

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.02.024

不同真空度下地表爆炸后地面振动规律研究

纪晓琳,王小红,李晓杰,闫鸿浩

(大连理工大学 运载工程与力学学部工程力学系,大连 116024)

摘要: 为研究真空度对爆炸引起的地面振动的影响,开展了炸药在真空爆炸容器爆炸后产生地面振动衰减规律的研究。研究爆炸振动衰减规律,进一步分析真空度对爆炸后地面振动效应的影响;同时,预判爆炸容器内不同药量爆炸时的影响距离,以确定爆炸影响范围进行防护。基于实验数据,分析了振动速度随炸药量、爆心距的衰减规律,并利用萨道夫斯基经验公式,采用最小二乘法拟合求取爆破振动参数 K 、 α 值,最终得到爆炸振动速度衰减方程,对综合情况和真空下的振动衰减曲线进行对比分析。结果表明:在爆炸容器5倍比距离下,真空度对振动速度衰减有影响;但是大于5倍比距离下,爆炸容器的真空度对振动影响很小,其远处的地基振动在相同距离下变化不大。在药量和爆心距相同的情况下,随着容器压强即真空度的增大,合速度缓慢增大,且对远距离处的振动影响很小。这是国内首次探索不同真空度下地面爆炸振动规律,并依据特定允许振动速度数值计算安全距离,可为类似研究提供借鉴。

关键词: 真空爆炸; 振动规律; 爆炸振动

中图分类号: O382; TD235 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)02-0159-06

Law of Surface Explosion Ground Vibration under Different Vacuum Degrees

Ji Xiao-lin, WANG Xiao-hong, LI Xiao-jie, YAN Hong-hao

(Department of Engineering Mechanics, Faculty of Vehicle Engineering
and Mechanics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to study the influence of vacuum on ground vibration caused by explosion, the attenuation law of ground vibration caused by explosion after vacuum explosive vessel is studied. The attenuation law of explosion vibration is studied, and the influence of vacuum on the ground vibration effect after explosion is further analyzed. At the same time, the influence distance of different explosive amount in the explosion container is predicted to determine the explosion influence range for protection. Based on the experimental data, the attenuation law of vibration velocity with explosive amount and the distance between testing point and charge is analyzed, and the blasting vibration parameters K , α are obtained by using the Sadowski empirical formula and the least square method. Finally, the attenuation equation of explosion vibration velocity is obtained, and the vibration attenuation curves under comprehensive condition and vacuum are compared and analyzed. The results show that the vacuum degree has an effect on the vibration velocity attenuation under the 5 times specific distance of the explosive container. However, when the specific distance is greater than 5 times the specific distance, the vacuum degree of the explosive container has little effect on the vibration, and the distant foundation vibration does not change much at the same distance. In the case of the same charge quantity and distance between testing point and charge, the resultant velocity increases slowly with the increase of container pressure, that is, the vacuum has little effect on the vibration at a long distance. This is the first time in China to explore the law of ground explosion vibration under different vacuum degrees, and the safe distance is calculated numerically according to the specific allowable vibration velocity, which can be used as a reference for similar research.

Key words: vacuum explosion; vibration law; explosive vibration

随着工业工程的快速发展,工业爆破在工程领域的应用越来越广泛。爆破技术在为工程施工带来便利的同时也存在一些安全问题。爆炸会引起土体或基岩的振动,同时产生的冲击波、有害气体、飞石等可能会对爆炸区域周围环境和邻近的地表建筑物造成污染和损害。为避免和减少爆破振动危害,预测和控制爆破振动强度,研究地表爆炸后地面振动规律是十分必要和有意義的。针对爆炸焊接作业,厂房内部的爆炸容器已经成为科研实验利器,不仅降低了往返靶场费用同时也加快了实验进度;如果,加大厂房内部的爆炸容器使用 TNT 当量,其引起的地面振动需要进行研究,不同药量下的安全距离划定便于后续再建厂房规划参考。

纵观地面振动规律的相关研究,对地铁汽车运行引起的地面振动实测和规律分析的研究较多;邹超等利用某地的实测数据^[1],分析振动加速度在时域频域的变化,得到地铁运行引起的地面振动响应和相关振动衰减规律。爆破引起的地面振动规律的研究的方法已经比较成熟,通常的研究思路是:根据爆炸试验或爆破工程中实测的数据,利用萨道夫斯基公式采用最小二乘法拟合得到相应的振动速度衰减公式。费鸿禄等将利用萨道夫斯基公式反推的质点振速和利用 FLAC^{3D} 软件数值模拟得到的振速与实际测得的振速进行对比^[2],得出的相关结论以指导方案调整和现场施工。胡建华等基于具体工程试验^[3],结合修正的萨道夫斯基公式采用多元线性化回归法来探究工程岩体的爆破振动衰减规律。冯阳阳等聚焦于爆炸容器内爆炸引起的地表振动^[4],分析了不同炸药量等变量下的振动规律变化。毕卫国等人分析了萨道夫斯基公式的误差来源^[5],并利用编制程序比较各种拟和公式,探讨振速衰减公式的优化选择。

本文开展炸药在真空爆炸容器(用于爆炸焊接科研使用)内,不同真空度下爆炸后地面振动规律研究,通过测点数据研究爆炸后地面振动衰减规律,并进一步分析真空度对爆炸后地面振动效应的影响;同时,预判爆炸容器内不同药量爆炸时的影响距离,以确定爆炸影响范围进行防护。

1 实验方案

1.1 实验测点布置

实验共测试 11 炮次,2020 年 9 月 2 日、3 日,在爆炸容器(体积 250 m³,尺寸不便标注,坐落于硅石矿坑)顶部布置振动速度 5#测点,1#、2#、3#、4#测点的具体位置如图 1 所示,共测试 5 炮次,实验编号为 S1~S5,同期也进行了噪声、壳体动态应变、内壁冲击波超压测量,本文重点分析振动速度规律。9 月 3 日、4 日,4#测点的位置调至到爆炸容器门口对面 22.5 m 处,其他测点位置保持不变,共测试 6 炮次,实验编号为 S6~S11,测点分布见图 1。

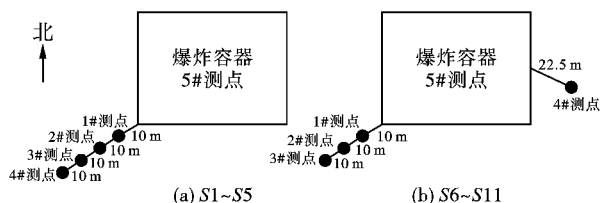


图 1 实验 S1~S11 监测布点图

Fig. 1 The experiment S1~S11 monitoring point arrangement

在计算分析时,对于 S1~S5 炮次,由于第二测点数据跳跃 3 次放弃对该点统计,第 5 测点放在了真空容器上方的覆盖沙土层测试时速度传感器脱离容器钢板,故放弃对其统计;对于 S6~S11 炮次,对于第四测点,由于其位于容器开口方向,也做放弃处理。

1.2 测试仪器

地面振动测试采用爆破振动仪及配套的速度传感器来进行数据的采集和记录。在每个测试点布置测振仪器,分析真空爆炸容器爆炸时采集的地震波形,得到各测点的振动速度、频率等重要参数。采集率 2 k/s,时间长度设定 2 s,调整预触发 -400 ms,速度传感器参数为 28~30 V/(m/s)。

2 振动测试结果

对于布置在爆炸容器顶部的 5#测点处的振动数据并不能反映地基振动与药量的关系,故对测点 4、5 的数据不做分析。为了清楚地分析真空爆炸容器在不同真空度、炸药量和测点的地基振动影响,根据曲线测试数据,提取了药量、距离、振动合速度、垂直向振动主频等主要参数数据做进一步分析,如表 1 所示。

收稿日期:2022-01-07

作者简介:纪晓琳(1997-),女,在读硕士,主要从事工程爆破及其振动测试方面的研究,(E-mail)1147170441@qq.com。

通讯作者:闫鸿浩(1975-),男,博士、教授,主要从事爆炸力学、爆炸加工、工程爆破及其振动测试等方面的研究,(E-mail)yanhh@dlut.edu.cn。

表 1 测点振动检测结果
Table 1 Vibration monitoring results of measuring points

实验 编号	药量/ kg	容器 压强/ atm	仪器 编号	垂直速度 $V_z/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	垂直 频率/ Hz	纬向速度 $V_y/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	纬向 频率/ Hz	经向速度 $V_x/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	经向 频率/ Hz	合速度 $V_H/$ ($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)	距离 L/m
S_1	10	0.2	1#	0.6725	20.056	0.7673	18.618	0.6284	21.992	0.9501	15
			3#	0.2953	17.544	0.1668	18.868	0.3236	17.544	0.3338	35
			4#	0.0575	0.250	0.0944	3.472	0.1207	9.091	0.1433	45
S_2	10	0.46	1#	1.0174	26.682	0.8666	22.082	0.5920	16.405	1.1107	15
			3#	0.3796	18.519	0.2669	21.739	0.3501	21.277	0.3915	35
			4#	0.0604	0.250	0.1048	3.125	0.1600	9.804	0.1736	45
S_3	10	0.76	1#	0.7549	15.862	0.9983	23.493	0.8068	19.256	1.2595	15
			3#	0.4176	20.833	0.2508	23.256	0.4032	20.408	0.4477	35
			4#	0.0705	0.250	0.1182	12.987	0.1492	8.547	0.1712	45
S_4	10	1	1#	0.9106	18.962	0.9309	18.785	0.9189	18.591	1.3124	15
			4#	0.0822	0.268	0.1334	14.085	0.1707	8.333	0.1858	45
S_5	20	0.22	1#	1.0371	17.723	1.5131	24.561	0.9728	24.664	1.6108	15
			4#	0.0955	0.268	0.1361	17.857	0.1892	9.434	0.2215	45
S_6	40	0.2	1#	1.6194	13.387	2.2433	15.017	2.5046	21.159	3.1452	15
			2#	1.6071	27.027	1.6726	13.514	0.6283	23.256	1.8096	25
			3#	0.8714	17.857	0.9647	18.519	0.4163	21.739	1.0104	35
S_7	60	0.21	1#	0.9392	12.959	1.2219	16.238	1.1221	19.428	1.6553	15
			2#	0.6175	37.037	1.1051	14.925	0.2946	21.739	1.1335	25
			3#	0.4861	16.949	0.5686	13.699	0.2939	17.857	0.6328	35
S_8	80	0.2	1#	2.0249	13.819	2.7084	15.188	3.0936	18.239	4.0560	15
			2#	2.0251	25.000	2.0226	12.195	1.0426	19.231	2.2542	25
			3#	1.0231	17.544	1.2610	14.925	0.4901	37.037	1.4036	35
S_9	15	0.2	1#	1.1425	14.094	1.6725	16.868	1.8054	26.081	2.2414	15
			2#	1.0837	33.333	1.0753	13.514	0.3443	15.385	1.1332	25
			3#	0.6105	17.857	0.6715	14.493	0.2904	24.390	0.7870	35
S_{10}	25	0.5	1#	1.6149	12.533	2.9372	15.186	3.525	18.323	4.4374	15
			2#	2.0060	25.000	2.0081	12.987	0.9248	16.949	2.4095	25
			3#	1.1992	17.544	1.3989	12.048	0.4944	21.277	1.5146	35
S_{11}	10	0.2	1#	0.8489	15.798	0.9439	17.681	1.0777	21.589	1.3339	15
			2#	0.5196	35.714	0.8361	13.889	0.2979	14.493	0.8743	25
			3#	0.4239	18.182	0.4066	12.346	0.2586	18.182	0.4884	35

3 振动结果分析

以表 1 中实验 S_{11} (10 kg、0.2 atm)、 S_9 (15 kg、0.2 atm)、 S_6 (40 kg、0.2 atm)、 S_8 (80 kg、0.2 atm) 数据绘制绘制药量和真空度一定时爆炸振速与爆心距的关系曲线,如图 2 所示。

由图 2 可知,在药量和真空度一定的情况下,随着爆心距的增加,振动速度逐渐减小。且靠近爆炸源头的区域振动速度随距离的增加衰减迅速。分析相同距离下的振动速度大小可知起爆药量大者其振

动速度大,符合实际情况也符合常识,释放能量越大,相同距离下振动速度大,对应结果见图 3。

同样以表 1 中实验 S_{11} 、 S_9 、 S_6 、 S_8 数据绘制爆心距和真空度一定时爆炸振速与药量的关系曲线,如图 3 所示,在爆心距和真空度一定的情况下,随着药量的增加,振动速度逐渐增大。且比较 3 条曲线可知,振速随距离的增加而减小,这与上述结果是一致的。上述结果亦与文献[6,7]的结论保持一致。

3.1 振动速度回归分析

根据所得数据,现对该测试地点进行振动速度

回归分析。采取的方法是:利用萨道夫斯基经验公式,用最小二乘法拟合求取爆破振动参数 K 、 α 值,最终得到爆炸振动速度衰减方程。萨道夫斯基经验公式为^[8-13]

$$V = K(\sqrt[3]{Q}/R)^\alpha \quad (1)$$

式中: V 为爆炸引起质点峰值振速, cm/s ; Q 为药量, kg ; R 为爆心距, m ; K 、 α 为分别为与地质条件和爆炸方式有关的系数和衰减指数。

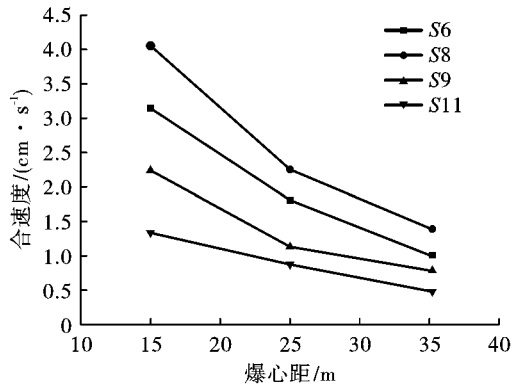


图2 药量和真空度一定时爆炸振动速度图

Fig. 2 Vibration velocity diagram with constant dosage and vacuum degree

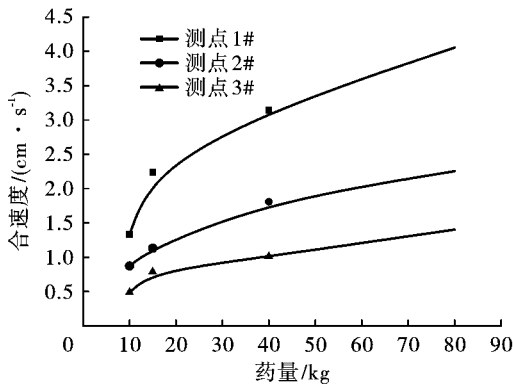


图3 不同起爆药量下振动速度图

Fig. 3 Vibration velocity diagram under different amount of primary explosive

对公式(1)做如下处理,两边取对数,公式转变为线性方程

$$\ln(V) = \ln(K) + \alpha \ln(\sqrt[3]{Q}/R) \quad (2)$$

结合所得测试数据,统计 Q 、 R 、 V , 形成 $\ln(V)$ 与 $\ln(\sqrt[3]{Q}/R)$ 的数据队列,绘制 $\ln(V)$ 与 $\ln(\sqrt[3]{Q}/R)$ 的散点图,并依据最小二乘法拟合直线得出图4,拟合 $y = 1.6142x + 3.5098$, 得: $K = e^{3.5098} \approx 33.44$, $\alpha = 1.61$ (K 值取整, α 保留两位小数)。则可得到地面振动速度衰减方程: $V = 33.44(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.61} (\text{cm/s})$ 。

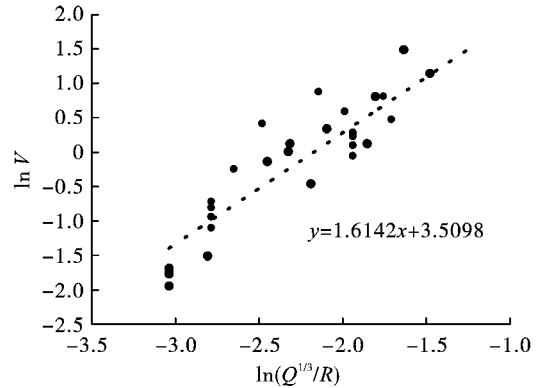


图4 爆炸振动统计拟合图

Fig. 4 Statistical fitting diagram of explosion vibration

3.2 0.2 大气压下振动衰减规律

从图4中保留0.2大气压下振动速度数据,用二乘法反演爆炸振动速度衰减规律如图5。

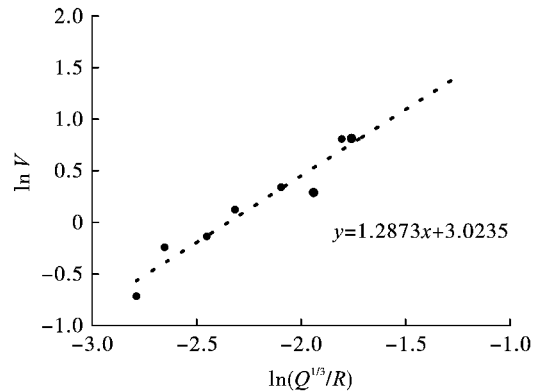


图5 爆炸振动统计拟合图(0.2 atm)

Fig. 5 Statistical fitting diagram of explosion vibration(0.2 atm)

同样利用最小二乘法拟合直线,得到拟和公式: $y = 1.2873x + 3.0235$ 。由此可得, $K = e^{3.0235} \approx 20.56$, $\alpha = 1.29$ (K 值取整, α 保留两位小数)。则0.2个大气压下的数据拟合得到的振动衰减公式 $V = 20.56(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.29} (\text{cm/s})$ 。

3.3 地面振动衰减规律对照

将3.1节、3.2节反演得到的振动衰减规律综合于图6上。蓝色曲线是综合振动衰减曲线,红色曲线为0.2大气压下的地表振动速度衰减规律;当此距离大于5时,两者相差很微小;在此距离小于5时,真空下爆炸地表振动相对于综合振动数值还是有所减小,这表明当具有真空度时,容器内炸药爆炸引起的近距离振动要小一些,十分符合客观实际。由于炸药在容器内部且布置在底部,炸药与地面直接接触,炸药爆炸产生对地基的冲击会由于真空度变化使得传递给地基的能量降低,但降低量有限。

对于远距离预估时,不必要计较真空影响,可以考虑综合情况下振动规律进行计算。

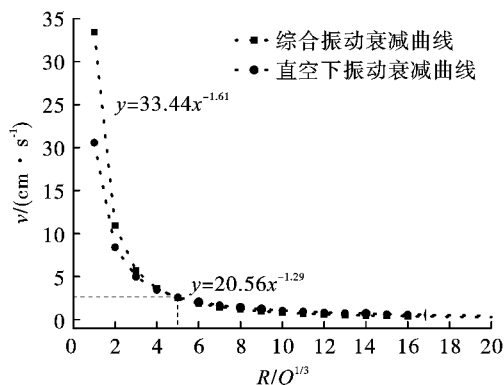


图6 振动衰减规律对照图

Fig. 6 Contrastive diagram of vibration attenuation law

为精细比较真空度影响,将实验 $S_1 \sim S_4$ 实验数据单独考虑,统计于图7。对于在15、35 m处测点,真空度0.2~0.46~0.76~1.0变化时,振动速度增加;对于45 m处测点,真空度从0.2向1.0变化时,振动速度变化并不大,这也证明了图6分析的正确性。

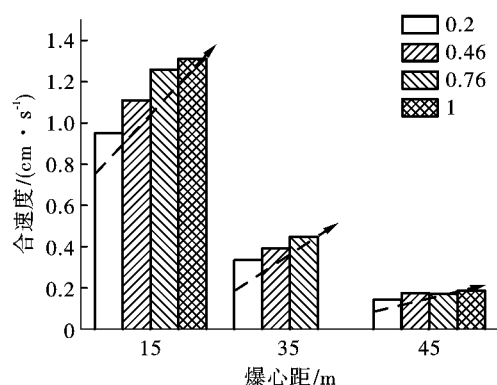


图7 不同真空度下不同距离处在相同药量下振动速度规律图

Fig. 7 Diagram of vibration velocity law under the condition of different vacuum degrees, distances and same dosage

考虑真空条件,预判当抽空时即爆炸容器内为负压,远距离处振动影响很小。 S_1 号实验,10 kg炸药,0.20 atm,4#测点,距离45 m,其振动合速度0.1433 cm/s; S_2 号实验,10 kg炸药,0.46 atm,4#测点,距离45 m,其振动合速度0.1736 cm/s; S_3 号实验,10 kg炸药,0.76 atm,4#测点,距离45 m,其振动合速度0.1712 cm/s; S_4 号实验,10 kg炸药,1.0 atm,4#测点,距离45 m,其振动合速度0.1858 cm/s。振动合速度从0.1433变化到0.1858 cm/s,增加很微弱。根据图7和上述分析,在药量和爆心距相同的情况下,随着容器压强即

真空度的增大,合速度缓慢增大,且对远距离处的振动影响很小。

4 预判振动影响距离

爆炸容器是爆炸焊接的主要加工场所,而爆炸焊接场地建设在居民区不太现实,有可能在野外构筑。在野外,可以只考虑“土窑洞、土坯房、毛石房屋”类别房屋。根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014)中对此类房屋的爆破振动安全允许标准,在三个频域的振动允许速度为0.15~1.5 cm/s;建议取最小值0.15 cm/s设置防护。爆炸真空容器使用药量从300~700 kg变化,振动速度设置防护标准为0.15 cm/s,其综合压强、0.2 atm下振动影响范围如表2所示。

表2 安全距离
Table 2 Safe distance

药量/kg	安全距离/m(0.2 atm)	安全距离/m(综合)
100	210	133
200	265	168
300	304	192
400	334	212
500	360	228
600	382	242
700	403	255

分析表2,对于抽真空和综合两种情况,真空情况下的振动影响范围相对大一些,故可以选择振动速度衰减规律为 $V = 20.56(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.29}$ (cm/s)。

5 结论

以爆炸容器爆炸试验为背景,研究了不同真空度下爆炸后地面振动规律,得到以下结论:

(1)在药量和真空度一定的情况下,随着爆心距的增加,振动速度逐渐减小。且靠近爆炸源头的区域振动速度随距离的增加衰减迅速。在爆心距和真空度一定的情况下,随着药量的增加,振动速度逐渐增大。

(2)当抽空时,即容器为负压,其振动影响很小,由于地基振动的源头来自于炸药爆炸对地面的冲击造成的,在大于5倍比距离时的地基振动在相同距离下变化不大。在药量和爆心距相同的情况下,随着容器压强即真空度的增大,合速度缓慢增大,且对远距离处的振动影响很小。

(3)依据实测数据,用最小二乘法拟合出的地面振动速度衰减方程: $V = 33.44(\sqrt[3]{Q}/R)^{1.61}$; $V =$

20.56($\sqrt[3]{Q/R}$)^{1.29}(0.2 atm)。

(4)对于抽真空和综合两种情况,真空情况下的振动影响范围相对大一些,故可以选择振动速度衰减规律公式 $V = 20.56(\sqrt[3]{Q/R})^{1.29}$ (cm/s) 进行控制。

参考文献 (References)

- [1] 邹超,汪益敏,汪朝晖,等.地铁车辆段咽喉区地面振动传播规律实测与分析[J].振动与冲击,2015,34(16):200-206.
- [1] ZOU Chao, WANG Yi-min, WANG Chao-hui, et al. Field measurement and analysis of ground vibration in the throat area of metro depot[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(16):200-206. (in Chinese)
- [2] 费鸿禄,王振达,蒋安俊,等.地铁隧道爆破振动对地面的影响规律研究[J].爆破,2018,35(3):68-73.
- [2] FEI Hong-lu, WANG Zhen-da, JIANG An-jun, et al. Study on influence of blasting vibration on ground of metro tunnel[J]. Blasting, 2018, 35(3):68-73. (in Chinese)
- [3] 胡建华,尚俊龙,罗先伟,等.单孔爆破振动监测与衰减规律多元线性化回归[J].振动与冲击,2013,32(16):49-53.
- [3] HU Jian-hua, SHANG Jun-long, LUO Xian-wei, et al. Monitoring of single-hole blasting vibration and detection of its attenuation law by using multiple linear regression[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(16):49-53. (in Chinese)
- [4] 冯阳阳,蒲传金,肖定军,等.爆炸塔炸药空爆振动衰减及对邻近建筑影响试验[J].爆破,2018,35(1):21-26,34.
- [4] FENG Yang-yang, PU Chuan-jin, XIAO Ding-jun, et al. Test of vibration attenuation and influence on adjacent buildings[J]. Blasting, 2018, 35(1):21-26, 34. (in Chinese)
- [5] 毕卫国,石崇.爆破振动速度衰减公式的优化选择[J].岩土力学,2004(S1):99-102.
- [5] BI Wei-Guo, SHI Chong. Optimization selection of blasting vibration velocity attenuation formulas[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004(S1):99-102. (in Chinese)
- [6] 贺高威,蒲传金,肖定军,等.爆炸塔内悬置裸露药包爆炸地表振动试验[J].有色金属(矿山部分),2018,70(2):53-58.
- [6] HE Gao-wei, PU Chuan-jin, XIAO Ding-jun, et al. Experiment on surface vibration of suspended exposed explosive charge in explosion tower[J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2018, 70(2):53-58. (in Chinese)
- [7] 刘向前,蒲传金,陆路,等.爆炸塔内空爆振动对邻近建筑物影响测试与评估[J].现代矿业,2019,35(6):242-246,251.
- [7] LIU Xiang-qian, PU Chuan-jin, LU Lu, et al. Testing and evaluation of air blast vibration in explosion tower on adjacent buildings[J]. Modern Mining, 2019, 35(6):242-246, 251. (in Chinese)
- [8] 国家安全生产监督管理总局. GB6722—2014 爆破安全规程[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [8] State Administration of Work Safety. GB 6722—2014 Safety regulation for blasting[S]. Beijing: China Standards Press, 2015. (in Chinese)
- [9] 闫鸿浩,李晓杰,曲艳东,等.爆破振动速度测试精细分析[J].岩土力学,2007(10):2091-2094.
- [9] YAN Hong-hao, LI Xiao-jie, QU Yan-dong, et al. Fine analysis of blasting vibration velocity testing[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007(10):2091-2094. (in Chinese)
- [10] 刘志波.莲花山隧道爆破振动效应试验研究[J].爆破,2020,37(3):78-84.
- [10] LIU Zhi-bo. Experimental study on blasting vibration effect of Lianhuashan tunnel[J]. Blasting, 2020, 37(3):78-84. (in Chinese)
- [11] 刘翼,谢守冬,傅建秋.180 m 烟囱分段爆破拆除振动监测与安全分析[J].爆破,2020,37(3):103-108.
- [11] LIU Yi, XIE Shou-dong, FU Jian-qiu. Monitoring and safety analysis of blasting vibration for blasting demolition of 180 m chimney in sections[J]. Blasting, 2020, 37(3):103-108. (in Chinese)
- [12] 李胜林,方真刚,杨瑞,等.浅埋地铁隧道爆破施工引起的地表振动规律分析[J].爆破,2019,36(2):111-116,130.
- [12] LI Sheng-lin, FANG Zhen-gang, YANG Rui, et al. Analysis of ground vibration caused by blasting construction of shallow buried tunnel[J]. Blasting, 2019, 36(2):111-116, 130. (in Chinese)
- [13] 王林峰,邓冰杰,莫诒,等.基于概率论的爆破振动安全评估与控制[J].振动与冲击,2020,39(14):122-129.
- [13] WANG Lin-feng, DENG Bing-jie, MO Yi, et al. Fourier frequency prediction of blasting vibration based on the probability theory[J]. Journal of Vibration and Shock, 2020, 39(14):122-129. (in Chinese)

英文编辑:陈东方