

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.03.003

软弱夹层对岩石爆破裂纹扩展影响的实验研究*

吴立辉¹,李洪伟¹,杨赛群¹,管月强¹,雷战²,刘迪³

(1. 安徽理工大学 化学工程学院,淮南 232000;2. 安徽铜陵海螺水泥有限公司,铜陵 244000;

3. 核工业南京建设集团有限公司,南京 210000)

摘要: 为研究与炮孔平行的软弱夹层对岩石爆破裂纹扩展的影响,通过钢制模具浇筑长宽高为40 cm × 40 cm × 36 cm、含不同软弱夹层(泥土和石子、泥土、水)的水泥砂浆试块进行爆破模拟实验。试块浇筑过程中,沿软弱夹层中垂线方向、距炮孔8 cm、12 cm、18 cm处对称预埋6个深度为10 cm的径向应变砖,用于超动态应变仪监测试块爆破过程中内部的应变变化;同时,采用高速摄影仪观测试块爆破裂纹扩展过程。对比分析同一试块炮孔两侧(软弱夹层侧和完整侧)和不同试块之间软弱夹层侧的裂纹扩展结果和应变差异,结果表明:同一试块,靠近软弱夹层侧的炮孔裂纹扩展速度比完整侧更快;不同试块之间,随着软弱夹层强度的降低,靠近软弱夹层侧的炮孔裂纹扩展速度越快、裂纹扩展越充分。软弱夹层具有阻止裂纹扩展的效果,软弱夹层强度越低止裂效果越明显;软弱夹层两端生成翼裂纹,且软弱夹层强度越低,翼裂纹扩展速度越快。试块各测点的峰值应变值在0.0178~0.0640之间,对应的峰值应力为49.9~179.2 MPa,且随着距离的增大,应力波衰减速度在一定范围内呈先大后小再由小到大的趋势;软弱夹层强度越低,爆炸应力波衰减越快。

关键词: 软弱夹层;岩石破碎;裂纹扩展;应变

中图分类号: TD235.3

文献标识码: A

文章编号: 1001-487X(2022)03-0016-09

Experimental Study on Influence of Weak Interlayer on Rock Blasting Crack Propagation

WU Li-hui¹, LI Hong-wei¹, YANG Sai-qun¹, GUAN Yue-qiang¹, LEI Zhan², LIU Di³

(1. School of Chemical Engineering, Anhui University of Science and Technology,

Huainan 232000, China; 2. Anhui Tongling Conch Cement Co., Ltd., Tongling 244000, China;

3. Nuclear Industry Nanjing Construction Group Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: In order to study the influence of weak interlayer parallel to the blast hole on rock blasting crack propagation, blasting simulation experiments were carried out by pouring cement mortar test blocks with 40 cm × 40 cm × 36 cm in length, width and height and different weak interlayers (soil and stone, soil, water) into steel mold. Six radial strain bricks with a depth of 10 cm were symmetrically embedded along the vertical direction of the weak interlayer and 8 cm, 12 cm and 18 cm away from the blast hole in the pouring process of the test block, which were used to monitor the internal strain changes in the blasting process of the test blocks by using ultrahigh dynamic strainometer; At the same time, the blasting crack propagation process of the test blocks was observed by high speed camera. The crack propagation results and strain differences between the two sides of the same test block (the weak interlayer side and the intact side) and the weak interlayer side between different test blocks were compared and analyzed. The results show that: In the same test block, the blast hole crack growth rate near the weak interlayer side is faster than the complete side. Between different test blocks, as the strength of the weak interlayer decreases, the crack propagation speed of the blast hole near the side of the weak interlayer is faster, and the crack propagation is more adequate. The weak interlayer has the effect of preventing crack propagation, and the lower the strength of the weak interlayer is, the more obvious the crack arrest effect becomes. Wing cracks are generated at both ends of the weak interlayer,

and the lower the strength of the weak interlayer, the faster the propagation speed of the wing cracks. The peak strain value of each measuring point of the test block is between 0.0178 ~ 0.0640, and the corresponding peak stress is 49.9 ~ 179.2 MPa. As the distance increases, the attenuation speed of the stress wave in a certain range shows a large to small, and then small to large trend. The lower the strength of the weak interlayer is, the faster the explosive stress wave attenuates.

Key words: weak interlayer; rock fragmentation; crack propagation; strain

随着爆破技术的进步,爆破施工向着更加精细、高效的方向发展,这就要求爆破施工对天然的地质条件进行有效的利用,如岩体中的层理、节理、裂隙等。目前,众多学者对岩石节理裂隙在爆破条件下的裂纹扩展规律研究较多,成果丰硕^[1-4]。但对岩体中软弱夹层的研究较少,尤其是软弱夹层对岩石爆破裂纹扩展规律影响的研究。爆破施工中软弱夹层极大的影响了爆生裂纹的扩展,使爆破无法达到预期效果,更会导致严重的工程事故,如隧道爆破岩体中的软弱夹层会导致隧道周边轮廓的超欠挖;边坡岩体内存在软弱夹层会导致斜坡崩滑失稳。因此,对含有软弱夹层岩体爆破裂纹扩展规律的研究,将对隧道掘进、边坡控制有重要意义。

其中,张运良,孙宁新等利用有限元软件 ANSYS/LS-DYNA,从爆炸应力波的传播和爆生气体的楔入两个方面对含软弱夹层的隧道爆破机理进行模拟推演^[5],得到不同软弱夹层赋存状态下隧道爆破成型轮廓分布图式。徐叶勤,李梅等利用 CASRock 软件^[6],分析了爆炸荷载作用下软弱夹层与隧道距离和软弱夹层倾角对隧道围岩稳定性的影响,得出软弱夹层越靠近隧道边界产生的影响越大,软弱夹层倾角对隧道围岩的影响程度随角度增长先增大后减小的结论。杜瑞锋,斐向军等通过进行含软弱夹层的混凝土模型爆破实验,利用振动监测仪对爆破地震波进行监测分析^[7],得出软弱夹层具有“吸能”和“减震”效应,并构建爆破地震波作用下含软弱夹层边坡的宏观受力模型,分析了边坡在爆破地震波作用下的滑动机理。张继春,肖正学等通过进行含软弱夹层的混凝土模型爆破试验^[8],利用高速摄像观测爆破过程中夹层土的运动状态,得到了不同炮孔装药量、夹层土含水率和最小抵抗线条件下夹层土的运动特征及其变化规律。张继春,宋小林等利用有限元软件 LS-DYNA,得到了深孔爆破时岩体中

软弱层内的爆腔半径随软弱层厚度、倾角、炮孔直径、装药量和装药量长径比的变化规律^[9]。

以上研究从理论计算、数值模拟和炮孔与软弱夹层相交的角度出发,对爆炸过程中软弱夹层的运动特征进行研究,着重于软弱夹层对隧道和山体边坡稳定性的分析,为工程实践提供了重要的参考价值,但均未考虑软弱夹层与炮孔平行时对岩石爆破裂纹扩展规律的影响。本实验通过制作含有软弱夹层的水泥砂浆试块,对含不同软弱夹层的试块爆破裂纹扩展过程进行研究,利用高速摄影仪和超动态应变仪,对试块爆破裂纹扩展过程和内部应力应变变化过程进行观测分析,得出相应规律,对工程实践具有一定的理论指导意义。

1 实验方案

1.1 模型建立

实验水泥砂浆模型制作材料及其质量配比为:水泥:河沙:水 = 1:2:0.7,模型制作过程中预留夹层缝隙,待混凝土凝固后灌注夹层材料。考虑到装药直径、炮孔深度及模型制作难易程度,模型尺寸设计为:40 × 40 × 36 cm ($A \times B \times H$),孔径(d)8 mm,装药高度(L_1)10 cm,填塞高度(L_2)5 cm,软弱层尺寸:1 × 30 × 26 cm ($a \times b \times h$),软弱夹层距炮孔 10 cm,软弱夹层两端距自由面(L)5 cm,如图 1 所示。

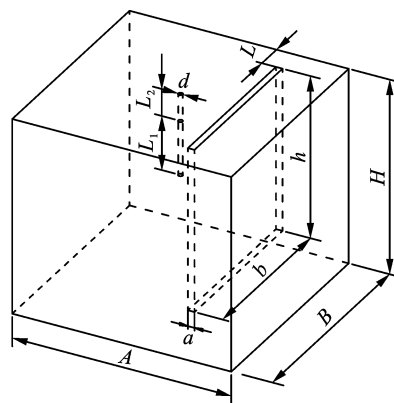


图 1 实验模型

Fig. 1 Test model

收稿日期:2022-06-03

作者简介:吴立辉(1994-),男,在读硕士,从事爆炸技术及应用方面的研究,(E-mail)756510231@qq.com。

通讯作者:李洪伟(1979-),男,教授、硕士生导师,从事爆炸安全与控制爆破技术研究,(E-mail)1227002529@qq.com。

基金项目:安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2019A0123);淮南市“50·科技之星”创新团队项目(淮人才[2014]2号)

1.2 实验材料

软弱夹层多是由碎石、岩屑、泥土等,经风化及水蚀作用形成的具有一定厚度和强度的填塞物,一般比较潮湿,塑性高,抗拉、抗压、剪切强度都很小^[10]。因此,设计的实验试块中软弱夹层材料分别为:(1)泥土和石子;(2)泥土;(3)水。每次实验采用单发瞬发电雷管,装药量为0.6 g RDX,堵塞材料为自制炮泥。其中,水泥砂浆试块参数如表1所示^[11]。

表1 水泥砂浆试块相关参数

Table 1 Relevant parameters of cement mortar test block

单轴抗压强度 σ_c /MPa	单轴抗拉强度 σ_{st} /MPa	密度 ρ /($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 E /GPa	纵波速度 C_p /($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
12.8	1.74	1773.8	2.8	2557

1.3 实验思路

本实验意在通过观察含软弱夹层的水泥砂浆试块爆破裂纹扩展过程,分析研究得到不同软弱夹层材料对裂纹扩展的影响,为含软弱夹层的岩石爆破工程提供一定指导。为此实验思路设计如下:(1)同一试块炮孔两侧(软弱夹层靠近炮孔侧和完整侧)裂纹扩展规律对比分析;(2)含不同软弱夹层的试块之间裂纹扩展规律对比分析。

1.4 试块应变测试

本实验通过超动态应变仪测量爆破过程中试块受到的径向应变^[12-14]。超动态应变仪主要是将电路中由爆炸应力波传播引起的电阻变化转化为电压的变化,所测得的试验数据是电压和时间的变化关系曲线。把记录下来的电压与时间之间变化关系,通过转换变成应力或应变和时间之间的关系。其转换关系式为

$$\begin{cases} \varepsilon = \frac{4U_0}{kAU_1} \\ \sigma = E \cdot \varepsilon \end{cases} \quad (1)$$

式中: ε 为换算后的应变值; U_0 为测得时程曲线上的电压值,V; k 为应变片灵敏系数; A 为增益; U_1 为设定桥压值,V; σ 为换算后的应力值,MPa; E 为试块的弹性模量,GPa。

若岩体视为均质体,则爆炸冲击波压力衰减规律为^[15]

$$\begin{cases} \sigma_r = P \cdot \bar{r}^{-\alpha} \\ \bar{r} = r/r_b \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_r 为波阵面上峰值压力,MPa; P 为炮孔孔壁压力,MPa; \bar{r} 为比距离; r 为距炮孔中心的距离;

r_b 为炮孔半径; α 为岩石介质中爆炸应力波峰值压力随距离的衰减指数。

为了尽可能采集到更多数据和保证一定的精确度,超动态应变仪选用的采样率为10 000 kHz,采样长度为160 K,桥压大小设置为4 V,增益设置为100。具体应变测量点的位置分布如图2所示。

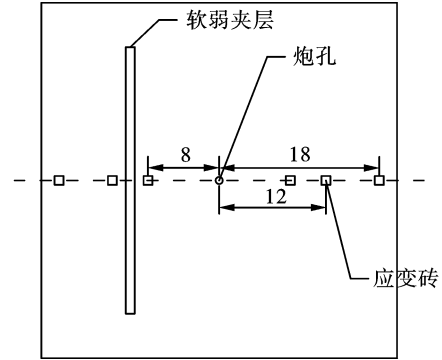


图2 应变测量点分布(单位:m)

Fig. 2 Distribution of strain measurement points(unit:m)

2 实验结果与分析

2.1 试块裂纹扩展分析

为了更加清晰直观的观察试块在炸药爆炸作用下裂纹的扩展情况,采用日本生产的Memrecam HX-3型高速摄像机进行拍摄(见图3),实验选用拍摄帧率为10000幅/s;分辨率640×640 PPI;拍摄时间2.4 s,定义第一张出现裂纹照片的前一张照片时间为 $t=0$ ms。



图3 Memrecam HX-3型高速摄像机

Fig. 3 Memrecam HX-3 high speed camera

工况1:软弱夹层为泥土和石子的试块裂纹扩展情况,如图4所示(注:图4、5、6中裂纹标注线均为裂纹起点和终点之间的连线)。

由图4可得出,爆炸过程中,共形成11条主裂纹和若干条次裂纹^[16,17]。 $t=0.1$ ms时,炮孔壁在爆炸冲击波径向压缩产生的切向拉伸作用下生成4条裂纹(裂纹1、2、3、4),其中裂纹1、2受软弱夹层侧爆炸应力波反射拉伸影响^[18],裂纹扩展速度较裂纹3、4更快。 $t=0.4$ ms时,生成裂纹5、6、6'、7、8,

其中裂纹 5 在软弱夹层侧爆炸应力波反射拉伸和爆生气体楔入的共同作用下产生;裂纹 6'、7 在爆炸应力波反射拉伸作用下产生并从自由面向炮孔方向扩展;裂纹 6 在爆炸应力波压缩和爆生气体楔入的共同作用下产生并与裂纹 6' 相对发展;裂纹 8 在爆炸应力波反射和绕射产生的拉伸作用下产生^[19]。t = 0.8 ms 时,生成裂纹 2'、9、10,其中裂纹 10 受爆炸应力波反射拉伸作用在自由面产生微裂纹,再经爆

炸冲击与地面碰撞使裂纹进一步扩大;裂纹 2' 产生原因与裂纹 5 相同;裂纹 9 产生原因与裂纹 8 相同。t = 1.6 ms 时,生成的裂纹 11 与裂纹 10 原因相同。t = ∞ 时,生成若干条次裂纹,分析为爆生气体楔入裂缝、膨胀导致试块位移产生的拉伸裂纹。

工况 2:软弱夹层为泥土的试块裂纹扩展情况,如图 5 所示。

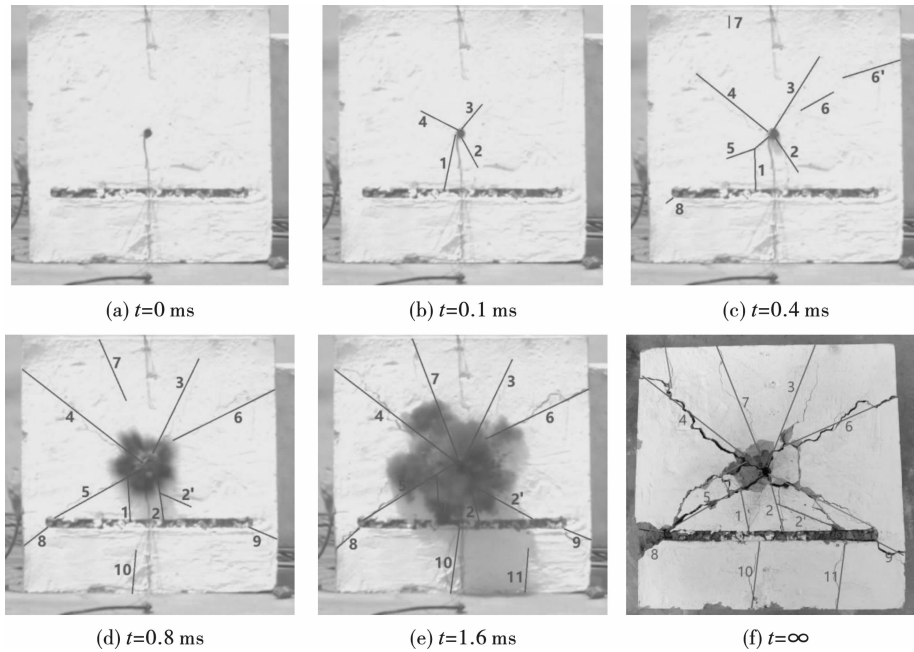


图 4 软弱夹层为泥土和石子的试块裂纹扩展过程

Fig. 4 The crack propagation process of the test block with soil and stones as the weak interlayer

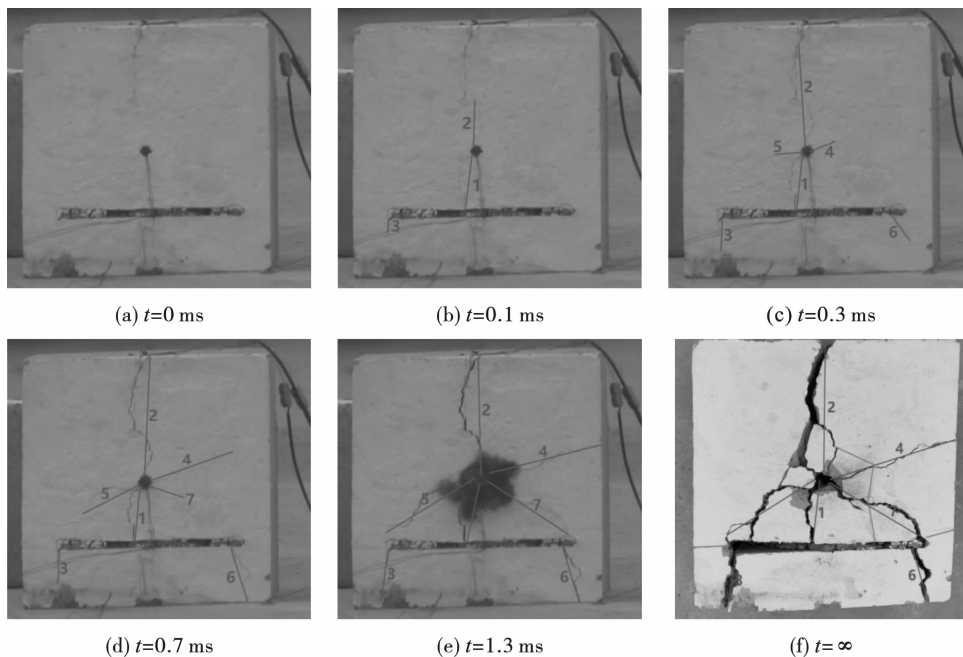


图 5 软弱夹层为泥土的试块裂纹扩展过程

Fig. 5 The crack propagation process of the test block with soil as the weak interlayer

由图5可得出,爆炸过程中,共形成7条主裂纹和若干条次裂纹。 $t=0.1\text{ ms}$ 时,炮孔壁在爆炸冲击波径向压缩产生的切向拉伸作用下生成2条裂纹(裂纹1、2),其中裂纹1受软弱夹层侧爆炸应力波反射拉伸影响,裂纹扩展速度较裂纹2更快;另外,在爆炸应力波反射拉伸和绕射产生的拉伸作用下生成裂纹3。 $t=0.3\text{ ms}$ 时,生成裂纹4、5、6,其中裂纹4、5先受

软弱夹层侧爆炸应力波反射拉伸作用形成微裂纹,再经爆炸气体楔入加速扩展;裂纹6产生原因与裂纹3相同。 $t=0.7\text{ ms}$ 时,生成的裂纹7与裂纹5原因相同。 $t=\infty$ 时,生成若干条次裂纹,分析为爆生气体楔入裂缝、膨胀导致试块位移产生的拉裂纹。

工况3:软弱夹层为水的试块裂纹扩展情况,如图6所示。

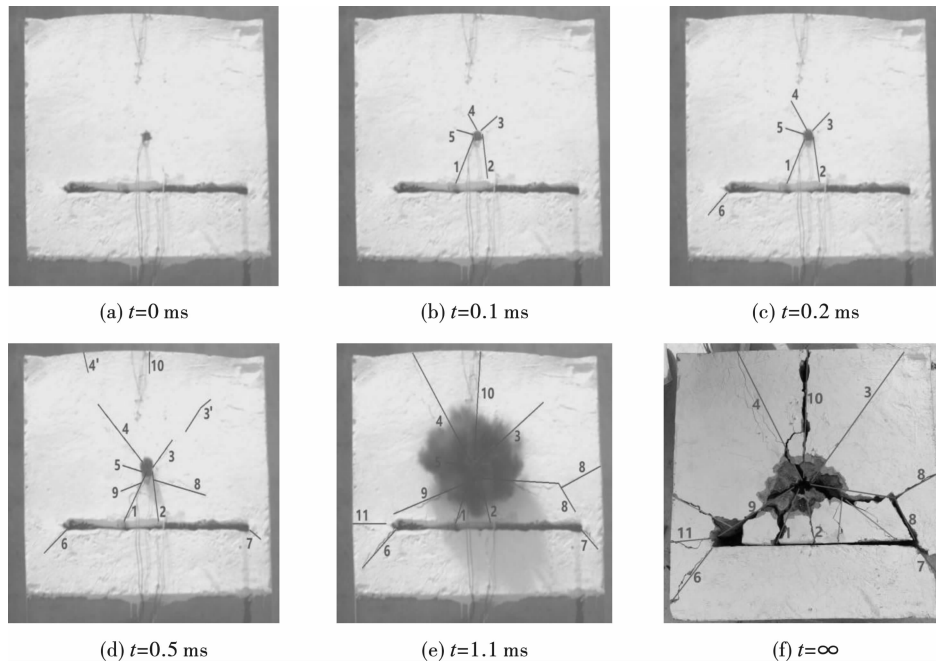


图6 软弱夹层为水的试块裂纹扩展过程

Fig. 6 The crack propagation process of the test block with water as the weak interlayer

由图6可知,爆炸过程共形成11条主裂纹和若干条次裂纹。 $t=0.1\text{ ms}$ 时,炮孔壁在爆炸冲击波径向压缩产生的切向拉伸作用下生成5条裂纹(裂纹1、2、3、4、5),其中裂纹1、2受爆炸应力波反射拉伸影响,裂纹扩展速度较裂纹3、4、5更快。 $t=0.2\text{ ms}$ 时,在爆炸应力波反射和绕射产生的拉伸作用下生成裂纹6。 $t=0.5\text{ ms}$ 时,生成裂纹3'、4'、7、8、9、10,其中裂纹3'在爆炸应力波反射叠加产生的拉伸作用下产生;裂纹4'、10在爆炸应力波反射拉伸作用下产生并从自由面向炮孔方向扩展;裂纹8、9在爆炸应力波反射拉伸和爆炸气体楔入的共同作用下产生;裂纹7产生原因与裂纹6相同。 $t=1.1\text{ ms}$ 时,裂纹11在爆炸应力波反射拉伸作用下从自由面向软弱层端部扩展。 $t=\infty$ 时,生成若干条次裂纹,分析为爆生气体楔入裂缝、膨胀导致试块位移产生的拉裂纹。

工况1、2、3相互比较可知,工况3软弱夹层靠近炮孔侧裂纹扩展最充分,工况2次之,工况1最差。分析认为三种软弱夹层材料的不可压缩性由大

到小分别为:泥土和石子>泥土>水,所以爆炸过程中软弱夹层侧所受夹制作用也由大到小,软弱夹层为水时更易破坏,爆生气体的楔入阻力最小,裂纹扩展也最充分。另外,工况1相较于工况2、3,软弱夹层靠近自由面侧有裂纹扩展,分析认为软弱夹层强度越高,爆炸应力波透射系数越大^[15],透射应力波越强,透射应力波在自由面反射拉伸越容易产生裂纹,这说明软弱夹层具有阻止裂纹扩展的效果,软弱夹层强度越低,止裂效果越明显。

经测量,水泥砂浆试块的纵波速度为2557 m/s,试块裂纹扩展速度 v 如表2所示。

由表2可得,工况1软弱夹层靠近炮孔侧裂纹平均扩展速度为920.4 m/s,翼裂纹平均扩展速度为131.1 m/s;工况2软弱夹层靠近炮孔侧裂纹平均扩展速度为1140.3 m/s,翼裂纹平均扩展速度为229.5 m/s;工况3软弱夹层靠近炮孔侧裂纹平均扩展速度为1228.2 m/s,翼裂纹平均扩展速度为438.6 m/s;试块完整侧裂纹平均扩展速度为697.4 m/s,具体如下图7。

表 2 水泥砂浆试块裂纹扩展速度
Table 2 The crack propagation velocity of cement mortar test block

软弱夹层材料	裂纹编号	裂纹扩展长度/cm	裂纹扩展速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	裂纹平均扩展速度 $\bar{v}/(m \cdot s^{-1})$	\bar{v}/C_p	
软弱夹层 靠近炮孔侧	泥土和石子	1	11.231 ($\Delta t = 0.1$ ms)	1123.1	920.4	0.360
		2	7.177 ($\Delta t = 0.1$ ms)	717.7		
	泥土	1	11.403 ($\Delta t = 0.1$ ms)	1140.3	1140.3	0.446
		1	13.884 ($\Delta t = 0.1$ ms)	1388.4	1228.2	
完整侧	泥土和石子	3	6.029 ($\Delta t = 0.1$ ms)	602.9	697.4	0.273
		4	7.465 ($\Delta t = 0.1$ ms)	746.5		
	泥土	2	8.205 ($\Delta t = 0.1$ ms)	820.5	820.5	0.273
		3	6.408 ($\Delta t = 0.1$ ms)	640.8	676.4	
软弱夹层 两端裂纹	泥土和石子	8	4.594 ($\Delta t = 0.4$ ms)	114.9	131.1	0.051
		9	5.886 ($\Delta t = 0.4$ ms)	147.2		
	泥土	3	2.225 ($\Delta t = 0.1$ ms)	222.5	229.5	0.090
		6	4.728 ($\Delta t = 0.2$ ms)	236.4	439.5	
	水	6	7.476 ($\Delta t = 0.1$ ms)	747.6	439.5	0.172
		7	3.916 ($\Delta t = 0.3$ ms)	130.5	130.5	

注:软弱夹层两端裂纹以下简称:翼裂纹

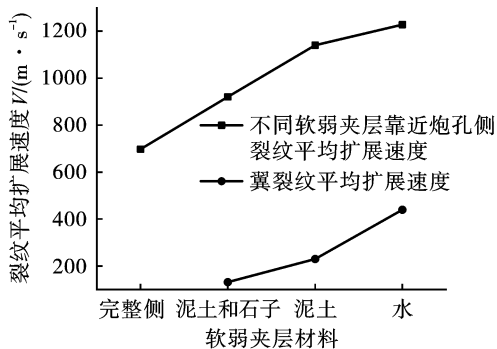


图 7 水泥砂浆试块裂纹平均扩展速度
Fig. 7 Average crack propagation velocity of cement mortar test block

由图 7 可看出,同一试块,软弱夹层靠近炮孔侧裂纹扩展速度大于完整侧;不同试块之间,随着软弱夹层强度的降低,软弱夹层靠近炮孔侧裂纹(包括翼裂纹)扩展速度逐渐增加;其中,工况 3 软弱夹层靠近炮孔侧裂纹扩展速度最大,工况 1 软弱夹层靠近炮孔侧裂纹扩展速度最小。根据一维弹性应力波在不同介质界面上透射波系数 T 与反射波系数 F 之间的关系 $(1 + F = T)$ 可知^[15]:软弱夹层强度越低,其波阻抗越小,反射系数 F (负数) 越小,则反射应力波强度越大,裂纹扩展速度越快。

在裂纹扩展速度研究上,莫特 (Mott) 认为^[20],当加载达到格里菲斯 (Griffith) 极限状态时,裂纹扩展速度和物体内的音速相比要“小”,得出泊松比

$\mu = 0.25$ 时的裂纹扩展速度表达式

$$V = 0.38C_p \left(1 - \frac{a_0}{a}\right) \quad (3)$$

式中: V 为裂纹扩展速度; C_p 为介质中的纵波速度; a_0 为初始裂纹长度; a 为扩展后的裂纹长度。由上式可知,裂纹扩展速度存在一个极限值,即 $V_{\max} = 0.38C_p$ 。

由表 2 可知,3 种工况下水泥砂浆试块软弱夹层靠近炮孔侧及完整侧裂纹平均扩展速度 \bar{v} ,分别为岩石纵波速度 C_p 的 0.48 倍、0.446 倍、0.36 倍、0.273 倍。所得结果部分超过莫特研究认为的 $V_{\max} = 0.38C_p$,原因为爆炸应力波在软弱夹层处的反射拉伸导致裂纹加速扩展,且软弱夹层强度越低,爆炸反射应力波越强,裂纹扩展速度越快。

2.2 试块应力应变分析

将超动态应变仪记录下来的爆炸应力波电压与时间变化关系数据,通公式(1)进行转换,可得爆炸应力波径向应力和时间变化的关系曲线,选取其中典型波形进行分析,如下图 8,其中,正号表示拉应力,负号表示压应力,所测波形未经滤波处理。

由图 8 可知,含不同软弱夹层试块的爆炸应力波应力峰值随着距离的增加而逐渐降低。软弱夹层分别为泥土和石子、泥土、水的试块爆炸应力波从开始波动至完全衰减的作用时间分别为 12 μs 、17 μs 、10 μs ;其中,图 8(b)相较于图 8(a)、图 8(c),爆炸

应力波最后经历一次较小的拉伸波动,波动明显^[21],结合软弱夹层为泥土的试块爆破裂纹扩展规律分析:试块爆炸瞬间产生爆炸冲击波(应力波)压缩孔壁(试块)产生裂纹1、2,裂纹1、2扩展路径经

过应力测点1、2、5、7,爆生气体楔入使裂纹进一步扩展产生拉伸应力波动,裂纹扩展过程与应力波曲线图相对应,说明爆炸裂纹扩展过程是爆炸应力波和爆生气体的综合作用。

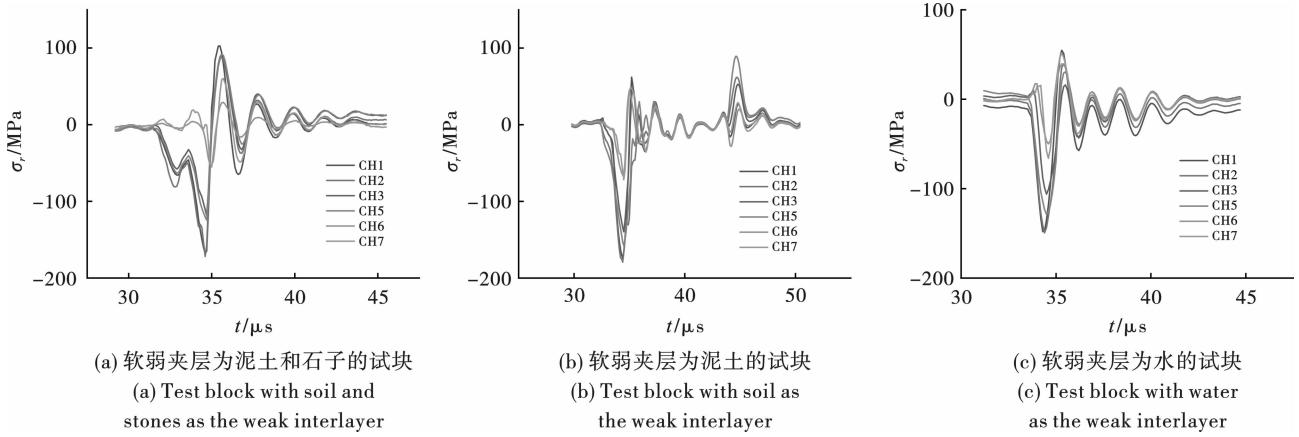


图8 各试块径向应力和时间之间的关系曲线

Fig. 8 The relationship curve between radial stress and time of each test block

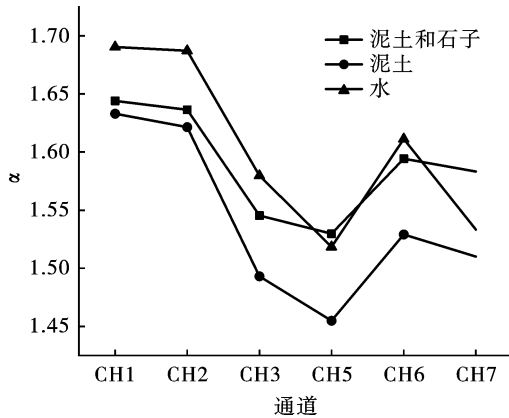


图9 含不同软弱夹层试块应力波衰减系数

Fig. 9 Stress wave attenuation coefficient of test blocks with different weak interlayers

对试块应变测得的峰值电压数据经公式(1)、(2)整理,如表3所示。

通过表3可知,试块各测点峰值应变值在0.0178~0.0640之间,对应的峰值应力为49.9~179.2 MPa。另外,可发现以下规律:(1)各通道应变值和应力值按大小排序为:通道1、2>3、5>6、7;(2)各通道应力波衰减系数按大小排序为:通道1、2>6、7>3、5,如图9所示;(3)各试块炮孔两侧应力波衰减系数差值之比排序为:0.926>0.840>0.657(泥土和石子>泥土>水)。由图2可知,测点1和测点2距炮孔均为8 cm,测点3和测点5距炮孔均为12 cm,测点6和测点7距炮孔均为18 cm,结合表3数据规律说明:随着距离的增大,爆炸应力波峰值在衰减的同时,应力波衰减系数在一定范围

内先减小后增加,即在一定范围内应力波衰减速度随距离的增大呈先大后小,再由小到大的趋势。另外,试块炮孔两侧应力波衰减系数差值之比越来越小,说明软弱夹层强度越低,爆炸应力波穿过软弱夹层后衰减越快,根据一维弹性应力波在不同介质界面上透射波系数 T 与反射波系数 F 之间的关系($1+F=T$)可知:软弱夹层强度越低,其波阻抗越小、反射系数 F (负数)越小、透射系数 T (正数)越小,则透射应力波强度越小,应力波衰减幅度越明显。

3 结论

(1)同一试块,软弱夹层靠近炮孔侧裂纹扩展速度比完整侧更快;不同试块之间,随着软弱夹层强度的降低,靠近软弱夹层侧的炮孔裂纹扩展速度越快、裂纹扩展越充分。同时,软弱夹层具有阻止裂纹扩展的效果,软弱夹层强度越低,止裂效果越明显;软弱夹层两端生成翼裂纹,软弱夹层强度越低,翼裂纹扩展速度越快。

(2)试块各测点的峰值应变值在0.0178~0.0640间,对应的峰值应力为49.9~179.2 MPa,且随着距离的增大,应力波衰减速度在一定范围内呈先大后小再由小到大的趋势;软弱夹层强度越低,爆炸应力波衰减越快。

(3)随着软弱夹层强度的变化,软弱夹层靠近炮孔侧裂纹扩展速度和应力波衰减速度有较强的相关性,软弱夹层侧裂纹扩展速度越快,应力波衰减速度越快。

表3 试块应变测试数据
Table 3 Strain test data of test block

通道		CH1	CH2	CH3	CH5	CH6	CH7	$\alpha_1 - \alpha_3$	
测点到爆心距离/cm		8	8	12	12	18	18	$\alpha_2 - \alpha_5$	
软弱夹层材料	泥土和石子	U_o/V	-6.0103	-6.1402	-4.2243	-4.4392	-1.8941	-1.9702	0.926
		ε	0.0601	0.0614	0.0422	0.0444	0.0189	0.0197	
		σ_r/MPa	168.3	171.9	118.3	124.3	53.0	55.2	
		α	1.6441	1.6364	1.5453	1.5297	1.5943	1.5833	
	泥土	U_o/V	-12.3976	-12.7993	-9.9738	-11.2645	-4.7872	-5.1215	0.840
		ε	0.0620	0.0640	0.0499	0.0563	0.0239	0.0256	
		σ_r/MPa	173.6	179.2	139.6	157.7	67.0	71.7	
		ε	1.6330	1.6214	1.4931	1.4548	1.5290	1.5101	
	水	U_o/V	-10.5708	-10.668	-7.5761	-9.203	-3.5642	-4.7136	0.657
		ε	0.0529	0.0533	0.0379	0.0460	0.0178	0.0236	
		σ_r/MPa	148.0	149.4	106.1	128.8	49.9	66.0	
		α	1.6904	1.6871	1.5796	1.5184	1.6113	1.5333	

注:应变片灵敏系数为2.0,桥压为4 V,软弱夹层为泥土和石子的试块测量增益为50,软弱夹层为泥土、水的试块测量增益为100,试块弹性模量为2.8 GPa, α_i 为第*i*通道的衰减系数。

参考文献 (References)

- [1] 丁晨曦,杨仁树,陈程,等.切缝药包爆破定向裂纹与张开节理相互作用的实验研究[J].工程科学学报,2021,43(7):894-902.
- [1] DING Chen-xi, YANG Ren-shu, CHEN Cheng, et al. Experimental study of the interaction of directional crack and open joint in slit charge blasting[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43(7): 894-902. (in Chinese)
- [2] 苏洪,龚悦,杨仁树,等.爆炸荷载作用下预裂缝宽度对裂纹扩展的影响[J].中国矿业大学学报,2021,50(3):579-586.
- [2] SU Hong, GONG Yue, YANG Ren-shu, et al. Influence of pre-splitting crack width on crack propagation under blast loading[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2021, 50(3): 579-586. (in Chinese)
- [3] 徐帮树,张万志,石伟航,等.节理裂隙层状岩体隧道掘进爆破参数试验研究[J].中国矿业大学学报,2019,48(6):1248-1255.
- [3] XU Bang-shu, ZHANG Wan-zhi, SHI Wei-hang, et al. Experimental study of parameters of tunneling blasting in jointed layered rock mass[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(6): 1248-1255. (in Chinese)
- [4] 杨仁树,苏洪.爆炸荷载下含预裂缝的裂纹扩展实验研究[J].煤炭学报,2019,44(2):482-489.
- [4] YANG Ren-shu, SU Hong. Experimental study on crack propagation with pre-crack under explosion load[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(2): 482-489. (in Chinese)
- [5] 张运良,孙宁新,毛雨,等.软弱夹层对隧道光面爆破效果影响机理研究[J].铁道科学与工程学报,2020,17(1):148-158.
- [5] ZHANG Yun-liang, SUN Ning-xin, MAO Yu, et al. Study on the influence mechanism of weak interlayer on tunnel smooth blasting effect[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2020, 17(1): 148-158. (in Chinese)
- [6] 徐叶勤,李梅,姚俊伟,等.爆破荷载对含软弱夹层隧道围岩稳定性和变形破坏特征的影响[J].爆破,2020,37(2):35-41.
- [6] XU Ye-qin, LI Mei, YAO Jun-wei, et al. Influence of blasting load on stability and deformation failure characteristics of tunnel surrounding rock mass with weak interlayer[J]. Blasting, 2020, 37(2): 35-41. (in Chinese)
- [7] 杜瑞锋,裴向军,贾俊,等.含软弱夹层岩质边坡在爆破地震波下的试验研究[J].土木工程学报,2021,54(4):95-106.
- [7] DU Rui-feng, PEI Xiang-jun, JIA Jun, et al. Experimental study on rock slope with weak interlayer under blasting seismic wave[J]. China Civil Engineering Journal, 2021, 54(4): 95-106. (in Chinese)
- [8] 张继春,肖正学,郑爽英,等.含软弱夹层岩体爆破的夹层土运动特征试验研究[J].岩石力学与工程学报,2009,28(8):1697-1703.
- [8] ZHANG Ji-chun, XIAO Zheng-xue, ZHENG Shuang-ying, et al. Experimental study of motion characteristics of weak intercalation in rock mass blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(8): 1697-1703. (in Chinese)

- [9] 张继春,宋小林,郭学彬,等.深孔爆破条件下岩体软弱夹层变形特性研究[J].中国铁道科学,2008(2):77-81.
- [9] ZHANG Ji-chun,SONG Xiao-lin,GUO Xue-bin,et al. Research on deformation characteristics of weak interlayer in rock mass under deep-hole blasting[J].China Railway Science,2008(2):77-81.(in Chinese)
- [10] 刘佑荣,唐辉明.岩体力学[M].北京:化学工业出版社,2009.
- [11] 李洪伟,雷战,刘伟,等.起爆方式对岩石柱状装药爆破作用的影响[J].工程爆破,2019,25(5):28-34.
- [11] LI Hong-wei,LEI Zhan,LIU Wei,et al. Influence of detonation mode on blasting effect of rock columnar charge[J].Engineering Blasting,2019,25(5):28-34.(in Chinese)
- [12] 马芹永,袁璞,韩博,等.立井井筒掘进爆破模型试验超动态应变测试系统设计[J].爆破,2013,30(4):50-53,74.
- [12] MA Qin-yong,YUAN Pu,HAN Bo,et al. Design of super dynamic strain testing system of shaft blasting model experiment[J].Blasting,2013,30(4):50-54.(in Chinese)
- [13] 李清,王汉军,杨仁树.多孔台阶爆破破裂过程的试块试验研究[J].煤炭学报,2005,30(5):576-579.
- [13] LI Qing,WANG Han-jun,YANG Ren-shu. Experimental investigation on fracture process of multi-hole bench blasting[J].Journal of China Coal Society,2005,30(5):576-579.(in Chinese)
- [14] 陈云立.环向切缝药包爆炸应力分布及裂缝扩展试块试验研究[D].淮南:安徽理工大学,2019.
- [14] CHEN Li-yun. Experimental study on stress distribution and crack propagation model of circumferential slit column[D].Huannan:Anhui University of Science and Technology,2019.(in Chinese)
- [15] 戴俊.岩石动力学特性与爆破理论[M].北京:冶金工业出版社,2014.
- [16] 胡荣,朱哲明,胡哲源,等.爆炸动载荷下裂纹扩展规律的实验研究[J].岩石力学与工程学报,2013(7):1476-1481.
- [16] HU Rong,ZHU Zhe-ming,HU Zhe-yuan,et al. Experimental study of regularity of crack propagation under blasting dynamic loads[J].Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering,2013(7):1476-1481.(in Chinese)
- [17] 李清,张茜,李晟源,等.爆炸应力波作用下分支裂纹动态力学特性实验[J].岩土力学,2011,32(10):3026-3032.
- [17] LI Qing,ZHANG Xi,LI Sheng-yuan,et al. Experimental study of dynamic fracture behaviors of branched cracks under blasting stress wave[J].Rock and Soil Mechanics,2011,32(10):3026-3032.(in Chinese)
- [18] 孙宁新,雷明锋,张运良,等.软弱夹层对爆炸应力波传播过程的影响研究[J].振动与冲击,2020,39(16):112-119,147.
- [18] SUN Ning-xin,LEI Ming-feng,ZHANG Yun-liang,et al. A study on the influence of weak interlayer on the propagation process of explosion stress wave[J].Journal of Vibration and Shock,2020,39(16):112-119,147.(in Chinese)
- [19] 苏洪,龚悦,李凯.抑制预裂缝端部翼裂纹起裂动焦散实验研究[J].工程爆破,2020,26(1):21-25.
- [19] SU Hong,GONG Yue,LI Kai. Experimental study on dynamic caustics of suppress wing crack initiation at pre-splitting crack tip[J].Engineering Blasting,2020,26(1):21-25.(in Chinese)
- [20] 张志呈.岩体爆破裂纹扩展速度实验研究[J].爆破器材,2000(3):1-8.
- [20] ZHANG Zhi-cheng. An experimental study of crack expansion speed in rock blasting[J].Explosive Materials,2000(3):1-8.(in Chinese)
- [21] 刘飞.砂浆试块中爆炸应力波的测试与数值模拟[D].淮南:安徽理工大学,2016.
- [21] LIU Fei. Testing and numerical simulation on explosion strain wave in mortar test block[D].Huannan:Anhui University of Science and Technology,2016.(in Chinese)

英文编辑:柯波

科技论文网络首发小知识

网络首发(Online First Publish),就是被录用论文在纸质刊物出版前,先以网络出版形式刊发出来,读者可以在文章所在网页阅览、下载和打印。网络首发与纸质版具有同等效力,可减少出版时滞,使作者的首发权得到及时确认,以促进科研成果快速传播。