

# 炮孔合理堵塞长度的研究

罗勇 沈兆武

(中国科学技术大学力学与机械工程系,安徽合肥 230026)

**【摘要】** 基于爆破理论和应力波理论,分析了炮孔堵塞物的作用机理及其在炮孔中运动过程,推导出了炮孔堵塞长度的计算公式,并对合理炮孔堵塞长度的选取进行了现场试验,试验结果说明了理论分析的正确性,可为爆破实践提供理论依据。

**【关键词】** 爆破理论;应力波理论;堵塞

**【中图分类号】** TU 751.9

## Study on Stemming Length in Hole-charged Blasting

Luo Yong Shen Zhaowu

(Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei Anhui 230026 China)

**【Abstract】** According to blasting theory and stress theory, stemming mechanism and movement of stemmed material in blasting are analyzed and the expression of length of stemmed material is deduced. The blasting experiment with different stemming length is carried out and the experimental results show the theoretical derivation and analysis are correct. It will supply parameters design of blasting with the theoretical gist.

**【Key Words】** blasting theory; stress wave theory; stemming

## 0 引言

爆破法被广泛应用于矿山以及其它地下与地面岩石工程和土层工程施工中。炮孔堵塞是爆破施工中的一个重要环节,堵塞材料的选择、堵塞结构及其几何参数等对爆破效果都有重要的影响。合理的炮孔堵塞,可以增加孔内炸药化学反应的完全程度,并能减少孔口飞石和降低孔口空气冲击波的强度,延长孔内爆炸气体作用时间,从而提高炸药能量利用率,改善爆破效果。因此,炮孔堵塞问题早已引起爆破工作者的重视。为了能适应现代工程爆破发展的需要,关于堵塞作用机理、堵塞材料的运动规律,爆轰气体压力和岩体应力场分布的变化与堵塞参数的关系,最优堵塞参数和堵塞结构等问题急需深入研究。因此从理论上阐明炮孔堵塞作用机理,寻求合理堵塞参数,提高爆破效果、降低爆破成本,具有十分重要的意义。

## 1 炮孔堵塞的作用机理

理论和实践表明,炮孔堵塞与不堵塞时对爆炸冲击波的波峰值影响虽不明显,但其后压力迅速降低的速率,特别是爆生气体压力的降低速率及其对岩石产生破裂作用的时间,都与是否堵塞有关。爆

炸瞬间,爆炸冲击波(应力波)将集中向结构弱面——炮孔堵塞段作用。炮孔未堵塞或堵塞长度过短,爆生气体很容易从孔口泄出。因此,孔内压力迅速降低,从而将大大减弱膨胀压力对岩石的破裂作用;而炮孔堵塞得好,则可阻止爆轰气体过早地从孔口中冲出,爆炸气体膨胀作用于炮孔壁上的压力才能达到最大,作用时间延长、岩石破碎程度更好<sup>[1-4]</sup>。

炸药爆炸后,爆生气体要冲出炮孔口,必须克服堵塞物的惯性阻力及其与炮孔孔壁之间的摩擦阻力。正是由于上述阻力的存在使得炮孔内爆炸产生的高压气体作用时间相对延长,增加了炸药化学反应的完全程度,从而得到更充分的爆炸能;并使由应力波作用生成的裂隙在受到高压气体的气楔作用后加速发展,高压气体向裂隙中楔入,不仅提高了破岩效果,还减小了岩石的抛掷距离,同时可降低空气冲击波强度,并改善作业环境<sup>[2-3]</sup>。

要达到较好的爆破效果,一方面要选择性能良好的炸药,同时对药包及装药结构进行优化设计;另一方面,要把炮孔堵塞好。也可以说在同一爆破条件下,爆破效率的高低与炮孔堵塞质量的好坏有关。

## 2 堵塞物在炮孔中运动分析

炮孔堵塞物在炮孔中的运动可以分为两个过程:一是微观运动即波动过程,即爆生气体压缩堵塞物的过程;二是堵塞物的宏观运动即移动过程。为了便于讨论,作如下假设:1)炸药爆轰瞬间完成,且爆轰气体沿轴向运动速度比气体膨胀引起的炮孔周围介质径向速度大得多,以致后者可以忽略,因此爆轰气体沿炮孔轴向的运动可以近似看成一维流动;2)爆生气体瞬间同时作用于炮孔空间的各个部位和方向,堵塞材料的被压缩过程就是冲击压缩波在其中的传播过程;3)爆生气体为理想气体;4)炮泥为完全非弹性体,其空隙率很小,忽略其压缩变形,堵塞材料在炮孔中的整体移动相当于刚体移动。

### 2.1 堵塞物开始移动前所需的时间 $t_1$

炮孔堵塞物的整体移动是在爆生气体作用于堵塞物时,堵塞物内部形成的压应力波由炮孔里端传播到外端孔口处瞬间开始的。由于近似地认为炮孔堵塞施工时已将堵塞物捣实,即认为在爆生气体作用下堵塞物不再发生压缩变形,因而堵塞物开始移动前所需的时间  $t_1$  即为堵塞长度与应力波传播速度之比。

### 2.2 堵塞物冲移出炮孔所需的时间 $t_2$

由于惯性作用,堵塞物冲出炮孔需要一定的时间。当应力波传播到堵塞物外端时,堵塞物被看作刚体开始整体移动(见图1)。

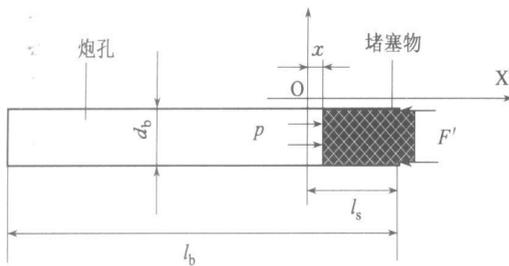


图1 炮孔堵塞物运动力学模型

堵塞物的运动规律服从牛顿第二定律,即

$$F = m \cdot a \quad (1)$$

由图1有

$$F = [(\pi \cdot d_b^2 \cdot p) / 4] - F' \quad (2)$$

$$m = d_b^2 \cdot l_s \cdot \rho \cdot \pi / 4 \quad (3)$$

式中: $F$ 为炮孔堵塞物所受合力,包括爆生气体的压力  $p$  和炮孔孔壁的摩擦阻力  $F'$ ;  $m$  和  $a$  分别为堵塞物的质量和运动加速度;  $d_b$  为炮孔直径,与堵塞物直径相等;  $l_s$  为堵塞长度;  $\rho$  为堵塞物的密度;  $p$  为炮孔内气体压力。

在爆生气体静压作用下,堵塞材料内产生轴向

压应力,压应力就等于  $p$ 。由于堵塞材料轴向受力,径向必然发生膨胀,但孔壁的约束作用不允许其发生径向变形,这样堵塞物就必然给炮孔施以压力作用。根据泊松效应,结合图1,堵塞物在炮孔内移动时所受的摩擦阻力  $F'$  可由下式计算

$$F' = \pi \cdot d_b \cdot (l_s - x) \cdot \lambda \cdot f \cdot p \quad (4)$$

$$\lambda = \frac{\mu_d}{1 - \mu_d} \quad (5)$$

式中: $F'$ 为堵塞物移动时所受炮孔的摩擦阻力,其值随堵塞物的运动而逐渐减小; $x$ 为堵塞物在炮孔中的位移,与时间有关; $f$ 为堵塞物与孔壁的摩擦系数; $\mu_d$ 为动态泊松比。

由式(1)~式(5)可得堵塞物在炮孔中运动加速度为

$$a = [d_b \cdot p - 4\pi \cdot (l_s - x) \cdot \lambda \cdot f \cdot p] / (d_b \cdot l_s \cdot \rho) \quad (6)$$

根据堵塞物的运动方程,其完全移动出炮孔时的总移动距离为炮泥的堵塞长度  $l_s$ 。因有

$$l = \frac{1}{2} a \cdot t^2 \quad (7)$$

则由式(6)和式(7)有

$$t = \left[ \frac{2l_s}{a} \right]^{\frac{1}{2}} = \left\{ (2\rho \cdot d_b \cdot l_s^2) / [d_b \cdot p - 4\pi \cdot (l_s - x) \cdot \lambda \cdot f \cdot p] \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

根据假设,堵塞物在冲出炮孔前,炮孔体积的增大是堵塞物向炮孔孔口移动  $x$  造成的。假定柱状药包爆轰瞬间完成且爆生气体在炮孔中等熵膨胀,则在堵塞物在冲出炮孔前,爆生气体压力  $p$  随堵塞物运动而衰减的规律为<sup>[4]</sup>

$$p = \left[ V_0 / \left( V_0 + \frac{1}{4} \pi \cdot d_b^2 \cdot x \right) \right]^\gamma \cdot p_a \quad (9)$$

式中: $\gamma$ 为绝热(等熵)指数;  $d_b$ 为起爆前炮孔直径;  $p_a$ 为爆生气体充满炮孔瞬间对炮孔壁的初始冲击载荷;  $V_0$ 为起爆前炮孔除去堵塞段的体积;  $V$ 为堵塞物移动  $x$  后炮孔对应的炮孔体积。  $l_b$  为炮孔长度;  $l_s$  为炮孔堵塞长度。

根据文献[5],炮孔内轴向连续装药时,有

$$p_a = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 \cdot \left( \frac{d_c}{d_b} \right)^6 \cdot n \quad (10)$$

若炮孔内轴向不连续装药,则有

$$p_a = \frac{1}{8} \rho_0 D^2 \cdot \left( \frac{d_c}{d_b} \right)^6 \cdot l_e \cdot K_z \quad (11)$$

式中: $\rho_0$ 为炸药密度;  $D$ 为炸药爆速;  $d_c$ 为炮孔内装药直径;  $l_e$ 为轴向装药系数,  $l_e = \frac{l_c}{l_b - l_s}$ ;  $l_c$ 为装

药长度;  $n$  为爆炸产物膨胀碰撞孔壁时的压力增大系数,一般取 10;  $K_z$  为应力波折射系数,与岩石的波阻抗有关。

由式(8)~式(11)可得

$$t = \sqrt{\frac{2l_s}{a}} = \sqrt{\frac{2\rho d_b l_s^2}{[d_s - 4\pi(l_s - x)\lambda \cdot f] p_a} \cdot \left[ \frac{(l_b - l_s) + x}{l_b - l_s} \right]^r} \quad (12)$$

故堵塞物完全移动出炮孔所需时间为  $t_2$  为

$$t_2 = t|_{x=l_s} = \sqrt{\frac{2\rho \cdot l_s^2}{d_b \cdot p_a} \cdot \left( \frac{l_b}{l_b - l_s} \right)^\gamma} \quad (13)$$

从式(13)可以看出,在炮孔参数(炮孔深度和直径)一定时,堵塞物冲出炮孔所需的时间  $t_2$  与炮孔堵塞长度  $l_s$ ,堵塞物的密度  $\rho$  以及炮孔内气体压力  $p_a$  密切相关。增大炮孔堵塞长度  $l_s$  和堵塞物的密度  $\rho$ ,或在炸药类型确定的前提下,可以优化装药结构,设计合理的装药不耦合系数,适当降低爆轰气体的压力  $p_a$  都能有效地延长堵塞物在炮孔中移动时间  $t_2$ ;当然,在相同条件下,选用高摩擦系数的堵塞材料肯定也能延长爆生气体对介质的作用时间。

### 3 炮孔堵塞长度

堵塞材料过短时,将会过早地冲出炮孔,使爆轰气体起不到“气楔”作用,影响爆破效果;而堵塞过长时,将增大炮孔堵塞工作量,影响施工速度,孔口堵塞部分易出现大块,孔口堵塞长度越长,大块越多;在巷道掘进爆破时还可能会出现挂门帘现象,也同样影响爆破效果。巷道及隧道掘进爆破一般要求是尽可能的破碎,故应有在堵塞材料被抛出炮孔前,岩石的破碎过程应当完成了,即临界条件应满足

$$t_s = t_d \quad (14)$$

式中:  $t_s$  为堵塞材料在炮孔中的作用时间;  $t_d$  岩石破碎所需要的时间。

根据前文分析,堵塞材料在炮孔中的作用时间

包括堵塞物受应力波压缩的时间  $t_1$  和堵塞材料在炮孔中的运动时间  $t_2$ ,即

$$t_s = t_1 + t_2 \quad (15)$$

由于应力波的传播速度极快,而堵塞材料在炮孔中的运动速度较慢,故可忽略应力波压缩作用的时间  $t_1$ ,近似认为

$$t_2 = t_d \quad (16)$$

根据爆炸力学和应力波理论可知,介质破碎所需要的时间  $t_d$  为

$$t_d = \frac{2W}{C_P} + \frac{W}{C_R} \quad (17)$$

式中:  $W$  为装药的最小抵抗线;  $C_P$  和  $C_R$  分别为被爆介质中的纵波速度和表面瑞利波速度。

故将式(13)和(17)代入式(16)可得

$$\sqrt{\frac{2\rho \cdot l_s^2}{d_b \cdot p_a} \cdot \left( \frac{l_b}{l_b - l_s} \right)^\gamma} = \frac{2W}{C_P} + \frac{W}{C_R} \quad (18)$$

由于忽略了应力波压缩作用的时间  $t_1$ ,故式(18)计算的结果偏小。在实际爆破时,可以参考式(18)确定一个堵塞长度的选取范围,然后根据爆破要求来选取合理的堵塞长度。

### 4 合理堵塞长度的现场试验

试验选择在某矿 2 064 mm 台阶大理石中进行,试验前测定试块密度为 2 604 kg/m<sup>3</sup>,单轴抗压强度为 134.5 MPa,纵波速度和表面瑞利波速度分别为 2 780 m/s 和 284 m/s。试验分为 6 组,每组 3 个孔,孔径 154 mm,孔深 12.3 m,底盘抵抗线  $W$  为 4 m。根据上文分析的式(18)计算得到的堵塞长度约为 2.9~3.1 m,试验以钴屑为堵塞材料,  $f = 0.05 \sim 0.06$ ,  $\mu_d = 0.28 \sim 0.36$ 。为便于比较爆破效果,试验时炮孔堵塞长度  $l_s$  分别取 2.0 m、2.5 m、3.0 m、3.5 m、4.0 m 和 5.0 m。理论计算所得到的堵塞长度与抵抗线和孔径的关系为  $l_s = (0.73 \sim 0.80) W$  和  $l_s = (18.8 \sim 20.1) d_b$ 。以破碎块筛下累计质量为 50 % 和 90 % 的筛孔尺寸  $K_{50}$  和  $K_{90}$  为块度指数和破碎效果。试验结果见表 1。

表 1 堵塞长度对爆破效果影响的试验结果

试验组别	堵塞长度 /m	堵塞长度/抵抗线	堵塞长度/炮孔孔径	块度指数		单孔破岩量 /t	炸药单耗 / (kg·m <sup>-3</sup> )
				$K_{50}$	$K_{90}$		
1	5.0	1.25	32.5	230	325	755	0.47
2	4.0	1.00	25.9	185	251	705	0.58
3	3.5	0.88	22.7	162	218	693	0.69
4	3.0	0.75	19.5	151	210	698	0.66
5	2.5	0.63	16.2	158	214	688	0.71
6	2.0	0.50	12.9	175	225	533	0.94

根据表1数据,可得:堵塞长度过大或过小均对控制破碎块度不利,平均块度会相应增大或大块率提高。炮孔合理堵塞长度为  $l_s = (0.63 \sim 0.88) W$ , 或  $l_s = (16.2 \sim 22.7) d_b$ 。这时爆破效果稳定,易控制破碎块度。而理论计算所得到的结论为  $l_s = (0.73 \sim 0.80) W$  和  $l_s = (18.8 \sim 20.1) d_b$ 。这有力地说明了理论推导的正确可靠。由于现场条件的复杂性,在实际施工时,可以在上述范围内根据不同的爆破要求选取堵塞长度,使单个炮孔装药量达到最大,在保持炸药单耗不变的情况下,加大孔网参数以充分利用钻孔体积,降低爆破成本。

## 5 结论

从理论上对炮孔堵塞物的作用机理及其运动规律的进行了探讨,并通过现场试验对炮孔堵塞长度的选取进行了研究。得到了以下结论:

1) 爆生气体压力克服堵塞物与炮孔孔壁面的摩擦阻力推动其沿炮孔轴向运动;堵塞物的运动与其长度及炮孔尺寸和装药结构有关,增加堵塞物长度及其充填密度均可明显延长了应力波和爆生气体对被爆介质的作用时间,改善爆破效果。

2) 试验结果表明堵塞长度过大或过小均对控制破碎块度不利,平均块度会相应增大或大块率提高。

炮孔合理堵塞长度为  $l_s = (0.63 \sim 0.88) W$ , 或  $l_s = (16.2 \sim 22.7) d_b$ 。这时爆破效果稳定,易控制破碎块度。而理论计算所得到的堵塞长度恰好在这个范围内,这有力地说明了理论推导的正确可靠。

3) 由于爆破现场条件的复杂性,如何依此理论基础合理确定最佳堵塞长度,还要和实际中不同的爆破要求联系起来。

## 参 考 文 献

- [1] 唐中华,张志呈,陆文,等. 炮孔堵塞及堵塞方法对爆破效果的影响[J]. 西南工学院学报, 1998, 13(2): 64-66.
- [2] 杨永琦. 矿山爆破技术与安全[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1991: 185-190.
- [3] 王廷武. 地面与地下工程控制爆破[M]. 北京:煤炭工业出版社, 1990: 57-60.
- [4] 林大能,胡伟,彭刚. 爆炸挤压成腔中的不耦合效应研究[J]. 煤炭学报, 2002, 27(2): 144-147.
- [5] 徐颖,孟益平,程玉生. 装药不耦合系数对爆破裂纹控制的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(12): 1843-1847.

收稿日期:2005-06-21

(上接第20页)

得推广的新方法。目前,神经网络在岩土工程中取得的瞩目的成就,已经引起了工程界、学术界的广泛关注。

## 5 结论

1) 动量BP神经网络算法非常适用于路基沉降预测问题的研究,预测结果与实际沉降量具有良好的 consistency,能够对未来的沉降预测起到跟踪作用。

2) 在路基施工过程中,此方法可利用施工监测数据及时反馈环境变化的信息,便于施工人员及时调整施工参数,避免重大工程事故的发生。由于胶新铁路缺少相应的施工过程中的参数,没有选用施工参数作为输入进行预测,将是一个缺憾。

3) 动量BP神经网络算法还存在不足之处,主要是需要进行多次训练,训练时间较长。另外,该方法依然存在着局部极小值问题,若要避免此问题,需要另辟蹊径。再者,动量因子的选择具有盲目性,一

旦确定,在整个网络训练过程中就不再改变。因此,该算法还有待继续改进。

## 参 考 文 献

- [1] 从爽. 面向 Matlab 工具箱的神经网络理论与应用[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社, 1998: 45-46.
- [2] 闻新. Matlab 神经网络仿真与应用[M]. 北京:科学出版社, 2003: 269-271.
- [3] 司明强. 人工神经网络在高速公路沉降预测中的应用[D]. 上海:同济大学, 2002: 43-45.
- [4] 闻新,周露,王丹力. Matlab 神经网络应用设计[M]. 北京:科学出版社, 2000: 207-243.
- [5] 宰金珉,梅国雄. 成长曲线在地基沉降预测中的应用[J]. 南京建筑工程学院学报, 2000(2): 8-13.
- [6] 刘勇健,张伯友. 基于混沌优化-神经网络的单桩竖向极限承载力预测方法[J]. 工业建筑, 2005, 35(3): 38-41.

收稿日期:2005-11-07