

土壤耕作部件耐磨减阻处理的研究现状

李庆达, 郭建永, 胡军, 张伟, 王宏立, 代洪庆

(黑龙江八一农垦大学 工程学院, 黑龙江 大庆 163319)

摘要: 综述了提高土壤耕作部件耐磨性的多种方法。利用表面处理工程技术, 例如堆焊技术、涂覆耐磨材料、热喷涂技术, 可以在普通基材制成的零部件表面形成一层耐磨层, 磨损时能有效保护零部件, 从而使零部件具有良好耐磨性。由于表面涂层的可重复性, 利用表面处理工程技术还可以修复磨损不严重的触土部件, 提高产品利用率, 减少钢铁资源损失。激光表面强化处理与高能离子注渗两种方法可以改变农机触土部件的晶体结构, 从而提高产品耐磨性。自然界中的生物经过多年进化, 能很好地适应自然环境, 以生物体的轮廓结构为模型, 依据仿生学理论研制的仿生部件可以有效降低土壤粘附率, 达到减粘降阻的效果, 进而减小零部件的磨损量, 间接提高产品的耐磨性能。通过对海豹、鲨鱼等生物表面的研究发现, 非光滑表面比光滑表面具有更好的减粘降阻效果, 将零部件表面处理成非光滑表面能大大提高零件的耐磨性能。

关键词: 触土部件; 耐磨处理; 表面处理; 仿生

中图分类号: TG174.44 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)02-0119-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.02.019

Research Status of Wear Resistance and Drag Reduction Treatment of Soil Cultivation Components

LI QING-da, GUO Jian-yong, HU Jun, ZHANG Wei, WANG Hong-li, DAI Hong-qing

(School of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

ABSTRACT: The work aims to review various methods of improving wear resistance of soil cultivation components. Engineering technology of surface treatment such as surfacing technology, coating wear-resistant materials and thermal spraying technology can be applied to deposit a wear-resistant layer on parts and components made of common base materials, protecting the parts in case of wear, and providing good wear resistance for the parts and components. Due to repeatability of the surface coating, surface treatment engineering technology could be utilized to repair soil-engaging components subject to minor wear, enhance utilization rate of the products and reduce loss of iron and steel resources. Both laser surface hardening treatment and high energy ion implantation could change crystal structure of soil-engaging components on agricultural machinery, so as to improve wear resistance of the products. After years of evolution, organisms in nature could well adapt to the natural environment. Bionic components developed in accordance with bionics theory with outline structure of organisms as model can effectively

收稿日期: 2016-07-12; 修订日期: 2016-08-02

Received: 2016-07-12; Revised: 2016-08-02

基金项目: 高等学校博士学科点专项科研项目(青年教师类)(20122305120005)

Fund: Supported by Special research fund for the doctoral program of Higher Education (Young teachers) (20122305120005)

作者简介: 李庆达(1982—), 男, 工学博士, 副教授, 主要从事农机具加工制造的研究。

Biography: LI Qing-da (1982—), Male, Doctor of engineering, Associate professor, Mainly engaged in agricultural research, processing and manufacturing.

通讯作者: 胡军(1972—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事保护性耕作技术及装备研究。

Corresponding author: HU Jun (1972—), Male, Associate professor, Master tutor, Mainly engaged in the research of conservation tillage technology and equipment.

reduce rate of soil adhesion and achieve the effect of reducing adhesion and resistance, thus reduce abrasion loss of the parts and components, and increase abrasion resistance of the products indirectly. Studies of seals, sharks and other biological surfaces showed that non smooth surfaces had better effect of adhesion and resistance reduction than smooth surfaces. Providing non smooth surface for parts and components can greatly improve wear resistance of parts.

KEY WORDS: soil-engaging parts; wear resistant treatment; surface treatment; bionics

农作物的生长离不开土壤,土壤的状态会直接影响农作物的产量。国内外大量实践研究表明,合理的耕作制度可以有效保持或提高土壤的肥力,增加作物产量^[1-5]。在农业生产中,土壤耕作部件被广泛应用于农业机械中,如深松铲、铧式犁的犁体、耕作机刀片、圆盘耙耙片和开沟机等。土壤耕作部件主要作用是破碎大块或板结的土壤,使粘结的土壤发生分离^[6]。

农业机械化发展给农民带来了很大的帮助,但目前国内农业机械产品寿命低,故障率高。调查结果表明,农业机械触土部件多发生磨损失效和断裂失效,磨损是造成农业机械部件失效的最主要原因,约占农机部件失效的80%^[7]。农业触土部件在实际生产中,由于耕作环境比较复杂,零部件通常会受到外力而使材料发生位移或脱落,这种现象称为磨料磨损;田间耕作机械在工作时往往会受到来自土壤的接触应力,在循环变化的接触应力作用下,零件材料会发生剥落,这种磨损称为疲劳磨损。由于制作零件的材料不达标,冷、热处理不合格等因素,零件表面或内部会产生缺陷,在受到循环变化的外力作用或受到突然的冲击力作用时,工作部件发生断裂,称为断裂失效^[7-9]。

据资料显示,磨损失效占材料和能源损失的60%~80%,每年磨损的钢材占到钢材总量的十分之一左右,造成了巨大的经济损失。前苏联每年因为磨损造成的经济损失达120~140亿卢布。因为零件磨损失效,美国每年也有高达1000亿美元的经济损失。在农业机械、矿山机械等行业中,因设备与矿石、沙土等物料的长期接触,中国每年有超过1000亿元人民币的经济损失,金属能源消耗达300万吨以上^[10]。

为了减小磨损造成的损失,国内外目前采取了多种多样的方法。例如:在普通材料制成的零件表面或磨损不严重的零件表面,利用表面堆焊技术或激光涂敷技术形成功能性表面,提高零部件的耐磨性,使磨损的零件循环利用,既减少了经济损失,又减少了能源消耗;利用激光处理技术使材料的内部结构发生变化,提高其耐磨性能。除此之外,一些学者从仿生学的角度,通过结构仿生或利用非光滑表面减阻耐磨的特性,研制出了仿生机械,有效改善了磨损量大的问题。

1 表面耐磨处理的研究现状

表面处理工艺在农业机械触土部件耐磨处理方面具有广阔的应用前景,文中主要对表面堆焊、熔覆、热喷涂、激光强化、高能离子注渗这五种表面处理工艺进行总结,分析了表面处理工艺在农机触土部件耐磨处理方面的应用前景。

1.1 表面堆焊

通过焊接的方法,使具有一定性能的材料在基材表面形成一种耐磨层,这种工艺处理过程叫作堆焊。研究表明,堆焊技术处理过的零件表面具有很好的耐磨性能^[11]。

我国农业机械中土壤耕作部件用到的主要材料是60Si₂Mn。2012年,翟鹏飞、邢泽炳等人在60Si₂Mn钢基体上利用堆焊技术形成了合金铸铁堆焊层,通过磨损试验以及从原理上利用显微硬度计和金相显微镜分析了基材表面堆焊涂层的显微结构和作用,结果表明:堆焊层强度大,韧性高,组织细密,耐磨性好^[12]。

2015年,S. V. Raikov等人通过电子显微镜扫描发现,在钢材表面堆焊的耐磨涂层存在多层结构,包括表面涂层本身、过渡层和热影响区。实验结果表明,在钢材表面形成这样的涂层,能在涂层和钢材表面形成弹性应力状态,有效减小磨损^[13]。同年,M. Benegra、A. L. B. Santana等人比较了在不锈钢表面分别利用等离子堆焊涂层与超音速火焰喷涂得到的镍铝合金涂层,磨损试验结果表明:等离子堆焊镍铝涂层的耐磨性优于超音速火焰喷涂涂层,并且等离子堆焊涂层未观察到热处理过程的表面氧化,主要原因是镍铝化合物是众所周知的抗高温环境材料^[14]。仍然是在同年,董升涛利用等离子弧堆焊技术,在普通国产球墨铸铁深松铲尖的表面制备了铁基-碳化钨耐磨涂层,田间试验结果分析发现:碳化钨在Fe90合金中的合适配比为40%,耐磨性能较普通球墨铸铁母材铲尖提高了5倍^[15]。

1.2 熔覆耐磨材料

激光熔覆可以在廉价的基材上形成耐磨、耐热、耐蚀的合金层,有效改善基材的耐磨性能。与表面堆

焊技术相同,利用激光熔覆技术可以对普通基材或磨损不严重的基材的受损表面进行修复,使零件循环利用,大幅度减小经济损失。例如:在优质碳素结构钢 10 号钢的钢材表面,利用激光熔覆技术可以形成具有良好耐磨性能的 TiB_2 陶瓷涂层;应用连续 CO_2 激光在不锈钢表面可以制得由 WC 、 TiN 、 TiB_2 微粒组成的涂层,取得很好的耐磨、耐蚀、耐热效果^[16-17]。

熔覆镍基涂层的成本较高,为了增大经济效益,降低生产成本,2004 年,丛锦玲、李志鑫、王维新等人把熔覆镍基涂层改为熔覆铁基涂层,实验对象是农机耕作部件犁铧。经过改进后的犁铧在博州地区某农场进行了实地试验,相比较实验室的数据更加准确。试验数据显示,当未经过处理的犁铧完全报废时,熔覆铁基涂层的犁铧磨损量仅为 20% 左右,说明熔覆铁基涂层能有效提高犁铧的耐磨性。此外,该技术具有成本低、设备简单的优势^[18]。

Ni60A 不仅具有熔点低、自熔性好的优点,而且能对金属起到良好的润滑作用,除此之外,它还有良好的韧性及耐磨性能。铸造碳化钨具有耐磨性好、硬度和强度高优点。2005 年,郝建军、马跃进等人将两者结合到一起,利用熔覆技术对农业机械部件犁铧进行改进。试验结果表明:镍基固溶体与铸造碳化钨能相辅相成,互相强化,有效提高两种材料自身的耐磨性能。该研究的实验对象为因磨损而报废的犁铧,研究表明利用熔覆技术能使犁铧得到循环利用,大大提高经济效益^[19]。

中国农业机械刀具普遍存在磨损速度快、失效频率高的缺陷。为了改善这一现状,2013 年,赵建国、李建昌等人利用反应氮弧熔覆技术对农机常用的钢材 65Mn 钢进行了改良。他们以工业氮气作为原料,制备了 TiCN/Fe 金属陶瓷复合涂层,与传统材料制成的刀具进行磨损试验对比后发现,涂层近表层的硬度高达 Q235 的 3 倍以上,耐磨性能是普通 65Mn 的两倍。此外,当熔覆速度比较大时,涂层表面的质量欠佳,但硬度较大;当熔覆速度减小时,结果相反^[20]。

1.3 热喷涂表面处理

根茬粉碎还田机、旋耕机刀片等农业触土部件,为了达到破碎土壤、切割根茬和秸秆等目的,会经常与根茬秸秆、土壤中的砂石等发生接触,非常容易发生磨损失效。刀具磨损之后不仅会严重影响切碎根茬、秸秆的质量,还会增大阻力,增加油耗。目前我国农业机械方面的刀具基体主要为 65Mn 钢,但 65Mn 钢制成的刀具从经济价值和耐磨性能方面看,都不能完全满足使用要求。2005 年,郝建军、许志兴等人利用热喷涂技术对 65Mn 钢制成的灭茬刀具(如图 1)进行了改进,通过钢砂来模拟田间的农业机械作业环境,并对磨粒磨损试验结果进行了分析。他们发现:相比较普通的 65Mn 钢,喷涂了 NiWC 合金的 65Mn 钢能将磨损量降低到一半左右,除此之外,基材与喷焊层之间没有分层现象及裂纹,结合性能良好^[21]。

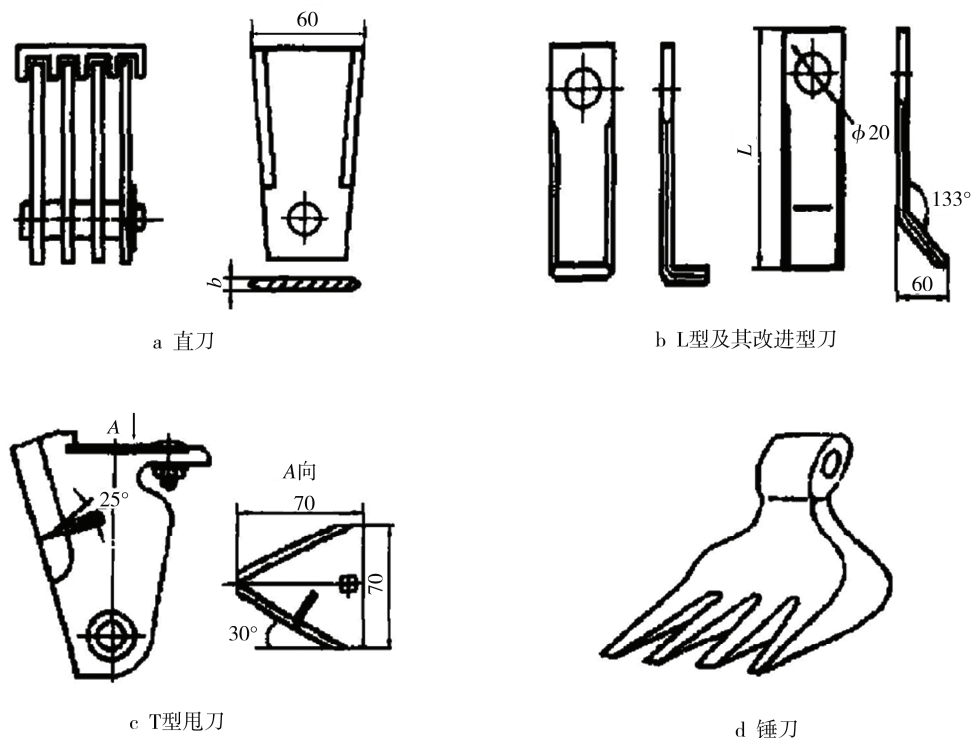


图 1 4 种根茬还田刀具形状示意图^[21]

Fig.1 4 sorts of the cutting tool in the field of root stubble^[21]: a) straight cutter; b) L type and improved cutter; c) T type cutter; d) hammer claw type cutter

为了改善钢材的耐磨性和耐腐蚀性,在工业机械及农业机械生产中经常会创建功能表面。目前为了保证表面的耐磨性和耐腐蚀性,最广泛的商业表面处理是创建功能性硬铬镀层,但镀硬铬工艺对人体健康和环境有不利影响。2011年,S. H与F. Z等人通过研究发现,热喷涂技术可以达到与镀硬铬工艺相同的目的,而且对人体和自然不存在影响。他们还根据四种不同的磨损性能试验得出结论:在所有的测试中,超音速喷涂硬质合金涂层表现出优异的性能,建议可以替代传统表面处理^[22]。

1.4 激光表面强化处理

以电子束、激光、离子束等为代表的表面强化处理技术是一项改进型新技术,目前重视发展这门技术的国家越来越多。表面强化处理技术的主要优点有:不需要淬火介质、淬火硬度高、加工速度快、无污染等^[23]。

40Cr钢和9SiCr钢是农业机械生产中常用的材料,常规提高40Cr钢耐磨性的方法是900℃淬火。陈卓君、张祖立等人利用CO₂横流式激光器对40Cr钢和9SiCr钢进行激光强化处理,并仿照农业触土部件的工作环境在不同土壤中进行磨粒磨损试验,通过实验数据得出:激光强化处理能有效提高试样的耐磨性能^[24-27]。

江苏大学的花银群等人对45钢进行了激光淬火处理和激光冲击处理,有效提高了45钢的耐磨性能,相比较渗氮处理的45钢,耐磨性能提高3倍^[28]。

1.5 高能离子注渗

高能粒子注渗技术是表面改性技术的一种,大量实验数据表明:高能离子注渗WC处理的钢材,耐磨性能普遍提高3~6倍,在农业机械生产中有很大的应用前景^[29-30]。

邢泽炳等人^[31]利用高能钨离子注入技术,以农业机械中的犁铧为实验对象,通过光学显微镜观察、X射线衍射分析、显微硬度计以及磨粒磨损试验机测试等方法,研究了犁铧钢经过离子渗碳化钨处理后的耐磨性能。实验结果表明:在同样大小的载荷下磨损4000圈以后,经过处理的试样比没有经过处理的原始试样的累积磨损量降低了75%~80%。这说明离子渗碳化钨技术在提高农业机械耐磨性方面有很大的前景。

从以上多个实例可以看出,表面处理技术在农机触土部件耐磨处理方面有良好的应用前景,并且利用堆焊、热喷涂等方法可以修复磨损不严重的触土部件,使零部件循环使用,降低生产成本。但在实际应用中,磨损后的零件如何进行修复存在较大的困难,主要原因是堆焊、热喷涂、熔覆等设备较大,不适宜在野外进行修复,而从农民手中收购进行统一修复处

理会增加运输成本。针对这一现象,从零部件自身进行优化成为提高农机触土部件耐磨性的一个趋势。仿生学在近年来发展速度较快,在农机触土部件耐磨处理方面提供了广阔的新思路。

2 耐磨减阻仿生耕作部件的研究现状

2.1 结构仿生

由于人畜的踩踏或机器的碾压,耕作土壤会被过度压实,严重影响农作物的生长。为了改善这一现象,深松技术在国内外的耕作生产中开始被广泛应用。深松作业的优势在于:1)可以使大块、粘结的土壤破碎,改善土壤的结构;2)可以疏松坚实的土壤,使雨水更容易流入土壤底层,提高土壤的蓄水能力;3)使土壤的通透性提高,疏松的土壤便于与外界进行气体交换,同时增加土壤中的空气含量,促进农作物的生长,达到高产的目的^[1,32]。但由于直接作用于土壤,深松铲的磨损速度快,磨损量大,其耐磨减阻技术亟待解决。

鼯鼠长期生活在地下,经过多年的进化,在挖土方面具有非常高的效率,有“活的挖掘机”之称,一只成年鼯鼠一晚上能够挖掘出超过90米的地道,地道长度约为它体长的900倍^[33]。其他一些土壤洞穴动物,如小家鼠、乌达尔黄鼠、穿山甲、蜣螂等,在多年的进化中,它们的肢体结构等产生了明显的优势,在挖掘过程中会受到最低的切削阻力,并且具有良好的减粘、降阻功能^[34-37]。

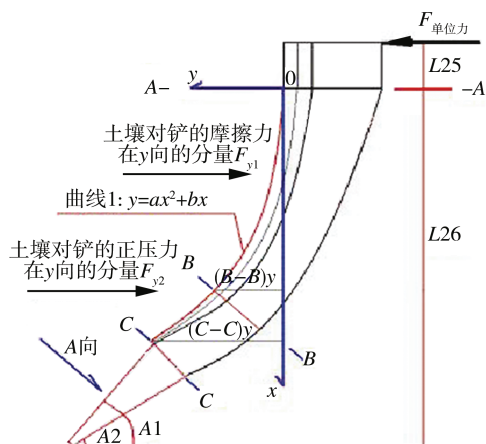
陈东辉^[38]通过研究分析家鼠的爪趾结构,设计了仿生深松铲柄。该仿生深松铲柄的内外准线采用了家鼠爪趾的外部轮廓,根据田间试验的结果可以得出:改变后的触土曲线可以大大减小耕作阻力,与改良前的深松铲相比,减阻率为5%~12%。朱凤武^[39]等人利用有限元法及软件研究分析了金龟子的爪趾结构(如图2、图3),研究发现在相同耕深和耕速的条件下,入土角度为27.5°时,深松铲所受的耕作阻力最小,这与金龟子爪趾的切削角度吻合^[28]。



a 雄性金龟子 b 雌性金龟子

图2 金龟子的生物原型^[39]

Fig.2 Biological prototype of beetle^[39]:
a) male beetles, b) female beetles

图 3 依据金龟子的爪趾结构设计的仿生深松铲^[40]Fig.3 Chafer subsoiler designed based on the bionic claw structure^[40]

有研究表明, 装载和挖掘机械的触土部件表面的 20%~30% 被土壤粘附, 严重影响机械的生产能力, 根据土壤的物理性质不同, 这些机械的生产率平均下降 30%, 能量损失提高了 30%~50%。一些土壤动物通过弹性变形降低土壤的粘附力, 有研究者通过研究土壤动物的弹性变形特性, 设计了一种仿生柔性铲。改良后的仿生柔性铲的土壤粘结量减少了 15.85%, 土壤剪切力降低了 59.5%^[40]。

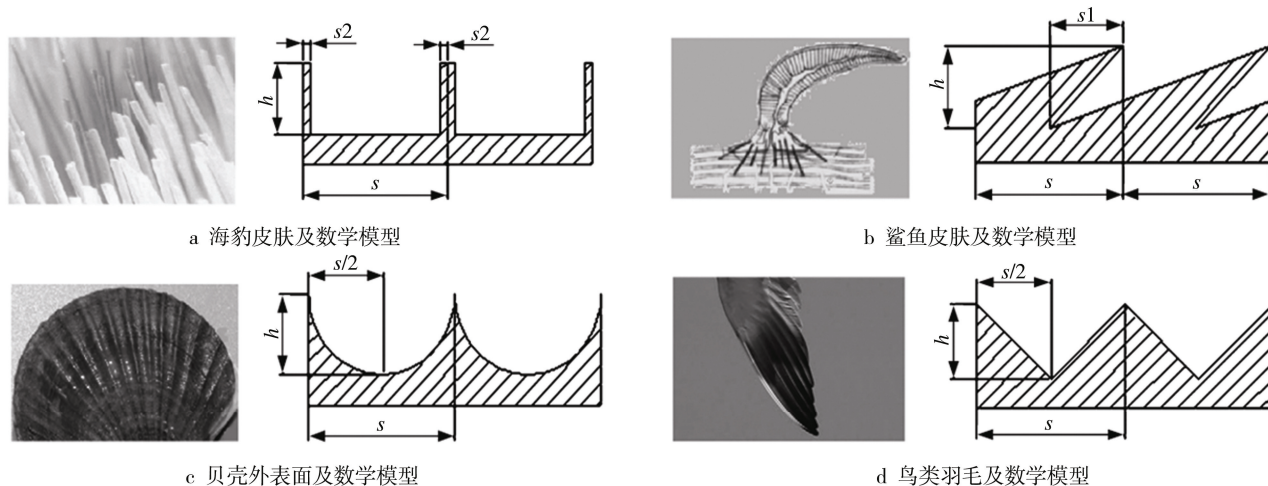
2.2 表面仿生

自然界中的任何表面都可以归纳为光滑表面

和非光滑表面两大类。受传统观念的影响, 大多数人会认同“接触表面越光滑, 物体所受到的摩擦力越小, 物体运动起来越快”这一理论。近年来, 随着仿生学的发展, 多位学者经过研究发现, 这一理论并不是一直适用: 在粘湿条件下能够减小摩擦阻力的并不是光滑表面, 而是非光滑表面。随着进一步的研究, 科学家发现对于空中飞行生物、水中生物及土壤生物而言, 粘附和阻力最小的是某种非光滑表面^[41]。

根据仿生学的观点, 生物的结构、器官和功能是生物长期进化而形成的最佳结果, 除此之外, 生物的非光滑表面也是为了适应环境而长期进化的结果。早在 1990 年, 吉林大学的学者就发现生物的非光滑表面在耐磨减阻方面具有良好的效果, 例如穿山甲非光滑形态的鳞片能有效减小磨粒磨损行为, 沙滩贝壳的非光滑表面形态能有效抵抗海水的冲刷^[42]。

J-Cui 等人选用四种典型具有非光滑表面的水生动物或有翅昆虫作为生物原型 (如图 4), 根据四种类型的仿生沟槽表面来研究微小通道减阻的作用。通过比较这些不光滑、具有微小通道的表面和光滑表面发现: 具有微小通道的非光滑表面能有效减小流动压力。通过仿真试验得出结论: 为了达到减阻的目的, 小宽高比的脊形槽比较适合低雷诺兹数流, 大的宽高比更适合大雷诺兹数流^[43]。

图 4 四种类型的仿生沟槽表面^[43]Fig.4 Four types of bionic grooved surface^[43]: a) seal skin and mathematical model, b) shark skin and mathematical model, c) shell outer surface and mathematical model, d) feathers of birds and mathematical model

生物非光滑表面具有良好的减粘、降阻、耐磨作用。徐德生、任露泉等人^[44]通过研究发现, 在 45 号钢表面制备非光滑的复合耐磨涂层, 物体的耐磨性能显著提高, 在试验条件下复合涂层材料的耐磨性分别为淬火 45 号钢和高铬铸铁的 12.4 和 4.9 倍。

丛茜、王连成、任露泉等人^[45]通过对穿山甲等动

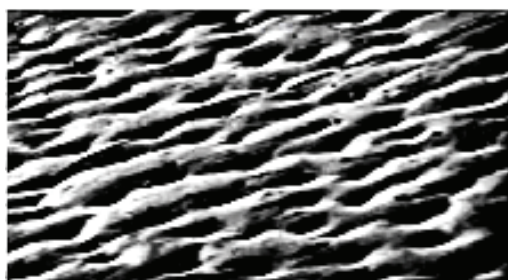
物的分析发现: 很多土壤动物之所以能够在土壤中快速穿行, 是因为它们的体表属于鳞片形非光滑表面, 这种非光滑表面能有效减粘降阻。他们根据这一现象设计出仿生推土板 (如图 5), 经过试验分析可以得出: 光滑推土板粘附大块粘土, 而非光滑推土板无粘附现象发生, 且鳞片形非光滑推土板比光滑推土板平

均减少阻力 15%左右。

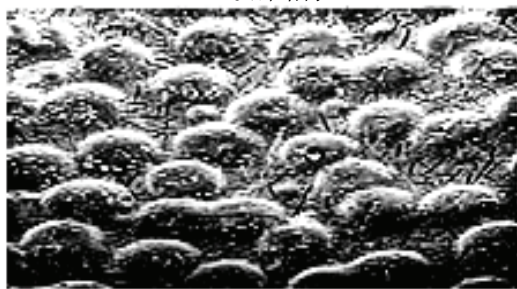


图 5 仿生推土板^[45]
Fig.5 Bionic bulldozing plate^[45]

王立新、高雅妍^[46]通过对蛭螂的分析发现：蛭螂之所以能有较强的挖掘能力，是因为它体表具有非光滑表面，蛭螂的头部呈现凸起，前胸及背板处呈现凹陷，如图 6 所示。他们利用激光重熔技术，在普通推土板表面制备了蛭螂表面结构，设计出仿生非光滑推土板的最佳结构是以平行四边形的形式排列。相比较普通推土板，仿生非光滑推土板推土阻力减小了 18.09%，并且随着土壤湿度的增大，其减粘降阻效果会更加明显^[47]。



a 头部结构



b 前胸及背板结构

图 6 蛭螂的结构^[47]
Fig.6 Structure of catharsius^[47]

3 结语

堆焊、熔覆、热喷涂耐磨材料不仅可以延长农机零部件的第一次使用寿命，还可以处理磨损失效的农机零部件，使产品能够多次利用，创造更大的经济效益。相比较堆焊技术和涂覆技术，激光表面强化技术

和高能离子注渗技术成本较高，对处理设备同样有很高的要求，不适宜大规模推广使用。目前这些方法大部分处于实验室研究阶段，在实际生产中的应用很少，但在不久的将来应该会成为提高农业机械触土部件耐磨性发展的主要趋势。很多学者对农业机械常用钢材进行了表面处理实验，通过对实验结果的分析可知，堆焊、熔覆等表面处理方式在提高农业机械触土部件耐磨性方面有很好的效果。

仿生学作为一个新兴学科，因其应用范围十分广泛而迅速发展，大量学者从仿生的角度，从结构仿生、表面仿生等方面作为切入点，对传统机械进行创新，研制出了仿生机械。例如，基于金龟子爪趾结构制造的仿生铲尖与基于蛭螂表面制成的仿生推土板在耐磨减阻方面效果显著。利用仿生学原理制造出的仿生农机零部件在耐磨性方面有很大的提升。对贝壳、动物鳞甲的研究以及大量的实验数据表明，非光滑表面能够有效减小摩擦，减少触土部件的土壤粘附量，大大提高农机零部件的使用寿命。这一理论在提高农机零部件耐磨性方面具有很大的作用。

参考文献：

- [1] 朱凤武, 王景利, 潘世强, 等. 土壤深松技术研究进展[J]. 吉林农业大学学报, 2003, 25(4): 457—461.
ZHU Feng-wu, WANG Jing-li, PAN Shi-qiang, et al. Advances in Researches of Soil Subsoiling Technique [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2003, 25 (4): 457—461.
- [2] 徐永刚, 马强, 周晔, 等. 秸秆还田与深松对土壤理化性质和玉米产量的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 428—432.
XU Yong-gang, MA Qiang, ZHOU Ye, et al. Effects of Straw Returning and Deep Loosening on Soil Physical and Chemical Properties and Maize Yields[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(2): 428—432.
- [3] 刘欣, 吕霞, 王帅. 我国深松机械的现状分析及发展建议[J]. 农业科技与装备, 2011(2): 130—131.
LIU Xin, LYU Xia, WANG Shuai. Analysis on the Current Development in China's Subsoiling Machinery and Proposals for Further Growth[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2011(2): 130—131.
- [4] 霍星辰, 杨诗韵, 赵鹏飞, 等. 深松技术及其对土壤理化性质的影响[J]. 农业科技与装备, 2016(3): 62—64.
HUO Xing-chen, YANG Shi-yun, ZHAO Peng-fei, et al. Subsoiling Technology and Its Effect on Soil Chemical and Physical Properties[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2016(3): 62—64.
- [5] 齐华, 刘明, 张卫健, 等. 深松耕作对土壤物理性状及玉米根系分布的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(4): 191—196.
QI Hua, LIU Ming, ZHANG Wei-jian, et al. Effect of Deep Loosening Mode on Soil Physical Characteristics and Maize Root Distribution[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27(4): 191—196.

- [6] 邢义胜, 郭志军. 耕作部件宏观触土曲面设计研究现状分析[J]. 农机化研究, 2014(1): 1—4.
XING Yi-sheng, GUO Zhi-jun. Actuality Analysis of Designing on Soil Cultivating Components with Different Macroscopic Soil-engaging Surfaces[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014(1): 1—4.
- [7] 王会强, 蒋辉, 邢艳秋, 等. 农业机械常见的失效分析[J]. 农机化研究, 2008(9): 28—30.
WANG Hui-qiang, JIANG Hui, XING Yan-qiu, et al. The Usual Failure and Analysis in Agricultural Machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(9): 28—30.
- [8] 孙伟春. 磨粒磨损研究的现状和发展趋势[J]. 广西质量监督导报, 2008(2): 71—72.
SUN Wei-chun. The Present Situation and Development Trend of Abrasive Wear Research[J]. Guangxi Quality Supervision Guide Periodical, 2008(2): 71—72.
- [9] 苏彬彬, 徐杨, 简建明. 农业机械耐磨件发展及研究现状[J]. 热处理技术与装备, 2013, 34(5): 53—57.
SU Bin-bin, XU Yang, JIAN Jian-ming. The Actuality of Development and Research of Wear Resistant Part for Agricultural Machinery [J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2013, 34(5): 53—57.
- [10] 张金波, 王晨超, 王洋, 等. 农业耕作机械触土部件土壤磨料磨损研究[J]. 现代化农业, 2015(1): 52—53.
ZHANG Jin-bo, WANG Chen-chao, WANG Yang, et al. Abrasive Soil Contact Soil Farming Machinery Parts Wear[J]. Modernizing Agriculture, 2015(1): 52—53.
- [11] 李晓忠, 周晓峰, 高瑞全, 等. 复合芯棒的研制开发[J]. 钢管, 2011, 40(4): 63—66.
LI Xiao-zhong, ZHOU Xiao-feng, GAO Rui-quan, et al. Research & Development of Complex Mandrel[J]. Steel Pipe, 2011, 40(4): 63—66.
- [12] 翟鹏飞, 邢泽炳, 张晓刚. 耕作部件表面堆焊合金铸铁及其性能研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2012, 50(12): 1—3.
ZHAI Peng-fei, XING Ze-bing, ZHANG Xiao-gang. Property of Surfacing Alloy Cast Iron Layer on Tillage Components[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2012, 50(12): 1—3.
- [13] RAIKOV S V, KAPRALOV E V. Structure Gradient in Wear Resistant Coatings on Steel[J]. Steel in Translation, 2015, 45(2): 120—124.
- [14] BENEGRÀ M, SANTANA A L B, MARANHO O, et al. Effect of Heat Treatment on Wear Resistance of Nickel Aluminide Coatings Deposited by HVOF and PTA[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2015, (24): 1111—1114.
- [15] 董升涛. 深松铲尖堆焊 Fe 基 WC 复合涂层的组织分析与性能研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2015.
DONG S T. Analysis and Properties of Subsoiler Tip Surfacing Fe-based WC Composite Coating[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2015.
- [16] 尚丽娟, 康煜平, 刘常升. 试论粉末火焰喷焊和激光熔覆技术[J]. 热加工工艺, 2002(4): 47—49.
SHANG Li-juan, KANG Yu-ping, LIU Chang-sheng. Discussion of the Techniques of Powder Flame Spray-welding and Laser Cladding[J]. Hot Working Technology, 2002(4): 47—49.
- [17] 张大伟, 雷廷权, 李强. 激光熔覆金属表面改性研究进展(上)[J]. 中国表面工程, 1999(3): 1—6.
ZHANG Da-wei, LEI Ting-quan, LI Qiang. Recent Development of Research on Surface Modification of Metals with Laser Cladding (Upper)[J]. China Surface Engineering, 1999(3): 1—6.
- [18] 丛锦玲, 李志鑫, 王维新. 犁铧刃面熔敷耐磨材料试验与应用[J]. 新疆农机化, 2004(2): 37.
CONG J L, LI Z X, WANG W X. Ploughshare Blade Surface Wear-resistant Welding Materials Testing and Application[J]. Xinjiang Agricultural Mechanization, 2004(2): 37.
- [19] 郝建军, 马跃进, 杨欣, 等. 火焰熔覆镍基/铸造碳化钨熔覆层在犁铧上的应用[J]. 农业机械学报, 2005, 36(11): 139—142.
HAO Jian-jun, MA Yue-jin, YANG Xin, et al. Experimental Investigation on Plowshare Coated by Flame Cladding Ni-base Cast WC[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(11): 139—142.
- [20] 赵建国, 李建昌, 郝建军, 等. 氮弧熔覆 TiCN/Fe 金属陶瓷涂层对农业刀具耐磨性的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 84—89.
ZHAO Jian-guo, LI Jian-chang, HAO Jian-jun, et al. Influence of TiCN/Fe Metal Ceramic Coating by Reaction Nitrogen Arc Cladding on Wear Resistance of Agricultural Tools[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(3): 84—89.
- [21] 郝建军, 许志兴, 马跃进, 等. 灭茬刀具喷焊 NiWC 的耐磨粒磨损性能[J]. 农业机械学报, 2005, 36(9): 135—138.
HAO Jian-jun, XU Zhi-xing, MA Yue-jin, et al. Abrasive Resistance of Stubble-cleaning Cutter Coated by Flame Spray Welding NiWC Alloy[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(9): 135—138.
- [22] Houdková Š, Zahálka F, Kašparová M, et al. Comparative Study of Thermally Sprayed Coatings under Different Types of Wear Conditions for Hard Chromium Replacement[J]. Tribol Lett, 2011, 43(2): 139—154.
- [23] 周建忠, 袁国定, 杜生亚. 应用激光强化技术提高覆盖件模具寿命[J]. 模具工业, 2000(4): 52—54.
ZHOU Jian-zhong, YUAN Guo-ding, DU Sheng-ya. Application of Laser Hardening Technology to Improve Die Life Cover[J]. Mold Industry, 2000(4): 52—54.
- [24] 陈卓君, 张祖立. 激光处理冷轧 Q235/40Cr 干摩擦试验研究[J]. 润滑与密封, 2007, 32(2): 105—107.
CHEN Zhuo-jun, ZHANG Zu-li. Experimental Study on the Dry Friction Behavior of Cold Roll Steel Q235/40Cr Treated by Laser[J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(2): 105—107.
- [25] 陈卓君, 张祖立. 激光硬化 9SiCr 表面土壤磨损研究[J]. 摩擦学学报, 2011, 31(1): 84—87.
CHEN Zhuo-jun, ZHANG Zu-li. Abrasive Wear of Laser Surface Hardened 9SiCr in Soil[J]. Tribology, 2011, 31(1): 84—87.
- [26] 张晓刚. 碳钢离子渗碳化钨组织及耐磨性分析[D]. 太谷: 山西农业大学, 2014.
ZHANG Xiao-gang. Analysis of Microstructure and

- Wear Resistance of Tungsten Carbide in the Carbon Steel[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2014.
- [27] 高原, 徐晋勇, 高清, 等. 双层辉光离子渗金属技术特点分析[J]. 热加工工艺, 2006(3): 56—59.
GAO Yuan, XU Jin-yong, GAO Qing, et al. Analysis on Characteristics of Double Glow Discharge Plasma Surface Alloying Process[J]. Heat Treatment, 2006(3): 56—59.
- [28] 李磊, 张荣英, 陈海燕. 仿生深松铲发展现状与展望[J]. 农机化研究, 2015(2): 265—268.
LI Lei, ZHANG Rong-ying, CHEN Hai-yan. The Development of Bionic Subsoilers and Outlooks[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015 (2): 265—268.
- [29] 赵天林, 赵钢. 高能离子注渗 WC 的实用效果及耐磨性分析[J]. 中国表面工程, 2003(5): 36—38.
ZHAO Tian-lin, ZHAO Gang. Analysis of Application and Wear Resistance of the High-energy Ion Implanted WC Coating[J]. China Surface Engineering, 2003(5): 36—38.
- [30] 孙晶, 许振华, 赵天林, 等. 低碳结构钢表面粒子注渗强化机理的研究[J]. 热加工工艺, 2007, 36(24): 66—67.
SUN Jing, XU Zhen-hua, ZHAO Tian-lin, et al. Study on Strengthening Mechanism of Ion Implanting for Low Carbon Structural Steel[J]. Hot Working Technology, 2007, 36(24): 66—67.
- [31] 邢泽炳, 卫英慧. 65Mn 钢离子渗碳化钨的耐磨性能[J]. 材料热处理学报, 2013, 34(增刊 II): 201—204.
XING Ze-bing, WEI Ying-hui. Wear-resisting Property of 65Mn Steel with Ion Implanting Tungsten Carbide[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2013, 34(Suppl II): 201—204.
- [32] 张祥彩, 李洪文, 王庆杰, 等. 我国北方地区机械化深松技术的研究现状[J]. 农机化研究, 2015(8): 261—264.
ZHANG Xiang-cai, LI Hong-wen, WANG Qing-jie, et al. Research Status on Mechanized Subsoiling Technology in Northern China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(8): 261—264.
- [33] 刘财勇. 鼯鼠爪趾切削机理研究[D]. 长春: 吉林大学, 2009.
LIU Cai-yong. Study on the Cutting Mechanism of the Claws of the Mole Rat[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [34] 汲文峰. 鼯鼠爪趾几何特征与切土功能分析[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
JI Wen-feng. Analysis of the Geometric Characteristics and Soil Cutting Function of the Claws of the Mole Rat[D]. Changchun: Jilin University, 2009.
- [35] 刘俊. 脊椎动物的穴居及其历史[J]. 动物之美, 2000, 8(3): 32—33.
LIU Jun. Burrowing Vertebrates and Its History[J]. Journal of the Beauty of Animals, 2000, 8(3): 32—33.
- [36] TONG Jin, SUN Jiyu, CHEN Donghui, et al. Geometrical Features and Wettability of Dung Beetles and Potential Biomimetic Engineering Applications in Tillage Implements[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 80: 1—12.
- [37] 施新泉. 原来如此——千姿万态的动物[M]. 上海: 上海科学技术文献出版社, 2005: 160—161.
- SHI Xin-quan. So that — Zi Million State Animal[M]. Shang Hai: Shanghai Science and Technology Literature Publishing House, 2005: 160—161.
- [38] 陈东辉. 典型生物摩擦学结构及仿生[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
CHEN Dong-hui. Typical Bio Tribology Structure and Bionics[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [39] 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.
ZHU Feng-wu. Chafer Morphological Analysis and Subsoiling Tillage Member Bionic Design[D]. Changchun: Jilin University, 2005.
- [40] RASHID Qaisrani, LI Jianqiao. The Role of Bionic Modifications in Reducing Adhesion and Draft of Agricultural and Earthmoving Machinery[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(461): 553—561.
- [41] 王淑杰, 任露泉, 韩志武, 等. 典型生物非光滑理论及其仿生应用[J]. 农机化研究, 2015(1): 209—210.
WANG Shu-jie, REN Lu-quan, HAN Zhi-wu, et al. The Effect of Non-smooth of Being Creatures and Its Bionic Applied Research[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015(1): 209—210.
- [42] 任露泉, 杨卓娟, 韩志武. 生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 144—147.
REN Lu-quan, YANG Zhuo-juan, HAN Zhi-wu. Non-smooth Wearable Surfaces of Living Creatures and Their Bionic Application[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 144—147.
- [43] CUI Jing, FU Yabo. A Numerical Study on Pressure Drop in Microchannel Flow with Different Bionic Micro-grooved Surfaces[J]. Journal of Bionic Engineering, 2012, 9(1): 99—109.
- [44] 徐德生, 任露泉, 邱小明, 等. WC/Cu 基仿生非光滑耐磨复合涂层的研究[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 148—151.
XU De-sheng, REN Lu-quan, QIU Xiao-ming, et al. Study on WC/Cu Based Bionic, Non-smoothed, and Composite Coating[J]. Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 148—151.
- [45] 丛茜, 王连成, 任露泉, 等. 鳞片形非光滑表面的仿生设计[J]. 吉林工业大学学报, 1998(2): 12—16.
CONG Qian, WANG Lian-cheng, REN Lu-quan, et al. Bionics Design for Scaly Nonsmooth Surfaces[J]. Journal of Jilin University of Technology, 1998(2): 12—16.
- [46] 王立新, 高雅妍. 农业机械领域的工程仿生研究概况与应用前景[J]. 河北科技大学学报, 2014, 35(4): 309—317.
WANG Li-xin, GAO Ya-yan. Research Advance and Development Prospect of Engineering Bionics in Agricultural Machinery Field[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2014, 35(4): 309—317.
- [47] REN L Q, TONG Jin. Reducing Sliding Resistance of Soil Against Bulldozing Plates by Unsmoothed Bionics Surface[J]. Journal of Terramechanics, 1995, 32(6): 303—309.