

双聚能槽药柱的研究及工程应用

秦健飞, 秦如霞

(中国水电八局, 湖南长沙 410007)

摘要:双聚能槽药柱在炮孔内有约束条件下爆炸时,由于聚能作用会聚集双聚能槽药柱爆炸后的成缝能量,并使得炸药爆速发生变化,在采用文中装置后可确保聚能射流能够沿着预裂(光爆)面发挥气刃作用,这样将使爆破应力波作用、高压气体的膨胀作用和聚能射流的气刃作用在岩体形成裂缝的瞬间能够有机结合。

关键词:双聚能槽药柱;瞬时爆轰论;对中装置;双聚能预裂

中图分类号:TD235

文献标识码:B

Study and Application of the Explosive Rolls with Double Concentrated Energy Grooves

QIN Jian-fei, QIN Ru-xia

(Sinohydro Bureau Eight, Changsha, Hunan 410007, China)

Abstract: The blasting energy of the explosive rolls with double concentrated energy grooves can be concentrated after it was blasted in the hole. The alignment setting ensures that the high pressure gas blades penetrate cracks along the presplit face. This organical combination of the presplit blasting and the concentrated energy blasting makes the application of the double concentrated energy presplit blasting in production.

Key words: explosive rolls with double concentrated energy grooves; theoretics of the momentary blasting; alignment setting; the concentrated energy presplit blasting

聚能预裂(光面)爆破研究,旨在寻求一种减少能耗和钻孔工作量,以及爆破后对保留岩体破坏影响比较小的爆破技术。“双聚能预裂与光面爆破综合技术”^[1-6]在推广应用的同时,进一步开展了更为深入的理论研究和模拟试验研究。研究成果表明,双聚能槽药柱在有炮孔约束条件下其爆速会发生变化,从而实现扩大预裂(光面)爆破孔距、减小对保留岩体爆破危害的双重目标。

1 预裂(光面)爆破规律的理论研究

1.1 双聚能槽药柱瞬时爆轰论

在“双聚能预裂与光面爆破综合技术”实际施工中,双聚能槽药柱是采用导爆索绑在短半轴边,或者将导爆索置于双聚能槽药柱内引爆的,两种引爆方式对于爆破效果没有区别。工业导爆索的爆速 $\geq 6\ 000\text{ m/s}$,全药柱的爆轰过程非常短

促。目前常使用的工业炸药的爆速为 $3\ 200 \sim 5\ 500\text{ m/s}$, 双聚能槽药柱短半轴方向宽度 22 mm , 全断面爆轰时间只有 $4.00 \sim 6.87 \times 10^{-6}\text{ s}$ 。因此, 可以假定爆轰是瞬间完成, 这样就可以不考虑起爆点在装药中位置的影响。这就是瞬时爆轰假说, 采用瞬时爆轰的假说, 可以使问题的研究简化^[7]。

爆轰瞬间完成, 炸药爆炸时所产生的爆轰产物来不及发生位移, 在这一瞬间爆轰产物的体积和装药的初始体积一样。而且爆轰产物处于静止状态, 爆轰产物的质点初速度为零。药柱各表面在爆轰瞬间, 爆炸场是均匀的。双聚能槽药柱在爆破孔内爆轰产物的压力认为可以达到热化学压力。所谓热化学压力就是假定没有热辐射和热传导等热的逸散时, 爆轰产物还在炸药装药初所占的体积内就已获得热和化学平衡后所达到的流体准静压力。爆炸产物的散射可认为是在这种高压状态下向外膨胀的质点运动。也就是说, 炸药爆炸所释放出的能量全部转变为爆炸产物的内能, 在真空中散射时, 内能完全转变为动能^[7-8]。

在瞬时爆轰假说条件下, 爆轰产物沿着其装药表面的法线向各个方向散射开来, 而形成所谓的散射面, 这个面把未运动和已运动的产物分离开来, 随着时间的推移, 它将逐渐向药柱内部推移。

如图1所示, 设药柱的长半轴为 a , 短半轴为 b , 半锥角为 α , 锥角顶到装药中心的距离为 c 。炸药起爆后, 药柱沿图2所示的过程一层层向外脱离。这样沿椭圆面和聚能槽的张角面这两个方向飞散的爆轰产物在中间相遇会形成一个交界面, 该交界面为图2所示的一条曲线, 求解这条曲线便可得出各方向散射的装药量。

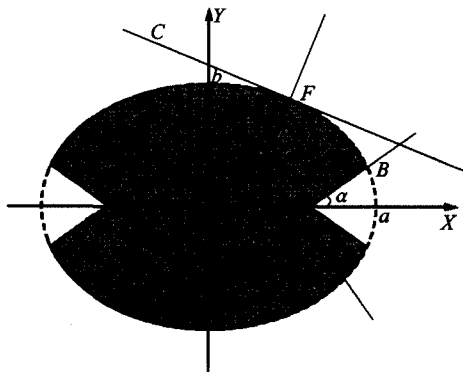


图1 装药截面参数图

Fig. 1 Parameters of section of the explosive roll

可得出: 双聚能槽药柱产生聚能效应的装药有效部分面积 $S_{\text{有}}$ 为(图2中的斜影部分):

$$S_{\text{有}} = 4 \times \left[\int_0^B f(x_0) dx_0 - \frac{1}{2} (x_B - c) \cdot y_B \right] \quad (1)$$

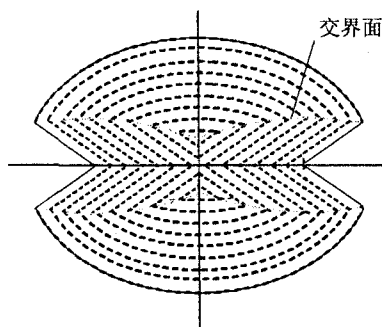


图2 装药爆轰后的飞散过程图

Fig. 2 Splitting process after blasting

双聚能槽药柱装药的总截面积 $S_{\text{总}}$ 为(图2中的弧形及斜影部分):

$$S_{\text{总}} = 4 \times \left[\int_0^B \frac{b}{a} \sqrt{a^2 - x^2} dx - \frac{1}{2} (x_B - c) \cdot y_B \right] \quad (2)$$

双聚能槽药柱产生聚能效应有效利用率 η 为:

$$\eta = S_{\text{有}} / S_{\text{总}} \quad (3)$$

运用计算机进行数值分析, 以 η 的最大值做为判断最优参数的标准, 得出了以下结论:

在短半轴与长半轴之比 b/a 为 0.8222 时, 即: 当 $a = 15$, $b = 12.3331$, $c = 9$, $\alpha = 34.8235^\circ$ 时, 椭圆形双聚能槽药柱在聚能方向的利用率最大, 为最优装药的结构参数。这与工地采用的双聚能槽管截面参数十分吻合。

1.2 双聚能槽药柱爆速降低的机理分析

影响炸药爆速的主要因素为炸药成分、装药密度、原材料细度和药柱直径等。而双聚能槽药柱在炮孔内爆炸时, 药柱直径比普通预裂爆破所使用的 $\phi 32$ 药柱小, 当炸药品种和药柱断面确定之后这些都是确定不变的因素。因此双聚能槽药柱爆炸时爆速降低的原因, 除了药柱直径变小外还应当还有其他原因, 爆速的降低必须寻求新的理论解释。如果按照瞬时爆轰论计算出双聚能槽药柱能产生聚能效应的装药比例, 问题就会变得比较容易解决, 如图3所示:

图中, 设 O 为直角坐标系原点, 第一象限对应函数为: 椭圆弧 $y = \frac{11}{15} \sqrt{15^2 - x^2}$, 三角形边线 y

经计算机数值模拟计算求解交界面曲线函数

$= \tan 35^\circ(x - 9)$; 求解出交界面曲线函数 $y = -0.0177x^2 + 0.3425x + 2.2966$ 以断面积表示单位长度药柱的装药量, 设 $ODFBKO$ 所围面积为 S_1 , $OCABKO$ 所围面积为 S_2 , BKH 所围面积为 S_3 , 经计算机数值模拟计算求解交界面曲线函数可得出:

1) 装药总面积: $4(S_1 - S_3) = 4(127.56 - 9.36) = 472.80$

2) 右向装药有效部分面积: $2(S_2 - S_3) = 2(50.14 - 9.36) = 81.56$

3) 左向装药有效部分面积: $2(S_2 - S_3) = 2(50.14 - 9.36) = 81.56$

4) 上向装药有效部分面积: $2(S_1 - S_2) = 2(127.56 - 50.14) = 154.84$

5) 下向装药有效部分面积: $2(S_1 - S_2) = 2(127.56 - 50.14) = 154.84$

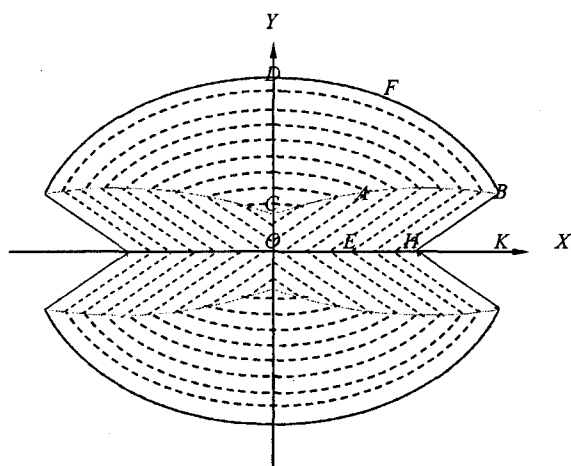


图3 双聚能槽药柱产生聚能效应的装药比例
Fig. 3 Proportion of the explosive producing concentrated energy in the roll

双聚能槽药柱产生聚能效应有效利用率 η 为:

$$\eta = S_{\text{有}}/S_{\text{总}} = 4(S_2 - S_3)/4(S_1 - S_3) = 163.12/472.80 = 34.5\%$$

双聚能槽药柱有 34.5% 的装药产生聚能效应, 采用双聚能槽药柱进行预裂(光面)爆破时, 其孔距会成倍增大. 由于有约 1/3 的药量破岩成缝做功, 炸药的能量分配发生变化导致了炸药传爆速度的降低, 所以双聚能槽药柱在炮孔中爆炸时爆速降低.

1.3 双聚能槽药柱的破岩机理分析

双聚能槽药柱在炮孔中引爆后, 聚能槽附近的炸药产生高密度的气体射流, 气体射流在炮孔

孔壁上按一定方向造成弧形破坏边缘, 即塑性变形区, 由于孔壁和炮孔堵塞的约束, 爆生气体不能迅速逸散, 而是对孔壁产生准静态作用^[9-10]. 双聚能槽药柱由于采用了完全不耦合装药(药柱完全安装在炮孔中心位置), 爆生物质在炮孔内膨胀时孔壁由原来圆形变为近似椭圆形的弹性边界, 孔壁被分为塑性变形区和完整的弹性变形区, 且塑性变形区处于各向等压的应力状态. 塑性变形区的外边缘, 岩石处于弹性与塑性变形的临界状态. 因此爆生气体在孔内准静态膨胀时, 相当于椭圆形边界孔壁均匀作用有压力 P , 椭圆形边界受到准静态应力场(图4)作用, 而孔壁压力小于或等于岩石动抗压强度. 但柱面波在各个方向上的强度是不同的, 由于双聚能槽的聚能作用, 聚能槽对应的方向上柱波的压力比较高, 而非聚能槽方向则较低, 这也是孔壁由原来圆形变为近似椭圆形的弹性边界的关键原因. 在 x 方向上的相邻两孔连线上, 因为岩石的抗拉强度永小于其动抗压强度, 在爆破应力波和高压气体膨胀的共同作用下, 相邻两孔方向上开始出现微裂缝, 由于对中装置的完全对中作用, 双聚能槽使聚能射流方向与预裂面完全吻合, 聚能射流会使预裂缝迅速扩展和延伸, 由此还可以推导得出最佳炮孔间距值为:

$$S = \left\{ \frac{2\mu + 1}{1 - \mu} \cdot \frac{P}{[\sigma_s]} \right\}^{1/\alpha} a + 2b \quad (4)$$

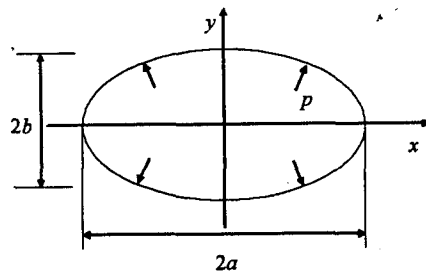


图4 双聚能槽药柱的爆生气体
均压作用于椭圆形边界上
Fig. 4 Blasting gas acts on the
elliptic boundary equably

而采用一般的非聚能不耦合装药, 其最佳炮孔间距值则为:

$$S_1 = \left\{ \frac{2\mu + 1}{1 - \mu} \cdot \frac{P}{[\sigma_s]} \right\}^{1/\alpha} b + 2b \quad (5)$$

由两式可以得到:

$$S/S_1 = (a/b) + 1 \quad (6)$$

因 $a < b$, 所以 $S > S_1$. 这表明椭圆形双聚能槽药柱用于预裂(光面)爆破时, 其孔距可以增大很多, 同时由于成形双聚能槽药柱的双槽聚能槽管材质为聚氯乙烯(PVC)及其他化学添加剂, 其密度高达 1.8, 在高温作用下其粒子射流会比一般炸药气体射流具有更高的作功能力, 因此又再次提高了炮孔的间距, 减少了钻孔工作量. 炮孔间距的增加取决于双聚能槽药柱的断面参数, 即聚能效果和罩材材质.

2 双槽聚能药柱工程实例及指标测试

2.1 双聚能槽药柱的工程应用

双聚能槽药柱已在我国很多大中型水电站工地推广应用, 小湾、溪洛渡、彭水、龙开口、铅厂等水电站的边坡预裂、水平预裂都广泛采用了这一新技术. 为此制定的《双聚能预裂与光面爆破综合技术施工工法》已于 2008 年 3 月被中华人民共和国住房和城乡建设部审批为国家一级工法, 工法编号: YJGF078-2006(一级).

2.2 保留岩体声波测试

小湾水电站弱风化花岗岩双聚能槽药柱预裂爆破保留岩体, 对爆前爆后声波波速进行了检测, 检测结果表明, 采用聚能预裂爆破时保留岩体的声波衰减完全满足规范要求, 小湾爆后保留岩体 40 cm 深度的波速平均降低 1.02%, 最大只降低 4%, 远小于规范要求^[1-6].

2.3 保留岩体爆破地震效应测试

溪洛渡水电站强风化玄武岩坝肩边坡进行 15 m 梯段双聚能槽药柱预裂爆破时, 对爆区后冲方向爆破质点振动速度进行监测. 爆区后冲方向沿水流方向共布置 8 个地表测点, 分别测试垂直向、水平切向和水平径向的质点振动速度.

从爆破监测成果和波形图可知, 双聚能槽药柱预裂爆破的减振效果明显, 在预裂缝形成后靠近建基面的主爆破孔爆破在监测点的振动速度与离开监测点较远的主爆破孔的爆破振动速度相差无几^[1-6].

所有双聚能槽药柱预裂爆破的观测资料表明, 双聚能预裂爆破的裂缝开展宽度比普通预裂爆破的裂缝开展宽度略小, 但是同样能够起到很好的减振作用.

2.4 保留岩体爆破残留半孔的对比

由于双聚能槽药柱预裂(光面)爆破对保留岩体的破坏作用显著减小, 因此采用该项技术施工的预裂(光爆)面其残留半孔就是个半圆, 并且

没有爆破再生裂隙, 并且半孔残留率得到很大提高^[1-6].

3 试验结果分析

3.1 聚能效果与药柱形状和聚能槽的张角相关

为研究扩大预裂爆破的孔距和减小爆破对保留岩体的危害, 制定双聚能槽药柱的截面参数, 进行了改变截面参数值的对比试验, 取得了最优截面参数值, 如图 5 所示.

试验表明在双聚能槽药柱采用最优截面参数值时, 可以达到最理想的爆破效果, 预裂爆破的孔距可以增大 2~3 倍, 同时爆破对保留岩体的危害得到有效减小.

3.2 聚能结构产生聚能效应

计算机数值模拟计算和试验表明: 药柱形状只要有聚能结构, 就会有聚能效应产生.

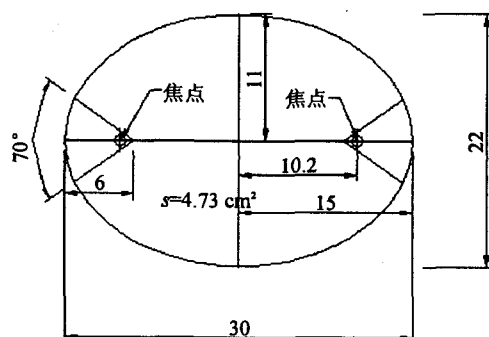


图 5 双聚能槽药柱的最优截面参数

Fig. 5 The optimum section parameters of explosive roll with double concentrated energy grooves

用 $\phi 25$ 圆柱形药柱(装药截面 4.90 cm^2)和双聚能槽药柱(装药截面 4.73 cm^2)在碾压平整密实渣场的爆破试验也充分证明了这一结论(见图 6, 图 7), $\phi 25$ 圆柱形药柱(截面 4.90 cm^2)渣面上只留下爆破痕迹, 无刻痕; 而双聚能槽药柱(截面 4.73 cm^2)渣面上留下 6.9 mm 宽、6.4 mm 深的刻槽.

3.3 双聚能槽药柱在炮孔内爆炸时爆速变小

采用 HandiTrap II VOD 爆速测试系统对双聚能槽药柱爆速测试, 结果表明由于双聚能作用, 在炮孔内的双聚能槽药柱爆炸时, 爆速比普通预裂爆破所采用的药柱在自然状态下的爆速降低了 19.55%, 用等截面圆形药柱和双聚能槽药柱作爆速对比测试也证实了这种现象. 计算机数值模拟计算表明双聚能槽炸药爆炸时, 有 34.5% 的爆破能转

化为双聚能射流能,因此爆速降低和爆破能量的重新分配都大大减少了对保留岩体的破坏作用。

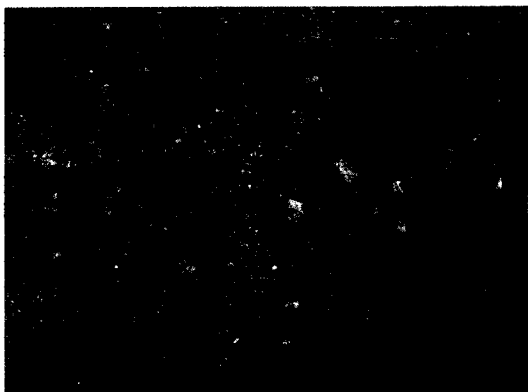


图6 $\phi 25$ 圆柱形药柱
Fig.6 $\phi 25$ explosive roll



图7 双聚能槽药柱
Fig.7 The explosive roll

4 经济效益分析

以小湾水垫塘采用双聚能槽药柱进行水平预裂爆破与原来采用普通水平预裂爆破进行经济对比分析,实际爆破标准块为:长 $\times$ 宽 $\times$ 高 $=15\text{ m}\times 32\text{ m}\times 2.5\text{ m}$,水平预裂孔深度为 15 m 。普通预裂爆破孔距 80 cm ,计 40 个孔,双聚能槽药柱预裂爆破孔距 200 cm 计 16 个孔进行对比分析预裂爆破费用。潜孔钻钻孔费 27.46 元/m ,CM-351 钻孔费 35.00 元/m ,炸药 8 元/kg ,导爆索 2.5 元/m ,人工费 50 元/人 。台班,双聚能槽管材 4.80 元/m (个)。计算结果表明采用双聚能槽药柱进行预裂(光面)爆破根据不同地质条件一般可以扩大孔距 $2\sim 3$ 倍,因此可得到双聚能槽药柱进行预裂爆破与普通药柱进行预裂爆破相比,单位面积

造孔量降低 $50\%\sim 65\%$,单位面积能源消耗降低 $50\%\sim 65\%$,单位面积装药量降低 $50\%\sim 65\%$,单位面积预裂(光面)爆破成本降低 $50\%\sim 55\%$ 。

5 结论

1)由于利用瞬时爆轰的假说进行计算机数值分析得出的椭圆形双聚能槽药柱最优装药的结构参数与工地试验得出的双聚能槽药柱最优结构参数吻合,工程实践中双聚能槽药柱采用导爆索内外两种引爆方式对于爆破效果没有差别,因此瞬时爆轰的假说是正确的。

2)理论研究和工程实践均表明采用椭圆形双聚能槽药柱进行预裂和光面爆破时,由于面装药密度的减少和爆破能量的集中释放,可以成倍扩大孔距并且减小爆破对保留岩体的危害,增强保留岩体的稳定性和安全性。

3)采用双聚能槽药柱进行预裂和光面爆破,不仅可以降低能耗,保护环境,还可以节省施工成本,加快施工进度,提高施工质量,具有相当好的经济效益和社会效益,值得大力推广应用。

参考文献:

- [1] 秦健飞. 聚能预裂(光面)爆破技术[J]. 工程爆破, 2007, 13(2): 19-24.
- [2] 秦健飞. 双聚能预裂与光面爆破综合技术[J]. 采矿技术 2007, 7(3): 58-60.
- [3] Qin Jianfei. The Technology of Concentrated Energy Presplit Blasting[C]//WANG Xuguang. New Development On Engineering Blasting. Metallurgical Industry Press, 2007.
- [4] Qin Jianfei. The Using of Concentrated Energy Explosive in Presplit lasting[C]//Proceedings of The 2nd International Conference on Explosives and Blasting, 2007.
- [5] 秦健飞. 双聚能预裂与光面爆破新技术评析[J]. 水利水电施工, 2008(1): 17-22.
- [6] 秦健飞, 秦如霞. 双聚能槽药柱的研究及其应用[C]//刘殿书. 中国爆破新技术 II. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 215-219.
- [7] 叶序双. 爆炸作用理论基础[M]. 南京: 解放军理工大学工程兵工程学院, 2001.
- [8] 张志呈. 爆破基础理论与设计施工技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1994.
- [9] 郭进平, 聂兴信. 新编爆破工程实用技术大全[M]. 北京: 光面日报出版社, 2002.