma_{\min}}^{\gamma_{\max}} g(\gamma) d\gamma} & , \gamma_{\min} < \gamma < \gamma_{\max} \\ 1 & , \gamma \leq \gamma_{\min} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $f(\varepsilon)$ 、 $g(\gamma)$  分别表示代表性体积单元单位体积内拉伸应变强度分布函数和剪切应变强度分布函数;  $\varepsilon_{\min}$ 、 $\varepsilon_{\max}$  和  $\gamma_{\min}$ 、 $\gamma_{\max}$  分别表示代表体积单元内部发生微元断裂的最小拉应变、完全拉断的最大拉应变和发生微元断裂的最小剪应变、最大剪应变。

## 5 高温爆破及煤层自燃防治的数值模拟方法

采用连续-非连续单元法进行数值求解,其英文简称为 CDEM (Continuous-Discontinuous Element Method)。CDEM 可定义为一种拉格朗日系统下的基于可断裂单元的动态显示求解算法<sup>[19-21]</sup>。它结合了有限元、离散元法的优势,通过拉格朗日能量系统建立严格的控制方程,利用动态松弛法显示迭代求解,实现了连续-非连续的统一描述,可模拟材料从连续变形到断裂直至运动的全过程。

CDEM 将空间离散为许多单元,但与有限元不同,它不组成总体刚度矩阵,而是采用动态松弛技术来求解各个单元的力、位移、压力、温度等变量<sup>[22]</sup>。CDEM 在时间域内采用显式迭代方法,可以求解动态、静态问题。CDEM 的这种显式求解和逐个单元求解的特点,使之易于并行化,如文献[23,24]所述。

可以采用三棱柱、四面体或六面体单元等进行网格划分。根据变分原理,导出单元的动力学方程

$$M\ddot{u}(t) + C\dot{u}(t) + Ku(t) = F(t) \quad (27)$$

式中:  $\ddot{u}(t)$ 、 $\dot{u}(t)$  和  $u(t)$  分别是单元内所有节点的加速度列阵、速度列阵和位移列阵;  $M$ 、 $C$ 、 $K$  和  $F(t)$  分别为单元质量矩阵、阻尼矩阵、刚度矩阵和节点外部荷载列阵。

不同于有限元方法通过总刚求解,连续-非连续单元法在建立单元的动力学求解方程后,无需组装总体刚度矩阵,而采用动态松弛方法进行求解。动态松弛方法既可求解动态问题,又可求解静态问题。对于静态问题,通过在动态计算中引入阻尼项,使得初始不平衡的振动系统逐渐衰减到平衡位置,是一种将静力学问题转化为动力学问题进行求解的显式方法。对于动态问题,可以直接使用该控制方程进行真实模拟。

连续-非连续单元法在单元界面或单元内部,使

用应变强度分布准则作为其本构方程和破坏条件。当单元界面或单元内部达到应变强度分布准则的破坏条件时,单元界面或单元内部断裂形成裂隙面,这一过程可模拟从连续到断裂的过程,实现了连续、非连续的统一计算。当界面或内部断裂时,固体做接触计算,流体进行孔隙-裂隙耦合渗流计算<sup>[25]</sup>。接触计算采用文献[26,27]所述半弹簧法,渗流计算采用文献[14,28]所述的中心型有限体积法或文献[29]所述的 CDEM 法。此外,煤层自燃过程使得温度上升,该热传导过程采用文献[24,30]中的计算方法。

## 6 相关数值方法算例

### 6.1 计算模型

给出一个井工-露天联合开采的算例,分别研究以下内容,见图 1。

- (1) 破裂场分布规律。
- (2) 地裂缝的破裂范围、深度及宽度。
- (3) 空气在煤层裂隙中的流场分布。
- (4) 裂隙中温度场的分布。

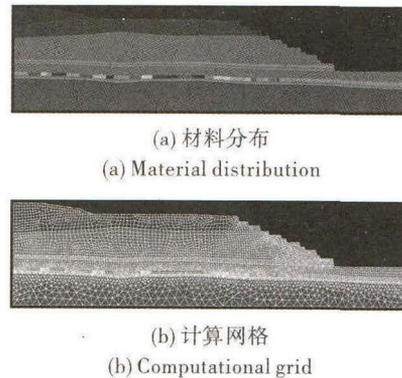


图 1 井工-露天联合开采煤矿几何模型

Fig. 1 Geometric model of a joint underground-opencast coal mine

采用如图 1 所示计算模型,其中煤层为图中棕色部分和彩色分段部分。该模型底部长 1500 m,模型左侧高度为 380 m,右侧高度为 150 m。上部煤层深约为 192.7 m,总厚度 12.5 m,下部煤层埋深约为 237.9 m,煤层厚 11.8 m。

### 6.2 结果分析

- (1) 破裂场分布规律

图 2 为 CDEM 数值模拟开采后的水平方向位移结果。从结果可以看出,井工开采之后,露天矿上方出现多条贯穿性的大裂缝。这些裂缝与开采巷道连通,导致外部空气可以进入煤层内部。



图2 开采后的水平方向位移

Fig. 2 Horizontal displacement after excavation

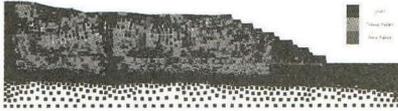


图3 破裂区域与破裂方式(蓝点表示该处未破坏,红点表示剪切破坏,绿点表示拉伸破坏)

Fig. 3 Fracture area and failure modes(Blue dots for no failure;red dots for shear failure;green dots for tensile failure)

### (2) 地裂缝的破裂范围、深度及宽度

结合图2和图3,从中可以看出,开采井上方出现两条垂直方向大裂缝,致使与上部空气贯通。地裂缝的破裂范围为井工开采长度,并且裂缝在开采煤的上方。地裂缝的破裂深度为开采煤上方所有区



图5 裂隙温度场分布

Fig. 5 Temperature distribution in fracture

## 7 煤层自燃防治技术路线与防治方法

大范围煤层自燃防治已经是几百年来难题,国内外采用了以“封堵”燃区与空气隔绝的方法,仅仅在短期内有效。追究其原因在于,地层中的煤燃烧,改变了地层的力学特性,这种因力学特性的变化引起地表产生的裂缝是长时间的,通常可以在几个月甚至几年内完成。而隔绝空气的工程技术通常是在施工期内完成,施工结束后地层的长时间变形和地裂缝产生很难用被动的封堵技术实现。一旦地表发生了变形、产生了裂缝,隔绝空气的功效开始降低,当裂缝逐渐增多,工程措施也就逐渐走向失败。为此,我们提出一种新的煤层自燃防治技术路线,即,利用重力热管原理,实现地层长期自适应降温工艺。

### 7.1 防治技术路线

大范围煤层自燃灾害防治的基本路线和原理如下:

(1) 在大范围内实现封堵地表裂缝。该技术要

求,宽度主要集中在初始开采区域。

### (3) 空气在煤层裂隙中的流场分布

空气主要分布在三个裂隙内:竖向裂缝1、竖向裂缝2、横向裂缝3。空气在裂隙内中的流场分布,计算结果如图4所示。从该图可看出,岩层中破坏的部分都被空气充满。



图4 空气通过裂缝进入煤层内部

Fig. 4 Air enters the mine though fracture

### (4) 裂隙中温度场的分布

从图5可以看出,裂隙的存在,使得空气得以进入煤层,给煤层提供氧气。煤层自身有一定温度,在接触空气后,会释放热量。热量积聚在煤层周围,使得裂隙中的温度一步步提高,最终达到煤的燃点,产生燃烧。

求地表与地下空气隔绝,其工艺和材料不追求强度和厚度,只要求断绝空气的流通。具体技术可用用抗高温不透气材料在地表铺设。

(2) 铺设隔温材料后,并不能起到灭火的作用,地下存留的氧气和高温依然能维持一段煤层燃烧,甚至持续很长时间。为此,用红外摄像仪在空中拍摄,可以发现地表高温处,并且隔温表层材料可能会在短时间破坏、断裂形成裂缝。

(3) 循环水自适应灭火。在裂缝处铺设供水管及蒸汽回收管,并加盖密封板。按照前面的量纲分析,地表出现高温的地方,是地下燃烧温度沿着裂隙传波的地方,因此,高温点附近必有裂隙。在裂隙出加排水管可以有效灭火。当水流至高温热源时,水被气化,吸收热量,起到降温的作用。气化后的水上升,逐渐冷却形成水,再度下降流至热热处气化。如果上升到地表仍然没有冷却,则被蒸汽回收管收集,导入地表冷却罐,形成水后进入供水管。

(4) 灭火原理。往复循环,地下高温热源产生

的热量不断带到地表,收到冷却后将地表低温带入地下,地下燃烧点会不断减少。在整个灭火过程中,除了水会因煤层滤湿,减少循环水量外,整个过程基本上依靠系统自身能量循环完成,无需人工干预。

(5) 自适应灭火工艺的技术要点是要随时监测地表的温度和蒸汽泄露表象,切实可行的防止空气进入地下和地下水蒸气外溢,适当时机补充注入水。当个别地区灭火工作完成时,地下水不再蒸发,表明该地区灭火工作暂时完成,积留在下的水可以抽至地面,重新注入其它区域灭火。

(6) 此项工程是解决长期煤层自燃的根本措施,也需要坚持和长期作业。就基本原理上,能量循环。

## 7.2 炮孔降温的新方法

目前,高温爆破中常采取三类方法确保安全:一是采用降温措施,二是采用耐高温爆破器材和耐高温起爆器进行爆破,三是采用隔热材料将爆破器材隔热包装以防止自爆。第一类方法在煤矿火区爆破和冶炼生产中应用广泛。常用的措施包括大面积的洒水区域降温、炮孔注水降温、装药前的水袋降温、注浆降温等。洒水降温对于煤矿火区爆破起到很好的降温效果,但需要大量的水资源。对于裂隙发育的爆破区域,灌浆降温较为适合,但需要把握灌浆的稠稀度。第二类方法目前已取得较大进展,但缺点是耐高温的炸药往往造价过高,不适宜用于规模大的矿山爆破。高温矿山的温度常高达几百度,目前的耐高温炸药无法满足要求。此外,耐高温起爆器材的耐受温度只有 $100^{\circ}\text{C}$ ,也无法满足高温矿山爆破要求。第三类方法可以一定程度上隔绝温度,但在安装炸药时较为不便,并且温度不易控制,存在安全隐患。针对高温矿山的爆破,需要设计特殊装置,使得温度控制在安全范围内。为此,我们提出了一种利用重力热管降温原理降低高温爆破中炮孔温度的方法及装置。该方法已经申报了国家专利,在这里介绍主要目的是引起工程界专注,将这一新的思想用于工程实践。

基本原理:在钻机成孔后,由于煤层中有自燃煤,地温达到自燃温度,当孔口空气进入地下,提供了氧气,满足燃烧条件,炮孔内的煤自燃。为此,防止炮孔内煤燃烧的主要的措施包括降低煤层内的温度和防止地表空气进入孔内。具体做法是在炮孔孔口处安装一套封闭、注水和冷却装置,冷却装置用于炮孔内水蒸气的循环冷却,密封装置用于将炮孔内的水蒸气密封在炮孔内,防止水分流失;注水装置可向管内补充水分;冷却装置、密封装置和高温爆破炮孔一同形成一个重力热管降温循环系统。

当水以低速注入孔内,水就会在重力作用下沿

井壁下流,当水到达高温煤处就会降温。若煤层温度高于 $100^{\circ}\text{C}$ ,水就会被气化,形成蒸汽上浮。上浮的气体到达地表被冷却装置降温,冷凝成水,又在重力作用下进入煤层。往复循环不断将地下热能带到地表,又不断将地表低温以流动的形式带入地下。

该技术的主要优点在于:通过密封装置可将水密闭在炮孔内,只需使用少量的水即可对炮孔内部进行降温,利于干旱地区或高温矿山的安全爆破;通过注水装置可以调节注水量,进而调节炮孔内温度;通过冷却装置,可高效吸收炮孔内水蒸气带来的热量。该方法与洒水降温相比,只需少量的水即可实现温度控制,减少了对水的依赖。可将高温矿山中炮孔温度控制在 $100^{\circ}\text{C}$ 以内或更低,使得炸药在安全温度范围内。

## 8 结论

诱发煤层自燃防治及高温爆破安全技术的关键是力学问题,设计到地质勘探、现场监测和数值模拟等力学分析方法;煤层自燃规律的基本控制方程包括热传导方程、煤岩体的动力方程和煤层中孔隙渗流和裂隙流动,即温度场、应力场和破裂场以及渗流场的耦合问题。与煤层自燃相关的两种矿山开采类型分别井工开采和露天开采,基本物理过程包括采矿引起煤层破裂,形成的裂隙创造了高温热对流传导和补充氧气的煤层自燃条件。井工开采的治理技术应主要关注地表隔绝空气和降温,而主动的降温措施是在密闭环境下,利用注水-气化-冷凝-再注水的自循环,实现自适应灭火。露天开采重要的是减少开挖过程中形成稳定性较差的边坡和地表隔绝空气。在现有乳化炸药能够在 $100^{\circ}\text{C}$ 不爆炸的条件下。利用重力热管降温比较科学。配合适当的辅助措施,该技术可以保证孔内温度低于 $100^{\circ}\text{C}$ ,孔壁裂隙产生的高温可以借助水在孔壁的流动自动寻找位置并降温。

## 参考文献 (References)

- [1] 毛占利. 高瓦斯煤层自燃火灾防治技术研究[D]. 西安:西安科技大学,2006.
- [2] 赵凤杰. 基于活化能指标煤的自然倾向性的研究[D]. 阜新:辽宁工程技术大学,2005.
- [3] 胡社荣,蒋大成. 煤层自燃灾害研究现状与防治对策[J]. 中国地质灾害与防治学报,2000(4):69-72.
- [3] HU She-rong, JIANG Da-cheng. The disaster of spontaneous combustion of coalbeds and countermeasure of prevention[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2000(4):69-72. (in Chinese)
- [4] 束学来,郑炳旭,郭子如,等. 煤矿火区降温措施的分

- 析与实践[J]. 爆破, 2014, 31(3): 154-158.
- [4] SHU Xue-lai, ZHENG Bing-xu, GUO Zi-ru, et al. Analysis and practical of cooling measures in coal mine fire area [J]. *Blasting*, 2014, 31(3): 154-158. (in Chinese)
- [5] 文虎, 徐精彩, 邓军, 等. 煤层自燃多功能灌浆注浆胶防灭火系统及其应用[J]. *煤炭工程*, 2004(5): 4-6.
- [5] WEN Hu, XU Jing-cai, DENG Jun, et al. Multifunctional colloidal grouting system for prevention of spontaneous combustion and its applications [J]. *Coal Engineering*, 2004(5): 4-6. (in Chinese)
- [6] 雷学武, 万余庆, 李宝春. 乌达矿区煤层自燃现状及成因初析[J]. *中国煤田地质*, 1999, 11(4): 19-20, 36.
- [6] LEI Xue-wu, WAN Yu-qing, LI Bao-chun. Preliminary analysis of the status quo and causes of coal spontaneous combustion in Wuda coalfield [J]. *Coal Geology of China*, 1999, 11(4): 19-20, 36. (in Chinese)
- [7] 许晨, 李克民, 李晋旭, 等. 露天煤矿高温火区爆破的安全技术探究[J]. *露天采矿技术*, 2010(4): 73-75.
- [7] XU Chen, LI Ke-min, LI Jin-xu, et al. Security technology research on high-temperature fire area blasting in surface mine [J]. *Opencast Mining Technology*, 2010(4): 73-75. (in Chinese)
- [8] 束学来, 郑炳旭, 郭子如, 等. 测温技术在煤矿火区爆破中的应用[J]. *煤炭技术*, 2014, 33(8): 299-301.
- [8] SHU Xue-lai, ZHENG Bing-xu, GUO Zi-ru, et al. Application of temperature measurement technology in coal mine fire area blasting [J]. *Coal Technology*, 2014, 33(8): 299-301. (in Chinese)
- [9] 蔡建德. 露天煤矿高温区爆破安全作业技术研究[J]. *工程爆破*, 2013(1): 92-95.
- [9] CAI Jian-de. Security technology of high-temperature blasting in open pit coal mine [J]. *Engineering Blasting*, 2013(1): 92-95. (in Chinese)
- [10] 周名辉, 唐洪佩, 杨开山. 露天煤矿高温爆破技术研究[J]. *爆破*, 2014, 31(2): 119-122.
- [10] ZHOU Ming-hui, TANG Hong-pei, YANG Kai-shan. Study of high temperature area blasting in opencast coal mine [J]. *Blasting*, 2014, 31(2): 119-122. (in Chinese)
- [11] HOLMAN J P. Heat transfer (6th edition) [M]. McGraw-Hill Book Company, 1986.
- [12] 金大伟, 赵永军, 霍凯中. 煤储层渗透率主要影响因素及其物理模型研究[EB/OL]. 中国科技论文在线. <http://www.paper.edu.cn/download/downPaper/200508-166>. 2015-06-08.
- [13] 樊新杰, 曹代勇, 时孝磊, 等. 内蒙古西部乌达矿区煤层自燃的控制因素[J]. *地质通报*, 2006, 25(4): 487-491.
- [13] FAN Xin-jie, CAO Dai-yong, SHI Xiao-lei, et al. Controlling factors of spontaneous combustion of coal seams in the Wuda coalfield, western Inner Mongolia, China [J]. *Geological Bulletin of China*, 2006, 25(4): 487-491. (in Chinese)
- [14] 王理想, 李世海, 马照松, 等. 一种中心型有限体积孔隙-裂隙渗流求解方法及其 OpenMP 并行化[J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(5): 865-875.
- [14] WANG Li-xiang, LI Shi-hai, MA Zhao-song, et al. A cell-centered finite volume method for fluid flow in fractured porous media and its parallelization with OpenMP [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(5): 865-875. (in Chinese)
- [15] LI S H, ZHOU D. Strain strength distribution criterion [C] // *Third International Symposium on Computational Mechanics (ISCM III)*, Taipei, Taiwan, 2011: 414-415.
- [16] 李世海, 周东. 脆性材料损伤表述方法及基于应变强度分布破坏准则的计算单元[J]. *水利学报*, 2012, 43(S1): 8-12.
- [16] LI Shi-hai, ZHOU Dong. Formulation for damage of brittle materials and computational element based on criterion of strain strength distribution [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(S1): 8-12. (in Chinese)
- [17] LI SH, ZHOU D. Progressive failure constitutive model of fracture plane in geomaterial based on strain strength distribution [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, 50(3/4): 570-577.
- [18] 李世海, 周东, 王杰, 等. 水电能源开发中的关键工程地质体力学问题[J]. *中国科学: 物理学 力学 天文学*, 2013, 43(12): 1602-1616.
- [18] LI Shi-hai, ZHOU Dong, WANG Jie, et al. Key problem of engineering geomechanics in hydroelectric energy exploitation [J]. *SCIENTIA SINICA Physica, Mechanica & Astronomica*, 2013, 43(12): 1602-1616. (in Chinese)
- [19] 李世海, 汪远年. 三维离散元计算参数选取方法研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2004, 23(21): 3642-3651.
- [19] LI Shi-hai, WANG Yuan-nian. Selection study of computational parameters for DEM in geomechanics [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2004, 23(21): 3642-3651. (in Chinese)
- [20] LI S H, ZHAO M H, WANG Y N, et al. A new numerical method for DEM block and particle model [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2004, 41: 414-418.
- [21] LI S H, LIU X Y, LIU T P, et al. Continuum-based discrete element method and its applications [C] // *Proceedings of UK-China Summer School/International Symposium on DEM*, Beijing, China, 2008: 147-170.
- [22] DAY A S. An introduction to dynamic relaxation [J]. *The Engineering*, 1965, 219(29): 218-221.
- [23] MA Z S, FENG C, LIU T P, et al. A GPU accelerated continuous-based discrete element method for elastodynamics analysis [J]. *Advanced Materials Research*, 2011, 320: 329-334.

(下转第16页)

- and analyses on explosive effect of ribbon charge [J]. *Blasting*, 1999, 16(2):7-11. (in Chinese)
- [11] NEWMARK N M, SIESS C P, VIEST I M. Tests and analysis of composite beams with incomplete interaction [J]. *Proc Soc Exp Stress Anal*, 1951, 9(1):75-92.
- [12] JONES J P, WHITTIER J S. Waves at a flexibly bonded interface [J]. *Journal of Applied Mechanics*, 1967, 34(4):905-909.
- [13] MURTY G S. A theoretical model for the attenuation and dispersion of Stoneley waves at the loosely bonded interface of [10] elastic half spaces [J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1975, 11(1):65-79.
- [14] MYER L R, PYRAK-NOLTE L J, COOK N G W. Effects of single fractures on seismic wave propagation [J]. *Rock Joints*. Balkema, Rotterdam, 1990:467-473.
- [15] 王明洋, 钱七虎. 爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律 [J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(2):42-46.
- [15] WANG Ming-yang, QIAN Qi-hu. Attenuation law of explosive wave propagation in cracks [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 1995, 17(2):42-46. (in Chinese)
- [16] 李夕兵, 赖海辉, 古德生. 爆炸应力波斜入射岩体软弱结构面的透反射关系和滑移准则 [J]. *中国有色金属学报*, 1992(1):10-15.
- [16] LI Xi-bing, LAI Hai-hui, GU De-sheng. The relationship and incidence rule between reflectance and transmission induced by explosion stress wave at the weak structure plane [J]. *Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 1992(1):10-15. (in Chinese)
- [17] 卢文波. 应力波与可滑移岩石界面间的相互作用研究 [J]. *岩土力学*, 1996, 17(3):70-75.
- [17] LU Wen-bo. A study on interaction between stress wave and slipping rock interface [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 1996, 17(3):70-75. (in Chinese)
- [18] 卢文波, 赖世骧. 岩石钻爆开挖中预裂缝的隔震效果分析 [J]. *爆炸与冲击*, 1997, 17(3):193-198.
- [18] LU Wen-bo, LAI Shi-xiang. Analysis of vibration isolating effect of pre-splitting crack in rock excavation by blasting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(3):193-198. (in Chinese)
- [19] 胡英国, 卢文波, 金旭浩, 等. 岩石高边坡开挖爆破动力损伤的数值仿真 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2012, 31(11):2204-2213.
- [19] HU Ying-guo, LU Wen-bo, JIN Xu-hao, et al. Numerical simulation for excavation blasting dynamic damage of rock high slope [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2012, 31(11):2204-2213. (in Chinese)
- [20] WANG Z L, LI Y C, SHEN R F. Numerical simulation of tensile damage and blast crater in brittle rock due to underground explosion [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2007, 44(5):730-738.

(上接第9页)

- [24] WANG L X, LI S H, ZHANG G X, et al. A gpu-based parallel procedure for nonlinear analysis of complex structures using a coupled FEM/DEM approach [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, Article ID 618980:15.
- [25] 王 杰, 李世海, 周 东, 等. 模拟岩石破裂过程的块体单元离散弹簧模型 [J]. *岩土力学*, 2013, 34(8):2355-2362.
- [25] WANG Jie, LI Shi-hai, ZHOU Dong, et al. A block-discrete-spring model to simulate failure process of rock [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(8):2355-2362. (in Chinese)
- [26] 冯 春, 李世海, 刘晓宇. 半弹簧接触模型及其在边坡破坏计算中的应用 [J]. *力学学报*, 2011, 43(1):184-192.
- [26] FENG Chun, LI Shi-hai, LIU Xiao-yu. Semi-spring contact model and its application to failure simulation of slope [J]. *Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2011, 43(1):184-192. (in Chinese)
- [27] WANG J, LI S H, FENG C. A new algorithm to detect contacts in a system composed of many polyhedral blocks [C] // *Proceedings of the 6th International Conference on Discrete Element Methods and Related Techniques*, 2013:451-456.
- [28] WANG L X, LI S H, MA Z S. A finite volume simulator for single-phase flow in fractured porous media [C] // *Proceedings of the 6th International Conference on Discrete Element Methods and Related Techniques*, 2013:130-135.
- [29] 刘 洋, 李世海, 刘晓宇. 基于连续介质离散元的双重介质渗流应力耦合模型 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2011, 30(5):951-959.
- [29] LIU Yang, LI Shi-hai, LIU Xiao-yu. Coupled fluid flow and stress computation model of dual media based on continuum-medium distinct element method [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2011, 30(5):951-959. (in Chinese)
- [30] ZHANG L, ZHANG G X, WANG L X, et al. A comparative study on different parallel solvers for nonlinear analysis of complex structures [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, Article ID 764237:14.