

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.03.006

# 壳体环向聚能致裂器的作用原理与应用研究<sup>\*</sup>

陈 伟 马宏昊 沈兆武 王德宝

中国科学技术大学近代力学系(安徽合肥,230027)

[摘 要] 针对岩巷掘进等工程爆破中掏槽爆破效率低的问题,采用“先切后掏”的爆破技术,设计了一种壳体环向聚能致裂器。其结构特点是:直接利用弹壳材料作为聚能材料,在圆管形弹壳上设置多个聚能环,既减少装药量又能提高炸药能量利用率。装药起爆后,在轴向同时形成多排环向聚能射流,对周围岩石介质进行致裂,裂缝在爆生气体的径向准静态载荷作用下进一步扩展,形成交错的裂纹网。通过掏槽爆破模型试验对该致裂器的作用原理进行了验证,结果表明:掏槽爆破的炮孔利用率达到 98%,能有效提高爆破效率和循环进尺,降低爆破成本。

[关键词] 掏槽爆破;聚能致裂;聚能环;模型试验

[分类号] TD235

## 引言

聚能效应<sup>[1]</sup>是利用装药结构一端特殊的空穴,在炸药爆炸时爆轰产物聚集在轴线上,汇聚成一股速度和压力都很高的聚能流,使爆轰产物的能量集中作用在较小面积上,大大提高了在特定方向上局部的破坏作用。这种装药结构不仅节约炸药,而且提高了能量利用率,增强炸药的爆炸效果。线性聚能切割器<sup>[2]</sup>就是一种利用炸药聚能效应对目标进行切割的新型技术,装药起爆后,爆轰波由起爆点向前传播,当爆轰波波阵面到达聚能罩时,在爆轰压力作用下药型罩以极高速度被压垮,随着爆轰波的继续传播,被压垮的聚能罩材料在对称面上发生碰撞并汇聚于对称面上,形成一股高温、高压和能量密集的具有很强穿透和切割能力的金属射流刀,当这种射流作用到周围目标介质上时,对目标施加巨大的径向准静态载荷而将其破坏,可用于切割钢板、岩石等坚硬物体。

随着线性聚能装药在军事和工程领域应用范围的拓展,出现了环向聚能切割器<sup>[3]</sup>,该切割器能够产生环向高温、高压和能量密集的平面射流刀,对环向目标介质进行破坏。张英才等<sup>[4]</sup>利用自制的环向聚能切割弹在排除深井卡钻事故中获得了理想的爆破效果;夏红兵等<sup>[5]</sup>研制的多向线性聚能切割弹使用圆管作为外壳,由多个圆形铜管两两相邻且相切作为线性药型罩,结合 LS-DNVA 商业软件对该切

割弹进行爆炸切割试验的数值模拟,并成功将其应用在油气井、矿井卡钻等问题上;李新会等<sup>[6]</sup>利用环向射流原理进行炸断或破损水下柔性索链;赵根等<sup>[7]</sup>研制的环向聚能药包应用在建基面开挖中,在保证质量的前提下,加快施工进度,为建基面的开挖提供一种新的方法。

在岩巷掘进和矿山开采爆破工程中,掏槽效果的好坏直接决定了整个爆破效率和循环进尺。自瑞典学者把聚能装药引入岩石爆破并提出线性聚能装药爆破方法以来<sup>[2]</sup>,国内外学者对该技术在岩巷掘进等工程爆破领域进行了大量的试验和理论研究,特别是切缝药包应用在掏槽爆破中的已十分普遍和成熟<sup>[8-11]</sup>,但是将环向聚能装药结构应用在该领域还鲜有介绍。

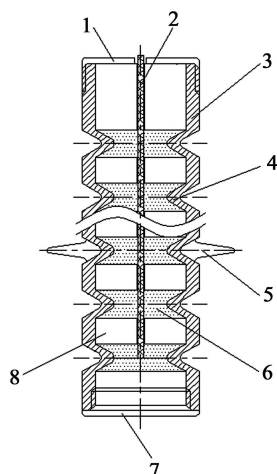
由于掏槽爆破只有一个自由面,随着开采深度的增加,岩石的夹制作用也显著增加,并且岩石在破碎过程中没有充足的空间进行体积膨胀。为了克服这些不利的因素,本研究设计了一种壳体环向聚能致裂器(图 1)。通过模型试验对该致裂器的爆炸作用效果进行研究。采用了“先切后掏”的爆破技术,即先利用环向装药结构在炸药爆炸后产生多排环向射流,对装药孔周围岩体进行分段致裂,并在爆轰气体的径向准静态载荷作用下,使得岩石的裂隙进一步扩展,增加了岩石的破碎效率,最后在后续爆炸作用下,槽腔内岩体破碎充分,并被抛出槽腔。

<sup>\*</sup> 收稿日期:2014-10-14

基金项目:国家自然科学基金重点项目(51134012);国家自然科学基金面上项目(51174183, 51374189)

作者简介:陈伟(1988~),男,博士,主要从事现代爆炸技术与安全工程研究。E-mail: chwei@mail.ustc.edu.cn

通信作者:马宏昊(1980~),男,博士,副教授,主要从事爆破器材与安全工程研究。E-mail: hhma@ustc.edu.cn



1 - 上盖; 2 - 导爆索; 3 - 圆管形弹壳; 4 - 聚能环外壳;  
5 - 聚能射流; 6 - 主装药; 7 - 下盖; 8 - 装药分层器

图 1 壳体环向爆炸聚能致裂器结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of the shell annular cumulative cracking device

## 1 壳体环向聚能致裂器设计

### 1.1 结构设计

本文设计并制作了一种充分利用弹壳的材料作为聚能材料,由壳体环向聚能装药结构构成的壳体环向聚能致裂器,在圆管形弹壳的外圆面上设置相互平行的环形槽,该环形槽的作用相当于药型罩,具有聚能作用,称为聚能环,横截面形状为楔形或半圆形。图 1 所示为楔形壳体环向聚能致裂器的结构示意图。

利用装药分层器(如图 1 所示)将炸药集中装在环形槽腔内,弹壳非环形槽段用装药分层器隔开,这样既能减少装药量,充分利用炸药的爆轰能量,又能合理分配炸药能量。该结构在轴向上能同时形成多排环向射流,显著增强爆破效果,提高爆破效率,节约爆破成本。

### 1.2 参数设计

#### 1.2.1 聚能罩

##### 1.2.1.1 形状

聚能罩能将炸药的爆轰能量转换为罩体材料的射流动能,从而提高聚能装药对目标的局部破坏能力。聚能罩的形状决定了聚能效果。在工程上,环向聚能装药横截面一般常采用楔形和半圆形罩。

根据不可压缩流体的聚能射流理论,射流质量  $m_j$  和射流速度  $v_j$  与聚能罩锥顶角  $\alpha$  的关系<sup>[1]</sup>如下:

$$m_j = m \sin^2 \frac{\alpha}{2}; \quad (1)$$

$$v_j = v_0 \tan^{-1} \frac{\alpha}{2}. \quad (2)$$

式(1)和式(2)中: $m$  和  $v_0$  分别为汇聚来流的质量

和速度(即单位时间内流过入射来流横截面的流体质量)。

由式(1)和式(2)可知,射流质量  $m_j$  随着聚能罩锥顶角  $\alpha$  的减小而减小,射流速度  $v_j$  随锥顶角  $\alpha$  的减小而增大。锥顶角小时射流头部速度较高,射流质量较低;锥顶角大时则射流头部速度较低,射流质量较高。相关研究表明:聚能罩锥顶角在  $30^\circ \sim 70^\circ$  时,射流具有足够的质量和速度;锥顶角大时射流质量大,利于增大孔径,提高后效作用。考虑到聚能罩的加工难度,本文设计的壳体环向聚能致裂器的聚能罩采用楔形,设计锥角为  $60^\circ \sim 90^\circ$ 。

#### 1.2.1.2 壁厚

聚能罩的另一个关键性设计变量是壁厚<sup>[3]</sup>,聚能罩壁厚对聚能射流形成的质量和破坏能力有着显著的影响。通常采用等壁厚的聚能罩,但有时为改善射流性能,一般也采用变壁厚的聚能罩,即顶部厚、底部薄,形成的射流速度小,质量大,穿孔浅但孔口较大;或顶部薄、底部厚的反向变壁厚聚能罩,射流速度大,质量小,孔口较小但穿孔深度较大。为了使试验效果达到最好,本研究采用顶部薄、底部厚的变壁厚聚能罩。

#### 1.2.2 炸药

环向爆炸聚能致裂器应确保对岩石介质具有足够的致裂能力。致裂器在聚能罩结构确定后,影响炸药爆炸聚能致裂效果的主要因素是爆压。因此,为了提高致裂器的致裂能力,应尽量选取高爆压的炸药。按照流体力学中的爆轰理论,炸药的爆轰压力可表示为:

$$p_{CJ} = \frac{1}{4} \rho_0 D^2. \quad (3)$$

式中: $p_{CJ}$  为炸药的爆轰压力; $\rho_0$  为装药密度; $D$  为爆轰波传播速度。

由式(3)可以看出,选用爆速高、密度大的炸药,有利于提高聚能装药的爆炸威力。同时,对于同一种炸药来说,爆速与装药密度间存在线性关系,为提高爆炸致裂能力,应尽量选择高爆压炸药,并尽可能提高装药密度。TNT、RDX 以及 TNT-RDX 等炸药,常用来制作聚能装药。

## 2 试验研究

试验设计及爆破效果如图 2 所示。

选用外径为 16 mm、壁厚 1 mm、长 320 mm 的圆柱形铜管作为弹壳,每 20 mm 压制一个深度为 1.5 mm 的楔形凹槽,锥顶角  $60^\circ$ ,共 14 个,见图 2(a)。装药采用  $m(\text{RDX}) : m(\text{乳化基质}) = 80 : 20$ ,其中乳化基质起黏结剂作用,由雷管起爆高爆速导爆索,

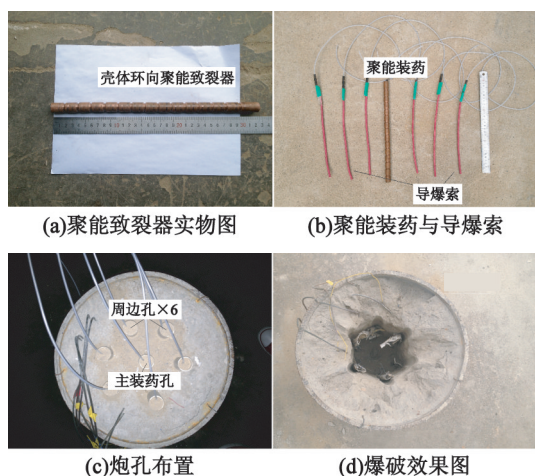


图2 掏槽爆破试验及效果图

Fig. 2 Cut blasting experiment and rendering

导爆索再起爆环形装药。

为了验证壳体环向聚能致裂器在岩石中的爆破效果,根据相似准则,在无缝钢管模型内浇筑水泥墩进行掏槽爆破模拟试验,无缝钢管不但可以保证试件成型后具有高强度,还可以削弱在实验室现有条件下模型的边缘效应<sup>[12]</sup>。选取无缝钢管的直径 310 mm,长度 500 mm。模型的砂浆试件材料配比为  $m(500^\# \text{普通硅酸盐水泥}) : m(\text{砂子}) : m(\text{水}) = 1.0 : 2.0 : 0.4$ ,其单轴抗压强度为 17.4 MPa,泊松比为 0.17,密度为  $2.13 \text{ g/cm}^3$ 。在水泥墩中心用 PVC 管预留直径为 25 mm、长度为 500 mm 的深孔,在中心孔直径为 140 mm 的圆周上预留 6 个直径为 25 mm、长度为 500 mm 的深孔。将上述壳体环向聚能致裂器置于中间孔,其余 6 个周边孔装填由太安装药的导爆索,见图 2(b),中心起爆,周边孔延迟 100 ms 起爆。上下封孔长度为 80 ~ 100 mm,堵塞材料为黄沙。

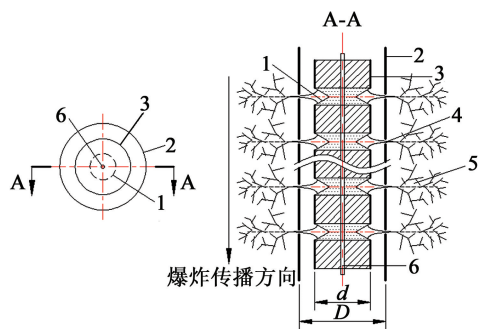
对于采用聚能装药进行掏槽爆破、岩巷掘进等工程爆破,炮孔内装药形式一般采用不耦合装药,不耦合系数一般由理论计算结果和工程经验确定。本试验中不耦合系数为 1.56,该参数由炮孔和弹壳直径决定。

掏槽孔爆破目的是在开挖面上形成槽腔,增加断面自由度,使其余炮孔能向槽腔顺利地爆破。周边孔是掏槽爆破中为装药孔预先设置的自由面,给中心装药孔爆破后岩石破碎和膨胀岩体提供空间,如图 2(c)所示。

### 3 试验结果分析与讨论

从图 2(d)的爆破效果可以看出,壳体环向聚能致裂器爆破后具有良好的掏槽爆破效果,可以明显看到在水泥墩的中间形成  $\varnothing 140 \text{ mm}$  的孔洞,掏槽眼

成型质量好,孔壁平整,炮孔利用率达到 98%。由以上结果分析可知,聚能装药在孔中由引爆装置引爆后,爆轰波沿着金属圆管轴向传播,作用到弹壳聚能环上,在爆轰压力作用下,聚能环以极高速度被压垮,形成一股向对称面汇聚的环向高速运动的平面射流,整个弹壳就会在极短时差内形成多排高速运动的环向聚能射流刀,高速撞击岩体,在岩体孔壁上形成初始诱导裂缝,减弱了围岩的夹制作用,增加了新的自由面,如图 3 所示。由于试验中未发生冲炮现象,说明堵塞效果好,爆轰气体被密封在炮孔内,根据岩石断裂力学的原理,聚能装药爆炸后产生的高温、高压爆炸气体只能从射流产生的裂缝处撞击孔壁产生初始裂纹,裂纹在气楔和应力集中共同作用下向前扩展。



1 - 聚能环;2 - 炮孔;3 - 弹壳;4 - 聚能射流形成的初始裂缝;5 - 裂缝进一步扩展为裂纹;6 - 导爆索

图3 壳体环向聚能致裂器爆炸致裂示意图

Fig. 3 Structure diagram of explosive fracturing of the shell annular cumulative cracking device

由于聚能环在壳体上可均匀分布,分段式集中装药结构对炸药的能量在炮孔内起到一定的均匀分布作用,合理分配能量;只要聚能环间距合适,整个孔内装药爆炸完成后,在爆生气体的准静态载荷作用下,由射流所产生的裂缝进一步扩展形成裂纹,形成交错的裂纹网,能有效减小大块率,便于爆破后岩石的清运。在后续周边炮孔延迟爆炸能量作用下,使槽腔内的岩体充分破碎,并被抛出槽腔。

### 4 结论

本文设计并制作了一种壳体环向聚能致裂器,由试验结果及分析可以得出以下结论:

1) 炮孔利用率 98%,证明其在掏槽爆破中的可行性,能有效提高爆破效率和循环进尺。

2) 弹壳上的聚能环在爆炸压力的作用下,形成多排环向高速运动的平面射流,高温、高压、能量密集的金属射流高速撞击岩体,在岩体孔壁上形成初始诱导裂缝,裂缝在爆生气体的准静态载荷作用下进一步扩展,形成交错的裂纹网。



3) 结构简单, 加工和使用方便, 单次起爆药量少, 振动小。

4) 充分利用装药处壳体形成聚能环, 弹壳材料和炸药能量利用率高, 安全性有保证, 可以提高工作效率, 降低生产成本, 具有良好的工程应用前景。

### 参 考 文 献

- [1] Л. П. 奥尔连科. 爆炸物理学 [M]. 孙承伟, 译. 北京: 科学出版社, 2011.  
Л. П. ОРЛЕНКО. Explosion physics [M]. Translated by Sun Chengwei. Beijing: Science Press, 2011.
- [2] Bjarnholt G, Holmberg R, Ouchterlong F. A linear shaped charge system for contour blasting [C]// Konya C C. Proceeding of 9th conference on explosives and blasting technique. Dallas: Society of Explosives Engineers, 1983: 350-358.
- [3] 沃尔特斯 W P, 朱卡斯 J A. 成型装药原理及其应用 [M]. 王树魁, 贝静芬, 等, 译. 北京: 兵器工业出版社, 1992.
- [4] 张英才, 孙玉宁, 冯冠军. 环向聚能平面切割弹的研制 [J]. 力学与实践, 1997, 19(4): 54-55.
- [5] 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]. 含能材料, 2013, 21(1): 85-91.  
Xia Hongbing, Li Lei, Ma Honghao, et al. Application of the multi-directional linear cumulative cutter [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2013, 21(1): 85-91.
- [6] 李新会, 高频. 环状聚能爆炸切割器水下性能研究 [J]. 爆破, 2008, 25(4): 79-81.  
Li Xinhui, Gao Pin. Underwater blasting performance research of ring energy-accumulated bangalore torpedo [J]. Blasting, 2008, 25(4): 79-81.
- [7] 赵根, 文德钧, 张正宇, 等. 环向聚能药包研制及其在建基面开挖中的应用 [J]. 爆破, 2001, 18(2): 8-12.

Zhao Gen, Wen Dejun, Zhang Zhengyu, et al. Preparation of the annular cumulative charge and its application in foundation excavation blasting [J]. Blasting, 2001, 18(2): 8-12.

- [8] 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, 2010.  
Jiang Linlin. Mechanism and application of directional fracture blasting with slotted cartridge [D]. Beijing: China University of Mining & Technology, 2010.
- [9] 杨国梁, 杨仁树, 佟强. 切缝药包掏槽爆破研究与应用 [J]. 煤炭学报, 2012, 37(3): 385-388.  
Yang Guoliang, Yang Renshu, Tong Qiang. Research and application of cut blasting with slotted charge [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(3): 385-388.
- [10] 罗勇, 沈兆武. 聚能药包在岩石定向断裂爆破中的应用研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(3): 250-255.  
Luo Yong, Shen Zhaowu. Application study on directional fracture controlled blasting with shaped charge in rock [J]. Explosion and Shock Waves, 2006, 26(3): 250-255.
- [11] 周瑶, 李孝林, 佟彦军, 等. 双向聚能预裂爆破切割器的研制与应用 [J]. 火炸药学报, 2006, 29(3): 70-72.  
Zhou Yao, Li Xiaolin, Tong Yanjun, et al. The development of two-directional energy-focusing cutter and its application for fore-splitting blasting [J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants, 2006, 29(3): 70-72.
- [12] 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.  
Luo Yong, Shen Zhaowu, Cui Xiaorong. Application study on blasting with linear cumulative cutting charge in rock [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2006, 14(3): 236-240.

## Mechanism and Application Study of the Shell Annular Cumulative Cracking Device

CHEN Wei, MA Honghao, SHEN Zhaowu, WANG Debao

Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China (Anhui Hefei, 230027)

[ABSTRACT] Aiming at solving the low cut blasting efficiency in rock drifting, a shell annular cumulative cracking device was proposed based on the "cutting to slotting" technology. The shell materials were used to be shaped materials and multiple shaped rings were equipped on the circular tube. It could not only reduce charge quantity but also raise the utilization ratio of explosive energy. After explosion, the multiple annular shaped jet could be formed along the axial line simultaneously, resulting in the crack of the surrounding rock medium. The crack network would be further developed under the action of quasi static loading of detonation gas. This device was tested through the cut blasting model experiment. The results show that, with this device, the utilization ratio of blasting hole achieves 98%. The blasting efficiency and cyclical footage can be improved effectively and the cost of drifting can also be reduced.

[KEY WORDS] cut blasting; shaped fracturing; shaped ring; model experiment