

面向苏打盐碱地的触土部件减粘功能设计与试验

齐江涛¹ 熊悦淞¹ 高子博¹ 张清珠² 李默¹

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 湖州师范学院工程学院, 湖州 313000)

摘要: 耕作机具触土部件与土壤间的粘附现象会导致机具能耗显著增加, 严重制约了农业机械作业的整体质量和效率。因此, 开发能够降低触土部件与土壤之间粘附力的技术, 是提升农业机械作业效率的重要方向。本研究通过结构设计和电渗技术两方面探讨减少触土部件土壤粘附的有效性和可行性。基于仿生学原理, 通过模拟土壤动物体表特有的形貌结构, 设计了一系列具有仿生非光滑表面结构的触土部件——压盘与圆筒, 并通过拉拔试验证明了仿生凸包结构能够有效降低触土部件的法向土壤粘附力。同时, 引入电渗技术, 将电压以及通电时间等关键参数纳入试验方案, 系统考察了这些因素对土壤粘附特性的调控效果。试验结果表明, 在没施加电渗措施即无电压作用时, 土壤与触土部件之间的粘附力显著高于施加电压的情况, 且土壤粘附力随着电压和通电时间的增加而减小。此外, 在进行电渗试验后, 压盘及圆筒的触土表面呈洁净状态, 无明显土壤粘附, 并有清晰的水膜痕迹。研究结果证实了电渗技术在降低金属触土部件土壤粘附力方面的有效性。

关键词: 苏打盐碱地; 触土部件; 土壤粘附; 电渗技术; 仿生非光滑表面

中图分类号: S222.12.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)11-0099-10

OSID:



Design and Experiment of Anti-adhesion Function for Soil-contacting Components in Soda-saline Alkali Soils

QI Jiangtao¹ XIONG Yuesong¹ GAO Zibo¹ ZHANG Qingzhu² LI Mo¹

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. School of Engineering, Huzhou University, Huzhou 313000, China)

Abstract: The phenomenon of adhesion between the soil-contacting components of tillage implements and the soil leads to a significant increase in energy consumption, severely restricting the overall quality and efficiency of agricultural machinery operations. Therefore, developing technologies that reduce the adhesive force between soil-contacting components and soil is an important research direction for improving the efficiency of agricultural machinery operations. Aiming to explore the effectiveness and feasibility of reducing soil adhesion on soil-contacting components through two approaches: structural design and electro-osmosis technology, based on biomimetic principles, by simulating the unique surface morphologies of toads and pangolins, a series of soil-contacting components with bio-inspired non-smooth surface structures, including press wheels and cylinders, were designed. Tensile tests were conducted to demonstrate that bio-inspired protuberance structures can effectively reduce the normal soil adhesion force on soil-contacting components. Meanwhile, electro-osmosis technology was introduced, incorporating key parameters such as voltage value and energization time into the experimental scheme, systematically investigating their regulatory effects on soil adhesion characteristics. The experimental results showed that when no electro-osmosis measures were applied (i. e., without voltage), the adhesion force between the soil and the soil-contacting components was significantly higher than that when voltage was applied. Moreover, the soil adhesion force was decreased as the voltage value and energization time were increased. Additionally, after conducting the electro-osmosis experiments, the soil-contacting surfaces of the press wheels and cylinders were in a clean state with no significant soil adhesion, and clear water film traces were observed. The research result confirmed the effectiveness of electro-osmosis technology in

收稿日期: 2026-01-28 修回日期: 2026-02-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(U23A6001)和吉林省科学技术厅科技发展计划项目(20210203099SF)

作者简介: 齐江涛(1981—),男,教授,博士,主要从事仿生智能农业装备研究,E-mail: qijiangtao@jlu.edu.cn

通信作者: 李默(1986—),女,副教授,博士,主要从事农业工程仿生技术研究,E-mail: moli@jlu.edu.cn

reducing soil adhesion forces on metal soil-contacting components, providing important theoretical support and technical backing for its potential application in agricultural machinery.

Key words: soda-saline alkali soils; soil-contacting components; soil adhesion; electro-osmosis technology; bio-inspired nonsmooth surface

0 引言

土壤粘附现象普遍存在于土木矿产、交通运输及农业生产等与土壤相关的工程领域,严重影响机械的作业质量和机具寿命。在农业机械耕作过程中,土壤对机具触土部件表面的粘附不仅会增加牵引阻力,降低耕作效果,缩短机具使用寿命,也会导致能耗上升,严重制约农业生产的整体质量和效率。研究表明,克服田间耕作机具与土壤粘附所需的能量占农业生产总能耗的 30% ~ 50%,且土壤粘附现象会导致耕作生产率下降约 30%^[1-3]。因此,深入揭示土壤粘附机理并构建有效减黏技术体系,已成为提升农业机械作业性能的关键问题。

围绕土壤粘附机理的研究,学者主要从界面水分作用机制展开探讨。FOUNTAIN^[4]和 BAVER^[5]于 1954 年提出了水膜理论,认为固体与土壤接触界面处产生的水膜是导致土壤粘附的主要原因。当土壤湿度较低时,断裂的水环使土壤颗粒间形成粘附;当土壤湿度较高时,颗粒中的水饱和并与固体表面形成紧密连接的水膜。FOUNTAIN 进一步通过试验指出,单位面积附着力等于土壤水分张力。随后,AKIYAMA 等^[6-7]提出,连续薄膜接触状态下水膜毛管压力是附着力的主因。REN 等^[8]强调连续水膜或弯液面表面张力在水分张力与毛管压力形成中的核心作用。BURBAUM 等^[9-10]指出流体膜产生的毛细力随薄膜厚度减小而增大。上述研究共同表明,界面水膜厚度及其力学状态是调控土壤粘附的关键物理基础。

基于上述机理认知,现阶段降低触土部件土壤粘附力的技术途径主要包括^[11-15]:采用机械手段清除粘结土壤;通过改变部件材料特性降低粘附作用;调节土壤与部件界面处水膜厚度降低粘附。然而,现有方法多侧重于结构或材料层面的被动减粘,对于主动调控界面水分状态的研究仍相对不足。

电渗现象为界面水分主动调控提供了新的技术路径。1809 年,RUESS 首次在水土介质两侧施加电位差,观察到水分由阳极向阴极迁移,断电后现象即终止,这标志着土壤电渗现象的首次记录^[16]。WIEDEMANN (1852)、PERRIN (1904) 及 DANIEL (1939) 等通过试验验证,证实电渗现象在黏土及多孔介质中普遍存在^[16]。随着理论与技术发展,电渗

技术逐步应用于电渗析、离子交换膜、电镀工艺及岩土工程等领域。在软土加固、污染土壤治理和淤泥处理等工程场景,电渗法表现出较传统方法更高的效率和可控性。然而,在农业工程领域,尤其是针对触土部件界面粘附调控的应用研究仍处于起步阶段。

吉林省西部的盐碱地是全国面积最大的苏打盐碱地^[17]。该区域土壤渗透性差,干早期表层板结严重,降雨后土壤粘结成块,对机具的粘附问题尤为突出。目前盐碱地改良多采用化学、生物及工程技术综合措施^[18-19],但深松与翻整作业不可避免地加剧触土部件的粘附负担。因此,在盐碱地作业环境下构建主动减粘调控机制具有重要现实意义。

基于此,本研究从仿生减粘结构与电渗主动调控双重路径着手:一方面,基于仿生学原理模拟土壤动物体表微观形貌结构,设计具有减粘特性的仿生触土部件,并对不同形貌结构下的土壤粘附力进行对比分析;另一方面,引入电渗技术,将电压及通电时间等参数纳入试验体系,系统研究电场作用下界面水膜调控对粘附特性的影响。

1 试验方法

1.1 土壤粘附机理分析

土壤与触土部件之间的界面可简化为固-水-土模型^[20-21],如图 1 所示。当分离固体和土壤时,需要施加一个外力 F_s ,以克服毛细力 F_m 和黏滞力 F_v , F_s 数值上等同于土壤粘附力,即有

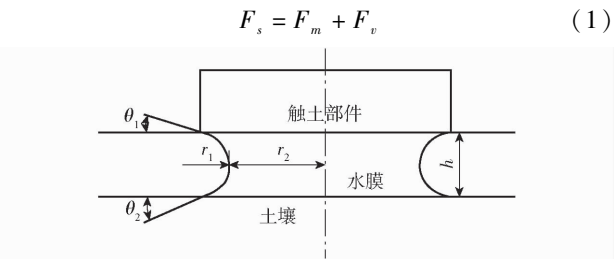


图 1 土壤粘附机理简图

Fig.1 Schematic of adhesion in solid - water - soil model

固-土界面处的毛细力 F_m 受液体表面张力和拉普拉斯压力的影响。 F_m 和 F_v 的大小取决于液体的性质、液膜厚度以及界面的几何形状。在图 1 中, θ_1 和 θ_2 分别为触土部件与水膜的接触角以及土壤与水膜的接触角,计算中通常假设液体与固体及土壤

的接触角相等,即 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$; r_1 为水膜凹面半径, r_2 为水膜凸面半径,且 $r_1 \ll r_2$, h 是水膜厚度。

毛细力 F_m 包括拉普拉斯压力 (Δp) 和固-土界面液体表面张力 (γ),即沿水膜轴线方向的表面张力。 F_m 表示为

$$F_m = \Delta p \pi r_2^2 + 2 \pi r_2 \gamma \sin \theta$$

(2)

其中

$$\Delta p = \gamma \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

(3)

则

$$F_m = \frac{2 \pi r_2^2 \gamma \cos \theta}{h} + 2 \pi \gamma r_2 \sin \theta$$

(4)

黏滞力可通过水膜压力差公式计算

$$F_v = \frac{16 \pi \eta (r_1 + r_2)^4}{h^3} \frac{dh}{dt}$$

(5)

式中 η ——流体黏度

dh/dt ——固体从土壤中脱离时的速率,称为拉拔速度 v

由于水与土壤的接触角 θ 通常极小,可取 $\theta = 0$,则有

$$F_s = \frac{2 \pi r_2^2 \gamma h^2 + 16 \pi \eta (r_1 + r_2)^4 v}{h^3}$$

(6)

半径 r_1 、 r_2 基本保持不变,水的表面张力和动态黏度已知, $\gamma = 72.8 \text{ mN/m}$, $\eta = 0.00101 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。切向土壤粘附力的计算分析是在法向粘附力的基础上考

虑土壤与触土部件之间的摩擦作用,切向粘附力 $T = \mu F_s$, μ 为二者之间的摩擦因数,试验可测。故由式(6)可知,土壤粘附力的影响因素为水膜厚度和拉拔速度。而在前期研究^[22]中发现拉拔速度对粘附力的影响不显著,故本研究中不考虑速度影响。

1.2 电渗机理分析

土壤颗粒对离子的选择性吸附与迁移具有类似半透膜的界面特性。在含盐土体系中,孔隙水中溶解离子形成浓度梯度,从而导致水的化学势差产生。当两侧溶液浓度不同时,水分子在自由能差驱动下发生定向迁移,构成了渗透现象的物理基础。

半透膜体系由初始状态到平衡状态的演变过程如图 2 所示。当土体两侧存在离子浓度差时,水的自由能同时受溶液浓度与静水压力的共同控制。图 2a 为半透膜两侧的初始状态,此时两腔室存在离子浓度差,尚未形成静水压差。在半透界面选择透水不透盐的作用下,水分由自由能较高的一侧向自由能较低的一侧迁移,并逐渐在低自由能侧形成静水压差。随着水分迁移持续进行,两侧水的总势能逐步趋于一致,当达到势能平衡时形成平衡状态 1 (图 2b)。若在高浓度侧施加足够的外加压力以抵消由浓度差引起的自由能差,则水分迁移停止,此时形成平衡状态 2 (图 2c),该外加压力即为渗透压^[22]。

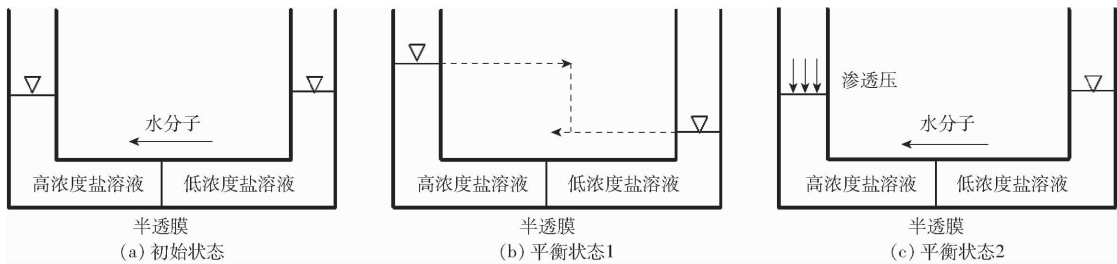


图 2 半透膜渗透压的初始状态与平衡状态

Fig. 2 Initial state and equilibrium state of osmotic pressure in a semipermeable membrane

在电场作用下,土体中水分迁移机制进一步发生改变。土体孔隙水中的溶解盐分可引起溶质势变化,从而影响水分总势能^[23]。当外加电场存在时,孔隙水中的阳离子在电场力驱动下向阴极迁移。由于黏土颗粒表面带负电荷,其电双层结构与半透界面效应共同作用,使阴极区离子浓度逐渐升高,其土壤电渗原理简图如图 3 所示。离子浓度升高导致阴

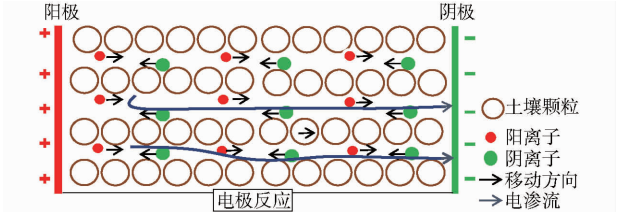


图 3 土壤电渗原理简图

Fig. 3 Schematic of soil electro-osmosis principle

极区域水分化学势降低,相对于阳极区域形成势能差。在电场力与化学势差的耦合作用下,自由水由阳极向阴极定向迁移,并在阴极区域累积甚至析出。该过程即为土体电渗现象,其本质为电场力驱动下的孔隙水定向迁移行为。

影响土壤电渗效果的主要因素可分为两类:一类是土壤本身的内在特性,包括孔隙水含量、溶解盐分浓度以及 pH 值等;另一类则是外部试验条件,如施加的电场强度、通电方式及电极材料的选择等。本研究基于电渗作用机制,通过促进土壤水向阴极迁移来增加农业触土部件表面的水膜厚度,从而有效降低其与土壤之间的粘附现象。考虑到本试验对象针对特定类型的苏打盐碱地,其内在因素较为稳定,因此研究重点聚焦于外部调控参数。在试验方

案设计中,主要选取电压和通电时间两个关键变量,系统探究这些外部因素对土壤粘附特征的调控效果。

1.3 土壤参数

本研究所用土壤样品采集于吉林省西部松嫩平原典型苏打盐碱地区(43°59′~45°32′N,123°11′~126°11′E)。该区域为我国典型重度盐碱土分布区,土体结构松散、渗透性差,具有明显的高含盐与高黏结特征,是研究触土部件粘附机理及电渗调控效果的代表性土类。采样地块位置如图 4 所示。

采用对角线布点法设置 5 个采样点,选取 0~200 mm 表层土壤作为试验样本。采集后首先清除肉眼可见石块及植物根系等杂质。采用烘干法测定



图 4 苏打盐碱地采样地块

Fig.4 Soda salt-alkali land sampling plot

土壤容重与含水率;过筛处理后,利用激光粒度仪进行颗粒组成分析;采用 LP-100D 数字式液塑限联合测定仪测定土样塑限(Plastic limit, PL)与液限(Liquid limit, LL),相关参数如表 1 所示。

表 1 土样物理力学与颗粒组成参数

Tab.1 Physical-mechanical properties and particle composition of tested soil

密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏粒质量 分数/%	粉土质量 分数/%	沙砾质量 分数/%	PL/%	LL/%	不同颗粒尺寸质量分数/%				含水率/ %
						0~ 0.001 mm	0.001~ 0.01 mm	0.01~ 0.05 mm	0.05~ 0.15 mm	
1213	15	42	43	20	42	12	36	28	24	29

1.4 试验装备

本研究通过改装电子万能试验机,构建了一套用于测定土壤粘附力的试验系统,如图 5 所示,以评估黏土与触土部件间的粘结性能。

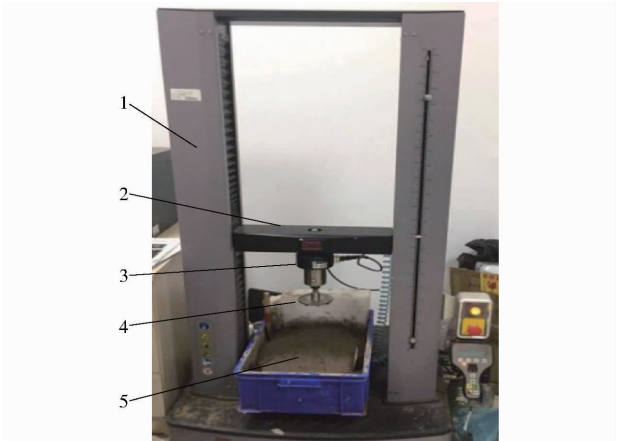


图 5 试验装备

Fig.5 Pull-out apparatus

1. 固定框架 2. 活动平台 3. 传感器 4. 压盘 5. 土槽

该试验的基本原理是:将触土部件以恒定速度贯入土壤中,静置 30 s,再将其向上拉拔脱离土壤,拉拔过程由力传感器实时测量部件从土中脱离时产生的拉拔力,即为土壤粘附力。试验装置主要由固定框架、活动平台、力传感器和土槽等组成,并设计了专用夹具将触土部件固定在活动平台上,以确保其能够实现上下匀速运动。

试验开始时,启动机器,活动平台带动触土部件向下运动,同时系统同步采集和记录平台的力-位移数据。为定量描述部件与土壤接触的过程,以触土部

件初始接触土壤表面到其完全埋入在土中的位置为作业深度。具体的,压盘作业深度为 15 mm,对应其完全埋入土壤的状态;而圆筒作业深度则为 65 mm,对应其超 2/3 高度深入土体的情况。到达作业深度后,触土部件静置在土壤中加载 30 s,而后活动平台以 1 mm/s 的恒定速度拉动触土部件上移,传感器记录的部件脱离土壤需要的拉拔力即为粘附力。

1.5 压盘设计

近年来,基于土壤动物非光滑体表结构的仿生减粘设计方法已广泛应用于农业机械触土部件优化研究中。相关研究表明,凸包、凹坑及棱纹等非光滑结构能够改变界面实际接触状态与润湿行为,从而削弱毛细吸附与界面附着作用^[24-27]。在此基础上,本研究选取典型土壤动物体表形貌作为仿生设计原型,如图 6 所示。

蟾蜍腹部表面疣粒结构排列相对规则,尺寸均一,表面呈均匀凸起形态,如图 6a 所示。该类结构有利于在界面接触过程中形成分散接触点,从而降低连续水膜的形成概率。蟾蜍背部表面则存在尺寸差异显著的疣粒结构,小疣粒与大疣粒交错分布,空间排列呈非均匀状态,如图 6b 所示。该结构通过破坏界面接触的连续性与均匀性,进一步削弱粘附作用。穿山甲鳞片表面具有明显的条状棱纹结构,表面呈周期性起伏形态,如图 6c 所示。该类棱纹结构在受力方向上具有一定的引导作用,可改变土体接触与脱离过程中的应力分布。

经测量,蟾蜍腹部疣粒直径为 1.5~2.0 mm,背

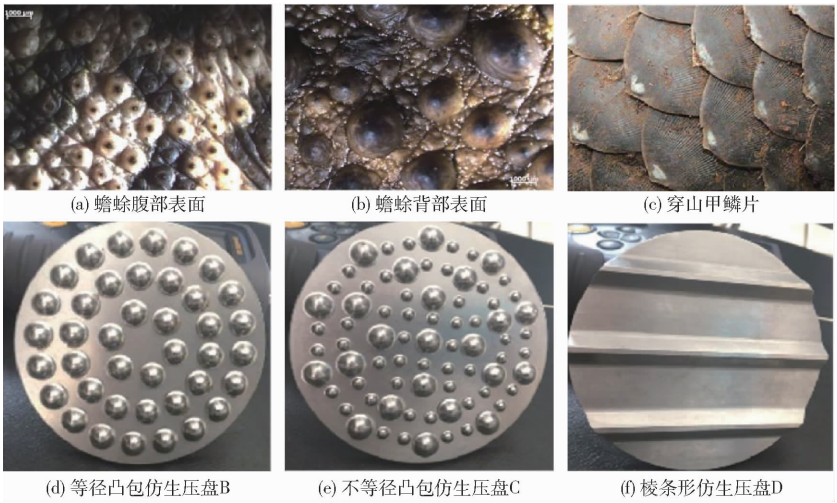


图 6 仿生原型与压盘实物

Fig. 6 Bionic prototype and pressure disc specimens

部大疣粒直径为 2.5 ~ 4.0 mm。考虑加工工艺可行性及结构强度需求,对仿生尺寸进行比例放大:等径凸包直径设为 8 mm,不等径凸包分别设为 4 mm (小)与 8 mm (大),棱条结构底宽为 10 mm,高度为 4 mm。3 种仿生结构均布置于圆盘工作表面,其具体结构形态如图 6 所示。

基于上述生物原型特征,在直径 100 mm、厚度 3 mm 的 45 号钢平面圆盘表面构建 3 种仿生结构。等径凸包仿生压盘 B 由尺寸一致的圆形凸包均匀排布构成,如图 6d 所示,用于模拟蟾蜍腹部规则疣粒结构。不等径凸包仿生压盘 C 由大小不同的凸包组合排列,如图 6e 所示,用以模拟蟾蜍背部疣粒尺寸差异特征。棱条形仿生压盘 D 在圆盘表面布置平行棱条结构,如图 6f 所示,其几何形态借鉴穿山甲鳞片棱纹特征。

1.6 圆筒设计

为了考察触土部件与土壤之间的切向粘附力,设计了一个平滑圆筒和在内表面添加仿生凸包结构的仿生圆筒,圆筒筒高 130 mm,外径 100 mm,厚度 3 mm,凸包直径 8 mm,材料为 45 号钢。圆筒模型图与加工实物图如图 7 所示。

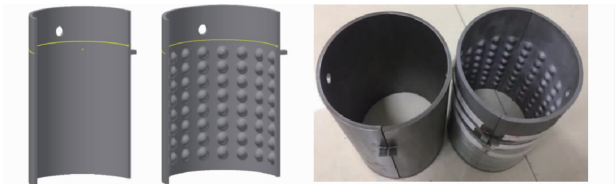


图 7 光滑圆筒与仿生圆筒的模型图及实物图

Fig. 7 Model diagrams and physical specimens of smooth cylinder and bionic cylinder

1.7 电渗试验

为了系统研究电渗条件对触土部件土壤粘附的影响,本试验采用直流稳压电源(型号 MP3020)作

为电场控制装置。已有大量电渗固结排水的试验研究表明,阴极材料对电渗过程影响较小,而传统金属电极材料铁、铜、铝相比,铁电极效果更好^[3,28],故本试验中选择一个自制铁环(直径 140 mm,高 70 mm,厚 1 mm)与电源阳极连接,触土部件连接电源阴极,如图 8 所示。

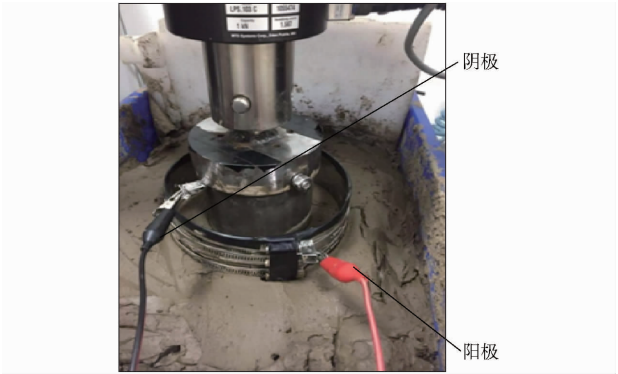


图 8 圆筒电渗试验布置图

Fig. 8 Layout of electro-osmosis test on cylinder

在前期研究^[24]中发现触土部件的土壤粘附力与土壤含水率显著相关,与接触时间有一定相关性,而与拉拔速度不相关,故本试验选择固定的拉拔速度 1 mm/s。此外,考虑电压使用的安全与便利,选择电渗条件参数:电压为 12、24、30 V,压盘的通电时间为 5、10、15 s,圆筒的通电时间为 20、40、60 s。

1.8 试验方案

为系统评估仿生结构与电渗作用对土壤粘附行为的影响,本研究设置 3 组试验。第 1 组为压盘粘附筛选试验。以传统光滑压盘(A)及 3 种仿生压盘(B、C、D)为研究对象,在固定含水率(29%)条件下进行拉拔试验,比较不同结构对法向土壤粘附力的影响,筛选减粘效果最优的结构类型。第 2 组为压盘电渗粘附试验。在筛选出的最优仿生结构基础

上,与传统光滑压盘进行对比,在不同电压(0、12、24、30 V)和通电时间(5、10、15 s)条件下开展电渗粘附试验。以结构类型、电压和通电时间为自变量,以土壤粘附力和粘附质量为响应变量,采用 Design-Expert 软件进行方差分析。第3组为圆筒电渗粘附

试验。为验证电渗减粘效果在不同接触几何条件下的适用性,选取传统圆筒(TA)与仿生圆筒(TB),在不同电压(0、24、30 V)与通电时间(20、40、60 s)条件下进行试验。各试验因素与水平见表2。为保证数据可靠性,每组试验均重复3次。

表 2 试验因素与水平
Tab.2 Factors and levels in ANOVA

组别	试验类型	结构类型	含水率/%	电压/V	通电时间/s	水平组合说明	试验次数
1	压盘粘附试验	A、B、C、D	29			4 结构×固定含水率	12
2	电渗压盘试验	A、B		0/12/24/30	5/10/15	2 结构×4 电压×3 时间	60
3	电渗圆筒试验	TA、TB		0/24/30	20/40/60	2 结构×3 电压×3 时间	42

2 试验结果分析

2.1 压盘粘附试验

不同结构压盘的土壤法向粘附力测试结果如图9所示。总体来看,各结构压盘之间的粘附力存在明显差异,传统光滑压盘A的粘附力最高,3种仿生结构压盘均低于A。

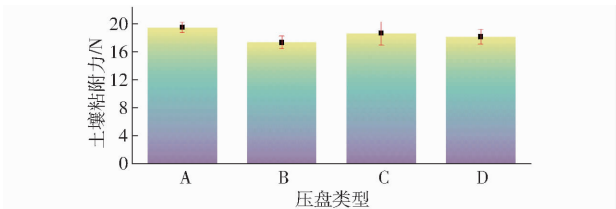


图 9 压盘粘附力对比试验结果

Fig.9 Results of pressure-plate adhesion comparison experiment

由图9可知,不等径凸包压盘C与棱条压盘D的粘附力分别较A降低4%和7%,减粘效果较为有限;等径凸包压盘B的粘附力最低,较A降低11%,降幅最为显著。不同仿生结构之间亦存在差异,等径凸包压盘B的粘附力明显低于不等径凸包压盘C和棱条压盘D。

试验结果表明,压盘表面结构形式对土壤粘附力具有显著影响。在相同含水率条件下,非光滑仿生结构能够有效降低触土部件的法向粘附力,其中等径凸包结构表现出更优的减粘效果。因此,在后续电渗试验中选取等径凸包压盘B与传统光滑压盘A进行对比研究。

2.2 压盘电渗粘附试验

在筛选出等径凸包结构后,开展压盘电渗粘附试验。方差分析结果见表3。结构类型、电压和通电时间3个因素对土壤粘附力均具有显著影响($p < 0.0001$),表明电渗参数对界面粘附行为具有显著调控作用。

为进一步分析各因素对粘附力的影响趋势,压

表 3 方差分析结果

Tab.3 ANOVA of adhesion force in the 2nd group of experiments

来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>p</i>
模型	338.07	5	67.61	33.22	<0.0001
结构类型	47.07	1	47.07	23.13	<0.0001
电压	139.19	2	69.6	34.19	<0.0001
通电时间	151.81	2	75.9	37.29	<0.0001
残差	97.71	48	2.04		

盘土壤粘附力随电压和通电时间变化情况如图10所示。总体来看,在无电压条件(0 V)下,传统压盘A与仿生压盘B的粘附力均处于较高水平;随着电压增加及通电时间延长,两种压盘的粘附力均呈持续下降趋势。

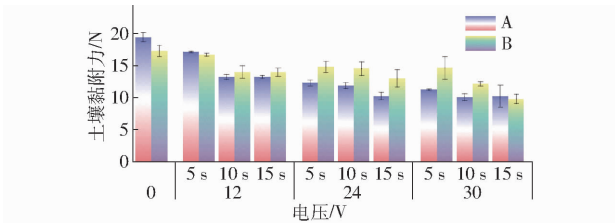


图 10 压盘试验的土壤粘附力

Fig.10 Soil adhesion force in plate compaction test

由图10可知,对于传统压盘A,在12 V条件下,随着通电时间由5 s延长至15 s,粘附力降幅由约11%提高至33%;在24 V与30 V条件下,粘附力进一步下降,在30 V、15 s条件下达到最小值,总降幅约为47%。对于仿生压盘B,整体变化趋势与压盘A一致,但降幅相对较小。在30 V、15 s条件下,其粘附力较0 V状态下降约43%。

综合比较可见,在相同电渗参数下,仿生压盘B的粘附力始终低于传统压盘A;同时,两种结构的粘附力均随着电压和通电时间的增加而降低。

为验证粘附力变化结果的可靠性,进一步统计压盘表面附着土壤质量,其变化趋势如图11所示。整体趋势与粘附力测试结果一致,随着电压升高及

通电时间延长,压盘表面附着土壤质量呈逐步下降趋势。在 30 V、15 s 条件下,两种压盘的附着质量均达到最小值。不同结构之间亦存在差异,在相同电渗条件下,仿生压盘 B 的附着质量始终低于传统压盘 A,表明仿生结构与电渗作用对降低界面附着具有协同效果。

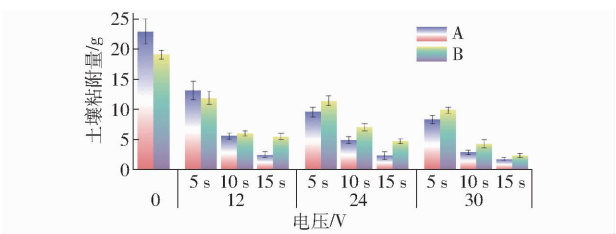


图 11 压盘试验的土壤粘附量

Fig. 11 Soil adhesion weight in plate compaction test

为观察电渗作用下界面接触状态的变化,记录压盘脱离后土壤表面形态,如图 12 所示。在电压 24 V、通电时间 10 s 条件下,土壤表面形成完整且边缘清晰的压盘印痕,印痕内部未见明显土壤颗粒粘附残留。同时在印痕区域可观察到局部水滴析出及水膜残留痕迹。压盘表面未出现明显团聚土壤附着,说明在电渗条件下界面接触状态发生改变。



图 12 仿生压盘电渗试验后的压盘表面与土壤印痕(电压 24 V,通电时间 10 s)

Fig. 12 Disc B and indentation in soil surface with applying 24 V voltage for 10 s

2.3 圆筒电渗粘附试验

为验证电渗减粘效果在不同接触几何条件下的适用性,开展圆筒电渗粘附试验。圆筒土壤粘附力变化趋势如图 13 所示。

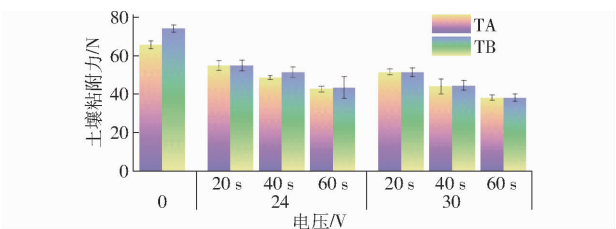


图 13 圆筒试验的土壤粘附力

Fig. 13 Soil adhesion force in cylinder test

由图 13 可知,在无电压条件(0 V)下,传统圆筒 TA 与仿生圆筒 TB 的粘附力均处于较高水平;随着电压升高及通电时间延长,两种圆筒的粘附力均呈

持续下降趋势。对于传统圆筒 TA,在 24 V 条件下,随着通电时间由 20 s 延长至 60 s,粘附力降幅由约 16% 增加至 35%;当电压升至 30 V 时,对应降幅进一步提高至 22%、33% 和 42%。对于仿生圆筒 TB,在 24 V 条件下,其粘附力分别降低约 26%、30% 和 41%;在 30 V 条件下,降幅进一步提高至 31%、40% 和 48%。在 30 V、60 s 条件下,两种圆筒的粘附力均达到最低值。在相同电渗参数下,仿生圆筒 TB 的粘附力整体低于传统圆筒 TA,且降幅更为显著,说明仿生结构在电渗作用下仍具有稳定的减黏优势。

为验证粘附力变化结果的可靠性,进一步统计圆筒表面附着土壤质量,其变化趋势如图 14 所示。整体变化规律与粘附力测试结果保持一致。随着电压由 0 V 提高至 30 V、通电时间由 20 s 延长至 60 s,两种圆筒的附着土壤质量均呈持续下降趋势,在 30 V、60 s 条件下达到最低值。仿生圆筒 TB 在相同电渗参数下的附着质量始终低于传统圆筒 TA,与粘附力变化趋势相互印证。

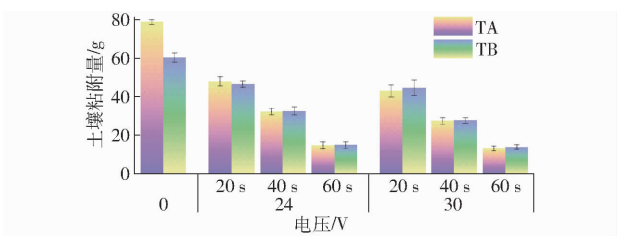


图 14 圆筒试验的土壤粘附量

Fig. 14 Soil adhesion weight in cylinder test

为进一步观察电渗作用下界面接触状态的变化,记录圆筒脱离后土壤表面形态,如图 15 所示。在电压 24 V、通电时间 40 s 条件下,土壤表面形成轮廓清晰、边缘完整的圆筒压痕结构。压痕区域未观察到明显土壤颗粒团聚或粘附残留现象,压痕内部结构保持相对完整。同时可见局部湿润区域及水分迁移痕迹,表明电渗作用下界面水分分布状态发生改变。

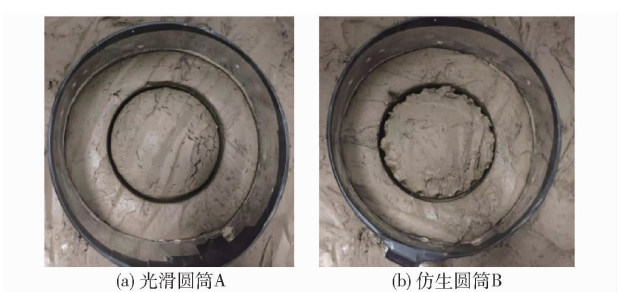


图 15 圆筒电渗试验后的土壤压痕(电压 24 V, 通电 40 s)

Fig. 15 Cylinder and indentation in soil surface with applying 24 V voltage for 40 s

3 讨论

在压盘粘附试验中,采用仿生非光滑结构设计的压盘产生的法向土壤粘附力显著低于传统平滑表面压盘 A。该结果与文献[29]对仿生非光滑结构在农机具上的减阻减黏的研究结果一致,说明在农机部件上设计非光滑结构有助于破坏土壤与触土部件之间水膜的连续性以降低粘附力。

本研究采用的电渗试验中,阳极布置在紧邻触土部件的土壤中,待土壤与部件发生接触后即可与作为阴极的触土部件形成回路。相较于传统的在触土部件表面添加阳极结构的改造方式^[30-31],本研究采用的阳极配置方式更加简单高效。其主要优势在于无需对触土部件进行结构改造,仅需在其附近简单布置额外阳极即可实现有效降低土壤粘附力的电渗减粘效果。此外,对触土部件施加电压可显著降低金属触土部件上的土壤粘附力,且附着力随着施加电压的增大和作用时间的延长而逐渐减小。

本研究所用的压盘仅有一个与土壤接触的主表面,产生的主要是法向粘附力。试验表明,对该压盘施加 24 V、持续 10 s 的电渗处理,即可显著降低其粘附力,使压盘表面光滑洁净无土壤附着。圆筒有内侧和外侧两个与土壤接触的表面,产生的主要阻力为切向附着力,对内壁光滑的圆筒施加 24 V、持续 20 s 的电渗处理即可显著降低粘附力,而仿生凸包结构的存在增加了部件与土壤之间的摩擦,导致在无电渗条件下仿生圆筒的土壤粘附力高于传统光滑圆筒,而通过施加 24 V、持续 40 s 的电渗处理可显著减小圆筒的土壤粘附力。尽管方差分析结果证实电压和通电时间均对土壤粘附具有显著影响,但根据固结排水领域大量试验研究的共识,并非通电持续时间越长效果越佳;过长的连续通电时间不仅会导致能耗增加、阳极材料腐蚀加剧等问题,还可能引发排水效率下降的逆向现象。因此,在实际固结排水施工中,工程技术人员普遍采用调节电压参数并结合间歇性通电的操作方案。因此,基于本试验结果及固结排水工程实践经验,建议在农业机械触土部件的电渗操控系统设计中,将电压视为主要的控制变量。具体而言,当施加 24 V 恒定电压且通电时间达到 10 s 时,即可获得较为理想的减粘效果。

值得注意的是,在施加电渗条件后,添加非光滑凸包结构的仿生部件的减粘效果相比传统光滑工作表面的触土部件并无优势,特别是仿生圆筒的粘附力相比光滑圆筒不仅没有减小甚至更大。对此,从以下两方面进行分析:首先,从力学原理来看,由于切向粘附力的计算与摩擦力近似,切向粘附力 $T =$

μF_s (F_s 为法向粘附力),则摩擦因数对切向粘附力有很大影响,而凸包结构显著增加了土壤与部件之间的摩擦,故切向粘附力增加;其次,从水膜生成机理角度,仿生凸包结构的存在使得电渗处理下形成的水膜厚度分布不均匀,从而削弱了其减粘性能。如图 16 所示,与光滑表面相比,仿生压盘或仿生圆筒等具有凸包结构的触土部件,在与土壤接触时会形成非平滑的水膜分布。特别是在电渗场作用下,由于水分子迁移速度加快,使得阴极表面即部件表面形成了更厚的水膜,但凸包结构的存在显著削弱了其减粘性能。

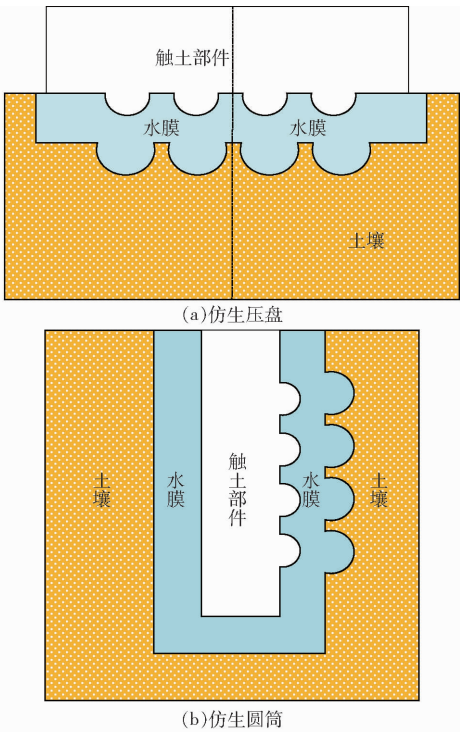


图 16 触土部件与土壤的接触机理示意图
Fig. 16 Schematics of contact mechanism between soil-contacting components and soil

综上,电渗条件下,凸包结构对触土部件的减粘作用效果有限,这与其结构特征及其对水膜形成机制的影响密切相关。

此外,在完成电渗试验后,压盘和圆筒与土壤接触的表面都呈现出光滑洁净且无明显土壤附着的状态,并可清晰观察到水膜的润湿痕迹。根据 MACKON (1962)^[30]、KHAN 等 (2010)^[31] 以及 MASSAH 等 (2021)^[32] 多位学者的研究成果,土壤电渗处理能够增强接触界面处水膜的厚度,从而显著降低土壤与触土部件之间的粘附力。本研究的试验结果与上述结论吻合。这也表明:当金属部件与土壤之间存在较大的接触面积时,需要延长电渗处理时间才能实现更优的减粘效果。因为电渗的原理是通过从土壤中抽取水分以形成更厚更稳定的水膜,

从而在部件与土壤接触界面处实现润滑来降低粘附力。

从应用角度来看,本研究所采用的 24 V 电压正好适合现有农业机械普遍配备的蓄电池供电特性,使得电渗技术能够便捷地整合到常规耕作机具中。只要在机具设计中恰当选用阳极材料并合理布置,即可实现该技术与常规耕作机械的成功整合,而无需改动土壤触土部件本身结构。这一发现为电渗技术在农业机械领域的实际应用提供了重要参考。

4 结论

(1)通过仿生学原理设计了一系列具有非光滑表面结构的触土压盘,并采用拉拔试验方法进行了

系统试验。结果表明,仿生凸包结构能够有效降低触土部件的法向土壤粘附力。

(2)基于电渗原理,将触土部件设定为阴极,在其周围布置阳极工具,系统地研究了不同电压和通电时间对触土部件土壤粘附力及粘附量的影响。研究发现,对触土部件施加适当电压能够显著降低金属触土部件的土壤粘附力,且粘附力随着电压作用时间的增加而减小。

(3)本研究证实电渗技术在减少触土部件土壤粘附方面具有显著的应用潜力,且无需对其结构进行额外改造。对于犁铧、深松铲等在土壤中持续作业的传统农田耕作机械,电渗技术能显著提升其耕作质量并提高工作效率。

参 考 文 献

- [1] QAISRANI R, LI J, KHAN M, et al. Soil adhesion preventing mechanism of bionic bulldozing plates and mouldboard ploughs [J]. *Advances in Natural Science*, 2010, 3: 100 – 107.
- [2] TONG J, ZHANG Q, CHEN D, et al. Effects of bionic geometric structure press rollers on reducing rolling resistance and adhesion against soil[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 461: 63 – 72.
- [3] JIA H, WANG W, WANG W, et al. Application of anti-adhesion structure based on earthworm motion characteristics[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 159 – 166.
- [4] FOUNTAINE E. Investigations into the mechanism of soil adhesion[J]. *Journal of Soil Science*, 1954, 5: 251 – 263.
- [5] BAVER L. *Soil physics*[M]. New York:Wiley,1956.
- [6] AKIYAMA Y, YOKOI O. Study on soil adhesion, Part II. theoretical analysis of adhesion mechanism at the saturating stage [J]. *Journal of Japanese Soil Fertility Science*, 1972, 43(8): 271 – 277.
- [7] AKIYAMA Y, YOKOI O. Study on soil adhesion. Part III. theoretical analysis of adhesion mechanism at the saturation stage [J]. *Journal of Japanese Soil Fertility Science*, 1972, 43(9): 315 – 320.
- [8] REN L, TONG J, LI J, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil engaging components: a review[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2001, 79(3): 239 – 264.
- [9] BURBAUM U. *Adhäsion bindiger Böden an Werkstoffoberflächen von Tunnelbohrmaschinen* [D]. Darmstadt: Technische Universität, 2009.
- [10] BURBAUM U, SASS I. Physics of adhesion of soils to solid surfaces [J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2017, 76:1097 – 1105.
- [11] BARZEGAR M, KARIMI R, HASHEMI S, et al. Evaluating the draft force and soil-tool adhesion of a UHMW – PE coated furrower[J]. *Soil Tillage Research*, 2016, 163: 160 – 167.
- [12] WANG H, WAN Q, ZHOU M, et al. Reduction of friction and soil adhesion of medium carbon steel via hard coating and surface texture[J]. *Coatings*, 2020, 10(6): 561.
- [13] LIU G, XIA J, ZHENG K, et al. Effects of vibration parameters on the interfacial adhesion system between soil and metal surface[J]. *Soil Tillage Research*, 2022, 218: 105294.
- [14] LI J, QI H, MA Y, et al. Investigating soil adhesion and anti adhesion performance of nonsmooth subsoiler surfaces[J]. *Journal of Engineering*, 2024(1): 7019756.
- [15] 王思宁. 吉林西部盐碱水田土壤有机碳源/汇特征与影响因素研究[D]. 长春:吉林大学,2022.
WANG Sining. Study on soil organic carbon source/sink characteristics and influencing factors of saline-alkali paddy fields in western Jilin[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [16] 甘淇匀. 软土电渗的电场作用机理与多场耦合理论研究[D]. 杭州:浙江大学,2022.
GAN Qiyun. Studies on the electric field mechanism and multi-field coupling theory of electro-osmosis in soft soils [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)
- [17] 刘国阳,夏俊芳,郑侃,等. 振动横挡阻隔式旋耕防黏结刀辊设计与试验[J]. *农业工程学报*,2022,38(23):29 – 40.
LIU Guoyang, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiment of the barrier type rotary anti-adhesion blade roller with vibration crosspiece[J]. *Transactions of the CSAE*, 2022, 38(23): 29 – 40. (in Chinese)
- [18] 屈忠义,孙慧慧,杨博,等. 不同改良剂对盐碱地土壤微生物与加工番茄产量的影响[J]. *农业机械学报*,2021,52(4): 311 – 318,350.
QU Zhongyi, SUN Huihui, YANG Bo, et al. Effects of different amendments on soil microorganisms and yield of processing

tomato in saline alkali soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 311 – 318, 350. (in Chinese)

[19] 李晓爽,党红凯,宋妮,等. 肥沙混施对盐碱地冬小麦耗水特性与生长的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(5):272 – 284.

LI Xiaoshuang, DANG Hongkai, SONG Ni, et al. Effects of biological organic fertilizer and yellow river sediment mixture on water consumption and growth of winter wheat in saline alkali land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 272 – 284. (in Chinese)

[20] LIU P, WANG S, SHI Y, et al. Tangential adhesion strength between clay and steel for various soil softnesses[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2019, 31(5): 04019048.

[21] FANG Y, ZHUO B, WANG Y, et al. Metal-soil interface adhesion in clay clogging during shield tunneling: theoretical model and experimental validation[J]. Underground Space, 2024, 15: 188 – 202.

[22] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.

[23] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

[24] LI M, GAO Z, TANG J, et al. Experimental assessment of electro-osmotic soil-engaging tools for adhesion reduction[J]. European Journal of Soil Science,2025, 76(3):e70133.

[25] REN L Q, HAN Z W, LI J Q,et al. Experimental investigation of bionic rough curved soil cutting blade surface to reduce soil adhesion and friction[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85(1 – 2): 1 – 12.

[26] JIA X. Unsmooth cuticles of soil animals and theoretical analysis of their hydrophobicity and anti-soil-adhesion mechanism[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 295(2): 490 – 494.

[27] SALEM A, WANG H, GAO Y, et al. Effect of biomimetic surface geometry, soil texture, and soil moisture content on the drag force of soil-touching parts[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 8927.

[28] 陶燕丽,周建,龚晓南,等. 铁和铜电极对电渗效果影响的对比试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(2):388 – 394.

TAO Yanli, ZHOU Jian, GONG Xiaonan, et al. Comparative experiment on influence of ferrum and cuprum electrodes on electroosmotic effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 388 – 394. (in Chinese)

[29] REN L, CONG Q, TONG J, et al. Reducing adhesion of soil against loading shovel using bionic electro-osmosis method[J]. Journal of Terramechanics, 2001, 38:211 – 219.

[30] MACKON C. The effect of electro-osmosis on soil to steel sliding friction as influenced by speed, voltage and soil moisture [D]. New York: Cornell University,1962.

[31] KHAN M, QAISRANI R, LI J. The techniques of reducing adhesion and scouring soil by bionic-review of literature[J]. Advances in Natural Science, 2010,3(2): 41 – 50.

[32] MASSAH J, FARD M, AGHEL H. An optimized bionic electro-osmotic soil-engaging implement for soil adhesion reduction [J]. Journal of Terramechanics, 2021, 95: 1 – 6.

~~~~~

(上接第 76 页)

[30] LI J W, LI H W, WANG Q J, et al. Resistance reduction mechanism of potato bionic digging shovels in clay soil[J]. Biosystems Engineering, 2023, 233: 19 – 33.

[31] ZHANG S L, ZHAO H B, WANG X Z, et al. Discrete element modeling and shear properties of maize stubble-soil complex [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107575.

[32] 侯锡彬,崔舒然,李明森,等. 1ZLZ – 300 型全幅复式种床整地机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 1): 125 – 134.

HOU Xibin, CUI Shuran, LI Mingsen, et al. Design and experiment of 1ZLZ – 300 full width compound seed bed preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp.1):125 – 134. (in Chinese)

[33] 朱惠斌,吴宪,白丽珍,等. 基于 EDEM – ADAMS 仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 10 – 22.

ZHU Huibin, WU Xian, BAI Lizhen, et al. Development of the biaxial stubble breaking no-tillage device for rice stubble field based on EDEM – ADAMS simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(19): 10 – 22. (in Chinese)

[34] GB/T 20865—2017 免(少)耕施肥播种机[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

[35] NY/T 1003—2006 施肥机械质量评价技术规范[S]. 北京:中国农业出版社,2006.