

深松犁减黏降阻研究综述

鲍洋清¹, 许令峰^{1,2*}, 宋月鹏^{1,2}, 刘贤喜^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 山东泰安 271018; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 山东泰安 271018)

摘要 针对目前土壤深松技术中出现的耕作阻力大的问题, 结合仿生技术和振动技术, 总结基于解决这一问题的多种仿生深松犁和振动深松犁, 对其减黏降阻效果进行分析和阐述, 并提出提高深松犁的工作性能及发展方向的建议。

关键词 深松犁; 减黏降阻; 仿生; 振动

中图分类号 S222.12⁺9 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)07-0033-03

Review on Reducing Adhesion and Resistance of Subsoiler

BAO Yang-qing¹, XU Ling-feng^{1,2}, SONG Yue-peng^{1,2} et al (1. College of Mechanical and Electronic Engineering of Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Tai'an, Shandong 271018)

Abstract To solve the big resistance during loosening soil deeply, different kinds of bionic subsoilers and vibrating subsoilers were summarized which were based on bionic technology and vibrating technology. Effect of reducing adhesion and resistance of them was analyzed. Some suggestions on how to improve the working performance of subsoilers and its developmental directions were put forward.

Key words Subsoiler; Reduce adhesion and resistance; Bionic; Vibration

土壤深松是实施保护性耕作技术的重要措施。以其不翻转、不破坏土壤层原始结构和提高土壤含水率以及降低土壤容重为特点, 从而达到疏松土壤、促进植物根系生长的效果, 使作物增产增收^[1]。然而深松过程中土壤与机具的黏附较为严重, 导致耕作阻力增大, 能耗增大, 不但增加深松作业的成本, 而且在一定程度上限制土壤深松技术的推广和应用^[2]。因此, 减黏降阻、提高机具寿命成为深松机具设计的重要课题。通过模仿自然界的生物经过长期进化而形成的结构及其减黏降阻机理, 设计多种结构的仿生深松犁; 另外借助振动理论优化深松犁结构, 也可降低深松耕作阻力和黏滞力, 提高触土部件的耐磨性, 从而延长其使用寿命。

1 深松犁仿生降阻技术研究

黏附问题普遍存在于农机触土部件中, 由于土壤黏附导致深松犁耕作阻力增大, 降低深松犁工作效率^[3]。一些土壤动物外壳等器官具有显著的减黏功能, 成为仿生的对象。

1.1 仿蜣螂深松犁 蜣螂长期生活在黏性较大的介质中, 身体却并未被介质黏附, 表现出非凡的减黏脱附功能, 因此成为被广泛模仿的对象。

1.1.1 蜣螂体表非光滑表面仿生 蜣螂体表的分布有密集的鱼鳞状、圆盘状和波浪形念珠状凸起和凹陷, 构成其与粪便或者泥土直接相接触的非光滑表面。将蜣螂体表非光滑结构几何特征用于犁壁设计, 结果表明, 随机分布的仿生非光滑表面与规则分布的表面相比, 前者使犁壁的横截面不存在规则分布所具有的有序的壁厚差, 使其强度分配更加合理, 有利于消除薄弱环节, 使加工制造时产生的变形开裂现象得到明显改善; 当土堡沿着仿生非光滑表面运动时, 无规

则排列方向与次序的几何单元大大减少了其运动中产生的摆动及附加阻力, 降低了土堡与底平面的接触概率, 这些因素均有利于犁壁的减黏脱土^[3-4]。

1.1.2 蜣螂前足曲线拟和仿生 研究发现, 蜣螂前足胫节各齿的触土曲面是由无数特征曲线构成的, 其中最具有代表性的是爪趾的外缘轮廓曲线, 其他曲线与此相近。因此, 对蜣螂的前足胫节外缘轮廓依次进行测量和曲线拟合, 分析结果表明, 其轮廓线可用以下的二次多项式来描述: $y = 24.7995x^2 - 313.9920x + 995.5940$, 该多项式的拟合精度为 0.99355, 利用 ANSYS 软件分析深松犁耕作过程中的力学性能, 得到深松部件的优化参数^[5]。该项研究通过对蜣螂的形态特征进行细致的观察和分析, 运用专业软件进行计算机辅助设计, 最终研制出仿生深松犁, 田间耕作试验表明其具有良好的减阻效果。

1.1.3 蜣螂体表电场仿生 除了对蜣螂的体表及足进行模仿研究以外, 研究者还模拟蜣螂体表电位的正、负交变电场, 将触土部件作为负极, 并找到合适的正极位置, 促使土壤中的水分子向负极移动进而形成水膜, 以此降低触土部件与土壤之间的相互作用力, 实现减黏降阻。采用这种分离式电渗的方式制备非光滑表面, 形成仿生电渗模面。为消除电渗效果的“死区”, 研究者将非光滑表面的触土部件分为多个相间的区域, 从而构成正、负交变电场, 此种方式获得了更好的脱附效果。

1.2 仿动物鳞片深松犁 研究发现, 穿山甲与扇贝虽然生活在不同的环境中, 但穿山甲的鳞片与扇贝的瓣均具有表面棱纹型的几何结构, 其磨损形式十分相似。故研究者将穿山甲体表鳞片与栉孔扇贝瓣定为生物原型^[6], 通过三维激光扫描、点云处理, 分析 2 种试验样品的横截面轮廓特征点的分布规律, 发现 2 种曲线都有类似正弦函数的特征, 所不同的是其振幅的大小, 因此可用以下的标准正弦函数方程表达: $f(x) = a \times \sin(bx + c)$, 式中, a 、 b 、 c 均为实常数, 且 a 、 b 不为

基金项目 “十三五”国家重点研发计划(2016YFD0700502-2); 农业发展研究院智能农业装备研发项目(24134)。

作者简介 鲍洋清(1992—), 女, 山东烟台人, 硕士研究生, 研究方向: 深松犁减黏降阻。* 通讯作者, 副教授, 博士, 从事机械设计制造研究。

收稿日期 2017-12-17

0. 在传统深松铲刃结构类型的基础上设计不同的仿生几何结构在铲刃上的分布形式。将仿生棱纹条在铲刃上的布置方向与土壤沿触土表面的运动方向设置为垂直, 分别按 1.0D、1.5D、2.0D 3 种分布方式排列。将这 3 种仿生棱纹形深松铲与非仿生深松铲分别进行磨料磨损试验, 结果是 3 种仿生棱纹形深松铲刃较非仿生深松铲的耐磨效果均好, 其中 1.5D 型取得最佳耐磨性。

1.3 仿挖掘足深松犁 除了以生物的体表为研究对象外, 研究者还对善于挖掘的动物进行分析。研究发现, 达乌尔黄鼠、小家鼠以及蝼蛄的挖掘足形状具有相同的特征, 利用 UG9.0 软件中的光栅图像功能, 将获取的挖掘足图片插入软件进行仿形辅助设计, 最终将优化后的结构借助 CAXA 软件进行编程, 以实现数控加工。根据家鼠鼠趾、达乌尔黄鼠鼠趾以及蝼蛄爪趾的外形分别设计不同形状的深松铲柄, 并对这 3 种动物挖掘足的仿生深松铲的减阻效果进行对比^[7]。结果表明, 仿生爪趾深松铲比对照深松铲的耕作阻力明显减小, 且耕作中更容易入土, 但不足的是仿生铲的铲尖虽然起到耐磨作用, 但脱附效果有待提高。

研究者通过观察熊类挖掘时爪趾的运动形态, 发现其与深松铲的深松过程很相近^[8], 故基于仿生学原理, 借助 MATLAB 软件提取棕熊爪趾的曲线信息, 其爪趾内、外侧曲线的拟合方程分别为: $y_1 = 1\,917\,000x_1^{-1.658} + 8.743$, 式中, x_1 的取值范围是 $116 \leq x_1 \leq 500$; $y_2 = 5\,299x_2^{-0.5737} - 1\,143$, 式中, x_2 的取值范围是 $26 \leq x_2 \leq 500$, 将拟合得到的曲线进行等比例放大, 并在国标圆弧形深松铲的基础上, 设计仿棕熊爪趾的深松铲柄和铲尖。但考虑到深松作业时土壤颗粒间的相互粘结, 故建立离散元模型, 从而进一步直观地模拟深松铲与土壤颗粒间的相互作用, 并依据仿真结果对仿黑熊爪趾深松铲结构参数进行优化, 结果表明, 此种仿生深松铲大大减小耕作阻力, 从而使耕作效果得到改善。

1.4 仿蚯蚓深松犁 根据蚯蚓能在土壤中活动自如、不易粘土这一现象, 深入探究其原因, 发现这与蚯蚓体表接触外界时产生的剪切阻力有关。由于其体表液中的黏蛋白可以有效地黏附住土壤表面颗粒, 故体表液层内的剪切阻力比其他界面层边壁的剪切阻力小, 明显小于蚯蚓直接与土壤接触时所产生的剪切阻力^[9]。对蚯蚓的头部和体部分别进行体表形貌的润湿性分析, 结果表明, 体表背孔和波纹的排列特征对其减黏降阻效果有很大影响。通过设定孔及波纹的数量和排列方式, 设计制造出仿生耦合试件, 结果表明仿蚯蚓体表形貌试件的减黏降阻效果明显。

2 深松犁振动降阻技术研究

土壤作用力影响牵引阻力, 而合理地利用振动可以减小土壤颗粒之间相互作用力, 从而降低牵引阻力, 并且不同的土壤特性和地表覆盖对牵引阻力有一定的影响。振动深松机可降低机具牵引阻力, 节省燃油消耗, 为蓄水保墒提供可行的作业机具^[10-12], 概括来讲, 振动深松机分为受迫振动和自激振动 2 类深松机。

2.1 受迫振动深松犁 非振动深松时, 深松铲的运动状态

可看成匀速运动, 而振动深松作业时, 深松铲发生水平及竖直方向的摆动, 故其速度和加速度不是固定的^[13]。据此, 研究者设计一种受迫振动深松机, 其振动动力来源于拖拉机的后动力输出轴, 工作时联轴器将拖拉机的后动力输出轴的转动运动传递给偏心轴, 将转动转变为连接器的上下振动, 连接板将振动转变成转动轴的摆动, 从而深松铲开始振动, 以此实现振动深松。这种振动方式不仅能实现振动深松, 还能减振, 在一定程度上可以缓解拖拉机由深松机振动所带来的影响。随后采用正交试验方法得出影响受迫振动参数的最优组合, 并进行验证, 为深松机振动特性分析与性能参数设计提供有力的参考^[14]。

除了此种振动方式以外, 日本的 SAKAI 等研制了一种与中型拖拉机配套的四铧振动深松机, 其输出的动力被传送到锥齿轮减速器上, 再通过链轮传动使曲柄轴开始转动, 连杆在曲柄轴的带动下进行往复运动, 最终深松铲在前进方向上产生振动, 实现深松作业, 并取得显著的减阻效果。

2.2 自激振动深松犁 与受迫振动原理所不同的自激振动深松机, 其振动来自于专门的振动机构。研究者设计一种结构简单紧凑、入土角可控的自激振动深松机。其自激振动深松装置主要由弹性减阻单元、深松部件固定部件等组成^[15]。该装置由螺栓将上下固定板连接在机架上, 由过载保护销和铰链将深松铲与杠杆固接起来。当深松铲未工作时, 调节预紧螺母, 减振弹簧使滑块沿着摆杆滑动, 从而带动杠杆转动, 使杠杆与下固定板一侧接触, 此为深松铲最小入土角的位置。深松铲入土工作时, 深松铲受土壤阻力作用带动杠杆转动, 当耕作阻力过大时, 杠杆和下固定板另一侧相接触, 此为深松铲的最大入土角位置。该种深松铲可以调节入土角, 根据实际深松入土情况将入土角控制在最佳的范围内, 这种自激振动深松方式可降低牵引阻力 29.8%, 并且自激振动条件下, 入土角可控相对于不可控牵引阻力下降 8.9%。

有研究者根据自激式振动减阻方式的振动来源即自激振动、土壤表层凹凸不平、土壤内部紧实度含水率与牵引机械自身振动等方面, 将仿生学理论融入设计中, 研制出仿獾爪趾的自激式仿生振动深松铲。结果表明, 这种振动式仿生深松铲的耕作阻力与耕作深度、耕作速度均呈正相关, 但受耕作深度的影响相比于耕作速度更加显著。总的来说, 振动式仿生深松铲比未经振动的仿生深松铲的耕作阻力明显减小, 且减阻效果非常显著^[16]。

虽然振动深松机能通过振动松碎土块, 有效降低耕作阻力, 但振动同时传递到拖拉机上给作业者带来不适, 因此研究者设计了一种新型的 V 型交错振动深松施肥机^[17], 主要包括主机架、动力提供及转化装置、交错往复运动单元、偏心结构单元、深度控制机构和施肥系统等, 通过优化深松铲的结构来改变穿透土壤形式并降低阻力, 同时保持振动深松机在工作时的振动稳定性和平衡性, 使作业者的工作环境得到改善。结果表明, 与不振动深松的工作方式相比, 振动深松的牵引阻力显著降低, 且牵引阻力随着前进速度的增加而增加; 土壤平均含水率明显增加; 滑移率、土壤坚实度、土壤容

重均明显降低。

随着计算机辅助设计技术的发展,研究者从振动式深松机的运动轨迹和运动特性入手,对振动机构进行三维建模和运动仿真分析。结果表明,结构参数振动角对振动式深松机的减阻影响较大,当振动角为负值时,更利于深松犁的减阻。UG 运动仿真和 ANSYS 有限元分析不仅为上述结论提供理论支持,而且提供模拟土壤切削有限元分析的载荷数据。在此基础上,不断地进行参数优化,根据仿真结果改进振动式深松机的结构,将改进后的机具借助在线监测装备进行田间试验,结果表明,参数优化后的振动式深松机深松后的土壤密度、坚实度、土壤耕作阻力均有明显下降^[18]。

3 总结与展望

诸多研究表明,以土壤动物等生物为仿生对象研制的深松犁减黏降阻效果显著,降低能耗的同时进一步促进土壤深松技术的发展。但是目前对仿生深松犁的研究多集中在深松铲本身的结构参数,对于土壤深松耕作系统中的土壤物理特性以及土壤的交互作用研究则相对较少^[19]。此外,研究中大多只对生物原型的外形或结构进行轮廓上的仿生,而动物在运动过程中的发力方式和具体减阻过程需要仔细研究;仿生用的动物原型目前局限性比较大,基本上是土壤动物或者挖掘动物等,所涉及的产品外观相仿,希望今后研究者能从大自然其他生物中发现灵感,进而应用到仿生犁的研发中。

通过总结前人振动深松犁的研究成果,不难发现振动式深松减阻方式减阻效果明显。除激振装置外,几乎无需增设其他辅助装置,结构简单易行,操作方便可靠,并且拖拉机的牵引性能得到明显改善,发动机的功率利用率得到提高,但是振动式深松机消耗的总功率比非振动深松机高。因此,研发振动式深松机时,需要兼顾功率消耗、发动机的功率利用率等因素^[20]。

除了仿生深松犁和振动深松犁 2 种减黏降阻方式以外,有研究者在深松铲尖设小孔,在铲柄上设有 2 条通道与小孔相通,依靠压缩机充水使铲尖土壤得到疏松,此为充气深松机。还有学者以天然植物纤维为研究对象,利用其低摩擦系数、低黏着、耐磨等力学特性研究生物仿生复合材料,当横切

面纤维与滑动界面处于垂直方向时,试样表面层一定深度的集体组织首先被磨去,使纤维端头突出于基体之上,形成一种具有非光滑特征的磨损表面几何形态,磨料粒子在这种形态的表面上易产生滑动,使得生物纤维复合材料表现出很强的耐磨性和减黏降阻特性^[21]。因此,今后还可在仿生植物纤维复合材料等方面寻求深松犁新的减阻方式。

参考文献

- [1] 李友军. 保护性耕作理论与技术[M]. 北京:中国农业出版社,2008.
- [2] 陈秉聪. 车辆行走机构形态学及仿生减粘脱土理论[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- [3] 李建桥,任露泉,刘朝宗,等. 减粘降阻仿生犁壁的研究[J]. 农业机械学报,1996,27(2):1-4.
- [4] 孙久荣,程红,丛茜,等. 蛭螂(*Copris ochus Motschulsky*)减粘脱附的仿生学研究[J]. 生物物理学报,2001,17(4):785-793.
- [5] 朱凤武. 金龟子形态分析及深松耕作部件仿生设计[D]. 长春:吉林大学,2005.
- [6] 张金波. 深松铲减阻耐磨仿生理论与技术[D]. 长春:吉林大学,2014.
- [7] 刘润杰. 仿生技术在深松减阻技术上的研究与应用[D]. 保定:河北农业大学,2015.
- [8] 李博. 基于离散元法的深松铲减阻及耕作效果研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2016.
- [9] 寇冰雪. 仿蚯蚓润滑功能耦合表面减阻特性[D]. 长春:吉林大学,2011.
- [10] 辛丽丽,李传琦,梁继辉,等. 考虑分段土壤作用力的振动减阻分析[J]. 农业机械学报,2014,45(2):136-140.
- [11] 李霞,付俊峰,张东兴,等. 基于振动减阻原理的深松机牵引阻力试验[J]. 农业工程学报,2012,28(1):32-36.
- [12] 徐宗保,董欣,李紫辉,等. 振动式深松中耕作业机的研制与试验研究[J]. 农机化研究,2010,32(1):182-184.
- [13] 文学洙,廉哲满. 振动式挖掘机的设计与试验[J]. 农业机械学报,2006,37(10):77-82.
- [14] 李霞,张东兴,王维新,等. 受迫振动深松机性能参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(21):17-24.
- [15] 张军昌,闫小丽,林泽坤,等. 自激式振动深松整地机设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(9):44-49,72.
- [16] 白景峰,李博,吕秀婷,等. 基于狗獾爪趾的仿生深松铲振动减阻研究[J]. 农机化研究,2016,38(5):224-227.
- [17] ABDALLA NOURELDIN OSMAN KHEIRY. 交错振动式深松机的设计与试验研究[D]. 北京:中国农业大学,2014.
- [18] 刘晓红. 振动深松减阻机理及作业参数在线监测研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2016.
- [19] 袁军,王景立. 深松技术与深松机具发展现状[J]. 安徽农业科学,2014,42(33):11978-11979,12008.
- [20] NIYAMAPA T, SALOKHE V M. Soil disturbance and force mechanics of vibrating tillage tool[J]. Journal of terramechanics, 2000, 37(3):151-166.
- [21] 孙俊杰,王智芹,王宝刚,等. 竹材的力学性能及磨料磨损性能研究[J]. 农机化研究,2011,33(7):162-166.

科技论文写作规范——标点符号

标点符号按照 GB/T 15834—2011 执行,每个标点占 1 格(破折号占 2 格)。外文中的标点符号按照外文的规范和习惯。注意破折号“——”、一字线“—”(浪纹线“~”)和短横线“-”的不同用法。破折号又称两字线或双连划,占 2 个字身位置;一字线占 1 个字身位置,短横线又称半字线或对开划,占半个字身位置。破折号可作文中的补充性说明(如注释、插入语等),或用于公式或图表的说明文字中。一字线“—”(浪纹线“~”)用于表示标示相关项目(如时间、地域等)的起止。例如 1949—1986 年,北京—上海特别旅客快车。参考文献范围号用“-”。短横线用于连接词组,或用于连接化合物名称与其前面的符号或位序,或用于公式、表格、插图、插图、型号、样本等的编号。外文中的破折号(Dash)的字身与 m 宽,俗称 m Dash,其用法与中文中的破折号相当。外文的连接符俗称哈芬(hyphen)。其中,对开哈芬的字身为 m 字身的一半,相当于中文中范围号的用法;三开哈芬的字身为 m 字母的 1/3,相当于中文中的短横线的用法。