

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2020.01.013

复杂工况下高边坡预裂爆破技术及施工工艺研究

唐毅, 孙飞, 李广洲, 蒋新忠

(核工业南京建设集团有限公司, 南京 211102)

摘要: 以漳州核电一期场地平整开挖边坡工程为研究背景, 在31~36轴43.5~53.5 m高程处的边坡爆破开挖过程中, 由于同一层边坡不同位置的标高不同, 且坡比在1:0.6~1:0.75之间渐变, 造成边坡预裂爆破施工技术难度增大。通过对施工重难点分析, 结合以往类似预裂爆破经验, 分别从孔径 d 、孔距 a 、不耦合系数 B 、装药线密度 q 、孔深 H 、倾斜角度等爆破参数进行了详细的设计, 在现场施工过程中从测量定位、孔位确定、钻孔、装药、填塞及网路连接等重点环节施工工艺进行了阐述。通过对爆后效果观察, 效果良好。

关键词: 开挖边坡; 预裂爆破; 变坡比; 异标高; 施工方案

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2020)01-0093-07

Research on Pre-splitting Blasting Technology and Construction Process for High Slope under Complicated Conditions

TANG Yi, SUN Fei, LI Guang-zhou, JIANG Xin-zhong

(Nuclear Industry Nanjing Construction Group Co Ltd, Nanjing 210003, China)

Abstract: The slope project of the first phase of Zhangzhou Nuclear Power Plant is taken as the research background. During the slope blasting excavation process on the 31~36 axis and 43.5~53.5 m elevation, the elevation of different positions of the same layer slope is different, and the slope ratio changed from 1:0.6 to 1:0.75, which made the pre-splitting blasting of the slope more difficult. Based on the analysis of the key and difficult points in the construction and previous similar pre-splitting blasting experience, the blasting parameters such as hole diameter d , hole distance a , uncoupling coefficient B , linear charge density q , hole depth H and inclination angle were designed in detail. Meanwhile, the key links such as surveying and positioning, hole location determination, drilling, charging, filling and network connection were described. Through the observation after blasting, the effect was good. The experience can provide a reference for similar projects.

Key words: slope excavation; pre-splitting blasting; variable slope ratio; different level; construction method statement

爆破技术是岩土高边坡开挖的一种行之有效的手段, 为了降低爆破对边坡的振动破坏、保证边坡岩体的完整性, 施工中常采用预裂爆破技术。预裂爆破属于定向成缝成面的控制爆破技术范畴, 由

光面爆破演变而来, 早期也有称作预裂光面爆破, 上世纪50年代在国外兴起, 60年代中期到70年代初期在我国地下开挖、边坡治理等工程中开始全面推广应用, 取得了巨大的经济效益^[1]。

在边坡预裂爆破开挖过程中, 沿预定的边坡边界按一定的间距布置一排预裂爆破孔, 在孔中装少量的不耦合药包, 主爆孔起爆之前先起爆预裂孔, 沿预裂孔方向预先形成一道贯通裂隙。其作用

收稿日期: 2019-07-25

作者简介: 唐毅(1981-), 男, 本科, 主要从事爆炸与毁伤作用机理研究及其应用, (E-mail)393955176@qq.com。

通讯作者: 孙飞(1989-), 男, 硕士, 主要从事爆炸与毁伤作用机理研究及其应用, (E-mail)1326662880@qq.com。

一方面可使主爆孔炸药爆炸的冲击波到达预裂面时被折射、扩散、扰动和吸收,大大降低主爆孔爆破对预裂面以外岩体的松动和破坏,提高岩体的稳定性;另一方面可确保爆破开挖的边界尽量与设计的轮廓线相符,不出现超挖或欠挖现象^[2,3]。

1 工程概况

根据该段边坡的工程设计图纸结合现场实际工况,由于地表地质原因,31轴左侧为松软土层,使用施工机械按要求刷坡至设计要求即可,本次预裂爆破为31~36轴,如图1所示,各轴之间上口线高程、下口线高程、边坡高度、坡比及预裂边界形状不尽相同,具体参数详见表1。

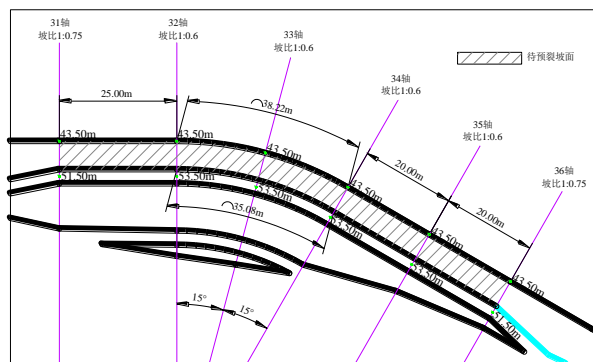


图1 预裂爆破段边坡设计图

Fig. 1 Pre-splitting blasting section slope design

2 施工重难点

由图1与表1可知,该段边坡各轴处设计参数不尽相同,在施工过程中应分别进行设计施工,工作量大,施工技术复杂且精度较难控制。

3 预裂爆破施工工艺

在预裂孔前设置3排露天深孔爆破孔,平均孔深10 m,孔距5.5 m,排距3.0 m,单耗 0.38 kg/m^3 ;由于本工程中主要研究预裂爆破技术参数,而露天深孔爆破参数根据现场工况及经验可取经验值,此处不再进行过多赘述。

3.1 爆破参数选择

预裂爆破的预裂效果好坏取决于预裂爆破工艺、爆破参数以及炸药特性,对于工程而言,爆破工艺和炸药特性都是较为固定的,唯有爆破参数会随地质状况和生产需要而变动,因此,爆破参数的选择直接影响着爆破效果,是预裂爆破工程设计的重要内容。本文结合工程实践经验和有关文献给出各种爆破参数的计算公式和一些参考值来对爆破参数进行选择^[4-8]。

(1)炮孔直径 d 。炮孔直径的确定直接关系到施工的效率 and 成本,应综合考虑岩石特性、现场机械设备及工程具体要求进行选择^[4]。一般情况下,主要根据爆破现场工况和钻机型号确定,当在底下小断面的巷道实施预裂爆破时,孔径取 $35\sim 45 \text{ mm}$;而在露天情况下实施预裂爆破时孔径可取大些,根据多年核电预裂爆破施工经验及现场钻具,本次预裂爆破孔径 $d=90 \text{ mm}$ 。

(2)孔距 a 。预裂爆破的实质是使预裂孔之间产生贯通裂隙,已形成平整的断裂面。因此,炮孔间距对形成贯通裂隙有着非常重要的作用。炮孔间距的大小主要取决于炸药性质、不耦合系数和岩石的物理力学性质^[5,6]。经查阅参考文献可知,瑞典兰格弗斯(Langefors)给出了如下公式

$$a=(8\sim 12)d(d>60\text{mm}) \text{ 和 } a=(9\sim 14)d(d\leq 60\text{mm}) \quad (1)$$

由于 $d=90 \text{ mm}$,孔距 a 的取值范围为 $0.72\sim 1.08 \text{ m}$,为方便现场布孔,孔距 $a=1.0 \text{ m}$ 取整。

(3)不耦合系数 B ^[5,6]。不耦合系数 B 是指孔径与药径之比,当药包全部填满整个断面时,不耦合系数就达到了最小值 $B=1$,这时装药起爆后,能量可直接传入岩壁,避免了传播过程中的损耗。随着不耦合系数的增大,药孔壁上的切向最大应力急剧下降,作用时间延长,使得爆炸能以应力波形式传播能量的部分减少,而以准静态压力形式传播能量的部分增多。在岩石中就有利于形成应力叠加、应力集中以及拉伸裂隙,而不宜产生粉碎。

表1 43.5~53.5 m 边坡 31~36 轴详细参数表

Table 1 43.5~53.5 m slope 31~36 axis detailed parameter list

轴数	轴间距离/m	上口线高程/m	下口线高程/m	边坡高度/m	坡比	预裂边界形状
31~32 轴	20	51.5~53.5	43.5	8~10	1:0.75~1:0.6	直线形
32~34 轴	52.36	53.5	43.5	10	1:0.6	圆弧形
34~35 轴	20	53.5	43.5	10	1:0.6	直线形
35~36 轴	20	53.5~51.5	43.5	10~8	1:0.6~1:0.75	直线形

一般情况下, 预裂爆破中预裂孔只是要求形成预裂缝, 而不是大量崩落岩石, 因此不宜采用太大的孔径和装药直径。根据试验及经验数据, 不耦合系数 B 一般取 2~4, 坚硬岩石因抗压强度高, 可采用较小的不耦合系数, 而松软岩石则应取较大的不耦合系数。本工程中为中等强度岩石, 且根据现场可提供炸药型号, 药卷最小直径为 32 mm, 为方便施工, 减少二次处理, 本工程取不耦合系数 $B=90/32=2.81$ 。

(4) 装药线密度 $q^{[5,6]}$ 。经查阅相关文献资料可知, 预裂爆破的线装药密度 q 计算公式有

$$q = Kda^{1/2} \quad (2)$$

式中, K 为岩石系数, 坚硬岩石为 0.6, 中等强度岩石为 0.4~0.5, 软岩为 0.3~0.4。考虑到本工程中待爆岩体为中等强度岩石, 风化较严

重, 由上述公式可计算出线装药密度 q 的取值范围在 0.36~0.45 kg/m, 为保证边坡保留岩体部分的完整性, 本工程中线装药密度取小值 $q=0.36$ kg/m。

(5) 孔深 H 。孔深根据预裂孔坡比与上、下口线高程差计算, 超深取 0.5 m, 详见表 2。

(6) 倾斜角度。对于类似变坡比的边坡预裂爆破孔理论角度, 为便于施工通常只将变坡比段的角度差求出来, 除以预裂孔数, 按平均法粗略计算出每个预裂孔增减的度数, 这种方法可用于坡比变化不大的边坡施工中, 精度较差。31~32 轴与 35~36 轴预裂孔角度变化按此方法与实际边坡角度的误差见图 2、图 3; 为最大程度确保施工精度, 应分别计算每个预裂孔的钻孔角度, 详见表 2。

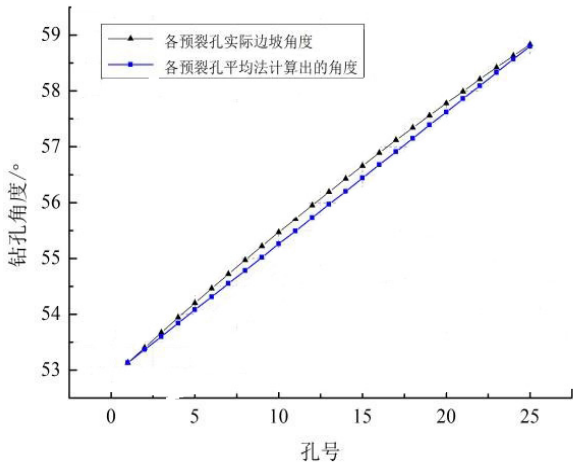


图 2 31~32 轴钻孔角度变化对比图

Fig. 2 Contrast diagram of 31~32 shaft drilling angle variation

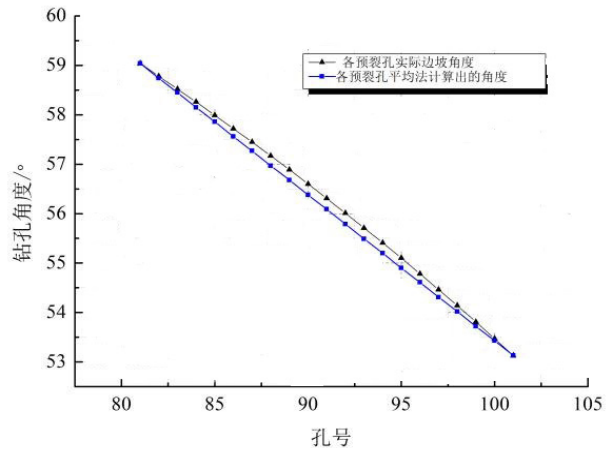


图 3 35~36 轴钻孔角度变化对比图

Fig. 3 Contrast diagram of 35~36 shaft drilling angle variation

3.2 布孔、钻孔工艺

根据多年核电预裂爆破施工经验总结, 预裂爆破的布孔步骤主要有:

(1) 测量定位。根据施工图纸要求的边坡上口线位置, 为保证边坡上口线的精度, 尤其是 32~34 轴处圆弧形上口线的误差, 使用测量仪器沿 31~36 轴每隔 3m 定位一个点, 将 31~36 轴待爆破段边坡的上口线理论位置标识出来。然后在理论上口线上以孔距 $a=1$ m 的距离将预裂孔理论位置挨个标记出, 并结合各孔位所在位置的坡比计算出钻孔的理论角度, 如表 2 所示。

(2) 实际孔位确定。由于边坡实际高程与设计高程有误差, 布孔时, 应根据预裂孔位的实际高程

对理论孔位进行微调, 换算原则为“高处后移, 低处前移”, 确保在设计边坡面上钻孔, 如图 4 所示。

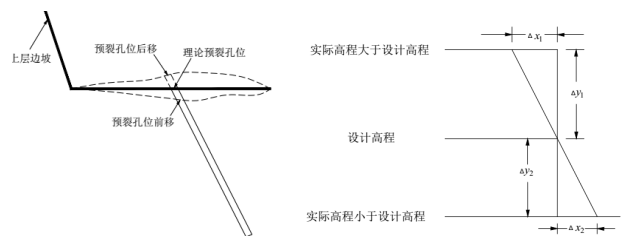


图 4 预裂孔位微调原则示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fine-tuning principle of pre-cracking

表2 边坡31~36轴设计预裂孔参数
Table 2 Design of pre-cracking parameters for slope 31~36 axis

轴号	孔号	理论高程/m	边坡高程差/m	理论角度/°	坡长/m	斜超深/m	孔深/m
31~32 轴	1	51.50	8.00	53.13	10.00	0.63	10.60
	2	51.58	8.08	53.40	10.06	0.62	10.70
	3	51.66	8.16	53.67	10.13	0.62	10.80
	4	51.74	8.24	53.94	10.19	0.62	10.80
	5	51.82	8.32	54.20	10.26	0.62	10.90
	6	51.90	8.40	54.46	10.32	0.61	10.90
	7	51.98	8.48	54.72	10.39	0.61	11.00
	8	52.06	8.56	54.97	10.45	0.61	11.10
	9	52.14	8.64	55.22	10.52	0.61	11.10
	10	52.22	8.72	55.47	10.58	0.61	11.20
	11	52.30	8.80	55.71	10.65	0.61	11.30
	12	52.38	8.88	55.95	10.72	0.60	11.30
	13	52.46	8.96	56.19	10.78	0.60	11.38
	14	52.54	9.04	56.43	10.85	0.60	11.50
	15	52.62	9.12	56.66	10.92	0.60	11.50
	16	52.70	9.20	56.89	10.98	0.60	11.60
	17	52.78	9.28	57.12	11.05	0.60	11.70
	18	52.86	9.36	57.34	11.12	0.59	11.70
	19	52.94	9.44	57.56	11.19	0.59	11.80
	20	53.02	9.52	57.78	11.25	0.59	11.80
	21	53.10	9.60	57.99	11.32	0.59	11.90
	22	53.18	9.68	58.21	11.39	0.59	12.00
	23	53.26	9.76	58.42	11.46	0.59	12.10
	24	53.34	9.84	58.63	11.52	0.59	12.10
	25	53.42	9.92	58.83	11.59	0.58	12.20
32~34 轴	26~60	53.50	10.00	59.04	11.66	0.58	12.20
34~35 轴	61~80	53.50	10.00	59.04	11.66	0.58	12.20
35~36 轴	81	53.50	10.00	59.04	11.66	0.58	12.20
	82	53.40	9.90	58.78	11.58	0.58	12.20
	83	53.30	9.80	58.52	11.49	0.59	12.10
	84	53.20	9.70	58.26	11.41	0.59	12.00
	85	53.10	9.60	57.99	11.32	0.59	11.90
	86	53.00	9.50	57.72	11.24	0.59	11.80
	87	52.90	9.40	57.45	11.15	0.59	11.70
	88	52.80	9.30	57.17	11.07	0.60	11.70
	89	52.70	9.20	56.89	10.98	0.60	11.60
	90	52.60	9.10	56.60	10.90	0.60	11.50
	91	52.50	9.00	56.31	10.82	0.60	11.40
	92	52.40	8.90	56.01	10.73	0.60	11.30
	93	52.30	8.80	55.71	10.65	0.61	11.30
	94	52.20	8.70	55.41	10.57	0.61	11.20
	95	52.10	8.60	55.10	10.49	0.61	11.10
	96	52.00	8.50	54.78	10.40	0.61	11.00
	97	51.90	8.40	54.46	10.32	0.61	10.90
	98	51.80	8.30	54.14	10.24	0.62	10.90
	99	51.70	8.20	53.81	10.16	0.62	10.80
	100	51.60	8.10	53.47	10.08	0.62	10.70
	101	51.50	8.00	53.13	10.00	0.63	10.60

1. 计算过程取超深为 0.5 m, 则斜超深=超深*sin(理论角度); 2. 孔深等于坡长与斜超深之和, 方便施工, 保留小数点后一位。

(3) 布置导向孔。预裂孔位置按照实际高程调整后, 在预裂孔沿边坡上口线法线 3 m 处各自定位出一个导向孔, 与预裂孔一一对应, 导向孔处使用铅垂线对钻杆方向进行定位, 大大提高钻孔精度。钻孔角度与方向控制见图 5、图 6。



图 5 钻孔角度控制
Fig. 5 Drilling angle control



图 6 钻孔方向控制
Fig. 6 Drilling direction control

(4) 钻孔。由表 2 可知各预裂孔的钻孔角度, 由于钻机在实际施工过程中, 孔深在 10 m 左右, 倾斜钻孔时, 钻头在岩石各向受到的应力各不相同, 钻杆会向受应力小的一侧弯曲, 因此成孔后形成一条向上略微弯曲的孔, 实际钻孔角度往往比理论角度偏大 $1^{\circ}\sim 2^{\circ}$, 如果按照理论角度来打孔的话, 预裂爆破后下口线会向外移, 未达到设计要求, 需对下口线处的根底进行二次处理, 时间成本和经济成本大大增

加。为避免此类情况发生, 根据多年施工经验, 钻孔时可根据现场实际工况将钻孔角度调大 $1\sim 2^{\circ}$ 左右。

3.4 装药结构

由前述爆破参数选择可知, 线装药密度 q 为 0.36 kg/m , 考虑到孔底处岩石强度较高、夹制作用大、爆后容易形成较难处理根底, 且为避免孔口药量过大导致爆后在孔口产生利文斯顿漏斗, 破坏边坡面, 结合现场炸药型号, 分别在孔底和孔口处设置加强段药包和减弱段药包, 线装药密度分别为 $q_{\text{加强}}=2.44\text{ kg/m}$, $q_{\text{减弱}}=0.20\text{ kg/m}$ 。装药结构见图 7。

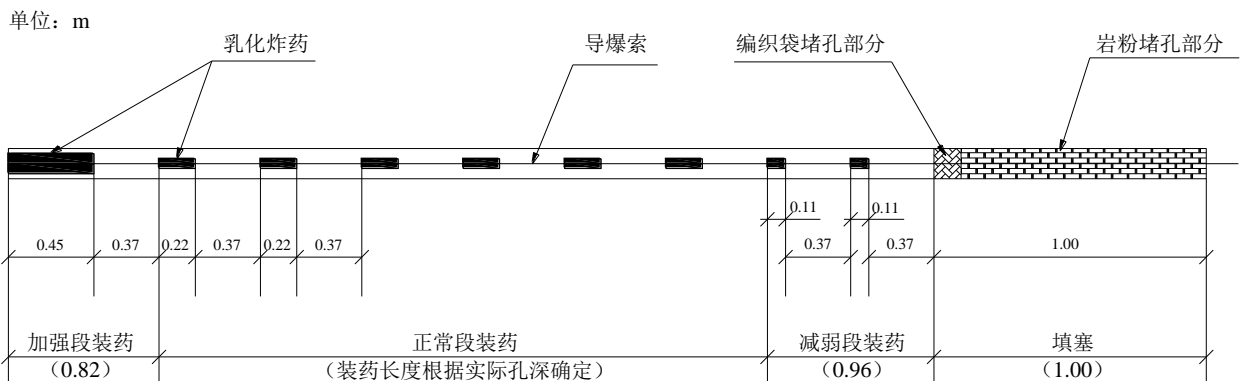


图 7 预裂孔装药结构示意图(单位:m)
Fig. 7 Schematic diagram of pre-cracking charge structure(unit:m)

在装药的过程中,为确保导爆索与炸药贴合质量,能完全引爆炸药,孔底加强段应将导爆索完全插入炸药内部,正常段应使用绝缘胶带先将炸药按设计间距绑扎在导爆索上,然后将绑扎好的“药串”固定到竹片,慢慢送入预裂孔中,见图8。

3.5 填塞要领

由于预裂爆破属于不耦合装药,药包与孔壁之间空隙较大,不可像主爆区那样,装完药后直接使用岩粉填塞,为防止岩粉填充药包与孔壁之间的间隙,应先向孔内填塞一柔性堵塞物,如废旧编织袋,然后在回填岩粉,填塞长度为1 m,按要求填满岩粉

后,应轻轻捣实,如图9所示。

3.6 网路连接

(1)导爆索的联结。导爆索的传爆能力有一定的方向性,因此在导爆索连接时,在预裂孔外沿预裂方向敷设一条导爆索主线,将各预裂孔中引出的支线接头迎着导爆索主线的传爆方向联结,支线与主线传爆方向的夹角应小于 90° ,如图10所示。

(2)导爆索与雷管之间的联结。为确保雷管起爆导爆索的可靠性,雷管与导爆索捆扎端头头的距离不少于15 cm,雷管的聚能穴应朝向导爆索的传爆方向。

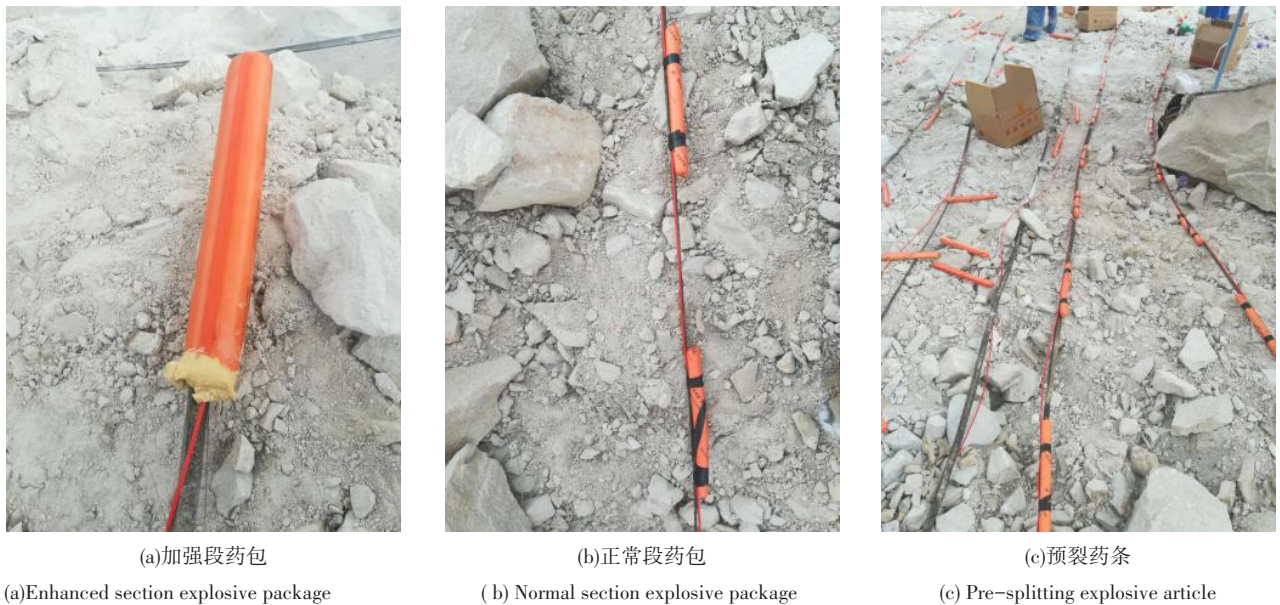


图8 预裂药包制作

Fig. 8 Pre-splitting explosive strip production



图9 编织袋填塞炮孔

Fig. 9 Woven bag filling blasthole

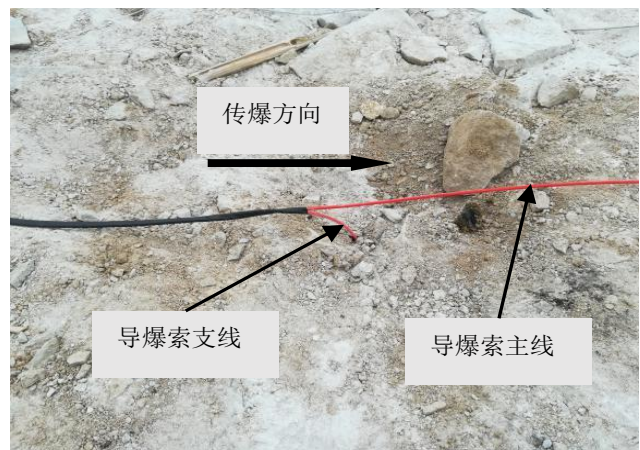


图10 导爆索网路联结

Fig. 10 Detonating cord network connection

(3)起爆网路联结。由于导爆索传爆过程中产生的噪音较大,而本次预裂爆破孔101个,为防止扰民,使用3段毫秒延期雷管将其分成5区进行延期起爆,前4个区各分担20个预裂孔,最后一区分担21个预裂孔;最后一个预裂孔与前排露天深孔导爆管网路联结,中间设置一发5段毫秒延期雷管。

4 爆后效果

通过爆后观察,可见沿着预裂孔方向形成了一条宽约4 cm的贯通裂缝,裂缝两侧表面岩体无外翻,见图11;将爆渣清理干净后,坡底无较大抵抗线,可使用油锤等施工机具进行清理,无需进行二次爆破处理,预裂面成型较好,半孔率达到95%以上,见图12、图13。



图11 爆后形成预裂缝 图12 爆后根底
Fig. 11 Pre-crack after explosion Fig. 12 Post-explosive root



图13 预裂成型边坡面
Fig. 13 Pre-cracked slope

5 结论

通过本次预裂爆破参数设计、施工以及爆破后效果可得,本次设计比较成功,可为类似工程在一定程度上提供参考。

参考文献(References)

- [1] 胡英国,卢文波,陈明,等.不同开挖方式下岩石高2013,32(6):1176-1184.
- [2] HU Ying-guo, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Comparison of damage evolution process of high rock slope excavated by different methods[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(6): 1176-1184. (in Chinese)
- [3] 许名标,彭德红.边坡预裂爆破参数优化研究[J].爆炸与冲击, 2008, 28(4): 355-359.
- [4] XU Ming-biao, PENG De-hong. Parameter optimization of the slope pre-splitting blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2008, 28(4): 355-359. (in Chinese)
- [5] 丁小华,李克民,任占营,等.露天矿高台阶预裂爆破技术的发展及应用[J].矿业研究与开发, 2011, 31(2): 94-97.
- [6] DING Xiao-hua, LI Ke-min, REN Zhan-ying, et al. Development and application of high bench pre-splitting blasting technique in surface mine[J]. Mining R & D, 2011, 31(2): 94-97. (in Chinese)
- [7] 王和平,郭连军,张大宁,等.大孤山铁矿预裂爆破研究与应用[J].金属矿山, 2015(10): 18-23.
- [8] WANG He-ping, GUO Lian-jun, ZHANG Da-ning, et al. Application and research of pre-splitting blasting in Dagushan iron mine[J]. Metal Mine, 2015(10): 18-23. (in Chinese)
- [9] 阳天海,龙源,顾文彬,等.光面、预裂爆破参数选择与质量措施研究[J].爆破, 2000, 17(1): 10-13.
- [10] YANG Tian-hai, LONG Yuan, GU Wen-bin, et al. Study on parameters selection and quality measures in smooth and presplitting blasting[J]. Blasting, 2000, 17(1): 10-13. (in Chinese)
- [11] 葛克水.预裂爆破参数的研究[D].北京:中国地质大学, 2009.
- [12] 陈俊桦,张家生,李新平.基于岩石爆破损伤理论的预裂爆破参数研究及应用[J].岩石力学, 2016, 37(5): 1441-1450.
- [13] CHEN Jun-hua, ZHANG Jia-sheng, LI Xin-ping. Study of presplitting blasting parameters and its application based on rock blasting-induced damage theory[J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(5): 1441-1450. (in Chinese)
- [14] 安远英.预裂爆破成缝机理的数值模拟研究及其应用[J].煤矿安全, 2018, 49(5): 178-182.
- [15] AN Yuan-ying. Numerical simulation research on mechanism of cracks formation induced by pre-splitting blasting and its application[J]. Safety in Coal Mine, 2018, 49(5): 178-182. (in Chinese)

英文编辑:陈东方