

# 稀土催渗碳氮硼共渗自磨刃割刀组织与性能研究

宋月鹏<sup>1</sup>, 王伟<sup>1,2</sup>, 李法德<sup>1</sup>, 宋占华<sup>1</sup>

(1. 山东农业大学 机械与电子工程学院, 山东 泰安 271018;  
2. 泰安市产品质量监督检验所, 山东 泰安 271000)

**摘要:** **目的** 提高旋转式割草机割刀耐磨性能和切割锋锐性能, 以实现刀具的长寿命作业和对作物的低损伤收获。**方法** 采用固体稀土催渗碳氮硼共渗, 对割刀后刀面及刀尖进行局部化学热处理, 通过扫描电子显微镜、光学显微镜及显微硬度计对共渗层组织、微区成分及硬度分布进行检测, 探讨割刀作业过程中形成自磨锐特性, 并进行田间试验验证。**结果** 割刀经 850 °C×4 h 稀土催渗碳氮硼共渗后, 后刀面及刀尖表面由硼化物层(厚度约 50~70 μm)和碳氮共渗层(厚度约 750~1000 μm)组成, 刃口处经高频加热油淬后, 外层硼化物由于共晶重熔使硬度有所增加。共渗割刀在厚度方向上实现了组织、成分和硬度的梯度均匀变化, 碳氮共渗层对表面高硬硼化物支撑能力有较大提升。作业过程中, 割刀后刀面及刃口处的表层硼化物硬度高、耐磨性好, 不易剥落及崩刃, 使用寿命长, 刃口突出可始终保持锋锐的切割性能, 从而形成了自磨锐特性, 实现了对再生作物的低损伤切割。田间试验结果表明, 与市售割刀相比, 共渗割刀耐磨性较高, 长时间作业后仍能保持锋锐的切割性能, 有利于作物切口的愈合与再生。**结论** 稀土催渗碳氮硼共渗的割刀, 由于组织、成分、硬度的梯度均匀变化, 在作业过程中形成自磨刃, 实现了刀具的长寿命作业和对作物的低损伤收获。

**关键词:** 稀土催渗; 碳氮硼共渗; 割刀; 自磨刃; 组织; 耐磨性

**中图分类号:** TG174.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)01-0340-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.01.030

## Microstructure and Properties of Self-sharpening Blades Via Carbon-Nitron-Boronized with Rare Elements Catalysis

SONG Yue-peng<sup>1</sup>, WANG Wei<sup>1,2</sup>, LI Fa-de<sup>1</sup>, SONG Zhan-hua<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;  
2. Taian Institute of Supervision and Inspection on Product Quality, Tai'an 271000, China)

收稿日期: 2020-02-21; 修订日期: 2020-11-30

Received: 2020-02-21; Revised: 2020-11-30

**基金项目:** 国家十三五智能农机装备重点研发计划项目(2016YFD0701701); 山东省自然科学基金(ZR2019MEE092); 山东省现代农业产业技术体系果品产业创新团队资金(SDAIT-06-12); 山东农业大学“双一流”奖补资金(SYL2017XTTD07)

**Fund:** Supported by Funds of National Key Research and Development for 13th Five-years Plan (2016YFD0701701), Natural Science Foundation of Shandong Province (ZR2019MEE092), Innovation Team Fund for Fruit Industry of Modern Agricultural Technology System in Shandong Province (SDAIT-06-12), Funds of Shandong Agricultural University “Double Tops” Programs (SYL2017XTTD07)

**作者简介:** 宋月鹏(1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为表面工程。

**Biography:** SONG Yue-peng (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: surface engineering.

**通讯作者:** 李法德(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新型农业与农产品加工机械关键技术基础理论及结构优化。邮箱: lifade@sdau.edu.cn

**Corresponding author:** LI Fa-de (1962—), Male, Doctor, Professor, Research focus: foundation theories and structure optimization of key technologies for new agricultural machineries. E-mail: lifade@sdau.edu.cn

**引文格式:** 宋月鹏, 王伟, 李法德, 等. 稀土催渗碳氮硼共渗自磨刃割刀组织与性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(1): 340-346.

SONG Yue-peng, WANG Wei, LI Fa-de, et al. Microstructure and properties of self-sharpening blades via carbon-nitron-boronized with rare elements catalysis[J]. Surface technology, 2021, 50(1): 340-346.

**ABSTRACT:** The work aims to improve the properties of wear resistance and cutting sharpness of rotary mower cutter, so as to realize the long service life of blades and lower the damage to crops. The flank surface and tip point of blades were heat-treated by carbon-nitron-boronized with rare elements catalysis technique. Scanning electron microscope (SEM), optical microscope (OM) and microhardness tester were used to detect the microstructure, components and hardness distribution of co-infiltrated layer. The self-sharpening characteristic formation mechanism of blades in the operation process was studied and verified with field test. After treatment of carbon-nitron-boronized with rare elements catalysis (850 °C×4 h), the flank surface and tip point of blades were composed of boride layer (about 50~70 μm thickness) and carbonitriding layer (about 750~1000 μm thickness). The cutting edge hardness of boride increased due to hypereutectic treatment after high frequency induction quenching in oil. Therefore, gentle gradient variation of microstructure, components and hardness of heated blades was exhibited following the thickness direction and the support ability of carbonitriding layer to external boride layer remarkably increased. In the working process, the blades had longer serve life due to higher hardness flank surface and cutting edge, excellent wear resistance as well as difficult peeling and edge flaking. The protruding cutting edge could always keep sharp cutting performance, thus forming self-sharpening characteristics and realizing low-damage cutting of regenerated crops. The results of field test indicated that compared with the blades available in the market, the co-infiltrated blades had higher wear resistance and could still keep the sharp cutting performance after long-term operation, which was conducive to the healing and regeneration of crop cutting damage. The blades after treatment with carbon-nitron-boronized with rare elements catalysis technique can form the self-sharpening characteristic in the operation process because of uniform gradient microstructure, components and hardness distribution for the flank surface and tip point, thus realizing the long service life and lowering damage to crops.

**KEY WORDS:** rare elements catalysis; carbon-nitron-boronized; blades; self-sharpening; microstructure and properties

畜牧业在国民经济中占有重要地位,其 50%以上的产值由饲草转化而来(如美国达 73%,澳大利亚、新西兰均在 90%以上)。但是,目前国产饲草料收获机械普遍存在可靠性差、无故障作业时间短等诸多问题,约 80%以上的高端农机装备需要进口,其中一个重要原因在于关键零部件可靠性差、使用寿命短<sup>[1]</sup>。割刀是现代饲草料收获机械的核心零部件,直接影响到整机工作可靠性与使用寿命、作业效率及能耗<sup>[2-6]</sup>。资料介绍<sup>[2-4]</sup>,国产饲草料收获机械切刀的使用寿命仅为国外产品的 1/3~1/2,国外高端饲草料收获机械普遍采用自磨锐刀具,但其制备难度大、成本高<sup>[3-4]</sup>。

化学热处理是国内制备自磨锐农机刀具的主要方法之一<sup>[3-4,7-9]</sup>,通过渗碳、渗硼、渗铬、碳氮共渗等工艺对农机刀具进行处理<sup>[7-9]</sup>。如内蒙古农业大学郭林、申庆泰等<sup>[8]</sup>对铡草机刀片进行渗碳处理;华中农业大学田波平等<sup>[9]</sup>采用硼铝共渗处理收割机刀片。这些刀具虽取得较好效果,但在制备及使用过程中存在渗层浅,热处理温度高,变形较大,硬度梯度大导致硬化层极易剥落等诸多问题,严重影响整机的工作可靠性及其作业效果。众多研究结果表明<sup>[10-20]</sup>,稀土元素不仅具有显著的催渗效果,能降低热处理温度,提高渗速,减小零件变形,还可以大幅提高渗层的硬度及耐磨性,Liu 等研究结果表明<sup>[10]</sup>,17-4PH 钢经 500 °C×4 h 气体离子碳氮共渗处理后,与未加稀土元素相比,加稀土元素形成的碳氮共渗层的厚度增加了 29%,硬度提高了 70~120HV,摩擦速率降低了 51%。宋月鹏等前期研究结果表明<sup>[11]</sup>,渗剂中的稀土含量对碳氮硼共渗层深度、硬度及致密度具有显著影响,经

过对固体共渗剂组分的优化设计,最佳稀土含量为 4%~6%。不仅如此,稀土催渗碳氮硼(CNB)共渗工艺还可以形成硬度呈均匀梯度分布的渗层,这对于饲草料收获机械割刀自磨锐特性形成、提高作业可靠性及效果具有重要意义。

本文采用的割刀基体材料为 40CrMoV,尺寸结构按国家标准(GB/T 10938—2008)执行,对割刀后刀面与刀尖处进行稀土催渗固体碳氮硼局部共渗处理,通过对共渗层的显微组织、成分及硬度分布进行检测分析,研究稀土催渗碳氮硼共渗割刀工作过程中自磨锐特性的形成原理及其对作物的低损伤切割机制,并进行田间试验验证。

## 1 试验

### 1.1 割刀的稀土催渗固体碳氮硼局部共渗工艺过程

采用固体法稀土催渗碳氮硼共渗工艺,渗剂由渗硼剂(55%)与碳氮共渗剂(45%)混合而成,渗硼剂组分(质量分数)为:稀土 6%,硼砂 25%,铁合金 25%,还原剂 15%,余量为添加剂。碳氮共渗剂组分为:尿素 25%,无水碳酸钠 8%,稀土 5%,无水乙酸钠 8%,余量为添加剂。

割刀刃口角度为 30°,除后刀面及刀尖外,其余部位均涂覆防渗涂料。按照文献[11]给出的热处理步骤进行共渗处理。渗罐材料为 316L 不锈钢,双层盖水玻璃泥密封,到温入炉。共渗工艺为 850 °C×4 h,

渗后进行空冷处理。从渗罐中取出共渗割刀清理,刃口处在 GY-40 型高频感应设备(山东莱州市新源电子设备厂)上加热,设备的输出功率是 40 kW,震荡频率是 30~50 kHz,通电加热 5 s 后油淬。

## 1.2 性能测试及组织观察

利用 Caikon-4XCE 型金相显微镜(上海蔡康光学仪器有限公司)进行显微组织分析及照相;采用 TH51 型显微硬度计(北京时代)进行材料的显微硬度测试;采用 SU7000 型扫描电镜(SEM,日立高新技术公司)进行组织分析及微区成分分布检测。

## 1.3 田间试验

田间试验在淄博市淄川区抽政园林基地进行,试验用草主要是园林绿化树培育基地内自生杂草,高约为 0.5~1.2 m,直径约为 3~5 mm。采用 9G-15 偏置式旋转割草机(石家庄鑫农机械有限公司)进行田间试验,该割草机共有四个刀盘,每个刀盘上又各有两个刀轴,每个刀轴上可安装 4 片割刀。将两组碳氮硼共渗自磨刃刀片(16 片)分别安装在两个刀盘上,将另一组市售割刀(65Mn 钢,刃口处感应淬火,16 片)安装到另两个刀盘上,两者进行相同条件下的现场割草试验。刀盘转速 1450 r/min,作业效率 0.4~0.8 公

顷/h,割茬高度 50~150 mm。作业不同时间后,测量两种割刀的磨损失重速率(g/h),最后对比不同割刀刃口处磨损宏观形貌及切割茬口的形貌。

## 2 结果及分析

### 2.1 稀土催渗碳氮硼共渗层的显微组织及成分分布

图 1 为割刀经 850 °C×4 h 稀土催渗碳氮硼共渗处理后,空冷状态下的显微组织形貌。由图可以看出,共渗割刀的后刀面外层由硼化物层和碳氮共渗层组成,如图 1a 所示。最外层的硼化物较为致密,与内层碳氮共渗层界面呈指状楔入,厚度约为 50~70 μm。硼化物具有较高的硬度( $\text{Fe}_2\text{B}$  为 1300~1700HV,  $\text{FeB}$  为 1500~2200HV)和优良的耐磨性能。与单一渗硼处理相比,稀土催渗碳氮硼共渗会形成厚度约为 750~1000 μm 的碳氮共渗层,如图 1b 所示,正火或淬火后,该区的硬度均比基体高,因此硬度梯度变缓,对外层硬的硼化物层起到良好的支撑作用,可使得割刀作业过程中,刃口处的硼化物层不易剥落或崩刃。这对于割刀自磨锐特性的形成,提高工作可靠性及作业效果是极为有利的。

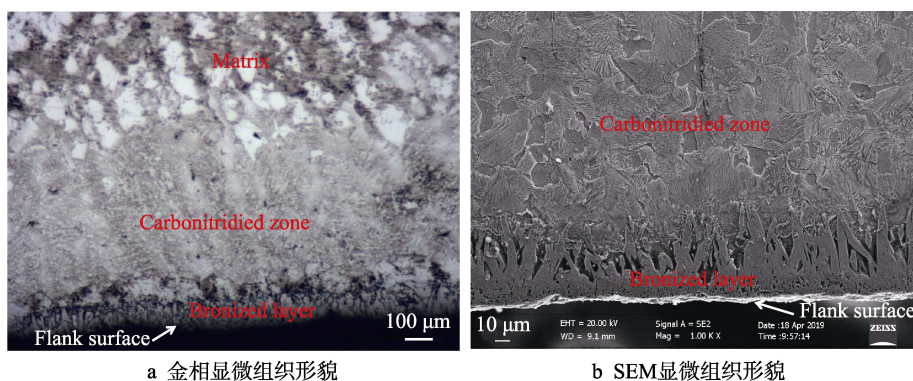


图 1 稀土催渗碳氮硼共渗层显微组织形貌

Fig.1 Microstructure morphology of carbon-nitron-boronized layer with rare elements catalysis: a) metallographic structure; b) SEM structure

众所周知,碳、氮、硼元素对钢铁材料的硬度及淬透性具有显著的影响,通过 SEM 结合微区成分进行这三种元素的线扫描分析(EDS),结果如图 2b—d 所示。由检测结果可以看出,硼化物层中,碳元素的含量较低,这与文献[11,14,18]给出的结论一致。主要原因是碳元素在硼化物中的溶解度极低,当外层硼化物形成致密层而逐渐向内层扩展时,表层的碳、氮元素将内迁形成所谓的过渡区,因此在硼化物层中,硼元素含量较高,碳、氮元素含量相对较低,而从过渡区、碳氮共渗区到基体,这两种元素呈梯度均匀变化分布。

进一步对共渗层中 Cr 与 Fe 元素分布情况进行线

扫描分析,结果如图 2e、f 所示。图中显示,这两种元素在硼化物区含量较低,在碳氮共渗区含量逐渐增加,这说明在热处理过程中,这两种元素逐渐向基体扩散。与基体相比,碳氮共渗区的 C、N、Cr、B 等元素含量较高,显著提高了该区的淬透性及马氏体硬度。

基于稀土催渗碳氮硼共渗层成分分布检测结果,可以得到共渗层形成机制:固体渗硼剂及碳氮共渗剂在高温下发生化学反应,生成活性稀土原子、硼原子、碳原子及氮原子。稀土原子首先吸附在钢件表面,沿晶界或其他结构缺陷处向基体扩散,由于原子半径较大,引起表面组织及晶格结构发生严重畸变,这为半

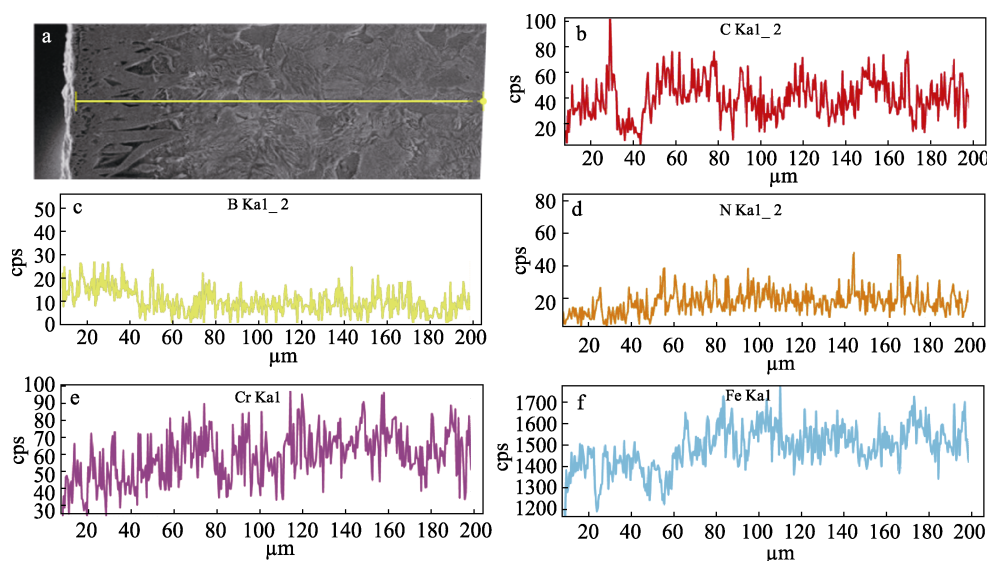


图 2 稀土催渗碳氮硼共渗层成分分布

Fig.2 Component distribution of carbon-nitron-boronized layer with rare elements catalysis

径较小的 C、N、B 原子的快速渗入创造了热力学条件<sup>[11-15,16-20]</sup>。当表层硼元素达到一定浓度时, 会形成  $\text{Fe}_2\text{B}$  相并逐渐长大, 一部分 Cr 原子溶入  $\text{Fe}_2\text{B}$  相, 可以大幅度降低  $\text{Fe}_2\text{B}$  的本质脆性<sup>[21]</sup>。由于 C、N 等元素在硼化物中溶解度较小, 因此表层的这些元素将逐渐向基体扩散, 形成碳氮共渗层。这种成分梯度分布对于提高该区的硬度及对表层硼化物支撑是极为有利的。

## 2.2 稀土催渗碳氮硼共渗层硬度梯度分布及其割刀的自磨锐特性

前已述及, 稀土催渗碳氮硼共渗层实现了成分及组织的梯度分布, 图 3 为割刀经稀土催渗碳氮硼共渗处理 ( $850\text{ }^\circ\text{C} \times 4\text{ h}$ ) 后, 两种状态 (空冷、刃口高频淬火) 下剖面沿厚度方向不同部位的硬度分布, 其中, 图 3a 中硬度的测量位置 L1 距刀尖处 1.0 mm, 图 3b 中 L2 距离刀尖处 5.0 mm。

由图 3 可以看出, 割刀的后刀面为硼化物层, 硬

度较高, 从后刀面到顶面的硬度逐渐降低, 并且梯度变化较为平缓。同时检测结果表明, 刃口处感应淬火后, 硼化物硬度有所升高, 如 L1 处, 靠近后刀面 0.01 mm 处, 淬火后硼化物硬度约为 1800HV, 而共渗后空冷处理的硼化物只有 1500HV。硬度升高的原因可能是由于高频加热时, 硼化物与 Fe 形成了共晶重熔处理, 枝状或锯齿状硼化物层形貌变得非常不明显, 与碳氮共渗层结合牢固, 初生的硼化物由杂乱无章的分布变为在试样横截面上沿长度方向排列, 并增加了其形核率, 晶粒得到细化, 表层硼化物不易剥落。图 4a、b 分别为感应加热前后的硼化物组织形貌对比。

对硼化物进行共晶重熔处理, 可以有效提高硼化物层的硬度、耐磨性。刘瑾的研究结果表明<sup>[22]</sup>, 随着高频感应加热电压强度的增大, 共晶体凝固过程中形核率的增加程度、晶粒的平均等效直径和所占体积分数都呈减小趋势, 因此导致外层硼化物晶粒细化、致密度增加, 硬度提高。张艳等<sup>[23]</sup>对金属模具表面稀土催化共晶渗硼组织及性能进行了研究, 发现经共晶重

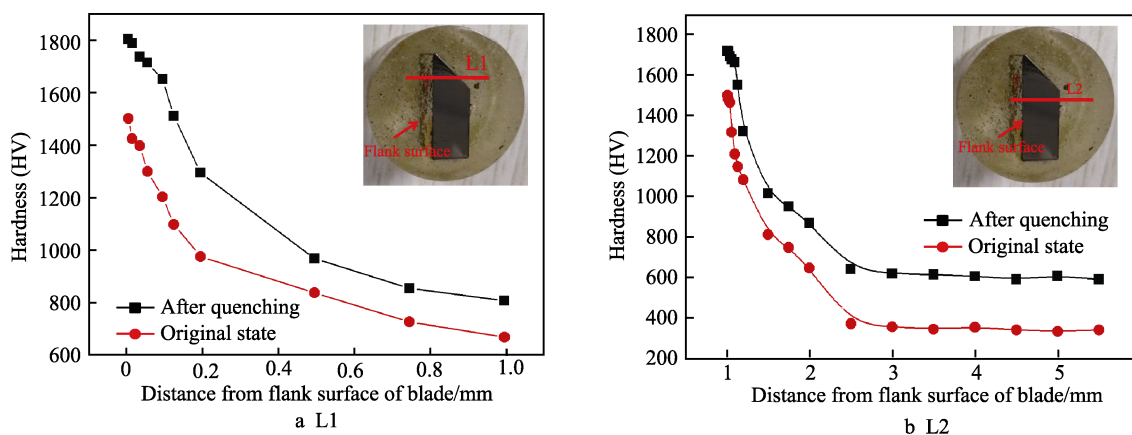


图 3 稀土催渗碳氮硼共渗割刀剖面的硬度分布

Fig.3 Hardness distribution of carbon-nitron-boronized blade with rare elements catalysis



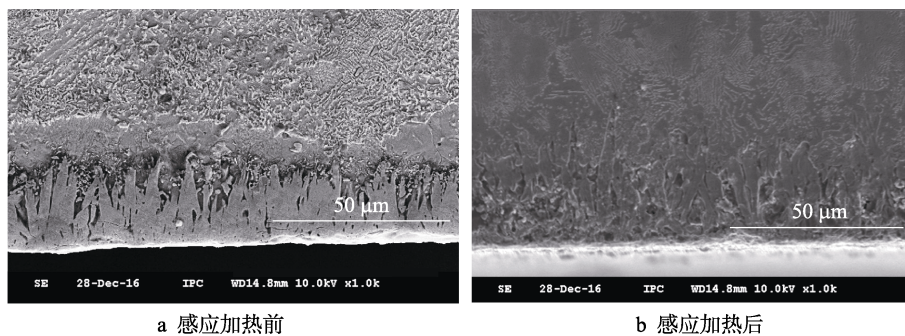


图4 稀土催渗碳氮硼共渗层感应加热前后的组织形貌对比

Fig.4 Comparison of microstructure morphology for carbon-nitron-boronized layer before and after induction heating treatment: a) before induction heating treatment; b) after induction heating treatment

熔处理后, 渗硼层硬度及耐磨性能显著提高。陈树旺等<sup>[24]</sup>对渗硼层进行高频感应加热共晶重熔处理后, 大幅提高了磨损、冲击和在高温条件下工模具的寿命。

割刀自磨锐特性形成的基本原理是, 工作过程中刃口处的两个刃面产生不同的磨损量, 使得刃口始终突出于前沿, 这样可较长时间保持割刀锋利的切割性能<sup>[2-4]</sup>。由此可见, 自磨刃是由于刀片工作过程中两刃面(前刀面、后刀面)磨损程度不同而形成的。就材料设计而言, 实现刃面硬度不同, 就可以实现割刀作业过程中磨损量的差异, 进而形成自磨锐特性。采用硬度呈梯度均匀分布的新材料制备自磨刃割刀, 可以长时间保证切割锋利性。宋月鹏<sup>[25]</sup>及 Rostek 等<sup>[5]</sup>采用不同梯度材料制备饲草料收获机械刀具零件, 取得了较好的使用效果。

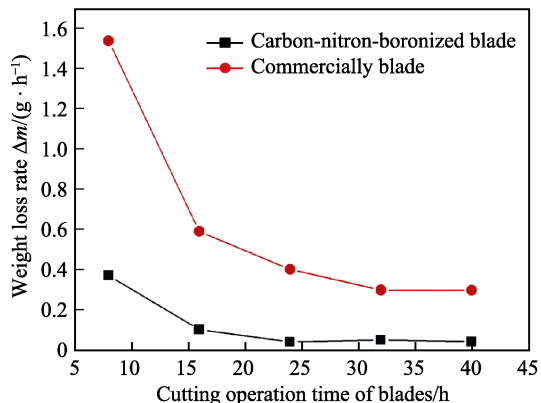
对割刀进行稀土催渗碳氮硼共渗处理时, 前刀面(除刀尖处外)及顶面均涂覆防渗涂料, 这些部位的表层无硼化物。显微硬度检测结果发现, 共渗割刀刃口淬火后, 刀尖处表层硼化物硬度约为 1700HV, 内层碳氮共渗层硬度约为 1000~1400HV, 耐磨性好, 对刀尖处硼化物有良好的支撑作用, 作业过程中不易剥落或崩刃。距后刀面 1 mm 处的前刀面硬度约为 780HV, 前刀面上从刀尖到顶面的硬度分布呈梯度均

匀变化, 因此刀尖部位始终保持锋利的切割性能。另一方面, 后刀面与割茬或土壤接触时, 磨损严重, 需要具有较高的硬度, 由图 3 中 L2 测量位置的硬度梯度分布检测结果可以看出, 在割刀厚度方向上, 硬度梯度比较平缓, 这对于割刀作业过程中自磨锐特性的形成具有重要意义。

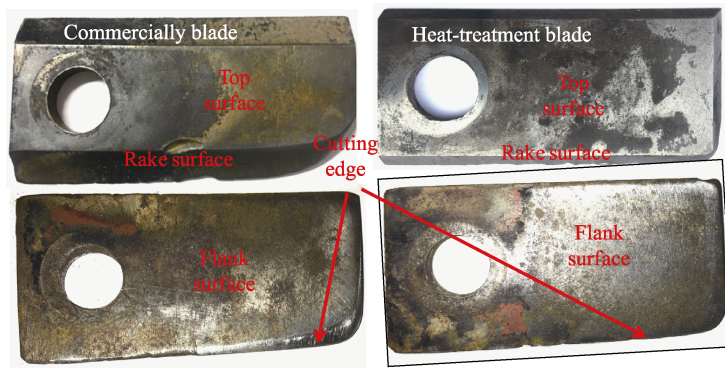
## 2.3 田间试验及其结果分析

图 5a 为两种割刀(市售割刀、稀土催渗碳氮硼共渗自磨刃割刀)在不同作业时间下的失重曲线, 图 5b 为相同条件下两种割刀作业 40 h 后, 割刀刃口及后刀面的宏观形貌比较。

由图 5a 可以看出, 相同条件下, 两种割刀作业初期的磨损失重速率较大, 但随着作业时间的延长, 割刀的磨损失重速率逐渐趋向于平稳。作业初期 8 h 内, 市售刀片磨损失重速率为 1.54 g/h, 而碳氮硼共渗割刀的失重速率仅为 0.41 g/h。随着作业时间逐渐延长, 两种割刀的失重速率均缓慢下降, 工作 40 h 后, 市售刀片磨损失重速率为 0.297 g/h, 而碳氮硼共渗割刀的磨损失重速率为 0.04 g/h。从割刀作业过程中的数据可以看出, 与国标市售割刀相比, 碳氮硼共渗割刀的耐磨性能提高 3 倍以上。这充分说明稀土催



a 不同工作时间磨损失重速率



b 宏观磨损形貌

图5 两种割刀在不同工作条件下的失重及宏观磨损状况

Fig.5 Weight loss and macro wear of two blades in the same cutting conditions: a) weight loss for different cutting time; b) macro wear

渗碳氮硼共渗自磨刀割刀耐磨性、使用寿命大幅度提升,这对于提高我国高端农机关键零件制备水平具有重要的现实意义。

进一步观察两种割刀作业 40 h 后的宏观形貌 (图 5b 所示),可以明显看出,市售割刀刃口处两个刃面形成了较大的圆弧半径而钝化,磨损极为严重。主要原因在于,市售割刀的处理工艺是,65Mn 钢板开刃后,刃口处进行高频感应淬火,此时刃口处前刀面与后刀面硬度相差不大,因此作业过程中两刃面磨损速率比较接近,这样会造成刃口处曲率半径逐渐增大而钝化,作业过程中对牧草茎秆撞击拉拔作用增强,使根部与土壤松动而枯萎。同时,钝化的割刀对牧草的切割作用变弱,使得切口处极为粗糙。图 6a 为市售割刀工作 40 h 后,继续切割牧草时形成的割茬切口形貌,这种粗糙的切口使牧草的水分及营养物质快速流失,极难愈合,对于像苜蓿之类的再生作物的再生过程具有不利影响,再生周期大幅延长。

而对于稀土催渗碳氮硼共渗割刀,由于后刀面为高硬硼化物,耐磨性好,沿割刀厚度方向上的前刀面硬度梯度均匀缓慢变化,作业时均匀磨损,刃口处曲率半径变化不大,始终保持锋锐的切割性能,这种自磨刀割刀对于牧草的低损伤切割是极为有利的。图 6b 为稀土催渗碳氮硼共渗自磨刀割刀工作 40 h 后,继续切割牧草时割茬切口的宏观形貌,由图可以看出,切口处比较平齐,茎秆损伤较小,再生芽破损小,非常利于切口的愈合与再生作物的正常生长。



a 市售割刀作业后

b 稀土催渗碳氮硼共渗割刀作业后

图 6 两种割刀作业 40 h 后割茬切口的宏观形貌比较  
Fig.6 Comparison of macro morphologies in cutting edges of two blades after working for 40 hours: a) blade available in the market; b) carbon-nitron-boronized blade with rare elements catalysis

### 3 结论

1) 40CrMoV 割刀经 850 °C×4 h 稀土催渗碳氮硼共渗后,后刀面外层由硼化物层 (约 50~70 μm) 和碳氮共渗层 (约 750~1000 μm) 组成,割刀刃口处

高频油淬后,外层硼化物共晶重熔处理导致硬度有所增加。

2) 稀土催渗碳氮硼共渗层实现了割刀厚度方向上组织、成分及硬度分布的梯度均匀变化,后刀面及刃口处表层硼化物硬度高、耐磨性好,碳氮共渗层对硼化物有良好的支撑作用,使得割刀作业过程中可以形成自磨锐特性。

3) 田间试验结果表明,稀土催渗碳氮硼共渗割刀耐磨性是市售割刀的 3 倍以上,作业 40 h 后仍然保持锋锐的切割性能,切口平齐,再生芽破损小,非常利于切口的愈合与再生作物的生长。

### 参考文献:

- [1] 中国农业机械化协会.《以改革创新为引领,加快推进我国农业机械装备制造转型升级》专题调研报告[R]. [2017-05]. <http://www.cama.org.cn/njxh/>.  
CAMA. Special investigation report for accelerating the transformation and upgrading China's agricultural machinery and equipment manufacture with the guidance of reform and innovation[R]. [2017-05]. <http://www.cama.org.cn/njxh/>.
- [2] 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.  
HUANG Jian-hong. Wear, material selection and heat treatment of agricultural machinery parts[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.
- [3] 宋月鹏, 王伟, 高东升, 等. 基于表面工程技术制备农机刀具的研究现状[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(1): 27-31.  
SONG Yue-peng, WANG Wei, GAO Dong-sheng, et al. Research status of agricultural machine cutting tools treated by surface engineering technology[J]. Journal of Chinese agricultural mechanization, 2018, 39(1): 27-31.
- [4] 宋月鹏, 高雪, 高东升, 等. 国内外农机自磨刀割刀的制备及其研究进展[J]. 热加工工艺, 2018, 47(2): 45-49.  
SONG Yue-peng, GAO Xue, GAO Dong-sheng, et al. Preparation and research progress of self-sharpening cutter for agricultural machinery in China and abroad[J]. Hot working technology, 2018, 47(2): 45-49.
- [5] ROSTEK T, HOMBERG W. Locally graded steel materials for self-sharpening cutting blades[J]. Procedia engineering, 2017, 207: 2185-2190.
- [6] LI Jian-chang, YANG Shu-hua, HAO Jian-jun, et al. Application of reaction nitrogen arc cladding TiCN/Fe composite coating on cutter of agricultural machinery[J]. China welding, 2016, 25(2): 47-52.
- [7] 郭金兵. 甘蔗收割机切割参数分析与切割刀耐磨强化的实验研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2016.  
GUO Jin-bing. Sugarcane harvester cutting parameter

- analysis and cutter wear-resistant strengthen experiment research[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2016.
- [8] 郭林, 申庆泰. 铡草机刀片自磨刃强化变形规律研究[J]. 农机化研究, 2013(12): 67-69.  
GUO Lin, SHEN Qing-tai. Hay cutter blade chemical heat treatment deformation strengthening research[J]. Journal of agricultural mechanization research, 2013(12): 67-69.
- [9] 田波平, 廖庆喜, 李章永, 等. 芦苇收割机刀片参数与工艺设计试验研究[J]. 农机化研究, 1997(4): 49-54.  
TIAN Bo-ping, LIAO Qing-Xi, LI Zhang-yong, et al. Experimental study on blade parameters and process design of reed reaper[J]. Journal of agricultural mechanization research, 1997(4): 49-54.
- [10] LIU R L, YAN M F, WU D L. Microstructure and mechanical properties of 17-4PH steel plasma nitrocarburized with and without rare earths addition[J]. Journal of materials processing technology, 2010, 210: 784-790.
- [11] 韩旭光, 宋月鹏, 刘立勇, 等. 基于稀土催渗碳氮硼共渗技术的研究与应用[J]. 中国农机化, 2010(4): 71-73.  
HAN Xu-guang, SONG Yue-peng, LIU Li-yong, et al. Study and application on boride-nitriding-carburized heat treatment technique based on the catalytic effects of rare earth elements[J]. Chinese agricultural mechanization, 2010(4): 71-73.
- [12] 王兰, 吴奕明, 卞国阳, 等. 稀土  $\text{La}_2\text{O}_3$  对 45 钢渗硼层性能的影响[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 94-99.  
WANG Lan, WU Yi-ming, BIAN Guo-yang, et al. Effect of rare earth  $\text{La}_2\text{O}_3$  on performance of 45 steel boronized layer[J]. Surface technology, 2019, 48(2): 94-99.
- [13] FAN M F. Study on absorption and transport of carbon in steel during gas carburizing with rare-earth addition[J]. Materials chemistry and physics, 2001, 70: 242-244.
- [14] YUAN Xing-dong, XU Bin, CAI Yu-cheng. A novel RE-chrome-boronizing technology assisted by fast multiple rotation rolling treatment at low temperature[J]. Applied surface science, 2015, 357: 2285-2289.
- [15] 金荣植, 杨新龙, 朱立硕. 先进的化学热处理催渗技术及应用[J]. 金属加工, 2016(S2): 1-7.  
JIN Rong-zhi, YANG Xin-long, ZHU Li-shuo. Advanced chemical heat treatment technology and application[J]. Metal working, 2016(S2): 1-7.
- [16] 韦乃安, 韦春贝, 代明江, 等. 稀土含量对 Ti6Al4V 钛合金等离子渗氮层组织和摩擦学性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(3): 148-154.  
WEI Nai-an, WEI Chun-bei, DAI Ming-jiang, et al. Effect of rare earth content on the microstructure and friction properties of Ti6Al4V alloy by plasma nitriding[J]. Surface technology, 2020, 49(3): 148-154.
- [17] 于玉城, 王振玲, 王树城, 等. 稀土加入量对 20# 齿轮用钢渗碳层组织及耐磨性的影响[J]. 表面技术, 2011, 40(2): 12-14.  
YU Yu-cheng, WANG Zhen-ling, WANG Shu-cheng, et al. Effects of the rare-earth addition on the carburizing layer structure and wear-resisting property of 20# steel used as the gear[J]. Surface technology, 2011, 40(2): 12-14.
- [18] YUAN Xing-dong, XU Bin, CAI Yu-cheng. Study on Cr-rare earth-boronizing of the steel 45 at low temperature[J]. Physics procedia, 2013, 50: 82-87.
- [19] 郑盼, 商剑, 张越. 稀土添加量对 20CrMnTi 钢表面碳氮渗层组织及性能的影响[J]. 表面技术, 2018, 47(7): 167-172.  
ZHENG Pan, SHANG Jian, ZHANG Yue. Effects of rare earth content on microstructure and properties of composite carbon-niobiumizing coatings prepared on 20CrMnTi steel[J]. Surface technology, 2018, 47(7): 167-172.
- [20] TANG L N, FAN M F. Effects of rare earths addition on the microstructure, wear and corrosion resistances of plasma nitrided 30CrMnSiA steel[J]. Surface and coatings technology, 2012, 206: 2363-2370.
- [21] 许斌, 宋月鹏, 冯承明. 降低渗硼层本质脆性对其磨粒磨损特性的影响[J]. 中国机械工程, 2001, 12(10): 1194-1197.  
XU Bin, SONG Yue-peng, FENG Cheng-ming. Effect of decreasing the eigen-brittleness of boride layer on its abrasion wear behavior[J]. China mechanical engineering, 2001, 12(10): 1194-1197.
- [22] 刘瑾. 脉冲电流对过共晶 Fe-C-B 合金初生硼化物形貌分布的影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.  
LIU Jin. Effect of electric pulse on primary boride in hypereutectic Fe-C-B alloy[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [23] 张艳, 鲍崇高, 侯书增. 金属模具表面稀土催化共晶渗硼组织及其性能[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48 (10): 96-100.  
ZHANG Yan, BAO Chong-gao, HOU Shu-zeng. The metal mold surface and properties of rare earth catalyst eutectic boride[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10): 96-100.
- [24] 陈树旺, 陈卫东, 王全胜. 高频感应加热渗硼及共晶化的工艺和组织研究[J]. 热处理, 2014, 29(2): 34-40.  
CHEN Shu-wang, CHEN Wei-dong, WANG Quan-sheng. Process of boronizing followed by eutecticum treating by high-frequency induction heating and case structure[J]. Heat treatment, 2014, 29(2): 34-40.
- [25] 宋月鹏, 高雪, 李法德, 等. 超重力熔铸梯度材料制备饲料草料收获机械自磨锐切刀[J]. 中国科学: 技术科学, 2018, 48(1): 94-100.  
SONG Yue-peng, GAO Xue, LI Fa-de, et al. Study on self-sharpening cutter for forage harvesting machine with functionally gradient material prepared by combustion synthesis melt-casting under ultra-gravity field[J]. Scientia sinica technologica, 2018, 48(1): 94-100.