

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2025.06.021

# 节理对爆炸应力波透反射能量影响研究

汪鹏程, 徐永恺

(合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009)

**摘要:**天然的岩体中存在着大量的节理、裂隙等缺陷,裂隙对炸药爆破能量的传播起到阻断和衰减作用。文章基于 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件,建立线弹性节理岩石爆破数值模型,研究不同产状的节理对爆炸应力波透反射能量的影响。结果表明:随着节理厚度增大,透射能量比逐渐减小并趋于稳定,而反射能量比则逐渐增大并趋于稳定;节理距爆源距离越远,透射能量比逐渐增大并趋于稳定,反射能量比逐渐减小并趋于稳定;节理倾斜角度越大,透射能量比越大,并逐渐趋于 1.0,反射能量比随节理倾斜角度增大而逐渐减小并趋于 0;当节理填充不同材料时,填充材料的弹性模量比岩石的弹性模量越小,对爆炸应力波能量反射能力越强,应力波越难透射过节理。爆炸应力波的透射率随着节理数量的增多而逐渐减小,节理数量越多,节理厚度对爆炸应力波能量透射率的影响则越小。

**关键词:**岩石爆破;节理性质;爆破能量;数值模拟

中图分类号:U455.6

文献标志码:A

文章编号:1003-5060(2025)06-0846-06

## Study on the influence of joints on transmitted and reflected energy of explosive stress waves

WANG Pengcheng, XU Yongkai

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** There are a large number of joints, cracks, and other defects in natural rock masses, which block and attenuate the propagation of explosive blasting energy. Based on the ANSYS/LS-DYNA numerical simulation software, this paper establishes a numerical model for linear elastic jointed rock blasting, and studies the influence of different occurrences of joints on the transmitted and reflected energy of explosive stress waves. The results show that as the joint thickness increases, the transmitted energy ratio gradually decreases and tends to stabilize, while the reflected energy ratio gradually increases and tends to stabilize; as the distance between the joint and the explosion source increases, the transmitted energy ratio gradually increases and tends to stabilize, while the reflected energy ratio gradually decreases and tends to stabilize; as the joint inclination angle increases, the transmitted energy ratio increases and gradually approaches 1.0, while the reflected energy ratio gradually decreases and approaches 0. When joints are filled with different materials, the smaller the elastic modulus of the filling material compared to that of the rock, the stronger the ability to reflect the energy of explosive stress waves, and the harder it is for stress waves to pass through the joint. The transmittance of explosive stress waves gradually decreases with the increase of the number of joints, and the more joints there are, the smaller the influence of joint thickness on the energy transmittance of explosive stress waves.

**Key words:** rock blasting; joint properties; blasting energy; numerical simulation

收稿日期:2023-04-12;修回日期:2023-06-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(12272119)

作者简介:汪鹏程(1968—),男,安徽桐城人,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

钻孔爆破是常见的隧道破岩方法,而隧道岩体中常常含有节理裂隙等天然缺陷,这些缺陷的存在对爆炸应力波起到隔断减弱的作用,直接影响炸药的破岩效果。一般而言,炸药爆破通过产生的振动和能量对岩体产生主要的破坏作用。因此,可以通过研究节理裂隙对炸药爆破产生振动和能量的影响来分析节理对炸药爆破产生的隔断作用。

近些年来,多数研究学者已经开展了节理对爆破影响的研究。文献[1]通过理论推导爆炸应力波在穿越岩石和节理界面时的透、反射公式;文献[2]根据实际地质几何特征,结合理论分析,推导出应力波穿越节理时的衰减规律;文献[3]以 ricker 子波作为爆炸场源,从力的角度得出爆生裂纹从节理两端起裂扩展的结果;文献[4]通过连续-非连续数值模拟方法,探讨节理强度、节理刚度、节理间距、节理倾角等节理物理力学性质和几何特征对爆破效果的影响规律;文献[5]通过近似方法研究节理与岩体交界处应力波的透反射规律;文献[6]在考虑节理界面与充填材料共同变形的条件下,推导 P 波和 S 波在充填节理处的波动方程,得出透射系数与节理角度、厚度的关系;文献[7]通过研究爆炸应力波在层状节理中的衰减实验,发现节理对应力波的阻碍作用与应力波射入节理中的角度有关。

本文在上述研究基础上,通过 ANSYS/LS-DYNA 数值模拟软件,研究节理物理性质及数量对爆炸应力波的阻碍作用,分析节理对爆炸应力波能量产生的影响。

## 1 应力波在岩石中传播的能量

在无限域岩石中,假设爆炸应力波产生的平面纵波以  $c_p$  的速度在岩石内部传播<sup>[7]</sup>,则该纵波具有的瞬时爆破能量  $e_p$  为:

$$e_p = \frac{1}{2}\sigma\left(\frac{\sigma}{\rho c_p^2}\right) + \frac{1}{2}\rho\left(\frac{\sigma}{\rho c_p}\right)^2 \quad (1)$$

该纵波的平均能量密度  $\bar{e}_p$  为:

$$\bar{e}_p = \frac{1}{\rho c_p^2 T} \int_0^x \sigma^2 dx \quad (2)$$

其中: $\sigma$  为所选取的测点的法向应力; $x$  为测点离炸药中心的距离; $T$  为爆炸应力波的整个作用过程所需时间; $c_p$  为纵波波速; $\rho$  为岩石的材料密度。

相应地,应力波在岩石中横波的平均能量密度  $\bar{e}_s$  为:

$$\bar{e}_s = \frac{1}{\rho c_s^2 T} \int_0^x \tau^2 dx \quad (3)$$

其中: $\tau$  为选取测点的切向应力; $c_s$  为岩石中横波波速。纵波和横波的能量公式分别为:

$$W_\sigma = \frac{A}{\rho c_p^2} \int_0^x \sigma^2 dx \quad (4)$$

$$W_\tau = \frac{A}{\rho c_s^2} \int_0^x \tau^2 dx \quad (5)$$

在 ANSYS 软件中,所选取岩石的材料和节理都为线弹性材料,且线弹性材料应力波的传播过程是一个等温过程<sup>[8]</sup>,除岩石材料外,与外部没有任何热量交换。因此,爆炸应力波在遇到岩石节理过程中的入射波、反射波和透射波的能量公式分别为:

$$W_1 = W_{\sigma_1} + W_{\tau_1} = \frac{A}{\rho c_p^2} \int_0^{x_1} \sigma_1^2 dx + \frac{A}{\rho c_s^2} \int_0^{x_1} \tau_1^2 dx \quad (6)$$

$$W_T = W_{\sigma_2} + W_{\tau_2} = \frac{A}{\rho c_p^2} \int_0^{x_2} \sigma_2^2 dx + \frac{A}{\rho c_s^2} \int_0^{x_2} \tau_2^2 dx \quad (7)$$

$$W_R = W_1 - W_T \quad (8)$$

其中: $W_{\sigma_1}$ 、 $W_{\tau_1}$  分别为节理靠近爆源侧的纵波、横波的能量; $W_{\sigma_2}$ 、 $W_{\tau_2}$  分别为节理远离爆源侧的纵波、横波的能量; $W_1$ 、 $W_T$ 、 $W_R$  分别为选取测点的爆炸入射波、透射波和反射波的能量; $A$  为选取单元测点的面积; $x_1$  为节理靠近爆源侧测点到爆源的距离; $x_2$  为节理远离爆源侧测点到爆源侧的距离; $\sigma_1$ 、 $\tau_1$  分别为节理靠近爆源侧测点的法向应力和切向应力; $\sigma_2$ 、 $\tau_2$  分别为节理远离爆源侧测点的法向应力和切向应力。

反射波占入射波的能量比  $K_R$ 、透射波占入射波的能量比  $K_T$  的计算公式分别为:

$$\begin{cases} K_R = W_R/W_1, \\ K_T = W_T/W_1 \end{cases} \quad (9)$$

## 2 单条节理对应力波能量的影响

本文通过 ANSYS 建立岩石单条节理爆破数值模型,考虑节理几何尺寸以及节理填充物对爆炸应力波能量的影响<sup>[9]</sup>。其中节理几何尺寸考虑 3 个影响因素:节理厚度、节理距爆源垂直距离、节理倾斜角度;节理填充物分别考虑了无节理时、空节理、填充水、填充土壤的情况<sup>[10]</sup>。

### 2.1 数值模型的建立

#### 2.1.1 节理几何尺寸影响因素数值模型

1) 节理厚度。为研究节理厚度对岩石爆破产生的能量影响,简化隧道岩石爆破模型,只保留

单孔爆破。其中装药炮孔半径  $r=0.05\text{ m}$ , 整个岩石尺寸取为  $2\text{ m}\times 1\text{ m}$ , 岩石  $z$  方向只取 1 个单元厚度。节理左侧面距离炸药中心的距离  $R=1\text{ m}$  保持不变, 为保证应力波穿透节理不受节理填充物厚度影响, 选取的节理填充物厚度应该大于应力波波长, 因此节理的厚度  $D$  依次  $0.1r, 0.2r, 0.3r, 0.4r, 0.5r, 0.6r, 0.7r, 0.8r$ , 不同节理厚度下节理岩石爆破模型 I 如图 1 所示。

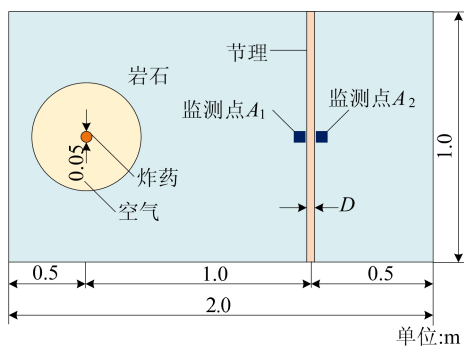


图 1 不同厚度节理岩石爆破模型 I

2) 节理距爆源距离。本文为探究节理距爆源的垂直距离  $L$  对爆破产生的应力波能量的影响, 建立的岩石和炸药模型尺寸与模型 I 相同, 区别在固定节理的厚度  $D=0.5r$ , 改变节理左侧面到炸药中心的距离, 粉碎区的半径<sup>[11]</sup> 通常为  $(1.2\sim 5.0)r$ , 裂纹区半径通常为  $(8\sim 15)r$ , 因此设置节理距爆源距离分别为  $4r, 8r, 12r, 16r, 20r, 24r, 28r$ , 不同节理距爆源距离下节理岩石爆破模型 II 如图 2 所示。

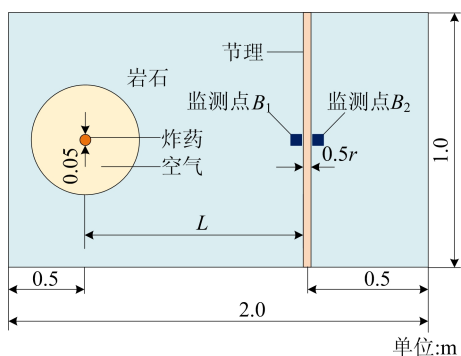


图 2 不同节理距爆源距离节理岩石爆破模型 II

3) 节理倾斜角度。本文为研究节理角度对岩石爆破产生的影响, 建立不同倾斜角度  $\theta$  下的节理岩石爆破模型, 其中, 装药半径不变, 观测点距离炸药中心为  $0.5\text{ m}$  不变, 节理厚度为  $0.5r$ ;  $\theta$  取  $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 80^\circ$ , 分别建立不同倾斜角度的节理爆破模型 III, 如图 3 所示。

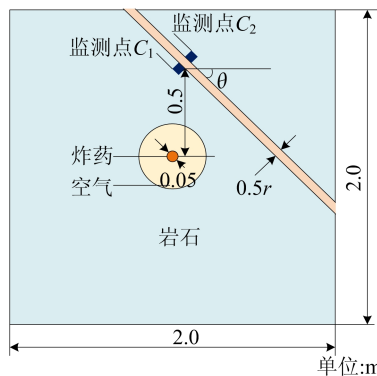


图 3 不同角度节理爆破模型 III

2.1.2 不同节理填充物数值模型

在研究节理填充物<sup>[11]</sup>对爆炸应力波能量的影响时, 本文建立的数值模型 IV 如图 4 所示, 其中岩石尺寸为  $3\text{ m}\times 2\text{ m}$ , 炸药半径为  $r=0.05\text{ m}$ , 空气半径为  $R=0.5\text{ m}$ , 节理厚度分别取  $0.2r, 1.0r, 2.0r$ , 节理填充物依次为空气、水、土。

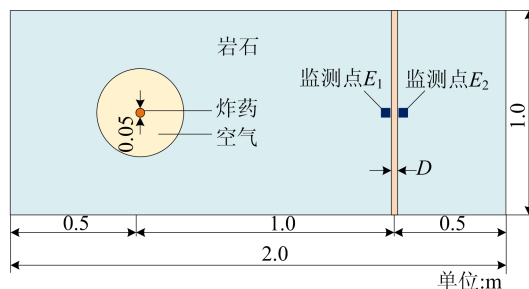


图 4 不同节理填充物模型 IV

以上为节理尺寸和节理填充物对爆炸应力波能量影响的数值模型, 岩石材料的损伤采用 RHT 模型, 其参数<sup>[12]</sup>见表 1 所列。

表 1 岩石 RHT 模型参数

参数	数值	参数	数值
$\rho_0 / (\text{kg}/\text{m}^3)$	2 700	$Q_0$	0.64
$G/\text{GPa}$	24.17	$B_q$	0.01
$f_c/\text{MPa}$	119	$A_1$	1.6
$N_1$	0.6	$N_p$	4
$\beta_c$	0.016	$P_{\text{lock}}/\text{GPa}$	6
$B_0$	1.68	$\beta_t$	0.014
$B_1$	1.68	$G_c^*$	2
$\alpha_0$	1.1	$G_t^*$	0.7
$T_1/\text{GPa}$	86.71	$I_X$	0.5
$T_2/\text{GPa}$	0	$D_1$	0.04
$F_t^*$	0.1	$D_2$	1.00
$F_s^*$	0.38	$P_{\text{crush}}$	40
$A_1/\text{GPa}$	86.71	$A_f$	1.62
$A_2/\text{GPa}$	145.6	$N_f$	0.6
$A_3/\text{GPa}$	89.03		

炸药一般采用 MAT-HIGH-EXPLOSIVE 模型和 JWL 表示的状态方程进行描述,本文所选取的炸药为泰安炸药,其相关参数见表 2 所列。节理填充材料采用 MAT-PLASTIC-KINEMATIC 模拟土的弹塑性材料,其参数见表 3 所列。当节理填充材料为水时,利用 EOS\_GRUNEISEN 模拟其状态方程<sup>[13]</sup>,其参数见表 4 所列。

表 2 炸药的相关参数

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C_d/(\text{m}/\text{s})$	$A_1$	$R_1$	$R_2$	$\omega$	$P_{CJ}/\text{MPa}$	$E_J$
1 500	7 450	625	5.2	1.6	0.3	22	8.5

表 3 土的相关参数

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$e$	$\mu$	$p_r$	$\epsilon$	$\alpha$	$\beta$
1.16	0.2	0.189	0.3	0.025	0.04	0.5

表 4 水的相关参数

$\rho/(\text{kg}/\text{m}^3)$	$C$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	GAMAO
1.02	1.65	1.92	-0.096	0	0.35

## 2.2 数值模拟结果分析

### 2.2.1 节理厚度对爆炸应力波透反射能量影响

采用后处理软件 LS-PREPOST 分别打开模型 I、II、III 的计算结果文件,提取观测点  $A_1$ 、 $A_2$  的法向应力  $\sigma$  和切向应力  $\tau$  的值,将模型 I 观测点的法向应力和切向应力代入式(6)~(8)中,并将计算得出的结果  $W_T$  和  $W_R$  代入式(9),得到节理厚度对爆炸应力波的透、反射能量比的影响,如图 5 所示。

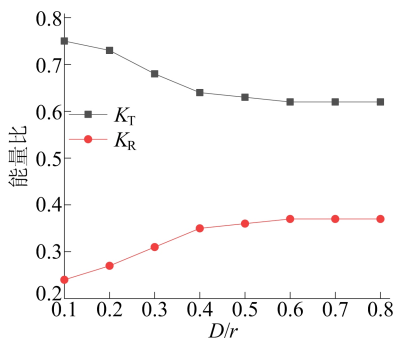


图 5 节理厚度对应力波透、反射能量比的影响

从图 5 可以看出,随着节理厚度的增大,透射能量比逐渐减小并趋于稳定,而反射能量比则逐渐增大并趋于稳定。这表明随着节理厚度不断增大时,被节理反射回来的应力波能量越来越大,而

透射过去的能量越来越少;应力波越来越难透过节理传播过去,节理对爆炸应力波能量起到阻碍的作用<sup>[14]</sup>。在实际隧道爆破当中,应根据具体的岩石性质布置合理的炸药量。

同理,将模型 II、III 测得的观测点透、反射应力值分别代入式(6)~(8),并将计算得到的  $W_T$  和  $W_R$  代入式(9),节理距爆源距离、节理倾斜角度对应力波能量的影响分别如图 6、图 7 所示。

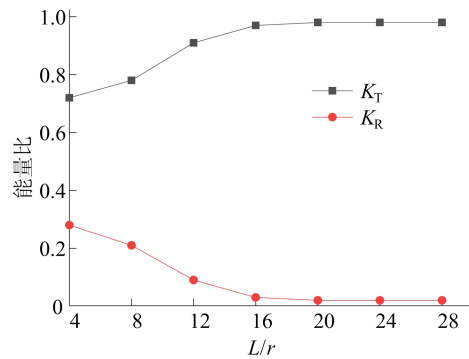


图 6 节理距爆源距离对应力波能量的影响

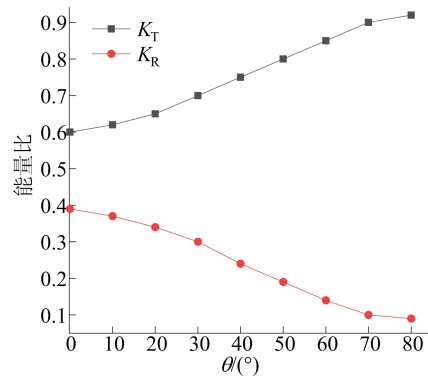


图 7 节理倾斜角度对应力波能量的影响

从图 6 可以看出,当节理距爆源的距离越来越大时,透射能量比逐渐增大并趋于稳定,反射能量比逐渐减小并趋于稳定。这表明在节理距爆源的距离越来越远的过程中,应力波能量产生的衰减也越来越多,频率越来越低。而应力波的频率越低,波的透射能力就越强<sup>[15]</sup>。因此,节理距爆源距离越远,应力波的透射能量比就越高,进而导致反射能量比就越低。

从图 7 可以看出,当节理的倾斜角度越来越大时,透射能量比逐渐增大,并趋向于 1,而反射能量比逐渐较小并趋向于 0。这表明在测点不变的情况下,节理的倾斜角度越大,越有助于应力波透射过节理<sup>[16]</sup>。节理倾斜之后,导致节理的“有效长度”变大,而应力波的透射率与应力波的振幅

和节理的长度比有关<sup>[17]</sup>,在一定的范围内,应力波的透射率随着两者的长度比增大而增大。

### 2.2.2 节理填充物对爆炸应力波能量的影响

在分析节理填充物对爆炸应力波能量影响时,分别建立无节理岩石模型和含节理岩石模型,节理依次填充空气、水、土壤,节理厚度分别取  $1.0r$ 、 $2.0r$ 、 $3.0r$ ,将监测点  $E_1$  和  $E_2$  的正向应力  $\sigma$  和切向应力  $\tau$  取出,同理将监测点  $E_1$  和  $E_2$  的  $\sigma$ 、 $\tau$  值代入式(6)~(8),得出的  $W_R$  和  $W_T$  代入式(9),得出不同节理填充物对爆炸应力波能量的影响如图 8 所示。

由图 8 可知,相较于无节理时,节理的存在降低了应力波能量的透射率,提高了应力波能量的反射率,且随着填充材料的弹性模量岩石的越小,爆炸应力波的透射能量比越小,反射能量比越高。当节理厚度较小时,不同填充物节理的透射能量比  $K_T$  和  $K_R$  相近,而随着节理厚度的增大,不同填充物节理之间的  $K_T$ 、 $K_R$  之间的差值也随之增大;这是由于当节理厚度较小时,应力波的波长与节理厚度相近,更容易透射过节理。当节理为同一材料填充物时,  $K_T$  随着节理厚度的增大而逐渐减小,  $K_R$  则随着节理厚度的增大而增大,即节理厚度越大,对应力波的阻碍能力则越强;节理填充材料土、水、空气对爆炸应力波的阻碍能力的从强到弱顺序为空气、水、土壤。

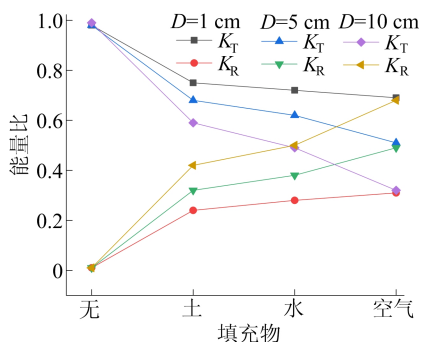


图 8 不同节理填充物对爆炸应力波能量的影响

## 3 节理数量对应力波能量的影响

上述讨论了在单条节理的情况下节理性质对爆炸应力波透反射能量的影响,本节将基于单条节理对爆炸应力波产生透反射能力,求解节理数量对爆炸应力波能量透射能量的影响,即透射过节理的能量  $W_R$  占总入射能量  $W_1$  的比例,节理数量对爆炸应力波能量透射率  $\psi$  的计算公式为:

$$\psi = \frac{W_R}{W_1} \times 100\% \quad (10)$$

在本节研究中,固定节理距爆源的距离,只考虑节理厚度  $D$  对爆炸应力波能量的影响,节理厚度  $D$  依次取  $0.2r$ 、 $0.6r$ 、 $1.0r$ ,模型如图 9 所示。建立 5 条平行节理的岩体爆破数值模型,其中岩石尺寸为  $4\text{ m} \times 1\text{ m}$ ,炸药半径为  $r=0.05\text{ m}$ ,空气半径为  $0.5\text{ m}$ ,模型四周设置无反射边界,模拟无限域岩石的爆破情况;共计 111 300 个单元,求解时间设置为  $3\ 000\ \mu\text{s}$ ;材料参数同上。

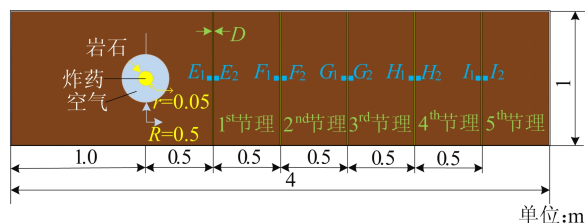


图 9 多节理爆破示意图

依次取每个节理两侧的监测点  $E$ 、 $F$ 、 $G$ 、 $H$ 、 $I$  的正向、切向应力,并依据式(4)~(7)计算出节理前后监测点的爆炸能量  $W_1$ 、 $W_R$ ,进而再依据式(10)求得节理对爆炸应力波能量的透射率,节理数量对爆炸应力波能量的影响如图 10 所示。

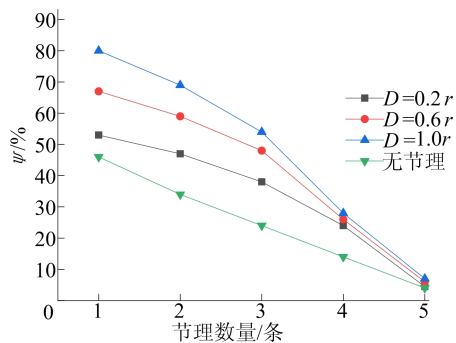


图 10 节理数量对爆炸应力波能量的影响

由图 10 可知,无节理时,爆炸应力波能量的透射率呈线性变化,而节理的存在对应力波能量的传播产生了显著的衰减影响,随着节理数量的增多,爆炸应力波能量的透射率逐渐减小,且节理数量越多,衰减幅度越大。当节理厚度  $D$  依次取  $0.2r$ 、 $0.6r$ 、 $1.0r$  时,应力波能量透射率随着节理厚度的增加越来越高,即节理厚度越大,应力波的能量越难透射过节理。同时,随着节理数量的增加,不同厚度节理对应力波能量的透射率逐渐趋于相同值,这与上述模型 II 的结果一致,即随着应力波在岩石中传播的距离增加,应力波的频率逐

渐降低,但透射率逐渐增强,此时节理的厚度对应力波能量透射率的影响也越来越小。

#### 4 结 论

本文基于 ANSYS/LS-DYNA 软件,采用数值模拟的方法分析岩石节理性质以及数量对爆炸应力波能量的影响,为改善工程爆破效果及安全性提供一定的参考。主要结论如下:

1) 节理厚度、节理距爆源的距离以及节理倾斜角度影响爆炸应力波的透反射能量比;随着节理厚度增大,透射能量比逐渐减小并趋于稳定,而反射能量比则逐渐增大并趋于稳定;节理距爆源距离越远,透射能量比越大并趋于稳定,反射能量比越小并趋于稳定;节理倾斜角度越大,透射能量比增大并趋于 1.0,反射能量比逐渐较小并趋于 0。

2) 节理填充物的弹性模量比岩石的越小时,对应力波的阻碍能力则越强,即爆炸应力波的透射能量比越小,反射能量比越大;节理填充相同材料时,节理厚度越大,对爆炸应力波能量的阻碍能力也越大。

3) 应力波能量透射率随着节理数量的增多而逐渐减小,且节理数量越多,节理厚度对能量透射率的影响越小,不同节理厚度对应力波能量的透射率逐渐趋于相同值。

#### [参 考 文 献]

- [1] 柴少波,李建春,李海波. 柱面波在节理岩体中的传播特性[J]. 岩石力学与工程学报,2014,33(3):523-530.
- [2] 孙冰,郭闪闪,曾晟,等. 应力波在层状节理岩体中的透反射与衰减规律[J]. 防灾减灾工程学报,2015,35(6):828-832.
- [3] 杨仁树,许鹏,杨立云,等. 节理岩体中爆炸应力波传播规律的研究[J]. 金属矿山,2016(6):49-54.
- [4] 赵安平,冯春,郭汝坤,等. 节理特性对应力波传播及爆破效果的影响规律研究[J]. 岩石力学与工程学报,2018,37(9):2027-2036.
- [5] ZHAO B X,ZHAO J,CAI G J. P-wave transmission across fractures with nonlinear deformational behaviour[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,2006,30(11):1097-1112.
- [6] 贾帅龙,王志亮,熊峰,等. 充填节理岩体中应力波传播特性研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(8):1073-1081.
- [7] LAK M,MARJI M F,BAFGHI A Y,et al. Analytical and numerical modeling of rock blasting operations using a two-dimensional elasto-dynamic Green's function[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2019,114:208-217.
- [8] ZHAO J,CAI J G. Transmission of elastic P-wave across single fracture with a nonlinear normal deformation behavior[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2001,34(1):3-22.
- [9] 马小满,陈明,严鹏,等. 爆破作用下节理岩体应变能变化规律及影响研究[J]. 爆破,2018,35(3):1-6,67.
- [10] 潘长春,徐颖,宗琦. 基于单孔爆破的节理裂隙减振模型试验研究[J]. 振动与冲击,2017,36(7):255-261.
- [11] 冷振东,卢文波,陈明,等. 岩石钻孔爆破粉碎区计算模型的改进[J]. 爆炸与冲击,2015,35(1):101-107.
- [12] LI H C,LI D S,ZHAO L. Experimental study on the time-dependent dynamic mechanical behaviour of C60 concrete under high-temperatures[J]. Journal of Beijing University of Technology(English Edition),2015,24(3):313-320.
- [13] 刘江超,高文学,王林台,等. 水封爆破装药结构优化数值分析及其应用[J]. 振动与冲击,2020,39(9):57-62,96.
- [14] 鞠杨,李业学,谢和平,等. 节理岩石的应力波动与能量耗散[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(12):2426-2434.
- [15] 李继业,康强,赵明生,等. 节理岩体爆破振动传播衰减规律相似模型试验研究[J]. 爆破,2022,39(2):30-35,74.
- [16] 周文海,胡才智,包娟,等. 含节理岩体爆破过程中应力波传播与裂纹扩展的数值研究[J]. 力学学报,2022,54(9):2501-2512.
- [17] VARMA M,MAJI V B,BOOMINATHAN A. Influence of rock joints on longitudinal wave velocity using experimental and numerical techniques[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2021,141:104699.
- [18] 杨阳,杨仁树,王建国. 节理厚度对岩石动力特性影响的模拟试验[J]. 中国矿业大学学报,2016,45(2):211-216,309.
- [19] LU Y B,LI Q M,MA G W. Numerical investigation of the dynamic compressive strength of rocks based on split Hopkinson pressure bar tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2010,47(5):829-83.

(责任编辑 吴 亮)