

炮孔定向断裂爆破作用*

于慕松 杨永琦 杨仁树 张奇 金乾坤

(中国矿业大学北京研究生部 北京 100083)

摘要 采用三维激光全息动光弹超动态综合测试系统进行了定向断裂爆破模型试验研究。分析和讨论了定向断裂爆破动应力场参数和定向断裂爆破作用机理;优选了实用的定向断裂爆破新方法和配套工艺。经岩巷生产实践表明:所选择的切缝药包定向断裂爆破方法是可行的,它为改革现有光面爆破技术提供了良好的应用前景。

关键词 炮孔 定向断裂 爆破作用

中图分类号 TD235.1

1 前言

当前国内外岩巷生产中大都采用光面爆破技术控制周边质量。实践证明:单靠改善光面爆破技术,不可能做到精确控制周边质量。由于普遍存在超挖现象,直接影响降低成本和提高施工速度,在软岩和破碎岩层条件下尤为突出。如铁道部大秦线施工中,仅以19km隧道统计,如果超挖10cm,相当于多挖1km的同断面隧道。而我国每年的洞挖进尺,据不完全统计,约在5000km左右,若按上法粗略统计,超挖量减少10cm,相当于少挖250km隧道,可节约数十亿投资。煤炭工业每年岩巷掘进约1500km,如按此类推,将会取得重大的经济效益。但是,根据当前实际情况,要想精确地控制巷道周边质量,必须彻底改进光面爆破技术,寻求新的炮孔定向断裂爆破方法。国内外许多学者都相继开展了这方面的研究。

早在1905年,C. L. Foster 就提出在炮孔壁上挖轴向沟槽,可以加强在预定方向的岩石破碎。到80年代,A. L. Isakov^[1]又提出按预先或爆破瞬时对炮孔周边的力学强度进行分析和类似的研究。W. L. Fournery, D. B. Barker 和 J. W. Dally 等人^[2]进行了模型实验和现场试验,取得了积极的成果。我国从80年代后期,逐步开展了岩石定向断裂研究,在实验室、现场都做了不少研究工作。但是由于理论和技术上的复杂性,迄今为止,还没有能将定向断裂爆破方法应用于生产实践中。

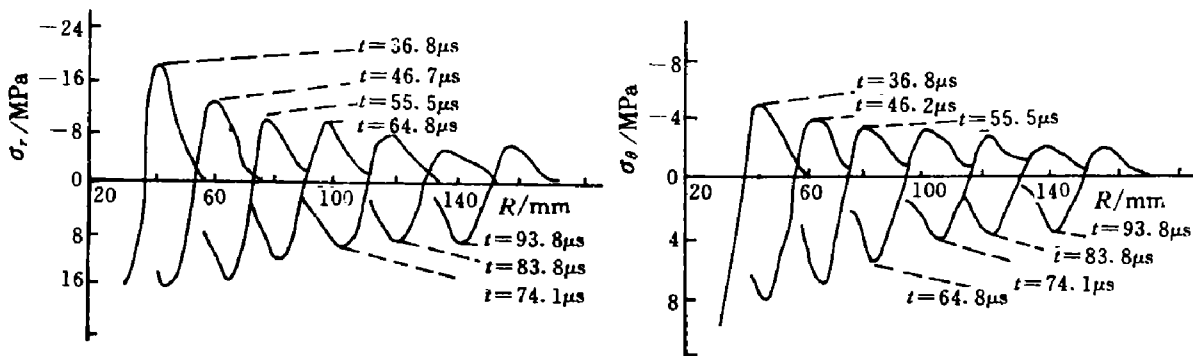
我们于1989年立项进行了研究工作。在实验室模型实验基础上,优选出以切缝药包为主的定向断裂爆破新工艺。经大同马脊梁运输大巷生产试验表明:定向断裂爆破方法可靠,效果良好。在 $f=4\sim 6$ 的岩石巷道中,眼痕率可从30%~50%左右提高到95%以上;不平整度小于100mm,炮眼利用率达98%以上。已形成的定向断裂爆破,三角复式分层分段掏槽的中深孔定向断裂爆破新工艺,具有广阔的应用推广前景。

* 国家自然科学基金,煤炭科学基金资助项目。

1995-11-23收到原稿,1996-04-05收到修改稿。

2 普通炮孔动应力场特征

当装药在炮孔中爆炸后,由于爆炸冲击波和爆生气体的综合作用,在炮孔周围沿径向产生同心圆的膨胀波和畸变波,P波在前,S波在后。炮孔附近周边岩体,由于切向拉应力的作用而形成若干径向裂缝。在环氧树脂模型进行试验,爆破后可见到6~11条明显的径向裂缝。裂缝尖端的应力场很强,但可分辨出它的应力条纹级数。在冲击波的动态作用同时,爆生气体楔入裂缝,使相邻径向裂缝之间形成类似于受径向压力作用的圆盘状应力条纹分布。炮孔附近密集裂纹区的范围约为炮孔半径的3~4倍。根据应力-光学定律可以求出应力应变关系和不同时刻径向应力、切向应力和径向距离的分布曲线(图1)。同时采用超动态测试系统可以求出动应变峰值随比例距离的衰减规律^[3]。



(a) 径向应力与径向距离关系
(a) Radial stress as a function
of position at different time

(b) 切向应力与径向距离关系
(b) Tangential stress as a function
of position at different time

图1 几个不同时刻径向应力 σ_r 、切向应力 σ_θ 随径向距离 R 的分布

Fig. 1 The distribution of σ_r - R , σ_θ - R at different time

当确定不耦合系数后,可以求出动应变峰值随比例距离衰减的关系,预测裂缝扩展长度,从而有效地控制炮孔附近周边的破碎情况。

当周边相邻炮孔同时爆炸后,应力波以柱面波的形式从炮孔向四周传播,在两炮孔之间形成一个极强的应力带,并出现应力集中现象。当间距合适时,在炮孔中间连心面上合成拉应力将大于岩石的极限抗拉强度。因此在相邻两炮孔之间的孔壁拉应力和爆生气体楔的驱动作用下,不论起爆时差大小,使得裂缝都从两炮孔开始向中心扩展,直至贯穿。图2为相邻两炮孔同时起爆后的应力发展图。A, B分别为两炮孔,炮孔间距100mm,沿径向扩展的有P波和S波。炮孔附近将产生径向裂缝。E点为两炮孔之间的应力叠加点。这已在模型实验和生产试验中得到验证。

根据研究^[4],在普通光爆孔中,径向裂纹的扩展规律与裂纹尖端的应力强度因子为复合型, K_I 一般为 K_{Ic} 的 $1/3 \sim 1/2$; K_{Ic} 值为 $2.25 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$; 止裂韧度约为 $1.1 \text{MPa} \sqrt{\text{m}}$, 其复合判据为

$$K_I + AK_I^2 + BK_{Ic} \geq K_{Ic} \quad (1)$$

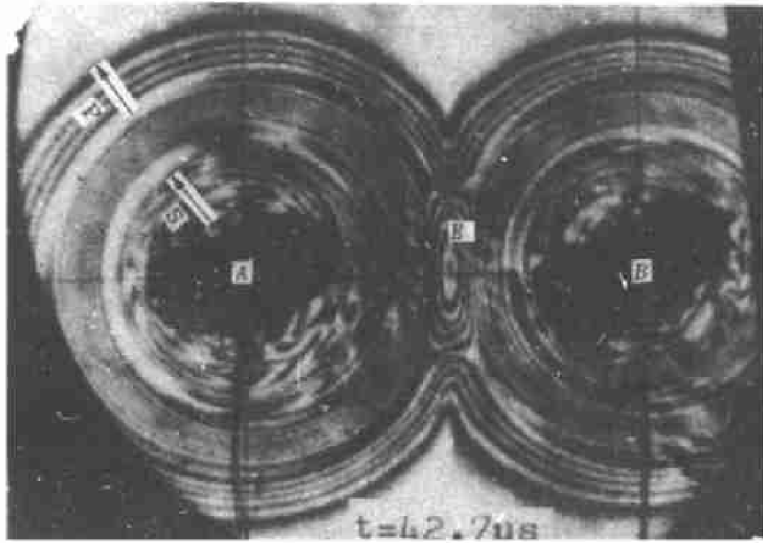


图 2 相邻两炮孔同时起爆后的应力条纹图

Fig. 2 Dynamic fringe patterns when two holes detonate simultaneously

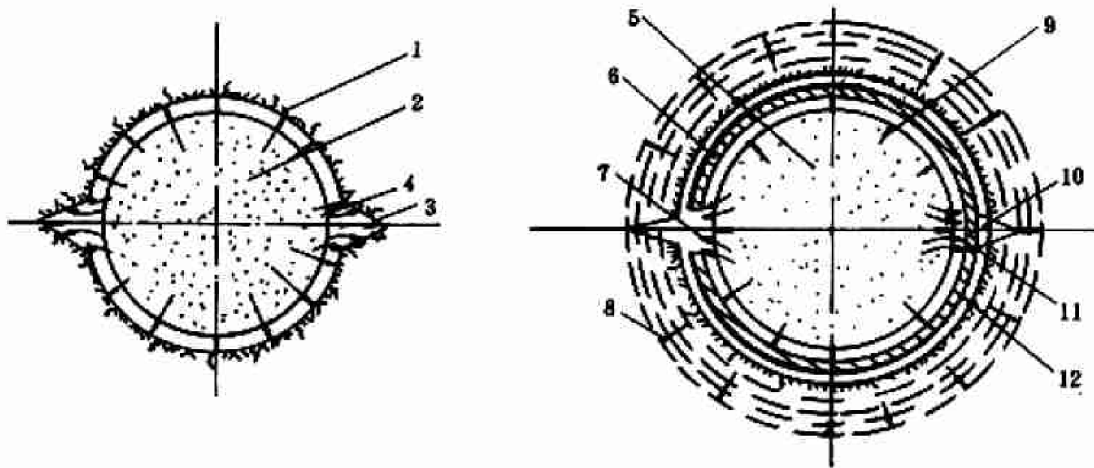
爆炸后最初的径向裂纹是由应力波作用产生的。随着应力波传播距离的增大,应力峰值将不断衰减,其裂纹尖端应力场的应力强度因子随裂纹数增加, K_I 型应力强度因子减小。由于爆生气体的作用,炮孔壁呈现复合型裂纹尖端动态应力场。 K_I 约为 K_{II} 的2~5倍。就是说,裂纹扩展时受到的剪切应力作用效应是拉伸应力作用效应的1/2~1/5。 K_I 是导致裂纹弯曲的重要因素。只要存在很小的 K_I 值,就会明显地增加裂纹扩展速度。 K_I 是由于爆生气体以高压楔入裂纹形成一个特殊的劈裂作用。因此研究炮孔断裂时,仅考虑 $K_I \geq K_{IK}$ (K_{IK} 为断裂韧度)是不全面的,应充分考虑爆生气体的驱动产生的 K_I 作用。

3 炮孔定向断裂爆破作用

和普通炮孔爆破不同,定向断裂爆破是人为地产生应力集中,使炮孔壁按预定的方向破裂。图3为定向断裂爆破法的炮孔示意图。

图3(a)为切槽炮孔结构示意图。它的特点是在爆破前加强炮孔周边的应力集中,如果切槽足够深,就会在爆炸后沿尖劈尖端产生精确的沿预定方向的破裂。切槽角度的大小和切槽深度直接影响定向断裂爆破效果。在切槽炮孔的四周应力发展不同于普通炮孔。图4为切槽炮孔应力变化状况。图中 O 为切槽炮孔, n 为切槽炮孔两侧切槽尖端的应力集中点。和图2相比,可以看出,应力发生了明显的集中。尽管如此,根据电测结果,在切槽炮孔四周,不论哪个方向,应力波峰值(径向应力 σ_r 和切向应力 σ_θ)都随比例距离增大而衰减。但是衰减指数各异。在相同比例距离处,沿切槽方向应变峰值最大,衰减速度也快;与切槽垂直方向应变峰值次之,衰减程度较小;与切槽成 45° 方向应变峰值最小,衰减程度次于切槽方向。根据实测,测点距炮孔中心分别为30、110mm处,沿切槽方向应变峰值分别为 $4908\mu\epsilon$ 和 $1241\mu\epsilon$;垂直切槽方向分别为 $1365\mu\epsilon$ 和 $837\mu\epsilon$;沿 45° 方向,应变峰值分别

为 $995\mu\epsilon$ 和 $224\mu\epsilon$ 。在 30mm 测点处,沿切槽方向的切向应变峰值是垂直切槽方向的 3.6 倍,是沿 45° 角方向的 4.9 倍;而在 110mm 处,沿切槽方向的切向应变峰值是垂直切槽方向的 1.5 倍,是 45° 角方向的 5.5 倍。



(a)切槽炮孔爆破

(b)切缝药包爆破

(a) The grooving borehole blasting

(b) The slotted cartridge blasting

1,12. 炮孔壁;2. 药包;3. 切槽;4,7. 爆生气体能流;5. 切缝药包;6. 塑料切缝管;
8. 爆炸瞬间冲击波前沿;9. 爆生气体前沿;10. 初始裂缝;11. 切口

1,12. Borehole wall;2. Charge;3. Groove 4,7. Explosion energy flows;5. Slotted cartridge;6. Plastic shell;8. Advance air forward position;9. The forward position of the detonating air;10. Open fracture;11. Slots

图3 炮孔定向断裂作用示意图

Fig.3 Schematic diagram of effects of the directed crack blasting

从图4看出,在炮孔两侧形成了明显的应力集中,其等差条纹曲线以 x 轴为对称轴并通过切槽尖端。根据弹性理论,裂纹尖端的应力强度因子主要为 I 型, I 型作用极小,可以认为切槽炮孔和普通光爆孔不同,在于应力波的影响极小,可以不考虑。根据材料力学和平面应力状态下应力光学定律,可得

$$K_I = \frac{\sqrt{2\pi r}}{\sin\theta} \left(\frac{n f_s}{h} \right)$$

式中: n 为等差条纹级数; f_s 为材料的动态条纹值 (N/m 条); h 为材料试件厚度 (m)。

根据实验^[5],沿定向断裂爆破方向应力强度因子约为非定向的 2.57~4.4 倍,远大于材料的断裂韧度。

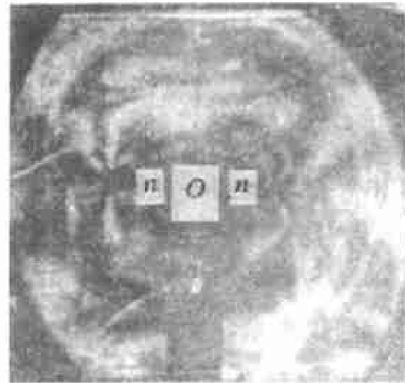


图4 切槽炮孔应力变化图

Fig.4 The stress fringe patterns of the grooving borehole

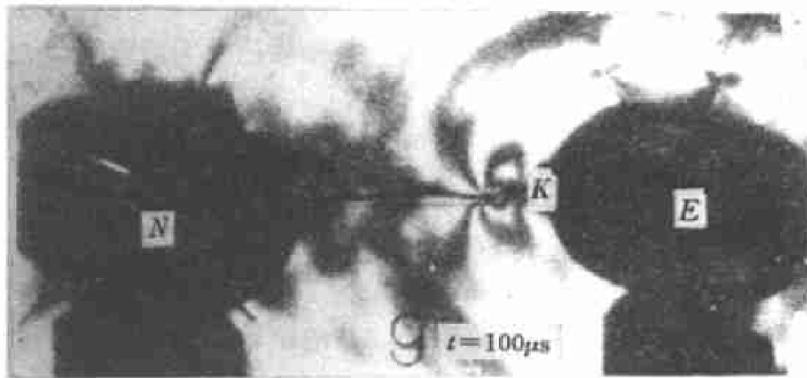


图5 切槽炮孔贯穿图

Fig. 5 Perforation cracks of the two grooving borehole blasting

槽尖端首先起裂。在爆生气体作用下,使裂缝自炮孔向两炮孔中心扩展,裂纹为张开型。如果切槽参数适当,可以相当精确地沿预定方向扩展,直至两炮孔贯通。

切槽炮孔定向断裂爆破效果,与切槽角度大小、切槽深度、炸药的爆轰压力大小等因素有关。

作用在炮孔壁上的爆生气体准静态压力按等熵膨胀过程计算。当采用2号岩石炸药时,爆生气体准静态压力为 $29.4\text{MPa}^{[6]}$ 。

文献[2]给出了用于计算炮孔切槽尖端裂纹初始扩展所需压力。引起裂纹驱动所需孔压很小,任何岩石在低压时都可能在切槽处形成裂纹扩展。大多数岩石起始扩展所需的断裂韧性随岩石性质不同而变化。例如石灰岩 $K_{IC}=55\sim 83$;砂岩 $K_{IC}=15\sim 16$;而花岗岩 $K_{IC}=186\sim 636$ 。不同岩石所需压力也不同。以石灰岩为例,当压力超过 8.67MPa ,一条 0.05cm 深的切槽就会发生裂缝扩展。在花岗岩上相同深度的切槽需要 20.8MPa 的压力。

控制裂纹初始扩展的压力范围主要取决于岩石的断裂韧性 K_{IC} ,自然裂纹长度 a 以及切槽深度。此外还与岩石的晶体材料有关。

影响切槽定向断裂爆破应用的主要障碍是可靠的切槽钻具,国内外均在进行研究,设计了几种切槽钻具,但是在实施中仍有一些技术问题没有解决。为此从生产应用出发,同时开展了切缝药包定向断裂爆破研究。

4 切缝药包定向断裂爆破机理

切缝药包定向断裂控制爆破的特点是在爆炸的瞬时,在炮孔周围形成定向的应力集中,来控制预定区域径向裂缝的发展。切缝管的作用原理是在炮孔壁四周形成不均匀的应力分布,使预定区域受到足够的破裂力。形成定向裂缝的过程可分为两个阶段:爆炸初期,在切缝管内腔还没有形成均布压强之前,在爆炸冲击波的作用下,在对准切缝的炮孔壁面局部产生了预裂缝,而后在爆生气体压力作用下使预裂缝扩展。

图6为切缝药包爆破模型实验单孔全息干涉图。沿 x 轴方向为切缝方向。在爆轰 $56\mu\text{s}$ 时,P波已衰减,箭头标示的干涉条纹图由S波和R波产生。条纹分布为椭圆状,切缝连线方向为长轴,在切缝方向R波前沿条纹比较密集。反映出切缝方向应力波超前传

图5为相邻两切槽炮孔爆炸后裂缝贯穿图。图中N、E分别为两定向炮孔,炮孔间距 150mm ,当起爆 $100\mu\text{s}$ 后,在炮孔切槽附近K点处产生应力集中,呈对称的等差条纹图。由于切槽的存在,改变了炸药的能量分布。炮孔壁的其他方向切向拉应力受到抑制,因而在切

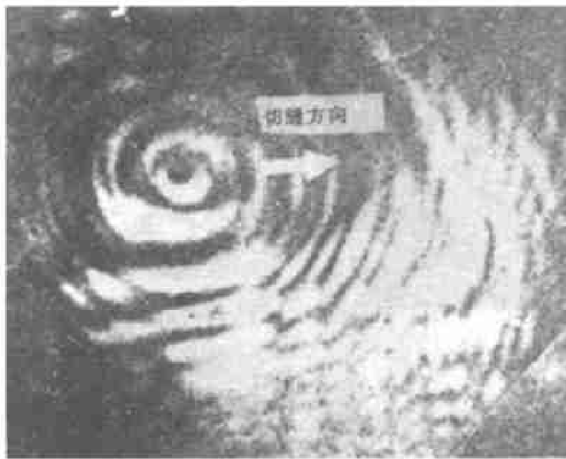


图6 切缝药包爆破全息干涉图($t=56\mu\text{s}$)
Fig. 6 The fringe patterns slotted cartridge blasting at $56\mu\text{s}$ after explosion

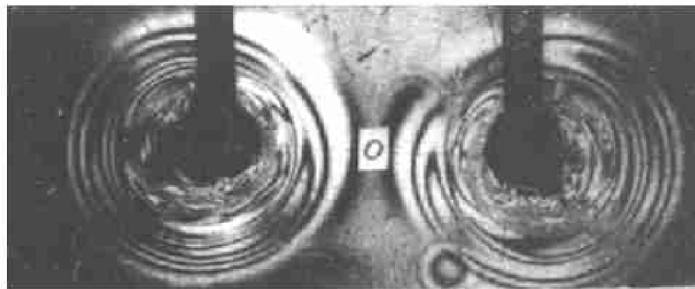


图7 相邻切缝药包的动态应力条纹图
Fig. 7 The dynamic stress fringe of two boreholes with slotted cartridges

播,形成了较强的应力应变场。切缝方向的最大位移峰值约为垂直切缝方向的1.6倍。

图7是全息激光光弹切缝药包动态应力条纹图。塑料切缝管内径为7mm,壁厚1mm,不耦合系数为1.7,炮孔间距为130mm,切缝管切缝对准O方向。从图中看出:当同时起爆后,应力发展从两个炮孔开始,但是它呈现非对称椭圆形分布。在两孔连心面轴线上,P波前沿有一个尖角,P波与S波过渡区也有一个尖角,而在其他方向没有这个特征,这说明,切缝方向受力大于其他方向,最先将在O点汇集和叠加。

弄清切缝药包定向断裂机理是一个极为复杂和困难的问题。模型实验表明,要使沿切缝方向产生预裂缝,炮孔四周其他方向部位又不发生二次破碎,使沿x轴方向切向拉应力最大,首先产生微小的径向预裂缝。在爆炸过程中,由于切缝管壳有一定强度,当爆轰波作用于切缝壳后,将产生透射波,透射波经环形空间衰减后再作用于孔壁,由于切缝管吸收部分能量和环形空间的衰减作用,不会在其他方向产生二次破碎作用。与此同时,由于

药包和切缝管阻抗不同,爆生气体经切缝内管反射加速驱动初始裂缝向前扩展。当两个相邻切缝药包在炮孔爆炸后,两孔之间同样形成强烈的应力加强带,最后裂缝在炮孔之间贯穿。

定向断裂爆破成缝机理与光面爆破成缝机理有相似之处,但是定向断裂爆破时,使在炮孔某一方向具有较强的应力集中,应力强度因子最大。因此裂缝贯穿速度快,时间短,在相同条件下,增大了炮孔间距,减少了对炮孔壁的损坏,其动应力强度因子为 K_K 型,这为减少炮孔数、炸药单耗、提高周边眼痕率提供了理论依据。根据模型实验,沿定向断裂爆破方向的应力强度因子为非定向的3.75~5.4倍,炮孔间距比光爆提高了0.5~2.5倍。

5 理论成果应用

本研究成果应用于大同马脊梁矿井运输大巷 $f=6\sim 8$ 的砂页岩中。巷道掘进断面

12. 4m², 采用 YT-28 气腿式凿岩机, ZYP 耙斗式装岩机, 1 吨 U 型矿车, 综合工作队, “四六”制作业。通过现场生产循环试验, 形成了定向断裂爆破、三角复式分层分段掏槽的中深孔定向断裂爆破新工艺。在现有钻爆机械化作业线, 不增加设备投资条件下, 使巷道周边眼痕率从 40%~50% 左右提高到 95% 以上; 不平整度下降到 100mm 之内; 飞石控制在 15m 以内。炮眼利用率达 98%。取得了明显的经济效益。这一理论成果的运用给光面爆破改进带来了广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Isakov A L, et al. Method for Directed Fracture of Rocks. Inventer's Certificate No. 793035, Byull. Izobret, No. 5(1983)
- 2 Fourney W L, Dally J W. Fracture Evaluation of a Ligamented Split-tube for Fracture Control in Blasting. UMP-76-51416. University of Maryland, U. S. A, 1976
- 3 杨永琦, 方文儒. 爆炸应变波和裂缝形成的模型试验研究. 中国矿业学院学报, 1984, (1): 82
- 4 朱振海, 杨永琦. 炮孔爆破中径向裂纹扩展复合应力强度因子的研究. 煤炭学报, 1989, (3): 103~110
- 5 王汉军. 定向断裂控制爆破的实验研究: [硕士论文]. 北京: 中国矿业大学北京研究生部, 1991
- 6 凌伟明, 杨永琦. 爆生气体在光面爆破中的作用. 煤炭学报, 1990, 15(1): 73~82

MODEL EXPERIMENTAL STUDY ON MECHANISM OF BOREHOLE DIRECTED FRACTURE BLASTING

Yu Musong, Yang Yongqi, Yang Renshu, Ziang Qi, Jin Qiankun

(Beijing Graduate School, China University of Mining and Technology, Beijing, 100083)

ABSTRACT The model test investigations of directed fracture blasting have been carried out by using the super dynamic measuring system and the 3-dimensional laser holographic dynamic photoelastic instrument. The dynamic stress field and the mechanism of the directed fracture blasting are analyzed. The practical directed fracture blasting method and the corresponding technology are optimized. Working practices in rock drifts show that the selected slit-charge directed fracture blasting method is feasible, it opens up broad prospects for improving the existing smooth blasting technique.

KEY WORDS borehole directed fracture blasting, experimental study