煤炭学报

JOURNAL OF CHINA COAL SOCIETY

Vol. 34 No. 9 Sep. 2009

文章编号:0253-9993(2009)09-1281-04

# 基于入、反射波的杆波阻特性反演方法

刘德顺,何先可,段 凯,徐小艳

(湖南科技大学 机械设备健康维护省重点实验室, 湖南 湘潭 411201)

 摘 要:提出了一种根据间接测试法获得的钎杆上的应变来推算钻头波阻的方法.首先描述应力 波在变波阻部件中的传播规律,建立基于波透反射关系方程,然后介绍已知冲击入射波和钻头反 射波反求钻头波阻的反演原理与计算方法,最后以数值仿真对反演方法的正确性进行了验证.
 关键词:钎杆;波阻特性;反演;应力波
 中图分类号:TD421.25 文献标识码:A

# The inversion of variable characteristics impedance of the rod based on incident waves and reflection waves

LIU De-shun, HE Xian-ke, DUAN Kai, XU Xiao-yan

(Hunan Provincial Key Laboratory of Health Maintenance for Mechanical Equipment, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

**Abstract**: A new method was proposed to estimate variable characteristics impedance of the dill bit from the strains in a drill rod using strain measurement. Firstly, described stress wave propagation in a rod with variable characteristics impedance and established a relationship between incident waves and reflection waves based on the wave equation. Secondly, an inversion method for calculating characteristic impedance of the drill bit was introduced based on known incident waves and reflected wave from the drill bit. Finally, the inversion method was validated through the numerical simulation.

Key words: drill rod; the characteristic impedance; inversion; stress wave

在冲击凿岩机械系统研究中,钻头对岩石的作用力与凿深的关系曲线反映了钻头与岩石相互作用机 理,是对冲击凿岩机械系统工作状态进行诊断和实施最优控制的基础<sup>[1-2]</sup>.由于直接测试法要将传感元件 附于钻头或被钻进岩石上来测量冲击点的力和位移,这种方法即使在实验室中也很难实现,在冲击凿岩系 统工作中几乎无法实现,因此,间接测试法引起广泛关注.间接测试法一般是应用测量钎杆的应变来推算 钻头上的冲击力和位移,通常钎杆较长,并且有一部分不在炮孔内,便于实现.20世纪90年代以来, Lundberg, Carlsson和 Sundin等人先后提出了两点应变测量法和两点应变测量钻头的冲击力和位移的方 法<sup>[3-4]</sup>;对于较长的钎杆,刘德顺、Park等提出了一点应变测量钻头的冲击力和位移的方法<sup>[5-6]</sup>.然而, 在间接测试法中,必须根据钎杆和钻头的波阻特性来推算作用力与位移,虽然等截面均质钎杆的波阻容易 求得,但准确计算几何形状复杂且有硬质合金镶嵌的钻头的波阻并不容易,而且钻头与钎杆连接状态和与 岩石的接触状态都将对波传播特性产生影响,这将导致这种测试法获得的作用力与凿深的关系曲线不能准

**收稿日期:** 2008-09-25 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50774032);湖南省教育厅重点科研资助项目(07A018);湖南省自然科学基金资助项目(07555074)

作者简介:刘德顺(1962—),男,湖南湘潭人,教授,博士生导师.Tel:0732-8290380, E-mail: deshunliu@ hotmail.com

## 1282 煤炭学报 2009 年第34 卷

确反映钻头与岩石相互作用的实际状况. 笔者提出一种根据间接测试法获得的钎杆上的应变来推算钻头波 阻的方法,本文重点介绍该方法的原理. 首先描述应力波在变波阻部件中传播规律,建立基于波透反射关 系方程; 然后提出已知冲击入射波和钻头反射波反求钻头波阻的反演原理与计算方法,最后以数值仿真对 反演方法的正确性进行验证.

#### 1 弹性杆波动分析

冲击凿岩机活塞冲击钎杆产生一应力波,应力波沿钎杆传播,通过钻头作用在岩石上,使岩石发生破碎,钎杆和钻头不断旋转冲击破碎岩石,岩屑被不断排出形成炮孔.一般将冲击凿岩机械系统抽象为一维 线性弹性杆,由波动方程描述为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{c^2 \partial^2 u}{\partial x^2},$$

式中, u 为位移; t, x 分别为时间和空间坐标; c 为波速,  $c = \sqrt{E/\rho}$ , 其中, E,  $\rho$  分别为弹性杆材料的弹性模量和密度.

波动方程的解由2个相向而行的顺波*P*(右行波)和逆波*Q*(左行波)叠加而成,由于钎杆和钻头同 为钢质材料,故一般认为两者的应力波波速相同.无论是顺 *Q\_\_\_\_\_\_P* 波还是逆波,它们在杆中传播过程中,遇到波阻变化时就将 \_\_\_\_\_

发生透反射,根据透反射规律就可以得到所考察截面的各时 刻的顺、逆两波,从而得到杆中各处的状态.将弹性杆离散 成等长度的若干单元,杆单元长(空间步长)为 $\Delta x$ ,相应 地时间步长  $\Delta t = \Delta x/c$ .每一单元的波阻一定,在每单元中 存在顺、逆两波,如图1所示.根据波的透反射关系<sup>[7]</sup>可得



图1 应力波透反射



 $P_{i,j} = \mu_{i-1,i}P_{i-1,j-1} + \lambda_{i,i-1}Q_{i,j-1}, Q_{i,j} = \lambda_{i,i+1}P_{i,j-1} + \mu_{i+1,i}Q_{i+1,j-1},$  (1) 式中,  $P_{i,j}, Q_{i,j}$ 分别为  $t = j\Delta t$  时刻作用在第 i 单元中点截面上的顺波力和逆波力(这里均以压力为正,拉力为负).

式(1)中的透射系数和反射系数分别为

 $\mu_{i,i+1} = 2Z_{i+1}/(Z_i + Z_{i+1}), \lambda_{i,i+1} = (Z_{i+1} - Z_i)/(Z_i + Z_{i+1}),$ (2) 式中,  $Z_i$ 为*i*单元杆波阻;  $Z_{i+1}$ 为*i*+1单元杆波阻.

并且,它们存在如下关系,即

$$\mu_{i+1,i} = 2 - \mu_{i,i+1}, \lambda_{i,i+1} = \mu_{i,i+1} - 1, \lambda_{i+1,i} = -\lambda_{i,i+1}.$$

由杆中的顺波和逆波,可以求得杆中点截面上的质点速度和作用力以,即

$$v_{ij} = (P_{ij} - Q_{ij})/Z_i, \ F_{ij} = P_{ij} + Q_{ij}.$$
(3)

当弹性杆各截面的波阻为已知时,根据初始条件由式(1)就可递推求出各截面在各时刻的顺波力和 逆波力,由式(3)又可求出速度和作用力,即杆的波动状态.这一过程称之为弹性杆波动分析.

#### 2 波阻反演原理与方法

#### 2.1 波阻反演原理

冲击应力波(压缩波)从A点沿钎杆传播时,由于钎杆一般是均质等截面的,故波阻不变而不会发生反射.直到波传播到钻头B点,波阻发生变化,一部分冲击应力波透射进钻头C点作用在岩石上使其发生破碎,另一部分冲击应力波反射回钎杆,并沿钎杆向冲击端A点传播,如图2所示.钎杆和钻头都为钢质材料,应力波传播速度相同.

在钎杆上设一观测点 G (这里假设在钎杆的中点). 当持续时间为  $t_0$  的冲击应力波从 A 点沿钎杆传播时, 经历时间  $L_0/(2c)(L_0$  为钎杆长度) 到达 G 点,此前 G 点是静止的;再经历  $L_0/(2c)$  到达 B 点,在此截



Fig. 2 Propagation law of stress wave

面应力波发生透射和反射:反射波在时间 c 点经过 G 截面 点,历经时间  $L_0/(2c)$ ,再经过 A 点反射在时间 e 回到 G点,历经时间  $L_0/c$ ;同时,B 点的透射波继续通过钻头传 播直到 C 点截面,期间由于钻头波阻变化而发生透射和反 射,当 C 点截面的反射波在时间 d 经过 G 点时,即从时间 c 到 d 经历时间  $2L_b/c(L_b$  为钎头长度).虽然,应力波在 C点截面还将不断反射,但反射波前面  $2L_b/c$  时间段已经包 含了整个钻头的波阻信息.对于一般冲击凿岩机械系统, 冲击应力波持续时间满足  $t_0 < L_0/c$ ,并且钻头长度远小于 钎杆长度  $L_b \ll L_0$ ,这就意味着冲击入射应力波作用在界面

B 后反射波到达 G 点前, G 点已处于静止,即入射波和反射波是不重叠的.所以,在 G 点截面上可以直接 记录得到完整的冲击应力波(入射波)和用于反演计算钻头波阻的反射波前一部分.即在前阶段 G 点截 面上只有顺波(入射波),逆波为 0;在后阶段 G 点截面上只有逆波(反射波),顺波为 0.采用应变测试 法容易得到 G 点的作用力波形,由上述分析可知,前阶段 G 点作用力(持续时间为 t<sub>0</sub>)就是入射波 f(t) (顺波力),后阶段 G 点作用力就是反射波 φ(t)(逆波力).

#### 2.2 波阻反演计算方法

将持续时间  $t_0$  的入射波 f(t) 按  $\Delta t$  离散得到  $f = [f_1, f_2, \dots, f_m]$ ,式中  $f_j = f(j\Delta t)$ ,  $m = t_0/\Delta t$ ;将长度为  $L_b$  的钻头按  $\Delta x = c\Delta t$  离散为 n 个等波阻单元,每个单元波阻依次为  $Z = [Z_1, Z_2, \dots, Z_n]$ ,  $n = L_b/\Delta x = L_b/(c\Delta t)$ .取等波阻钎杆中靠近钻头的第1个单元进行考察,其波阻为  $Z_0$ ,由于钎杆中波阻不变,不发生反射,故在该单元中的顺波就是入射波,逆波就是反射波(只取反射波前面  $2L_b/c$  部分).将反射波  $\varphi(t)$  按  $\Delta t$  零散,得到  $\varphi = [\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n]$ ,式中  $\varphi_j = \varphi[(2j-1)\Delta t]$ ,它是因为每单元  $\Delta x$  钻头的波阻信息要 经  $2\Delta t$ 时间才能反射获得.这样,基于冲击入射波和反射波反演计算钻头波阻问题可表示为:已知 f 和  $\varphi$ , 求 Z.

将钎杆和钻头的 n +1 个单元从左至右编号,以入射波达到钎杆单元(第1个单元)开始计时,这里 注意到该单元中的反射波要滞后一个时间步长,则已知条件和初始条件可表示为

 $P_{i,1} = 0 \quad (i = 2, \dots, n+1), \ Q_{i,1} = 0 \quad (i = 1, \dots, n+1),$ (4)

 $P_{1,j} = f_j$   $(j = 1, \dots, m), Q_{1,j} = \varphi_j$   $(j = 1, \dots, n).$ 

综合应用式 (1) 和式 (4), 就可以求得透射系数 μ<sub>i,i+1</sub> (*i* = 1, …, *n*), 再由式 (2) 可求得波阻 *Z*. 比如, 由式 (1) 可得

 $Q_{1,2} = (\mu_{1,2} - 1)P_{1,1}, \mu_{1,2} = 2Z_1/(Z_1 + Z_0), Z_1 = (\varphi_2/f_1 + 1)Z_0/(1 - \varphi_2/f_1).$ 

波阻 Z 与入射波 f 和反射波  $\varphi$  的关系不便于表示为显函数形式,其他单元的波阻是不便直接求得的. 从式 (1) 推理可知,反射波  $\varphi$  只与透射系数  $\mu_{i,i+1}$  ( $i=1, \dots, j$ ) 有关,而且两者之间存在着线性关系. 这样,可先假设  $\mu_{i,i+1} = x_1$  和  $\mu_{i,i+1} = x_2$ ,利用式 (1) 求得对应的反射波分别为  $y_1$  和  $y_2$ ,再根据线性关系,求得透射系数为

$$\mu_{i,i+1} = x_1 + (x_2 - x_1)(\varphi_j - y_1)/(y_2 - y_1),$$

再由式(2)递推求解出 Z<sub>i+1</sub>,即

$$Z_{i+1} = \left\{ \left[ x_1 + \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} (\varphi_j - y_1) \right] Z_i \right\} / \left\{ 2 - \left[ x_1 + \frac{x_2 - x_1}{y_2 - y_1} (\varphi_j - y_1) \right] \right\},$$

如此,便可从*i*=1,…,*n*依次递推求解出钻头各单元的波阻分布.

#### 3 数值仿真验证

为了验证基于入射波和反射波反演杆波阻特性方法的正确性,这里给出一个数值仿真实例.首先应用

### 煤炭学报 2009年第34卷

波动分析方法对一个波阻分布已知的杆进行分析,获得某个入射波作用下的反射波(部分),然后根据入 射波和反射波反演计算出杆波阻的特性.入射波和反射波(部分)如图3所示,前面的波形为入射波, 后面的波形为反射波.取时间步长  $\Delta t = 1 \mu s$ ,波传播速度为5000 m/s,得到单元长度  $\Delta x = 5$  mm,设钎杆 波阻  $Z_0 = 33 135.0 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ .应用反演计算方法得到各钻头单元波阻见表1,与原来设定的弹性杆波阻分 布完全相同,这说明本文提出的基于入射波和反射波反演杆波阻特性方法是可行的.



表1 弹性杆的波阻分布特性					
Table 1         Distribution of characteristic impedance in					
elastic rod					N ∙ s∕m
$Z_0$	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_4$	$Z_5$
33 135.0	60 080.3	87 497.1	98 853.7	122 540.0	148 556.2
$Z_6$	$Z_7$	$Z_8$	$Z_9$	$Z_{10}$	$Z_{11}$
158 556 2	158 556 2	158 556 2	136 490 3	117 884 2	0

Fig. 3 The waveform of incident wave and reflection wave

#### 4 结 语

根据钎杆上测试得到的应变来直接推算钻头波阻特性,从而为冲击凿岩间接测试法测试计算出作用力 与凿深的关系曲线提供了新方法.这种方法避免了计算复杂形状钻头的波阻引起的误差,更能反映钻头对 岩石互相作用的实际状态.有关测试中的试验与数据处理部分将在另文论述.

#### 参考文献:

- Rasit A. Evaluation of drill cutting in prediction of penetration rate by using coarseness index and mean particle size in percussive drilling [J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2004, 22: 417-425.
- [2] Fukui K, Okubo S. Some attempts for estimating rock strength and rock mass classification from cutting force and insvestigation of optimum operation of tunnel boring machines [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2006, 39 (1): 25-44.
- [3] Carlsson J, Sundin K G, Lundberg B. A method for determination of in-hole dynamic force-penetration data from two-point strain measurement on a percussive drill rod [J]. International Journal of Rock Mechanics Mining Science & Geomechanics Abstracts, 1990, 27 (6): 553-558.
- [4] 巫绪涛,胡时胜,张芳荣.两点应变测量法在 SHPB 测量技术上的运用 [J].爆炸与冲击,2003,23 (4):309-312.

Wu Xutao, Hu Shisheng, Zhang Fangrong. Application of two-point strain measurement to the SHPB technique [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23 (4): 309-312.

- [5] Park W S, Zhou M. Separation of elastic waves in Split Hopkinson Bars using one-point strain measurements [J]. Experimental Mechanics, 1999, 39 (4): 287-294.
- [6] 刘德顺,朱萍玉,彭佑多,等.冲击载荷下弹性杆端的作用力-位移关系曲线的一点应变测试法 [J]. 湘潭矿业学院学报,2000,15 (2):18-22.
   Liu Deshun, Zhu Pingyu, Peng Youduo, et al. A method for determination of dynamic force-displacement curvefrom one-oint

strain measurement on an elastic rod endface [J]. Journal of Xiangtan Mining Institute, 2000, 15 (2): 18-22.

[7] 刘德顺,李夕兵,朱萍玉.冲击机械动力学与反演设计 [M].北京:科学出版社,2007.

Liu Deshun, Li Xibing, Zhu Pingyu. Dynamics and inverse design of impact machines [M]. Beijing: Science Press, 2007.