

文章编号: 1001-1455(2010)01-0058-07

# 混凝土介质中空气间隔装药的爆破机理\*

吴亮<sup>1</sup>, 卢文波<sup>2</sup>, 钟冬望<sup>1</sup>, 朱红兵<sup>3</sup>

(1. 武汉科技大学理学院, 湖北 武汉 430081;

2. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3. 中国长江三峡开发总公司, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 基于 LS-DYNA 非线性有限元程序, 采用 JHC 混凝土损伤演化模型, 研究了不同装药结构及不同空气比情况下炮孔近区混凝土损伤的破坏机理。3 种装药结构计算结果表明: 随着空气比的增加, 破坏方式由压剪破坏转变为拉伸破坏, 不同的空气比可应用于不同的爆破目的; 对于梯段爆破, 空气层位于上部的装药结构爆炸能量利用率最好, 当空气比为 40% 时, 炮孔中部混凝土单元破坏方式由压剪转为拉伸破坏, 表明存在一个合理的空气比, 可以提高爆炸能量利用率; 对于预裂、光面爆破, 空气层位于中部的装药结构爆破效果最优; 起爆方式对梯段爆破效果的影响要比预裂和光面爆破效果明显。

**关键词:** 爆炸力学; 破坏机理; JHC 混凝土损伤演化模型; 空气间隔装药; 爆炸冲击荷载; 混凝土损伤

**中图分类号:** O389

**国标学科代码:** 130 · 3599

**文献标志码:** A

## 1 引言

近 10 年来, 随着经济建设的发展, 全国各地基础建设发展迅速, 特别是现代化矿山、西部山区水电的开发, 爆破作为石方开挖的最常用技术得到了前所未有的应用与发展。传统的连续柱状装药存在单耗大、爆轰初压过高、岩石过度粉碎、爆破振动强度高和炮孔上部堵塞段过长等缺点, 易产生大块和根底, 带来爆破振动危害、铲装和运输效率低下等诸多问题。有效地利用爆炸能量成为目前需解决的关键技术问题。空气间隔爆破技术的运用使爆炸能量得到有效利用<sup>[1]</sup>。许多模型实验和矿山实践都证明, 改连续柱状装药为轴向空气间隔装药可以有效地克服连续装药爆破带来的诸多弊端, 并能取得理想的爆破效果, 不仅提高了炸药能量的有效利用率, 降低了爆破成本, 而且控制了爆破危害。另外, 空气间隔装药结构还可以应用于光面爆破和预裂爆破<sup>[2]</sup>。

由于空气间隔装药爆破过程首先是爆轰波传播, 然后与空气、岩石耦合作用, 并充分利用爆炸能量破碎岩石, 最后形成爆堆的复杂动态过程; 同时, 在破岩过程中还产生了爆破地震效应。目前, 对于空气间隔装药爆破破岩机理的理论研究集中在炮孔压力计算, 对于应力波加、卸载作用下岩石的损伤演化过程、能量释放规律的研究还不够完善。本文中采用 JHC(Johnson-Holmquist-Cook)混凝土损伤演化模型, 研究不同装药结构及不同空气比情况下炮孔近区混凝土损伤破坏机理。

## 2 材料模型选用和计算模型建立

### 2.1 混凝土损伤模型

混凝土受到爆炸冲击荷载作用时, 需要考虑大应变、高应变率和高围压下材料损伤实效的动态响应, JHC 模型是一种适用于高应变率、大变形下混凝土与岩石的材料模型。它与金属材料中应用广泛的 Johnson-Cook 材料模型相类似, 等效屈服强度是压力、应变率及损伤的函数, 损伤量则是塑性体应变、等效塑性应变和压力的函数。JHC 模型的等效屈服强度为

$$\sigma^* = [A(1 - D) + Bp^{*N}](1 + C \ln \dot{\epsilon}^*) \quad (1)$$

式中: 标准化等效应力  $\sigma^* = \sigma / f'_c$ ,  $\sigma$  为等效应力,  $f'_c$  为静单轴抗压强度;  $D$  为损伤量, 且  $0 \leq D \leq 1$ ; 标准化压力  $p^* = p / f'_c$ ; 量纲一应变率  $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon} / \dot{\epsilon}_0$ ,  $\dot{\epsilon}$  为等效应变率,  $\dot{\epsilon}_0$  为参考应变率。A、B、N 和 C 均为由实验确定的常数。

\* 收稿日期: 2008-09-08; 修回日期: 2008-12-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(50774056, 50779050); 武汉科技大学科学基金项目(080068)

作者简介: 吴亮(1980—), 男, 博士, 讲师。

以等效塑性应变和塑性体应变的累积来描述损伤,损伤演化方程为

$$D = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{\epsilon_p^f + \mu_p^f} = \sum \frac{\Delta \epsilon_p + \Delta \mu_p}{D_1 (p^* + T^*)^{D_2}} \tag{2}$$

式中:  $\Delta \epsilon_p$  和  $\Delta \mu_p$  分别为等效塑性应变增量和等效塑性体应变增量,常压下材料断裂时的塑性应变  $f(p) = \epsilon_p^f + \mu_p^f$ ; 标准化最大抗拉静水压力  $T^* = T/f_c'$ ,  $T$  为最大抗拉静水压力;  $D_1$  和  $D_2$  为实验所得的损伤常数。

混凝土材料参数分别为<sup>[3]</sup>:  $\rho_0 = 2.44 \text{ g/cm}^3$ ,  $E = 35.7 \text{ GPa}$ ,  $\nu = 0.2$ ,  $G = 14.86 \text{ GPa}$ ,  $A = 0.79$ ,  $B = 1.6$ ,  $C = 0.007$ ,  $N = 0.61$ ,  $f_c = 48 \text{ MPa}$ ,  $T = 4 \text{ MPa}$ ,  $E_{f,\min} = 0.01$ ,  $S_{f,\max} = 7.0$ ,  $p_{\text{crush}} = 0.016 \text{ GPa}$ ,  $u_{\text{crush}} = 0.001$ ,  $p_{\text{lock}} = 0.8 \text{ GPa}$ ,  $u_{\text{lock}} = 0.1$ ,  $D_1 = 0.04$ ,  $D_2 = 1.0$ ,  $K_1 = 85.0 \text{ GPa}$ ,  $K_2 = -171.0 \text{ GPa}$ ,  $K_3 = 208.0 \text{ GPa}$ ,  $\epsilon_0 = 1.0 \times 10^{-6}$ 。

### 2.2 炸药状态方程

在数值模拟中,精确描述装药爆轰时的压力变化历程的方法很多。基本原理是以炸药的爆轰研究成果结合爆生气体的状态方程描述整个爆腔的动力膨胀。LS-DYNA 程序<sup>[4]</sup>可以直接模拟高能炸药的爆炸过程。

在爆炸场的数值模拟中,由于爆轰产物的压力波动范围很大,很难找到 1 个适合所有压力范围的状态方程。这里采用 JWL 方程

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V} \tag{3}$$

式中:  $p$  为由 JWL 状态方程决定的压力,  $V$  为相对体积,  $E_0$  为初始比内能,  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $\omega$  为描述 JWL 方程的 5 个独立物理常数。

炸药参数取值分别为<sup>[5]</sup>:  $\rho_0 = 1.3 \text{ g/cm}^3$ ,  $D = 4.0 \text{ km/s}$ ,  $A = 214.4 \text{ GPa}$ ,  $B = 182 \text{ MPa}$ ,  $R_1 = 4.2$ ,  $R_2 = 0.9$ ,  $\omega = 0.15$ ,  $E_0 = 4.192 \text{ GJ/m}^3$ 。

空气密度  $\rho_0 = 1.29 \text{ kg/m}^3$ , 采用线性多项式状态方程。

### 2.3 数值计算几何模型

空气层位于上部的装药结构计算模型见图 1, 计算模型包括炸药、混凝土与空气 3 种材料。为简化计算, 堵塞采用混凝土材料。炮孔直径 40 mm, 炮孔深 1.2 m, 堵塞 0.2 m。空气层和炸药共 1.0 m, 其中空气层所占的体积称空气比。AD 为自由边界, 长 4 m, AB、BC 和 CD 为无反射边界, AB 长 3 m。选取 3 个典型单元 7 001、9 353 和 11 753, 分别为平行于空气层与炸药段底部、中间和上部 3 个部位, 这些典型单元与炮孔距离均为 0.5 m。

计算了空气层分别位于炸药上部、中部和下部 3 种装药情况, 炸药与炮孔径向耦合, 而轴向不耦合, 每种装药情况的空气比为 20%、40%、60% 和 80%, 同时对空气比为 20% 的每种装药情况采用了不同的起爆方式。

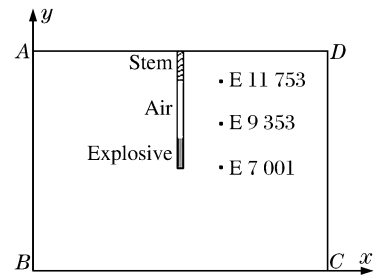


图 1 计算模型示意图

Fig.1 Sketch of calculation model

## 3 计算结果及分析

### 3.1 不同空气层位置的破岩机理

F. V. Donze 等<sup>[6]</sup>认为, 粉碎区的产生是由于爆破压力超过了岩体的动态强度, 使岩体破坏, 这个过程持续时间很短。当粉碎区形成以后, 爆源压力向远区放射, 在区域周围出现裂纹并沿径向扩张。在主裂纹扩展时, 将有数目不等的支裂纹伴随出现, 粉碎区半径与装药半径的比例  $d \approx 5$ 。T. N. Hagan<sup>[7]</sup>认为, 岩体粉碎区的形成是岩体初始晶粒结构破坏和新的岩体颗粒紧缩重排的过程, 通过试验分析, 得到  $d = 1 \sim 10$ 。采用损伤材料模型计算时, 一般把损伤值达到 1 的区域认为粉碎区<sup>[8]</sup>, 损伤值在 0~1.0 之间, 称为裂隙区, 损伤值为 0 的区域为未损伤区。

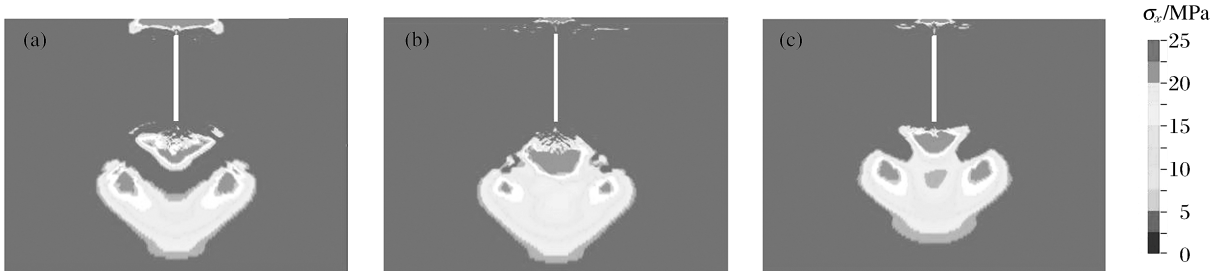
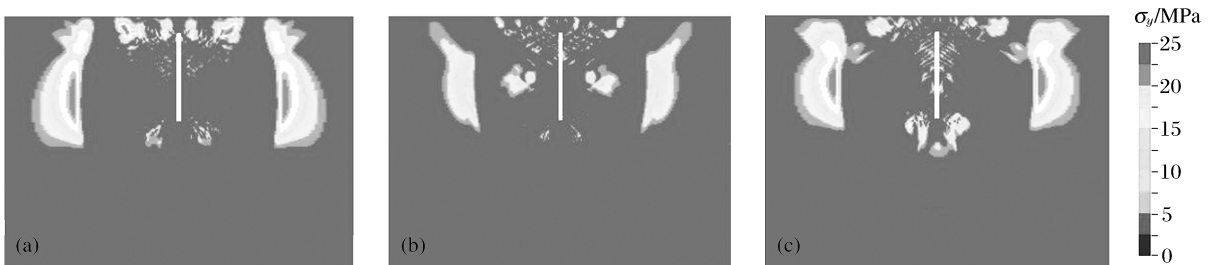
图 2 为压剪损伤分布图, 图中(a)~(c)分别对应空气层位于炸药上部、中部和底部, (a)、(c)采用反向起爆, (b)采用两端起爆。图 3~9 中的装药结构和起爆方式与图 2 对应。当底端反向起爆, 最后形成的粉碎区如纺锤形。这是由于炸药起爆初始阶段, 爆轰气体压力和温度较小, 因此底端粉碎区不明显。随着爆轰向上传播, 爆轰产物形成的高压气体以及爆炸产生的强冲击波增大, 混凝土压剪粉碎区逐渐增大, 最大装药段粉碎半径为 11 cm, 为炮孔半径的 5.5 倍。随后爆轰冲击波在堵头反射形成压损区, 顶端压损区随着空气比增加而减小。对于空气层位于中部的情况, 每段炸药区的混凝土压剪粉碎区形状与前面分析情况类似。从两端起爆计算结果可以看出, 由于两端爆轰冲击波向中间传播, 在炮孔中部叠加, 没有在中部形成粉碎区, 形成了和装药段相同的裂隙区。空气层位于底部的情况, 反向起爆引起的混凝土损伤区与空气层位于上部反向起爆情况一致, 只是图形倒置了。计算结果表明, 对于空气层位于底部的情况, 由于空气层的存在降低了爆轰冲击压力对底部的冲击损伤。从这点上看, 空气层置于底部可用于保护底板, 这与文献[9-10]一致。



图2 空气比为20%时的压剪损伤

Fig. 2 Damage distribution at air-decked ratio 20%

图3~4为空气比为20%时各装药结构在0.6 ms时刻的拉伸应力云图。空气层位于上部时,爆轰冲击波沿炮孔壁向外传播,在炮孔底部形成相应的拉伸区。而在堵头段受自由面的影响,顶部介质在冲击波作用下向上运动,产生拉伸区域,上述2个拉伸应力区域将会产生竖向裂纹。计算表明,冲击波在底部反射引起 $y$ 方向的拉伸应力向外传播,同时向下传播的稀疏波使得拉伸应力区域增加,在堵塞段,冲击波在自由面反射形成拉伸应力。从空气层位于中部、两端起爆情况来看,底部 $x$ 方向拉伸应力区域和空气层位于上部差不多,而堵塞段 $x$ 方向拉伸应力区域不明显。另外, $y$ 方向拉伸应力相对较少,说明炮孔内稀疏波作用不明显。空气层位于底部、反向起爆也只是在炮孔底部形成 $x$ 方向拉伸区域,堵塞段拉伸应力较少,而 $y$ 方向拉伸应力和空气层位于上部相同,这也是由于炮孔内稀疏波的作用,但堵塞段 $y$ 方向拉应力区较少。比较3种装药结构,对于 $x$ 方向拉伸应力,共同点在于拉伸区域集中在炮孔底部,空气层位于底部的结构所产生的拉伸应力区域最小;对于 $y$ 方向拉伸应力,拉伸区域都集中在炮孔径向部位,空气层位于中部的装药结构拉伸破坏最小,其他基本相同。

图3 空气比为20%时 $x$ 方向拉伸应力云图Fig. 3  $x$ -axle tensile stress at air-decked ratio 20%图4 空气比为20%时 $y$ 方向拉伸应力云图Fig. 4  $y$ -axle tensile stress at air-decked ratio 20%

为进一步分析拉伸破坏范围,选取了典型单元的第一主应力,见图5。应力、应变的符号规定为拉正压负。先比较堵塞段单元的破坏情况,从拉应力峰值及作用时间上分析得到,空气层位于上部情况拉伸应力峰值最大,为33.6 MPa,作用时间也最长,空气层位于中间的作用效果其次。对于炮孔中部拉伸破坏,计算得到规律与堵塞段单元一致,而分析炮孔底部单元第一主应力,得到空气层位于底部的拉伸效果显著,可见,底部空气间隔装药并不能完全起到保护底板的作用。文献[11-12]在深孔梯段爆破采用底部空气装药,取得较好的效果,因此可以初步推断空气层位于底部的装药结构应用于不同的爆破目的可能与空气比有关,这一观点还有待进一步证实。

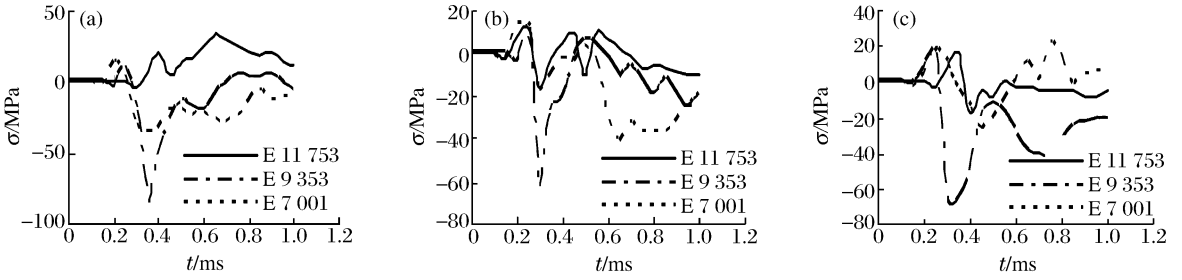


图 5 空气比为 20% 时不同装药结构典型单元的第一主应力

Fig. 5 1st-prin stress curves of typical elements for different charge structure at air-decked ratio 20%

当采用空气间隔装药结构进行梯段爆破时,从计算的压剪粉碎以及拉伸破坏范围来看,各装药结构都能取得较好的效果。考虑到脆性材料抗拉强度远小于抗压强度,空气层位于上部的装药结构炮孔中部单元由压剪破坏变为拉伸破坏,且拉伸破坏范围最大,因此,爆炸能量利用率最好,这与文献[2]一致。爆破施工中由于围岩的夹制作用,通常希望炮孔底部能有更多的爆轰能量以破碎和抛掷岩石,虽然空气层置于中部可以满足这一要求,但在常规爆破中孔顶围岩通常更易破碎,将大量能量集中作用于孔顶是没有必要的,而且两端装药起爆需要 2 发雷管,增加了爆破成本。

### 3.2 空气比对爆破效果的影响

随着空气比的增加,爆炸能量减小,势必影响破坏机理,因此,这里对空气比为 80% 的各装药结构进行分析。由上节得出炮孔压剪粉碎区仅限于装药段,所以空气比为 80% 的粉碎区很小,限于篇幅,这里不作讨论。图 6~7 为空气比为 80% 各装药结构在 0.6 ms 时刻  $x$ 、 $y$  方向的应力云图,由图可见, $x$  方向的拉应力区域主要在炮孔底部,拉伸应力峰值与范围由大到小依次为空气层位于上部、中部和底部时装药结构,并且空气层位于上部时堵塞段拉伸应力区最大; $y$  方向的拉伸应力区域主要在炮孔径向部位,空气层位于上部的拉应力区最大,空气层位于下部的最小,而且主要在炮孔底部段。计算结果表明,空气比大时破坏机理主要是拉伸破坏。因而,在岩石预裂爆破、光面爆破时能够获得较理想的爆破效果。



图 6 空气比为 80% 时  $x$  方向拉伸应力云图

Fig. 6  $x$ -axle tensile stress at air-decked ratio 80%

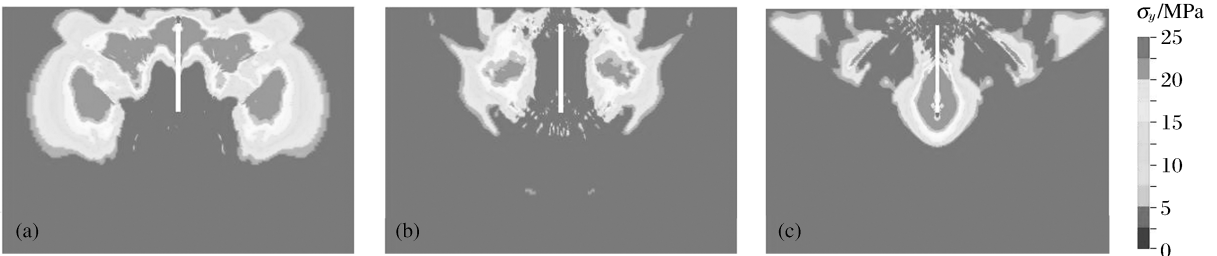


图 7 空气比为 80% 时  $y$  方向拉伸应力云图

Fig. 7  $y$ -axle tensile stress at air-decked ratio 80%

为进一步分析哪种装药结构用于光面和预裂爆破更好,选取了典型单元的第一主应力,见图 8。从堵塞段单元第一主应力来看,空气层位于中部时拉伸应力峰值最大,为 31.4 MPa,作用时间也最长,空气层位于底部次之。对于炮孔中部拉伸破坏,空气层位于上部时拉伸应力峰值最大,为 41.8 MPa,作用时间也最长,其次为空气层位于中部。对于炮孔

底部拉伸破坏,空气层位于中部时拉伸应力峰值最大,为约 30.0 MPa,作用时间也最长,空气层位于底部次之。计算结果表明,空气层位于中部的装药结构爆破效果最优,但爆破成本高,施工操作不方便。而空气层位于底部时实际施工中会因为堵塞效果引起爆轰气体过早溢出。因此,实际施工中建议采用上部空气层结构,中部拉应力范围广,不仅爆炸能量利用率高,易于裂纹扩展,而且操作简便。

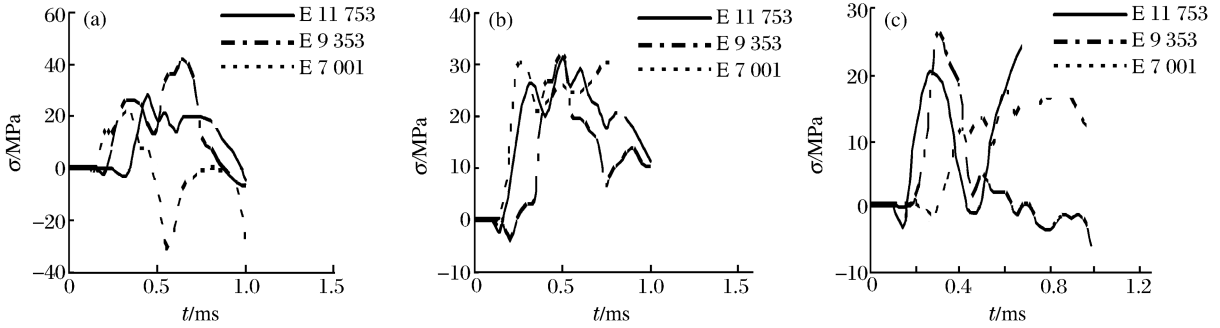


图 8 空气比为 80% 时不同装药结构典型单元的第一主应力

Fig. 8 1st-prin stress curves of typical elements for different charge structure at air-decked ratio 80%

图 9 为不同空气比情况下炮孔中部典型单元第一主应力曲线。3 种装药结构计算结果表明,随着空气比的增加,破坏方式由压剪破坏转变为拉伸破坏。空气比为 40% 时,破坏机理由压剪转为拉伸破坏,更能充分破坏混凝土,达到较好的块度级配,表明存在一个合理的空气比,充分利用提高爆炸能量。计算结果与文献[1]一致。

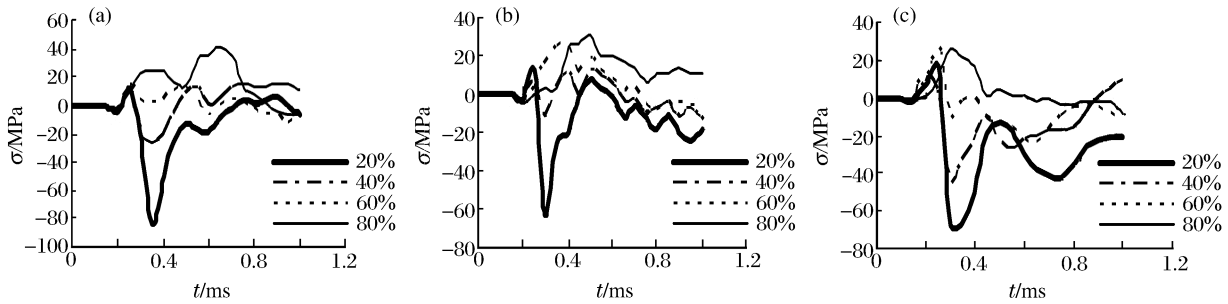


图 9 不同空气比时单元 9 353 的第一主应力

Fig. 9 1st-prin stress curves of E9 353 for different air-decked ratio

### 3.3 起爆方式对爆破效果的影响

图 10 为与上述起爆方式不同的第一主应力,(a)、(c)采用正向起爆,(b)采用中间起爆。限于篇幅, $x$ 、 $y$  方向拉伸应力云不再罗列。比较相应的装药结构和空气比,可以得到:空气层位于上部和底部的装药结构,正向起爆产生的拉应力区域比反向起爆的小,而空气层位于中部情况相反。由图 10(a)、5(a),反向起爆时炮孔上部单元拉伸峰值大,中间单元由压缩变为拉伸,而正向起爆一直处于压缩状态,炮孔底部单元均处于压缩状态,正向起爆压缩峰值大。这表明,正向起爆时爆炸能量更多地用于冲击炮孔下部混凝土,被混凝土介质所吸收,而反向起爆更多地用于破坏混凝土。由图 10(b)、5(b),中间起爆时各典型单元由压缩变为拉伸比两端起爆情况显著,可见中间起爆效果优于两端起爆。由图 10(c)、5(c),反向起爆爆破比正向起爆效果好。

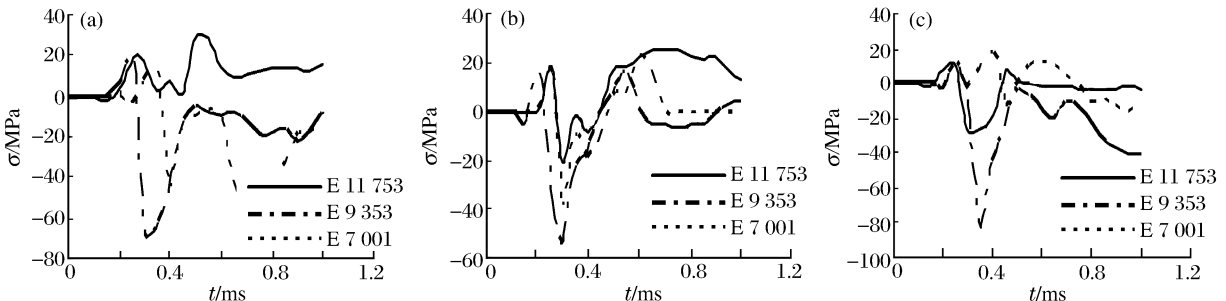


图 10 空气比为 20% 时不同装药结构典型单元的第一主应力

Fig. 10 1st-prin stress curves of typical elements for different charge structure at air-decked ratio 20%

对于空气比较大的预裂和光面爆破,计算得出起爆方式对爆破效果的影响不明显。限于篇幅,不再罗列。

## 4 工程应用

选取向家坝水电站右岸山体 PD40 勘探平洞作为地下厂房底部空气间隔装药光面爆破的实验部位。围岩为 II 类围岩,岩石单轴抗压强度为 100 MPa,密度为 2.68 t/m<sup>3</sup>,弹性模量为 25.35 GPa,泊松比为 0.2。PD40 勘探平洞支洞洞深 180 m,采用手风钻钻孔,钻孔直径为 40 mm,采用直径为 32 mm 的 2 号岩石乳化炸药。钻孔深度均为 2.0 m,堵塞段长度为 0.4 m,空气层长度 1.0 m,底部装药长度 0.6 m。爆破后洞壁半孔率超过 90%,即使是底部装药段,残留半孔也很完整;只是在起爆点,炮孔壁表层可见较明显的冲击粉碎痕迹,爆破效果见图 11。对比正向起爆和反向起爆的炮孔底部装药段的破坏效果,发现两者的底部破坏没有明显不同。

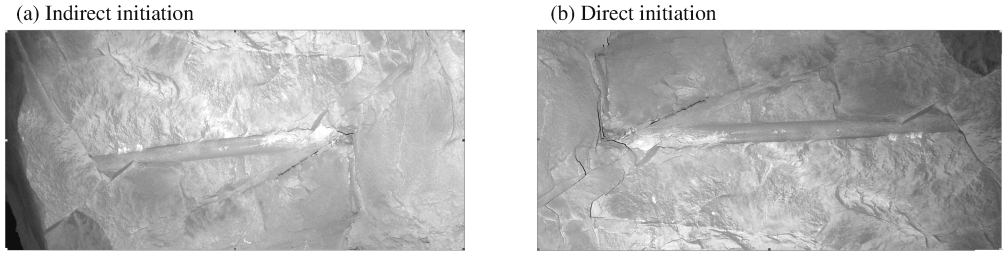


图 11 爆破效果

Fig. 11 Blasting effect

## 5 结论

采用 JHC 混凝土损伤演化模型得到空气层分别位于炸药上部、中部和低部 3 种空气装药结构及起爆方式和不同的空气比的计算结果,获得以下结论:

- (1) 对于梯段爆破,空气层位于上部时装药结构炮孔中部单元由压剪破坏变为拉伸破坏,且拉伸破坏范围最大,爆炸能量利用率最好,破岩成本低,操作简便。
- (2) 对于光面、预裂爆破,计算结果表明,空气层位于中部时装药结构爆破效果最优,但是爆破成本高,施工操作不方便,而空气层位于底部实际施工中会因为堵塞效果引起爆轰气体过早溢出,因此,实际施工中建议采用上部空气层结构。
- (3) 3 种装药结构计算结果表明,随着空气比的增加,破岩方式由压剪破坏转变为拉伸破坏。当空气层位于上部,空气比为 40% 时,破岩机理由压剪转为拉伸破坏,更能充分破坏混凝土,表明存在一个合理的空气比,充分利用爆炸能量,达到较好的块度分布。
- (4) 梯段爆破时,空气层位于上部和底部时装药结构反向起爆爆破效果比正向起爆好,空气层位于中部时装药结构中间起爆效果比两端起爆好;预裂和光面爆破时,起爆方式对爆破效果的影响不明显。

## 参考文献:

- [1] ZHU Hong-bing, LU Wen-bo, WU Liang. Air-decking technique in bench blasting[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006,16(2):184-188.
- [2] 朱红兵,卢文波,吴亮. 空气间隔装药爆破机理研究[J]. 岩土力学,2007,28(5):986-990.  
ZHU Hong-bing, LU Wen-bo, WU Liang. Research on mechanism of air-decking technique in bench blasting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007,28(5):986-990.
- [3] Holmquist T J, Johnson G R. A computational constitutive model for concrete subjected to larger strains, high strain rates and high pressure[C]//Jackson N, Dickert S. 14th International Symposium Ballistics. USA: American Defense Preparedness' Association, 1995:591-600.
- [4] LS-DYNA keyword user's manual[Z]. California: Livermore Software Technology Corporation, 2003.
- [5] 夏祥,李海波,李俊如,等. 岩体爆生裂纹的数值模拟[J]. 岩土力学,2006,27(11):1987-1991.  
XIA Xiang, LI Hai-bo, LI Jun-ru, et al. Numerical simulation of blast-induced cracks in rock[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006,27(11):1987-1991.
- [6] Donze F V, Bouchez J, Magnier S A. Modeling fractures in rock blasting[J]. International Journal of Rock Me-

chanics and Mining Sciences, 1997, 34(8):1152-1163.

- [7] Hagan T N. Rock breakage by explosives[J]. Acta Astron, 1979(6):329-340.
- [8] 王志亮,李永池. 工程爆破中径向水不耦合系数效应数值仿真[J]. 岩土力学, 2005, 26(12):1926-1930.  
WANG Zhi-liang, LI Yong-chi. Numerical simulation on effects of radial water-decoupling coefficient in engineering blast[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12):1926-1930.
- [9] 杨军,黄风雷. 深孔爆破空隙装药损伤演化过程的数值模拟[J]. 爆破, 1997, 14(2):1-6.  
YANG Jun, HUANG Feng-lei. A numerical calculation on damage evolution in deep-hole blasting with bottom gap charging[J]. Blasting, 1997, 14(2):1-6.
- [10] 董永香,夏昌敬,段祝平. 平面爆炸波在半无限混凝土介质中传播与衰减特性的数值分析[J]. 工程力学, 2006, 23(2):60-65.  
DONG Yong-xiang, XIA Chang-jing, DUAN Zhu-ping. Numerical analysis of plane explosive wave propagation with its attenuation behavior in semi-infinite medium[J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(2):60-65.
- [11] 刘振东,高毓山,谭永后. 底部间隔装药结构在南芬露天矿的试验研究[J]. 矿业快报, 2002(7):85-88.
- [12] 辜大志,谢圣权,陈寿如. 孔底空气间隔装药改善爆破震动和爆破效果的研究[J]. 采矿技术, 2004, 4(4):64-66.

## Blasting mechanism of air-decked charge in concrete medium \*

WU Liang<sup>1</sup>, LU Wen-bo<sup>2</sup>, ZHONG Dong-wang<sup>1</sup>, ZHU Hong-bing<sup>3</sup>

(1. College of Science, Wuhan University of Science and Technology,

Wuhan 430081, Hubei, China;

2. State Key Laboratory of Water Resource and Hydropower Engineering Science,

Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

3. China Three Gorges Project Corporation, Yichang 443002, Hubei, China)

**Abstract:** Based on the non-linear finite-element procedure of LS-DYNA, the Johnson-Holmquist-Cook (JHC) model was adopted to investigate the damage evolution of the concrete near the blast hole in the cases of different charging structures and different air-decked ratios. The calculation results for three charging structures show that there is a gradual change from compression-shear failure to tensile failure with the increase of air-decked ratio and that different air-decked charging structures can be applied to different blasting purposes. For bench blasting, the highest utilization ratio of explosion energy belongs to the top air-decked charging structure. When the air-decked ratio reaches 40%, the failure mode of the concrete element changes from compression-shear failure to tensile failure in the middle of the blast hole. It is indicated that a certain reasonable air-decked ratio exists and it can be used to improve the utilization ratio of blasting energy. For presplitting blasting and smooth blasting, the best blasting effect belongs to the middle air-decked charging structure. Detonating manners can affect bench blasting more strongly than presplitting blasting and smooth blasting.

**Key words:** mechanics of explosion; failure mechanism; Johnson-Holmquist-Cook model; air-decked charge; blast loading; concrete damage

\* Received 8 September 2008; Revised 17 December 2008

Supported by the National Natural Science Foundation of China (50774056, 50779050)

Corresponding author: WU Liang, wliang80@yahoo.cn