

不同加载波形下矿岩破碎的耗能规律^①

李夕兵 赖海辉 古德生

(中南工业大学)

摘 要

根据典型岩(矿)石在不同应力波形加载条件下的冲击耗能实验结果,算出了在各种加载条件下的岩石吸能值与破碎程度。结果表明:岩石吸能与破碎效果均和加载波形有关,当施入能量足以破碎岩石时,按节能观点,钟形波加载将明显优于指数形波加载,但无论何种加载波形和加载强度,岩石的吸能均未超过入射能的50%。

关键词: 岩石动力学 矿岩破碎 应力波 耗能与节能

岩石动态断裂和破碎实验多在 SHPB 及类似装置上进行。许多研究者也先后采用这类装置对岩石进行了能量耗散方面的研究,并获得了某些有价值的成果^[1-4],他们的研究内容主要限于考察加载应力水平和延续时间对破碎效果的影响,加载波形一般为方波;但较少考虑破碎效率的提高和能量的节省,而这些都与加载波形有关。在冲击机械中,不同的活塞结构形式会产生不同的加载应力波形;爆破破岩时,即使在阻抗匹配的条件下,由于装药量和装药结构的不同,也会产生不同的爆炸应力波波形。虽然早在 60 年代,一些研究者就提出了冲击破岩系统应以能量传递效率最大或反射最小为目标的最优应力波形的概念^[5-6],但这种概念并没有真正反映出用于有效破岩的能量大小,因为传入岩石中的一部分能量还会以弹性波的形式无用耗散,这一部分能量的多少无疑也是与加载波形有关的。因此,有必要探讨不同加载波形条件下的岩石耗能规律。正是基于这一目的,作者在国家自然科学基金的资助下,用六种不同形状的冲头、对四种岩石、在 SHPB 装置上进行了不同加载应力水平下的冲

击实验,获得了不少有价值的结果。本文将着重讨论其中的一部分,即不同加载波形对破岩效果的影响。

1 实验

1.1 实验装置

实验装置如图 1 所示,实验系统严格满足一维应力的条件,输入输出杆直径均为 22 mm,长 1.2 m,对应的密度和声速为 $7.7840 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 和 $5\,606.5 \text{ m/s}$,压缩空气枪有三种规格,分别为 $d22$ 、 $d30$ 和 $d38 \text{ mm}$,可保证用不同结构冲锤冲击加载的要求。图 2、图 3 为本次实验所采用的冲头规格和对应的加载入射应力波形,设计的加载波延续时间为 $100 \mu\text{s}$,从图中可以看出:方波,钟形波(b),和指数形波延时约为 $100 \mu\text{s}$ 。由于波的延时只取决于冲头的几何尺寸,因此所有实验中,波的延时是确定的。实验时,通过改变冲头的冲击速度以获得不同的加载能量。通过测试系统记录下每次冲击实验的冲击速度和产生的应力波形,然后调用该系统软件,即可获得每次冲

① 本课题属国家自然科学基金资助项目;本文于 1991 年 12 月 24 日收到

击条件下的岩石动力学参数。

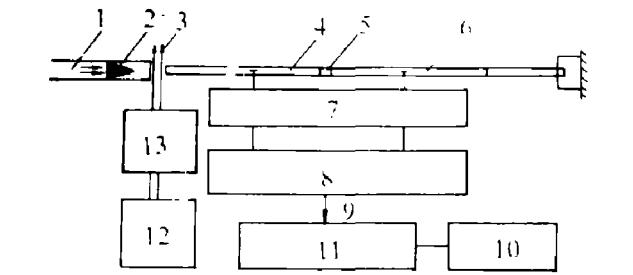


图1 实验装置原理图

1—压缩空气；2—冲击头；3—激光器；4—输入杆；5—岩样；6—输出杆；7—超动态应变仪；8—BCVI瞬态波形存储器；9—接口；10—打印机；11—APPLE-II微机；12—计数器；13—转换放大器

1.2 试样

岩样是在 500 mm × 500 mm × 500 mm 左右的岩块中用岩芯钻进获得的。直径约 21 mm，长径比为 1.6 左右，试样两端面磨平，且保证平行度在 0.05 mm 范围之内。静压实验是在 INSTRON 1342 伺服液压机上进行的，岩石类型及有关参数见表 1。

1.3 破碎程度描述

多次冲击后，收集破碎岩块，用 0.6, 2.5, 6.0, 9.0 和 12 mm 筛网过筛，以求得每次冲击后破碎岩块的粒度分布和平均粒度。平均粒度按下式求得：

d_m = \frac{\sum(r_i d_i)}{\sum r_i}

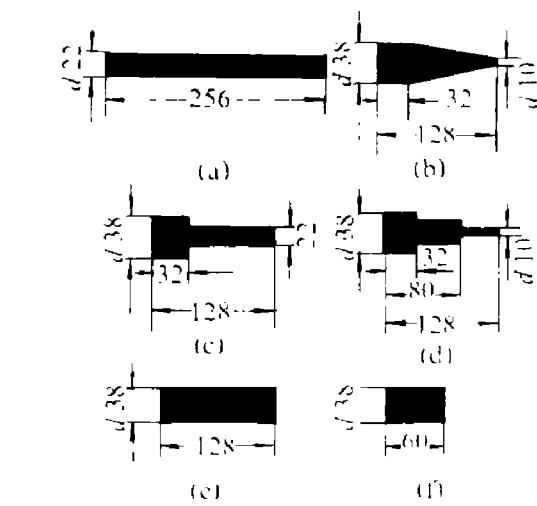


图2 不同结构形式的冲头

式中 d_i 为某种粒度的尺寸； r_i 为该尺寸粒度所占的百分率。计算中，取小于 0.6 mm 岩块的平均粒度为 0.3 mm，大于 12 mm 取 13.5 mm，其余间隔内取中值。

表1 实验用岩石类型及其力学参数

岩石类型	均质性	$\rho_s / 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$	$\sigma_{cs} \text{ MPa}$	$C_s / \text{km.s}^{-1}$	E_s / GPa	$W_s / \text{J.cm}^{-3}$
红砂岩	好	2.02	32.13	2.39	15.71	0.0445
花岗岩	较好	2.63	78.58	4.25	39.20	0.1210
大理岩	好	2.70	165.9	5.60	79.06	0.2065
石灰岩	差	2.68	110.0	5.79	59.68	0.1375

* ρ_s —密度； σ_{cs} —抗压强度； C_s —声速；
 E_s —弹模； W_s —单位体积岩石的变形功

2 实验结果与分析

2.1 透射能与入射能的关系

图 4 为砂岩、花岗岩和大理岩在方波加载下透射能随入射能变化的关系，其它波形加载也有类似结果。从图中不难看出：随着入射能的增大，透射能增量的相对值随之减小；同时，透射能量的大小还与岩石的波阻抗有关。

2.2 岩石耗能与入射能的关系

图 5、6、7 分别给出了六种锤冲击砂岩、花岗岩和大理岩时，在入射能(W_i)范围为 10 ~ 60 J 的条件下，单位体积岩石的吸能随入射能的变化规律，以及方波、钟形波和指数形波

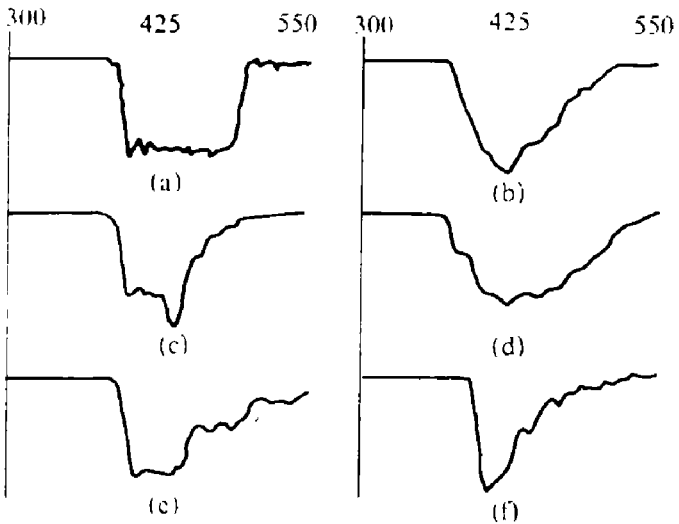
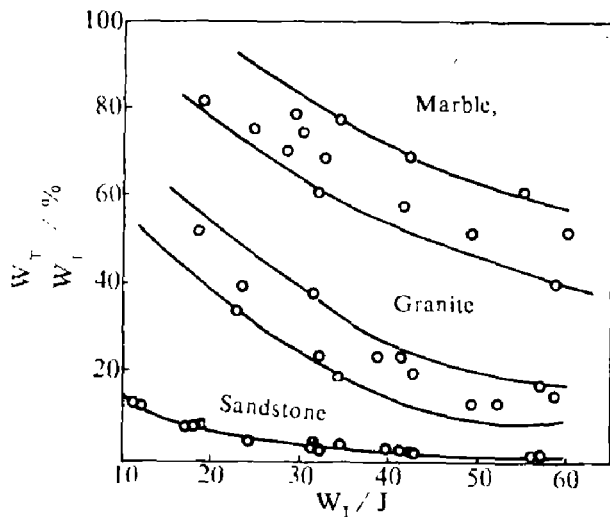


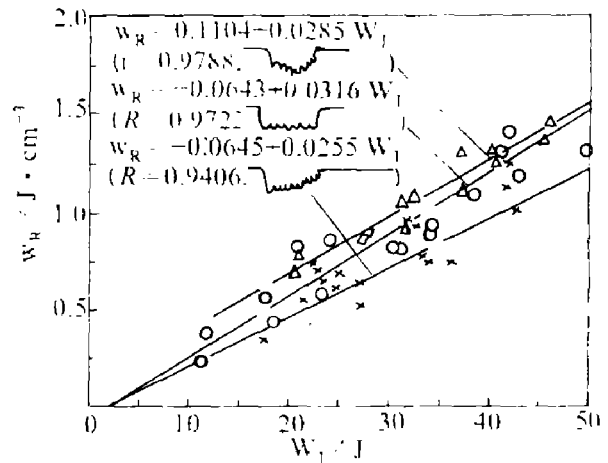
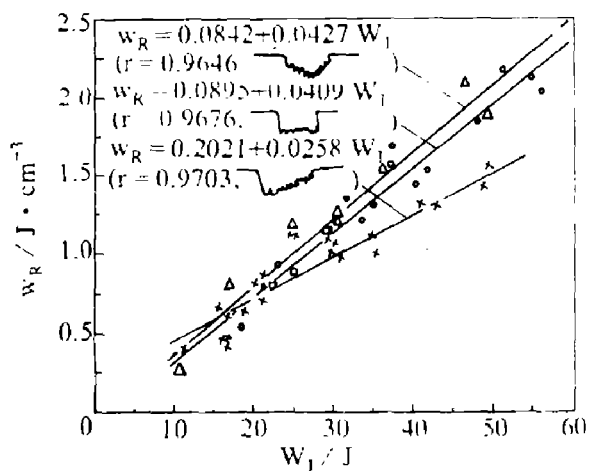
图3 六种不同类型的加载应力波形

图4 方波加载下透射能(W_T)随入射能(W_I)

变化关系散点图

1—大理岩; 2—花岗岩; 3—砂岩

所对应的回归分析结果。从图中可见: (1) 无论采用何种加载波形, 岩石的吸能值均随入射能的增大而近似直线地上升; 钟形波及方波加载时岩石吸能值随入射能的增大而上升较快, 指数形波加载时, 则上升较慢。对于红砂岩, 由于风化严重, 强度较低, 仅其能量入射的起始段便可以破碎。因而从某一起始加载能量 (约为 20J 开始, 用指数形波加载的岩石吸能值就低于钟形波加载。随着入射能的增大, 这种差异似乎更为明显, 而方波和钟形波在高入射能量段则几乎趋于一致; 花岗岩却不同, 在其起始能量入射段, 无论采用前述的那一种波形加载, 吸能值的差异都不很明显。同时, 在我们的实验范围内, 方波与钟形波的上升斜率及两者的吸能差值亦相差不大, 但随着入射能量的增大, 它们和指数形波的差异则越明显; 对于大理岩, 在低入射能量段, 回归结果清楚地表明: 指数波均与方波和钟形波有一交点, 当入射能大于此能量后, 指数波的能量吸收效果随入射能的增大而越来越比其它两种波差, 而在此能量范围内, 指数形波的岩石吸能效果反而优于其它两种波。产生这一现象的原因可能是: 对高强度类岩石, 在 20~30 J 的入射能还不足以充分破碎岩石时, 指数形波在等入射

图5 红砂岩在不同加载波形下的吸能(W_R)与入射能(W_I)关系散点图和回归曲线图6 花岗岩在不同加载波形下的吸能(W_R)与入射能(W_I)的关系

能条件下的应力峰值明显高于其它两种波^[4]。

按 $l/d=1.6$, $d=2.1$ mm 计算, 根据回归分析结果, 对于砂岩, 当入射能达到 50 J 时, 采用能量吸收率最大的钟形波加载, 其吸能率也只占入射能的 35.7%, 方波为 35.3%, 指数形波为 28.2%; 相应地, 花岗岩则为 47.7%(钟形波), 45.5%(方波)和 34.7%(指数波); 大理岩为 42.0%(钟形波), 36.1%(方波)和 28.2%(指数波)。可见, 岩石吸能均没有达到入射能的一半, 事实上, 若根据冲击试样的实际入射能与岩石吸能值计算, 所有实验除了花岗岩中有四次的吸能率达到了入射能的 50%(最高为 52.21%)外, 其余均未超过入射

能的一半。

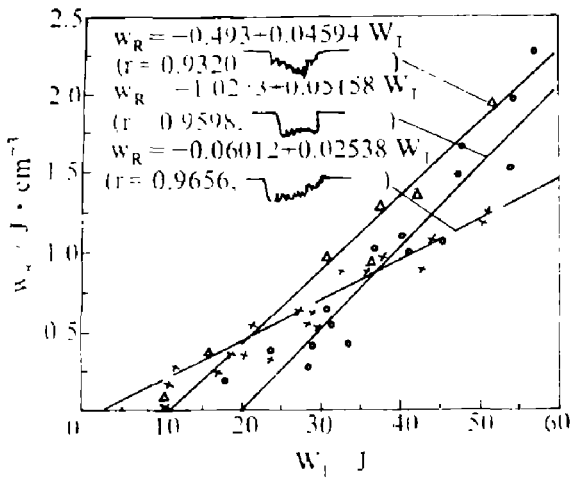


图7 大理岩在不同加载波形下的吸能(W_R)与入射能(W_I)关系

2.3 不同加载条件下的破碎程度

图8、9、10分别表示花岗岩在方波，钟形波和指数形波加载条件下用筛上累计所得到的粒度组成关系曲线，它们表明：随入射能的增大，破碎程度增加，粒度组成从粗粒比重为主向细而均一靠近，其它岩石也有类似结果。图11、12还给出了据此所得到的平均粒度与入射能及单位体积岩石吸能的关系曲线，这里更为清楚地表明：随入射能的增大，破碎粒度减小，从图11还可看出，波形的差异，也能导致等入射能条件下的粒度差异。但如果用单位体积岩石的吸能值来衡量破碎程度或效果，则加载波形的影响明显减小。图12显示，平均粒度与单位体积岩石吸能的散点关系离散性较小，并近似遵循同一正比关系，这表明：岩石吸能的多少能直接表征产生新表面积的大小。但当 W_R 增大到某一值时（对所实验的花岗岩 W_R 约为 1.5 J/cm^3 ），随单位体积岩石吸能的增加，粒度的减小程度明显减小，这可能有如下两个原因，其一是当单位体积岩石吸能很大时，其破碎岩块的动能明显增大，因而相应地产生新表面积的表面能较小；其次是在此条件下，细粒粉末状岩块将明显增多，而本实验计算中对小于 0.6 mm 的岩粒，仍用 0.3 mm 计算可能不妥。

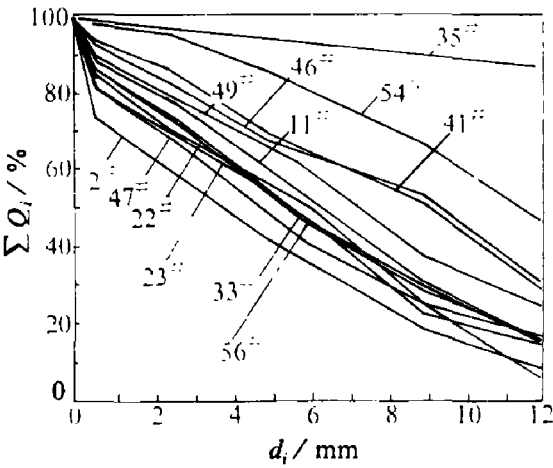


图8 花岗岩在方波入射条件下用筛上累计(ΣQ_i)表示的粒度(d_i)组成关系

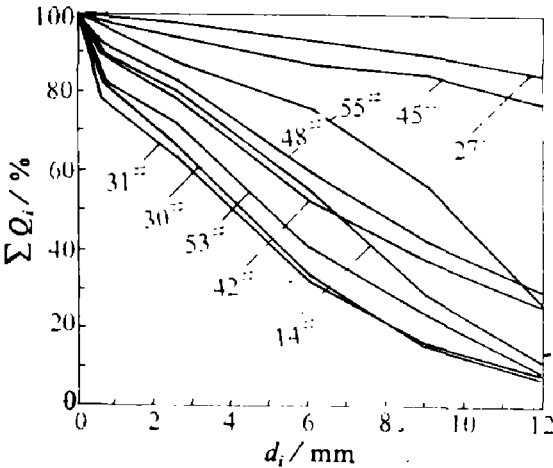


图9 花岗岩在钟形波入射条件下用筛上累计(ΣQ_i)表示的粒度(d_i)组成关系

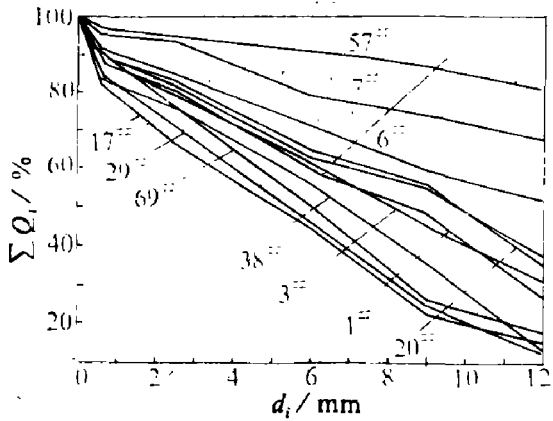


图10 花岗岩在指数波加载条件下用筛上累计(ΣQ_i)表示的粒度(d_i)组成关系

3 结论

(1) 等延续时间条件下, 不同应力波形加载岩样的实验结果表明: 加载波形的差异能导致用于有效破岩的岩石吸能的较大差异, 在我们的实验范围内: 当入射能增加到能足够充分破碎岩石时, 等入射能条件下指数形波加载的岩石吸能值均低于方波加载和钟形波加载, 钟形波加载的岩石吸能值最高;

(2) 无论何种加载波形, 用 SHPB 法测定的单位体积岩石吸能与破碎后的岩块粒度关系的离散性均较小, 并可近似地用统一的线性关系表示, 岩石吸能的高低反映了破碎效果的好坏。因此, 在表征不同加载条件下的动态破碎效果时, 采用以 W_R 作为指标的这种应力波加载耗能实验是可行的;

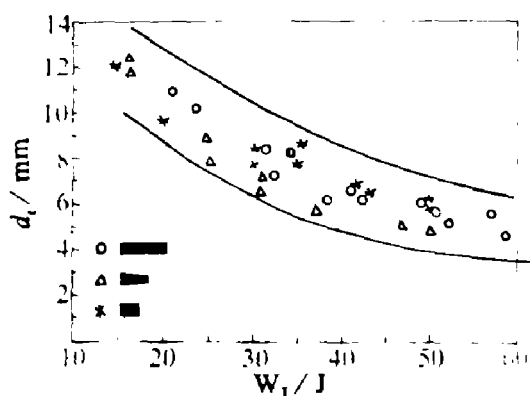


图 11 花岗岩在不同加载条件下入射能(W_i)与平均粒度(d_i)的关系散点图

(3) 由于岩石吸能率的大小不同, 在等入射能条件下, 不同加载波形造成的岩石破碎程

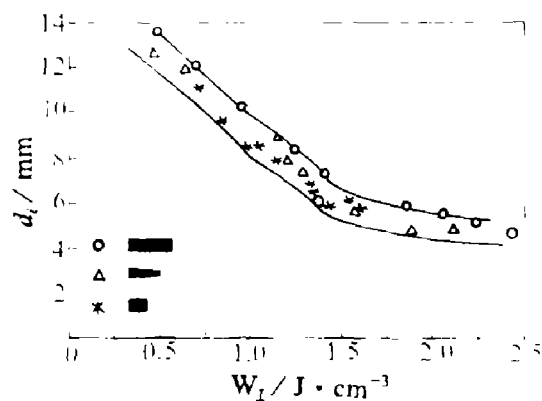


图 12 花岗岩的吸能(W_R)与平均粒度(d_i)关系散点图

度也存在明显的差异, 但无论何种加载波形, 破碎程度均随入射能的增加而增大, 而且粒度组成也从以粗粒为主向细而均发展;

(4) 岩石吸能值随入射能的增大而增加, 但最大的岩石吸能也难于超过入射能的一半。

参考文献

- 1 Hakalehto K O. The Behaviour of Rock Under Impulse Loads, Doctor Thesis, Univ. of Otaniemi-Helsinki, 1969.
- 2 Lundberg B. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 1976, 13: 187-197.
- 3 Olsson W A. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, 1991, 28: 115-118.
- 4 李夕兵, 赖海辉, 中南矿冶学院学报, 1989, 20(6): 595-604.
- 5 Fairhurst C. Mine Quarry Engng., 1961, 27: 327-328.
- 6 Lundberg B. Some Basic Problems in Percussive Rock Destruction, Dissertation, Chalmers Univ. of Technology, Gothenburg, 1971.

(上接 P5)

(4) 多元统计分析表明, 本区银与诸元素的相关性处于较高的水平, 且以银与铅的相关性最为明显, 银与硫的相关性也较明显。而有利的伴生银矿化矿物组合是黄铁矿-方铅矿组合, 距岩体 1.2~2.0 km 的中温热液黄铁铅锌矿脉是银的富集部位。

本专题得到柿竹园矿林巨成等人的大力支持与帮助, 本校地质教研室的同志参加了部分工作, 谨向他们致以衷心的感谢。

参考文献

- 1 李 艺, 梁有彬. 地质与勘探, 1991年, 27(8): 21-25.