

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2015.04.017

柱状药包爆炸波传播规律的试验分析

江向阳, 颜事龙, 刘伟, 黄文尧

(安徽理工大学理学院, 安徽淮南 232001)

摘要:药包爆炸波在结构体中传播规律是研究爆破工程的关键性问题之一。先利用爆炸水池对微小药量柱状药包爆炸冲击波压力进行试验测试, 得到药包爆炸冲击波压力计算公式的相关参数; 再利用预埋在试件中应变砖, 对不同药量和长径比的药包进行爆破超动态应变测试。通过试验数据分析获得了柱状药包的爆炸冲击波在混凝土类脆性材料中的传播规律以及近中区应力波公式 $\sigma_r = \frac{\sigma_m}{r^\alpha}$ 中的衰减系数 α 值。

关键词:柱状药包; 爆炸力学; 爆炸波

中图分类号: O382.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2015)04-0121-07

Experimental analysis of the law of explosive wave of cylindrical charge

JIANG Xiangyang, YAN Shilong, LIU Wei, HUANG Wenyao

(College of Science, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, Anhui, P.R.China)

Abstract: The law of explosive wave in structures is one of the key problems of the blasting engineering studying. The study obtains the parameters of the formula of pressure caused by cylindrical charge's explosive shock wave through experiments in a pool firstly. Through testing cylindrical charge exploding in concrete specimen, the study then gets blasting strain wave's propagation law and formula's parameter of exploding cylindrical charge in concrete specimen.

Key words: cylindrical charge; explosion mechanics; explosive wave

由于工程爆破具有快速、经济和安全等优点, 所以随着国民经济的高速发展, 工程爆破技术在矿山、水利水电、铁路、交通、建筑等各个领域得到了广泛的应用, 并在其中起着举足轻重的作用。炸药爆炸使岩体类结构体发生破裂、破碎及抛掷, 这是爆炸应力波和爆生气体膨胀共同作用的结果。爆破作用是一个瞬间完成的高温高压过程, 岩石类材料本身具有非均匀性、非弹性和各向异性, 这导致其在爆炸载荷作用下是一个复杂的物理、力学过程^[1-2]。空气中和水下爆炸时的物理机制和介质运动已经研究的很全面和很详尽, 相比之下岩石中地下爆炸的物理机制、介质的运动和破坏的研究还很不透彻^[3-6]。

目前, 对于岩石爆破的物理机制, 国内外众多科研工作者从力学模型^[7]、断裂损伤^[7-12]、能量原理^[2, 13-14]、数值计算^[15]和实验^[16-17]等方面进行了大量研究, 但其成果与工程实际应用的需要相距甚远^[18-19]。爆破应力波在工作介质中的传播规律是解决该问题的基础。根据应力波理论, 应力波在介质中传播发生的衰减可分为几何衰减和物理衰减: 几何衰减是因能量分布空间的增大而衰减; 物理衰减是波在传播过程中与介质作用

收稿日期: 2015-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51134012); 安徽省教育厅自然科学基金资助项目(KJ2013A102)。

Supported by National Natural Science Foundation of China(51134012) and Natural Science Foundation of Education Department of Anhui Province(KJ2013A102).

作者简介: 江向阳(1973-), 男, 安徽理工大学博士研究生, 研究方向为岩土力学、爆炸力学及工程应用, (E-mail) xyjiang@aust.edu.cn。

而导致其携带的能量转变为其它形式的能量,如形成新岩块表面的表面能,由耗散生成的热能等。对于球形药包爆破应力波理论,经过前苏联科学家的努力,已获得了广为大家接受的应力波方程。柱状药包与球形药包的爆破应力波在传播过程中,在相同距离的条件下,其分布空间是不同的,故衰减也不同^[14]。因此,用球形药包理论来处理柱状药包问题在本质上是合适的。这里采用系统的实验手段对柱状药包在混凝土试件中爆破应力波进行试验测试与分析。

1 柱状药包参数的水下爆炸测试

由于试验用的水泥砂浆试块体积不大,所需药量很小,炮孔直径也很小,只有几个毫米,所以使用工业炸药是不合适的。本试验采用的是二硝基重氮酚(DDNP)作为爆源,装药密度为 $\rho_0 = 0.82 \text{ g/cm}^3$,爆速为 $v = 3\,991 \text{ m/s}$ 。药包直径为 3.5 mm 。试验所用爆炸水池 $\phi 5.5 \text{ m}$ 、高 3.62 m 。为避免炸药爆炸后来自水面和水池底部冲击反射的干扰,将装药在水池中心三分之二深度处爆炸,以消除边界效应。水下爆炸测试系统如图 1 所示。

根据 P.库尔的研究^[20],炸药水下爆炸冲击波压力计算公式

$$P_m = k \left(\frac{W}{R} \right)^{\alpha}, \quad (1)$$

式中: P_m 为冲击波压力,MPa; W 为标定药包的重量,kg; R 为传感器至药包中心的距离,这里其为 0.237 m ; k 、 α 为与实验有关系数和指数。

试验测试数据如表 1 所示,采用最小二乘法对实验数据进行曲线拟合,得到 $k = 41.45 \text{ MPa}$, $\alpha = 1.235$ 。

表 1 柱状药包水下爆炸压力试验数据

Table 1 Data of pressure of cylindrical charge blasting under water

编号	药量/g	峰值压力/MPa	平均压力/MPa
1	0.33	9.586	9.533
2		9.476	
3		11.867	
4	0.45	12.045	11.956
5		14.361	
6	0.61	13.898	14.130
7		14.005	
8	1.1	14.005	14.005

2 柱状药包爆炸冲击波基本问题

药包爆炸时在爆破工作面上产生的压力可达 $5 \sim 10$ 万个大气压,爆炸载荷首先在炮孔附近区域形成冲击波。随着冲击波的传播,爆炸能量向四周扩散,岩石介质中产生短时间的高压和高温,其使得岩石中形成

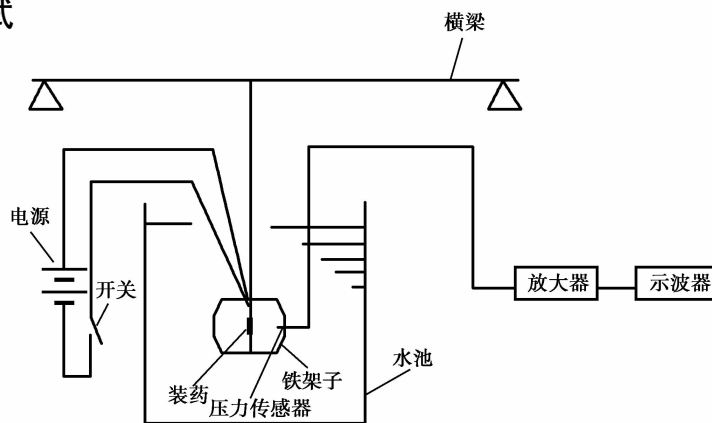


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental device

压碎圈。压碎圈的形成将消耗冲击波中很大一部分能量,导致冲击波衰减很快。因此,炸药爆破岩石的作用是先形成爆炸冲击波,而后其衰减成应力波。

关于爆炸应力波的研究较为成熟的是集中装药的球形药包,而在工程实践中,常采用等效球形药包理论的方法来计算柱状药包参数,即用集中药包的理论和公式计算柱状药包应力场参数,而后将其药量均匀拉长分布或乘以一经验系数来修正。关于柱状药包爆炸产生的冲击波在介质中的衰减规律一般用式(2)表示^[21]。

$$\sigma_r = \frac{\sigma_m}{r^\alpha}, \quad (2)$$

式中: $\bar{r} = \frac{r}{r_0}$ 为比距离, r, r_0 分别为传播距离和炮孔半径,其适用范围: $10 \leq \bar{r} \leq 120$; σ_m 炮孔的初始压力; α 为衰减系数,与介质和药包形状等因素有关。常见岩石的衰减系数由文献[21]可知 $1.4 \leq \alpha \leq 3.0$,如表2所示。

表2 不同岩石爆破应力波衰减系数

Table 2 The attenuation parameters of explosive stress waves of different rocks

岩石类型	岩石波速/(m·s ⁻¹)	α 值		
		堵塞封闭爆破	硐室爆破	表面爆破
灰岩、砾岩、片麻岩等	1 000~3 000	1.7~2.1	1.8~2.4	2.4~3.0
砂岩、石英、白云岩等	3 000~5 000	1.6~2.0	1.8~2.3	2.2~2.8
花岗岩、大理岩闪长岩等	4 500~6 000	1.4~1.8	1.7~2.1	2.0~2.6

当冲击波衰减为应力波后,若此时假定岩石为理想弹性介质,就可以由应力波理论推导出其传播方程。应力波在传播过程中,波阵面应满足质量守恒和动量守恒两定律,即运动学相容条件和动力学相容条件。柱状药包在弹性介质中爆炸激起的应力波应为柱面波或近似柱面波。

采用 Lagrange 柱坐标 r, θ, z , 其中只有径向位移 $u_r(r, t)$ 非零,且其只是 r, t 的函数。由动量守恒条件可得柱面波的径向运动方程:

$$\frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = \rho_0 \frac{\partial v}{\partial t}. \quad (3)$$

根据广义虎克定律可得到应力的表达式:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= (\lambda + 2G)\theta - 2G \frac{u_r}{r}, \\ \sigma_\theta &= \lambda\theta + 2G \frac{u_r}{r}, \\ \sigma_z &= \lambda\theta. \end{aligned} \quad (4)$$

所以柱面波的波前应力为:

$$\sigma_r = \sqrt{\frac{r_0}{r}} \sigma_m. \quad (5)$$

显然,柱状药包的爆炸应力波在不同区域传播时衰减系数差异较大。在近中区,药包爆炸在介质中产生的是冲击波,衰减规律如式(2)所示,其衰减系数大于在1~3之间;在远区,产生的是弹性应力波,衰减规律如式(5)所示,其衰减系数是0.5。

3 柱状药包在砂浆试块中的爆炸测试

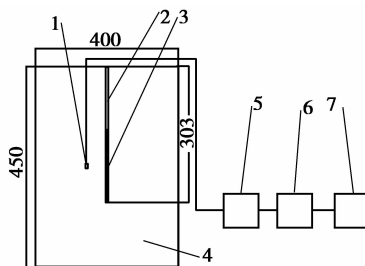
砂浆试块配比为:水泥:黄沙:水=1:2:0.5。通过在材料试验机和 CTS-25 型非金属超声波检测仪进行测试,得到混凝土的物理力学参数,如表3所示。

表 3 水泥砂浆试块物理力学参数

Table 3 Cement mortar specimen mechanical parameters

容重/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	抗压强度 σ_c/MPa	弹模 E/GPa	泊松比	纵波 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	横波 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
2.2	50.63	26.25	0.29	3 971	2 161

混凝土试件采用圆柱体,直径为 400 mm,高为 450 mm。药包在水泥砂浆中爆破应变测试装置如图 2 所示。预埋的应变砖所用的材料和配比与混凝土试件相同,以保证它们波阻抗相等。应变砖尺寸为 180 mm \times 20 mm \times 10 mm,每块应变砖上布置 4 个测点,其到炮孔的距离分别为 4,8,13,18 cm。



1—应变砖;2—堵塞;3—柱状药包;4—水泥砂浆试块;
5—SDY2107A 型超动态应变仪;6—TST3406C 动态测试分析仪;
7—计算机

图 2 爆炸应变波测定装置示意图(单位:mm)

Fig.2 Schematic diagram of blasting strain wave measuring device (Unit: mm)

实验采用的是柱状药包,直径为 3.5 mm,药量分别为:0.2,0.33,0.45,0.61,1.1 g。每一药量做 2 个为 1 组平行实验,根据前面的水下实验计算各种药量的药包其炮孔初始压力 σ_m ,如表 4 所示。

表 4 混凝土试件炮孔中的初始爆炸应力

Table 4 The initial blasting stress of blast hole in concrete specimen

编号	药量/g	药包长度/mm	药包长径比	炮孔深度/mm	初始压力 σ_m/GPa
1	0.20	35	10.0	255	54.640
2	0.33	60	17.1	265	67.011
3	0.45	80	22.9	275	76.040
4	0.61	105	30.0	285	86.076
5	1.10	190	54.3	320	109.46

试验中没有发生应变砖被剥离的现象,这说明预埋的应变砖在试块中没有产生明显的界面效应,也证明这种预埋应变砖的方法是可行的。爆破的破碎块度较为均匀,以 5 号试块为例,其长径比是所有药包中最大的,其被爆破成完整的 8 块,如图 3 所示。通过超动态应变仪测得的应变波形,如图 4 所示。从所测波形图中得出,炸药在岩体中爆炸,在近区首先产生快速的压缩波,各测点应变急剧突跃,这时径向获得很大的负应变值。由于装药条件的不同,每组所测波形在细节上又各不相同。以 5 号试块为例,其应变波如图 4 所示,由里向外依次为 1、2、3、4 号测点。5 组试块测得的应变如表 5 所示。



图 3 5# 试块爆破效果图

Fig.3 The rendering of broken 5# specimen

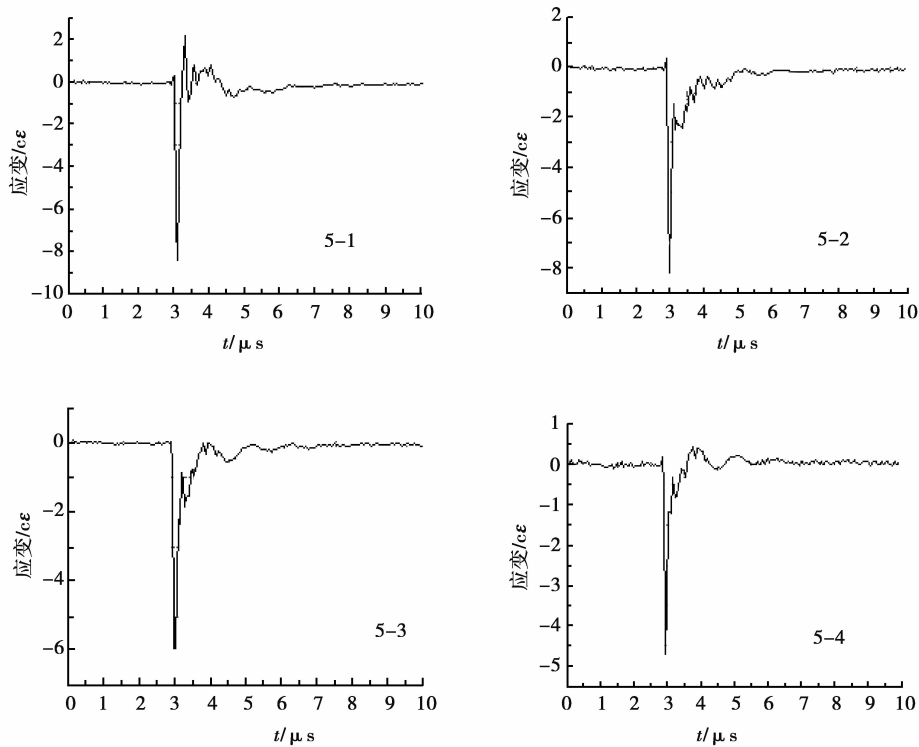


图4 5#试块应变波图

Fig.4 Strain wave of 5# specimen

表5 混凝土试件中爆炸应变波测试结果

Table 5 Results of blasting strain wave in concrete specimen

测点(r_0/r)	1号/ $\mu\epsilon$	2号/ $\mu\epsilon$	3号/ $\mu\epsilon$	4号/ $\mu\epsilon$	5号/ $\mu\epsilon$
23.857	55 001	79 987	105 660	82 878	83 790
46.714	51 463	74 935	91 537	81 446	81 837
75.286	47 938	70 443	65 821	70 118	59 181
103.857	40 001	71 810	56 250	62 045	47 071

根据药包的水下测试得到炮孔的初始爆炸压力和混凝土的材料参数,对上表中数据进行拟合,得到爆炸应力波的衰减系数 α_i 和平均衰减系数 $\alpha = \frac{1}{n} \sum \alpha_i$ 为: $\alpha_1 = 1.030 19$, $\alpha_2 = 0.967 87$, $\alpha_3 = 0.963 89$, $\alpha_4 = 1.040 39$, $\alpha_5 = 1.128 14$, $\alpha = 1.026 1$ 。

试验结果与众多文献中给出的常见岩石中爆炸冲击波衰减系数相比偏小。试验所用的混凝土试块是水泥砂浆,没有粗骨料,浇注也是在实验室中完成的。试件的均匀性得到了保证,其致密性较好,微缺陷较少,所以其爆炸冲击波衰减系数比岩石的小,差异较大。

4 结 论

1)通过水下爆炸测试实验,得出了柱状药包的爆炸冲击波计算公式 $P_m = k \left(\frac{W}{R} \right)^{\frac{1}{3} \alpha}$ 的参数 $k = 41.45 \text{ MPa}$, $\alpha = 1.235$,其结果与其他研究结果和工程实际吻合较好。

2)通过预埋应变传感器方法,测得柱状药包在混凝土试件中的爆炸冲击波在混凝土介质中的衰减规律:

$$\sigma_r = \frac{\sigma_m}{r^\alpha}, \text{衰减指数: } \alpha = 1.026, \text{试验数据规律性较好,结果可靠。}$$

3)通过对应变波传播规律的实验数据的数值分析,得出了柱状药包在混凝土试件中衰减系数,其与爆炸冲击波在常见岩石中衰减系数有较大差异,对工程爆破实践有切实意义。

参考文献:

- [1] 钱七虎. 岩石爆炸动力学的若干进展[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(10): 1945-1968.
QIAN Qihu. Some advances in rock blasting dynamics[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(10): 1945-1968. (in Chinese)
- [2] Sanchidrián J A, Segara P, Lopez L M. Energy components in rock blasting[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2007(44): 130-147.
- [3] 范新, 王明洋, 谭可可. 爆炸荷载作用下深部块体变形运动规律研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(5): 1019-1025.
FAN Xin, WANG Mingyang, TAN Keke. Study on rule of block deformation and movement under explosion loads[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(5): 1019-1025. (in Chinese)
- [4] 王明洋, 葛涛, 戚承志, 等. 爆炸荷载作用下岩石的变形与破坏研究(D)[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(2): 43-54.
WANG Mingyang, GE Tao, QI Chengzhi, et al. Study of deformation and failure of rock under explosion load(part D)[J]. Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering, 2003, 23(2): 43-54. (in Chinese)
- [5] 王明洋, 王立云, 戚承志, 等. 爆炸荷载作用下岩石的变形与破坏研究(II)[J]. 防灾减灾工程学报, 2003, 23(3): 9-20.
WANG Mingyang, WANG Liyun, QI Chengzhi, et al. Study of deformation and failure of rock under explosion load(part II)[J]. Journal of Disaster Prevent and Mitigation Engineering, 2003, 23(3): 9-20. (in Chinese)
- [6] 王礼立. 爆炸与冲击荷载下结构和材料动态响应的新进展[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(2): 81-88.
WANG Lili. Progress in studies on dynamic response of structures and materials under explosive/impact loading[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2): 81-88. (in Chinese)
- [7] Prasad U, Mohanty B, Nemes J A. Dynamic strength and fragmentation of selected rocks under impact loading [C]//4th North American Rock Mechanics Symposium, July 31-August 3, 2000, Seattle, Washiogton. Rotterdam: American Rock Mechanics Association, 2000: 577-82.
- [8] 李清. 爆炸致裂的岩石动态力学行为与断裂控制试验研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2009.
LI Qing. Experiment of fracture behaviors and control for crack propagation under blasting load[D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2009. (in Chinese)
- [9] 张志呈. 定向断裂控制爆破机理综述[J]. 矿业研究与开发, 2000, 20(5): 40-42.
ZHANG Zhicheng. Summary of the mechanism of directional fracture controlled blasting[J]. Mining Research and Development, 2000, 20(5): 40-42. (in Chinese)
- [10] Hudaverdi T, Kulatilake P H S W, Kuzu C. Prediction of blast fragmentation using multivariate analysis procedures[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2011, 35(12): 1318-33.
- [11] Hamdi E, Bouden Romdhane N, du Mouza J, et al. Fragmentation energy in rock blasting[J]. Geotechnical and Geological Engineering, 2008, 26(2): 133-46.
- [12] Rinehart J S. Dynamic fracture strength of rocks [C]// Proceedings of the seventh symposium on rock mechanics. Pennsylvania: University Park, 1965.
- [13] 赵阳升, 冯增朝, 万志军. 岩体动力破坏的最小能量原理[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(11): 1781-1783.
ZHAO Yangsheng, FENG Zengchao, WAN Zhijun. Least energy principle of dynamical failure of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(11): 1781-1783. (in Chinese)
- [14] 颜事龙. 集中药包与条形药包爆破能量分布的研究[D]. 北京: 铁道部科学研究院, 1994.
YAN Shilong. Distribution of the explosive energy studied by concentrated charge and cylindrical charge[D]. Beijing: MOR Science Research Institute, 1994. (in Chinese)
- [15] 王志亮, 郑明新. 基于TCK损伤本构的岩石爆破效应数值模拟[J]. 岩土力学, 2008, 29(1): 230-234.
WANG Zhiliang, ZHENG Mingxin. Numerical simulation of effect of rock blasting based on TCK damage constitutive model[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(1): 230-234. (in Chinese)
- [16] 王伟, 李小春. 不耦合装药下爆炸应力波传播规律的试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1723-1728.

- WANG Wei, LI XiaoChun. Experimental study of propagation law of explosive stress wave under condition of decouple charge[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1723-1728. (in Chinese)
- [17] 曾新华. 岩石爆破损伤影响范围研究[D]. 天津: 天津大学, 2003.
ZEN Xinhua. Damage range studying of rock blasting[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.(in Chinese)
- [18] 黄文尧, 穆朝民, 宗琦, 等. 水胶药柱深孔预裂爆破弱化综采面硬岩断层分析[J]. 重庆大学学报, 2013, 36(7): 102-107.
HUANG Wenyao, MU Chaomin, ZONG Qi, et al. Analysis on weakening hard rock used by long-hole presplitting blasting fully mechanize coal face with water-gel explosive grain[J]. Journal of Chongqing University, 2013, 36(7): 102-107. (in Chinese)
- [19] 郭长宝, 张永双, 孙东生, 等. 挤压和剪切构造环境下深埋隧道岩爆对比研究[J]. 地质学报, 2011, 85(1): 66-77.
GUO Chang-bao, ZHANG Yong-shuang, SUN Dong-sheng, et al. Comparison study of rock bursts of deep buried tunnels in the shear and compression tectonic environments[J]. Acta Geologica Sinica, 2011, 85(1): 66-77.(in Chinese)
- [20] P 库尔. 水下爆炸[M]. 罗耀杰, 韩泽润, 官信, 等译. 北京: 国防工业出版社, 1960.
Cole P. Underwater explosion[M]. LUO Yaojie, HAN Zerun, GUAN Xin, et al. trans. Beijing: National Defense Industry Press, 1960. (in Chinese)
- [21] 杨善元. 岩石爆破动力学基础[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 1991: 74-78.
YANG Shanyuan. Dynamics base of rock blasting[M]. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1991: 74-78. (in Chinese)

(编辑 郑洁)

(上接第 90 页)

- [6] 宫凤强, 李夕兵, 董陇军. 基于未确知测度理论的采空区危险性评价研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 323-330.
GONG Fengqiang, LI Xibing, DONG Longjun. Underground goaf risk evaluation based on uncertainty measurement theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(2): 323-330. (in Chinese)
- [7] Dong L J. Unascertained measurement classifying model of goaf collapse prediction[J]. Journal of Coal Science & Engineering: English Edition, 2008, 12(2): 221-224.
- [8] 冯岩, 王新民, 程爱宝, 等. 采空区危险性评价方法优化[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013(7): 2881-2888.
FENG Yan, WANG Xinmin, CHENG Aibao, et al. Method optimization of Underground goaf risk evaluation[J]. Journal of Central South University(Science and Technology), 2013(7): 2881-2888. (in Chinese)
- [9] 张燕平, 张铃. 机器学习理论与算法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
ZHANG Yanping, ZHANG Ling. The theory and algorithm of machine learning[M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese)
- [10] Gkalelis N, Mezaris V, Kompatsiaris I, et al. Linear subclass support vector machines[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2012, 19(9): 575-578.
- [11] Ye Q L, ZHAO C X, Ye N, et al. Multi-weight vector projection support vector machines[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(13): 2006-2011.
- [12] Chang C C, Lin C J. LIBSVM: A library for support vector machines[J]. ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST), 2011, 2(3): 1-27.
- [13] Chapelle O, Vapnik V, Bousquet O, et al. Choosing multiple parameters for support vector machines[J]. Machine Learning, 2002, 46(1): 131-159.
- [14] 赵洪波, 冯夏庭. 支持向量机函数拟合在边坡稳定性估计中的应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 241-245.
ZHAO Hongbo, FENG Xiating. Application of support vector machines function fitting in slope stability evaluation[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 241-245. (in Chinese)
- [15] 赵洪波. 围岩破坏模式识别的支持向量机研究[J]. 岩石力学, 2005, 26(2): 235-238.
ZHAO Hongbo. Recognition of collapse type of surrounding rock mass based on support vector machine[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(2): 235-238. (in Chinese)

(编辑 郑洁)