DOI：10.11858/gywlxb.20261170

两次连续爆炸作用下方钢管位移的影响因素

王万月，耿少波，刘亚玲，高营，黄宇劼，薛建英，韩云山

（中北大学环境与安全工程学院，山西 太原 030051）

摘 要：为研究两次连续爆炸作用下方钢管迎爆面的位移响应，在炸药总量相同的前提下，将炸药分两发，其质量比分别为 1：9，3：7，5：5，7：3 和 9：1，起爆时间间隔分别为 500 μs，750 μs，1000 μs，1250 μs，1500 μs，1750 μs 和 2000 μs，采用数值计算方法分析炸药方面因素对方管迎爆面最大竖向位移的影响。研究结果表明：起爆时间间隔较小时，两次爆炸时方管竖向位移比单发爆炸的大 18.6%，起爆时间间隔较大时，两次爆炸方管竖向位移比单发爆炸的小 22.9%；起爆时间间隔 500 μs~2000 μs 范围内，炸药质量比 1：9 的方管竖向位移最小；除起爆时间间隔 1000 μs 和炸药质量比 9：1 的其它工况，随着炸药质量比的增大竖向位移逐渐变大，当炸药质量比 7：3 时，竖向位移相对较大，且随着起爆时间间隔增大，方管竖向位移逐渐减小。对方管两次爆炸，质量较大的炸药先爆炸时，方管竖向位移比质量较小的炸药先爆炸的大，且随着起爆时间间隔的增大，起爆顺序对竖向位移的影响越来越大，最大高达 33.1%。

关键词：两次连续爆炸；方管；炸药质量比；起爆时间间隔；起爆顺序；竖向位移

中图分类号：TD235; O521.9　　**文献标识码：**A

现代战争中集束炸弹横空出世，载有数枚子弹的母弹发射后，在极短的时间内大量子弹投射至被爆目标区域并迅速爆炸，对被爆目标多次轰炸造成毁灭性的杀伤力和破坏力[1-3]。关乎战局的重要建筑往往是集束弹的重点打击对象，如科索沃战争中美国使用装有200枚子弹的集束弹攻击对方电力设施致其电力瘫痪[4],俄乌冲突期间，俄罗斯首次使用RBK-500型500公斤集束弹对顿涅茨克南部一定居点进行大规模空袭使其重要设施严重毁坏[5]。2024年6月乌克兰使用装备集束弹药战斗部的陆军战术导弹系统对克里米亚的塞瓦斯托波尔市发动空袭，造成4名平民死亡，151人受伤[6]。

方管是建筑结构中常用构件，其在单发爆炸作用下的动态响应和损伤研究相对较多[7-10]，在多发爆炸作用的研究相对较少。BAMBACH[11]对73根铝合金方管进行了横向单发爆炸加载试验，基于冲击荷载作用下实心金属梁变形理论，考虑方管局部变形能量吸收和截面抗弯模量减小的情况下，推导出爆炸荷载作用下空方管的弯曲变形经验公式。WEGENER等[12]对单发爆炸作用下方管的变形特点进行了分析，根据方管爆炸试验结果，基于局部变形和整体变形不耦合的假设，对方管的局部变形和整体变形进行了有效预测。JAMA等[13]对53根方管进行单发爆炸试验，提出塑性屈服机理，指出方管吸收的能量中有超过50%用于局部变形，其余能量用于整体弯曲变形。周游等[14]对薄壁方管进行了单次和两次爆炸（起爆时间间隔足够长）试验和数值模拟，分析了有损伤和无损伤方管分别在相同炸药量作用下的变形差异，与本文拟研究的在总炸药量相同的条件下，方管在极短的时间内经历连续两次爆炸作用的抗爆研究具有明显的不同。

鉴于集束炸弹爆炸的复杂性及其作用建筑结构及构件的研究几乎空白，本文拟先进行集束炸弹两次连续爆炸探索性研究，即在总炸药量相同的前提下，将总炸药分为两份，其质量比分别为 1：9，3：7，5：5，7：3 和 9：1，第一发炸药起爆后分别在 500 μs，750 μs，1000 μs，1250 μs，1500

通信作者：耿少波（1982－），男，博士，副教授，主要从事桥梁结构爆炸荷载和防护设计研究. E-mail：gengshaobo@nuc.edu.cn

限制录用，非最终出版稿

μs，1750 μs 和 2000 μs 时第二发炸药起爆。由于实验室开展特定起爆时间间隔的连续爆炸难度较大，本文完成了方管单发爆炸试验，采用 LS-DYNA 数值分析软件对试验工况进行数值计算，为开展两次爆炸作用下方管响应有限元模型和材料模型提供准确的参数，然后采用数值方法，分析爆炸次数，炸药质量比，起爆时间间隔和起爆顺序对方管迎爆面最大竖向位移的影响，为方管在集束炸药作用下的抗爆性能研究提供参考。

1 方管单发爆炸试验和数值计算

1.1 爆炸试验

1.1.1 试验设计

方管单发爆炸试验装置如图1所示。方管为长1.5 m钢管，两端各伸入固定支座0.1 m，有效长度1.3 m，截面正方形，外径边长0.07 m，厚度3.75 mm，密度7.8×10³ kg/m³，弹性模量2.1×10⁵ MPa，屈服强度2.69×10² MPa，抗拉强度4.75×10² MPa，伸长率26%。混合炸药TNT和RDX质量比19：81，密度1.75×10³ kg/m³，爆轰速度8.3×10³ m/s，爆压3.2×10⁴ MPa，总质量78.15 g，TNT当量116.68 g，药柱水平置于方管跨中正上方68.5 mm处，炸药采用电子雷管一端起爆。

1.1.2 试验结果

图 2 为方管变形图，由图知方管迎爆面出现局部凹坑，凹坑长度 206.2 mm，最大竖向位移 27.5 mm，两侧棱向中间内扣，侧棱最小距离 53.5 mm。

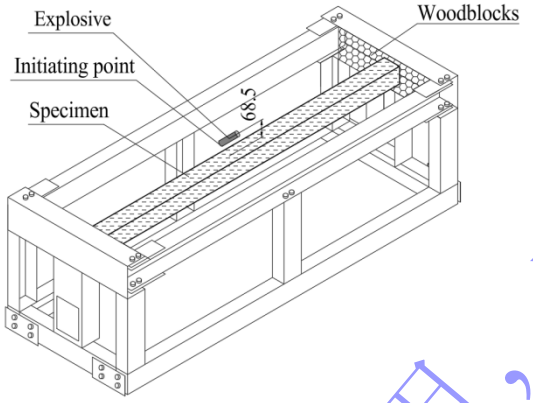


图1 方管单发爆炸试验 单位：mm

Fig.1 Single detonation test of the square tube (Unit: mm)

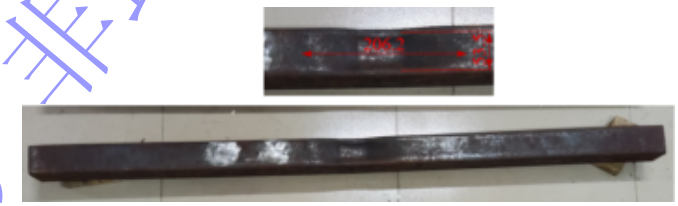


图2 方管变形 单位：mm

Fig.2 Square tube deformation (Unit: mm)

1.2 数值计算

1.2.1 数值计算模型

因计算模型对称，所以仅建立1/2有限元模型。方管选用Shell壳单元，采用Lagrange算法。空气域长宽高分别为1.32 m、0.3 m和0.8 m，空气域包裹整个方管，空气和炸药选用Solid 164实体单元，采用ALE算法。方管网格尺寸5 mm，7280个单元，炸药和空气网格尺寸5~6 mm，单元数分别为272和2206141。方管两端采用*BOUNDARY_SPC_SET设置固支边界条件，空气6个面中除一对称面外其它5个面采用*BOUNDARY_NON_REFLECTING设置无反射边界。

1.2.2 材料模型及参数设置

TNT 和 RDX 混合炸药采用*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN（8#）材料模型及*EOS_JWL 状态方程，爆炸压力 p_e 表示为：

$$p_e = A\left(1-\frac{w}{R_1V}\right)e^{-R_1V}+B\left(1-\frac{w}{R_2V}\right)e^{-R_2V}+\frac{wE_e}{V} \tag{1}$$

式中，V 为单位体积装药产生的爆轰产物体积，E_e 为炸药初始单位体积内能，参数 A、B、R_1、R_2 及 w 由实验确定，其值见表 1。

空气采用*MAT_NULL（9#）材料模型及*EOS_LINEAR_POLYNOMIAL 状态方程，空气密度 1.29 kg/m³，空气压力 p_a 表示为：

最终采用，非最终出版稿

$$p_a = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E_a \quad (2)$$

$$\mu = \nu - 1 \quad (3)$$

$$C_4 = C_5 = K - 1 \quad (4)$$

式中，ν为任意时刻空气密度与初始空气密度比值，K 为空气绝热指数，E_a为气体单位体积内能，C_0~C_6 为空气状态方程参数，其值见表 2。

方管采用*MAT_PLASTIC_KINEMATIC（3#）弹塑性材料模型，动态屈服应力采用$1+\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{S_{\rm rc}}\right)^{1/S_{\rm rp}}$因子进行计算，其中$\dot{\varepsilon}$为应变率，$S_{\rm rc}$和 $S_{\rm rp}$为应变率参数，其值及泊松比 $P_{\rm r}$，切向模量 $E_{\rm tan}$，硬化因子 $B_{\rm eta}$ 设置见表 3。

表 1 TNT 和 RDX 混合炸药参数[15,16]

Tab.1 Parameters of TNT and RDX explosives

A/ MPa	B/ MPa	R_1	R_2	w	Initial internal energy per unit reference specific volume E_e/（J/m^3）
6.0341×10^6	9.9236×10^6	4.3	1.1	0.35	9.2×10^3

表 2 空气参数[17,18]

Tab.2 Parameters of Air

C_0	C_1	C_2	C_3	K	C_4	C_5	C_6	Initial internal energy per unit reference specific volume Ea/（KJ/m^3）
0	0	0	0	1.4	0.4	0.4	0	2.53×10^2

表 3 方管模型材料参数[19-21]

Tab 3 Parameters of the square tube

Poisson ratio $P_{\rm r}$	Tangent modulus $E_{\rm tan}$ /MPa	$B_{\rm eta}$	$S_{\rm rc}$	$S_{\rm rp}$
0.3	7.63	1.0	40	5

1.2.3 数值计算结果

图 3 为数值计算至 10000 μs 时方管竖向位移云图，方管迎爆面出现局部凹坑，凹坑长度 219.8 mm，比试验值 206.2 mm 大 6.6%。图 4 为方管迎爆面最大变形处竖向位移和侧棱横向位移时程曲线，由图知方管迎爆面最大竖向位移趋于 26.5 mm，比试验值 27.5 mm 小 3.60%。侧棱最大横向位移趋于 7.2 mm，即侧棱最小距离 55.6 mm，比实验值 53.5 mm 大 3.9%。

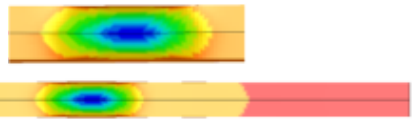
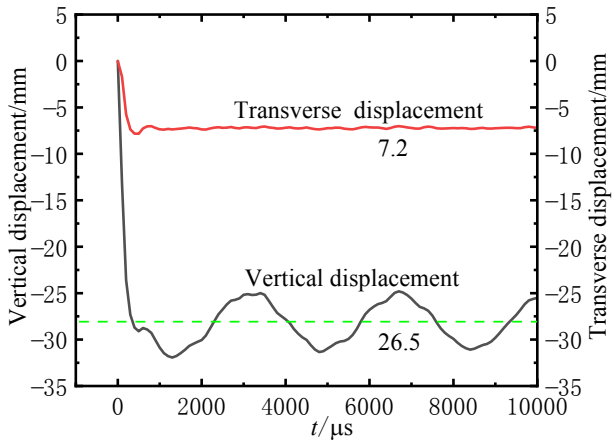


图3 方管竖向位移云图

Fig.3 Vertical displacement contours of the square tube



最新录用，非最终出版稿

图4 方管位移时程曲线

Fig.4 Displacement time history curve of the square tube

2 方管两次爆炸方案

受实验室条件限制，方管单发爆炸试验炸药量仅78.15 g，对方管两次爆炸，因炸药分成两份，当总炸药量较小时单份炸药量更少，方管迎爆面变形较小不利于分析爆炸次数、炸药质量比、起爆时间间隔和起爆顺序对方管跨中竖向位移的影响；而总炸药量过大时，方管迎爆面出现长裂缝[19]或破口[22]，裂缝或破口轴向和横向尺寸不易测量，且方管损伤需要裂缝或破口纵向横向尺寸两个参数衡量，经多次数值模拟，最终确定爆距500 mm时总炸药量700 g，TNT当量1045 g，此时方管迎爆面不仅发生明显竖向位移变形，且不会出现裂缝或破口。方管爆炸工况如表4所示，第一发和第二发炸药质量比分别为1：9，3：7，5：5，7：3和9：1，起爆时间间隔分别为500 μs，750 μs，1000 μs，1250 μs，1500 μs，1750 μs和2000 μs，两发炸药均位于方管跨中正上方，爆距均为500 mm。同时为了评估爆炸次数对方管迎爆面最大竖向位移的影响，本文的工况36是方管单发爆炸工况（即炸药质量比10：0，起爆时间间隔0 μs），炸药量同方管两次爆炸的总炸药量，即700 g，炸药布置和爆距均与两次爆炸的相同。

表 4 爆炸工况

Tab.4 Detonation conditions

Test	Explosive mass ratio	Detonation time interval/μs	Test	Explosive mass ratio	Detonation time interval/μs	Test	Explosive mass ratio	Detonation time interval/μs
1	1：9	500	13	5：5	1000	25	9：1	1500
2	3：7	500	14	7：3	1000	26	1：9	1750
3	5：5	500	15	9：1	1000	27	3：7	1750
4	7：3	500	16	1：9	1250	28	5：5	1750
5	9：1	500	17	3：7	1250	29	7：3	1750
6	1：9	750	18	5：5	1250	30	9：1	1750
7	3：7	750	19	7：3	1250	31	1：9	2000
8	5：5	750	20	9：1	1250	32	3：7	2000
9	7：3	750	21	1：9	1500	33	5：5	2000
10	9：1	750	22	3：7	1500	34	7：3	2000
11	1：9	1000	23	5：5	1500	35	9：1	2000
12	3：7	1000	24	7：3	1500	36	10：0	0

3 数值计算结果及影响因素分析

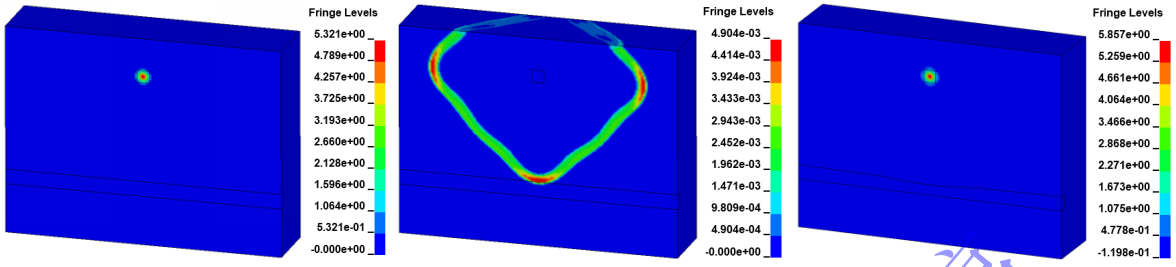
方管两次连续爆炸数值模拟时，先对第一发炸药、空气一和方管进行建模，导出 K 文件 a.k 后，采用*INITIAL_DETONATION 和*CONTROL_TERMINATION 设置第一发炸药起爆时间和计算终止时间（即第二发炸药起爆时间），采用 Typical LS-DYNA Analysis 启动模式读取 a.k 文件进行第一次爆炸计算并生成 d3dump01 文件。然后在已建好的模型基础上继续进行第二发炸药和空气二建模，导出 K 文件 b.k 后，采用*DELETE_PART 删除第一发炸药和空气一，采用*STRESS_INITIALIZATION 对方管应力初始化，设置第二发炸药起爆时间后，采用 Full Restart Analyais 启动模式读取 b.k 文件，并加载之前的 d3dump01 文件进行第二次爆炸计算。

3.1 数值计算结果

图 5 是工况 3 炸药质量比 5：5，起爆时间间隔 500 μs 超压云图。由图知炸药中心起爆 10 μs 时在第一发炸药处已清晰可见小球形爆炸冲击波，爆心处超压值最大，为 5.32×10^3 MPa。140 μs 时爆

最新录用，非最终出版稿

炸冲击波到达方管迎爆面，受正方体炸药形状影响，爆炸冲击波为非球面波，左右和下部冲击波面超压值最大，为 4.90 MPa。第二发炸药起爆后 10 μs 即 510 μs 时，在第二发炸药处可见如 10 μs 时的爆炸冲击波，爆心处超压值依然最大，只是受第一发炸药爆炸冲击波的影响，超压最值为 5.86×10^{3} MPa，且场内出现负压，最大负压值为 1.20×10^{2} MPa，同时可见在第一发炸药爆炸作用下方管迎爆面出现的较大竖向变形。

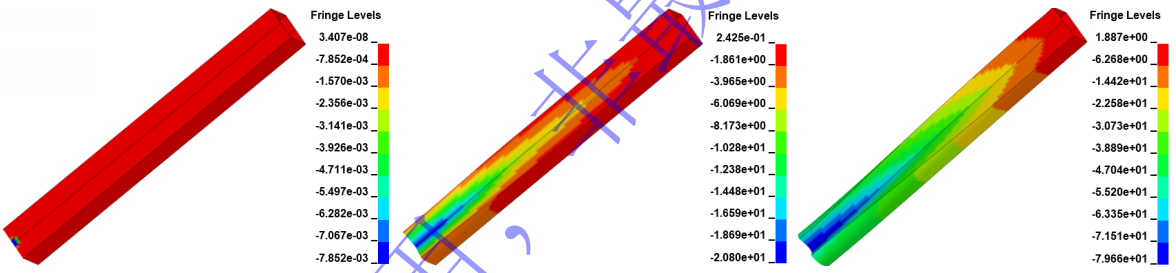


（a）10 μs　　（b）140 μs　　（c）510 μs

图 5 工况 3 超压云图

Fig.5 Overpressure contours for test 3

图 6 是工况 3 方管竖向位移云图。由图知 145 μs 时方管迎爆面较小范围内出现变形，最大竖向位移 7.9×10^{-3} mm。500 μs 时即第二发炸药刚开始起爆时受第一发爆炸冲击波的作用方管迎爆面变形区域变大，跨中处竖向位移最大为 20.8 mm，10000 μs 时方管迎爆面变形区域更大，方管跨中竖向位移最大为 79.7 mm。所有方管爆炸工况 10000 μs 时方管迎爆面跨中最大竖向位移如表 5 和图 7 所示。



（a）145 μs　　（b）500 μs　　（c）10000 μs

图 6 工况 3 方管竖向位移云图

Fig.6 Vertical displacement contours of the square tube for test 3

表 5 方管竖向位移

Tab.5 Vertical displacements of the square tube

Test	Explos-ive mass ratio	Detonation time interval/μs	Vertical displace-ment/mm	Test	Explos-ive mass ratio	Detonation time interval/μs	Vertical displace-ment /mm	Test	Explos-ive mass ratio	Detonation time interval/μs	Vertical displace-ment/mm
1	1：9	500	71.1	13	5：5	1000	75.2	25	9：1	1500	71.3
2	3：7	500	77.2	14	7：3	1000	78.9	26	1：9	1750	52.2
3	5：5	500	79.7	15	9：1	1000	74.0	27	3：7	1750	60.1
4	7：3	500	80.2	16	1：9	1250	70.0	28	5：5	1750	64.9
5	9：1	500	72.8	17	3：7	1250	72.5	29	7：3	1750	69.9
6	1：9	750	69.7	18	5：5	1250	74.0	30	9：1	1750	69.5

最新录用，非最终出版稿

7	3：7	750	76.8	19	7：3	1250	77.0	31	1：9	2000	52.1
8	5：5	750	77.7	20	9：1	1250	73.7	32	3：7	2000	54.1
9	7：3	750	79.8	21	1：9	1500	59.1	33	5：5	2000	60.1
10	9：1	750	74.1	22	3：7	1500	66.2	34	7：3	2000	66.3
11	1：9	1000	70.9	23	5：5	1500	69.6	35	9：1	2000	67.8
12	3：7	1000	75.4	24	7：3	1500	73.7	36	10：0	0	67.6

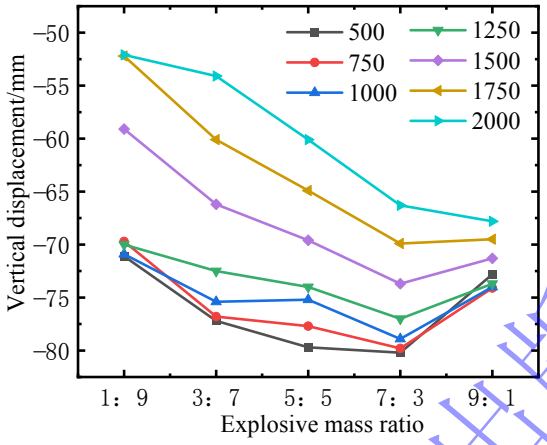


图 7 方管竖向位移

Fig.7 Vertical displacement of the square tube

3.2 爆炸次数

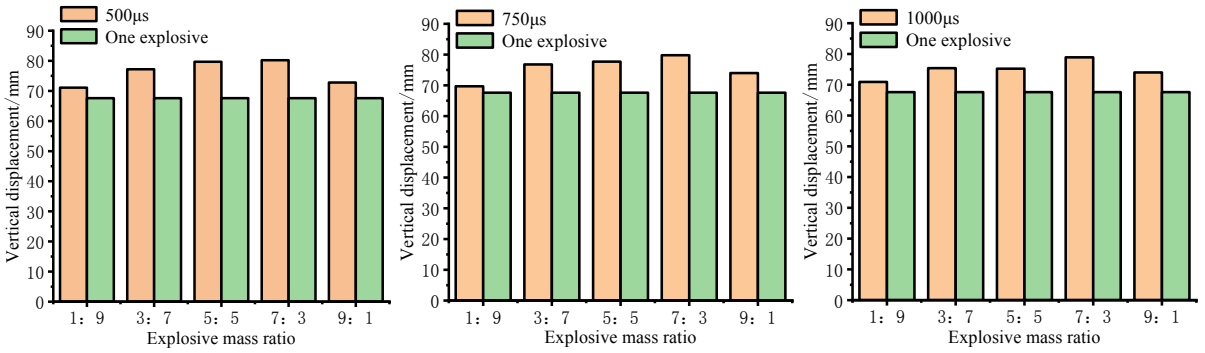
图 8 分别是起爆时间间隔 500 μs，750 μs，1000 μs，1250 μs，1500 μs，1750 μs 和 2000 μs，数值模拟至 10000 μs 时，炸药质量比分别为 1：9，3：7，5：5，7：3 和 9：1 时，方管迎爆面跨中竖向位移与单发爆炸的对比图。

由图 8（a）—图 8（d）和表 5 知起爆时间间隔 500 μs，750 μs，1000 μs 和 1250 μs 时，两次爆炸方管竖向位移均比单发爆炸的大。起爆时间间隔 500 μs，质量比为 1：9，3：7，5：5，7：3 和 9：1 时，方管竖向位移分别为 71.1 mm，77.2 mm，79.7 mm，80.2 mm 和 72.8 mm，比单发爆炸的大 5.2%，14.2%，17.9%，18.6%和 7.7%。起爆时间间隔 750 μs 时，竖向位移分别为 69.7 mm，76.8 mm，77.7 mm，79.8 mm 和 74.1 mm，比单发爆炸的大 3.1%，13.6%，14.9%，18.0%和 9.6%。起爆时间间隔 1000 μs 时，竖向位移分别为 70.9 mm，75.4 mm，75.2 mm，78.9 mm 和 74.0 mm，比单发爆炸的大 4.9%，11.5%，11.2%，16.7%和 9.5%。起爆时间间隔 1250 μs 时，竖向位移分别为 70.0 mm，72.5 mm，74.0 mm，77.0 mm 和 73.7 mm，比单发爆炸的大 3.6%，7.2%，9.5%，13.9%和 9.0%。

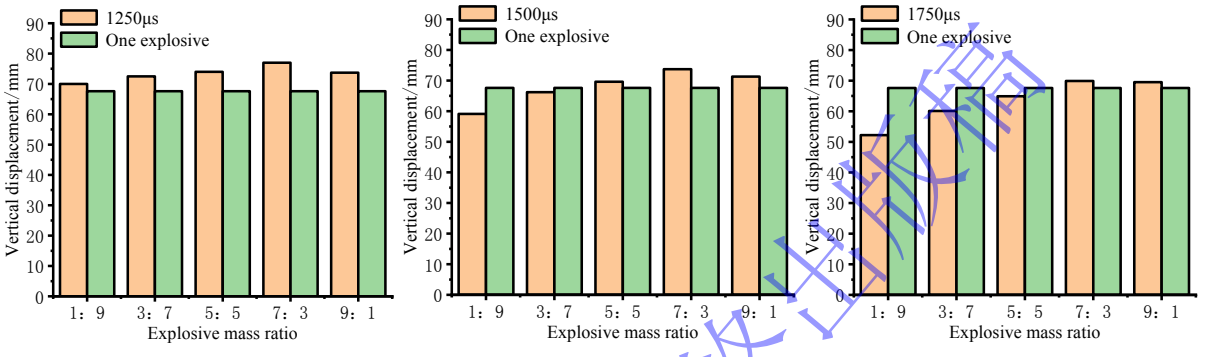
由图 8（e）—图 8（g）和表 5 知起爆时间间隔 1500 μs，1750 μs 和 2000 μs 时，两次爆炸方管竖向位移变小，且部分两次爆炸工况方管竖向位移比单发爆炸的大，部分两次爆炸工况的比单发爆炸的小。起爆时间间隔 1500 μs，质量比为 1：9 和 3：7 时，方管竖向位移分别为 59.1mm 和 66.2 mm，比单发爆炸的小 12.6%和 2.1%；质量比为 5：5，7：3 和 9：1 时，方管竖向位移分别为 69.6 mm，73.7 mm 和 71.3 mm，比单发爆炸的大 3.0%，9.0%和 5.5%。起爆时间间隔 1750 μs，质量比为 1：9，3：7 和 5：5 时，方管竖向位移分别为 52.2 mm，60.1 mm 和 64.9 mm，比单发爆炸的小 22.8%，11.1%和 4.0%；质量比为 7：3 和 9：1 时，方管竖向位移分别为 69.9 mm 和 69.5 mm，仅比单发爆炸的大 3.4%和 2.8%。起爆时间间隔 2000 μs，质量比为 1：9，3：7，5：5 和 7：3 时，方管竖向位移分别为 52.1 mm，54.1 mm，60.1 mm 和 66.3 mm，比单发爆炸的小 22.9%，20.0%，11.1%和 1.9%；质量比为 9：1 时，方管竖向位移为 67.8 mm，仅比单发爆炸的大 0.3%。

综上所述，受多因素影响两次爆炸时方管竖向位移可比单发的大 18.6%，也可比单发的小 22.9%，说明第一次爆炸冲击波对方管的冲击作用可减弱方管在第二次爆炸冲击波的抗爆能力，也可因炸药分为两份，两次爆炸冲击波能量均较单发的小，方管的抗爆能力比单发的更强。

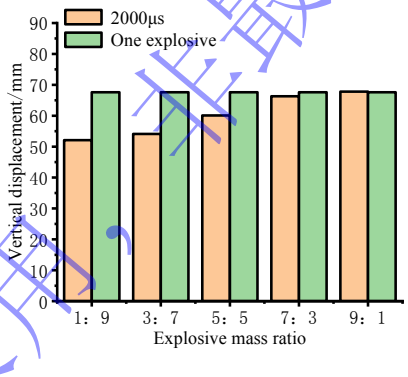
录用稿，非最终出版稿



（a）Detonation time interval 500 μs　（b）Detonation time interval 750 μs　（c）Detonation time interval 1000 μs



（d）Detonation time interval 1250 μs　（e）Detonation time interval 1500 μs　（f）Detonation time interval 1750 μs



（g）Detonation time interval 2000 μs

图 8 单发和两发爆炸方管竖向位移

Fig.8 Vertical displacements of the square tube for one explosion and two explosions

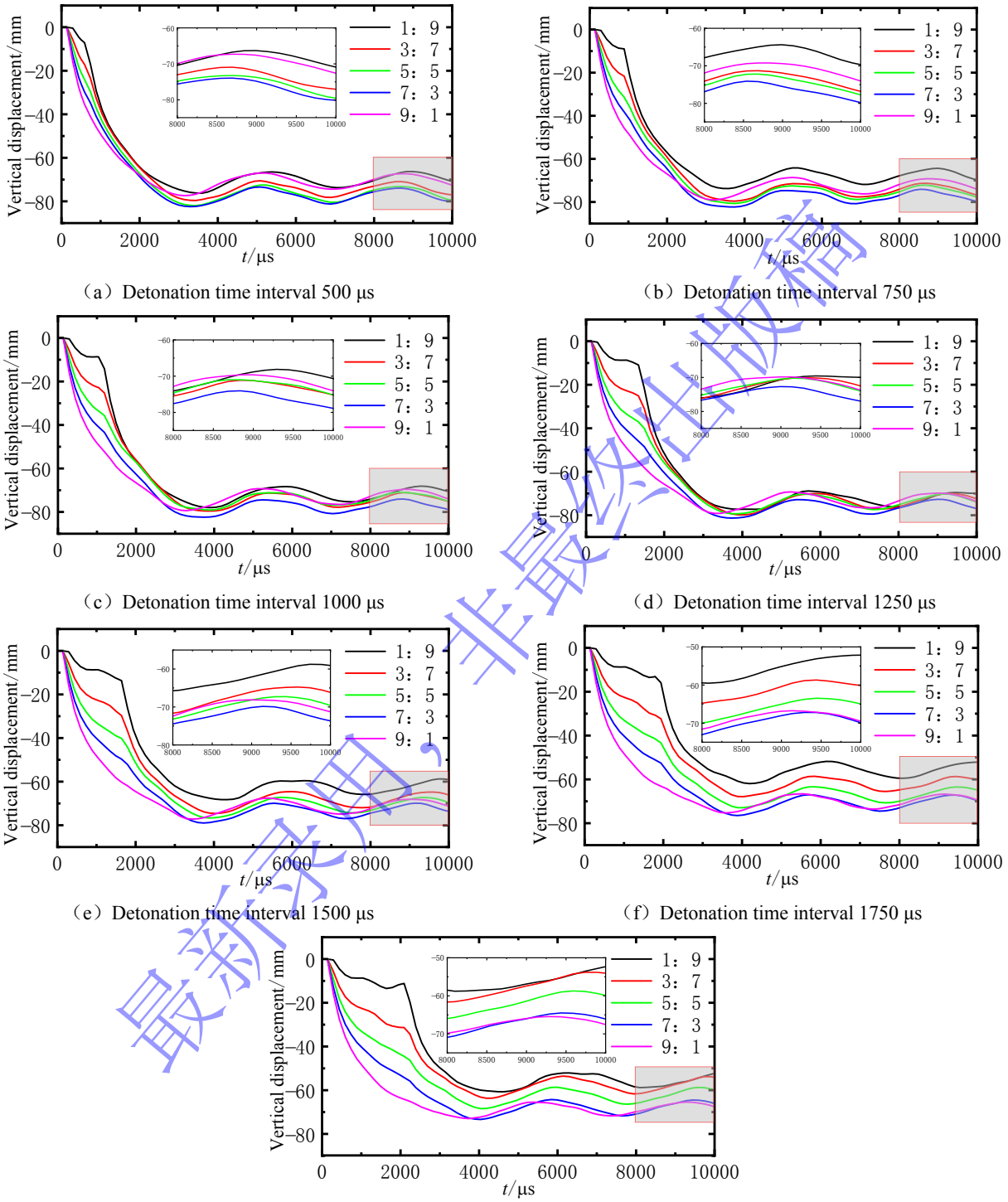
3.3 炸药质量比

图 9 分别是起爆时间间隔 500 μs，750 μs，1000 μs，1250 μs，1500 μs，1750 μs 和 2000 μs，不同炸药质量比时方管迎爆面跨中竖向位移时程曲线，由图知炸药质量比对方管竖向位移影响较大。由图 9 和表 5 知，除起爆时间间隔 1000 μs 炸药质量比 3：7 至 5：5 这一段，10000 μs 时方管竖向位移由 75.4 mm 降低至 75.2 mm，变形减小了 0.3%外，质量比 1：9 至 7：3，10000 μs 时方管竖向位移逐渐增大。除起爆时间间隔 2000 μs 质量比 7：3 至 9：1 这一段，方管竖向位移由 66.3 mm 增大至 67.8 mm，变形增加 2.3%外，质量比自 7：3 至 9：1，方管竖向位移均减小。即在总炸药量相同的前提下，炸药质量比 1：9 时，方管竖向位移最小，除上述两段，质量比自 1：9 至 9：1 变化过程中，随着第一发炸药质量增加第二发炸药质量减小，竖向位移逐渐变大，当炸药质量比 7：3 时，位移相对较大，之后位移减小。

值得注意的是在图 9（a）—图 9（g）中，炸药质量比 1：9 时方管竖向位移时程曲线在第二发炸药起爆后均出现明显突降，原因是第一发炸药质量较小，第一次爆炸冲击波对方管的冲击较小，

录用稿件，非最终出版稿

方管竖向位移偏小，而第二发炸药质量是第一发的 9 倍，第二次爆炸冲击波对方管的冲击加大，因此方管竖向位移突然增大，导致时程曲线出现突降，且随着第一发炸药质量增加第二发炸药质量减小，这种突变逐渐变小，当炸药质量比 9：1，即第一发炸药质量是第二发的 9 倍时，时程曲线向下的突变几乎不可见，曲线已近乎光滑。



（a）Detonation time interval 500 μs

（b）Detonation time interval 750 μs

（c）Detonation time interval 1000 μs

（d）Detonation time interval 1250 μs

（e）Detonation time interval 1500 μs

（f）Detonation time interval 1750 μs

（g）Detonation time interval 2000 μs

图 9 不同质量比时方管竖向位移时程曲线

Fig.9 Vertical displacement time history curves of the square tube for different explosive mass ratio

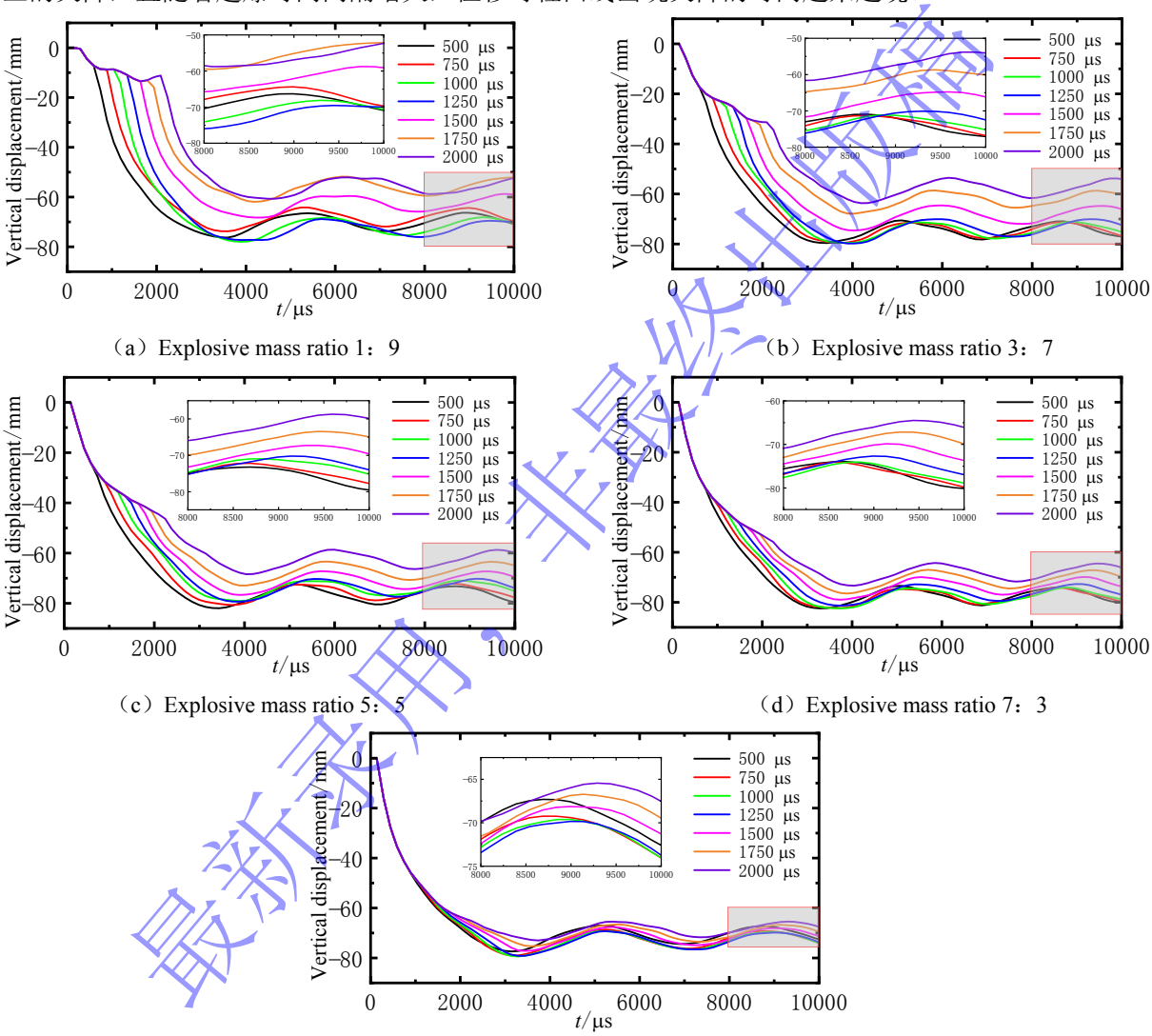
3.4 起爆时间间隔

图 10 分别是炸药质量比 1：9，3：7，5：5，7：3 和 9：1，不同起爆时间间隔时方管迎爆面

最新录用，非最终出版稿

跨中竖向位移时程曲线。由图知起爆时间间隔对方管竖向位移影响较大。由图 10 和表 5 知炸药质量比 1：9，起爆时间间隔 1000 μs 时，方管竖向位移为 70.9 mm，比 750 μs 的 69.7 mm 大 1.7%，炸药质量比 9：1，起爆时间间隔 750 μs 时，竖向位移为 74.1 mm，比 500 μs 的 72.8 mm 大 1.8%，除上述两段，随着起爆时间间隔的增大，方管竖向位移逐渐减小。另炸药质量比 1：9，起爆时间间隔 2000 μs时方管竖向位移 52.1 mm 比 500 μs的 71.1 mm 小 26.7%；炸药质量比 3：7 时，2000 μs时方管竖向位移 54.1 mm 比 500 μs的 77.2 mm 小 29.9%；质量比 5：5 时，2000 μs时方管竖向位移 60.1 mm 比 500 μs的 79.7 mm 小 24.6%；质量比 7：3，2000 μs时方管竖向位移 66.3 mm 比 500 μs的 80.2 mm 小 17.3%；质量比 9：1，2000 μs时方管竖向位移 67.8 mm 比 500 μs的 72.8 mm 小 6.9%，即炸药质量比较大时，起爆时间间隔对方管竖向位移的影响较小。

如 3.3 节所述，因第二发炸药爆炸作用，图 10 中方管竖向位移时程曲线均会出现明显或不明显的突降，且随着起爆时间间隔增大，位移时程曲线出现突降的时间越来越晚。



（a）Explosive mass ratio 1：9

（b）Explosive mass ratio 3：7

（c）Explosive mass ratio 5：5

（d）Explosive mass ratio 7：3

（e）Explosive mass ratio 9：1

图 10 不同起爆时间间隔时方管竖向位移时程曲线

Fig.10 Vertical displacement time history curves of the square tube for different detonation time interval

3.5 起爆顺序

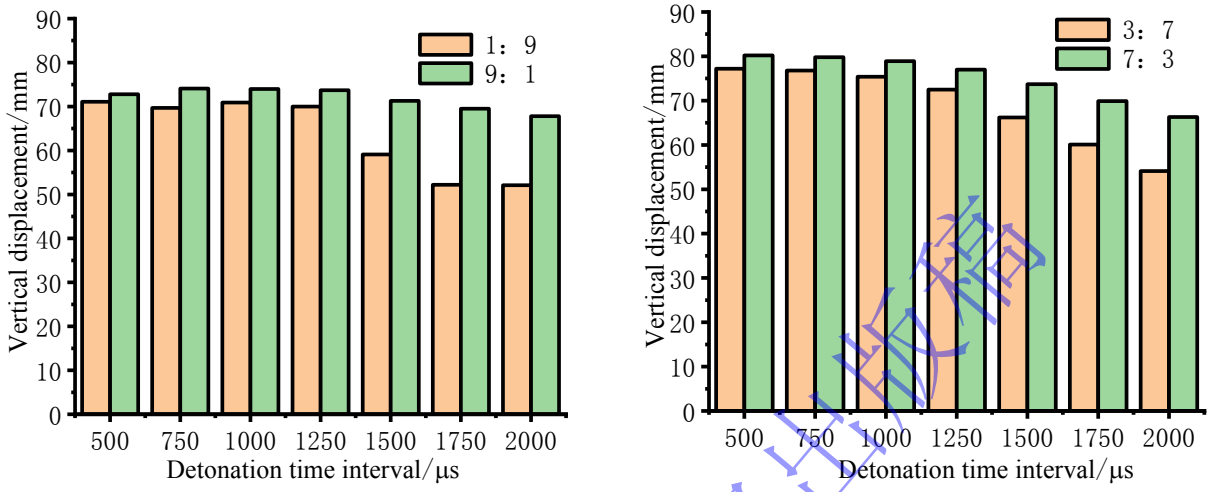
图 11 分别是炸药质量比 1：9 和 9：1、3：7 和 7：3 时，数值计算至 10000 μs 时方管迎爆面跨中竖向位移对比图。由图知质量较大的炸药先爆炸时，方管竖向位移比质量较小的炸药先爆炸的大，且随着起爆时间间隔的增大，起爆顺序对方管竖向位移的影响越来越大。

由图 11（a）和表 5 知，起爆时间间隔 500 μs，炸药质量比 9：1 时方管竖向位移 72.8 mm 比

最新录用，非最终出版稿

1：9 的 71.1 mm 大 2.4%，方管竖向位移相差最小。起爆时间间隔 1750 μs，9：1 时竖向位移为 69.5 mm 比 1：9 的 52.2 mm 大 33.1%，竖向位移相差最大。

由图11（b）和表5知，起爆时间间隔500 μs时，炸药质量比7：3时方管竖向位移80.2 mm比3：7的77.2 mm大3.9%，起爆时间间隔750 μs，7：3时竖向位移79.8 mm比3：7的76.8 mm也大3.9%，即起爆时间间隔500 μs和750 μs时，方管迎爆面跨中竖向位移相差最小。起爆时间间隔2000 μs时，7：3时竖向位移66.3 mm比3：7的54.1 mm大22.6%，竖向位移相差最大。



（a）Explosive mass ratio 1：9 和 9：1　　（b）Explosive mass ratio 3：7 和 7：3

图 11 不同起爆顺序时方管竖向位移

Fig.11 Vertical displacements of the square tube for different initiation sequence

4 结　论

在炸药总量相同的前提下，研究了质量比 1：9~9：1、起爆时间间隔 500~2000 μs 时两次连续爆炸作用方钢管最大竖向位移响应分析，得出如下结论：

（1）起爆时间间隔较小如 500 μs 时，两次爆炸方管竖向位移比单发爆炸的大 18.6%；起爆时间间隔较大时如 2000 μs 时，两次爆炸方管竖向位移比单发爆炸的小 22.9%。

（2）起爆时间间隔 500 μs~2000 μs 范围内，炸药质量比 1：9 方管竖向位移最小；除起爆时间间隔 1000 μs、质量比 3：7 至 5：5 和起爆时间间隔 2000 μs 质量比 7：3 至 9：1，随着第一发炸药质量增加第二发炸药质量减小，竖向位移逐渐变大，当炸药质量比 7：3 时，位移相对较大，之后位移减小。

（3）除炸药质量比 1：9 起爆时间间隔 750 μs 至 1000 μs 和炸药质量比 9：1 起爆时间间隔 500 μs 至 750 μs，随着起爆时间间隔增大，方管竖向位移逐渐减小，且炸药质量比较大时，起爆时间间隔对竖向位移的影响较小。

（4）质量较大的炸药先爆炸时，比质量较小的炸药先爆炸的方管竖向位移大，且随着起爆时间间隔的增大，起爆顺序对竖向位移的影响越来越大，最大高达 33.1%。

最新录用，非最终出版稿

参考文献

[1] 汪德武,曹延伟,董靖.国际军控背景下集束弹药技术发展综述[J].探测与控制学报, 2010, 32(4):1-6.
WANG D W,CAO Y W, DONG J.Summary of cluster bomb technology development under the background of international armament control. Journal of Detection & Control, 2010, 32(4):1-6.

[2] 吴国东,贾伟,王志军,等.子母弹对面目标的毁伤效能研究［J］.应用基础与工程科学学报,2012,20(4):739-744.

WU G D, JIA W, WANG Z J,et al. Damage effectiveness research for sub-munitions to the area target［J］. Journal of Basic Science and Engineering, 2012, 20(4):739-744.

[3] 谢卓杰,王玉惠,王文敬,等.航空子母弹打击大型水面舰艇的毁伤评估[J].电光与控制, 2016, 23(4):37-41.
XIE Z J,WANG Y H,WANG W J,et al.Damage assessment for large surface ship under the attacking of aviation shrapnel[J]. Electronics Optics & Control, 2016, 23(4):37-41.

[4] 张翟,尚鸿博,白海慧.集束弹药:令人生畏的战场利器[J]. 军事文摘, 2023(17).
ZHANG H, SHAGN H B, BAI H H. Cluster munitions : a daunting battlefield weapon[J]. Military Digest, 2023(17).

[5] 张锦,柳玉鹏.俄军首次使用新型集束炸弹？[N].环球时报, 2023-11-22.(08).

[6] 赵祺.乌克兰使用集束弹药对克里米亚发动空袭[EB/OL]. [2024-06-25]. https://news.youth.cn/gj/202406/t20240625_15336204.htm.

[7] REMENNIKOV A M, UY B. Explosive testing and modelling of square tubular steel columns for near-field detonations[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2014, 101(oct.):290-303.

[8] KARAGIOZOVA D, YU T X, LU G. Transverse blast loading of hollow beams with square cross-sections[J]. Thin-Walled Structures, 2013, 62（jan.):169-178.

[9] 张秀华,张唯佳,张宇. Q460 高强钢柱在近爆荷载作用下的动力响应研究[J]. 振动与冲击, 2022, 41 (3):107-114,147.
ZHANG X Y, ZHNG W J, ZHANG Y. Dynamic response of Q460 high strength steel column under near explosion load[J]. Journal of Vibration and Shock, 2022, 41 (3):107-114,147.

[10] 余洋,纪冲,周游,等.侧向局部爆炸荷载下钢质方管的损伤破坏及影响因素研究[J]. 振动与冲击, 2018, 37(15):191-198.
YU Y, JI C, ZHOU Y, et al. Damage and failure of steel square tubes under lateral local explosion loading and their influencing factors[J]. Journal of Vibration and Shock, 2018, 37(15):191-198.

[11] BAMBACH M R .Behaviour and design of aluminium hollow sections subjected to transverse blast loads[J]. Thin-Walled Structures, 2008, 46:1370-1381.

[12] WEGENER R B， MARTIN J B． Predictions of permanent deformation of impulsively loaded simply supported square tubes steel beams［J］. International Journal of Mechanical Science, 1985, 27(12):55-69.

[13] JAMA H H, NURICK G N, BAMBACH M R, et al. Steel square hollow sections subjected to transverse blast loads[J]. Thin-Walled Structures, 2012, 53:109-122.

[14] 周游,纪冲,王雷元,等. 重复爆炸载荷作用下薄壁方管动力响应研究[J].兵工学报, 2019, 40(9):1871-1880.
ZHOU Y, JI C,WAGN L Y, et al. Research on the dynamic response of thin-walled square tube under repeated blast Loads[J].Acta Armamentarii, 2019, 40(9):1871-1880.

[15] Century Dynamics Inc. AUTODYN user's manual[M]. Houston: Century Dynamics, 2005: 473.

[16] 薛建锋,章琪月,许红浩,等.接触爆炸下 POZD 涂覆钢筋混凝土梁的抗爆性能[J].高压物理学报, 2025,39(5): 054203.
XUE J F, ZHANG Q Y, XUE H H, et al. Blast resistance of POZD-Coated reinforced concrete beams under contact explosion［J］.Chinese Journal of High Pressure Physics,2025,39(5): 054203.

[17] 段晓瑜,崔庆忠,郭永学,等. 炸药在空气中爆炸冲击波的地面反射超压实验研究[J]. 兵工学报, 2016,37(12): 2277-2283.
DUAN X Y,CUI Q Z,GUO Y X, et al. Experimental investigation of ground reflected overpressure of shock wave in air blast［J］. Acta Armamentarii,2016,37(12):2277-2283.

[18] GUO X K, LI Y, MCCRUM D P, et al. A reinforced concrete shear wall building structure subjected to internal TNT explosions: Test results and numerical validation [J]. International Journal of Impact Engineering, 2024, 190: 104950.

[19] 王万月,耿少波,王华,等. 近场多发爆炸荷载作用下方钢管构件的动态响应及其损伤[J].高压物理学报, 2022, 36(3):034104.
WANG W Y, GENG S B, WANG H, et al. Dynamic response and damage of square steel tubular structural components by near-field multiple Blast loads[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2022, 36(3):034104.

[20] 赵均海,孙珊珊,党会学,等.钢管混凝土柱抗爆性能数值模拟与实验验证[J].应用数学和力学, 2020, 41(9):943-955.
ZHAO J H, SUN S S, DANG H X, et al. Numerical simulation and test validation for concreted filled steel tube columns under blast loading[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2020, 41(9):943-955.

[21] 张磊,余振鹏,于祥敏,等.远场爆炸荷载作用下钢箱梁桥的动力响应及毁伤评估[J].火箭军工程大学学报, 2024, 38(1):34-45.

最新录用，非最终出版稿

ZHANG L,YUE Z P, YU X M, et al. Dynamic response and damage assessment of steel box girder bridges under far-field blast loading[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(1):34-45.

[22] NGO T, MOHOTTI D, REMENNIKOV A, et al. Response and failure mechanism of tubular steel columns subjected to close-range explosions[C]//ST Smith. 23rd Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials (ACMSM23), Lismore, NSW: Southern Cross University, 2014: 1045-1050.

Factors Affecting Displacement of the Square Steel Tube under Two Consecutive Detonations

WANG Wanyue, GENG Shaobo, LIU Yaling, GAO Ying, HUANG Yujie, XUE Jianying, HAN Yunshan

(*School of Environment and Safety Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, Shanxi, China*)

Abstract: To investigate the deformation response of the square steel tube under two consecutive detonations, on the premise of the same total explosive quantity, detonations were conducted through two rounds of explosives with mass ratios of 1:9, 3:7, 5:5, 7:3 and 9:1, and detonation time intervals of 500, 750, 1000, 1250, 1500, 1750 and 2000 μs, respectively. Then, an analysis was made on the impact of explosives on the maximum vertical displacement of the front surface of the pipe by using the numerical method. The results show that when the detonation time interval is small, the vertical displacement of the pipe can be up to 18.6% higher than that of the pipe during a single explosion; when the detonation time interval is large, it can be up to 22.9% lower. In the range of detonation time interval of 500 ~ 2000 μs, when the explosive mass ratio is 1:9, the vertical displacement of the pipe is the minimal. Except for the detonation time interval of 1000 μs and the explosive mass ratio of 9:1, the vertical displacement gradually increases with the increasing mass ratio of explosive, and when the explosive mass ratio is 7:3, the displacement reaches its maximum. Moreover, with the increasing detonation time interval, the vertical displacement of the pipe gradually decreases. For the two explosions conducted on the pipe, if the one with a greater explosive mass is conducted firstly, the vertical displacement of the pipe is longer than that of the one with less massive explosive. Moreover, with the increasing detonation time interval, the influence of detonation sequence on the vertical displacement of the pipe becomes increasingly significant, with a maximum increase of 33.1%.

Keywords: two consecutive detonations; square tube; explosive mass ratio; detonation time interval; detonation sequence; vertical displacement

录用稿，非最终出版稿