

深孔直眼掏槽爆破排碴过程研究

林从谋 陈士海

(山东矿业学院 泰安 271019)

摘要 通过对直眼掏槽爆破过程的合理简化,建立了排碴过程的物理模型,研究了排碴规律,并通过实例对其合理性进行了验证。

关键词 爆破 掏槽 数学模型

中图分类号 TD236

掏槽爆破的目的是在平地上掏出一个孔洞,为后续起爆的炮孔爆破创造有利的新自由面,因此掏槽爆破是一种受岩石夹制性很强的爆破型式。在井巷掘进爆破(尤其是深孔爆破)中,整个爆破的成功与否,很大程度上取决于掏槽爆破的效率(即形成的槽腔面积和深度)。也就是说,井巷掘进爆破的好坏,可归结为掏槽爆破槽腔内岩碴的排弃状况。因此,深孔掏槽爆破排碴过程的研究,是井巷掘进高效爆破技术中的一个重要课题。

1 掏槽爆破分析基本假设

目前,在井巷掘进爆破中,采用的掏槽爆破有多种。在深孔爆破中主要采用直眼掏槽,它主要有如下二种类型(图1):单行空炮眼掏槽和漏斗式掏槽。二者的区别在于:前者除掘进断面被作为其爆破自由面外,还设有不装药的空炮眼作为辅助自由面。

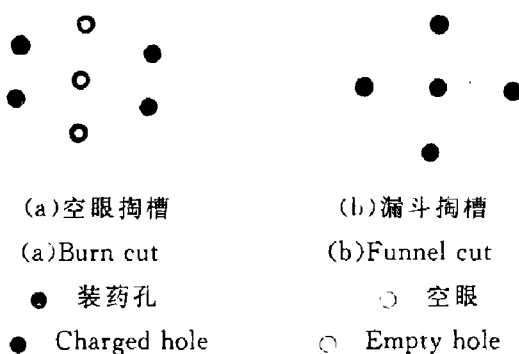


图1 直眼掏槽型式

Fig. 1 Types of parallel cut

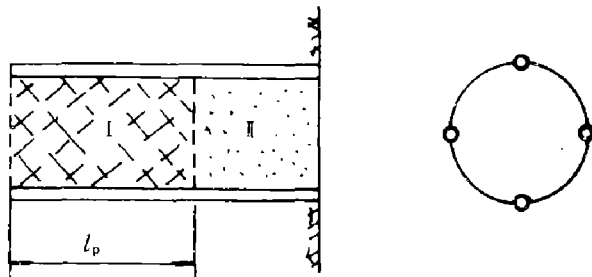
直眼掏槽实际上是单自由面下具有一定排列规律和起爆时序的柱状药卷装药的一种群孔爆破。它的特点是炮眼间距小,炸药单耗高,排碴困难。研究表明,槽腔在形成过程中,大体可分为二个阶段:第一阶段,爆炸冲击波对岩石进行粉碎性破碎,即破碎过程;第二阶段,爆生气体余压膨胀,从而将已破碎的岩石抛掷出腔外,即排碴过程。为了从理论上对排碴过程进行分析,我们作如下基本假设:

(1)爆炸应力波对槽腔内岩石仅使其变形破碎,但对其抛掷速度的影响很小,可忽略不计;(2)岩碴在抛掷运动过程中,不再发生二次破碎;(3)岩体破碎结束后,爆生气体膨胀抛掷岩块,并迅速向已破碎岩体渗流;(4)掏槽炮孔堵塞良好;(5)腔壁平整,岩块与腔壁之间摩擦系数为 $\tan\phi_0$ 。

根据上述假设,槽腔内岩石在开始向外抛掷运动过程中,爆破对岩石的破碎过程已经结束,此时可以将腔内的岩碴看成为松散体,它的运动规律可用散体力学理论描述。

2 直眼掏槽爆破排碴过程物理模型

当掏槽眼装药同时爆炸后,槽腔内的岩石被过度破碎,此时爆生气体迅速渗入已破碎



I. 爆生气体渗流区; II. 爆生气体未渗流区;

l_p . 装药长度

I. Percolation area of explosion gas;

II. Non-Percolation area of explosion gas;

l_p . Charge length

图 2 直眼掏槽爆破物理模型

Fig. 2 Physical model of parallel cut blasting

的岩体中。计算表明,爆生气体正向渗流速度可达几十米/秒~几百米/秒。考虑基本假设,并为简化计算,进一步假设爆生气体的渗流仅发生在装药段 l_p 范围内。因此,槽腔内岩石碎块的排弃运动可分为两个区域进行计算: I 爆生气体渗流区; II 爆生气体未渗流区(图 2)。

2.1 爆生气体渗流区(I区)

I 区内含有高压气体和碎块(松散体),根据掏槽爆破岩石破碎特点,槽腔内的岩石遭受粉碎性破碎,因此可以认为:在该区内高压气体均匀地渗流到松散体中,松散体随着高压气体的体积膨胀向外运动。

I 区内高压气体在自身膨胀带动该区内碎块向外运动的同时,还推动 II 区的碎块向外抛射。

2.2 爆生气体未渗流区(II区)

在爆生气体未渗流区内,仅含有岩石碎块(松散体)。统计理论证明,散体的运动满足流体运动方程组,即满足流体力学运动方程和连续性方程。当然其中的密度 ρ , 速度 \vec{u} 和应力张量 p_{ij} 都是统计意义上的平均值。考虑到槽腔内岩石碎块只能向一个方向运动,且岩块在膨胀压力作用下产生的体密度变化是微量,可以忽略不计(视岩块为刚体)。该区内岩块的抛射动力来自 I 区的膨胀压力。

2.3 碎块抛出槽腔后的运动规律

当碎块被抛出槽腔后,就不再受到爆生气体膨胀压力的作用,因此它的运动规律为以碎块脱离槽腔瞬间的速度(亦称逃逸速度)为初速度,开始按照抛物外弹道规律抛射。

2.4 深孔和浅孔直眼掏槽爆破排碴过程的区别

直眼掏槽爆破中,掏槽眼的装药长度 l_p 与不装药长度 l_n 的比值 ϵ 随爆破条件不同而异(表 1)。

随 ϵ 值不同,排碴过程也略有不同。当 $\epsilon > 2$ 时,即装药段长度很大情况下(尤其是超深孔一次成井),排碴运动将主要发生在爆生气体渗透区(I区),II区由于与I区相比其长度较小,对I区的影响也较小。II区的岩块运动可进一步简化处理。当 $\epsilon < 2$ 时,由于装药段长度较小(尤其是浅孔爆破),II区的岩块运动规律对I区排碴影响较大,此时II区的岩块运动不能简化。

表1 不同爆破条件下的 ε Table 1 Ratio ε in different blasting conditions

爆破条件	$\varepsilon = l_p/l_e$
浅孔爆破(<1.8m)	<1.7
中深孔(1.8~2.5m)爆破	1.7~2.0
深孔(2.5~5m)爆破	2.0~2.5
超深孔(>5m)一次成井	>2.5

3 直眼掏槽爆破排碴过程

3.1 数学模型

对于超深孔掏槽爆破来说,槽腔内岩块的运动主要发生在爆生气体渗透区,Ⅱ区的长度与之相比很小,由此可建立如下数学模型:

3.1.1 I 区

岩块运动规律可用一维不定常流动规律来描述,它的基本方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho v) &= 0 \\ \frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} &= 0 \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{\rho^\gamma} \right) + v \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{p}{\rho^\gamma} \right) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: p, ρ 分别为岩块与爆生气体混合体的压力和密度; v 为岩块与爆生气体混合体的膨胀速度; γ 为等熵绝热指数。

$$\gamma = 1.9 + 0.6\rho \quad (2)$$

方程的初始条件为

$$\text{当 } t = 0 \text{ 时, } \begin{cases} v_0 = 0 \\ p_0 = p_b \left(\frac{1 - 0.556}{V'_0/V_a - 0.556} \right)^{4/3} \end{cases} \quad (3)$$

式中: p_b 为炸药爆压; V_a 为各装药炮孔体积总和; V'_0 为爆生气体在I区内所占体积。

当Ⅱ区岩块脱离槽腔,I区混合体自由膨胀,此时初始条件为

$$\begin{cases} v = v_m \\ p = p_m \end{cases}, \quad \text{槽腔口 } p = p'_0 \text{ (外界环境压力)}.$$

3.1.2 II 区

若用 $x(t)$ 表示 I、II 区交界面的位置,II 区内岩石碎块与腔壁的摩擦力 F 为

$$F = p' L l_c \tan \phi_0 \quad (4)$$

式中: p' 为II区岩石碎块作用到腔壁的正压力; L 为槽腔截面周长; ϕ_0 为岩石碎块与腔壁

摩擦角。

由于 II 区与 I 区相比, II 区的长度很小, 因此假设 II 区在 I 区传来的膨胀压力作用下, 作整体运动, 且区内各处压力相等。因此式(4)中的 p' 等于 I、II 区交界面的压力 p_e 。根据牛顿第二定律, II 区内岩块的运动规律为

$$p_e S - p_e L l_c \tan \phi_0 = S l_c \rho_m x''(t) \quad (5)$$

式中: ρ_m 为 II 区内岩块的平均密度; S 为槽腔截面积。式(5)可化简为

$$p_e (1 - \frac{L l_c}{S} \tan \phi_0) = \rho_m x''(t) \quad (6)$$

方程的初始条件为: $t=0, x(0)=x'(0)=0$ 。

3.2 排碴规律

由图 2 可知, 当 I 区内高压气体开始膨胀, 带动该区岩块向右运动, 且推动 II 区岩块向外运动时, I 区内将产生一簇左传稀疏波。利用特征线理论, 并考虑无粘、无热的连续流均熵关系式

$$\frac{c}{c_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \quad (7)$$

式中: ρ, c 为密度和当地音速; 下标 0 代表该参量的初始值; γ 为爆生气体和岩块混合体的等熵绝热指数, 由式(2)确定。

由式(1)可求得 I 区内左传稀疏波速度为

$$c = c_0 - \frac{\gamma-1}{2} x'(t) \quad (8)$$

压力为

$$p = p_0 \left(\frac{c}{c_0}\right)^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \quad (9)$$

或

$$p = p_0 \left[1 - \frac{\gamma-1}{2c_0} x'(t)\right]^{\frac{2\gamma}{\gamma-1}} \quad (9')$$

II 区与 I 区交界面处岩块速度和压力等于与它毗邻的 I 区混合体的速度和压力。因此式(9)式[或式(9')]确定的压力即为推动 II 区岩块整体运动的压力 p_e 。

将式(9')代入式(6), 并利用初始条件积分求解, 得 II 区岩块的运动速度为

$$x'(t) = \frac{2c_0}{\gamma-1} \left\{1 - \left[1 + \frac{\gamma+1}{2c_0} \frac{p_0}{\rho_m} \left(1 - \frac{L l_c}{S} \tan \phi_0\right) t\right]^{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}}\right\} \quad (10)$$

令

$$A = \left(1 - \frac{L l_c}{S} \tan \phi_0\right) / \rho_m$$

则式(10)可表示为

$$x'(t) = \frac{2c_0}{\gamma-1} \left[1 - \left(1 + \frac{\gamma+1}{2c_0} p_0 A t\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}}\right] \quad (11)$$

对上式进一步积分, 得 I、II 区交界面的运动规律为

$$x(t) = \frac{2c_0}{\gamma-1} \left\{t + \frac{c_0}{p_0 A} \left[1 - \left(1 + \frac{\gamma+1}{2c_0} p_0 A t\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}}\right]\right\} \quad (12)$$

上式说明:

(1) 当 $x(t) = l_c$ 时, I 区的岩块已完全脱离槽腔, 并以此时刻的速度为初速度抛射出去, 此时 I 区与 II 区的岩块运动已分开, I 区内混合体为自由膨胀(不再推动 II 区岩块)。

(2) I 区内混合体在膨胀过程中, 压力不断降低。当混合体压力降低到小于岩块与腔壁的侧向摩擦力 F_c 时, I 区内岩块就停止运动, 即 I 区内岩块停止运动的临界条件为: $p = F_c$ 。

(3) 槽腔内岩块停止运动时刻, 左传稀疏波的传播位置, 可认为是掏槽爆破的有效深度 l_d , 掏槽爆破效率 η 为: $\eta = l_d / (l_p + l_c)$ 。

(4) 当槽腔内的岩块停止运动时, 滞留在槽腔内的岩块体积 V_p 反映了掏槽爆破槽腔的洁净度 $\phi = \frac{V_p}{V_d}$, V_d 为掏槽有效深度内槽腔体积, $V_d = S l_d$ 。

3.3 实际算例

本文所述掏槽爆破分析曾用于山东宁阳石屯煤矿二采区煤仓一次爆破成井施工设计。该煤仓设计直径 3.5m, 深 15m, 根据钻孔揭露的岩芯看, 主要穿过的岩层为中粒砂岩, 且岩质均匀, 无裂隙, 密度为 2.45g/cm^3 , 单轴抗压强度 70MPa, 纵波速度为 2400m/s。根据一次成井爆破方案设计, 为了避免煤仓的上口和下口出现喇叭口, 在此二部位首先采用预裂爆破开口, 开口高度上、下各 1.5m, 中间剩余的 12m 采用一次爆破。深孔一次成井爆

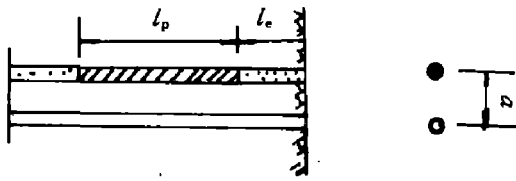


图3 装药结构

Fig. 3 Charge constitution

破的成功与否(是否爆通)取决于掏槽形成的槽腔质量(排碴的干净)。

采用螺旋掏槽形式(图3), 孔深 12m, 分三段装药, 在每一段内掏槽孔连续耦合装药, 装药长度 3m, 堵塞长度 1m。掏槽孔直径 73mm, 空孔直径 89mm, 掏槽孔与空孔间距 300mm。采用百毫秒延期雷管、2# 煤矿铵梯

炸药。为了保证可靠掏槽, 采用上述方法对其计算分析, 同时也是通过实例, 验证该方法的正确性, 计算过程如下。

(1) 槽腔参数

$$\text{周长 } L = \frac{\pi}{2}(d_1 + d_2) + 2a = 0.85 \text{m}$$

$$\text{面积 } S = \frac{1}{2}(d_1 + d_2)a + \frac{\pi}{8}(d_1^2 + d_2^2) = 2.95 \times 10^{-2} \text{m}^2$$

$$\text{体积 } V_0 = S l_p = 8.85 \times 10^{-2} \text{m}^3$$

式中: d_1 为掏槽孔直径; d_2 为空孔直径; a 为掏槽孔与空孔间距; l_p 为装药长度。

(2) 炸药在炮孔中爆轰参数

$$\text{爆轰压力 } p_b = \frac{1}{4} \rho D^2 = 3240 \text{MPa}$$

$$\text{音速 } c_b = D - \frac{1}{4} D = 2700 \text{m/s}$$

$$\text{密度 } \rho_b = \frac{4}{3} \rho = 1.33 \times 10^3 \text{kg/m}^3。$$

式中: ρ 为炸药密度。

(3) I 区初始膨胀压力 p_0

$$\text{爆生气体在 I 区所占体积 } V'_0 = \frac{\pi}{4}(d_1^2 + d_2^2)l_p = 3.12 \times 10^{-2} \text{m}^3$$

$$\text{装药炮孔体积 } V_a = \frac{\pi}{4}d_1^2 l_p = 1.26 \times 10^{-2} \text{m}^3$$

$$\text{由式(3)得 } p_0 = 32.4 \times \left(\frac{1 - 0.556}{3.12 \times 10^{-2} / (1.26 \times 10^{-2}) - 0.556} \right)^{4/3} = 1079 \text{MPa}$$

(4) I 区平均密度 ρ_{m1}

考虑岩石破碎空隙全部由爆生气体渗透,且岩石本身体积不变,故岩石碎块密度不变

$$\rho'_{m1} = 2.45 \times 10^3 \text{kg/m}^3$$

爆生气体膨胀到 V'_0 体积时密度为

$$\rho''_{m1} = \left(\frac{p_0}{p_b} \right)^{1/3} \rho_b = 0.92 \times 10^3 \text{kg/m}^3$$

$$\rho_{m1} = [\rho'_{m1}(V_0 - V'_0) + \rho''_{m1}V'_0] / V_0 = 1.91 \times 10^3 \text{kg/m}^3$$

(5) I 区音速 c_0

爆生气体音速

$$c'_0 = (\rho''_{m1} / \rho_b)^{2/3} c_b = 1557.62 \text{m/s}$$

因为 I 区内岩石碎块的运动主要取决于爆生气体的膨胀,故认为混合体音速 c_0 主要取决于爆生气体音速 c'_0 ,且存在比例关系

$$c_0 = Kc'_0$$

式中: K 为比例系数

(6) I 区内左传波参数

当 $x(t) = l_c = 1 \text{m}$ 时,取岩块与腔壁摩擦角 $\phi_0 = 30^\circ$, $K = 0.4$, $A = 6.79 \times 10^{-3}$,代入式(1)得

$$t_m = 2.29 \times 10^{-3} \text{s}$$

代入式(11)得 $x'(t_m) = 538.71 \text{m/s}$

该值即为 II 区岩块脱离槽腔向外抛射的初速度。将该值代入式(8)、(9)得 II 区与 I 区脱离后的 I 区内左传波参数值

$$c = 84.34 \text{m/s}$$

$$p = 2.68 \times 10^6 \text{Pa}$$

可以看出此时 I 区内仍有较高的压力。

(7) I 区岩石碎块混合体的自由膨胀

对于本算例来说,当 II 区与 I 区脱离后, I 区的碎块以超音速流出槽腔,在槽腔口不再产生新的左传反射稀疏波,或者说,槽腔口反射波的绝对速度为零(即在槽腔口形成一道驻立不动的波)。

随着混合体的膨胀,槽腔内的压力值随之降低,当压力降至 F_c ,岩块就停止排弃运动。

$$F_c = \frac{\rho_{m1} \times V}{S} \tan \phi_0$$

式中: V 为剩余岩块的体积; S 为槽腔周边面积。即

$$F_c = [2.45 \times 9.8 \times 10^3 \times \tan 30^\circ / (0.85 \times 4)] \times V = 4.16 \times 10^3 V \text{ Pa}$$

若取剩余岩块的最大值 $V = V_0 - V'_0 = 5.73 \times 10^{-2} \text{ m}^3$, 则: $F_c = 2.38 \times 10^2 \text{ Pa}$

而槽腔内的压力仍远远大于此值, 因此岩块仍能不断地被抛出。

通过计算分析, 证明采用上述爆破参数, 能实现理想的掏槽效果。实践也表明, 采用上述爆破参数, 保证了 94 年 5 月该煤仓的一次爆破成井施工的顺利完成, 获得了很好的经济效益。

5 结 语

由于目前对掏槽爆破排碴过程还很少研究, 因此笔者在这方面进行了尝试和探索, 试图能揭示这一高速过程的机理。所采用的方法虽然在一次爆破成井施工实践中已被证明可行, 但还存在着许多缺陷, 有待今后进一步完善。

参 考 文 献

- 1 杨人光, 等. 建筑物爆破拆除. 中国建筑工业出版社, 1985. 273~278
- 2 黄元清. 爆破介质抛掷运动的观测与研究. 土岩爆破文集(一), 冶金工业出版社, 1980
- 3 杨人光, 等. 爆破抛体加速运动的渗流模型计算. 力学学报, 1984, 16(1): 62~72
- 4 张连玉, 等. 爆炸气体动力学基础. 北京工业学院出版社, 1987. 203~305

STUDIES ON THE FRAGMENT DISCHARGE PROCESS IN DEEP HOLE PARALLEL-CUT BLASTING

Lin Chongmou, Chen Shihai

(Shan-Dong Mining Institute, Tai'an, 271019)

ABSTRACT Physical models of fragment discharge process are established and the fragment discharge law is discussed by the rational simplification of parallel-cut blasting process in this paper. Verification of the process is demonstrated by an example.

KEY WORDS blasting, cut, mathematical model