

文章编号: 1001-1455(2012)06-0647-06

隔振沟对爆炸塔周边地表振动的影响^{*}

胡八一, 陈石勇, 谷 岩, 刘 宇, 刘仓理

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 对内径 2 m、壁厚 0.4 m 的椭球封头爆炸塔进行有、无隔振沟条件下的对比爆炸实验, 并监测塔体周边 6 个测点的地表竖向及水平方向的振动速度。研究表明: 地表质点的振动持续时间小于 0.2 s, 竖向振动频谱在 20~500 Hz 范围内, 水平方向振动频谱则在 200~800 Hz 范围内; 隔振沟使水平方向振动幅度衰减至原来的 1/10, 对竖向振动幅度衰减至原来的 1/4~1/3, 对地表振动频率无明显影响; 爆炸塔隔振沟的深度为 1 m 时, 对爆炸地震波无任何衰减作用, 仅当深度达到 1.5~2.0 倍瑞利波波长时(5.6~7.5 m)才会产生明显的隔振效果。

关键词: 爆炸力学; 振动速度; 爆炸地震波; 爆炸塔

中图分类号: O384; TD235

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

爆炸塔作为一类特殊的抗爆建筑结构, 广泛应用于工业、交通、水利、军事科研及矿山开采等领域^[1]。随着人们对环境保护和人类健康的日益重视, 过去户外进行的许多爆炸作业及爆炸加工将更多地转入室内爆炸塔中, 因此, 爆炸塔的应用也将更加广泛和频繁^[2-3]。

然而, 在爆炸塔的使用过程中, 爆炸产生的地震波对邻近建筑和仪器设备仍有较强的冲击振动影响, 个别爆炸塔因此不能完成设计当量的考核实验^[4]。对这种由爆炸冲击引起的地震波的振动影响, 通常运用隔振沟技术^[5-8]降低和削弱。隔振沟的尺寸大同小异, 如 1 kg TNT 当量爆炸塔, 隔振沟宽 0.8 m, 深 1.8 m; 5 kg 爆炸塔, 隔振沟宽 1 m, 深 1.4 m。但所有这些设计或工程均没有说明为何要这样设计隔振沟, 也没有爆炸塔建成后对邻近实验室地面冲击振动监测结果的报道, 因此, 对爆炸塔使用过程中出现的较强地面振动也就无法进行量化对比测量和分析。

基于以上状况, 我们专门设计建造了一个小型爆炸塔, 对该塔体在无隔振沟和有隔振沟两种条件下进行了爆炸对比实验, 监测了塔体周边地表的振动速度, 着重关注爆炸地震波的振动幅值、频率和持续时间等 3 个要素^[9-11]。

本文中, 简要介绍这个研究结果, 以期进一步认识爆炸塔周边地表的振动特征并对隔振沟参数设计提供有益参考。

1 实验设计

1.1 爆炸塔及炸药参数

爆炸塔为柱形椭球封头结构, 用钢筋钢纤维混凝土建造, 如图 1 所示, 内径 2 m, 柱段高 1.5 m, 壁厚 0.4 m。有 0.6 m×0.5 m 的防爆门及数个 $\varnothing 20$ mm 起爆测试通道。隔振沟宽度 0.3 m, 深 1 m。

炸药为压装 TNT 药球, 密度 1.63 g/cm³, 药球中心设计有 $\varnothing 11 \times 5$ mm 太安传爆药, 用雷管中心起爆。实验时药球中心始终与塔内地面保持 0.15 m 的高度。

实验分 2 个步骤进行, 先是塔体建成后无隔振沟时, 安排 5 发实验, 实验用炸药球半径分别是 35、45、55 和 65 mm, 其中 1 发 35 mm 为重复性验证实验, 目的是考察速度峰峰值的统计涨落幅度; 然后是隔振沟挖成后, 安排 4 发爆炸实验, 实验用炸药球半径分别是 40、50、60 和 70 mm。

* 收稿日期: 2011-09-01; 修回日期: 2012-08-14

基金项目: 国家科技专项工程项目(971-II-SJ05.1)

作者简介: 胡八一(1965—), 男, 研究员。

1.2 测试布局及仪器

如图 2 所示,在爆炸塔周边地表布设了 2 条互成 90°的对应重复测线,目的是考察塔体地面地质状况及传感器安装等微小差别对测试数据的影响。图 2 中 A、D 点位于隔振沟内侧,距塔体外表 0.2 m,距隔振沟壁 0.1 m,相同测线上各测点间距均为 0.9 m。

振动速度传感器是 VS-10 型双向(垂直 z 及水平径向 x)磁电式传感器,通过 1.5 m 长引线接入 UBOX-20016 型拾振器,通过触发设置实现现场等待式记录。

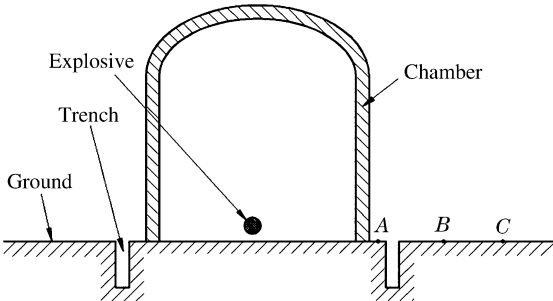


图 1 塔体结构示意图
Fig.1 Schematic of the chamber

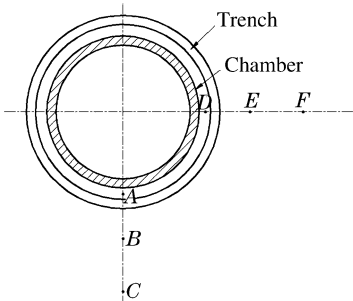


图 2 测点布局
Fig.2 Arrangement of the measuring points

2 测试结果及分析

2.1 地表振动波形特征

细致分析实验获得的近百条爆炸塔周边地表振动波形,可归纳出以下几点认识:

(1)无隔振沟时,各点垂直(z 方向)振幅均大于水平(x 方向)振幅,垂直方向振动周期较大,同时叠加了频率较高的小振幅高频振动,如图 3 所示。有隔振沟后,沟内侧 A、D 点的垂直及水平向振幅均急剧提高,水平方向振幅反而超过垂直向,随着炸药量增大,这一趋向更为显著;不过此时沟外侧各点的振幅,仍是垂直方向大于水平方向,与无隔振沟时一样,图 4 所示为有隔振沟时最大炸药量加载的 A 点垂直(z 方向)与水平(x 方向)方向振动波形。

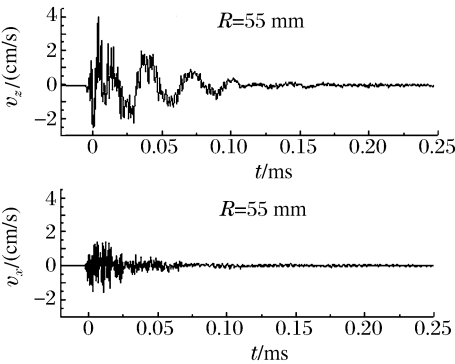


图 3 A 点无隔振沟振动波形
Fig.3 The vibration waves without trench

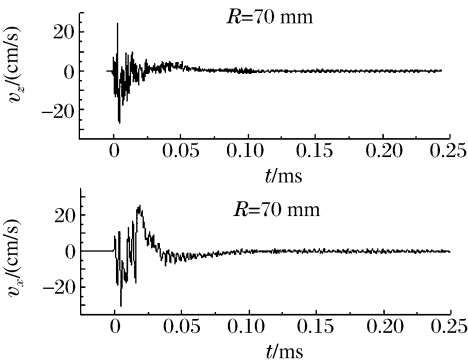


图 4 A 点有隔振沟振动波形
Fig.4 The vibration waves with trench

(2)在实验的药量范围(283~2 338 g),爆炸引发的地震波持续时间一般小于 0.1 s,个别可持续近 0.2 s。这个持续时间与 600 kg 单段药量爆破^[12]测得的振动时长(0.4 s)差一倍,与 50 t 大型爆破^[13]的振动持续时间(2~5 s)小很多。与天然地震的几十秒至数分钟的振动时间就相差多。

(3)对实测速度波形进行 FFT 分析,发现垂直方向的振动,其频谱主要位于 20~500 Hz 这个范围,而水平方向的振动,则大多位于 200~800 Hz 范围内。图 5 即是图 3 所示波形的 FFT 分析结果,其中纵坐标 $\bar{A}$ 为量纲一相对振幅,显然比文献[11](单次 17 kg 炸药)和文献[12]的振动频率分布更高(其最高功率对应的频谱分别是 169.38 和 14.64 Hz)。且发现隔振沟存在与否对振动频谱基本无影响。

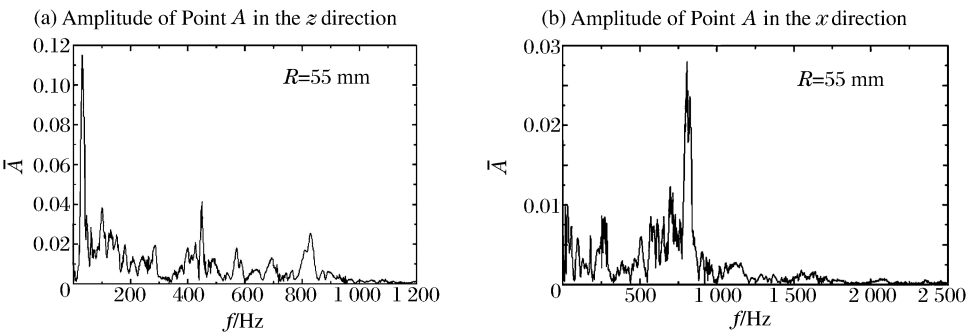


图 5 典型振动波形的 FFT 频谱

Fig. 5 The FFT spectra of typical vibration waves

2.2 各点振动速度峰峰值比较

由于峰峰值更能说明振动幅值的大小,所以用来代表振动的强弱。表 1、2 分别是无隔振沟、有隔振沟时垂直 z 及水平 x 向的各点处振动速度峰值的数据。

表 1 无隔振沟时振动速度峰峰值比较

Table 1 Comparison of vibration velocity peak to peak value without trench

R/mm	A		B		C		D		E		F	
	$v_z/$	$v_x/$	$v_z/$	$v_x/$	$v_z/$	$v_x/$	$v_z/$	$v_x/$	$v_z/$	$v_x/$	$v_z/$	$v_x/$
	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)
35	3.03	2.85	—	—	—	—	2.70	2.03	1.39	1.30	1.40	1.22
35	2.71	1.12	0.93	0.62	1.65	1.15	1.88	0.72	0.89	0.50	0.70	0.60
45	5.14	4.03	2.49	2.43	3.98	1.94	3.21	1.83	2.21	2.18	2.26	1.30
55	6.62	2.96	2.10	2.47	3.50	1.93	4.09	2.89	3.06	2.51	1.87	1.70
65	13.10	3.33	2.75	3.66	5.02	2.39	5.40	3.17	2.77	4.50	2.77	2.62

表 2 有隔振沟时振动速度峰峰值比较

Table 2 Comparison of vibration velocity peak to peak value with trench

R/mm	A		B		C		D		E		F	
	$v_z/$	$v_x/$	$v_z/$	$v_x/$	$v_z/$	$v_x/$	$v_z/$	$v_x/$	$v_z/$	$v_x/$	$v_z/$	$v_x/$
	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)	(cm/s)
40	—	—	—	—	1.81	0.80	9.93	10.00	1.58	0.73	1.05	0.54
50	14.30	19.20	4.40	1.75	1.53	1.08	20.00	19.20	2.33	0.71	3.68	1.37
60	24.35	29.41	7.67	2.39	2.63	1.04	29.62	20.80	3.68	1.07	6.61	3.14
70	51.26	55.96	12.29	4.14	3.95	2.08	28.92	34.94	6.63	2.40	6.98	3.21

对比分析表 1、2 中的数据,可以看到:

(1)爆炸产生的地震波确实是典型的非平稳随机信号^[10],对 $R=35\text{ mm}$ 进行的 2 次重复实验结果充分显示了随机涨落特征;此外,2 条重复测线上各对应点数据的较大差别也提示地面施工状况或传感器安装力矩的微小差别也会导致测试结果呈现较大的差异。

(2)隔振沟的存在使沟内侧(靠塔体)地表的振动幅度增强至原来的约 10 倍,这是爆炸地震波在隔振沟自由面的反射效应所致。郭学彬等^[14]在野外均质黄土层中发现振速增加现象(但增量仅约 30%),并把它解释为沟槽的动力反应,该动力反应区宽度约 0.60 m。B、E 点的数据也提示炸药量越大,这种动力反应现象越明显,而 B、E 这 2 个点距隔振沟中心 0.65 m,正好处于动力反应区的边缘上。

(3)隔振沟对水平方向的振动衰减更为有效,使振幅衰减至原来的 1/10 以下;垂直方向的振幅衰减至原来的 1/4~1/3。这个结果与郑水明等^[6]对 11 t 的落锤从 12 m 高处落下的隔振研究结论一致,即:隔振沟使水平向振动速度峰值衰减了 80%,使垂直方向衰减了不足 30%。

(4)B、C、E、F 这 4 个点的数据表明隔振沟并没有从绝对振动幅值上降低爆炸塔隔振沟外侧 0.5~1.5 m 区域地表的质点振动速度。这个结果很有意义,首先它解释了为何个别爆炸塔运行时相邻建筑的地面振动仍然非常强烈;其次它提示我们,需要从理论上探讨隔振沟的深度设计依据,而不能再一句经验设计成深 1~2 m。

3 讨 论

天然或人工振源在介质中引发的地震波如图 6 所示,首先是纵波(P 波),它的振动方向与波传播方向一致,使介质产生疏密相间的压缩和膨胀;其次是横波(S 波),质点振动方向与波传播方向垂直,使介质被剪切,S 波分 SV 和 SH 波;最后是面波(主要以瑞利波为主),瑞利波(R 波)是前面 2 种体波(P 波和 SV 波)在介质边界相互作用叠加形成的,使介质质点作图 6 中所示的逆向椭圆运动,且质点垂直方向振幅为水平向的约 1.5 倍。

从前面实测的地面振动波形可以看出,爆炸引起的地面振动是很复杂的随机过程,它既有体波也有面波,是不同幅值、不同频率与不同相位的各种波型的叠加波。同时由于测点离振源中心较近,P 波、S 波和 R 波在传播时尚未分离,他们对地面振动均有贡献,但从振幅角度看,垂直方向的振幅仍然大于水平方向,周期较大,衰减也较慢,具有面波(R 波)特征。因此,爆炸塔的隔振就主要考虑对瑞利波的衰减,已有的研究认识均表明:R 波在半无限空间中的有效传播深度约 1.5λ ^[15](λ 为 R 波波长),文献[16]的动光弹研究显示出当隔振沟深度达到 $(3\sim4)\lambda$ 时,R 波被完全反射回去,此时达到最大隔振效果。

显然求出爆炸地震波中 R 波的波长 λ ,即可据此设计爆炸塔的隔振沟深度。实际工程中爆炸塔外侧周边地面混凝土层厚仅几厘米,主要还是粘土层,在粘土层中 C. H. Dowding^[17] 给出的 S 波速度 v_s 为 200~800 m/s,瑞利波速度 $v_R\approx0.92v_s$,则 R 波速度在 184~736 m/s 这个范围内。赵增欣^[18] 在大烟囱爆破中测出水泥地面的 S 波速度 $v_s=619$ m/s,由此得到 R 波速度 $v_R=569$ m/s,与郑水明^[6] 的分析计算和文献[17]对页岩中 R 波波速的实测结果 671 m/s 也较接近。因此爆炸塔周边地面瑞利波的传播速度可参照取为 569 m/s。而本文中实测的垂直向振动频率(R 波的垂直分量体现)主要分布在 200~500 Hz 之间,如图 7 所示。波长 $\lambda=v_R/f$,故此时 R 波的波长在 200 Hz 时为 2.85 m,在 500 Hz 时为 1.14 m。由于对结构破坏较大的是低频振动,取 200 Hz 时的最大波长 $\lambda_{\max}=2.85$ m。考虑文献[15-16]的研究成果,并结合实际工程可行性和建设成本,则隔振沟深度建议取 3λ ,深约 8.5 m。

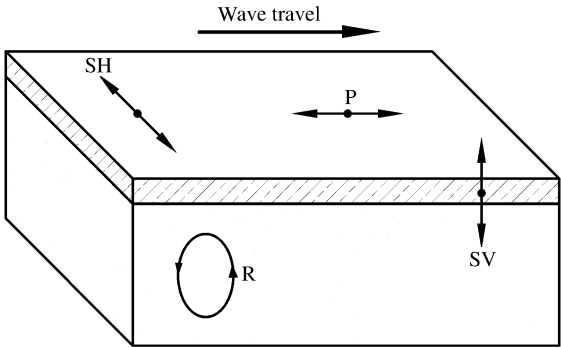


图 6 介质中的地震波

Fig. 6 The seismic waves in the medium

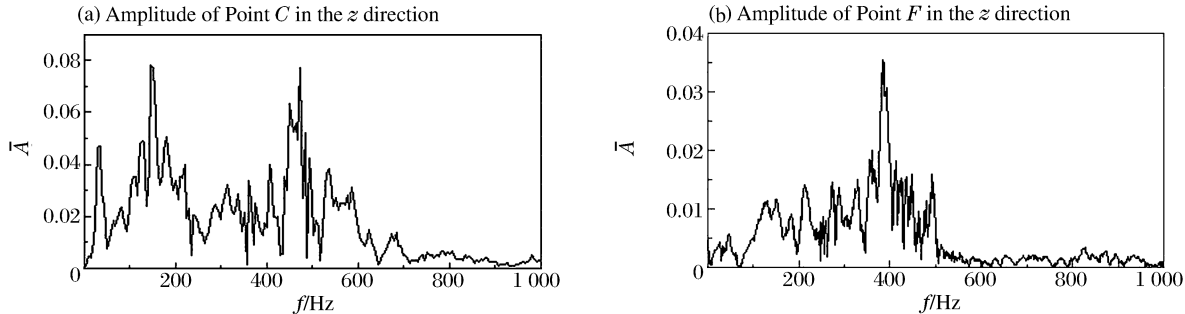


图 7 垂直方向振动的频谱分析

Fig. 7 The FFT analysis of the vertical vibration waves

4 结 论

(1)爆炸塔周边地表的振动具有典型非平稳随机信号特征,振动波形是包含体波和面波的叠加波;地面振动的持续时间小于0.2 s,垂直向振动频谱范围在20~500 Hz,水平向则范围在200~800 Hz。

(2)隔振沟的存在使靠塔体一侧地表的质点振动幅度因自由面反射效应而增强至之前约10倍,质点水平方向振动幅度的增大比垂直方向更突出;无隔振沟或隔振沟外侧,地表垂直方向振幅大于水平方向,垂直方向振动周期较大,衰减更慢,具有面波特征;水平方向频率更大,衰减更快,振幅较小,具有体波特征。隔振沟对地表振动频率无明显影响。

(3)隔振沟对水平方向的振动衰减效应更加明显,可使水平方向振幅衰减至原来的1/10;使垂直方向振幅衰减至原来的1/4~1/3。

(4)对爆炸塔产生的地震波,隔振沟的深度至少应达到2~3倍瑞利波波长,即5.7~8.5 m,才能产生明显的隔振作用;实测结果也表明1 m深的隔振沟基本上无隔振意义。

参考文献:

- [1] Lee R S. A survey of contained high explosive firing facilities[R]. UCRL-17091,1978.
- [2] 赵士达.爆炸力学实验室[J].科研工程,1996,18(4):1-6.
ZHAO Shi-da. The explosion mechanics laboratory[J]. Chinese Journal of Scientific Research Engineering,1996,18(4):1-6.
- [3] Baker C F. Site 300's contained[J]. Science & Technology Review, UCRL-52000-97-3, 1997.
- [4] 何涌东,陈静.免振捣自密实混凝土在大型爆炸洞施工中的应用[J].施工技术,2002,31(5):34-35.
HE Yong-dong, CHEN Jing. Application of free-vibration self-compaction concrete in construction of large explosion hole[J]. Chinese Journal of Construction Technology, 2002,31(5):34-35.
- [5] Venkatesh H S. Reduction of blast induced ground vibrations with open trenches in surface mines[C]//Proceedings of the 12th International Conference of IACMAG. Goa, India, 2008:4132-4139.
- [6] 郑水明.工程场地隔振沟减震效应[J].爆破,2008,25(3):103-106.
ZHENG Shui-ming. Vibration-isolating effect of vibration-isolating slot in project site[J]. Chinese Journal of Blasting, 2008,25(3):103-106.
- [7] 文潮,李运良.减震沟槽成形技术实验研究[J].应用物理,2010,1(3):300-307.
WEN Chao, LI Yun-liang. Experimental study on the techniques of forming damping slot[J]. Chinese Journal of Applied Physics, 2010,1(3):300-307.
- [8] 林大超,白春华.爆炸地震效应[M].北京:地质出版社,2007:78-81.
- [9] 言志信,王后裕.爆破地震效应及安全[M].北京:科学出版社,2011:46-48.
- [10] 李夕兵,凌同华,张义平.爆破震动信号分析理论与技术[M].北京:科学出版社,2009:23-25.
- [11] 李国保,舒大强.隧洞爆破作用下洞内与露天区域振动能量特性分析[J].爆破,2011,28(2):105-108.
LI Guo-bao, SHU Da-qiang. Energy characteristic analysis of vibration inside and outside tunnel under blasting effect[J]. Chinese Journal of Blasting,2011,28(2):105-108.
- [12] 唐飞勇.爆破振动信号特征分析的应用探讨[J].爆破,2010,27(4):109-115.
TANG Fei-yong. Characteristics analysis of blasting vibration signal of open pit[J]. Chinese Journal of Blasting, 2010,27(4):109-115.
- [13] 刘爱文.50 t科学爆破振动的衰减特征及地形效应[J].爆炸与冲击,2010,30(1):21-26.
LIU Ai-wen. Attenuation characteristics and topographic effect of a scientific explosion with 50t explosive[J]. Explosion and Shock Waves, 2010,30(1):21-26.
- [14] 郭学彬,肖正学,张志呈.爆破地震作用的沟槽效应[J].爆破器材,1999,28(3):4-7.
GUO Xue-bin, XIAO Zheng-xue, ZHANG Zhi-cheng. Channel effect of blasting vibration[J]. Chinese Journal of Explosive Materials, 1999,28(3):4-7.
- [15] 夏唐代,颜可珍.饱和土层中瑞利波的传播特性[J].水利学报,2004(11):81-84.

XIA Tang-dai, YAN Ke-zhen. Propagation of Rayleigh wave in saturated soil layer[J]. Chinese Journal of Water Conservancy, 2004(11):81-84.

[16] 朱振海. 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 Zheng-hai. Dynamic photoelastic studies of the vibration damping by a slot near a structure[J]. Explosion and Shock Waves, 1989, 9(1):55-59.

[17] Dowding C H. Blast vibration monitoring and control[M]. London: Prentice-Hall International, Inc. 1985:21-22.

[18] 赵增欣. 大烟囱爆破振动分析[C]//第 15 届全国振动与噪声控制高技术及应用会议文集. 杭州, 2001:23-30.

**Effects of vibration-isolating trench on ground vibration
surrounding blast containment chamber^{*}**

HU Ba-yi, CHEN Shi-yong, GU Yan, LIU Yu, LIU Cang-li
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,
Mianyang 621900, Sichuan, China*)

Abstract: A series of blast experiments with and without vibration-isolating trenches were implemented in the blast containment chamber with an elliptic cone which having an inside diameter of 2 m and a wall thickness of 0.4 m. And the vertical and horizontal ground vibration velocities at 6 different points on the surrounding ground of the chamber were measured. The experimental results show that the ground vibration duration is less than 0.2 seconds, the frequency spectra of the vertical and horizontal vibrations are in the 20-500 Hz and 200-800 Hz ranges, respectively. The horizontal velocity amplitudes after attenuation by the trenches are one-tenth of those before attenuation, as well as one-fourth to one-third for the vertical velocity amplitudes. But the trenches have no obvious effect on the frequency spectra of the ground vibration waves. The vibration-isolating trenches with 1m depth have no attenuation effect on the blast seismic waves, but the attenuation effect will be remarkable when the depths of the trenches are 1.5-2.0 times as long as the wavelengths of the Rayleigh waves.

Key words: mechanics of explosion; vibration velocity; blast containment chamberblast seismic waves; chamber

^{*} Received 1 September 2011; Revised 14 August 2012
Corresponding author: HU Ba-yi, hby5170@sina.com

(责任编辑 王易难)