

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2024.04.003

不同装药结构下混凝土中炮孔轴向、 径向爆炸应力波的衰减规律研究*

郭志东¹, 李光¹, 祝贺超¹, 胡世超¹, 左进京², 游帅³

(1. 鞍钢基石矿业有限公司, 鞍山 114047; 2. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083;
3. 中国矿业大学(北京) 力学与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 为了探索不同装药结构下混凝土中爆破应力波的衰减规律, 基于相似理论, 开展了混凝土中不同装药结构的模型试验, 采用16通道动态应变仪, 采集了混凝土中炮孔轴向和径向不同位置处的应变值, 并通过计算得到了各处的峰值应力, 进而获得了不同装药结构下混凝土中炮孔轴向、径向爆炸应力波的衰减规律。结果表明: 随爆心距的增加, 爆破应力波呈现幂指数衰减; 耦合装药结构炮孔壁受到的初压及最高压最大, 爆轰波作用于介质时间较短, 不耦合装药结构降低了孔壁初压, 延长了爆轰压力作用时间; 耦合装药结构在破碎区消耗大量能量, 能量传递不均匀, 不耦合装药结构爆破应力波衰减的较慢, 能量传递均匀。

关键词: 模型试验; 混凝土; 不同装药结构; 爆破应力波; 应变

中图分类号: O382 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2024)04-0018-07

Study on Attenuation Law of Axial and Radial Explosion Stress Wave with Different Charge Structures in Concrete

GUO Zhi-dong¹, LI Guang¹, ZHU He-chao¹, HU Shi-chao¹, ZUO Jin-jing², YOU Shuai³

(1. Ansteel Cornerstone Mining Corporation, Limited, Anshan 114047, China;
2. School of Civil and Resource Engineering, University of Science and Technology Beijing,
Beijing 100083, China; 2. School of Mechanics and Civil Engineering, China University of
Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: To explore the attenuation law of blasting stress waves in concrete under different charging structures, the strain values at different positions of the experimental models were tested by a 16-channel dynamic strain gauge based on similarity theory. Meanwhile, the attenuation law of axial and radial blast stress waves in concrete under different charge structures was obtained by calculating the peak stress. The results show that the blasting stress wave exhibits a power exponential decay as the distance between the blasting centers increases. The initial pressure and maximum pressure on the borehole wall of the coupled charge structure are the highest, and the detonation wave acts on the medium for a short time. The uncoupled charge structure reduces the initial pressure on the borehole wall and prolongs the time of detonation pressure action. The coupled charging structure consumes much energy in the crushing zone, and the energy transfer is uneven. The stress wave attenuation of the uncoupled charging structure during blasting is slow, and the energy transfer is uniform.

收稿日期 (Date of reception): 2024-04-01

网络首发日期 (Published online): 2024-09-15

作者简介: 郭志东 (1971-), 男, 硕士、高级工程师, 从事爆破工程方面的研究, (E-mail) gzdagky@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金 (52208384)

About the author: GUO Zhi-dong (1971-), male, master degree, senior engineer, engaged in blasting engineering research, (E-mail) gzdagky@163.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52208384)

Key words: model experiments; concrete; different charge structures; bursting stress waves; strain

目前,混凝土被广泛用于各类建(构)筑物,在对混凝土进行抗爆设计及损伤评价时,需要关注爆破动荷载作用下的应力波传播规律,而因为混凝土在爆炸近区动荷载的高幅值和瞬时性,其呈现强非线性及高应变率,使得收集和分析混凝土的爆破应力波传播规律有巨大困难^[1-4]。Nian 等通过混凝土靶体爆破试验^[5,6],得到了不同距离的爆破应力波变化曲线。Mu 通过现场试验发现在不同埋深状态下^[7],混凝土爆破应力波随距离的变化规律。Tu 等基于立方根缩放的现场试验^[8-10],研究了爆破动荷载对爆破近区混凝土的影响。王海露等对混凝土靶体内动态力学参数测试进行了探索^[11],收集了动态应力波数据。章征林通过 FBG 传感技术测量了爆破作用对混凝土外表面的应变变化曲线^[12]。黄家蓉通过数值模拟和现场试验发现了混凝土中条形药包爆破动态应力波的传播规律^[13]。

此外,国内外众多学者通过数值模拟研究了混凝土中爆破应力波的变化规律^[14-18]。侯福金通过数值模拟研究了爆破荷载作用下中隔壁支护结构的动力响应^[19],发现在爆破应力波对中隔壁支护结构中心、顶部和底部响应最强烈。赵凯模拟了球形药包爆破应力波在混凝土中的传播规律^[20],阐明了装药形状对爆破应力波传播的影响。董永香用过 LS-DYNA 模拟了平面爆炸波在混凝土中的传播过程^[21],发现应力波与介质损伤变化有内在联系。郝海明利用 LS-DYNA 研究了应力波在不同养护龄期混凝土中的传播及其破坏过程^[22]。

不同装药结构对爆破效果的影响也不同,如耦合装药在震动远区能量最大,不耦合装药可以降低爆破远区地震波产生的震动速度。目前对混凝土中不同装药结构爆破应力波的衰减规律鲜有人研究,本文基于波动理论、量纲分析理论以及相似理论,以模型试验为基础,研究不同装药结构下混凝土中炮孔轴向、径向爆炸应力波的衰减规律。

1 试验设计

装药结构是爆破设计的重要参数,对爆破效果有显著影响。本文拟通过相似模型试验分析研究不同装药结构的爆破应力波衰减特征,设计四种装药结构(耦合连续装药结构、耦合不连续装药结构、不耦合连续装药结构、不耦合不连续装药结构),每种装药结构制作 3 个混凝土模型。通过在模型试件内放置应变砖,采用专用屏蔽线与 NUXI-1004 集成式

16 通道动态应变测试仪连接,采集不同装药结构药包起爆后混凝土不同位置处的峰值应变,根据混凝土力学参数得到不同位置的应力值,分析不同装药结构的爆破应力波衰减规律。

基于相似理论,设计试验模型试件强度为 50MPa。设计模型整体尺寸为 800 mm × 800 mm × 500 mm,炮孔半径为 5 mm(炮孔的半径相对于模型整体尺寸比值在 100 以上),炮孔深度为 200 mm。此时,可把模型近似为一个无限体,即力的传递是向药包各个方向的,各方的边界也是无穷远的,每个模型炸药用量均为 5 g 黑索金,不同点在于每个模型的药包装药结构不一致。

2 制作模型

在浇筑试验模型之前,先将应变片贴在与混凝土模型配比相同的应变砖上,每个试验模型有 4 块应变砖,如下图 1 所示,每块应变砖上有 4 个测点,即每个试验模型有 16 个测点,应变砖的尺寸为 220 mm × 25 mm × 10 mm。应变砖的强度应与模型强度一致,避免因应变砖与试验模型强度相差较大而产生的试验误差。



图 1 应变砖

Fig. 1 Strain brick

测点位置设置在轴向距离炮孔 4 cm、8 cm、12 cm、16 cm 位置处自炮孔底部到孔口自由面 5 cm、10 cm、15 cm 及 20 cm 的位置,本次试验模型如图 2 所示,一共 16 个测点。

本次爆破试验所用的炸药为黑索金,每个试件模型装药 5 g。采用耦合连续装药结构时,直接将称量完毕的炸药倒入炮孔内,用炮泥填塞即可;采用耦合不连续装药结构时,先在炮孔内倒入 2.5 g 黑索金,然后用木垫分隔,再次放入剩余 2.5 g 的炸药,用炮泥填塞完毕;采用不耦合连续装药结构时,为约束炸药使其不与炮孔壁接触,将炸药装入直径为

5 mm 的吸管内,不耦合系数为 2,用炮泥填塞;采用不耦合不连续装药结构时,将炸药装在直径为 5 mm

的吸管内,不耦合系数为 2,把药柱分成两段,中间用木垫分开,并用炮泥填塞。

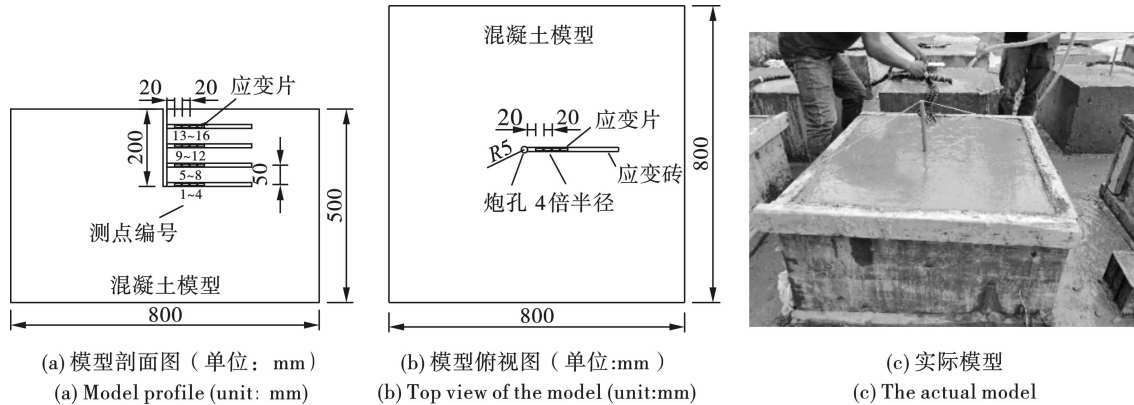


图 2 模型示意图
Fig. 2 model diagram

待准备工作完毕,用烙铁把模型预留屏蔽线按标记与动态应变仪各通道外接线焊接在一起,并用绝缘胶带将焊接处包缠以防止干扰。然后将按不同装药结构制作的炸药放入预留炮孔,并保证炸药放置于炮孔底部,放入 100 mg 叠氮化铅作为起爆药,用脚线引出,用炮泥将炮孔填塞。炮孔堵塞完毕后,打开动态应变仪,调节动态应变仪参数,将脚线与起爆器连接,为起爆器充电后起爆,爆破现场如图 3 所示。



图 3 爆破现场示意图
Fig. 3 Schematic diagram of the blasting site

3 试验结果与分析

为了研究不同装药结构爆破时不同位置处的峰值应力变化规律,通过现场实验,浇筑了 800 mm × 800 mm × 500 mm 的混凝土模型,开展了耦合连续、耦合不连续、不耦合连续和不耦合不连续 4 种装药结构爆破实验,每组实验进行开展 3 次试验,保证实验的可重复性,每组实验装药量一致,均为 5 g 黑索金,不耦合装药的不耦合系数为 2,具体参数如上节所示。

首先通过动态应变仪测得不同装药结构下不同测点应变随时间的时程曲线,然后根据所测应变时

程曲线的峰值应变,计算得到相应的爆破应力波峰值应力,计算公式如式(1),分析研究不同装药结构下爆破应力波的衰减规律。

$$\sigma_r = E \times \varepsilon_r \quad (1)$$

式中: σ_r 为冲击波峰值应力,MPa; E 为混凝土弹性模量; ε_r 为混凝土内部峰值应变, $\mu\varepsilon$ 。

3.1 炮孔底部爆破应力波的衰减规律

采用动态应变仪,测得不同装药结构下炮孔底部径向不同位置的应变时程曲线(限于篇幅不再列出),得到相应的峰值应变,如表 1 所示。

根据表 1 中不同测点处的峰值应变,采用公式(1)求得混凝土内部不同位置的峰值应力,得到炮孔底部径向不同半径处不同装药结构的峰值应力曲线,如图 4 所示。

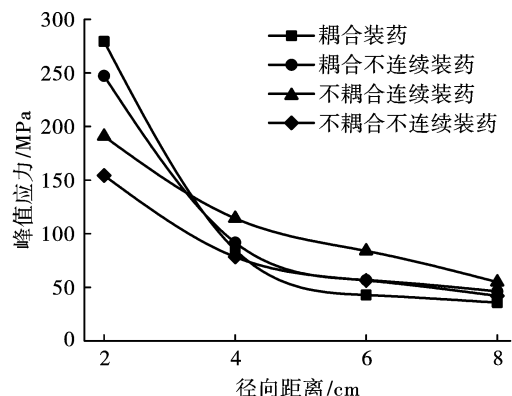


图 4 不同装药结构炮孔底部径向不同半径峰值应力变化曲线

Fig. 4 Variation curves of peak stress in different radial distances at the bottom of gun holes with different charging structures

从图 4 可以看出,测点距离炮孔越远,其峰值应力就越小,但是不同装药结构其变化规律也不尽相

同,从图中可以看出,四种装药结构的峰值应力可以近似看作幂函数衰减,从图中可以看到耦合连续装药结构初始应力峰值最大,但是在炮孔底部位置其峰值应力衰减的最快,在径向距离炮孔 8 cm 处,耦合连续装药结构的峰值应力最小,同时可以计算出不同装药结构的衰减系数,在炮孔底部处耦合装药连续结构的峰值应力衰减速率为 0.87,耦合不连续装药结构的为 0.81,不耦合连续装药结构的为 0.71,不耦合不连续装药结构的为 0.72,可知道不

耦合连续装药结构衰减的最慢,耦合连续装药结构衰减得快。炮孔底部径向不同半径处耦合装药结构的初始峰值应力值均比同等情况下不耦合装药结构的峰值应力值大,但是衰减速度大于不耦合装药结构,根据该数据可以得到,在相同药量的爆破工程中,炮孔底部耦合连续装药结构的爆破初始应力值最大,但其衰减的速度最快,不耦合不连续的初始峰值应力最小,不耦合连续装药的应力波衰减得最缓慢。

表 1 不同装药结构下炮孔底部径向不同位置峰值应变

Table 1 Peak strain at different radial positions at the bottom of the hole under different charging structures

装药结构	炮孔底部径向不同位置的峰值应变/ $\mu\epsilon$								
	2 cm	均值	4 cm	均值	6 cm	均值	8 cm	均值	
耦合装药	①	8234.875		2670.008		1303.338		1071.398	
	②	7941.914	8092.911	2367.789	2462.567	1146.499	1242.137	946.499	1032.786
	③	8101.945		2349.904		1276.574		1080.460	
耦合不连续装药	①	7188.853		2828.685		1641.205		1327.230	
	②	7114.260	7164.062	2800.830	2658.741	1650.579	1645.884	1345.049	1339.729
	③	7189.073		2346.709		1645.868		1346.908	
不耦合连续装药	①	4953.539		3381.274		2525.967		1603.438	
	②	6705.420	5532.865	3209.555	3312.513	2331.204	2430.088	1579.398	1590.646
	③	4939.637		3346.709		2433.092		1589.101	
不耦合不连续装药	①	4477.689		2267.368		1667.368	1634.820	1231.683	
	②	4481.205	4472.812	2257.620	2268.153	1657.620		1211.711	1216.742
	③	4459.543		2279.471		1579.471		1206.832	

3.2 轴向距炮孔底部 5 cm 爆破应力波衰减规律
采用动态应变仪,测得不同装药结构下轴向距

离炮孔底部 5 cm,径向不同位置的应变时程曲线,得到相应的峰值应变,如表 2 所示。

表 2 不同装药结构下轴向距炮孔底部 5 cm 径向不同位置的峰值应变

Table 2 Peak strain at different radial positions at 5 cm from the bottom of the gun hole under different charging structures

装药结构	轴向距炮孔底部 5 cm 径向不同位置的峰值应变/ $\mu\epsilon$								
	2 cm	均值	4 cm	均值	6 cm	均值	8 cm	均值	
耦合装药	①	9371.189		3655.085		1812.095		1361.6610	
	②	9066.056	9190.349	3420.881	3415.782	1761.091	1756.718	1178.4340	1295.480
	③	9133.801		3171.381		1696.968		1346.3440	
耦合不连续装药	①	7737.736		3911.205		1912.095		1627.5673	
	②	7711.409	7714.594	3873.723	3883.759	1861.091	1890.051	1611.2050	1608.488
	③	7694.636		3866.350		1896.968		1586.6925	
不耦合连续装药	①	5737.736		3311.205		2638.390		1715.8410	
	②	5711.409	5730.260	3360.902	3321.489	2606.134	2591.588	1691.5550	1721.422
	③	5741.636		3292.361		2530.241		1756.8690	
不耦合不连续装药	①	4975.535		2771.061		1808.159		1433.6060	
	②	4935.292	4916.821	2770.446	2768.944	1798.063	1803.105	1455.8710	1442.526
	③	4839.637		2765.326		1803.092		1438.1010	

同理可以得到不同装药结构爆破后轴向距离炮孔底部 5 cm 不同测点的应力曲线,不同装药结构峰值应力曲线如图 5。

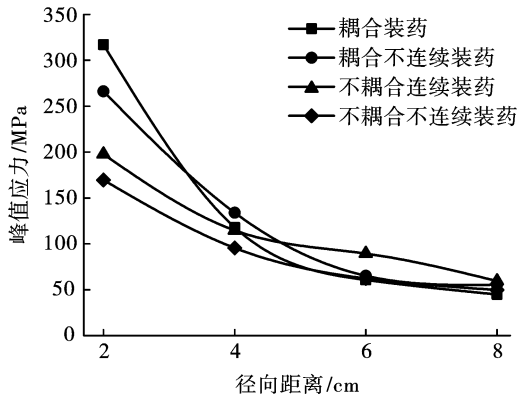


图 5 不同装药结构轴向距离炮孔底部 5 cm 峰值应力变化曲线

Fig. 5 Variation curve of peak stress at 5 cm from the bottom of the blast hole with different charging structures

从图 5 可以看出,在轴向距离炮孔底部 5 cm 处,径向距离炮孔越远,不同装药结构峰值应力就越

小,同时可以把不同装药的应力看作幂函数衰减,与炮孔底部径向距离处的测点相比,在此处,不同装药结构的初始应力峰值均比炮孔底部的初始应力峰值大,耦合连续装药结构的初始峰值应力最大,不耦合不连续装药结构的初始峰值应力小,耦合连续装药结构的衰减速率为 0.86,耦合不连续装药结构的衰减速率为 0.79,不耦合连续装药结构的衰减速率 0.70,不耦合不连续装药结构的衰减速率 0.70,不同装药结构在轴向距离炮孔底部 5 倍半径处峰值应力的衰减速率均比炮孔底部位置的峰值应力的衰减速率小,耦合连续装药结构的峰值应力衰减的最快,不耦合连续装药结构的峰值应力衰减的最慢,耦合装药结构的初始峰值应力值均比同等情况下不耦合装药结构的峰值应力大,耦合连续装药结构的初始峰值应力比耦合不连续的初始应力大,不耦合不连续装药结构的峰值应力最小。

3.3 轴向距炮孔底部 10 cm 爆破应力波衰减规律

采用动态应变仪,测得不同装药结构下轴向距离炮孔底部 10 cm,径向不同位置的应变时程曲线,得到相应的峰值应变,如表 3 所示。

表 3 不同装药结构下轴向距炮孔底部 10 cm 径向不同位置的峰值应变
Table 3 Peak strain at different radial positions at 10 cm from the bottom of the blast hole under different charging structures

装药结构	轴向距离炮孔底部 10 cm 径向不同位置的峰值应变/ $\mu\epsilon$								
	2 cm	均值	4 cm	均值	6 cm	均值	8 cm	均值	
耦合装药	①	5364.708		2083.886		1108.054		930.119	
	②	5115.137	5222.371	1911.409	2020.044	1050.374	1071.512	911.205	921.620
	③	5187.269		2064.838		1056.109		923.535	
耦合不连续装药	①	4688.853		2171.061		1511.205		1227.230	
	②	4614.260	4664.062	2189.446	2188.611	1550.579	1535.884	1245.049	1239.729
	③	4689.073		2205.326		1545.868		1246.908	
不耦合连续装药	①	4113.163		2278.301		2032.167		1652.013	
	②	4262.348	4206.312	2240.249	2260.139	1923.454	2005.130	1645.049	1614.657
	③	4243.426		2261.866		2059.768		1546.908	
不耦合不连续装药	①	3777.689		1667.368		1310.742		1031.683	
	②	3771.205	3769.479	1657.620	1634.820	1314.952	1302.368	1021.711	1022.075
	③	3759.543		1579.471		1281.409		1012.832	

根据表 3 中各装药结构不同位置的峰值应变均值,计算出不同装药结构轴向距离炮孔底部 10 cm 处的峰值应力,做出不同装药结构轴向距离炮孔底部 10 cm 不同位置处的应力曲线,不同装药结构峰值应力曲线如图 6。

从图 6 可以看到,耦合连续装药结构的初始峰

值应力最大,不耦合不连续装药结构初始应力峰值最小,对比轴向距离炮孔底部 5 cm 处不同位置的初始应力,轴向距离炮孔底部 10 cm 处的初始应力较小,不过整体也呈现了幂指数下降趋势,耦合装药结构的初始应力最大,不耦合不连续装药结构的初始峰值应力最小,同时经过计算可以得到耦合连续装药

结构峰值应力衰减速率为 0.82,耦合不连续装药结构峰值应力衰减速率为 0.73,不耦合连续装药结构峰值应力衰减速率为 0.61,不耦合不连续装药结构峰值应力衰减速率为 0.72,耦合连续装药结构衰减的最快,不耦合连续衰减的最慢。耦合装药结构的初始峰值应力值均比同等情况下不耦合装药结构的峰值应力大,耦合连续装药结构的初始峰值应力比耦合不连续的初始应力大,不耦合不连续装药结构的峰值应力最小。

3.4 轴向距炮孔底部 15 cm 处爆破应力波衰减规律

采用动态应变仪,测得不同装药结构下轴向距离炮孔底部 15 cm,径向不同位置的应变时程曲线,得到相应的峰值应变,如表 4 所示。

表 4 不同装药结构下轴向距炮孔底部 15 cm 处径向不同位置的峰值应变
Table 4 Peak strain at different radial positions at 15 cm from the bottom of the blast hole under different charge structures

装药结构	轴向距炮孔底部 15 cm 径向不同位置的峰值应变/ $\mu\epsilon$								
	2 cm	均值	4 cm	均值	6 cm	均值	8 cm	均值	
耦合装药	①	1371.189		1155.085		912.095		1061.661	
	②	1366.056	1356.349	1170.881	1172.449	961.091	923.385	1078.434	1062.146
	③	1331.801		1191.381		896.968		1046.344	
耦合不连续装药	①	1237.736		1311.205		912.095		827.567	
	②	1211.409	1247.927	1373.723	1350.426	861.091	890.051	861.205	847.821
	③	1294.636		1366.350		896.968		854.693	
不耦合连续装药	①	1537.736		1611.205		1338.390		1115.841	
	②	1511.409	1530.260	1660.902	1621.489	1306.134	1324.922	1091.555	1121.422
	③	1541.636		1592.361		1330.241		1156.869	
不耦合不连续装药	①	1077.689		1053.368		810.742		931.683	
	②	1071.205	1069.479	1057.620	1030.153	814.952	802.368	921.711	922.075
	③	1059.543		979.471		781.409		912.832	

根据表 4 可以得到不同装药结构下轴向距离炮孔底部 15 cm 不同位置处的峰值应力曲线,如图 7 所示。

从图 7 可以看到,耦合连续装药结构的初始峰值应力最大,不耦合不连续装药结构初始应力峰值最小,轴向距离炮孔底部 15 cm 处应力峰值比轴向距离炮孔底部 0.5 cm 和 10 cm 处各测点的初始应力峰值要小得多,且此处应力值总体呈现下降趋势,但是变化不是很大,耦合连续装药结构峰值应力的衰减速率为 0.21,耦合不连续装药结构峰值应力的衰减速率为 0.32,不耦合连续装药结构峰值应力的衰减速率为 0.26,不耦合不连续装药结构峰值应力的衰减速率为 0.13,在轴向距离炮孔底部 15 cm

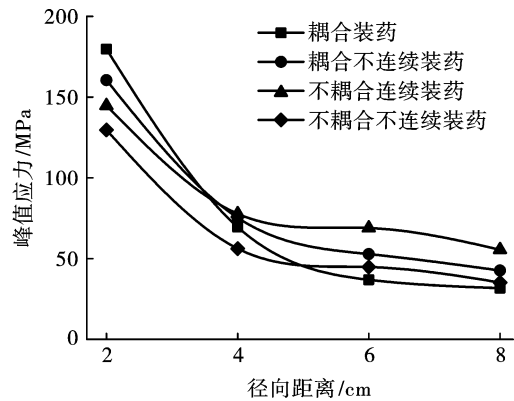


图 6 不同装药结构轴向距离炮孔底部 10 cm 峰值应力变化曲线

Fig.6 Variation curve of peak stress at the axial distance of 10 cm from the bottom of the blast hole with different charging structures

处,所有装药结构的应力变化趋势不是很规则,在该处离药包位置较远,应力波衰减到此处时能量较小,且由于比较靠近自由面,应力波反射,导致此处应力值较小,波形混乱。总的来说,距离炮孔越远,应力越小。

4 结论

(1)在径向距离炮孔 8 cm 范围内,四种装药结构的应力值都呈幂指数衰减,测点距离炮孔越远,峰值应力越小。

(2)四种装药结构在轴向距离炮孔底部 5 cm 处的测点峰值应力比其余径向距离的峰值应力大,在轴向距离炮孔底部 15 cm 处的测点处,测点峰值

应力最小,应力值呈线性变化,应力波衰减不明显。

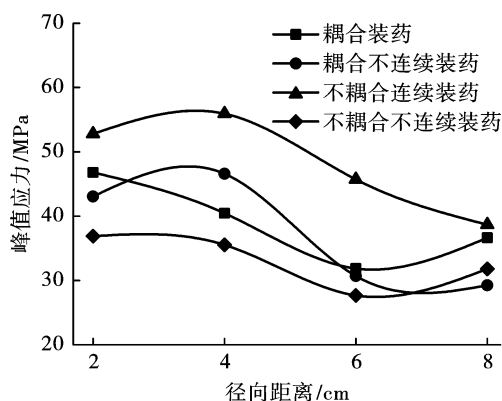


图7 不同装药结构轴向距离炮孔底部15 cm处峰值应力变化曲线

Fig. 7 Variation curve of peak stress at 15 cm from the bottom of blast hole with different charging structures

(3)耦合连续装药结构的初始应力峰值最大,炮孔壁受到的初压以及最高压最大,炮孔壁过度粉碎,炮孔压力衰减得快,爆轰波作用于混凝土的时间较短;不耦合装药结构的初始峰值应力较小,爆轰波经过压缩性较强的不耦合介质,降低了孔壁初压,避免了孔壁过度破碎,孔内压力衰减的慢,延长了爆轰压力作用时间。

(4)耦合装药结构在破碎区消耗大量能量,介质破碎区范围比同条件不耦合装药结构大,且其能量传递不均匀,不耦合装药结构应力波衰减的较慢,能量传递均匀,爆破后介质块度均匀。

参考文献 (References)

- [1] 张柱,赵慧,于晖. 混凝土材料动态力学性能实验与数值模拟研究[J]. 高压物理学报, 2011, 25(6): 533-538.
- [1] ZHANG Zhu, ZHAO Hui, YU Hui. Experiments and numerical simulations of concrete dynamic mechanical properties [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2011, 25(6): 533-538. (in Chinese)
- [2] 高 鑫,孔祥振,方 秦,等. 混凝土中爆炸应力波衰减规律的数值模拟研究[J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(12): 68-80.
- [2] GAO Chu, KONG Xiang-zhen, FANG Qin, et al. Numerical study on attenuation of stress wave in concrete subjected to explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(12): 68-80. (in Chinese)
- [3] 卢 浩,陈丹鹤,邓树新,等. 重大工程设施抗爆韧性设计的思考[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2023, 51(6): 864-873.
- [3] LU Hao, CHEN Dan-he, DENG Shu-xin, et al. Reflection on anti-explosion toughness design in major engineering facilities [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2023, 51(6): 864-873. (in Chinese)
- [4] 左进京,杨仁树,肖成龙,等. 煤矿井巷中空孔掏槽爆破模型实验研究[J]. 矿业科学学报, 2018, 3(4): 335-341.
- [4] ZUO Jin-jing, YANG Ren-shu, XIAO Cheng-long, et al. Model test of empty hole cut blasting in coal mine rock drivage [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2018, 3(4): 335-341. (in Chinese)
- [5] NIAN Wei-min, KOLLURU V L Subramaniam, YIANNIS Andreopoulos. Experimental investigation on blast response of cellular concrete [J]. International Journal of Impact Engineering, 2016(96): 105-115.
- [6] LIU S F, GENG H, KONG X, et al. Experimental study on the propagation law of explosive stress wave in cement mortar with weak layers [J]. Buildings, 2022(12): 687.
- [7] MU C M, HUI Z, MA H F. Prediction method for ground shock parameters of explosion in concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021(291): 123372.
- [8] TU H, FUNG T C, TAN K H, et al. An analytical model to predict the compressive damage of concrete plates under contact detonation [J]. International Journal of Impact Engineering, 2019(134): 103344.
- [9] 张朝平,张先锋,谈梦婷,等. 聚能杆式射流侵彻混凝土和岩石靶体试验与数值模拟[J/OL]. 含能材料: 1-14. [2023-06-29]. DOI:10.11943/CJEM2023071.
- [9] ZHANG Chao-ping, ZHANG Xian-feng, TAN Meng-ting, et al. Experimental and numerical simulation of shaped charge jet penetrating concrete and rock targets [J/OL]. Chinese Journal of Energetic Materials: 1-14. [2023-06-29]. DOI:10.11943/CJEM2023071. (in Chinese)
- [10] 王定贤,胡永乐,金飞华,等. 行波杆在混凝土应力波参数测量中的应用[J]. 兵工学报, 2010, 31(S1): 238-241.
- [10] WANG Ding-xian, HU Yong-le, JIN Fei-hua, et al. Application of bar gauge in parameters measurement of stress wave in concrete [J]. Acta Armamentarii, 2010, 31(S1): 238-241. (in Chinese)
- [11] 王海露. 混凝土中变埋深爆炸应力波传播规律数值模拟[D]. 淮南:安徽理工大学, 2014.
- [11] WANG Hai-lu. Variable depth explosion numerical simulation of stress wave propagation in concrete [D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

- [19] KURUPPU M D, CHONG K P. Fracture toughness testing of brittle materials using semi-circular bend (SCB) specimen [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2012, 91:133-150.
- [20] 丁遂栋, 孙利民. 断裂力学 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1997:106-107.
- [21] KURUPPU M D, OBARA Y, AYATOLLAHI M R, et al. ISRM-suggested method for determining the mode I static fracture toughness using semi-circular bend specimen [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2014, 47(1):267-274.
- [22] 高 玮, 崔 爽, 肖 婷, 等. 基于最小塑性区半径准则的岩石裂纹起裂规律 [J]. *煤炭学报*, 2021, 46(10):3193-3202.
- [22] GAO Wei, CUI Shuang, XIAO Ting, et al. Crack initiation of rock based on the minimum plastic zone radius criterion [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10):3193-3202. (in Chinese)
- [23] ALIHA M R M, AYATOLLAHI M R, SMITH D J, et al. Geometry and size effects on fracture trajectory in a limestone rock under mixed mode loading [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010, 77(11):2200-2212.
- [24] 龚江宏. 陶瓷断裂力学 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.

(上接第 24 页)

- [12] 章征林, 王 源, 孙阳阳, 等. FBG 应变测试技术在混凝土内爆炸试验中的应用 [J]. *压电与声光*, 2017, 39(2):281-283, 288.
- [12] ZHANG Zheng-lin, WANG Yuan, SUN Yang-yang, et al. Application of FBG strain measuring technique to the concrete inward detonation test [J]. *Piezoelectrics & Acousto-optics*, 2017, 39(2):281-283, 288. (in Chinese)
- [13] 黄家蓉, 刘光昆, 吴 飏, 等. 爆炸冲击作用下混凝土中动态应力波测试与仿真 [J]. *防护工程*, 2020, 42(4):23-28.
- [13] HUANG Jia-rong, LIU Guang-kun, WU Biao, et al. Testing and simulation of dynamic stress wave in concrete under explosion and impact [J]. *Protective Engineering*, 2020, 42(4):23-28. (in Chinese)
- [14] KONG X, FANG Q, CHEN L, et al. A new material model for concrete subjected to intense dynamic loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018(120):60-78.
- [15] 刘 鑫, 兰 涛, 秦广冲, 等. 地应力对混凝土材料中爆炸应力波传播影响规律研究 [J]. *爆破*, 2023, 40(3):151-157, 205.
- [15] LIU Xin, LAN Tao, QIN Guang-chong, et al. Study on influence of in situ stress on propagation of explosion stress wave in concrete [J]. *Blasting*, 2023, 40(3):151-157, 205. (in Chinese)
- [16] 王志斌, 杨立云, 钱桂安, 等. 混凝土抗拉与抗压强度尺寸效应统计模型 [J]. *矿业科学学报*, 2022, 7(2):193-199.
- [16] WANG Zhi-bin, YANG Li-yun, QIAN Gui-an, et al. A statistical model of size effect on concrete tensile and compressive strength [J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2022, 7(2):193-199. (in Chinese)
- [17] WANG Y, KONG X, FANG Q, et al. Modelling damage mechanisms of concrete under high confinement pressure [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021(150):103815.
- [18] YANG S, KONG X, WU H, et al. Constitutive modelling of UHPCC material under impact and blast loadings [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2021(153):103860.
- [19] 侯福金, 李术才, 管晓明, 等. 隧道爆破荷载作用下中隔壁动力响应与破坏机理研究 [J]. *中国公路学报*, 2019, 32(3):109-117
- [19] HOU Fu-jin, LI Shu-cai, GUAN Xiao-ming, et al. Dynamic response and destruction mechanism of center diaphragm support wall under tunnel blasting [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2019, 32(3):109-117. (in Chinese)
- [20] 赵 凯, 王肖钧, 卞 梁, 等. 混凝土介质中不同药形装药爆炸波传播特性的数值模拟 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2007(7):711-716.
- [20] ZHAO Kai, WANG Xiao-jun, BIAN Liao, et al. Numerical study on the propagation and damage behavior of the blasting wave with differently shaped explosives in concrete [J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2007(7):711-716. (in Chinese)
- [21] 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(2):60-65.
- [21] 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(2):60-65. (in Chinese)
- [22] 郝海明, 赵光明, 孟祥瑞. 爆破对不同龄期混凝土喷层破坏的数值分析 [J]. *地下空间与工程学报*, 2013, 9(1):173-178.
- [22] HAO Hai-ming, ZHAO Guang-ming, MENG Xiang-rui. Numerical analysis of blasting on the rupture of concrete spray layer at different ages [J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2013, 9(1):173-178. (in Chinese)