

文章编号: 1001-487X(2005)03-0012-05

节理裂隙岩体爆破试验研究

李建军, 段祝平

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

摘要: 首先利用超声波探测法对节理裂隙岩体进行了声波测试, 对不同的节理裂隙岩体进行了质量评估。然后通过对节理裂隙岩体进行爆破漏斗试验, 分析了节理裂隙对岩体中爆炸应力波传播、岩石破碎及爆破漏斗形成的影响, 得出了一些有益结论, 对节理裂隙岩体理论研究和指导工程实践具有一定的参考价值。

关键词: 爆炸力学; 节理裂隙岩体; 超声波测试; 爆破漏斗

中图分类号: TD 235.37 **文献标识码:** A

Experimental Investigation of Jointed and Fractured Rock Masses

LI Jian-jun, DUAN Zhu-ping

(State Key LNM, Institute of Mechanics, CAS, Beijing 100080, China)

Abstract: Utilizing the technique of ultrasonic detection on jointed and fractured rock masses, the author firstly measures the elastic wave velocity, then appraises the quality of different masses. Secondly, experiments on explosive funnel are conducted, and the paper discusses the influences of the joints on propagation of shock wave, the rock breaking and formation of explosive funnel. Some beneficial conclusions are drawn which are available for references to practical projects and theoretical research of jointed and fractured rock masses.

Key words: mechanics of explosion; jointed and fractured rock masses; ultrasonic detection; explosive funnel

1 引言

天然岩体含有大量的断层、节理、裂隙等缺陷, 具有明显的非线性和显著的各向异性。它们使得爆炸能量分布不平衡, 严重阻碍应力波的传播, 造成应力波能量急剧衰减, 并使爆生气体过早外逸, 影响爆破效果^[1]。因此, 研究节理裂隙岩体在爆炸载荷作用下的破碎机理对于采用合理的凿岩爆破参数、提高爆炸能量利用率、改善爆破效果等均具有实际意义及理论指导作用。正因为如此, 节理裂隙对应力波传播和爆破效果的影响, 一直是国内外岩石力学界众多学者关注的重点课题之一^[2-5], 而且在将来一段时期内仍将是一研究热点。

从试验方面对节理裂隙岩体进行了研究, 包括节理裂隙岩体声波测试和爆破漏斗试验, 最后对含结构弱面岩体的爆破设计提出了一些建议。

2 节理裂隙岩体声波速度测试

为了分析节理裂隙对爆炸应力波传播及爆破破碎的影响, 首先需对节理裂隙岩体的物理性质有一个初步质量评价。为此在泰明公路进行了现场声波测试, 现场地形属于丘陵地带, 岩体为花岗岩, 并受到一定程度风化, 岩石普氏系数在 8~10 之间, 且岩体节理裂隙比较明显。

2.1 节理裂隙岩体声波速度测试方法及原理

为了测得节理裂隙对声波速度和岩体损伤的影响, 根据要求和现有试验条件, 决定采用超声波探测法, 即用频率大于 20 kHz 的超声波, 对小型试件或建筑结构材料的动弹性模量或波速进行检测以探测

收稿日期: 2005-05-20.

作者简介: 李建军(1975-), 男; 北京; 中国科学院力学所非线性力学国家重点实验室博士生。

内部缺陷。所用的探测方法为表面直透法,测试时将激励器(发射换能器)和拾音器(接收换能器)紧贴岩石试件的 2 个平整端面(如图 1),然后将换能

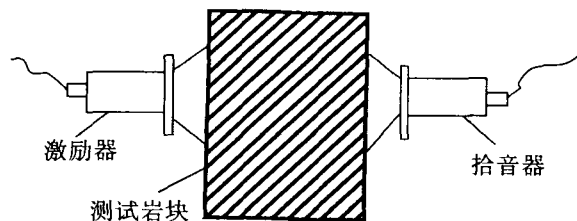


图 1 岩块测试示意图

Fig 1 Rock test sketch map

器通过电缆分别接入“发射”和“接收”插座。振荡器产生的周期电脉冲经过放大器传给激励器,它将电脉冲转成机械脉冲在杆端产生扰动,经过试件后

由拾音器再将机械震动信号转成电信号,放大后进行显示和记录。

2.2 数据采集及结果分析

采用如图 1 所示方法,测量时,先测试出波在岩石试件中传播所用时间 T ,然后用尺子量出每个试件的长度 L ,根据公式 $V=L/T$ 即可求出岩石试件波速,利用公式 $D=1-V^2/V_0^2$ 求出岩石初始损伤(V_0 为未损伤岩石弹性波波速, V 为损伤岩石弹性波波速)。虽然求出的波速和岩体波速有一定差别,但对于分析节理裂隙对声波衰减以及岩体强度影响仍有一定参考价值。

根据上述测试方法和要求,在现场对 6 种不同岩石试件进行了声波测试。以试件 1 视为无损试件,以此为标准,算出试件初始损伤。测试数据见表 1。

表 1 试验数据

Table 1 Test data

试件编号	测试方向长度/mm	声时/ μs	波速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	初始损伤	试件描述
1	620	93.2	6 652	0	岩石完好,无节理裂隙。
2	800	167.3	4 782	0.49	试件两端分别有 5 条与测试方向垂直间距 3 mm 小裂隙和 7 条间距 2 mm 劈理。
3	700	245.6	2 850	0.84	垂直与波传播方向有平均 3 mm 宽的节理 6 条,11 条劈理。
4	670	168.1	3 986	0.64	垂直于波传播方向有 1 条 4 mm 厚夹层,7 条平均间距 7 cm 的劈理。
5	430	79.3	5 422	0.34	垂直于波传播方向有 7 条劈理。
6	560	93.6	5 983	0.22	垂直于波传播方向有 3 条小节理,平行波传播方向有 2 条小节理。

2.3 数据分析

1) 从表 1 中数据可以看出,节理裂隙等软弱结构面对声波传播速度具有较大影响。试件 3 由于在垂直于声波传播方向有 6 条 3 mm 宽节理,11 条劈理,使得声波传播受到很大阻碍,因为声波要在节理面发生反射、折射和透射,使声波在岩体中传播速度变慢,传播时间变长。从传播速度计算出的初始损伤可以看出,岩体初始损伤达到 0.84,其内部结构受到很大破坏,使岩块强度大大降低。

2) 即使在同一方向的平面上,测点不同,测出的波速也有很大差别。原因是虽然块体表面特征基本相同,但在岩块内部节理裂隙分布可能有很大变化,使得波速不同。另外可以从示波器中可以看出,接受波的频率与波速有很大关系,波速快的,频率就高,有时甚至很难分辨;波速低的,频率就低。说明损伤有减频作用,使声波发生频散。

3) 从当时无损岩石块声波衰减波形图和损伤

较大岩块声波衰减波形图可以发现,无损岩石块波形图开始阶段明显有一首波,即平稳发展阶段,波形类似于正弦曲线;而损伤岩石块波形图无首波,声波开始即出现衰减,波形很不规则,说明节理岩体声波衰减较快。

3 爆破漏斗试验及结果分析

为了分析节理裂隙对应力波传播及爆破漏斗形状、破碎效果的影响,在泰明公路和边王公路山体爆破现场进行了单孔爆破漏斗试验。现场属丘陵地带,岩体为花岗岩和弱化花岗岩,岩石普氏系数 10~12,且岩体节理裂隙较明显。

3.1 方案设计

漏斗试验采用炮孔直径 35 mm,炮眼深度 100 cm,炸药为 2# 岩石炸药,采用耦合装药,起爆方式为反向起爆和正向起爆,测试数据如表 2 所示。

表2 爆破漏斗试验数据
Table 2 Crater test data

序号	孔深 /cm	装药量 /kg	漏斗深度 /cm	漏斗半径 /cm	堆积直径 /cm	堆积高度 /cm	引爆方式
试验 1	100	0.45	46	63	210	20	反向引爆
试验 2	100	0.45	50	65	200	20	反向引爆
试验 3	100	0.60	70	105	290	35	反向引爆
试验 4	100	0.60	65	100	290	26	反向引爆
试验 5	100	0.53	60	95	270	25	反向引爆
试验 6	100	0.53	55	80	210	25	反向引爆
试验 7	100	54	90	260	40	反向引爆	
试验 8	100	0.53	50	80	260	38	反向引爆
试验 9	100	0.53	50	70	270	30	正向引爆

3.2 试验分析

1) 漏斗试验 1、2 为节理面法向与炮孔轴向平行的情形,漏斗形状如图 2。可以看出:漏斗深度较浅,只有 46 cm,破坏范围较小,漏斗直径也只有 63 cm,而且明显留有根底,说明爆破效果不是太好,炮眼利用率较低。

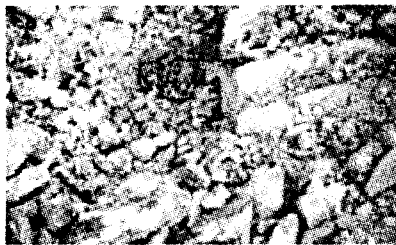


图2 漏斗试验 1、试验 2 的漏斗形状
Fig 2 The crater shape of test 1 and test 2

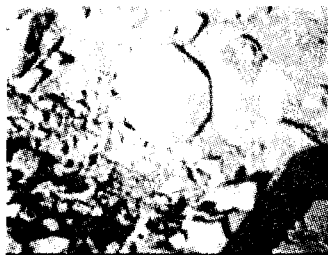


图3 漏斗试验 3、试验 4 的漏斗形状
Fig 3 The crater shape of test 3 and test 4

2) 漏斗试验 3、4 为节理面法向与炮孔走向平行情形,但装药量为 0.60 kg,漏斗形状如图 3。可以看出:漏斗形状较好,漏斗深度分别为 70 cm, 65 cm, 漏斗半径分别为 105 cm, 100 cm, 爆破范围较大,说明爆炸能量利用率较高,但漏斗试验 4 爆后有一长约 50 cm 岩块尚未破碎。

3) 试验 5、6 为节理面法向与炮孔轴向方向垂



图4 漏斗试验 5、试验 6 的漏斗形状
Fig 4 The crater shape of test 5 and test 6



图5 漏斗试验 7 的漏斗形状
Fig 5 The crater shape of test 7

直的情形,漏斗形状如图 4。可以看出:漏斗形状成长条形,漏斗半径沿节理走向明显比节理垂直方向要长,垂直节理方向有大块岩石未破碎,破碎块度不均。说明沿节理走向爆破效果较好,垂直节理方向爆破效果较差。

4) 漏斗试验 7 为夹层法向与炮孔轴向斜交情形,夹层厚度为 30 cm,夹层强度较低,爆破漏斗形状如图 5。可见爆破漏斗形状成长条形,且在节理走向方向漏斗开口较长,但整体爆破体积较小,且有大块岩石。

5) 漏斗试验 8 为夹层法向与炮孔轴线垂直的情形,夹层厚度分别为 44 cm,夹层岩石强度较低,漏斗形状如图 6。可以看出,漏斗形状极不规则,呈长条形,爆破块度较大,且周边有大裂缝产生,爆破范围较小。这主要是因为夹层严重阻碍应力波传播,使爆炸能量迅速衰减,爆炸能量利用率较低。



图 6 漏斗试验 8 的漏斗形状
Fig 6 The crater shape of test 8

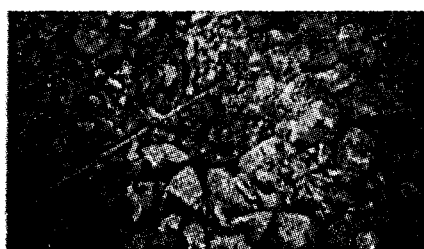


图 7 漏斗试验 9 的漏斗形状
Fig 7 The crater shape of test 9

6) 漏斗试验 9 为节理面法向与炮孔轴向平行情形,起爆方式为正向起爆,漏斗形状如图 7。可以看出:漏斗形状较好,块度分布较均匀,漏斗深度较小。这是因为正向起爆情况下,用于顶部漏斗的爆破能量相对较大,爆破能量对底部岩石的破坏时间短,因此上部岩石破碎较好,下部岩石破碎较差,漏斗深度较反向起爆较浅,破坏作用较弱,反向起爆比正向起爆具有较高炮孔利用率。

7) 图 8、图 9 分别为漏斗试验 3、8 的爆破块度分布图,从图 8、图 9 中可以看出,试验 3 块度均匀,平均块度小,而试验 8 块度明显大小不一,有一长度约 1.1 m 的大块产生,而且块度平均较大。说明夹层对爆破效果的影响比节理裂隙大,含夹层的岩体爆破块度较大,爆破效果较差。



图 8 漏斗试验 3 的爆破块度分布图
Fig 8 Blasting breakage sketch map of crater test 3

从上述爆破漏斗试验可以看出:岩体中的节理裂隙以及夹层等结构弱面存在严重阻碍了爆炸能量



图 9 漏斗试验 8 的爆破块度分布图

Fig 9 Blasting breakage sketch map of crater test 8
均匀分布,使爆炸动作用和静作用没有充分发挥所致。而在同等装药量下,炮孔轴向与结构面法向平行时漏斗成形较好,体积较大。炮孔轴向与结构面法向垂直时爆破漏斗开口较小,爆破体积也小。爆破漏斗开口方向趋于结构面走向方向。含夹层岩体爆破效果较差,块度不均匀。反向装药有助于改善爆破效果,提高炮眼利用率。

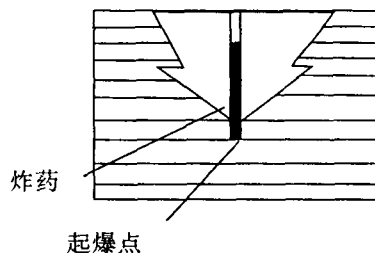


图 10 含一组结构弱面且炮孔轴向与结构面法向平行
Fig 10 It contains a set of faint structure area and the hole axis is parallel to vertical line of the structure area

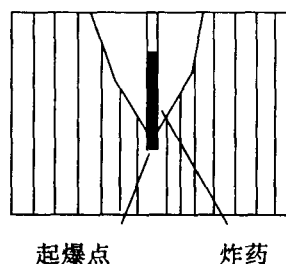


图 11 含一组结构弱面且炮眼轴向与结构面法向垂直
Fig 11 It contains a set of faint structure area and the hole axis is upright to the vertical structure area

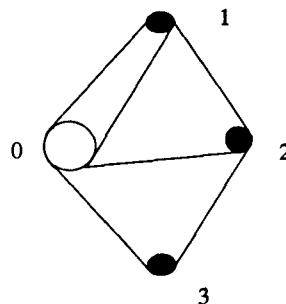


图 12 单螺旋掏槽
Fig 12 Single helix cut

4 含结构弱面岩体爆破设计建议

1) 对于如图 10 含一组结构弱面且炮孔轴向与结构面法向平行的情形, 此时漏斗形状不像均质岩体中那样光滑, 上端开口较大, 爆破体积较大, 炮眼利用率高, 易形成阶梯状的漏斗, 因此爆破设计时可适当加大相邻炮眼孔距。

2) 对于如图 11 所含一组结构弱面且炮眼轴向与结构面法向垂直情形, 爆破漏斗开口较小, 爆破体积相应减小, 而且易留根底和大块, 因此设计时应适当减小炮眼孔距和最小抵抗线。

3) 常见掏槽孔布置一般设在工作面的中心部位且对称布置。根据上述分析, 这在节理裂隙岩体中是不太合理的, 易采用如图 12 所示的单螺旋掏槽较合适, 图中 0 为空孔, 1、2、3 为装药炮孔起爆顺序。螺旋掏槽依次间隔起爆, 能充分利用自由面, 扩大掏槽效果, 改善炮眼利用率, 以达到提高爆破质量的目的。在实际设计中, 炮孔间距和起爆顺序应根据岩体中节理倾向和炮孔夹角来确定。

5 结 语

节理裂隙的存在从宏观上弱化了岩体结构, 严重阻碍了爆炸能量均匀分布, 因此在爆破设计和施

工中, 炮孔布置、炮孔起爆顺序应充分考虑节理裂隙岩体中的结构弱面影响, 更加合理地优化爆破设计, 才能取得较好的爆破效果。

参考文献

- [1] Ash R L. On Rock Mechanics [M]. New York: 1973. 263 ~ 271.
- [2] Fourney. On Rock Fragility [M]. Lulea: Blasting, 1983. 505 ~ 531.
- [3] 尚嘉兰, 郭汉彦. 岩体裂隙对应力波传播的影响[J]. 爆炸与冲击, 1993, 13(4): 334 ~ 342.
- [3] Shang Jia-lan, Guo Han-yan. The Affection of the Rock Cranny to the Sprend of Stress Wave [J]. Blasting and Shock, 1993, 13(4): 334 ~ 342.
- [4] 王明洋, 钱七虎. 爆炸应力波通过节理裂隙带的衰减规律[J]. 岩体工程学报, 1995, (2): 42 ~ 46.
- [4] Wang Ming-yang, Qian Qi-hu. The Attenuation Law of the Blasting Stress Wave Acrossing Loint Cranny Belt [J]. Rock Engineering Transaction, 1995, (2): 42 ~ 46.
- [5] 费鸿禄. 节理岩体爆破的研究现状[J]. 工程爆破, 1996, 2(1): 60 ~ 67.
- [5] Fei Hong-lu. Research Status Quo of the Toint Rock Blasting [J]. Engineering Blasting, 1996, 2(1): 60 ~ 67.

(上接第 11 页)

- [4] Wang Hai-fu, Feng Shun-shan. Study on Shock Pressure Properties of Porous Iron [J]. Journal of Beijing Institute of Technology, 1998, 18(2): 165 ~ 169.
- [5] 王永刚, 胡时胜, 王礼立. 爆炸荷载下泡沫铝材料中冲击波衰减特性的实验和数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(6): 516 ~ 522.
- [5] Wang Yong-gang, Hu Shi-sheng, Wang Li-li. Shock Attenuation in Aluminum Foams under Explosion Loading [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(6): 516 ~ 522.
- [6] 陈网桦, 朱卫华, 彭金华, 等. 硬质聚氨酯泡沫塑料隔爆性能的研究[J]. 爆炸与冲击, 1997, 17(3): 281 ~ 284.
- [6] Chen Wang-hua, Zhu Wei-hua, Peng Jin-hua, et al. Gap Test Investigation of Rigid Polyurethane Foam Plastics [J]. Explosion and Shock Waves, 1997, 17(3): 281 ~ 284.
- [7] 卢子兴, 严寒冰, 王建华. 聚氨酯复合泡沫塑料的动态压缩力学性能[J]. 中国塑料, 2004, 18(3): 67 ~ 70.
- [7] Lu Zi-xing, Yan Han-bing, Wang Jian-hua. Mechanical Properties of Polyurethane Syntactic Foams under Dynamic Compression [J]. China Plastic, 2004, 18(3): 67 ~ 70.
- [8] 章冠人, 陈大年. 凝聚炸药起爆动力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1991.
- [8] Zhang Guan-ren, Chen Da-nian. Ignition Dynamics of Coacervation Charge [M]. Beijing: Defence Industry Press, 1991.
- [9] 叶序双. 爆炸力学基础[M]. 南京: 工程兵工程学院, 1999.
- [9] Ye Xu-shuang. Explosion Mechanics [M]. Nanjing: Engineering Institute of Engineer Corps, 1999.
- [10] 郑孟菊, 俞统昌, 张银亮. 炸药的性能及测试技术[M]. 北京: 兵器工业出版社, 1990.
- [10] Zheng Meng-ju, Yu Tong-chang, Zhang Yin-liang. Properties and Test Technology of Charge [M]. Beijing: Industry Press, 1990.