

# 基于混合人工蜂群算法乳化炸药配方优化

张健宁<sup>1</sup>, 韩新平<sup>1,2</sup>, 王 珍<sup>1</sup>

(1. 辽宁工程技术大学矿业学院, 阜新 123000; 2. 辽宁工程技术大学露天矿山研究院, 阜新 123000)

**摘 要** 针对某露天矿提高乳化炸药爆热以改善油母页岩爆破效果的需求, 在保证炸药原材料成本不高于 1700 元/t 的前提下, 基于混合人工蜂群算法优化了某露天矿乳化炸药成分配比. 以露天矿爆破炸药组分配方的 6 个参数为主要影响因子, 采用 RNA 分子操作和 Oracle 罚函数法改进人工蜂群算法, 建立了乳化炸药配方优化模型, 同时应用爆热测试仪对新配方乳化炸药进行测试. 结果表明: 在乳化炸药配方组成为硝酸钠 7%、硝酸铵 78.264%、水 9%、乳化剂 2%、石蜡 2%、柴油 1.736% 时, 新配方乳化炸药爆热提高至  $3328.7 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 对露天矿爆破生产具有良好的指导意义.

**关键词** 人工蜂群算法; 乳化炸药; 爆热; 配方优化

**中图分类号** TD235

## Emulsion Explosive Formulation Optimization Based on Hybrid Artificial Bee Colony Algorithm

ZHANG Jianning<sup>1</sup>, HAN Xinping<sup>1,2</sup>, WANG Zhen<sup>1</sup>

(1. School of Mining, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;  
2. Research Institute of Open Pit Mine, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract** According to the requirement to improve the blasting effect of oil shale by increasing the explosive heat of formula optimization, optimize emulsion explosive composition based on hybrid artificial bee colony algorithm in the open pit mine, which is on the premise that the cost of raw materials in explosives is not higher than 1700 yuan/t. With 6 parameters of blasting explosive components as the main influencing factors, use RNA molecular operations and Oracle penalty function to improved artificial bee colony algorithm, establish emulsion explosive formulation optimization model, test the emulsion explosive heat of new formula by explosion heat tester. The results showed that: when the sodium nitrate 7% and ammonium nitrate 78.264%, water 9%,

收稿日期: 2014-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51104084, 51474119); 国家自然科学基金重点资助项目 (U1361211); 高等学校博士学科点专项基金项目 (20122121110003)

作者简介: 张健宁 (1988-), 男, 汉, 辽宁阜新人, 硕士研究生, 研究方向: 露天开采工艺, E-mail: lin\_123888@163.com; 韩新平 (1956-), 男, 汉, 辽宁阜新人, 教授, 硕士生导师, 研究方向: 露天开采工艺; 通讯作者: 王珍 (1989-), 女, 汉, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 研究方向: 露天开采工艺, E-mail: 15898305580@163.com.

emulsifier 2%, paraffin wax 2%, diesel 1.736% compose the emulsion explosive formulations, emulsion explosive heat of new formula increase to  $3328.7 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ , which is a good guiding significance for blasting in open-pit mine production.

**Keywords** artificial bee colony algorithm; emulsion explosive; explosion heat; formula optimization

**Chinese Library Classification** TD235

## 0 引言

爆破是破岩的最佳手段,也是露天矿生产的重要环节.从爆破能量传递和波动理论出发,合理的炸药岩石匹配直接影响着露天矿爆破最终的成本与效果.然而爆炸反应伴随着高温、高压和高速的瞬时变化过程,由于体性质和爆破条件复杂多变,只有通过炸药爆炸后的能量分布规律研究,才能改进爆破工艺与效果.实验表明当炸药的波阻抗值与岩石的波阻抗值越接近,岩石吸收的能量越多,在岩石中所引起的应变值越大,产生的爆破效果最好.对于软岩、塑性变形大的岩石,应力波能绝大部分消耗在空腔的形成,而且岩石本身弹性模量低,宜用爆压较低、爆热较高的炸药<sup>[1]</sup>.由于爆热值与波阻抗、爆压、爆速值均成正比,在诸多炸药示性量中爆热为最佳优化目标.

露天矿现场针对油母页岩爆破采用的是孔网参数为  $4.5\text{m}\times 4.5\text{m}$  的松动爆破,孔底间隔装药,孔深  $8.6\text{m}$ ,炸药单耗  $150 \text{ g}/\text{m}^3$ ,已取得较好的爆破效果.因此在成熟的爆破方案和成本控制基础上,采用优化性能良好的人工蜂群算法优化乳化炸药配方提高炸药性能,是进一步改善爆破效果和提生产效益的必然选择.而传统的人工蜂群算法存在着后期收敛速度慢、局部搜索能力弱,不能处理离散和约束问题等缺点.为了解决早熟收敛问题,王宁等受 DNA 和 RNA 分子操作的启发,提出了多种 DNA 或 RNA 遗传算法,数值寻优试验展示了这些算法的优点<sup>[2,3]</sup>.借鉴以上思路,通过对传统的 Oracle 罚函数的改进,结合 RNA 分子操作,提出了解决约束优化乳化炸药配方的 RNA-ABC 算法.

## 1 混合人工蜂群算法

### 1.1 人工蜂群算法

人工蜂群算法是一种基于蜜蜂觅食行为提出的随机搜索算法.2005年,由土耳其 Erciyes 大学的 Karaboga 教授首次提出了人工蜂群算法模型.在人工蜂群算法中,人工蜂群由雇佣蜂、观察蜂、侦查蜂三部分组成,雇佣蜂的数量和食物源的数量相同.初始化随机产生的食物源位置随着雇佣蜂、观察蜂和侦查蜂的不断搜索而更新.雇佣蜂在每个食物源领域搜索一个新食物源,并记录其信息,若新食物源的数量比初始的食物源多,则雇佣蜂记住新的位置忘记旧的食物源位置.

所有蜜蜂完成搜索后,他们将把搜索到的食物源信息与观察蜂分享;观察蜂根据已得知信息通过择食物源的概率公式选择其中一个食物源位置,然后,观察蜂也在附近随机搜索一个新的食物源,并检查其信息.然后比较两个食物源的优劣,保存质量好的食物源.当某个食物源经过多次循环之后没有得到改善,并且超过限制值以后,则放弃该食物源,同时与这个食物源相对应

的雇佣蜂也转变为侦查蜂, 重新寻找新的食物源<sup>[4]</sup>. 人工蜂群算法流程图如图 1 所示.

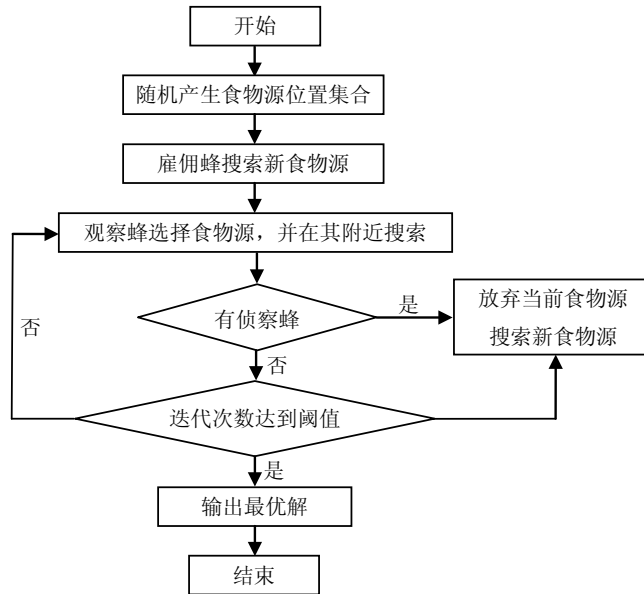


图 1 人工蜂群算法流程图

设优化问题为:

$$\begin{aligned} \min \quad & f(x), \quad X = [x_1, x_2, \dots, x_D] \\ \text{s.t.} \quad & x_i \in [a_i, b_i], \quad i = 1, 2, \dots, D \end{aligned}$$

在 ABC 算法中, 初始食物源公式为:

$$x_i = x_{\text{low}} + \text{rand}(x_{\text{up}} - x_{\text{low}}), \quad i = 1, 2, \dots, FN \quad (1)$$

其中  $x_i (i = 1, 2, \dots, FN)$  均为  $D$  维向量,  $D$  为待优化问题的参数个数,  $x_{\text{up}}$ 、 $x_{\text{low}}$  分别为  $x_i$  的上下界.

雇佣蜂和观察蜂的食物源搜索更新公式为:

$$v_i^j = x_i^j + \Phi_i^j(x_i^j - x_k^j) \quad (2)$$

式中  $k \in \{1, 2, \dots, FN\}$  为随机产生的维数索引值;  $j \in \{1, 2, \dots, D\}$  为随机产生的索引值,  $\Phi_i^j$  为  $[-1, 1]$  区间上等产生的一个等概率随机实数.

观察蜂选择食物源的概率公式为:

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{n=1}^{FN} fit_n} \quad (3)$$

式中,  $FN$  是食物源数量,  $fit_i$  是第  $i$  份食物源的适应度值.

### 1.2 RNA 分子操作

原始的 ABC 算法中, 食物源的探索和开采都是基于实数编码进行的, 需采用全新的碱基编码方式加入到 RNA 分子操作中. RNA 链的四种碱基 AGCU 可以表示为种群中的每个个体, 编码空间表示为  $E = \{A, G, C, U\}^L$ , 其中  $L$  表示 RNA 链碱基串长度. 同时碱基  $E_1 = \{A, G, C, U\}^L$  的编码方式需替换为  $E_2 = \{0, 1, 2, 3\}^L$  的数字编码方式. 采用  $E_2$  的二进制数字 00 对应碱基 C,

01 对应碱基 U, 10 对应碱基 A, 11 对应碱基 G, 当首位为 0 时表示嘧啶碱基, 而当首位为 1 时表示嘌呤碱基. 这四种编码方式也保留了碱基的互补关系, 即互补的 C 和 G 碱基对应的编码 0 和 1 保持互补关系, U 和 A 碱基对应的编码 2 和 3 保持互补关系, CUAG/0123 编码也是最优的编码方式.

选取 RNA 转位算子、换位算子、置换算子三种操作作为主要的分子操作方式. 将 10% 的个体作为精英保存, 其余的所有个体按照适应度函数排序后分为两部分, 然后 RNA-ABC 算法执行交叉. 由于在前半部分中性个体中存在着更多的优秀基因, 置换操作在中性个体之间执行, 新个体需替换父个体以保持种群规模的不变性. 在后半部分不良个体群中采用转位和换位操作以保持种群多样性. 算法中三种 RNA 操作执行概率分别为: 置换操作概率等于 1, 换位操作概率等于 0.5, 对不执行换位操作的个体采用转位操作替换.

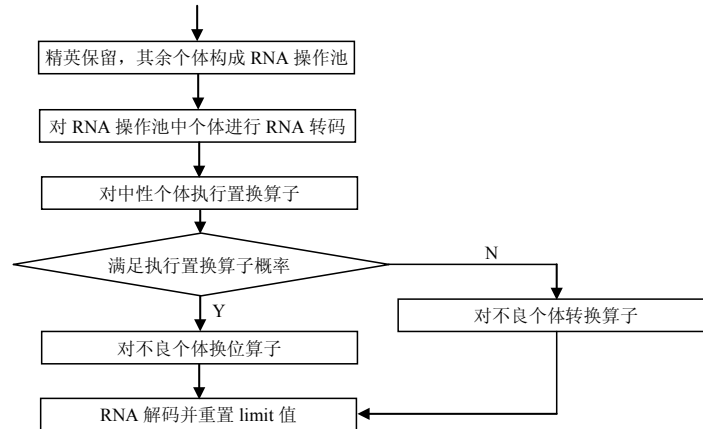


图 2 RNA 分子操作流程

### 1.3 约束处理

为了求解具有约束条件的优化问题, 需要结合合适的约束处理方法, 其中罚函数是一种常用的约束处理方法. 如自适应或模拟退火罚函数等<sup>[5]</sup>, 可以针对特定的问题调整参数, 从而提高最优解的搜索效率, 优点是不需要引入很多参数, 缺点是很难获得满意的性能. Oracle 罚函数法则有效的解决了上述问题<sup>[6]</sup>, 该方法设定了一个可调参数  $\Omega$ , 对于特殊的约束条件问题, 它被选定为最优可行解的等价目标函数值, 并将目标函数  $\min f(\vec{x})$  转化为一个等式约束  $g_0(\vec{x}) = f(\vec{x}) - \Omega = 0$ ,

$$\begin{aligned} & \min f(\vec{x}) \\ \text{s.t. } & h_j(\vec{x}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, me \\ & g_j(\vec{x}) \geq 0, \quad j = me + 1, \dots, m \end{aligned} \quad (4)$$

其中  $me$  为等式约束的个数,  $m$  为所有约束的个数. 通过  $\Omega$  的上述转化后, 新的目标函数表达式为  $\tilde{f}(\vec{x}) = f(\vec{x}) - \Omega \equiv 0$ , 目标函数变为多余, 等式的约束个数变为  $me + 1$  个.

确立  $p(\vec{x})$  作为 Oracle 罚函数新的适应度函数值, 同时选取范数  $l^\infty$  来定义剩余函数  $res(\vec{x})$ , 其公式如下:

$$l^\infty : res(\vec{x}) = \max\{|g_i(\vec{x})|_{i=1, \dots, me}, |\min\{0, g(\vec{x})\}_{i=me+1, \dots, m}|\} \quad (5)$$

法函数值  $p(\bar{x})$  的计算公式为:

$$p(\bar{x}) = \begin{cases} \alpha \cdot |f(\bar{x}) - \Omega| + (1 - \alpha) \cdot res(\bar{x}), & \text{if } f(\bar{x}) > \Omega \text{ or } res(\bar{x}) > 0 \\ -|f(\bar{x}) - \Omega|, & \text{if } f(\bar{x}) \leq \Omega \text{ and } res(\bar{x}) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

自适应系数  $\alpha$  的分段函数计算公式为 [7]:

$$\alpha = \begin{cases} \frac{|f(x) - \Omega| \cdot (6\sqrt{3} - 2) / 6\sqrt{3} - res(\bar{x})}{|f(x) - \Omega| - res(\bar{x})}, & \text{if } f(\bar{x}) > \Omega \text{ and } res(\bar{x}) < \frac{|f(\bar{x}) - \Omega|}{3} \\ 1 - \frac{1}{2\sqrt{\frac{|f(\bar{x}) - \Omega|}{res(\bar{x})}}}, & \text{if } f(\bar{x}) > \Omega \text{ and } \frac{|f(\bar{x}) - \Omega|}{3} \leq res(\bar{x}) \leq |f(\bar{x}) - \Omega| \\ \frac{1}{2}\sqrt{\frac{|f(\bar{x}) - \Omega|}{res(\bar{x})}}, & \text{if } f(\bar{x}) > \Omega \text{ and } res(\bar{x}) > |f(\bar{x}) - \Omega| \\ 0, & \text{if } f(\bar{x}) \leq \Omega \end{cases} \quad (7)$$

在有多种约束条件的情况下, 可行解的最优估值  $\Omega$  都是难以确定的, 因此需要有一种新的 Oracle 参数更新规则来调整  $\Omega$  值, 设一个  $i$  值做为算法迭代循环周期索引, 则其规则公式为:

$$\Omega^i = \begin{cases} f^{i-1}, & \text{if } f^{i-1} < \Omega^{i-1} \text{ and } res^{i-1} = 0 \\ \Omega^{i-1}, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

由于自适应参数  $\alpha$  和更新规则的设置, 使 Oracle 罚函数方法保持良好性能的同时, 只有一个参数  $\Omega$ , 且对  $\Omega$  值的设置不严格.

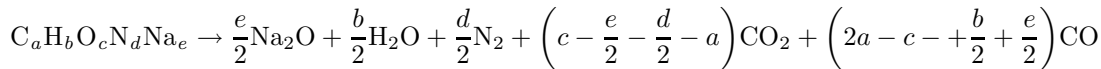
在寻优时, 对于式 (7) 中的约束等式  $h_j(\bar{x}) = 0$ , 一般会采用等式约束  $|h_j(\bar{x}) - \varepsilon| \leq 0$  来进行处理. 若变量中存在  $n$  个离散变量,  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_n\}$ , 则可以通过一个连续变量  $x \in [1, n]$  取整的方式获得整数下标值  $i$ , 公式如下

$$i = round(x), \quad x \in [1, n] \quad (9)$$

## 2 乳化炸药配方设计数学模型的建立及求解

### 2.1 目标函数

某露天矿为了改善油母页岩爆破效果, 需改进现有乳化炸药配方以提高炸药爆热值. 油母页岩波阻抗值  $36 \sim 47 \text{ MN} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 对应的匹配爆热值  $3000 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \sim 3500 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . 在保证炸药原材料成本不高于  $1700 \text{ 元/t}$  的前提下, 对某露天矿乳化炸药成分配比进行优化. 乳化炸药的主要成分为 C、H、O、N、Na 元素, 在微弱的负氧平衡条件下乳化炸药  $C_a H_b O_c N_d Na_e$  的爆炸反应方程式为 [8]:



式中  $a, b, c, d, e$  为每公斤乳化炸药中 C、H、O、N、Na 各元素原子的摩尔数, 则有

$$a = \sum_{i=1}^n \frac{10a_i}{m_i} x_i \quad b = \sum_{i=1}^n \frac{10b_i}{m_i} x_i \quad c = \sum_{i=1}^n \frac{10c_i}{m_i} x_i \quad d = \sum_{i=1}^n \frac{10d_i}{m_i} x_i \quad e = \sum_{i=1}^n \frac{10e_i}{m_i} x_i$$

盖斯定律: 炸药的爆热  $Q_{2,3} = Q_{1,3} - Q_{1,2}$

式中,  $Q_{1,3}$  为爆炸产物的生成热之和,  $Q_{1,2}$  为炸药的生成热,  $Q_{2,3}$  为爆热. 若  $i$  组的定容生成热为  $Q_{f(i)}, i = 1, 2, \dots, n$ , 则

$$Q_{\max} = \frac{e}{2} \cdot Q_{f(Na_2O)} + \frac{b}{2} \cdot Q_{f(H_2O)} + \frac{d}{2} \cdot Q_{f(N_2)} + \left(c - \frac{b+e}{2} - a\right) \cdot Q_{f(CO_2)}$$

$$+ \left( 2a - c + \frac{b + e}{2} \right) \cdot Q_{f(\text{CO})} - \sum_{i=1}^n \frac{10}{m_i} \cdot Q_{f(i)}$$

最大爆热值  $Q_{\max} = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ .

## 2.2 数学模型

乳化炸药的配方设计的约束条件包括有氧平衡、变量和、原材料成本和 6 种成分的变量上下线<sup>[9]</sup>. 设所选择的  $i$  种物质的氧平衡为  $o_i, i = 1, 2, \dots, n$ , 氧平衡的约束条件为:

$$\sum o_i x_i \leq 0 \quad (10)$$

变量的和应满足:

$$\sum x_i = 100 \quad (11)$$

设所选择的  $i$  中物质的成本为  $\text{cost}_i, i = 1, 2, \dots, n$ , 则乳化炸药原材料的成本公式为:

$$\sum \text{cost}_i x_i = \frac{\text{cost}}{10} \quad (12)$$

式中,  $\text{cost}$  为乳化炸药每吨原材料的成本.

每个原材料变量的限制范围由经验值确定:

$$s_i \leq x_i \leq t_i, \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

乳化炸药由硝酸钠、硝酸铵、水、乳化剂、石蜡、柴油组成, 设每种成分的质量百分含量分别为  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$ , 将它们带入  $a, b, c, d, e$ , 则有:

$$a = 0.561x_4 + 0.709x_5 + 0.706x_6$$

$$b = 0.500x_2 + 1.111x_3 + 1.028x_4 + 1.496x_5 + 1.529x_6$$

$$c = 0.353x_1 + 0.375x_2 + 0.556x_3 + 0.140x_4$$

$$d = 0.118x_1 + 0.250x_2$$

$$e = 0.059x_1$$

将  $a, b, c, d, e$  带入爆热目标函数  $Q_{\max}$  和约束条件, 将炸药原材料成本控制在  $1700/\text{元} \cdot \text{t}^{-1}$ , 得到乳化炸药新配方的爆热目标函数表达式为:

$$Q_{\max} = 52.79x_1 + 51.08x_2 + -23.07x_3 - 97.77x_4 - 173.05x_5 - 167.62x_6$$

搜索空间约束条件:

$$47x_1 + 20x_2 + -239x_4 - 380x_5 - 380x_6 \leq K$$

$$x_1 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 = 100$$

$$2.1x_1 + 1.4x_2 + 10x_4 + 6.5x_5 + 7.3x_6 \leq \text{cost}/10 = 150$$

$$5 \leq x_1 \leq 10 \quad 70 \leq x_2 \leq 82 \quad 8 \leq x_3 \leq 13 \quad 1 \leq x_4 \leq 3 \quad 2 \leq x_5 \leq 4 \quad 1 \leq x_6 \leq 3$$

## 2.3 寻优结果与分析

使用 RNA-ABC 算法对乳化炸药成分配比优化问题优化求解. 计算中采用的算法参数设置为: 种群食物源个数  $S_n = 100$ , 精英保留量为 10%,  $Cyc_{\max} = 2000$ ,  $limit = 200$ ,  $p_1 = 1.0$ ,  $p_2 = 0.5$ . 乳化炸药配方设计的目标函数的搜索空间为 6 维, 具有 3 个线性或非线性的不等式约

束。如图 3 所示, 在前 30 多代中, RNA-ABC 算法在 Oracle 算法的指引下, 不断的搜索可行区域, 随后找到了可行区域并不断更新位置, 曲线缓慢平稳下降至 50 代左右收敛于最大爆热值  $3328.309\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

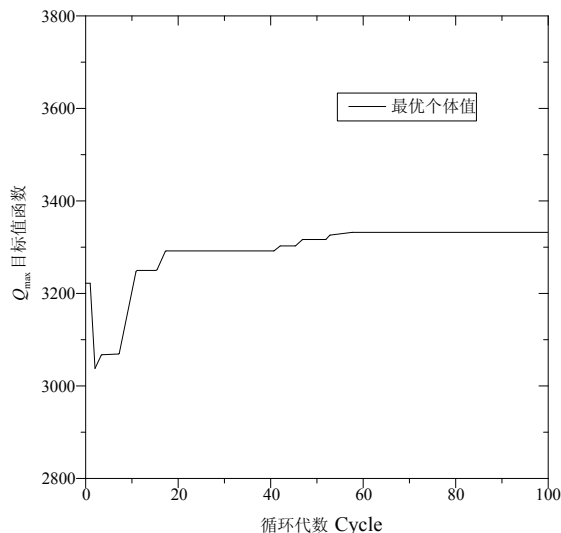


图 3 RNA-ABC 算法寻优函数收敛曲线

如表 1 所示, 对比 RNA-ABC 算法, Deb 遗传算法<sup>[10,11]</sup> 将进化代数设置为 4000, 使用遗传算法获得的最优解为 3247.452, 结果偏差大, 且成功率较低, 仅有 25%。使用 HGA 算法<sup>[12]</sup> 成功率提高到 50%, 且所得最优解为 3244.821, 非常接近已知最优解。但是 HGA 的解  $x^* = (7, 78.253, 9, 2, 2, 1.747)$  被带入到成本约束函数时轻度的超过了限制值, 为  $1700.073 > 1700$ 。RNA-ABC 算法收敛到最优解附近  $x^* = (7, 78.264, 9, 2, 2, 1.736)$ , 所得最优解为 3326.997, 比 HGA 的结果好, 且最优解在所有约束函数限制范围内, 因此优于 Deb 遗传算法和 HGA 算法的解。

表 1 三种算法求解结果统计

	Deb 遗传算法			HGA 算法			RNA-ABC 算法	
	成功次数	最优解	进化迭代数设定	成功次数	最优解	平均进化代数	最优解	标准差
$Q_{\max}$	25	3247.452	5000	50	3244.821	332	3326.997	$1.57\text{e-}8$

产生的最优配方结果与原配方参数对比值如表 2 所示。

表 2 乳化炸药新配方与原配方的参数比较

序号	配方								
	硝酸钠 $\times 100$	硝酸铵 $\times 100$	水 $\times 100$	乳化剂 $\times 100$	石蜡 $\times 100$	柴油 $\times 100$	氧平衡 $\times 100$	计算爆热 $/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	原材料成 本/ $\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$
1	7.00	78.264	9.00	2.00	2.00	1.736	0	3326.997	1699.424
2	7.00	76.98	10.00	2.00	2.00	2.02	0	3190.736	1702.18

选用配方 1 制成乳化炸药, 使用爆热测试仪测得新旧配方的爆炸性能, 证实新配方的爆炸性能明显高于旧配方, 爆炸性能如表 3 所示。

表 3 乳化炸药新配方与原配方爆炸性能比较

序号	炸药爆炸性能				
	测定爆热/ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	爆速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	猛度/mm	殉爆距离/cm	做功能/ml
1	3328.7	$4100\text{m}\cdot\text{s}^{-1} \sim 4700\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	17mm~19mm	8cm~10cm	300ml~320ml
2	3189.6	$4000\text{m}\cdot\text{s}^{-1} \sim 4600\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	16mm~19mm	7cm~9cm	300ml~310ml

### 3 结论

(1) 引入人工蜂群算法优化乳化炸药成分配比, 将 RNA 分子操作与 ABC 算法结合, 并使用 Oracle 罚函数处理约束, 实现了对具有约束的优化问题的求解. 与 Deb 遗传算法和 HGA 算法对比表明, 在满足各种约束的条件下, RNA-ABC 算法能明显改善解的精度.

(2) 根据 RNA-ABC 算法所计算出的最优乳化炸药配方试制的乳化炸药, 成本降低到  $1700/\text{元}\cdot\text{t}^{-1}$  以下, 经爆热测试仪测得, 爆热明显高于原有乳化炸药, 新配方的乳化炸药爆炸性能明显高于原有配方, 对改善露天矿油母页岩的爆破效果产生了积极的影响, 提高了露天矿的生产效益, 具有推广价值.

### 参 考 文 献

- [1] 陈银良. 炸药性能指标对岩石爆破效果的理论分析及实际应用 [J]. 能源与环境, 2011, 64(4): 160-161.
- [2] Chen X, Wang N. Optimization of short-time gasoline blending scheduling problem with a DNA based hybrid genetic algorithm [J]. Chemical Engineering and Processing, 2010: 1076-1083.
- [3] Wang K T, Wang N. A protein inspired RNA genetic algorithm for parameter estimation in hydrocracking of heavy oil[J]. Chemical Engineering Journal, 2010, 167(1): 228-239.
- [4] 张新艳. 改进蜂群聚类算法 [D]. 长春: 东北师范大学, 2013.
- [5] 吴剑锋, 朱学愚, 刘建立. 基于遗传算法的模拟退火罚函数方法求解地下水管理模型 [J]. 中国科学 E 辑, 1999, 29(5): 474-480.
- [6] Schluter M, Gerdtts M. The oracle penalty method[J]. Journal of Global Optimization, 2010, 47(2): 293-325.
- [7] 董明刚. 基于差分进化的优化算法及应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [8] 吕春绪, 刘祖亮, 倪欧琪. 工业炸药 [M]. 北京: 兵器工业出版社, 1996: 1-13.
- [9] 汪旭光. 乳化炸药 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 1-14.
- [10] Mechalewicz Z. Genetic algorithm + data structures = evolution programs[M]. New York: Springer-Verlag, 1996.
- [11] Chen X, Wang N. A DNA based genetic algorithm for parameter estimation in the hydrogenation reaction[J]. Chemical Engineering Journal, 2009, 150(2-3): 527-535.
- [12] Tao J L, Wang N. DNA double helix based hybrid GA for the gasoline blending recipe optimization problem[J]. Chemical Engineering Technology, 2008, 31(3): 440-451.