

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.019

混装炸药的能量与岩石性质匹配研究

王基禹¹, 赵明生^{1,2}

(1. 贵州大学 矿业学院, 贵阳 550000; 2. 保利新联爆破工程集团有限公司, 贵阳 550002)

摘要: 炸药与岩石的合理匹配可以有效提高炸药的能量利用率, 改善爆破效果。为研究炸药与岩石匹配关系对爆破效果的影响, 在新疆某露天煤矿采集了不同平台的岩石试样, 通过开展岩石静态力学试验, 获得了不同岩石单轴抗压强度、弹性模量、泊松比和抗拉强度。通过开展 SHPB 岩石动态冲击试验, 获得了不同冲击荷载对岩体应力应变及岩体破坏特征的影响规律。基于混装乳化炸药不同组分配比的调整, 通过混装乳化炸药爆速测试和密度测试, 获得了5种不同性能的混装乳化炸药配方。基于炸药与岩石能量匹配理论, 建立了基于BP神经网络的炸药与岩石能量匹配模型, 通过测试样本对训练好的 PSO-BP 神经网络进行测试, 三组预测的平均误差分别为 5.09%、7.26% 和 4.79%。最后, 将炸药与岩石能量匹配模型在新疆某露天矿 1252 西平台、1228 东平台和 1180 西平台进行了工程应用。结果表明: 相比传统的炸药配方和爆破参数, 通过混装炸药能量与岩石性质匹配关系选择的炸药不仅能够降低炸药单耗, 同时大块率、后裂距离等爆破效果指标也得到了有效改善。

关键词: 能量匹配; 岩石力学性质; 混装炸药; 神经网络

中图分类号: TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0138-06

Study on Formula Diversity and Rock Energy Matching of Mixed Explosives

WANG Ji-yu¹, ZHAO Ming-sheng^{1,2}

(1. School of mining, Guizhou University, Guiyang 550000, China;

2. Poly Xinlian Blasting Engineering Group Co., Ltd., Guiyang 550002, China)

Abstract: The reasonable matching of explosive and rock can effectively increase the energy utilization rate of explosive and improve the blasting effect. To study the influence of the matching relationship between explosives and rock on the blasting effect, rock samples from different platforms were collected from an open-pit coal mine in Xinjiang. Through rock static mechanics tests, uniaxial compressive strength, elastic modulus, Poisson's ratio and tensile strength of different rocks were obtained. Through the SHPB dynamic rock impact test, the influence law of different impact loads on rock stress, strain and rock failure characteristics was obtained. Based on the adjustment of the ratio of different components of the mixed emulsion explosive, five different formulations of the mixed emulsion explosive with different properties were obtained through the detonation velocity test and density test of the mixed emulsion explosive. Based on the theory of explosive and rock energy matching, an explosive and rock energy matching model based on BP neural network was established. The trained PSO-BP neural network was tested by test samples. The average errors of the three groups of prediction are 5.09%, 7.26% and 4.79% respectively. Finally, the energy matching model of explosive and rock is applied to the 1252 West platform, 1228 East platform and 1180 West platform of an open-pit mine in Xinjiang. The results show that, compared with the traditional explosive formula and blasting pa-

收稿日期: 2022-05-07

作者简介: 王基禹(1997-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 硕士, 主要研究方向为爆破工程、安全工程, (E-mail)602574716@qq.com。

通讯作者: 赵明生(1982-), 男, 黑龙江双城人, 博士, 主要研究方向为爆破工程、采矿工程, (E-mail)377413454@qq.com。

rameters, the explosive selected by the matching relationship between the energy of mixed explosive and rock properties can not only reduce the single consumption of explosive, but improve the blasting effect indexes such as bulk rate and backsplitting distance.

Key words: energy matching; mechanical properties of rock; mixed explosives; neural network

炸药与岩石匹配一直是爆破工程领域尚未完全解决的重大难题,当前炸药与岩石匹配的理论主要分为波阻抗匹配、全过程匹配和能量匹配^[1,2]。国内外许多学者都进行了相关的研究,也取得了一些建设性的成果。目前,波阻抗匹配理论是爆破工程中运用最为广泛的炸药与岩石匹配理论。该理论根据炸药岩石界面上冲击波的入射和反射效应,认为炸药与岩石的波阻抗相等时,能量利用率最高。李夕兵等以传递到岩石介质中的最大爆炸能量为目标^[3],通过理论分析和数值计算,改正了合理匹配时岩石与炸药参数之间的关系,为爆破开挖中的炸药选择提供了科学依据。杨仁树等利用分离式霍普金森压杆(SHPB)试验系统^[4],对系列波阻抗的模型材料进行不同应变率下的冲击压缩试验。试验结果表明,岩石在冲击荷载下的应力波传播特征、动态应力应变关系以及破碎块度分形特征同时受波阻抗、应变率和冲击速度的影响。叶海旺等基于BP神经网络和模糊数学方法^[5],建立了炸药与岩石匹配模型,解决了岩石的复杂多变性和爆破过程的复杂性问题。赵明生等通过理论分析和现场试验研究了不同混装炸药配方对炸药波阻抗的影响^[6]。结合现场岩石地质条件及炸药能量利用率,设计了不同的炸药配方,实现了炸药与岩石的能量匹配、提高了炸药能量利用率、提升了爆破效果。

目前,国内外专家对于炸药与岩石的全过程匹配研究较少。其中,郭子庭等根据三维动应力场以及简化的气体扩裂和能量分配模型^[7],分析计算了爆破破碎过程各阶段的能量分配关系,并得出在炸药与岩石匹配时,应考虑爆破全过程的炸药、岩石和孔网参数等综合因素,进而提出了炸药岩石全过程匹配的观点和具体要求。同时,部分国内专家从能量的角度出发,对炸药与岩石匹配进行了大量研究。赖应得提出采用增减装药量来适应破碎岩石所需的能量^[8],通过对岩巷掘进小直径中深孔直眼分段掏槽机理和参数的分析。徐颖等研究了掏槽爆破装药爆炸能量与岩体自身损伤状态的匹配^[9],得出分段装药利用其在岩石中的残余应力和大量的爆生裂隙,增强了岩石的破碎,同时也改善了炸药爆炸能量与岩石破碎的匹配关系。冷振东等从爆破破碎机理出发^[10],在保证相邻炮孔间岩石充分破碎的前提

下,通过对粉碎区的合理控制来确定钻孔爆破最优的炸药性能参数,提出了炸药与岩石能量匹配准则。

目前的对于炸药与岩石匹配的研究主要集中在波阻抗或者过程研究,对于基于能量理论的炸药与岩石匹配研究较少。本文结合岩石力学试验和混装炸药配方多样性研究,基于能量匹配理论,建立了基于神经网络的炸药与岩石能量匹配模型,将该匹配模型在新疆某露天煤矿爆破施工现场进行推广应用,为改善爆破效果、提高炸药能量利用率奠定基础。

1 岩石破坏模式分析

以新疆某露天煤矿 1252 平盘、1228 平盘、1180 平盘的岩石为研究对象,对该平盘的岩石进行取样,共制取了静力学试验岩石试样 34 个,动力学试验岩石试样 15 个。通过为了测得矿岩的基本物理力学性质,将分别进行室内单轴压缩实验、巴西劈裂拉伸实验,获取岩石的单轴抗压强度、抗拉强度等力学参数。单轴压缩实验用试样为 $\phi 50 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 圆柱体,拉伸实验用试样为 $\phi 50 \text{ mm} \times 30 \text{ mm}$ 圆盘体,SHPB 动态压缩实验用试样为 $50 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} (\phi \times L)$ 圆柱体。标准试样如图 1 所示。

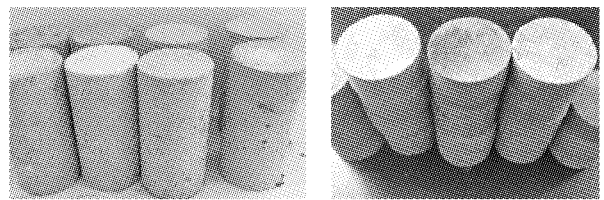


图 1 部分标准试样

Fig. 1 Standard samples

通过静力学试验得到 1252、1228 和 1180 各平盘采集的岩石试样的单轴抗压强度平均值为 82.40 MPa、133.43 MPa 和 92.10 MPa,岩石的弹性模量平均值分别为 26.37 GPa、14.68 GPa 和 17.74 GPa,泊松比平均值分别为 0.29、0.24 和 0.29。各平盘岩石的平均抗拉强度为 4.28 MPa、3.92 MPa 和 8.25 MPa。

岩石动力学试验基于保利新联爆破工程有限公司民爆工程实验室内改进式 SHPB 实验平台,得到不同冲击气压下应力时间曲线如图 2 所示。从岩石应力时间曲线中可以发现,岩石的最大应变值与

冲击荷载强度无明显关系。此外,随着冲击气压的增加,其峰后曲线越陡。这说明动态扰动强度不光

影响岩石的动态压缩强度,同时对岩石破坏后的残余强度也有重要的影响。

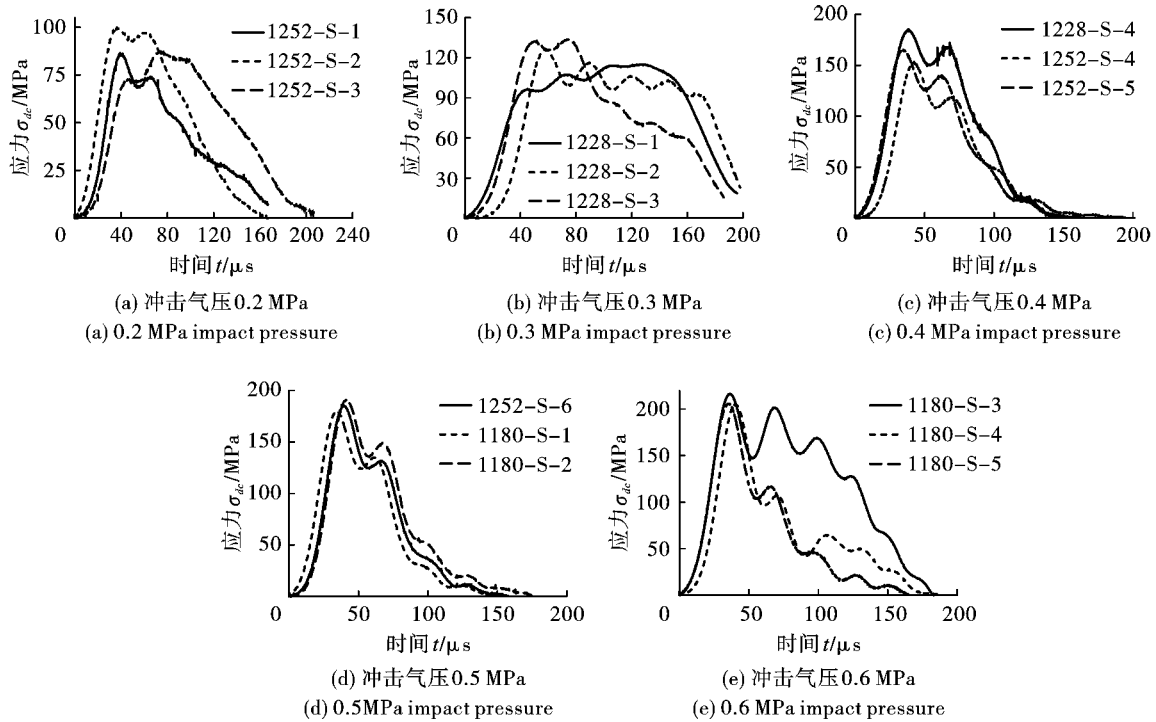


图2 不同冲击气压下岩石应力时间曲线

Fig. 2 Stress-time curve under different impact pressure

为深入研究岩石整体破裂、失稳机理及其发展过程,选取岩石在不同冲击气压值下岩石破坏过程列于图3中,考察单轴加载下岩石的最终破坏模式。由图可以看出岩石在轴向冲击荷载作用下首先沿环向产生大量裂纹,裂纹产生的原因是由于应力波在试件传播过程中发生反射产生的反射拉伸波所引起。进一步,岩石基本上失去了承载能力,破坏更加充分,破碎块度更小,最后在应力应变曲线下下降的最后阶段岩石已经完全失去承载能力。

2 现场混装乳化炸药配方多样性研究

从能量匹配原理可知,只要求破碎岩石所需的能量做功和炸药爆炸产生的能量相等或接近相等就可以,不要求严格硬岩用高威力炸药,软岩用低威力

炸药,而是通过增减装药量来调节爆炸能量大小,以适应岩石硬软程度。因此只需要设计出几组不同性能的炸药配方,再根据实际情况,调整装药量即可。混装乳化炸药的主要成分由硝酸铵、硫脲、水、乳化剂和油相组成。基于现场地面站生产条件,通过调整混装乳化炸药各组分含量来改变炸药的性能,获得5种不同性能的现场混装乳化炸药,如表1所示。

进行混装乳化炸药爆速测试,采用外径110 mm PVC管装满混装炸药,使用双层塑料薄膜封口,用缠绕漆包线作为靶线探针,共设置五组探针,现场基时设置为0.1 μs,靶距为230 mm。爆速测试仪器为ZBS-10型智能十段爆速测试仪。每组试验现场爆速测试方法如图4所示。

表1 现场混装乳化炸药配方

Table 1 Formula of mixed emulsion explosive on site

编号	AN/%	硫脲/%	H ₂ O/%	乳化剂/%	油相/%
E ₁	80.5	0.2	13.5	Span80(1.8)	柴油 2.4, 机油 1.8
E ₂	79.5	0.2	14.5	Span80(1.8)	柴油 2.4, 机油 1.8
E ₃	78.5	0.2	15.5	Span80(1.8)	柴油 2.4, 机油 1.8
E ₄	77.5	0.2	16.5	Span80(1.8)	柴油 2.4, 机油 1.8
E ₅	76.5	0.2	17.5	Span80(1.8)	柴油 2.4, 机油 1.8

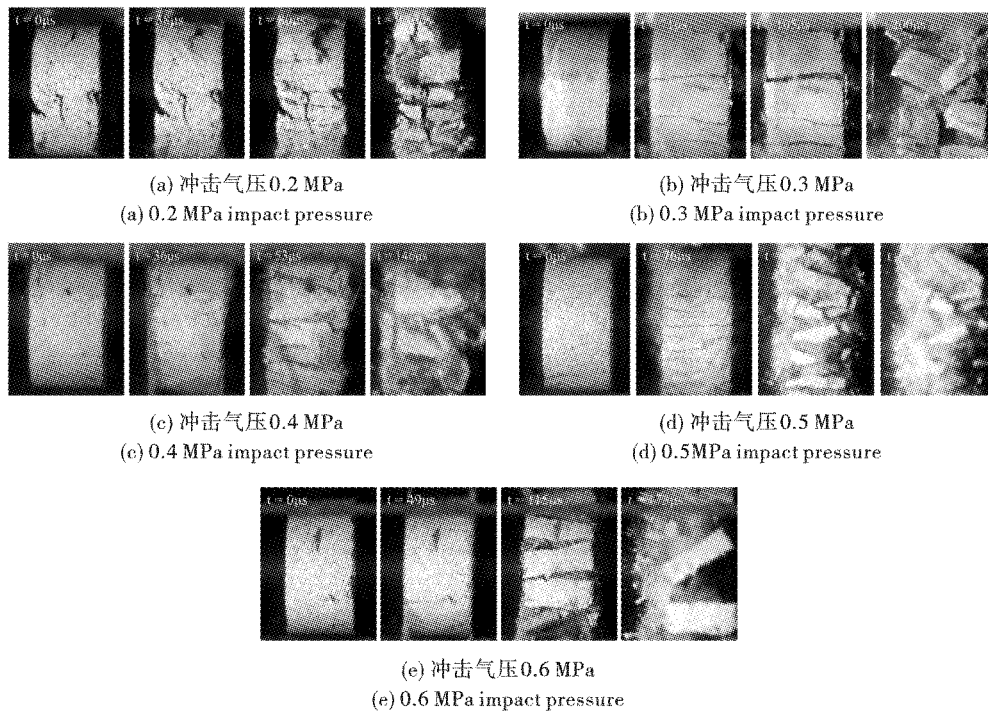


图 3 不同冲击气压下岩石试验的破坏过程

Fig. 3 Failure process of rock test under different impact pressure

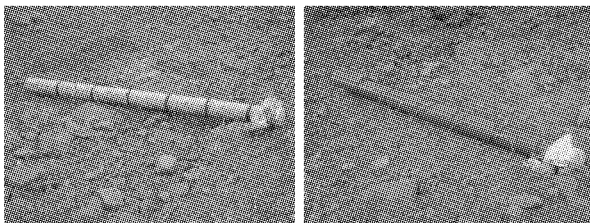


图 4 现场爆速测试

Fig. 4 Field detonation velocity test

根据现场测试,爆轰波在传递到 PVC 管第三段

时可达到稳定爆轰,因此选取第三段的爆速值作为测试结果。共进行了 5 次爆速试验,每次试验测试 2 组爆速,共获得 10 组测试结果。爆速及密度测试结果如表 2 所示。

如表 2 所示, E_1 配方炸药平均爆速分别为 5060.5 m/s,可作为高威力炸药使用。 E_2 和 E_3 配方炸药平均爆速分别为 4539 m/s 和 4263.5 m/s,可作为中威力炸药使用。 E_4 配方和 E_5 配方炸药平均爆速分别为 3593 m/s 和 3502 m/s,可作为低威力炸药使用。

表 2 混装乳化炸药爆速测试结果

Table 2 Explosion velocity test results of mixed emulsion explosive

测试	组数	靶距/mm	爆速/ ($m \cdot s^{-1}$)	平均爆速/ ($m \cdot s^{-1}$)	密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)	平均密度/ ($g \cdot cm^{-3}$)
E_1	1#	230	4859	5060.5	1.23	1.240
	2#	230	5262		1.25	
E_2	1#	230	4743	4539.0	1.24	1.230
	2#	230	4335		1.22	
E_3	1#	230	4138	4263.5	1.23	1.220
	2#	230	4389		1.21	
E_4	1#	230	3637	3593.0	1.18	1.195
	2#	230	3549		1.21	
E_5	1#	230	3367	3502.0	1.17	1.180
	2#	230	3637		1.19	

结合成本考虑,虽然 E_2 和 E_3 配方炸药都可作为中威力炸药使用,但因为 E_3 配方水含量较多,成本更低,因此优先使用 E_3 配方炸药。 E_4 和 E_5 配方炸药爆速相近,前文实验结果表明,当水含量超过 17% 以上时,乳化基质稳定性会随水含量的增大快速下降,因此优先使用 E_4 配方炸药。

3 炸药与岩石智能匹配研究

本模型的设计思路是在获取了现场的岩石力学

参数后,根据要达到的爆破效果,匹配炸药性能合适的炸药配方,再结合炸药与能量匹配定律,对现场的实际装药情况进行优化,以达到改善爆破效果的目的。因此,模型的输入层包括岩石力学参数、现场情况和爆破效果要求三方面,输出层包括炸药性能参数和爆破设计参数两方面。BP 神经网络结构如图 5 所示。

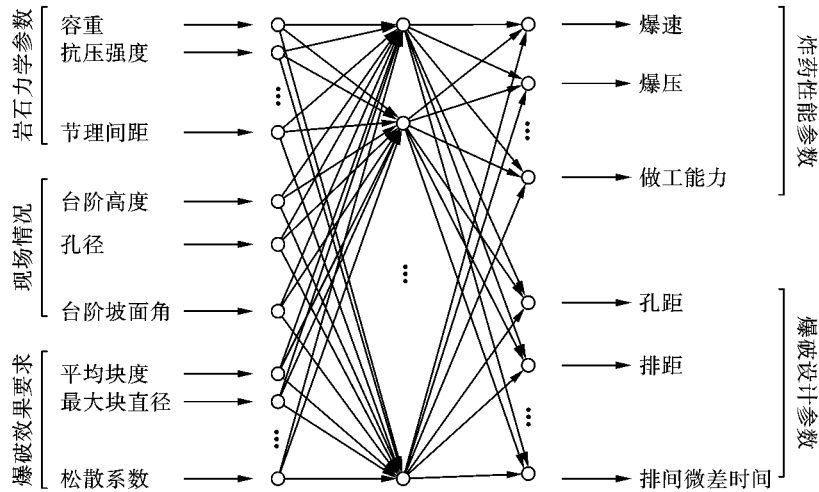


图 5 神经网络模型

Fig. 5 Neural network model

选取矿山 1252、1228、1180 不同平盘典型爆破数据 18 组岩石性质、现场条件、爆破效果、炸药性能、爆破参数进行数据统计,将收集的工程实践数据进行样本训练和检测。取 18 组数据中的 15 组数据

作为训练样本对模型进行训练,将剩下的 3 组数据作为检验样本对模型进行验证。测试样本的测试结果如表 3 所示。

表 3 神经网络预测结果对比

Table 3 Comparison of Neural Network Prediction Results

输出值	第一组			第二组			第三组		
	预测值	样本值	误差%	预测值	样本值	误差%	预测值	样本值	误差%
爆速/($m \cdot s^{-1}$)	4452	4250	4.753	4535	4250	6.71	3485	3300	5.61
爆压/GPa	3.04	2.95	3.051	2.84	2.95	3.73	3.1	2.97	4.38
猛度/mm	10.67	10	6.700	9.46	10	5.40	9.85	9.5	3.68
爆热($kJ \cdot kg^{-1}$)	2768	2850	2.873	2952	2850	3.58	2847	2932	2.89
爆容/($L \cdot kg^{-1}$)	1156	1144	1.111	1106	1144	3.25	1089	1024	6.39
炸药密度/($g \cdot cm^{-3}$)	1.14	1.22	6.557	1.18	1.22	3.28	1.19	1.18	0.85
做功能力/($kJ \cdot kg^{-1}$)	4052	4500	9.96	4124	4500	8.36	3752	3589	4.54
孔距/m	5.7	5.5	3.636	4.32	4	8.00	5.84	5.5	2.67
排距/m	3.84	4	4.000	3.17	3	5.67	4.26	3.8	6.50
炸药单耗	0.435	0.45	3.333	0.483	0.52	7.12	0.386	0.40	3.50
填塞长度/m	3.37	3.5	3.714	1.93	2.2	12.27	3.64	3.5	4.00
超深/m	1.34	1.2	11.67	0.58	0.5	16.00	1.33	1.2	10.83
排间微差/m	52.4	50	4.800	44.5	50	11.00	53.2	50	6.40
平均误差/%			5.09			7.26			4.79

如表3所示,三组预测的平均误差分别为5.09%、7.26%和4.79%,最大输出值误差为16.00%,误差超过百分之十的输出值共有4个,其余误差均小于百分之十,说明该模型可应用于工程实践。

4 工程应用

根据现场生产计划,选定1252西平台、1228东

平台和1180西平台为试验区域分别进行试验,每次试验共分三组,第一组为原爆破设计,第二组为经模型预测的孔网参数,但采用原配方炸药装药,第三组为采用模型预测的孔网参数和能量匹配的炸药进行装药。其中第一组和第二组为对照组。各平台试验参数如表4所示。

表4 不同平台试验参数
Table 4 Test Parameters of different Platform

平台	组数	方量/m ³	炸药单耗/(kg·m ⁻³)	孔网参数/m	超深/m	填塞长度/m	微差时间	炸药配方选择	总装药量/kg
1252 平台	1	25 358	0.38	4×5.5	1.5	3.5	孔间延时	原配方	9636.04
	2	24 113	0.45	4×6	1.5	3.5	25 ms, 排间延时	原配方	10 850.85
	3	24 352	0.43	4×6	1.5	3.5	50 ms	E ₄	10 471.36
1228 平台	1	12 845	0.46	4×5.5	1.5	3.5	孔间延时	原配方	5908.70
	2	12 675	0.47	4×5.5	1.5	3.5	25 ms, 排间延时	原配方	5957.25
	3	12 703	0.49	4×5.5	1.5	3.5	50 ms	E ₃	6224.47
1180 平台	1	18 674	0.46	4×5.5	1.5	3.5	孔间延时	原配方	8590.04
	2	16 299	0.45	4×6	1.5	3.5	25 ms, 排间延时	原配方	7334.55
	3	15 436	0.44	4×6	1.5	3.5	50 ms	E ₃	6791.84

爆破后及时采集爆堆图片,使用块度分析软件 Split-Desktop 2.0 对爆破后的爆堆块度进行统计分析。统计结果表明:1252西平台三组试验大块率分别为10.1%、13.4%、6.1%,1228东平台三组试验大块率分别为8.6%、8.9%、4.8%,1180西平台三组试验大块率分别为7.4%、7.7%、5.8%。应用炸药与岩石能量匹配模型,各台阶大块率降低效果明显,爆堆块度分布更为集中,有效提高了后续铲装效率。

5 结论

(1) 通过开展岩石静、动态力学试验,获得了不同岩石静态力学参数以及不同冲击荷载对岩体应力应变及岩体破坏特征的影响规律。通过调整混装乳化炸药不同组分配比,结合混装乳化炸药爆速测试和密度测试,获得了5种不同性能的混装乳化炸药配方。

(2) 基于炸药与岩石能量匹配理论,建立了基于BP神经网络的炸药与岩石能量匹配模型,通过测试样本对训练好的PSO-BP神经网络进行测试,三组预测的平均误差分别为5.09%、7.26%和4.79%。

(3) 基于能量调控原则,针对新疆某露天矿1252西平台、1228东平台和1180西平台开展了工程试验。

爆破结果表明:相比传统的炸药配方和爆破参数,合理匹配的炸药不仅能够降低炸药单耗,同时大块率、后裂距离等爆破效果指标也得到了有效改善。

参考文献 (References)

- [1] 郑长青. 炸药与岩石智能匹配系统研究[D]. 北京:中国地质大学,2009.
- [1] ZHENG Chang-qing. Intelligent matching system of explosive rock[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2009. (in Chinese)
- [2] 孙建鼎. 关于提高爆炸能量利用率的探讨[J]. 爆破, 1996, 13(2): 20-24.
- [2] SUN Jian-ding. Discussion on improving the utilization rate of explosive energy[J]. Blasting, 1996, 13(2): 20-24. (in Chinese)
- [3] 李夕兵, 古德生, 赖海辉, 等. 岩石与炸药波阻抗匹配的能量研究[J]. 中南矿冶学院学报, 1992(1): 18-23.
- [3] LI Xi-bing, GU De-sheng, LAI Hai-hui, et al. The energy analysis on matching of acoustic impedance between rock and explosive[J]. Journal of Central-south Institute of Mining and Metallurgy, 1992(1): 18-23. (in Chinese)