

DOI: 10.11883/bzycj-2018-0495

## 螺旋管聚能药包根底光面爆破机理研究及应用\*

邓永兴<sup>1</sup>, 张中雷<sup>2</sup>, 管志强<sup>2</sup>, 杨中树<sup>2</sup>, 马宏昊<sup>1,3</sup>, 沈兆武<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和 Design 重点实验室, 安徽 合肥 230026;

2. 大昌建设集团有限公司, 浙江 舟山 316021;

3. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 针对现阶段光面爆破存在的根底不平整问题以及炸药能量利用率低的问题, 提出了一种螺旋管聚能药包。为探究药包的破岩机理, 采用 LS-DYNA 数值模拟和钻孔爆破试验相结合的方法研究了此药包的破岩机理。数值模拟结果表明, 螺旋管聚能药包能形成连续金属射流侵彻炮孔孔壁, 孔壁被侵彻出垂直炮孔方向的裂缝。用普通柱状药包和此药包进行钻孔爆破对比试验, 结果表明, 螺旋管药包试样的残留炮孔孔壁有螺旋形侵彻缝, 印证了数值模拟的侵彻结果。并且相比于普通柱状药包, 其炮孔利用率提高 7.2%、扩孔率提高 8.4%。将此药包应用于舟山绿色石化基地围垦区, 结果表明, 螺旋管药包爆破区域根底高度平均比普通装药低 14 cm, 根底高度标准差比普通装药小 12 cm。研究成果在爆破工程应用中有很价值, 可以降低施工成本、加快施工进度、提高爆破效果, 适合在矿山开采、井巷掘进等工程中使用。

**关键词:** 螺旋管药型罩; 根底光面爆破; 径向射流; 深孔爆破; 爆破根底

中图分类号: O389

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

### Research and application of root smooth blasting mechanism of shaped charge in spiral tube

DENG Yongxing<sup>1</sup>, ZHANG Zhonglei<sup>2</sup>, GUAN Zhiqiang<sup>2</sup>, YANG Zhongshu<sup>2</sup>, MA Honghao<sup>1,3</sup>, SHEN Zhaowu<sup>1</sup>

(1. CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China;

2. Darch Construction Group CO., LTD., Zhoushan 316021, Zhejiang, China;

3. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

**Abstract:** Aiming at the unevenness of the root bottom and the low power capacity of the explosive in the present stage of smooth blasting, a kind of spiral tube shaped charge was put forward. In order to explore the rock-breaking mechanism of the charge, LS-DYNA numerical simulation and borehole blasting test were used to study the rock-breaking mechanism of the charge. Firstly, the numerical simulation results show that the spiral pipe shaped charge can form a continuous metal jet penetrating the borehole wall, and the borehole wall was penetrated out of the crack in the direction of the vertical borehole. The results show that there are helical perforation cracks in the borehole wall of the residual sample of spiral tube, which confirmed the penetration results of numerical simulation. In addition, the perforation utilization rate and reaming rate were increased by 7.2% and 8.4%, respectively, compared with the normal columnar charge. Finally, this charge was applied to the reclamation area of Zhoushan. The results showed that the average root height of the spiral pipe charge blasting area was 14 cm lower than that of the common charge, and the standard deviation of the root height was 12 cm less than that of the common

\* 收稿日期: 2018-12-12; 修回日期: 2019-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(51674229, 51874267); 中国科学技术大学重要方向项目培育基金(WK2480000002)

第一作者: 邓永兴(1992—), 男, 硕士研究生, [dyxustc@mail.ustc.edu.cn](mailto:dyxustc@mail.ustc.edu.cn)

通信作者: 马宏昊(1980—), 男, 博士, 副教授, [hhma@ustc.edu.cn](mailto:hhma@ustc.edu.cn)

charge, that is, the cumulative charge saved 14 cm hole depth and charge length and reduced the roughness of 12 cm. The research results are of great value in the application of blasting engineering, which can reduce the construction cost, speed up the construction progress and improve the blasting effect.

**Keywords:** spiral tube shaped charge; root smooth blasting; radial jet; deep borehole blasting; root bottom of blasting

自20世纪50年代,光面爆破技术在瑞典兴起以来,随后在各国广泛应用。相对于普通爆破,光面爆破后巷道或硐室成型质量有较大改观,但围岩损伤仍较严重,轮廓不平整度大,尤其在软弱破碎岩体中问题更为突出,根底超欠挖严重,在一定程度上限制了该技术的应用与发展<sup>[1-3]</sup>。针对这种现状,国内外很多学者做了相关研究并取得很好的成果。切缝管状药包是实现光面爆破的新思路,从1978年Fourney等<sup>[4]</sup>提出了切缝管状药包后,此技术在我国也得到了大力地推广并做了很多研究。杨仁树等<sup>[5-6]</sup>通过动光弹爆炸加载实验和井巷爆破实验获得了切缝药包用于钻孔爆破时岩石产生裂纹及发展过程和爆破后光面效果。何满潮等<sup>[7-8]</sup>研究了双向聚能拉伸爆破技术,该技术施工工艺简单易于在工程中推广使用。但这些技术仅能减轻周边孔的超欠挖问题,不能解决根底光面爆破问题。针对根底光面爆破问题, Singh等<sup>[9]</sup>通过对药包破岩机理分析,提出了通过减小抵抗线、增加超深来降低根底不平整;刘亮<sup>[10]</sup>等通过数值模拟研究了起爆方式对台阶爆破根底影响,得出正向起爆有利于减小根底高度差。这些研究对根底光面爆破有重要指导意义,但未能提高炸药做功能力仍会形成爆破漏斗,存在缺陷。在运用聚能射流方面,李晓杰等<sup>[11]</sup>等提出了一种深孔爆破聚能平底弹,通过在孔底加装多个线性聚能药型罩对孔壁进行横向侵彻,进而达到根底光面爆破效果;Chen等<sup>[12]</sup>提出了在孔内使用环形聚能药包对孔壁进行横向侵彻,并做了相关实验。但这些研究未进行工程试验及效果分析,且这些方式成本较高,操作繁琐,未能广泛推广使用。

针对上述爆破方式的缺陷,本文研究了一种螺旋管聚能药包,其由圆管紧密螺旋制成药型罩,并在螺旋管围成的空腔内装填炸药而制成。此药包利用圆管的聚能效应,提高了炸药做功能力和根底光面爆破效果。

## 1 钻孔爆破试验

### 1.1 试验装置及方案

为验证螺旋管聚能药包的定向侵彻孔壁和聚能作用,设计了钻孔爆破试验方案,其主要包括加钢管约束的水泥砂浆试样和药包。其中药包有普通柱状药包和螺旋管聚能药包;水泥砂浆试样是在钢管内浇筑水泥砂浆制成,钢管不但保证试件成型后具有高强度,还可削弱模型的边缘效应<sup>[13]</sup>。试验装置如图1所示。

#### (1) 药包装药结构

试验所用聚能药包的药型罩由圆管紧密螺旋而成,在螺旋管围成空腔内装填炸药,并在炸药端面中心固定雷管。金属铝具有延展性、柔韧性、易加工且工程造价低,试验采用铝管制成药型罩。试验采用黑索金作为聚能药包主装药,其机械感度低、能量高、爆速高。钻孔爆破试验在爆炸罐内进行,不宜采用大尺寸装药。药型罩所用铝圆管外径5 mm,管壁厚1.2 mm,螺旋管所围空腔直径20 mm,共4匝,炸药共9 g,装药密度约为1.4 g/cm<sup>3</sup>。为得到药包加装螺旋管药型罩与不加装药型罩爆破效果的差异,设计普通药柱对比试验。对比试验中控制有无药型罩单一

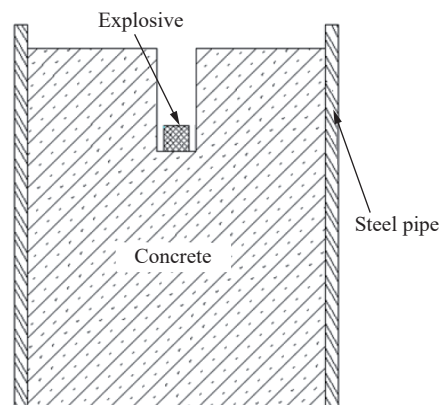


图1 试验装置

Fig. 1 Experimental apparatus

变量, 对比聚能药包尺寸, 设计普通圆柱状药包由铝箔作为外壳, 其内径 20 mm, 内部装填高 20 mm 的黑索金, 共 9 g。两种药包结构如图 2 所示。

### (2) 试样设计

所用约束钢管直径为 200 mm、高为 300 mm; 内部装填水泥砂浆, 其中 500#普通硅酸盐水泥、砂子和水的质量配比为 1 : 2 : 0.4; 室外养护超 3 个月, 在水泥砂浆端面中心钻孔, 孔深 80 mm, 孔径 36 mm。

## 1.2 试验结果

爆破后根底如图 3 所示。对爆破根底测量得出螺旋管聚能药包试样炮孔利用率为 64.3%, 柱状药包试样炮孔利用率为 57.1%, 螺旋管聚能药包试样的炮孔利用率提高了 7.2%。在螺旋管聚能爆破试样中, 有以炮孔为内径, 外径约为 110 mm 的环形平整区, 即图 3(b) 中红线区域, 区域内根底高度差小于 3 mm, 而柱状药包爆破试样无平整区。

爆破后残留炮孔如图 4 所示。螺旋管聚能药包试样残留炮孔直径扩大为 51.5 mm, 扩孔率约为 43.1%, 柱状药包试样残留炮孔直径扩大为 48.5 mm, 扩孔率约为 34.7%, 螺旋管聚能药包扩孔率提高了 8.4%, 说明螺旋管聚能药包对孔壁做功更大, 具有聚能效果。柱状药包爆破试样孔内壁呈圆柱形, 而螺旋管聚能爆破试样的残留炮孔孔壁有螺旋形侵彻缝, 侵彻缝上有铝屑残余, 说明有金属射流产生。其中最上面侵彻缝较深, 水泥砂浆试样出现层裂, 说明聚能药包能产生射流垂直侵彻孔壁, 致使水泥砂浆试样出现侵彻缝, 进而在侵彻缝水平面形成层裂、脱落, 实现根底光面爆破。



(a) Columnar explosive charge (b) Shaped charge in spiral tube

图 2 药包结构

Fig. 2 Structure of explosive charge



(a) Model of columnar explosive charge (b) Model of shaped charge in spiral tube

图 3 爆破根底结果

Fig. 3 Results of root bottoms



(a) Model of columnar explosive charge (b) Model of shaped charge in spiral tube

图 4 爆破残留炮孔结果

Fig. 4 Results of residual boreholes

## 2 侵彻过程数值模拟

螺旋管聚能药包钻孔爆破过程复杂且迅速, 不易直接观测, 因此采用 LS-DYNA 软件对螺旋管聚能药包侵彻过程进行模拟。计算模型由炸药、混凝土、铝管和空气组成, 炸药、铝管和空气采用欧拉网格建模, 单元使用多物质 ALE 算法, 混凝土采用拉格朗日算法。混凝土与炸药、空气、铝管之间采用流固耦合接触算法。整个模型采用 cm-g- $\mu$ s 单位制。

### 2.1 计算模型

建立计算模型时, 药包结构不对称, 模型复杂不易建立。因环形圆管药型罩与螺旋圆管药型罩作用原理相同, 故可将螺旋管药型罩简化为环形圆管药型罩, 此时模型为轴对称结构, 取一匝圆管的四分之一建立模型, 如图 5 所示。为模拟混凝土爆炸破坏, 引入失效关键字 MAT\_ADD\_EROSION, 当混凝土单



元受到拉应力为 1.54 MPa 或压应力为 17.4 MPa 时<sup>[14]</sup>, 单元失效被删除。

模型中黑索金炸药采用高能燃烧 (High-Explosive-Burn) 本构模型及其 Jones-Wikins-Lee (JWL) 状态方程; 药型罩采用铝的 Johnson-Cook 材料模型及其 Grüneison 状态方程; 空气采用空材料模型及其 Grüneison 状态方程; 混凝土靶板采用 Johnson-Holmquist-Concrete (JHC) 本构模型。

## 2.2 计算结果

射流形成过程如图 6 所示, 炸药起爆后爆轰波在炸药内传播; 爆轰波传到炸药一侧的管壁时管壁被压垮, 顶部出现外翻; 随后管壁金属粒子在爆轰波的作用下向轴线方向运动; 由于圆管的对称性, 运动的金属粒子垂直于轴线方向的速度相互抵消, 从而形成沿轴线方向运动的射流; 最后高速运动的金属射流穿过背离炸药一侧的管壁继续运动。

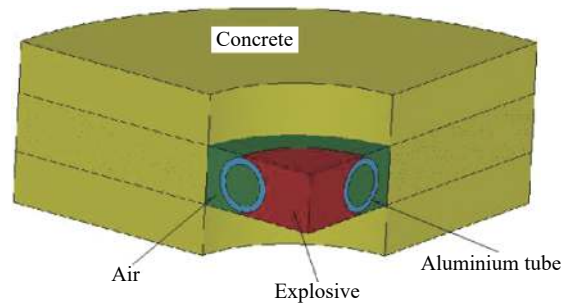


图 5 计算模型

Fig. 5 Calculation model

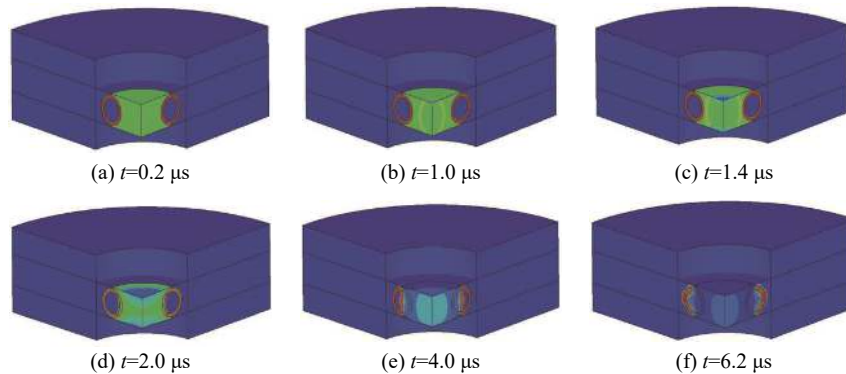


图 6 射流形成过程

Fig. 6 Process of jet formation

当高速运动的金属射流撞击孔壁时, 混凝土产生破坏, 过程如图 7 所示。射流作用于孔壁, 混凝土受到远大于其抗压强度的压应力而被压碎, 并有应力波向远处传播。随着射流继续侵彻, 炮孔内壁被侵彻出垂直于孔壁方向的初始导向裂缝。当应力波向周围传播到达侵彻缝附近孔壁时, 在空气-混凝土界面反射大于混凝土抗拉强度的拉应力, 混凝土被破坏。孔壁混凝土径向受压收缩, 释放弹性能, 在环向上受到拉应力, 当此拉应力大于混凝土抗拉强度时产生环向裂缝<sup>[15]</sup>, 如图 7 中  $t=13.4 \mu\text{s}$  时混凝土上表面。在应力波作用下和应力集中效应, 裂缝逐渐扩展。最后射流速度和应力都逐渐衰减, 裂缝停止扩展呈放射状, 如图 7 中  $t=20 \mu\text{s}$ , 同时也印证了试验结果图 3(b)。

## 3 结果分析与讨论

### 3.1 射流侵彻分析

在螺旋管围成的空腔装填炸药后, 靠近炸药一侧管壁有一半嵌入到炸药中, 此部分管壁充当聚能药型罩。此药型罩形成射流原理与半球形药型罩相似, 药包起爆后, 爆轰波到达管壁时, 管壁被压垮朝圆管轴线运动, 由于圆管具有对称性, 金属粒子垂直于轴线方向的速度抵消, 金属粒子沿轴线运动形成射流<sup>[16]</sup>。相比于楔形药型罩, 圆形药型罩产生射流直径粗、药型罩利用率高<sup>[17]</sup>。当射流到达背离炸药一侧的管壁时, 如图 6 所示管壁对射流头部有阻碍作用, 致使射流头部速度减慢, 被后面的射流追上从而射流头部质量增大, 有助于形成较宽侵彻缝, 如试验结果中图 4 所示。

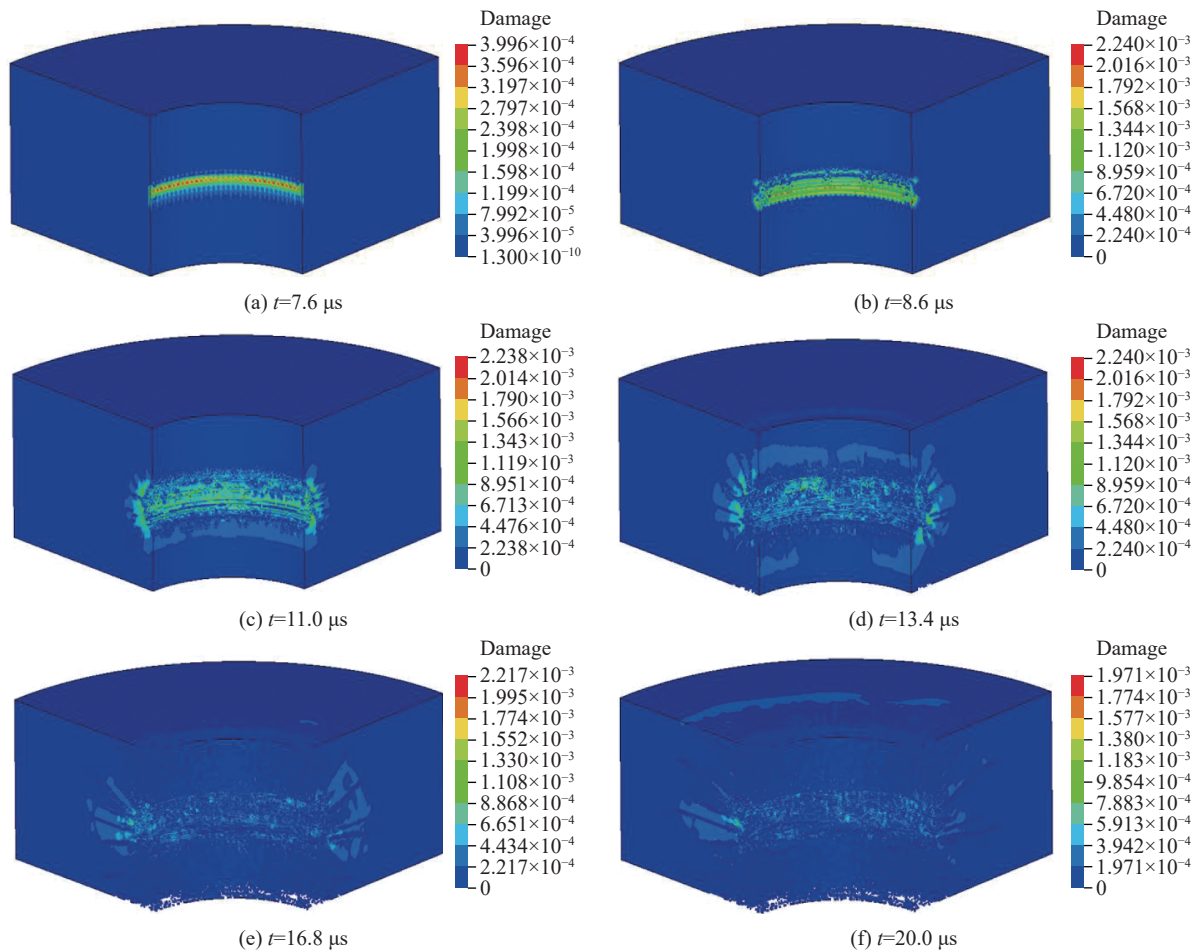


图 7 混凝土破碎过程

Fig. 7 Process of concrete breaking

高速运动的射流对孔壁侵彻过程, 可用考虑靶板强度的准定常理想不可压缩流体力学侵彻理论描述<sup>[18]</sup>。此理论假设射流侵彻靶板时是准定常过程, 射流释放的能量一部分转化为靶板的动能, 另一部分为克服材料强度做功, 记这部分功为  $W$ 。根据伯努利方程则有:

$$\frac{1}{2}\rho_J(v_J - U_T)^2 = \frac{1}{2}\rho_T U_T^2 + W \quad (1)$$

式中:  $\rho_J$ 、 $v_J$  为射流的密度和速度,  $U_T$  为侵彻速度,  $\rho_T$  为靶板密度。由于射流终止侵彻时,  $U_T=0$ , 且射流速度小于等于临界速度  $v_{JC}$ , 即射流小于此速度时不再侵彻靶板, 代入式 (1) 可得:

$$W = \frac{1}{2}\rho_J v_{JC}^2 \quad (2)$$

消去  $W$  可得<sup>[19]</sup>:

$$U_T = \frac{1}{1 - \frac{\rho_J}{\rho_T}} \left[ v_J - \sqrt{\frac{\rho_J}{\rho_T} v_J^2 + \left(1 - \frac{\rho_J}{\rho_T}\right) v_{JC}^2} \right] \quad (3)$$

在侵彻轴线上弹靶界面处靶板速度为 0, 故此处压力  $P$  可由伯努利方程给出:

$$P = P_T + \frac{1}{2}\rho_T U_T^2 \quad (4)$$

式中:  $P_T$  为靶板初始压力, 可忽略不计。由数值模拟结果可知  $v_J=2\ 400\text{ m/s}$ ,  $v_{JC}=500\text{ m/s}$ , 铝管和混凝土密

度分别为 2.7 和 2.5 g/cm<sup>3</sup>。代入计算可得  $P=1.7$  GPa, 远大于靶板的动载抗压强度, 故靶板被破坏, 被侵入出裂缝, 随着裂缝不断加深, 射流能量不断消耗, 侵入逐渐停止。

### 3.2 岩石破碎分析

当孔壁岩石被射流侵入出裂缝后即作为初始导向裂缝, 此导向裂缝在自身扩展和岩石脱落方向起重要作用<sup>[20]</sup>。并且在应力波和气楔的共同作用下裂缝朝初始方向逐渐扩展<sup>[21]</sup>, 裂缝尖端处有应力集中效应, 加速裂缝扩展。随后形成径向发射状裂缝, 形状如试验结果图 3(b) 和模拟结果图 7 所示, 最后裂缝在射流侵入平面内贯穿, 岩体出现层裂、脱落。

在射流和冲击波作用于炮孔孔壁时, 除产生裂隙外, 孔壁附近岩石受到远大于其抗压强度的压应力而破碎, 形成粉碎区。同时岩体径向方向受到压应力被压缩, 释放弹性能, 在弹性阶段当岩体径向受到压应力, 其垂直方向即环向受到拉应力。而混凝土抗拉强度小于抗压强度, 当此拉应力大于岩体抗拉强度时, 岩体产生环向裂缝<sup>[15]</sup>, 如图 7 所示。随后在应力波和冲击波共同作用下, 粉碎区和环向裂缝区贯通, 形成炮孔扩孔。

在岩体受力过程中, 岩体处于混合拉压三向应力状态<sup>[22]</sup>, 其内任一点应力强度为:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[ (\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中:  $\sigma_i$  为任一点应力强度;  $\sigma_r$  为径向应力强度;  $\sigma_\theta$  为环向应力强度;  $\sigma_z$  为竖直方向应力强度。当岩体受到有效应力峰值  $(\sigma_i)_{\max} \geq S_{cd}$  时, 形成粉碎区, 当  $(\sigma_i)_{\max} \geq S_{td}$  形成裂隙区, 其中  $S_{cd}$  为岩体动态抗压强度,  $S_{td}$  为岩体动态抗拉强度。

通过上述分析可知, 此聚能药包利用螺旋管药型罩聚能效应, 提高炸药做功能力, 在孔壁形成初始导向裂缝。在气楔和应力波的作用下, 裂缝沿初始方向扩展, 在射流侵入平面贯通, 最后岩体出现层裂、脱落, 实现定向切缝及根底平整的目的。

## 4 工程应用

为测试螺旋管聚能药包在深孔爆破中的效果, 在舟山绿色石化基地围垦区进行了试验。此次试验在一次台阶爆破中进行, 共 90 个孔, 其中 28 个炮孔在孔底填装一个螺旋管药包, 上部装填 2 号岩石乳化炸药, 剩余 62 个炮孔全部装填 2 号岩石乳化炸药。起爆后, 清理掉爆破产生的碎石, 用载波相位差分技术 (RTK) 测量根底基岩三维坐标, 用测点  $z$  方向高度评判聚能药包爆破的根底效果。分别用公式:

$$\bar{z} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i \quad (6)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_i - \bar{z})^2} \quad (7)$$

计算出  $z$  方向坐标的平均值和标准差, 用来表示根底平均高度和平整度。通过计算得到正常孔区域根底高度平均值和标准差分别为 3.92 m 和 0.32 m; 聚能孔区域根底高度平均值和标准差分别为 3.78 m 和 0.20 m。从结果可得使用聚能药包区域根底高度的平均值和标准差比正常孔区域的分别低 14 cm 和 12 cm。平均值降低 14 cm, 证明装填聚能药包比正常装药情况下平均多打出 14 cm 的深度, 在工程应用中可以节省 14 cm 的孔深和装药长度; 标准差降低 12 cm, 证明装填聚能药包的根底高度比正常装药的接近平均高度, 根底不平整度降低。故此聚能药包既可降低前期的打孔和装药成本, 也可降低后期根底的处理成本。

## 5 结论

(1) 通过钻孔爆破试验, 对比螺旋管聚能药包和柱状药包对水泥砂浆试样的爆破结果, 得出此聚能

药包提高了7.2%的炮孔利用率,提高了8.4%的扩孔率。并且聚能药包能产生射流垂直侵彻孔壁,使孔壁产生径向裂缝,在爆生气体作用下使裂缝扩展,水泥砂浆试样出现层裂、脱落,有助于产生平整根底。

(2)运用LS-DYNA软件对螺旋管聚能药包侵彻混凝土进行数值模拟,得到了射流形成过程和裂缝发展过程。得到的侵彻缝形状以及裂缝形貌和钻孔爆破试验结果相同,进一步印证聚能药包可以降低根底不平整度。

(3)通过钻孔爆破试验和数值模拟的结果,分析了螺旋管聚能药包爆破机理。此药包利用圆管的聚能效应,将炸药能量集中在垂直孔壁方向,侵彻出径向初始导向裂缝。随后此裂缝在气楔作用下沿初始方向迅速扩展,最后裂缝在射流侵彻平面内贯通形成层裂,岩石脱落,从而达到根底平整的目的。

(4)将此药包应用在舟山绿色石化基地围垦区的深孔爆破工程。通过和正常装药炮孔区域根底高度作对比,得出使用聚能药包的根底平均降低约14 cm、不平整度平均减少约12 cm。故此聚能药包既可降低前期的打孔和装药成本,也可降低后期根底的处理成本。

## 参考文献:

- [1] 于慕松,杨永琦,杨仁树,等.炮孔定向断裂爆破作用[J].*爆炸与冲击*,1997,17(2):159-165.  
YU M S, YANG Y Q, YANG R S, et al. Model experimental study on mechanism of borehole directed fracture blasting [J]. *Explosion and Shock Waves*, 1997, 17(2): 159-165.
- [2] 戴俊,杨永琦.软岩巷道周边控制爆破的研究[J].*煤炭学报*,2000,25(4):374-378. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2000.04.009.  
DAI J, YANG Y Q. Study on the controlled perimeter blasting for drift in soft rock [J]. *Journal of China Coal Society*, 2000, 25(4): 374-378. DOI: 10.3321/j.issn:0253-9993.2000.04.009.
- [3] 满轲,刘晓丽,王锡勇,等.掏槽方式对光面爆破效果的影响研究[J].*科学技术与工程*,2017,17(19):92-98. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.19.015.  
MAN K, LIU X L, WANG X Y, et al. Research on the smooth blasting influenced by the cave cutting method [J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(19): 92-98. DOI: 10.3969/j.issn.1671-1815.2017.19.015.
- [4] FOURNEY W L, DALLY J W, HOLLOWAY D C. Controlled blasting with ligamented charge holders [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1978, 15(3): 121-129. DOI: 10.1016/0148-9062(78)90006-2.
- [5] 杨仁树,左进京,杨国梁.切缝药包定向控制爆破的试验研究[J].*振动与冲击*,2018,37(24):24-29. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.24.005.  
YANG R S, ZUO J J, YANG G L. An experimental study on slotted cartridge directional controlled blasting [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(24): 24-29. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.24.005.
- [6] 杨仁树,张召冉,杨立云,等.基于硬岩快掘技术的切缝药包聚能爆破试验研究[J].*岩石力学与工程学报*,2013,32(2):317-323. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.02.013.  
YANG R S, ZHANG Z R, YANG L Y, et al. Cumulative blasting experiment study of slotted cartridge based on hard-rock rapid driving technology [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2013, 32(2): 317-323. DOI: 10.3969/j.issn.1000-6915.2013.02.013.
- [7] 何满潮,郭鹏飞,张晓虎,等.基于双向聚能拉张爆破理论的巷道顶板定向预裂[J].*爆炸与冲击*,2018,38(4):795-803. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0359.  
HE M C, GUO P F, ZHANG X H, et al. Directional pre-splitting of roadway roof based on the theory of bilateral cumulative tensile explosion [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(4): 795-803. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0359.
- [8] 何满潮,曹伍富,单仁亮,等.双向聚能拉伸爆破新技术[J].*岩石力学与工程学报*,2003,22(12):2047-2051. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.12.018.  
HE M C, CAO W F, SHAN R L, et al. New blasting technology: bilateral cumulative tensile explosion [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2003, 22(12): 2047-2051. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2003.12.018.
- [9] SINGH M M, MANDAL S K. Mechanics of rock breakage by blasting and its application in blasting design [J]. *Journal of Mines, Metals and Fuels*, 2007, 55(6-7): 183-189.



- [10] 刘亮, 郑炳旭, 陈明, 等. 起爆方式对台阶爆破根底影响的数值模拟分析 [J]. *爆破*, 2015, 32(3): 49–54, 78. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2015.03.009.  
LIU L, ZHENG B X, CHEN M, et al. Numerical simulation analysis of influence of different detonation methods on bedrock in bench blasting [J]. *Blasting*, 2015, 32(3): 49–54, 78. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2015.03.009.
- [11] 李晓杰, 阎宏浩, 曹香光, 等. 一种中深孔爆破聚能平底弹及使用方法: CN1556367A[P]. 2004-12-22.
- [12] CHEN W, MA H H, SHEN Z W, et al. Experiment research on the rock blasting effect with radial jet cracker [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2015, 49: 249–252. DOI: 10.1016/j.tust.2015.05.008.
- [13] 罗勇, 沈兆武, 崔晓荣. 线性聚能切割器的应用研究 [J]. *含能材料*, 2006, 14(3): 236–240. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2006.03.021.  
LUO Y, SHEN Z W, CUI X R. Application study on blasting with linear cumulative cutting charge in rock [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2006, 14(3): 236–240. DOI: 10.3969/j.issn.1006-9941.2006.03.021.
- [14] 洪泳, 马宏昊, 沈兆武, 等. 基于环形自由面岩土高效爆破的研究与应用 [J]. *爆炸与冲击*, 2018, 38(1): 98–105. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0176.  
HONG Y, MA H H, SHEN Z W, et al. Research and application on efficient rock blasting based on circular free surface [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2018, 38(1): 98–105. DOI: 10.11883/bzycj-2016-0176.
- [15] 谭元军, 陈继府. 空气间隔径向不耦合装药条件下柱状药包的破岩机理研究 [J]. *爆破*, 2011, 28(1): 58–60. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2011.01.014.  
TAN Y J, CHEN J F. Theory research of powder destroying with cylinder charge in rock under the condition of air interval decoupling charge along diameter [J]. *Blasting*, 2011, 28(1): 58–60. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2011.01.014.
- [16] 夏红兵, 李磊, 马宏昊, 等. 多向线性聚能切割弹的研究与应用 [J]. *中山大学学报(自然科学版)*, 2012, 51(6): 48–53.  
XIA H B, LI Lei, MA H H, et al. Research and application of the multi-directional linear cumulative cutter [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2012, 51(6): 48–53.
- [17] 张之凡, 李兵, 王龙侃, 等. 基于 SPH-FEM 方法的半球形聚能装药破甲特性研究 [J]. *振动与冲击*, 2016, 35(14): 71–76. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.14.011.  
ZHANG Z F, LI B, WANG L K, et al. Penetration characteristics of hemispherical shaped charge based on SPH-FEM method [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2016, 35(14): 71–76. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2016.14.011.
- [18] 张国伟. 终点效应及其应用技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [19] 恽寿榕, 赵衡阳. 爆炸力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [20] 刘健, 刘泽功, 高魁, 等. 深孔定向聚能爆破增透机制模拟试验研究及现场应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2014, 33(12): 2490–2496. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.12.014.  
LIU J, LIU Z G, GAO K, et al. Experimental study and application of directional focused energy blasting in deep boreholes [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2014, 33(12): 2490–2496. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.12.014.
- [21] 岳中文, 张士春, 邱鹏, 等. 装药结构对切缝药包爆破效果影响的研究 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(10): 27–34. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.10.005.  
YUE Z W, ZHANG S C, QIU P, et al. Influence of charge structures on the slotted cartridge blasting effect [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(10): 27–34. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.10.005.
- [22] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算 [J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2001, 20(2): 144–147. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0562.2001.02.005.  
DAI J. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science Edition)*, 2001, 20(2): 144–147. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0562.2001.02.005.

(责任编辑 王小飞)