

岩石在不同加载波下的 σ - $\dot{\epsilon}$ - ϵ 关系^①

李夕兵

(中南工业大学资源开发工程系, 长沙 410083)

摘 要

为考察 SHPB 试验中 P-C 振荡对岩石动态应力应变关系的影响, 用几种不同类型的冲头对岩石进行了不同加载条件下的冲击实验。结果表明: 入射波形中的 P-C 振荡将会导致岩石 σ - $\dot{\epsilon}$ - ϵ 关系的严重波动, 在岩石的 SHPB 试验中, 应设法消除加载波的 P-C 振荡。

关键词: 岩石动态实验技术 岩石动力学 SHPB 法

采用 SHPB 法, 单次冲击即可获得岩石的动态 σ - $\dot{\epsilon}$ - ϵ 关系曲线, 但常规的矩形波加载, 由于波头部分存在着明显的 P-C 振荡, 所测得的 σ - $\dot{\epsilon}$ 关系也必然伴随着一定的振荡^[1]。长期以来, 岩石的 SHPB 实验一直是沿用与金属相类似的矩形波加载法, 所得曲线均进行过计算机光滑化处理, 因而最终所得到的 σ - $\dot{\epsilon}$ - ϵ 关系表象上是光滑的。对于金属类试件, 由于试件强度高, 同时表现为弹塑性, 且弹模大, 入射波中的 P-C 振荡带来的 σ - $\dot{\epsilon}$ 关系图中的振荡是可以接受的, 计算机光滑化处理不会带来多大误差^[2], 但对于岩石这种强度低, 弹模小的弹脆性试件的情况如何, 至今尚少有人进行探讨, 为此作者在这方面进行了一些研究。

1 实验冲头及对应的人射波形

图 1 为作者在 SHPB 试验中采用的几种不同类型的冲头, 图 2 为对应的入射应力波形。图 3~5 分别为用等径(图 2(a))、锥形(图 2(b))、和阶梯形(图 2(c))冲头对岩石进行冲击实验所得到的入射、反射应力波形, 从图中可以看出: 等径冲头和阶梯形冲头产生的入射应力波存在有明显的 P-C 振荡, 当入射应力值较

低时, P-C 振荡较小, 但随入射应力的增大, P-C 振荡相应地增大。因此, 对这两种冲头, 加载速率愈高, P-C 振荡愈为明显, 而锥形冲头所对应的入射应力波加载段几乎不存在振荡, 而且, 从实验曲线可以看出, 即使加载率较高, 与这种冲头对应的入射应力波均未见到明显的 P-C 振荡。

2 不同加载波下的动态 σ - $\dot{\epsilon}$ - ϵ 关系

图 6 和图 7 分别给出了各种冲头冲击花岗岩未经光滑化处理的典型动态 σ - $\dot{\epsilon}$ - ϵ 关系。从

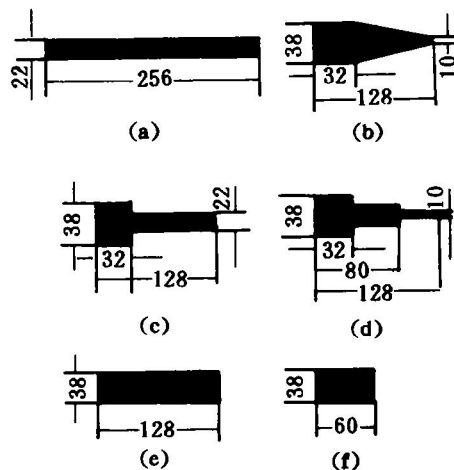


图 1 不同结构形式的冲头

① 属国家自然科学基金资助项目 收稿日期: 1994 年 1 月 14 日

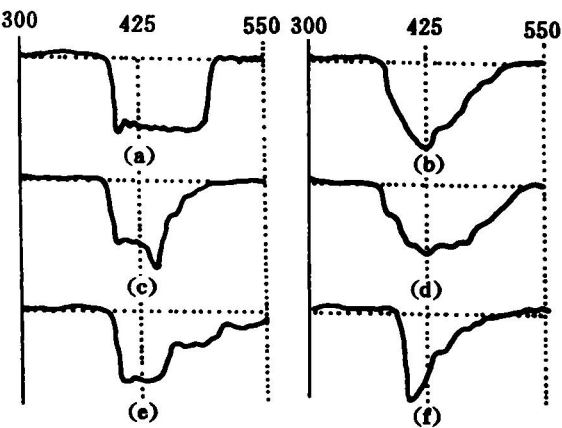


图 2 不同冲头所对应的人射应力波形

图中可以看出：入射波形中的 P-C 振荡导致了最终的 $\sigma-\epsilon$ 关系振荡，不但纵向振荡值大，而且横向振荡值亦较大。产生这一结果的原因在于：这种入射波形的振荡，即加载时入射力随时间的上升和下降，导致了岩石实际受力的明显振荡，如图 8 所示。

这实际上相当于岩石破裂前的小幅值加卸载，但这种瞬时的加卸载表现出来的 $\sigma-\epsilon$ 关系却明显与静态不同，静态加压到一定程度再人为卸载时，由于加载率很小，正应变率很低，因此，卸载时，应变亦随之回复^[3]。而在冲击载荷下，岩样有很高的正应变率，即使此时由

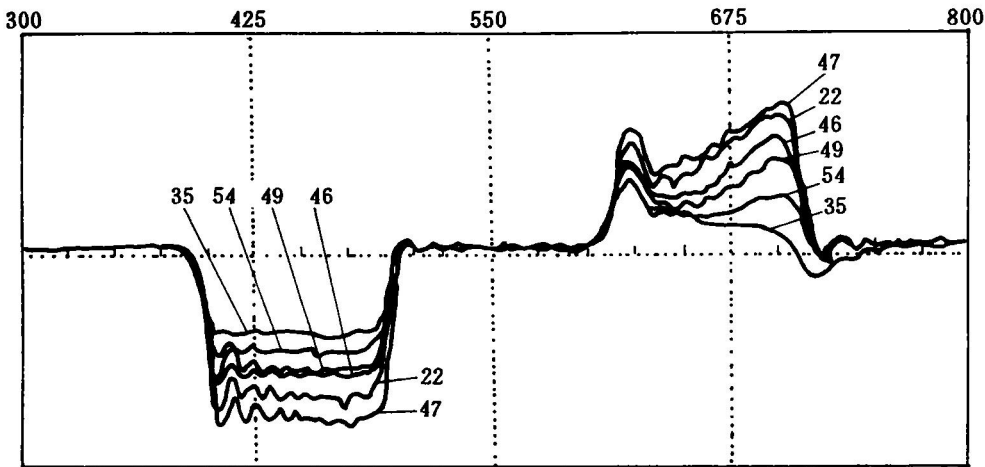


图 3 使用等径冲头对花岗岩试件冲击加载的人射和反射应力波形
(横坐标上面的数字表示加载时间， μs ；图内的数字表示试验编号)

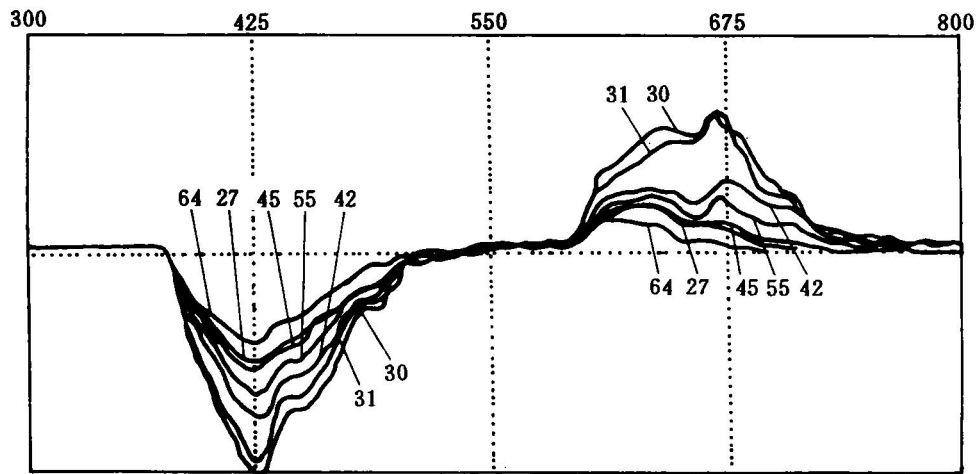


图 4 使用锥形冲头对花岗岩冲击加载所获得的人射和反射应力波形
(横坐标上面的数字表示加载时间， μs ；图内的数字表示试验编号)

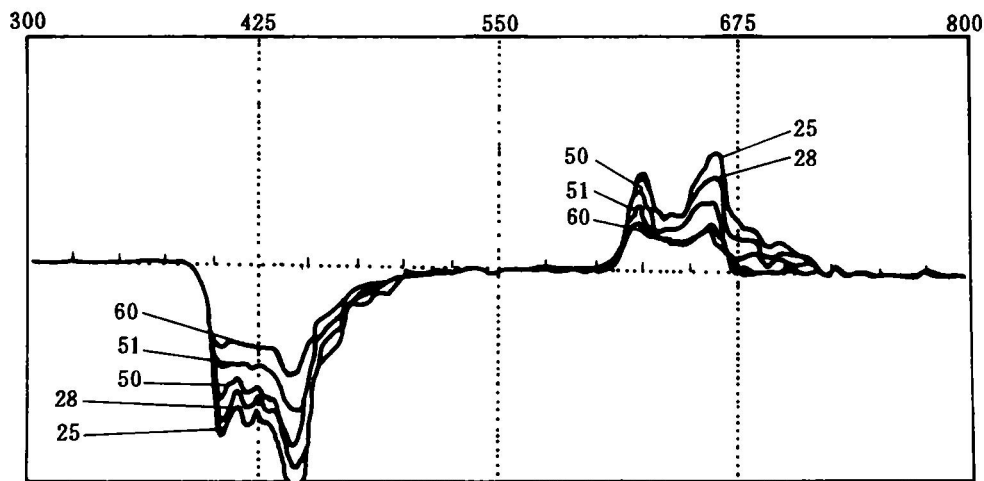


图5 阶梯型冲头冲击加载时的入射和反射应力波形
(横坐标上面的数字表示加载时间, μs ; 图内的数字表示试验编号)

于振荡而瞬时卸载, 其正应变率仍然很大(见图6)。应变将继续向正方向发展, 这样就导致了如图7所示的带有较大纵横向振荡的 σ - ϵ 关系。这种 σ - ϵ 关系虽然经过曲线拟合可以获得光滑的 σ - ϵ 曲线, 但与金属类试件不同: 一是岩石表现为弹脆性, 其入射、反射和透射波中都存在有其高频成分^[1]; 二是岩石与金属类试件相比强度较低, 特别是对于低强度类岩石(如砂岩), 其振荡值与岩石强度之比相对较大, 因此用光滑后所获得的 σ - ϵ 关系来表征岩石在瞬态强载荷下的岩石动态力学行为是很勉强的。在用 SHPB 法进行岩石动态本构关系测试时, 必须采用 P-C 振荡很小的入射应力波, 而不宜采用与金属类似的矩形波。

实验表明, 似钟形波加载, 例如图1(b)中所表示的锥形冲头加载时, 无论入射力多大, 加载段均无振荡存在, 同时, 二维有限元及理论分析业已表明^[4]: 这种冲锤加载, 只要锥角较小, 一、二维结果极为吻合, 入射波中无高频振荡存在。因此, 这种加载波所测得的 σ - ϵ 关系极为理想光滑, 与矩形波加载相比较的大量实验结果亦证实了这一点^[5]。同时, 从大量实验所获得的 ϵ - t 图还可得出: 在用 SHPB 法测定岩石的动态参量时, 使用常规的矩形波加

载, 或图1(c)阶梯形冲头及图1(f)大断面短冲头所对应的指数形波加载, 岩样应变率随时间

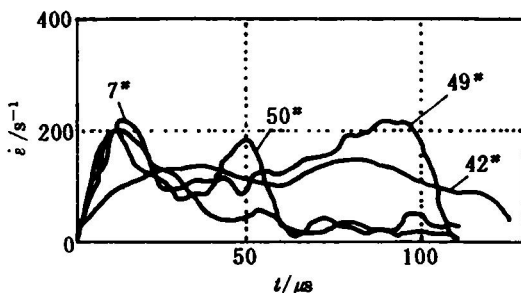


图6 不同波形加载条件下
应变率随时间的变化

7*—指数形波加载; 42*—似钟形波加载;
49*—矩形波加载; 50*—图1中的C型冲头加载

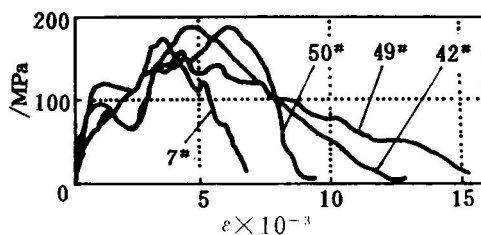


图7 不同波形加载条件下花岗岩的
动态应力-应变关系曲线

7*—指数形波加载; 42*—似钟形波加载;
49*—矩形波加载; 50*—图1中的C型冲头加载

(下转 22 页)

大, U_x 、 U_y 很不稳定, 不同步采集的数据计算 ψ 的误差很大, 当摆动周期接近轮番测量间隔时, 将导致 ψ 不可信。

4.3 摆锤不稳定误差

这种误差最大可达 15° ^[3]。在航空工程中常靠陀螺滤波稳定; 在测斜仪中则只能依靠计算机处理, 对于不便采用自适应滤波的单片机, 可采用另一专利文献^[4]介绍的中值滤波、峰谷值寻址和峰谷值之间数据统计、平均的方法。

采用磁通门罗盘的摆式连续测斜仪的研制过程已表明, 其倾斜度精度可保证 $\leq 0.5^\circ$, 倾斜方位精度可保证 $\leq 2^\circ$ 。

参考文献

- 1 张学孚. 中国专利 ZL 93233904. 2. 1993-05-11.
- 2 陆怡良. 中国航空科技文献. 1987.
- 3 陆怡良等. 海洋学报 1991. 3 13(2): 262-270.
- 4 张学孚. 中国专利 ZL 93233903. 4. 1993-05-11.

(上接 18 页)

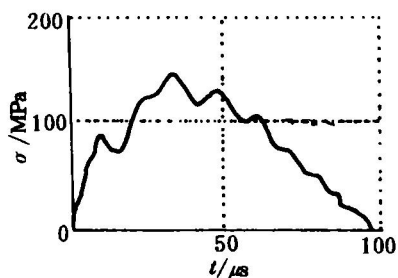


图 8 岩石实际受力随时间的变化

的变化很大, 而锥形冲头所对应的似钟形波加载, 应变率随时间的变化较为平坦。尽管用 SHPB 法不可能实现恒应变率加载, 但这种加载波形的改变却明显地改善了加载条件, 应变率

的稳定程度明显优于其它形式的冲头加载, 如图 6 所示。因此在使用 SHPB 法进行与冲击爆炸破岩相当加载率下的 σ - ε 关系全图测试时, 宜用图 1(b)所对应的这类锥形冲头冲击加载。

参考文献

- 1 Bertholf L D, Karnes C H. J Mech Phys Solids, 1975, 23: 1-9.
- 2 唐志平, 王礼立. 爆炸与冲击, 1986, 6(4): 320-327.
- 3 高磊(编). 见: 矿山岩体力学. 北京: 冶金工业出版社, 1979.
- 4 Gupta R B, Nilsson L. J of Sound and Vibration, 1978, 60(4): 553-56.
- 5 李夕兵等. 爆炸与冲击, 1993, 13(2): 125-130.