DOI: 10.11883/bzycj-2016-0260
文章编号: 1001-1455(2018)04-0918-07

40 kg TNT 当量爆炸塔的振动监测及分析*

胡八一,肖智强,谷 岩,刘 宇,冯东升,刘 军
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要: 运用速度传感器和拾振器,对 40 kg TNT 当量爆炸塔在 15、20、25 和 40 kg TNT 炸药爆炸加载下爆炸塔旁侧实验室所在地面、屋顶以及塔顶的振动速度进行监测分析。测试结果表明:在本实验条件下实验室地面质点振动速度峰值均小于 5 cm/s,振动持续时间为 5～10 s,振动频率一般高于 10 Hz;屋顶的竖向振动峰值是水平向的 6～7 倍,即存在显著的竖向振动放大效应。小波包分析表明:地面竖向振动携带的能量是水平向振动携带能量的 2.5～4.0 倍,质点振动信号中 95%以上的能量处于 0～160 Hz 频带,而竖向振动中 90%以上的能量集中在 10～40 Hz 范围。研究结果提示:6 m 深隔振沟的隔振效果十分有限,在超过 5 kg TNT 当量的加载条件下,欲取得理想的隔振效果,应选择独立地基和隔振支座的减振设计方式。

关键词: 爆炸塔;振动速度;小波包分析;能量分布
中图分类号: O384 **国标学科代码**: 13035 **文献标志码**: A

由于爆炸塔的内部空间尺寸以及人员和设备的进出通道可以比爆炸容器设计建造得更大,且施工现场不需要整体去应力等退火设备,因此在很多爆炸生产和实验研究领域发挥着爆炸容器不可替代的作用[1]。然而,由于爆炸塔一般建造在地面上,其内部爆炸产生的冲击振动仍然是安全管理需要重视的问题,比如:美国海军表面武器中心在建成 22.5 kg TNT 当量的爆炸塔时,就较全面地监测了爆轰产物和地面振动等实验参数[2];21 世纪初美国劳伦斯利弗莫尔实验室(LLNL)在设计 60 kg 高能炸药爆炸塔[3]时,为确保安全,先按 1∶4 缩比模型建造了一个验证塔,并进行了全方位的爆炸加载考核验证实验[4]。中国目前建造的爆炸塔的设计当量一般在 1～5 kg TNT,各研究单位积累了数十年安全运行经验。对于中国工程物理研究院流体物理研究所新建成的 40 kg TNT 当量爆炸塔,其运行时地面振动能否满足 GB 6722—2014(爆破安全规程)的相关要求,实验时塔体内部的附属功能设备能否正常运转等诸多问题都需要进行考核验证。本文中简要介绍了塔体的设计情况和考核验收实验,重点关注爆炸加载时爆炸塔周边实验室地面的振动参数,并与相关监测数据进行对比分析,以期对未来中国相关工程设计提供借鉴和参考。

1 塔体设计及实验安排

1.1 塔体及炸药

如图 1 所示,塔体采用圆柱段加椭球封头结构,其内径为 16 m,圆柱段高 9 m。距外壁 0.5 m 处设计了一条基于 1∶8 缩比塔研究结果[5]的隔振沟,沟深 6.0 m,宽度为 0.8 m。塔体四周为抗震实验室,层高 5.1 m,按抗 9 度地震烈度设计。塔体自身采用钢纤维钢筋混凝土结构,实验室地面为普通承重混凝土。

炸药为压装 TNT 药球,密度不低于 1.63 g/cm^3,中心起爆。将药球置于塔内中心点,当药球质量为 15、20、25 和 40 kg 时,其炸高分别为 1.2、1.2、1.5 和 3.0 m。这样安排的目的在于减轻炸药近距离爆炸对塔内地表的破坏作用[6],同时适当降低周边实验室地面的冲击振动幅值。

* **收稿日期**: 2016-08-22; **修回日期**: 2017-10-09
基金项目: 国家科技专项工程项目(SJ05.1)
第一作者: 胡八一(1965—),男,研究员; **通信作者**: 肖智强,xzhiqiang@21cn.com。

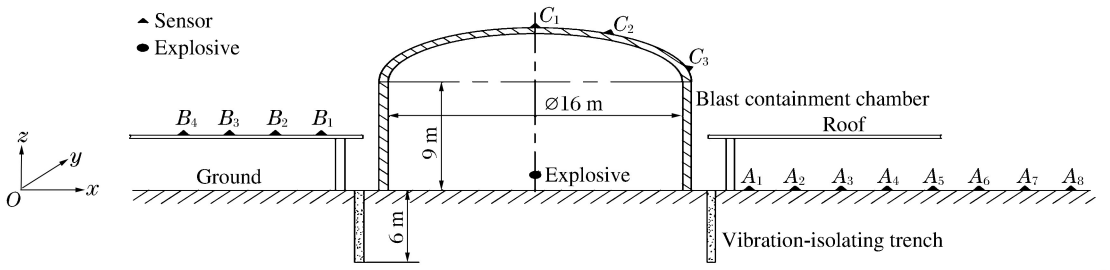


图 1 塔体结构及测点分布示意

Fig. 1 Schematic of chamber and velocity measuring points

1.2 传感器及其布局

采用 TP3V-10 型三向磁电式速度传感器(灵敏度为 0.21～0.25 V/(cm·s^{-1}))，布设在如图 1 所示的测点上，由 1.5 m 长导线引入拾振器(型号为 UBOX-20016，4 通道，A/D 转换精度 16 bit，最高采样率达 200 kHz，记录长度为 8 GB)内，通过预先触发设置实现现场等待式监测。

15 和 20 kg TNT 爆炸加载时，在图 1 所示的 3 个不同高度处布设速度传感器；25 和 40 kg TNT 爆炸加载时，只监测实验室地面和屋顶的振动数据。实验室地面和屋顶的传感器间距为 10 m，其中 A_1、B_1 处传感器在水平方向上距隔振沟外沿约 1.2 m；塔顶传感器的间距为 4 m，在水平切向(y 方向)布设少量与水平径向(x 方向)相对应的复测点(图 1 未标识)，以增加随机振动信号的对比观测。

2 监测结果与分析

2.1 实验室不同区域的振动特征

重点监测爆炸塔周边实验室地面、屋顶和爆炸塔塔顶 3 个不同高度区域的质点振动情况。表 1 列出了这 3 个区域的振动速度峰值，其中 w 为炸药质量，x、y、z 对应图 1 所示的 3 个方向，A_1'、B_1' 分别为 A_1 和 B_1 测点在 y 方向对应的复测点，C_1、C_2 和 C_3 测点分别位于塔顶中心位置及半径 4 和 8 m 处。

由表 1 数据可见：(1) 对于 3 个方向的质点振动速度峰值，地面上 z 向质点振动速度峰值一般大于水平向(x、y 向)，而屋顶上 z 向质点振动速度峰值远远大于水平向，几乎是水平向的 6～7 倍，表现出建筑物在地震波作用下振动的竖向放大效应，爆破工程中对附近多层建筑物的安全监测结果[7-8]也表明存在这种效应；(2) 对于爆炸塔自身而言，其中心顶点(C_1)的 z 向振动速度最大，中间位置(C_2)的 z 向振动速度约为中心顶点的 1/2，塔体边沿(C_3)约为中间位置的 1/2，水平向也存在类似规律。

表 1 不同区域振动速度峰值比较

Table 1 Comparison of vibration velocity peaks in different zones

w/kg	方向	地面振动速度峰值/(cm·s^{-1})		屋顶振动速度峰值/(cm·s^{-1})		塔顶振动速度峰值/(cm·s^{-1})		
		A_1	A_1'	B_1	B_1'	C_1	C_2	C_3
15	x	1.26	2.21	0.52	0.58	14.23	8.13	4.30
	y	0.92	0.80	0.47	0.73	9.96	4.09	1.90
	z	1.37	2.05	3.34	3.65	31.86	15.69	8.00
20	x	1.70	2.14	0.83	0.68	25.15	12.41	8.10
	y	1.39	0.92	0.69	0.94	22.53	6.84	1.58
	z	2.18	2.88	4.56	5.09	45.92	22.60	11.24

表 2 给出了在 4 种当量炸药爆炸加载下水平径向(x 向)不同测点的振动速度峰值。从表 2 中可见：(1) 距爆心最近的 A_1 测点(隔振沟外侧边沿)，其水平径向(x 向)质点振动速度峰值往往大于该点的竖向(z 向)振动速度峰值，但稍微远离隔振沟边沿后该现象随即消失，即依然是竖向振动速度峰值大于水平径向；(2) TNT 当量从 15 kg 递增到 40 kg 时，最大峰值振速为 3.67 cm/s，并且随着爆心距离的

增加,地面振动速度迅速衰减。对照 GB 6722—2014:当振动频率在 10～50 Hz 范围时,钢筋混凝土结构建筑允许的安全振速为 3.5～4.5 cm/s;当振动频率在 50～100 Hz 范围时,该安全振速提高到 4.2～5.0 cm/s。因此可以认为,爆炸塔周边实验室的建筑结构在爆炸塔全当量运行时是安全的,达到了国家标准的相关要求。

表 2 不同测点的振动速度峰值

Table 2 Comparison of vibration velocity peaks at different measure points

w/kg	方向	振动速度峰值/(cm·s^{-1})				w/kg	方向	振动速度峰值/(cm·s^{-1})			
		A_1	A_2	A_5	A_7			A_1	A_2	A_5	A_7
15	x	2.21	0.47	0.15	0.07	25	x	3.67	0.64	0.23	0.11
	y	0.80	0.14	0.06	0.06		y	1.95	0.26	0.15	0.09
	z	2.05	1.07	0.28	0.22		z	2.09	1.60	0.49	0.44
20	x	2.14	0.58	0.18	0.12	40	x	3.11	0.85	0.13	0.16
	y	0.92	0.17	0.07	0.09		y	0.91	0.47	0.01	0.08
	z	2.88	1.52	0.36	0.29		z	2.19	2.20	0.48	0.33

2.2 速度波形的频率及能量特征

图 2 显示了地面振动的典型速度波形以及经快速傅里叶变换(fast Fourier transformation, FFT)所得功率谱密度及特征主振频率,其中 $v_{\max}$ 为最大振速,f_{m} 为主振频率,t_{tot} 为振动持续时间。综合本实验中所得速度波形特征,可以得到以下几点认识:(1) 地面振动持续时间一般在 5～10 s,与现场人体的体感一致,明显比小药量缩比塔实验的振动时间长得多[5],且对人体的摇晃更强烈;(2) 振动频率主要在 15～150 Hz 范围,与缩比塔实验结果相比,高频成分更少,即振动频率整体向低频方向偏移。竖向(z 向)的振动频率相比水平向而言,向低频方向的移动更明显和集中,即由缩比实验的 100～800 Hz 平移至 15～60 Hz。

由于爆炸振动信号属于典型的非平稳随机信号,因此采用小波包分析技术[9-10]比传统的 FFT 分析更有效,更重要的是它可以给出不同频带的振动能量分布信息[11]。本实验中设置采样频率为 5 kHz,故其 Nyquist 频率为 2.5 kHz,运用 db8 进行小波包分解,可将信号分解到第 9 层,即共有 $2^9=512$ 个小波包,对应的最低频带为 0～9.8 Hz,最高频带为 1.25～2.50 kHz。表 3 列出了 25 kg TNT 爆炸加载时实验室地面和屋顶 6 个测点 z 方向的振动信号能量分布及总能量 E,其中 φ_E 为振动信号在不同频带上的能量占总能量的比例,f 为频率。

表 3 竖向振动信号的能量分布

Table 3 Energy distribution of the vibration signal in z direction

f/Hz	φ_E/%					
	A_1(地面)	A_2(地面)	A_5(地面)	B_1(屋顶)	B_2(屋顶)	B_5(屋顶)
0～9.8	0.49	0.03	4.65	0.02	0.01	0.14
9.8～19.5	45.29	55.24	64.93	26.43	31.78	43.36
19.5～39.1	32.48	34.13	29.26	72.68	67.82	52.10
39.1～78.1	5.53	5.42	0.45	0.55	0.29	4.04
78.1～156.3	8.20	3.83	0.36	0.24	0.07	0.32
156.3～312.5	3.18	1.31	0.08	0.05	0.02	0.02
312.5～625.0	3.75	0.01	0.04	0.02	0.00	0.00
625.0～1 250.0	1.03	0.01	0.07	0.00	0.00	0.01
1 250.0～2 500.0	0.05	0.02	0.15	0.00	0.00	0.01
E/(cm^2·s^{-2})	1 592.31	911.57	109.26	41 877	17 033	1 564

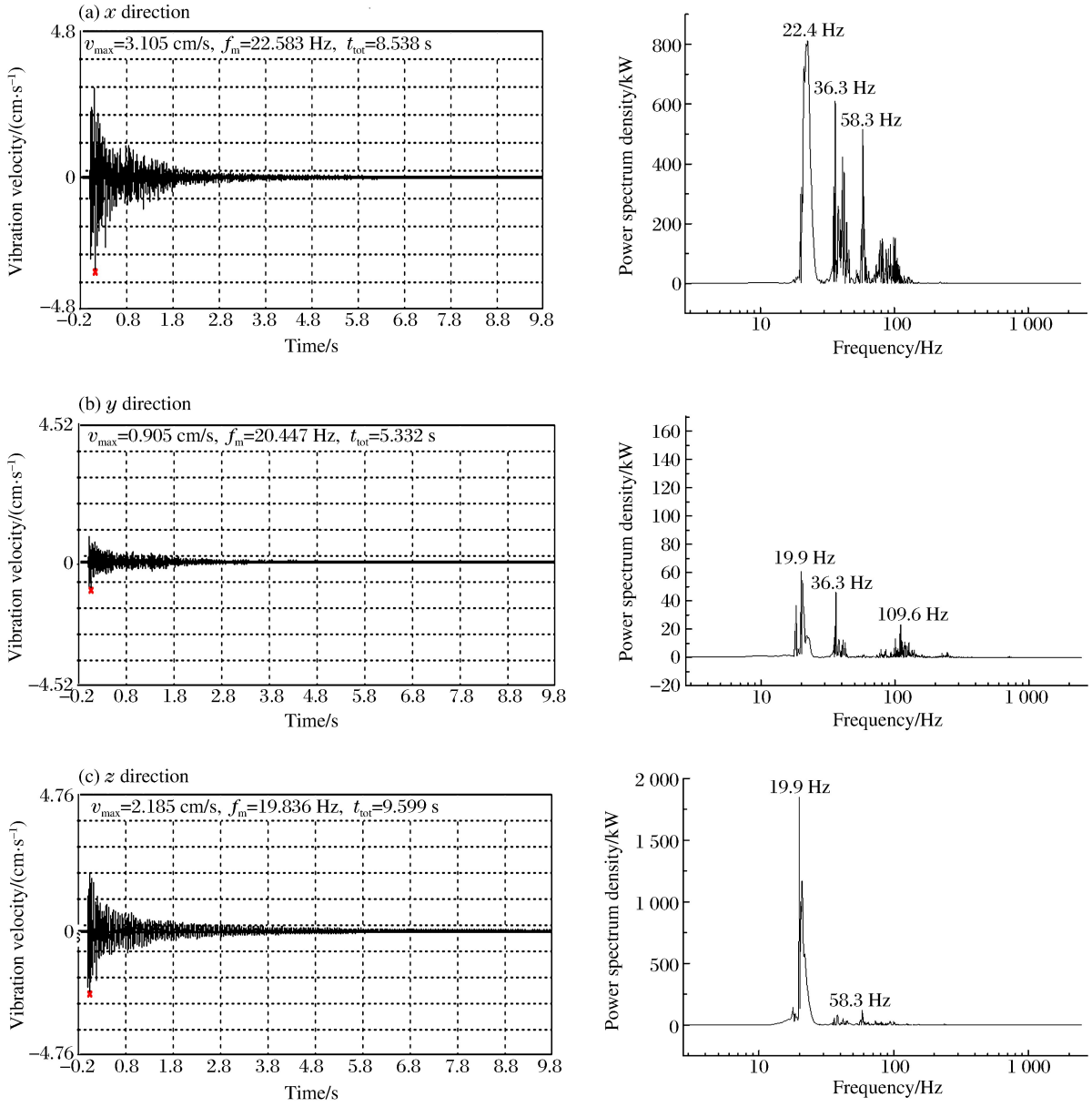


图 2　40 kg TNT 加载时 A_1 点的地面振动速度波形及 FFT 频谱

Fig. 2　Vibration velocity waves and their FFT spectra under 40 kg TNT load at A_1 point

表 4 给出了实验室地面 A_2 点在两种炸药爆炸加载下沿 x、y、z 3 个方向振动信号的频带能量分布和总能量 E 的比较。综合表 3 和表 4 数据，可以看到：(1) 无论地面还是屋顶，竖向(z 向)振动能量主要集中在 10～40 Hz，占全部能量的 77%～99%，因此要衰减或隔离这种几十千克 TNT 当量爆炸产生的冲击振动，目标应瞄准 10～150 Hz 范围，重点在 10～40 Hz 频段；(2) 竖向(z 向)携带的能量最大，是水平径向(x 向)的 3～4 倍，是水平切向(y 向)的 19～52 倍，因此如何有效降低或隔离竖向振动是爆炸冲击隔振需要重点关注的问题；(3) 同文献[10]中数吨级硝铵炸药爆破产生的冲击振动相比，几十千克 TNT 当量炸药爆炸产生的地震波在 0～10 Hz 和 150 Hz 以上频段所携带能量很少，而大爆破在 0～10 Hz 频段仍包含 10%～47%的能量，这是二者最显著的差别；在文献[9]中几十千克硝铵炸药的延时爆破作业中，所监测到的振动主频在 20～100 Hz 范围，振动持续时间也在 5～10 s 范围，各测点的 80%能量对应的频谱范围也不超过 10～125 Hz，与本实验结果具有极好的一致性。

表 4 两种载荷下 A_2 点的振动信号能量分布

Table 4 Energy distribution of the vibration signal at A_2 point under two loads

f/Hz	$\varphi_E(w=15\ \mathrm{kg})$/%			$\varphi_E(w=40\ \mathrm{kg})$/%		
	x	y	z	x	y	z
0～9.8	0.01	0.04	0.04	19.62	0.57	0.13
9.8～19.5	68.62	38.87	60.24	12.43	13.93	17.30
19.5～39.1	25.17	28.68	28.29	50.51	34.04	56.01
39.1～78.1	4.50	23.59	6.77	12.31	23.51	13.37
78.1～156.3	1.14	6.43	3.72	4.64	23.33	11.45
156.3～312.5	0.43	0.44	0.90	0.25	3.04	1.66
312.5～625.0	0.02	0.37	0.01	0.05	0.33	0.01
625.0～1 250.0	0.03	0.47	0.01	0.06	0.42	0.02
1 250.0～2 500.0	0.07	1.10	0.02	0.12	0.83	0.04
E/(cm^2 · s^{-2})	196.68	14.01	735.87	352.25	54.45	1 060.20

3 讨 论

为进行对比研究，在中国工程物理研究院流体物理研究所的 5 kg 爆炸塔进行了一发 4.04 kg TNT 当量地面振动速度监测实验。该塔周边有一条 1 m 深隔振沟。炸药中心距塔内地面高 0.9 m，同型号速度传感器布置在 5 kg 爆炸塔外壁 2、8、15 m 处，地面三向振动速度峰值见表 5。对比表 2 和表 5 数据，可以看到：距离爆炸塔外壁越近，振动越剧烈，且 40 kg 爆炸塔在 x、y、z 3 个方向上的振动峰值均远超过 5 kg 爆炸塔；对于 40 kg 爆炸塔，当距离爆心较远(大于 20 m)时，地面振动很快降到比 5 kg 爆炸塔 15 m 处的振动还要小的程度。

表 5 5 kg 爆炸塔地面振动速度峰值测量结果

Table 5 Vibration velocity peak of the ground neigboring the 5 kg TNT equivalent blast containment chamber

振动时间/s	方向	振动速度峰值/(cm · s^{-1})		
		2 m	8 m	15 m
1.73～1.95	x	0.99	0.48	0.25
	y	0.84	0.41	0.29
	z	1.76	0.77	0.44

文献[5]中监测到的地面振动时间很短，在 0.1～0.2 s 之间(药量 0.3～2.3 kg TNT)，而本实验中为 5～10 s，由此可见地面振动持续时间与药量正相关，即药量越大，振动持续时间越长。同时也揭示出 6 m 深隔振沟并未起到文献[5]中所预期的隔振效果，或者说隔振效果很差。原因何在？从表 4 中的数据可见，80%～90%的振动能量集中在 10～80 Hz 范围，其中竖向振动能量的 80%～95%集中在 10～40 Hz 范围；而文献[5]中的计算所采用的瑞利波频率为 200 Hz，明显偏大约一个数量级，即实际瑞利波波长 λ_R 应为 28.5 m 左右，若再依据朱振海等[12]的动光弹研究结果，$3\lambda_R$ 深的隔振沟才能基本隔离冲击形成的表面波，从而充分解释了为何国内众多爆炸塔隔振效果不佳的缘由。这也说明在近距离实验室条件下，期望依靠隔振沟有效衰减几十千克炸药爆炸产生的冲击振动，在实际工程中既难实现，也不经济。

因此，今后要设计高于 5 kg TNT 当量的爆炸塔时，可采用隔振支座的整体隔振方式[13-14]。日本高铁沿线建筑物采用隔振基座后，对火车高速运动产生的 25 Hz 冲击振动的隔振效果很好[15]。此外，在使用 10 和 25 kg 爆炸容器系统时未监测到明显的地面冲击振动[16-17]，其原因在于爆炸容器通过鞍座放

置在地面上，支撑鞍座的支架在一定程度上起到了减震器的作用，所以当爆炸容器运行时，传到地面的振动幅值仅为鞍座上的 1/20～1/5。

4　结　论

(1) 在本实验条件下，40 kg 爆炸塔旁侧实验室地面的最大质点振动速度峰值小于 5 cm/s，质点振动频率尤其是竖向振动频率大于 10 Hz，满足 GB 6722—2014(爆破安全规程)的安全允许振动要求。

(2) 与 1∶8 缩比塔及 5 kg 爆炸塔实验结果相比，40 kg 爆炸塔激发的地面冲击振动时间更长，达 5～10 s，人体的主观感受更强烈。说明早期基于缩比塔实验结果确定的瑞利波波长(λ_R=2.85 m)随着药量的增大而变化。本实验监测到的竖向振动频率集中在 10～40 Hz 范围，缩比塔在 200～500 Hz 范围，故瑞利波波长实际增大了约 10 倍。

(3) 小波包分析很适合于这类冲击振动信号分析，分析表明：竖向振动(z 向)所携带的能量是同一点水平向(x、y 向)振动所携带能量之和的 2.5～4.0 倍；质点振动信号中超过 95%的能量处于 10～160 Hz 频段，其中在 10～80 Hz 范围包含至少 75%以上的能量，而竖向振动信号中超过 90%的能量集中在 10～40 Hz 频段；爆炸产生的冲击振动有竖向放大效应，即屋顶的质点振动峰值是地面的 2～3 倍，振动所携带的能量则是地面的几十倍，故不建议在屋顶放置其他实验测试设备。

(4) 传统的隔振沟技术在小药量爆炸时是勉强可行的；随着药量的增大(超过 5 kg TNT)，建议采用独立地基加减振支座的隔振设计，目前中国建筑界在该领域的设计和施工能力[18]已基本成熟可靠。

参考文献：

[1] MORSE J L, WEINGART R C. High-explosives applications facility (HEAF): UCID-21864[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1989.

[2] SWISDAK M, PECKHAM P. Validation tests in building 327-50-pound bombproof: NSWC-TR-384[R]. White Oak: Naval Surface Weapons Center, 1985.

[3] LYLE J W. Calculating contained firing facility (CFF) explosive firing zones: UCRL-ID-132204-REV-2[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2001.

[4] PASTRNAK J W, BAKER C F, SIMMONS L F. Measurements of a 1/4-scale model of a 60 kg explosives firing chamber: UCRL-JC-117774[R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 1995.

[5] 胡八一，陈石勇，谷岩，等. 隔振沟对爆炸塔周边地表振动的影响[J]. 爆炸与冲击，2012，32(6)：647-652.
HU Bayi, CHEN Shiyong, GU Yan, et al. Effects of vibration-isolating trench on ground vibration surrounding blast containment chamber[J]. Explosion and Shock Waves, 2012, 32(6): 647-652.

[6] CHARLES F. Site 300's new contained firing facility[J]. Science and Technology Review, 1997, 3: 4-9.

[7] 娄建武，龙源，徐全军，等. 工程爆破中的建筑物振动监测[J]. 解放军理工大学(自然科学版)，2000，1(5)：58-62.
LOU Jianwu, LONG Yuan, XU Quanjun, et al. Measuring and analysis of structure's response vibration in engineering blasting[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science), 2000, 1(5): 58-62.

[8] 陈士海，魏海霞，张子华，等. 钢筋混凝土结构爆破地震响应频谱及幅值变化规律分析[J]. 振动与冲击，2011，30(1)：213-217.
CHEN Shihai, WEI Haixia, ZHANG Zihua, et al. Spectral analysis and amplitude varying for blasting vibration response of a reinforced concrete building[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 213-217.

[9] ZHONG G S, AO L, ZHAO K. Influence of explosion parameters on wavelet packet frequency band energy distribution of blast vibration[J]. Journal of Central South University, 2012, 19(9): 2674-2680.

[10] 宁瑞峰，张世平. 小波包分析在爆破震动信号能量衰减规律中的应用[J]. 爆破，2014，31(1)：1-4.
NING Ruifeng, ZHANG Shiping. Application of wavelet packet analysis in blasting vibration signal energy attenuation law[J]. Blasting, 2014, 31(1): 1-4.

[11] 费鸿禄，曾翔宇，杨智广. 隧道掘进爆破振动对地表影响的小波包分析[J]. 爆炸与冲击，2017，37(1)：77-83.
FEI Honglu, ZENG Xiangyu, YANG Zhiguang. Influence of tunnel excavation blasting vibration on earth's sur-

face based on wavelet packet analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 2017,37(1):77-83.

[12] 朱振海,杨永琦.沟槽对建筑物减震作用的动光弹研究[J].爆炸与冲击,1989,9(1):55-59.
ZHU Zhenhai, YANG Yongqi. Dynamic photoelastic studies of the vibration damping by a slot near a structure [J]. Explosion and Shock Waves, 1989,9(1):55-59.

[13] JACOBSEN L S, AGBABIAN M S, KARAGOZIAN J. Study of shock isolation for hardened structures: AD639303[R]. Department of the Army, Office of the Chief of Engineers, 1996.

[14] 严东晋,钱七虎,唐德高.爆炸冲击震动下隔震系统设计的可靠性[J].土木工程学报,2001,34(3):23-28.
YAN Dongjin, QIAN Qihu, TANG Degao. Reliability of isolation system under blast shock and vibration[J]. China Civil Engineering Journal, 2001,34(3):23-28.

[15] 日本免震构造协会.图解隔震结构入门[M].叶烈平,译.北京:科学出版社,1998.

[16] 胡八一,刘宇,燕乐伟,等.10 kg TNT 当量爆炸容器的冲击振动监测[J].振动与冲击,2001,20(4):65-67.
HU Bayi, LIU Yu, YAN Lewei, et al. Shock induced vibration monitoring of the 10 kg TNT equivalent explosion vessel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2001,20(4):65-67.

[17] 胡八一,刘仓理,陈石勇,等.25 kg TNT 当量爆炸容器的冲击隔震研究[J].振动与冲击,2006,25(6):43-45.
HU Bayi, LIU Cangli, CHEN Shiyong, et al. Study on isolation of shock induced vibration of a 25 kg TNT equivalent explosion vessel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2006,25(6):43-45.

[18] 邓烜,叶烈伟,郁银泉,等.大底盘多塔隔震结构设计[J].建筑结构,2015,45(8):13-24.
DENG Xuan, YE Liewei, YU Yinquan, et al. Seismic isolation design of multi-tower structure with enlarged base [J]. Building Structure, 2015,45(8):13-24.

Vibration monitoring and analysis of the 40 kg TNT equivalent blast containment chamber

HU Bayi, XIAO Zhiqiang, GU Yan, LIU Yu, FENG Dongsheng, LIU Jun

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: In the present work, the vibration velocities of the ground, roof and top of the 40 kg TNT equivalent blast containment chamber resulting respectively from 15, 20, 25 and 40 kg TNT explosion were monitored using velocity sensors and geophones. The measured results showed that all of the ground velocity peaks were less than 5 cm/s, the vibration frequency was almost higher than 10 Hz and the vibration duration reached 5 to 10 s, and the vertical vibration peak of the roof was obviously enlarged by 6 to 7 times that of the horizontal ones. The wavelet packet analysis of the velocities' signal showed that the vertical vibration energy of the ground was 2.5 to 4.0 times that of the horizontal vibration energy, more than 95% of the vibration energy mostly concentrated in the range of 0—160 Hz, while more than 90% of the vertical vibration energy was limited in the range of 10—40 Hz. The results reveal that the attenuation effect of the vibration-isolating trench at a depth of 6 m on the blast seismic waves is imperfect, the independent base and seismic isolation bearing should be adopted if we hope to obtain an ideal attenuation effect especially when the explosive weight exceeds 5 kg TNT equivalent.

Keywords: blast containment chamber; vibration velocity; wavelet packet analysis; energy distribution

(责任编辑 王 影)