

水中爆炸对围岩增耦的实验研究

王占江, 蔡宗义, 郑学锋, 朱玉荣

(西北核技术研究所, 西安 710024)

[摘要] 为研究水中爆炸对围岩的增耦, 在一个直径 1.6 m 的水泥砂浆半球体装置上, 将其中中心预留的直径 0.3 m 的腔室内注水和置入水泥砂浆芯体, 对比性地进行了一系列的 1.00 g TNT (2,4,6—三硝基甲苯) 当量的填实和空腔爆炸实验。水泥砂浆球表运动测量数据表明, 与水泥砂浆中的空腔解耦相比, 水中空腔爆炸的解耦效果较差, 尤其水腔中爆炸可大大增强爆炸能量的耦合。可以推断, 水下爆炸会明显增强围岩中的爆炸应力波强度, 近水域中的空中爆炸也可能会增强围岩中的爆炸能耦合, 因而相对于围岩和堤坝中同距离、同药量的爆炸来讲, 所引起的破坏危险更大。

[关键词] 水下爆炸; 围岩增耦; 水泥砂浆; 应力波; 空腔解耦

[中图分类号] TD235.4 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2009)04-0046-04

1 前言

江、河、湖、海、水库等的堤坝以及港口、码头、船闸的抗爆能力是工程安全与防护研究中的重要课题, 涉及到水下爆炸、地下爆炸及其水域附近的空中爆炸等所产生的爆炸能量耦合与传播。

爆炸源区的介质特性是爆炸能量向外辐射的决定因素。空腔解耦爆炸^[1-3]就是利用空气冲击波的快速衰减特性而降低了围岩中的能量耦合率; 相反, 水是一种典型的增耦介质, 水中爆炸及近水域中的空中爆炸, 均会激发强烈的水中冲击波, 并耦合进入围岩中, 在一定条件下, 它所引起的围岩运动速度和位移会远大于单纯围岩介质中同距离处相同当量爆炸所产生的运动速度和位移, 因而可能造成更大的破坏或灾害。

1975—1979年, 前苏联曾在岩盐中做过 6 次非常小的核爆炸, 当量范围为 0.01~0.5 kt, 这 6 次试验都是在 1968 年一次 25 kt 的核爆炸所形成的等效球半径为 28.9 m 的空腔中进行的。由于空腔中充满了水, 这 6 次很小当量的核爆炸实际上不是空腔解耦核爆炸, 相反, 在接近充水空腔的最低响应频率

上反而增强了地震耦合^[4-7]。

为研究水中爆炸波引起的围岩中应力波强度和特征, 了解有关增耦的基本现象, 在一个直径为 1.6 m 的水泥砂浆浇筑的半球体装置中, 进行了水腔中和水泥砂浆中的克级药量化爆模拟实验。

2 实验装置^[8,9]

如图 1 所示, 水泥砂浆半球体装置主体是用 625 号水泥特制的高强度材料, 容重为 2.31 g/cm³, 抗压强度为 82 MPa, 抗拉强度为 7.8 MPa, 球体中的弹性纵波速度为 4.34 km/s, 其冲击压缩特性与岩石较接近^[10]。

为防止爆炸导致水泥砂浆装置主体被破坏, 在其中心预留了直径 30 cm 的腔体, 用来放置安装有炸药球的可替换的水泥砂浆芯体或其他材料。实验用太安炸药球直径为 1 cm, 当量为 1.00 g TNT, 用外径为 1 mm 的柔爆索从球心引爆。实验时, 当在腔体中置入水泥砂浆芯体时, 其与腔体之间的缝隙用水实现波的耦合传播。

通过测量粘贴在球表不同方位点上铝杆中的纵向应变, 按照一维杆中应力波传播的原理可换算得

[收稿日期] 2008-12-17

[作者简介] 王占江(1961-), 男, 河北张北县人, 博士, 西北核技术研究所研究员, 主要从事地下爆炸力学效应和材料力学方面的研究;
E-mail: wzhj_nint@163.com

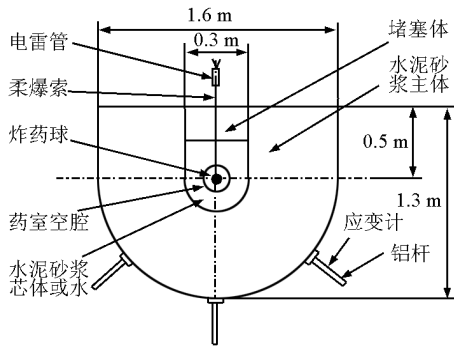


图1 水泥砂浆球体装置实验原理图

Fig. 1 Schematic of cement mortar sphere apparatus

3 结果分析

进行了两组 1.00 g TNT 当量的化爆模拟实验。第一组,在水泥砂浆球体中心的一个直径为 30 cm 的大腔体中注满水,将药球置于水中爆炸,或将药球先放入一个低强度球形薄壁容器中,再将容器置于水中爆炸。水中爆炸波到达腔体内表面后在水泥砂浆球体中激发出一个向外传播的应力波,共实验 6 炮。第二组,以一系列包含着一个不同直径球腔的直径为 30 cm 的水泥砂浆浇筑的芯体置入水泥砂浆半球体内的大腔体中,芯体中最小尺寸的球腔直径等于药球直径,这就是水泥砂浆中的填实爆炸,其余则为水泥砂浆中的空腔爆炸,共实验 7 炮。表 1 和表 2 分别给出了水中和水泥砂浆中所有填实和空腔爆炸的水泥砂浆球表运动速度、位移和时间特征值等实验数据。图 2 和图 3 各给出了一炮水中填实和空腔爆炸时的实测波形,图 4 给出了水泥砂浆中填实爆炸时的实测波形。图 5 比较了水中和水泥砂浆中填实和空腔爆炸的球表运动速度和位移。

到与球体中的应力波相对应的球体自由表面的运动速度,该运动速度相当于水泥砂浆中同距离自由场粒子速度的两倍。实验模型为一维球对称,测点布设在半球体下部区域,在上部区域的非球对称影响到来前,可测得完整的人射波形,这样就可将不同方位测点的数据进行平均处理。

表 1 水中 1.00 g TNT 炸药球填实和空腔爆炸实验结果

Table 1 A set of experimental data of tamped and cavity decoupling explosions of 1.00 g TNT in water

炮号	空腔与药球 半径比	比例空 腔半径 $/(m \cdot kt^{-1/3})$	速度峰值 $/(m \cdot s^{-1})$	位移峰值/ μm	上升沿 $/\mu s$	半高宽 $/\mu s$	正相脉 宽/ μs	填实与空腔 爆炸速度 比值	填实与 空腔爆炸 位移比值
WT-1g	1	5	0.392	6.961	10.0	17.0	42.6	1	1
WD2.9-1g	2.9	14.5	0.263	4.991	12.0	20.1	37.7	1.49	1.39
WD3.7-1g	3.7	18.5	0.216	3.458	9.5	16.4	36.2	1.81	2.01
WD6-1g	6	30	0.130	1.695	9.3	11.8	30.5	3.02	4.11
WD8.4-1g	8.4	42	0.089 5	1.089	9.0	11.6	29.9	4.38	6.39
WD10.8-1g	10.8	54	0.079 6	1.049	9.6	11.8	33.3	4.92	6.64

表 2 水泥砂浆中 1.00 g TNT 药球填实和空腔爆炸实验结果

Table 2 A set of experimental data of tamped and cavity decoupling explosions of 1.00 g TNT in cement mortar

炮号	空腔与药球 半径比	比例空 腔半径 $/(m \cdot kt^{-1/3})$	速度峰值 $/(m \cdot s^{-1})$	位移峰值/ μm	上升沿 $/\mu s$	半高宽 $/\mu s$	正相脉 宽/ μs	填实与空腔 爆炸速度 比值	填实与 空腔爆炸 位移比值
CT-1g-1	1	5	0.073 2	0.900	10.9	12.9	21.8		
CT-1g-2	1	5	0.078 9	1.110	3.5	14.7	26.8	1	1
CD1.5-1g	1.5	7.5	0.026 3	0.280	10.2	10.5	20.5	2.89	3.59
CD2-1g	2	10	0.016 8	0.132	8.8	8.1	17.5	4.53	7.61
CD3-1g	3	15	0.001 44	0.012 5	6.3	5.4	12.3	52.8	80.4
CD4-1g	4	20	0.000 758	0.008 36	7.6	11.8	18.4	100.3	120.2
CD5-1g	5	25	0.000 446	0.005 43	8.2	9.6	18.2	170.5	185.1

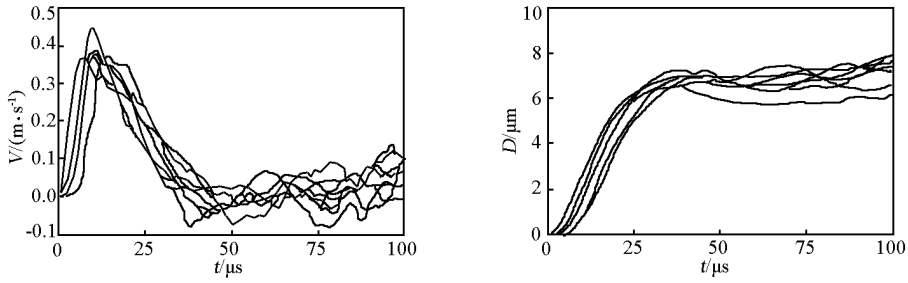


图2 水中 1.00 g TNT 填实爆炸时水泥砂浆球表运动速度和位移波形(WT-1g)

Fig. 2 The velocity and displacement profiles by a tamped explosion of 1.00 g TNT in water(WT-1g)

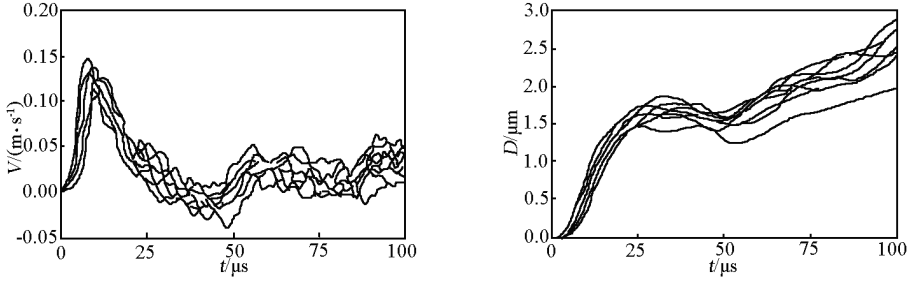


图3 水中 1.00 g TNT 空腔爆炸时水泥砂浆球表运动速度和位移波形(WD6-1g)

Fig. 3 The velocity and displacement profiles by a cavity explosion of 1.00 g TNT in water(WD6-1g)

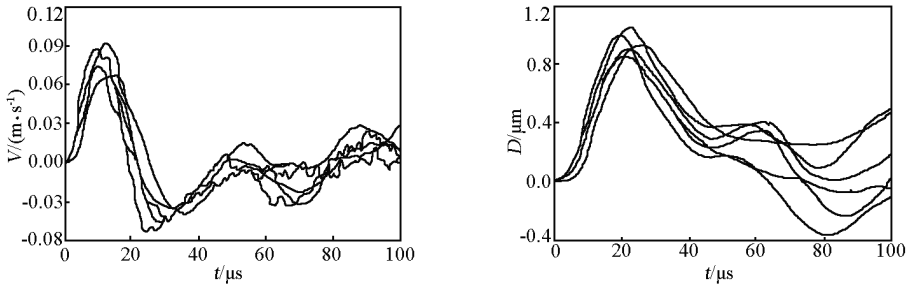


图4 水泥砂浆中 1.00 g TNT 填实爆炸时水泥砂浆球表运动速度和位移波形(CT-1g)

Fig. 4 The velocity and displacement profiles by a tamped explosion of 1.00 g TNT in cement mortar(CT-1g)

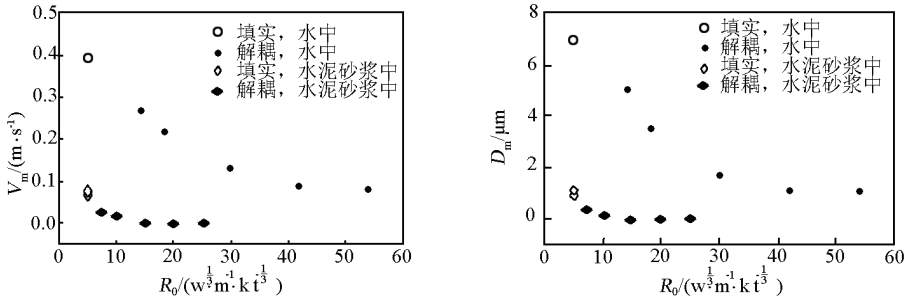


图5 水中和水泥砂浆中填实和空腔解耦爆炸的球表运动速度和位移峰值

Fig. 5 Peak velocity and peak displacement for tamped and cavity decoupled explosions in water and in cement mortar

笔者进行了微弱的高频应力波测量,尽管水泥砂浆的非均匀性和本底干扰的影响较大,但在归一化条件下,水泥砂浆球体中的 1.00 g TNT 炸药球填实爆炸的粒子速度峰值和粒子比位移峰值的不确定

度与美国薄胶泥(模拟硬岩)实验的相当^[11~13],与国内外当量从几 kt 到几十 kt 的核试验结果基本一致^[9],而且反映出了不同源区条件爆炸的力学效应差别和特征。

1) 水中填实爆炸大大增强了水泥砂浆中爆炸能量的耦合,对比充水腔室中和水泥砂浆芯体中 1 g TNT 的填实爆炸,耦合进入水泥砂浆球体中的应力波幅度差别很大(速度峰值相对比值约为 5、位移峰值相对比值约为 7),脉宽差别也很明显(相对比值约为 2);

2) 水泥砂浆中的空腔解耦效果很明显,空腔越大,爆炸能量耦合率越低,在比例空腔半径达到 $25 \text{ m/kt}^{1/3}$ 时,解耦效果已快趋于饱和,这与花岗岩中实验室化爆模拟的结果^[9]是相吻合的;

3) 水中空腔爆炸的解耦效果较差,在比例空腔半径达到 $54 \text{ m/kt}^{1/3}$ 时,解耦效果趋于饱和,此时的比例空腔半径是水泥砂浆的两倍以上,但解耦效果却低约一个量级以上,其应力波幅度与水泥砂浆中同药量填实爆炸的相当;

4) 充水腔室中的填实和空腔爆炸时的应力波正相脉宽明显大于水泥砂浆中的应力波正相脉宽,但二者的应力波频谱变化趋势具有相似规律,即随空腔增大先向高频方向发展,而后趋于不变,或者说变化很缓慢。

作为补充,在水泥砂浆芯体中设置了半径为 20 mm 的水腔,进行了 1 g 药量的实验,此时的水腔比例半径为 $20 \text{ m/kt}^{1/3}$,球表的应力波幅值约是水泥砂浆中 1 g 药量填实爆炸的 2 倍,约是水腔比例半径为 $150 \text{ m/kt}^{1/3}$ 的注水腔室中 1 g 药量填实爆炸的 0.4 倍。用有机玻璃进行了类似的水腔实验,同样显示出水腔的存在大大增强了周围固体介质中爆炸能量的耦合。这些均揭示出爆炸源周围的水腔增强了围岩中的爆炸能耦合,与前苏联岩盐中核爆的水腔比例半径为 $36 \sim 134 \text{ m/kt}^{1/3}$ 的地震增耦现象一致。

4 结语

在直径 1.6 m 的水泥砂浆半球体中心预留腔室内,通过注水和置入水泥砂浆芯体,分别进行了两组系列的克级药量填实和空腔爆炸实验,均测量水泥砂浆球体表面的运动速度,通过对比分析来研究水中爆炸波向围岩中的耦合。测量数据表明,与水泥砂浆中的空腔解耦相比,水中空腔爆炸的解耦效果较差,尤其水腔中填实爆炸和较小空腔爆炸均可大大增强周围水泥砂浆中爆炸能量的耦合。

可以推断,水中填实爆炸和较小空腔爆炸、以及近水域中的空中爆炸均会明显增强围岩中的爆炸应力波强度,因而相比于围岩中同样距离、同药量的爆炸来讲,所引起的破坏危险更大,故对于江、河、湖、

海、水库等的堤坝以及港口、码头、船闸的工程安全与防护设计和抗爆能力评估,尤其要注意在水中和水面上方近距离爆炸时通过水介质耦合进入坝体和围岩的应力波所引起的破坏作用。空气、岩石和水中爆炸时,其对应的强冲击波的衰减指数分别约为 3.0, 2.0 和 1.1,结合材料的强度、可压缩性和波的传播路径等,可以定性和半定量地解释以上关于水对围岩中爆炸波的增耦作用、以及水中空腔爆炸的解耦效果较差等问题。

致谢:文章得到了林俊德院士和李孝兰研究员的指导,在此表示感谢。

参考文献

- [1] Latter A L, Lelevier R E, Martinelli E A, et al. A method of concealing underground nuclear explosions [J]. J Geophys Res, 1961, 66(3):943-946
- [2] Herbst R F, Werth G C, Springer D L. Use of large cavities to reduce seismic waves from underground explosion [J]. J Geophys Res, 1961, 66(3):959-978
- [3] Rodean H C. Cavity decoupling of nuclear explosions [R]. UCRL-51097, 1971
- [4] Sykes L R. Yields of underground nuclear explosions at Azgir and Shagan River, USSR and implications for identifying decoupled nuclear testing in salt [R]. AD-A250971, 1991
- [5] Sykes L R. Dealing with decoupled nuclear explosions under a comprehensive test ban treaty [R]. AD-A290740, 1994
- [6] Murphy J R, Kitov I O, Stevens J L, et al. Analysis of the seismic characteristics of U. S. and Russian cavity decoupled explosions [R]. AD-A293244, 1994
- [7] Murphy J R, Kitov I O, Rimer N, et al. Further studies of the seismic characteristics of Russian explosions in cavities: Implications for cavity decoupling of underground nuclear explosions [R]. AD-A305955, 1996
- [8] 王占江,李孝兰,林俊德,等. 微量爆炸激发的水泥砂浆球表运动测量和分析 [J]. 固体力学学报, 2002, 23(专辑):119-123
- [9] 王占江. 岩土中填实与空腔解耦爆炸的化爆模拟实验研究 [D]. 长沙:国防科技大学, 2003
- [10] 王占江,李焰,张德志,等. 高强度水泥砂浆的一维应变动力学特性 [J]. 爆炸与冲击, 1999, 13(增刊):344-348
- [11] Cizek J C, Florence A L, Keough D D, et al. Experimental study of the effects of faults on spherical wave propagation, phase I [R]. AD-A081080, 1979
- [12] Cizek J C, Florence A L. Laboratory investigation of containment in underground nuclear tests [R]. AD-A130292, 1982
- [13] Cizek J C, Florence A L. Laboratory investigation of containment of underground explosions [R]. AD-A151712, 1983

(下转 90 页)