

文章编号: 1000-7598-(2008) 09-2589-06

单螺旋空孔直眼掏槽成腔过程数值模拟研究

郑祥滨, 璩世杰, 范利华, 王 莹

(北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083)

摘 要: 采用 ANSYS 三维非线性动力有限元软件, 对单螺旋空孔直眼掏槽的爆炸应力波传播规律与成腔过程进行了数值模拟研究, 得到了单元有效塑性应变分布图、节点有效速度分布图、节点时间-加速度历程曲线和炸药爆炸体积扩展过程示意图。结果表明, 模拟的爆炸应力波是以柱面波形式传递, 这与理论上的爆破应力波传递形式相一致, 同时还总结出爆破效果与装药孔至空孔的距离相关的结论。整个数值模拟研究实现了掏槽爆破成腔成型过程和压力传播过程的可视化, 对预测掏槽爆破效果和优化爆破设计具有积极意义。

关 键 词: 单螺旋直眼掏槽; 成腔过程; 数值模拟

中图分类号: O 382

文献标识码: A

Numerical simulation of cavity formation process by single helix parallel hole cut blasting

ZHENG Xiang-bin, QU Shi-jie, FAN Li-hua, WANG Ying

(School of Civil and Environmental Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Process of cavity formation and propagation of the stress wave from single helix parallel hole cut blasting are analyzed with ANSYS/LS-DYNA 3D nonlinear dynamic finite element software. The distribution of element Misc. plastic strain, node Misc. velocity, node time-acceleration history curve and the sketch of the blasting cartridge's volume ratio during the process are simulated. It is concluded that the process of the blasting wave between theory and simulation is similar and the simulated blasting wave radiating in the form of cylinder. Moreover, the final blasting result has related with the distance from the hole to the bomber; therefore the cavity formation and stress propagation can be visualized. It is expected that the result of the study may provide a positive help to blast design optimization of parallel hole cut blasting.

Key words: single helix parallel hole cut blasting; cavity formation; numerical simulation

1 引 言

在隧道或井巷爆破工程中, 掏槽效果是决定整个破岩效果及循环进尺大小的关键。单螺旋空孔直眼掏槽具有炮眼布置简单、易于操作、适用于各类岩层、能实现较高的炮眼利用率等特点^[1], 因而在目前的隧道或井巷掘进工程中被广泛采用。

掏槽的目的是为后续起爆炮孔抵抗线范围内岩石的崩落提供自由空间。采用单螺旋空孔直眼掏槽, 介于掏槽孔与空孔范围内的岩石首先在高压气体与冲击波联合作用下发生破坏, 继而向空孔和掌子面方向运动, 最终形成槽腔——亦即后继起爆的辅助

孔的自由面和自由空间。显然, 掏槽爆破的效果将直接影响到辅助孔的爆破效果, 进而影响到周边孔的爆破。因此, 对空孔直眼掏槽空腔成型过程进行研究, 对于优化爆破设计、保证爆破效果具有重要的理论价值和实际意义。

文献[2-7]分别对直眼掏槽爆破机制、参数设计及爆破效果模拟等若干问题进行了探讨, 但国内对直眼掏槽空腔成型过程的研究尚不多见。由于爆破过程伴随有复杂参量随时间和空间的急剧变化, 而目前还缺乏对岩石爆破过程物理力学现象进行全面量化监测的有效技术手段, 导致只能在理想简化假设的情况下得到一些典型问题的解析解; 又由于

爆炸的高温、高压和高速特征对试验仪表及传感器的要求很高, 试验难度大、可靠性差, 且很难直观反映岩石爆破的过程。因此, 本文基于爆炸动力学本构模型, 尝试利用 ANSYS 计算机仿真软件对单螺旋空孔直眼掏槽过程进行模拟, 为判断掏槽设计(包括炮孔布置间距, 药包埋深与炸药的选用等)的合理性、优化选取爆破技术参数提供一定的参考依据。

2 掏槽爆破本构模型与状态方程

掏槽爆破过程中涉及的介质有岩石、炸药及爆轰气体产物、炮孔堵塞炮泥及空孔内和掌子面外的空气等, 需要分别建立其本构模型, 并确定多相物质的模型耦合方法。

NSYS/LS-DYNA 是一个可进行非线性冲击动力问题有效分析的有限元程序。采用 ANSYS/LS-DYNA 进行爆炸的流-固耦合分析时, 一般有两种算法^[8]: 一种是 Lagrange 算法, 但该方法在大变形数值计算中, 常常会出现单元的畸变现象, 特别是在网格划分不均匀的时候, 这种现象表现得尤为明显。本文采用的是 ALE 算法, 对于爆炸中涉及到的多相物质, 诸如空气、土壤、水、破坏后的岩石等, 采用此方法可以更为有效地解决单元畸变和模型网格中同时存在的多相物质的耦合问题。

2.1 岩石材料 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型

采用 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型, 可以有效地模拟混凝土和岩石等介质动态冲击过程中的大应力、大应变及高压气体膨胀等力学行为, 其中压力方程可以描述相关的体积应变与永久破碎区的压力状态和介质的损伤状态^[9]。

鉴于在大多数情况下, 损伤的主要部分是由有效塑性应变引起的, 故本文选择采用 Holmquist-Johnson-Cook 本构模型。其状态方程分别为^[11]

(1) 线弹性区加载和卸载状态方程

$$p = \mu K_e \quad (1)$$

式中: μ 为标准体积应变, $\mu = \frac{\rho}{\rho_0} - 1$; ρ 为当前密度; ρ_0 为初始密度; $K_e = \frac{p_c}{\mu_c}$; p_c 和 μ_c 分别为单轴强度抗压试验中的压碎压力和压实体积应变。

(2) 塑性过渡区加载状态方程

$$p = p_c + \frac{(p_1 - p_c)(\mu - \mu_c)}{\mu_{p_1} - \mu_c} \quad (2)$$

式中: p_1 为压实压力; $\mu_c = \frac{\rho_g}{\rho_0} - 1$; ρ_g 为颗粒密度,

它对应于材料完全没有空气间隙时的密度; μ_{p_1} 为在 p_1 处的体积应变, 称为永久压碎体积应变。

(3) 塑性过渡区卸载状态方程

$$p - p_{\max} = [(1 - F)K_e + FK_1](\mu - \mu_{\max}) \quad (3)$$

式中: 插值因子 $F = \frac{\mu_{\max} - \mu_c}{\mu_{p_1} - \mu_c}$; K_1 为塑性体积模量;

$\mu_{\max}$ 和 $p_{\max}$ 分别为卸载前达到的最大体积应变和最大压力。

(4) 完全密实区加载状态方程

$$p = m_1 \bar{\mu} + m_2 \bar{\mu}^2 + m_3 \bar{\mu}^3 \quad (4)$$

式中: $\bar{\mu}$ 为修正的体积应变, $\bar{\mu} = \frac{\mu - \mu_c}{1 + \mu_c}$; μ_c 为压实体积应变; m_1 , m_2 , m_3 均为常数。

(5) 完全密实区卸载状态方程

$$p - p_{\max} = K_1 (\bar{\mu} - \bar{\mu}_{\max}) \quad (5)$$

岩石的力学性质与状态方程参数分别见表 1 和表 2。

表 1 岩石力学性质参数
Table 1 Rock property parameters

密度 / g·cm ⁻³	剪切模量 / GPa	弹性模量 / GPa	泊松比	比内能 / 10 ¹⁰ ergs·g ⁻¹
3.217	18.6	46	0.15	1.267

表 2 状态方程参数
Table 2 Parameters of the state equations

K_1 / GPa	K_2 / GPa	K_3 / GPa	μ_{crush}	P_{crush} / GPa	P_{lock} / GPa	μ_{lock}	T / GPa	K_e / GPa
127	-216	257	0.006	0.217	0.65	0.2	0.032	12

注: P_{crush} 为岩石压应力; P_{lock} 岩石固有压应力; μ_{crush} 为与应力相对应的体积应变; μ_{lock} 为岩石固有体积应变; T 为最大超静拉伸应力。

2.2 炸药燃烧模型

采用高能炸药材料 MAT-HIGH-EXPLOSIVE-BURN 和 JWL 状态方程描述炸药材料^[8]。JWL 状态方程能精确描述在爆炸过程中爆轰产物的压力、体积、能量特性。该材料模型和高能炸药 JWL 状态方程连用, 它定义压力为相对体积和内能的函数:

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \quad (6)$$

式中: A , B , R_1 , R_2 , ω 为材料常数, 也是 JWL 方程系数; V 为相对体积; E_0 为初始内能密度。由于爆炸问题会涉及到各种物理量随时间的急剧变化, 这将会导致模型中压力、密度、质点的加速度等参量发生跳跃性间断^[10]。为避免此种情况, 将人工体积黏性系数加进压力项, 使得冲击波的强间断转化成在相当狭窄的区域内的连续变化。巷道掘进爆破使用的炸药为 2[#]岩石硝胺炸药, 炸药初始密度 $\rho = 1.2 \text{ g/cm}^3$, 爆轰波传播速度为 $3\,200 \text{ m/s}$ 。炸药材料和状态方程参数见表 3。

表 3 炸药材料和状态方程参数
Table 3 Parameters of the explosive product and the state equation

CJ 压力 / GPa	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	ω	E_0 / GPa
5.6	252.3	3.93	4.82	0.97	0.35	0.752

2.3 空气材料模型

这种材料模型通过调用状态方程来避免偏应力计算, 压力下限由截止压力确定。在模拟过程中使用 MAT-NULL 状态方程来模拟空气, 在空气膨胀与压缩时 MAT-NULL 状态方程应用失效准则可以判断出处于临界压力状态时已经超过拉压极限的单元^[8]。本文模拟采用空气密度 $\rho = 1.2 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ ^[10]。

2.4 土体材料模型

采用 MAT-SOIL-AND-FOAM 状态方程确定炮孔堵塞材料（即所谓炮泥）模型。使用该状态方程可在模拟过程中对固气二相介质的耦合问题进行有效的描述。根据实测结果，本文取炮泥的密度为 1.85 g/cm^3 ，弹性模量为 $1.6 \times 10^4 \text{ GPa}$ ，泊松比为 0.2。

3 成腔过程的数值模拟

3.1 工程实例概况

某铁矿井下-274 水平巷道的掘进采用人工凿岩, 凿岩机为 YT-28 型气腿式凿岩机。钎头直径为 38 mm, 钎杆长度为 2.0 m, 炮孔直径为 40 mm, 采用 2[#]岩石硝胺炸药, 药包规格为 $\phi 32 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$, 起爆方式为电雷管微差起爆。-274 水平巷道采矿进路采用三心拱断面布孔方式, 设计断面尺寸宽为 3.74 m、高为 3.07 m。采用普通爆破掘进技术, 每循环炮孔数达 50 个, 每循环装药为 46 kg, 炮孔深度为 2.0 m, 掘进循环进尺为 1.2~1.5 m。断面爆破后轮廓成形不规则, 岩面不平整, 掏槽部分凹进最大达 50 cm, 半孔率为 65 %, 断面周边有超挖现象。因此, 需要调整爆破设计参数, 优化爆破设计。

3.2 单螺旋空孔直眼掏槽炮眼布置

直眼掏槽的特点是所有掏槽孔都与掌子面垂直,并严格保持平行。掏槽孔中有一个或数个不装药的孔,作为装药孔的辅助自由面。装药方式为底部空气柱间隔装药。炮眼布置如图1。

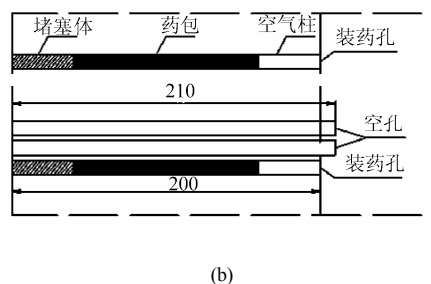
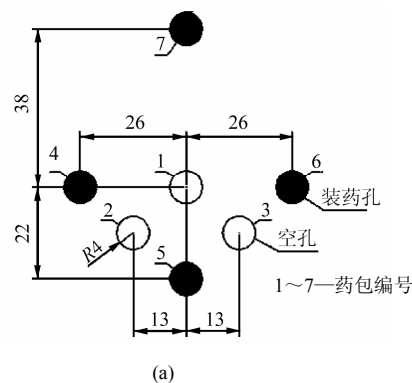


图 1 单螺旋空孔直眼掏槽模型图 (单位: cm)
Fig.1 Borehole layout of the single helix cut model (unit: cm)

3.3 有限元计算模型

考虑到巷道周边围岩对其本身的影响, 周边围岩的边界范围拟选取 2 倍的巷道尺寸。本次模拟忽略上覆围岩的自重, 利用六面体单元分别对炸药、岩石、炮泥、空气柱进行空间离散。由于掏槽孔与整个巷道断面相比尺寸较小, 故采用关键区域细化和非关键区域粗化的原则进行网格划分, 即靠近炸药部分的网格相对密集, 远端边界部分相对稀疏, 网格划分如图 2 所示。考虑到结构的对称性, 并尽量节省计算时间, 取计算模型的一半为研究对象。巷道掘进模型取长为 3.87 m, 宽为 4.0 m, 高为 6.0 m, 所建巷道的力学模型和局部详图, 如图 3 和图 4 所示。整个模型共划分为 66 954 个单元, 其中炸药单元数为 $360 \times 3 = 1\,080$ 个, 药包底部空气介质单元数为 $661 \times 2 + 120 \times 3 = 1\,682$ 个, 炮泥填塞体单元数为 $120 \times 3 = 360$ 个, 岩石单元数为 63 832 个。由于爆炸空腔成型与扩展过程持续时间一般在 1 ms 左右, 各炮孔时间差为 35 μs , 所以本次模拟设置时间为 1 ms。

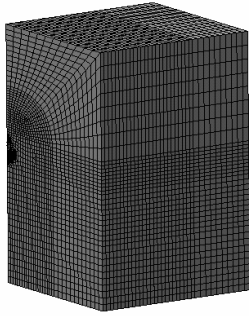


图2 模型单元网格

Fig.2 Element meshing of the model

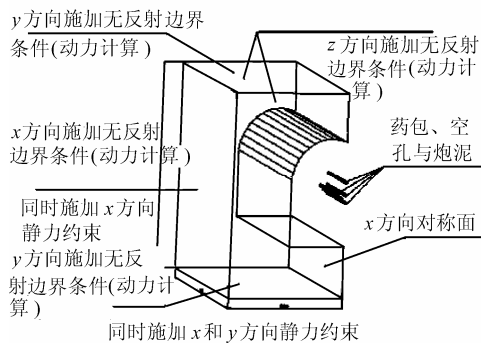


图3 巷道力学模型图

Fig.3 Mechanics model of the tunnel studied

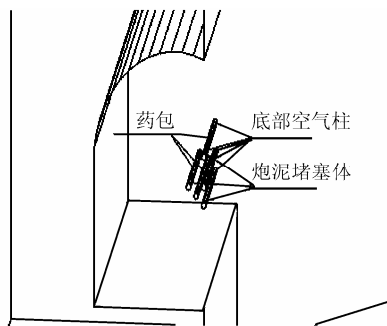


图4 模型局部详图

Fig.4 Detailed drawing of the model

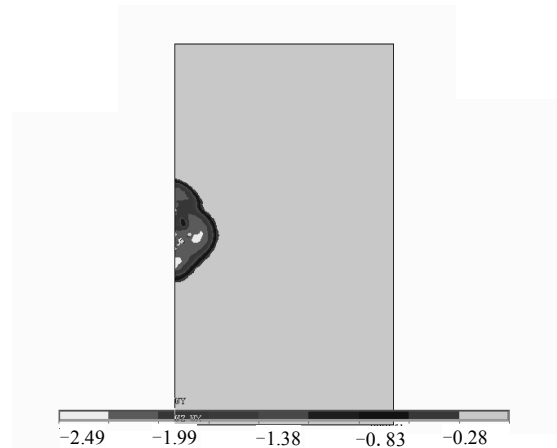
3.4 单螺旋空孔直眼掏槽空腔成型模拟结果与分析

由于巷道模型是非透明实体,而我们分析的是岩石内部药包的爆炸过程,为了能看到岩石内部与药包的互相作用情况,可以通过 ANSYS/LS-DYNA 自带的后处理里的切片功能来实现,把巷道从 $Z = -100 \text{ cm}$ 的地方切开,即药包中心的位置。

3.4.1 单螺旋空孔直眼掏槽有效塑性应变

图5为 $Z = -100 \text{ cm}$ 处 $t = 989 \mu\text{s}$ 时刻有效塑性应变分布图。从图中可以看出,随着药包与空孔距离的增加,其爆炸产生的塑性影响区域也随之扩大,有效塑性应变区的最近端出现在7号药包顶部与6号药包最右端处 0.5 m 处,而最近端则出现在5号

药包的下底端处 0.57 m 处,有效塑性应变区域呈现出向四周辐射状变化。从有效塑性应变值大小来看,其应变值大小从中心空孔向外逐级减小,最远端处往往是塑性应变值最小的区域,由于应力波传播过程中能量的耗散,使得这些区域应变值较低。而1号空孔附近,由于药包产生的爆炸应力波的互相叠加、反向拉伸应力波的叠加、空孔自由面的存在,使得该区域的塑性应变值要明显高于远端区域的应变值。从图可知,由于塑性应变范围已经影响至辅助孔区域,该区域岩石表现出强松动的态势,可谓后续药包爆破提供临孔自由面,这将有利于辅助孔爆破。但由于以上塑性应变值的不均匀分布可能会导致岩石破碎块度的不均匀,进而影响到岩石抛腔运动。

图5 $t = 989 \mu\text{s}$ 有效塑性应变分布图 (单位: 10^{-4})Fig.5 Distribution of Misc plastic strain ($t = 989 \mu\text{s}$) (unit: 10^{-4})

3.4.2 单节点有效速度图与加速度-时间历程曲线

从图6可以看出,节点速度最大的地方出现在药包周围,而相比之下节点速度最小的地方出现各组药包连线的中心区域,也包括中心空孔作用的区域,这也就同时证明了药包连线的中心区域是最容易出现应力叠加的区域。为了更为清楚地了解应力波的传播路径与发展情况,本文通过记录几个关键节点处的 y 向加速度值来间接地反映该节点处的受力状态。其中57291号节点(曲线A)靠近5号药包,57331号节点(曲线B)靠近1号空孔,57478号节点(曲线C)是两炮孔连线中点处节点,从图7记录的节点加速度-时间曲线历程来看,57291号节点由于受到爆炸冲击力的作用,产生了较大的冲击载荷,随后发生了衰减,类似于爆炸产生的应力波随指数衰减的曲线,而57478号节点产生的冲击载荷要高于57331号节点载荷,当炮孔处应力衰减后,其略有回弹趋势,随后节点呈现出负加速度

增大的趋势,这说明此时拉应力产生,主要是受到爆炸应力波和经空孔自由面反射的反向拉深应力波相互叠加作用的结果。可见以上3组曲线基本上吻合了试验与理论上关于应力波传播变化的规律。

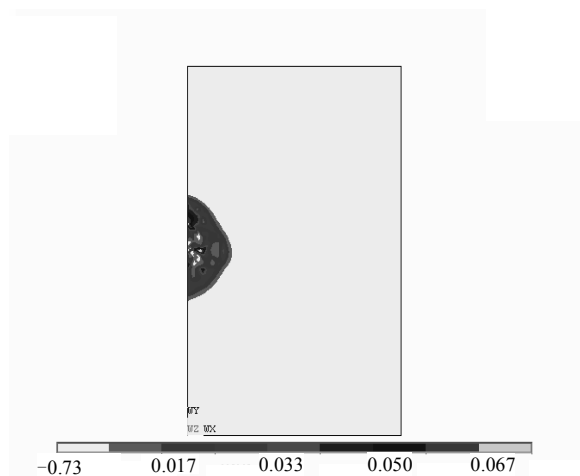


图6 $t = 989 \mu\text{s}$ 节点有效速度分布图 (单位: $10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig.6 Distribution of node Misc velocity ($t = 989 \mu\text{s}$) (unit: $10^{-9} \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

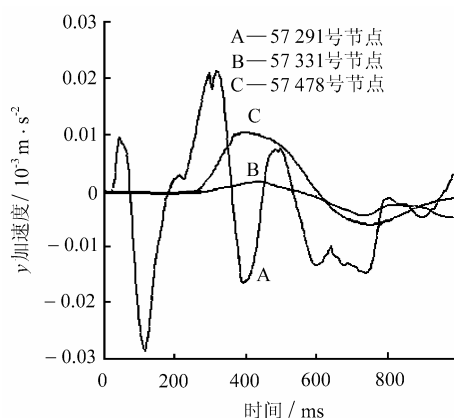


图7 关键节点时间-加速度曲线

Fig.7 Y Acceleration-time history Misc node velocity curve of three key nodes

3.4.3 单螺旋空孔直眼掏槽空腔成型过程分析

利用 ANSYS/LS-DYNA 自带的 LS-PREPOST 后处理软件,其 Misc 和 History var 5#模块功能是可以动态显示炸药与空孔等物质在固定网格中所占的比例。通过该功能可以清楚地观察到整个掏槽爆破空腔成型的过程,即炸药与空气等物质的扩张过程。经过 LCON 功能处理后,图8可以显示出等值线范围,同时使用镜像功能显示出全部模型。这样可以更加清楚、直观地反映整个掏槽爆破中药包与空气相互作用的过程,从图可以看到在 $t = 142 \mu\text{s}$ 时,5号与7号药包开始沿着轴心连线方向向中心1号空孔方向扩展,同时4号、6号药包以自身为中心成

圆周辐射状扩展,由于应力波尚未传达到空孔,故空孔未受较大扰动。而在 $t = 454 \mu\text{s}$ 时,两侧4号与6号药包沿着圆心连线方向开始向2号与3号空孔方向扩展,并逐渐接近,此时5号与7号药包除了继续沿原方向向1号空孔扩展以外,同时还表现出向两侧4号、6号药包扩展的态势,而中心空孔区域则开始出现受扰动的迹象。在 $t = 747 \mu\text{s}$ 时,以4~6号药包作用范围扩展到中心空孔区域,此时空孔已经明显出现受扰动的迹象,即表现为空孔的破碎与岩石的抛腔运动。此时其应力影响区域出现互相重叠的迹象,表明应力波在此处已经发生了叠加,而7号药包由于距离空孔相对较远,其作用区域尚未达到中心1号空孔,此时的1号空孔受影响的程度要弱于2号和3号空孔。在 $t = 988 \mu\text{s}$ 时,各组药包作用范围开始在中心空孔区域出现重合,此时炸药与空孔之间的裂缝扩展已经出现贯通的迹象,爆炸产生的应力波已经完全向周围介质扩散完毕,而药包的影响区域则表现为向四周扩展的同时优先向中心空孔发展的趋势。

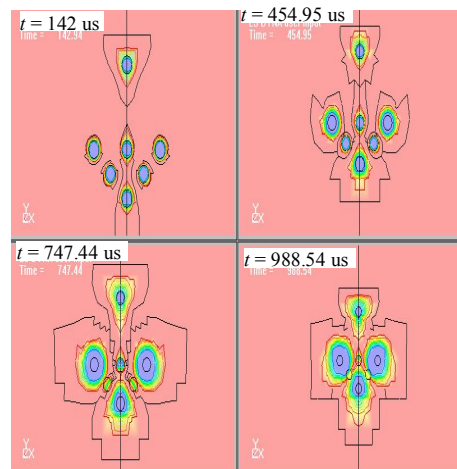


图8 空孔直眼掏槽成腔过程示意图

Fig.8 Diagrammatic sketch for the process of parallel hole cut blasting with cavity formation

4 结 论

(1) 由两相流体力学的基本原理可知:在含空孔的直眼掏槽爆破中,装药孔爆炸以后,使装药孔与空孔之间的岩石介质破碎,并首先向空孔方向运动,在相对应的空孔壁上产生撞击回弹,爆生气体与岩石破碎体迅速成为混合体。由于高压爆生气体膨胀,岩石碎块开始向炮孔轴向运动,形成槽腔;同时本次模拟也验证了爆炸应力波是以柱面波的形式进行传递。可见本文的模拟结果比较贴切地吻合了理论上的槽腔成型过程。

(2) 含空孔直眼掏槽成型的效果与装药孔至空孔的距离有关、掏槽槽腔内岩石碎块的抛掷过程与孔距大小有关。随装药孔至空孔距离的增大, 会影响到整个空腔成型的最终效果, 表现为空腔局部区域岩石破碎效果较差、腔体形状的不规则, 不利于岩石的抛离, 半孔率较低。

(3) 爆破应力波以柱面波的形式传递, 而空孔能较好地起到自由面的作用, 相邻炮孔连心线的中心是应力优先发展和应力波发生叠加的位置。

(4) 本次模拟的是底部空气柱间隔装药结构, 该结构可以明显扩大槽腔体积、降低炸药消耗、扩大爆破漏斗体积的作用, 因此, 研究多种不同介质同时存在的情况, 模拟多相物质的耦合, 能更加真实地反映实际爆破成腔的过程。

此外, 本文不足之处在于对炸药爆炸作用下岩石的破坏范围也随岩石的性质的变化而改变, 同时在一定炮眼深度条件下, 对空孔的大小、眼距、补偿空间及形成机制的分析不够, 有待于今后进行深入的研究。

参 考 文 献

- [1] 王文龙. 钻眼爆破[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1984.
- [2] 罗学东, 朱小红, 周传波, 等. 坚硬岩石条件下九孔掏槽方式的数值模拟研究[J]. 爆破, 2005, 22(3): 17—25.
- [3] 高文学, 金乾坤, 杨军, 等. 沟槽深孔微差爆破的工程实践和数值模拟[J]. 爆炸与冲击, 1999, 19(2): 164—168.
GAO Wen-xue, JING Qian-qun, YANG Yun, et al. Engineering practice and numerical simulation on the millisecond blasting for ditching deep boreholes[J]. **Explosion and Shock waves**, 1999, 19(2): 164—168.
- [4] 张奇, 杨永琦, 员永峰, 等. 直眼掏槽爆破效果的影响因素分析[J]. 岩土力学, 2001, 22(2): 144—147.
ZHANG Qi, YANG Yong-qi, YUAN Yong-feng, et al. Study on the factors affecting parallel hole cut blasting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2001, 22(2): 144—147.
- [5] 张奇, 张玉明, 雒昆利. 直眼掏槽的爆破作用及参数计算[J]. 岩土力学, 1997, 18(2): 51—56.
ZHANG Qi, ZHANG Yu-ming, LUO Kun-li. Parameter calculation for multi-step and multi-stage blasting with vertical borehole cutting[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1997, 18(2): 51—56.
- [6] 李新平, 朱瑞庚, 夏元友. 中深孔双螺旋掏槽爆破的破碎机理与设计[J]. 岩土工程学报, 1997, 19(2): 84—88.
LI Xin-ping, ZHU Rui-geng, XIA Yuan-you. Rock fragmentation mechanism and application of plural spiral cutting blasting[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1997, 19(2): 84—88.
- [7] 林大能, 陈寿如. 空孔直眼掏槽成腔模型理论与实践分析[J]. 岩土力学, 2005, 26(3): 479—483.
LIN Da-neng, CHEN Shou-ru. Experimental and theoretical study of parallel hole cut blasting with cavity[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(3): 479—483.
- [8] Livmore Software Technology User's Corporation. SLS-DYNA Keyword User's Manual[R]. Livmore Software Technology Corporation Version971. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- [9] HOLMWUIST T J, DR G R. JOHNSON A. Computational constitutive model for concrete subjected to large strains, high strain rates and high pressures[C]// The 14th International Symposium on Ballistics. USA: American Defense Preparedness Association, 1993: 591—600.
- [10] 尚晓江, 苏建宁. ANSYS/LS-DYNA 动力分析方法与工程实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [11] 何长江, 于志鲁, 范中波. 混凝土动态冲击问题的一种欧拉数值方法析[J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(2): 152—157.
He Chang-jiang, YU Zhi-lu, FAN Zhong-bo. An eulerian numerical method on dynamic impact problem of concrete[J]. **Explosion and Shock Waves**, 2002, 22(2): 152—157.