doi：10. 12068/j. issn. 1005－3026. 2026. 20240180

离散元法与响应面法结合的多轴原位土壤修复装置参数优化

王志鹏，王有昭，朱 彤，马 峰
（东北大学 机械工程与自动化学院，辽宁 沈阳 110819）

摘 要：为解决黑土修复效率低的问题，促进黑土资源循环利用，开发了一种新型土壤修复装置. 为提高其作业效率与处理质量，采用离散元法对黑土颗粒的运动及相互作用进行数值模拟，通过正交试验、最陡爬坡试验与响应面试验相结合的方法，对装置关键运行参数进行系统优化. 通过正交试验确定最陡爬坡试验的中心水平值；借助最陡爬坡试验明确响应面法的中心试验点与最优值范围；在此基础上，利用响应面法构建可靠的响应面模型，最终获得装置运行的最优参数组合：转速135 r/min、均混时间2. 6 s、均混螺距73 mm、刀片间距27 mm. 该研究为黑土原位修复装置的结构设计与运行控制提供了可行的参数依据，对提升土壤修复工程效率、推动黑土可持续利用具有实际意义.

关 键 词：多轴；土壤修复装置；离散元法；响应面法；混合均匀性
中图分类号：TH 41 **文献标志码**：A **文章编号**：1005-3026(2026)02-0082-05

Parameter Optimization of Multi-axis In-situ Soil Remediation Device Combining Discrete Element Method and Response Surface Methodology

WANG Zhi-peng, *WANG You-zhao*, *ZHU Tong*, *MA Feng*
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China. Corresponding author: ZHU Tong, E-mail: tongzhu@mail.neu.edu.cn)

Abstract: To address the issue of low efficiency in black soil remediation and promote the recycling and utilization of black soil resources, a novel soil remediation device was developed. To enhance its operational efficiency and treatment quality, the discrete element method was used to numerically simulate the motion and interactions of black soil particles. The key operating parameters of the device were systematically optimized through a combined approach of orthogonal experiments, steepest ascent experiments, and response surface methodology. The central level for the steepest ascent experiment was determined using orthogonal experiments. The steepest ascent experiment then identified the central test point and optimal range for the response surface methodology. Based on this, a reliable response surface model was constructed using the response surface methodology, ultimately obtaining the optimal parameter combination for equipment operation: a rotational speed of 135 r/min, a uniform mixing time of 2. 6 s, an uniform pitch of 73 mm, and a blade spacing of 27 mm. This research provides a feasible parameter basis for the structural design and operational control of in-situ black soil remediation equipment, which has practical significance for improving the efficiency of soil remediation projects and promoting the sustainable utilization of black soil.

Key words: multi-axis; soil remediation device; discrete element method; response surface method; mixing homogeneity

收稿日期：2024-10-11
基金项目：国家重点研发计划项目(2020YFC1806402).
作者简介：王志鹏(1995—)，男，河南平顶山人，东北大学博士研究生.
通信作者：朱 彤，E-mail：tongzhu@mail.neu.edu.cn.

黑土是中国东北地区重要的生态与农业资源，但部分区域的黑土正面临重金属污染的威胁[1-2]. 实施修复以实现黑土资源的循环利用已刻不容缓. 其中，固定化/稳定化是有效方法，其核心在于通过土壤均混搅拌设备使修复药剂与污染土壤充分混合，从而实现重金属钝化；混合均匀度直接决定修复效果与土壤回收率[3]. 然而，现有修复装置常存在效率低、适应性差的问题，难以应对不同土壤特性与污染深度的多样需求[4]. 因此，开发高效、通用的新型修复装置迫在眉睫. 离散元法（DEM）为此提供了关键技术路径，可通过模拟“土壤-药剂-设备”的作用，为设备设计与参数优化提供理论依据，从而提升修复效率[5].

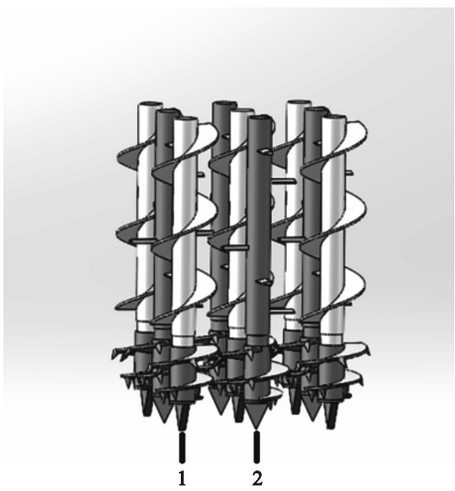
对于颗粒的均混性研究已有很多案例. Wang 等[6]以污染黑土为对象，基于 SolidWorks 设计，结合离散元法和响应面法系统研究了三级修复钻头的运动与结构参数，以优化其与重金属钝化剂的混合过程. Song 等[7]通过建立仿生深松机犁盘的仿真模型，重点分析了其受力状态与断裂行为，相关结论在现场试验中得到了验证. Liu 等[8]以施肥均匀度变异系数为指标，通过试验探究了器械结构参数对施肥效果的影响. Ma 等[9]针对隧道掘进机渗透率预测问题，建立并比较了多种算法模型的精度，为复杂系统性能预测提供了参考. Jiang 等[10]建立了不规则砾石颗粒模型，采用正交试验并以莱西混合指数为指标，研究了多因素对混合行为的影响. Xiao 等[11]采用离散元法与响应面法，以混合均匀度为指标，模拟并优化了转鼓内砂石的混合过程.

本文聚焦于重金属污染黑土的原位修复需求，利用 SolidWorks 设计了一种新型原位九轴土壤修复装置，并以均混时间、均混螺距、刀片间距和均混转速为因素，以离散系数、剩余键数量及中心螺旋搅拌轴扭矩、边缘螺旋搅拌轴扭矩与破碎轴扭矩为指标，综合运用 DEM 仿真、正交试验、最陡爬坡试验与响应面法，系统研究并优化了该装置的药剂与土壤混合过程，旨在为开发高效、适应性强的土壤修复装置提供方案.

1　土壤修复装置结构及工作原理

根据土壤修复的功能和需求，对新型原位九轴土壤修复装置进行了设计和三维建模. 新型原位九轴土壤修复装置的三维视图如图 1 所示. 新型原位九轴土壤修复装置分为 2 大部分：螺旋搅拌装置和破碎装置.

新型原位九轴土壤修复装置工作原理如下：当破碎装置和螺旋搅拌装置钻头向下移动到土层表面时，破碎装置和螺旋搅拌装置钻头的钻尖首先破碎中心的土壤，然后该装置继续向下移动，破碎装置和螺旋搅拌装置钻头的螺旋叶片下缘的锥形破碎齿对周围的土壤进行二次破碎，进一步粉碎大块土壤，可变直径螺旋叶片使机器在向下移动时达到设计的最大破碎半径，当破碎装置和螺旋搅拌装置钻头完全钻入地下时，到达破碎刀片的顶部，破碎轴上的破碎刀片开始将土壤再次破碎，同时将粉碎的土块与药剂混合.



注：1 为螺旋搅拌装置；2 为破碎装置.

图 1　新型原位九轴土壤修复装置

Fig. 1　Novel in-situ nine-axis soil remediation device

该装置可以扩展工作区域，实现破碎土壤和土壤与药剂的均混，完成土壤颗粒与药剂的破碎和均混目标. 当钻头达到目标深度后，装置的下降停止，破碎装置和螺旋搅拌装置钻头在目标深度处进行一定时间的均混破碎，以确保土壤被充分破碎、药剂与土壤更好地结合. 破碎和均混工作完成后，控制动臂机构将设备提升.

2　新型土壤修复装置仿真优化试验结果与讨论

2.1　药剂离散元模型

本文土壤修复浅黑土深度在 0 ~ 300 mm，取土壤仿真颗粒半径为 5 mm，以在保证计算效率的同时，尽可能模拟土壤的接触行为[12-14]. 图 2a 为土壤颗粒模型. 钝化药剂离散元模型颗粒粒径为 4 mm，颗粒模型如图 2b 所示.

2.2 土壤修复装置离散元仿真模型

为了更接近实际工作条件,利用SolidWorks软件对破碎装置和螺旋搅拌装置进行了建模,并将其导入EDEM软件进行运动形状和参数设置.仿真比例以1:1为基础,研究不同运动参数和结构参数下土壤与试剂的混合过程.新型原位九轴土壤修复装置的仿真模型如图3所示.

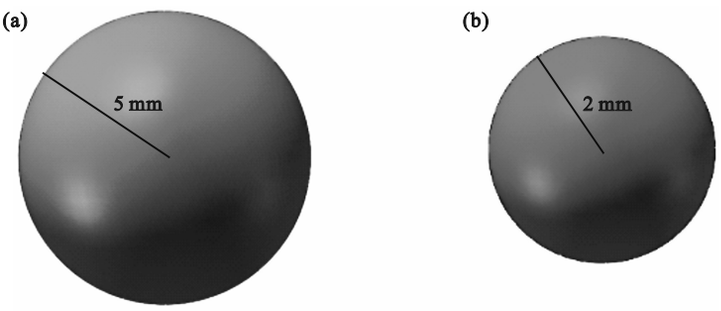


图2 土壤颗粒与药剂颗粒模型

Fig. 2 Soil paticle and agent particle models

(a)—土壤颗粒;(b)—钝化药剂颗粒.

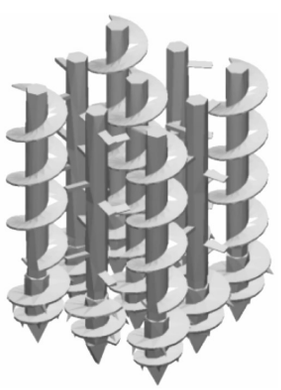


图3 EDEM仿真模型

Fig. 3 EDEM simulation model

模拟尺寸确定后,使用EDEM的颗粒工厂动态生成介质和土壤颗粒.根据上述设置的土壤层模拟环境[15-16],生成41 258个颗粒.土壤颗粒和钝化药剂颗粒的建模过程如图4所示.

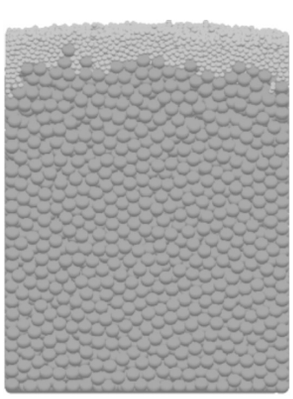


图4 土壤颗粒与药剂颗粒模型建模过程

Fig. 4 Modelling process of soil particle and agent particle models

2.3 评价指标

1)土壤破碎率计算公式[17-18]如下:

$$I=\frac{N_c}{N_d+N_c}\times 100\%. \tag{1}$$

式中:I为土壤破碎率,%;N_c为作业区域内土壤黏结键断裂个数;N_d为作业区域内土壤黏结键未断裂个数.

2)假设土槽中土壤颗粒和钝化药剂颗粒总质量分别为M_a,M_b,土槽内物料总质量为$M=M_a+M_b$.当螺旋钻头完成1个工作周期后,对土槽区域进行网格划分,并统计每个网格内的土壤颗粒质量m_a和钝化药剂颗粒质量m_b,每个网格内的物料总质量为$m=m_a+m_b$.

每个网格钝化药剂质量占比a为

$$a=\frac{m_b}{m_q}. \tag{2}$$

式中,m_q为每个网格的药剂质量和土壤质量之和.

理论情况下药剂最佳质量占比A为

$$A=\frac{M_b}{M}. \tag{3}$$

第i个网格中药剂质量的偏离程度δ_i为

$$\delta_i=\frac{a_i}{A}. \tag{4}$$

式中,a_i为第i个网中钝化药剂质量占比.

标准差S_N为

$$S_N=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(\delta_i-\bar{\delta}\right)^2}{n-1}}. \tag{5}$$

式中:$\bar{\delta}$为所有网格中药剂质量偏离程度的平均值;n为网格数量.

整体离散系数C为

$$C=\frac{S_N}{\delta}. \tag{6}$$

2.4　多轴螺旋钻头EDEM仿真优化

2.4.1　正交试验设计及结果分析

在正交试验设计中,以均混时间、均混螺距、刀片间距和均混转速作为考察因素(具体设计见表1),并选取了5个关键指标进行综合评价:离散系数、剩余键数量、中心螺旋搅拌轴扭矩、边缘螺旋搅拌轴扭矩和破碎轴扭矩.试验数据采用极差分析法和综合平衡法进行处理[19].离散系数作为衡量土壤颗粒与修复药剂混合均匀度的核心指标,其值越低,代表混合效果越好,直接关系到修复反应的效率和彻底性.剩余键数量从微观层面量化了土壤颗粒的破碎程度,键数越少,表明土壤结构被破坏得越充分,越有利于药剂渗透.中心螺旋搅拌轴扭矩、边缘螺旋搅拌轴扭矩与破碎轴扭矩,这3个扭矩参数共同表征了装置的工作负载与能耗特性.

表1　正交试验安排

Table 1　Arrangement of orthogonal experiment

试验组号	均混时间/s	均混螺距/mm	刀片间距/mm	均混转速/(r·min^{-1})	离散系数	剩余键数量	中心螺旋搅拌轴扭矩/(N·m)	边缘螺旋搅拌轴扭矩/(N·m)	破碎轴扭矩/(N·m)
1	0	40	20	100	0.349 8	1 448	50.02	102.75	67.05
2	1	60	30	100	0.357 1	1 401	58.92	96.05	70.53
3	2	50	40	100	0.356 3	1 403	41.64	93.09	64.50
4	0	60	40	110	0.543 7	1 442	51.71	83.83	57.11
5	1	50	20	110	0.391 6	1 406	41.34	86.74	62.09
6	2	40	30	110	0.394 4	1 402	55.56	95.87	73.39
7	0	50	30	120	0.320 6	1 433	40.58	78.90	66.41
8	1	40	40	120	0.366 3	1 404	52.54	89.66	55.76
9	2	60	20	120	0.355 5	1 400	54.82	98.44	57.60

为进一步确定整体最优方案,采用综合平衡法,系统权衡了均混转速、均混时间、均混螺距和刀片间距对各指标的交叉影响.经综合比较分析,确定新型原位九轴土壤修复装置的最佳运动与结构参数如下:转速120 r/min、均混时间2 s、均混螺距60 mm、刀片间距30 mm.该组合在多项指标间取得了较好的平衡,并作为后续优化试验的基准参数.

2.4.2　最陡爬坡试验

在对新型原位九轴土壤修复装置药剂与土壤混合过程进行正交试验后,确定了最佳参数组合,并将其作为最陡爬坡试验的参考水平.使用最陡爬坡试验方法可以快速逼近最优值范围.最陡爬坡试验的设计和结果如表2所示.以离散系数为优化指标,在第3组试验中,离散系数最小.以剩余键数量作为优化指标,第3组试验的剩余键数最少.5组试验的剩余键数非常接近.以中心螺旋搅拌轴扭矩作为优化指标,中心螺旋搅拌轴扭矩在第4组试验中最小,在第3组试验中最大.以边缘螺旋搅拌轴扭矩作为优化指标,边缘螺旋搅拌轴扭矩在第5组试验中最小,在第1组试验中最大.以破碎轴扭矩作为优化指标,破碎轴扭矩在第5组试验中最小,在第2组试验中最大.综合所有评价指标,将组合2和组合4的因子水平作为响应面试验的上下水平.

表2　最陡爬坡试验设计及结果

Table 2　Steepest ascent experiment design and results

试验组号	均混转速/(r·min^{-1})	均混时间/s	均混螺距/mm	刀片间距/mm	离散系数	剩余键数量	中心螺旋搅拌轴扭矩/(N·m)	边缘螺旋搅拌轴扭矩/(N·m)	破碎轴扭矩/(N·m)
1	80	0.2	30	10	0.422 50	1 498	40.15	111.86	69.56
2	100	1.1	45	20	0.392 50	1 358	42.82	108.57	82.55
3	120	2.0	60	30	0.282 14	1 301	45.56	95.43	52.40
4	140	2.9	75	40	0.324 45	1 342	39.52	88.43	55.46
5	160	3.8	90	50	0.513 40	1 300	41.79	79.43	49.65

2.4.3 响应面试验

本研究采用Design Expert软件设计了Box-Behnken响应面试验,涉及4个因素变量和5个响应变量,共计29组试验.基于各组试验的参数设置,对新型原位九轴土壤修复装置的三维结构参数进行了相应调整,并在EDEM软件中设置了对应的工作参数进行模拟[19].完成模拟后,对29组试验结果进行了数据处理,并进行了方差分析与回归分析,以建立可靠且合理的预测模型.根据装置的性能指标要求,利用Design Expert软件以离散系数、剩余键数量、中心螺旋搅拌轴扭矩、边缘螺旋搅拌轴扭矩和破碎轴扭矩最小化为优化目标,进行了参数优化.优化得到的最优参数组合如下:均混时间2.6 s、均混螺距73 mm、刀片间距27 mm、转速135 r/min.通过对比响应面模型预测值与最优参数下的实际模拟值,各响应变量的误差分别为5.6%,6.3%,4.35%,2.22%和3.22%.该结果表明,模型预测值与物理模拟值之间无显著差异,验证了所建响应面模型的有效性与可靠性.

3 结 论

1)通过正交试验获得初步较优参数:转速120 r/min、均混时间2 s、均混螺距60 mm、刀片间距30 mm;

2)根据最陡爬坡试验结果,选取组合2与组合4的各因素水平作为响应面试验的上下水平;

3)经响应面优化得到最终参数:转速135 r/min、均混时间2.6 s、搅拌螺距73 mm、刀片间距27 mm.在该最优参数下,模型预测值与实际仿真值之间的误差分别为5.6%,6.3%,4.35%,2.22%和3.22%,表明模型具有较好的预测精度.

参考文献:

[1] Cui Y B, Bai L, Li C H, et al. Assessment of heavy metal contamination levels and health risks in environmental media in the northeast region[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022, 80: 103796.

[2] Wu Q H, Zhou H C, Tam N F Y, et al. Contamination, toxicity and speciation of heavy metals in an industrialized urban river: Implications for the dispersal of heavy metals [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2016, 104(1/2): 153-161.

[3] Ye S L, Wang L Y, Liu T C. Study of solidification and stabilization of heavy metals by passivators in heavy metal-contaminated soil[J]. *Open Chemistry*, 2022, 20(1): 1-9.

[4] 卢兴福, 戴波, 杨世亮. 转鼓内圆柱形颗粒混合的超二次曲面离散单元法模拟[J]. 化工进展, 2023, 42(5): 2252-2261.
(Lu Xing-fu, Dai Bo, Yang Shi-liang. Super-quadric discrete element method investigation of mixing behaviors of cylindrical particles in a rotating drum[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2023, 42(5): 2252-2261.)

[5] 刘浩钰. 动荷载下EPS颗粒混合轻量土滞回曲线本构模型及离散元数值模拟研究[D]. 咸阳:西北农林科技大学, 2023.
(Liu Hao-yu. Study on hysteresis constitutive model anddiscrete element numerical simulation of lightweight soil mixed with EPS particles underdynamic load [D]. Xianyang: Northwest A & F University, 2023.)

[6] Wang Z P, Zhu T, Wang Y Z, et al. Simulation and analysis of soil homogenization drills based on discrete element method and response surface methodology [J]. *Particuology*, 2024, 88: 128-148.

[7] Song G Z, Huang F G, Pan J F. Feasibility analysis of calcium carbonate particle trajectory simulation in a dual horizontal shaft mixer[J]. *Materials*, 2023, 16(17): 5999.

[8] Liu J S, Gao C Q, Nie Y J, et al. Numerical simulation of Fertilizer Shunt-Plate with uniformity based on EDEM software [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2020, 178: 105737.

[9] Ma T H, Jin Y, Liu Z, et al. Research on prediction of TBM performance of deep-buried tunnel based on machine learning[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(13): 6599.

[10] Jiang S Q, Ye Y X, He M X, et al. Mixing uniformity of irregular sand and gravel materials in a rotating drum with determination of contact model parameters [J]. *Powder Technology*, 2019, 354: 377-391.

[11] Xiao X W, Zhan J, Jiang S Q, et al. The analysis of mixing performance of sand and gravel in a rotating drum by DEM [J]. *Computational Particle Mechanics*, 2024, 11(3): 1357-1373.

[12] Ucgul M, Saunders C, Li P L, et al. Analyzing the mixing performance of a rotary spader using digital image processing and discrete element modelling (DEM) [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2018, 151: 1-10.

[13] Zou L L, Yan D W, Niu Z R, et al. Parametric analysis and numerical optimisation of spinach root vibration shovel cutting using discrete element method [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2023, 212: 108138.

[14] Aikins K A, Barr J B, Antille D L, et al. Analysis of effect of bentleg opener geometry on performance in cohesive soil using the discrete element method [J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 209: 106-124.

[15] Zhao L, Zhou H P, Xu L Y, et al. Parameter calibration of coconut bran substrate simulation model based on discrete element and response surface methodology [J]. *Powder Technology*, 2022, 395: 183-194.

[16] Fang M, Yu Z H, Zhang W J, et al. Friction coefficient calibration of corn stalk particle mixtures using Plackett-Burman design and response surface methodology [J]. *Powder Technology*, 2022, 396: 731-742.

[17] Jadidi B, Ebrahimi M, Ein-Mozaffari F, et al. Analyzing mixing behavior in a double paddle blender containing two types of non-spherical particles through discrete element method (DEM) and response surface method (RSM) [J]. *Powder Technology*, 2023, 427: 118761.

[18] Herman A P, Gan J Q, Zhou Z Y, et al. Discrete particle simulation for mixing of granular materials in ribbon mixers: a scale-up study [J]. *Powder Technology*, 2022, 400: 117222.

[19] Tsugeno Y, Sakai M, Yamazaki S, et al. DEM simulation for optimal design of powder mixing in a ribbon mixer[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(5): 1735-1749.