

大型地下水封石洞油库工程 洞室群中下层开挖爆破方案试验研究

周永力¹, 赵晓², 孙海江¹, 李鹏³

(1. 中国人民武装警察部队水电第七支队, 湖北 武汉 430223;

2. 中国人民武装警察部队水电第三总队, 四川 成都 610036; 3. 长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 论述了某大型地下水封石洞油库工程洞室群在水封条件下中下层开挖爆破方案试验研究, 得出了适合该工程开挖爆破方案并在实际施工中成功应用, 对今后类似工程有一定的借鉴意义。

关键词: 爆破试验; 水封石洞油库; 洞室群中下层开挖; 研究

中图分类号: TV542; TV554; TV522

文献标识码: B

文章编号: 1001-2184(2014)增1-0004-06

1 概述

某大型地下水封石洞油库工程主要由主洞室群、竖井、水幕系统及施工巷道等组成, 主洞室群洞室之间由连接巷道连通, 其跨度为 20 m、高度为 30 m, 为直边墙拱洞, 长度在 475 ~ 777 m 之间。洞室群顶部 25 m 处设水幕系统, 由注水巷道和水幕孔组成, 覆盖整个洞库上方。该工程岩石以较完整的花岗片麻岩为主, 岩体呈块状、层状结构, 整体稳定性较好, 岩体等级以 II、III 类为主。

主洞室群中下层开挖爆破具有施工环境十分复杂(多洞室平行施工及水幕注水条件施工等)、成型效果要求高、爆破振动及损伤控制严格等特点。根据实践经验, 轮廓面若采用预裂爆破成型, 可较好地控制主爆孔对保留岩体的损伤及爆破振动影响, 但其本身对洞室围岩的损伤影响及预裂爆破在水封条件下成缝的难易程度等问题都有待进一步研究。轮廓面若采用光面爆破成型, 则主爆孔爆破对保留岩体及高边墙的振动响应和累积损伤较难控制。因此, 在洞室群中下层爆破开挖前期, 主要进行了“深孔台阶+预裂爆破”和“水平浅孔+光面爆破”试验, 同时结合施工进行了“深孔台阶+光面爆破”试验, 以验证在主爆区采用深孔台阶爆破开挖条件下两种轮廓控制爆破方案对洞室群中下层开挖的适用性。

2 中下层开挖爆破方案试验

(1) 试验条件。

爆破开挖试验段方案、部位及围岩条件见表 1。

表 1 爆破试验段方案、部位及围岩条件统计表

试验方案	试验洞库	围岩类型	岩体特性
深孔台阶+预裂爆破	主洞①	III 类和 III 2 类	较完整, 局部裂隙发育
水平浅孔+光面爆破	主洞②	II 类和 III 1 类	较完整
深孔台阶+光面爆破	主洞③	II 类和 III 类	较完整

(2) 试验参数。

对于深孔台阶+预裂爆破方案, 主爆孔孔径为 90 mm, 孔距为 2.5 ~ 3 m; 排距为 2 ~ 2.5 m, 预裂孔孔径 76 mm, 孔距 0.7 m。爆破采用孔间微差起爆, 高段雷管入孔、孔外低段雷管接力分段起爆。

对于水平浅孔+光面爆破方案, 主爆孔孔径为 42 mm, 孔距为 1 ~ 1.5 m, 排距为 1.4 ~ 1.5 m, 光爆孔孔径为 42 mm, 孔距为 0.5 m。采用孔间微差起爆网路。

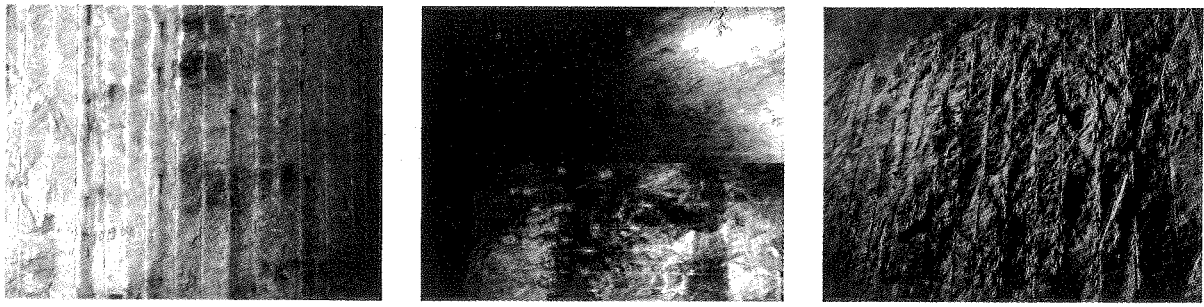
对于深孔台阶+光面爆破方案, 爆破参数与预裂爆破相近, 主要是起爆网络有所差异。

(3) 爆破成型效果。

图 1 为不同爆破方案条件下爆破后轮廓面成型效果。

根据爆破后的观察和测量得知, 三种爆破方案的轮廓面成型效果较好, 半孔率均大于 80%, 部分试验半孔率达 90% 以上, 3 m 直尺检查平整度小于 15 cm。相比之下, 主洞室深孔台阶+光面爆破(或深孔台阶+预裂爆破)方案的半孔率、平整度优于手风钻水平浅孔+光面爆破效果。根据施工现场试验情况得知, 三种爆破方案的爆破成型效果均能满足开挖施工技术要求。

收稿日期: 2014-06-15



(a)深孔台阶+预裂爆破方案

(b)水平浅孔+光面爆破方案

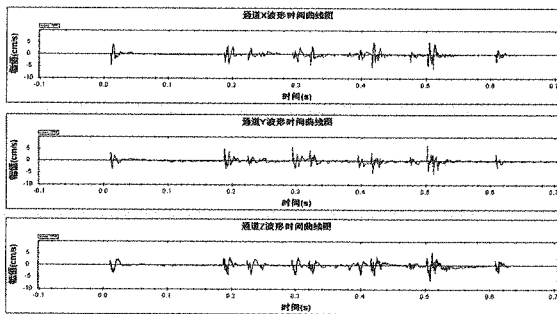
(c)深孔台阶+光面爆破方案

图1 典型爆破试验轮廓面成型效果图

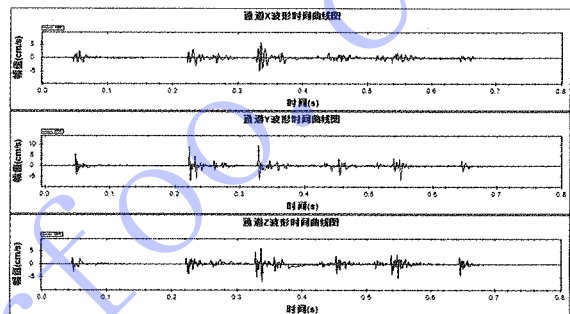
3 不同爆破方案下洞室群开挖爆破振动特性分析

爆破试验过程中典型爆破振动波形图及其频谱图见图2~4。

3.1 爆破振动测试成果分析

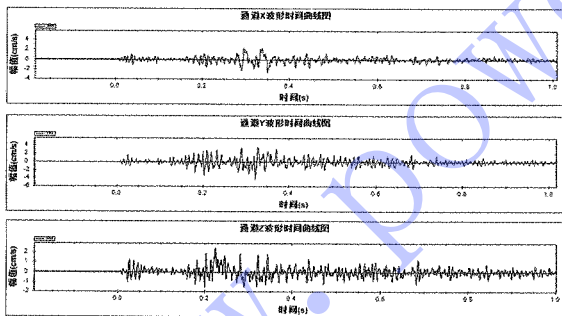


(a)本洞测点振动波形

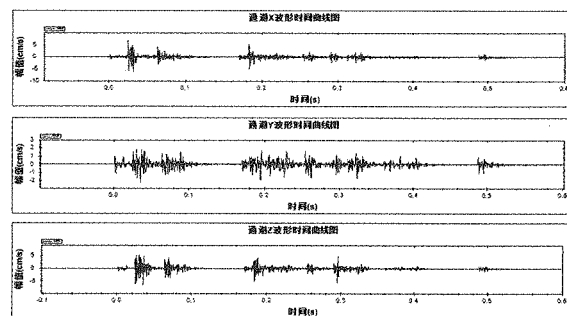


(b)邻洞测点振动波形

图2 深孔台阶+预裂爆破方案爆破试验典型振动波形图

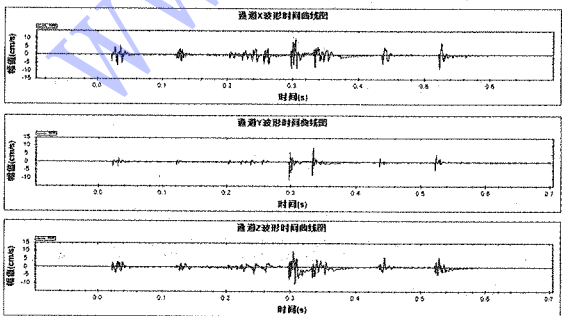


(a)本洞测点振动波形

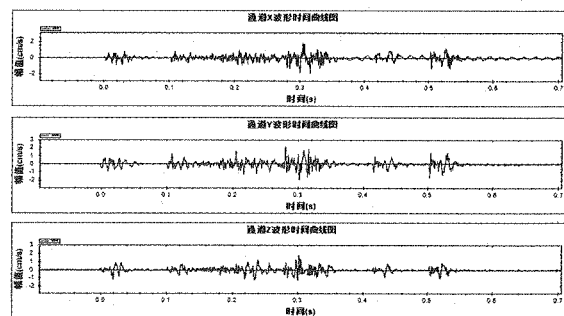


(b)邻洞测点振动波形

图3 水平浅孔+光面爆破方案爆破试验典型振动波形图



(a)本洞测点振动波形



(b)邻洞测点振动波形

图4 深孔台阶+光面爆破方案爆破试验典型振动波形图

由图 2~4 可知,在近区和中远区,三种爆破方案各段爆破振动波形分离均较明显;在相同爆心距条件下,水平浅孔+光面爆破方案的爆破振动峰值要小于深孔台阶+预裂爆破及深孔台阶+光面爆破方案下的振动峰值。

3.2 爆破振动衰减规律分析

工程中通常采用以炸药量和爆心距为主要影响因素的经验公式对质点峰值振速的衰减特性进行描述,其表达式为:

$$V = K\rho\alpha \quad (1)$$

式中 ρ 为比例药量; K 为与岩石性质、爆破参数等有关的因子; α 为振动衰减系数。

将深孔台阶+预裂爆破、水平浅孔+光面爆

破、深孔台阶+光面爆破三种爆破方案条件下主爆段爆破振动衰减规律经验公式列入表 2 中,并作峰值振速与 $1/\rho$ 的关系曲线如图 5、6 所示。

表 2 三种爆破方案条件下爆破振动衰减规律表

爆破方案	水平垂直洞轴线方向	水平平行洞轴线方向	竖直面
深孔台阶+预裂爆破	$V_x = 70.3\rho^{-1.41}$	$V_y = 60.8\rho^{-1.34}$	$V_z = 43.3\rho^{-1.19}$
水平浅孔+光面爆破	$V_x = 41.2\rho^{-1.07}$	$V_y = 30.6\rho^{-1.14}$	$V_z = 27.0\rho^{-1.01}$
深孔台阶+光面爆破	$V_x = 59.6\rho^{-1.21}$	$V_y = 87\rho^{-1.29}$	$V_z = 115.7\rho^{-1.51}$

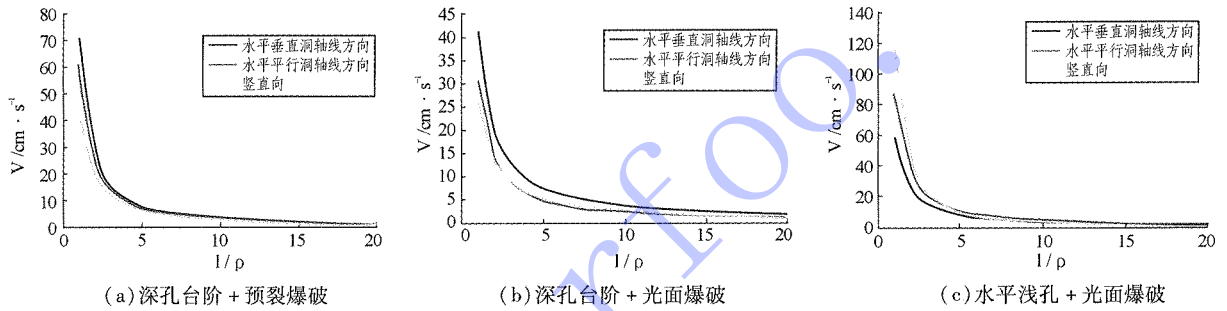


图 5 不同方向的爆破峰值振速与 $1/\rho$ 的关系曲线图

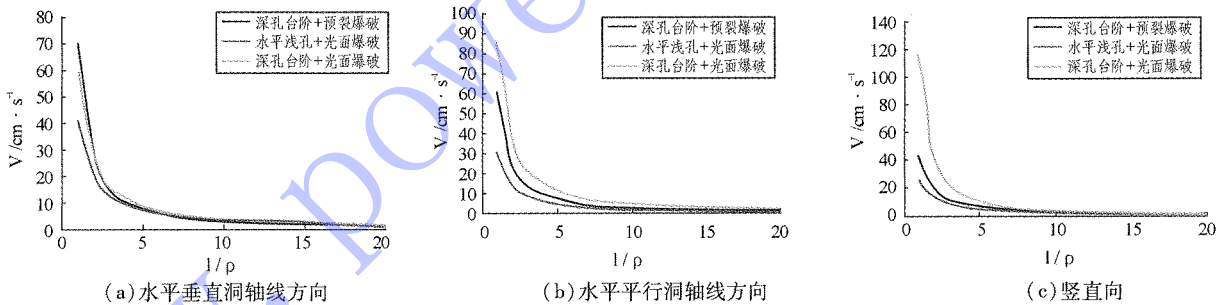


图 6 不同爆破方案条件下峰值振速与 $1/\rho$ 的关系曲线图

由图 5、6 及表 2 知,水平浅孔+光面爆破方案的 K 值和 α 值最小,三种爆破方案中,水平浅孔+光面爆破方案的振速最小,但衰减最慢。由于单响药量 Q 一定时, $1/\rho$ 与爆心距 R 正相关,在近区和中远区,深孔台阶+预裂爆破、水平浅孔+光面爆破方案均为水平垂直洞轴线方向振速最大,深孔台阶+光面爆破方案为竖直面最大。从图 6 中可以明显看出,深孔台阶+预裂爆破和深孔台阶+光面爆破方案在近区和中远区的峰值振速明显大于水平浅孔+光面爆破方案。深孔台阶爆破两种方案的水平垂直洞轴线方向的峰值振速

衰减规律相差不大。而对于水平平行洞轴线方向及竖直面方向的峰值振动,在单响药量 Q 相同的情况下,深孔台阶+光面爆破方案在近区和中远区峰值振速和衰减速度明显要大于深孔台阶+预裂爆破方案。因此深孔台阶+光面爆破方案在近区和中远区引起的爆破振动最大,深孔台阶+预裂爆破方案次之,水平浅孔+光面爆破方案最小。

4 不同爆破方案下洞室群围岩爆破影响深度分析

4.1 声波检测成果

(1) 爆破试验之爆破前后声波的检测。

为比较深孔台阶+预裂爆破和水平浅孔+光

面爆破方案对围岩的松动影响,在爆破试验过程中进行了多次声波测试,分别见表 3 和表 4。

表 3 深孔台阶 + 预裂爆破方案爆破试验声波测试结果表

序号	测试方法	测试次数	测线编号	松动深度 /m		松动圈平均波速 /m · s ⁻¹		变化率 /%
				爆前	爆后	爆前	爆后	
1	跨孔法	第一次试验	QS1 - QS2	0.5	0.5	3 845	3 708	-3.6
2			QS2 - QS3	0.25	0.25	4 436	4 201	-5.3
3			QS4 - QS5	0.5	0.5	3 436	3 145	-8.5
4			QS5 - QS6	0.5	0.5	3 758	3 440	-8.5
5			QS7 - QS8	0.5	0.5	2 828	2 433	-14
6	跨孔法	第二次试验	QS8 - QS9	0.75	0.75	3 845	3 535	-8.1
7			QS10 ~ QS11	0.75	0.75	2 627	2 248	-14.4
8			QS11 ~ QS12	0.75	0.75	3 350	3 183	-5
9			QS13 ~ QS14	<0.25	<0.25	/	/	/
10	跨孔法	第三次试验	QS14 ~ QS15	0.5	0.5	4 708	4 677	0.7
11			QS16 ~ QS17	0.75	0.75	2 935	2 599	-11.5
12			QS17 ~ QS18	0.75	0.75	3 017	2 789	-7.5

注:部分测线在测试范围内未发现明显的松动,故测线松动深度为 <0.25 m(0.25 m 为最小测试深度)。

表 4 水平浅孔 + 光面爆破方案下爆破试验声波测试结果表

序号	测试方法	测试部位	测线编号	松动深度 /m		松动圈平均波速 /m · s ⁻¹		变化率 /%
				爆前	爆后	爆前	爆后	
1	单孔法	主洞②0 + 85 m	S1	0.2	0.2	3 279	3 078	-6.1
2			S2	<0.2	<0.2	/	/	/
3			S3	0.4	0.4	4 338	3 829	-11.7
4			S4	<0.2	<0.2	/	/	/
5			S5	0.8	0.8	4 386	4 277	-2.5
6			S6	0.2	0.2	3 614	3 349	-7.3
7		主洞②0 + 60 m	S7	0.2	0.2	3 360	3 126	-7
8			S8	0.4	0.4	4 429	3 874	-12.5
9			S9	<0.2	<0.2	/	/	/
10			S10	0.4	0.4	4 251	3 752	-11.7
11			S11	0.2	0.2	3 360	3 126	-7
12			S12	0.2	0.2	3 797	3 532	-7

注:部分测线在测试范围内未发现明显的松动,故测线松动深度为 <0.2 m(0.2 m 为最小测试深度)。

(2) 生产性开挖爆后声波检测。

为了比较深孔台阶 + 预裂爆破和深孔台阶 + 光面爆破方案爆破对围岩的松动影响,在围岩较好(均在 II 类围岩)的区域进行了爆后声波测试,分别见表 5 和表 6。

4.2 声波检测的洞室群开挖爆破扰动评价

根据声波测试结果,爆破试验区域声波速度 V_p 值在 2 800 ~ 6 000 m/s 之间,大部分测线平均波速集中在 4 000 ~ 5 000 m/s 之间,爆破前后试验区域边墙岩体的声波曲线均变化不大,松动深度大都没有加深。部分测孔的松动圈范围内波速在爆破后有所降低,而松动圈范围外岩体波速基本无变化,这表明爆破对边墙的影响主要表现在松动圈范围内的岩石波速进一步降低,对松动深度范围外的岩体没有明显影响。

4.3 不同爆破方案条件下洞室群爆破影响深度

比较

(1) 深孔台阶 + 预裂爆破与水平浅孔 + 光面爆破方案比较。

两种爆破方案对边墙的影响主要表现在原有松动圈范围内岩石波速进一步降低。深孔台阶 + 预裂爆破方案边墙岩体原有松动圈内平均波速下降最大为 14.4%;而水平浅孔 + 光面爆破方案边墙岩体原有松动圈内平均波速下降最大为 12.5%。两种爆破方案下爆破后松动圈范围内声波波速降低比例均未超过 15%,表明爆破未造成边墙围岩破坏。但相比之下,水平浅孔 + 光面爆破爆破方案下爆破对围岩的扰动影响略小,且更容易控制。

(2) 深孔台阶 + 预裂爆破与深孔台阶 + 光面爆破方案比较。

两种方案声波测试均在岩性较好(II类围岩)

区域进行,岩石声波波速一般在 4 500 ~ 6 000 m/s 之间。受爆破开挖及卸荷影响,深孔台阶 + 预裂爆破方案爆破后边墙岩体松动深度最大为 0.8 m(投影到边墙法线为 0.79 m);深孔台阶 + 光面爆破方

案爆破后岩体松动深度最大为 0.6 m(投影到边墙法线为 0.42 m)。可见,深孔台阶 + 光面爆破方案下爆破对围岩的扰动影响略小,但总体而言,两种方案下爆破影响深度均在可控范围内。

表 5 深孔台阶 + 预裂爆破方案爆破后声波测试结果表

序号	测试方法	测试部位	测线编号	松弛深度 /m	松弛层平均波速 /m · s ⁻¹
1			YS1 - YS2	0.20	4 687
2		主洞①0 + 315 m	YS2 - YS3	0.2	3 571
3			YS4 - YS5	<0.2	/
4			YS5 - YS6	0.4	3 279
5			YS7 - YS8	<0.2	/
6	跨孔法	主洞①0 + 305 m	YS8 - YS9	0.2	4 167
7			YS10 - YS11	0.6	2 872
8			YS11 - YS12	0.2	2 841
9			YS13 - YS14	0.6	2 955
10		主洞①0 + 295 m	YS14 - YS15	0.4	3 425
11			YS16 - YS17	0.8	3 875
12			YS17 - YQS18	0.2	2 554

注:部分测线在测试范围内未发现明显的松动,故测线松动深度为 <0.2 m(0.2 m 为最小测试深度)。

表 6 深孔台阶 + 光面爆破方案爆破后声波测试结果表

序号	测试方法	测试部位	测线编号	松弛深度 /m	松弛层平均波速 /m · s ⁻¹
1	跨孔法	主洞⑧0 + 625 m	GS1 - GS2	0.6	4 697
2			GS2 - GS3	<0.2	/
3			GS4 - GS5	0.2	4 491
4			GS5 - GS6	<0.2	/

注:部分测线在测试范围内未发现明显的松动,故测线松动深度为 <0.2 m(0.2 m 为最小测试深度)。

5 地下水封洞室群开挖爆破方案的优选

综合爆破试验的开挖效果、爆破振动特性及爆破对围岩深度影响分析,推荐在某大型地下水封石洞油库洞室群中下层开挖施工中采用深孔台阶 + 预裂爆破和水平浅孔 + 光面爆破方案相结合的方式进行开挖。具体推荐的爆破方案及孔网参

数如下:

(1)深孔台阶 + 预裂爆破方案。

推荐采用全幅开挖的方式,主爆孔 2 ~ 3 孔一响,控制最大单响起爆药量不大于 89 kg,采用孔外接力起爆网路。炮孔布置及爆破网路见图 7,爆破参数见表 7。

表 7 深孔台阶 + 预裂爆破推荐方案爆破参数表

孔别	孔径 /mm	孔距 /m	排距 /m	孔深 /m	堵塞长度 /m	药径 /mm	平均线密度 /g · m ⁻¹	孔数	单孔药量 /kg	总药量 /kg	平均单耗 /kg · m ⁻³
主爆孔 1	90	3	2.5	11.5	2.5	70	/	18	39	702	0.54
主爆孔 2	90	2.5	2.5	11.5	2.2	70	/	7	34.5	241.5	
缓冲孔 1	90	1.5	1.2	11.5	2.5	70/32	/	12	20.5	246	
缓冲孔 2	90	1.5	1.2	11.5	2.5	70/32	/	2	23	46	
预裂孔	76	0.7	/	11.5	1	32	440	34	5	170	

(2)水平浅孔 + 光面爆破方案。

根据爆破试验的效果,所采用的水平浅孔 + 光面爆破推荐方案的炮孔布置及起爆网络如图 8 所示,爆破参数如表 8 所示。

6 结 语

(1)采用上述三种爆破方案,轮廓面成型效果均较好,能够满足开挖施工技术要求。相比之下,深孔台阶爆破的两种方案中的半孔率、平整度

优于手风钻水平浅孔 + 光面爆破的效果。

(2)深孔台阶 + 光面爆破方案在近区和中远区引起的爆破振动最大,深孔台阶 + 预裂爆破方案次之,水平浅孔 + 光面爆破方案最小。

(3)“深孔台阶 + 预裂爆破”和“水平浅孔 + 光面爆破”方案对边墙的影响主要表现在原有松动圈范围内的岩石波速进一步降低。两种爆破方案下爆破后松动圈范围内的声波波速降低比例均

表 8 水平浅孔 + 光面爆破推荐方案爆破参数表

孔别	孔径 /mm	孔数 /个	药卷 /mm	单孔药量 /kg	线装药 /g·m ⁻¹	间距 /m	排距 /m	装药量 /kg	单耗 /kg·m ⁻³	总药量 /kg
崩落孔 1	42	36	32	3.6		1.5	1.5	129.6		
周边孔 1	42	12	25	1.26	280	1		15.1	0.45	179.8
底板孔	42	9	32	3.9		1.5		35.1		
崩落孔 2	42	12	32	2.4		1	1.4	28.8		
周边孔 2	42	24	32	0.9	220	0.5		21.6	0.5	50.4

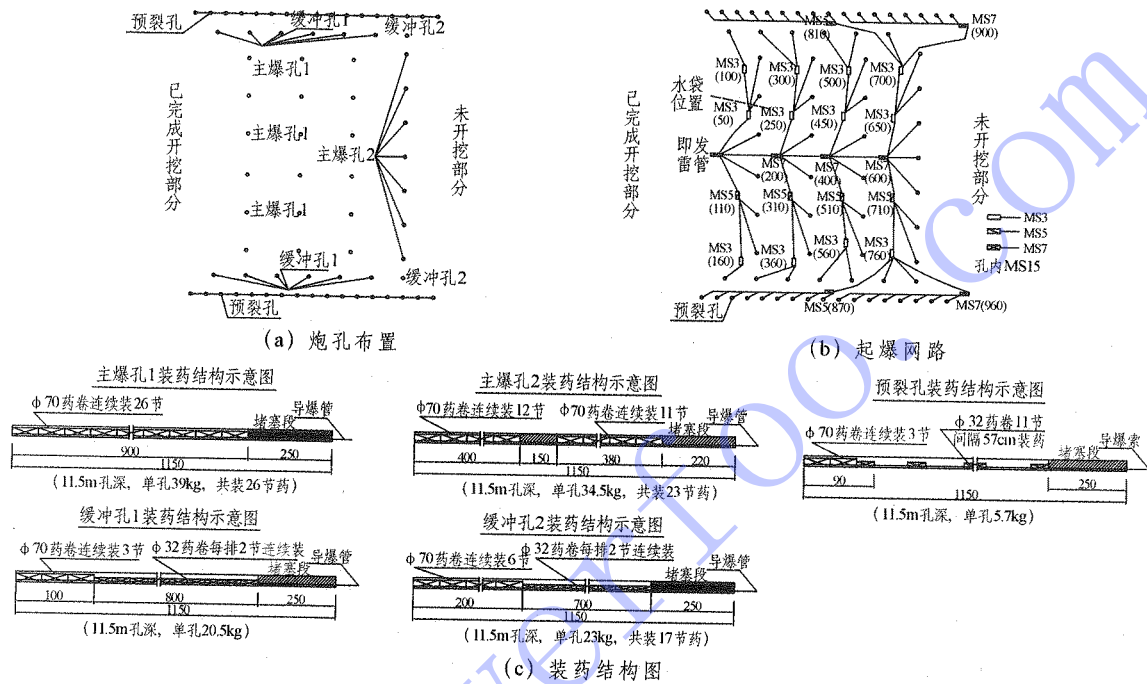


图 7 深孔台阶 + 预裂爆破推荐方案炮孔布置、起爆网络及装药结构图

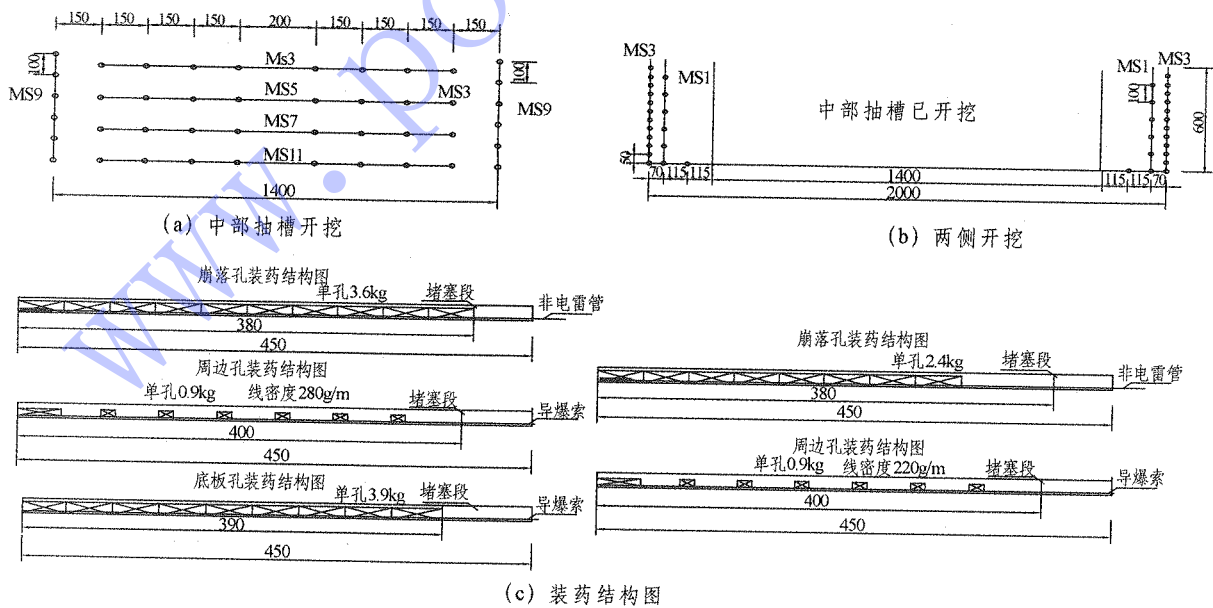


图 8 水平浅孔 + 光面爆破推荐方案炮孔布置及起爆网络图

(下转第 34 页)

放效率。

(2)机降点:主要用于人员、机械设备、物资等的投放,选取时要沿公路路线设置,可依托公路弯道、路边停车场、路面较宽处等满足直升机机降及设备投放的安全、坚实地点设置;同时,机降点应尽量靠近公路损毁节点以缩短机械设备行程,节约时间及油料。

(3)转运场:主要在抢修路段较长,直升机航程投送半径无法覆盖或有大型桥梁、隧道等公路设施无法在短时间内抢修完毕时设置,场地要求与装载区相同,通过转运场采取“蛙跳”的方式向前推进以保证抢修工作全线展开。

(4)以米-26 为例对各类场地的要求:装载区(转运场)通常不小于 300 m × 200 m 且周边无高大建筑物、树木、高压线塔等障碍物;机降点通常不小于 100 m × 100 m 且周边无高大建筑物、树木、高压线塔等障碍物;装载区与机降点间的距离不大于当地直升机带荷载条件下最大航程的 40%,如超出此距离,则应设置转运场。

3.5 制约直升机机降的因素

(1)场地条件的影响:机降点场地所需面积不大、要求不高,可通过小分队携带少量设备徒步或直升机绳降、机降方式开辟;装载区(转运场)对场地要求相对较高,可通过先设置机降点,投送土石方机械设备、人员、油料迅速开辟。

(2)地形条件的影响:山区地形条件对直升机飞行的最大阻碍为海拔高度。对此,只能选择海拔高度满足飞行条件的河谷、山谷及路段设置

(上接第 9 页)
未超过 15%,表明爆破未造成边墙围岩的破坏。相比之下,水平浅孔 + 光面爆破方案下爆破对围岩的扰动影响略小且容易控制。比较深孔台阶 + 预裂爆破与深孔台阶 + 光面爆破方案下爆后的声波测试结果可知:深孔台阶 + 光面爆破方案下爆破对围岩的扰动影响略小,但总体上两种方案爆破影响深度均在可控范围内。

(4)深孔台阶爆破可用于某大型地下水封石洞油库洞室群中下层开挖,但轮廓面应采用预裂或光面爆破并严格控制钻孔精度、单段起爆药量、药包直径及装药结构;水平小孔径光面爆破产生的振动较小,对围岩的扰动影响较小,适合在岩体

装载区(转运场)、航线、机降点。

(3)气象条件的影响:直升机在雨、雾气象条件下会受到一定的影响或无法起飞,而山区往往多雨、雾天气。对此,在紧急情况下,可考虑人工消雨、消雾。在现有的技术条件下,可以满足上百公里范围内消除雨、雾对飞行造成的不利影响。

4 结 语

地震灾害条件下山区公路的抢修要在最短的时间内完成,应通过无人机、卫星等勘测手段确定需抢修路段的总体情况,并根据损毁节点的情况及位置充分安排抢修资源,在整个路段上创建数个直升机机降点以直升机机降投送抢修资源,再以单个机降点为依托向前后两个方向同时展开工作面。如遇短时间内无法修复的大型桥梁、隧道或损毁节点时果断开辟转运场,对于一些条件好、位置重要的机降点,在公路抢通后仍可保留,防范余震对已通车路段的破坏。

参考文献:

- [1] 姬鸿丽. 洛阳首次人工消云减雨效果的技术分析[C]. 第 26 届中国气象学会年会人工影响天气与大气物理学分会场论文集, 2009.
- [2] 刘敏锋, 杨建军, 张超. 人工消云消雨在人工影响天气中的应用初探[C]. 陕西省气象学会 2005 年学术交流会论文集, 2005.
- [3] 倪先平. 直升机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.

作者简介:

李镇坤(1982-),男,贵州六盘水人,项目副总工程师,工程师,少校,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作;
高静(1984-),女,河南新乡人,工程师,上尉,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作。(责任编辑:李燕辉)

性质较差或爆破振动控制相对较严格的开挖区域中采用;光面爆破时主爆破孔产生的振动大于采用预裂爆破时主爆破孔的振动,在地质条件较好部位宜优先采用预裂爆破方案。

参考文献:

- [1] 张正宇, 张文焯, 等. 现代水利水电工程爆破[M]. 北京: 水利水电出版社, 2003.

作者简介:

周永力(1978-),男,河南上蔡人,高级工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作;
赵晓(1976-),男,陕西勉县人,高级工程师,硕士,从事水利水电工程建设管理工作;
孙海江(1981-),男,河南焦作人,工程师,学士,从事水利水电工程施工技术与管理工作;
李鹏(1985-),男,湖北安陆人,工程师,博士,从事充实岩土动力学与工程爆破相关的研究工作。(责任编辑:李燕辉)