

农业机械触土部件材料研究与应用进展综述

詹 华^{1,2} 张艳静¹ 郑 军³ 王永欣^{4,5} 马小斌¹ 鲍曼雨¹ 汪瑞军^{1,2}

(1. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083; 2. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083;
3. 安徽工业大学材料科学与工程学院, 马鞍山 243032; 4. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201;
5. 海洋关键材料全国重点实验室, 宁波 315201)

摘要: 农业机械触土部件的性能直接决定农机作业效率与服役寿命,其材料发展是提升农业装备水平的关键。本文系统综述了触土部件材料的研究进展与应用现状。首先,分析了部件在砂土、黏土、水田等典型工况下的受力与损伤机制,明确了耐磨性、抗冲击性、抗粘附性等核心性能要求。其次,梳理了从传统钢铁材料(弹簧钢、硼钢)到现代表面涂层技术(堆焊、熔覆、热喷涂、化学热处理等)及新型材料(高分子、高熵合金)的技术体系,并对比了国内外研究与应用差距。结合国内外典型应用案例,总结了材料性能的田间、实验室及数值模拟评价方法。最后,指出当前材料在极端工况适应性、多性能协同及产业化应用中面临的挑战,并从产业化升级、工况导向设计、智能与绿色制造、差异化竞争等方面展望了未来发展方向,旨在为高性能触土部件材料研发与工程应用提供系统性理论参考。

关键词: 农业机械; 触土部件; 耐磨材料; 表面工程; 工况分析; 性能评价

中图分类号: S222 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)11-0001-14

OSID:



Review of Research and Application Progress of Materials for Agricultural Machinery Soil-contact Components

ZHAN Hua^{1,2} ZHANG Yanjing¹ ZHENG Jun³ WANG Yongxin^{4,5} MA Xiaobin¹
BAO Manyu¹ WANG Ruijun^{1,2}

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

2. State Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China

3. School of Materials Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243032, China

4. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China

5. State Key Laboratory of Advanced Marine Materials, Ningbo 315201, China)

Abstract: The soil-contact components in agricultural machinery, whose performance directly determined operating efficiency and service life, and whose materials development was key to advancing agricultural equipment were investigated. It presented a systematic review of the research progress and current applications of soil-contact component materials. Firstly, it analyzed the loading and damage mechanisms of these components under typical operating conditions, such as sand and clay soils, and paddy fields, and clarified core performance requirements, including wear resistance, impact resistance, and anti-adhesion properties. Secondly, it traced the technology system from traditional steel materials (spring steel, boron steel) to modern surface coating technologies (hardfacing, cladding, thermal spraying, chemical surface treatments, etc.) and to new materials (polymers, high-entropy alloys), and compared the gaps between domestic and international research and applications. Drawing on representative domestic and international case studies, it summarized evaluation methods for material performance in field tests, laboratory experiments, and numerical simulations. Finally, it identified the challenges that current materials faced in extreme operating conditions, multi-property synergy, and industrialization, and outlined future development directions in terms of industrial upgrading, condition-driven design,

收稿日期: 2026-03-01 修回日期: 2026-03-19

基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFB3714100)和山东省农机研发制造推广应用一体化试点项目(NJYTHSD-202315)

作者简介: 詹华(1982—),女,正高级工程师,博士,主要从事表面工程和再制造工程研究,E-mail: zhanhua1101@163.com

通信作者: 汪瑞军(1967—),男,研究员,博士,主要从事高端装备关键部件材料制造技术与工程化应用研究,E-mail: wangrj@caams.org.cn

intelligent and green manufacturing, and differentiated competition. The aim was to provide a systematic theoretical reference for the development and engineering application of high-performance soil-contact component materials.

Key words: agricultural machinery; soil-contact components; wear-resistant materials; surface engineering; operating-condition analysis; performance evaluation

0 引言

材料作为机械装备的基础,其性能直接决定装备的可靠性与稳定性。在现代农业中,农业机械对于提升作业效率、减轻劳动强度、改善生产条件及保障粮食安全具有关键作用。触土部件如犁铧、旋耕刀、深松铲、开沟器、覆土器、镇压轮、中耕铲、圆盘耙、挖掘铲、动力耙、波纹盘等作为农机的核心功能单元,直接承担翻耕、松土、播种、施肥和收获等重要作业任务,其材料性能从根本上影响着作业效率、耕作质量以及整机服役寿命。

触土部件工作时与土壤、砂石、作物根茬等介质直接接触,承受着复杂的摩擦、冲击和挤压^[1],极易引发磨损、腐蚀、断裂及疲劳等失效形式。随着农业向规模化、精准化方向发展,以及保护性耕作、稻茬田作业等复杂工况的普及,对触土部件材料的耐磨性、耐蚀性、抗粘附性与抗疲劳性提出了更为严苛的要求^[2-3]。近年来,国内外学者围绕触土部件材料的筛选、改性技术创新与性能提升开展了广泛研究^[4-7],逐步形成多元材料体系与多样化改性工艺。然而,在极端工况适应性、综合性能匹配、成本控制与产业化应用等方面,现有研究仍存在不足。

本文系统梳理农业机械触土部件常用材料体系的研究进展,总结关键材料改性技术,结合典型应用案例归纳性能评价方法,分析当前面临的主要挑战,并对未来发展趋势进行展望,以期对触土部件材料的深入研发与工程应用提供理论参考。

1 触土部件工况分析与性能要求

1.1 工况分析

触土部件在土壤中作业时,主要承受3种作用力的综合影响:切削或耕作阻力,即部件切削、挤压和破碎土壤时受到的土壤反作用力^[2,8],其大小与土壤质地、耕作深度及部件结构参数呈正相关;侧向挤压力,由土壤受挤压后向两侧流动而对部件侧面产生的压力;硬物碰撞带来的冲击载荷。这3种力的合力共同决定了触土部件的力学响应。

触土部件的损伤是材料性能、受力状态与环境因素共同作用的结果,主要表现为磨粒磨损、腐蚀磨损、疲劳损伤、冲击破坏及粘着磨损等形式^[9]。其

中,磨粒磨损是主要的损伤机制之一:土壤中的砂粒、石砾等硬质颗粒嵌入或滑过部件表面,通过微切削、塑性变形及挤压脱落等方式导致材料流失,形成沟槽与麻点,致使刃口钝化、耕作阻力增大、作业质量下降^[1,10]。其次,部件在作业中反复承受冲击与交变载荷,易在表层萌生疲劳裂纹,逐步扩展为点蚀、剥落乃至断裂,如高速作业下的旋耕刀常出现此类疲劳损伤。此外,在潮湿、酸性或碱性土壤(如水田、盐碱地)中,部件表面还会与水分、有机物及酸碱物质发生化学或电化学反应,形成腐蚀产物,并在摩擦作用下持续脱落,形成“腐蚀-磨损”协同加剧的恶性循环,表现为锈坑与剥落加剧。

不同作业工况对触土部件材料的性能需求存在显著差异:北方旱地作业侧重耐磨性;南方稻茬田需兼顾抗粘附、耐腐蚀与防堵塞;丘陵山地作业要求部件轻量且抗冲击;而在保护性耕作条件下,还需应对高秸秆覆盖导致的摩擦加剧与缠绕问题^[11]。同时,土壤含水率、密实度、颗粒尺寸等参数会显著影响部件的实际工况与材料需求。土壤含水率升高会增强黏土对金属的粘附,在含水率约20%时粘附力达到峰值^[12-14];砂土含水率增加通常加剧磨损,而壤土和黏土则呈现相反趋势^[15];细颗粒土壤通常粘附更强,进而加剧表面磨损与粘附积累^[16]。干燥过程中位移量更大,进而加剧表面磨损与粘附积累。不同土壤类型对触土部件的影响效果如表1所示。

1.2 性能要求

鉴于上述复杂的作业环境,触土部件材料的选择需进行多性能协同匹配,核心要求包括优异的耐磨性、良好的抗疲劳与抗冲击性能。此外,针对黏重土壤、水田、盐碱地等工作环境,还需兼顾防粘附与耐腐蚀性能。同时,材料的经济适用性也是实现规模化生产与推广的关键。

具体而言,耐磨性能是抵抗磨粒磨损、延长部件寿命的核心,通常可通过提高材料硬度、优化显微组织来实现^[21-24]。为应对交变载荷与砂石冲击导致的断裂、剥落等问题,则需通过提升材料的强度与韧性,避免因材料过硬、过脆而引起的开裂。在特定工况下,还需通过表面改性或材料创新来增强抗粘附与耐腐蚀能力。最终,在满足上述性能要求的基础上,必须合理控制成本,确保触土部件兼具技术先进

表 1 不同土壤环境特点对触土部件的影响效果

Tab.1 Effects of environmental characteristics of different soils on soil-engaging components		
土壤类型	环境特点	影响效果
砂土	颗粒粗大、硬度高(含大量石英砂),孔隙大、含水率低,透气性好	磨粒磨损极其严重;硬质砂粒直接切削部件表面,刀刃快速变钝。冲击载荷频发;土壤中易混杂石块,部件碰撞概率高,易出现崩刃、断裂。耕作阻力波动大;土壤松散与坚硬区域交替,交变载荷幅值大,加速疲劳损伤 ^[1]
黏土	颗粒细小、粘结性强,孔隙小、含水率高,易板结	粘着磨损+腐蚀磨损为主;高含水率导致部件黏泥,同时电化学腐蚀加剧。耕作阻力大且稳定;土壤板结后硬度高,部件切削负荷大,易发生塑性变形。磨损均匀但速率快;无明显硬质颗粒,但粘着摩擦持续作用,部件整体磨损量大 ^[17]
壤土	砂粒、黏粒比例适中,土质疏松、肥力高,含水率适中	土壤性质均衡,部件受力稳定,磨粒磨损、粘着磨损程度相对温和,是对触土部件损伤最小的土壤类型 ^[18]
水田土	长期淹水、含水率极高,土壤呈泥浆状,含大量腐殖质,pH 值多偏酸性	腐蚀磨损占主导;酸性水环境加速部件电化学腐蚀,表面易生铁锈、出现点蚀。粘着磨损严重;泥浆易粘附部件表面,形成滑动摩擦界面,材料流失快。耕作阻力小但粘阻大;土壤软烂,切削阻力低,但黏泥导致运行阻力增加,部件易过热 ^[19]
盐碱土	含盐量高(如氯化钠、碳酸钠),土壤呈碱性,含水率波动大	化学腐蚀极强;盐碱成分破坏部件表面保护膜,引发严重点蚀、晶间腐蚀。腐蚀-磨损耦合效应显著;腐蚀坑成为应力集中点,加速磨粒磨损和疲劳裂纹扩展。土壤板结严重;干旱时盐碱结晶导致土壤坚硬,耕作阻力剧增 ^[20]

性与市场竞争力。不同工况环境下触土部件材料的核心性能需求归纳于表 2。

表 2 不同工况环境下使用触土部件材料的核心性能要求
Tab.2 Core performance requirements of soil-engaging component materials under different working conditions

作业工况 环境	材料性能 核心要求	适配说明
北方旱田	优异的耐磨性能	适配旱田土壤质地,抵御砂粒等硬质颗粒引发的磨粒磨损,减少部件刃口钝化,降低耕作阻力
		应对水田潮湿环境,减少黏土粘附,抵御水分引发的腐蚀,同时避免稻茬与土壤混合物堵塞部件
南方稻茬田	兼顾抗粘附、耐蚀与防堵塞性能	
丘陵山地	轻量化、抗冲击能力	适配复杂地形作业,兼顾部件便携性与结构强度,抵御土壤中硬物碰撞产生的冲击载荷
		适应高秸秆覆盖场景,抵御秸秆摩擦带来的额外磨损,避免秸秆缠绕部件影响作业效率
保护性耕作	耐磨、抗摩擦、抗缠绕	

2 农业机械触土部件材料技术体系及研究现状

农业机械触土部件材料的发展经历了从传统常用材料到现代高性能材料的系统升级,目前形成了以钢铁材料为基础、耐磨合金为核心、表面涂层与功能复合材料为重要发展方向的技术体系。国内外研究共同表明,材料体系的演进始终围绕“强韧匹配、耐磨减阻、长效服役”三大目标展开,欧美、日本等农业装备强国在高性能合金与先进表面工程技术领域布局较早,中国近年来通过国家重点研发计划等

持续发力,部分材料性能已接近国际先进水平,但在基础理论研究、工艺稳定性与成本控制方面仍有差距。

2.1 钢铁材料

农机触土部件在耕作过程中直接承受土壤磨粒磨损、冲击载荷与疲劳作用,其材料性能直接决定整机作业质量、服役寿命与使用成本。普通钢铁材料因原料充足、成本低廉、成型及热处理工艺成熟,长期以来是我国中低端触土部件的主导选材。依据化学成分、力学性能及工程应用特点,这类钢铁材料主要分为碳素结构钢、弹簧钢、低合金耐磨钢三大类。随着现代农业装备向高速、重载、高效化发展,传统钢材在耐磨性、强韧性匹配及服役稳定性上的不足日益突出,不同材料在应用场景、市场占比与技术迭代路径上呈现显著分化。系统梳理各类钢铁材料的性能特点、应用现状与研究进展,可为触土部件材料优选、性能提升及技术升级提供基础依据。

2.1.1 碳素结构钢

碳素结构钢(如 Q235 钢)强度与耐磨性均偏低,目前已基本退出主作业部件领域,仅用于覆土器、镇压轮等辅助部件。为满足辅助部件的服役需求,需通过表面淬火、正火等简单热处理工艺提升其表面硬度与耐磨性,降低田间作业中的变形与磨损风险。尽管性能有限,但得益于极低的采购成本与良好的焊接、冷加工性能,其在中小农机企业的辅助部件制造中仍有一定应用空间。

2.1.2 弹簧钢

弹簧钢(如 65Mn、60Si2Mn)是旋耕刀、犁铧、深松铲等部件的传统基础材料,通过调质处理可获得良好的综合力学性能^[24]。国内 65Mn 钢耙片在砂土中的工作寿命为 26.33 hm²/片;在砂壤土中的寿

命为 $57.66 \text{ hm}^2/\text{片}$;而在黑黏土中则为 $80 \sim 100 \text{ hm}^2/\text{片}$ ^[25]。但该类材料在高速、重负荷、含石量高的复杂工况下,易出现刃口磨损过快、疲劳断裂等问题,强韧性与耐磨性难以兼顾。国外针对弹簧钢在耕作部件中的磨损与服役性能开展了系统的田间对比试验。GUPTA 等^[26]以鸭掌式中耕铲为研究对象,在黑棉土条件下开展了 30 h 耐久试验,对比了废旧板簧钢、全新热处理钢、结构钢及低碳钢的磨损行为。结果显示:经强化的板簧钢质量损失为 61 g,显著优于商用低碳钢对照样(72 g);该研究直接证实,弹簧钢作为触土部件材料具有可靠的力学性能与成本优势,热处理可进一步提升其耐磨潜力。

从应用趋势来看,日本、德国等农机发达国家已逐步以低合金耐磨钢替代传统 65Mn 弹簧钢用于主耕作部件;国内头部企业也开始材料升级,但受成本与工艺配套限制,65Mn 钢仍在中小农机企业的触土部件中占据主导地位。目前国内外研究多聚焦于表面强化、热处理优化等方式,进一步提升弹簧钢触土部件的耐磨寿命与服役稳定性。

2.1.3 低合金耐磨钢

低合金耐磨钢在碳钢基础上添加 Cr、Mn、Mo、Ni、Nb 等元素,结合淬火+低温回火获得板条马氏体组织,兼具高强度与良好韧性。硼钢作为典型的低合金耐磨钢,因其优异的淬透性、良好的强韧性及相对较低的成本,成为触土部件材料升级的重要方向,尤其适用于高速作业工况。通过渗碳-淬火-回火或感应淬火等工艺,可获得表面高硬度($> \text{HRC}55$)、芯部高韧性(冲击吸收功大于 20 J)的理想梯度组织。

在国外研究中,硼钢是触土部件耐磨材料的核心研究对象^[27-28]。针对 30MnB5、22MnB5 等典型硼钢,国外学者系统开展了基体磨损行为、服役性能及寿命提升机制研究^[29-32],明确了硼钢在磨粒磨损条件下的主要失效形式是微切削与犁沟磨损,并揭示了载荷、土壤介质、润滑状态对硼钢磨损规律的影响,为硼钢在耕作部件上的选材与性能优化提供了理论依据。在此基础上,欧洲已形成成熟的硼钢应用体系,高速犁铧、圆盘耙、中耕铲等核心触土部件普遍采用 27MnCrB5、30MnB5 等硼钢材料,部件的耐磨性、结构稳定性与服役寿命均处于国际先进水平。

国内对低合金耐磨钢尤其是硼钢的研究与应用近年来发展迅速。在国家重点研发计划支持下,中国农业机械化科学研究院集团有限公司牵头开展了高端农机装备关键核心部件用轻量化、低成本、高性能锰硼钢材料、制备技术及产业化示范研究,成功开

发出适用于触土部件的低成本高强耐磨锰硼钢,为国内高端农机装备材料升级提供了重要支撑^[33]。国内部分头部企业建成硼钢触土部件专用热处理生产线,实现了硼钢犁尖、耙片等产品的工程化应用。但整体来看,我国硼钢部件在批次稳定性、热处理均匀性、疲劳寿命控制等方面与国外先进水平仍存在差距,规模化应用与成套技术体系仍有待完善。

综上所述,碳素结构钢性能有限,仅适用于低载荷辅助部件;弹簧钢成本适中、工艺成熟,仍是当前国内中低端触土作业部件的主流材料,但难以满足高速重载与复杂工况的长寿命需求;低合金耐磨钢特别是硼钢,凭借优异的强韧性与耐磨性,成为触土部件基体材料升级的重要方向。然而,受限于材料本身成分与微观组织,单纯依靠基体合金化与热处理强化,已难以进一步大幅提升触土部件的耐磨寿命与综合服役性能。在基体材料难以发生颠覆性变革的前提下,通过表面涂层技术对部件进行改性强化,在保持芯部强韧性的同时显著提升表面硬度与耐磨性,成为突破触土部件磨损瓶颈、实现性能跨越式提升的有效途径。

2.2 表面涂层材料

随着材料科学与表面工程技术的交叉融合,表面涂层技术在触土部件领域的应用研究日趋活跃,成为突破钢铁材料性能极限的重要路径。常用的表面涂层技术主要包括表面堆焊、表面熔覆、热喷涂、化学热处理和其他新型表面技术等。

2.2.1 表面堆焊

表面堆焊技术早在 20 世纪七八十年代就已在国外农机上得到普遍应用,我国也于同期开始尝试。经过数十年发展,表面堆焊已被广泛用于犁铧、深松铲、旋耕刀等部件的强化^[34]。当前研究热点已转向基于摩擦学理论的环境-部件-材料多因素协同设计。在材料研发层面,传统的高铬铸铁堆焊合金因其组织中存在硬质的 M_7C_3 碳化物而得到广泛应用^[35]。为进一步提升性能,研究者正积极探索添加碳化钛(TiC)等陶瓷增强相^[36]。马笑晗等^[37]通过药芯焊丝电弧焊制备含 TiC 增强相的亚共晶高铬铸铁堆焊层,TiC 的加入能有效细化组织,其抗磨粒磨损性能较未添加 TiC 的合金可提升 5.2 倍(图 1),抗冲击磨损性能也提升 1.2 倍。

2.2.2 表面熔覆

表面熔覆技术通过在廉价韧性基体上熔覆一层高性能合金,实现了低成本与高耐磨性的结合,并显著提升了部件的耐磨性与使用寿命,已成为当前该领域的研究热点与主流强化手段^[38]。表面熔覆主要包括激光熔覆和等离子熔覆。从工艺发展来看,

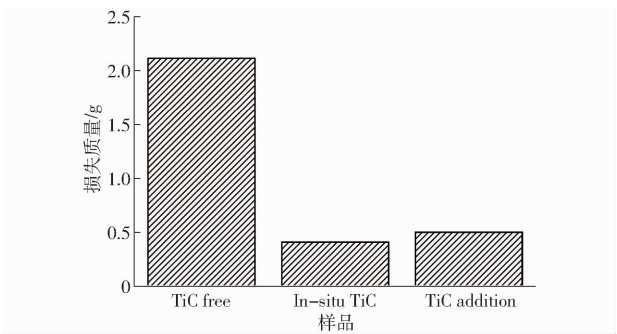


图 1 堆焊层磨粒磨损损失质量
Fig. 1 Wear loss of hardfacing alloys

激光熔覆因其能量密度高、热影响区小、稀释率低且能与基体形成冶金结合等优势,展现出巨大潜力^[39-43],尤其适用于旋耕刀、犁铧等具有复杂曲面结构的部件。当前的研究已不再仅仅关注涂层制备,而是深入到对成形质量和服役性能的精确控制。谢林圻等^[44]通过优化激光熔覆路径来调控复杂曲面涂层中的残余应力,发现在曲率较大处残余应力会达到峰值,为制备高质量涂层提供了理论依据。同时,等离子熔覆技术也在向高效、低成本方向发展。李响等^[45]研究表明采用优化的等离子熔覆工艺在 Q235 钢表面制备 Fe-Cr-C 合金熔覆层,其硬度可达基体的 3 倍,基体磨损量减少约 2/3,展现出良好的经济性和应用前景。在材料体系创新方面,熔覆技术正朝着多元化和功能复合化迈进。通过在铁基、镍基等合金粉末中添加高硬度的陶瓷增强相(如 WC、TiC)制备的金属基复合材料涂层成为主流。屈平等^[46]采用等离子熔覆制备的 WC 增强镍基复合涂层如图 2 所示,其耐磨性相比 65Mn 基体提高 6 倍。此外,针对作业中存在的粘附问题,国内外研究者也开始探索具有减摩、自润滑功能的复合涂层^[2]。

2.2.3 热喷涂

热喷涂技术因其热输入低、基体材料选择范围广、涂层厚度可控且适于批量生产等特点,在农机触土部件耐磨强化领域展现出独特的应用价值^[6]。在工艺层面,大气等离子喷涂 (APS) 技术已成为当前国际研究的热点。MUNTEANU 等^[47]对圆盘耙等触土部件的系统研究表明,APS 技术能够制备出兼具耐磨、耐蚀的高性能表面层,显著延长部件在磨粒磨损、冲击应力和化学腐蚀协同作用下的服役寿命。针对犁铧等部件的应用也证实,热喷涂涂层在提高硬度和抵抗摩擦性能方面效果显著,是延长农机具寿命、降低维护成本的有效解决方案^[48]。国内研究注重特定土壤工况下的适应性,针对南方丘陵红壤“湿、酸、黏”的特点,李明曦等^[49]提出了增韧硬质合金涂层的防护策略,系统探索了涂层在该类严苛工

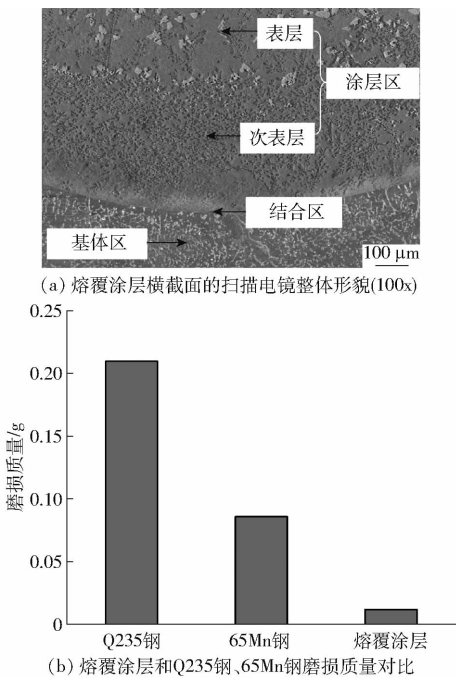


图 2 熔覆层的组织及耐磨性

Fig. 2 Microstructure and wear resistance of cladding layer

况下的退化机理,为提升触土部件在红壤地区的作业性能提供了理论支撑。超音速火焰喷涂 (HVOF) 制备的 WC-12Ni 硬质涂层在旋耕刀上进行磨损试验,结果表明,在泥浆砂水比 3:1,载荷为 70 N 时,未进行涂层的旋耕刀、喷涂完成之后旋耕刀磨损损失分别为 1 021 mg 和 53 mg,充分证明了 WC-12Ni 硬质涂层具有优异的耐磨性。在材料体系方面,热喷涂技术正朝着多元化深入发展。NiCrBSi、WC-Co-Cr、TiO₂、Al₂O₃、Cr₂O₃ 以及金属-陶瓷复合材料等涂层体系被广泛研究,这些涂层在硬度提升、摩擦降低以及抗剥离、抗氧化等方面均展现出显著改善。喷涂制备的 WC-Co-Cr 涂层耐磨性比司太立合金涂层高 15 倍^[50]。尽管热喷涂技术在农机领域的应用成果显著,但其机械结合为主的结合方式使其在抗冲击性能方面较冶金结合的熔覆技术存在固有局限。

2.2.4 化学热处理

化学热处理技术通过改变材料表面的化学成分和组织结构,可在不改变基体芯部韧性的前提下显著提升表面硬度和耐磨性,因其工艺成熟、成本可控、适于批量处理等特点,在农机触土部件强化领域占据重要地位。常用的提高农机触土部件耐磨性的化学热处理方法包括渗氮、渗碳和碳氮共渗。国内研究者采用碳氮共渗提高了犁铧、旋耕刀等触土部件的耐磨性,延长了部件的使用寿命^[51]。当前,化学热处理技术正朝着多元共渗与复合处理方向深入发展。如图 3 所示,对 65Mn 钢材料的深松铲和犁

铍部件进行淬火-回火工艺 (Quenching-tempering, QT) 或渗碳-淬火-回火工艺 (Carburizing-quenching-tempering, CQT) 处理后, 部件组织得到细化、相结构得以调控, 耐磨性能显著提升^[52-53]。针对硼钢材料的整体力学性能的协同优化。GUO 等^[54] 提出了一种新型复合热处理工艺——“正火 + 亚温淬火 + 回

火 (NIQT)” 处理 27MnCrB5 硼钢, 通过在铁素体/奥氏体两相区精确调控奥氏体化温度, 获得了以马氏体和铁素体为主的多相复合组织。当淬火温度为 790℃ 时, 材料获得抗拉强度 1 654 MPa、断后伸长率 10.4%、冲击吸收功 77 J、硬度 530 HV_{0.3} 的优异综合力学性能。

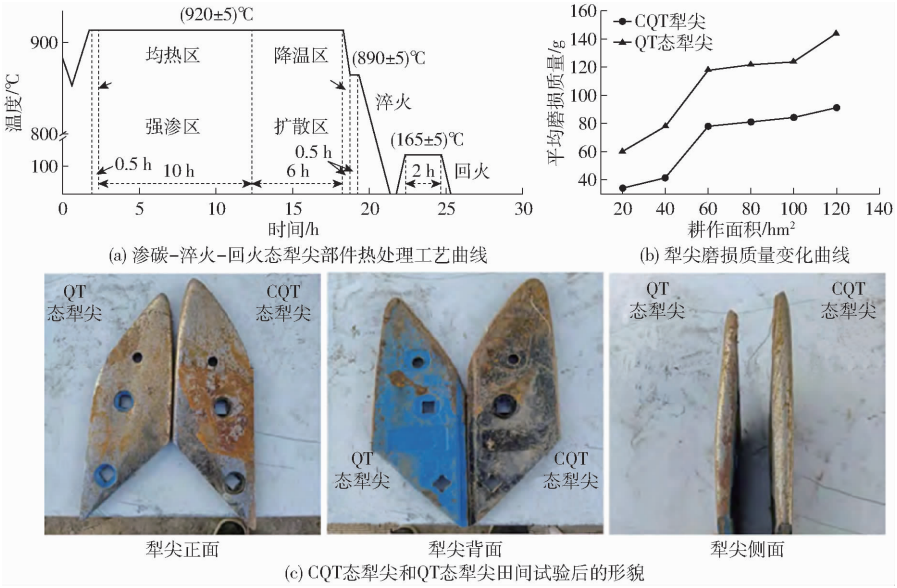


图3 犁铧热处理工艺及磨损情况示意图

Fig.3 Schematics of heat treatment process and wear condition of plow share

2.2.5 其他新型表面技术

近年来,真空气相沉积、钎涂等技术也在触土部件材料表面进行了研究应用。其中,真空气相沉积可在部件表面制备微米级厚度的硬质涂层,如 TiN、TiC、DLC 等,显著提升表面硬度与摩擦性能。NALBANT 等^[55] 对犁铧表面涂层的磨损性能开展了研究。该研究以 30MnB5 钢为基体,分别采用电镀法制备 20 μm 硬铬涂层、化学镀法制备 20 μm 镍涂层,以及物理气相沉积法制备 4 μm TiN 涂层,并在砂质黏壤土环境下开展耐磨试验。结果表明, TiN 涂层的耐磨性能优于硬铬涂层与镍涂层。然而,受限于沉积效率低、设备成本高、涂层厚度薄 (通常仅数微米) 等特点,真空气相沉积在承受严重磨粒磨损的触土部件上面临“涂层薄-磨损深”的固有矛盾,难以满足深松铲、犁铧等重载部件的使用寿命要求。钎涂技术通过钎料合金将高硬度耐磨颗粒 (如 WC、金刚石) 牢固粘结在基体表面,形成兼具高硬度和冶金结合的复合涂层,近年来在农机触土部件领域展现出良好的应用前景。采用真空等离子钎涂技术制备的 WC-Ni 基耐磨涂层,当 WC 含量为 50% 时,涂层综合性能最优,维氏硬度达 1 206 HV_{0.2},在严重磨损条件下的磨损率较 65Mn 钢基体降低 90% 以上^[56]。浦娟等^[57] 采用真空钎焊工艺制备了镍基碳化钨耐磨涂层。

研究发现,当碳化钨含量由 30% 提高至 50% 时,涂层硬质层的平均硬度由 817 HV_{0.2} 提升至 929 HV_{0.2},硬度达到基体的 6~8 倍,说明增加碳化钨硬质相含量可显著提高涂层硬度。同时,随着碳化钨硬质含量的增加,涂层摩擦因数由 0.50 降至 0.44,摩擦磨损质量损失由 0.005 2 g 降至 0.002 4 g,表明碳化钨硬质相的增多有效改善了涂层的耐磨性能,在磨损过程中发挥了明显的支撑与抗磨作用。

采用真空钎涂、感应钎涂等方式制备的 NiCrBSi/金刚石耐磨涂层,金刚石颗粒均匀弥散分布,涂层与基体形成良好冶金结合。在相同磨损试验条件下, NiCrBSi/金刚石涂层质量损失约为 NiCrBSi 涂层的 1/5、NiCrBSi/WC 涂层的 1/3,展现出优异的耐磨性能。该技术已在旋耕刀、螺旋输送机叶片等农机部件上开展工程应用,经现场试验验证,金刚石钎涂旋耕刀的耐磨性及使用寿命得到大幅提高^[58]。

2.3 新型材料

随着农机装备向高速、高效、长寿命方向升级,传统钢铁材料在耐磨、减粘、轻量化等方面的短板日益凸显。新型材料凭借独特的性能优势,为触土部件性能提升提供了新的解决方案,成为农机触土部件材料研究的热点领域。

2.3.1 高分子材料

高分子材料(如聚氨酯、超高分子量聚乙烯)因其低表面能、良好的减粘脱土特性,在土壤粘附抑制方面具有独特优势,但强度低、耐热性差制约其单独作为触土部件使用,多以表面防护层、复合涂层或复合结构形式应用,国内外研究均围绕其改性优化、性能提升及工程化应用展开系统探索。

国外重点研究高分子涂层改性与减阻耐磨性能:以低碳钢为基体,用 SiO_2 、 Al_2O_3 等填充改性聚酰胺 6 (PA6)、聚乙烯 (PE) 涂层,合理控制填充剂参数可显著提升耐磨性^[59];在减阻脱土方面,国外学者利用超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 的自洁性和低摩擦特性,对开沟器齿进行表面涂层处理,在重黏土土壤箱试验中(耕深 20 cm、两种压实度、含水率 4% 和 18%),UHMWPE 涂层开沟器齿的平均牵引力显著降低。在高压实度、18% 含水率条件下,牵引力较钢质开沟器齿降低 29%,证实了其优异的减阻效果^[60]。此外,国外还开发多元复合与纳米涂层:聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 与聚四氟乙烯微粉 (PTFEMP) 辐照交联复合涂层可提升弹性模量、降低摩擦因数^[61];TiN-TaC 纳米涂层的粘附力和摩擦角远低于钢质材料^[62];聚四氟乙烯 (PTFE)/聚氨酯 (PU) 纳米复合材料(质量比 1:2)疏水性能最优^[63];同时,针对仿生结构高分子涂层在曼谷黏土(干土、黏性土、淹水土壤)中,采用高度直径比小于等于 0.5 的凸起结构(扁球形、短长球形等),可使 UHMWPE 仿生板的滑动阻力降低 10%~30%,法向粘附力降低 10%~60%,且淹水土壤中减阻减粘效果更显著^[64]。

国内对高分子材料的研究主要集中于改性优化、仿生复合涂层及工程化应用,聚焦触土部件的减粘、减阻与耐磨性能提升。为优化高分子材料的耐磨性能与力学性能,ZHENG 等^[65]采用纳米碳化硅(硬质相)和丁腈橡胶(弹性体)对 UHMWPE 进行改性,改性后材料的密度提高 5.67%、弯曲模量提高 107%,体积磨损率降低 98%,质量磨损率降低 64.64%;同时,材料表面接触角提升至 102.76°,较纯 UHMWPE 提高 18%,成功实现了耐磨性能与疏水减粘功能的双重提升,为触土部件的粘附抑制与磨损防护提供了新途径。在仿生涂层与表面改性方面,国内 GUAN 等^[66]提出仿獾爪趾结构的仿生破碎齿,并采用 PTFE 与氟硅丙烯酸 (FAA) 树脂混合涂层对齿面进行改性,通过红外光谱、接触角测试及耐磨试验证实,当涂层厚度为 10 μm 时,耕作阻力最低、耐磨性最优,综合性能最佳,田间试验也证实,涂层仿生齿较普通齿能耗更低、土壤粘附更少

(图 4a)。此外,LI 等^[67]研究开发了仿蚯蚓拒土表面涂层,通过稳定接枝二甲氧基硅烷并注入硅油,实现生态友好型减粘,可使理论粘附功降低 10 倍,有效抵御黏性土壤粘附,同时明确了土壤含水率、粘附速度、粘附角度对涂层拒土性能的影响,为在农机触土部件中的应用提供了理论指导(如图 4b)。在 UHMWPE 材料应用研究方面,吉林大学佟金团队^[68]将 UHMWPE 应用于鼠道犁扩孔器、仿生开沟器等部件,采用“结构钢芯+UHMWPE 外套”的复合结构实现脱土减阻功能。仿生开沟器通过在普通芯铧式开沟器表面覆上带有波纹形仿生结构的 UHMWPE 或其复合材料,与钢质光滑表面开沟器相比,不粘附土壤作业阻力减小 10%~30%^[69]。

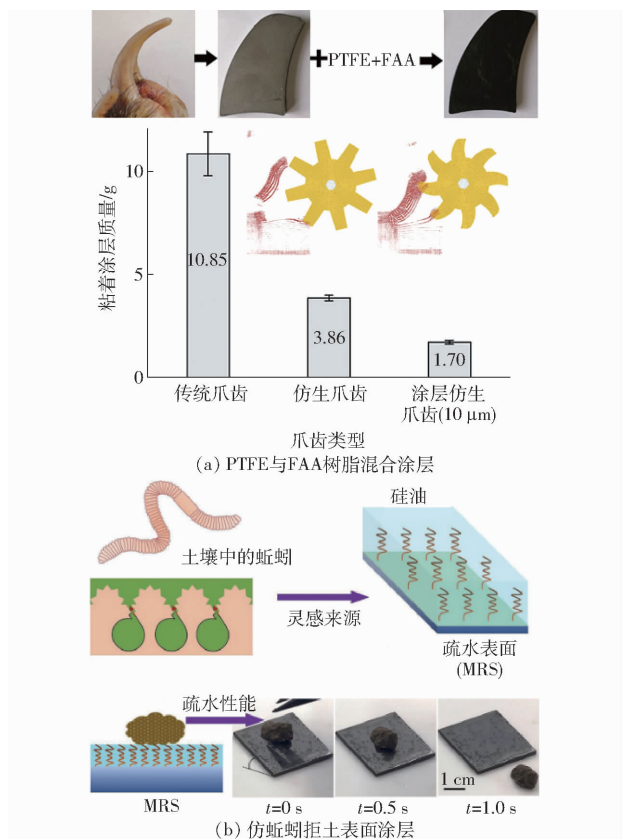


图 4 高分子材料示意图

Fig. 4 Schematics of polymeric material

综合来看,国内外高分子材料研究均围绕减粘、减阻、耐磨三大核心需求,国外侧重多元复合改性与纳米涂层开发,国内则聚焦仿生结合改性及工程化落地,但二者均面临高分子材料耐热性、强度不足的共性问题,亟需通过优化改性工艺,推动其在高速、重载触土部件中实现规模化应用。

2.3.2 高熵合金

高熵合金作为新兴多元合金体系,其组织致密、韧性优良、耐磨性强,可突破传统材料“硬度-韧性”矛盾,适配触土部件工况。目前相关研究主要围绕

激光熔覆、掺杂改性及性能优化展开,核心是提升部件寿命。FeCoCrNiMn 高熵合金涂层组织致密、晶粒单一,无复杂脆性金属间化合物。经在 50 N 载荷、80 r/min 转速条件摩擦 2 h 后其磨损质量损失仅 2 mg,显著优于 65Mn 基体(9 mg)及传统 Ni60A 合金涂层(4 mg)。尽管其硬度(635.81 HV_{0.3})略低于 Fe90(683.87 HV)和 Ni60A(663.62 HV),但耐磨性反而更好,这与其高韧性及加工硬化特性有关^[70]。在涂层成分与工艺优化方面,CoMoCrSiFe 涂层经最优工艺处理后,硬度达 65Mn 钢的 3.3 倍,磨损率仅为基体的 0.091 倍^[71];AlCrFeNiCuMo_{0.6} 涂层硬度、耐磨性及耐蚀性最优,可满足复杂工况需求^[72]。稀土氧化物掺杂是提升涂层性能的重要手段,0.8% La₂O₃ 掺杂 FeCoNiCrMo 涂层耐磨性最优^[73];6% Y₂O₃ 掺杂 AlCrFeNiTi 涂层硬度提升 42.96%,磨损量减少 50% 以上,主导磨损机制为氧化与磨粒磨损^[74]。后续处理可进一步优化涂层性能,Al₂FeCoNiCrW_{0.5} 涂层经超声冲击及回复处理后,硬度达基材的 2.5 倍,田间试验显示,强化后犁尖耐磨性较传统犁尖最高提升 13.8%^[75]。

综上,高熵合金可有效提升触土部件耐磨耐蚀性能,突破传统材料瓶颈,但存在制备成本高、规模化不成熟等问题。未来需聚焦低成本工艺与工程化应用,以实现其在触土部件中的规模化推广。

3 农业机械触土部件材料应用与性能评价

3.1 典型产品

近年来,硼钢材料成为替代 65Mn、60Si2Mn 等弹簧钢材料的新型农机触土部件用材。江苏大学与宝钢联合研发的硼钢,通过精细调控合金成分,使重型圆盘耙片在新疆复杂土壤环境下服役寿命从 466 hm² 延长至 666 hm² 以上,同时耙片成本从进口产品的 500 元/片降至 200 元/片,实现了低成本与高性能的协同^[76]。中国科学院金属研究所通过在硼钢中添加微合金化元素、引入细小碳化物,研制出一种高强高韧耐磨合金钢,将其制备成圆盘耙后在新疆地区进行试验,经作业 106 hm² 后,普通的耙片磨损严重,甚至出现了断裂,但中国科学院金属研究所研制的耙片相对完整。10 组对比试验中,普通耙片磨损率为 10.31%,中国科学院金属研究所研制的耙片仅为 1.86%^[77]。

国外的农机触土部件普遍采用堆焊^[78]、熔敷^[79]和钎焊硬质合金^[80]的方式对犁铧、深松铲、旋耕刀的易磨损部位进行保护,显著提高了使用寿命并形成了批量应用。英国的 SPALDINGS 公司,利用钨极氩弧熔覆的方法,在深松铲尖的表面和刃口堆

焊 WC 硬质颗粒,提高深松犁铲耕作寿命的同时保证其耕作的可靠性(如图 5a)。美国 EUROSHARE 公司,利用 Ni 基焊条在铲尖堆焊耐磨层,形成自磨锐犁铲,入土能力强,提高使用寿命的同时,降低油耗。日本小桥工业株式会社的 Zplus1 旋耕刀,通过在旋耕刀表面制备耐磨自熔合金涂层,使得涂层与基体之间存在硬度差,工作时切削刃更锋利,使用寿命提升 1.5 倍(图 5b)。在 2025 年汉诺威农机展上,阿玛松(AMAZONE)展出的触土部件采用了硬质合金钎焊与局部堆焊增强技术。其高端系列产品在易磨损区域进行针对性硬质合金镶嵌,并采用包边设计以降低冲击损伤,应用中实际磨损量仅为未强化部件的 1/3。该公司将产品分为 3 个等级:普通(original)、堆焊(HD)和钎焊硬质合金(HD pro),其中 HD pro 的刀片和刀尖采用特殊角度的硬质合金板,环绕切割刃,减少磨损,全面保护所有的易损部分,降低硬质合金的断裂风险。



图 5 国外品牌农机触土部件

Fig. 5 Foreign brand agricultural machinery soil-engaging components

国内也有大量的研究机构开展了农机触土部件材料研究,如中国农业机械化科学研究院集团有限公司承担了农机装备材料生产应用示范平台建设项目,联合国内 11 家优势企业针对我国农机装备领域表面工程技术应用水平低、关键零部件使用寿命短、可靠性差的问题,面向收获机、拖拉机、旋耕机、采棉机、秸秆粉碎机等先进收获机械和农机装备,围绕犁

铧和旋耕刀、收获刀具和采棉指、传动轴和齿轮、曲轴和拨叉等 8 种典型零部件,建设了农机关键零部件表面制备材料生产应用示范线等 5 条新材料生产应用示范线,1 条农机装备研制以及试验验证示范线。其中,MnB 系耐磨钢、犁铧耐磨堆焊材料、旋耕刀和圆盘耙片表面强化耐磨涂层材料的应用实现使用寿命提高 50%,可靠性显著提高^[81]。其他研究机构,如华中农业大学、河北农业大学、沈阳农业大学、山东农业大学以及黑龙江八一农垦大学等科研机构围绕旋耕刀、犁铧等触土部件寿命提升也开展了大量研究并取得成效^[82-86]。如图 6 所示,青岛沃瑞田农业装备有限公司、青岛征和工业股份有限公司、江苏金秆农业装备有限公司、河南龙丰实业股份有限公司等企业已将表面涂层技术应用于其生产的农机触土部件表面,产品在国内外实现应用^[87-90]。

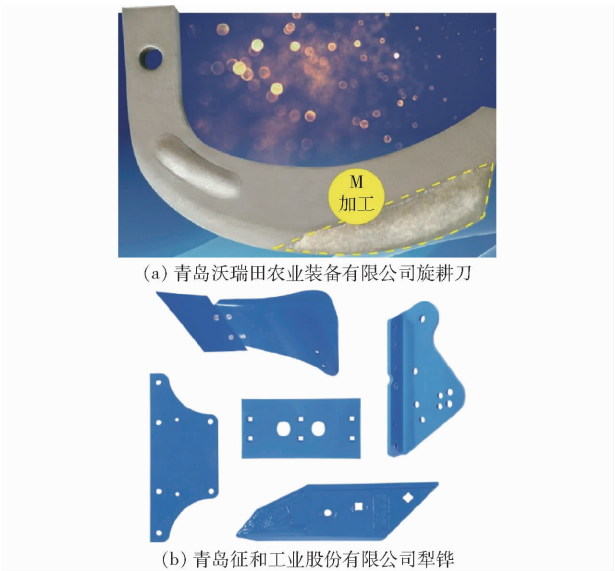


图 6 国内品牌农机触土部件

Fig. 6 Domestic brand agricultural machinery soil-engaging components

3.2 材料性能评价方法

如 1.2 节所述,触土部件需根据实际工况匹配

相应的材料性能,通常应具备优异的耐磨性、良好的抗疲劳与抗冲击性能;在特殊工况下,还需兼顾防粘附与耐腐蚀性能。

耐磨性是评价触土部件材料性能的核心指标,也是提升其使用性能的关键方向。目前,触土部件耐磨性的评价方法主要包括田间试验、实验室试验和数值模拟 3 种。表 3 系统对比了上述 3 种评价方法的优缺点及适用场景。田间试验通过实际作业环境,记录部件的服役寿命和磨损量,能够直观反映材料在真实工况下的耐磨表现。然而,该方法易受环境影响,试验结果往往离散性较大;同时,机具作业能耗较高,经济性较差^[91]。实验室试验则常见于销-盘摩擦磨损试验、磨粒磨损试验等手段,通过测定磨损质量、磨损体积、磨痕硬度等指标,实现对材料耐磨性能的量化评估^[92]。此外,土槽试验台也被用于对实际触土部件进行耐磨性测试,通过设置不同土壤条件并安装多种传感器,对比分析不同材料在实际部件中的耐磨表现^[93]。实验室方法具有高效筛选材料和快速获取性能的优势,但由于传感测量技术的限制,磨损数据的实时采集尚难以实现;同时,其试验结果尚未与田间磨损结果建立起有效关联。数值模拟技术的进步则为触土部件工作过程中的受力分析、磨损机理研究及土壤-作物-部件互作关系的建立提供了支撑,在部件结构和工作参数优化、材料选择等方面发挥了积极作用。然而,受边界条件设定和环境简化等因素的影响,当前数值模拟在复杂工况下的仿真精度仍存在一定偏差。

材料的疲劳性能、冲击性能及耐腐蚀性能评价均遵循相应的国家或行业标准。如疲劳性能可依据 GB/T 3075—2021《金属材料 疲劳试验 轴向力控制方法》进行测试;冲击性能可参照 GB/T 229—2020《金属材料 夏比摆锤冲击试验方法》进行评价;耐腐蚀性能则可按照 GB/T 10125—2021《人造气氛腐蚀试验 盐雾试验》开展检测。相关标准为材料性能的

表 3 触土部件耐磨性评价方法对比

Tab.3 Comparison of wear resistance evaluation methods for soil-engaging components				
评价方法	核心原理/手段	优点	局限性	适用场景
田间试验	实际作业环境服役,记录部件寿命与磨损量	真实反映实际工况,结果直观可信	周期长、成本高、环境因素不可控、结果离散性大	最终性能验证、产品定型考核
实验室试验	销-盘摩擦磨损试验、磨粒磨损试验、土槽试验台测试	条件可控、周期短、成本低、可高效筛选材料、定量评估	与田间结果关联性尚未建立、实时磨损监测困难、简化工况与实际存在偏差	材料初筛、机理研究、工艺优化
数值模拟	有限元法、离散元法模拟磨损过程与应力分布	可获取难以测量的物理量、支持多因素耦合分析、成本低、周期短	边界条件简化导致精度偏差、需试验数据验证、复杂工况模拟难度大	结构优化、参数设计、机理探索

规范评价提供了重要依据。

4 问题分析与发展展望

4.1 问题分析

农机触土部件材料的性能提升已受到高度重视。我国在“十四五”期间设立了重点研发计划专项,以支持新型低成本硼钢材料及其表面涂层技术的开发。然而,我国地域广阔,不同地区土壤环境条件差异显著,加之农机部件对成本较为敏感,使得触土部件材料在极端工况适应性、综合性能匹配、成本控制及产业化应用等方面仍面临诸多挑战。

具体而言,在磨粒磨损与腐蚀协同作用、交变载荷与土壤粘附叠加等复杂工况下,现有材料的综合性能仍难以满足使用要求,影响农机装备长时间稳定作业。此外,材料的耐磨性与韧性难以兼得,抗粘附性能与耐磨性能之间亦存在相互制约,这些问题亟待进一步突破。

在表面改性技术方面,尽管相关技术已得到广泛应用,但在成本控制、批量化生产质量一致性等方面仍有待提升,部分技术材料的性能也需进一步优化,以更好地适应现代农业装备的发展需求。

4.2 发展展望

面向未来,高性能、低成本、智能化、轻量化及可持续性将成为农机零部件及材料发展的主要方向。针对农机触土部件的材料发展路径,提出以下发展方向:

(1)推动高性能涂层材料的产业化应用与质量升级。重点突破高性能涂层材料及轻量化材料的规模化、低成本制备技术,加快实验室成果向实际应用

转化。同步建立涵盖原料规格、制备工艺到成品检测的全流程标准体系与质量控制体系,保障产品的一致性与可靠性。

(2)加强以实际作业工况为导向的设计与验证闭环。涂层及材料的设计应紧密结合农田作业的实际工况,提升部件在多环境因素作用下的适应性与耐久性。可引入智能感知与数据反馈机制,通过在关键部件集成低成本、高可靠传感器,实时监测受力、温度与振动状态,依托作业数据进行基于实际磨损或作业量的预测性维护,实现从经验设计向数据驱动的迭代优化。

(3)创新研发范式,构建可持续的产业生态。借助数字孪生与人工智能技术,利用机器学习与高通量计算加速新型材料成分与涂层结构的设计开发,建立关键部件的全生命周期数字孪生模型,在虚拟环境中实现性能仿真与优化评估,显著缩短研发周期、降低试验成本。同时,推动关键部件绿色再制造技术体系建设,重点突破高价值部件的再制造技术,配套构建旧件回收、性能评估与再制造认证标准体系,逐步形成“制造—使用—修复—再使用”的循环经济模式。此外,加强跨学科人才培养,鼓励企业与高校、科研院所联合培养具备材料科学、机械工程、农艺知识及数据科学素养的复合型技术人才。

(4)以差异化与性价比优势提升市场竞争力。在保障产品可靠性与适用性的前提下,通过优化结构设计、改进制造工艺和整合供应链资源,持续提升产品的性价比。针对不同地域、不同作物的作业需求,开发差异化的产品系列,以更强的市场竞争力满足多样化用户需求。

参 考 文 献

[1] 郝建军, 刘天龙, 赵建国, 等. 耕整播农机装备触土部件表面耐磨强化研究进展[J]. 农业工程学报, 2024, 40(11): 14 – 25.
HAO Jianjun, LIU Tianlong, ZHAO Jianguo, et al. Research progress in surface wear resistance strengthening of soil contact components in tillage and sowing agricultural machinery equipment[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(11): 14 – 25. (in Chinese)

[2] 贾洪雷, 王万鹏, 陈志, 等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 1 – 13.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1 – 13. (in Chinese)

[3] 武胜金, 王星星, 施进发, 等. 农机部件表面耐磨涂层的国内外研究现状[J]. 电焊机, 2020, 50(9): 232 – 238.
WU Shengjin, WANG Xingxing, SHI Jinfa, et al. Research status on surface wear-resistant coating of agricultural machinery components at home and abroad[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(9): 232 – 238. (in Chinese)

[4] XU Z, HUANG J, MAO M, et al. An investigation on the friction in a micro sheet metal roll forming processes considering adhesion and ploughing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 285: 116790.

[5] MISHRA T, ROOIJ M D, SHISODE M, et al. Analytical, numerical and experimental studies on ploughing behaviour in soft metallic coatings[J]. Wear, 2020, 448 – 449: 203219.

[6] KAROONBOONYANAN S, SALOKHE V M, NIRANATLUMPONG P. Wear resistance of thermally sprayed rotary tiller blades[J]. Wear, 2006, 263(1): 604 – 608.

[7] MA S, XU L M, XU S C, et al. Wear study on flexible brush-type soil removal component for removing soil used to protect

- grapevines against cold[J]. *Biosystems Engineering*, 2023, 228: 88 – 104.
- [8] ASL J H, SINGH S. Optimization and evaluation of rotary tiller blades: computer solution of mathematical relations[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 106(1): 1 – 7.
- [9] 汪瑞军, 宋月鹏, 詹华, 等. 农机装备关键部件表面工程技术与典型应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2025.
- [10] 黄建洪. 农机零件的磨损、选材及热处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [11] 郭俊, 姬长英, ARSLAN C, 等. 稻麦秸秆旋耕作业中受力与位移分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(10): 11 – 18.
GUO Jun, JI Changying, ARSLAN C, et al. Stress and displacement analyses of rice and wheat straws in rotary tillage process [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10): 11 – 18. (in Chinese)
- [12] ZHENG K, JIAN C, XIA J, et al. Effects of soil bulk density and moisture content on the physico-mechanical properties of paddy soil in plough layer[J]. *Water*, 2021, 13(16): 2290.
- [13] ALI S S, YAOMING L, MA Z, et al. Effect of grouser height on the tractive performance of single grouser shoe under different soil moisture contents in clay loam terrain[J]. *Sustainability*, 2021, 13(3): 1156.
- [14] YANG X, YANG Z Y, ZHANG X Y, et al. Experimental study on the influences of water content, consolidation time, and soil conditioning on the adhesion of clay in EPB shields[J]. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2022, 81(10): 426.
- [15] GE J, ZHANG D, WANG X, et al. Tractive performances of single grouser shoe affected by different soils with varied moisture contents[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2019, 11(5): 1687814019849133.
- [16] WANG S Y, ZHOU Z H, LIU P F, et al. On the critical particle size of soil with clogging potential in shield tunneling[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2023, 15(2): 477 – 485.
- [17] SHARIFI M A. Wear and coating of tillage tools: a review[J]. *Heliyon*, 2023, 9(6): e16669.
- [18] TOMASZ S, PIOTR K, BEATA B. Roughness of ploughshare working surface and mechanisms of wear during operation in various soils[J]. *Metals*, 2018, 8(12): 1042.
- [19] 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 Zhuojun, ZHANG Zuli. Abrasive wear of laser surface hardened sicr in soil[J]. *Tribology*, 2011, 31(1): 84 – 87. (in Chinese)
- [20] 李浩, 郝建军, 赵建国, 等. 国外农机触土部件土壤磨损机理研究现状及启示[J]. *农机化研究*, 2022, 44(9): 1 – 6.
LI Hao, HAO Jianjun, ZHAO Jianguo, et al. The status and enlightenment of research on soil abrasion mechanism of soil-engaging components of agricultural machinery abroad[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2022, 44(9): 1 – 6. (in Chinese)
- [21] 李祖阳, 陈文刚, 张垚, 等. 农业触土机具材料表面涂层减阻抗磨特性研究进展[J]. *材料热处理学报*, 2024, 45(11): 24 – 36.
LI Zuyang, CHEN Wengang, ZHANG Yao, et al. Research progress on resistance reduction and anti-wear characteristics of surface coatings on agricultural soil-touching implement materials[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2024, 45(11): 24 – 36. (in Chinese)
- [22] 吴志立, 赵建杰, 吴明亮, 等. 农机土壤工作部件耐磨强化研究进展[J]. *中国农机化学报*, 2016, 37(8): 256 – 264.
WU Zhili, ZHAO Jianjie, WU Mingliang, et al. Progress in wear resistance and surface modification of soil cultivating components for agricultural machinery[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(8): 256 – 264. (in Chinese)
- [23] 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 Jinbo, WANG Chenchao, WANG Yang, et al. Research on soil abrasive wear of contact parts of agricultural tillage machinery[J]. *Modernizing Agriculture*, 2015(1): 52 – 53. (in Chinese)
- [24] 王旭明, 李伟, 王晓莉, 等. 农机用耐磨材料的选择及对比[J]. *金属热处理*, 2017, 42(7): 35 – 37.
WANG Xuming, LI Wei, WANG Xiaoli, et al. Selection and comparison of wear resistant materials for agricultural machinery [J]. *Heat Treatment of Metals*, 2017, 42(7): 35 – 37. (in Chinese)
- [25] 杨海, 王俊发. 渗硼与热处理对耙片耐磨性的影响[C]//黑龙江省农业机械学会第十次会员代表大会暨学术报告会论文集, 2013.
- [26] GUPTA A K, JESUDAS D M, DAS P K, et al. Performance evaluation of different types of steel for duck foot sweep application[J]. *Biosystems Engineering*, 2004, 88(1): 63 – 74.
- [27] YAZICI A. Investigation of the wear behavior of martempered 30MnB5 steel for soil tillage[J]. *Transactions of the ASABE*, 2012, 55(1): 15 – 20.
- [28] KALÁCSKA Á, BAETS P D, FAUCONNIER D, et al. Abrasive wear behaviour of 27MnB5 steel used in agricultural tines [J]. *Wear*, 2020, 442 – 443: 203107.
- [29] DILAY Y, GNEY B, ZKAN A, et al. Microstructure and wear properties of WC10Co4Cr coating to cultivator blades by DJ – HVOF[J]. *Emerging Materials Research*, 2021, 10(3): 278 – 288.
- [30] KOSTENCKI P, STAWICKI T, KRÓLICKA A, et al. Wear of cultivator coulters reinforced with cemented-carbide plates and hardfacing[J]. *Wear*, 2019, 438 – 439: 203063.
- [31] MEHTA J, GREWAL J S, MITTAL P, et al. Comparison of dry and lubricated wear behaviour of 22MnB5 uncoated ultra high strength steel[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2021, 47: 1530 – 1534.

- [32] VRUBLEVSKIY O, OLEJNICZAK K, NAPIORKOWSKI J, et al. Modeling wear of different surface layers of agricultural tools in soil abrasive mass[J]. Measurement, 2025, 242: 116076.
- [33] 中国农业机械化科学研究院集团有限公司. 新材料所承担的国家重点研发计划项目通过年度审查[R/OL]. (2025-12-18)[2026-03-02]. http://www.caams.org.cn/zxxz/qydt/kjxw/202512/t20251224_607835.html.
- [34] KANG A S, CHEEMA G S, SINGLA S. Wear behavior of hardfacings on rotary tiller blades[J]. Procedia Engineering, 2014, 97(C): 1442-1451.
- [35] 徐奥. 碳化钨及碳当量对过共晶高铬铸铁高频感应堆焊层组织性能影响的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.
XU Ao. Effect of tungsten carbide and carbon equivalent on structures and properties of hypereutectic high chromium cast iron welding layers prepared by high frequency induction cladding[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018. (in Chinese)
- [36] 王驰, 孙俊生, 徐虎, 等. 原位自生 TiC 对高铬铸铁堆焊金属组织与性能的影响[J]. 机械工程材料, 2021, 45(9): 30-34.
WANG Chi, XU Junsheng, XU Hu, et al. Effect of in-situ synthesis TiC on microstructure and properties of high chromium cast iron surfacing metal[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45(9): 30-34. (in Chinese)
- [37] 马笑晗, 贺定勇, 秦志恒, 等. TiC 对亚共晶高铬铸铁堆焊合金组织及磨损性能的影响[J]. 中国表面工程, 2024, 37(4): 142-150.
MA Xiaohan, HE Dingyong, QIN Zhiheng, et al. Effects of TiC on the microstructure and wear resistance of hypoeutectic Fe-Cr-C hardfacing alloy[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(4): 142-150. (in Chinese)
- [38] 王志文, 刘秀波, 周安, 等. 表面技术提高农林机械耐磨性能及应用研究进展[J]. 中国表面工程, 2024, 37(4): 102-116.
WANG Zhiwen, LIU Xiubo, ZHOU An, et al. Research progress of surface technology to improve the wear resistance of agricultural and forestry machinery and application[J]. China Surface Engineering, 2024, 37(4): 102-116. (in Chinese)
- [39] 李明科. 65Mn 钢激光熔覆 WC-Ni 涂层裂纹形成机理及抑制方法[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
LI Mingke. Mechanism and suppression method of crack formation in 65Mn steel laser cladding WC-Ni coating[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2024. (in Chinese)
- [40] 王杉杉. 深松铲表面激光熔覆镍基复合涂层制备及性能研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2024.
WANG Shanshan. Preparation and performance of laser cladding Nickel-based composite coating on the surface of deep-shovel [D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2024. (in Chinese)
- [41] 程才. 秸秆还田机刀片表面激光熔覆工艺优化及性能提升研究[D]. 湛江: 广东海洋大学, 2024.
CHENG Cai. Optimization of the laser cladding process and enhancement of performance for straw returner blade surfaces[D]. Zhanjiang: Guangdong Ocean University, 2024. (in Chinese)
- [42] 李艳. 65Mn 钢表面激光熔覆 Fe60/WC 复合涂层组织结构及耐磨性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2023.
LI Yan. Study on the structure and wear resistance of laser cladding Fe60/WC composite coating on 65Mn steel surface[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2023. (in Chinese)
- [43] 王超, 姜芙林, 杨发展, 等. 激光能量密度对 65Mn 钢表面 Ni60A/WC 复合涂层摩擦磨损性能的影响规律[J]. 表面技术, 2024, 53(11): 181-192.
WANG Chao, JIANG Fulin, YANG Fazhan, et al. Effect of laser energy density on friction and wear properties of Ni60A/WC composite coating on 65Mn steel surface[J]. Surface Technology, 2024, 53(11): 181-192. (in Chinese)
- [44] 谢林圯, 师文庆, 吴腾, 等. 曲面基底工件激光熔覆温度场与应力场数值模拟[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 296-303, 325.
XIE Linxuan, SHI Wenqing, WU Teng, et al. Numerical simulation of temperature field and stress field of laser cladding on curved substrate workpiece[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 296-303, 325. (in Chinese)
- [45] 李响, 来佑彬, 杨波, 等. 等离子熔覆 Fe-Cr-C 合金涂层工艺优化及性能研究[J]. 表面技术, 2020, 49(6): 177-184.
LI Xiang, LAI Youbin, YANG Bo, et al. Process optimization and properties of Fe-Cr-C alloy coating prepared by plasma cladding[J]. Surface Technology, 2020, 49(6): 177-184. (in Chinese)
- [46] 屈平, 马跃进, 赵建国, 等. 原位合成 Ti(C,N)-WC/Ni60A 基复合涂层显微结构及性能[J]. 农业工程学报, 2014, 30(10): 73-81.
QU Ping, MA Yuejin, ZHAO Jianguo, et al. Microstructure and performance of in-situ synthesis Ti(C,N)-WC/Ni60A matrix composites coating[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(10): 73-81. (in Chinese)
- [47] MUNTEANU C, MELNIC I, ISTRATE B, et al. A comprehensive review of improving the durability properties of agricultural harrow discs by atmospheric plasma spraying (APS)[J]. Coatings, 2025, 15(6): 632.
- [48] MUNTEANU C, LUPU F C, ISTRATE B, et al. Use of thermal coatings to improve the durability of working tools in agricultural tillage machinery: a review[J]. Applied Sciences, 2026, 16(1): 474.
- [49] 李明曦, 李明, 黄海波, 等. 农机具触土部件表面处理技术研究进展[J/OL]. 中国表面工程, 2025: 1-18. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Ij-1FT9NYjBoiG5TUME01ZKMsIhn9y_RiztTRdW7Y2YTSxMu1KVkIOSAO7oZsBA7RmP3VmNTgPX4LQCiZHAS85cNLZXmtswzwMCtoNcV7Itkr0E7J_YiIRbepQ18A0J2KL2fJfydTLY4bNOuFncb6wsMiLFS3hmrwlkYOg_82UlnMli46H5Hw=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
LI Mingxin, LI Ming, HUANG Haibo, et al. Research progress in surface treatment technology of soil-engaging components of agricultural machinery[J/OL]. China Surface Engineering, 2025: 1-18. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=Ij-1FT9NYjBoiG5TUME01ZKMsIhn9y_RiztTRdW7Y2YTSxMu1KVkIOSAO7oZsBA7RmP3VmNTgPX4LQCiZHAS85cNLZXmtswzwMCtoNcV7Itkr0E7J_YiIRbepQ18A0J2KL2fJfydTLY4bNOuFncb6wsMiLFS3hmrwlkYOg_82UlnMli46H5Hw=&uniplatform=NZKPT&language=CHS

1FT9NYjBoiG5TUME01ZKMslhn9y _ RiztTrdW7Y2YTSxMu1KVkI0SAO7oZsBA7RmP3VmNTgPX4LQCiZHSA85cNLZXmtswz
wMCtoNcV7litr0E7J _ YilRbepQ18AOJ2KL2fjfydTLY4bNOuFncb6wsMiLFS3hmrwlkYOg _ 82UlnMli46H5Hw = = &uniplatform =
NZKPT&language = CHS. (in Chinese)

[50] PIOTR K, TOMASZ S, ALEKSANDRA K. Wear of the working parts of agricultural tools in the context of the mass of chemical elements introduced into soil during its cultivation[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2020, 9(2): 229 – 240.

[51] 蒋三生, 张新. 表面处理提高旋耕刀耐磨性研究现状[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(1): 27 – 29.
JIANG Sansheng, ZHANG Xin. Research status on surface treatment to improve wear resistance of rotary blade[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2020,48(1): 27 – 29. (in Chinese)

[52] 杨海. 田间触土部件磨损特性分析及耐磨技术试验研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2017.
YANG Hai. Wear Characteristic analysis and wear-resistant technique study of soil-engaging components [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017. (in Chinese)

[53] 沈宝国, 黄豪, 郭顺, 等. 渗碳工艺对高速液压翻转犁犁尖部件耐磨性的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(14): 35 – 42.
SHEN Baoguo, HUANG Hao, GUO Shun, et al. Effects of carburizing process on the wear resistance of plow tips of high speed hydraulic reversible plough[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(14): 35 – 42. (in Chinese)

[54] GUO Y, SUN Z, GUO S, et al. Research on a novel heat treatment process for boron steel used for soil-engaging components of tillage machinery[J]. Agriculture, 2024, 14(9): 1555.

[55] NALBANT M, PALALI A T. Effects of different material coatings on the wearing of plowshares in soil tillage[J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2011, 35(3): 215 – 223.

[56] ZHENG X, SUN B, GAO G, et al. Tribological performance and failure mechanisms of soil-engaging components with brazed WC – Ni coatings[J]. Tribology International, 2026, 214(PA): 111139.

[57] 浦娟, 李欣竹, 孙华为, 等. 柔性镍基碳化钨金属布真空钎焊工艺研究[J]. 材料导报, 2026, 40(3): 129 – 136.
PU Juan, LI Xinzhu, SUN Huawei, et al. Study on vacuum brazing process of flexible nickel-based tungstencarbide metal cloth [J]. Materials Reports, 2026, 40(3): 129 – 136. (in Chinese)

[58] 李宇佳, 孙志鹏, 张雷, 等. 金刚石钎涂技术在过流部件上的应用研究[J]. 电焊机, 2021, 51(10): 19 – 23,152.
LI Yujia, SUN Zhipeng, ZHANG Lei, et al. Application research of diamond brazecoating technology in flow passage components[J]. Electric Welding Machine, 2021, 51(10): 19 – 23, 152. (in Chinese)

[59] ALI W Y, EZZAT F M H. Wear of tillage tools coated by thermoplastic coatings[J]. Wear, 1994, 173(1): 115 – 119.

[60] BARZEGAR M, HASHEMI S J, NAZOKDAST H, et al. Evaluating the draft force and soil-tool adhesion of a UHMW – PE coated furrower[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 163: 160 – 167.

[61] MAJJI S, DUBEY K A, MONDAL R K, et al. Development of electron beam cross-linked pdms/ptfem composites with low coefficient of friction and high elastic modulus[J]. Polymer-Plastics Technology and Engineering, 2014, 53(5): 435 – 441.

[62] MEHRANG M S, SHAHGHOLI G, MOINFAR A. Effect of nano coating materials on reduction of soil adhesion and external friction[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 193: 42 – 49.

[63] REDDY C K, SHAILAJA D. Improving hydrophobicity of polyurethane by PTFE incorporation[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2015, 132(47): 42779.

[64] SONI P, SALOKHE V M. Influence of dimensions of UHMW – PE Protuberances on sliding resistance and normal adhesion of bangkok clay soil to biomimetic plates[J]. Journal of Bionics Engineering, 2006(2): 63 – 71.

[65] ZHENG X B, GAO G, SUN B G, et al. Study of frictional wear and desorption of nanoparticle-rubber blend modified UHMWPE composites[J]. Polymer Composites, 2024, 45(12): 10812 – 10825.

[66] GUAN C, FU J, XU L, et al. Study on the reduction of soil adhesion and tillage force of bionic cutter teeth in secondary soil crushing[J]. Biosystems Engineering, 2022, 213: 133 – 147.

[67] LI X, WANG R, CAI Y, et al. Biomimetic eco-friendly matter-repellent surfaces with superior soil adhesion resistance[J]. Surfaces and Interfaces, 2025, 56: 105630.

[68] 佟金, 马云海, 邓志华, 等. 鼠道犁仿生减阻扩孔器: 05312961[P]. 2012 – 10 – 10.

[69] 佟金. 地面机械触土部件减粘降阻的仿生改性研究[D]. 长春: 吉林大学, 1992.
TONG Jin. Characteristics of reducing adhesion and resistance of bionic coatings prepared for touching-soil components of terrain machinery[D]. Changchun: Jilin University, 1992. (in Chinese)

[70] 王晨臣, 李庆达, 汪昊, 等. 触土部件高熵合金耐磨涂层磨损性能研究[J]. 农机使用与维修, 2024(3): 23 – 26.
WANG Chenchen, LI Qingda, WANG Hao, et al. Study on the wear performance of high-entropy alloy wear-resistant coatings of soil-touched parts[J]. Farm Machinery Using & Maintenance, 2024(3): 23 – 26. (in Chinese)

[71] CUI T, WANG K, SHENG Y, et al. Effect of laser energy density on microstructures and properties of laser cladding CoMoCrSiFe coating[J]. Optics and Laser Technology, 2025, 192(PA): 113529.

[72] 丁子扬. 激光熔覆 AlCrFeNiCuMox 高熵合金组织性能研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.
DING Ziyang. Microstructure and properties of laser cladding AlCrFeNiCuMox high entropy alloy [D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[73] LI Z, CHEN W, LI D, et al. Frictional wear properties of different nano La2O3 composite FeCoNiCrMo high-entropy alloy coatings under soil conditions[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 35: 6874 – 6888.

[74] YIN M, CHEN W, LI D, et al. Effect of adding Y2O3 on microstructure and wear resistance of AlCrFeNiTi high-entropy alloy coating[J]. *Ceramics International*, 2025, 51(26PC): 50929–50940.

[75] 张冲. 激光熔覆高熵合金复合涂层制备及摩擦磨损性能研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2025.
ZHANG Chong. Research on the preparation and friction and wear properties of laser cladding high-entropy alloy composite coatings[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2025. (in Chinese)

[76] 梁乐. 基于低成本、高性能农机用钢的重型圆盘耙片的研发与制造技术——科技日报、兵团日报等媒体报道学部成果“新型国产重型圆盘耙”[R/OL]. (2025-11-13)[2026-02-28]. <https://tiame.ujis.edu.cn/info/1401/5431.htm>.

[77] 王莹, 武江民. 黑科技让国产农机配件更长寿[R/OL]. (2024-04-12)[2026-02-28]. <https://www.worker.cn/c/2024-04-12/8219779.shtml>.

[78] KIMAPONG K, POONAYOM P, WATTANAJITSIRI V. Microstructure and wear resistance of hard-facing weld metal on JIS-S50C carbon steel in agricultural machine parts[J]. *Materials Science Forum*, 2016, 4304(872): 55–61.

[79] MANTRI S A, CHEN W Y, ZHANG X. Microstructure and mechanical property evaluation of laser powder bed fusion manufactured Fe-9Cr-1Mo based G92 alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2026, 277: 117232.

[80] ANNAPPA A R, BASAVARAJAPPA S. Some studies on three-body abrasive wear behaviour of hardfaced steel alloy for agricultural plough tool application[J]. *International Journal of Abrasive Technology*, 2016, 7(3): 200–215.

[81] 中国农业机械化科学研究院集团有限公司. 全国首个农机材料领域应用示范平台建成大大提升农机使用寿命[R/OL]. (2024-01-29)[2026-02-28]. https://www.sinomach.com.cn/xwzx/zgsdt/2024_qydt/202401/t20240129_430017.html.

[82] 夏进启, 闫龙, 詹华, 等. 旋耕刀表面铁基涂层摩擦磨损性能研究[J]. *表面技术*, 2025, 54(7): 86–97.
XIA Jinqi, YAN Long, ZHAN Hua, et al. Friction and wear properties of iron-based coating on surface of rotary blade[J]. *Surface Technology*, 2025, 54(7): 86–97. (in Chinese)

[83] 杜永英, 李成华, 马业鹏, 等. 旋耕灭茬刀热处理参数对耐磨性影响的试验研究[J]. *农机化研究*, 2006, 28(3): 120–122.
DU Yongying, LI Chenghua, MA Yepeng, et al. Experiment study on influence of heat treatment of soil working parts on anti-wear properties[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2006, 28(3): 120–122. (in Chinese)

[84] 郝建军, 占志国, 侯俊英, 等. 旋耕刀 Fe/WC/CeO₂ 等离子堆焊层制备及其组织性能[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(24): 1–8.
HAO Jianjun, ZHAN Zhiguo, HOU Junying, et al. Preparation and microstructure properties of Fe/WC/CeO₂ plasma surfacing layer for rotary blades[J]. *Transactions of the CSAE*, 2021, 37(24): 1–8. (in Chinese)

[85] 田永财. 旋耕机刀片表面激光熔覆工艺及其耐磨性研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2016.
TIAN Yongcai. Research on laser cladding process and wear resistance of rotary tiller blade surface[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2016. (in Chinese)

[86] 闫勇, 王宏立. 深松铲尖表面激光熔覆强化试验研究[J]. *黑龙江八一农垦大学学报*, 2020, 32(1): 78–82, 108.
YAN Yong, WANG Hongli. Study on laser cladding strengthening technology for surface[J]. *Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University*, 2020, 32(1): 78–82, 108. (in Chinese)

[87] 刘文陶. 一种破碎机用耐磨锤头: 18736274[P]. 2022-11-08.

[88] 唐存干, 桂庚利, 胡小峰. 一种深松铲: 05237796[P]. 2021-02-26.

[89] 刘文陶. 一种旋耕刀: 15276883[P]. 2020-05-22.

[90] 唐存干, 肖茂华, 桂庚利, 等. 一种整体式栅条犁壁: 13140626[P]. 2022-09-02.

[91] 张艳静, 詹华, 徐天杨, 等. 农业机械耕作部件磨损性能试验研究现状[J]. *中国农机化学报*, 2024, 45(1): 61–67.
ZHANG Yanjing, ZHAN Hua, XU Tianyang, et al. Current research of experiment on wear performance for tillage tools of agricultural machinery[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2024, 45(1): 61–67. (in Chinese)

[92] MOSLEH M, GHARAHBAGH E A, ROSTAMI J. Effects of relative hardness and moisture on tool wear in soil excavation operations[J]. *Wear*, 2013, 302(1): 1555–1559.

[93] CURLEY M, JOSEPH T G. Cyclic loading and a modified ASTM G65 abrasion test[J]. *Wear*, 2017, 390–391: 346–354.