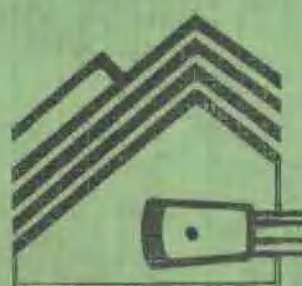


凿岩原理与钻头磨损

Principles of Rock Drilling and Bit Wear

(美) George B. Clark 著

胡 铭 译



贵阳钎钢研究所情报室

凿岩原理与钻头磨损

Principles of Rock Drilling and Bit Wear

(美) George B. Clark 著

胡 铭 译

贵阳钎钢研究所情报室

编 辑：贵阳钎钢研究所情报室
出 版：《钎具简讯》编辑部
发 行：贵州省钻具实业开发公司
贵州省科技报刊登记证 030 号

责任编辑：黄洁仁、刘建政
封面设计：高颖钦

印 刷：贵州工学院印刷厂

译 者 的 话

《凿岩原理与钻头磨损》一书为美国科罗拉多矿业学院采矿系教授G. B. Clark博士所著，发表于科罗拉多矿业学院学报上。目前国外关于凿岩原理和岩石破碎理论的论文很多，观点也各有差异。但我们认为：研究凿岩原理和岩石破碎理论的目的，是在于正确地评定钻具的冲击载荷，冲击功，以及钻头几何形状等影响岩石破碎的因素，从而创造合理的破碎条件，使破碎能量的消耗达到最少。就此观点而言，译者认为本文中所论述的理论和大量的试验数据是有一定借鉴价值的。因此，我们将本书译出，供广大从事凿岩和钻具生产的技术人员参考。

本书在编译过程中，得到以下同志的帮助：李正光工程师对本书中的技术术语作了审校，黄洁仁工程师和刘建政、翟利亚同志负责本书文字及图表的全面校对。在此谨表示感谢。

本书采用符号

A	= 活塞面积 (英吋 ²)
A	= 常数
A_H	= 凿孔的横截面积
A_S	= 总表面积
C	= 常数
C	= 碳
C_e	= 常数, 英制单位
C_m	= 常数, 公制单位
C_0	= 岩石的抗压强度
Cfm	= 每分钟立方英尺
c	= 裂纹形成位置
D	= 钻头直径
d	= 颗粒平均尺寸
E	= 杨氏弹性模量
E	= 降压能量
E_1	= 压缩空气作功
E_p	= 功率输出
E_r	= 活塞做功能力
E_r	= 输出比能
E_{va}	= 视在比能
E_w	= 脉动能量
F	= 输出频率
f	= 散状体积比值
$\bar{f}$	= 调整后频率
f	= 每分钟冲击频率
f'	= 岩石强度系数
F	= 切削力, 凿刮
F_e	= 弹性载荷极限
F_L	= 作用在气腿上的力
F_H	= 水平分力
F_p	= 作用在活塞上的力 (磅)
F_r	= 破损载荷
F_t	= 切向力
F_{th}	= 推力 (磅)
F_{tq}	= 扭矩 (呎-磅)
F_t	= 保持钻头接触岩石的最小推力

F_v = 总推力
 g = 重力加速度 (呎/秒²)
 H = 硬度
 h_e = 弹性极限时的冲头位移
 i = 筛网比
 K = 常数
 K = 标度因素
 K_o = 常数
 k = PR 和 (CFM)² 的比例系数
 k_1 = 活塞回程时间比值
 k_2 = 活塞停顿时间比值
 k = 破碎后材料的尺度模量
 K = 常数
 L = 夹持压下载荷
 I = 两次冲击间的滑动
 m = 常数
 N = 冲击次数
 N = 颗粒数
 n = 正常时冲程的次数
 n = 冲击次数
 n = 应力分布系数
 N_r = 冲孔硬度
 PR = 凿进速率 (吋/分)
 P = 气缸中气体压力 (巴) (工作压力)
 p = 晶粒间平均自由路程
 $P_1 = dy$, 粒度分布的微分
 P_1 = 试样总质量筛选比
 R = 硬度
 R = 旋转阻力
 R_a = 反射系数
 S = 比面
 S_d = 强度参数, 牙轮钻试验
 SE = 比面能量
 TRS = 横向强度
 t = 切削深度 翼状钻头
 t_f = 脉冲延续时间 (秒)
 t_1 = 冲程时间 (秒)
 T_o = 传递系数
 T_m = 附加推力
 T_o = 温度

T_r = 钻头至岩石的能量传递系数
 T_r = 扭矩能量传递率
 u = X方向位移
 u = 滑动速度
 v = 质点速度
 V = 破碎岩石的体积
 V = 体积
 V_d = 音速
 V_p = -35网目材料的体积
 V^s = 活塞极限速度
 V_s = 破碎率
 v_b = 钎杆或钻杆中波的质点速度
 v_o = 活塞冲击时的速度
 v_p = 活塞中波的质点速度
 W = 活塞质量 (磅)
 W = 重量
 W_e = 弹性功, 冲孔试验
 W_p = -35网目材料的重量
 W_1, W_2, W_3 = 功
 x = 沿钎杆长度方向
 x = 颗粒度
 y = 尺寸分布
 α = 回归线斜率
 α = 单位能量钻凿体积
 β = 冲量传递系数
 β = 操作因素 (小于1.0)
 δ = 每转推进量
 γ = 面积比率
 γ = 比热率
 γ = 钻头材料磨损量与所破碎岩石的比值
 λ = 颗粒形状因素
 ρ = 密度
 σ = 平均应力
 σ_c = 屈服应力
 σ_i = 岩石——钻头间的入射应力
 τ = 抗剪强度
 τ = 应力脉冲撞击岩石的持续时间
 μ = 摩擦系数
 v_s = 破碎率
 w = 切削倾角, 翼状钻头

目 录

符号	(1)
引言	(1)
风动凿岩机	(2)
工作原理	(2)
有关指数	(4)
钎杆中应力波的传递	(5)
早期风动凿岩的探讨	(11)
风动冲击式凿岩机——特性	(17)
凿岩机特性	(17)
应变能量——钎杆	(24)
应力脉冲的测量	(25)
数据分析	(26)
可钻性的研究——实验室	(31)
推力和凿岩速率	(34)
物理特性和凿岩速率	(38)
岩石的强度系数	(40)
岩石强度系数 (CRS) 的计算	(46)
岩石破碎中能量粒度的关系	(47)
破碎定理	(47)
破碎中能量和颗粒尺度分布	(48)
对美国矿业局 (USBM) 分析的不同见解	(49)
岩石强度系数 (CRS) 试验的分析	(49)
纯破碎能量的测定	(51)
筛选分析	(51)
岩石强度系数 (CRS) 的分析	(53)
岩石强度系数 (CRS) 试验中的破碎比能 (Selcuk 1981)	(53)
可钻性研究——矿区试验	(55)
物理性质与可钻性——现场	(51)
岩石强度系数 (CRS) 与可钻性——现场试验	(52)
比能与岩石可钻性	(52)
矿区试验——石英岩	(72)
推力	(81)
实际推力的需求量	(82)

风动冲击式凿岩——独立回转式	(84)
凿岩机和气马达	(85)
实验步骤	(87)
试验结果	(87)
岩石物理性质	(91)
能量需求量	(91)
颗粒尺度	(93)
液压冲击式凿岩机	(93)
旋转冲击式凿岩	(94)
旋转冲击式凿岩现场试验	(94)
液压凿岩机	(100)
金刚石凿岩	(106)
磨削凿岩的理论	(106)
试验步骤	(108)
凿岩速率和岩石性质——地表钻头	(108)
孕镶金刚石钻头	(111)
旋转式凿岩	(118)
刮削钻头	(118)
牙轮钻头	(119)
喷焰凿岩	(123)
参考文献	(124)

引 言

在有关凿岩生产, 工程成本及凿岩机械使用的文献中, 大量的资料数据有待于引证, 因而收集整理目前各种凿岩过程中岩石破碎机理、实验成果, 以及理论进展方面的资料就成为客观上的要求。通过对这些资料的分析, 将使凿岩技术进一步深入发展。

本书概括了包括基本凿岩知识在内的各种技术的进展。就目前已达到的凿岩技术, 来论述凿岩机械的理论发展是本书的部份内容。

本书主要介绍凿岩过程和岩石的破碎机理。其中许多基本参数已由美国和海外的学者在凿岩实验中作过研究分析。对工程中一些感兴趣的研究结果也作了介绍和论述。这些资料对具有一定凿岩原理知识的工程师来说, 能更加确切地进行深入研究, 以论证诸如能量利用、凿入速率预测、岩石破碎、有效破碎岩石时所需要的能量和应力值, 凿岩过程中能量传递过程, 以及其他有关的因素。

导致高效率凿岩机械发展的有两个关键性的因素。1. 凿岩机构造的改进, 以及凿岩钻具如钎杆、钻杆及钻头在冶金性能方面的发展。2. 岩石破碎机理和高效率凿岩中能量利用率理论的发展。

凿岩有多种目的, 目前已采用多种凿岩方法用于岩石钻孔。如地质探矿、地勘、石油钻井, 凿岩爆破, 定基钻孔以及用于研究性的钻探工作等。近年来, 各国学者虽然提出了许多新的凿岩方法, 但都处于试验阶段。

当今应用最广泛的仍然是机械凿岩法, 在小范围内也有采用高温凿岩法的, 对软岩用高压水喷射凿岩也是有效的一种凿岩方法。

目前使用机械凿岩的类型有: (1) 冲击式, (2) 回转式, (3) 切削式, (4) 刮压式, (5) 上列各法的综合式, (6) 火焰破碎法等(表1)。

冲击式钻机是在孔内提升和落下一个大而重的钻头, 破碎的岩屑由捞砂筒排出, 这种凿岩方法目前已很少使用。冲击式凿岩机, 除近年来发展的液压凿岩机外, 是一种用压缩空气供能的凿岩机械。这是一种采用回转——冲击方法结合的凿岩工具, 配用非对称切削刃的钻头。凿岩机是用风动或液压作为动力。旋转式钻机是采用刮刃钻头、螺旋钻头、金刚石钻头和牙轮钻头, 用钻头上的滚盘切刃或镶焊的齿柱来破碎岩石。

火焰喷射钻孔通常用于快速破碎含硅质的硬岩。水力喷射凿岩也正处于发展阶段。另外, 激光和电子束熔化凿岩钻孔、超声波振动切削钻孔、高压水喷射切割等凿岩方法也都处于试验过程。

除高压水喷射凿岩法外, 其他方法对钻凿地面物质的潜在应用性似乎不大。高压水喷射法最有希望的场地是钻凿软质岩层, 如煤层、页岩或砂岩等岩石, 或作为某些切削凿岩机械的辅助部件, 如用于隧道钻机的切削头上。

表1 凿岩方法的分类(Hartman1968)*

凿 岩 方 法	使 用 机 械
冲 击 式 落 锤 工 具 凿 岩 机	冲击钻机, 钢绳钻机 风动凿岩机或液压凿岩机
旋转, 刮削式 刮 刃 钻 头 金 刚 石 钻 头 冲 击 钻 头 齿 状 钻 头	螺旋钻, 高压回转钻机 金刚石钻头钻机 岩芯钻机 钢绳、链条回转钻机
旋转滚压钻头 旋转—冲击	牙轮钻机 刮削式钻机, 牙轮钻机
高温火焰法	喷焰钻, 挖槽钻机

* 为便于读者查阅有关作者索引, 以及保持各地名的准确性, 文中的学者姓名和各地名均未译。

一、风 动 凿 岩 机

工作原理

早在1961年, Pflieger和Lavardanne在引用潜孔钻机的设计参数时, 就已叙述了在理想状态下风动凿岩机的基本工作原理。

风动活塞式凿岩机的动作可用数学的方法来表示, 并可用简化的假定理想状态来分析。从方程中可求出较为精确的近似值, 这对设计和试验评定冲击式凿岩机的性能特点的计算是十分有用的。

风动活塞式凿岩机决定其效率的两个工作部件是: (1) 汽缸, (2) 活塞, 它们的尺度是, (3) 活塞工作面积, (4) 活塞冲程 S , (5) 活塞重量 W (图1)。在活塞背端受空气压力作用产生动力冲程时, 活塞是加速度运动的, 而在正面受压时则产生回程。这些都由自动阀来进行控制。功率则是上述各项因素以及进气压力和排气阀回压的函数。性能方程是在下列假定基础上推导的:

(1) 动力冲程中, 作用在活塞面上的气压是均匀的;

(2) 全冲程的压力为一个平均的有效值;

(3) 在动力冲程中, 活塞的加速度呈线性增长;
有关的工作因素列于表2。

活塞的输出功率是空气压力, 活塞面积, 冲程, 和重量的函数。对给定的凿岩机, 活塞每次冲击的

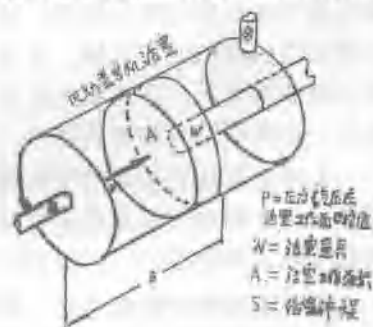


图1 风动凿岩机活塞

能量直接随压力而增加，而每分钟的冲击次数却按压力的平方根增加。

表 2

理想的性能方程

参 数		单 位	
活塞上的力 (动力冲程)	$Fp = PA$	(磅)	(1)
功	$E_1 = \frac{PAS}{12}$	(呎-磅)	(2)
加速度	$a = \frac{PAg}{W}$	(呎/秒 ²)	(3)
时间	$t_1 = \left(\frac{WS}{6PAg} \right)^{\frac{1}{2}}$	(秒)	(4)
极限速度	$V_s = \left(\frac{PASg}{6W} \right)$	(呎/秒)	(5)
时间，冲程和回程	$t = (1 + K) \left(\frac{WS}{6PAg} \right)^{\frac{1}{2}}$	(秒)	(6)
冲击次数/分	$f = \frac{60}{1 + k_1} \left(\frac{6PAg}{WS} \right)$		(7)
功/分 (功率)	$Er = \frac{\text{功}}{\text{一次冲击}} \times \frac{\text{冲击次数}}{\text{分}}$		
	$Er_u = (PAS) \left(\frac{PA}{WS} \right)^{1/2}$		
	$Era = \frac{P^{3/2} A^{3/2} S^{1/2}}{W^{1/2}}$	(呎-磅/分)	(8)

Hustruild (1971年) 和其他学者在活塞回程 (7) 的方程中引用了一个附加参数:

$$f = \frac{60}{(1 + k_1 + k_2)} \left(\frac{C_{(e,m)} PAg}{WS} \right)^{1/2} \quad (9)$$

($C_e = 6, C_m = 1/2$)

式中: k_1 和 k_2 表示回程和活塞停顿的时间参数。如果冲程，回程和活塞的停顿时间相等，则(9)式可改写成:

$$\bar{f} = K_0 \left(\frac{C_{(e,m)} PAg}{WS} \right)^{1/2} \quad (10)$$

$20 \leq K_0 \leq 30$

通常，速度是小于理想状态的，所以方程(5)可写成:

$$V_s = \beta_0 \left(\frac{PASg}{C_{(e,m)} W} \right) \quad (11)$$

这里，对给定凿岩工具条件时， β_0 是一个小于 1 的操作参数

1968年, Hustvedt 证明了最小力 F_1 保持钻头与岩石接触的要求是:

$$F_1 = \frac{\bar{f}}{30} (1 + \beta) \int_0^r \sigma_1 dt \quad (12)$$

式中: σ_1 = 随时间函数的岩石和钻头接触面间入射应力

r = 撞击岩石后应力脉冲的持续时间,

β = 钎杆至活塞的动量传递系数, 一般为 $0 < \beta < 0.2$,

方程(12)可简化为:

$$F_1 = \frac{\bar{f}}{30} (1 + \beta) \frac{W V_s}{g} \quad (13)$$

将方程(10)和方程(5)代入则:

$$F_1 = \frac{K_0}{30} \beta_0 (1 + \beta) \frac{W V_s}{g} \quad (14)$$

使用方程(15)可作为预测给定的凿岩机—钻头—岩石综合凿入率的一种方法 (Cook 和其他学者1968年)

$$PR = \frac{C_{(e,m)} E_r \times \bar{f} \times T_R}{A_H \times E_v} \quad (15)$$

式中: ($C_e = 12$, $C_m = 1$)

T_R = 钻头至岩石的能量传递系数

A_H = 钻进的横截面积

E_v = 在岩石——钻头接触处的岩石破碎比能

计算时, 可将下列数值代入

$T_R = 0.8$, $E_v = \sigma_0$ (岩石抗压强度)

将 $\bar{f}$ 和 E_v 的原式代入, 则有

$$PR = \frac{K_0 T_R}{A_H E_v} \left[\frac{(C_{(e,m)} S g)}{W} (P A)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \beta_0^2 \quad (16)$$

($C_n = 6$, $C_m = 1/2$)

方程14~16可用于计算推力, 空气压力, 岩石性质和凿岩速率的近似关系。

有关指数

为保证简单或复杂形状楔形钻刃有效的凿进, 钻头每冲击一次后即由钎杆带动回转一个角度。这点可从在凿岩机未发明前采用的手工凿岩法中见到。即一支一字刃的短钢钎受锤头的敲打产生冲程, 每冲击一次后, 钢钎就转动一个角度。如果钻头不转动, 经若干次冲击后, 孔槽就会被碎石和岩屑填满, 造成凿进中断。转动钎杆可使钻头每次冲击后都处在一个新表面上, 以便岩屑, 碎石排出和凿进。

早期的指数试验是使用平刃一字钻头进行的 (Simon 1956)。将一个固定有重物的钻头落在岩石表面上。当钻头楔刃在两个相互交叉

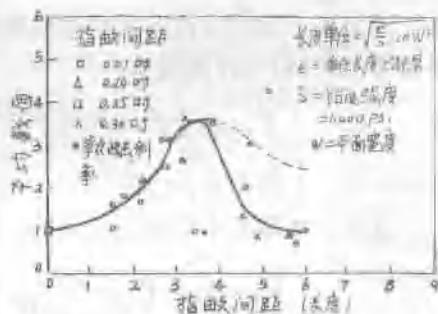


图2 指数曲线

的位置落下时，材料的中间被击碎。随两次冲击点之间距离的增加并超过一个临界间距时，两凿痕间岩石破碎体积迅速减小（图2）。

试验的平行指数可用来说明若干种岩石破碎类型的指数原理。即它限制了有关能量、力、应力、脉冲，能量应用方法，和其他因素的几何形状，以保证有效破碎。例如：在有效切削和隧道钻机头部滚盘的掘进面两槽之间破碎时，上列因素就形成线性的几何形状。

关于凿岩炮孔的冲击式凿岩和旋转冲击式凿岩中呈现出斜率的曲线指数，哈特曼（Hartman）在1968年就指出冲击式凿岩机每次冲击之间的指数角度不是临界值。

所以平行指数的几何形状也与直接应用平行指数试验结果所得到较精确的曲线不完全相同。

风动凿岩机和近年来发展的液压凿岩机每分钟冲击次数都比较大。每次冲击都凿落岩石，并在孔底留下一个射线状的凿痕或凿槽。

对一字刃钻头或交叉 90° 的十字形钻头来说，似乎简单的百分率指数对 90° 角的钻头较为适用。

1957年，哈特曼（Hartman）在实验室试验中求出较理想的指数角度为 $30\sim 45^\circ$ 。但是，却没有大量的现场试验来验证这些实验室的数据。工作时的凿岩机，有可能每次冲击时转动机构提供给钎杆的转数相对不变，这样许多因素都可能影响指数角度的变化，如旋转阻力，钎杆中反射应力波的结果，转动部件的惯量等。

一些四翼钻头的刀片不是采用 90° 角设计，使用这种钻头可减少在孔底凿槽中反复冲击的可能性。

美国矿业局的Paithankar和Misra（1980年）指出：从小规模实验室所得到的岩石冲击可钻性与所测定的“标准”物理性质不完全相符。他们对五种不同的岩石：玄武岩、花岗岩、花岗斑岩、石灰石、白云石进行了实物可钻性试验，用小钻头在实验室试验来比较它们的比值。试验装置由直径10毫米碳化钨小钻头（ 110° 刃角），落锤和冲击器组成，给定能量0.14公斤米。并假定所有的冲击能都被传递到岩石。每次冲击后岩屑都被排除，以免过度粉碎，并测定岩屑的体积来确定比能 E_r 。

凿岩的比能，可由岩石—钻头接触面测定，可以看出，它是岩石性能和指数角度的函数（图3）。

钎杆中应力波的传递

为了对从活塞经钎杆到岩石能量的传递有所了解，就必须具有一定的平面弹性应力波产生和传播的知识。

小直径钎杆中弹性应力波传递的微分方程按下式求导。设一个单位截面的小元素，长度为 dx ；

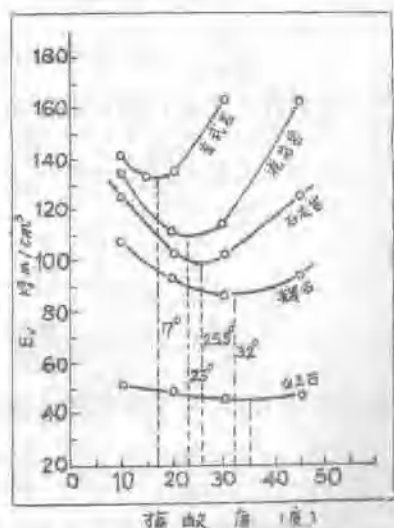


图3 E_r 和指数角关系

$$\sigma_x \leftarrow \left[\begin{array}{c} \leftarrow dx \rightarrow \\ \leftarrow dx \rightarrow \end{array} \right] \rightarrow \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx$$

其中应力的变化率是: $\frac{\partial \sigma_x}{\partial x}$

坐标方向 x 代表沿杆的轴向, 作用在元素上的力为:

$$\sigma_x \text{ 和 } \sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx$$

因为这些元素必须在动态中保持平衡, 可应用牛顿定律 $F=Ma$ 。单位截面元素的质量是 ρdx , 加速度为:

$$\frac{d^2 u}{dt^2}$$

式中 u 是位移, 因此,

$$\sigma_x + \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} dx - \sigma_x = \rho dx \frac{d^2 u}{dt^2} \quad (17)$$

$$\text{或} \quad \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = \rho \frac{d^2 u}{dt^2} \quad (18)$$

方程(17)和(18)适用于可支撑或传递应力的任何类型的固性材料。对于弹性材料(满足霍克定律), 应力和应变之间的关系为:

$$\sigma_x = E \frac{\partial u}{\partial x} \quad (19)$$

式中: E = 杨氏弹性模量

$u = x$ 方向的位移

$\frac{\partial u}{\partial x}$ = 应变的无穷小量

将它代入方程(18), 则得到:

$$E \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (20)$$

$$\text{或} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (21)$$

$$\text{和} \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (22)$$

式中 $C^2 = E/\rho$, C 是弹性杆件中的波速, 这就说明相同的波形方程适用于应力, 即

$$\frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial x^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 \sigma_x}{\partial t^2} \quad (23)$$

这波形方程只适用于没有位移的场合, 但它们用于叙述传递距离相对比较短的小直径杆件中脉冲的传递机理却是足够精确的。因此这些比较简单的探讨可用来分析杆中平面(巴*)波的状态。

棱形弹性杆件中的波形参数的基本关系可由基础运动定律求出。在细长杆件中

* 巴(bar), 声压单位, 1bar = 1达因/厘米²均方根值。

波阵面的质点运动是很小的，这些运动在推导中一般被忽略。如假定杆体端部受冲击，产生一个矩形波（压应力波，图4），当每个递次面受到压缩时，波就沿着杆体以速度 c 传递，在经过时间 t 后，杆体长度 ct 将受到压缩，钎杆其余部分的应力就消除了（Timoshenko 1934）。钎杆杆体的质点将沿着波传播的方向，以速度 V 移动。由于是压应力，杆体的长度按数值 $u = \sigma ct / E$ 递减，质点的速度由下式给出：

$$V = u/t = C\sigma/E \quad (24)$$

在冲击瞬间，钎杆受压部位是静止的，经过时间 t 后，即产生速度 V 和冲量 $\Delta ct pv$ ，它等于压应力的冲力，

$$\Delta \sigma t = \Delta ct pv \quad (25)$$

由一般的波形方程中，波速（杆）可按下式得出

$$c = (E/\rho)^{1/2} \quad (26)$$

$$\text{所以} \quad V = \sigma / (E\rho)^{1/2} \quad (27)$$

这里， C 与压应力无关，而与拉压应力中应力的质点速度成比例。在后一种情况中，质点速度是在应力波传递的相对方向。

从上述方程中可得：

$$\sigma = EV/c \quad (28)$$

因此，应力波的系数可由弹性常数和应力大小来确定。虽然在此只考虑了一个矩形应力波，但下面推导也可用于其他形状的波形。波的能量是由两部份组成的：变形中的应变能，即

$$\Delta ct \sigma^2 / 2E \quad (29)$$

和动能，即

$$\Delta ct pv^2 / 2 = \Delta ct \sigma^2 / 2E \quad (32)$$

也就是说，弹性波的能量是由动能和应变能的各一半组成。大多数情况下得出的波形微分方程是线性的，方程解可相加。这样，如果钎杆中两个波在相对的方向传递，产生的应力和质点速度是这两个波形的叠加，可用叠加法求出。当波动相互通过后，即恢复到各自原先的波形。如果两个压应力波相遇，其应力相加，而质点速度是负的。其他形状的波形也可用类似的方法进行分析（图4）。

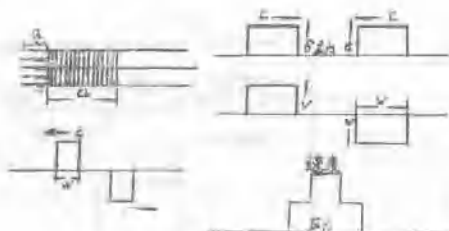


图4 (a) 冲击产生的矩形应力波
(b) 冲击压应力波
(c) 冲击产生的拉伸、压缩应力波

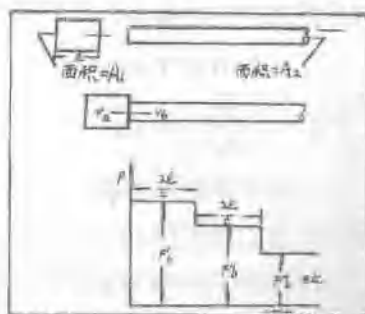


图5 相同截面积的活塞和钎杆力的波形 (Delta 1968)

对两个等量并连续冲动的压应力波，其应力是两倍叠加，而特性区域的质点速度为零。同样，在叠加区应变能是两倍，而动能为零。另一方面，如果等量的拉伸和压缩应力波在传递中以相对的方向碰撞，并相互通过后，则叠加区域的应力为零，质点速度和动能为二倍，应变能为零。

当冲击式凿岩机的活塞冲击钎杆尾端时，撞击则在活塞和钎杆中产生波动。其能量传递和反射的数量取决于若干种因素，如相对的横截面积、长度、密度、弹性特征，以及活塞和钎杆的几何形状。

用图示分析，我们选择相同直径的活塞和钎杆（图6），将钎杆的长度视为无限大，以致在杆体中不会出现反射应力波，即当应力波到达自由端后，反射的相位差为 180° 。这点同样可用作分析比较复杂的几何形状活塞的基础，活塞形状的设计就确定了钎杆中波动形状。有关各种形状活塞的影响，*Dutta*在1968年就做过分析，这里介绍的只是其中两种。

用一个长度 l ，截面积 A_p 的活塞冲击一个截面和弹性特征相同且无限长的钎杆。每次冲击产生的压应力波的量次和形状相同，它们的参数可由方程(21)和冲击的初始条件来决定。

活塞中反射的（矩形）压应力波在时间 l/C 内到达活塞的自由端，这里 l 是活塞长度， C 是在钢制活塞中应力波的传播速度，这时波动按照张应力波的形式反射回。使在自由端的质点速度增加一倍，张应力波在时间 $2l/C$ 内被反射到活塞和钎杆之间的接触面。由于应力波是张力状况，活塞和钎杆之间的接触是开启的，因此在钎杆中产生长度 $2l/C$ 的矩形应力波（图5）。

接触力 F 是恒定的，如果活塞的质点速度是 V_p ，钎杆的质点速度是 V_b ，活塞的冲击速度是 V_0 。

$$\text{则: } V_0 - V_p = V_b \quad (31)$$

这就表明平面应力波与质点速度有关

$$\sigma = \rho CV \quad (32)$$

所以，当横截面积相等或不相等时（图6），活塞和钎杆接触面之间的初始力是：

$$F_p = P_p C_p V_p A_p = P_b C_b V_b A_b = F_b \quad (33)$$

如果假定钢制活塞和钎杆的密度和波速相等，则：

$$V_p A_p = V_b A_b \quad (34)$$

$$\text{或 } V_p = \frac{A_b V_b}{A_p} = r V_b \quad (35)$$

式中： r = 两个面积的半径

所以，从方程(31)

$$V_b = V_0 - \gamma V_b \quad (36)$$

$$\text{或 } V_b = V_0 \frac{1}{1 + \gamma} \quad (37)$$

和从方程(37)

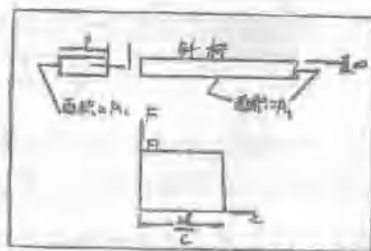


图6 不同截面积活塞和钎杆力的波形 (*Dutta* 1968)