

DOI: 10.11883/bzycj-2020-0352

孔内起爆位置对爆破振动场分布的影响作用规律*

高启栋^{1,2}, 靳军¹, 王亚琼¹, 卢文波², 冷振东^{3,4}, 陈明²

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064;

2. 武汉大学水工岩石力学教育部重点实验室, 湖北 武汉 430072;

3. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010;

4. 中国葛洲坝集团易普力股份有限公司, 重庆 401121)

摘要: 岩石钻孔爆破中, 孔内起爆位置决定炸药爆轰波的传播方向, 进而影响爆破振动场的分布。通过分析柱状药包爆轰产物和爆炸能量的分配及其爆炸应力场的分布, 揭示了起爆位置的影响作用机理; 基于 Heelan 短柱解延长药包叠加计算模型, 比较分析了不同起爆位置下爆破振动场的分布规律, 并结合现场实验, 验证了起爆位置对爆破振动场分布的调节作用效果。结果表明: 起爆位置的影响作用机理在于柱状药包爆炸能量的轴向不均匀分配和爆破振动场叠加的相位延迟效应; 孔内起爆位置对爆破振动场的分布起调节作用, 爆破振动沿爆轰波传播正向叠加增强, 且爆破振动场分布的不均匀性受药包长度和炸药爆轰速度的调控; 对于常见的几种起爆方式, 现场实验统计结果显示, 底部起爆时地表爆破振动峰值最大, 中部起爆次之, 上部起爆最小, 且爆破振动差异性随炮孔深度的增加而增大, 但振动差异会随距离逐渐消减。

关键词: 钻孔爆破; 起爆位置; 爆破振动场分布; 质点峰值振速

中图分类号: O382.2

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

Acting law of in-hole initiation position on distribution of blast vibration field

GAO Qidong^{1,2}, JIN Jun¹, WANG Yaqiong¹, LU Wenbo², LENG Zhendong^{3,4}, CHEN Ming²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Rock Mechanics in Hydraulic Structural Engineering, Ministry of Education,
Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;

3. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China;

4. Gezhouba Group Explosive Co., Ltd, Chongqing 401121, China)

Abstract: In rock drilling and blasting, the in-hole initiation position determines the propagation direction of the explosive detonation wave, and thereby affects the distribution of blast vibration field (BVF). In this study, the acting mechanism of the initiation position was investigated via the comprehensive analysis of the distribution of the detonation products, the explosion energy as well as BVF of the cylindrical charge. Then, the distribution law of BVF under different initiation positions was analyzed using the Heelan's short-column-solution based superposition model of an extended charge. At last, the acting effect of the initiation position on the distribution of BVF was demonstrated by the onsite blasting experiment. Results indicate that the acting mechanism of the initiation position lies in the axial non-uniform distribution of the explosive energy and the phase

* 收稿日期: 2020-09-27; 修回日期: 2020-12-17

基金项目: 国家自然科学基金(52009003, 51809016); 中央高校基本科研业务费专项基金(300102210123);
水工岩石力学教育部重点实验室开放研究基金(EMHSE1903)

第一作者: 高启栋(1991—), 男, 博士, 讲师, qdqiao@chd.edu.cn

通信作者: 王亚琼(1975—), 男, 博士, 教授, ys08@gl.chd.edu.cn

delay effect of the superposition of BVF. The in-hole initiation position has the adjustment effect on the distribution of BVF, due to which, the blast vibration amplitude is strengthened at the forward direction of the detonation wave. It needs to be pointed that the non-uniformity of the distribution of BVF is under some control of the explosive length and the explosive velocity of detonation. For the common initiation modes, the field test results indicate that the ground peak particle velocities under the bottom are larger than those under the top and mid-point initiations, and the top initiation is the smallest. Besides, the blast vibration differences becomes more obvious as the blast-hole depth increases, but the vibration difference gradually vanishes with distance.

Keywords: drilling and blasting; initiation position; distribution of blast vibration field; peak particle velocity

钻孔爆破是一种经济高效的施工技术手段,已被广泛应用于采矿、水利、交通及市政等基础建设领域^[1]。在实际工程中,孔内炸药多由雷管引爆,是由于孔内药包的几何特性(大长径比)^[2]及炸药的有限爆轰速度特性^[3],爆轰反应沿药包轴向呈现时间和方向效应^[4]。孔内起爆位置决定炸药爆轰波的传播方向,进而影响爆破振动场的分布。因此,孔内起爆位置的影响不可忽视。

针对起爆位置或起爆方向的影响,已有了较多研究。Onederra 等^[5]采用复合应力爆破模型(hybrid stress blasting model, HSBM)进行数值模拟,发现反向起爆时孔口附近的损伤范围大于孔底;Liu 等^[6]模拟了孔口、孔底及中间起爆条件下台阶爆破根底分布情况,结果表明起爆雷管置于上部能有效地缓解爆破根底;冷振东等^[7]研究了孔内双点起爆所引发的爆炸能量传输过程和爆破破岩效果;向文飞等^[8]以条形药包为例,采用 Starfield 叠加法分析了它在介质中激发的应力场;杨仁树等^[9]探讨了柱状药包中点起爆时激发的应力应变场及爆生裂纹尖端局部应力场的演化规律;高启栋等^[10]从爆炸应力波传播与反射的角度切入,比较分析了掏槽孔不同位置起爆时产生的掏槽效果及其所诱发支护结构的爆破振动响应。

考虑破碎及抛掷效果,以往的研究多推荐底部起爆^[11],但当起爆雷管置于药包底部时,并不一定利于地表爆破振动的控制^[12],目前仍缺乏有关起爆位置对爆破振动场分布影响作用规律的系统研究。本文中,从柱状药包爆轰产物与爆炸能量分配及其爆炸应力场分布角度出发,揭示起爆位置的影响作用机理,并基于 Heelan 短柱解的延长药包叠加计算模型,结合相应的现场爆破实验,比较分析不同起爆位置下爆破振动场的分布规律。拟为工程中选取合适的起爆位置以兼顾爆破破岩效果与振动控制的要求提供参考。

1 起爆位置影响的作用机理

1.1 柱状药包爆轰产物及爆炸能量的分配

柱状药包的爆轰反应由雷管引发后,继而随爆轰波的传播向前推进。由于炸药爆轰速度有限,且考虑柱状药包的几何特性(大长径比),柱状药包的爆轰反应存在时间和方向效应,起爆位置决定着爆轰波的传播方向,自然也影响爆轰产物与爆炸能量的分配。如图 1 所示,张宝铎等^[13]基于一维流动模型分析了柱状药包爆轰产物及爆炸能量的分配效应。假设柱状药包置于刚壁管中,药包的总长为 L ,起爆点左侧及右侧的药包长度分别为 b 和 a ($L=a+b$, $b \leq a$),药包横截面积为 A_0 ,炸药的初始密度和爆速分别为 ρ_0 和 D ,则经一定时间后,刚壁管内将形成 8 种不同的流场,分配于起爆点两侧爆轰产物的质量 M 和能量 E 为:

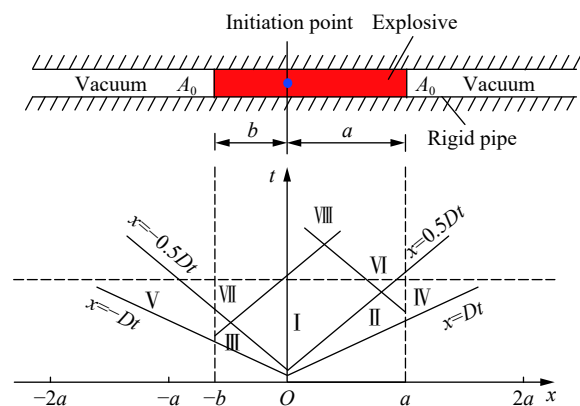


图 1 柱状药包爆轰产物的一维流动模型

Fig. 1 One-dimensional flow model of the detonation products of a cylindrical charge

$$\begin{cases} M_a = \frac{1}{9}\rho_0 A_0 (5a + 4b) \\ M_b = \frac{1}{9}\rho_0 A_0 (4a + 5b) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} E_a = \frac{1}{27}\rho_0 A_0 D^2 \left(a + \frac{11}{16}b \right) \\ E_b = \frac{1}{27}\rho_0 A_0 D^2 \left(\frac{11}{16}a + b \right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: M_a 、 M_b 为分配于起爆点右侧与左侧的爆轰产物质量, E_a 、 E_b 为传至起爆点右侧与左侧的爆炸能量。假设 $b=0$, 即左端引爆, 有:

$$\begin{cases} M_a = \frac{5}{9}\rho_0 A_0 L \\ M_b = \frac{4}{9}\rho_0 A_0 L \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} E_a = \frac{16}{27} \frac{L}{16} A_0 \rho_0 D^2 \\ E_b = \frac{11}{27} \frac{L}{16} A_0 \rho_0 D^2 \end{cases} \quad (4)$$

由式 (1)~(2) 可知, 最终传至起爆点两侧的爆轰产物质量 M 和能量 E 与起爆点的位置密切相关。而由式 (3)~(4) 可知, 若药包左端起爆, 传至药包右端的质量和能量分别为左端的 1.25 倍和 1.45 倍, 说明爆炸能量会优先分配到爆轰波传播正向。

1.2 爆炸应力场叠加的相位延迟效应

不同于球状药包, 柱状药包的应力场并非均匀辐射^[14], 它可通过一系列单元药包的叠加获得^[15]。因炸药爆轰速度受限, 所以须考虑单元药包叠加的相位延迟效应。如图 2(a) 所示, 假设长为 L 的柱状药包均分为 n 个小单元, 即每个单元长为 L/n 。以底部起爆为例, 则单元药包 $i-1$ 将比 i 早 $L/(nD)$ 起爆。由于后爆单元距药柱上部测点 (如点 P) 越来越近, 距药柱底部测点 (如点 Q) 越来越远, 所以应力叠加在药柱上部, 即柱状药包爆炸应力场沿爆轰波传播正向叠加增强。为简单起见, 设单元药包的源函数为^[16]:

$$f(R, t) = \begin{cases} AR^{-\alpha} g(t - \tau) & t \geq \tau \\ 0 & t < \tau \end{cases} \quad (5)$$

式中: $AR^{-\alpha}$ 为 R 处的应力幅值, τ 为应力波传至观测点的时间, $g(t)$ 为单元药包激发的应力波形状。 $g(t)$ 可用逐渐衰减的正弦波来代替^[16]:

$$g(t) = e^{-\beta t} \sin(\omega t) \quad (6)$$

式中: β 和 ω 分别为衰减系数与角频率。柱状药包的总应力场为:

$$\begin{cases} F_r = \sum f \sin \varphi_i \\ F_z = - \sum f \cos \varphi_i \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sin \varphi_i = \frac{r}{R_i} \\ \cos \varphi_i = \frac{z - (i - 1/2)L/n + L/2}{R_i} \\ \tau_i = \frac{R_i}{c} + \frac{(i - 1/2)L}{nD} \\ R_i = \sqrt{r^2 + \left(z - \frac{(i - 1/2)L}{n} + \frac{L}{2} \right)^2} \end{cases} \quad (8)$$

式中: z 、 r 为测点至药包中心的轴向与径向距离, R_i 为单元药包 i 至测点的距离, c 为岩体的声速。

令柱状药包长度 $L=3\text{ m}$ 、爆轰速度 $D=3\ 600\text{ m/s}$, 据式 (5)~(8), 可得柱状药包激发的峰值应力等值线图, 如图 2(b) 所示, 图中以到药包中心的距离来表征峰值应力大小。柱状药包底部起爆在顶端产生的峰值应力比底端高约 38%, 其应力场并非均匀分布, 而是在爆轰波传播的正向叠加增强。

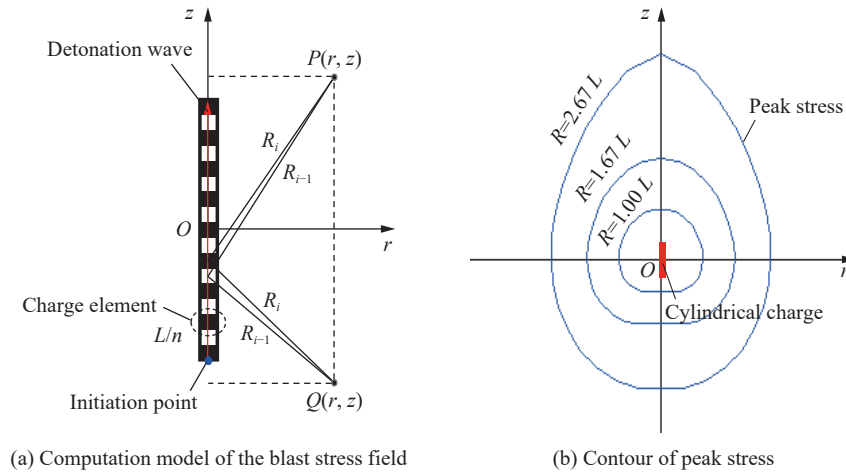


图 2 柱状药包的相位延迟效应

Fig. 2 The phase delay effects of the cylindrical charge

2 基于 Heelan 短柱解的延长药包爆破振动场计算分析

2.1 计算模型

如前面所述, 延长药包的爆破振动场也可由短柱单元药包依次叠加获得(见图 3), 且各短柱单元需按爆轰传播速度 D 沿药包轴向计算其相位延迟。关于短柱药包激发的振动场, Heelan^[17] 基于短柱空腔受内压的力学模型, 推导了短柱药包的位移解, 结果表明短柱药包可同时激发 P 波和 S 波, 且二者均有特定的优势辐射方位(见图 4)。短柱空腔受径向内压作用下(短柱炸药源)P 波和 S 波的位移解分别为^[17]:

$$\begin{bmatrix} u_p \\ \omega_p \end{bmatrix} = \left(\frac{F_1(\phi)}{R} \frac{d}{dt} \left(p \left(t - \frac{R}{v} \right) \right) \right) \begin{bmatrix} \sin \phi \\ -\cos \phi \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} u_s \\ \omega_s \end{bmatrix} = \left(\frac{F_2(\phi)}{R} \frac{d}{dt} \left(p \left(t - \frac{R}{v} \right) \right) \right) \begin{bmatrix} \cos \phi \\ \sin \phi \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: u_p 、 u_s 、 ω_p 和 ω_s 分别为 P 波、S 波的水平位移与垂直位移, v_p 和 v_s 分别为 P 波和 S 波的传播速度, R 为到药包中心的距离, ϕ 为波传播方向与 z 轴的夹角, $p(t)$ 为短柱空腔所受的径向压力, $F_1(\phi)$ 和 $F_2(\phi)$ 为 P 波和 S 波的源函数。P 波和 S 波的源函数分别为:

$$\begin{cases} F_1(\phi) = \frac{\Delta}{4\pi \mu v_p} \left(1 - \frac{2v_s^2 \cos^2 \phi}{v_p^2} \right) \\ F_2(\phi) = \frac{\Delta}{4\pi \mu v_p} \sin 2\phi \end{cases} \quad (11)$$

式中: Δ 为短柱空腔的体积, μ 为泊松比。

进一步地, 参照式 (7)~(8) 的计算方法和图 3 的叠加模型, 以底部起爆为例给出了延长药包爆破振动场的计算公式:

$$\begin{bmatrix} v_{ri} \\ v_{zi} \end{bmatrix} = \left(\frac{F_1(\phi_i)}{R_i} \frac{d^2}{dt^2} \left(p \left(t - \frac{(i-1)L}{nD} - \frac{R_i}{v_p} \right) \right) \right) \begin{bmatrix} \sin \phi_i \\ -\cos \phi_i \end{bmatrix} + \left(\frac{F_2(\phi_i)}{R_i} \frac{d^2}{dt^2} \left(p \left(t - \frac{(i-1)L}{nD} - \frac{R_i}{v_s} \right) \right) \right) \begin{bmatrix} \cos \phi_i \\ \sin \phi_i \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\begin{bmatrix} v_r \\ v_z \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \begin{bmatrix} v_{ri} \\ v_{zi} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: v_{ri} 和 v_{zi} 分别为短柱单元药包的水平及垂直向爆破振动速度。式 (12) 由式 (9)~(10) 先求导再累加得到。同理, 也可推导上部起爆、中点起爆及两端起爆时的爆破振动场计算公式。

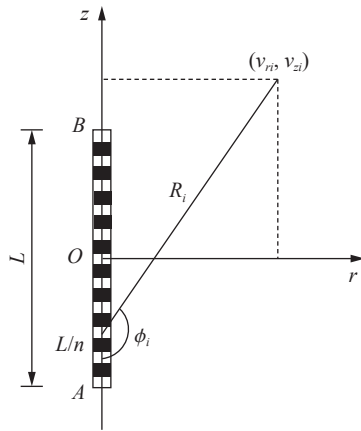


图 3 延长药包爆破振动场的计算模型
Fig. 3 Computation model of the blast vibration field of the extended charge

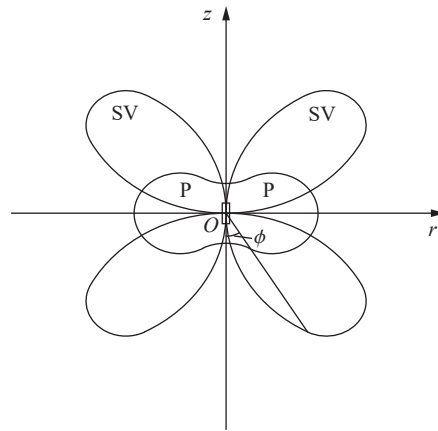


图 4 短柱药包的辐射模式
Fig. 4 Radiation pattern of the short explosive column

计算中, 短柱炸药所受的径向压力源函数 $p(t)$ 基于文献 [18-19] 的实验数据选取:

$$p(t) = p_b e^t (t^k - 2kt^{k-1} + k(k-1)t^{k-2}) \quad (14)$$

式中: p_b 为峰值爆轰压力, k 为表征源函数形状的参数。延长药包和岩石的相关参数分别为: 药包长 3.0 m, 直径 32 mm, 密度 1 243 kg/m³, 爆轰速度 3 600 m/s; 岩石密度 2 700 kg/m³, 弹性模量 25 GPa, 泊松比 0.25。图 5 为采用上述方法计算所得的典型爆破振动速度曲线。

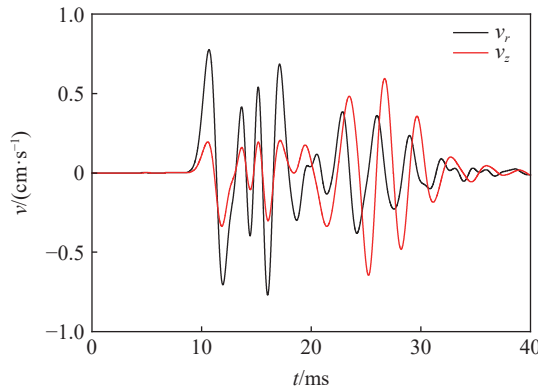


图 5 基于叠加计算模型的典型爆破振动速度曲线
Fig. 5 Typical blast vibration velocity curves based on the superposition model

2.2 不同起爆位置的爆破振动场

2.2.1 测点沿药包轴向分布的质点峰值振速

药包轴向的测点布置如图 6 所示, 其中 A、B、O、AB 分别表示底部起爆、上部起爆、中点起爆和两端起爆。图 7 为药包轴向各测点的质点峰值振速 v_{pp} 随比例距离 d_s 的变化曲线, 比例距离为:

$$d_s = r/Q^{1/2} \quad (15)$$

式中: r 为测点至药包中心的距离, Q 为装药量。

由图 7 可知, 对于药包轴向各测点, 底部起爆激发的峰值振速最大, 上部起爆最小, 中点起爆及两端起爆大致相等, 且介于底部起爆与上部起爆之间。底部起爆时测点置于爆轰波传播正向, 后爆单元药包在测点处的振动叠加增强; 上部起爆时, 测点置于爆轰波传播负向, 后爆单元在测点处振动叠加减弱。

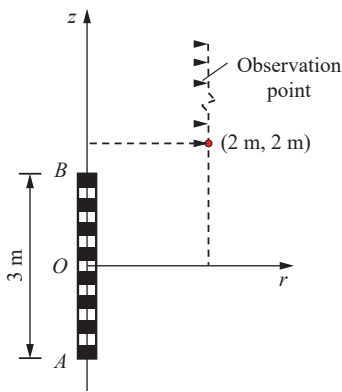


图 6 药包轴向的测点布置

Fig. 6 The observation points along the vertical direction of the cylindrical charge

由此可见, 由于短柱单元的相位延迟效应, 延长药包的爆破振动场沿轴向并非均匀分布。

为了比较不同起爆位置爆破振动峰值的差异, 定义差异率:

$$\eta = \frac{v_{pp,A} - v_{pp,B}}{v_{pp,B}} \quad (16)$$

式中: $v_{pp,A}$ 和 $v_{pp,B}$ 分别为底部起爆和上部起爆时的质点峰值振速, 可由轴向和径向的振动速度得到。图 8 为不同起爆位置的 v_{pp} 以及相应的 η 的变化曲线, 其中底部起爆和上部起爆的 η 为 8%~13%, 并随着 d_s 的增大逐渐消减, 表明起爆位置对爆破振动场分布的影响限于一定的距离范围。

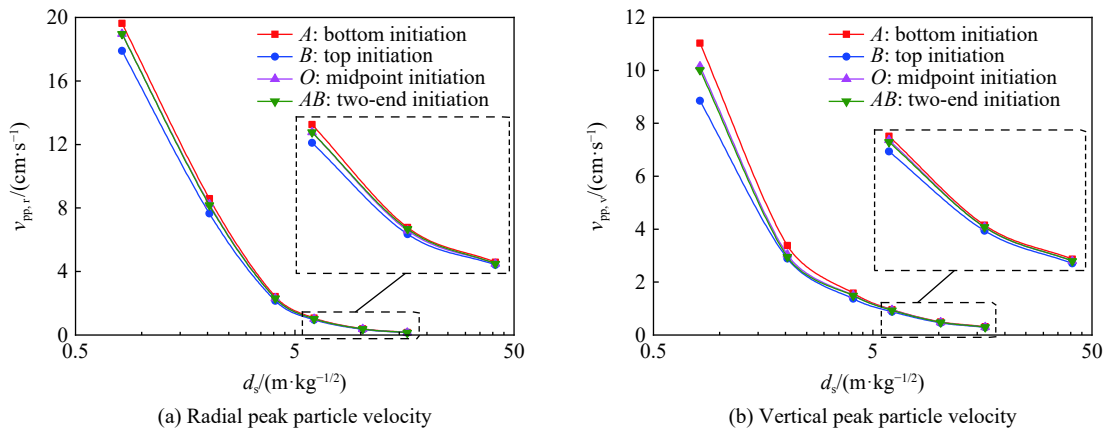


图 7 质点峰值振速随比例距离的变化

Fig. 7 Peak particle velocities of the cylindrical charge varying with scaled distances

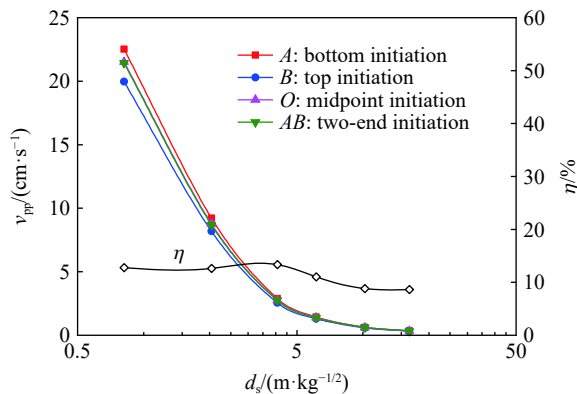


图 8 沿轴向分布测点的质点峰值振速及差异率

Fig. 8 Peak particle velocities of measuring points along vertical direction and their difference ratios

2.2.2 测点沿药包径向分布的质点峰值振速

药包径向的测点布置如图 9 所示, 图 10 为药包径向各测点的质点峰值振速 v_{pp} 随比例距离 d_s 的变化曲线。由图 10 可知, 对于药包径向各测点, 底部起爆下的峰值振速大于上部起爆, 该趋势与药包轴向布置测点时类似。然而, 随径向距离的增大, 中点起爆及两端起爆情况下的峰值振速会略微超过底部起

爆, 这是因为药包中点和两端起爆时, 爆轰波从中点或两端同时向上下两个方向传播, 即存在上下两个方向单元药包的振动叠加。此外, 药包径向各测点的峰值振速并非随距离严格衰减, 可能由短柱药包的特定辐射模式引起 (见图 4), 但其影响仅限于局部的测点, 爆破振动峰值整体衰减的趋势并未受影响。图 11 为不同起爆位置的 v_{pp} 以及相应的 η 的变化曲线, 其中 η 也随 d_s 增大而递减, 当 d_s 超过 $7 \text{ m/kg}^{1/2}$ ($r \approx 30 \text{ m}$) 时, η 趋于零。

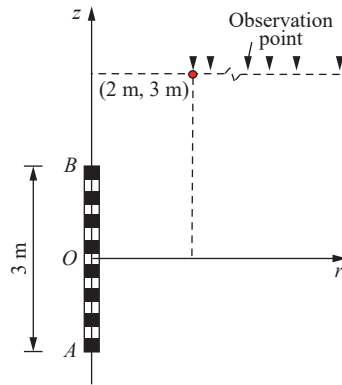


图 9 药包径向的测点布置

Fig. 9 The observation points along the radial direction of the cylindrical charge

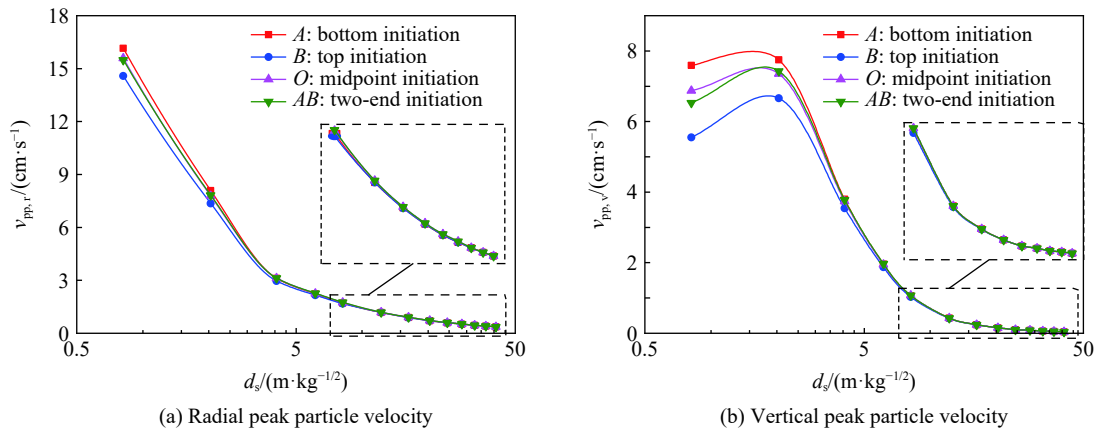


图 10 质点峰值振速随比例距离的变化

Fig. 10 Peak particle velocities of the cylindrical charge varying with scaled distances

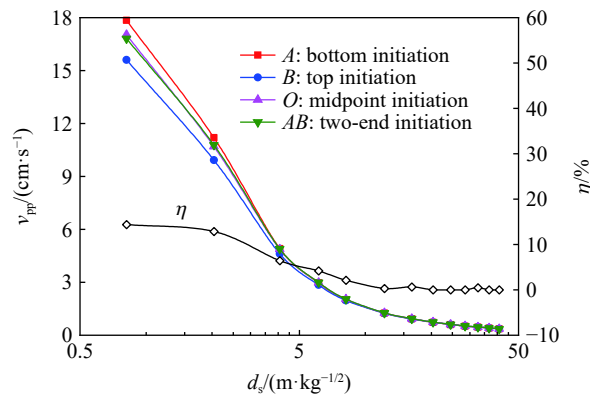


图 11 沿径向分布测点的质点峰值振速及差异率

Fig. 11 Peak particle velocities of measuring points along radial direction and their difference ratios

2.3 装药参数的敏感性

由前面可知, 导致延长药包爆破振动场分布不均匀性的内在原因在于药包的几何特性和爆轰速度的有限性, 因此本节着重分析药包长度 L 和爆轰速度 D 对质点峰值振速差异率 η 的影响。如图 12 所示, 计算结果表明, 差异率 η 随药包长度增大而递增, 随爆轰速度增大而递减, 即药包的几何特性及炸药的自身属性对爆破振动场分布的影响不容忽视。有限的爆轰速度与较大的装药长径比均会放大起爆位置对爆破振动场分布的影响效果, 所以在工程实际中应综合考量爆破破岩效果与振动控制的要求, 以选择合理的装药结构及炸药类型。

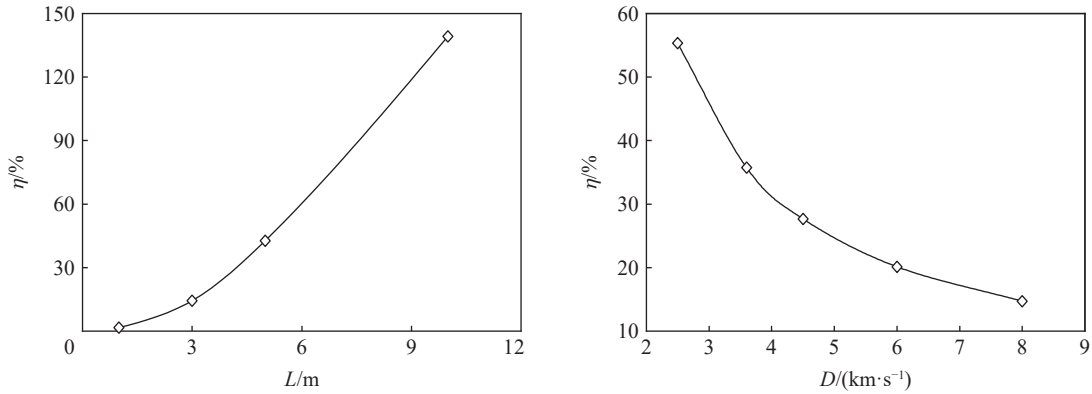


图 12 装药参数对质点峰值振速差异率的影响

Fig. 12 Influences of explosive parameters on difference ratios of peak particle velocities

3 现场爆破实验

3.1 丰宁抽水蓄能电站

3.1.1 爆破设计

丰宁抽水蓄能电站位于河北省丰宁满族自治县境内, 电站规划装机容量 3 600 MW, 分两期开发建设。一期、二期地下厂房均位于水道系统中部, 上覆山体厚度约 300 m, 岩性为微风化中粗粒花岗岩, 围岩类别以 III 类为主。为进一步验证孔内起爆位置对爆破振动场分布的影响作用规律, 在电站二期工程建设中某条探洞的底板开展了单孔爆破实验。如图 13 所示, 在探洞底板共布置 6 个垂直炮孔, 按炮孔深度及起爆位置的不同, 可将其整合分为 3 组对比实验。各孔均不耦合装药, 不耦合系数 1.52, 炸药选用 2 号岩石乳化炸药, 堵塞材料为钻孔岩屑, 钻孔装药参数见表 1, 装药结构如图 14 所示。孔间均采用半秒延期雷管间隔, 按炮孔 I → II → III → IV → V → VI 的顺序逐孔起爆, 并由近及远在探洞底板布置了 10 个爆破振动测点, 振动速度由 TC-4850 爆破测振仪记录。

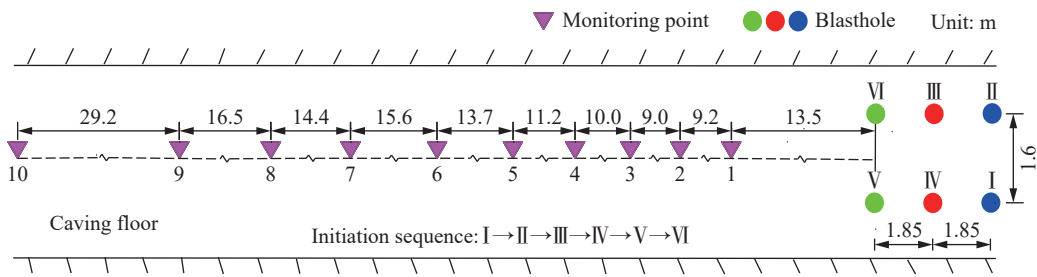


图 13 炮孔和振动测点的布置

Fig. 13 Layout of blast holes and vibration monitoring points

表 1 钻孔爆破参数

Table 1 Drilling and blasting parameters

对比组	炮孔	起爆方式	孔径/mm	孔深/m	药径/mm	装药量/kg	装药长度/m	堵塞段长度/m
1	I	两端起爆	76	8.0	50	12.0	6.0	2.0
	II	底部起爆						
2	III	中点起爆	76	6.0	50	8.4	4.0	2.0
	IV	底部起爆						
3	V	中点起爆	76	4.5	50	5.4	2.7	1.8
	VI	底部起爆						

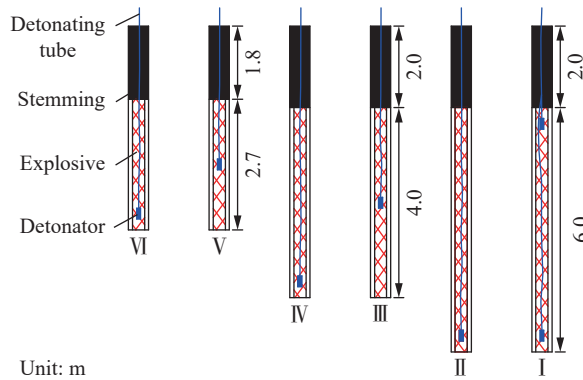


图 14 装药结构

Fig. 14 Charging structures

3.1.2 实验结果

图 15 为实测的典型爆破振动速度曲线, 包括 6 段独立的信号, 且在时间轴上未见相互叠加, 分别代表炮孔 I ~ VI 诱发的爆破振动。为满足控制单一变量原则、便于分析, 对多次测量结果做归一化处理, 拟合 v_{pp} 随比例距离 d_s 的变化曲线(见图 16):

$$v_{pp} = K d_s^{-\alpha} \quad (17)$$

式中: K 和 α 是与现场地质条件相关的衰减因子。

此外, 为了表征起爆位置对爆破振动场分布的影响效果, 也分别定义了底部起爆与上部起爆、底部起爆与中点起爆的质点峰值振速差异率:

$$\eta_1 = \frac{v_{pp,b} - v_{pp,t}}{v_{pp,t}} \quad (18)$$

$$\eta_2 = \frac{v_{pp,b} - v_{pp,m}}{v_{pp,m}} \quad (19)$$

式中: $v_{pp,b}$ 、 $v_{pp,t}$ 和 $v_{pp,m}$ 分别为底部起爆、上部起爆和中点起爆时的 v_{pp} 。图 17 为不同对照组中质点峰值振速差异率随比例距离的拟合曲线, $v_{pp,r}$ 、 $v_{pp,t}$ 、 $v_{pp,v}$ 和 v_{pp} 分别为径向、切向、垂向和总的质点峰值振速。

需要说明的是, 尽管炮孔 I 中布置了上下两发雷管, 但因半秒雷管的延时误差较大, 并不能真正实现

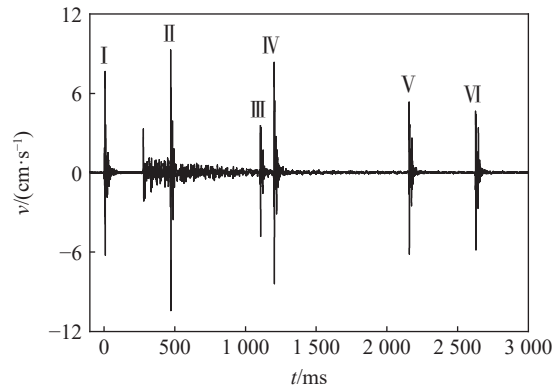


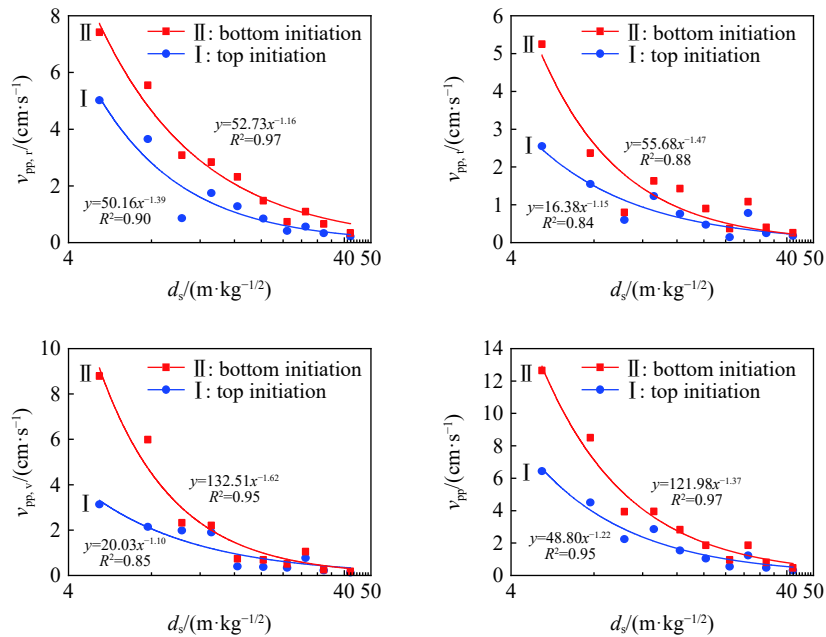
图 15 典型的爆破振动速度曲线

Fig. 15 Typical blast vibration velocity curves

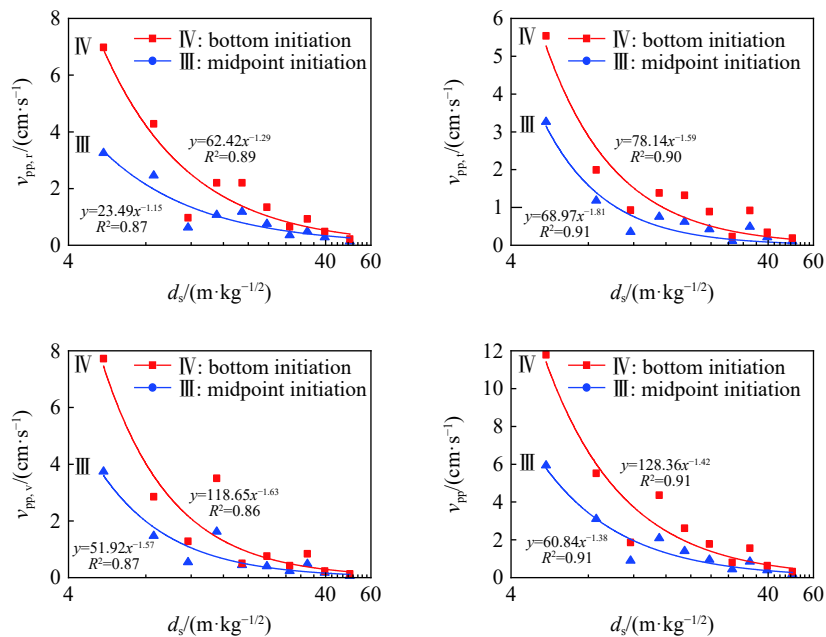
两点同时起爆, 且结合前面及实测数据分析, 炮孔 I 内的炸药实际上应由上部的 1 发雷管引爆, 因此此处的分析将炮孔 I 视为上部起爆孔, 图 16 也标明炮孔 I 为上部起爆。进一步分析图 16~17, 可以得出如下。

(1) 炮孔 I 和 II。由图 16(a)、图 17(a) 可知, 底部起爆孔诱发的地表爆破振动峰值拟合曲线高于上部起爆孔, 二者之间的差异率可达 95% 以上。这是因为, 地表测点位于底部, 起爆时爆轰波传播的正向, 位于上部起爆时爆轰波传播的负向。

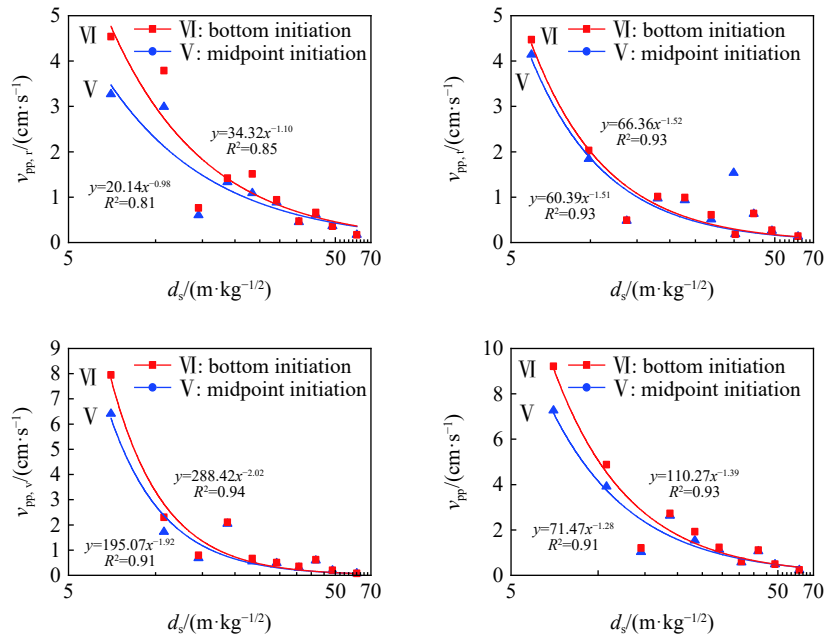
(2) 炮孔 III 和 IV、炮孔 V 和 VI。由图 16(b)~(c)、图 17(b)~(c) 可知, 底部起爆孔诱发的地表爆破振动峰值拟合曲线高于中点起爆孔, 二者之间的差异率可达 110% 以上。两个对比的工况类似, 区别仅在于炮孔深度和装药长度。但比较图 17(b)、(c), 可以发现, 前者的差异率明显大于后者。这可归因于后者的炮孔更深且药包更长, 这进一步印证了装药长度对爆破振动场分布不均匀性的影响效果。



(a) Blastholes I and II



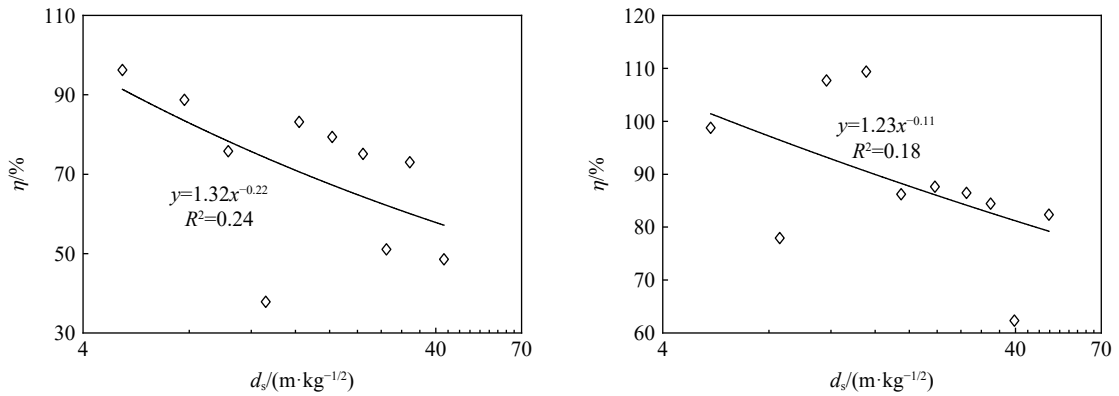
(b) Blastholes III and IV



(c) Blastholes V and VI

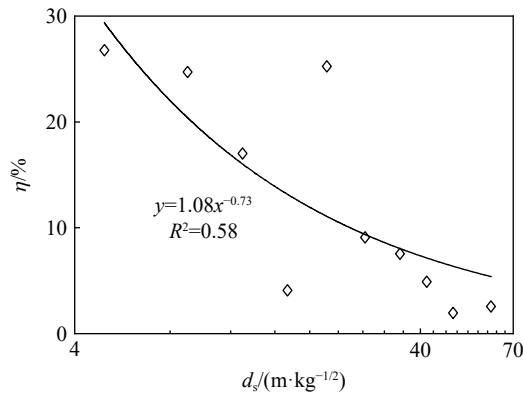
图 16 质点峰值振速随比例距离的变化及其拟合曲线

Fig. 16 Peak particle velocities varying with scaled distances and their fitting curves



(a) Blastholes I and II

(b) Blastholes III and IV



(c) Blastholes V and VI

图 17 质点峰值振速差异率随比例距离的变化及其拟合曲线

Fig. 17 Difference ratios of peak particle velocities varying with scaled distances and their fitting curves

3.2 舟山石化基地

3.2.1 爆破设计

舟山绿色石化基地项目拟以大鱼山为核心, 围垦陆域 41 平方公里, 是一个超大型的炼化一体化绿色石化基地。该石化基地的场坪工程面临大量的土石方爆破开挖, 结合某次生产爆破也开展了一次爆破实验。如图 18 所示, 爆破共包含 7 排 129 个主爆孔, 均在同一起爆网络中起爆, 孔间采用 MS3 雷管(50 ms)间隔, 排间采用 MS5 雷管(110 ms)间隔。炮孔采用不耦合装药, 不耦合系数为 1.28, 孔内炸药选用 2 号岩石乳化炸药, 均由 MS10 雷管(380 ms)引爆, 堵塞材料为钻孔岩屑, 钻孔装药参数见表 2。为进一步验证研究起爆位置的影响效果, 采用 MS9 雷管(310 ms)从起爆网络中分离出最后两个单孔 S1 和 S2, 并在爆区左侧布置了 5 个爆破振动监测点。炮孔 S1 和 S2 的装药结构如图 19 所示, 其中 S1 上部起爆, S2 底部起爆, 测点到炮孔 S1 和 S2 的距离为 26.0~86.4 m。

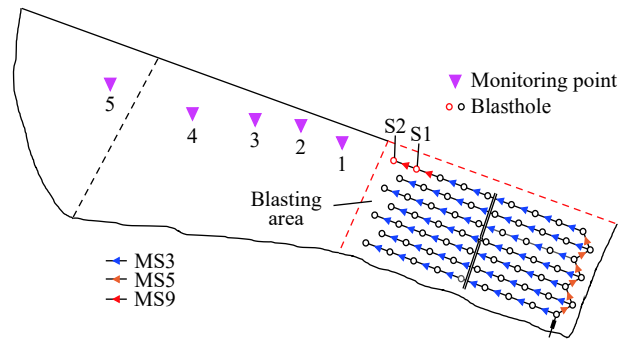


图 18 炮孔和振动测点的布置
Fig. 18 Layout of blastholes and vibration monitoring points

为进一步验证研究起爆位置的影响效果, 采用 MS9 雷管(310 ms)从起爆网络中分离出最后两个单孔 S1 和 S2, 并在爆区左侧布置了 5 个爆破振动监测点。炮孔 S1 和 S2 的装药结构如图 19 所示, 其中 S1 上部起爆, S2 底部起爆, 测点到炮孔 S1 和 S2 的距离为 26.0~86.4 m。

表 2 钻孔爆破参数

Table 2 Drilling and blasting parameters

炮孔	炮孔直径/mm	炮孔深度/m	孔距/m	药包直径/mm	装药量/kg	堵塞段长度/m
主爆孔	115	9.3~14.9	5.0~6.0	90	48~84	4.5~5.5
单孔S1/S2	115	15.0	—	90	72	5.0

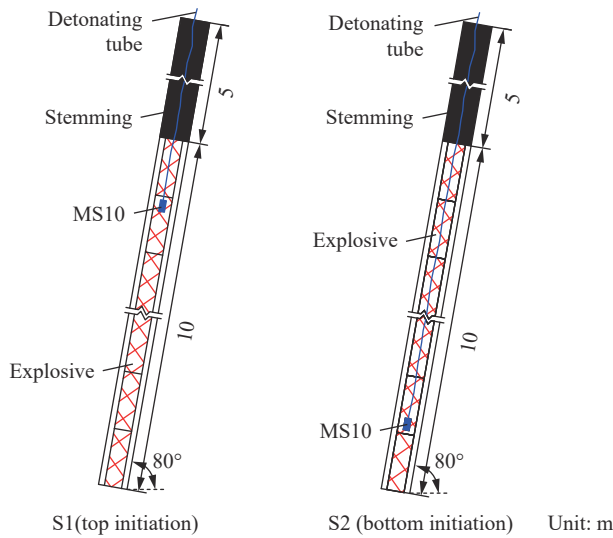


图 19 装药结构

Fig. 19 Charging structures

3.2.2 实验结果

如图 20 所示, 生产爆破孔诱发了振动相互重叠, 但分离出的单孔 S1 和 S2 诱发的爆破振动在时间轴上完全分开。图 21 为按式 (17) 拟合得到的质点峰值振速随比例距离的变化曲线, 其中 v_{pp} 是水平径向 $v_{pp,r}$ 、水平切向 $v_{pp,t}$ 和垂直向 $v_{pp,v}$ 的合成, 图 22 为对应的差异率拟合曲线。底部起爆孔(S2)诱发的爆破振动峰值拟合曲线明显高于上部起爆孔(S1), 且二者之间的差异率可达 210% 以上, 但差异率 η 随 d_s 增大逐渐消减, 也说明起爆位置对爆破振动场分布的影响限于一定范围, 若测点足够远时, 起爆位置影响可忽略不计。

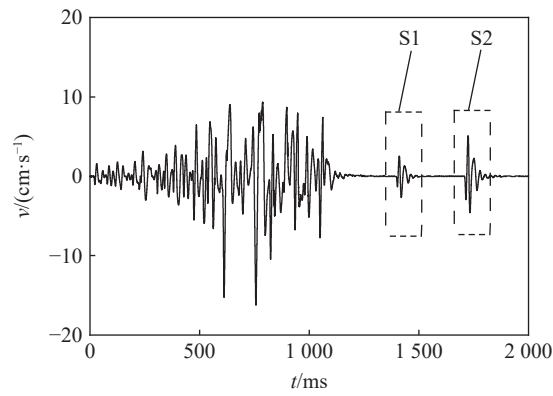


图 20 单孔 S1 和 S2 的典型爆破振动速度曲线

Fig. 20 Typical blast vibration velocity curves in single blastholes S1 and S2

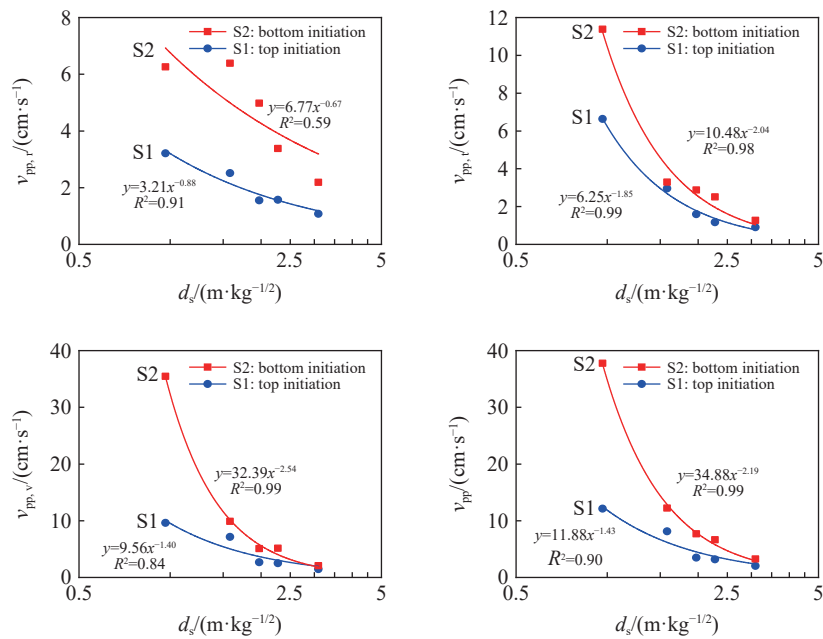


图 21 单孔 S1 和 S2 的质点峰值振速随比例距离的变化及其拟合曲线

Fig. 21 Peak particle velocities varying with scaled distances and their fitting curves in single blastholes S1 and S2

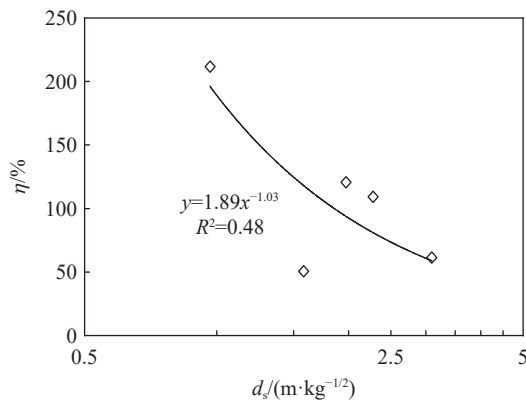


图 22 单孔 S1 和 S2 的质点峰值振速差异率随比例距离的变化及其拟合曲线

Fig. 22 Difference ratios of peak particle velocities varying with scaled distances and their fitting curves in single blastholes S1 and S2

3.3 讨论

理论分析表明, 柱状药包的爆炸能量会优先分配至爆轰波传播的正向, 这可解释为柱状药包爆炸能量的轴向不均匀分配效应; 数值计算结果显示, 柱状药包的爆破振动场也并非均匀分布, 而是沿爆轰波传播的正向叠加增强, 且爆破振动场的不均匀性受药包长度和炸药爆轰速度的调控, 这可解释为柱状药包爆破振动场叠加的相位延迟效应。通过对比现场实验与数值计算中的质点峰值振速差异率, 可以发现, 现场实验(见图 17、22)显著大于数值计算(见图 8、11), 说明能量分配效应与相位延迟效应并非单独作用, 二者共同影响柱状药包爆破振动场的分布。另外, 对比见图 17、22 可知, 因不同起爆位置产生的爆破振动差异性随炮孔深度增加而增大, 但振动差异均会随距离逐渐消减, 即起爆位置对爆破振动场分布的影响限于一定距离范围, 这也符合圣维南原理。

4 结 论

为了探明孔内起爆位置对爆破振动场分布的影响规律, 分别从理论分析、数值计算及现场实验 3 个方面开展了研究, 主要得出以下结论。

(1) 孔内起爆位置的影响机理源于柱状药包的几何特性(长径比)和炸药的自身属性(有限爆轰速度), 进一步可解释为柱状药包爆炸能量的轴向不均匀分配和爆破振动场叠加的相位延迟效应。

(2) 理论分析和数值计算结果表明, 爆炸能量优先分配至爆轰波传播的正向, 爆破振动在爆轰波传播的正向叠加增强; 现场实验结果显示, 底部起爆时的地表爆破振动峰值普遍高于上部起爆和中点起爆, 且爆破振动差异性随炮孔深度的增加而增大, 但振动差异均会随距离逐渐消减。

(3) 爆破振动场分布的不均匀性对装药参数较敏感, 主要受药包长度 L 和爆轰速度 D 的调控。

诚然, 起爆位置的影响不仅限于爆破振动场的分布, 后续的研究中还需结合爆破破碎效果、爆破损伤演化等的综合考虑, 进一步优化装药结构或起爆位置。

参考文献:

- [1] 冷振东, 卢文波, 范勇, 等. 侧向起爆条件下的爆炸能量分布及其对破岩效果的影响 [J]. *爆炸与冲击*, 2007, 37(4): 661–669. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0661-09.
LENG Z D, LU W B, FAN Y, et al. Explosion energy distribution by side initiation and its effects on rock fragmentation [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2007, 37(4): 661–669. DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0661-09.
- [2] 李鹏毅, 王仲琦, 徐谦, 等. 有限长柱形药包土中爆腔特征尺寸的计算方法 [J]. *爆炸与冲击*, 2019, 39(12): 124201. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0416.
LI P Y, WANG Z Q, XU Q, et al. Calculation methods for characteristic sizes of blasting cavities induced by finite-length cylindrical charges in soil [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2019, 39(12): 124201. DOI: 10.11883/bzycj-2018-0416.
- [3] 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.
- [4] KNOCK C, DAVIES N. Blast waves from cylindrical charges [J]. *Shock Waves*, 2013, 23(4): 337–343. DOI: 10.1007/s00193-013-0438-7.
- [5] ONEDERRA I A, FURTNEY J K, SELLERS E, et al. Modelling blast induced damage from a fully coupled explosive charge [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2013, 58: 73–84. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2012.10.004.
- [6] LIU L, CHEN M, LU W B, et al. Effect of the location of the detonation initiation point for bench blasting [J]. *Shock and Vibration*, 2015(6–7): 1–11. DOI: 10.1155/2015/907310.
- [7] 冷振东, 范勇, 卢文波, 等. 孔内双点起爆条件下的爆炸能量传输与破岩效果分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2019, 38(12): 2451–2462. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0474.
LENG Z D, FAN Y, LU W B, et al. Explosion energy transmission and rock-breaking effect of in-hole dual initiation [J].

- Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2019, 38(12): 2451–2462. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2019.0474.
- [8] 向文飞, 舒大强, 朱传云. 起爆方式对条形药包爆炸应力场的影响分析 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2005, 24(9): 1624–1628. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.09.026.
- XIANG W F, SHU D Q, ZHU C Y. Impacts of detonating mode on blast stress field of linear explosive charge [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2005, 24(9): 1624–1628. DOI: 10.3321/j.issn:1000-6915.2005.09.026.
- [9] 杨仁树, 郭洋, 李清, 等. 中间起爆柱状药包爆炸应力应变场演化规律 [J]. *煤炭学报*, 2019, 44(11): 3423–3431. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.1673.
- YANG R S, GUO Y, LI Q, et al. Evolution law on explosive stress and strain field of column charges at middle detonation position [J]. *Journal of China Coal Society*, 2019, 44(11): 3423–3431. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2018.1673.
- [10] 高启栋, 卢文波, 冷振东, 等. 隧洞开挖过程中掏槽孔起爆位置的优选 [J]. *振动与冲击*, 2018, 37(9): 8–16. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.09.002.
- GAO Q D, LU W B, LENG Z D, et al. Optimization of cut-hole's detonating position in tunnel excavation [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2018, 37(9): 8–16. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2018.09.002.
- [11] 郭洋, 李清, 杨仁树, 等. 三维模型柱状药包爆生裂纹扩展规律研究 [J]. *振动与冲击*, 2020, 39(10): 133–140, 184. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.10.018.
- GUO Y, LI Q, YANG R S, et al. Study on crack propagation law of cylindrical charges in three-dimensional models [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2020, 39(10): 133–140, 184. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2020.10.018.
- [12] 吴超, 周传波, 路世伟, 等. 柱状装药不同起爆方式的数值模拟研究 [J]. *爆破*, 2016, 33(2): 74–77, 91. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2016.02.014.
- WU C, ZHOU C B, LU S W, et al. Numerical simulation on cylindrical charged explosives with different initiation [J]. *Blasting*, 2016, 33(2): 74–77, 91. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2016.02.014.
- [13] 张宝钺, 张庆明, 黄风雷. 爆轰物理学 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 2001: 271–274.
- [14] FAVREAU R F. Generation of strain waves in rock by an explosion in a spherical cavity [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1969, 74(17): 4267–4280. DOI: 10.1029/JB074i017p04267.
- [15] BLAIR D. Seismic radiation from an explosive column [J]. *Geophysics*, 2010, 75(1): E55–E65. DOI: 10.1190/1.3294860.
- [16] LIU K W, LI X H, LI X B, et al. Characteristics and mechanisms of strain waves generated in rock by cylindrical explosive charges [J]. *Journal of Central South University*, 2016, 23(11): 2951–2957. DOI: 10.1007/s11771-016-3359-7.
- [17] HEELAN P A. Radiation from a cylindrical source of finite length [J]. *Geophysics*, 1953, 18(3): 685–696. DOI: 10.1190/1.1437923.
- [18] LARSON D B. Explosive energy coupling in geologic materials [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 1982, 19(4): 157–166. DOI: 10.1016/0148-9062(82)90886-5.
- [19] GRADY D E, KIPP M E, SMITH C S. Explosive fracture studies on oil shale [J]. *Society of Petroleum Engineers Journal*, 1980, 20(5): 349–356. DOI: 10.2118/8215-PA.

(责任编辑 丁峰)