



地面机械脱附减阻仿生研究进展

任露泉

吉林大学地面机械仿生技术教育部重点实验室, 长春 130022

* E-mail: lqren@jlu.edu.cn

收稿日期: 2008-07-01; 接受日期: 2008-07-25

国家自然科学基金重点项目(批准号: 59835200, 50635030)、国家科技攻关项目(批准号: 2005BA429C)和国家科技成果重点推广项目(批准号: 2005EC000119)资助

摘要 机械仿生的理论研究具有重要的科学意义, 仿生机械的研发在工程技术领域中有重要的应用价值. 自然界的生物, 在优胜劣汰的进化过程中, 为了生存, 必须造就适应环境、延续生命的本领. 本文从地面机械脱附减阻的研究现状着手, 结合吉林大学多年来在这一领域系列性的研究成果, 介绍了土壤动物脱附减阻的基本原理, 进而阐述了形态仿生、柔性仿生、电渗仿生、构形仿生, 以及多元耦合(协同)仿生的原理与技术. 最后介绍了工程仿生的应用研究, 并指出这些理论具有广阔的发展前景.

关键词

地面机械
脱附减阻
仿生
非光滑
耦合

地面机械, 无论是在地面上行走的载运机械和军事车辆, 还是以地表和土壤为作业对象的农业机械和铲运机械, 其触土部件的脱附减阻一直是国内外许多学者致力研究的重要技术问题. 尤其是土壤(旱田、水田)、滩涂、湿地、沼泽、雪地、沙漠等对车轮、履带和作业部件表面的粘附和阻力, 严重影响机械的工作效率、使用寿命和作业质量, 增大能量消耗, 甚至使机械无法正常运行、作业. 长期以来, 国内外许多学者对这一领域的研究做出许多贡献. 但因依据的是经典理论, 采用的是传统方法, 故在解决重大难题方面未见质的突破.

自然界的生物, 在优胜劣汰的进化过程中, 为了生存, 必须造就适应环境、延续生命的本领. 俯瞰生活在黏湿土壤中各种动物, 为何能活动自如而体表毫不粘土? 从物质、能量和信息的多重作用切入, 探索土壤动物这种遇黏不粘的优异功能, 揭示其机理与规律, 是地面机械脱附减阻研究的新途径.

20 世纪 80 年代初, 原吉林工业大学(现吉林大学)的研究人员, 受土壤动物遇黏不粘现象的启示, 联合 10 多个专业的科技人员, 系统地开展了土壤动物脱附减阻及机械仿生研究, 现已形成了集科学研究、技术开发、成果转化、人才培养和学科建设于一体的地面机械脱附减

阻仿生研究基地, 并拓展到多种非土壤介质的多个仿生功能研究领域.

1 地面机械的粘附与阻力

大量工农业生产实践和研究表明, 土壤等黏湿物料的粘附严重影响和制约着众多工程领域的发展. 在车辆工程领域, 即使通过性能优良的越野汽车轮胎, 在黏湿地带, 也会因黏土的粘附和滞留变成光轮而失去行驶能力^[1,2]; 在土方工程领域, 土壤对装载机铲斗、挖掘机挖斗、自卸车车厢等工作部件的粘附积土量可达其斗(厢)额定容量的 20%~50%^[3], 降低生产率 30%^[4,5]; 在农业工程领域, 土壤粘附使犁耕阻力增加 30%以上^[6,7], 耕整机械能耗增加 30%~50%^[3,8], 使播种机械减少出苗率 5%~10%; 在能源工程领域, 煤矿矿车和发电厂斗轮机轮斗平均粘煤量可达其额定容量的 40%, 降低生产率 30%~47%^[9,10]. 因此, 许多学者把土壤粘附问题视为地面运载、挖掘、耕作机械领域重大难题, 竞相研究. 自 19 世纪 30 年代开始^[11], 已在多方面取得可喜的进展. 特别是进入 20 世纪以来, 许多研究者从观察现象、总结实践和分析大量试验结果出发, 对土壤粘附机理进行了广泛的探讨, 提出了种种不同的理论和学说, 从不同角度对土壤粘附现象进行诠释. 例如, Fountaine(1954)的水分张力理论; 钱定华(1965)的五层界面模型; Zisman(1968)、秋山丰等(1972)的毛细管理论; Вайбаков(1957)、Помапов(1973)等的合力模型和张际先(1985)的粘附界面分子模型理论等^[12~16]. 这些理论和学说使人们对土壤粘附现象内在本质的认识不断深化, 但在土壤粘附领域还有不少问题有待进一步探索. 20 世纪末至 21 世纪初, 吉林大学的一些研究者, 从不同侧面对土壤粘附机理进行了深入探索, 取得了新的进展^[2,17,18]. 与此同时, 人们还围绕土壤、触土固体材料、粘附界面与试验条件 4 个方面, 对土壤粘附的规律进行了大量的试验研究^[19,20]. 吉林大学的研究人员还对在多因素作用下土壤粘附动态规律, 进行了试验优化、分形分维、灰色关联和神经网络等多种方法的量化分析^[21~23].

土壤粘附机理与规律的研究进展, 有力地促进了地面机械脱附减阻的研究. 人们针对触土部件的结构特点和作业条件, 开发了多种脱附减阻的新方法, 如改善粘附界面的充气、充液和加热法, 电渗法, 机械法, 表面改形与改性法等, 但仍满足不了工程实际的需求. 随着经济的发展和技术的进步, 地面机械的种类和数量日益增多, 应用范围日趋扩大, 其触土部件的减粘脱附显得更为重要, 各国进一步加强了脱附减阻理论研究与技术开发. 俄罗斯重视行走机械和建筑工程机械的减粘研究; 欧洲国家曾力图研制无粘附源的曲面铲斗; 美国已将电渗电压降至 45 V. 此外, 日本正进行超声波减粘研究, 美国利用激光进行表面清污, 德国正研发新的防粘材料等. 这些工作都将对把地面机械脱附减阻的研究推向更新、更高层次产生重要意义.

地面机械触土部件的多样性, 黏湿土壤的多变性, 粘附界面的复杂性和粘附过程变化的随机性, 使得脱附减阻的研究异常困难, 研究任务还相当艰巨. 随着科学技术的进步, 机械仿生学显示出巨大的威力, 日益被人们所重视. 近年来, 美国、欧盟等正将仿生改形技术应用于航空与航海; 日本等国在致力于研究与开发仿生防粘剂; 我国吉林大学正致力于土壤动物优异的遇黏不粘功能的仿生研究, 开辟了脱附减阻研究一个崭新的领域, 其研究成果展现了令人鼓舞的前景.

2 生物脱附减阻基本原理

自然界中许多动物和植物, 无论是生活在土壤中和陆地上, 还是生活在水中和空中, 虽然其生存条件差异很大, 但其中绝大多数都会遇到粘附问题. 它们经过亿万年在各自生存环境中的进化优化, 逐渐具有各种特殊的防粘脱附功能. 如蝴蝶等昆虫的翅面具有很好的疏水性; 海绵、软珊瑚等水中动物可分泌防粘的化学防水剂; 海鸥等鸟类羽毛特殊的几何结构具有优良的疏水减粘效果; 荷叶、苇叶等植物叶片具有优异的自洁功能, 等等.

土壤环境中, 生物的防粘减阻特性集中体现于土壤动物. 在自然选择的影响下, 土壤动物最能适应的种类, 表现出有机体与其生存环境的高度统一. 如软体动物蜗牛(*Fruticicda*), 环节动物蚯蚓(*Eisenia foetida*), 节肢动物蝼蛄(*Gryllotalpa*)、蚂蚁(*Formicidae*)及蜣螂(*Catharsius molossus* L.), 哺乳动物穿山甲(*Manis pentadactyla*)等, 却完全适应黏湿的土壤条件, 活动自如而毫不粘土. 土壤动物不仅行走和“工作”(如掘土、挖土等)两部分都具有明显的脱附减阻功能, 而且其整个体表或全身都有脱附减阻的能力. 研究表明^[17,24], 土壤动物的这一特殊功能, 是多个因素协同作用的结果, 包括生物的形体、形态、结构、构成(或材料、组成)、柔性、电渗、润滑及其协同、耦合、复合、嵌合等. 上述因素以及它们间的相互协同作用, 形成了生物体自身具有的主动脱附减阻功能特性.

生物非光滑. 土壤动物体表普遍存在几何非光滑特征^[25~27], 即一定几何形状的结构单元随机地或规律地分布于体表某些部位, 结构单元的形状有鳞片形、凸包形、凹坑形、刚毛形和波纹形等, 如图 1 所示. 同一土壤动物体表不同部位呈现的几何非光滑形态各异, 这与土壤动物对环境适应的生物进化过程, 特别是与不同部位的触土方式有关. 几何非光滑结构单元在力学特性上可表现为刚性的、弹性的或柔性的. 在尺度上, 也有所不同, 可分为宏观非光滑和微观非光滑. 土壤动物非光滑体表的减粘降阻功能特性可通过数学模型表达^[28], 其非光滑体

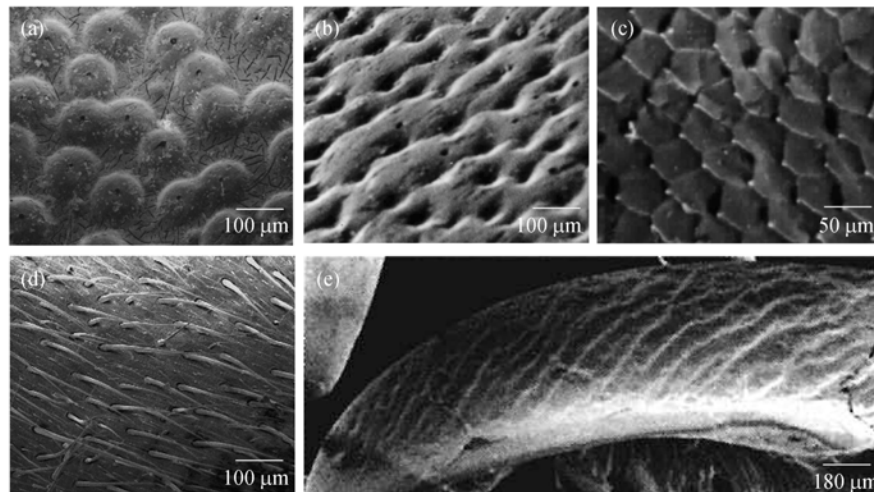


图 1 土壤动物体表的非光滑形态

- (a) 蜣螂头部(凸包形); (b) 步甲胸节背板(凹坑形); (c) 蚂蚁腹部(鳞片形);
(d) 蝼蛄背板(刚毛形); (e) 陆甲鄂部(波纹形)

表与土壤相互作用可产生微振效应、水膜不连续效应和界面空气膜效应, 不仅使粘附界面产生一定频率和振幅的微动, 减少与土壤的接触面积和静接触时间, 还使粘附界面的水膜呈不连续分布, 使动物体表与土壤间产生局部空气膜, 从而减小土壤与动物非光滑体表的粘附力和摩擦力。

生物柔性. 田鼠(*Microtus*)、蛴螬(*Holotrichia diomphalia*)等土壤动物体表具有柔性^[3], 呈现出一维、二维和三维的多种柔形, 使生物体本身的不同部分, 可进行非线性大变形, 并能在外力作用下恢复原形, 如图 2(a)所示. 生物柔层还会储流通过, 造成土壤对柔性表面无法压实, 降低负压, 有效减少柔性表面的任一接触单元与土壤之间的连续接触时间, 使粘附界面的粘附力减小; 并通过柔性单元的相互揉动、移动、转动、振动和波动等, 使与其粘结的土壤被脱离. 生物柔性变形还会吸收一部分能量, 使系统中用于粘附与摩擦的能量减少, 从而减小柔性体表的滑动阻力, 如图 2(b)所示.

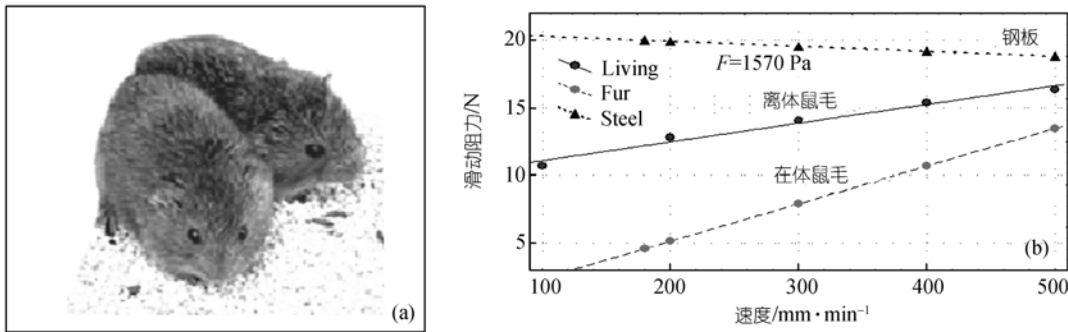


图 2 土壤动物体表的柔性特征
(a) 田鼠; (b) 田鼠柔性体表的土壤滑动阻力明显减小

生物电渗. 通过对土壤动物的生物电测试, 发现与传统分离式电渗完全不同的生物表面整体电渗现象^[29], 如图 3 所示. 蚯蚓等土壤动物运动着的体表部分受到土壤作用产生局部变形, 引发出体表动作电位, 相对于未运动体表部位呈负电位, 正极与负极在同一表面. 当体表多个部位受到刺激, 就产生多处分布的负电位区. 由于正负电位区距离短, 电位差使靠近体表的水化阳离子向接触区流动, 产生电渗现象, 改善界面水润滑, 从而降低界面水膜张力和黏滞力, 使土壤粘附力和摩擦力减小.

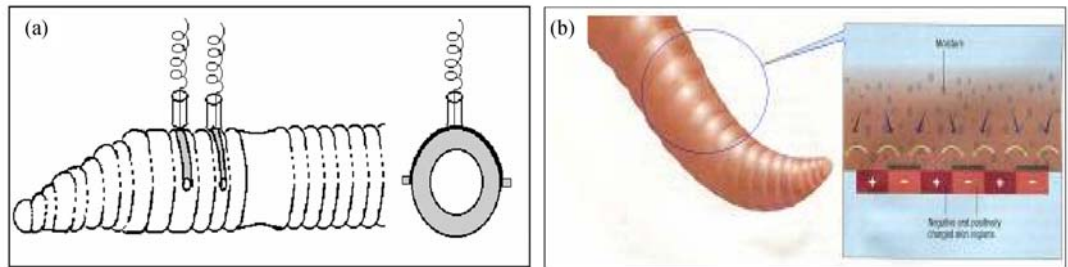


图 3 生物电渗效应
(a) 蚯蚓体表生物电测试; (b) 蚯蚓体表电渗原理

生物构形。 生物与其环境介质和生存条件长期相互作用, 促使其进化出高度适应生存环境的构形^[30]。土壤动物构形适应土壤环境的主要进化趋势为: 躯体变小, 体形细长, 上下扁平, 挖掘附肢强大。研究表明, 蝼蛄、穿山甲、黄鼠等掘土能力强、松土效率高的挖掘动物, 其爪趾具有特殊的几何曲线构形和楔形结构, 如图 4 所示, 能够有效分散沿掘进方向的应力, 减少挖掘阻力, 弱化下部土壤扰动, 强化上部松土效果; 尤其当爪趾前伸量与掘土深度比值达 0.6~0.9 时, 松土效果最好, 如图 5 所示。

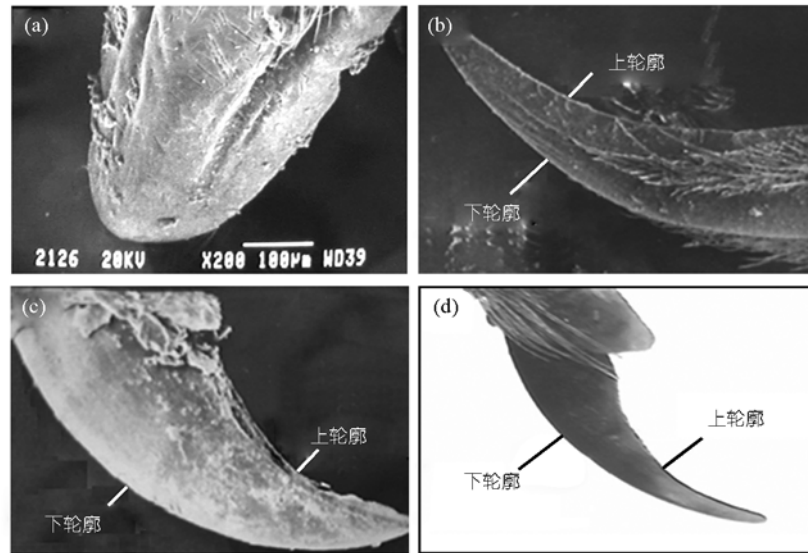


图 4 典型土壤动物爪趾构形

(a) 蝼蛄前足最大趾尖端俯视; (b) 蝼蛄前足最大趾侧视; (c) 小鼠前爪中趾侧视; (d) 达乌尔黄鼠前爪中趾侧视

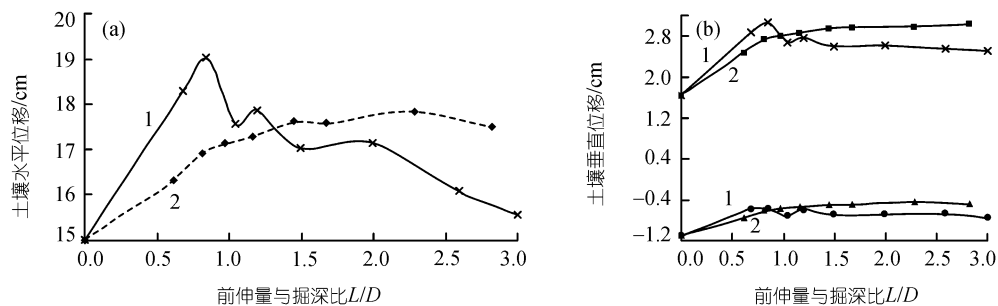


图 5 固定驱动力下小鼠爪趾曲线与直线部件掘土效果的有限元分析结果

(a) 土壤水平位移的有限元分析; (b) 土壤垂直位移的有限元分析. 1-小鼠爪趾曲线; 2-直线部件

生物润滑。 蚯蚓、泥鳅(*Misgurnus anguillicaudatus*)等土壤动物还会分泌具有润滑功能的体表液^[31]。蚯蚓体表分布着能自动调控开启和关闭的多个背孔, 需要润滑时, 就会分泌体表液。体表液是一种以有高滞留性的黏蛋白为主溶液的稀溶液, 它与体表、土壤一起构成三层界面系统, 即体表层、体液层和渗有体液的土壤层, 如图 6 所示。体表液提供了一个弱剪切层, 在土

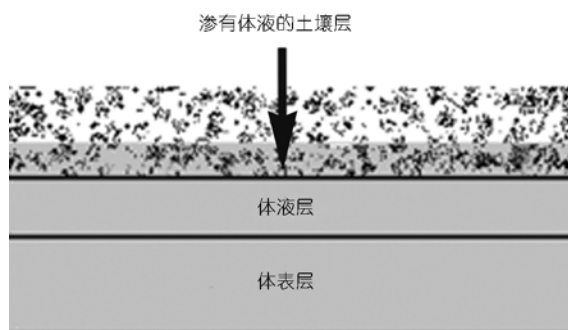


图6 三层界面系统示意图

壤动物体表与土壤层之间形成润滑界面,可降低土壤对动物体表的粘附。生物润滑、生物电渗和生物体表柔性对蚯蚓的减粘降阻具有多元耦合作用。

尚需指出,土壤动物减粘脱附的方式和途径,决不限于我们已认识到的上述几个方面,还有许多奥秘有待进一步探索和揭示。不仅如此,我们发现,生物还具有更多对工程有重要意义的功能特性,如自洁、耐磨、抗疲劳、抗冲蚀、降噪、隐身等^[32~35]。随着理论研究的逐步深入和先进测试技术的不断涌现,人们对生物功能特性机理的认识,会越来越深入,越来越全面,从而使工程仿生学的生物模式越来越丰富,生物学基础也越来越坚实。

3 脱附减阻仿生理论、技术与应用

生物体作为有机整体,其自身具有高度自适应协调控制能力,土壤动物优异的脱附减阻功能就是上述各种因素高度调控的结果。不同的生物在不同的生存环境中,不仅其脱附减阻方式的调控程度会不同,而且侧重点也会不同,这些都是仿生研究的天然蓝本。对于脱附减阻仿生而言,人们既可以独立对其某一方面或某一个因素进行单元仿生,也可以同时模拟生物脱附的多个方面或多个因素进行多元耦合(协同)仿生。进行单元仿生时,特别要注重模拟那些对生物脱附减阻起主要作用的因素。基于生物脱附功能原理和土壤粘附机理与规律,吉林大学研究人员提出了生物模本原理、相似性原理、需求性原理、比较优化原理和可实现性原理等脱附减阻仿生的基本理论,并从多方面开展了单元仿生和多元仿生的系列性研究,主要有:构形仿生、形态仿生、结构仿生、柔性仿生、材料仿生、电渗仿生、润滑仿生、耦合(协同)仿生等,并已取得明显成效。下面主要介绍形态仿生、柔性仿生、电渗仿生、构形仿生和耦合(协同)仿生。

3.1 形态仿生

在单元仿生中,形态仿生,特别是非光滑形态仿生,已成为国际工程仿生领域研究的前沿与热点。美国重点研究海豚、鲨鱼和鲸鱼等大型水中动物体表形态特征^[36],并进行沟槽等形态仿生减阻研究;德国重点研究荷叶等植物叶片表面形态,并进行微凸形态仿生防粘自洁研究^[37];我国重点研究土壤动物体表形态功能,并进行非光滑脱附减阻仿生研究^[38~40]。

非光滑形态仿生, 首先, 优选非光滑生物模本, 运用相似理论建立相应的非光滑仿生模型; 然后, 通过计算机模拟和特征参数优化, 设计出仿生非光滑表面; 最后, 应用研究的各种成形工艺和技术, 制造出所设计的仿生非光滑形态.

例如, 根据地面机械耕作部件的运动学与动力学特点及其土壤粘附规律, 优选出凸包形非光滑形态模本, 进行脱附减阻仿生设计. 研究发现^[41], 蛭螂前胸背板表面为凸包非光滑形态: 凸包底圆直径为 d , 服从正态分布; 凸包在任一方向上的线密度为 $N=a+bL$ (L 为该方向计量长度, a 和 b 为系数); 凸包位置服从随机均匀分布. 基于上述形态参数的提取和定量统计以及与耕作部件的仿生类比、演化计算, 我们建立了仿生非光滑表面关于形态参数, 即非光滑单元体形状(此即凸包)、尺寸、分布和数量的仿生模型. 根据仿生模型, 针对非光滑形态特征参数和试验(约束边界)条件, 通过试验优化、计算机模拟、分形分析、有限元分析、频域分析、二阶谱矩及其统计不变量分析等多种优化与分析方法^[42-44], 构建仿生非光滑的最佳生态环境, 设计出优化的仿生非光滑形态, 如图 7 所示. 对于地面机械耕作部件的宏观仿生非光滑表面, 研发了特殊的成形方法, 如特制焊条的堆焊、异质材料钎焊和辗锻/冲压与热处理一体化整体成形等; 对于某些工程领域的微观仿生非光滑, 则采用逆向工程、激光雕刻、化学腐蚀雕刻、纳米模板和多元耦合等成形方法. 然而, 完全能保证仿生非光滑设计要求的理想的制造技术, 还有待进一步研究与开发.

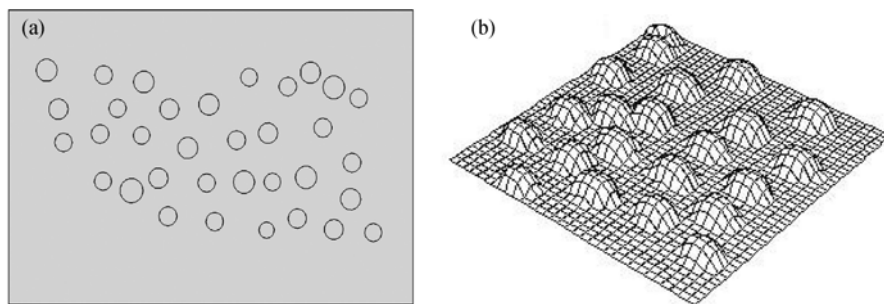


图 7 仿生非光滑表面计算机模拟

(a) 二维模拟; (b) 三维模拟

3.2 柔性仿生

模拟生物体表柔性特征构造人工柔性系统即为柔性仿生. 柔性仿生的实质, 是以非刚性动态柔性系统实现柔动脱附效应, 达到界面粘附系统能量耗散小、脱附减阻成效大的目的. 吉林大学基于生物柔性脱附减阻原理, 建立了柔性系统脱附减阻仿生模型; 并以触土部件粘附和阻力最小化为目标, 通过对穿山甲、蚯蚓和马陆等动物柔性体的仿生组合, 仿生类比和仿生优化, 提出了柔性仿生结构的设计方法, 研发了链布式、链条式与螺旋网式柔性衬和柔性辊的设计制作技术^[45-47], 如图 8 和图 9 所示.

表 1 列出柔性仿生中刚性与柔性结构单元的组合方式及其仿生设计思路. 刚性单元与刚性单元的 2 维织构形成 2-3 维链布式柔性仿生结构, 其设计原理在于优化结构单元的形状、尺寸、

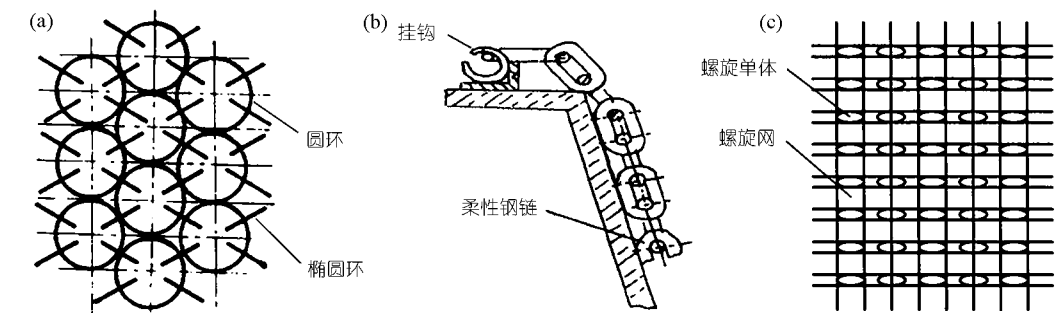


图 8 仿生柔性表面示意图
(a) 链布; (b) 链条; (c) 螺旋网

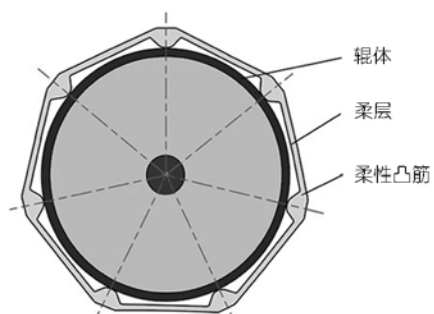


图 9 仿生柔性镇压辊

连接方式、密度及其分布,可在任一方产生无约束柔性变形,具有转动、移动、伸缩、蠕动等柔动特性,真正实现此种仿生织构的最佳柔度、柔层和柔动.刚性单元(组)与柔性单元组或空间间隔的 1-2 维织构形成链条式 2 维柔性仿生结构,其设计原理在于柔层中单元组相对独立,单元组间有一定间距,易实现横向摆动,在其水平面内具有较大柔度,可形成合理的柔层和柔动,并充分利用卸载物料的重力,有效实现柔性动态脱附.螺旋网式仿生柔性结构采用既轻又韧的柔性螺旋单元经 2 维编制而成,在柔层水平方向和垂

直方向具有移动柔性、转动柔性、振动柔性及波动柔性特征,可使松散黏湿物料受到隔离、柔搓、撕剥、抖动、折转以及渗水透气作用,大大改善粘附界面接触条件.仿生柔性辊的设计思路,是在具有合适柔性的外套内表面上优化设计若干形状、尺寸和间隔合理的凸筋,凸筋与辊体接触,既起到支撑柔性外套作用,又使柔性外套与辊体之间有一定间隙,形成适宜的柔层和柔度,保证柔性外套、凸筋、辊体形成柔性工作结构,且具有 3 维柔动效应.

表 1 刚性、柔性单元不同组合方式及其仿生设计

生物柔性组合	单元组合	仿生设计	空间维数	
			制作时	作业时
穿山甲 (鳞片+鳞片)	刚性单元+刚性单元	链布式柔性衬 (钢环+钢环)	2	3
穿山甲 (鳞片+肌体)	刚性单元+柔性单元	链条式柔性衬 (钢链+间隔空间)	1	2
		柔性辊 (刚性轮+非光滑橡胶套)	2	3
蚯蚓 (体节+体节)	柔性单元+柔性单元	PET 螺旋网 (PET 网+ PET 网)	3	3

3.3 电渗仿生

用于地面机械脱附减阻的传统电渗系统, 都是将正极和负极分别置于两个不同的表面, 两极间距大, 需较高的电渗电压, 一般为 45~250 V^[48], 电渗效果不理想, 且工作也不安全. 基于生物表面电渗现象, 吉林大学提出了整体表面低压仿生电渗原理, 将正负极布置于同一表面, 与触土面形成一体, 电渗电压降至 12~24 V^[49]; 同时, 开发了不同类型仿生电渗的设计技术, 如图 10 所示.

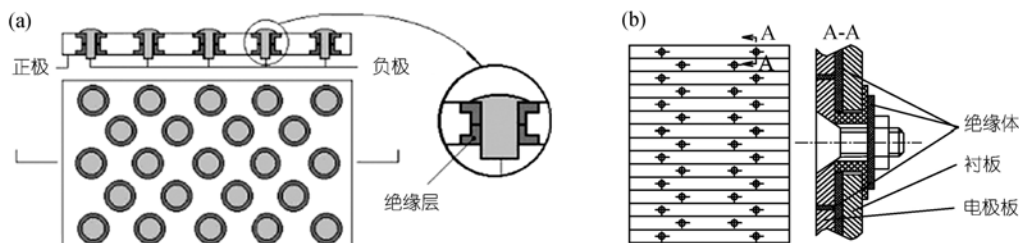


图 10 仿生电渗原理及其设计

(a) 球冠形仿生电渗原理及设计; (b) 条纹形仿生电渗表面

通过大量的电渗试验和统计分析, 建立了电渗效应(以粘附力为指标)关于电极形状、尺寸、分布以及电压、时间等因素的回归模型^[50], 并进行了仿生电渗系统的优化.

研究表明, 对于不同的黏湿物料, 应用不同类型的仿生电渗, 会产生不同的电渗效果. 因此, 在仿生电渗系统设计时, 要充分考虑电极的形状、尺寸与分布, 即需要优化正负极面积比值 λ . 例如, 对于含水量为 20% 左右的一般黄黏土, 若采用凸包形正极的仿生电渗系统, 由计算知, 其 $\lambda=1:9$; 而对于含水量为 12%~13% 的煤粉, 若采用条纹形正极的仿生电渗系统, 则由计算知, 其 $\lambda=1:2$.

在具体设计时, 还要注意地面机械触土部件的作用方式和作业状态. 仿生电渗在触土面相对运动速度较小或准静态的界面粘附系统, 具有明显优势和大的应用潜力.

3.4 构形仿生

构形仿生, 亦即体态、形状、外形仿生, 源于人类祖先朴素的形状相似仿生理念. 尽管迄今难以追溯到哪个生物原型启发了构形仿生, 但近代飞行器、潜艇等的外形设计均来自对鸟类、昆虫、鱼类等生物体构形的观察所产生的灵感. 模拟生物形体进行仿生减阻一直是国际上研究的热点, 但大多限于流体介质, 而在土壤介质中的研究, 则罕见报道. 吉林大学模拟土壤动物爪趾的特殊构形及其高效松土原理, 提出了包含松土部件楔形、楔角和特殊曲线形铲柄的系统仿生设计概念, 研发了仿生松土部件结构参数与工作参量一体化设计及其优化技术, 并实现了一体化成形制造^[51].

3.5 耦合(协同)仿生

在生命进程中, 生物功能的实现很少是靠生物体单一部分或单一因素完成的. 事实上, 是

生物体两个或两个以上的不同部分协同作用或不同因素耦合作用的结果。这种生物协同作用和耦合作用现象,在生物界普遍存在。例如,穿山甲胸背部的鳞片和爪趾的协同作用,使其具有明显的脱附减阻和耐磨功能;荷叶、蝴蝶翅面等的自洁防粘特性,是由它们的表面非光滑形态、微/纳复合结构和低能材料等三个因素耦合实现的;沙漠蜥蜴优异的抗冲蚀功能,是其体背硬质鳞片非光滑形态与多层组织柔性相互耦合的结果。

基于生物耦合原理的多元耦合仿生,较单元仿生更接近于生物原型,能更有效地实现仿生设计的功能要求,甚至可以解决单元仿生难以解决的问题。例如,非光滑单元形态仿生可有效解决动态界面粘附系统脱附减阻问题,但却不能解决静态界面粘附系统防粘自洁问题。但进行二元耦合仿生,将非光滑形态与低能材料耦合或将非光滑形态表面再进行低能化处理,不仅可将高能亲水表面转变为低能疏水表面,而且可大大改善表面防粘自洁功能特性。如果将非光滑表面形态进一步微尺度化,或进行三元耦合仿生,即在非光滑形态表面上,再进行微/纳复合结构建造,最后,再进行表面低能化处理,可实现表面疏水再向超疏水转变,真正实现生物防粘自洁功能特性的仿生再现。

3.6 工程应用

针对地面机械脱附减阻的实际需求,我们运用各种单元仿生和多元耦合(协同)仿生的理论与技术,结合地面机械的类型差异、触土部件作业规律和结构特点,制定了不同类型仿生产品开发的基本原则,所研制的4种系列10多个品种的仿生脱附减阻部件,已在农业、建筑、矿山和电力等多种机械上应用。应用表明,这些仿生部件结构简单,能在不影响原机正常作业的条件下,与工作装置同步自动完成预定作业,且成本低、能耗小、效率高、脱附效果好。例如仿生犁壁、仿生镇压辊和仿生电渗落煤斗等脱附率达90%;仿生深松铲较传统铲减阻19%,较日本岛根公司铲减阻6%~8%。

目前,单元仿生和多元耦合(协同)仿生的理论与技术,还在轻工、冶金、地质、医学、军工等众多工程领域和多种非土壤介质条件下,在进行自洁、耐磨、抗疲劳、降噪、隐身等更多生物功能的仿生实现中,发挥着越来越重要的作用。

4 结束语

地面机械在松软地面行驶和作业时面临的粘附和阻力问题,是农业生产和众多工程领域普遍性的技术难题。长期以来,国内外许多研究人员为探索脱附减阻的规律和本质,一直在理论、方法与技术多方面进行研究。

生物在大自然优胜劣汰的法则下,进化成与生存环境高度适应的功能特性。模拟土壤动物高效脱附减阻原理,进行了形态、柔性、电渗和构形等单元仿生和多元耦合仿生,建立了生物脱附减阻理论及其仿生技术体系,研制出多种仿生产品,取得明显成效。大量研究和实践表明,近代工程仿生是地面机械不同于传统理念的高效节能脱附减阻新途径。

地面机械脱附减阻仿生研究已拓展到众多工程领域,并在空气、水、油、岩石等多种非土壤介质的多种功能仿生中呈现明显优势,发展潜力巨大,应用前景广阔。

参考文献

- 1 任露泉, 佟金, 李建桥, 等. 松软地面机械仿生理论与技术. 农业机械学报, 2000, 31(1): 5—9
- 2 任露泉, 陈德兴, 陈秉聪. 土壤粘附研究概述. 农业工程学报, 1990, 6(1): 1—7
- 3 Ren L Q, Wang Y P, Li J Q, et al. Flexible unsmoothed cuticles of soil animals and their characteristics of reducing adhesion and resistance. Chinese Sci Bull, 1998, 43(2): 166—169
- 4 Hendrick J G, Bailey A C. Determining components of soil—metal sliding resistance. T ASAE, 1982, 25(4): 845—849
- 5 Robbins D H, Johnson C E, Schafer R L. Modeling soil-metal sliding resistance. ASAE, Paper, 1987, No. 87: 1580
- 6 Gill W R, VandenBerg G E. Soil dynamics in tillage and traction. Agricultural Handbook. Washington: Department of Agriculture, 1967, No. 316
- 7 孙一源, 高行方, 余登苑, 等. 农业土壤力学. 北京: 中国农业出版社, 1985
- 8 Cong Q, Ren L Q, Chen B C, et al. Using characteristics of burrowing animals to reduce soil-tool adhesion. T ASAE, 1999, 42(6): 1549—1556
- 9 Ren L Q, Yan B Z, Cong Q, et al. Experimental study on reducing adhesion in coal hopper by surface electro-osmosis. Chinese J Mech Eng, 1999, 12(2): 152—159
- 10 Sun S Y, Ren L Q, Tong J, et al. A shovel bucket with steel-cloth pocket by bionics. In: Proc Third Asia-Pacific Conf ISTVS. Changchun: ISTVS, 1992
- 11 贝佛尔 L D, 著. 周传槐, 译. 土壤物理学. 北京: 中国农业出版社, 1983
- 12 Fountaine E R. Investigation into the mechanism of soil adhesion. J Soil Sci, 1954, 5 (2): 251—263
- 13 钱定华, 张际先. 土壤对金属材料粘附和摩擦研究状况概述. 农业机械学报, 1984, 1: 69—78
- 14 陈秉聪. 土壤——车辆系统力学. 北京: 中国农业机械出版社, 1981
- 15 秋山丰, 横井肇. 土壤黏着性的研究(第三报). 日本土壤肥科学杂志, 1972, 43: 9
- 16 张际先, 桑正中, 高良润. 土壤对固体的粘附和摩擦. 农业机械学报, 1986, 17(1): 32—40
- 17 Ren L Q, Tong J, Li J Q, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components: A review. J Agr Eng Res, 2001, 79(3): 239—263 [DOI](#)
- 18 Ren L Q, Deng S Q, Tian L M, et al. The forming mechanism and rules of tangent resistance on the interface between soil and moldboard. In: Prec Joint Meeting 7th Asia-Pacific Conf ISTVS & 25th Ann Meeting Jpn Soc Terramechanics. Changchun: ISTVS, 2004
- 19 Salokhe V M, Gee-Clough D. Coating of cage wheel lugs to reduce soil adhesion. J Agr Eng Res, 1988, 41(3): 201—210 [DOI](#)
- 20 Chancellor W J. Friction between soil and equipment materials. ASAE, Paper, 1994, No. 94: 1034
- 21 任露泉. 试验优化设计与分析. 北京: 高等教育出版社, 2001
- 22 Zhang L, Ren L Q, Tong J, et al. Study of soil-solid adhesion by grey system theory. Prog Nat Sci, 2004, 14(2): 119—124 [DOI](#)
- 23 Ren L Q, Zhang L, Tong J, et al. GA-based analysis of the fractalness of soil-burrowing animal body surface. Int Agr Eng J, 2001, 10(1&2): 13—27
- 24 任露泉, 陈德兴, 胡建国. 土壤动物减粘脱土规律初步分析. 农业工程学报, 1990, 6(1): 15—20
- 25 任露泉, 丛茜, 佟金. 界面粘附中非光滑表面基本特性的研究. 农业工程学报, 1992, 8(1): 16—22
- 26 任露泉, 丛茜, 陈秉聪, 等. 几何非光滑典型生物体表防粘特性的研究. 农业机械学报, 1992, 23(2): 29—34
- 27 Tong J, Ren L Q, Chen B C. Geometrical morphology, chemical constitution and wettability of body surfaces of soil animals. Int Agr Eng J, 1994, 3(1&2): 59—68
- 28 Ren L Q, Deng S Q, Wang J C, et al. Design principles of the non-smooth surface of bionic plow moldboard. J Bionic Eng, 2004, 1(1): 9—19
- 29 孙久荣, 任露泉, 丛茜, 等. 蚯蚓体表电位的测定及其与运动的关系. 吉林工业大学学报, 1991, 4: 18—24

- 30 任露泉, 崔相旭, 张伯兰, 等. 典型土壤动物爪趾形态的初步分析. 农业机械学报, 1990, 2: 44—48
- 31 Ren L Q, Tong J, Li J Q, et al. Soil adhesion and biomimetics of soil-engaging components in anti-adhesion against soil: A review. In: Proc 13th Int Conf ISTVS. Munich: ISTVS, 1999
- 32 Fang Y, Sun G, Wang T Q, et al. Hydrophobicity mechanism of non-smooth pattern on surface of butterfly wing. Chinese Sci Bull, 2007, 52(5): 711—716
- 33 Han Z W, Ren L Q, Liu Z B, et al. Experimental investigation on anti-wear of a bionic non-smooth surface made by laser texturing. In: Proc 2nd Int Conf Design & Nature. Rhodes: ISTVS, 2004
- 34 Zhou H, Zhang Z H, Ren L Q, et al. Thermal fatigue behavior of medium carbon steel with striated non-smooth surface. Surf Coat Tech, 2006, 200(24): 6758—6764 [\[DOI\]](#)
- 35 Ren L Q, Qiu Z M, Han Z W, et al. Experimental investigation on color variation mechanisms of structural light in *papilio maackii menetries* butterfly wings. Sci China Ser E-Tech Sci, 2007, 50(4): 430—436
- 36 Miklosovic D S, Murray M M, Howle L E, et al. Leading-edge tubercles delay stall on humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) flippers. Phys Fluids, 2004, 16(5): 39—42 [\[DOI\]](#)
- 37 Barthoott W, Neinhuis C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surface. Planta, 1997, 202: 1—8 [\[DOI\]](#)
- 38 Ren L Q, Han Z W, Li J Q, et al. Effects of non-smooth characteristics on bionic bulldozer blades in resistance reduction against soil. J Terramechanics, 2003, 39: 221—230
- 39 Ren L Q, Tian L M, Li J Q, et al. The characteristic of drag reduction by biomimetic non-smooth surface. In: Prec Joint Meeting 7th Asia-Pacific Conf ISTVS & 25th Ann Meeting Jpn Soc Terramechanics, Changchun: ISTVS, 2004
- 40 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. Soil Till Res, 2006, 85: 1—12 [\[DOI\]](#)
- 41 Li J Q, Tong J, Ren L Q, et al. Applications of bionics non-smooth surface to reduce draft resistance against soil. In: Proc 14th Int Conf ISTVS, Vicksburg: ISTVS, 2002
- 42 Ren L Q, Tong J, Zhang S J, et al. Reducing sliding resistance of soil against bulldozing plates by unsmoothed bionics surfaces. J Terramechanics, 1995, 32(6): 303—309 [\[DOI\]](#)
- 43 Ren L Q, Li J Q, Chen B C. Unsmoothed surface on reducing resistance by bionics. Chinese Sci Bull, 1995, 40(13): 1076—1080
- 44 Chen B C, Wang G L, Ren L Q. Finite element analysis on the interaction between soil and unsmoothed surface. In: Proc 12th Int Conf ISTVS, Beijing: ISTVS, 1996
- 45 Ren L Q, Li J Q, Tong J, et al. Applications of the bionics flexibility technology for anti-adhesion between soil and working components. In: Proc 14th Int Conf ISTVS, Vicksburg: ISTVS, 2002
- 46 Yang X D, Ren L Q, Cong Q. Experimental study on freezing adhesion of coal dusts. In: Proc 6th Asia-Pacific ISTVS Conf, Bangkok: ISTVS, 2001
- 47 Ren L Q, Han Z W, Tian L M, et al. Characteristics of the non-smooth surface morphology of living creatures and its application in agricultural engineering. In: Proc 2nd Int Conf Design and Nature, Rhodes: ISTVS, 2004
- 48 Clyma H E, Larson D L. Evaluating the effectiveness of electro-osmosis in reducing tillage draft force. ASAE, Paper, 1991, No. 91: 3533
- 49 Ren L Q, Cong Q, Tong J, et al. Reducing adhesion of soil against loading shovel using bionic electro-osmosis method. J Terramechanics, 2001, 38: 211—219 [\[DOI\]](#)
- 50 Ren L Q, Yan B Z, Cong Q. Experimental study on bionic non-smooth surface soil electro-osmosis. Int Agr Eng J, 1999, 8(3): 185—196
- 51 Tong J, Guo Z J, Ren L Q, et al. Curvature features of three soil-burrowing animal claws and their potential applications in soil-engaging components. Int Agr Eng J, 2003, 12(3&4): 119—130