

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.06.008

西湾露天煤矿岩石台阶爆破中块度的控制研究*

李雁飞^① 李高原^② 马力^②

①国家能源集团陕西神延煤炭有限责任公司西湾露天煤矿(陕西榆林,719000)

②西安科技大学能源与矿业工程学院(陕西西安,710054)

[摘要] 为提高西湾露天煤矿岩石台阶爆破效果,从岩石爆破作用理论出发,定义不同类型岩石的可爆性。采用LS-DYNA数值模拟软件,构建FEM加密布孔模型及FEM-SPH压渣模型,得到最佳加密布孔长度及压渣厚度;采用粒子群算法(PSO)优化Canny边缘识别算法识别阈值,构建PSO-Canny爆堆块度识别模型,以现场使用方案为对照组,与Split-Desktop 4.0爆破块度分析软件进行识别效果对比。结果表明:顶部泥岩属于低波阻抗岩石,受爆生气体作用,产生塑性破坏;底部粉砂岩属于中阻抗岩石,受应力波与爆生气体共同作用,发生准脆性破坏。基于数值模拟结果,确定现场改善爆破技术方案为4 m加密布孔方案及8.5 m压渣方案。根据西湾露天煤矿现场岩石爆破试验,确定现场加密布孔和压渣3种方案的大块率分别为3.50%、3.10%、2.85%;采用4 m加密布孔及8.5 m压渣方案后,岩石爆破大块率分别下降0.40%、0.65%。将PSO-Canny与Split-Desktop 4.0块度分析软件结果对比,得到各方案的识别误差分别为6%、3%、2%。

[关键词] 露天深孔爆破;爆破控制;加密布孔;压渣爆破;爆堆块度识别;PSO-Canny模型

[分类号] TD235.3

Block Size Control of Rock Bench Blasting in Xiwan Open-Pit Coal Mine

LI Yanfei^①, LI Gaoyuan^②, MA Li^②

① Xiwan Open-Pit Coal Mine, Shaanxi Shenyan Coal Co., Ltd., China Energy (Shaanxi Yulin, 719000)

② College of Energy and Mining Engineering, Xi'an University of Science and Technology (Shaanxi Xi'an, 710054)

[ABSTRACT] In order to improve the blasting effect of rock bench in Xiwan Open-Pit Coal Mine, the explosiveness of different types of rocks was defined based on the theory of rock blasting action. LS-DYNA numerical simulation software was used to construct FEM dense hole arrangement model and FEM-SPH buffer model, and the optimal dense hole arrangement length and buffer thickness were obtained. Particle swarm optimization (PSO) was used to optimize the rock edge recognition threshold of Canny recognition algorithm, and a PSO-Canny explosion pile size recognition model was constructed. The on-site usage plan was used as the control group, and the recognition effect was compared with Split-Desktop 4.0 blasting block size analysis software. The results indicate that the top mudstone belongs to low wave impedance rocks and undergoes plastic failure under the action of explosive gas, while the bottom sandstone belongs to medium impedance rocks, which undergo quasi brittle failure under the combined action of stress waves and explosive gases. Based on numerical simulation results, the improved blasting technology scheme was determined to be a 4 m dense hole arrangement scheme and an 8.5 m buffer scheme. According to the rock blasting test in Xiwan Open-Pit Coal Mine, the block rates for each scheme were determined to be 3.50%, 3.10%, and 2.85%, respectively. After adopting 4 m dense hole arrangement and 8.5 m buffer schemes, the rock blasting fragmentation rate decreased by 0.40% and 0.65%, respectively. By comparing the results with the Split-Desktop 4.0 block size analysis software, it was found that the recognition errors of the three schemes were 6%, 3%, and 2%, respectively.

[KEYWORDS] open-pit deep-hole blasting; blasting control; dense hole arrangement; buffer blasting; blast pile fragments recognition; PSO-Canny model

* 收稿日期:2025-07-04

第一作者:李雁飞(1983—),男,硕士,高级工程师,主要从事露天煤矿生产技术与管理的研究。E-mail: 11551056@ceic.com

通信作者:马力(1986—),男,博士,教授,主要从事露天开采与矿山爆破工程的研究。E-mail: mali217@xust.edu.cn

0 引言

露天矿爆破后的岩石块度是影响现场采装效率的关键因素之一。爆破后产生的大块不仅增加露天矿的二次破碎成本,还对运输设备造成了负荷损耗,不利于高质量安全生产,对露天矿的经济效益造成了严峻挑战。此外,针对爆堆块度的识别直接影响了爆破措施及施工质量的效果评价,是岩石爆破块度控制的另一重要方面。现阶段,诸多学者逐渐重视矿山爆破产生的大块问题,开展了爆破块度控制措施及识别方法的相关研究。

针对加密布孔措施,Meng 等^[1]经数值模拟研究发现,加密空孔附近的岩体主要受拉力破坏,压缩损伤的单元数量随空孔直径的增加而减少;Chen 等^[2]试验研究发现,加密空孔位于爆破裂隙区,可有效控制裂纹的扩展方向;谢二伟等^[3]研究发现,孔间裂纹扩展长度随加密空孔孔径的增大先快速增长、后趋于稳定;梁瑞等^[4]得出,加密空孔自由面效应会在空孔附近引起冲击压力骤增和振速变化;陈响升等^[5]发现,加密空孔使应力波反射叠加,爆生裂纹偏转现象显著,峰值拉应力上升,引导裂隙扩展发育;冀玉豪等^[6]发现,随着加密空孔间距增大、半径减小,空孔效应应力集中现象减弱。

针对压渣措施,以入射应力波给予爆破岩体的总动量等于折射应力波给予渣堆的总动量为参考,推导得到压渣厚度计算公式,多位学者^[7-9]依据该理论计算,通过数值模拟和现场试验等验证了该措施的良好实施效果。针对爆堆块度识别,扩展 Kuz-Ram、xp-碎片和 Swebrec 等定量模型,可分析爆堆块度的分布和爆破参数之间的关系^[10-12];WipFrag、Split-Desktop 等半自动化商用软件结合人工干预,已具备了低成本、快速识别的优势^[13]。改进传统图像分割方法用于自动识别爆堆块度,已取得了一定成效。陈承桢等^[14]将基于深度学习的爆堆块度识别算法对爆破效果和采矿成本优化进行评估。徐浩哲等^[15]结合图像识别算法提取了爆堆块度分布特征,通过数值模拟分析了爆堆的空间分布及影响因素。刘俊伟等^[16]提出了一种结合 Mask B-R-CNN 和 HSV 变换的形态学优化块度统计方法,并进行了试验验证。徐振洋等^[17]转换和融合 Kuz-Ram 模型参数,导入爆堆形态预测模型,实现了一种爆堆自适应分层的块度空间分布测量方法。陈起建^[18]分别采用 Kuz-Ram 模型与 Swebrec 模型预测爆破碎片的块度分布。姬付全等^[19]基于 ACE + CLAHE 算法,

结合图像分块切割及双边滤波处理,提出一种隧道爆破块度分析法。陈然等^[20]提出了双门限阈值分割技术,减少了爆破块度图像分割中易出现的过分割、噪声、黑洞等问题。

爆破后产生的大块岩石严重影响了露天矿的正常生产,加密布孔和压渣是控制爆后大块的重要措施,具体的实施参数需根据现场工程技术条件进行确定。此外,针对爆堆块度的识别软件、模型和算法能够获得岩块的分布特征,但识别效率、准确性等仍可进一步提升^[10],以应用于控制措施的效果评价。

本文中,采用理论分析与数值模拟相结合的方法,针对西湾露天煤矿爆破后的大块问题,提出现场爆破控制技术方案。同时,采用粒子群算法(PSO)优化 Canny 边缘识别算法识别阈值,以现场 + 1115 台阶为试验对象,识别各爆破方案的大块率。

1 现场工程技术背景

西湾露天煤矿核定生产能力 13.00 Mt/a,年剥离量近 1 亿 m³,年爆破量约 6 500 万 m³。其中,年产煤 1 000 万 m³、岩石 5 500 万 m³,日爆破量 20 万 m³ 左右,现场爆破作业工程量较大。

西湾露天煤矿剥离台阶高度一般固定为 15 m,导致现场出现了岩性混杂剥离台阶,即非均质岩石台阶。非均质岩石台阶主要由泥岩与粉砂岩构成,台阶顶部约 7 m 区域为泥岩,底部 8 m 区域为粉砂岩。现场并未针对非均质岩石台阶爆破采取合适的爆破控制措施,使得爆破后出现明显的后排拉裂、爆破大块等问题。

当前,西湾露天煤矿岩石台阶爆破中的大块问题已严重制约正常生产,且对质量标准化控制与生产安全造成了严重威胁。研究相应的爆破措施和爆堆识别模型对西湾露天煤矿岩石台阶爆破块度控制的影响规律及效果评价,可以为现场工程爆破提供科学的理论依据,对提高露天矿经济效益、保障生产效率等具有实际意义。

2 岩石可爆性分级

调查得到,西湾露天煤矿研究区非均质岩石台阶主要由泥岩与粉砂岩构成。为了明确非均质岩石台阶爆破的破坏性质,依据岩石波阻抗公式确定不同类型岩石的可爆性分级:

$$Z_r = \rho v_p. \quad (1)$$

式中: Z_r 为岩石波阻抗; ρ 为岩石密度; v_p 为岩石纵波波速。

分别对现场泥岩和粉砂岩进行取样、加工及测试。岩石的物理力学参数的测试流程如图1所示;测试结果见表1、表2。

根据岩石力学测试参数,计算得粉砂岩、泥岩的



图1 岩石物理力学参数的测试流程(单位: mm)

Fig.1 Testing process for physical and mechanical parameters of rocks (Unit: mm)

表1 岩石抗压及抗拉强度的测试结果

Tab.1 Test results of compressive strength and tensile strength of rocks

				MPa
测试对象	抗压强度	平均抗压强度	抗拉强度	平均抗拉强度
粉砂岩	24.10	22.10	0.88	0.92
	20.80		1.14	
	21.40		0.73	
泥岩	14.00	15.83	1.71	1.32
	15.90		1.10	
	17.60		1.14	

表2 岩石密度及纵波波速的测试结果

Tab.2 Test results of density and longitudinal wave velocity of rocks

测试对象	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	平均密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	平均纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
粉砂岩	2 517	2 500	2 149	2 170
	2 480		2 177	
	2 503		2 184	
泥岩	2 006	2 000	1 923	1 940
	1 975		1 951	
	2 019		1 946	

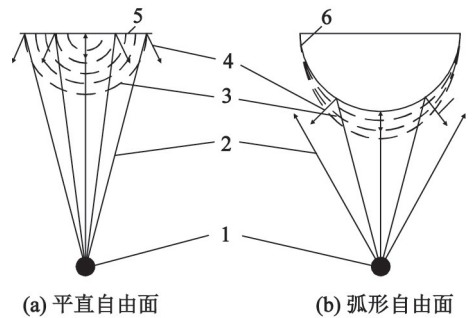
波阻抗分别为 5.43×10^3 、 $3.88 \times 10^3 \text{ g/cm}^3 \cdot \text{m/s}$ 。

基于哈努卡耶夫的岩石波阻抗性质定义原则^[21],确定顶部泥岩属于低波阻抗岩石,受爆生气体作用,产生塑性破坏;而底部粉砂岩属于中波阻抗岩石,受应力波与爆生气体共同作用,发生准脆性破坏。

3 爆破控制技术措施

3.1 加密布孔对爆破的影响规律

在不考虑加密孔作用的条件下,后排炮孔的临近自由面为台阶坡顶面,台阶坡顶面的形状可认为属于平直自由面,如图2(a)所示;以圆形加密孔为例,台阶坡顶面的反射应力波作用弧面的大小仅与钻孔圆的曲率半径有关,如图2(b)所示^[6,22]。



1 - 炮孔;2 - 入射应力波;3 - 拉伸破坏区;4 - 反射应力波;5 - 平直自由面;6 - 弧形自由面。

图2 应力波拉伸破坏作用示意图

Fig.2 Schematic diagram of tensile failure of stress waves

反射应力波强度与应力波反射前的强度、应力波入射角度等因素有关。如图3(a)所示,假设应力波到达 O 、 O_1 点时的强度为 P_1 ,当自由面为弧形时,入射与反射角为 φ ;当自由面为平直形时,入射与反射角均为 θ_1 。从图3(a)中可以得出以下角度关系:

$$\varphi = \theta_1 + \varphi_1 \quad (2)$$

当 $\theta_1 = 0^\circ$ 时,入射应力波将会全部反射回岩体,转变为反射拉伸应力波。应力波入射角度越大,应力波反射作用越明显,反射应力波强度就越低。相较平直自由面,曲率较大的弧形自由面应力波强度的衰减更显著。

考虑到岩石的抗拉强度明显低于抗压强度,在曲率较小的弧形自由面处较易发生拉伸破坏,形成拉伸破坏区,如图3(b)所示。因此,通过人为加钻加密,空孔为炮孔提供临近弧形自由面,可以有效提高炮孔爆破的效果。

单组炮孔作用下的爆破应力波挤压炮孔周围岩

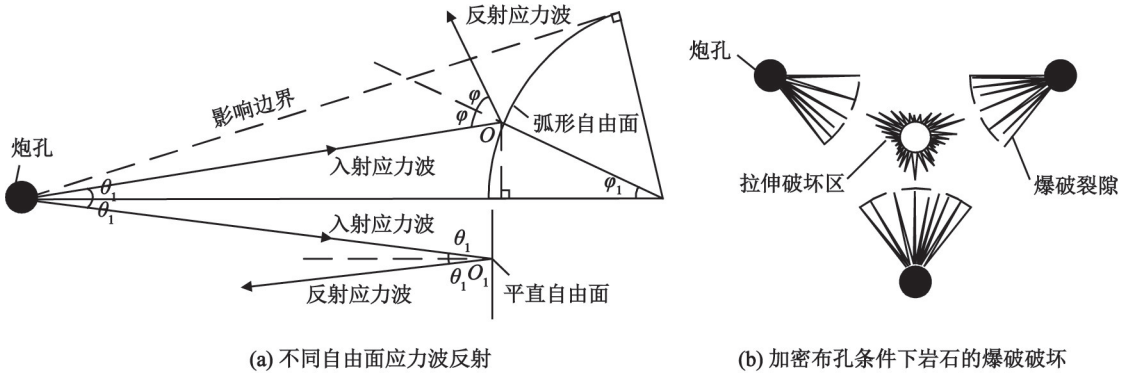


图 3 应力波反射影响爆破示意图

Fig. 3 Schematic diagram of reflection affecting blasting of stress waves

石,产生初步爆破裂隙;之后,爆生气体嵌入裂隙,推动裂隙进一步发育;当爆破裂隙尖端压力小于岩石动态抗压强度时,爆破裂隙发育完成。应力波在加密孔自由面反射作用的基础上形成拉伸破坏区,最终,爆破裂隙与拉伸破坏区贯穿,形成破坏。

3.2 压渣对爆破的影响规律

压渣是将上一次爆破后的松散渣体压覆至待爆破台阶的坡面处,以此延长前排抵抗线。在增加爆生气体及应力波作用时间的同时,可提高被爆破岩体与渣体间的挤压碰撞作用效果,进而改善爆破后台阶的岩体块度分布。压渣爆破的效果如图 4 所示^[7-9]。

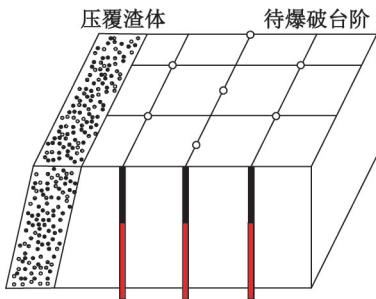


图 4 压渣爆破效果示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the outcome of buffer blasting

从应力波传播的角度出发,由于台阶坡面渣体的波阻抗大于空气的波阻抗,应力波在最外层渣体表面更多表现为反射,而非透射。压渣可以使应力波的反射位置从台阶坡面增加至渣体表面,结合坡面压渣对冲击波的阻隔作用,使得应力波整体做功时间变长,对台阶岩石的进一步爆破破碎具有促进作用,如图 5 所示。

基于爆生气体碎岩机理可得,当最小抵抗线较小时,爆生气体对抵抗线最小处岩石的有效作用时间过短,极易产生爆堆前冲、飞石等技术问题。压渣

后,增加了抵抗线长度,明显改善了爆堆前冲,能够使爆堆伸出量从 D_0 减小至 D_1 ,如图 6 所示。

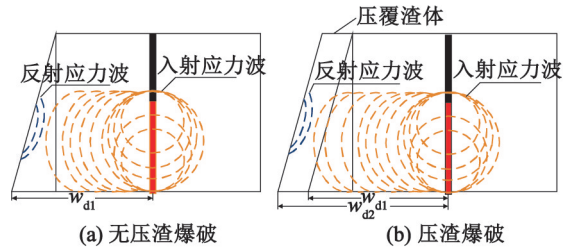


图 5 压渣爆破影响应力波作用示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the influence of buffer blasting on stress wave action

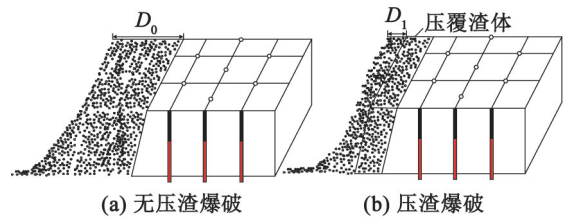


图 6 压渣爆破影响爆堆前冲作用示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the influence of buffer blasting on pre-explosion impact of the pile

台阶压渣厚度与渣体岩块尺寸的关系如下^[7]：

$$\begin{cases} D_z = \frac{W_d}{2} \left(K + \frac{v_{p2}}{v_{p1}} \right); \\ v_{p2} = 500(3 + d_z) \end{cases} \quad (3)$$

式中: D_z 为压渣厚度; W_d 为台阶底盘抵抗线; K 为渣体松散系数,据松散程度定性分为好(1.20 ~ 1.40)、一般(1.15 ~ 1.20)和差(1.10 ~ 1.15)共 3 个级别; v_{p1} 为被爆岩体的纵波波速; v_{p2} 为渣体的纵波波速; d_z 为压渣岩块平均尺寸。

经现场测试,渣体松散性较好,松散系数 K 取 1.3,渣体岩块的平均尺寸 d_z 为 0.2 m。将现场相关

工程技术参数代入式(3),计算得非均质岩石台阶理论最佳压渣厚度 D_z 为 8.5 m。

4 爆破方案损伤的数值模拟效果

采用 TrueGrid 软件构建三维台阶网格模型。先将模型导入 LS-PrePost 软件进行前处理、参数赋值等。最后,使用 LS-DYNA 软件对模型进行计算。模型整体长 20.0 m、宽 21.0 m、高 16.5 m,单个网格尺寸为 0.2 m × 0.2 m,共包含岩土网格 840 000 个、炸药网格 5 625 个、空气网格 4 500 个。利用 LS-PrePost 进行模型处理时,结合西湾露天煤矿非均质岩石台阶岩性分布特征,划分为顶部 7.0 m 泥岩、底部 9.5 m 粉砂岩(包含 1.5 m 超深)的台阶模型。炮孔三角布置,孔距为 9.0 m、排距为 6.5 m。FEM 数值模拟模型如图 7 所示。

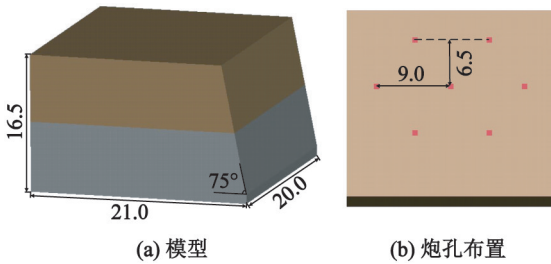


图7 FEM 数值模拟模型(单位: m)

Fig.7 FEM numerical simulation model (Unit: m)

FEM 网格模型无法体现渣体的散体性质。因此,采用 FEM-SPH 耦合方法,在台阶坡面增加 SPH 粒子模拟渣体,利用 Contact_Nodes_to_Surfaces 关键字设置 SPH 粒子与坡面 FEM 网格接触, FEM-SPH

数值模拟模型如图 8 所示。

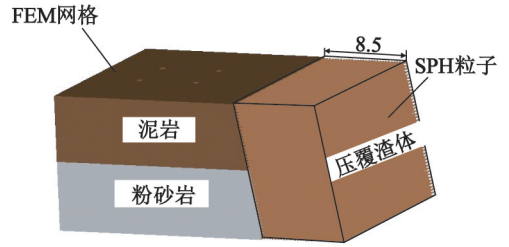


图8 FEM-SPH 耦合模型(单位: m)

Fig.8 FEM-SPH coupled model (Unit: m)

模型中,泥岩和粉砂岩采用 272-RHT 材料;空气采用 009-Null 材料,状态方程为

$$p_1 = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 - (C_4 + C_5 + C_6\mu^2)E_1 \quad (4)$$

式中: p_1 为气压; C_i 为空气状态方程系数, $i = 1, 2, \dots, 6$; μ 为气体相对体积; E_1 为单位气体体积内能。

炸药采用 008-High_Explosive_Burn 材料,爆轰产物压力、体积和能量等的关系用 JWL 状态方程:

$$p_2 = A\left(1 - \frac{\omega}{R_1V}\right)e^{-R_1V} + B\left(1 - \frac{\omega}{R_2V}\right)e^{-R_2V} + \frac{\omega E_2}{V} \quad (5)$$

式中: p_2 为爆轰产物压力; A, B, R_1, R_2, ω 为 JWL 方程参数; V 为爆轰产物的相对体积; E_2 为单位体积的爆轰能量。

参考相关研究^[23],结合岩石的物理力学参数,数值模拟模型中岩石、空气和炸药的材料及运动状态方程参数见表 3 ~ 表 5。表 3 ~ 表 5 中: ρ_0 为岩石密度; S 为弹性剪切模量; F_c 为抗压强度; F_t 为抗拉强度; N 为失效面参数; E_c 为断裂压缩应变率; ρ_1 为

表 3 岩石的材料参数

Tab.3 Material parameters of rocks

岩性	$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	S / GPa	F_c / MPa	F_t / MPa	N	E_c
粉砂岩	2 500	7.52	22.10	0.92	0.61	3.0×10^{22}
泥岩	2 000	6.70	15.83	1.32	0.61	3.0×10^{22}

表 4 空气的材料及状态方程参数

Tab.4 Material parameters and state equation parameters of the air

$\rho_1 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	E_1
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.25

表 5 炸药的材料及状态方程参数

Tab.5 Material parameters and state equation parameters of the explosive

$\rho_2 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	$D_V / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	p_{cl} / GPa	A	B	R_1	R_2	ω	E_2
1 200	4 500	2.43	3.73×10^{10}	3.74×10^9	4.15	0.9	0.35	8

空气密度; ρ_2 为炸药密度; D_v 为炸药爆轰波波速; p_{CJ} 为炸药爆压。

加密孔长度过短时,对于应力波的引导作用效果有限。因此,设计自 3 m 起,每 1 m 一个梯度,至泥岩覆盖厚度 7 m 的 5 种加密孔长度水平,开展爆破效果数值模拟研究。为监测沿加密孔孔壁的应力情况,模型在紧邻加密孔孔壁的岩体中自下而上布置了 A、B、C 3 个测点,测点间隔设置为 3 m,以保证监测结果的独立性。模型监测点布置位置如图 9 所示。爆破损伤等势面如图 10 ~ 图 14 所示。模型应力监测结果如图 15 所示。

由图 15 可得:测点 A、B 处应力基本稳定在 5 MPa 水平;测点 C 处应力随加密孔长度的增加表现为先增大、后逐步减小的趋势,峰值应力 54 MPa,在

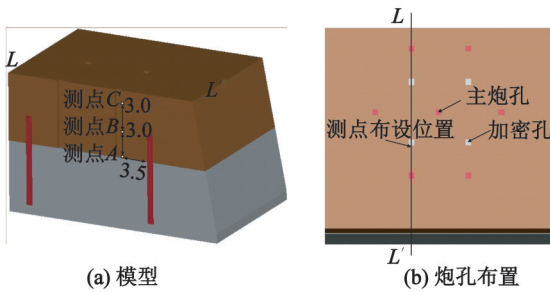


图 9 模型测点布置位置(单位: m)

Fig.9 Layout of measurement points in the model (Unit: m)

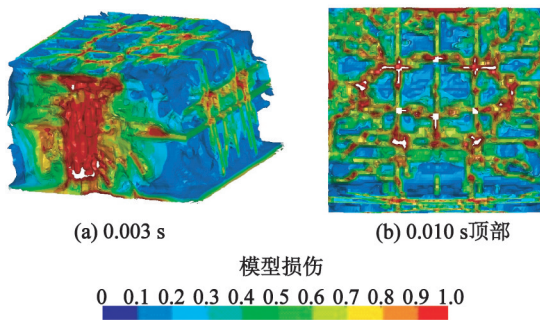


图 10 3 m 加密布孔损伤云图

Fig.10 Damage cloud map with the dense hole length of 3 m

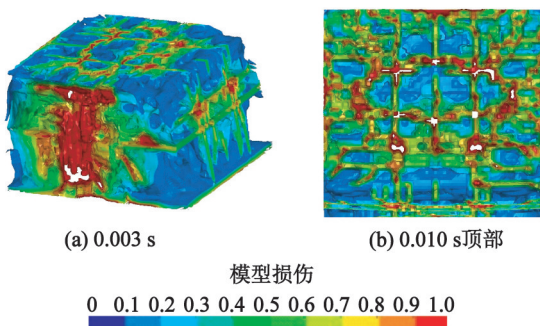


图 11 4 m 加密布孔损伤云图

Fig.11 Damage map with the dense hole length of 4 m

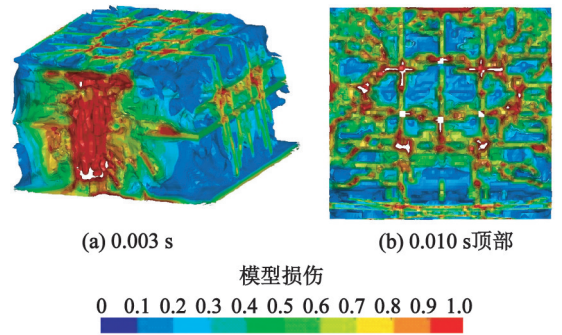


图 12 5 m 加密布孔损伤云图

Fig.12 Damage cloud map with the dense hole length of 5 m

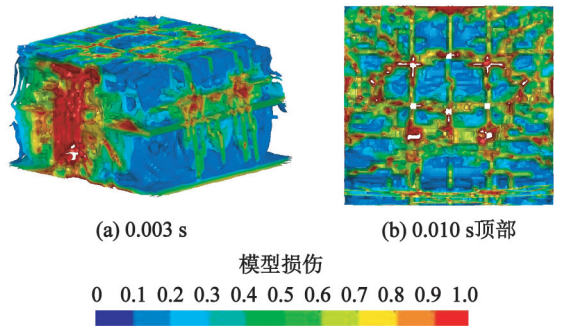


图 13 6 m 加密布孔损伤云图

Fig.13 Damage cloud map with the dense hole length of 6 m

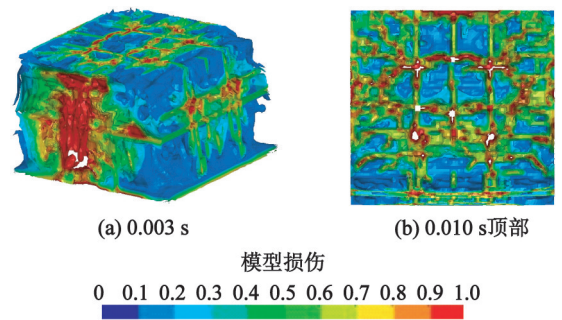


图 14 7 m 加密布孔损伤云图

Fig.14 Damage cloud map with the dense hole length of 7 m

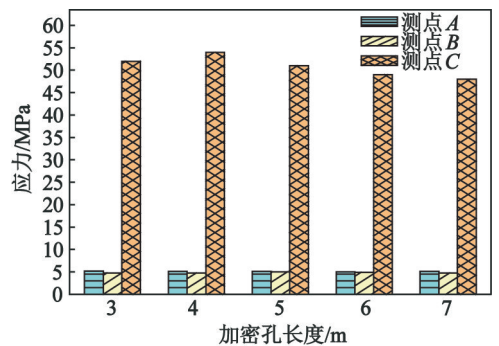


图 15 应力监测结果

Fig.15 Monitoring results of stress

加密孔长度 4 m 时达到。说明加密孔长度为 4 m 时,加密孔孔壁处应力达到最大,加密孔引导应力重新分布的作用最大,对岩石整体爆破破坏的优化效果达到最佳。因此,采用 4 m 作为最佳加密孔的布设长度。

由图 16 可得,在 0.003 s 时刻,FEM-SPH 模型中 FEM 网格内部的应力传播至坡面,并进行反射。一部分应力传播至 SPH 粒子,在压渣顶部造成小面积损伤,压渣粒子整体趋于稳定。在 0.006 s 时刻,FEM 网格内部损伤效果已达到饱和,压渣 SPH 粒子出现了类十字型损伤破坏;去除 SPH 粒子,观察台阶坡面损伤,出现了大面积的贯穿破坏,相较于 FEM 模型而言,台阶侧面损伤也更为明显。

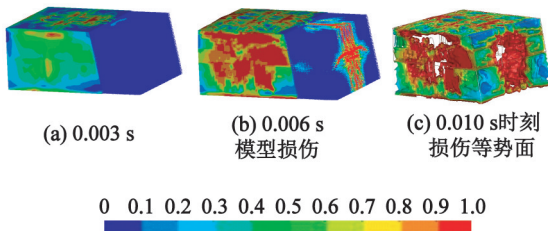


图 16 加密-压渣耦合损伤效果云图

Fig. 16 Cloud diagram of dense hole-buffer coupling damage effect

根据爆破方案损伤数值模拟效果,确定改善现场非均质岩石台阶爆破技术方案为 4 m 加密布孔方案和 8.5 m 压渣方案。

5 PSO-Canny 爆破块度识别模型

PSO 初始化一群随机粒子作为随机解,然后通过搜寻最优粒子位置进行迭代,在空间中搜索最优

解。假设 d 维搜索空间中的第 i 个粒子的位置和速度,分别为 $X_i = (X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,d})$ 和 $v_i = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,d})$ 。在迭代过程中,随机粒子通过追踪粒子本身所找到的最优解 $P_b [P_i = (P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,d})]$ 及整个种群目前所找到的全局最优解 P_g 来更新位置。

粒子速度及位置更新公式如下^[24-25]：

$$\begin{cases} v_{i,j}(t+1) = wv_{i,j}(t) + c_1r_1[P_{i,j} - x_{i,j}(t)] + c_2r_2[P_{g,j} - x_{i,j}(t)]; \\ X_{i,j}(t+1) = X_{i,j}(t) + v_{i,j}(t+1), j=1,2,\dots,d. \end{cases} \quad (6)$$

式中: w 为惯性权重,采用线性递减的方式设置,使群体初期搜索能力更好,在最优解附近搜索更精细; c_1 、 c_2 为学习因子,用于调节粒子和群体的经验认知,为平衡算法的全局探索和局部开发能力,均取 0.5; r_1 、 r_2 为 0 到 1 之间均匀分布的随机数; t 为第 t 轮迭代。

Canny 边缘检测是一种被广泛使用的轮廓识别算法,主要流程包括:针对灰度化图像,采用高斯滤波器去除噪声;接着,使用 Sobel 算子计算梯度;然后,应用非极大值抑制细化边缘;最后,通过双阈值检测来确定边缘。

双阈值的数值范围决定了 Canny 边缘检测算法的准确度。但是,此数值范围并没有明确的规定,只能通过大量试验测算得到,受到人为因素影响较大。因此,引入 PSO 搜寻双阈值的最佳取值范围,利用 processImage 函数处理识别轮廓结果数据,并储存在 totalAreas 函数中,进而提高 Canny 边缘检测算法的识别准确度。

通过对爆堆图样施行中值滤波、形态学处理等,提取爆堆区域岩石的轮廓数据进行爆破大块率识别。PSO-Canny 模型识别流程如图 17 所示。

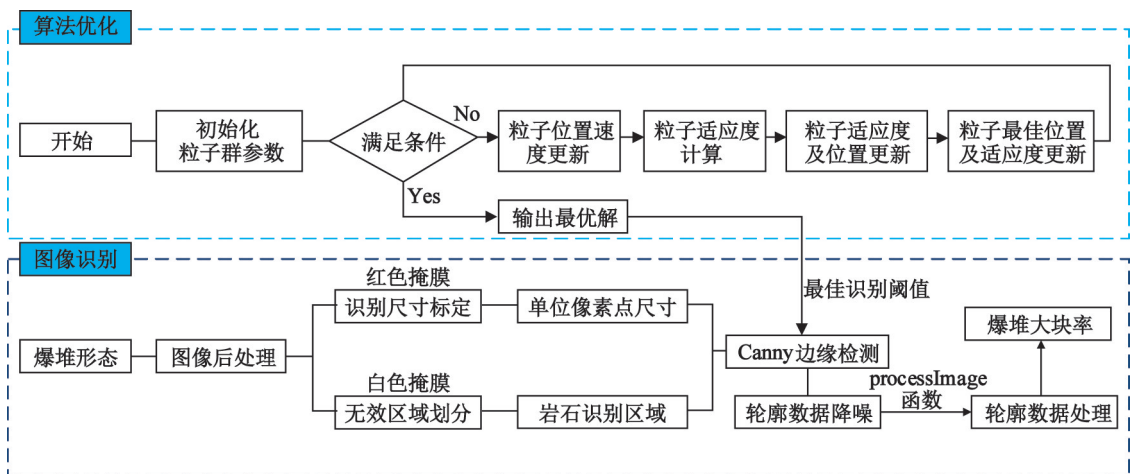


图 17 PSO-Canny 爆堆块度识别流程图

Fig. 17 Process diagram of PSO-Canny explosion fragmentation recognition

利用 PSO-Canny 模型确定爆堆块度尺寸,以标准 A4 纸作为参照物,通过表面积 623.7 cm^2 在不同爆堆图样中所占像素点的数量,换算单位像素点的尺寸数据。拍摄爆堆原始图样时,A4 纸应尽量竖直放置,且保持与拍摄设备同一水平,将爆堆的拍摄距离控制在一定范围;最后,统一图像像素尺寸的换算比例,以减少因爆堆平整度、拍摄距离、拍摄角度等对图像识别造成的影响,提升参照物换算爆堆岩块尺寸数据的可靠性。各方案爆堆与拍摄设备的距离控制在 $2 \sim 3 \text{ m}$;图像识别时,确定比例为 $0.28 \sim 0.32 \text{ pix/mm}$ 。PSO-Canny 模型识别结果如图 18 ~ 图 20 所示。

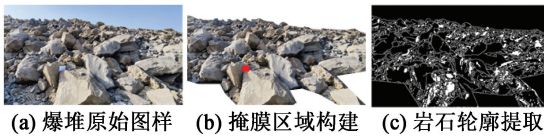


图 18 PSO-Canny 原方案识别结果

Fig. 18 Recognition results of original scheme by PSO-Canny

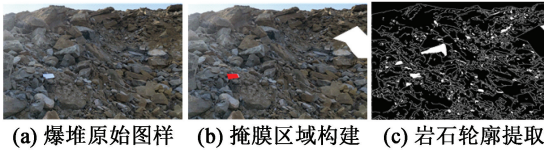


图 19 PSO-Canny 加密布孔方案识别结果

Fig. 19 Recognition results of dense hole scheme by PSO-Canny

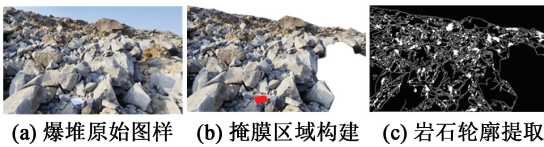


图 20 PSO-Canny 压渣方案识别结果

Fig. 20 Recognition results of buffer scheme by PSO-Canny

依据西湾露天煤矿现场岩石划分准则,判定直径超过 150 cm 的岩石为大块岩石。统计得到爆堆岩石的大块率如图 21 所示。

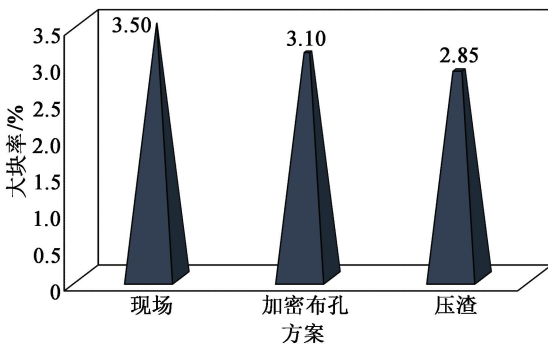


图 21 PSO-Canny 模型识别的爆破大块率

Fig. 21 Blasting block identification rate of PSO-Canny model

6 爆堆块度识别效果分析

Split-Desktop 4.0 是一款半自动化爆堆块度识别分析软件,经人工干预后能够快速、准确地获得爆堆块度数据,现场应用较广泛^[13]。软件识别结果如图 22 所示。图 22 中,青色标记为阴影、煤屑等不识别区域。统计得爆堆岩石大块率如图 23 所示。

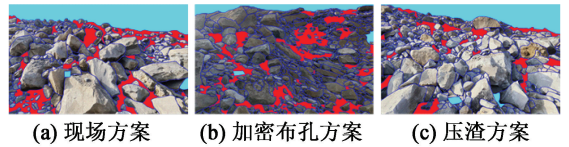


图 22 Split-Desktop 4.0 爆堆识别结果

Fig. 22 Explosion identification results of Split-Desktop 4.0

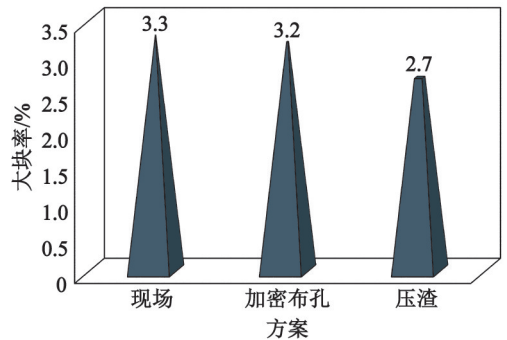


图 23 Split-Desktop 4.0 识别的爆破大块率

Fig. 23 Blasting block identification rate of Split-Desktop 4.0

PSO-Canny 模型与 Split-Desktop 4.0 爆堆块度分析软件的识别结果对比如图 24 所示。

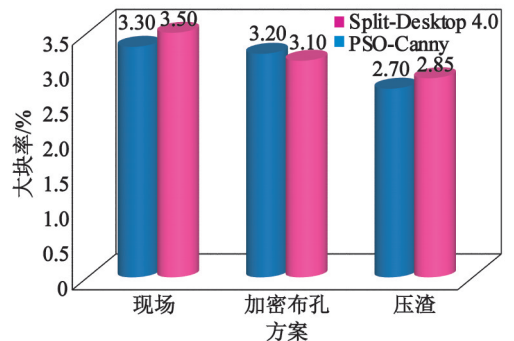


图 24 爆堆识别结果误差对比

Fig. 24 Comparison of error in explosion identification results

由图 24 可得,PSO-Canny 爆破块度识别模型与 Split-Desktop 4.0 软件识别结果基本一致。对于随机选取的 3 次爆破后的爆堆情况,两者的识别误差

分别为6%、3%、2%,处于可接受范围内,识别结果基本合理,且PSO-Canny模型识别效率明显更高。

7 结论

1)基于西湾露天煤矿非均质岩石台阶爆破块度明显的问题,在不改变孔网参数的基础上,提出增加爆破块度控制的措施。通过分析数值模拟结果,确定4 m为最佳加密布孔长度、8.5 m为最佳压渣厚度。经现场试验验证,4 m加密布孔方案与8.5 m压渣方案使爆后岩石大块率分别降低了0.40%与0.65%,压渣方案改善爆破效果优于4 m加密布孔方案。

2)利用PSO优化了Canny边缘识别算法识别阈值,构建了PSO-Canny露天矿爆破块度识别模型。以A4纸标准面积为参考对象,计算爆堆图样单位像素点尺寸,根据现场岩石划分准则确定各方案爆后的大块率。将PSO-Canny与Split-Desktop 4.0块度分析软件结果进行对比,得到各方案的识别误差分别为6%、3%、2%。

参考文献

- [1] MENG N, BAI J, CHEN Y, et al. Damage evolution mechanisms of rock induced by blasting with the aid of empty-hole effect [J]. *Energies*, 2020, 13(3): 756.
- [2] CHEN Q Y, LI H B, XIA X, et al. Research and application of empty hole effect under blasting loading [J]. *Journal of China Coal Society*, 2016, 41(11): 2749-2755.
- [3] 谢二伟, 孙得志, 郭俊庆, 等. 空孔孔径对深部岩石爆破裂纹扩展影响规律的数值模拟研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(7): 116-122.
XIE E W, SUN D Z, GUO J Q, et al. Numerical simulation study on the influence law of empty hole diameter on blasting crack propagation in deep rock [J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(7): 116-122.
- [4] 梁瑞, 王兵兵, 周文海, 等. 空孔对爆生裂纹扩展的力学行为研究[J]. *有色金属工程*, 2023, 13(11): 82-88, 125.
LIANG R, WANG B B, ZHOU W H, et al. Study on the mechanical behavior of empty holes on blasting crack propagation [J]. *Nonferrous Metals*, 2023, 13(11): 82-88, 125.
- [5] 陈响升, 刘泽功, 乔国栋, 等. 含控制孔切缝药柱爆破穿透松软煤层数值模拟研究[J]. *矿业研究与开发*, 2023, 43(12): 29-33.
CHEN X S, LIU Z G, QIAO G D, et al. Numerical simulation on blasting anti-reflection of soft coal seam with control hole and slit seam column [J]. *Mining Research and Development*, 2023, 43(12): 29-33.
- [6] 冀玉豪, 李文杰, 康兰方, 等. 基于空孔效应的坚硬岩石胀裂破岩石力学特性研究[J]. *爆破*, 2023, 40(2): 53-60.
JI Y H, LI W J, KANG L F, et al. Research on mechanical characteristics of rigid rock spallation and fracturing rock based on empty hole effect [J]. *Blasting*, 2023, 40(2): 53-60.
- [7] 崔年生, 楼晓明. 露天矿山深孔台阶压渣爆破参数优化研究[J]. *矿冶工程*, 2023, 43(4): 44-47.
CUI N S, LOU X M. Optimization of buffer blasting parameters for deep-hole bench blasting in open-pit mine [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 2023, 43(4): 44-47.
- [8] 王俊新, 王璞, 黄永辉, 等. 露天金矿控制矿体位移爆破数值模拟与生产试验研究[J]. *工程爆破*, 2023, 29(2): 87-94.
WANG J X, WANG P, HUANG Y H, et al. Research on numerical simulation and production test of blasting displacement controlled of ore body in open-pit gold mine [J]. *Engineering Blasting*, 2023, 29(2): 87-94.
- [9] 谢烽, 刘玉龙, 常剑, 等. 多排孔大块爆破压渣厚度对电铲铲装效率的影响研究[J]. *爆破*, 2022, 39(4): 85-91.
XIE F, LIU Y L, CHANG J, et al. Study on influence of buffer thickness in large block blasting with multiple rows of holes on loading efficiency of rope shovel [J]. *Blasting*, 2022, 39(4): 85-91.
- [10] OUCHTERLONY F, SANCHIDRIÁN J A. A review of development of better prediction equations for blast fragmentation [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(5): 1094-1109.
- [11] CUNNINGHAM C V B. The Kuz-Ram fragmentation model: 20 years on [C] // Brighton conference Proceedings. European Federation of Explosives Engineers, 2005: 201-210.
- [12] OUCHTERLONY F, SANCHIDRIÁN J A, MOSER P. Percentile fragment size predictions for blasted rock and the fragmentation-energy fan [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2017, 50(4): 751-779.
- [13] YAGHOUBI H, MANSOURI H, FARSANGI M A E, et al. Determining the fragmented rock size distribution using textural feature extraction of images [J]. *Powder Technology*, 2019, 342: 630-641.
- [14] 陈承桢, 李荟, 朱万成, 等. 基于深度学习和贴近摄影测量的露天矿爆堆块度识别算法[J]. *矿业科学学*

- 报, 2025, 10(1): 151-162.
- CHEN C Z, LI H, ZHU W C, et al. Blast pile fragments recognition algorithm for open pit mines based on deep learning and nap-of-the-object photogrammetry [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2025, 10(1): 151-162.
- [15] 徐浩哲, 李鑫雨, 闫钰亭, 等. 基于优化 Canny-Ostu 算法的爆破块度识别[J]. 有色金属(矿山部分), 2024, 76(3): 50-55.
- XU H Z, LI X Y, YAN Y T, et al. Blasting fragmentation recognition based on optimized Canny-Ostu algorithm [J]. Nonferrous Metals (Mining Section), 2024, 76(3): 50-55.
- [16] 刘俊伟, 陈晓青. 基于计算机视觉的爆破块度分布统计[J]. 矿业研究与开发, 2024, 44(1): 190-196.
- LIU J W, CHEN X Q. Statistics of blasting fragmentation distribution based on computer vision [J]. Mining Research and Development, 2024, 44(1): 190-196.
- [17] 徐振洋, 郇宝乾, 李萍丰, 等. 爆堆自适应分层的块度空间分布测量方法研究[J]. 爆破, 2024, 41(1): 27-36, 50.
- XU Z Y, HUAN B Q, LI P F, et al. Study on measurement method of fragment spatial distribution by adaptive stratification of blasting pile [J]. Blasting, 2024, 41(1): 27-36, 50.
- [18] 陈起建. 隧道岩体爆破碎片预测方法对比研究[J]. 工程爆破, 2023, 29(4): 78-86.
- CHEN Q J. Comparative study on prediction methods of blasting debris in tunnel rock mass [J]. Engineering Blasting, 2023, 29(4): 78-86.
- [19] 姬付全, 梁晓腾, 杨林, 等. 基于 ACE + CLAHE 算法的隧道爆破块度图像分析[J]. 人民长江, 2022, 53(11): 125-129.
- JI F Q, LIANG X T, YANG L, et al. Image analysis on tunnel blasting fragments based on ACE and CLAHE algorithm [J]. Yangtze River, 2022, 53(11): 125-129.
- [20] 陈然, 杨仕教, 朱忠华, 等. 基于双门限阈值的爆破块度图像识别研究[J]. 工程爆破, 2020, 26(2): 57-64.
- CHEN R, YANG S J, ZHU Z H, et al. Research on image recognition of blasting block based on double threshold [J]. Engineering Blasting, 2020, 26(2): 57-64.
- [21] 丁小华, 原文杰, 解祯, 等. 基于综合赋权云模型的露天矿岩体可爆性分级识别[J]. 煤炭科学技术, 2019, 47(10): 96-101.
- DING X H, YUAN W J, XIE Z, et al. Classification and identification of rock blastability in open-pit mine based on comprehensive weighted cloud model [J]. Coal Science and Technology, 2019, 47(10): 96-101.
- [22] 杨仁树, 陈程, 王煦, 等. 不同直径空孔对爆生裂纹扩展行为影响规律的实验研究[J]. 煤炭学报, 2017, 42(10): 2498-2503.
- YANG R S, CHEN C, WANG X, et al. Experimental investigation on the influence of different diameter empty holes on the crack growth behavior of blasting [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(10): 2498-2503.
- [23] 辛春亮, 薛再清, 涂建, 等. 有限元分析常用材料参数手册[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [24] 严妮. 基于提升小波和粒子群优化 Canny 算法的图像处理[D]. 大庆: 东北石油大学, 2013.
- YAN W. Image processing based on lifting wavelet and Canny algorithm of PSO [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2013.
- [25] 马钰, 魏文红. 一种基于简化方程的改进粒子群优化算法[J]. 东莞理工学院学报, 2025, 32(1): 41-47.
- MA Y, WEI W H. An improved particle swarm optimization algorithm based on simplified equations [J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2025, 32(1): 41-47.