

文章编号: 1001-4888(2011)01-0085-06

应力波穿越岩石节理时能量耗散规律的实验研究^{*}

李业学^{1,2}, 刘建锋², 秦丽¹

(1. 襄樊学院 建筑工程学院, 湖北 410053; 2. 四川大学 水利水电学院, 成都 610065)

摘要: 采用材料试验机和大尺度激光表面仪对大理岩和花岗岩两种岩石进行三点弯曲和粗糙断裂面的扫描实验, 详细地分析了粗糙断裂面的分形特征。通过 SHPB 实验, 研究并提出了波能量耗散与断裂面分形维数的定量关系; 分析了分形维数对波能量耗散的影响规律。研究得出以下结论: 1) 随着粗糙断裂面分形维数的增大, 通过断裂面时应力波能耗将相应增加; 2) 应力波能量主要是以热能和塑性变形能耗散。分形维数越大, 比表面积则越大, 粗糙表面粒子相互摩擦和挤压程度相应增加, 导致波的机械能转化成热能和塑性变形能部分增加, 因而波动能量耗散越大。

关键词: 应力波; 能量耗散; 分形; 断面; 岩石

中图分类号: TU457

文献标识码: A

0 引言

为了减小甚至避免地震波对建筑物、构筑物造成的损害, 有必要弄清波通过天然岩体中的裂隙时其能量衰减规律。1931 年, Jdffeys^[1] 对应力波通过不同结构后的能量衰减做了研究和分析, 虽然这一研究仅仅适用于波速连续改变的材料, 而不适用于裂隙, 但这开启了从能量角度研究波的先河。就应力波通过裂隙时的传播特性这一问题, Seinov 和 Chevkin^[2] 较早地开始了这方面的研究。研究结果显示, 应力波的能量衰减取决于裂隙的数量、宽度以及填充物的波阻抗。进入 20 世纪 80 年代, 研究者们就波能量衰减与裂隙参量间的关系做了深入的探讨。Crampin^[3] 研究指出, 当应力波通过有向排列的裂隙时, 应力波的能量衰减比相应波速改变表现出更大的各向异性, 这表明波的能量衰减比波速对存在的裂隙更敏感。同年, Hudson^[4] 揭示能量衰减系数与裂隙密度及平均裂隙半径对波长之比成正比。Kachanov^[5] 对能量衰减给予了机理上的解释, 他们指出, 弹性波通过岩体裂隙时, 波的能量衰减是由摩擦滑移和散射导致的。20 世纪 90 年代, Myer^[6] 等使用位移不连续体模型研究了波通过单一裂纹时的影响效应。后来在考虑正应力、刚度、填充介质、粘土、温度和初始损伤基础上修正了这一模型, Myer et al^[7-9]; Pyrak-Nolte and Cook^[10]; Cook^[11]; Pyrak-Nolte^[12] 也在实验上给予了验证。1994 年, He Hongliang^[13] 从损伤理论的角度研究了波速与含裂隙材料损伤参量间的关系。他认为, 由于损伤裂纹的存在和发展会引起应力波波速的衰减, 所以波速衰减系数和损伤参量之间的关系对损伤岩石中的应力波传播具有重要作用。2002 年, Kahraman^[14] 为弄清应力波通过粗糙断面时断面粗糙性是如何影响波的传播的, 从实验角度, 他给出了裂纹粗糙面系数(FRC)与波速的经验公式。纵观以上研究, 在研究波动能量衰减与裂隙参量关系时, 主要对裂隙参量中的裂隙宽度、长度及填充介质给予更多关注, 而裂

^{*} 收稿日期: 2010-05-24; 修回日期: 2010-07-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(50974091); 湖北省自然科学基金项目(2010CDB05202); 湖北省教育厅中青年项目(Q20102603)

通讯作者: 李业学(1977-), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩石冲击动力学方面的研究工作。E-mail: liyexue_student@sina.com

纹面的粗糙性却少有涉及。虽然 2002 年 Kahraman^[14] 在裂纹面粗糙性与波速的关系从实验角度做了探讨,但他通过纵横交错地刻划直线凹痕来模拟断面粗糙性,而实际上的粗糙断面却是极其不规则的。所以,为了更符合实际情况,有必要找一种描述随机分布裂隙的参量,即粗糙表面的分形维数,建立粗糙表面的分形维数与能耗的关系。

1 节理面扫描试验

选取大理岩和花岗岩两种岩样取芯,获取直径为 30mm 的圆柱体试样,通过三点弯曲实验断出如图 2 的粗糙断面,对断面扫描后用环氧树脂胶粘结实,而后截取长度 12mm 圆柱体试样,对其上、下表面进行精细机磨,保证上、下表面不平行度不超过 0.02mm,同时保证上、下表面与圆柱中心线完全垂直。最终加工出的成品岩样如图 1。



图 1 预制裂纹

Fig. 1 Precast crack



图 2 岩石断面图

Fig. 2 Figure of rock fracture surface



图 3 激光表面仪

Fig. 3 Laser profilometer

1.1 扫描实验简介

激光表面仪(如图 3)是一种非接触式测量表面形貌的仪器,其量程为 30mm,精度为 $7\mu\text{m}$,测试的最小间距为 $7.5\mu\text{m}$ 。现选取 0.2mm 的扫描步长,对粗糙断面(如图 2)进行扫描,获取表面的三维坐标。由于立方体覆盖法计算维数的需要,先在扫描获得的圆形数据区域中截取一个适当的矩形数据区域。利用立方体覆盖法^[15]分别计算出两种岩石断面分形维数(如表 1)。

1.2 扫描实验结果分析

从分形维数计算的双对数图可知,直线拟合的误差均在 6% 以下(分别为 0.84%、1.1%、1.3%、5.22%),这表明:通过三点弯曲获得的断裂面具有很好的分形特性。另外,随着粗糙断面的粗糙程度增加,双对数图中计算出的维数也随之增大。从实验上对谢和平、周宏伟提出的立方体覆盖法^[15]给予了验证。

2 SHPB 实验

2.1 SHPB 实验简介

本实验采用中国科学院力学研究所实验室 SHPB 实验设备完成,SHPB 杆长 2.2m、杆径 32mm,两半导体应变片均贴在入射和透射杆的正中间(即距杆端 1.1m)。设备安装调试完毕后,由氮气瓶提供的高压气体在弹膛迅速膨胀,推动子弹加速运动并以一定的速度撞入入射杆,在入射杆中产生速度为 V_I 右传的入射波;当入射波

传至 A_1 界面时,由于杆与试样具有不同的波阻抗,一部分反射回入射杆,产生波速为 V_R 的反射波,另一部分通过试件传给透射杆,产生透射波,其波速为 V_T (如图 4 所示)。应变波动信号由半导体应变片接收,并由超动态应变仪转变为电信号,再由超动态测试分析仪转变为离散信号存储起来。测试完毕

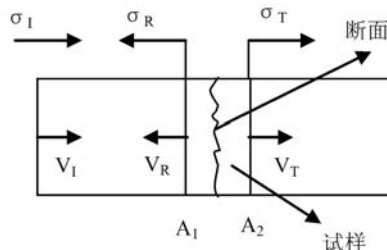


图 4 SHPB 实验原理图

Fig. 4 Figure of test theory

后,依据标定值将电压值换算成对应的应变值,并在 Matlab 环境下绘出入射、反射、透射的应变时间曲线(如图 5、图 6)。最后基于式(1)算出波通过预制裂纹面的能耗值(如表 1)。

表 1 花岗岩能耗值及分形维数统计表(单位: $J \times 10^{-4}$)

Tab. 1 Statistics of energy dissipation and dimension of granite and marble

岩石种类	试样编号	入射波能量	透射波能量	反射波能量	能耗	分形维数	减去最小能耗后的能耗值
大理岩	M1	160	96.72	39.40	25.07	2.0551	0.00
	M2	160	109.19	20.54	30.27	2.0747	5.20
	M3	160	105.97	19.74	33.25	2.1032	8.18
	M4	160	99.56	24.89	35.56	2.1071	10.49
	M5	160	106.28	15.18	38.54	2.1144	13.47
	M6	160	98.72	18.16	43.12	2.1225	18.05
	M7	160	101.33	16.00	43.73	2.1244	18.66
	M8	160	96.97	13.58	49.45	2.1460	24.38
花岗岩	G1	160	102.50	33.75	23.75	2.0474	0.00
	G2	160	98.06	34.84	27.10	2.0560	3.35
	G3	160	100.00	24.44	35.56	2.0833	11.81
	G4	160	99.31	24.28	35.31	2.0975	11.56
	G5	160	104.00	18.00	38.00	2.1008	14.25
	G6	160	107.40	12.05	40.55	2.1130	16.80
	G7	160	99.15	20.28	40.56	2.1201	16.81
	G8	160	105.95	9.73	44.32	2.1430	20.57
	G9	160	101.62	14.05	45.41	2.1529	21.66

试样的耗能值 E_S 为:

$$E_S = E_I - E_T - E_R \tag{1}$$

其中入射能 E_I 、反射能 E_R 、透射能 E_T 分别为:

$$E_I = \frac{A_e}{\rho_e C_e} \int_0^\tau \sigma_I^2(t) dt \tag{2}$$

$$E_R = \frac{A_e}{\rho_e C_e} \int_0^\tau \sigma_R^2(t) dt \tag{3}$$

$$E_T = \frac{A_e}{\rho_e C_e} \int_0^\tau \sigma_T^2(t) dt \tag{4}$$

式中: $\sigma_I(t)$ 、 $\sigma_R(t)$ 、 $\sigma_T(t)$ 分别为某一时刻 t 的入射、反射和透射应力,入射和透射应力取压应力为正,反射应力取拉应力为正; ρ_e 、 C_e 分别为弹性杆的波阻抗; τ 为应力波延续时间; A_e 为弹性杆的截面积。

通过如图 5 所示的时间应变曲线计算出能耗值(如表 1)。为消除冲击速度差异对实验结果的影响,可进行归一化处理,即:把入射波能量都换算为 $160 \times 10^{-4} J$,并将透射波能量、反射波能量、能耗也换算为对应值(如表 1),拟合出维数与能耗关系曲线 1(如图 6、图 7)。为剔除岩性的影响,现将所有能耗值减去这些能耗值中的最小值,获取能耗相对值(如表 1)。基于表 1,拟合出维数与能耗相对值关系曲线 2(如图 6、图 7)。

分析图 6、图 7 可知:1) 对于粗糙表面的分形维数与波的能耗关系,从拟合曲线可知,裂纹的分形维数越大,则波的能耗越大,也就是说,岩石的断裂表面越粗糙,波穿过该裂纹时,产生的能量耗散将越大。

2) 在图 6、图 7 中,无论是花岗岩还是大理岩,虽然分形维数对波的能耗影响规律是一致的,但不难

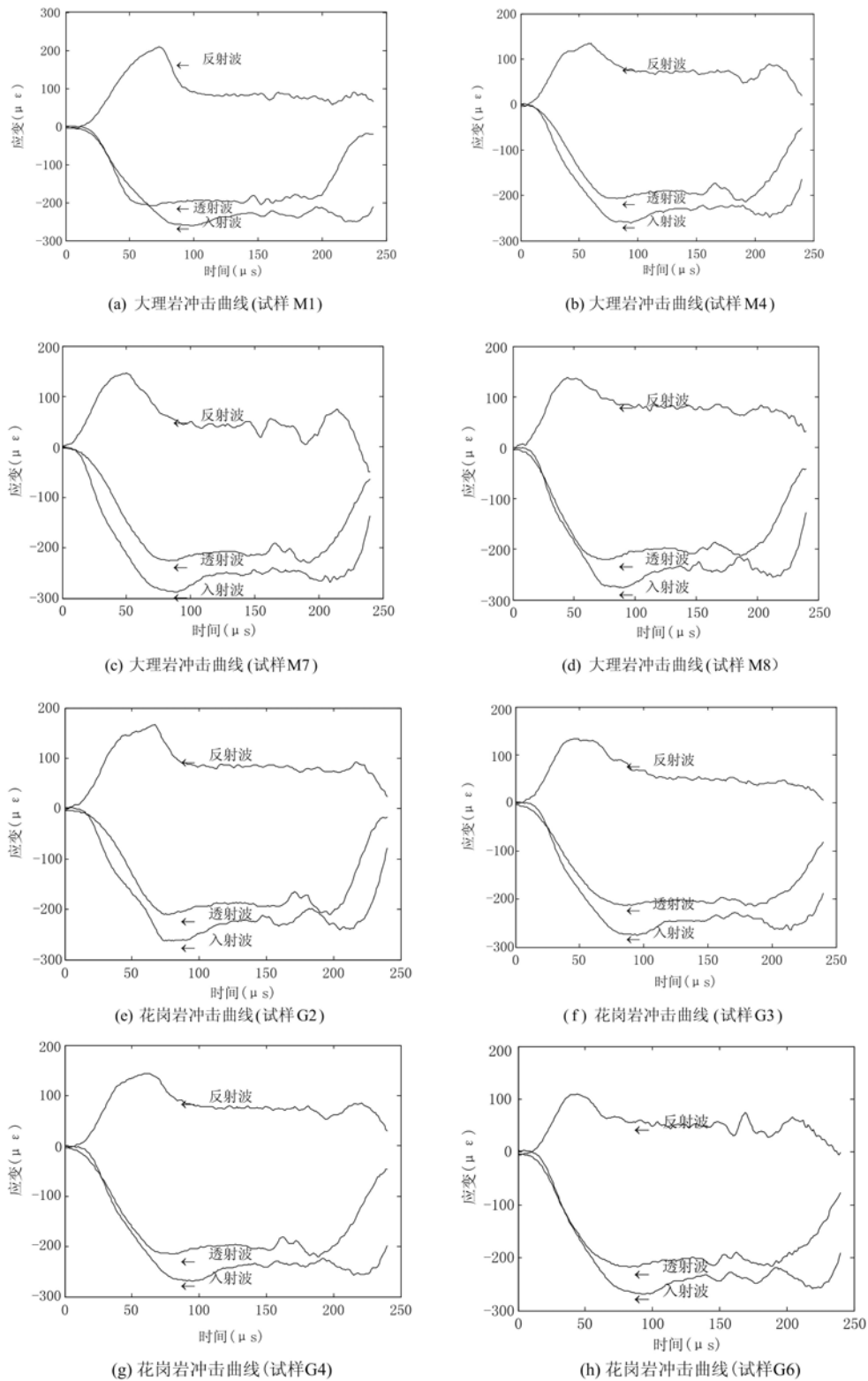


图 5 时间应变曲线

Fig. 5 Curve of strain and time

发现,通过各自减去对应的最小能耗值来剔除岩性和其它参数的影响后,仍存在这样的现象:在图 6 的曲线 2 中,能耗的增大幅度随维数的增大而增大,而在图 7 的曲线 2 中,能耗的增大幅度随维数的增大而减小,这一现象正好从另一个侧面证明了分形理论中的一个结论^[16]:对于给定粗糙表面,依据同一种分形维数计算法,维数是确定的,但反过来是不成立的。也就是说,当给出一个分维值,我们可以作出无

数个分形曲面。在这一实验中,虽然两个、甚至几个曲面算出的维数一致,但它们仍然是具有不同特征的曲面,相同的是这些曲面具有相同的粗糙程度(即相同的维数)。

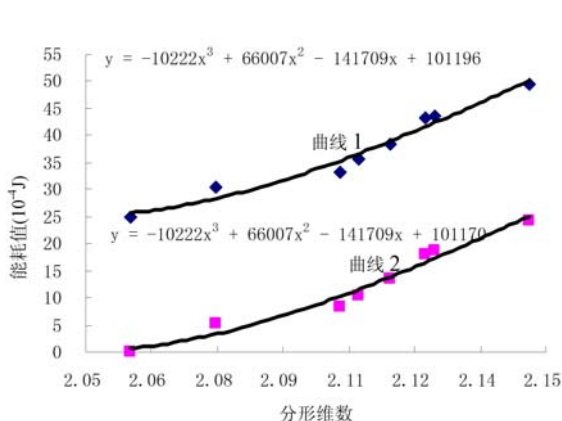


图6 大理岩能耗维数关系曲线

Fig. 6 Curve of relation between energy dissipation and dimension in marble

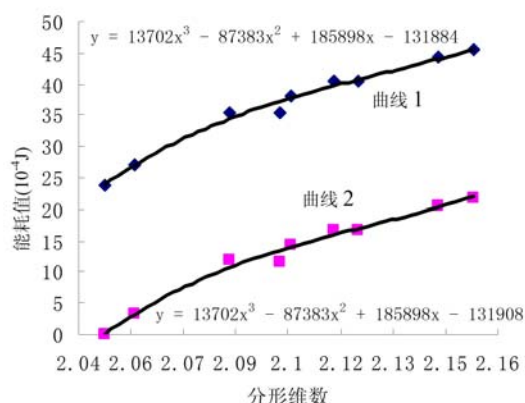


图7 花岗岩能耗维数关系曲线

Fig. 7 Curve of relation between energy dissipation and dimension in granite

2.3 现象的微观机理解释

组成岩石的基元粒子(原子、分子、离子等)并非固定不动,而是在一定的平衡位置作往复振动。大量基本粒子的振动是十分复杂的,包括线形谐振和非谐振的相互影响,这种振动在宏观上表现为一定的平均动能。当应力波传至断裂面时,断裂面的基本粒子振动加剧,在宏观上的表现就是温度升高,波的机械能转化成动能,导致波的能量耗散。

由于试样中断裂面的存在,使得岩石在应力波作用下更易发生塑性变形^[17],例如矿物晶粒内位错运动所产生的滑移和孪生,以及岩石微粒沿断裂面的剪切移动。塑性变形是不可逆的,其微观根源在于岩石组织结构发生不可逆的畸变,而宏观表现即为体积或形状永久变形。塑性变形是在塑性的作用下产生的。消耗与塑性变形的能量有一部分转化成热量,例如位错增殖散热,沿微缺陷面移动的摩擦生热等等,还有一部分则以形变累积的形式表现为岩石的塑性变形能。也就是说:波的机械能转化为两部分能量而被耗散,其一是:热能,其二是:塑性变形能。

从以上的能耗微观机理不难知道,应力波的能量主要是以热能和塑性变形能而耗散。表面越粗糙,即分形维数越大,比表面积越大,粒子相互摩擦和挤压程度也相应增加,导致波的机械能转化成热能和塑性变形能部分增加,因而在宏观上表现为断面越粗糙,波通过该断面时能量耗散就越大。

3 结论

通过三点弯曲和断面扫描实验,研究了粗糙表面的分形特性,利用 SHPB 实验手段,研究并提出了应力波通过粗糙断面的波动规律,即:应力波能耗随着分维增大呈非线性增大。通过两种岩样的能耗与分维关系曲线对比可知,分维不能完全表征粗糙面的几何特性,还需要辅之以参量——分形截距。

参考文献:

- [1] Jdffeys H. Damping in bodily seismic waves[J]. Geophysical Supplement to Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 1931,3:318—323.
- [2] 夏昌敬,谢和平,鞠杨. 孔隙岩石的 SHPB 试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(5):896—900 (XIA Changjing, XIE Heping, JU Yang. SHPB Test on Porous Rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(5): 896—900 (in Chinese))
- [3] Crampin S. A review of wave motion in anisotropic and cracked elastic media[J]. Wave Motion, 1981, 3:341—391.
- [4] Hudson J A. Wave speeds and attenuation of elastic waves in material containing cracks[J]. Geophys. J. R. astr.

- Soc., 1981, 64: 133—150.
- [5] Kachanov L M. Introduction to continuum damage mechanics[M]. Martinus Nijh of Publishers, 1986.
 - [6] Myer L R, Pyrak-Nolte L J, Cook N G W. Effect of single fractures on seismic wave propagation[M]// In: Proceedings of ISRM Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, 1990: 467—474.
 - [7] Myer L R, Hopkins D, Cook N G W. Effects of contact area of an interface on acoustic wave transmission characteristics[M]//In: Ashworth E, editor. Research of engineering applications in rock masses, 1985: 565—572.
 - [8] Myer L R. Hydromechanical and seismic properties of fractures[J]. Proceedings of the 7th International Congress on Rock Mechanics, 1991, 1: 397—404.
 - [9] Myer L R, Nihei K T, Nakagawa S. Dynamic properties of interfaces[M]//In: Proceedings of the 1st International Conference on Damage and Failure of Interfaces, Vienna, Austria, 1997: 47—56.
 - [10] Pyrak-Nolte L J, Cook N G W. Elastic interface waves along a fracture[J]. Geophysical Research Letters, 1987, 14(11): 1107—10.
 - [11] Cook N G W. Natural fractures in rock: mechanical, hydraulic and seismic behaviour and properties under normal stress[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences and Geomechanics Abstracts, 1992, 29(3): 198—223.
 - [12] Pyrak-Nolte L J. The seismic response of fractures and the inter relations among fracture properties[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1996, 33(8): 787—802.
 - [13] He Hongliang, Ahrens T J. Mechanical Properties of shock Damage Rocks [J]. Int J Rock Mech Min Sci&Geomech Abstr, 1994, 31(5): 525—533.
 - [14] Kahraman S. The effects of fracture roughness on P-wave velocity[J]. Engineering Geology, 2002, 63: 347—350.
 - [15] ZHOU H W, XIE H. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock[J]. Surface Review and Letters, 2003, 10(5): 751—762.
 - [16] 谢和平. 分形岩石力学导论[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
 - [17] 谢和平, 彭瑞东, 鞠杨. 岩石变形破坏过程中的能量耗散分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(21): 3565—3570 (Xie Heping, Peng Ruidong, Ju Yang. Energy Dissipation of Rock Deformation and Fracture[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(21): 3565—3570 (in Chinese))

Experimental Study on Rule of Energy Dissipation of Stress Wave across Rock Joint

LI Ye-xue^{1,2}, LIU Jian-feng², QIN Li¹

(1. Xiangfan University, Hubei 441053, China; 2. Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: Coarse character of fracture section and fractal characteristics of marble and granite were particularly analyzed by using material testing machine and large-scale profilometer based on three-point bending experiment and coarse fracture section scanning. Through SHPB experiment, the quantitative relation between wave energy dissipation and fractal dimension of fracture section was studied and presented. Rule about influence of fractal dimension on wave energy dissipation was analyzed. Following conclusions are drawn from above investigation: 1) With the increase of coarse fracture section fractal dimension, stress wave energy dissipation augments correspondently; 2) Stress wave energy is dissipated in form of heat and plastic deformation energy. Bigger the fractal dimension is, larger the specific surface area is. So the mutual friction and degree of clash among granules rise correspondently. Thus, the part of mechanical energy transforming into heat and plastic deformation energy augments. Therefore, the wave energy dissipation is severer.

Keywords: stress wave; energy dissipation; fractal; section; rock