

•水利与土木工程•

DOI:10.12454/j.jsuese.202400058



本刊网刊

轴向水不耦合装药结构爆破空气流场应力演化分析

王雁冰¹,孔维文¹,汪东宸¹,杨 柳¹,郝宪杰²

(1. 中国矿业大学(北京) 力学与土木工程学院,北京 100083;2. 中国矿业大学(北京) 能源与矿业学院,北京 100083)

摘 要:为研究不同轴向水不耦合形式对爆破效果的影响,通过高速纹影系统和超压测试系统并结合有限元 ANSYS AUTODYN 数值模拟,对轴向水不耦合结构在空气流场中起爆后冲击波的传播规律开展研究。以结构中装药段的位置为变量,设计 4 种水不耦合形式下的药包,通过纹影照片分析爆炸冲击波和爆生产物的波动变化,对比分析 4 种结构下冲击波的传播过程、速度变化、压力变化,并将数值模拟结果与纹影试验结果结合,得到炸药冲击波在空气流场中传播速度、压力的演化过程以及在药包内部的压力分布规律。结果显示:轴向水不耦合结构爆炸产生的能量在垂直于炮孔轴线方向比沿炮孔轴线方向更为集中。炸药起爆后产生的冲击波以扁球形在空气流场中传播,爆生产物随冲击波向外传播并逐渐与其分离,且在垂直方向上的位移更远;轴向水不耦合装药结构的爆炸冲击波压力受传播路径上介质的影响,含水耦合一侧的冲击波超压峰值低,但在相同传播距离上衰减速度更慢,冲击波作用时间更长,使该侧爆破作用影响范围更大。轴向水不耦合结构中装药段位置会对爆破效果产生影响,装药段的孔壁压力远大于水介质段,远离装药段的孔壁超压峰值低,因此,破坏范围主要在装药段产生,可以通过改变装药结构中炸药的段数、长度和位置来控制损伤的范围。

关键词:高速纹影;轴向装药;水不耦合;孔壁压力;ANSYS AUTODYN

中图分类号:O38

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2026)02-0239-14

近年来,国内外学者对水不耦合装药爆破开展了相关研究工作。现场试验与室内试验方面,杨仁树等^[1]运用爆炸加载数字激光动态焦散线试验系统,对不同装药结构的爆生断裂裂纹的扩展过程进行分析研究。明锋等^[2]运用室内数值模拟的参数进行了现场爆破试验,发现水耦合装药有利于炮孔底部围岩的破碎。高保彬等^[3]研究了装药结构和装药介质对工程爆破效果的影响,最终发现水耦合介质装药为较理想的结构。顾文彬等^[4]对耦合、空气不耦合、水不耦合等三种装药结构的爆破能量传递进行了理论分析,并通过具体爆破工程对震动进行测试并验证了能量传递公式。朱强等^[5]进行了空气间隔装药预裂爆破试验,得到轴向不耦合装药的岩体损伤分布特征。Xia 等^[6]进行了 3 次爆破试验,发现水层爆破的最大钻孔压力远大于普通爆破。杨国梁等^[7]设置下部装药、中部装药、两端装药和

耦合装药 4 种装药结构,研究轴向不耦合装药结构对炸药能量传递和爆破效果的影响。Liu 等^[8]研究了以空气和水作为间隔介质时,轴向和径向不耦合系数对爆破效果的影响,确定了最佳的不耦合装药系数。Park 等^[9]在中硬岩石的韩国某花岗岩隧道掘进中,对不同轴向不耦合系数进行了试验。Jang 等^[10]分析了水垫层对岩体爆破的影响,发现爆炸能量与水相互作用,在孔底产生了均匀连续的压力转换。Huang 等^[11-12]通过水耦合爆破模型试验,阐述了煤岩体先后受到水耦合爆破作用及水力压裂后的裂纹扩展机理。Talhi 等^[13]研究了水耦合装药爆破过程中 P 波峰值压力的变化规律。Itoh 等^[14]通过高速摄影试验并用特征线描述了爆炸冲击波在水下的衰减过程。Kira 等^[15]将高速摄影技术用于水下爆炸研究,用特征线法较好阐释了冲击波衰减过程,并模拟了初始冲击波的传播规律。

收稿日期:2024-01-23 修回日期:2024-06-11 网络出版日期:2024-07-11

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFC2902103);国家自然科学基金重点项目(51934001);中央高校基本科研业务费专项资金(2025JCCXLJ01)

作者简介:王雁冰(1987—),男,副教授.研究方向:工程爆破与岩石破碎. E-mail:ceowyb818@163.com

在数值模拟方面,闫国斌等^[16]通过建立三维单孔不耦合装药爆破模型,再现了不耦合装药爆破的应力发展过程,得到了爆破应力云图、应力和位移时程曲线。种玉配等^[17]模拟了不同的轴向不耦合结构形式,以及空气、水介质条件下与介质所处位置对岩体爆破效果的影响。刘救共等^[18]建立三维计算模型,发现不耦合系数在1.3~1.8之间时,水介质不耦合装药可有效降低未爆岩体的损伤。杨跃宗等^[19]研究径向不耦合系数、轴向不耦合装药位置、轴向不耦合系数等爆破参数对岩石损伤及孔壁压力分布的影响,分析了径向和轴向不耦合装药的优缺点。李晓静等^[20]通过数值模拟指出同心装药条件下岩体损伤分布较为均匀,偏心不耦合装药因能量分布非对称,耦合侧岩体破碎范围显著扩大,强化开挖侧破碎效果的同时降低了对预留侧岩体的损伤。史维升^[21]通过数值模拟确定装药结构的径向不耦合系数,改善了爆破效果。王立川等^[22]研究了隧道掏槽眼在空气和水介质中轴向不耦合装药结构工况下爆破振动传播规律,发现水介质轴向不耦合装药爆破引起的振速明显小于空气介质不耦合装药爆破。钱立坤等^[23]对耦合装药和孔底轴向水不耦合装药两个模型孔底起爆进行计算,发现不耦合装药改变了能量的做功效果,有利于孔底岩石的破碎。

目前研究大多以水作为耦合介质,通过观察岩石试件的损伤和裂纹扩展,来间接反映冲击波传播规律及水对爆破效果的影响。本文设计水介质处于不同位置的轴向水耦合装药结构试验,通过高速纹影试验及数值模拟研究水介质不耦合装药结构在空气场中的爆炸效果,分析水介质的传播过程;通过测点记录并分析炮孔周围的压力与等效应力等研究轴向水耦合装药结构在空气场中的爆破规律。

1 试验系统与设计方案

1.1 轴向水耦合药包试验系统

轴向水耦合试验系统由高速纹影系统及冲击波超压测试系统组成,综合测试系统如图1所示。

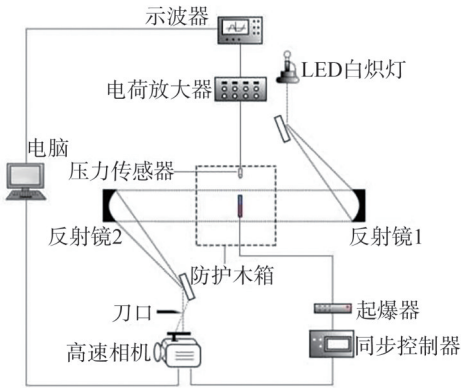


图1 综合测试系统^[24]
Fig. 1 Integrated testing system^[24]

1.1.1 高速纹影系统

纹影光路原理如图2所示。图2中:线光源S经透镜A₁成像于透镜M₁前焦平面处的狭缝R,光线经M₁准直后通过流场F,再经透镜M₂会聚至后焦平面刀口K处,同时流场F通过成像物镜A₂成像于照相底片Ph;光线在F中因密度梯度发生偏折,经刀口K剪切后转换为光强变化,最终在Ph上形成反映密度分布的明暗图像;d为透镜M₂至K的距离。

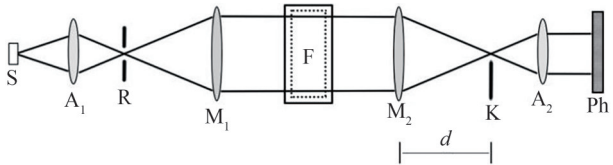


图2 纹影光路原理^[25]
Fig. 2 Principle of schlieren optical path^[25]

高速纹影系统中光源经过扩束镜形成发散光,发散光由平面反射镜形成平行光。防护木箱有防止药包爆炸后的碎片和爆生产物冲击损坏周围仪器设备的功能。在高速摄像机内部,集成的采集控制器将图像信息传输至数字处理器,待图像信息处理完成后,将其直接传输至计算机终端。

高速纹影试验系统实物如图3所示。



1. 平面镜1; 2. 扩束镜; 3. 激光器; 4. 平面镜2; 5. 刀口; 6. 高速相机; 7. 防护木箱。

图3 高速纹影试验系统实物^[26]
Fig. 3 Physical of high-speed schlieren experiment system^[26]

1.1.2 空气冲击波超压测试系统

试验现场超压测试系统实物如图4所示。在水平和垂直两个方向各布置一个压力传感器,冲击波超压P_m的计算公式为^[27]:

$$P_m = \frac{V}{KS_q} \quad (1)$$

式中:V为峰值电压,mV;K为电荷放大器的灵敏度,mV/pC,本文将K值设置为0.28 mV/pC;S_q为传感器的电荷灵敏度,pC/MPa,本文将S_q值设置为388.4 pC/MPa。



图 4 超压测试系统实物^[26]
Fig. 4 Physical of overpressure test system^[26]

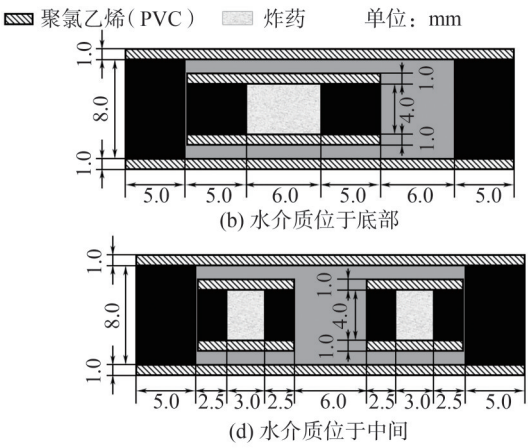
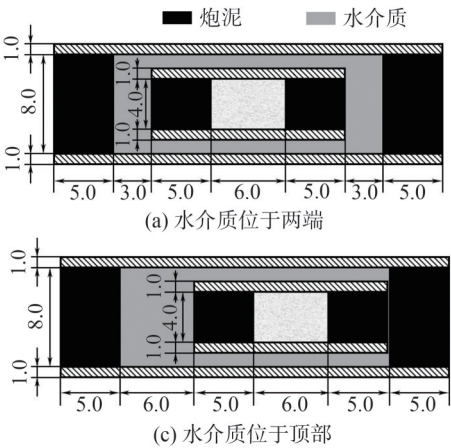


图 5 轴向水不耦合药包结构
Fig. 5 Axial water uncoupled charge structure
表 1 药包及外部约束尺寸
Table 1 Dimensions of charge and outer casing

试验编号	外壳材质	水介质位置	PVC 药包尺寸	PVC 外部硬管尺寸	药包长度/mm
1 [#]	PVC 透明硬管	PVC 透明硬管两端 各 3 mm	长为 16 mm, 外直径为 6 mm, 内径为 4 mm	长为 32 mm, 外直径为 10 mm, 内径为 8 mm, 壁厚为 1 mm	6
2 [#]	PVC 透明硬管	PVC 透明硬管底部 6 mm	长为 16 mm, 外直径为 6 mm, 内径为 4 mm	长为 32 mm, 外直径为 10 mm, 内径为 8 mm, 壁厚为 1 mm	6
3 [#]	PVC 透明硬管	PVC 透明硬管顶部 6 mm	长为 16 mm, 外直径为 6 mm, 内径为 4 mm	长为 32 mm, 外直径为 10 mm, 内径为 8 mm, 壁厚为 1 mm	6
4 [#]	PVC 透明硬管	PVC 透明硬管中部 6 mm	长为 8 mm, 外直径为 6 mm, 内径为 4 mm	长为 32 mm, 外直径为 10 mm, 内径为 8 mm, 壁厚为 1 mm	3

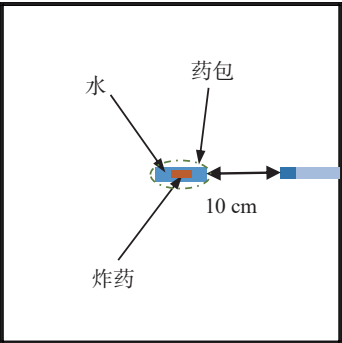


图 6 药包与超压传感器相对位置关系
Fig. 6 Relative position relationship between the medicine package and the overpressure sensor

1.2 轴向水耦合装药结构设计方案

共设计 4 种轴向水耦合药包结构, 装药结构如图 5 所示。

图 5 的各结构均采用二硝基重氮酚(DDNP)作为炸药, 且装药量均设计为 35 mg。为对比水介质位置对爆破超压峰值、爆轰波传播速度的影响, 设计了试验 1[#]~3[#]。为观察两个起爆点爆炸冲击波在中间部位产生的叠加现象^[17], 设计试验 4[#]。4 个试验均在距离爆心 10 cm 的垂直和平行处放置压力传感器, 采用悬吊方式放置到预定位置, 药包轴向垂直于光场。

试验 1[#]~4[#]药包及外部约束尺寸见表 1, 药包与压力传感器相对位置关系如图 6 所示。

2 轴向水耦合装药试验结果与分析

2.1 药包爆轰波动过程

图 7 为高速相机拍摄的爆轰波动过程。由图 7 可知: 试验 1[#]中: 67 μs 时, 爆轰冲击波和爆生产物完成分离, 波阵面与爆生产物间有明显的椭圆环状亮纹; 随后, 爆轰冲击波继续在流场中以椭球形传播, 爆生产物主要在垂直方向上传播。250 μs 时, 波阵面抵达垂直方向上的压力传感器。278 μs 时, 波阵面与水平方向的传感器接触。400 μs 时, 冲击波到达摄像机视场边界, 此时爆生产物垂直方向传播距离为 7.1 cm, 水平方向上传播

距离为 3.0 cm,爆生产物在垂直方向的传播距离大于在水平方向上的传播距离。

试验 2[#]中:爆后 64 μs ,冲击波和爆生产物分离;265 μs 时,波阵面几乎同时抵达垂直与水平两个方向的传感器。

试验 3[#]中:爆后 66 μs ,冲击波和爆生产物分离;222 μs 时,冲击波先抵达水平方向传感器;250 μs 时,抵达垂直方向传感器。

试验 1[#]~3[#]中,爆生产物和爆生产物的分离时间接近,水介质的位置对冲击波和爆炸物分离时间的影响较小,爆轰波阵面与垂直方向传感器的接触时间也较为相近,而抵达水平方向传感器的时间有较大差别,说明水介质长度主要影响冲击波沿药包轴向传播的速度,而对冲击波沿径向传播的速度影响较小。

试验 4[#]中:起爆 55 μs 后,右侧药包爆轰冲击波与爆生产物完成分离;起爆 100 μs 时,由于试验误差,左侧药包在右侧药包开始起爆;150 μs 时,观测到左侧药包向外传播的爆轰冲击波;起爆 200 μs 后,左侧药包的波阵面的位移距离超过爆生产物的位移距离;239 μs 时,右侧药包的爆轰波阵面与垂直方向传感器接触;261 μs 时,与水平方向传感器接触;322 μs 和 361 μs 时,左侧药包爆轰波阵面分别抵达水平方向与垂直方向的压力传感器;400 μs 时,右侧药包的爆轰波阵面已经超出视场范围,左侧药包的波阵面刚传播至视场边缘。爆生产物在垂直方向上的传播距离为 5.2 cm,而在水平方向上的传播距离为 3.8 cm。相比于试验 1[#]~3[#],爆生产物在水平方向上的位移增加了,而在垂直方向上的位移减小了。

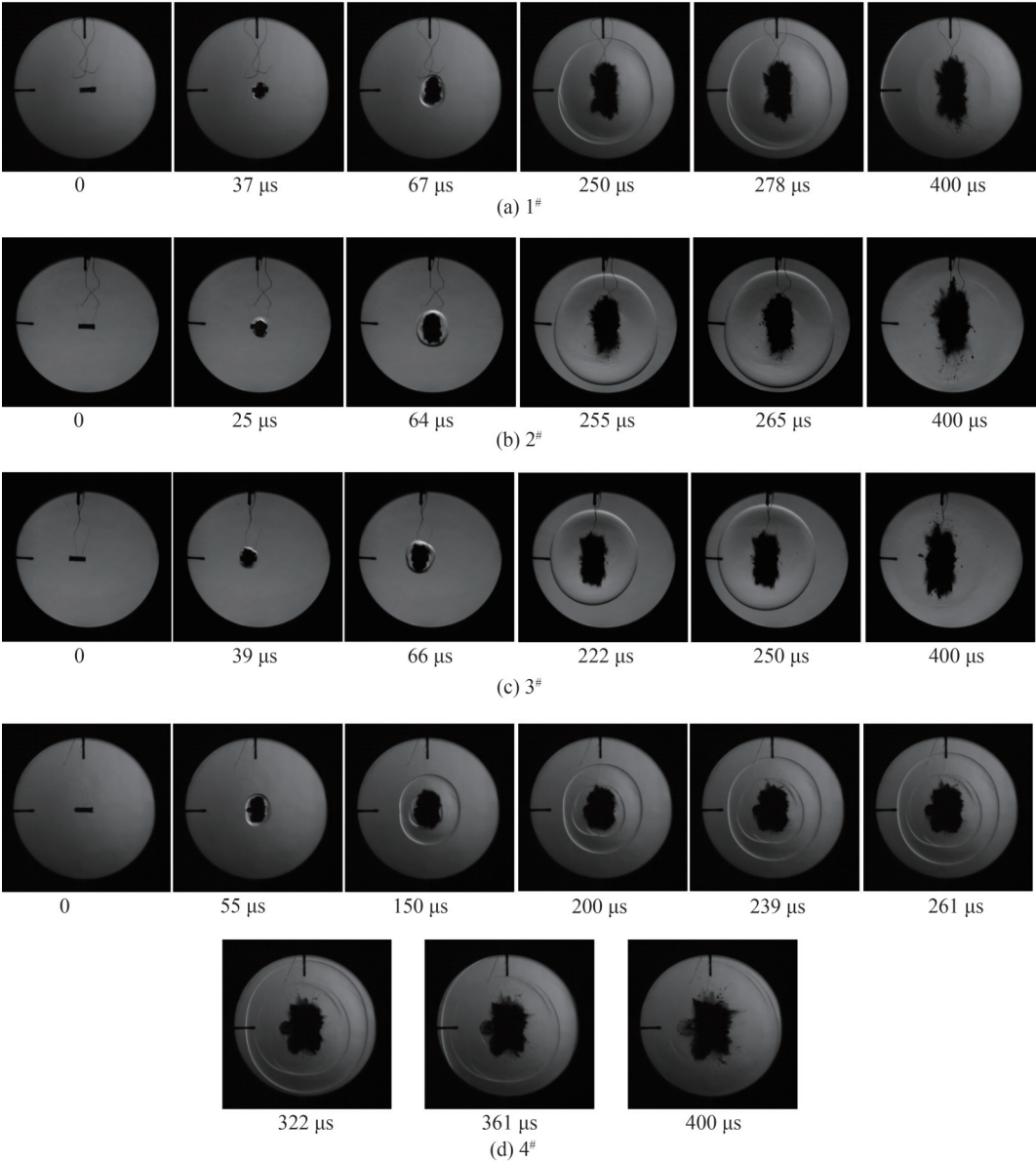


图7 高速相机拍摄的爆轰波动过程

Fig. 7 Blast wave process captured by the high-speed camera

2.2 爆轰冲击波和爆生产物平均速度

图8为爆轰冲击波和爆生产物的时间-速度曲线。

由图8(a)可以看出,爆轰冲击波传播速度总体呈现下降趋势,但不同装药结构对冲击波速度产生了不同的作用效果,各时间段速度大小有差别。最大冲击波传播速度出现在3[#],最大速度为438.6 m/s,且在起爆50 μ s内传播速度衰减较快。1[#]冲击波的初始速度和衰减速度处于3者中间,最大速度约为419.5 m/s,起爆50 μ s后速度衰减至390.4 m/s。2[#]爆轰冲击波初始速度最低,最大传播速度为411.1 m/s,速度整体衰减较慢,这是因为水介质一方面有利于冲击波的传播,另一方面爆轰冲击波的部分能量推动水介质向外膨胀扩散,消耗部分能量且传播速度逐渐降低。

4[#]-L和4[#]-R分别为水介质位于PVC透明药包中间时左、右两侧炸药的冲击波传播速度。相比于1[#]~3[#],4[#]-L和4[#]-R冲击波的初始传播速度较低,最大传播速度分别为403.5和398.3 m/s。这是由于4种装药结构总装药量相同,4[#]的两段炸药等分于其他3组试验中一段炸药的药量,单个药包爆炸产生的能量低,爆轰冲击波在推动爆生产物向外扩散后其传播速度衰减更快。由于水介质的存在,4[#]-R的冲击波初始速度大于4[#]-L。

由图8(b)可知,1[#]~3[#]冲击波速度的下降趋势比较类似,冲击波沿垂直方向的传播速度在未与爆生产物分离前快速衰减,由约600 m/s下降至480 m/s,冲击波与爆生产物分离后冲击波速度衰减变慢,随时间增加缓慢下降至430 m/s,并趋于稳定。1[#]冲击波传播速度总体要大于2[#]、3[#]的冲击波传播速度,说明起爆点位置的不同会对冲击波在垂直方向上的传播速度产生不同影响。1[#]炸药位于PVC透明药包中间,相比于2[#]、3[#]的炸药向PVC药包某一侧偏移,其爆心位置与垂直方向传感器的距离最近,可认为此时测得的传播速度是冲击波波阵面与传感器轴线相垂直的结果。2[#]、3[#]的爆心位置对于垂直方向的传感器有相同距离的偏移,因此,2[#]、3[#]中冲击波

的最大传播速度比较接近。4[#]-R、4[#]-L由于单个药包爆炸的能量低,且爆心位置与传感器位置有进一步的偏移,因此,这两条冲击波的最大速度显著低于1[#]~3[#]。在[10, 50] μ s时,4[#]-R冲击波速度呈现快速下降的趋势,4[#]-L的下降过程经历了一次很小的起伏,且冲击波的初始速度远低于4[#]-R,最大速度差为100 m/s左右。由于试验误差,右侧药包先于左侧药包起爆,推测右侧药包起爆时周围的水介质增加了冲击波的传播速度,又因压缩爆生产物而消耗了部分能量,表现为4[#]-R冲击波速度的快速下降,左侧炸药起爆时外部PVC药包约束已经被破坏,同时周围的水介质已经变成水雾的形态向外膨胀,此时左侧炸药近似于在空气场中起爆,因此,冲击波初始传播速度低,此时爆生产物已经受到右侧药包爆炸冲击波的影响向外扩散,左侧药包爆炸产生的冲击波在传播过程中只消耗了较少的能量,表现为4[#]-L冲击波传播速度先缓慢衰减,随后冲击波与已经扩散的爆生产物接触并作用,4[#]-L在(50, 75] μ s时经历了一段快速衰减后又趋于缓慢衰减的过程。

由图8(c)可知,1[#]~4[#]的爆生产物最大传播速度依次为370.3、365.4、290.8、320.4 m/s。1[#]、2[#]爆生产物的速度变化趋势基本一致:[22, 100] μ s间,快速下降;(100, 150] μ s间,爆生产物的衰减速度减慢;150 μ s后,爆生产物的扩散趋近于停滞。3[#]爆生产物的初始速度较低,[22, 100] μ s间,与1[#]、2[#]爆生产物的速度差逐渐缩小,趋近于30 m/s。4[#]爆生产物最大传播速度小于1[#]和2[#]的最大传播速度,轴向耦合装药爆炸的能量主要集中于装药段,由于该结构具有两个药包,冲击波覆盖的范围更大,使药包的爆生产物在水平方向上的传播距离更远,而在垂直方向上的传播速度和传播距离减少。4[#]在[50, 100] μ s间,爆生产物传播速度衰减变快,此时只有右侧药包起爆,冲击波的能量较低,不能持续使爆生产物向外扩散;(100, 125] μ s间,爆生产物传播速度的衰减速度变慢,为该装药结构中左侧药包的爆炸冲击波再一次推动爆生产物向外扩散的结果。

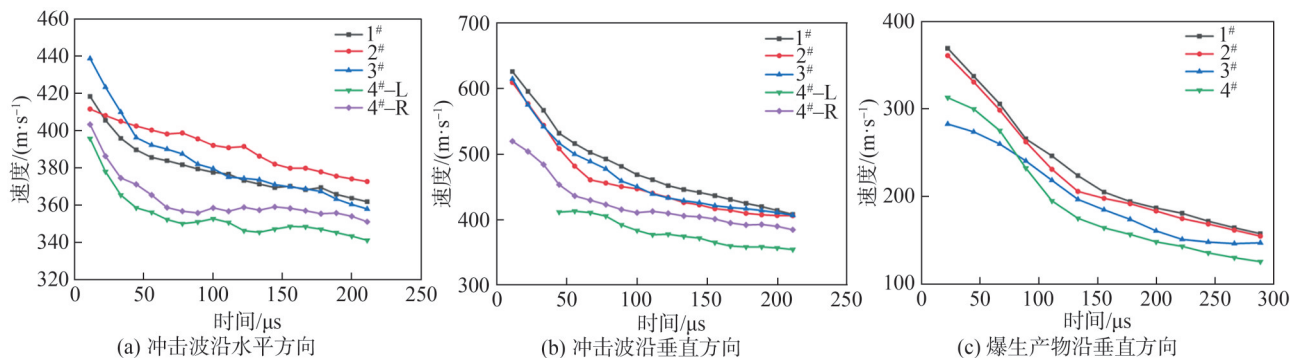
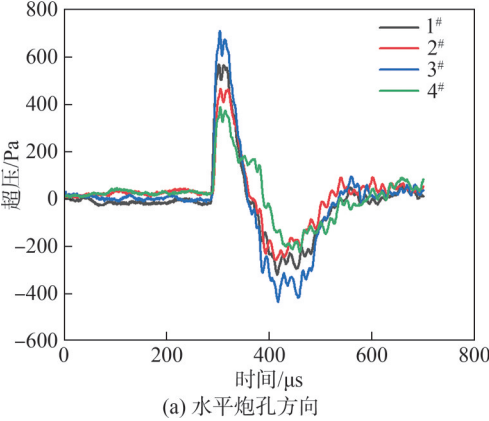


图8 爆轰冲击波和爆生产物的时间-速度曲线

Fig. 8 Time-velocity curves of blast shock waves and detonation products

此外,图 8(b)任意时刻对应的速度都比图 8(a)的速度大,说明垂直方向轴向耦合药包冲击波的传播速度大于水平方向的传播速度,在 60 μs 前后 4 种装药结构的冲击波前沿波阵面均开始与爆生产物分离,垂直方向上冲击波的传播速度呈现出较为一致的衰减规律,相比于初始速度,衰减比例均在 19% 左



右;水平方向上各结构的衰减速度不同,1[#]~3[#]、4[#]-R、4[#]-L 的冲击波相比于初始速度,衰减比例分别为 6.9%、3.5%、11.3%、8.1%、8.9%,从 1[#]~3[#]可以看出,冲击波速度衰减程度取决于水介质的长度。

2.3 超压测试结果

图 9 为爆轰冲击波超压测试曲线。

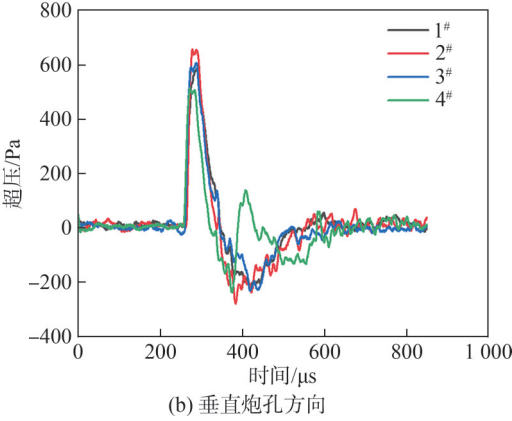


图 9 爆轰冲击波超压测试曲线
Fig. 9 Overpressure test curves of blast shock wave

2.3.1 水平方向超压测试

图 9(a) 中,1[#]~4[#] 的超压峰值依次为 567.80、464.76、709.12、387.73 Pa。超压峰值的差异主要源于两个因素:一是冲击波传播路径中穿过水介质的长度;二是单段炸药的药量。以 2[#] 试验为例,其冲击波从炮孔沿路径传播至传感器的过程中,穿过水介质的路径较短,主要经 PVC 固体介质后进入空气,能量在传播中逐渐耗散,因此其超压峰值在 1[#]~3[#] 中最低。对于 1[#]、3[#],两者的装药结构均只有一段炸药,单段药量相同,3[#] 的结构水介质长度大于 1[#] 的结构水介质长度,水介质延长了冲击波作用时间,3[#] 的超压峰值大于 1[#] 的超压峰值。对于 3[#]、4[#],炸药与传感器间水介质的长度相同,4[#] 的峰值是由先起爆的右侧药包冲击波经过水介质作用与传感器接触后产生的,但试验 4[#] 中单个药包的药量只有试验 3[#] 的一半,爆炸产生的能量较低,3[#] 的超压峰值大于 4[#] 的超压峰值。总体而言,当冲击波传播路径上水介质占比更多时,冲击波超压峰值更高;当结构中炸药与传感器间含水介质时,水介质能延长冲击波的作用时间,且使超压峰值增大。

1[#]~3[#] 冲击波超压在抵达峰值约 50 μs 后降至负压,且超压峰值越大的曲线,其负压的绝对值越大。4[#] 冲击波超压在冲击波超压衰减一段时间后出现了类似台阶状变化,这是因为后起爆的左侧药包的冲击波抵消了一部分衰减,在 480 μs 左右达到最大负压值,晚于 1[#]~3[#] 达到最大负压的时间。

2.3.2 垂直方向超压测试

图 9(b) 中,1[#]~4[#] 的超压峰值依次为 592.8、655.8、

606.9、520.5 Pa。

试验 1[#] 中,超压从 290 μs 开始衰减,经过 132 μs 后在 422 μs 达到最小值(-224.1 Pa)。2[#] 中,压力从 288 μs 开始衰减,经过 95 μs 后在 383 μs 达到最小值(-275 Pa)。3[#] 中,超压从 287 μs 开始衰减,经过 130 μs 后在 417 μs 达到最小值(-229.8 Pa)。可以看出,冲击波超压峰值越高,其衰减速度越快,产生的负压峰值绝对值越大。

由图 8(b) 可知,试验 4[#] 中,右、左侧药包冲击波在垂直方向的速度差值较大,左侧药包冲击波到达垂直传感器的时间比到达水平传感器的时间更晚。图 9(b) 中:4[#] 未出现图 9(a) 中的“台阶”现象,右侧药包冲击波先抵达垂直传感器,随后超压先增大至峰值,再衰减至负压;左侧药包的冲击波在右侧药包冲击波衰减将要结束时,才抵达垂直传感器,表现为 4[#] 超压测试值在衰减后再次上升,并出现了第 2 个超压峰值和相应的衰减过程。

对比图 9(a)、(b) 可知,1[#]、2[#]、4[#] 冲击波超压峰值增大,3[#] 冲击波超压峰值减小,认为轴向耦合装药爆炸产生的能量更多地集中在径向。试验 2[#]:冲击波沿炮孔轴向到传感器的传播过程,几乎不与水介质发生作用;在径向传播过程中,受到炸药周身环绕水介质的作用,超压峰值提升。试验 1[#]、4[#],冲击波在轴向和径向上均与水介质产生作用,但在垂直方向上,超压峰值更高。试验 3[#]:冲击波在轴向和径向上均与水介质产生作用,但轴向的超压峰值大于径向的超压峰值,认为水介质的长度对于沿炮孔轴向传播冲击波超压峰值的影响大于径向上的集中效果。

3 轴向水耦合装药结构数值模拟

利用有限元分析软件 ANSYS,建立不同装药结构下的计算模型,对爆轰过程展开数值模拟,并与纹影试验结果相互验证。

3.1 模型建立

3.1.1 算法选择与材料参数

药包外壳选用任意拉格朗日欧拉(ALE)算法,炸药和周围空气采用欧拉(Euler)算法。药包外壳本构模型及其参数如表 2^[28]所示。表 2 中: ρ_1 为药包外壳材料密度; C_1 和 C_2 为材料参数,用于描述剪切模量随压力与温度的变化。将空气视作理想气体,状态方程由气体试验定律定义如下^[28]:

表 2 药包外壳本构模型及其参数^[28]

Tab. 2 Constitutive model of drug package shell and its parameters^[28]

药包外壳材质	本构模型	剪切模量/GPa	$\rho_1/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	$C_1/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$C_2/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	屈服压力/GPa
PVC	Steinberg–Guinan	0.15	1.38	2 590	0	0.04

表 3 炸药材料力学参数

Tab. 3 Mechanical parameters of explosive material

炸药的密度 $\rho_2/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$	爆轰速度 $V_{\text{C-J}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	A/GPa	B/GPa	R_1	R_2	ω	E_0/GPa	爆轰压力 $P_{\text{C-J}}/\text{GPa}$
1.0	5 170	348.6	11.3	7.0	2.0	0.24	6.03	0.22

3.1.2 有限元模型

建立药包模型时,为避免 PVC 外壳对爆破能量传播的影响,炸药不再用 PVC 材质包裹。外壳材质及尺寸与高速纹影试验所用相同。4 种装药结构在沿炮孔

$$P=(\gamma-1)\frac{\rho}{\rho_0}E \tag{2}$$

式中: P 为压力; γ 为绝热指数, γ 取值为 1.4; ρ 为压缩或膨胀后的空气密度; ρ_0 为空气的初始密度, ρ_0 取值为 $1.225\times10^{-3}\text{ g/cm}^3$; E 为空气的初始比内能, E 取值为 $2.068\times10^5\text{ J/kg}$ 。

DDNP 炸药的 Jones–Wilkins–Lee (JWL) 状态方程为^[28]:

$$P_{\text{e}}=A(1-\frac{\omega}{R_1Q})\text{e}^{-R_1Q}+B(1-\frac{\omega}{R_2Q})\text{e}^{-R_2Q}+\frac{\omega E_0}{Q} \tag{3}$$

式中: Q 为相对体积; B 、 A 、 R_1 、 R_2 和 ω 均为参数,且均为确定常数; P_{e} 为爆炸物超压; E_0 为初始内能密度。

炸药材料力学参数如表 3 所示。

和垂直炮孔两个方向每隔 20 mm 布置一个测点,共布置 10 个测点;另外,沿外壳约束壁内侧每 4 mm 处布置一个测点,共布置 7 个测点。图 10 为有限元计算模型。图 10(a)~(d) 依次对应纹影试验中的 1[#]~4[#]。

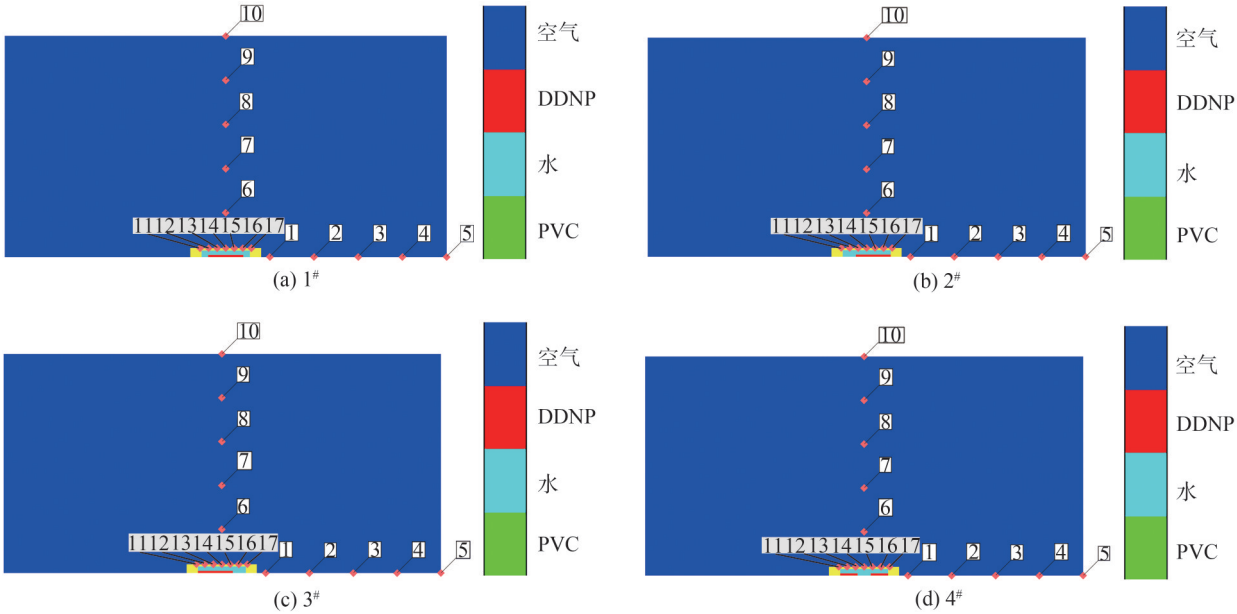


图 10 有限元计算模型

Fig. 10 Finite element computational models

3.2 结果分析

3.2.1 冲击波超压峰值衰减规律

图 11 为空气场中冲击波超压演化云图。图 11(a)

中,药包处于约束结构中间,冲击波以对称的椭球形向外扩散至流场边界。图 11(b)、(c)中,药包均向结构中的一侧偏移,135 μs 后明显观察到冲击波在向外传

播的过程中药包偏移一侧的传播速度大于另一侧。图 11(d)中,两个药包的结构使爆炸冲击波向外传播时更为均匀,200 μs 时冲击波的形状比 3、70、135 μs 时更接近圆形而非椭圆形。不同的装药结构对垂直炮孔

方向冲击波速度的影响较小,图 11(a)~(d)的冲击波在 200 μs 前后沿垂直方向上传播至流场边界,垂直炮孔方向冲击波的传播速度要大于沿炮孔方向冲击波的传播速度,与试验结果相吻合。

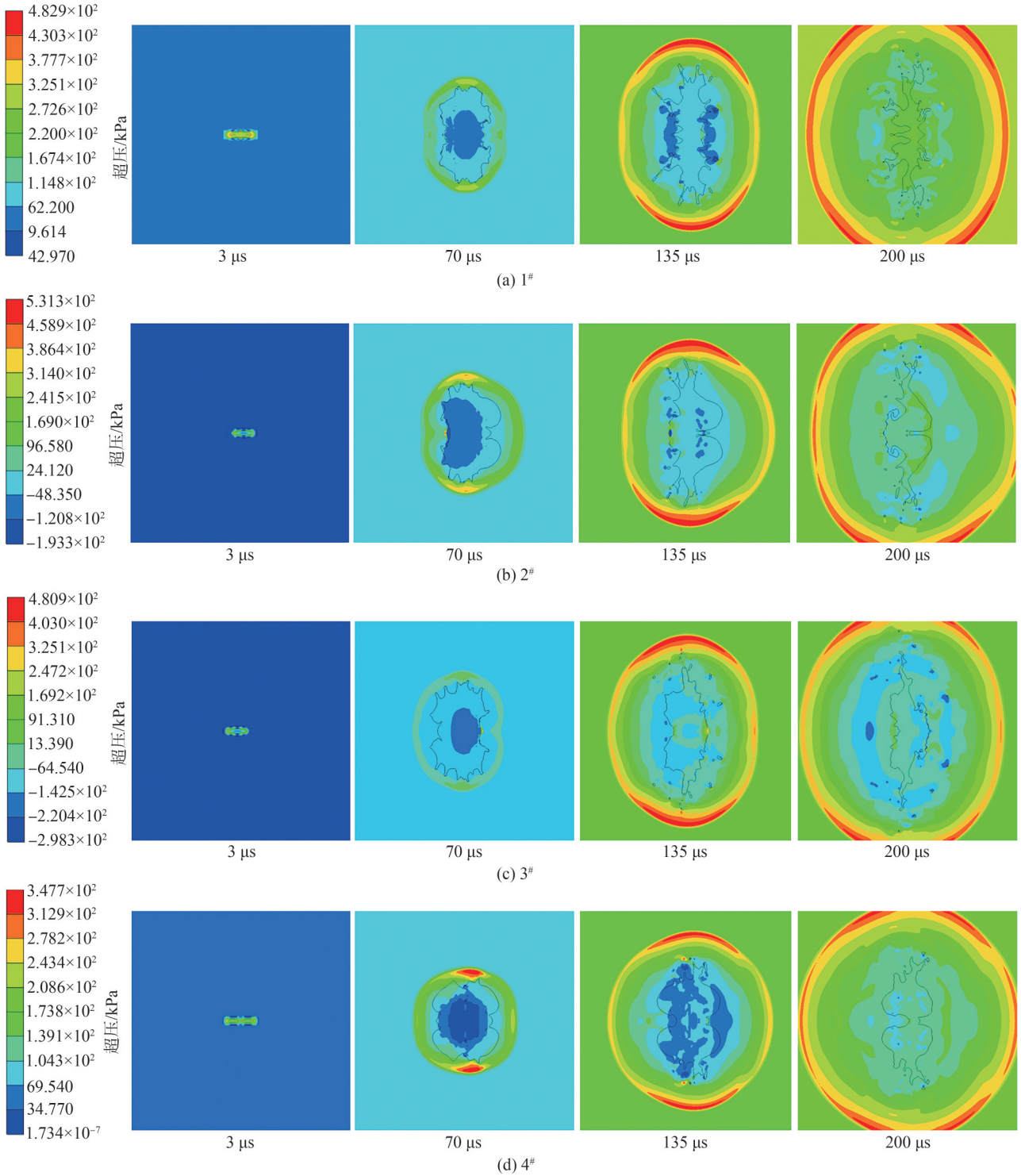


图 11 空气中冲击波超压演化云图

Fig. 11 Cloud diagrams of shock wave overpressure evolution in air field

图 12 为沿炮孔方向的冲击波超压衰减曲线。图 12(b)中,测点 1 与炸药距离最近,超压峰值最大;图 12(c)中,测点 1 与炸药距离最远,超压峰值最小。可

以看出,随着与炸药距离的增大,测点 1 处冲击波超压峰值会明显降低。由图 12(b)、(d)可以观察到,测点 1 存在一大一小两个峰值,这是由于在这两种结构中,

炸药与测点 1 之间缺少水介质且爆心距离测点较近,起爆后冲击波快速传播至药包外壳透射形成的冲击波与炸药破坏药包约束时产生的冲击波依次经过测

点 1,由于没有水介质的参与,透射冲击波的作用时间短,测点处的压力值先升高再快速下降而后再又升高,形成了两个峰值。

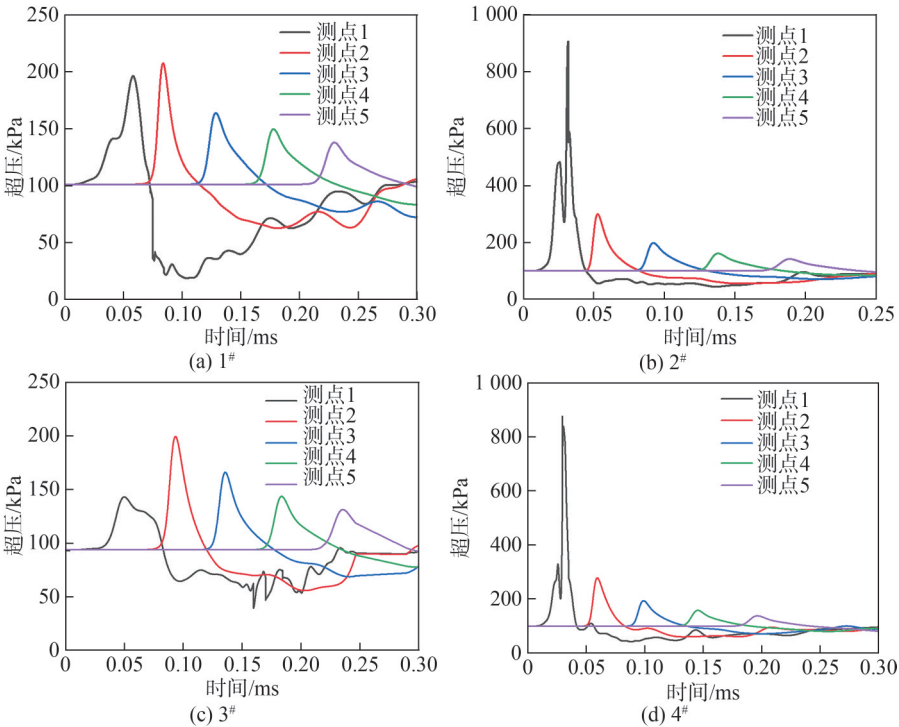


图 12 沿炮孔方向的冲击波超压衰减曲线

Fig. 12 Attenuation curves of shock wave overpressure along the direction of borehole

表 4 为沿炮孔方向各测点冲击波超压峰值和取得时间。结合图 12 进行分析:图 12(b)、(d)中,测点 1 的冲击波超压峰值均在起爆后极短时间内达到(0.032、0.030 ms),分别为 906.66、877.06 kPa;图 12(a)中,测点 1 的超压峰值仅为 196.57 kPa,达到时间延迟至 0.058 ms,与图 12(b)相比,峰值下降 78.32%,达到时间延长 93.33%;图 12(c)中,测点 1 的超压峰值进一步降低至 150.18 kPa,达到时间为 0.052 ms,与图 12(b)相比,峰值降幅达 83.43%,取得时间延后 66.67%。作为距离药包最近的测点,测点 1 的压力响应主要受炸药

与测点之间介质影响;图 12(a)和(c)中,炸药与测点 1 之间存在一段水柱及 PVC 封堵;图 12(b)和(d)中,二者之间仅设有 PVC 固体封堵介质。分析表明,水柱的存在虽导致冲击波超压峰值降低,但延长了冲击波的作用时间,减缓了压力衰减过程;当仅有固体介质时,冲击波超压峰值较高,但衰减更为迅速。相比之下,各结构中测点 2~5 的冲击波超压峰值间差距较小,这是由于冲击波传播至这些测点时,主要以空气为介质,此时传播距离的影响相对减弱,介质属性成为压力衰减的主要因素。

表 4 沿炮孔方向各测点冲击波超压峰值和取得时间

Tab. 4 Peak values and acquisition times of shock wave overpressure at each measuring point in the direction of borehole axis

测点编号	1 [#]		2 [#]		3 [#]		4 [#]	
	超压峰值/kPa	超压峰值取得时间/ms	超压峰值/kPa	超压峰值取得时间/ms	超压峰值/kPa	超压峰值取得时间/ms	超压峰值/kPa	超压峰值取得时间/ms
1	196.57	0.058	906.66	0.032	150.18	0.052	877.06	0.030
2	207.62	0.084	300.40	0.053	206.23	0.103	279.45	0.059
3	164.12	0.129	199.43	0.093	176.07	0.137	195.17	0.099
4	149.95	0.177	162.61	0.138	150.71	0.183	159.51	0.145
5	137.97	0.230	142.80	0.189	138.50	0.239	139.43	0.197

图 13 为垂直炮孔方向的冲击波超压衰减曲线。图 13(a)~(c)中,测点 6 的冲击波超压峰值先经历一次快速的升降,再快速升高,最后平缓地降低,相比于水平

方向的测点 1,测点 6 的冲击波超压峰值要更晚衰减到 100 kPa 以下。图 13(d)中:测点 6 位于两段炸药爆心的中间,却在所有测点中具有最高的冲击波超压峰值,为

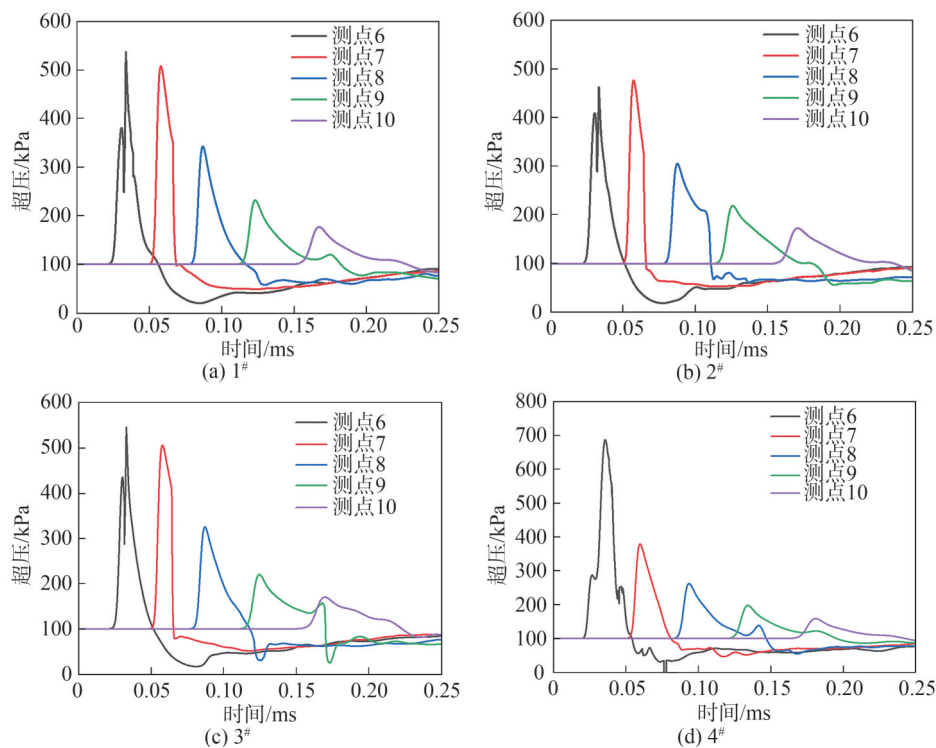


图 13 垂直炮孔方向的冲击波超压衰减曲线

Fig. 13 Attenuation curves of shock wave overpressure in vertical hole direction
687.72 kPa,装药结构中两段炸药产生的冲击波在该位置产生了叠加,导致超压峰值增大;测点7~10的超压峰值较低,两个冲击波的波阵面已经穿过彼此,叠加效果减弱,超压峰值要小于其他组在同一位置的测点。

表 5 为垂直炮孔方向各测点冲击波超压峰值和取得时间。结合图 13 进行分析:1[#]~3[#]均分别在 0.033、0.057、0.087、0.123、0.170 ms 前后经过测点 6~10,测点 8~10 处冲击波压力下降至 100 kPa 以下所需时间比

测点 6、7 要长。图 13(a)中,测点 6 的冲击波超压峰值传播至测点 10 时,超压峰值衰减 66.83%。图 13(b)、(c)中测点 6 至 10 的冲击波分别衰减了 63.64%、68.42%,说明单端炸药位置的不同对于垂直炮孔方向冲击波超压峰值衰减速率的影响较小。图 13(d)中,测点 6 至 10 的冲击波峰值压力下降了 76.72%,且各测点测得的压力是由两侧炸药冲击波叠加得到的结果,爆炸近区的冲击波超压峰值较大。

表 5 垂直炮孔方向各测点冲击波超压峰值和取得时间

Tab. 5 Peak values and acquisition times of shock wave overpressure at each measuring point in the direction of vertical borehole axis

测点编号	1 [#]		2 [#]		3 [#]		4 [#]	
	超压峰值/kPa	超压峰值取得时间/ms	超压峰值/kPa	超压峰值取得时间/ms	超压峰值/kPa	超压峰值取得时间/ms	超压峰值/kPa	超压峰值取得时间/ms
6	537.82	0.033	462.74	0.033	542.70	0.033	687.72	0.035
7	508.65	0.058	478.56	0.057	506.14	0.057	379.95	0.060
8	343.54	0.087	307.31	0.087	326.07	0.087	263.53	0.093
9	233.02	0.123	220.80	0.126	221.15	0.124	199.03	0.134
10	178.37	0.167	174.56	0.170	171.37	0.170	160.09	0.181

3.2.2 孔壁压力分布

图 14 为孔壁内冲击波压力衰减及孔壁超压峰值曲线。由图 14 可知:孔壁内冲击波压力的分布受到药包内炸药位置的影响;当炸药位于药包中间时,孔壁超压峰值呈钟形分布。图 14(a)中,测点 14 距离爆心最近,孔壁超压峰值最高,孔壁压力在炸药段的下降速度与测点到爆心的距离呈线性关系,炸药段以外孔壁的超压峰值快速下降。当炸药的位置向药包中一侧偏移时,孔壁

超压峰值呈“M”形分布。图 14(b)、(c)的孔壁最高超压峰值分别为测点 15 和 13,当测点的位置由炸药起爆处向炸药两端移动时,孔壁超压峰值的下降趋势不同;当测点向靠近药包堵塞一侧移动时,孔壁超压峰值趋于线性下降;当测点在向药包中水介质一侧移动至炸药段与水的交界处时,孔壁超压峰值会经历一次升高的过程;当测点移动至水耦合段时,孔壁压力快速下降,距离爆心最远测点处的孔壁压力远小于其他测点;当炸药

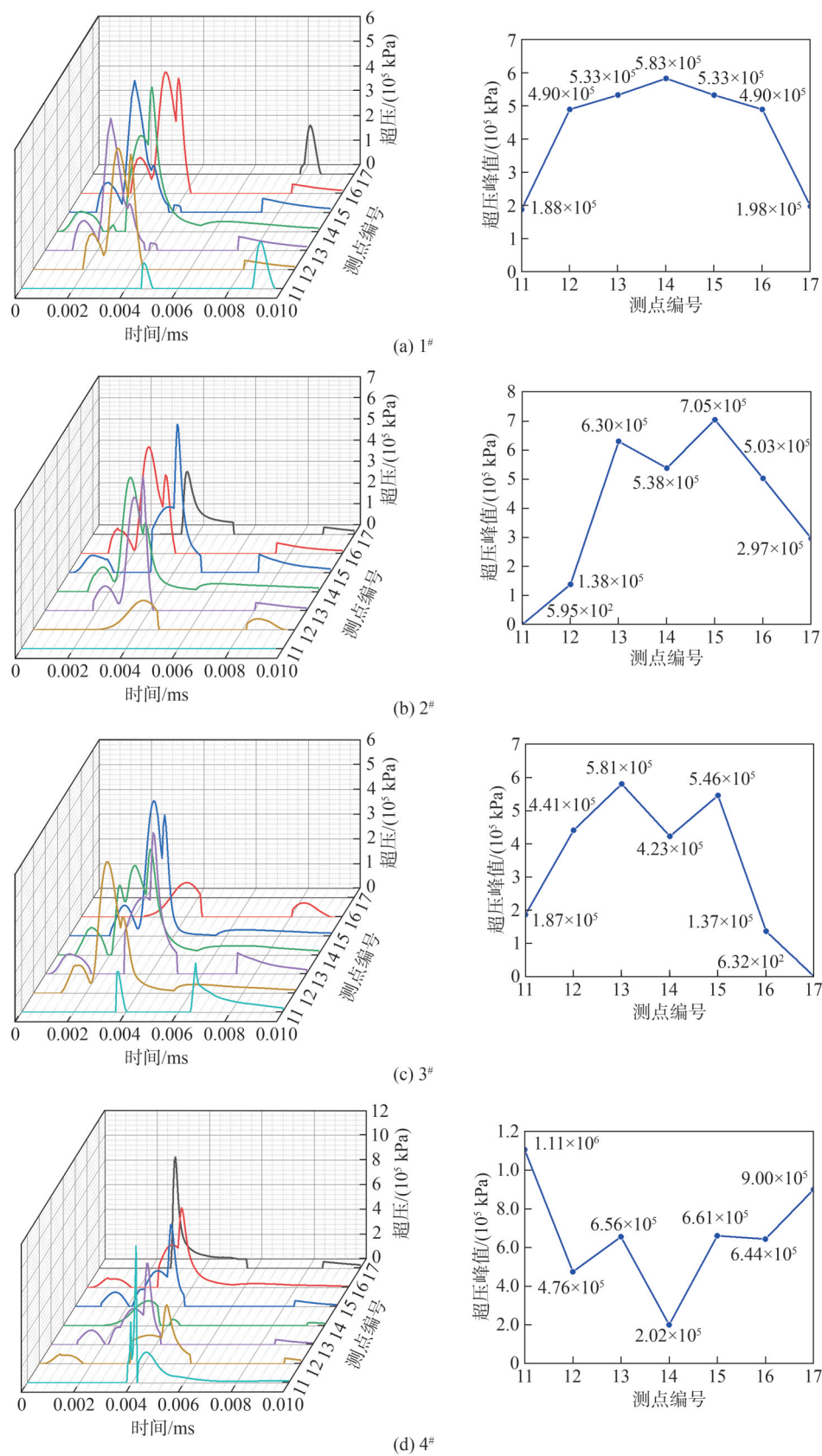


图 14 孔壁内冲击波超压衰减及孔壁超压峰值曲线

Fig. 14 Shock wave overpressure attenuation inside the borehole wall and pressure peak curves of the borehole wall

分布在药包两端时,孔壁超压峰值呈山谷形分布,处于

峰值要小于炸药与水耦合交界处。由图 14 可以发现,靠

近炸药段的测点孔壁压力时程曲线通常经历两次明显

的压力上升—下降过程。其物理过程可分解为两阶段：第一次压力升高对应炸药起爆后直接传播至该测点的初始冲击波，测点孔壁压力开始上升的时间与其到爆心的距离具有对应关系，即距离爆心越远，曲线开始上升的时间越滞后；当冲击波传播至药包外壳并发生反射后，反射波再次向内传播并在孔壁处与原有应力场叠加，引起曲线的第二次升高。

4 结 论

1) 根据纹影试验与超压测试结果，对于轴向水耦合装药结构，产生的冲击波在炮孔径向的传播速度与超压峰值均高于其轴向。这表明该水耦合结构炸药爆炸能量在径向上更为集中，利用这一特性，可通过调整炮孔方向，使径向对准目标岩体，从而实现对垂直于炮孔轴线区域的定向破坏。更多的爆炸能量用于破碎开挖岩体，能有效减少对保留岩体的损伤，有效提升爆破的效果，起到定向破坏的目的，增加爆炸能量利用率。

2) 根据超压测试和数值模拟的结果，炸药冲击波在沿炮孔方向近区的超压峰值受到炸药与测点间所存在的介质的影响，有水耦合一侧炸药冲击波在炸药轴线方向近区的超压峰值较没有水耦合一侧下降了 83.43%，在次近区下降了 30.89%，在爆炸远区则增加了 52.57%，没有水耦合一侧的冲击波压力衰减速度较快。轴向水耦合影响了冲击波的传播速度，水介质可以在传播过程中通过降低炸药冲击波的速度延缓冲击波压力的衰减过程；且耦合水柱越长，冲击波压力衰减速度越慢，进而延长爆炸的冲击波与压力传感器接触时的作用时间，有水耦合一侧炸药的冲击波压力衰减更慢，可以提高爆炸影响范围，炸药作用区域更加深远。

3) 轴向水耦合装药的装药位置对爆破效果产生影响，装药段的孔壁压力远大于水介质段，远离装药段的孔壁超压峰值低。采用将炸药分段与水介质耦合的装药结构，可以提升爆破影响范围，此时起爆产生的冲击波将会在两段炸药间垂直于炮孔轴线的平面上产生叠加，提高该处的超压峰值；同时，可以通过炸药段数和长度的改变，利用冲击波的叠加效果，实现特定位置的破岩。

参考文献：

[1] Yang Renshu, Wang Yanbing. Experimental study of dynamic fracture effect of blasting crack in slotted cartridge decoupling charge blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013, 32(7): 1337–1343. [杨仁树, 王雁冰. 切缝药包不耦合装药爆破爆生裂纹动态断裂效应的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2013, 32(7): 1337–1343.]

[2] Ming Feng, Zhu Wenhua, Li Dongqing. Application of water-couple charge blasting in tunnel excavation[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(5): 1008–1013. [明锋, 祝文化, 李东庆. 水耦合装药爆破在隧道掘进中的应用[J]. 地下空间与工程学报, 2012, 8(5): 1008–1013.]

[3] Gao Baobin, Liu Yunpeng, Wang Zuguang. Analysis of blasting effect under different coupling charge structure[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2014, 29(3): 10–14. [高保彬, 刘云鹏, 王祖洸. 不同耦合装药结构的爆破效果分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2014, 29(3): 10–14.]

[4] Gu Wenbin, Wang Zhenxiong, Chen Jianghai, et al. Influence of charge structure on the energy transfer of blasting vibration and explosive effect[J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35(2): 207–211. [顾文彬, 王振雄, 陈江海, 等. 装药结构对爆破震动能量传递及爆破效果影响研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(2): 207–211.]

[5] Zhu Qiang, Chen Ming, Zheng Bingxu, et al. Distribution and control technology of rock damage induced by air-deck charge presplitting blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(S1): 2758–2765. [朱强, 陈明, 郑炳旭, 等. 空气间隔装药预裂爆破岩体损伤分布特征及控制技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(S1): 2758–2765.]

[6] Xia Wenjun, Lu Wenbo, Li Ruize, et al. Effect of water-decked blasting on rock fragmentation energy[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020(2): 1–11.

[7] Yang Guoliang, Yang Boyi, Liang Guangyi, et al. Dynamic strain distribution and damage fractal characteristics of shale under axial decoupled charge blasting[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(6): 10–15. [杨国梁, 杨博壹, 梁光一, 等. 轴向不耦合装药爆破下页岩的动态应变分布及损伤分形特征[J]. 工程爆破, 2023, 29(6): 10–15.]

[8] Liu Jiangchao, Gao Wenxue, Zhang Shenghui, et al. Numerical analysis and application of uncoupled coefficient of water sealed blasting on blasting effect[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 719(3): 032035.

[9] Park D, Jeon S. Reduction of blast-induced vibration in the direction of tunneling using an air-deck at the bottom of a blasthole[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(5): 752–761.

[10] Jang H, Handel D, Ko Y, et al. Effects of water deck on rock blasting performance[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 112: 77–83.

[11] Huang Bingxiang, Li Pengfeng, Ma Jian, et al. Experimental investigation on the basic law of hydraulic fracturing after water pressure control blasting[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(4): 1321–1334.

- [12] Huang Bingxiang, Li Pengfeng. Experimental investigation on the basic law of the fracture spatial morphology for water pressure blasting in a drillhole under true triaxial stress[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(4): 1699–1709.
- [13] Talhi K, Bensaker B. Design of a model blasting system to measure peak P-wave stress[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2003, 23(6): 513–519.
- [14] Itoh S, Kira A, Kubota S, et al. Optical study of underwater explosion of high explosive[J]. Journal of the Japan Explosives Society, 1995, 56(5): 181–187.
- [15] Kira A, Fujita M, Itoh S. Underwater explosion of spherical explosives[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 85(1/2/3): 64–68.
- [16] Yan Guobin, Yu Yalun. Numerical simulation of air and water medium decoupling charge blasting[J]. Engineering Blasting, 2009, 15(4): 13–19. [闫国斌, 于亚伦. 空气与水介质不耦合装药爆破数值模拟[J]. 工程爆破, 2009, 15(4): 13–19.]
- [17] Chong Yupei, Xiong Yanlin, Qi Yanjun. Simulation study of optimization on the axial uncoupling charging structure[J]. Engineering Blasting, 2018, 24(2): 1–7. [种玉配, 熊炎林, 齐燕军. 轴向不耦合装药结构形式优化仿真研究[J]. 工程爆破, 2018, 24(2): 1–7.]
- [18] Liu Migong, Wang Hao, Lin Daneng, et al. Analysis of water medium decoupling ratio and position effect of axial decoupling charge structure[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(1): 93–101. [刘牧共, 王浩, 林大能, 等. 轴向不耦合装药结构水介质不耦合系数及位置效应分析[J]. 工程爆破, 2023, 29(1): 93–101.]
- [19] Yang Yuezong, Shao Zhushan, Xiong Xiaofeng, et al. Comparison of radial and axial uncoupled charge in rock blasting[J]. Blasting, 2018, 35(4): 26–33. [杨跃宗, 邵珠山, 熊小峰, 等. 岩石爆破中径向和轴向不耦合装药的对比分析[J]. 爆破, 2018, 35(4): 26–33.]
- [20] Li Xiaojing, Zhang Xiangyang, Zhang Huaken, et al. Numerical simulation of blasting damage distribution characteristics of eccentric decouple charge[J]. Journal of Shandong Jianzhu University, 2022, 37(1): 8–15. [李晓静, 张向阳, 张化恳, 等. 偏心不耦合装药爆破损伤分布特征数值模拟[J]. 山东建筑大学学报, 2022, 37(1): 8–15.]
- [21] Shi Weisheng. Numerical simulation and theory study of rock blasting without interaction charge[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2004: 26–40. [史维升. 不耦合装药条件下岩石爆破的理论研究和数值模拟[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2004: 26–40.]
- [22] Wang Lichuan, Zhang Xuemin, Ma Mingzheng, et al. 3D numerical simulation of tunnel blasting vibration laws under axial uncoupled charge with water medium[J]. Modern Tunneling Technology, 2018, 55(2): 96–102. [王立川, 张学民, 马明正, 等. 隧道爆破水介质轴向不耦合装药振动规律三维数值模拟研究[J]. 现代隧道技术, 2018, 55(2): 96–102.]
- [23] Qian Likun, Lin Daneng, Liu Yishuo, et al. Numerical simulation of decoupling effect of axial water medium at the bottom of hole[J]. Mining Technology, 2011, 11(5): 103–106. [钱立坤, 林大能, 刘医硕, 等. 孔底轴向水介质不耦合效应的数值模拟[J]. 采矿技术, 2011, 11(5): 103–106.]
- [24] Yang Renshu, Zuo Jinjing. Experimental study on directional fracture blasting of cutting seam cartridge[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019(1): 1085921.
- [25] Gao Xiangtao. Study on dynamic behavior of detonation impact of slotted charge[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2013. [高祥涛. 切缝药包爆炸冲击动力学行为研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2013.]
- [26] Yang Renshu, Gao Xiangtao, Chen Cheng, et al. Experimental study on blast wave propagation mechanisms of split-tube charge holders[J]. Journal of China Coal Society, 2014, 39(8): 1434–1440. [杨仁树, 高祥涛, 陈程, 等. 切缝药包爆炸波传播机制试验研究[J]. 煤炭学报, 2014, 39(8): 1434–1440.]
- [27] Zuo Jinjing. Experimental study on sectional cut blasting and directional fracture damage control of vertical shaft deep hole[D]. Beijing: China University of Mining & Technology, Beijing, 2020. [左进京. 立井深孔分段掏槽与周边定向断裂损伤控制试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2020.]
- [28] Wang Yanbing, Kong Weiwen, Zuo Jinjing, et al. Experimental and numerical analysis of dynamic action evolution of blast shock wave and detonation gas[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(S1): 248–260. [王雁冰, 孔维文, 左进京, 等. 爆炸冲击波和爆生气体的动态作用演化机制的实验与数值分析[J]. 煤炭学报, 2024, 49(S1): 248–260.]

Stress Evolution Analysis of Axial Water Uncoupled Charge Structure Blasting in Air Flow Field

WANG Yanbing¹, KONG Weiwen¹, WANG Dongchen¹, YANG Liu¹, HAO Xianjie²

(1. School of Mechanics and Architecture Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China;

2. School of Energy and Mining Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract:

Objective Currently, most studies on decoupled charges that use water as a coupling medium focus on rock damage and crack propagation. The impact of shock wave propagation and the water medium on the blasting effect is generally reflected through the damage observed in rock specimens. This

study investigates the propagation of shock waves and blast products when a water-decoupled charge structure detonates in an air field. In addition, it analyzes the pressure and equivalent stress around the borehole to examine the blasting behavior of axial water-coupled charge structures in an air field.

Methods First, various axial water decoupling charge structures were designed, and the propagation images of shock waves and blast products, as well as the shock wave pressures at fixed positions, were obtained when the charge structures were detonated in an air field by using a high-speed schlieren system and an overpressure testing system. The propagation speed time curves of the shock waves and blast products in the schlieren field were obtained by marking the shock wave front and the blast product boundaries in the images. The study summarized the influence patterns of the water coupling position on the blasting effect by analyzing the charge structures under different conditions. Numerical simulations were conducted to obtain the shock wave pressure values along the vertical and horizontal directions and at various positions along the borehole axis. Computational models for different charge structures were established using the ANSYS finite element numerical simulation software. The detonation process was simulated numerically, and the simulation results were integrated with the schlieren experimental results to determine the evolution of the propagation speed and pressure of the explosive shock waves in the air flow field and the pressure distribution inside the charge.

Results and Discussions The results obtained from the schlieren system and the overpressure testing system for different water coupled charge structures in field experiments were as follows: For Structures 1[#]~3[#], the maximum shock wave speeds in the horizontal direction were 419.5, 411.1, and 438.6 m/s, respectively. Structure 4[#] generated two shock waves with maximum propagation speeds of 403.5 and 398.3 m/s. The decay trends of the shock wave speeds in the vertical direction for Structures 1[#]~3[#] were similar. The shock wave speed in the vertical direction rapidly decayed from about 600 m/s to about 480 m/s within 60 μs after initiation, before separating from the blast products. After separation, the shock wave speed decayed more slowly and gradually decreased to about 430 m/s before stabilizing. In contrast, the maximum speeds of the two shock waves in Structure 4[#] were lower than those recorded for the other three structures. The overpressure peaks in the horizontal direction for Structures 1[#]~4[#] were 567.80, 464.76, 709.12, and 387.73 Pa, respectively. Structure 2[#] displayed the lowest overpressure peak among Structures 1[#]~3[#], while the overpressure peak of Structure 3[#] was 34.46% higher than that of Structure 4[#]. The overpressure peaks in the vertical direction for Structures 1[#]~4[#] were 592.8, 655.8, 606.9, and 520.5 Pa, respectively. In the numerical simulations, pressure values for different water coupled charge structures were obtained from measurement points arranged in the vertical direction, horizontal direction, and within the borehole wall. For Structure 1[#], the peak pressure at measurement point 2 was 207.62 kPa, and at measurement point 5 it was 137.97 kPa, representing a decrease of 33.55%. For Structure 2[#], the peak pressure at measurement point 2 was 300.40 kPa, and at measurement point 5 it was 142.80 kPa, representing a decrease of 52.46%. For Structure 3[#], the pressure decrease was 32.84%, and for Structure 4[#], it was 50.11%. Along the vertical borehole direction, Structures 1[#]~3[#] all reached pressure peaks at corresponding measurement points at approximately 0.033, 0.057, 0.087, 0.123, and 0.170 ms. The borehole wall pressure peak curve for Structure 1[#] displayed a bell-shaped distribution, while Structures 2[#] and 3[#] exhibited an M-shaped distribution, and Structure 4[#] showed a valley-shaped distribution. The analysis indicated that the water medium affected the shock wave pressure decay process. On the side with water coupling, the shock wave pressure decayed more slowly, which potentially increased the range of the explosion impact.

Conclusions The explosion energy of the axial water non-coupled structure is more concentrated along the vertical axis of the borehole compared to the borehole axis. After the detonation of the explosive, the shock wave propagates in a flattened spherical form into the air flow, with the blast products moving outward with the shock wave and gradually separating from it, which results in greater displacement in the vertical direction. The shock wave pressure generated by the explosion in the axial water non-coupled charge structure is influenced by the medium along its propagation path. The side with water coupling exhibits lower peak shock wave pressure, but the attenuation rate decreases more slowly over the same distance, and the shock wave duration remains longer, extending the blast effect range on that side. The position of the charge segment in the axial water non-coupled structure affects the blasting performance. The borehole wall pressure in the charge segment is substantially higher than that in the water medium segment, and the peak pressure decreases with increasing distance from the charge segment. Therefore, the damage primarily occurs within the charge segment. The damage range can be effectively controlled by modifying the number, length, and position of the explosives in the charge structure.

Key words: high-speed schlieren; axial charging; water decoupling; pressure of bore wall; ANSYS AUTODYN

(编辑 周璇)

引用格式: Wang Yanbing, Kong Weiwen, Wang Dongchen, et al. Stress evolution analysis of axial water uncoupled charge structure blasting in air flow field[J]. Advanced Engineering Sciences, 2026, 58(2): 239–252. [王雁冰, 孔维文, 汪东宸, 等. 轴向水不耦合装药结构爆破空气流场应力演化分析[J]. 工程科学与技术, 2026, 58(2): 239–252.]