

中深孔双螺旋掏槽爆破的 破碎机理与设计应用

李新平 朱瑞赓 夏元友
(武汉工业大学岩土与环境工程研究所, 430070)

文 摘 分析研究了中深孔双螺旋掏槽形式在爆炸冲击波或应力波的作用下, 掏槽炮孔爆源附近岩体破碎、破裂的过程及空孔在掏槽爆破中的作用效果。在此基础上提出了中深孔掏槽爆破设计的理论依据, 具体给出双螺旋掏槽爆破的设计参数。这种掏槽在三峡工程茅坪溪泄水洞大断面开挖掘进中得到应用。

关键词 双螺旋掏槽, 爆炸冲击波或应力波, 岩石破碎, 掏槽爆破设计参数。

1 前 言

目前, 铁路、公路、水利水电等工程隧洞开挖不仅掘进断面大, 而且越来越多地采用多臂钻台车钻孔, 因此掘进的机械化程度提高了, 钻孔深度加深了, 与此同时对掏槽爆破的要求更严了。众所周知, 不论是浅孔隧洞掘进还是中深孔隧洞掘进, 掏槽爆破都是隧洞掘进的最关键技术, 它的成败直接关系到后面几道工序的有效展开, 对隧洞掘进的循环进尺, 炮孔利用率等有着决定性的影响。尽管如此重要, 但由于理论研究上的难度, 现在对掏槽爆破的理论研究成果报道较少, 人们往往凭借经验选择掏槽形式, 因此使爆破设计达不到满意的程度, 致使爆破效率较低。本文试图针对中深孔双螺旋掏槽爆破情况, 分析爆炸冲击波或应力波在岩体中传播及引起的岩石破裂情况, 考虑掏槽空孔的作用效果以及实际施工情况等影响因素, 提出掏槽爆破参数的理论设计依据及实际参数。这种分析方法可以很方便地推广到其它掏槽形式中。

2 掏槽爆破的岩石破碎分析

对于中深孔隧洞掘进, 孔深一般为 3~ 5m, 掏槽孔多采用直眼布置, 这种情况给钻孔作业带来一定的困难, 对钻孔精度要求提高。否则如掏槽孔布置过近, 则会引起掏槽孔因钻孔偏差而相互贯通, 或附近钻孔震动引起孔眼掉碴堵塞, 影响钻孔质量和炮孔的装药量, 进而影响爆破效率。同时, 钻孔台车的引进, 可以使掏槽空孔直径加大, 补偿空间相应增大, 掏槽孔的间距适当加大, 保证钻孔在允许误差内不相互贯穿和掉碴堵孔, 提高掏槽效果。为了方便起见, 我们针对中深孔双螺旋掏槽形式(见图 1)进行具体分析。

2.1 掏槽炮孔爆破的岩体破坏范围

在中深孔掏槽情况下, 首响炮孔的自由空间为两个空孔, 主要起岩石破碎膨胀所需的补偿空间, 与自由面相比, 其反射岩体压应力并引起岩体层裂的作用是比较弱的。因此, 首响炮孔

爆炸可看作柱状冲击波或应力波在无限岩体介质引起的破坏, 其破坏区域可分为粉碎区、破裂区以及弹性区^[1, 2] (如图2)

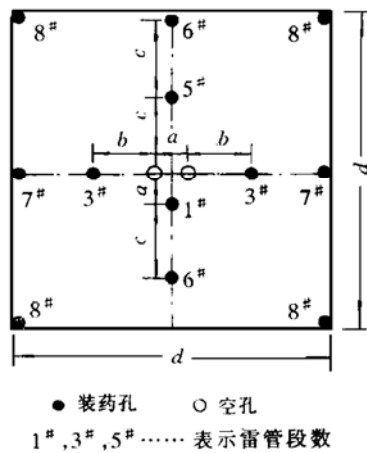


图1 双螺旋掏槽

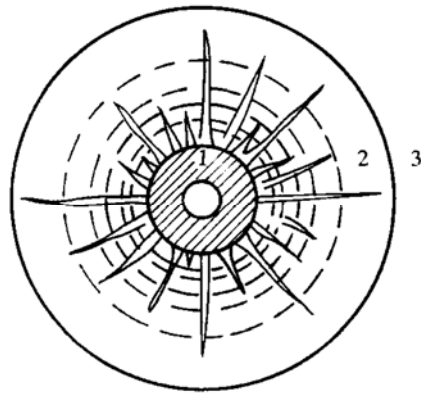


图2 首响炮孔引起的岩石破碎情况

在首响炮孔附近的围岩内, 如果冲击波或应力波的最大径向应力 $\sigma_{r\max}$ 大于岩石的三向抗压强度 $[\sigma_c]$, 则岩石处于粉碎状态, 即应满足条件^[3]

$$\begin{aligned}\sigma_{r\max} &\geq [\sigma_c] \\ [\sigma_c] &= (40 \sim 110)[\sigma_{0c}]\end{aligned}\quad (1)$$

式中 $[\sigma_{0c}]$ 为岩石的单向抗压强度。

在粉碎区外, 岩石在应力波作用下, 炮孔的径向产生压应力 σ_r , 而在切向产生拉应力 σ_θ 。当 σ_θ 大于岩石的极限抗拉强度 q 时, 将会产生与拉应力方向相垂直的裂缝, 即破裂区。破裂条件为

$$\begin{aligned}\sigma_\theta &\geq [q] \\ [q] &= (10 \sim 12)[\sigma_{0t}]\end{aligned}\quad (2)$$

式中 $[\sigma_{0t}]$ 为岩石的单轴抗拉强度。

在柱状装药情况下, 岩体处于平面应变状态, 岩体径向应力 σ_r 与切向应力 σ_θ 有如下关系

$$\sigma_\theta = -\frac{\mu}{1-\mu}\sigma_r \quad (3)$$

式中 μ 为岩石的泊桑比。

对于地质条件比较复杂或比较破碎的岩体, 可以通过现场测定岩体中横波与纵波传播速度 C_s, C_p , 也可以确定 σ_r, σ_θ 之间的关系为

$$\sigma_\theta = (2C_s^2/C_p^2 - 1)\sigma_r \quad (4)$$

由于几何衰减和能量损失(因岩石不是理想的弹性体)造成的衰减, 随冲击波或应力波传播距离增大, 应力峰值将不断减小。径向应力峰值与距离的关系可表示为^[2]

$$\sigma_{r\max} = P_2/\bar{r}^\alpha \quad (5)$$

式中 $\bar{r}$ 为距装药中心的距离 r 与炮眼半径 r_b 的比值, 即 $\bar{r} = r/r_b$; α 为应力衰减指数。

前苏联学者给出应力衰减指数与岩石泊桑比之间的经验关系为^[2]

$$\alpha = 2 \pm \mu/(1-\mu) \quad (6)$$

该式右边第二项对冲击波取加号, 对应力波取减号。

在偶合装药下, 按声学近似方法给出炮孔壁初始径向应力峰值 P_2 为

$$P_2 = \frac{1}{4} \rho_0 D_1^2 \frac{2}{1 + \rho_0 D_1 / \rho_m C_p} \quad (7)$$

不偶合装药情况下按爆轰产物等熵膨胀后碰撞炮眼壁的方法, 可以给出 P_2 为

$$P_2 = \frac{1}{8} \rho_0 D_1^2 (S_c / S_b)^3 n \quad (8)$$

式中 ρ_0 为炸药密度, g/cm^3 ; D_1 为爆速, m/s ; ρ_m 为岩石密度, g/cm^3 ; S_c 为药卷面积, cm^2 ; S_b 为炮眼面积, cm^2 ; n 为爆轰产物与炮孔壁碰撞时反射压力为入射压力的 n 倍 ($n = 4 \sim 20$)。

综合式(1), (5), (6), (7)或(8)可以确定炮孔周围粉碎区的半径 r_1 , 综合式(1), (2), (3)或(4), (5), (6)可以确定破裂圈的半径 r_2 , 即

$$r_1 = (P_2 / [\sigma_c])^{1/\alpha} r_b \quad (9)$$

$$r_2 = \left| [\sigma_c] / \left(-\frac{1-\mu}{\mu} [\sigma_l] \right) \right|^{1/\alpha} r_1 \quad (10)$$

2.2 掏槽空孔的作用效果

如图 1 所示, 中深孔双螺旋掏槽分 8 段 6 次微差起爆, 首响炮孔的岩石破碎补偿空间为两个空孔。其后首响爆岩面积成为第二响爆破的补偿空间。可以看出, 第二响爆破的岩石破碎补偿空间大为改善, 因此第二响炮孔的最小抵抗线也可以随之加大。同样地, 后面其它段爆破的自由空间较之前面又大为改善, 此时的炮孔爆炸模型转变为爆炸冲击波或应力波在存在自由面的有限岩体介质中产生变形和破坏, 炮孔的爆岩体积 V 、装药量 Q 以及能反映自由面夹制大小的抛掷爆破作用指数 n 之间的关系可表示为

$$Q = qV(0.4 + 0.6n^3) \quad (11)$$

式中 q 为形成标准抛掷漏($n = 1$)的单位耗药量。

从上面分析可知掏槽爆破第一响爆破条件最困难, 但也是最关键的。因此在可能的情况下, 必须最大限度地为其提供补偿空间。设首响炮孔的极限补偿空间系数为 n_0 , 则有

$$n_0 = \pi D^2 N / (4S) \quad (12)$$

式中 D 为空孔直径; N 为空孔数目; S 为首响炮孔所负担的爆岩面积, 它是首响炮孔与空孔空间布置的函数。

针对图 1 所示的双螺旋掏槽形式, 当 n_0 给定, 炮孔布置形式给定, 则由(12)式可确定满足补偿空间的 a 的最大值。

参考地下采矿中阶段崩落法的补偿空间系数 16% ~ 25%^[4], 以及有关应用情况^[5], n_0 初步确定为 20% ~ 30%。

2.3 中深孔双螺旋掏槽设计的理论依据

从 2.1 及 2.2 节中的分析我们可看出, 双螺旋掏槽首响爆破的炮孔布置应满足如下条件:

- (1) 掏槽首响爆破的岩体处于首响炮孔的破裂区内, 即 a 的最大值应满足式(10);
- (2) 掏槽首响爆破岩体的补偿空间系数至少大于 n_0 , 即 a 的最大值满足式(12);
- (3) 比较条件(1), (2)所得到的 a 值, 取其中较小值即为首响炮孔的布置参数。

至于掏槽爆破的其它炮孔, 随着补偿空间增大, 炮孔爆破的夹制因素减少, 炮孔的最小抵抗线则可逐步增加, 炮孔负担的爆岩面积逐步加大, 单位炸药消耗量逐步减少。至掏槽过程结

束, 炮孔布置及装药量基本上趋于正常状态。

3 中深孔双螺旋掏槽的工程应用

3.1 工程概况及围岩力学特性

茅坪溪泄水工程是三峡工程茅坪溪防护的主体工程之一, 全长 3100m。其中进口段为明渠, 长约 300m, 隧洞全长 1470m, 横断面为门洞式, 宽 10m, 高 12m(墙高 7m, 拱高 5m), 属无压隧洞; 出口段为两孔箱形涵洞, 长约 1530m。

隧洞围岩为坚硬的闪云斜长花岗岩, 密度为 2.7t/m^3 , 岩石抗压强度为 90~120MPa, 岩体变形模量为 35~45MPa, 泊桑比为 0.2, 岩石抗拉强度为 7~8.5MPa。

3.2 中深孔双螺旋掏槽的具体设计

这次大断面掘进分掏槽孔, 崩落孔和周边孔三个部分, 整个断面一次光爆成型。凿岩台车采用从瑞典进口的三臂钻台车, 钻孔直径可以调节或扩孔。在掏槽部分, 掏槽形式采用图 1 所示的双螺旋掏槽方法, 两个经过扩孔的空孔直径为 102mm, 掏槽炮孔直径为 70mm, 其余炮孔的直径为 48mm, 炮孔深度为 4m, 而空孔深度为 4.20~4.50m。

除周边光爆孔采用水胶炸药外, 其它炮孔皆采用 2[#] 岩石炸药。

在设计掏槽首响炮孔参数 a 时, 有关计算参数 $[\sigma_{0c}] = 120\text{MPa}$; $[\sigma_c] = 50[\sigma_{0c}]$ (由于是硬岩故取低值); $[\sigma_{0t}] = 8\text{MPa}$; $[\sigma_t] = 10[\sigma_{0t}]$; $\rho_m = 2.7\text{g/cm}^3$; $C_p = 5000\text{m/s}$; $\mu = 0.2$; $\rho_0 = 1.0\text{g/cm}^3$; $D_1 = 3600\text{m/s}$; $S_c = 32.15\text{cm}^2$; $S_b = 38.46\text{cm}^2$; $r_b = 35\text{mm}$; $n = 15$ (由于接近偶合装药, 故取较大值)。由式(6), (8), (9), (10) 确定粉碎圈与破裂圈半径分别为

$$r_1 = 1.47r_b = 51.45\text{mm} \quad (13)$$

$$r_2 = 5.34r_1 = 274.74\text{mm} \quad (14)$$

取 $n_0 = 20\sim 30\%$, $D = 102\text{mm}$, $N = 2$, 则由式(12) 确定

$$a = 214.06 \sim 282.85\text{mm} \quad (15)$$

综合式(14), (15), 最终确定掏槽首响炮孔参数为 $a = 250\text{mm}$ 。

按照其它掏槽炮孔的最小抵抗线可以逐步增加的原则, 选定掏槽炮孔布置的其它参数分别为 $b = 500\text{mm}$, $c = 600\text{mm}$, $d = 2500\text{mm}$ 。

在确定了中深孔双螺旋掏槽炮孔布置参数之后, 相应地可以确定 1[#], 3[#], 5[#]... 雷管掏槽爆破时各自的补偿空间系统 n'_0 , 抛掷爆破作用指数 n 以及单位体积耗药量 q' 如表 1 所示, 其中式(11) 中的标准抛掷漏斗 ($n = 1$) 的单位耗药量选为 $a = 16\text{N/m}^{3/6}$ 。

表 1 双螺旋掏槽分段爆破情况

类 别	爆 破 雷 管 段					
	1 [#]	3 [#]	5 [#]	6 [#]	7 [#]	8 [#]
补偿空间系数 $n'_0(\%)$	22.85	51.29	56.34	41.38	50.00	69.49
抛掷爆破作用指数 n	3.59	3.62	2.02	1.89	1.66	1.44
单位体积耗药量 (N/m^3)	449.7	461.3	85.7	70.9	50.2	34.9

3.3 爆破掘进效果

双螺旋掏槽爆破的炮孔利用率达 95% 以上, 整个掘进断面的炮孔利用率达 90% 以上, 月进尺为 225.5m, 隧洞提前贯通。

4 结 语

本文针对中深孔双螺旋掏槽爆破形式,认为掏槽爆破首响炮孔爆炸模型有别于其它掏槽炮孔。首响炮孔的破岩过程可以近似地看作爆炸冲击波或应力波在无限岩体介质中的传播和破坏。首响炮孔参数的理论设计依据是首响炮孔的破岩面积包括在它的破裂区范围内,同时要为其岩石破碎提供必需的极限补偿空间。首响炮孔为掏槽的其它炮孔提供了初始的爆破补偿空间和自由面,之后各段爆破孔的爆破条件逐步改善,它们是在有限岩体介质中进行破岩,因此它们的最小抵抗线可逐步加大。从表 1 所示的应用数据可以看出,各段的爆破补偿空间系数呈上升趋势,而抛掷爆破作用指数以及单位体积耗药量则逐步下降,反映了双螺旋掏槽爆破是在良性展开,它的工程应用效果也是显著的。当掏槽爆破结束之后,余下炮孔的设计和爆破条件基本上趋于正常状态。

致谢:现场试验研究工作得到葛洲坝工程局二公司经理吴森康高级工程师、茅坪溪泄水洞开挖指挥部喻定华指挥长、李恩义副指挥长等有关人员的大力支持和协助,在此谨致谢意!

参 考 文 献

- 1 李翼祺,马素贞.爆炸力学.北京:科学出版社,1983.
- 2 王廷武等.地面与地下工程控制爆破.北京:煤炭工业出版社,1990.
- 3 哈努卡耶夫 A. H. 矿岩爆破物理过程.刘殿中译.北京:冶金工业出版社,1980.
- 4 袁志超.降低深孔爆破大块率的研究.爆破,1984(2):54~57.
- 5 肖金发,王保智.深孔爆破成井的探讨.爆破,1984(2):50~53.
- 6 王文龙.钻眼爆破.北京:煤炭工业出版社,1984.

Rock Fragmentation Mechanism and Application of Plural Spiral Cutting Blasting with Holes of Medium or Large Depth

Li Xingping Zhu Ruigeng Xia yuanyou

(Institute of Rock- Soil and Environment Engineering, Wuhan University of Technology, 430070)

Abstract In this paper, some problems related to plural spiral cutting blasting with holes of medium or large depth, namely, the process of rock smash and fragmentation near the explosion source, and effects of empty holes on cutting blasting under explosion shock wave or stress wave are analysed and studied. On the basis of the theoretical analysis, the criteria and specific parameters for the design of this type of cutting blasting are presented. This cutting blasting is successfully used in the large- section excavation of the Maopingxi discharge tunnel in Three Gorges construction.

key words plural spiral cutting blasting, explosion shock wave or stress wave, rock fragmentation, design parameters of cutting blasting.