

冲击载荷下岩石动态应力-应变 全图测试中的合理加载波形

李夕兵 古德生 赖海辉

(中南工业大学, 湖南长沙 410083)

摘要 用 SHPB 法测定岩石的动态应力-应变关系时, 采用常规的等径冲击存在着明显的 P-C 振荡, 严重地影响试验精度。为消除这种振荡, 本文提出, 在对岩石进行动态应力-应变全图测试时, 应改变径冲头为锥形冲头, 同时给出了两种冲头四种岩石的对比实验结果。

关键词 岩石动态实验技术 岩石动力学 应力波

1 矩形波加载时的 P-C 振荡与动态应力-应变关系

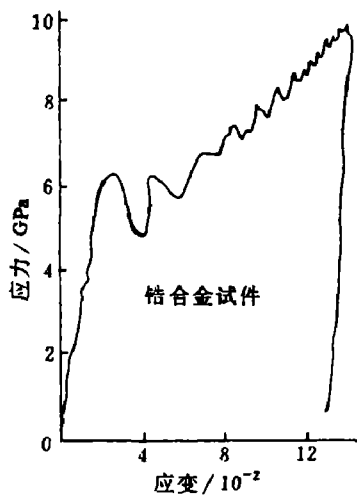


图1 金属类试件的动态
应力-应变关系曲线

Fig. 1 The dynamic stress-strain curve
of the metal specimen in SHPB subjected
to rectangle loading

材料动态性能测试目前比较流行和理想的方法之一是矩形波加载的 Hopkinson 压杆法。理论分析和实验观测均已表明, 采用矩形波加载时, 试样内部应力应变均匀化的假定能够得到满足, 且冲锤简单, 还易于动态标定。但由于存在横向惯性等效应, 大量实验和二维计算结果又表明, 矩形波的波头部分存在着明显的 Pochhammer-Chree 振荡^[1~3]。七十年代以前, 由人工处理这类实验数据时取点较稀和对波形及曲线的有意光滑化, 所得应力-应变曲线在表象上消除了这种振荡。但事实上, 由这种带有振荡的实验波形计算所得到的动态应力-应变曲线是必然伴随有一定振荡的^[4]。

对于金属类弹塑性试件, 由于屈服试件的有效衰减, 透射波中的这种振荡成份较小^[3~4]。虽然这种振荡在最后获得的动态应力-应变关系图中的反映仍然较为明显^[5], 但对于强度很高的金属类试件, 在应力-应变图中反映出来的这种振荡与其试件的实际受力水平相比是较小的, 因而是可以接受的。图1为采用等径冲击的 SHPB 所获得的铝合金试件的应力-应变关系^[6]。

对于弹脆性岩石试件, 不但透射和反射应力波中均存在着这种 P-C 振荡^[3~4], 同时, 试件的受力水平较低, 弹模较小, 因此, 所测得的应力-应变曲线必然伴随有很大的振荡,

• 国家自然科学基金资助课题。

1991年12月19日收到原稿, 1992年7月6日收到修改稿。

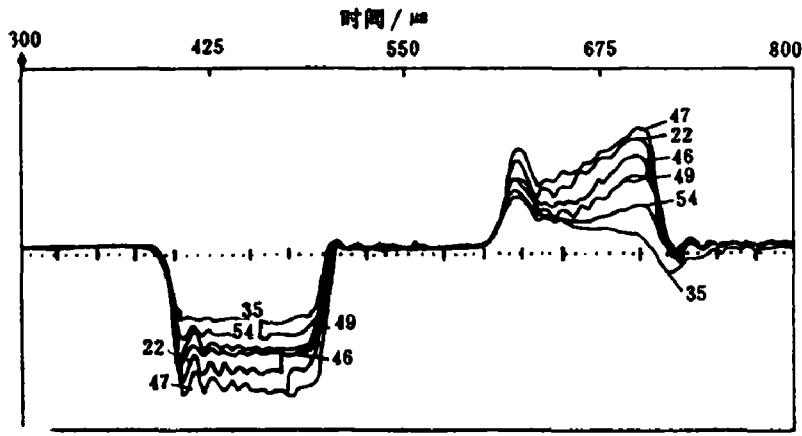


图2 对花岗岩试件冲击加载的入射和反射应力波形
Fig. 2 The incident and reflected pulses for granite specimens

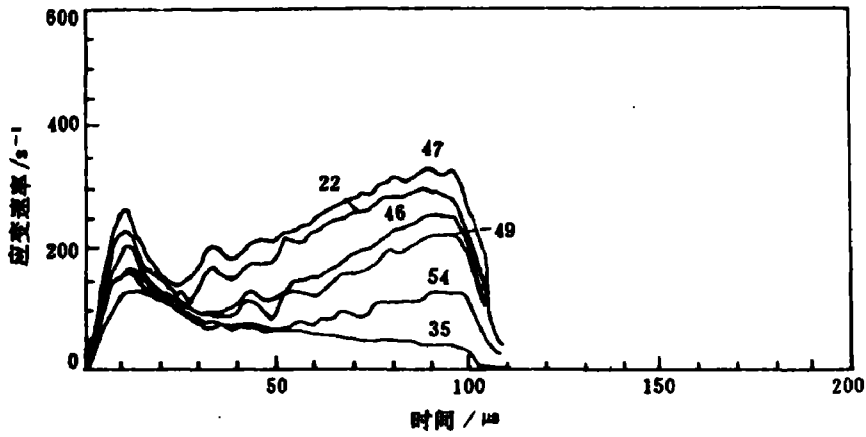


图3 应变速率随时间变化的关系曲线
Fig. 3 The time histories of strain rates

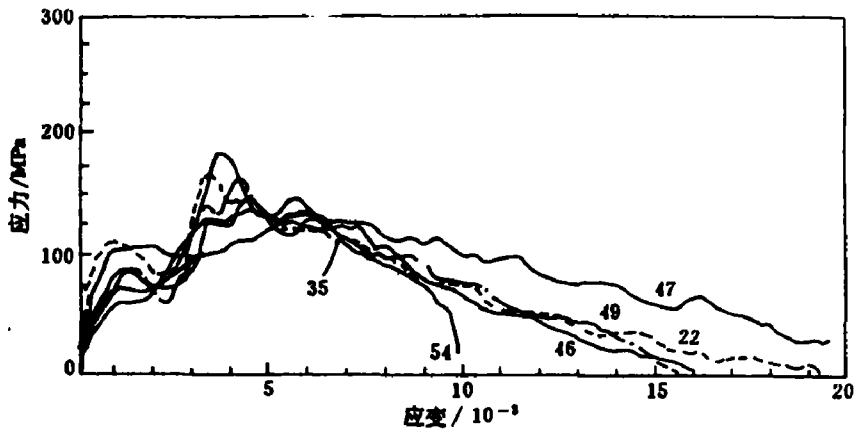


图4 花岗岩的动态应力-应变关系曲线
Fig. 4 The dynamic stress-strain curves of granite specimens in SHPB subjected to rectangle loading

特别是低强度类岩石,如砂岩,振荡的相对值有时甚至可以与岩石本身的强度相比拟。图2,图3和图4分别给出了本文采用等径的 SHPB 装置在不同的加载应力水平下对花岗岩冲击加载所获得的应力波形、应变速率和对应的应力-应变关系。从图中很清楚地看出,由于测量到的波形中存在的 P-C 振荡,使得应力-应变曲线存在有较大的波动。这种带有很大波动的应力-应变曲线,虽然经过曲线拟合可以得到光滑的应力-应变曲线,但由于振荡值与岩石强度间的差值远没有金属类试件中那么大,特别是砂岩类低强度岩石。而且波峰之间的间距较大,因此,用光滑化处理后得到的应力-应变关系来表征和抽象出岩石在瞬态加载条件下的本构特征是很勉强的,而未经处理的应力-应变关系又难于找到其共性,甚至无法确定一些动态参量。因此,用 SHPB 法来测定岩石,特别是低强度类岩石,在高应变率下的动态应力-应变关系全图时,采用等径冲击的矩形波加载是不理想的。必须寻求合理的加载形式,以便减小甚至消除这种振荡。

2 合理的加载波形

要消除 P-C 振荡带来的后果,必须寻求一种不带或很少存在振荡的加载波形。因为加载波形的改变并不会改变 SHPB 法中几个假定,特别是试样内部应力应变均匀化假定成立的可能性^[6]。锥形冲头撞击细长杆件的二维有限元分析结果已经证实,只要锥角不很大,一维分析结果和二维有限元计算值间极为吻合,波形不存在振荡^[7]。据此,并考虑到冲击发射装置的实际情况,本文设计了一种带有锥形结构的冲头,图5即为所设计的锥形冲头和实测到的应力波形。使用这种冲头进行的大量实验观测结果表明,这种冲头产生的加载波形,加载段逐渐上升,平整光滑,整个波形无明显振荡。图6、图7和图8分别为使用这种锥形冲头对花岗岩进行不同应力水平的冲击加载所获得的应力波形、应变速率、和对应的动态应力-应变关系曲线。作为对比,图9、图10和图11还分别给出了在等径冲头和锥形冲头条件下砂岩、石灰岩和大理岩的动态应力-应变关系曲线。

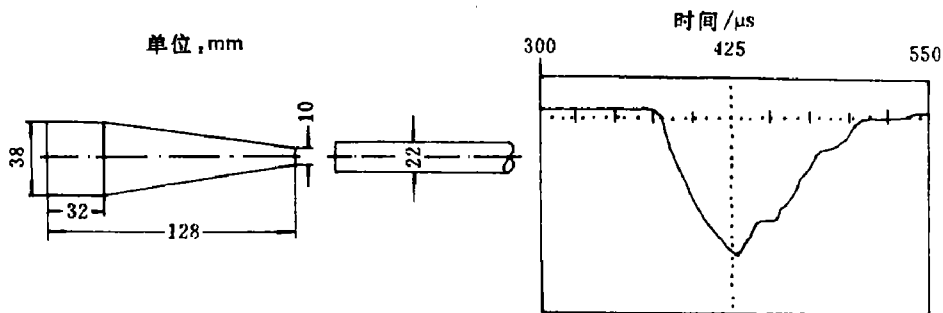


图5 锥形冲头的结构形式和所对应的应力波形

Fig. 5 The shape and sizes of the impact ram, and the corresponding stress waveform

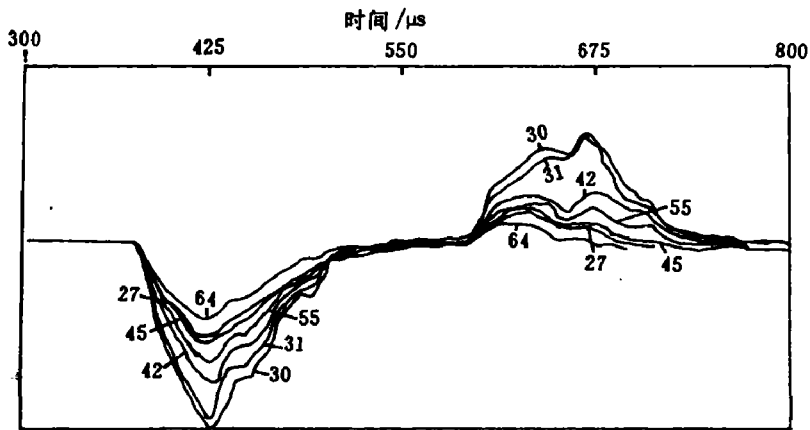


图6 使用锥形冲头对花岗岩冲击加载所获得的入射和反射应力波形
 Fig. 6 The incident and reflected stress waves in granite specimens obtained by using the truncated impact ram

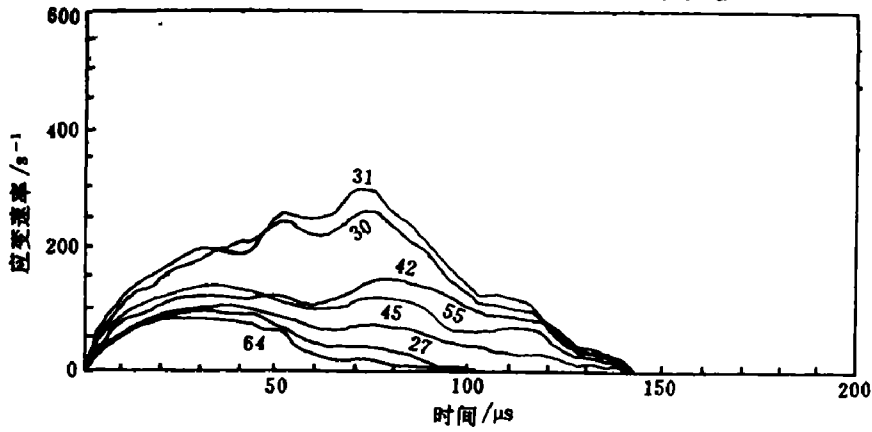


图7 应变速率随时间变化的关系曲线
 Fig. 7 The time histories of strain rates

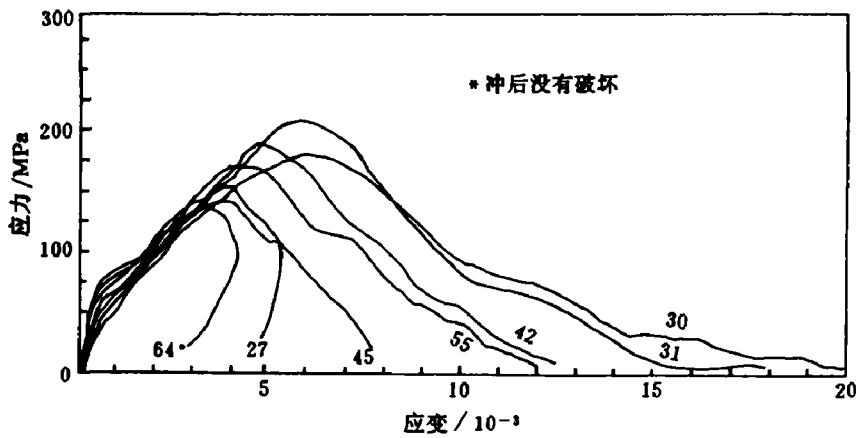


图8 锥形冲头加载时花岗岩的动态应力-应变关系曲线
 Fig. 8 The dynamic stress-strain curves of granite specimens subjected to impact loading generated by truncated impact ram
 * No destruction by impact

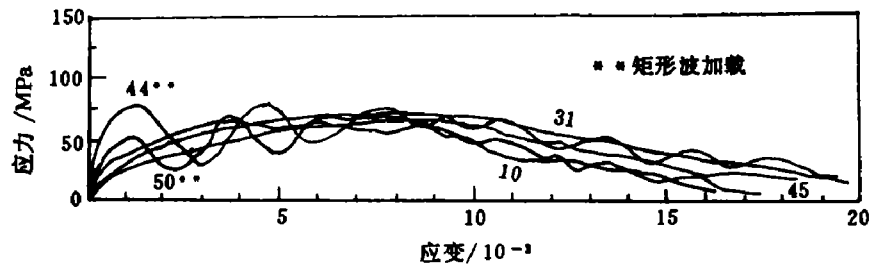


图 9 砂岩的动态应力-应变关系曲线

Fig. 9 The dynamic stress-strain curves of sandstone specimens
* * Rectangle wave loading

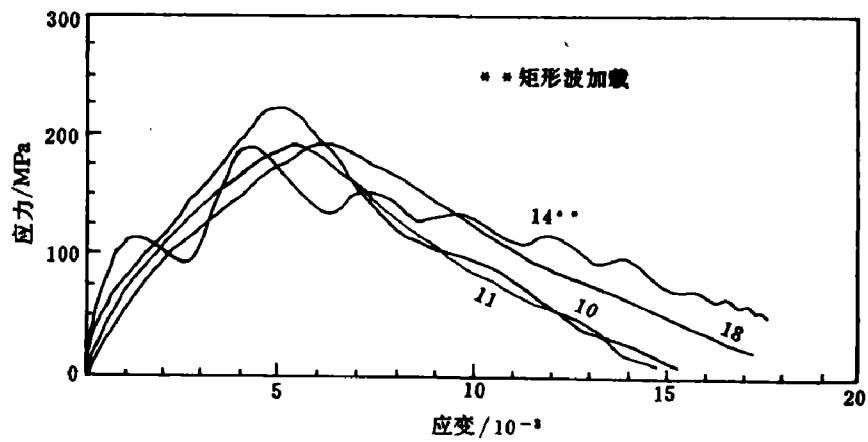


图 10 石灰岩的动态应力-应变关系曲线

Fig. 10 The dynamic stress-strain curves of limestone specimens
* * Rectangle wave loading

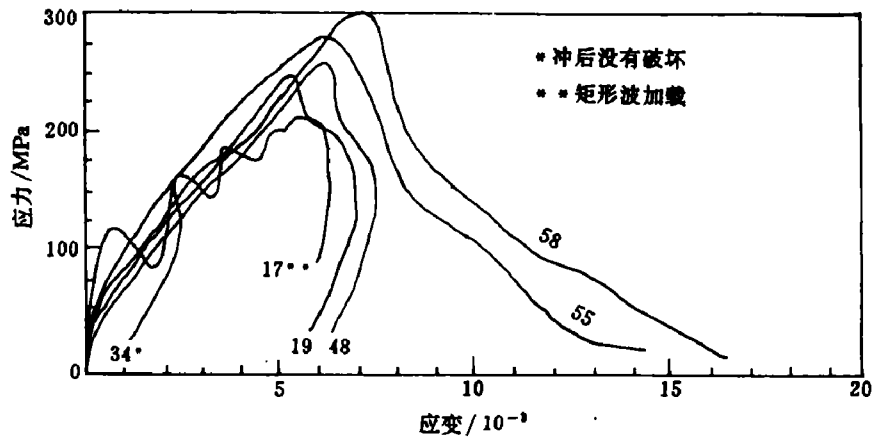


图 11 大理岩的动态应力-应变关系曲线

Fig. 11 The dynamic stress-strain curves of marble specimens
* No destruction by impact, * * Rectangle wave

从上述图中很明显地可以看出,采用这种锥形冲头加载时,由于加载波形不存在振荡,所得应力-应变曲线规整光滑,无需进行光滑化处理。据此,即能准确方便地得到岩石

的一些动态参量和不同加载率下岩石的本构特征。

3 结 论

1 过去人们常用矩形波加载来探讨岩石的动态本构特征,这种波形存在着明显的 P-C 振荡。由于岩石表现为弹脆性,且强度不高,特别是低强度类岩石,所测得的动态应力-应变关系将存在较大程度的振荡,因此,很难据此规整和表征出岩石在其实际加载水平下的动态响应。

2 采用本文提出的带有锥形结构的冲头冲击加载时,加载波形不存在振荡。对不同岩石的冲击加载实验结果表明:这种加载波所得到的应力-应变关系全图,曲线规整光滑,无需进行光滑化处理。同时,比较图 3 和图 7 还可得出,这种冲头加载明显地改变了应变率的相对稳定程度,在试样的整个受载时间内,应变率相对平稳,起伏变化不大。因此,这种带有锥形结构的冲头所对应的似钟形波是一种适用于矿岩动态应力-应变全图测试的理想加载波形。

参 考 文 献

- 1 Kolsky H 著,王福堂译. 力学译丛,1964,(3):73~80
- 2 Kolsky H 著,王 仁等译. 固体中的应力波. 北京:人民出版社,1958.
- 3 Bertholf L D. J Appl Mech, 1974, 41:137~144
- 4 Bertholf L D, Karnes C H. J Mech Phys Solids, 1975, 23:1~19
- 5 唐志平,王礼立. 爆炸与冲击,1986,6(4):320~327
- 6 李夕兵,魏海辉,朱成忠. 中南矿业学院学报,1988,19(5):492~499
- 7 Gupta R B, Nilsson L. J Sound Vibra, 1978 60(4):555~563

ON THE REASONABLE LOADING STRESS WAVEFORMS DETERMINED BY DYNAMIC STRESS-STRAIN CURVES OF ROCKS BY SHPB

Li Xibing, Gu Desheng, Lai Haihui

(Central-South University of Technology, Chensha, Hunan, 410083)

ABSTRACT In the measurement of dynamic parameters of rocks by SHPB subjected to rectangle loading, Pochhammer-Chree oscillations existed in incident, reflected, and transmitted waves result in a serious oscillation on the dynamic stress-strain curves. In order to eliminate this oscillation, this paper presents that the cylinder impact ram often used in SHPB should be changed into the truncated impact ram. For comparison, experimental results obtained by impact loading of two kinds of impact rams to four types of rocks are given.

KEY WORDS the dynamic experimental techniques of rocks, rock dynamics, stress waves