doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.10.048

# 金属陶瓷自磨刃割刀对苜蓿低损伤切割机理分析

宋月鹏[1,2]　王　征[1,2]　吴　昆[1,2]　李法德[1,2]　宋占华[1,2]　杨　潇[3]

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院; 2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018;
3. 中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

**摘要**: 通过数值模拟仿真分析了割刀刃口曲率半径对苜蓿切割过程力学特性的影响,采用超重力燃烧合成技术制备金属陶瓷梯度材料,按照国标要求制备旋转式割草机割刀,探讨了金属陶瓷割刀作业过程中自磨刃形成原理及其对苜蓿的低损伤切割机理,并进行了田间试验验证。结果表明,割刀刃口曲率半径是影响锋锐性的重要因素,曲率半径越大,刃口钝化越严重,割刀对茎秆的切割作用变弱,而撞击作用增强,茎秆生长方向($Z$ 方向)拉应力增大,形成撕裂拉拔作用,使苜蓿切口粗糙、根部松动。自磨刃割刀的后刀面为金属陶瓷材料,其硬度高(760 ~ 780 Hv)、耐磨性好,前刀面硬度呈梯度平缓变化趋势,在作业过程中磨损均匀,刃口曲率半径变化较小而形成自磨锐特性,实现了对苜蓿的低损伤切割。田间试验表明,在相同条件下,与市售割刀相比,金属陶瓷自磨刃割刀切割苜蓿 66.7 $hm^2$ 后仍然保持锋锐的切割性能,苜蓿切口平齐,组织损伤较轻,自愈过程正常,再生芽保留完整,再生周期可缩短 5 ~ 10 d。

**关键词**: 金属陶瓷材料; 苜蓿; 低损伤切割; 自磨刃; 计算机模拟

**中图分类号**: S220.4　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2020)10-0421-06　　**OSID**:

# Fabrication of Self-sharpening Blades with Metalloceramics Materials and Low-damaged Cutting Mechanism of Alfalfa

SONG Yuepeng[1,2]　WANG Zheng[1,2]　WU Kun[1,2]　LI Fade[1,2]　SONG Zhanhua[1,2]　YANG Xiao[3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *Shandong Key Laboratory of Garden Machinery and Equipment*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
3. *Institute of Physical and Chemical Technology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190, *China*)

**Abstract**: Through computer simulation, effects of edge curvature radius of blade on the mechanical properties during alfalfa cutting process were inspected. Metalloceramics functionally gradient material was fabricated by combustion synthesis casting under an ultra-gravity field. The structure of metalloceramics blades was prepared as national standard. Formation principle of self-sharpening characteristics and low-damaged mechanism cutting alfalfa for the metalloceramics blades were analyzed. Research results were verified by field experiment. The results indicated that edge curvature radius of blade was the key factor influencing the sharpness property. More value of radius was, blunter of the edge would be. According to stalk of alfalfa cut by blades, reducing cutting and increasing striking aspects would be existed. In the alfalfa growth direction ($Z$ direction), enhanced tensile stress can accumulate the stalk, which can lead to some disadvantage such as coarse stubble of stalk, root loosen and so on. The flank surface of blades were made up of metalloceramics with preferentially oriented columnar eutectic matrix of iron/iron carbides for the high hardness (760 ~ 780 Hv) and wear resistance. Hardness gradient variation of rake face of blades can lead to regular wear. Self-sharpening characteristics, sharp cutting performance and low-damaged cutting alfalfa for metalloceramics blades were so formed because of slight variation for their edge structure. The results of field experiment indicated that in the same

收稿日期: 2020-02-11　修回日期: 2020-03-05

**基金项目**: 国家重点研发计划项目(2016YFD0701701)、山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE092)、山东省现代农业产业技术体系果品产业创新团队资金项目(SDAIT-06-12)和山东农业大学"双一流"奖补资金项目(SYL2017XTTD07)

**作者简介**: 宋月鹏(1971—),男,教授,博士,主要从事果园机械与装备和农机零部件性能研究,E-mail: uptonsong@163.com

**通信作者**: 李法德(1962—),男,教授,博士,主要从事农业机械化及其自动化研究,E-mail: lifade@sdau.edu.cn

condition, after harvesting alfalfa plant for 66.7 $hm^2$, compared with the commercial blades, the designed blades had excellent cutting performance: flush notches, slight damage of tissue, natural self-healing process, shorten regeneration period for 5 to 10 days and so on.

**Key words**: metalloceramics material; alfalfa; low-damaged cutting; self-sharpening; computer simulation

## 0 引言

苜蓿被誉为牧草之王,是畜牧业重要的饲喂原料,大力发展苜蓿等优质饲草料生产,着力提升苜蓿收获的机械化水平是我国“三农”工作的重要内容之一[1-3]。国外苜蓿采后再生时间为 28 ~ 32 d,一年可收获 5 ~ 8 茬,而我国一般一年只能收获 3 ~ 4 茬。现蕾期是苜蓿收获的最佳时期,苜蓿开花后相对饲用价值下降[4]。因此,及时收获至关重要,采收时间长及再生周期长是我国苜蓿产业目前亟需解决的突出问题[1,4]。

2018 年 8 月,CLAAS 公司 8 h 内在 4 块地共收获了 141.1 $hm^2$ 苜蓿,作业速度最快达 30 km/h[5]。作为收获机械的关键部件,切割刃具需具有优良的强韧性、耐磨性及锋锐性等力学性能[6-10]。国内外高端饲草料收获机械普遍采用自磨锐刃具,并配以自动磨刀装置。但这些刃具必须精准控制刃口耐磨层与基体母材磨损率,保持适当比例才能获得优良的自磨锐效果[6,11],这在工艺上很难控制。研究发现,采用硬度呈梯度分布的新材料制备自磨刃可以长时间保证切割锋锐性,ROSTEK 等[12]及宋月鹏等[13-14]分别采用不同的梯度材料制备饲草料收获机械割刀,申庆泰等[15]采用渗碳工艺制备饲料粉碎机自磨刃锤片,均取得了良好的使用效果。

金属陶瓷梯度材料具有优良的强韧性及耐磨性,目前已广泛用于高铁、航空航天及电力等作业条件极为苛刻的领域[16-17],是一种性能优良的低损伤切割自磨刃新型材料[13]。目前,金属陶瓷自磨刃割刀切割过程的力学特性、梯度材料割刀自磨锐特性形成原理及其对苜蓿的低损伤切割机理尚未见系统报道。

廖宜涛等[18]采用 ANSYS 软件对芦竹切割过程进行了模拟仿真,取得较好效果,本文采用 ANSYS Workbench 对苜蓿切割过程进行数值模拟仿真,分析割刀刃口曲率半径对切割力学特性的影响,采用超重力燃烧合成技术制备金属陶瓷梯度材料,按照国家标准(GB/T 10938—2008)要求制备旋转式割草机金属陶瓷割刀,对割刀剖面的显微组织及硬度分布进行检测分析,探讨切割苜蓿作业过程中金属陶瓷自磨刃割刀的低损伤切割机理,并进行田间验证试验。

## 1 材料与方法

利用 SolidWorks 2016 建立旋转式割草机割刀切割苜蓿的有限元分析模型,为了提高模拟效率,对切割模型进行简化,只保留刀盘(45 号钢)、割刀(65Mn,刃口角为 30°)和单株苜蓿,再用 ANSYS Workbench 支持的 x_t 文件格式导入,3 种材料的物性参数如表 1 所示[19]。

**表 1 有限元分析模型材料属性参数**

**Tab. 1 Physical property parameters of materials**

| 参数 | 苜蓿 | 65Mn | 45 号钢 |
|---|---|---|---|
| 密度/(kg·m$^{-3}$) | $2.56\times10^2$ | $7.82\times10^3$ | $7.89\times10^3$ |
| $E_X$/MPa | 101.3 | | |
| $E_Y$/MPa | 101.3 | | |
| $E_Z$/MPa | 37.8 | | |
| $\mu_{XY}$ | 0.22 | | |
| $\mu_{YZ}$ | 0.27 | | |
| $\mu_{XZ}$ | 0.27 | | |
| $K_{XY}$/MPa | 41.5 | | |
| $K_{YZ}$/MPa | 9.6 | | |
| $K_{XZ}$/MPa | 9.6 | | |
| $E$/MPa | | $2.11\times10^5$ | $2.11\times10^5$ |
| $\mu$ | | 0.288 | 0.269 |

网格划分过程中,苜蓿设置为柔性材料,割刀与刀盘均设置为刚体材料,划分方式为智能尺寸划分,有限元个数为 9 549 个,利用 Supports/Fixed 与 Loads/Force 命令将苜蓿草茎秆 6 个自由度固定,其中 Loads/Force 沿 $Z$ 轴方向,即 $F$ = 1 000 N;通过 Explicit Dynamic/Velocity 与 Explicit Dynamic/Angular Velocity 定义切割器整体运动,其中进给速度为 2 000 mm/s,刀盘旋转速度为 3 600 r/min,旋转中心为刀片中心点。

割刀结构及有限元分析模型如图 1 所示。

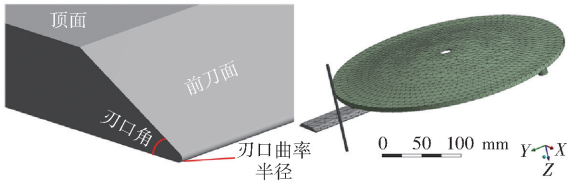



图 1 割刀结构及有限元分析模型

Fig. 1 Structure and FEM analysis model of blade

采用 $Fe_3O_4$/Al/铁基硬质合金颗粒的铝热体系，参照文献[13，20－22]的制备原理及步骤：按比例配制 $Fe_3O_4$/Al 铝热剂体系，其中 $Fe_3O_4$ 为工厂产生的氧化铁皮，球磨粉碎粒度为 150～300 μm 的颗粒。添加铁基硬质合金颗粒的粒度均为 100～200 μm，燃烧合成体系各组分的质量分数分别为：$Fe_3O_4$/Al 铝热剂 85%，V－Fe 3%、Mo－Fe 3%、Mn－Fe 4% 及 Cr－Fe 5%。超重力系数为 1 000，稳定旋转后点火，铝热剂发生剧烈反应，其化学反应为

$$Fe_3O_4 + Al + (VC,\ Cr_7C_3,\ MoC) \rightarrow Al_2O_3 + (FeCrVMo)C/Fe$$

高温高热金属 Fe 熔体及硬质合金颗粒熔覆到预置底部 10 mm 厚的 45 号钢板表面，形成金属陶瓷梯度材料，按照国家标准(GB/T 10938—2008)结构要求制备饲草料收获机械割刀，取样部位如图 2a 所示，图 2b、2c 分别为金属陶瓷割刀及剖面组织硬度测量试样，该割刀顶面为 45 号钢，后刀面为金属陶瓷梯度材料。

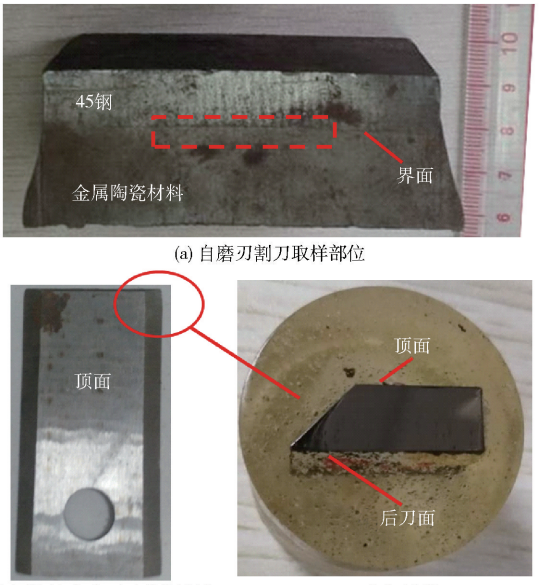
利用 TH51 型显微硬度计对梯度材料层进行显微组织硬度测量，利用 Caikon－4XCE 型金相显微镜进行组织观察并照相，利用扫描电镜(SEM，HITACHIS－4300 型)结合能谱仪进行材料显微组织观察及微区成分分析(EDS)。

与国家标准市售刀片置于同一设备的刀轴上，在相同工作条件下，进行苜蓿现场切割作业的对比试验，通过分析割刀剖面硬度分布、作业 66.7 $hm^2$ 苜蓿后不同割刀刃口的磨损状况及切口形貌，探讨金属陶瓷割刀自磨锐特性的形成及其对苜蓿的低损伤切割机理。

## 2　结果与分析

### 2.1　刃口曲率半径对割刀切割过程的仿真模拟

作物茎秆切割过程实际上是一个刃具/茎秆协同耦合作用下完成的复杂力学及摩擦过程，研究表明，割刀刃口曲率半径是影响刃具锋锐程度及切割




(a) 自磨刃割刀取样部位

(b) 金属陶瓷自磨刃及检测部位　　(c) 金相试样

图 2　金属陶瓷自磨刃取样位置及其刃口组织性能检测试样

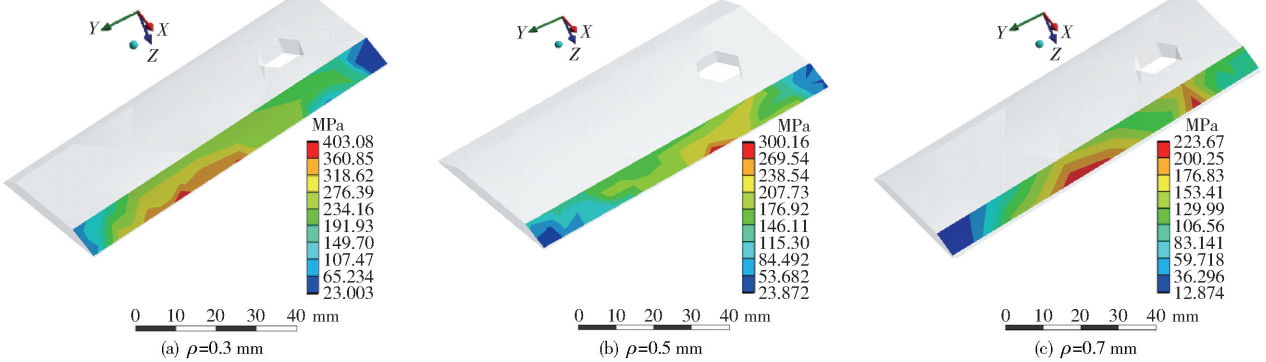
Fig. 2　Sample position of metalloceramics blade and its microstructure and property measurement sample

力学特性的重要因素[6,11,23]。

对不同刃口曲率半径(0.3、0.5、0.7 mm)的割刀切割苜蓿过程进行仿真模拟，图 3 为不同刃口曲率半径割刀切割苜蓿过程中前刀面等效应力分布云图。由图 3 可知，随着割刀刃口曲率半径增加，等效应力逐渐减小，对苜蓿的切割作用变弱，当曲率半径为 0.3 mm 时，对苜蓿切割应力可达 403.08 MPa，当曲率半径增大到 0.7 mm 时，切割应力为 223.67 MPa，下降了近 44.4%。切割作用变差会导致作业效率降低，能耗增加[6,10]。据文献[6]可知，当茎秆粉碎机刀片刃口磨钝后，拖拉机速度由 3 挡降到 2 挡，工作效率降低 20%，油耗反而上升 20%，间接验证了本文模拟结果的可靠性。

苜蓿在不同刃口曲率半径的割刀切割断裂过程中，苜蓿生长方向(Z 方向)应力分布的仿真模拟结果如图 4 所示。

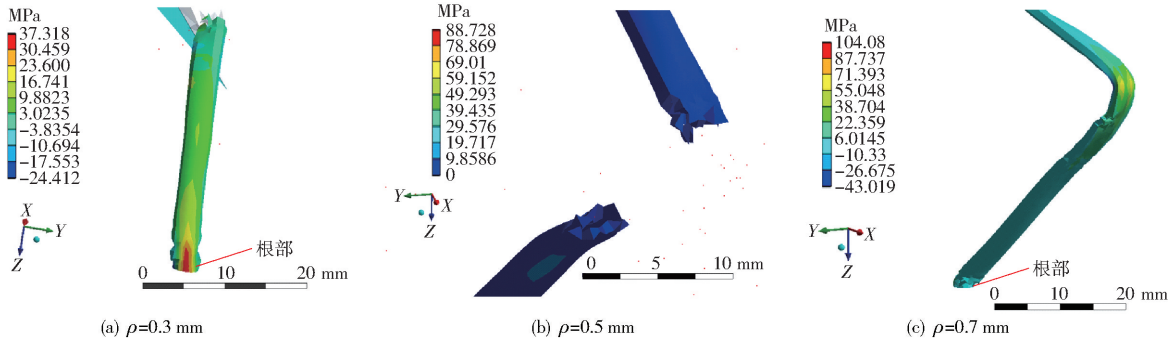
由图 4 可知，随着刃口曲率半径增加，苜蓿生长




(a) $\rho$=0.3 mm　　(b) $\rho$=0.5 mm　　(c) $\rho$=0.7 mm

图 3　不同刃口曲率半径($\rho$)前刀面等效应力分布云图

Fig. 3　Equivalent stress distribution on rake surface for different edge curvature radii of blade




(a) $\rho$=0.3 mm (b) $\rho$=0.5 mm (c) $\rho$=0.7 mm

图 4 不同刃口曲率半径苜蓿 $Z$ 轴方向的应力分布云图

Fig. 4 Stress distribution in $Z$ direction of alfalfa cut by different edge curvature radii of blade

方向($Z$ 轴方向)受力越来越大,即作业过程中,割刀对苜蓿的拉拔作用越来越大,当刃口曲率半径达到 0.7 mm 时(图 4c),割刀对苜蓿的拉应力达到 104.08 MPa,几乎是曲率半径为 0.3 mm(图 4a)时拉应力的 3 倍,作用在 $Z$ 轴方向上的拉力会使苜蓿根部松动,甚至从土壤中直接拔出,因此,在苜蓿主产区,收获后若浇水不及时可导致作物枯萎死亡[1],我国水资源贫乏的西北牧草主产区,情况尤为严重[24]。

因此,由模拟分析结果可以看出,刃口曲率半径是割刀锋锐性的重要影响因素,曲率半径越大,刃口钝化越严重,对苜蓿茎秆的切割作用越弱,撞击作用增强导致茎秆弯曲,O'DOGHERTY 等[25]利用高速摄像也获得了与图 4c 极为相似的茎秆变形形状,而苜蓿的生长方向($Z$ 方向)拉应力增大形成撕裂拉拔作用,使得苜蓿切口粗糙及根部的松动,这对于苜蓿的再生过程极为不利。

## 2.2 割刀显微组织及硬度分布

采用 $Fe_3O_4$/Al/高硬合金颗粒体系,经计算,该铝热剂的绝热温度为 3 148.2 K(纯铁的沸点温度)[13,26],超重力燃烧合成金属陶瓷材料过程中,产物 Fe 及 $Al_2O_3$ 均呈高温液相形态且密度差较大(Fe 为 7.138 g/cm$^3$,$Al_2O_3$ 为 3.008 g/cm$^3$),超重力场使多相快速分离,同时,多种金属陶瓷硬质合金颗粒(V-Fe、Mo-Fe 等)由于熔点、密度不同,在铁熔体内运动学及颗粒分布特征存在较大差异,形成硬度呈梯度分布的金属陶瓷材料。

金相显微组织观察及微区成分分析结果表明[13,20],金属陶瓷材料基体是产物 Fe 择优取向的柱状晶组织,在基体上弥散分布着高硬的 V-Fe 和 Cr-Fe 合金颗粒,由于铝热反应形成的铁熔体温度极高,这些合金颗粒表面熔化,与基体呈冶金结合,颗粒尺寸变小为 20~50 μm。由于 V-Fe 和 Cr-Fe 密度均小于铁熔体(V-Fe 为 7.0 g/cm$^3$,Cr-Fe 为 6.9 g/cm$^3$),因此,这两种颗粒主要集中于金属陶瓷材料的顶端,沿超重力方向逐渐减少并呈线性排列[13,20]。

自磨刃割刀后刀面为金属陶瓷材料,V-Fe 和 Cr-Fe 颗粒含量较高,硬度高(760~780 Hv),耐磨性好。距离后刀面越远,这两种颗粒的含量逐渐变少,硬度缓慢降低,如距后刀面 1 mm 处,硬度约为 650 Hv,而 2 mm 处硬度为 600 Hv。割刀顶面为 45 号钢,图 5 为厚度方向上距割刀后刀面不同距离处的硬度分布。

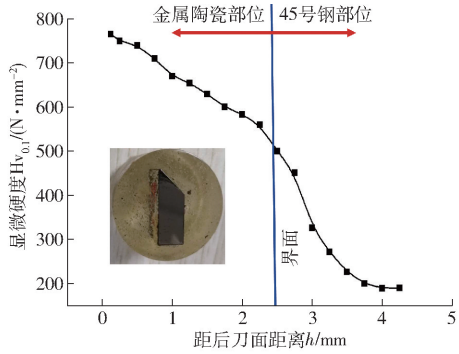



图 5 割刀剖面沿厚度方向的硬度分布

Fig. 5 Profile hardness distribution following thickness direction of metalloceramics blade

材料成型过程中,高温金属陶瓷材料熔体在超重力场作用下,对 45 号钢表面形成强烈的压焊作用,使得金属陶瓷材料/45 号钢界面处呈冶金焊合状态。

多相运动学分析结果表明[20],在金属陶瓷/45 号钢界面处,富集大量 Mo-Fe 颗粒,而 V-Fe 和 Cr-Fe 颗粒极少,硬度为 500 Hv 左右,实现了自磨刃割刀前刀面硬度的平缓梯度分布。这对于割刀自磨锐特性的形成及其对苜蓿的低损伤切割极为有利。

图 6 为不同割刀硬化层分布及刃口磨损模型示意图。图 6a 为刃口处整体淬火示意图,当割刀前刀面与后刀面硬度差别不大时,切割过程中,两刃面的磨损速率接近,导致刃口处曲率半径逐渐增大而变钝[6],对苜蓿茎秆的切割力学特性恶化,切割作

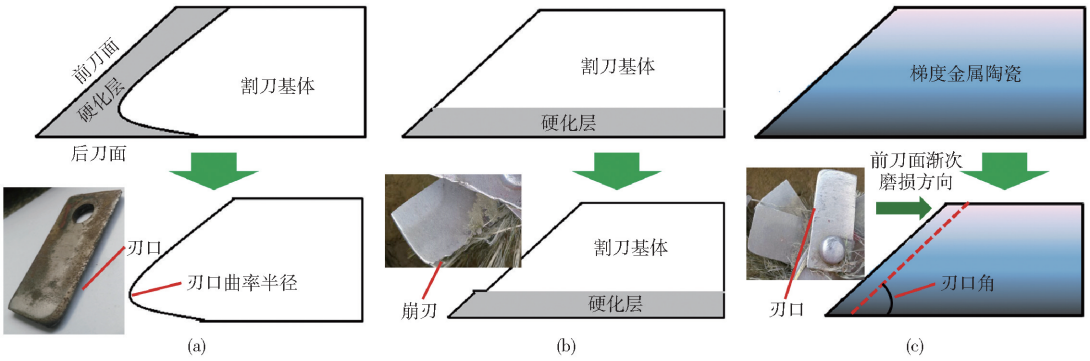



图 6　不同割刀硬化层分布及刃口磨损模型示意图

Fig. 6　Edge abrasion model and hardness distribution for different blades

用变弱而撞击、撕裂、拉拔作用增强。图 6b 为刃口硬化层/基体硬度、厚度匹配不合理，硬化层比基体磨损慢导致崩刃示意图。图 6c 为金属陶瓷自磨刃割刀示意图，由于硬度呈梯度平稳变化，没有界面结合层，不存在硬化层硬度、厚度的匹配问题以及结合界面强度问题；自磨刃割刀工作过程中，前刀面的磨损量呈渐次梯度变化，始终保持合理刃口角及刃口曲率半径，这对于苜蓿的低损伤切割极为有利。

## 2.3　割刀切割田间试验

采用 9G－15 型偏置式旋转割草机进行现场试验，该割草机共有 4 个刀盘，每个刀盘上又各有 2 个刀轴，每个刀轴上可安装 4 片割刀，将两组金属陶瓷自磨刃割刀（16 片）分别安装在 2 个刀盘上。将另一组市售割刀（16 片）安装到另 2 个刀盘上，两者进行相同条件下现场割草试验。牧草为 5 年生紫花苜蓿，茎秆直径约 2 mm，现蕾期切割，每小时作业 0.3～0.5 $hm^2$，收获约 66.7 $hm^2$ 后停机，对比两种割刀刃口形貌及苜蓿切口形貌。

田间试验结果表明，金属陶瓷自磨刃割刀后刀面是金属陶瓷材料，硬度高，耐磨性好，前刀面硬度呈平缓的梯度变化分布，作业过程中实现了均匀磨损，这样保证了刃口角与刃口曲率半径变化较小，可以始终保持较锋利的自磨锐特性，如图 7a 所示。从而实现了割刀刃口强韧性、耐磨性与锋锐性的有机统一。




(a) 金属陶瓷自磨刃割刀　　(b) 市售割刀

图 7　不同割刀作业 66.7 $hm^2$ 后刃口磨损情况对比

Fig. 7　Wear compassion of different blade edge after working for 66.7 $hm^2$

对于市售割刀，由于刃口处硬度分布不合理，后刀面磨损较快，前刀面磨损不均匀，导致刃口角及刃口曲率半径逐渐增大而变钝，切割性能恶化，如图 7b 所示。对于多茬生牧草作物如苜蓿等，对采收时间及采后再生要求极其严格，结果表明，刃口钝化的割刀（曲率半径增大）作业时，切割力学特性恶化（剪切应力减小、对茎秆的撞击拉拔作用增加）而大幅度降低收获效率，苜蓿的切口撕裂、纤维组织及潜伏芽遭破坏，水分及营养物质散失较快，苜蓿根部松动，自愈过程受到严重阻碍而影响作物的再生过程，导致再生周期延长，如图 8 所示。

对于金属陶瓷自磨刃割刀，实现了硬度梯度的平缓变化而形成自磨锐切割效果，长时间收获作业




(a) 割刀切割苜蓿模型　　(b) 磨钝割刀刃口形貌　　(c) 磨钝割刀切割苜蓿切口形貌

图 8　刃口变钝后切割苜蓿对再生芽点的损伤示意图

Fig. 8　Damage diagrammatic sketches for regenerating points of alfalfa cut by blade's blunted edge

后,仍然保持较为锋利的切割性能,苜蓿的切口平齐,组织损伤较轻,自愈过程正常,另外潜伏芽被完整保留,再生周期较短。

图 9 为相同条件下 2 种割刀作业 66.7 $hm^2$ 后,苜蓿切口的对比情况。



(a) 市售割刀 (b) 金属陶瓷自磨刃割刀

图 9 不同割刀作业 66.7 $hm^2$ 后苜蓿切口形貌比较

Fig. 9 Stubble comparison of different blade cutting after working for 66.7 $hm^2$

田间试验结果表明,两种割刀作业 66.7 $hm^2$ 后,与市售割刀相比,金属陶瓷自磨刃割刀切割苜蓿后,再生周期可缩短 5 ~ 10 d,每年可多收苜蓿 1 ~ 2 茬。同时还发现,金属陶瓷割刀的作业效率提高 10% ~ 20%,油耗降低 10% ~ 20%[13]。

## 3 结论

(1)割刀刃口曲率半径是影响切割锋锐性的重要因素,曲率半径越大,刃口钝化越严重,对牧草的切割作用变弱,对茎秆的撞击拉拔作用增强,茎秆生长方向($Z$ 方向)的拉应力增大,导致苜蓿切口粗糙、根部松动,不利于切口自愈及再生生长,导致收获周期延长。

(2)采用超重力燃烧合成技术制备的金属陶瓷梯度材料的割刀,在厚度方向实现了组织硬度的梯度均匀分布,后刀面硬度高、耐磨性好,前刀面硬度呈梯度平缓变化,使得作业过程中磨损呈渐次变化,刃口曲率半径变化较小,而始终保持锋锐的切割性能,割刀从而形成了自磨锐特性,实现了对苜蓿的低损伤切割。

(3)与市售割刀相比,金属陶瓷自磨刃割刀切割苜蓿 66.7 $hm^2$ 后,仍然保持较为锋利的切割性能,苜蓿的切口平齐,组织损伤较轻,自愈过程正常,潜伏芽被完整保留,再生周期缩短。

## 参 考 文 献


[1] 王德成,贺长彬,武红剑,等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(8):1 -25.
WANG Decheng, HE Changbin, WU Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(8):1 -25. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20170801&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.001. (in Chinese)

[2] 国务院. 关于加快推进农业机械化和农机装备产业转型升级的指导意见[E]. 国发[2018]42 号, 2018 年 12 月 29 日.

[3] 付作立, 王德成, 李卫, 等. 双圆盘式苜蓿旋转切割器设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018,49(增刊):214 -220.
FU Zuoli, WANG Decheng, LI Wei, et al. Desing and experiment of two-disc rotary mower of Alfalfa[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):214 -220. http://www.j-csam.org.jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2018s028&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.028. (in Chinese)

[4] 菲利普. 紫花苜蓿收获的关键技术[J]. 中国乳业, 2013(136): 8 -9.

[5] 马铮. CLAAS 宣称打破苜蓿收获世界纪录[J]. 农机市场, 2018(8):60.

[6] 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.

[7] 张炜, 吴劲锋, 马国军, 等. 苜蓿草粉对金属材料的磨料磨损试验[J]. 农业机械学报, 2009,40(11): 64 -67.
ZHANG Wei, WU Jinfeng, MA Guojun, et al. Experiment of metal materials abrasive wear for alfalfa powder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 64 -67. (in Chinese)

[8] 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.

[9] NIRANATLUMPONG P, SUKHONKET C, NAKNGOENTHONG J. Wear resistant surface treatment of pulverizer blades[J]. Wear, 2013, 302:878 -881.

[10] GAO H, MATHANKER S, MOMIN M A, et al. Effects of three cutting blade designs on energy consumption during mowing-conditioning of *Miscathus giganteus*[J]. Bimass and Bioecergy, 2018, 109:166 -171.

[11] 宋月鹏, 高雪, 高东升, 等. 国内外农机自磨刃割刀的制备及其研究进展[J]. 热加工工艺, 2018,47(2): 45 -49.
SONG Yuepeng, GAO Xue, GAO Dongsheng, 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. (in Chinese)

[12] ROSTEK T, HOMBERG W. Locally graded steel materials for self-sharpening cutting blades[J]. Procedia Engineering,2017, 207: 2185 -2190.

[13] 宋月鹏, 高雪, 李法德, 等. 超重力熔铸梯度材料制备饲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 Yuepeng, GAO Xue, LI Fade, 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 Techno Logica, 2018, 48(1): 94 -100. (in Chinese)

[14] 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/OL]. 表面技术,https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20200617.1604.046.html. 2020 -06 -18.
SONG Yuepeng, WANG Wei, LI Fade, et al. Research on microstructure and properties of self-sharpening blades via Carbon -Nitron -Boronized with Rare Elements catalysis[J/OL]. Surface Technology, https://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1083.TG.20200617.1604.046.html. 2020-06-18. (in Chinese)

[15] 申庆泰, 金敏, 池少英, 等. 饲料粉碎机锤片磨损特征与自磨刃强化处理[J]. 农业机械学报, 2010,41(增刊): 229 -232.
SHEN Qingtai, JIN Min, CHI Shaoying, et al. Wearing chatacteristics and self-sharpening enhanced treatment of fee grinder hammer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(Supp.):229 -232. (in Chinese)


(下转第 309 页)

[14] LI Mo, FU Qiang, SINGH V P, et al. Stochastic multi-objective modeling for optimization of water-food-energy nexus of irrigated agriculture[J]. Advances in Water Resources, 2019, 127(5): 209 - 224.
[15] FU Qiang, LIU Wei, CUI Song, et al. Geostatistical analysis of factors affecting irrigation water use efficiency on the Sanjiang Plain[J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers, 2017, 60(2):431 - 438.
[16] LI Mo, FU Qiang, SINGH V P, et al. Managing agricultural water and land resources with tradeoff between economic, environmental, and social considerations: a multi-objective non-linear optimization model under uncertainty[J]. Agricultural Systems, 2020, 178: 102685.
[17] LI Mo, FU Qiang, SINGH V P, et al. An optimal modelling approach for managing agricultural water-energy-food nexus under uncertainty[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 1416 - 1434.
[18] ZHANG Fan, TAN Qian, ZHANG Chenglong, et al. A regional water optimal allocation model based on the Cobb-Douglas production function under multiple uncertainties[J]. Water, 2017, 9(12): 923.
[19] 熊佳,崔远来,谢先红. 灌溉水利用效率的空间分布特征及等值线图研究[J]. 灌溉排水学报,2008,27(6):1 - 5.
XIONG Jia, CUI Yuanlai, XIE Xianhong. Spatial distribution of irrigation water use efficiency and its isogram[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(6): 1 - 5. (in Chinese)
[20] MORANKA D V, RAJU K S, KUMAR D N. Integrated sustainable irrigation planning with multi-objective fuzzy optimization approach[J]. Water Resources Management, 2013, 27(11): 3981 - 4004.
[21] PARITOH S, RAJ M S. Optimization of cropping pattern in a canal command area using fuzzy programming approach[J]. Water Resources Management, 2015,29(12): 4481 - 4500.
[22] MALAKAR K, MISHRA T, PATWARDHAN A. Inequality in water supply in India: an assessment using the Gini and Theil indices. Environment[J]. Development and Sustainability, 2018, 20(2): 841 - 864.
[23] GHEEWALA S H, SILALERTRUKSA T, NILSALAB P, et al. Water stress index and its implication for agricultural land-use policy in Thailand[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2018, 15(4):833 - 846.
[24] MOSLEH Z, SALEHI M H, FASAKHODI A A, et al. Sustainable allocation of agricultural lands and water resources using suitability analysis and mathematical multi-objective programming[J]. Geoderma, 2017, 303: 52 - 59.
[25] PEDRO-MONZONÍS M, SOLERA A, FERRER J, et al. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management[J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 482 - 493.

(上接第 426 页)

[16] LIU Jian, LI Juan, XU Chengying. Interaction of the cutting tools and the ceramic-reinforced metal matrix composites during micro-machining: a review[J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 2014,7(2): 55 - 70.
[17] ZHONG Lisheng, ZHNAG Xi, CHEN Shili,et al. Fe - W - C thermodynamics and in situ preparation of tungsten carbide-reinforced iron-based surface composites by solid-phase diffusion[J]. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2016, 57:42 - 49.
[18] 廖宜涛,廖庆喜,舒彩霞,等. 基于 ANSYS/LS - DYNA 的芦竹切割-进给速度匹配研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):30 - 34.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, SHU Caixia,et al. Matching of cutting and feeding speed for reaping *Arundo donax* L. based on ANSYS/LS - DYNA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(Supp.):30 - 34. (in Chinese)
[19] 张韬. 基于计算机模拟轻便型果园生草刈割机的研制[D]. 泰安：山东农业大学, 2018.
ZHANG Tao. Development of portable mower in orchard based on computer simulation[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[20] 高雪. 超重力燃烧合成自磨锐切刀梯度材料的制备工艺研究[D]. 泰安：山东农业大学, 2018.
GAO Xue. Study on preparation of gradient material for self-sharpening cutters based on combustion synthesis melt-casting under ultra-gravity field[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2018. (in Chinese)
[21] XU Yu, YANG Zengchao, HAN Zhao, et al. Fabrication of Ni/WC composite with two distinct layers through centrifugal infiltration combined with a thermite reaction[J]. Ceramics International, 2014, 40(1):1037 - 1043.
[22] SONG Yuepeng, LI Qian, LI Jiangtao, et al. Fabrication of W - Cu alloy via combustion synthesis infiltration under an ultra-gravity field[J]. Metal and Materials International, 2014, 20(6):1145 - 1150.
[23] 刘庆庭, 区颖刚, 卿上乐, 等. 甘蔗茎秆切割力的计算[J]. 农业机械学报, 2006,37(9): 89 - 92.
LIU Qingting, OU Yinggang, QING Shangle,et al. Cutting force calculation of sugarcane stalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2006,37(9): 89 - 92. (in Chinese)
[24] 乔子楣,刘敏国,杨惠敏. 高寒地区灌溉对建植当年紫花苜蓿产量、水分和光能利用率的影响[J]. 中国草地学报, 2020, 42(3): 86 - 93.
QIAO Zimei, LIU Minguo, YANG Huimin. Effects of irrigation on yields, water and light efficiencies of first year Alfalfa in the alpine region[J]. Chinese Journal of Grassland, 2020, 42(3): 86 - 93. (in Chinese)
[25] O'DOGHERTY M, GALE G E. Laboratory studies of the cutting of grass stems[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1986, 35(2):115 - 129.
[26] 宋月鹏, 王征, 高东升, 等. 铁氧化物/铝体系绝热温度数值计算与分析[J]. 硅酸盐学报, 2020,48(2): 253 - 257.
SONG Yuepeng, WANG Zheng, GAO Dongsheng, et al. Analysis on adiabatic temperature of ferric oxide aluminothermic system[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2020,48(2): 253 - 257. (in Chinese)