

凿入方程对凿入力-凿深曲线的分析

潘 岳 高实先

(青岛冶金矿山大学)

摘要 对岩石的凿入力-凿深曲线的特性作了专门分析, 阐明了凿入力-凿深曲线各个阶段的物理意义。以表格形式给出了凿入过程中的凿入力、凿入速度与入射波等各力学量之间的关系。文中还指出, 考虑到凿入装置与岩石间的相互作用, 将凿入过程中经由钎刃向钎尾方向传播的应力波称为逆波, 而不称为反射波较为合适。

关键词 岩石 凿入力-凿深曲线 凿入方程

一、引言

研究冲击式凿岩系统的能量传递效率问题, 需要有确定的凿入端边界条件。为此, 一些学者^[1-9]曾对某些种类岩石的凿入力-凿深关系曲线(以下简称为 $F-u$ 曲线)作过测定。例如图1、2分别是C.Fairhurst和W.A.Hustrolid所测得的 $F-u$ 曲线。凿入是一个瞬态过程, 测试技术复杂, 而岩石性质的离散又增加了数据处理的繁杂, 这些都阻碍了测定工作的深入进行。我们采用硅光电池位移传感器来测定凿深, 用应变片直接测定钎刃上的凿入力。这两个信息由双通道瞬态波形存贮器记录并转送微机, 微机按事先编制好的采样及数据处理程序立即给出测定结果。这就为广泛测定岩石的 $F-u$ 曲线创造了条件。图3、4是作者用上述测试

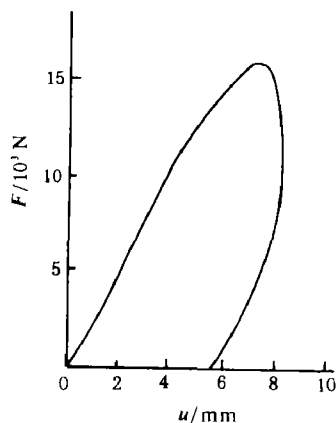


图1 石灰石的凿入力-凿深曲线^[1]

Fig. 1 Load-penetration curve of limestone^[1]

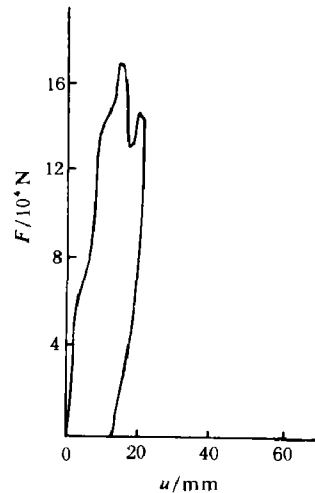


图2 大理石的凿入力-凿深曲线^[4]

Fig. 2 Load-penetration curve of marble^[4]

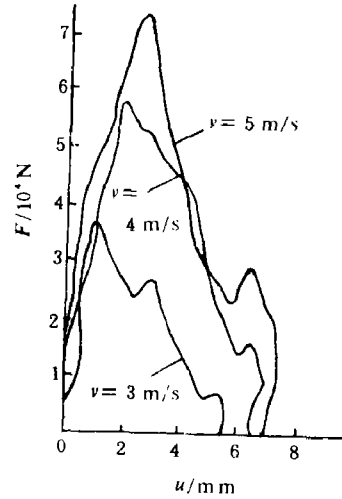
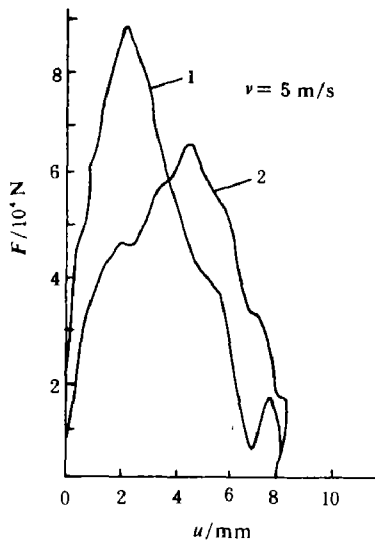


图3 花岗岩1, 大理石2的凿入力-凿深曲线^[9] 图4 闪长岩在不同撞击速度下的凿入力-凿深曲线^[9]

Fig.3 Load-penetration curves of granite 1 and marble 2^[9] Fig.4 Load-penetration curves of diovite at different strike ratios^[9]

系统, 从光面对花岗岩、大理岩及闪长岩凿入时所测得的 $F-u$ 曲线。

然而试验所测得的 $F-u$ 曲线的特性如何? 它们是否反映了实际凿入过程? 在凿入过程中, 凿入力、凿深与入射波等各力学量之间的关系又是如何呢? 一些测试者也曾对上述问题作过某些有意义的探讨, 但是可能因为研究的重点不在于此, 或是因为实际测得的 $F-u$ 曲线较少, 而未能作充分观察的缘故, 所进行的讨论深入尚嫌不够。本文拟对这些问题作专门讨论。

二、一维波动理论

为了后面行文方便, 先把一维波动理论的有关内容作简要回顾。

设弹性波在等截面杆中传播, 约定杆中某一截面 A 在时刻 t 的力学量符号为

$p(t)$ ——顺波或入射波 (规定方向向右)

$q(t)$ ——逆波或反射波 (规定方向向左)

$F(t)$ ——截面 A 所受的力

$u(t), du/dt$ ——截面 A 的位移, 位移速率

m ——一维杆的波阻

由一维波动理论知, 在杆的某截面 A 上有

$$F = p(t) + q(t) \quad (1)$$

$$u = \frac{1}{m} \int_0^t [p(t) - q(t)] dt \quad (2)$$

对式 (2) 求导得

$$m \frac{du}{dt} = p(t) - q(t) \quad (3)$$

在杆的左端面作用一入射波。当杆的右端面A为自由端时，显然有 $F=0$ 。于是由式(1)得到 $q(t) = -p(t)$ ，即在右端面A上的反射波为拉伸波，量值上与入射波相同。当杆的右端面A为固定端时，显然有 $du/dt=0$ ，于是由式(3)得到 $q(t) = p(t)$ ，即在右端面A上的反射波为压缩波，量值上与入射波相同。

三、凿入力-凿深曲线的特性

从图1到图4看到，实测 $F-u$ 曲线有以下共同特征：

(1) 曲线的起始阶段最陡，其斜率常常随撞击速度的增加而增加。在这个阶段虽然也有破碎，但只是局部的。同时发生的是刃下岩石的弹塑性变形和产生裂隙。

(2) 凿入力达到峰值便下降，但这时的凿深不是最大。如果入射波的幅度较大，且持续时间较长，刃下岩石会发生较大规模的跃进式破碎。

(3) 凿入力下降时凿深反而增加，即 $F-u$ 曲线上存在负斜率。这一事实表明，刃下岩石虽然产生了很多裂隙，但仍有一定的承载能力。如果入射波持续时间长，则裂隙区岩石将完全崩溃，钎刃遇到未曾破碎的底部岩，凿入力可能再回升而开始一个新的破碎循环。

(4) 在 $F-u$ 曲线的结束阶段，或多或少出现弹起现象，曲线下降由负斜率变成正斜率。

根据上述分析，对于持续时间长短不同的入射波，可以得到 $F-u$ 曲线的简化折线模型如图5。

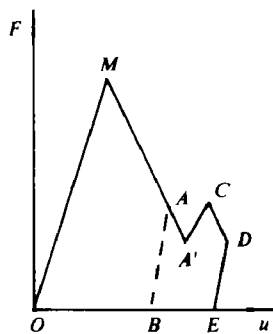


图5 凿入力-凿深曲线的折线模型

虚线——入射波时间较短，
实线——入射波时间较长。

Fig.5 Broken line model of load penetration curve

Dotted line— incident wave with short continuous time; real line—incident wave with long continuous time

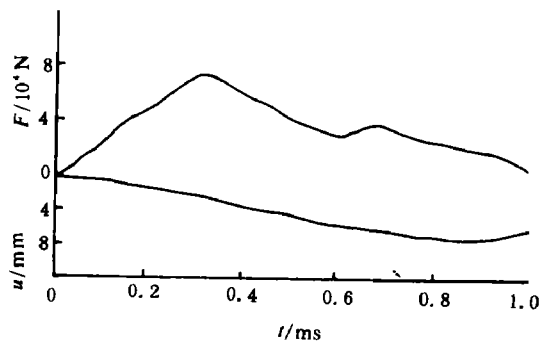


图6 闪长岩凿入力-凿深时间历程图^[9]

Fig.6 Load-time curve and penetration-time curve of diovite^[9]

Fairhurst 等把凿入力与凿入速度之比 $F/(du/dt)$ 称为凿入阻抗, 用比值 $F/(du/dt)$ 的大小来衡量对岩石凿入的难易程度, 并从图 1 得出凿入力最大时凿入速度为零的认识。他给出在开始凿入时凿入阻抗为零, 而在凿入力最大、凿入速度为零时凿入阻抗变为无穷大的结论^[3]。Fairhurst 的这些论点长期来被认为是正确的。为了有一个明确的认识起见, 可以分析一下图 6。图 6 是作者在双通道瞬态波形存储器上记录到的, 摆锤以 5 m/s 的速度撞击钎尾, 从光面对闪长岩凿入时的凿入力、凿深时间历程图。图中的 $F-t$ 曲线与 $u-t$ 曲线消去时间 t 后, 得到的便是图 4 中 $v = 5 \text{ m/s}$ 的 $F-u$ 曲线。从图 6 中看到: 开始凿入时, 尽管 F 小, 但是凿入速度几乎为零 (du/dt 是从零开始变化的), 所以凿入阻抗 $F/(du/dt)$ 不接近于零而是较大; 在 0.34 ms 附近 F 达到峰值, 但这时的 du/dt 不为零, 所以 $F/(du/dt)$ 不为无穷大。从图 1 到图 4 也可以看出这一点, 在 0.9 ms 时入射波也衰减, F 已经很小, 而 $du/dt = 0$, 这使得 $F/(du/dt) = \infty$ 。之后刃下岩石并无破碎, 如果在此凿痕基础上再输入新的入射波, 则 F 将很快增大, 凿深 u 将增加, du/dt 也将大于零, $F/(du/dt)$ 也就不会成为无穷大。这说明在同样凿深条件下, $F/(du/dt)$ 不是单值的。因此, 把 $F/(du/dt)$ 称为凿入阻抗, 并作为衡量对岩石凿入难易程度的指标是不合适的。

四、凿入时各力学量之间的关系

根据钎刃与岩石接触面 A 的力、位移边界条件: (1) 作用在岩石上的凿入力与钎刃上的受力相等; (2) 对岩石的凿入速度须等于钎刃的前进速度, 可以采用式 (1)、(3) 来描述凿入力-凿深的关系。由式 (1)、(3) 可得 F 与 $p(t)$ 、 du/dt 的关系式

$$F = 2p(t) - m \frac{du}{dt} \quad (4)$$

我们称为凿入方程。若将 $F-u$ 曲线上任一点的斜率 dF/du 用 k 表示, 则 $du/dt = (1/k)dF/dt$ 。将其代入式 (4) 可得凿入力与入射波的关系式

$$p(t) = \frac{1}{2} \left(F + \frac{m}{k} \frac{dF}{dt} \right) \quad (5)$$

凿入方程 (4) 中含有三个变量。对于不同本构的岩石及不同刃角、刃长的钎刃, 再加上岩石发生跃进式破碎时刻的随机性, 在同一入射波作用下的实际凿入速度 du/dt 是不同的, 也就是说不能仅由式 (4) 来求得 $F-u$ 曲线。但是可以用式 (4)、(5) 来阐明实测 $F-u$ 曲线各个阶段的物理意义及诸力学量之间的关系。下面我们结合图 5 中 $F-u$ 折线模型来进行工作。

在凿入的开始阶段, 即图 5 中的 OM 段, 曲线斜率 $k = dF/du > 0$, 这说明只有凿入力 F 进一步增大, 凿深 u 才能增加, 因此 OM 段曲线的斜率及点 M 处最大凿入力的量值体现了岩石的坚固性。由于此阶段 $dF/dt > 0$, 由式 (5) 得

$$F < 2p(t) \quad (6)$$

即凿入力小于入射波的两倍。从式 (4) 看到 $2p(t)$ 与 F 的差越大, du/dt 也越大, 即凿入越容易; 反之, 则凿入越难。图 3 中的花岗岩比大理岩更难凿入就是这个道理。

图 5 中 $F-u$ 折线下降沿有三个阶段

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dt} > 0, & \quad \frac{dF}{dt} < 0 \\ \frac{du}{dt} = 0, & \quad \frac{dF}{dt} < 0 \\ \frac{du}{dt} < 0, & \quad \frac{dF}{dt} < 0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

式(7)中第1式表明,力 F 下降时凿深继续增加,即刃下裂隙区岩石不能承受比 F 稍大一点的力了。这说明此阶段的力 F 的物理意义是钎刃下裂隙区岩石于所处条件下的最大承载能力。利用式(7)、(5)可以得到

$$\left. \begin{aligned} \frac{du}{dt} > 0, & \quad \frac{dF}{du} < 0 \text{ 时}, & \quad F < 2p(t) \\ \frac{du}{dt} = 0, & \quad \frac{dF}{du} = \infty \text{ 时}, & \quad F = 2p(t) \\ \frac{du}{dt} < 0, & \quad \frac{dF}{du} > 0 \text{ 时}, & \quad F > 2p(t) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式(8)中第2式表明,当入射波衰减到使得 $2p(t)$ 等于钎刃下裂隙区岩石的承载能力 F 时,钎刃停止凿入。

人们以往对于凿入力与入射波关系的认识是:一般情况下总有 $F < 2p(t)$;只有在达到固定端的极端情况下,才有 $F = 2p(t)$ 。然而式(8)中第3式表明, $F-u$ 曲线上还存在着 $F > 2p(t)$ 的情况。怎样来认识这个问题呢?我们认为,应当把凿入装置与被凿岩石看成是一个系统的两个部份,它们之间通过钎刃而相互传递能量。钎刃在凿入时,钎杆内的弹性波能部份耗于钎刃破碎岩石;部份被岩石介质传播到远方;还有一部份转化为钎刃下受压缩岩石的应变能。当钎杆内的入射波衰减到它的两倍还小于刃下裂隙区岩石的承载能力时,岩石中的压缩应变能释放出来,以应力波的形式经钎刃向钎尾方向传播。这时钎刃上的力 F 等于这部份回传的应力波加上数值为 $2p(t)$ 的反射波,当然就有 $F > 2p(t)$ (相应的宏观表现就是钎刃被弹起,这是与实际相符的)。于是由钎刃向钎尾方向传播的应力波就不能简单地称为反射波,这就是我们在第二节中命名 $q(t)$ 为逆波,而没有仅命名其为反射波的理由。

综上所述, $F-u$ 曲线各阶段诸力学量的关系如下表:

阶 段	$\frac{dF}{dt}$	$\frac{du}{dt}$	$F/2p(t)$	$k = \frac{dF}{du}$
开始凿入	+	+	< 1	+
继续凿入	-	+	< 1	-
停止凿入	-	0	= 1	∞
弹 起	-	-	> 1	+

五、结 论

1. 实测 $F-u$ 曲线表明:凿入力 F 最大时,凿入速度 du/dt 不为零;而 du/dt 为零时,力 F 已经减小。在讨论中还看到,把比值 $F/(du/dt)$ 称为凿入阻抗,并用它来衡量对岩石凿入

的难易程度是不合适的。

2. $F-u$ 曲线上的最大凿入力体现了被凿岩石的坚固性。在曲线下降的负斜率部分,力 F 表示钎刃下裂隙区岩石的最大承载力。在曲线下降的正斜率部分,力 F 等于两倍的入射波加上岩石所释放经钎刃向钎尾传播的弹性波。

3. $F-u$ 曲线各阶段诸力学量的关系由文中给出。可作为分析凿入过程之参考。

4. 向钎尾传播的弹性波 $q(t)$ 中,可以包含岩中释放经钎刃往钎尾传播的弹性波,所以称为逆波而不称为反射波较合适。

参 考 文 献

- [1] 佐佐木和郎,日本鉱業会誌,(12)(1958),989.
- [2] 高冈三郎,日本鉱業会誌,(12)(1959),1089.
- [3] Fairhurst, C., *Mine & Quarry Engineering*, (2)(1961), 169.
- [4] Hustrulid, W. A. Fairhurst, C., *Int. J. Rock Mech.* (4)(1971), 311.
- [5] Dutla, P. K., *Int. J. Rock Mech.* (6)(1972), 543.
- [6] Lundberg, B., *Int. J. Rock Mech.* (3)(1976), 187.
- [7] 徐小荷,岩石力学与工程学报,(3)(1984),75.
- [8] 唐春安,凿岩机械与风动工具,(1)(1985),47.
- [9] 潘岳,徐小荷,矿冶工程,(4)(1986),3.

ANALYSIS OF LOAD-PENETRATION CURVE BY PENETRATION EQUATION

Pan Yue, Gao Shixian

(Qingdao University of Metallurgy and Mine)

ABSTRACT The characteristics of load-penetration curve are specifically analyzed and the physical meaning of each section of the curve is also described in this paper. The relationship among the load, penetration velocity and the incident wave etc. is given out by tables. On consideration of the interaction between the penetrating apparatus and the rocks, it is also pointed out that it is suitable to call the stress wave by the adverse wave rather than the reflected wave which spreads to the end of bit through the bit edge in penetration course.

KEY WORDS rock, load-penetration curve, penetration equation.