

冲击载荷下裂隙岩体破碎能量耗散特征

陈品荃¹, 赵伏军^{1,2*}, 陈彪¹, 田芯宇¹

(1. 湖南科技大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 湘潭 411201;

2. 湖南科技大学 煤矿安全开采技术湖南省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

摘要:为研究裂隙岩体在冲击载荷作用下的动态力学特性,探究岩石在冲击载荷作用下破碎的能量耗散特征,利用分离式霍普金森杆对完整红砂岩试件以及预制不同角度单裂隙红砂岩试件进行冲击试验.试验结果表明:含裂隙岩石动态抗压强度均小于完整岩石的强度,预制裂隙降低了岩石的动态力学性能;随裂隙角度的增大,裂隙岩石的动态抗压强度随之增大,反射能与入射能的比值逐渐降低,透射能与入射能的比值逐渐增大;能量耗散具有初始阶段快速增长、峰值后略微下降的特征.

关键词:裂隙岩体;冲击载荷;能量;岩石破碎

中图分类号:TU455

文献标志码:A

文章编号:1672-9102(2021)03-0017-07

Energy Dissipation Characteristics of Prefabricated Fractured Rock Under Impact Load

CHEN Pinyin¹, ZHAO Fujun^{1,2}, CHEN Biao¹, TIAN Xinyu¹

(1. School of Resources, Environment and Safety Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Safe Mining Techniques of Coal, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: In order to study the dynamic mechanical properties of fractured rock mass under impact load, and explore the energy dissipation characteristics of rock fragmentation under impact load, and separated Hopkinson rods are used to test the complete red sandstone and prefabricated single fractured red sandstone with different angles. The test piece is subjected to an impact test. The test results show that the dynamic compressive strength of fractured rocks is less than the strength of the complete rock, and the prefabricated fractures reduce the dynamic mechanical properties of the rock. With the increase of the fracture angle, the dynamic compressive strength of the fractured rock increases, and the ratio of the reflected energy to incident energy gradually decreases, and the ratio of transmitted energy to incident energy gradually increases. Energy dissipation has the characteristics of rapid increase in the initial stage and decline after reaching the peak.

Keywords: fractured rock mass; impact load; energy; rock fragmentation

岩石工程经常受到冲击钻进、爆破等人为因素或冲击地压等自然因素引起的动荷载作用而破坏,对工程建设安全产生威胁^[1-2].岩石是非连续、非均质材料,具备明显的非线性、各向异性特征,自然界中的岩石均有不同程度的损伤.岩石内部所含的微裂纹在外部因素下扩展、贯通,待微观损伤发展至一定程度就会引起宏观破坏.岩石的破碎过程实质是能量的传递、交互过程,岩石在动载荷作用下发生的损伤或断裂过程不可避免地伴随外部能量转换和内部能量消耗.能量耗散是造成岩石损伤与破坏状态的重要因素^[3].

收稿日期:2021-01-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674116);湖南省自然科学基金资助项目(2020JJ4311)

*通信作者, E-mail: zfjxxn@263.net

岩石在冲击载荷作用下的力学特性研究领域,许鹏等^[4]研究分析了冲击载荷下弱面对裂纹扩展的影响规律;胡健等^[5]对圆柱形红砂岩进行单轴动态压缩试验,结果表明,随着入射能的增加,承受冲击加载后的试样呈现出完整、破裂和破碎3种不同状态,试样峰值应力呈现明显的应变率效应;李成杰等^[6]对类煤、岩单体及组合体试件进行冲击压缩试验,分析了试件能量耗散与破碎块度特征;宗琦等^[7]指出泥岩和砂岩的耗散能与应变率呈正线性关系,破碎尺寸与应变率呈负线性关系;郭永成等^[8]探究了不同路径下卸荷速率对砂岩力学特性及破坏过程中的能量耗散的影响;Braunagel M J等^[9]在 SHPB 试验装置下研究了花岗岩在循环加载过程中的动态抗压强度及破坏机理,指出试样的抗压强度在循环加载条件下会降低,而加载速度越快,岩石强度越大;杜瑞锋等^[10]通过砂岩动应力应变曲线,分析了中应变率范围内2种动变形模量的定义方法,表明采用等效动变形模量能反映砂岩在动态冲击压缩作用下的损伤变化特性;纪杰杰等^[11]采用分形维数可实现对岩石在冲击荷载作用下的破碎特性、力学特性和破碎耗能特性的定量研究;金解放等^[12]对红砂岩冲击试验发现岩石耗散能随冲击速度增加呈二次函数关系递增;张智宇等^[13]对深部白云岩开展单轴冲击试验,从应力-应变、强度和能量分布等方面对白云岩的动态力学性质进行分析,认为岩石在冲击荷载下发生拉伸破坏;王志亮等^[14-15]分析了花岗岩在等幅循环冲击下的峰值应力、应变、平均应变率、损伤值与冲击次数之间的关系,以及轴压对试样总循环冲击次数的影响。

以上研究均在岩石动力学领域对岩石的破碎特性与能量耗散进行分析,而岩石材料的特性决定其含有原生、次生的裂隙,针对含不同角度裂隙的岩石在冲击载荷下破碎过程的能量耗散特性的研究对实际工程具有指导意义.本试验采用不同角度单裂隙红砂岩试件,通过 SHPB 装置对其进行常规的动态压缩试验,研究红砂岩破碎的能量耗散特征.

1 试验方案

1.1 SHPB 试验原理

分离式霍普金森杆(SHPB),是实现高加载率的有效方法,被广泛用于研究材料在动载荷作用下的动态断裂问题,是研究动载荷作用下材料力学特性最常用、有效的设备,如图1所示.

假设冲击入射应力为 $\sigma_1(t)$,应力波在杆件中传播,在透射杆和入射杆产生透射应力 $\sigma_T(t)$ 和反射应力 $\sigma_R(t)$,同时试件端部产生入射应变 $\varepsilon_1(t)$ 和反射应变 $\varepsilon_R(t)$,以及透射杆产生透射应变 $\varepsilon_T(t)$.根据一维应力波理论及能量守恒定律,试件的耗散能 E_s 为

$$E_s = E_1 - E_R - E_T. \quad (1)$$

式中: E_1 为入射能; E_R 为反射能; E_T 为透射能.且

$$\begin{cases} E_1 = \frac{A_E}{\rho_E C_{E_0}} \int_0^\tau \sigma_1^2(t) dt; \\ E_R = \frac{A_E}{\rho_E C_{E_0}} \int_0^\tau \sigma_R^2(t) dt; \\ E_T = \frac{A_E}{\rho_E C_{E_0}} \int_0^\tau \sigma_T^2(t) dt. \end{cases} \quad (2)$$

式中: A_E 为弹性杆的截面积; $\rho_E C_{E_0}$ 为弹性杆的波阻抗; τ 为应力波延续时间;入射应力 $\sigma_1(t)$ 和透射应力

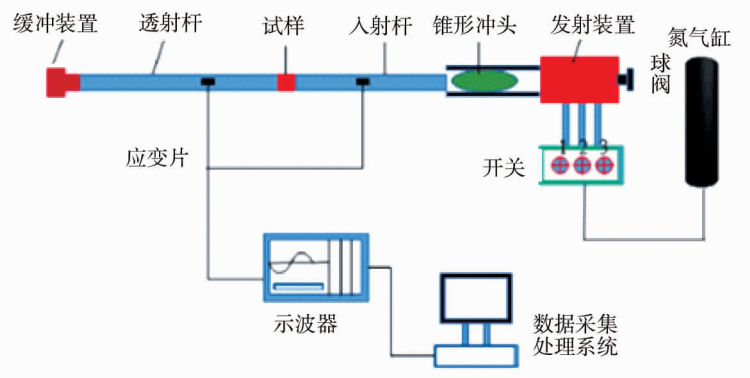


图1 SHPB 系统

$\sigma_T(t)$ 取压应力为正,反射应力 $\sigma_R(t)$ 取拉应力为正.

1.2 试件

试验选取较为完整且均质性比较好的红砂岩试件,试件无明显缺陷,红砂岩试件为圆柱体,尺寸为 $\Phi 50\text{ mm}\times 50\text{ mm}$,预制单裂隙,裂隙尺寸均为 $20\text{ mm}\times 1\text{ mm}$, α 为裂隙角度,如图2所示.试验所用的砂岩试件中有3个完整试件.按试验要求对试件进行打磨,令试件端部的不平行度在允许范围内.在试件内预制各角度裂隙,即 0° 组、 30° 组、 45° 组、 60° 组、 90° 组,共5组,为减少离散性对试验结果的影响,每组选用3个试件,共得15个预制裂隙试件.在SHPB系统上展开不同角度单裂隙红砂岩试件在相同冲击气压值下多次冲击试验.透射杆、入射杆与试件的接触端涂抹黄油,令试件与杆件有更好的接触并降低摩擦力的影响,冲击开始前对试验动力系统进行检查、调节,设置好试验气压.

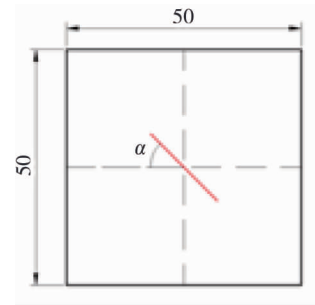


图2 不同倾角单裂隙红砂岩试件轴截面

为检测试件精度,保证试件均遵循试验方案设计要求,采用精度为 0.02 mm 的游标卡尺、精度为 0.01 g 的电子秤以及波速检测仪,测试件基本参数如表1所示.

表1 红砂岩试件基本参数

试件	裂隙角度/ $^\circ$	质量均值/g	高度均值/mm	直径均值/mm	裂隙长度均值/mm	密度均值/ (g/cm^3)	波速均值/ (m/s)
完整		232.0	50.3	49.5		2.45	2 911.68
D-0	0	229.0	50.3	49.6	20.33	2.42	2 006.67
D-30	30	228.0	50.1	49.7	20.27	2.42	2 245.67
D-45	45	227.0	50.3	49.6	20.25	2.41	2 585.47
D-60	60	228.5	50.3	49.7	19.93	2.41	2 941.18
D-90	90	226.0	50.3	49.6	20.33	2.40	2 886.71

2 试验结果分析

试验过程中设定气室中的冲击气压值为 0.55 MPa ,进行多次冲击试验.动态抗拉强度及平均应变速率试验数据如表2所示.

表2 不同倾角单裂隙试件动态力学参数

裂隙倾角/ $^\circ$	试件编号	动态抗压强度 σ/MPa		应变速率/ s^{-1}	
		试验数值	平均值	试验数值	平均值
0	D-0-1	49.08		78.77	
	D-0-2	43.07	43.87	73.13	74.90
	D-0-3	39.46		72.81	
30	D-30-1	50.48		70.13	
	D-30-2	50.08	50.48	70.02	70.59
	D-30-3	50.88		71.62	
45	D-45-1	60.50		68.61	
	D-45-2	58.49	64.70	65.90	69.99
	D-45-3	75.12		75.48	
60	D-60-1	80.13		63.05	
	D-60-2	73.89	79.79	59.73	64.43
	D-60-3	85.34		70.51	
90	D-90-1	97.36		56.51	
	D-90-2	89.94	95.75	46.36	56.37
	D-90-3	99.96		66.23	
	D-1	94.94		53.04	
	D-2	95.34	97.08	54.91	53.57
	D-3	100.96		52.75	

冲击气压试验下,试件的应力-应变曲线如图 3 所示.由图 3 可以看出:试件的应力-应变曲线包含弹性阶段、塑性阶段和破坏阶段.初始阶段即弹性阶段,近似直线平滑上升,表明在这一阶段试件具有良好的线弹性特征,该阶段应力-应变曲线的斜率即为岩石的初始弹性模量,说明 0.55 MPa 冲击气压不会对试件有明显的应变速率效应影响,试件的动态弹性模量较为稳定.随着裂隙角度增大,试件的动态弹性模量也逐渐增大.进入塑性阶段后,试件内部的裂隙损伤区在高应力的作用下发生不可逆的孔隙和裂纹萌生或发展,造成内部损伤及裂纹的进一步发展、贯通,最终导致试件破坏.60°和 90°裂隙试件,在到达峰值强度后应力-应变曲线下降迅速,峰后曲线的变化趋势表明,随裂隙与应力波传播方向趋于平行,试件的脆性程度越来越接近完整试件.裂隙的存在导致岩石的损伤被放大,在冲击载荷作用下,裂隙改变了试件的受力状态和破坏方式,不同倾角的裂隙对试件的影响不同.0°裂隙试件的试验中,应力波是垂直进入 0°裂隙的,因此转变为反射波,但裂隙仅 20 mm 长,并且裂隙在冲击压缩后有一定范围的闭合,所以依旧有透射波存在.反射波较大,透射波较低导致 0°单裂隙试件的动态抗压强度相比之下处于最低.当裂隙角度由 0°逐渐增大至 90°时,其动态抗压强度具有显著的升高趋势.但 90°裂隙与应力波的传播方向平行,其损伤对应力波的传播影响极小,90°单裂隙红砂岩试件破碎的应力-应变曲线与完整试件相比无明显差异.在入射波和反射波的作用下,裂隙试件受到压缩应力和横向拉伸应力的作用,岩石的抗拉强度低于抗压强度,因此横向拉伸应力引起的微裂隙先产生,并且冲击载荷的作用时间很短,微裂隙归并、搭接成剪切形式的贯通裂纹的时间不足,因此,试验中裂隙试件多为横向拉张破坏.

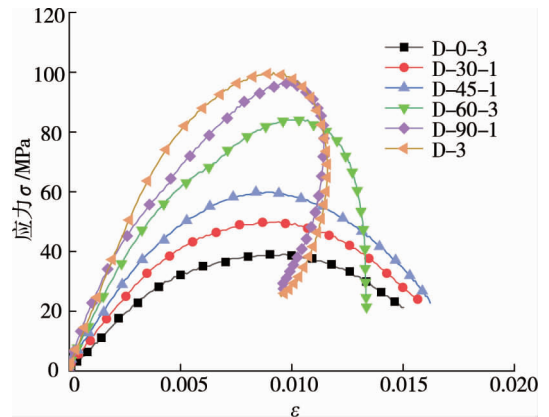


图 3 不同倾角单裂隙红砂岩试件应力-应变曲线

部分冲击试验下试件的破坏形态如图 4 所示,其中预制裂隙试件的破碎程度较大,破碎后的块度较小.完整试件在冲击试验后仍可在一定程度上还原,其破坏形式表现为剪切破坏,有一条由端面延伸至侧面的裂纹.预制裂隙降低了岩石的动态力学性能.

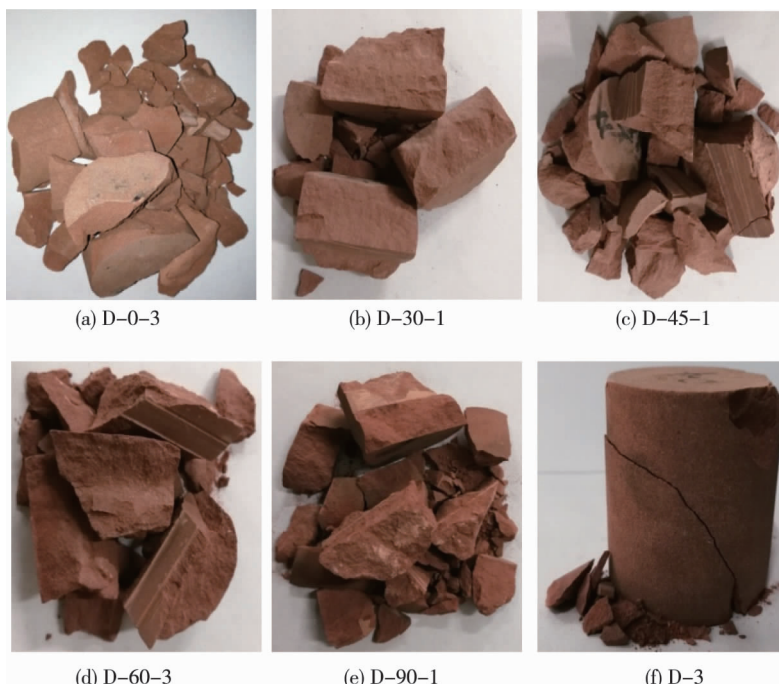


图 4 不同倾角单裂隙试件的破坏形态

3 能量耗散特征分析

3.1 不同倾角裂隙试件能量耗散特征分析

在 SHPB 冲击载荷试验过程中,试件和杆件的接触面均涂抹适量黄油作润滑剂,因此计算时,忽略试样与压杆之间因端部摩擦所消耗的能量.每组数据取均值,得到试件在 0.55 MPa 冲击气压下的能量分析曲线,如图 5 所示.

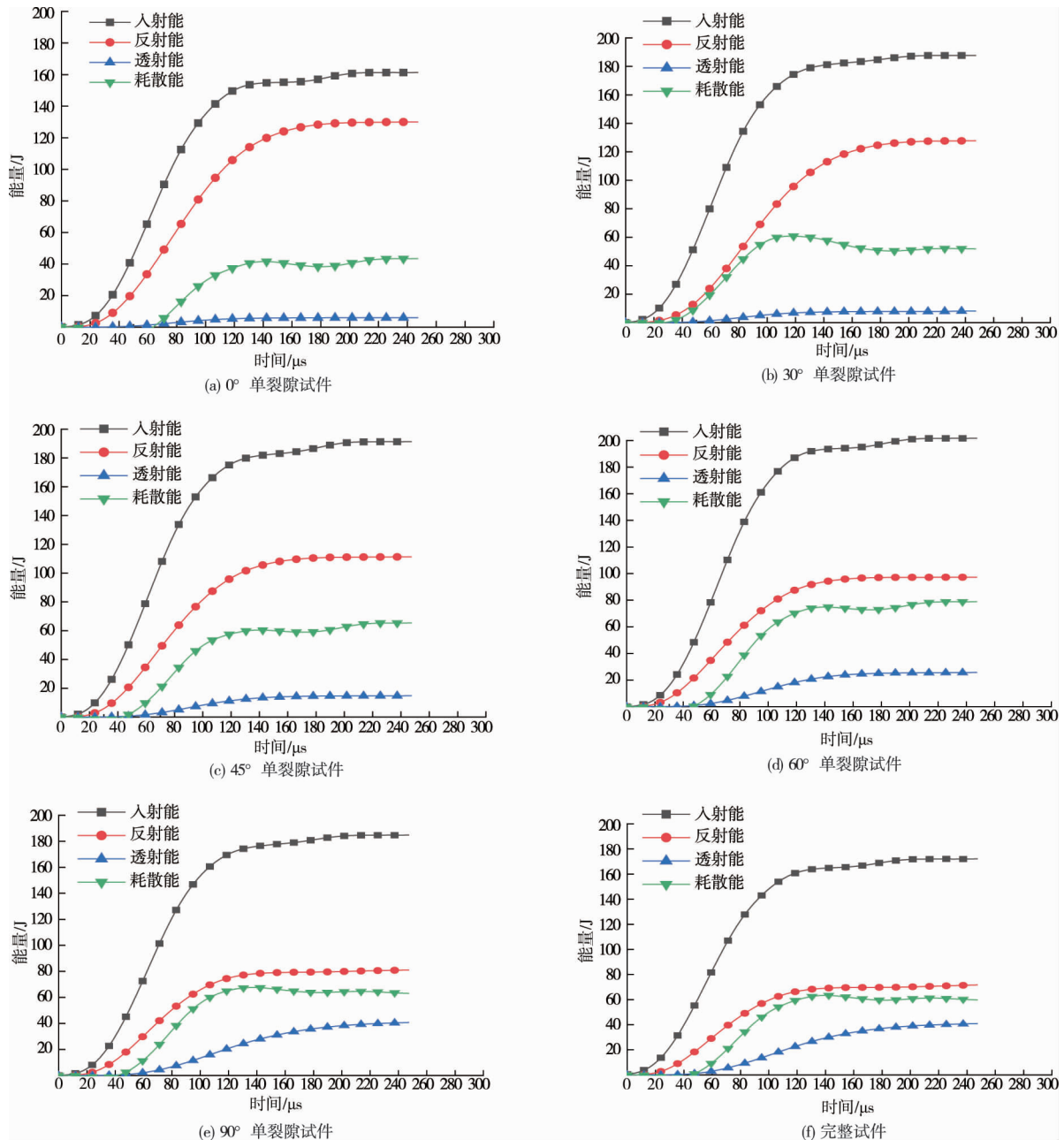


图 5 不同倾角单裂隙试件能量分析曲线

由图 5 可以明显看出:入射能初始阶段其增长速度最快,且入射能仅在峰值大小上有差异.不同倾角裂隙试件的耗散能有相似之处,随着耗散能曲线上升直至趋于平稳,被激活的裂隙沿着压应力方向扩展发育直至试件破碎,能量损耗也是岩石内部裂隙产生和发育的伴随结果,而试件破裂所需的能量耗散只占入射能的一部分,岩石内部分布着大小不等的孔隙、节理、微裂纹,岩石破裂的产生所需要的能量,比裂隙发育所需的能量更多.由于试件内部微裂隙没能完全发育,内部微裂隙在能量作用下继续发育,试件耗散能达到峰值后,微裂隙与宏观裂隙贯通使试件迅速破坏,破坏瞬间所需的能量比破坏过程中的能量需求略

高,因此耗散能曲线达到峰值后有一段略微下降的趋势.

3.2 反射能、透射能与入射能之间的关系

完整试件及不同角度单裂隙试件动态压缩试验后,为了更清晰地考察不同角度单裂隙红砂岩的能量耗散特性,采用反射能、透射能和耗散能与入射能的比值作为参数,表征各能量随角度变化的演化规律.经过多次冲击试验,统计各能量数据并计算反射能、透射能、耗散能与入射能的比值,结果如表3所示.

表3 不同倾角单裂隙试件能量分析结果及占比

试件编号	入射能 E_i/J	反射能 E_R/J	占比均 值 $\eta_R/\%$	透射能 E_T/J	占比均 值 $\eta_T/\%$	耗散能 E_S/J	占比均 值 $\eta_S/\%$
D-0-1	184.8	123.0		6.8		55.0	
D-0-2	152.6	107.7	69.6	5.7	3.2	39.2	27.2
D-0-3	231.2	165.5		5.4		60.2	
D-30-1	180.0	115.5		8.4		56.0	
D-30-2	155.2	99.4	60.0	9.0	4.5	46.8	29.4
D-30-3	233.1	162.9		7.3		63.0	
D-45-1	188.9	117.8		12.1		59.0	
D-45-2	157.7	94.6	58.6	13.3	7.7	49.8	33.7
D-45-3	232.9	124.5		19.3		89.1	
D-60-1	191.9	89.8		28.3		73.8	
D-60-2	165.9	95.3	50.1	35.4	15.2	35.2	33.9
D-60-3	215.2	106.5		23.3		85.4	
D-90-1	188.2	78.7		45.9		63.6	
D-90-2	148.1	62.9	43.6	32.6	23.1	52.6	33.3
D-90-3	222.81	103.7		31.5		87.6	
D-1	151.8	62.0		47.5		42.3	
D-2	165.2	63.3	40.0	49.7	27.1	52.2	33.4
D-3	231.8	91.9		45.8		94.1	

由表3可知:应力波进入砂岩试件后,不同倾角的裂隙对应力波的传播有影响.0°单裂隙反射能占比最大,透射能占比最小,因0°单裂隙与应力波传播方向垂直,入射能在裂隙影响下转变为反射能,从裂隙两侧或因裂隙冲击压缩闭合而穿过的透射能并不大.而随裂隙角度增大,反射能的占比逐步降低,透射能占比逐步增大,是由于随裂隙角度的增大,裂隙与应力波传播方向趋于平行,入射波与裂隙逐渐垂直,更多地转化为反射波.

为进一步分析不同单裂隙角度与能量的变化关系,根据表3绘制试件的反射能、透射能与入射能占比的变化趋势图,并得出其占比拟合曲线,如图6所示.

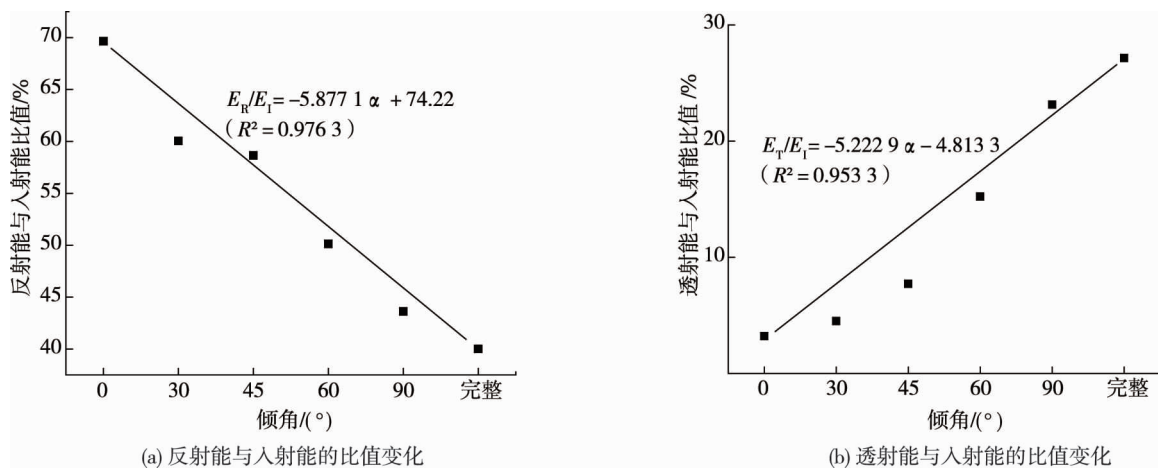


图6 不同倾角单裂隙试件能量关系拟合曲线

反射能与入射能比值的拟合关系式为

$$E_S/E_1 = -5.8771\alpha + 74.22, (R^2 = 0.9763) \quad (3)$$

透射能与入射能比值的拟合关系式为

$$E_T/E_1 = 5.2229\alpha - 4.8133, (R^2 = 0.9533) \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可看出:随裂隙角度增大,反射能与入射能的比值呈线性减小,透射能与入射能的比值呈线性增大.式(3)的相关系数为0.9763,式(4)的相关系数为0.9533,表明图6中数据与曲线的吻合程度较高.应力波作为能量的一种传播形式,当其进入试件内部,在试件内与裂隙间的交界面发生较为明显的能量传递与交互,影响岩石内部的应力状态.岩石抗拉强度远小于抗压强度,岩石对拉应力的变化较为敏感, 0° 单裂隙试件的裂隙尖端受拉应力影响最大,在动载荷下的峰值强度最低.由于单裂隙角度增大,裂隙尖端的拉应力和压应力开始耦合作用,裂隙周围应力场的压应力矢量随裂隙角度的增大而增大,直至 90° 时达到最大.结合图3应力-应变曲线以及图6能量关系拟合曲线,发现 90° 裂隙试件与完整试件的力学特性十分接近.

4 结论

1) 红砂岩试件在0.55 MPa冲击载荷下其动态弹性模量未受到明显的应变速率效应影响,随单裂隙角度增加,砂岩试件的动态抗压强度呈递增趋势.预制裂隙降低了岩石的动态力学性能.

2) 试件内部微裂隙在能量作用下继续发育,耗散能达到峰值后,微裂隙与宏观裂隙贯通使试件迅速破坏,破坏瞬间所需的能量比破坏过程中的能量需求略高,因此耗散能曲线达到峰值后有一段略微下降的趋势.

3) 随裂隙倾角增大,裂隙对应力波传播的影响逐渐减小.反射能与入射能的比值线性减小,透射能与入射能的比值线性增大, 90° 单裂隙试件力学特性与完整试件力学特性十分接近.

参考文献:

- [1] 李夕兵.岩石动力学基础与应用[M].北京:科学出版社,2014.
- [2] 黄理兴.岩石动力学研究成就与趋势[J].岩土力学,2011,32(10):2889-2900.
- [3] Whittles D N, Kingman S, Lowndes I, et al. Laboratory and numerical investigation into the characteristics of rock fragmentation [J]. Minerals Engineering, 2006, 19(14): 1418-1429.
- [4] 许鹏,杨仁树,鞠杨,等.含倾斜弱面介质中动态裂纹扩展行为研究[J].岩土工程学报,2019,41(9):1645-1652.
- [5] 胡健,宫凤强,贾航宇.SHPB压缩试验中红砂岩的力学与能量耗散特性研究[J].黄金科学技术,2020,28(3):411-420.
- [6] 李成杰,徐颖,叶洲元.冲击荷载下类煤岩组合物体能量耗散与破碎特性分析[J].岩土工程学报,2020,42(5):981-988.
- [7] 宗琦,柏杨,朱玉飞.煤矿泥岩和砂岩冲击破碎与耗能特性试验[J].科学技术与工程,2018,18(11):156-161.
- [8] 郭永成,王克辉,胡鹏,等.砂岩破坏特性与能量耗散的试验研究[J].力学与实践,2019,41(5):554-558.
- [9] Braunagel M J, Griffith W A. The effect of dynamic stress cycling on the compressive strength of rocks [J]. Geophysical Research Letters, 2019, 46(12): 6479-6486.
- [10] 杜瑞锋,裴向军,贾俊,等.多次冲击下砂岩粘弹性损伤本构关系[J].吉林大学学报(工学版),2021,51(2):638-649.
- [11] 纪杰杰,李洪涛,吴发名,等.冲击荷载作用下岩石破碎分形特征[J].振动与冲击,2020,39(13):176-183.
- [12] 金解放,吴越,张睿,等.冲击速度和轴向静载对红砂岩破碎及能耗的影响[J].爆炸与冲击,2020,40(10):42-55.
- [13] 张智宇,王建国,黄永辉,等.白云岩动力学特性及破坏模式试验研究[J].地下空间与工程学报,2018,14(5):1195-1201.
- [14] 王志亮,杨辉,田诺成.单轴循环冲击下花岗岩力学特性与损伤演化机理[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(2):59-66.
- [15] 田诺成,王志亮,熊峰,等.循环冲击荷载下轴压对花岗岩动力学特性的影响[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(5):156-164.