

原创技术策源地

# 巷道爆破掘进炮孔堵塞长度合理确定

Reasonable calculating stemming length in the bore hole of blasting roadway

秦声<sup>1,2</sup>, 吴德义<sup>1</sup>, 樊凌川<sup>3</sup>

(1. 安徽建筑大学 建筑结构与地下工程省级重点实验室, 安徽 合肥 230601;

2. 中国铁路上海局集团有限公司芜湖工务段, 安徽 芜湖 241000; 3. 浙江省浙中地质工程勘察院, 浙江 金华 321000)

**摘要:**合理确定巷道爆破掘进炮孔堵塞长度对于保证巷道安全高效掘进至关重要。目前相关计算理论都没有考虑炮泥运动过程为变加速运动, 计算结果与工程实际不尽一致。本文对以往计算方法加以改进, 考虑炮泥变加速运动的因素, 并结合某矿区工程实际来确定炮泥堵塞长度大致范围。结果表明与该计算过与工程实际基本一致, 说明该方法的合理性。

**关键词:**堵塞长度; 炮孔; 爆破

中图分类号: TD235

文献标志码: A

文章编号: 1672-609X(2021)04-0001-04

**Abstract:** Making sure the length of stemming in the bore hole which can keep an effectively excavation. What's more, the relative calculating theory didn't consider the acceleration change which must be disparate with the reality. This paper will improve the calculation considering the previous methods as well as combine with the actual works to select the proper calculating range, which shows that the improved method is basically consistent with the previous project experience, confirming the rationality of this method.

**Key words:** length of stemming; bore hole; blasting

## 1 前言

在爆破过程中, 通常认为炸药通过雷管引爆, 产生爆炸冲击波将岩石破碎, 破碎后形成粉碎区和裂隙区, 再经过爆生气体压力作用下将裂隙扩大从而使岩石达到破碎的目的。大量工程经验和理论表明<sup>[1]</sup>, 在工程爆破中, 不同堵塞长度不会影响爆破冲击波大小, 但会影响爆生气体压力扩张岩石裂缝的时间, 导致爆破效果不明显, 爆生气体压力作用下炮泥在炮孔中运动必须具有一定作用时间, 保证爆生气体更好地贯穿岩石裂缝, 使爆破效果更加明显。寻找合理炮泥堵塞长度, 对于提高爆破效果, 节约成本等有很重要的意义。

在以往研究中, 罗勇<sup>[2]</sup>、李延龙<sup>[3]</sup>、王琛<sup>[4]</sup>等认为在计算炮泥运动时间时, 利用炮泥冲出炮孔时刻的加速度作为炮泥的加速度大小, 认为炮泥在运动

过程中加速度为定值, 而实际上随着炮泥的运动, 炮孔内的爆生气体压力的变化导致炮泥的驱动力不断降低, 炮泥与孔壁的接触面变化的同时炮泥的阻力也在降低。因此可以得出, 炮泥在运动时的加速度是随着位移量的变化而变化的动态过程, 若利用炮泥冲出加速度作为整体的运动加速度, 可能会产生计算结果与实际情况不吻合。

## 2 炮泥运动规律

炮泥运动时间 $t_s$ 大致可以分为两个阶段: 一是炮泥在爆炸产生冲击波作用下压缩时间 $t_1$ , 二是炮泥压缩后在爆生压力作用下冲出炮孔的时间 $t_2$ 。大量实验表明, 由于爆炸应力波在岩石中传播速度比在炮泥中传播速度快, 因此炮泥在冲击波作用下的压缩时间 $t_1$ 可以忽略。分析过程中可作如下假设:

- (1) 爆生气体同时作用于炮孔各个方向。
- (2) 忽略炮泥压缩时间。
- (3) 岩石破碎后固体物质体积不变。

图1所示为炮孔堵塞示意图。相关文献<sup>[1,4]</sup>的研究结果表明, 使用经典力学方法来计算爆生气体作用下堵塞物加速度为

$$a = \frac{pd_b - 4\lambda fp(l_s - x)}{d_b l_s \rho} \quad (1)$$

[作者简介] 秦声(1995-), 男, 安徽阜阳人, 硕士, 主要从事地下工程研究。

[基金项目] 国家自然科学基金(51374009, 51674005); 安徽省自然科学基金(1608085ME105)

[引用格式] 秦声, 吴德义, 樊凌川. 巷道爆破掘进炮孔堵塞长度合理确定[J]. 中国矿山工程, 2021, 50(4): 1-4.

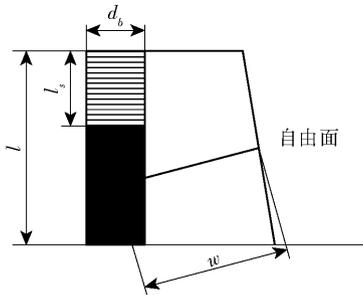


图1 炮孔堵塞示意图

$$\lambda = \frac{\mu_d}{1 - \mu_d} \quad (2)$$

式中:  $d_b$ ——炮孔内径, m;

$p$ ——爆轰压力, MPa;

$f$ ——孔壁的摩擦系数, 一般取 0.05;

$l_s$ ——炮孔堵塞长度, m;

$\rho$ ——炮泥密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$x$ ——炮泥不同时刻到达的位置, m;

$\mu_d$ ——炮泥的动态泊松比, 按照工程经验一般取  $\mu_d = 0.8$ ;

$\lambda$ ——侧压力系数。

由于炮泥在爆生气体压力作用下, 必会在周围产生对孔壁的侧压力, 从而产生摩擦力, 而且爆生气体随着炮泥的运动, 空腔体积会增大, 导致孔内压力的变化, 同时随着炮泥接触面不断减少, 摩擦力也会降低。因此炮泥的加速度是一个动态变化的值。从式(1)中看出, 要使炮泥在炮孔中受到爆生气体作用下推动, 必须在炮泥运动开始时有  $a > 0$ , 即  $x = 0$  时, 则

$$l_s < \frac{d_b}{4\lambda f} \quad (3)$$

由式(3)看出, 最大堵塞长度与炮泥种类、炮孔直径、炮泥与孔壁摩擦系数有关。但是由于炮泥在爆生气体压力作用下可能会发生破坏, 因此炮泥长度不一定必须要小于理论最大长度。

按照<sup>[5-7]</sup>爆轰产物的等熵关系得

$$p_0 V_0^\gamma = p V^\gamma \quad (4)$$

式中:  $p_0$ ——爆生气体初始压力, MPa;

$V_0$ ——爆生气体初始体积,  $\text{m}^3$ ;

$V$ ——炮泥产生位移后, 不同时刻的气体体积,  $\text{m}^3$ ;

$\gamma$ ——等熵指数, 一般取 3。

初始气体体积即为炮孔装药段的体积, 本文采用连续装药的形式。当炮泥开始运动后, 气体体积

发生变化, 由于在爆炸冲击波作用下, 产生粉碎圈和裂隙圈, 但是在粉碎圈内由于炮泥仍在炮孔中, 炮孔内仍处于一个相对密闭的环境, 粉碎的岩石散体仍占据炮孔内体积。因此炮孔内的空隙体积变化仅与炮泥的位移量和裂缝体积有关, 根据文献<sup>[8]</sup>知, 可忽略裂缝的体积对孔隙体积的变化。

因此炮孔内的初始空隙体积和产生位移后的孔隙体积分别由式(5)、(6)得出

$$V_0 = \pi \frac{d_b^2}{4} (l - l_s) \quad (5)$$

$$V = \pi \frac{d_b^2}{4} (l - l_s + x) \quad (6)$$

参照文献, 当炮孔内连续装药时, 则

$$p_0 = \frac{\rho_0 D^2}{2(\gamma + 1)} K_d^{-2\gamma} n \quad (7)$$

$$K_d = \frac{d_b}{d_c} \quad (8)$$

式中:  $l$ ——炮孔长度, m;

$K_d$ ——装药不耦合系数;

$d_c$ ——炮孔内装药直径, m;

$n$ ——爆轰压力增大系数, 范围在 8 ~ 11, 一般取 10;

$D$ ——炸药爆速, m/s;

$\rho_0$ ——炸药密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

综合上述式(1) ~ (8), 可得出炮泥运动加速度方程为

$$a = \frac{\rho_0 D^2 K_d^{-6} \cdot 10 \left( \frac{l - l_s}{l - l_s + x} \right)^3 [d_b - 4\lambda f (l_s - x)]}{8\rho d_b l_s} \quad (9)$$

从式(9)中看出, 影响炮泥加速度的因素很多, 装药密度  $\rho_0$ 、炸药爆速  $D$ 、炮孔直径  $d_b$ 、装药直径  $d_c$ 、炮孔长度  $l$ 、堵塞长度  $l_s$ 、炮泥种类等。炮泥加速度的大小直接影响炸药爆破时在炮孔内的作用时间。对此, 要保证爆破效果, 延长炮泥的冲出时间, 从式(9)中可以看出, 可以降低炸药的装药密度, 选用低爆速的炸药, 选择合适的不耦合装药系数和炮孔参数。此外, 式中堵塞长度  $l_s$  的增大也会降低加速度的大小, 但是根据式(3)看出,  $l_s$  值过大会导致炮泥无法冲出炮孔。

### 3 岩石破碎时间

炮泥封堵长度过短会导致炮泥过早冲出炮孔, 从而使炮孔内爆生气体压力降低过快, 影响爆破效

果;堵塞长度加大虽然可以保证炸药在炮孔内的作用时间,但是由于降低了装药量,且从式(9)可以看出,堵塞长度过大时,导致炮泥无法冲出炮孔,使堵塞段爆破不充分而出现“挂门帘”的现象。为了充分发挥炮泥和炸药相互作用的效果,应满足炮泥在冲出炮孔之前,炮孔内岩石已经充分破碎,松动圈和裂隙圈均已形成,即:

$$t_s \geq t_d \quad (10)$$

式中: $t_s$ ——炮泥运动时间,s;

$t_d$ ——岩石破碎时间,s。

岩石破裂的时间为<sup>[9]</sup>

$$t_d = 2 \left[ k + \sqrt{1 + \left( \frac{c_p}{D} \right)^2} \right] \frac{w}{c_p} \quad (11)$$

式中: $k$ ——与 $\mu$ 有关的系数, $\mu$ 取0.1~0.3时, $k$ 取1.6~2.1;

$c_p$ ——岩石纵波速,m/s;

$w$ ——最小抵抗线,mm;

$D$ ——炸药爆速,m/s。

参照以往研究,对于采用加速度的计算做出一些改进,按照运动方程知物体的加速度,等于其位移对时间的二阶导,则

$$a = \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (12)$$

由于加速度和速度的取值随着炮泥的运动在变化,不能直接进行计算,而且对于式(12)的边界条件为

$$\begin{cases} x_{t=0} = 0 \\ x_{t=t_d} = l_s \\ v_{t=0} = 0 \end{cases} \quad (13)$$

而式子展开后有四未知量,明显条件不足直接计算无法得出结论。对于这种变加速的情况,可近似认为在某一小段位移内,加速度是不变的,在这一小段位移上计算运动时间 $t_i$ ,按照下式计算炮泥运动总时间

$$t_s = \sum_{i=1}^n t_i \quad (14)$$

矿用炸药单卷长度一般为20 cm,炮孔深度一般是以米为单位。由于将整段位移分成若干份认为每1 cm范围内加速度为定值,以提高精确性。因此对于式(9)采用梯形公式来逼近计算每一段的加速度 $a_i$ 为

$$\begin{cases} x_1 = \frac{1}{2} a_1 t_1^2 \\ x_2 = \frac{1}{2} a_2 t_2^2 + a_1 t_1 t_2 \\ x_3 = \frac{1}{2} a_3 t_3^2 + (a_1 t_1 + a_2 t_2) t_3 \\ x_4 = \frac{1}{2} a_4 t_4^2 + (a_1 t_1 + a_2 t_2 + a_3 t_3) t_4 \\ x_5 = \frac{1}{2} a_5 t_5^2 + \dots \end{cases} \quad (15)$$

式中: $x_i$ ——第 $i$ 段距离,m;

$a_i$ ——第 $x_i$ 段长度范围内的加速度平均值,m/s<sup>2</sup>;

$t_i$ ——第 $x_i$ 段长度范围内所用时间,s。

### 4 算例分析

按照上述方法,结合某矿区北四采区工程实践,采用2号矿用铵梯炸药,其中装药密度 $\rho_0 = 1\ 000$  kg/m<sup>3</sup>,爆速 $D = 3\ 600$  m/s,装药不耦合系数 $K_d = 32/27$ , $n = 10$ ,炮泥密度 $\rho = 1\ 850$  kg/m<sup>3</sup>,装药长度 $l = 2.0$  m,炮孔直径 $d_b = 32$  mm,炮泥侧压比系数 $\lambda = 0.25$ ,炮泥泊松比 $\mu = 0.25$ ,抵抗线 $w = 0.5$  m,岩石动态泊松比 $\mu_d = 0.2$ ,单轴抗压强度 $\sigma = 90$  MPa,纵波速 $c_p = 5\ 000$  m/s为例,当堵塞长度 $l_s = 0.5$  m时,得出加速度和位移曲线如图2所示。

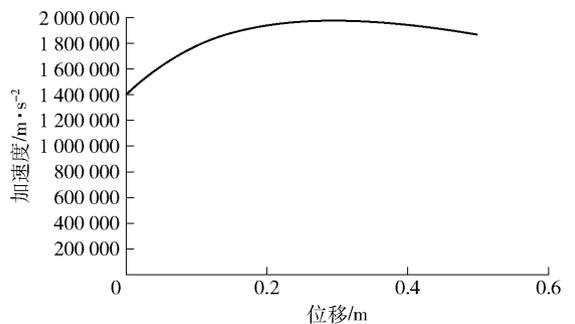


图2 炮泥运动加速度随位移量变化示意图

由图2可以看出,利用 $a = a_{t=t_d}$ 计算可能与实际情况有一定的偏差。根据式(9),代入不同的炮孔堵塞长度 $l_s$ ,对比炮泥定加速与变加速运动,计算结果见表1。

由式(11)可以得出岩石破碎时间为 $t = 7.423 \times 10^{-4}$  s,根据表1计算结果,对比变加速与定加速运动计算表明:当考虑变加速运动时,炮孔堵塞长度约为0.5 m,均在工程经验值40~60 cm<sup>[10]</sup>。

该矿区北四采区的工程实际爆破图表为周边

表1 不同堵塞长度炮泥运动时间( $10^{-4}$  s)

$l_s/m$	$l_s=0.2$		$l_s=0.3$		$l_s=0.4$		$l_s=0.5$		$l_s=0.6$	
	定加速	变加速								
1.5	477	1.93	718	3.26	962	9.62	1 207	7.72	1 457	12.88
2.0	477	1.90	717	3.18	958	9.58	1 201	7.38	1 445	12.04
2.5	476	1.88	716	3.14	956	9.56	1 197	7.20	1 440	11.64

眼、辅助眼眼深为 2.0 m,炮孔堵塞长度为 0.5 m,计算结果与该矿区工程实际采用参数一致。而罗勇采用方法对于小直径浅眼炮孔,计算炮泥运动时间与本文计算结论有很大差异,与该矿实际爆破参数也不一致,因此证明炮泥加速度的变化不可忽略。

参照此计算方法,采用相同的装药不耦合系数、抵抗线、炮孔直径等,仅改变岩性条件可以得出不同炮孔深度的堵塞长度,具体见表 2。

表2 不同岩性、炮孔深度条件下的堵塞长度 m

$f$	2~3	4~5	6~7	8~10	10~15
$l=1.5$	0.46	0.5	0.55	0.58	0.61
$l=2.0$	0.47	0.51	0.56	0.59	0.62
$l=2.5$	0.47	0.51	0.56	0.59	0.62

表中  $f$  代表岩石坚固性系数,通过表 2 结果可以看出不同岩性条件下堵塞长度基本满足工程经验值 40~60 cm。

## 5 结论

本文在炮泥运动规律上考虑了炮泥变加速运动,结合某矿区的实际爆破参数得出,炮泥的变加速运动不可忽略,可以得到以下结论:

(1)考虑变加速运动可以更加精确的计算出炮泥长度其结果在该矿区应用取得良好效果,在改变岩性条件时,计算结果仍然符合工程经验范围值。

(2)在浅眼爆破中,堵塞长度随着岩石强度的

增大而增大。

(3)对于中深孔爆破,由于装药量大导致堵塞物体会因爆生气体压力过大而在发生破坏,堵塞物的理论最大值与实际值会不一致。

### [参考文献]

- [1] 阙加锋. 炮泥作用浅析[J]. 能源与环境,2017,(3): 100-102.
- [2] 罗勇,沈兆武. 钻孔爆破中炮孔堵塞效果及堵塞长度的研究[J]. 力学与实践,2006,28(2):48-52
- [3] 李延龙,史秀志,刘博,等. 水炮泥合理填塞长度的试验研究[J]. 爆破,2015,32(2):11-16,38
- [4] 王琛,文忠,曹梦宇. 隧道爆破中炮泥的作用与堵塞长度计算[J]. 采矿技术,2011,11(5):118-120
- [5] 李银成. 爆轰产物物态方程(I)——爆热、爆轰产物的等熵方程和物态方程[J]. 高压物理学报,1998,12(4):271-280
- [6] 赵铮,陶钢,杜长星. 爆轰产物 JWL 状态方程应用研究[J]. 高压物理学报,2009,23(4):277-282
- [7] 吴德义,刘克成. 反向起爆水炮泥堵塞长度的研究[J]. 爆破器材,2002,31(4):26-28
- [8] 凌同华,曹峰,李洁. 菱形楔形混合掏槽爆破的数值模拟研究与应用[J]. 爆破,2016,33(4):9-14
- [9] 杨波涛. 中深孔爆破技术在大断面岩巷掘进施工中的应用[J]. 煤,2015(6):39-39
- [10] 喻长智,古德生,杜炜平,等. 炮孔堵塞长度的计算[J]. 矿冶工程,1999,19(4):9-11