DOI: 10.11883/bzycj-2016-0176
文章编号: 1001-1455(2018)01-0098-08

基于环形自由面岩土高效爆破的研究与应用*

洪 泳[1],马宏昊[1,2],沈兆武[1],任丽杰[1],崔 宇[1],赵 凯[1]
(1. 中国科学技术大学中国科学院材料力学行为和设计重点实验室,安徽 合肥 230026;
2. 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: 针对岩石巷道掘进循环进尺慢,炮孔利用率低的问题,采用取岩芯技术在岩土中形成环形自由面,利用少量炸药即可达到高效爆破的效果。首先对取岩芯爆破模型进行数值模拟,对爆炸效果进行预估,并得到相关爆破参数;之后根据模拟结果进行爆破实验,制作两组水泥模型,分别模拟取岩芯爆破与传统爆破,在模型外部布置测振仪,测量爆炸过后模型的相关振动数据,并对两组模型的爆破效果与振动数据作出比较,得出取岩芯模型爆破效果及爆破振动要明显优于传统爆破模型。最后将该技术应用在某岩巷掘进现场进行爆破实验,取得成功。实验结果表明,利用取岩芯技术成形环形自由面进行爆破,可以减少炮孔数,降低炸药单耗,控制住爆破振动,提高爆破效率,达到高效爆破的目的,特别是该技术可应用于城市地下工程爆破。

关键词: 巷道掘进,岩土爆破,岩芯 ,环形自由面
中图分类号: O389;TD236 **国标学科代码**:1303599 **文献标志码**: A

随着机械行业的发展,许多爆破过程都可以采用机械手段代替。Jimeno 等[1]、Langefors 等[2]、Ramezanzadeh 等[3]认为,在岩巷掘进中,特别是硬岩条件下的岩石开挖中,钻爆施工依然是最主要,最有效的方法。传统爆破方式主要使用压应力对岩石进行初始破坏,由于岩石的动态抗压强度较高,导致爆破用药量大,对周边环境产生较大的振动,危害周边结构,降低了围岩的稳定性[4];而大药量又会产生超挖现象,给后续爆破工作带来不便,增加清理时间与额外支出。目前岩石巷道多数采用浅孔小循环钻爆掘进方式,炮孔利用率低,循环进尺慢。针对这种现状,学者们也提出了许多提高爆破效率的方法。Mohanty[5]最先提出在装药孔间设置空孔来达到控制爆破裂纹扩展的方向,并随后通过实验和现场测试进行了证明。刘优平等[6]对含空孔掏槽爆破中的空孔作用进行了研究,从理论上得出了空孔的应力集中效应,并通过现场对比实验证明,适当加大空孔孔径是提高巷道爆破掘进循环进尺行之有效的方法;戴俊等[7]采用三角柱直眼掏槽爆破方式提高平巷掘进爆破效率;叶晓明等[8]提出一种三维(螺旋)切槽孔爆破方法,使切槽孔爆破突破定向成缝的范围,进入松动、破碎爆破领域,使其获得更大的应用前景。Nakamura 等[9]进行了爆破裂纹扩展控制实验,并对普通空孔和在空孔两侧切槽对爆生裂纹扩展的影响进行了分析。Chen 等[10]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;陈世海等[11]通过比较各种不同掏槽形式爆破的实验效果,得出复式桶式掏槽完全适合于中深孔爆破。众所周知,自由面的存在可以大大提高爆破效率,没有自由面的情况下爆破效果将会显得特别地差[12]。取岩芯技术是一种用于地质勘探领域的方法,可以在岩石周边形成一个环形自由面,利用该自由面只需很小的药量即可达到高效爆破的目的,再加上目前人造金刚石工艺已十分成熟,使得金刚石钻头的成本大大降低,取岩芯钻头尺寸也可做得很大,使取岩芯技术的大规模应用成为可能。基于上述背景,本文中提出基于环形自由面的岩土爆破技术,结合数值模拟与实验结果,得出取岩芯技术可以提高掏槽爆破的效率,且降低炸药单耗,减少爆破振动。

* **收稿日期**: 2016-06-20; **修回日期**: 2016-10-19
基金项目: 国家自然科学基金项目(51674229,51374189);
中国科学技术大学重要方向项目培育基金项目(WK2480000002);
金属矿山安全与健康国家重点实验室开放课题项目(Jskszdsys-2015-03)
第一作者: 洪 泳(1991—),男,硕士研究生; **通信作者**: 马宏昊,hhma@ustc.edu.cn。

1　基于环形自由面岩石爆破技术

根据地质勘查工作或工程的需要，使用环状岩芯钻头及其他取芯工具，从孔内取出的圆柱状岩石样品，该样品称为岩芯。将该技术应用于岩石的爆破，具体过程如图 1 所示。

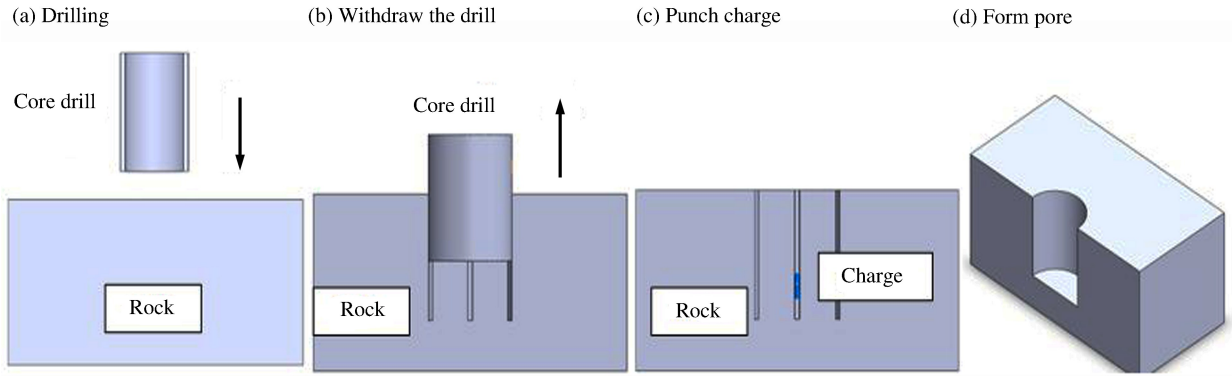


图 1　取岩芯爆破过程

Fig. 1　The process of blsting by coring

使用大直径取岩芯机，将岩芯钻头钻至目标位置，然后撤出岩芯钻头，形成环形自由面，将岩芯打孔装药之后爆破取出，形成规整的大直径空孔，由于岩芯钻头为空心钻，钻孔期间并不需要磨削很大的岩土量，因此钻孔时间较短。以实验室用台式钻孔机为例，在混凝土试件上钻取深度为 25 cm、直径为 20 cm的岩芯孔仅需 1 min，而普通钻头根本无法钻取如此大直径空孔，需要动用大型钻孔设备，费时费力。在实际应用中，岩芯钻所能钻取的孔直径必定远大于普通钻头所能达到的孔直径，该技术突破了传统钻孔受钻头尺寸制约的限制，具有先天的优势，钻孔效率高。

取岩芯技术创造了一个环形自由面，冲击波在此自由面上反射产生拉应力。该拉应力有两个重要作用：首先，有利于从已有的岩石裂隙中破碎岩石[13]；其次，由于岩石的动态抗拉强度远小于其动态抗压强度，该拉应力将在岩芯表面形成层裂现象[14]，因此仅需要一点炸药即可分离岩芯与底部岩石，且振动很小。

2　数值模拟

由于取岩芯模型爆破过程复杂，因此首先采用 LS-DYNA 软件对该模型进行模拟，以预估爆炸效果，并获得相关爆炸参数。计算模型由炸药、混凝土和空气组成，炸药与空气采用 ALE 算法，混凝土采用拉格朗日算法。混凝土与炸药、空气之间采用流固耦合接触算法。整个模型采用 cm-g-μs 单位制。

在本文中，药包质量与药包位置对模拟结果产生的影响最大，因此对其进行若干次调整，以获得最佳爆破效果，并将这些爆破参数用于后续的实验之中。

2.1　取岩芯模型

所建立的取岩芯模型为圆柱模型，由于模型是轴对称模型，所以采用四分之一模型建模，其中模型总高度为 30 cm，直径为 20 cm，岩芯直径为 10 cm，岩芯高度为 20 cm，空气间隙厚度为 1 cm。所用炸药为 1 g，且其与岩芯底部留有 2 cm 间隙。

为了模拟混凝土的爆炸破坏，引入了失效关键字 MAT_ADD_EROSION，当混凝土所受拉应力达到其失效应力，即拉应力为 2.5 MPa 时混凝土单元将被删除。



图 2　取岩芯模型

Fig. 2　Coring model

2.2 模拟结果

岩芯爆破过程如图 3 所示。

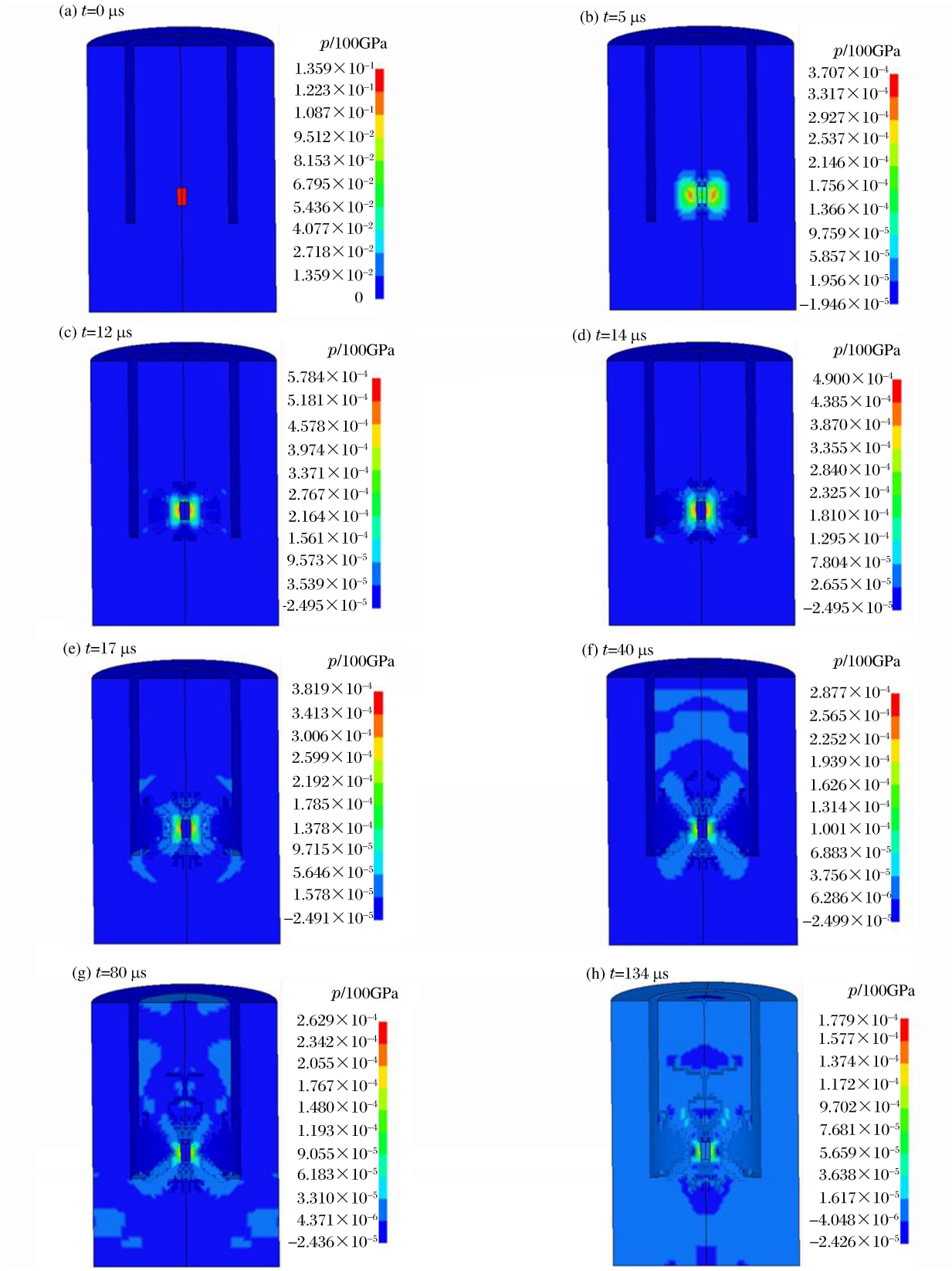


图 3 混凝土破碎过程

Fig. 3 The process of concrete breaking

从图 3 中可以看出，爆炸产生的压力由岩芯底部传递到到岩芯上部，少部分传递到岩芯下方混凝土，爆炸压力没有传递到岩芯环外的混凝土上。从爆破结果来看，岩芯底部破碎充分，根部基本与底下水泥断裂，岩芯顶部产生裂隙，破坏较小，而岩芯外围岩体则不受爆炸影响，空气隙的存在对外围岩体起到了很好的保护作用。

为使图表清晰，从模型上选取 4 个单元，如图 4 所示。观察压力随时间变化曲线，其周围单元曲线如图 5 所示，图 5 中可以看出，岩芯底部混凝土所受最大拉应力为 1.8 MPa，而外围混凝土仅出现轻微波动的拉压应力，其应力值远达不到混凝土失效准则，也即是外围混凝土不受炸药破坏影响。从图 5 中可以看出，虽然单元 55901 与 67480 到炸药距离相等，但是单元 55901 的应力明显高于单元 67480 的，这是由于单元 55901 处于岩芯与底部相接触的位置，出现了应力集中现象，有利于岩芯的断裂。

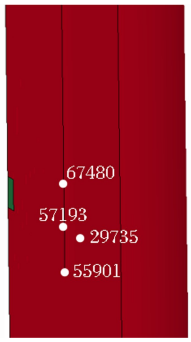


图 4　单元位置

Fig. 4　Element position

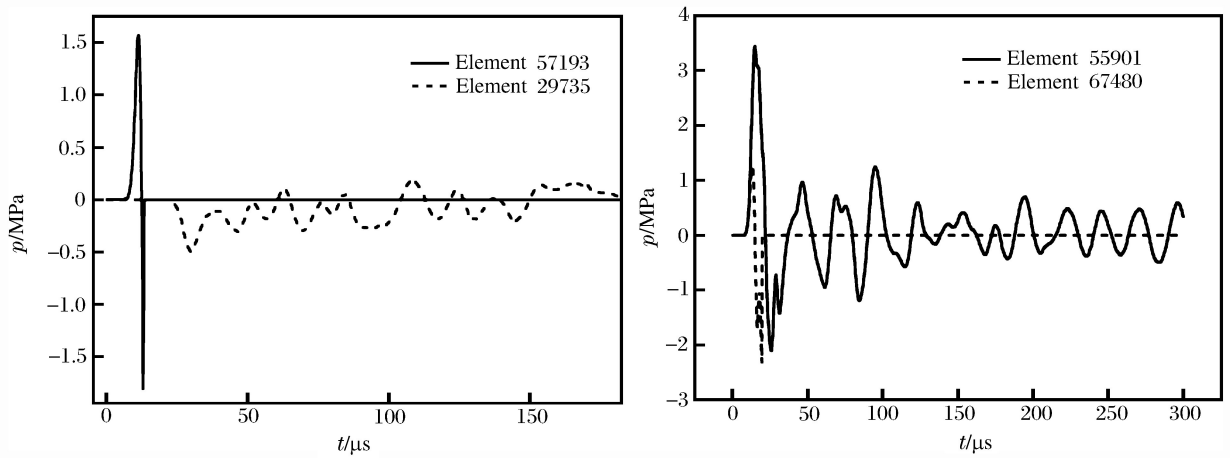


图 5　模型上的单元压力时程曲线

Fig. 5　History of element pressure on the model

3　基于环形自由面岩石爆破实验

为了验证取岩芯技术在岩石爆破中的作用，根据相似准则，在钢管模型内浇筑水泥沙浆进行爆破模拟实验，钢管不但可以保证试件成型后具有高强度，还可以削弱实验室现有条件下模型的边缘效应[15]。选用钢管的直径为 20 cm，高为 30 cm。模型采用的水泥砂浆试件的配比为 500＃普通硅酸盐水泥、砂子和水，其质量配比为 1∶2∶0.4，其单轴抗压强度为 17.4 MPa，抗拉强度为 1.54 MPa，弹性模量为 10.27 MPa，泊松比为 0.17，密度为 2.13 g/cm^3，纵波波速为 3 393 m/s。

实验中采用对照实验对爆破过程进行了模拟，共准备了 8 个上述规格的水泥模型，将它们编号并分为 2 组，其中 1～4 号模型采用取岩芯技术，将直径为 10 cm、长度为 30 cm、壁厚 0.5 cm 的 PVC 管插入水泥模型中心，插入深度为 20 cm，同时在钢管中心用 PVC 管预留 1 个孔径为 1.8 cm、深度为 20 cm 的炮孔，待水泥凝固之后将 PVC 管拔出，形成一个厚度为 0.5 cm 的取芯圆环，pvc 管在此处相当于取岩芯钻头。5～8 号模型模拟传统爆破，在钢管中间用 PVC 管预留一个孔径 1.8 cm、深度 20 cm 的炮孔。

由数值模拟所得实验参数，确定实验用雷管装药为 1 g 太安，所用测振仪型号为 TC4850，精度可达 0.001 cm。为了模拟实际岩巷爆破，将水泥模型平放于空中爆炸罐中，模型下方使用沙子垫平。在距离钢管顶端 12.5 cm 处放置测振仪，测量爆炸后钢管外部的振动。将雷管放入炮孔，雷管距离底部 2 cm，用沙子堵孔后引爆。具体实验装置如图 6 所示。



图 6 实验装置

Fig. 6 Experimental apparatus

4 实验结果

4.1 爆破效果:

爆炸后选取其中的 1、5 号模型进行分析,如图 7 所示。

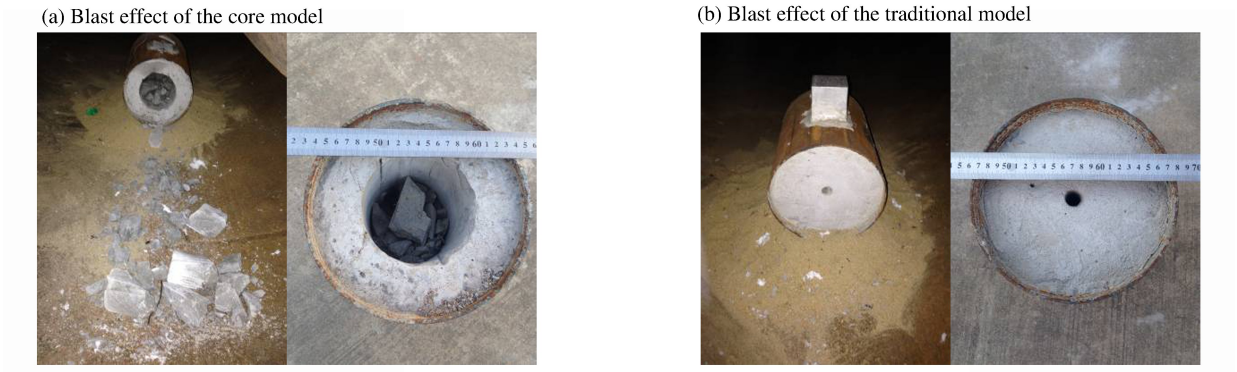


图 7 岩芯状态

Fig. 7 Core state

从图中可以看出,1 号模型岩芯被炸碎并抛掷出来,而 5 号模型水泥则完好无损,自由面的存在大大提高了爆破效果。将模型搬出空中爆炸罐,可发现 1 号模型岩芯已被完全炸碎,而岩芯环外的水泥则不受影响;从 5 号模型看不出任何爆破迹象。将 1 号水泥倒扣后轻轻晃动,岩芯掉落,如图 8 所示。

从图 8 中可以看出,1 号模型岩芯完全掉落,炮孔利用率可达 99%,岩芯环外壁平整,环外水泥不受雷管爆炸影响,取岩芯环起到了很好的能量隔断作用。尽管数值模拟与实验都采用 1 g 药量,但由于雷管威力要比药包威力大,因此实验中岩芯破坏较严重,但总体结果与数值模拟相吻合,即岩芯底部破碎严重,顶部破坏较轻,外围岩体不受爆炸影响。其余的水泥模型也与上述情况一致,实验的重复性好。全部模型爆破后对比参见图 9。



图 8 处理过后的岩芯状态

Fig. 8 The core state after the treatment



图 9　全部模型爆破效果对比

Fig. 9　Comparison of the blast effect of all the models

4.2　振动数据

爆破后取岩芯模型与传统水泥模型钢管振动位移图形处理之后如图 10 所示。从图 10 中可以看出，取岩芯模型振动位移在 0～0.007 cm 之间，而传统水泥模型振动位移在 0.002～0.012 cm 之间。单从振动数据来看，取岩芯模型减振效果并不明显，而从爆破效果来说，如果要达到与取岩芯模型相同的效果，则传统水泥模型需要增加数倍药量，这带来的振动势必大大增加。综上所述，在达到相同掏槽效果的条件下，取岩芯技术可大大减少爆破振动。

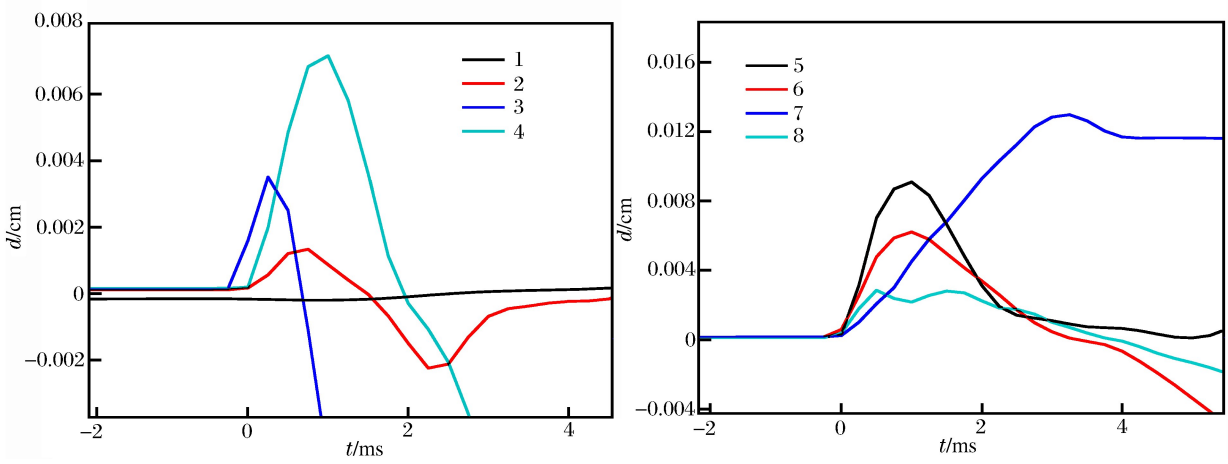


图 10　不同岩芯模型振动位移时程曲线

Fig. 10　Histories of vibration displacement for different core models

4.3　实验分析

由上述分析可知，取岩芯环为岩石爆破提供了一个环形自由面，将岩芯孤立起来，减小了最小抵抗线的长度，有利于岩芯的破碎，而岩芯底部与水泥的接触面积较小，容易导致应力集中现象，因此其接触位置较易断裂，更为岩芯的完全破碎提供了良好的条件且不会产生超挖现象[16]，从而使炮孔利用率达到 99%；同时，由于空气的波阻抗要远小于水泥的波阻抗，爆轰波传递到岩芯环空气域时将出现较大的衰减，岩芯环起到了能量隔断作用，雷管的能量大部分被用于岩芯的破碎[17]，有效地保护了环外水泥，充分利用了爆炸能量，可达到控制爆破的目的。

5　工程应用

黑龙江某矿巷，工程量 730 m，掘进断面 19.7 m^2，净断面 17.9 m^2。平巷、岩石为细沙岩，岩石坚固性系数为 9；工作面瓦斯情况小于 0.4 m^3/min；工作面涌水情况小于 5 m^3/h。掘进方式采用取岩芯钻车采取全断面一次掘进法，光面爆破。取岩芯钻车配备有直径为 40 cm 的岩芯钻头，该钻头要远大于目前市场上所存在的岩芯钻头，在岩巷上打孔后爆破取出岩芯，利用所产生的新自由面进行掏槽爆破。实验中巷道掘进效率明显提高，炮孔深度为 3.3～3.5 m，循环进尺在 3.1～3.4 m 之间，炮孔利用率为 92%～97%，多数约在 95%，爆破岩石块度均匀，达到高效掘进的目的。

6　结　论

本文中提出基于环形自由面岩土高效爆破原理，通过实验与应用，得出以下结论：

(1)取岩芯技术可成型高质量环形自由面，操作简单，可减少炮孔数，且炮孔利用率达 99%，从而实

现大循环进尺,提高掏槽爆破效率;

(2)基于环形自由面岩土高效爆破可减小炸药单耗,环形自由面起到了能量隔断作用,有效降低爆破所引起的振动,可对岩芯外部结构提供良好的保护作用,达到控制爆破的效果。

参考文献:

[1] JIMENO C L, JIMENO E L, CARCEDO F J A, et al. Drilling and blasting of rocks[M]. CRC Press, 1995.

[2] LANGEFORS U, KIHLSTRÖ m B. The modern technique of rock blasting[M]. 3rd ed. John Wiley & Sons Inc., 1963.

[3] RAMEZANZADEH A, HOOD M. A state-of-the-art review of mechanical rock excavation technologies[J]. International Journal of Mining and Environmental, 2010,1(1):29-39.

[4] 王树仁,魏有志.岩石爆破中断裂控制的研究[J].中国矿业大学学报,1985(3):118-125.
WANG Shuren, WEI Youzhi. Fracturc control in rock blasting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1985(3):118-125.

[5] MOHANTY B. Explosion generated fractures in rock and rock-like materials[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990,35(4/5):889-898.

[6] 刘优平,黎剑华,林大能,陈寿如.掏槽爆破中空孔效应的理论与试验研究[J].矿业研究与开发,2007,27(5):75-77.
LIU Youping, LI Jianhua, LIN Daneng, et al. Theoretical and experimental study on effects of empty hole in cut blasting[J]. Mining Research and Development, 2007,27(5):75-77.

[7] 戴俊,杨永琦.三角柱直眼掏槽爆破参数研究[J].爆炸与冲击,2000,20(4):364-368.
DAI Jun, YANG Yongqi. Researches on blasting parameters of triangle burn cut[J]. Explosion and Shock Waves, 2000,20(4):364-368.

[8] 叶晓明,李成芳.三维切槽孔爆破方法[J].地下空间与工程学报,1999,19(3):212-218.
YE Xiaoming,LI Chengfang. Explosion method with three dimensional cutting slot[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 1999,19(3):212-218.

[9] NAKAMURA Y, HO C S, YONEOKA M, et al. Model experiments on crack propagation between two charge holes in blasting[J]. Science & Technology of Energetic Materials, 2004,65(2):34-39.

[10] CHEN W, MA H, SHEN Z, et al. Experiment research on the rock blasting effect with radial jet cracker[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015,49(6):249-252.

[11] 陈士海,魏海霞,薛爱芝.坚硬岩石巷道中深孔掏槽爆破试验研究[J].岩石力学与工程学报,2007,26(增 1):3498-3502.
CHEN Shihai, WEI Haixia, XUE Aizhi. Testing study on middle deep cut-hole blasting in hard rock tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(suppl 1):3498-3502.

[12] RAI P, YANG H S, CHOUDHARY B S, et al. Formation of slot cut for creating free face in solid limestone bench: A case study[J]. Powder Technology, 2012,228(3):327-333.

[13] OLSSON M, NIE S, BERGQVIST I, et al. What causes cracks in rock blasting? [J]. Fragblast, 2002,6(2):221-233.

[14] WANG Z L, KONIETZKY H. Modelling of blast-induced fractures in jointed rock masses[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2009,76(12):1945-1955.

[15] 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.

[16] DEY K, MURTHY V. Prediction of blast-induced overbreak from uncontrolled burn-cut blasting in tunnels driven through medium rock class[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2012,28(3):49-56.

[17] OUCHTERLONY F, NYBERG U, OLSSON M, et al. Where does the explosive energy in rock blasting rounds go? [J]. Science and Technology of Energetic Materials, 2004,65(2):54-63.

Research and application on efficient rock blasting based on circular free surface

HONG yong[1], MA Honghao[1,2], SHEN Zhaowu[1],
REN Lijie[1], CUI Yu[1], ZHAO Kai[1]

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

Abstract: The present work aims to improve the speed and efficiency of rock excavation by forming a circular excavating surface with the coring technique so that the smallest possible charge of explosives would be needed. At first a numerical simulation was conducted to figure out the explosive parameters, then an experiment was carried out to verify the simulation. Two concrete models were fabricated to respectively model the coring blasting and the traditional blasting, with a vibration meter installed to measure the vibration. Comparison of the vibration data and the blasting effects between the two models show that the effect and the blasting vibration of the coring blasting are significantly superior to those of the traditional blasting. And the coring technique was successfully applied to an actual excavation project. The results show that the coring technique can be applied to blasting in circular excavating surface, thus reducing the number of shot holes, controlling the blasting vibration and improving blasting efficiency. This technique can be applied in urban engineering projects.

Keywords: rock drift excavation; rock blasting; coring; circular surface

(责任编辑　王易难)