DOI: 10.11883/1001-1455(2017)01-0134-06

切缝管轴向不耦合装药爆破实验*

杨国梁,程帅杰,王 平,李学海,闫玉岗
(中国矿业大学(北京)深部岩土力学与地下工程国家重点实验室,北京 100083)

摘要: 采用动态应变测试和高速摄影系统,对切缝管空气间隔装药定向断裂爆破机理进行研究。共采用 4 种装药结构,研究发现:当轴向不耦合系数为 1.5 时,炮孔两侧测点的应变比最大为 2.1,压力持续作用时间达到 9 μs,定向断裂效果显著。通过高速摄影测试发现裂纹的扩展速度并不是一个常量,扩展速度呈现震荡变化,并对其形成机理进行分析。在模型实验的基础上,分别采用不耦合装药系数 1.5 和 1.66,进行地下隧道和露天边坡工程爆破现场实验,取得了良好的效果。

关键词: 爆炸力学;轴向不耦合系数;应变比;定向断裂爆破;切缝管
中图分类号: O383.2;TD235 **国标学科代码**:13035 **文献标志码**: A

切缝药包爆破的实质是在具有一定密度和强度的炸药外壳上开有不同角度,不同形状和数量的切缝,利用切缝控制爆炸应力场的分布和爆生气体对(孔壁)介质的准静态作用和尖劈作用,达到控制所爆介质的开裂方向的目的[1]。轴向间隔装药爆破,其爆破作用机理与耦合装药时不同。采用空气间隔装药爆破时,虽然作用于炮孔侧壁的平均压力要显著低于耦合装药爆破,但是在空气层间隔界面形成的系列加载波作用下,炮孔内压力作用时间显著增长。相关学者对切缝药包爆破和空气间隔装药爆破机理分别进行了探索性研究。杨仁树等[2-4]等采用动焦散实验系统,研究了切缝药包定向断裂爆破的裂纹扩展规律,得到了裂纹尖端的动态强度因子。姜琳琳[5]、高祥涛[6]采用模型和现场实验的方法对切缝药包定向断裂爆破机理进行了深入研究,分析了影响切缝药包爆破的几个重要因素。刘永胜等[7]提出了一种新的水耦合切缝药包装药结构。蒲传金等[8]通过理论和实验研究了切缝药包爆破机理和爆破参数。肖正学等[9]用动态光弹性法研究了不同切缝宽度对爆破效果的影响。张志雄等[10]通过实验室模型实验研究了切缝外壳参数对裂纹定向扩展的影响。空气间隔装药爆破研究方面,宗琦等[11]从理论上探讨了空气垫层装药结构主要参数轴向不耦合系数的计算方法。李遥等[12]通过实验发现空气间隔装药爆破中空气层位置和比例对块度分布的影响规律。本文中进行了空气间隔装药结构的切缝药包爆破实验,采用动态应变测试和高速摄影系统,对比分析不同方向的应变分布规律及裂纹扩展速度。提出了切缝管最佳间隔装药结构,并在露天边坡和地下隧道工程爆破中进行应用。

1 实 验

1.1 实验方案设计

实验采用水泥砂浆模型,炮孔直径 10 mm,孔深 250 mm。浇筑前预先制备好应变砖,在浇筑过程中预埋,每个试块中放置 6 个。切缝管采用硬质塑料管,内径 6 mm,外径 8 mm,壁厚 1 mm,切缝宽 1 mm,切缝方向与模型长边方向一致。总装药量 1 200 mg(DDNP 为 200 mg,RDX 为 1 000 mg),装药总长度为 50 mm。切缝管长度分别为 50.00、62.50、75.00 和 100.00 mm,管内采用 4 种装药结构,轴向不耦合系数 α(药室总长与炸药长度之比)分别为 1.00、1.25、1.50 和 2.00,其中 $\alpha=1$ 时为耦合装药。采用电火花起爆,耦合装药在底部设置 1 个起爆点,其余结构在各段底部分别设置起爆点同时起爆。

* **收稿日期**: 2015-05-18; **修回日期**: 2015-09-17
基金项目: 国家自然科学基金项目(51134025,51274203,51374210)
第一作者: 杨国梁(1979—),男,博士,讲师,yanggl531@163.com。

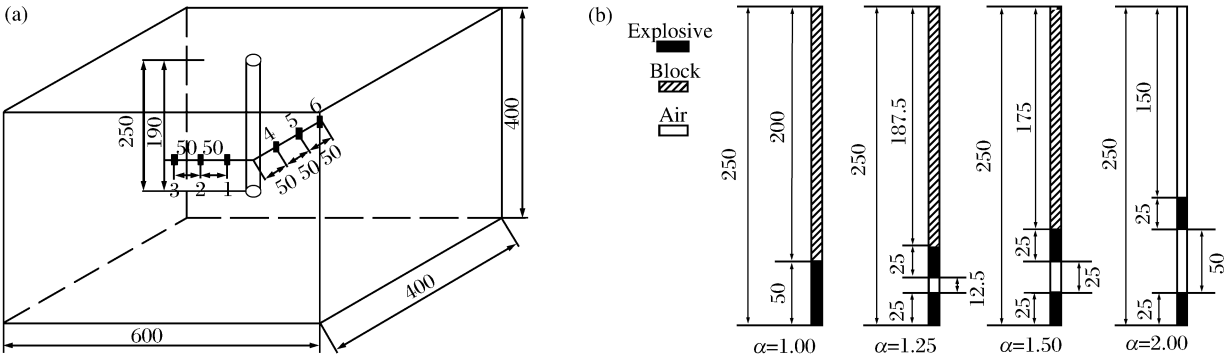

图 1　实验方案

Fig. 1　Schematics diagram of the test

1.2　实验测试系统

动态应变测试系统包括：(1)SDY2107A 型动态电阻应变仪；(2)TST3406C 动态数据采集卡；(3)显示器。高速摄影实验测试系统包括：(1)MS55K B2 高速摄影仪；(2)预装 Mega Speed 图像处理软件的笔记本电脑；(3)功率为 2 500 W 的 LED 灯。

2　测试结果分析

2.1　应变测试结果分析

应变测试结果如图 2 所示。对比发现：轴向不耦合系数对应变影响显著，当 $\alpha=1.00$ 时应变波形为陡峭的三角波，这说明耦合装药时，爆炸能量释放速度急剧增长，应变瞬间达到最大。$\alpha=1.25$ 时，曲线出现多个二次波形，且持续时间增长。$\alpha=1.50$ 和 $\alpha=2.00$ 时，测点应变峰值显著下降，但是曲线连续出现近视相等的 2 个波峰。上述测试结果说明，随着空气间隔长度的增加，2 段炸药爆炸形成的能量汇聚作用降低，但持续作用时间更长。

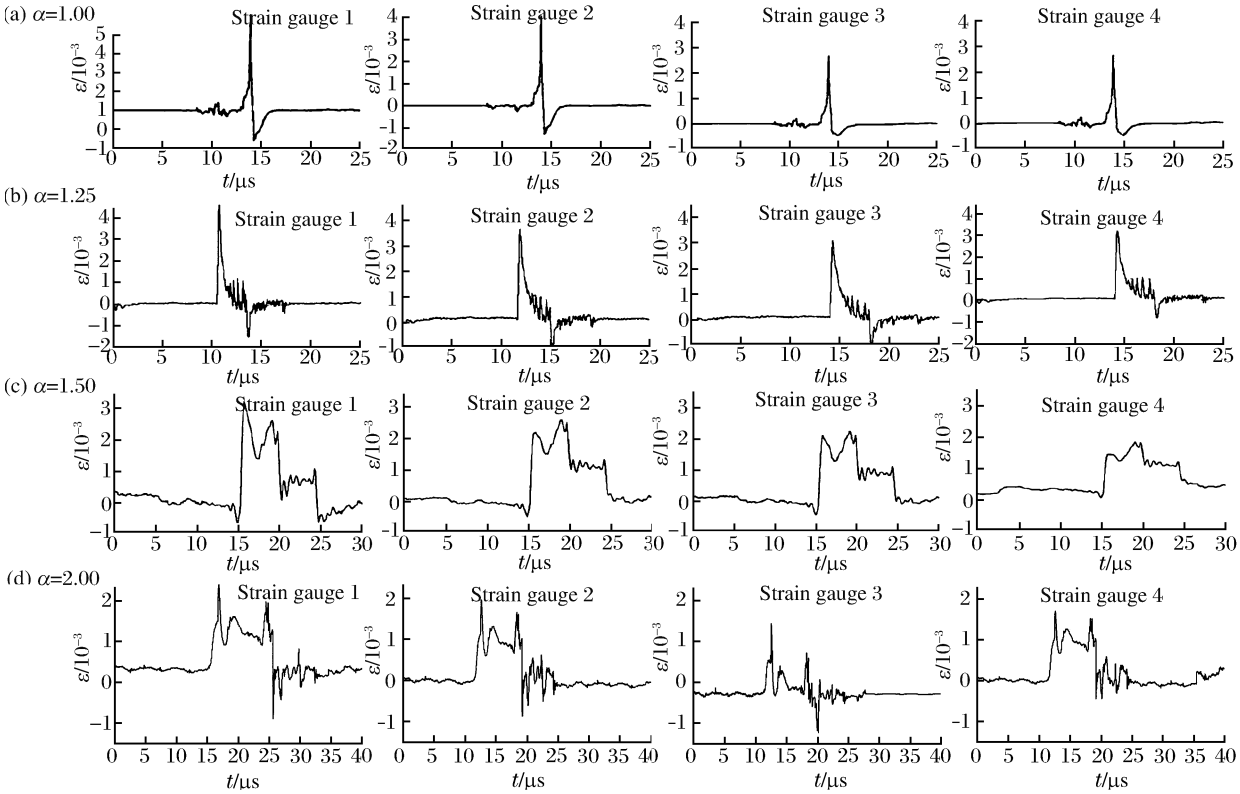

图 2　不同轴向不耦合系数下应变时程曲线

Fig. 2　Histories of strain with different axial decoupling coefficients

分别计算距炮孔 50、100 和 150 mm 处，不同方向上测点的应变比为 γ（即 $\varepsilon_1/\varepsilon_4$，$\varepsilon_2/\varepsilon_5$，$\varepsilon_3/\varepsilon_6$），得到的曲线如图 3 所示。同时提取测点的应变作用时间，求均值后得到的曲线如图 4 所示。由图 3 可知，α=1.00 时炮孔两侧的应变比在 1.7～1.9 之间。α=1.25 时，距炮孔 100 mm 处应变比达到最大，在 2.0 左右。当 α=1.50 时，距炮孔 50 mm 处应变比最大，为 2.10。当 α=2.00 时，距炮孔 100 mm 处应变比最小，为 1.56。由图 4 可知，随着空气间隔长度的增加，测点的应变作用时间显著增长，α 由 1.00 增加到 2.00，相应的应变作用时间增长了 3 倍。

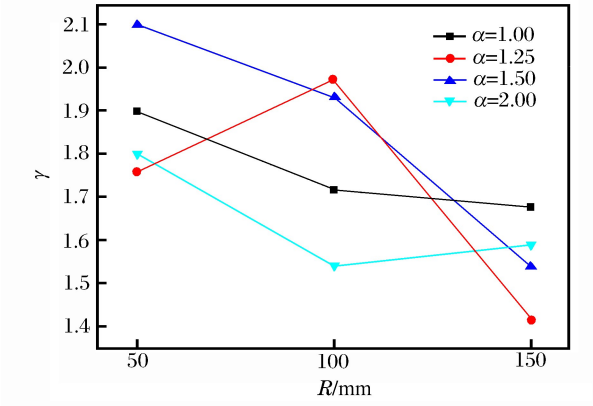

图 3 不同方向测点应变比

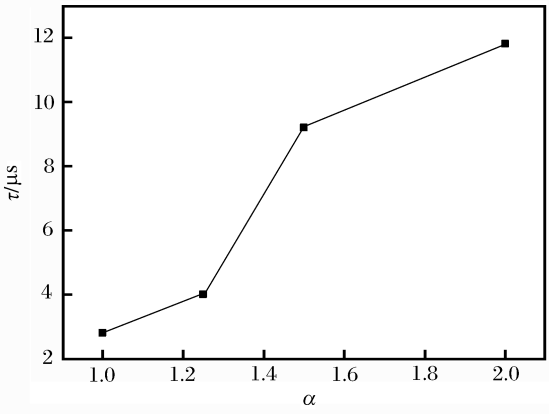

图 4 平均持续作用时间随随轴向不耦合系数关系

Fig. 3 Strain ratio of measuring point in different directions Fig. 4 Average duration time vs. axial decoupling coefficient

由图 3～4 可以得到如下规律：切缝管轴向不耦合装药的爆破效果由应变比和应变作用时间共同决定。应变比大，但作用时间短，定向断裂方向难以控制（α=1.00，1.25 时）；应变比小，作用时间长，可以形成定向裂纹，但容易形成次生裂纹（α=2.00 时）；同时提高应变比和作用时间才可以取得较好的定向断裂爆破效果。

2.2 高速摄影结果分析

典型的爆破效果如图 5 所示。图 6 给出了 α=1.50 时，高速摄影捕捉到的定向断裂爆破过程。图 7 所为不同时刻裂纹的扩展位置，其中：a 代表炮孔左侧裂纹，b 代表炮孔右侧裂纹；a_0、b_0 分别表示炮孔的左右边缘，a_0～a_8，b_0～b_8 分别表示在不同时刻裂纹发展的位置。

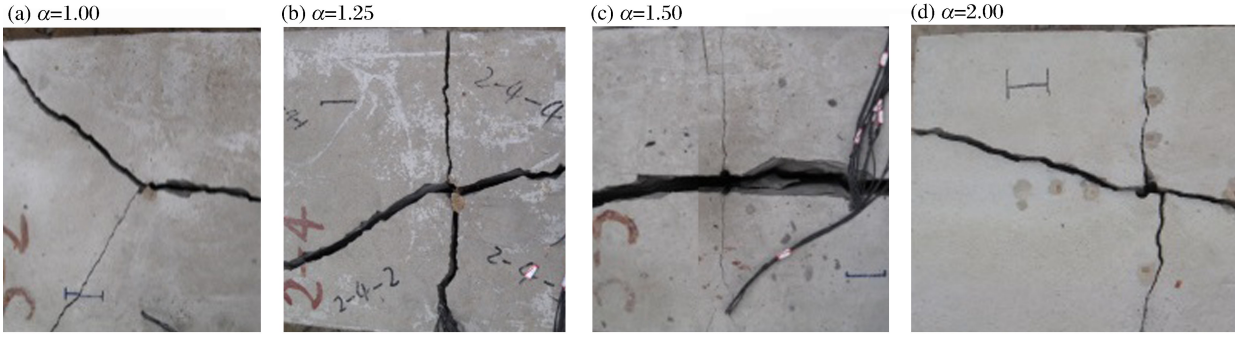

图 5 典型爆破效果

Fig. 5 Typical blasting effect



图 6 裂纹扩展过程

Fig. 6 Cracks propagation process

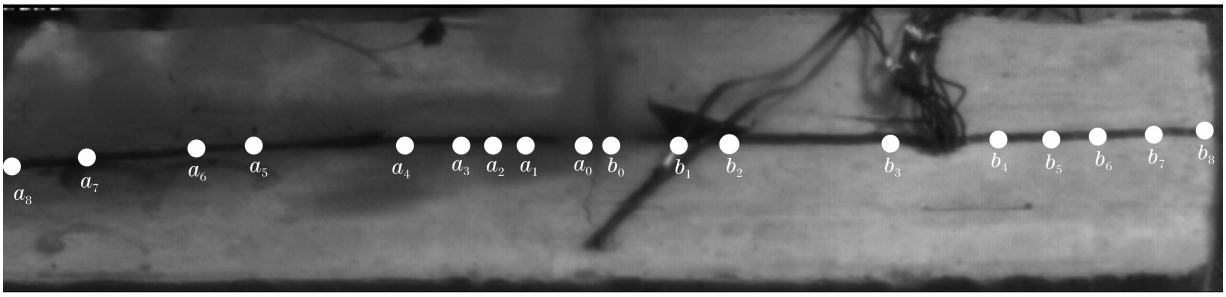

图 7　不同时刻裂纹扩展位置

Fig. 7　Crack positions at different times

提取 2 条裂纹在不同时刻的传播速度，形成曲线如图 8 所示。可以看到：(1)2 条曲线的形态基本一致，均有 3 个波峰和 3 个波谷；(2)裂纹扩展初始阶段，2 条裂纹扩展速度在 350～400 m/s 之间；(3)裂纹扩展中段(距炮孔 100～150 mm)，裂纹扩展速度达到最大，最大值在 520 m/s 以上；(4)裂纹发展至模型边界，裂纹扩展速度再次增长。

高速摄影揭示了裂纹扩展的 3 个阶段：第 1 阶段是爆炸初期裂纹形成的阶段，切缝处初始裂纹是爆炸应力波直接作用的结果。随着裂纹的扩展，应力波的强度降低，扩展速度下降，此时形成第 2 个波谷；第 2 阶段是爆生气体驱动裂纹扩展的阶段，随着高压爆生气体涌出，气体压力下降，裂纹扩展的速度降低，出现第 3 个波谷；第 3 阶段是裂纹惯性扩展的阶段，当裂纹扩展至模型边界时，能量完全释放，出现第 3 个波峰。

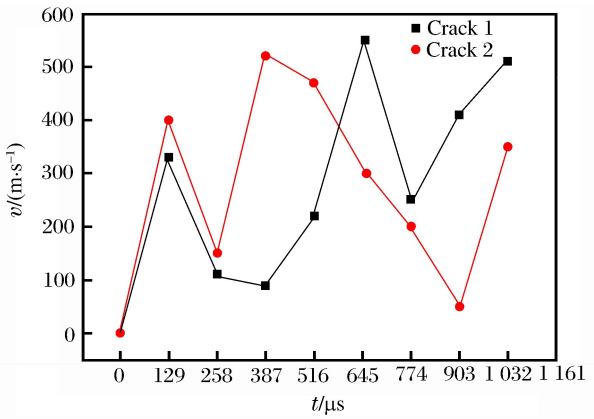

图 8　不同时刻的裂纹扩展速度

Fig. 8　Histories of cracks propagation velocity

3　现场实验

基于模型实验的研究成果，分别进行了地铁隧道周边光面爆破和金属矿山高陡边坡预裂爆破。地铁隧道周边光面爆破炮孔深 1.5 m，孔间距 600 mm，孔径 32 mm，单个药卷长 200 mm，重 200 g。现场采用硬质 PVC 切缝管，管长 600 mm，管内分 2 段装药，中间空气间隔长度 200 mm，轴向不耦合装药系数为 1.5。铜矿边坡预裂爆破炮孔深 16 m，间距 1.5 m。为了保证清除根底，底部集中装药，采用 3 个药卷并列绑扎。上部采用切缝药包间隔装药，药卷长 200 mm，单根切缝管长 1 m，药卷间距 200 mm，轴向不耦合装药系数为 1.66。用导爆索将药卷串联，最后将切缝药包绑扎在竹片上。每个炮孔使用 12 个切缝管，总装药长度为 13 m，炮孔顶部 3 m 不装药，现场图如图 9 所示。



图 9　现场装药

Fig. 9　Field charging

爆破效果如图 10 所示，采用切缝药包空气间隔装药爆破技术，隧道周边围岩的炮孔间距由400 mm提高到 600 mm，光面爆破后炮孔半眼痕率达到 100%，保证了隧道的成形质量，降低了围岩的损伤，提高了隧道的后续支护强度，全面提高了隧道的掘进速度。边坡预裂爆破后，半眼痕率达到 95%，边坡表面光滑平整，有效的提高了边坡的整体稳定性。

(a) Tunnel smooth blasting effect



(b) Slope presplitting blasting effect



图 10 爆破效果

Fig. 10 Blasting results

4 结 论

(1)切缝管轴向不耦合装药的爆破效果由应变比和应变作用时间共同决定：大应变比、短作用时间和小应变比、长作用时间均不能取得较好的定向断裂效果。轴向不耦合装药系数处于 1.5～2.0 之间，定向断裂爆破效果较好。

(2)高速摄影实验发现，裂纹的扩展速度呈现出折现变化，表明裂纹的扩展对应 3 个物理过程，揭示了切缝药包爆破的机理。

(3)将研究成果应用到地铁隧道周边光面爆破和露天高陡边坡预裂爆破中，爆破后断面光滑平整，半眼痕率分别达到 100%和 95%，有效地提高了围岩的稳定性。

参考文献：

[1] Fourney W L, Dally J W, Hollowouy D C. Controlled blasting with ligamented charge holders[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining, 1978,15(3):184-188.

[2] 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.
Yang Renshu, Wang Yanbing. Experimental study of dynamic fracture effect of blasting crack in slotted cartridge decoupling charge blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(7):1337-1343.

[3] 杨仁树，王雁冰，岳中文，等. 定向断裂双孔爆破裂纹扩展的动态行为[J]. 爆炸与冲击，2013，33(6)：631-637.
Yang Renshu, Wang Yanbing, Yue Zhongwen, et al. Dynamic behaviors of crack propagation on directional facture blasting with two hole[J]. Explosion and Shock Wave, 2013,33(6):631-637.

[4] 杨仁树，岳中文，肖同社，等. 节理介质断裂控制爆破裂纹扩展的动焦散试验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(2)：244-250.
Yang Renshu, Yue Zhongwen, Xiao Tongshe, et al. Dynamic caustics experiment on crack propagation of jointed medium fracture with controlled blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008,27(2):244-250.

[5] 姜琳琳. 切缝药包定向断裂爆破机理与应用研究[D]. 北京：中国矿业大学(北京)，2011.

[6] 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.

[7] 刘永胜，傅洪贤，王梦恕，等. 水耦合定向断裂装药结构试验及机理分析[J]. 北京交通大学学报，2009，33(1)：109-

112.
Liu Yongsheng, Fu Hongxian, Wang Mengshu, et al. Experimental research and analysis of mechanics on water-coupling directional fractural charge[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2009,33(1):109-112.

[8] 蒲传金，郭学彬，张志呈，等. 切缝药包爆破机理分析与试验研究[J]. 爆破，2006，23(1)：33-35.
Pu Chuanjin, Guo Xuebin, Zhang Zhicheng, et al. Mechanism analysis of cutting seam cartridge blasting[J]. Blasting, 2006,23(1):33-35.

[9] 肖正学，陆恣，陆渝生，等. 切缝宽度对药包爆炸效应影响的动光弹试验[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版)，2006，7(4)：371-375.
Xiao Zhengxue, Lu Min, Lu Yusheng, et al. Dynamic photoelasticity experimental study on influence of slit's width on slit charge's blast effect[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Nature Science Edition), 2006,7(4):371-375.

[10] 张志雄，郭银领，李林峰. 切缝药包爆破裂纹扩展机理研究[J]. 工程爆破，2007，13(2)：11-14.
Zhang Zhixiong, Guo Yinling, Li Linfeng. Study on mechanism of crack growth of cutting seam cartridge blasting [J]. Engineering Blasting, 2007,13(2):11-14.

[11] 宗琦，陆鹏举，罗强. 光面爆破空气垫层装药轴向不耦合系数理论研究[J]. 岩石力学与工程学报，2005，24(6)：1047-1051.
Zong Qi, Lu Pengju, Luo Qiang. Theoretical study on axial decoupling coefficients of smooth blasting with air cushion charging construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(6):1047-1051.

[12] 李遥，吴亮，钟冬望. 空气间隔装药混凝土爆破试验块度分析[J]. 爆破，2014，31(1)：10-15.
Li Yao, Wu Liang, Zhong Dongwang. Lumpiness distribution analysis of concrete blasting test with air-decking charge[J]. Blasting, 2014,31(1):10-15.

Experiment on slotted tube blasting of axial decoupling coefficient charging

Yang Guoliang, Cheng Shuaijie, Wang Ping, Li Xuehai, Yan Yugang
(*State Key Lab of Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing* 100083, *China*)

Abstract: In this work we performed experimental tests using the dynamic strain test and high speed photography system to study the mechanism of the air-deck slotted charging structure blasting, with four axial air-deck structures adopted. The results show that the highest strain ratio reached 2.1 as the axial decoupling coefficient 1.5, and the corresponding function time of pressure was 9 μs. The best result of directional fracture was achieved. The crack propagation process was recorded by high-speed photography, which show that the propagation speed of the crack was not a constant. The expansion speed of the crack fluctuated with time, and illustrated the phenomenon. Finally, the field tests were performed in the underground tunneling and open slope projects with 1.50 and 1.66 as the axial decoupling coefficient respectively, and with good results achieved.

Keywords: mechanics of explosion; axial decoupling coefficient; strain ratio; directional fracture blasting; slotted tube

(责任编辑　王易难)