

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.01.009

定向断裂控制爆破技术在巷道掘进中应用研究*

余永强^{1,2}, 余雳伟¹, 范利丹^{1,2}, 徐峰¹, 周桂杰¹

(1. 河南理工大学 土木工程学院, 焦作 454003;

2. 河南省地下空间开发及诱发灾变防治国际联合实验室, 焦作 454003)

摘要: 在煤矿巷道掘进中, 普通光面爆破技术存在着围岩表面超挖、欠挖、严重破坏等现象, 后期支护难度大, 维护成本高。在定向断裂控制爆破技术机理分析的基础上, 提出了周边眼切缝药包定向断裂控制技术, 进行了切缝药包爆破和普通药包爆破的工程应用对比研究。试验结果表明: 采用外径 38 mm、内径 36 mm、切缝宽度 4 mm、切缝长度 600 mm 的 PVC 管作为切缝管进行切缝药包定向断裂控制爆破, 其爆破效果较好。切缝药包爆破改善了巷道断面平整度, 开挖轮廓平滑, 提高了半孔率, 最大值为 90%。爆破完巷道轮廓成形好, 有效控制了超挖量, 平均线性超挖量为 0.171 m, 降低了 0.238 m。切缝药包爆破增加周边眼眼距, 节约每立方米炸药用量 25%, 每循环进尺可减少炸药用量约 20 kg, 减弱了爆破震动。定向断裂控制爆破有效降低了对围岩体的损伤, 增加了围岩的稳定性, 取得了较为理想的爆破效果。

关键词: 巷道掘进; 切缝药包; 定向断裂; 控制爆破; 复式楔形掏槽

中图分类号: TD235.373 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2022)01-0061-07

Application Study of Directional Fracture Controlled Blasting Technology in Roadway Excavation

YU Yong-qiang^{1,2}, YU Li-wei¹, FAN Li-dan^{1,2}, XU Feng¹, ZHOU Gui-jie¹

(1. School of Civil Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;

2. International Joint Research Laboratory of Henan Province for Underground Space Development and Disaster Prevention, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In coal mine roadway excavation, normal smoothing blasting technology has the phenomena of over-excavation, under-excavation and severe damage on the surrounding rock, which makes it difficult to support in the later stage and leads to high maintenance cost. Based on the mechanism analysis of directional fracture control blasting technology, we proposed a controlled blasting technology with slit charge in perimeter holes, and conducted comparison tests between blasts with slit charge and normal charge. The test results show that a good blasting effect can be achieved by a PVC pipe with outer diameter of 38 mm, inner diameter of 36 mm, slit width of 4 mm and slit length of 600 mm for directional fracture controlled blasting. This kind of controlled blasting technology improves the flatness of the roadway section, smooths the excavation contour and increases the half-hole rate with a maximum value of 90%. The average linear over-excavation was 0.171 m with a reduction of 0.238 m. Due to the increased hole spacing of the perimeter holes, the powder factor has been saved by 25%, which means about 20 kg less explosive per cycle of footage, and thus blasting vibration has also been reduced. Directional fracture control blasting effectively reduces the damage to the surrounding rock, increases its stability and achieves a more satisfactory blasting effect.

Key words: roadway excavation; slit charge; directional fracture; controlled blasting; compound wedge cut

近年来,定向断裂控制爆破技术已广泛应用在深部岩土工程、矿井建设、隧道开挖、水利工程、边坡爆破等涉及工程爆破的领域^[1]。最早在20世纪初Foster C L提出了挖轴向沟槽在炮孔壁上的方法,从而达到预定方向断裂的想法,由于理论限制和工艺的复杂性,没有得到实施^[2]。1950年,Duvall W J等提出反射波理论,系统研究了爆炸冲击荷载作用下岩石的破碎机理^[3]。1970年,Fourney W L首次在实验中采用切缝管状药包,在爆破过程中取得了定向断裂的效果^[4,5]。

田应祥等在露天控制爆破中采用了PVC管作为切缝管进行切缝药包爆破^[6],得到最佳爆破效果的切缝药管参数。丁晨曦等利用动态焦散法结合高速摄影技术^[7],研究切缝药包爆破定向裂纹与张开节理的作用过程,指出张开节理对切缝药包爆破定向裂纹的扩展有阻滞作用。杨仁树等利用高速纹影和超压测试技术研究了切缝药包爆破后爆轰波的变化规律^[8],发现爆生气体优先沿切缝方向释放,切缝方向的应力峰值远大于非切缝方向的。王志光等通过对顶板进行定向断裂爆破数值模拟研究^[9],用模拟得到的最优爆破参数在丰峪煤业十三采区进行定向断裂切顶爆破现场试验,解决了坚硬厚顶板下安全高效采煤问题。弥壮壮等运用LS-DYNA模拟了切缝药包作用机理^[10],在寺家庄矿南一盘区北回风巷进行现场切缝药包对比试验得到了增加半眼残痕条数,眼痕率比普通爆破提高70%左右的结果。岳中文等结合试验和数值模拟方法探讨了爆轰波与爆生气体作用于炮孔壁的过程^[11,12],通过对比表明,采用不耦合装药结构能使试件内部形成更高的应力集中,沿切缝方向的冲击作用也强于耦合装药结构。魏垂胜将切缝药包和环向聚能药包爆破技术的布孔设计应用车集煤矿达到了高效低耗爆破效果^[13],实现了岩巷快速掘进。宇广鑫等在潞安煤矿用聚能管定向光面爆破技术来爆破巷道的方法进行了对比试验提高了岩石巷道掘进^[14]。吴振华等指出聚能管光面爆破技术改变常规光面爆破参数^[15],将爆炸产生的能量集中在周边眼连线方向的围岩上,减少对围岩的破坏,保持巷道围岩的完整性。

由此可知,现有研究主要集中在聚能药包爆破

和切缝药包爆破的理论研究、数值模拟和切缝参数的调整与修正上,取得了丰硕的研究成果,而涉及通过切缝药包控制巷道开挖轮廓、提高半孔率的研究还比较少。众所周知,煤矿巷道开挖轮廓的控制、半孔率的提高对爆破效果有着重要的作用,普通的光面爆破难以达到理想效果。因此,提高半孔率、有效控制巷道开挖轮廓是获得爆破效果的重要途径。在安全、便捷高效且经济的前提下,进行周边眼切缝管装药定向断裂的控制爆破掘进技术研究,对煤矿矿井建设具有一定的工程意义。

1 定向断裂控制爆破机理

根据爆破破岩机理,岩体内最初形成的裂隙是由炸药产生的应力波造成的,然后爆炸气体渗入已产生的裂隙中同时在静压作用下,加强由应力波产生的裂隙的扩展^[16,17]。首先在切缝方向产生初始定向裂纹,使炮孔边缘及孔壁内形成应力松弛,在一定程度上抑制其他方向上裂隙的产生,初始裂纹形成以后,在爆生气体的作用下,初始裂纹尖端形成应力集中,当其动态应力强度因子超过介质的断裂韧性时,裂隙继续扩展,介质发生破坏^[18]。切缝药包爆破原理如图1所示。位于切缝管内的炸药在爆炸时,因切缝管的约束作用,冲击波沿着切缝方向直接向外传播作用于炮孔壁上(A点和B点)。

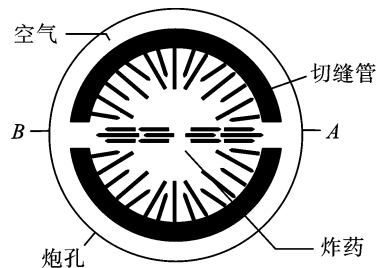


图1 切缝药包爆破原理

Fig. 1 Principle of slit charge blasting

切缝药包爆破总体可以划分为三个过程:第一,炸药起爆至在切缝管内充分爆炸,称为炸药起爆至初始冲击波阶段,在实际中,精确计算炸药爆炸后在空气中形成的冲击波是比较有难度的,常常采用近似的方法,这种近似计算将爆轰产物的膨胀过程分成两个时间段。第一阶段,爆轰产物压力由 p_H 膨胀到临界压力 p_r ,在此过程中,膨胀系数 k 是恒定值,爆轰产物符合下列公式

$$p_H - v_H^k = p_r - v_r^k \quad (1)$$

第二阶段,爆轰产物压力由 p_r 膨胀到空气冲击波初始压力 p_i ,在此过程中,膨胀系数 u 是恒定值,

收稿日期:2021-09-07

作者简介:余永强(1972-),男,教授、博士,主要从事地下工程开挖与支护、安全技术及工程方面的研究,(E-mail)yyq@hpu.edu.cn。

通讯作者:范利丹(1982-),女,副教授、硕士,主要从事地下工程支护材料、绿色建筑材料等方面的研究,(E-mail)lidanfan@hpu.edu.cn。

基金项目:国家自然科学基金项目(51874119)

爆轰产物符合下列公式

$$p_r - v_r^u = p_i - v_i^u \quad (2)$$

式中: k 和 u 均代表不同阶段的膨胀系数, k 通常取值为 3, u 取 1.2~1.4。 p_H 为爆轰产物压力; p_c 为爆轰产物临界压力; p_i 为空气冲击波初始压力; v_H, v_r, v_i 为不同阶段的比容。

第二,初始裂纹形成阶段,随着炸药爆炸过程的结束,所产生的膨胀波也开始穿过切缝方向向空气中传播,形成冲击波。切缝药包爆破时初始裂纹的形成条件为

$$p > (1 - \mu) \cdot S_{d1} / \mu \quad (3)$$

$$p > (1 - \mu)(C - \tau) / (\mu \cdot \tan \varphi) \quad (4)$$

式中: μ 为岩石的泊松比; p 为炮孔壁上的压力; S_{d1} 为岩石动态单轴抗拉强度; C 为岩石动态内聚力; φ 为岩石动态摩擦角; τ 为炮孔壁上的剪应力。

第三,裂纹扩展阶段,初始裂纹形成后,裂纹尖端在应力波和爆生气体的共同作用下,进一步发育和扩展。根据断裂力学,在准静态压力作用下,若满足

$$K_I > K_{IC} \quad (5)$$

则裂纹继续扩展。式中: K_I 为裂纹尖端处的应力强度因子; K_{IC} 为岩石动态断裂韧性。

切缝药包定向断裂控制爆破的第二个过程影响到定向断裂方向的精准性,第三个过程影响裂纹的

扩展长度。由此可见,定向断裂控制爆破效果是由第二个和第三个过程共同决定的。

2 切缝药包设计

切缝药包是在炸药药卷的外层套上预先切过缝的塑料管,采用不耦合装药,通过切缝管在炮孔周围产生不均匀的应力分布,特别是在切缝方向上产生应力突变,在预先切过缝的方向上产生裂缝。切缝管采用 PVC 塑料管,切缝管外表面设有聚能切缝,切缝管内设有爆破药卷,其直径和长度是根据炮孔和药卷的直径以及药卷长度来确定的,杨仁树等相关实验的实验结果得出最佳切缝宽度为 4 mm^[18],试验选取切缝宽度为 4 mm,切缝药包结构如图 2 所示,外径 38mm,内径 36 mm,壁厚 1 mm,其制作方法是:先将 PVC 塑料管加工成所需长度和直径,然后再加工出一定宽度和长度的对穿缝,为了保证切缝管的完整性,在 PVC 管的两端一般留 2~3 mm 的长度。切缝药包的安装过程如图 3 所示,在将炸药放入切缝管内,前端用炮泥堵塞,然后将切缝管放入周边孔中,切缝药包布置过程如图 4 所示,使切缝方向和轮廓面平行方向对齐,这有利于两炮孔间利用爆破气楔形成预裂面,从而达到定向控制爆破。

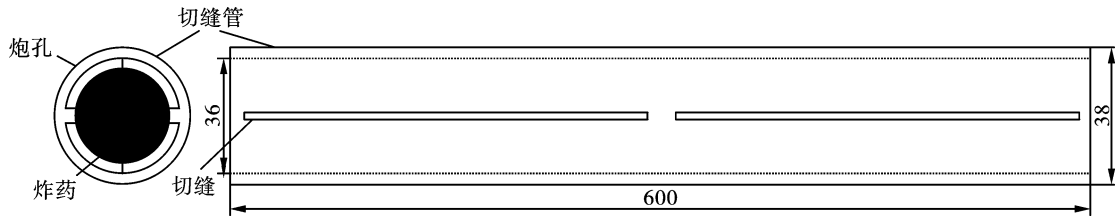


图 2 切缝药包结构图(单位:mm)

Fig. 2 Structure diagram of slit charge(unit:mm)



图 3 切缝药包安装图

Fig. 3 Installation diagram of the slit charge



图 4 切缝药包布置图

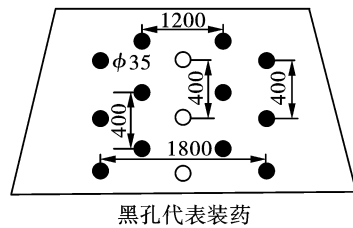
Fig. 4 Arrangement diagram of slit charge

3 现场试验

3.1 工程背景

中泰矿业-500 m 35 采区下山回风巷,巷道断面为直墙半圆拱形,巷道掘进中有水平、上山和下山部分,设计巷道净宽 5.0 m,净高 3.6 m,断面净面积 $S=15.32 \text{ m}^2$ 。断面岩石岩性分布较均匀,以白色中砂岩为主,并夹杂部分页岩,岩石普氏坚固性系数 $f=8.9 \sim 13.8$ 。围岩轮廓成形效果较差,破坏了围岩的稳定性,提高后期支护时间和经济成本。为了减少对围岩的损伤破坏,决定采用定向断裂控制爆破技术,全断面一次微差起爆方式,周边眼采用定向断裂切缝管装药。

试验设有两组,一组为切缝药包爆破,另一组为普通药包爆破。切缝药包爆破周边眼眼距为



500 mm,周边眼的数量为 29 个;普通药包爆破组周边眼的眼距为 300 mm,周边眼的数量为 39 个。

3.2 爆破方案设计

3.2.1 炮眼深度和直径

炮眼深度为 $l=2.2 \text{ m}$,取周边眼、辅助眼及底眼深度 2.2 m,掏槽眼深度 2.4 m。炮眼直径为 42 mm。

3.2.2 掏槽方式

对取回的巷道岩样进行钻芯取样,测得其平均普氏系数 $f=11.7$,属于较坚硬类岩石,根据工程经验决定采用复式楔形对称掏槽,充分利用漏斗状(楔形)炮眼的爆破作用将掘进面中部或中下部岩石爆出,掏槽炮孔布置图见图 5。

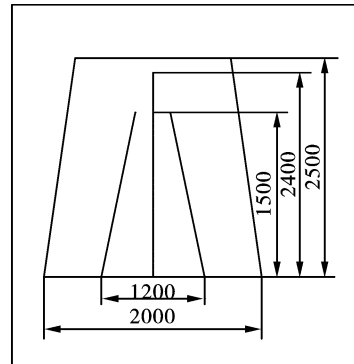


图 5 楔形掏槽炮孔布置示意图(单位:mm)

Fig. 5 Schematic diagram of hole arrangement of wedge-shaped cut(unit:mm)

(1) 间排距、倾角及最小抵抗线

一级和二级掏槽眼均布置为三对,孔口间距分别为 1200 mm、2000 mm,排距均为 400 mm,眼深分别为 1500 mm、2400 mm,两级掏槽眼交错布置。研究表明,掏槽眼倾斜角度 $65^\circ \sim 75^\circ$ 为宜,倾角越小,岩石的夹制作用将会越弱,因此可将一级掏槽眼倾角设置为 65° ,二级掏槽眼倾角为 75° 。中间轴线位置设置三个空孔,不装药,眼深为 2500 mm,排距为 400 mm。

辅助眼间距满足式 $a_r = (0.8 \sim 1.3)W'$, $W' = (0.456 \sim 0.741) \text{ m}$,对于坚硬类岩石,为达到较好的爆破效果,建议取小值,即 $a_r = 0.5 \text{ m} = 500 \text{ mm}$;另外,辅助眼炮眼间距可比掏槽眼大 100 ~ 200 mm,因此设计为 500 mm 符合设计要求,且一圈辅助眼与二圈辅助眼排距设计为 500 mm。辅助眼最小抵抗线为 $W' = 0.6 \text{ m}$ 。

一次微差爆破的较大装药量,为减小围岩的损伤程度和保证爆破效果的前提下,将切缝药包爆破周边眼间距 E 设置为 500 mm,普通药包爆破周边眼眼距设置为 300 mm。

光爆层厚度是影响光爆效果的重要参数,可按周边炮孔密集系数 $K = \frac{E}{W}$ 进行计算, K 值可取 0.8 ~ 1.0,硬岩取为 0.9,因此得切缝药包光爆层厚度 $W = 555 \text{ mm}$,取 550 mm,普通药包光爆层厚度 $W = 333 \text{ mm}$,取 350 mm。

(2) 装药量

炸药采用煤矿三级水胶炸药,规格为 $\phi 35 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 200 \text{ g}$ 。

掏槽眼单个炮孔装药量 Q_1 为 $Q_1 = \eta q_1 l$

式中: η 为炮孔装药系数,按砂岩坚固性系数查表取得 $\eta=0.8$; q_1 为线装药密度,按装药直径查表取得 $q_1=0.96 \text{ kg/m}$ 。 l 为炮孔深度,一级掏槽眼深度 1.5 m,

$Q_1 = 1.2 \text{ kg}$, 二级掏槽眼深度 2.4 m , $Q_1 = 1.9 \text{ kg}$ 。

辅助眼单孔装药量可按式计算 $Q_3 = q_2 a_r W$

式中: q_2 为硬岩炸药单耗,一般取 2.5 kg/m^3 。

带入各参数求得辅助眼单孔装药量 $Q_3 = 1.6 \text{ kg}$ 。

周边眼装药集中度 q_L 按下式计算: $q_L = K_1 K_2 m W$

式中: K_1 是与岩石性质有关参数,坚硬岩石取

$1.0 \sim 1.5$; K_2 是与炮孔深度有关参数,一般取 0.5 ;

m 为炮孔密集系数,取 $0.8 \sim 1.0$ 。带入得到切缝药包

包装药集中度 $q_L = 0.3 \text{ kg/m}$, 单孔装药量为 $Q_2 = 0.6 \text{ kg}$ 。

3.3 爆破设计图表

炮孔布置图如图 6 所示,爆破参数如表 1 所示。

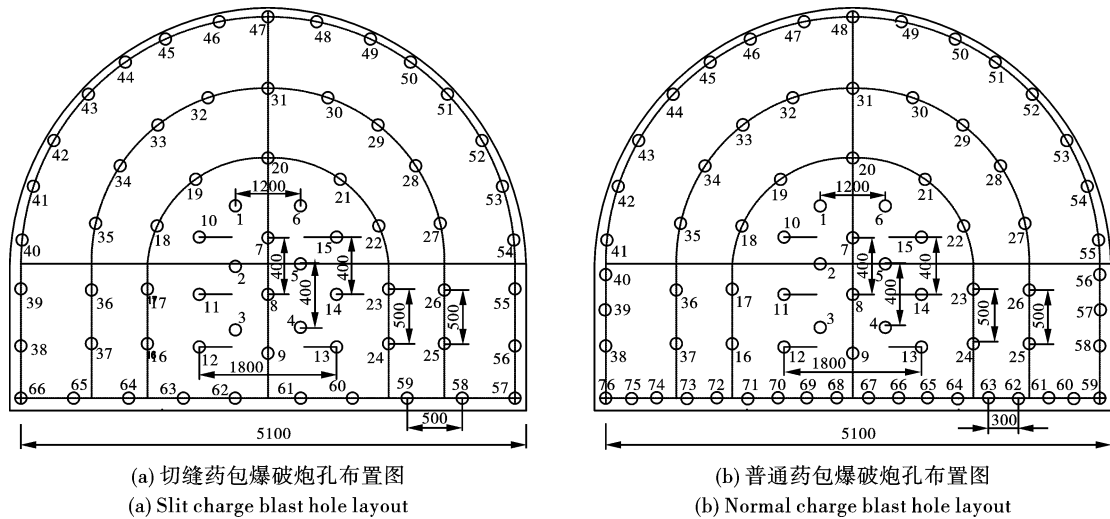


图 6 炮孔布置图(单位:mm)
Fig. 6 Blast hole layout(unit:mm)

表 1 爆破参数表
Table 1 Blasting parameter table

炮眼名称	普通药包爆破				切缝药包爆破			
	炮眼个数	炮眼深度/m	眼距/mm	单孔药量/kg	炮眼个数	炮眼深度/m	眼距/mm	单孔药量/kg
掏槽眼	6	1.5	400	1.2	6	1.5	400	1.2
掏槽眼	6	2.4	400	1.9	6	2.4	400	1.9
辅助眼	22	2.2	400	1.5	22	2.2	500	1.6
周边眼	39	2.0	300	0.9	29	2.2	500	0.6
中心空眼	3	2.5	400		3	2.5	400	
合计	76				66			

4 结果分析

在现场工业性试验期间,对炮眼利用率、周边眼痕保存率、平均线性超挖量、半孔率等进行了统计。试验统计结果如表 2 和表 3 所示。

对比常规普通药包爆破和切缝药包爆破,主要表现不同在(1)炸药用量(2)爆破效果(3)装药结构。基于这些差异,切缝药包爆破取得了良好的爆破效果,具体如下:

(1)缩短了打眼时间。切缝药包的周边眼数量比普通药包减少了 10 个,数量减少约 26%,缩短了钻孔时间,加快了施工时间,提高了施工效率。

(2)降低了炸药用量,根据试验记录,切缝药包每立方米炸药用量约为 2.2 kg ,普通药包每立方米炸药用量约为 2.9 kg ,每立方米炸药用量可减少 25%,每循环进尺可减少炸药用量约 20 kg 。

(3)超挖现象得到了有效控制。普通药包爆破超挖现象极其严重,采用切缝药包爆破后,如图 7 所示,平均线性超挖量为 0.171 m ,降低了 0.238 m ,超挖量得到有效控制,为后续施工提供了保障。

(4)提高了周边眼炮痕保存率和半孔率。如图 8 所示,开挖面较为平滑,爆破完巷道轮廓成形好,周边眼炮痕保存率平均值 93.2% ,提高约 10%,并在围岩表面均匀分布,半孔率平均值为 84.4% ,在

硬岩评价指标接近最优值(最优值为 85%以上),与普通药包爆破相比,提高约 10%,巷道轮廓面的平整度提高,爆破后围岩内部原有的裂隙几乎没有扩

展,并且没有再次产生过多新的裂隙,对围岩的扰动和破坏明显降低。

表 2 切缝药包试验组部分统计结果

Table 2 Part of the statistical results of the slit charge blast test group

地点	次数	炮眼利用率/%	周边眼炮痕保存率/%	平均线性超挖量/m	半孔率/%
回风巷上段	1	95	93	0.176	85
回风巷下段	2	95	94	0.214	86
3004 底联巷	3	91	95	0.152	80
3004 底联巷	4	90	93	0.134	81
北大巷	5	92	96	0.139	85
下山回风巷	6	93	92	0.187	84
3150 底联巷	7	93	89	0.195	90
平均值		92.7	93.2	0.171	84.4

表 3 普通药包试验组部分统计结果

Table 3 Part of the statistical results of the normal charge blast test group

地点	次数	炮眼利用率/%	周边眼炮痕保存率/%	平均线性超挖量/m	半孔率/%
回风巷上段	1	88	87	0.456	78
回风巷下段	2	90	84	0.478	74
3004 底联巷	3	90	82	0.298	75
3004 底联巷	4	87	80	0.367	70
北大巷	5	85	88	0.378	80
下山回风巷	6	87	89	0.398	81
3150 底联巷	7	91	79	0.488	77
平均值		88.2	84.1	0.409	76.4

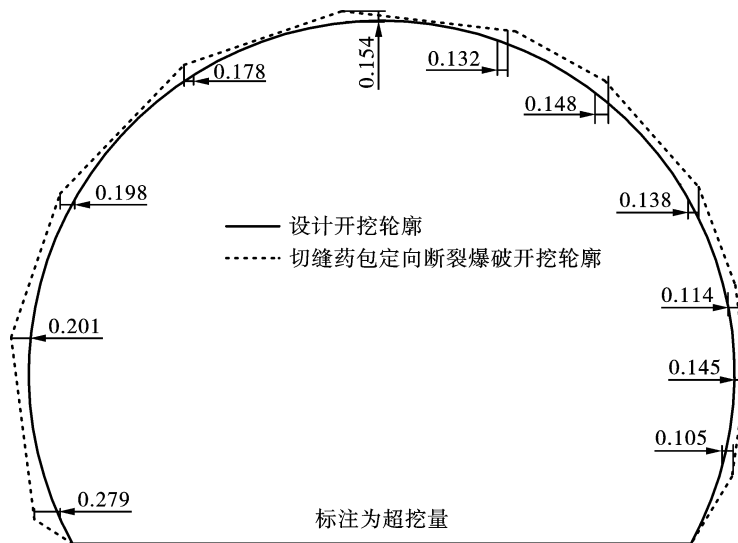


图 7 切缝药包开挖断面拟合图(单位:m)

Fig. 7 Fitting drawing of the excavation section of slit charge blast(unit:m)



图8 周边眼爆破效果

Fig. 8 Blast effect of perimeter holes

(5)减弱了爆破震动。切缝药包增加周边眼眼距,由300 mm提高到500 mm,为普通爆破周边眼眼距的1.6倍,降低了爆破过程中对围岩的影响,提高了围岩的稳定性。

切缝药包定向断裂控制爆破技术缩短了打眼时间,降低了炸药用量,降低了超挖量,提高了半孔率和周边眼炮痕保存率,有效降低了对围岩体的损伤,增加了围岩的稳定性,取得了较为理想的爆破效果。

5 结论

在煤矿巷道掘进中采用周边眼切缝药包定向断裂控制技术,进行了切缝药包爆破和普通药包爆破对比试验,试验取得了较为理想的爆破效果。

(1)切缝药包应用到周边眼后,提高了炮眼利用率,最大值为95%;与普通药包爆破相比,周边眼炮眼保存率提高约10%;平均线性超挖量降为0.171 m,有效控制了超挖量。

(2)切缝药包爆破完巷道轮廓成形好,巷道开挖轮廓较为平滑,切缝药包爆破增加周边眼眼距,减弱了爆破对围岩的震动,提高了半孔率,平均值为84.4%,降低对岩体的损伤,有效的增加了围岩的稳定性。

(3)切缝药包爆破减少了周边眼数量,缩短了打眼时间,工作效率得到提高,降低了炸药消耗量,每立方米炸药用量可减少25%,每循环进尺可减少炸药用量约20 kg。经济效益非常显著。

参考文献 (References)

[1] 杨仁树,王雁冰. 切缝药包不耦合装药爆破爆生裂纹动态断裂效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013,32(7):1337-1343.

[1] YANG Ren-shu, WANG Yan-bing. Experimental study on the dynamic fracture effect of uncoupled charge blasting burst cracks in slit packets[J]. Journal of Rock Mechan-

ics and Engineering, 2013, 32(7):1337-1343. (in Chinese)

[2] 高祥涛. 切缝药包爆轰冲击动力学行为研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2013.

[2] GAO Xiang-tao. Study on the kinetic behavior of slit packet blast impact[D]. Beijing: China University of Mining and Technology(Beijing), 2013. (in Chinese)

[3] LANGEFOR U, KIHLMSTROM B. Modern technique of rock blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1979, 16(3):51-64.

[4] FOURNEY W L, DALLY J W, HOLLOWAY D C. Controlled blasting with ligamented charge holders[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1978, 15(3):121-129.

[5] FOURNEY W L, STERN M. Further results on the stability of a finitely deformed thin cylindrical shell[J]. International Journal of Engineering Science, 1972, 10(7):102-113.

[6] 田应祥,张义平,金桑桑,等. 切缝药包在露天控制爆破中的应用研究[J]. 中国矿业, 2021, 30(7):171-175.

[6] TIAN Ying-xiang, ZHANG Yi-ping, JIN Sang-sang, et al. Study on the application of slit pack in open pit controlled blasting[J]. China Mining, 2021, 30(7):171-175. (in Chinese)

[7] 丁晨曦,杨仁树,陈程,等. 切缝药包爆破定向裂纹与张开节理相互作用的实验研究[J]. 工程科学学报, 2021, 43(7):894-902.

[7] DING Chen-xi, YANG Ren-shu, CHEN Cheng, et al. Experimental study on the interaction between slit pack blasting directional cracks and tension nodules[J]. Journal of Engineering Science, 2021, 43(7):894-902. (in Chinese)

[8] 杨仁树,杨国梁,高祥涛. 定向断裂控制爆破理论与实践[M]. 北京:科学出版社,2017.