

DOI:10.13409/j.cnki.jdpme.20220811001

# 冲击载荷下叠合岩层巷道围岩的应力演化数值模拟研究——基于岩层运动并行计算系统 StrataKing\*

岑子豪<sup>1</sup>, 王学滨<sup>2</sup>, 薛承宇<sup>1</sup>, 张钦杰<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学力学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学计算力学研究所, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:** 煤系地层属于典型的层状沉积岩层,这在传统连续介质模型中不能被较好反映。为了探究冲击载荷下叠合岩层巷道围岩的应力演化规律,采用以拉格朗日元与离散元耦合连续-非连续方法为基础发展的岩层运动并行计算系统 StrataKing,基于理想化模型分析了巷道上表面附近应力波的叠加。阐明了应力波叠加导致顶板开裂机理,并且探讨了冲击载荷幅值的影响规律。研究发现:在原始压应力波传至巷道上表面附近测点后,该测点的最大主应力刚开始呈下降-上升-下降的变化趋势,这是由原始压、拉应力波不同时刻的叠加不同导致的;由于次级应力波的波长较原始应力波的小,次级压、拉应力波的单独作用更明显,它们的叠加使巷道上表面附近测点能产生更低和更高的最大主应力,甚至导致顶板开裂;冲击载荷幅值越大,近似阶梯增长阶段中拉裂纹平均发展速度越快,巷道围岩最终开裂范围越大,巷道围岩平衡越困难。

**关键词:** StrataKing; 冲击载荷; 巷道围岩; 叠合岩层; 应力演化; 应力波叠加

**中图分类号:** TU452    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-2132(2024)01-0059-09

## Numerical Simulation on Stress Evolution of Surrounding Rock around A Roadway in Composite Strata under Impact Load Based on Parallel Computing System for Strata Motion

CEN Zihao<sup>1</sup>, WANG Xuebin<sup>2</sup>, XUE Chengyu<sup>1</sup>, ZHANG Qinjie<sup>1</sup>

(1. College of Mechanics and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

2. Institute of Computational Mechanics, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** Coal measure strata belong to typical layered sedimentary strata, which cannot be well simulated by use of the continuous model. In order to study the stress evolution of the surrounding rock around a roadway in composite strata under the impact load, the deformation-cracking processes of the surrounding rock were obtained through the parallel computing system for strata motion (based on the combined Lagrangian-discrete element method). The superposition of stress waves near the upper surface of the roadway was analyzed based on an idealized model. The mechanism of roof cracking caused

\* 收稿日期:2022-08-11;修回日期:2022-11-14

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52074142)资助

作者简介:岑子豪(1995—),男,硕士研究生。主要从事巷道围岩变形、破坏及稳定性方面的研究。

E-mail:czh463991455@qq.com

通讯作者:王学滨(1975—),男,教授,博导,博士。主要从事工程材料变形、破坏及稳定性方面的研究。

E-mail:wxbbb@263.net

by the superposition of stress waves was expounded, and influences of impact load amplitudes were explored. The following results were found. When the initial compressive stress wave reaches the monitored node near the upper surface of the roadway, the maximum principal stress of the monitored node shows a down-up-down trend at the beginning, which is caused by the superposition of the initial compressive and tensile stress waves at different points in time. Owing to the wavelengths of secondary stress waves being shorter than those of initial stress waves, the independent effects of the secondary compressive and tensile stress waves are more obvious than those of initial stress waves. The superposition of secondary stress waves will generate much lower or higher maximum principal stresses at the monitored node near the upper surface of the roadway, even leading to roof cracking. With increasing impact load amplitudes, the tensile cracks propagate more rapidly at the stepped growth stage, the final cracking range in the surrounding rock of the roadway increases, and the equilibrium of the surrounding rock becomes difficult.

**Keywords:** StrataKing; impact load; surrounding rock of the roadway; composite strata; stress evolution; stress wave superposition

## 0 引言

在采矿工程中,爆破和顶板断裂等都能产生冲击载荷。随着我国浅部煤炭资源的日益枯竭,开采深度每年以8~12 m的速度增加<sup>[1-2]</sup>。在深部高地应力、复杂地质条件下,冲击载荷作用下巷道围岩容易发生局部失稳,从而诱发冒顶、片帮、岩爆和冲击地压等灾害<sup>[3-5]</sup>。因此,研究冲击载荷下巷道围岩的应力、应变及裂纹的时空分布具有重要的理论和实际意义。

对于冲击载荷下巷道围岩破坏问题,大多数科技工作者采用连续方法或非连续方法开展数值模拟研究,并且已取得一些重要进展。例如,李夕兵等<sup>[6]</sup>采用PFC<sup>2D</sup>对高应力巷道围岩的力学响应和失稳机制开展了研究。结果表明,经由巷道顶板表面反射的拉应力波与静态的拉应力叠加引起了巷道顶板拉裂纹数量增加。Z. M. Zhu等<sup>[7-8]</sup>采用Autodyn<sup>2D</sup>对巷道围岩的破坏过程开展了研究。结果表明,经由巷道表面反射的拉应力波引起了围岩层裂。采用连续方法可以较好地计算巷道围岩的应力场和应变场,但仅能在一定程度上处理非连续介质问题。采用非连续方法可以较好地模拟岩块的运动和岩块之间的相互作用,但应力及应变的计算精度较低。兼具连续方法和非连续方法各自优势的连续-非连续方法正在快速发展<sup>[9-10]</sup>,此类方法被认为在连续介质向非连续介质转化和非连续介质进一步演化模拟方面具有突出能力。本文作者团

队基于自主开发的拉格朗日元与离散元耦合连续-非连续方法,已研究了冲击载荷幅值和频率对巷道围岩的变形-开裂过程的影响<sup>[11-12]</sup>。以该方法为基础,借鉴GPU并行计算的最新研究进展<sup>[13-14]</sup>,形成了岩层运动并行计算系统StrataKing(岩层之王,王之岩层)<sup>[15]</sup>。该系统的控制循环和计算任务分别由CPU和GPU执行,这在较大程度上提升了计算效率。在过去的研究中,采用的模型是单一岩性连续介质模型,这不能较好地反映煤系沉积岩固有的层状特征。通常,煤系沉积岩可被简化为叠合岩层模型(多个岩层叠合在一起,它们之间具有一定的黏聚力)。基于连续-非连续方法,半正弦波冲击下叠合岩层巷道围岩的应力演化的研究尚未见报道。

根据大安山矿轴10下槽煤层顺槽的地质条件,建立了叠合岩层模型,利用StrataKing,得到了冲击载荷下侧压系数大于1时巷道围岩的变形-开裂过程。首先,在巷道顶板布置了多个测点,以获取叠合岩层巷道围岩的最大主应力的演化;然后,基于理想化模型分析了巷道上表面附近应力波的叠加,以深化对最大主应力的演化规律的认识,并且阐明了应力波叠加导致顶板开裂机理;最后,探讨了冲击载荷幅值的影响规律。

## 1 StrataKing简介

StrataKing包括4大模块:应力-应变模块、开裂模块、接触-摩擦模块和运动模块。

在应力-应变模块中,每一个四边形单元被离散

为两对三角形子单元,每个子单元被分配一个线程,由各线程计算子单元的应力和应变:首先,根据高斯定理由子单元各节点的速度计算子单元应变率;然后,利用本构关系由子单元应变率计算子单元的应力并调和;最后,将各子单元的应力取平均求得单元的应力。

在开裂模块中,每个节点被分配一个线程,由各线程根据莫尔-库仑准则和最大主应力准则进行介质的开裂判断。

在接触-摩擦模块中,采用点-单元接触模式计算势接触力。若有一组接触点和单元发生接触,则生成一个包含该接触点和单元的接触对。每个接触对被分配一个线程,由各线程计算和分配势接触力。

在运动模块中,每个节点被分配一个线程,根据牛顿第二定律由节点质量和节点力计算节点加速度,再利用中心差分方法求解运动方程,进而得出节点的速度和位移。

StrataKing的流程如图1所示。首先,在主机端输入相关参数,对CPU内存和GPU显存进行分配,并将数据初始化。然后,执行循环语句,数据从CPU内存被拷贝至GPU显存,由CPU调用核函数在GPU上依次执行四大模块。最后,数据从GPU显存被拷贝至CPU内存,在主机端输出数据,并利用这些数据绘制曲线和云图等。应当指出,在一个时步内,上述循环语句被依次执行一遍,循环的次数被称为时步数目 $N$ ,当 $N$ 达到总时步数目 $N_m$ 时结束循环。

## 2 计算模型及方案

根据大安山矿轴10下槽煤层顺槽的地质条件<sup>[16]</sup>,通过将若干岩层叠合建立了叠合岩层模型(图2(a)),各岩层之间具有界面黏聚力。模型宽为

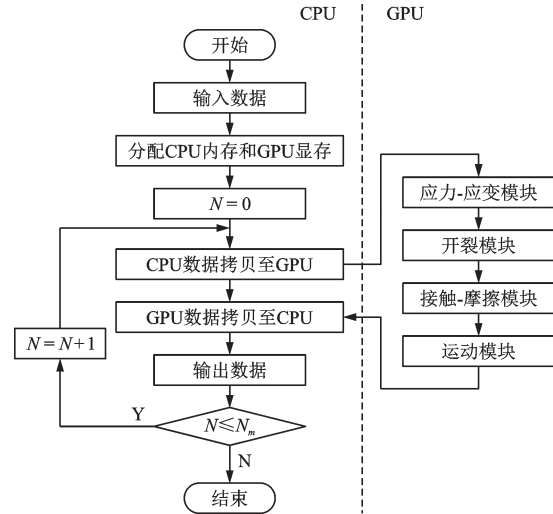


图1 StrataKing的流程

Fig.1 The flow chart of the parallel computing system for strata motion

40 m,高为40 m,模型左下角位于直角坐标系 $xOy$ 的 $O$ 点。该模型被剖分为 $200 \times 200$ 个正方形单元,每个单元边长为0.2 m。在模型下端面施加固定铰支座约束,在模型上端面 and 左、右边界分别施加9.45 MPa的垂直应力和12.5 MPa的水平应力,即侧压系数大于1。围岩力学参数见表1。另外,法向刚度系数 $K_n$ 取为弹性模量 $E$ 的15/m倍,I型断裂能 $G_I^I$ 和II型断裂能 $G_I^{II}$ 均取为0,两岩层间界面黏聚

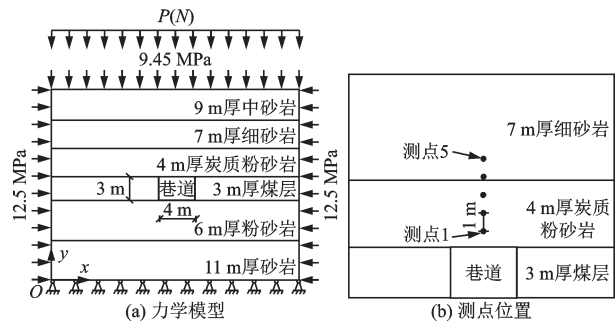


图2 力学模型和测点位置示意

Fig.2 Schematic of the mechanical model and positions of monitored nodes

表1 围岩力学参数<sup>[16]</sup>

Table 1 Mechanical parameters of the surrounding rock<sup>[16]</sup>

围岩类型	面密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-2})$	弹性模量 $E/\text{MPa}$	泊松比 $\mu$	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	黏聚力 $c/\text{MPa}$	抗拉强度 $\sigma_t/\text{MPa}$
中砂岩	2 530	13 010	0.26	42.35	14.66	8.64
细砂岩	2 660	12 250	0.23	38.51	15.34	6.43
炭质粉砂岩	2 640	8 480	0.34	35.04	13.66	7.92
煤层	1 810	2 090	0.21	32.72	1.47	0.73
粉砂岩	2 420	12 370	0.25	40.86	14.29	6.85
砂岩	2 490	13 140	0.29	43.36	13.65	8.27

力峰值取为两岩层黏聚力  $c$  的均值,局部自适应阻尼系数  $\alpha$  取为 0.2。为了确保数值稳定性,时间步长  $\Delta t$  取为临界时间步长的 1/4。计算条件为平面应变、大变形。

为了避免离散的四边形单元不能再开裂可能带来的高应力问题,对煤层单元采用应力跌落,应力跌落系数  $\beta$  取为 0.25<sup>[17]</sup>。

在巷道顶板布置了 5 个测点。测点 1 距离巷道上表面 1 m,相邻测点间距 1 m,如图 2(b)所示。

现有研究表明,顶板断裂和爆破等扰动产生的应力波可被简化为半正弦波<sup>[18-19]</sup>,采用的半正弦压应力波  $P(N)-N$  曲线如图 3 所示, $P(N)$  表达式为:

$$P(N) = \begin{cases} \frac{-P_{\max} [1 - \cos(2\pi\omega N\Delta t)]}{2} & 20\,001 \leq N \leq 21\,052 \\ 0 & N < 20\,001 \text{ 或 } N > 21\,052 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $P_{\max}$  为压应力波幅值; $\omega$  为作用频率,取为 50 Hz。

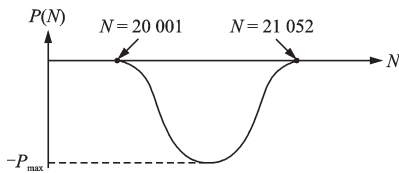


图 3  $P(N)-N$  曲线  
Fig.3 Curve of  $P(N)-N$

计算过程如下:

(1) 当  $N=0\sim 8\,600$  时,在初始应力及自重条件下将模型计算至趋于平衡。

(2) 当  $N=8\,601\sim 16\,000$  时,以由巷道中心向外逐圈删除单元的方式模拟巷道开挖过程。

(3) 当  $N=16\,001\sim 20\,000$  时,将开挖后模型计算至趋于平衡。

(4) 当  $N=20\,001\sim 21\,052$  时,在模型上端面施加冲击载荷(半正弦压应力波)。

共采用 4 个计算方案。方案 1~4 的  $P_{\max}$  分别为 10、20、30、40 MPa<sup>[16]</sup>。

### 3 计算结果及分析

#### 3.1 巷道围岩的最大主应力及裂纹的时空分布

以方案 4 ( $P_{\max}$  最大) 为例,介绍冲击载荷下叠合

岩层巷道围岩的最大主应力  $\sigma_3$  及裂纹的时空分布。为了叙述方便,将由模型上端面输入的压应力波定义为原始压应力波,将其经由巷道上表面反射的拉应力波定义为原始拉应力波。

图 4 给出了  $\sigma_3$  及裂纹的时空分布,正、负分别代表拉、压, $\sigma_3$  越小代表受挤压程度越大,灰色和黑色线段分别代表拉裂纹区段和剪裂纹区段。由此可以发现:

当  $N=16\,000$  时(图 4(a)),巷道已开挖完毕,在巷道顶、底板和两帮各存在一个半圆型的  $\sigma_3$  高值区。两帮  $\sigma_3$  高值区内的应力分布不连续,这是由于当煤层单元的应力状态对应的应力圆与莫尔-库仑准则强度线相切或相割时,其应力将发生跌落。由应力已跌落的煤层单元组成的区域为煤层破坏区。

当  $N=20\,200\sim 20\,300$  时(图 4(b)~(c)),原始压应力波已由模型上端面向下传播。在传播过程中,原始压应力波的前缘由直线逐渐转变为曲线,这应与模型的左、右边界条件有关。

当  $N=21\,000\sim 21\,700$  时(图 4(d)~(e)),若干拉裂纹出现在巷道两帮,这是由于在原始压应力波的冲击下,巷道两帮煤体向内挤入,且其局部  $\sigma_3$  达到抗拉强度。5 条由上至下发展的拉裂纹出现在底板,1 条由下至上发展的拉裂纹出现在巷道上表面附近,成片拉裂纹出现在巷道上方的细砂岩层中部。2 条拉裂纹出现在巷道上方的细砂岩层与炭质粉砂岩层交界处附近,下面对此现象进行解释。当界面黏聚力较小时,由于岩层界面的存在,各岩层可被近似为独立的梁结构。在原始压应力波的冲击下,细砂岩层向下弯曲变形,其下表面受拉程度增大,进而导致了 2 条斜向上发展的拉裂纹先出现在细砂岩层下界面附近。当然,原始拉应力波的作用也可能存在。随着细砂岩层与炭质粉砂岩层之间的错动量增大,它们之间的界面黏聚力在未达到峰值前持续增大,这将使得两岩层逐渐形成一个整体,进而导致上述拉裂纹斜向下发展至炭质粉砂岩层中。

当  $N=21\,701\sim 50\,000$  时(图 4(f)~(g)),巷道两帮的拉裂纹继续发展,进而导致片帮现象出现。巷道上表面附近的拉裂纹继续向上发展。巷道上方的细砂岩层与炭质粉砂岩层交界处的 2 条拉裂纹继续发展。底板的拉裂纹发展缓慢。

当  $N=50\,001\sim 100\,000$  时(图(h)),巷道围岩趋于平衡, $\sigma_3$  和裂纹的分布几乎不再变化。

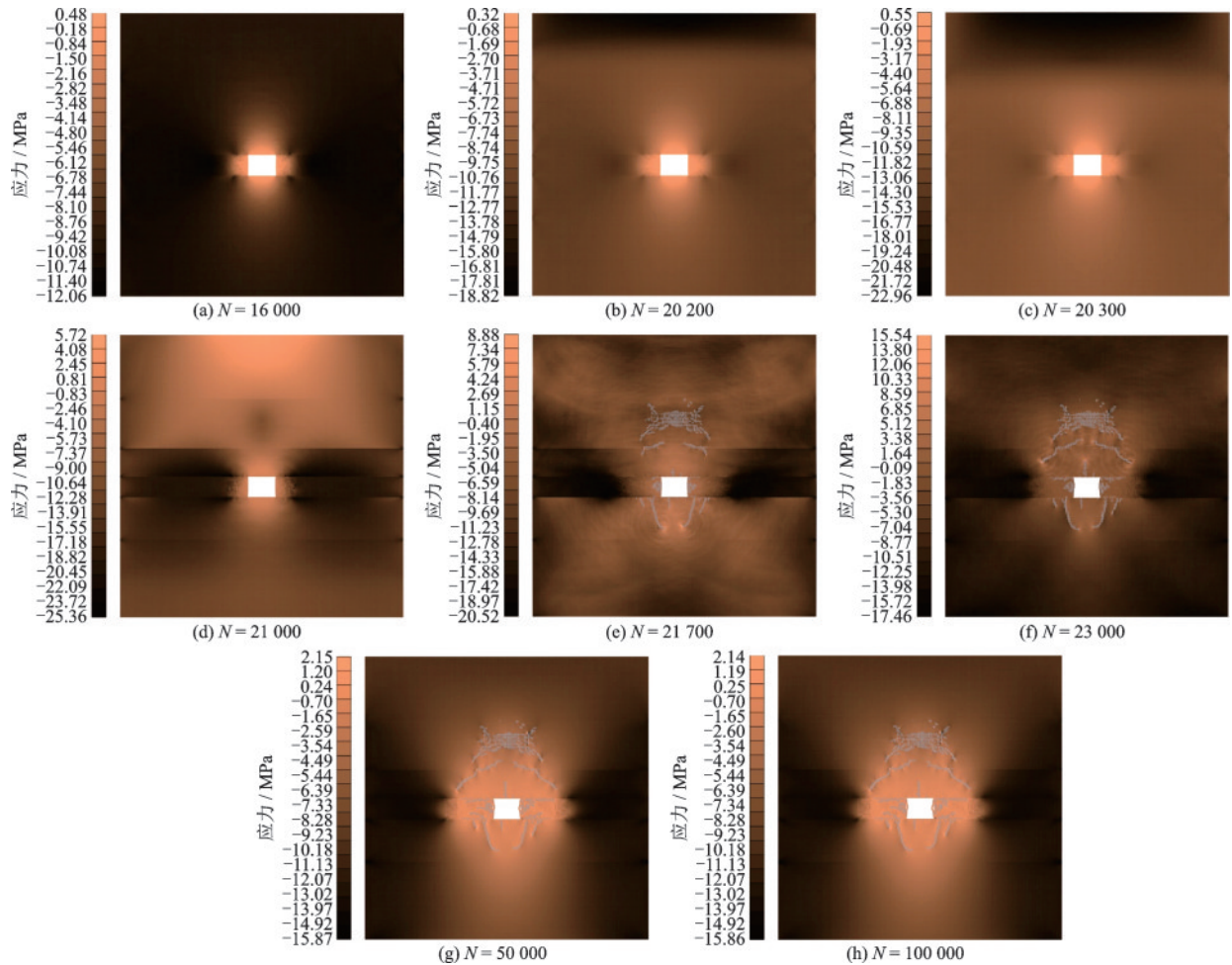


图4 方案4的 $\sigma_3$ 及裂纹的时空分布

Fig.4 Spatiotemporal distributions of  $\sigma_3$  and cracks in scheme 4

巷道围岩几乎未出现剪裂纹,这是由于除煤层以外各岩层的 $c$ 相对较大,它们的应力难以满足莫尔-库仑准则。应当指出,煤层的 $c$ 较小,但其中几乎不存在剪裂纹,这是由于对煤层单元进行了应力跌落(单元应力满足莫尔-库仑准则后发生跌落)。

文献[16]采用连续方法(FLAC<sup>3D</sup>)模拟了冲击载荷下巷道围岩的破坏过程,当冲击载荷幅值较大时,巷道两帮煤体发生拉伸破坏,这与本文中巷道两帮煤体发生拉裂有相符之处。不仅如此,本文采用的StrataKing适于模拟连续介质向非连续介质转化或非连续介质的进一步演化,裂纹的时空分布可被细致地呈现出来。

### 3.2 巷道顶板测点的 $\sigma_3$ 演化规律

图5(a)给出了测点1~5的 $\sigma_3-N$ 曲线。由此可以发现,在原始压应力波传入模型( $N=20\ 000$ )前,首先,各测点的 $\sigma_3$ 趋于稳定;随后,受到巷道开挖的影响,各测点的 $\sigma_3$ 上升,并且不同测点上升的程度不

同;当巷道开挖完成后,各测点的 $\sigma_3$ 趋于稳定。在原始压应力波传入模型后,各测点的 $\sigma_3$ 经历波动-衰减-稳定的过程。

为了更细致地反映各测点的 $\sigma_3-N$ 曲线的区别,图5(b)给出了 $N=5\ 000\sim 28\ 000$ 时测点1~5的 $\sigma_3-N$ 曲线。由此可以发现:

当 $N=5\ 000\sim 8\ 600$ 时,各测点的 $\sigma_3$ 趋于稳定,这对应于巷道开挖前的平衡阶段。

当 $N=8\ 601\sim 16\ 500$ 时,各测点的 $\sigma_3$ 随着 $N$ 的增大而上升,这是由于受到巷道开挖的影响,巷道附近围岩的应力得以释放。测点距离巷道上表面越近, $\sigma_3$ 上升的程度越大。例如,测点1的 $\sigma_3$ 从 $-9.80$  MPa上升至 $-0.73$  MPa;测点5的 $\sigma_3$ 从 $-9.71$  MPa上升至 $-5.65$  MPa。

当 $N=16\ 501\sim 20\ 000$ 时,各测点的 $\sigma_3$ 趋于稳定,这对应于巷道开挖后的平衡阶段。

当 $N=20\ 001\sim 20\ 300$ 时,各测点的 $\sigma_3$ 尚未发生明显变化,这是由于原始压应力波前缘尚未传至各

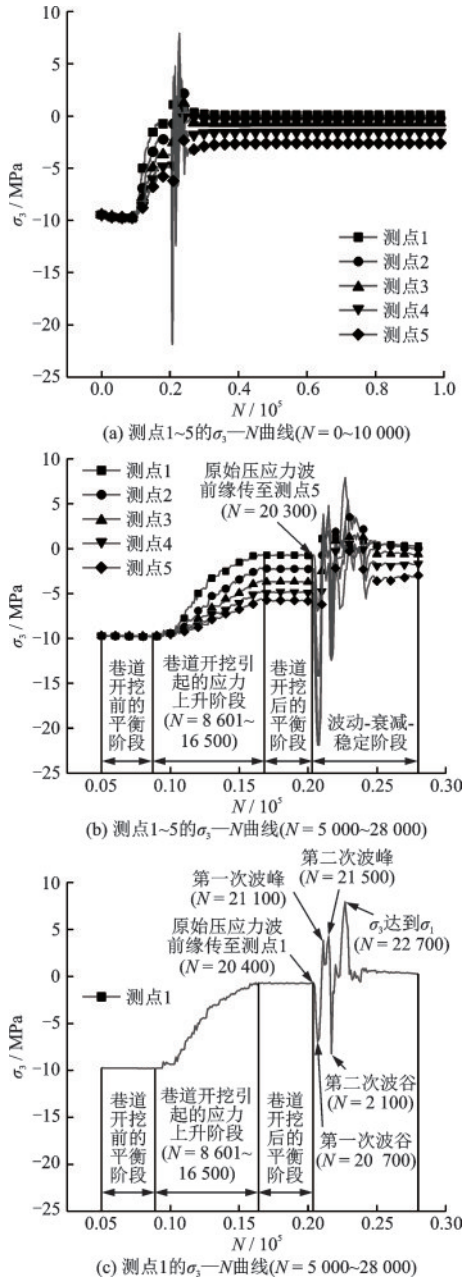


图5 方案4的测点1~5的 $\sigma_3$ - $N$ 曲线

Fig.5 Evolution of  $\sigma_3$  with timestep at monitored nodes 1-5 (scheme 4)

测点。

当 $N=20\ 301\sim 21\ 100$ 时,原始压应力波前缘依次传至各测点,这使得它们的 $\sigma_3$ 出现了剧烈波动,并且距离巷道上表面越远, $\sigma_3$ 的波动振幅越大。例如,测点1的 $\sigma_3$ 先从 $-0.73\text{ MPa}$ 下降至 $-6.96\text{ MPa}$ ,然后上升至 $3.80\text{ MPa}$ ,波动振幅为 $10.76\text{ MPa}$ ;测点5的 $\sigma_3$ 先从 $-5.85\text{ MPa}$ 下降至 $-21.87\text{ MPa}$ ,然后上升至 $2.22\text{ MPa}$ ,波动振幅为 $24.09\text{ MPa}$ 。下面,对此现象进行解释。在原始压应力波前缘传递至某测点后,该应力波将于巷道上表面反射为原始拉应力

波并再次传递至该测点。由于测点1距离巷道上表面较近,传至该测点的原始拉应力波的 $\sigma_3$ 绝对值与此时传至该测点的原始压应力波的相差不大,两者叠加将极大衰减原始压应力波的能量,从而导致测点1所受压应力波的影响较小。由于测点5距离巷道上表面较远,反射的原始拉应力波传递至该测点需要一定时间,这将使得传至测点5的原始拉应力波的 $\sigma_3$ 绝对值与此时传至该测点的原始压应力波的相差较大,从而导致测点5所受压应力波的影响较大。

此后,各测点的 $\sigma_3$ 呈衰减-稳定的趋势。

为了详细考察冲击载荷下巷道上表面附近测点的 $\sigma_3$ 的演化规律,以测点1的 $\sigma_3$ - $N$ 曲线为例进行介绍。图5(c)给出了 $N=5\ 000\sim 28\ 000$ 时测点1的 $\sigma_3$ - $N$ 曲线,由此可以发现:

当 $N=20\ 400\sim 20\ 700$ 时, $\sigma_3$ 由 $-0.73\text{ MPa}$ 下降至 $-6.96\text{ MPa}$ ,这表明原始压应力波的峰前部分逐渐传至该测点。应当指出,当 $N=20\ 400$ 时,原始压应力波的前缘刚好传至该测点。该测点距离巷道上表面较近。此后,原始压应力波前缘将很快传至巷道上表面反射为原始拉应力波。当 $N=20\ 700$ 时,原始拉应力波的前缘已传至该测点上方,此时原始压应力波的 $\sigma_3$ 绝对值与原始拉应力波的差值首次达到最大,从而使该测点的 $\sigma_3$ 达到波谷。

当 $N=20\ 701\sim 21\ 100$ 时, $\sigma_3$ 由 $-6.96\text{ MPa}$ 上升至 $3.80\text{ MPa}$ ,这是由于该测点所受原始拉应力波的作用逐渐强于原始压应力波的作用。

当 $N=21\ 101\sim 21\ 500$ 时, $\sigma_3$ - $N$ 曲线出现了震荡:当 $N=21\ 101\sim 21\ 200$ 时, $\sigma_3$ 由 $3.8\text{ MPa}$ 降至 $1.23\text{ MPa}$ ;当 $N=21\ 201\sim 21\ 500$ 时, $\sigma_3$ 由 $1.23\text{ MPa}$ 上升至 $4.24\text{ MPa}$ 。这是由于该测点下方的介质开裂造成的。另外,裂纹会阻断一部分应力波的传播,并引起应力波的反射,这也会引起该测点的 $\sigma_3$ 震荡。

当 $N=21\ 501\sim 21\ 700$ 时, $\sigma_3$ 再次下降至波谷;当 $N=21\ 701\sim 22\ 700$ 时, $\sigma_3$ 上升并达到炭质粉砂岩层(直接顶)的抗拉强度。此后,应力波在传播过程中逐渐衰减, $\sigma_3$ 逐渐趋于稳定。

### 3.3 基于理想化模型的分析

上文已指出,在原始压应力波传至测点1后,该测点的 $\sigma_3$ 刚开始( $N=20\ 400\sim 21\ 700$ )呈下降-上升-下降的变化趋势(图5(c))。在此阶段,测点1主要受到原始压应力波和原始拉应力波的叠加作用,其

他因素的影响较小。为了进一步对原始压应力波和原始拉应力波的叠加作用进行说明,基于理想化模型(例如,将岩石视为均匀连续的弹性介质,未考虑阻尼),图6(a)给出了巷道上表面附近原始压、拉应力波叠加示意图。其中,细实线和粗虚线分别代表测点1的原始压、拉应力波的时程曲线,细虚线代表原始压应力波的 $\sigma_3$ 绝对值,粗实线代表在原始压、拉应力波叠加后该测点的 $\sigma_3-N$ 曲线,带点的粗实线代表上述叠加后形成的拉应力波。下面根据示意图对该阶段的现象进行解释。

当 $N=a$ 时,测点1的 $\sigma_3$ 开始下降,这对应原始压应力波的前缘刚好传至该测点。当 $N=a\sim b$ 时,该测点的 $\sigma_3$ 逐渐下降,这是由于原始压应力波的 $\sigma_3$ 逐渐下降。当 $N=b$ 时,原始拉应力波的前缘已传至该测点上方,此时原始压应力波和原始拉应力波的 $\sigma_3$ 之和达到最小,从而使该测点的 $\sigma_3$ 达到波谷。当 $N=b\sim d$ 时,原始拉应力波的 $\sigma_3$ 逐渐大于原始压应力波的 $\sigma_3$ 绝对值,从而使原始压、拉应力波的 $\sigma_3$ 之和逐渐增大,这将导致该测点的 $\sigma_3$ 逐渐增大。应当指出,当 $N=c$ 时,原始压应力波的 $\sigma_3$ 绝对值与原始拉应力波的刚好相等,这表明此时原始压、拉应力波刚好抵消,在此之前原始压应力波的 $\sigma_3$ 绝对值大于原始拉应力波的,在此之后原始压应力波的 $\sigma_3$ 绝对值小于原始拉应力波的;当 $N=d$ 时,原始压应力

波和原始拉应力波的 $\sigma_3$ 之和达到最大,从而使该测点的 $\sigma_3$ 达到峰值。当 $N=d\sim e$ 时,原始拉应力波的峰后部分逐渐传出该测点,从而使该测点的 $\sigma_3$ 下降。

上文已指出,当 $N=21\ 500\sim 22\ 700$ 时,测点1的 $\sigma_3$ 首先再次降至波谷,然后上升并达到炭质粉砂岩层的抗拉强度。下面,基于理想化模型对此现象进行解释。由图6(a)可以发现,由原始压、拉应力波叠加后形成的拉应力波的强度和波长都将减小。该拉应力波经由岩层上界面反射后,将形成次级压应力波,其经由巷道上表面反射后会形成次级拉应力波。次级压、拉应力波仍将叠加。图6(b)给出了巷道上表面附近次级压、拉应力波叠加示意图。其中,细实线和粗虚线分别代表测点1的次级压、拉应力波的时程曲线,细虚线代表次级压应力波的 $\sigma_3$ 绝对值,粗实线代表在次级压、拉应力波叠加后该测点的 $\sigma_3-N$ 曲线。由此可以发现,由于次级应力波的波长较原始应力波的小,次级压、拉应力波的叠加将不如原始压、拉应力波的叠加更加及时(导致抵消程度较大);尽管次级压、拉应力波的强度有所减小,但波的单独作用更明显,从而抵消程度较小,它们的叠加使测点1能产生更低和更高的 $\sigma_3$ ,甚至导致拉裂。应当指出,次级压、拉应力波之后的后继应力波的叠加仍有致裂的可能。

### 3.4 冲击载荷幅值的影响

如上文所述,巷道围岩几乎未出现剪裂纹。下面,通过考察拉裂纹区段数目 $N_i$ 随着 $N$ 增大的演化规律分析巷道围岩的开裂情况。

图7(a)给出了方案1~4的 $N_i-N$ 曲线。为了更加清楚地呈现冲击载荷下各方案的 $N_i$ 的演化过程,图7(b)给出了 $N=20\ 000\sim 28\ 000$ 时各方案的 $N_i-N$ 曲线。

首先,以方案4( $P_{\max}$ 最大)为例,介绍 $N_i$ 随着 $N$ 增大的演化规律。由图7(b)可以发现, $N_i-N$ 曲线可被大致划分为以下阶段:恒定为0阶段、近似阶梯增长阶段和基本恒定不变阶段。在恒定为0阶段( $N=0\sim 21\ 000$ )后, $N_i$ 进入近似阶梯增长阶段( $N=21\ 001\sim 24\ 400$ ),该阶段可被大致划分为3个阶梯。每个阶梯可被划分为拉裂纹快速发展和缓慢发展阶段,这表明拉裂纹的发展具有一定间歇性。例如,在第1个阶梯中( $N=21\ 001\sim 22\ 500$ ),当 $N=21\ 001\sim 21\ 700$ 时, $N_i$ 由0快速增长至1 223,这是由巷道顶、底板和两帮中的拉裂纹萌生和发展造成的(图4(e));当 $N=21\ 701\sim 22\ 500$ 时, $N_i$ 由1 223缓

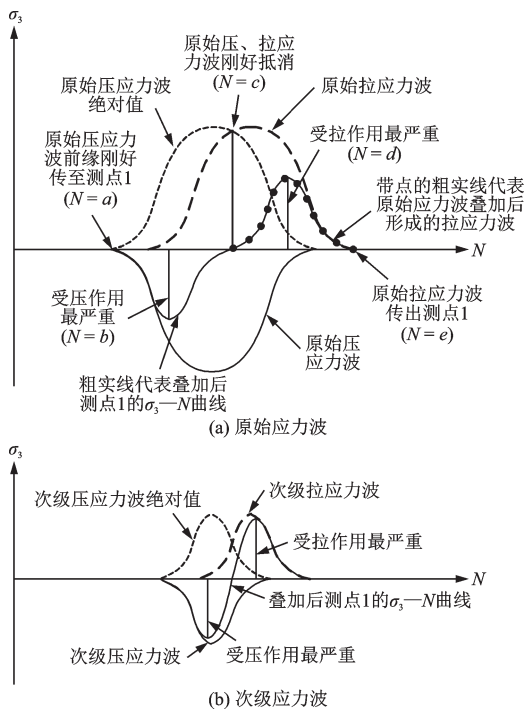


图6 基于理想化模型的应力波叠加示意

Fig.6 Schematic of stress waves superposition on an idealized model

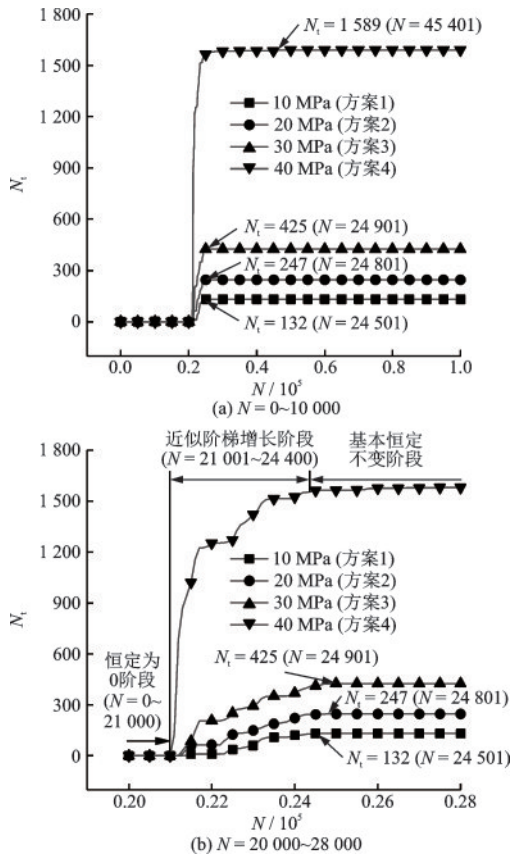


图7 方案1~4的 $N_t$ - $N$ 曲线

Fig.7 Evolution of the tensile crack segment number with timesteps (schemes 1-4)

慢增长至1 271,这是由于巷道围岩中某种有利于平衡的结构正在形成,应力处于调整中。拉裂纹间歇性发展表明了巷道围岩经历应力集中-应力释放(拉裂纹快速发展)-应力调整(拉裂纹缓慢发展,围岩中某种有助于平衡的结构正在形成)-应力调整失败(结构的平衡被打破)-应力再次集中-应力再次释放(拉裂纹再次快速发展)的循环过程。上述间歇性与文献[12]的结果(周期冲击载荷下单一岩性巷道围岩中拉、剪裂纹区段数目呈阶梯型增长)具有一定类似性。

方案1~3的 $N_t$ - $N$ 曲线的形式与方案4的基本相同,均可被划分为恒定为0阶段、近似阶梯增长阶段和基本恒定不变阶段。下面,对各方案的结果进行简单对比。

当 $N$ 相同时,方案1~4的 $N_t$ 依次增加。例如,当 $N=22 501$ 时,方案1~4的 $N_t$ 分别为38、125、251和1 271。在方案1~4中, $N_t$ 分别最终稳定在132、247、425和1 589,分别对应的 $N$ 为24 501、24 801、24 901和45 401。由此可以发现, $P_{max}$ 越大,近似阶梯增长阶段中拉裂纹平均发展速度越快;最终的 $N_t$

越大,这表明巷道围岩最终开裂范围越大;巷道围岩平衡越困难。这与文献[12]中周期冲击载荷下单一岩性巷道围岩拉裂纹区段数目与压应力波幅值成正比的结果定性相符。

## 4 结 论

(1)在原始压应力波传至巷道上表面附近后,此处测点的最大主应力刚开始呈下降-上升-下降的变化趋势。基于理想化模型的解释如下:首先,此处原始压应力波的作用逐渐增强;然后,经由巷道上表面反射的原始拉应力波(逐渐强于原始压应力波)在此处与原始压应力波发生叠加;最后,原始拉应力波峰后部分逐渐传出此处。

(2)由于次级应力波的波长较原始应力波的小,次级压、拉应力波的单独作用更明显,它们的叠加使巷道上表面附近测点能产生更低和更高的最大主应力,甚至导致顶板拉裂。

(3)冲击载荷幅值越大,近似阶梯增长阶段中拉裂纹平均发展速度越快,巷道围岩最终开裂范围越大,巷道围岩平衡越困难。

## 参考文献:

- [1] 康红普. 我国煤矿巷道围岩控制技术70年及展望[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 40(1): 1-30.  
Kang H P. Seventy years development and prospects of strata control technologies for coal mine roadways in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 40(1): 1-30. (in Chinese)
- [2] 侯朝炯. 深部巷道围岩控制的关键技术研究[J]. 中国矿业大学学报, 2017, 46(5): 970-978.  
Hou C J. A study on the technologies of controlling the surrounding rock of deep roadway[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2017, 46(5): 970-978. (in Chinese)
- [3] 李夕兵, 陶明, 宫凤强, 等. 冲击载荷作用下硬岩层裂破坏的理论和试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1081-1088.  
Li X B, Tao M, Gong F Q, et al. Theoretical and experimental study of hard rock spalling fracture under impact dynamic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1081-1088. (in Chinese)
- [4] 何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(16): 2803-2813.

- He M C, Xie H P, Peng S P, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(16): 2803-2813. (in Chinese)
- [5] 姜耀东, 赵毅鑫. 我国煤矿冲击地压的研究现状: 机制、预警与控制[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(11): 2188-2204.
- Jiang Y D, Zhao Y X. State of the art: Investigation on mechanism forecast and control of coal bumps in China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(11): 2188-2204. (in Chinese)
- [6] 李夕兵, 廖九波, 赵国彦, 等. 动力扰动下高应力巷道围岩动态响应规律[J]. 科技导报, 2012, 30(22): 48-54.
- Li X B, Liao J B, Zhao G Y, et al. Dynamic response of surrounding rock in highly-stressed tunnel by dynamic disturbance [J]. Science & Technology Review, 2012, 30(22): 48-54. (in Chinese)
- [7] Zhu Z M, Mohanty B, Xie H P. Numerical investigation of blasting-induced crack initiation and propagation in rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2007, 44: 412-424.
- [8] 朱哲明, 李元鑫, 周志荣, 等. 爆炸荷载下缺陷岩体的动态响应[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(6): 1157-1167.
- Zhu Z M, Li Y X, Zhou Z R, et al. Dynamic response of defected rock under blasting load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2011, 30(6): 1157-1167. (in Chinese)
- [9] Lollino P, Andriani G F. Role of brittle behaviour of soft calcarenites under low confinement: Laboratory observations and numerical investigation [J]. Rock Mechanics & Rock Engineering, 2017, 50(7): 1863-1882.
- [10] Feng C, Li S H, Liu X Y, et al. A semi-spring and semi-edge combined contact model in CDEM and its application to analysis of Jiweishan landslide [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014, 6(1): 26-35.
- [11] 王学滨, 刘桐辛, 田锋, 等. 周期冲击荷载下巷道顶板开裂机理数值模拟[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3106-3115.
- Wang X B, Liu T X, Tian F, et al. Numerical simulation of tunnel roof cracking mechanism under periodic impact loads[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(10): 3106-3115. (in Chinese)
- [12] 王学滨, 田锋, 钱帅帅. 不同冲击幅值下洞室围岩变形-开裂-垮塌过程——基于连续-非连续方法[J]. 振动与冲击, 2021, 40(1): 233-242.
- Wang X B, Tian F, Qian S S. Deformation-cracking-collapse process of surrounding rock of cavern for different impact amplitudes based on continuous-discontinuous method [J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(1): 233-242. (in Chinese)
- [13] Lisjak A, Mahabadi O K, He L, et al. Acceleration of a 2D/3D finite-discrete element code for geomechanical simulations using General Purpose GPU computing [J/OL]. Computers and Geotechnics, 2018, 100: 84-96.
- [14] Liu H, Liu Q S, Ma H, et al. A novel GPGPU parallelized contact detection algorithm for combined finite-discrete element method [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2021, 144: 104782.
- [15] 刘天成. 二维连续-非连续 CUDA 并行程序设计及应用[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2021.
- Liu T C. Design and application of a 2-Dimensional continuum-discontinuum CUDA Parallel Program [D]. Fuxin: Liaoning Technical University, 2021. (in Chinese)
- [16] 梁冰, 汪北方, 李刚, 等. 动力扰动诱发巷帮煤体冲击矿压机理研究[J]. 安全与环境学报, 2014, 14(2): 13-18.
- Liang B, Wang B F, Li G, et al. On the mechanism of the rock-bursts at the roadway sides induced by the dynamic disturbance [J]. Journal of Safety and Environment, 2014, 14(2): 13-18. (in Chinese)
- [17] 王学滨, 刘桐辛, 岑子豪, 等. 基于连续-非连续方法的正断层下盘开采断层滑移演化研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2021, 41(4): 804-812.
- Wang X B, Liu T X, Cen Z H, et al. Study on evolution of the fault slip during the normal fault footwall mining based on a continuum-discontinuum method [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2021, 41(4): 804-812. (in Chinese)
- [18] 高富强, 高新峰, 康红普. 动力扰动下深部巷道围岩力学响应 FLAC 分析[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(4): 680-685.
- Gao F Q, Gao X F, Kang H P. FLAC analysis of mechanical response of surrounding rock mass in deep tunnel [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(4): 680-685. (in Chinese)
- [19] 温颖远, 牟宗龙, 易恩兵, 等. 动力扰动下不同硬度煤层巷道围岩响应特征研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2013, 30(4): 555-559.
- Wen Y Y, Mu Z L, Yi E B, et al. The response features of roadway surrounding rock in different hardness coal seams under dynamic disturbance [J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2013, 30(4): 555-559. (in Chinese)

(本文编辑: 赵霞)