

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.072

真空复合轧制自磨锐割刀与其结合界面组织性能研究

宋月鹏^{1,2} 吴 昆^{1,2} 王 伟^{1,3} 许令峰^{1,2} 宋占华^{1,2} 李法德^{1,2}

(1. 山东农业大学机械与电子工程学院, 泰安 271018; 2. 山东农业大学山东省园艺机械与装备重点实验室, 泰安 271018; 3. 泰安市产品质量监督检验所, 泰安 271000)

摘要: 采用真空复合轧制工艺,将3种钢板(GCr15、Q420、IF)轧制成梯度复合材料,对其结合界面处的微观组织、成分及硬度分布、抗剪强度进行了检测,并对梯度材料自磨锐割刀进行了田间试验。结果表明,不同板层界面处材料间相互咬合形成较为紊乱的冶金结合方式,界面处元素相互扩散形成过渡区,组织缺陷较少。结合界面处的抗剪强度均超过了国标要求,且断裂方式为韧性断裂,不同界面间存在较为平缓的硬度梯度变化。梯度材料自磨锐割刀后刀面、刀尖及刃口材料为GCr15钢,硬度高、耐磨性好,前刀面的硬度呈梯度变化,磨损均匀,作业过程中可始终保持刀尖前凸,刃口曲率半径变化较小,能够长时间保持刃口的锋锐性与再生作物的低损伤切割。田间试验结果表明,相同作业条件下,梯度材料自磨锐割刀耐磨性是市售割刀的3倍以上。

关键词: 真空复合轧制; 结合界面; 自磨锐割刀; 组织性能; 低损伤切割

中图分类号: S220.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0586-07

Fabrication of Self-sharpening Blades via Vacuum-rolling Composite Technology and Its Interfacial Material Microstructure and Properties

SONG Yuepeng^{1,2} WU Kun^{1,2} WANG Wei^{1,3} XU Lingfeng^{1,2} SONG Zhanhua^{1,2} LI Fade^{1,2}(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
2. Shandong Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Shandong Agricultural University, Taian 271018, China
3. Taian Institute of Supervision and Inspection on Product Quality, Taian 271000, China)

Abstract: Composite gradient plates with GCr15, Q420 and IF steel was fabricated by vacuum-rolling composite (VRC) technology and the forage harvester blades were prepared. Microstructure, chemical composition and hardness distribution, and shear strength in the interface of composite gradient plates were inspected. In order to compare the cutting performance between composite gradient material self-sharpening blades and commercial blades, the field experiment was carried out. The results indicated that a more disordered metallurgical bonding characteristics because of materials inter-biting characteristics at the interface of different plates (GCr15/Q420, Q420/IF) during rolling process was formed. With fewer microstructure defects, transition zone was formed due to the chemical compositions diffusion in the interface. The shear strength of the bonding interface exceeded the requirements of the national standard, which can meet the requirements of gradient material self-sharpening blades. The interface fracture mode was ductile fracture with good plasticity. There was a relatively gentle hardness gradient variation between different interfaces. The flank surface, point tip and cutting edge of self-sharpening blades were made up of GCr15 steel with higher hardness and wear resistance. Hardness gradient variation and uniform wearing for rake surface of self-sharpening blades were remarkably exhibited. In the operation process, self-sharpening blades improved the operation efficiency and service life. It can keep the tool tip in the prominent position and edge curvature radius slightly change, which can maintain sharpness property of blades and low-damage cutting of regeneration. Field experiment can obtain the results comparison of wear weight-loss rate and macroscopic morphology between the composite gradient material self-

收稿日期: 2020-08-16 修回日期: 2020-09-16

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: uptonson@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

sharpening blades and commercial blades. The results showed that under the same operation conditions, compared with commercial blades, the gradient material self-sharpening blades had more excellent properties: slightly variation of arc radius, edge curvature radius, and abrasive resistance. The further field experiment results indicated that the wear resistance of the self-sharpening blades was more than three times of that of commercial blades.

Key words: vacuum-rolling composite; interface; self-sharpening blades; microstructure and properties; low-damaged cutting

0 引言

割刀作为饲草料机械的关键工作部件,作业过程中苛刻的工况条件要求其具备优良的强韧性、耐磨性及锋锐性等综合力学性能。据统计,割刀磨损失效破坏约占 80% 以上^[1-3]。研究表明,刃口钝化可导致割刀切割性能下降,对作物茎秆的撞击、拉拔作用增加,切口粗糙,损伤严重,对作物切口的愈合及再生过程产生不利影响^[4]。国内外高端饲草料收获机械普遍采用自磨锐割刀并配以自动磨刀装置,其基本原理是,当割刀刃口处两刃面硬度不同时,工作过程中会产生不同磨损量,硬刃面突出而形成自磨锐效果^[2]。

表面工程技术(如表面熔覆、化学热处理等)是国内外制备自磨锐割刀的主要手段,但都存在一定问题^[5-6]。近年来,多层金属自磨锐刀具受到国内外的广泛关注,如 RADCHENKO 等^[7]采用粉末轧制+适当热处理制备自磨锐刀具,王黎辉等^[8]以 3 层金属轧制农用收获机复合刀片,均取得较好试验效果,但这些自磨锐割刀均存在成本高、变形大、结合界面容易开裂、剥落和制备工艺复杂等问题。

真空复合轧制(Vacuum-rolling composite, VRC)多层板材加热过程中处于真空环境,结合界面氧化物少,分布弥散,界面结合强度高,且生产成本低、效率高^[9]。因此通过合理设计板材成分、厚度及加工工艺,可以制备强韧性、耐磨性及锋锐性有机统一的自磨锐割刀^[10]。

本文对 3 种不同硬度板材(GCr15、Q420、IF)进行真空复合轧制,形成硬度呈梯度分布的多层金属复合梯度材料,进行金相显微组织分析及界面结合强度测试,而后按照国标(GB/T 10938—2008)结构要求制备饲草料收获机械割刀并进行现场试验。

1 材料与方法

试验用原材料为 3 种不同硬度的板材(GCr15、Q420、IF),主要化学成分及硬度(HV)如表 1 所示。

参照文献[10]的真空复合轧制工艺路线,将 3 种板材轧制成梯度复合材料,如图 1a 所示,然后按照国家标准(GB/T 10938—2008)制备饲草料收获

表 1 原材料的化学成分及硬度

Tab. 1 Chemical composition and hardness of raw materials

材料	C 质量 分数/ %	Cr 质量 分数/ %	Mn 质 量分 数/%	Si 质 量分 数/%	Fe 及 其他 元素	硬度/ HV
GCr15	0.956	1.45	0.293	0.240	Bal.	390
Q420	0.051	0.373	1.900	0.321	Bal.	270
IF	0.004	0.120	0.130	0.005	Bal.	90



(a)梯度复合材料

(b)割刀形貌

图 1 梯度复合材料及其割刀形貌

Fig. 1 Composite gradient plates and cutter morphology

机械割刀,刃口部位进行感应加热淬火,如图 1b 所示。

采用 Caikon-4XCE 型金相显微镜(上海蔡康光学仪器有限公司)观察显微组织并拍照,利用扫描电镜(SEM, SU7000 型,日本日立公司)结合能谱仪对梯度材料自磨锐割刀组织结构及微区成分进行检测,用 TH51 型显微硬度计(北京欧波同光学技术有限公司)对硬度分布进行显微组织硬度测量,采用 1 200 kN 电液伺服试验机(MTS, E65.126)检测多层金属自磨锐割刀界面剪切强度。

田间试验用草为自生杂草,高为 0.5 ~ 1.2 m,直径为 3 ~ 5 mm。试验设备为 9G-15 型偏置式旋转割草机(石家庄鑫农机械有限公司),将两组梯度材料自磨锐刀片(16 片)分别安装在两个刀盘上。将两组市售割刀(65Mn,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现场割草试验,刀盘转速 1 450 r/min,作业效率 0.4 ~ 0.8 hm²/h,割茬高度 50 ~ 150 mm,作业不同时间后测量两种割刀磨损失重速率,最后对比不同割刀刃口处磨损宏观形貌。

2 结果与分析

2.1 梯度材料自磨锐割刀显微组织及界面处成分分布

梯度材料自磨锐割刀后刀面及刀尖为硬度较高的 GCr15 材料,耐磨性好,顶面为硬度较低的 IF 钢材,中间层为硬度适中的 Q420,由此割刀前刀面实现了不同硬度的梯度分布。在作业过程中,割刀后刀面及刀尖处硬度高,耐磨性优良,前刀面的硬度呈梯度变化,磨损较为均匀,使得刀尖始终凸出而形成自磨锐效果,如图 2a 所示。

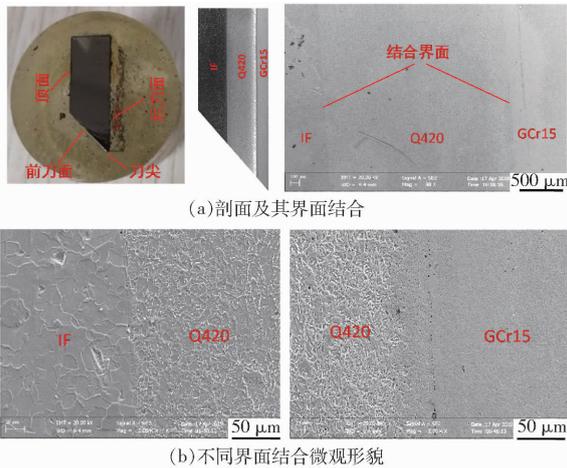


图 2 梯度材料自磨锐割刀界面结合形貌

Fig.2 Interfacial morphology of self-sharpening blades with composite gradient plates

不同板层间结合界面极易开裂是影响多层金属自磨锐割刀使用性能的重要因素,前期研究结果表明^[10],采用真空复合轧制工艺,可以获得 3 种金属

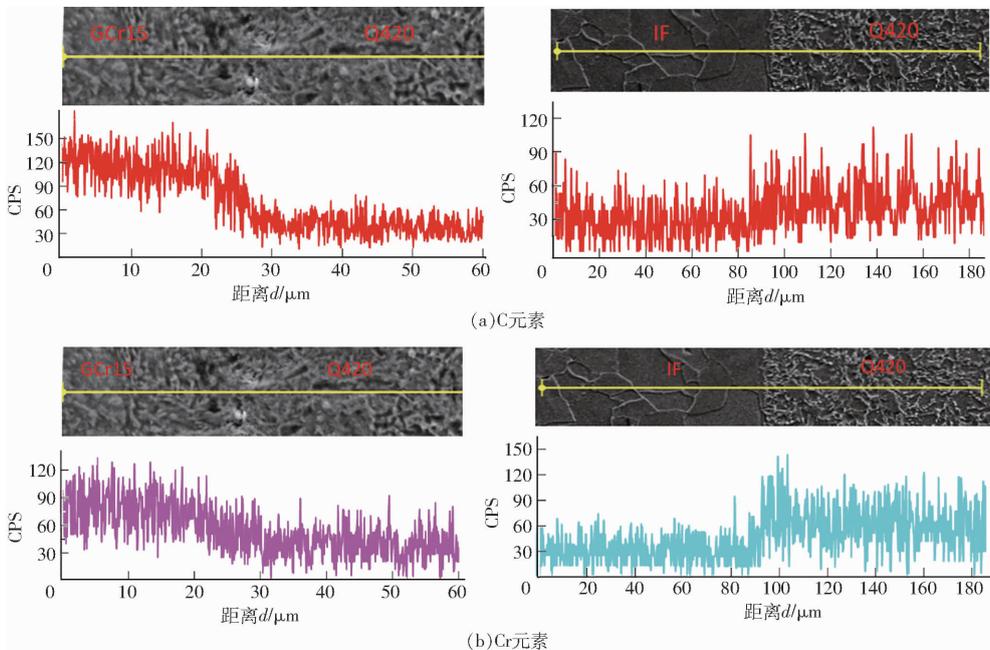


图 3 梯度材料自磨锐割刀界面处 C、Cr 元素线扫描分布

Fig.3 Carbon and chromium distribution in interface of self-sharpening blades with composite gradient plates

板材间呈冶金界面结合状态,组织缺陷(气孔、夹渣等)较少,如图 2b 所示。

从图 2 可以看出,界面两侧母材之间形成了约 40 μm 的结合界面层,该处的晶粒得到细化,晶粒沿轧制方向被压扁,形成相互流动的现象,保证了母材之间的结合性能,文献[10-16]均获得了相似的研究结果。

对不同板层间结合界面(GCr15/Q420、Q420/IF)微区化学成分进行了能谱检测,图 3 为不同界面处,C 及 Cr 元素线扫描分布情况。

研究结果发现,不同板层结合界面两侧存在较大的 C 元素及 Cr 元素的化学势,轧制温度为 1 250 $^{\circ}\text{C}$,轧制过程中,两种元素在高温下可以由高浓度区向低浓度区进行扩散,从而提高结合界面低碳一侧母材的硬度;同时 C 与 Cr 的亲合力较强,容易形成硬度较高的 Cr 碳化物相。这些碳化物相提高了低碳侧母材的硬度,在结合界面处形成了较为平缓的硬度过渡区,可有效减缓割刀内部的应力集中,形成硬度梯度分布的复合材料^[12,14-15]。

3 种板材真空复合轧制合坯前,对 3 种母材表面进行预处理(去油除锈、表面抽真空等),轧制过程中,在较大压下率作用下,不同板层界面两侧金属产生较大变形量,使得界面金属之间沿轧制方向发生相互挤出流动^[11,14,16],不同材料间相互咬合形成较为紊乱的界面结合方式,对于结合强度提升极为有利,如图 4a、4b 箭头指示部位。

进一步检测梯度材料自磨锐割刀的 GCr15/Q420 界面结合处成分分布,结果发现 O、Si、Mn 元素的含量均出现了轻微上升,如图 5 所示。

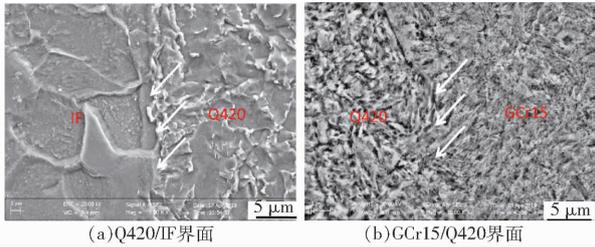


图 4 梯度材料不同界面紊乱的结合形貌

Fig. 4 Disordered binding morphology in interface area of composite gradient plates

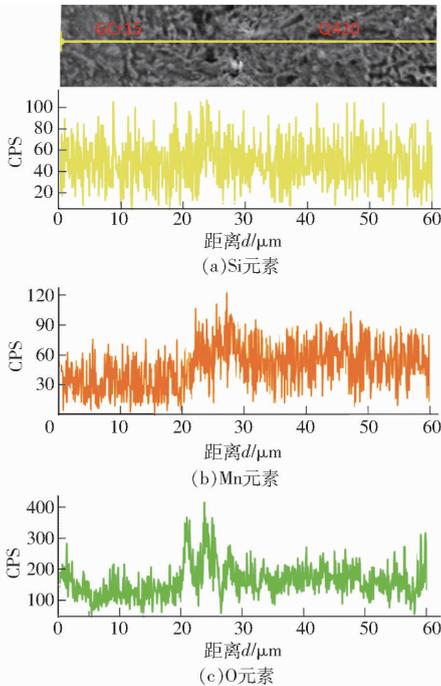


图 5 自磨锐割刀 GCr15/Q420 界面结合处 O、Si、Mn 元素分布

Fig. 5 Oxygen, silicon and manganese elements distribution in GCr15/Q420 of self-sharpening blades

图 5 表明 3 层板材轧制前表面残存、吸附的部分 O 元素在长时间加热中会优先与界面两侧的 Si、Mn 等易氧化元素发生反应,生成 Si - Mn 氧化物薄层,分布于两侧基体的原始界面,然后在轧制力的作用下在结合界面破碎散落成细小的氧化物^[17]。PENG 等^[18] 研究表明,真空轧制时界面处细小氧化物利于界面结合,制备多层复合板的材料力学性能越好。

2.2 梯度材料自磨锐割刀界面处抗剪强度及硬度分布

界面抗剪强度是多层金属材料使用性能重要的影响因素,直接决定了割刀的使用寿命。依据 GB/T 8165—2008 测试标准,在 1 200 kN 电液伺服试验机做凸耳试验检测梯度材料自磨锐割刀界面处的剪切强度。图 6 为 GCr15/Q420 结合界面的断口形貌。由图 6 可知,在剪切断口上存在颗粒状物质与

韧窝,颗粒状物质与基体有明显的粘接现象,表明结合界面的主要断裂方式为韧性断裂;韧窝的出现也表明了轧制结合界面具有良好的塑性。进一步研究发现,Q420/IF 结合界面断裂方式也为韧性断裂。

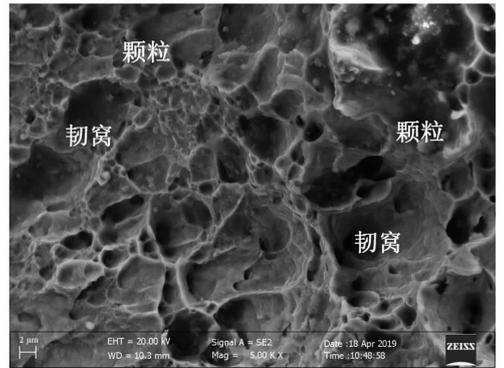


图 6 自磨锐割刀 GCr15/Q420 界面韧性断裂断口形貌

Fig. 6 Appearance characteristics of ductile fracture in GCr15/Q420 of self-sharpening blades

梯度材料不同板层界面韧性断裂模式由以下因素决定:①真空复合轧制多层板材加热过程中处于真空环境,结合界面处氧化物少且分布细弥,组织缺陷较少。②4 道次轧制,总压下量约为 85%,不同材料间相互咬合形成较为紊乱的界面结合,呈现冶金结合方式。③高温加热及轧制过程中,界面处元素相互扩散,形成了组织结构与性能平缓变化的过渡区^[19-21]。

多层金属板材热处理过程中,由于热应力及相变应力,导致界面处开裂也是影响使用性能的重要因素,对 3 种不同状态梯度材料自磨锐割刀试样(原始轧制状态、850℃ 水淬、850℃ 油淬)结合面抗剪强度进行检测分析,结果如表 2 所示。

表 2 3 种不同状态试样界面处拉剪强度

Tab. 2 Interfacial shear strength of composite gradient plates at different states

结合界面类型	试样状态	抗剪强度/MPa
GCr15/Q420	热轧板	333
	水淬	268
	油淬	259
Q420/IF	热轧板	312
	水淬	254
	油淬	247

由表 2 可知,与原始热轧状态割刀相比,淬火后割刀不同界面处抗剪强度均有所降低,可能是由于加热及淬火过程中存在较大内应力所致,但是,结合界面的抗剪强度均超过国家标准 GB/T 8165—2008 规定的复合板拉剪强度 210 MPa,能够满足梯度材料自磨锐割刀对界面结合强度要求。

利用显微硬度计对割刀剖面沿 GCr15/Q420/IF

方向进行显微组织硬度检测,硬度分布如图7所示。

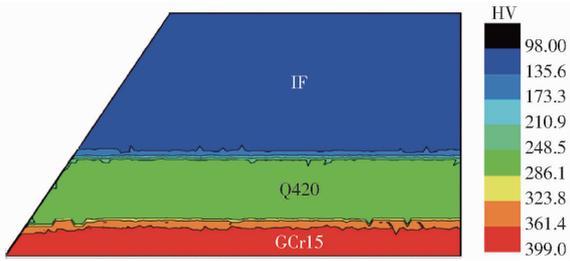


图7 自磨锐割刀剖面硬度分布云图

Fig.7 Hardness distribution pattern of self-sharpening blades with composite gradient plates

由图7可知,刃口处感应淬火前,割刀剖面整体显微硬度差值约为300 HV,在98~399 HV范围内呈均匀的梯度分布。两结合界面的硬度均介于两侧基体硬度之间,GCr15/Q420界面结合层和Q420/IF结合层与两侧基体硬度差均约为100 HV。

不同界面间存在较为平缓的硬度梯度变化,可以有效减小梯度材料的热应力和相变应力^[12,14,16],极大地提高了割刀热处理的稳定性和后期作业过程中的可靠性。

实际生产过程中,割刀刃口处采用局部淬火工艺,使刃口截面的组织硬度呈梯度分布,作业过程中,刀尖硬度高,耐磨性好,前刀面呈比例磨损,可以长时间保持刀尖前凸,割刀刃口角和刃口圆弧半径变化较小,从而实现了自磨锐性能,割刀将始终保持锋锐的切割性能,提高了作业效率。

2.3 梯度材料自磨锐割刀田间试验

割草机割刀长期受到沙土、石子等磨粒磨损冲击,极易造成失效,直接影响整机可靠性和使用寿命^[2,22-24]。对于无支撑切割割刀(如甩刀),对切割线速度有一定要求,其磨粒磨损更为严重,导致刃口曲率半径增大而变钝,回转轴远端割刀刃口由直角变为圆弧,使得切割性能大幅度降低,作业效率下降,能耗增加^[2,25-26]。

将梯度材料自磨锐割刀及市售割刀分别安装在同一设备的刀轴上,相同工作条件下,作业不同时间后,测量相同安装位置两种割刀的磨损失重速率,如图8a所示。由图8a可以看出,割草机初始作业阶段,刀具的磨损失重速率较大,但随着作业时间的增长磨损失重速率逐渐趋向于平稳。梯度材料自磨锐割刀的耐磨性能明显优于市售割刀。在相同条件下作业8 h后,市售刀片磨损失重速率为1.324 g/h,而梯度材料自磨锐割刀磨损失重速率仅为0.35 g/h,梯度材料自磨锐割刀耐磨性能约为市售割刀的3倍以上。随着试验时长的增加,2种割刀磨损失重速率均缓慢下降,国标市售割刀的磨损失重速率约为梯度材料自磨锐割刀2倍。

图8b、8c为两种割刀在相同条件下作业16 h后宏观形貌对比。由图8b、8c可知,回转轴远端割刀刃口处由直角变为圆弧(图8b、8c箭头),相比较而言,市售割刀圆弧半径及刃口处曲率半径更大,说明磨损更为严重,对茎秆的切割作用变差而滑擦、撞击与撕裂作用增强,这对于作物切口形貌、愈合与再生过程极为不利^[4]。

市售割刀刃口处前刀面与后刀面硬度无明显差别,刀尖处磨损后形成较大曲率半径。同时回转轴远端割刀刃口处,由于切割速度较大,直角刃口逐渐向圆弧刃口过渡,且圆弧半径逐渐增大,切割性能恶化。对于梯度材料自磨锐割刀,后刀面、刀尖及刃口材料为GCr15钢,淬火后硬度为58~63 HRC,耐磨性好,有效提高与茎秆茬口、砂石触碰时的耐磨损性能。顶面为IF钢,硬度低、韧性好,中间层Q420钢对高硬度GCr15钢刃口及刀尖起到有力支撑,且界面处结合强度较高,作业过程中不易崩刃与开裂,实现了割刀的强韧性及耐磨性的有机结合。同时,由于前刀面的硬度呈梯度变化,磨损较为均匀,刀尖前凸且保持较小的刃口曲率半径,确保了梯度材料自

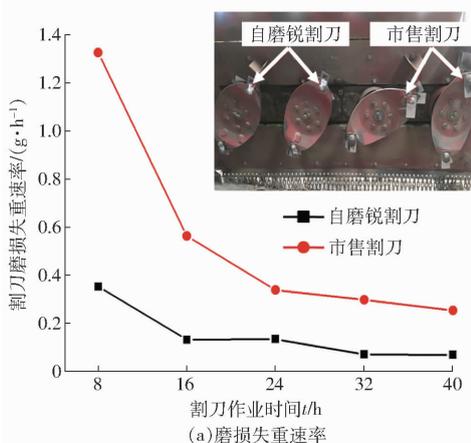


图8 两种割刀磨损失重速率曲线及作业16 h后宏观形貌对比

Fig.8 Wear weight-loss rate curve and comparison morphology after working 16 h for two kinds of blades

磨锐割刀始终优良的切割锋锐性,对再生作物的低损伤切割极为有利,作物的切口平齐、愈合性较好、再生过程正常。

3 结论

(1)3层板材(GCr15、Q420、IF)真空复合轧制成梯度材料,不同板层界面处材料间相互咬合形成较为紊乱的界面结合,呈现冶金结合方式。结合界面处氧化物少且分布细弥,组织缺陷较少。界面处元素相互扩散,形成了组织结构与性能平缓变化的过渡区。

(2)梯度材料不同板层结合界面断裂方式为韧

性断裂,与原始热轧状态梯度材料自磨锐割刀相比,淬火后割刀不同界面处抗剪强度虽有所降低,但均超过国家标准,不同界面间存在较为平缓的硬度梯度变化。

(3)田间试验结果表明,梯度材料自磨锐割刀后刀面、刀尖及刃口材料为GCr15钢,前刀面硬度呈梯度变化,磨损较为均匀,刀尖前凸且保持较小的刃口曲率半径,实现了割刀的强韧性、耐磨性及锋锐性的有机结合与再生作物的低损伤切割。相同作业条件下,梯度材料自磨锐割刀耐磨性是市售割刀的3倍以上。

参 考 文 献

- [1] 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 Jianguo, LI Jianchang, HAO Jianjun, et al. Influence of TiCN/Fe metal ceramic coating by reaction nitrogen arc cladding on wear resistance of agricultural tools[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3):84-89. (in Chinese)
- [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.
- [3] 郝建军,马跃进,刘占良,等. 鞭式刀具的失效及火焰喷焊 Ni/WC 强化的可行性研究[J]. 农业工程学报, 2005, 21(8):74-77.
HAO Jianjun, MA Yuejin, LIU Zhanliang, et al. Failure of scourge-type reamer and feasibility of strengthening by flame spray welding Ni/WC coatings[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(8):74-77. (in Chinese)
- [4] 宋月鹏,王征,吴昆,等. 金属陶瓷自磨刃割刀对苜蓿低损伤切割机理[J]. 农业机械学报, 2020, 51(10):421-426.
SONG Yuepeng, WANG Zheng, WU Kun, et al. Fabrication of self-sharpening blades with metaloceramics materials and low-damaged cutting mechanism of alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10):421-426. (in Chinese)
- [5] 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)
- [6] 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 Yuepeng, WANG Wei, GAO Dongsheng, 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. (in Chinese)
- [7] RADCHENKO A K, GOGAEVA T K. Multilayer steel composite prepared by rolling[J]. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 2003, 42(7):336-340.
- [8] 王黎辉,张振军,刘富强,等. 农用收割机复合刀片制造方法:CN102126007A[P]. 2011-07-20.
- [9] 谢广明,骆宗安,王光磊,等. 真空轧制不锈钢复合板的组织和性能[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2011, 32(10):1398-1401.
XIE Guangming, LUO Zongan, WANG Guanglei, et al. Microstructure and properties of stainless steel clad plate by vacuum rolling cladding[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2011, 32(10):1398-1401. (in Chinese)
- [10] 王伟,宋月鹏,许令峰,等. 真空复合轧制硬度梯度材料的显微组织及硬度分布[J]. 材料热处理学报, 2018, 39(9):87-92.
WANG Wei, SONG Yuepeng, XU Lingfeng, et al. Microstructure and hardness distribution of hardness gradient materials via vacuum composite rolling process[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39(9):87-92. (in Chinese)
- [11] 黄庆学,李海斌,周存龙,等. 复合板轧制压下率对碳钢组织及相变的影响[J]. 材料热处理学报, 2014, 35(3):149-153.
HUANG Qingxue, LI Haibin, ZHOU Cunlong, et al. Effect of reduction rate on microstructure and transformation behavior of carbon steel by rolling clad plate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2014, 35(3):149-153. (in Chinese)
- [12] 王泽鹏,张红梅,付魁军,等. 热轧 304L/Q235B 不锈钢复合板界面特征及性能分析[J]. 材料热处理学报, 2016, 37(增刊):44-49.
WANG Zepeng, ZHANG Hongmei, FU Kuijun, et al. Characteristics of bonding interface and analysis of properties of hot-rolled 304L/Q235B stainless steel clad plate[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2016, 37(Supp.):44-49. (in Chinese)
- [13] JIANG Haitao, YAN Xiaoqian, LIU Jixiong, et al. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical property of Ti-steel explosive-rolling clad plate[J]. Transactions of Nonferrous Materials Society China, 2014(24):697-704.

- [14] AKRAMIFARD H R, MIRZADEH H, PARSA M H. Estimating interface bonding strength in clad sheets based on tensile test results [J]. *Materials and Design*, 2014, 64:307 – 309.
- [15] 韩银娜, 张小军, 李龙, 等. 铝合金/不锈钢层状复合材料界面化合物生长行为[J]. *材料热处理学报*, 2018, 39(3): 1 – 7.
HAN Yinna, ZHANG Xiaojun, LI Long, et al. Growth behavior of intermetallic compounds of aluminum alloy/stainless steel composite[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2018, 39(3):1 – 7. (in Chinese)
- [16] 李民权, 张辉, 李落星. 热轧钢/铝复合板结合强度及界面的研究[J]. *热加工工艺*, 2008, 37(24):34 – 37.
LI Minquan, ZHANG Hui, LI Luoxing. Study on bonding strength and interface of hot rolled steel/aluminum metal-laminate material[J]. *Hot Working Technology*, 2008, 37(24):34 – 37. (in Chinese)
- [17] NOMURA M, HASHIMOTO I, KOZUMA S, et al. Effects of surface oxides on the phosphatability of the high strength cold rolled steels[J]. *Tetsu to Hagane*, 2006, 92(6):378 – 384.
- [18] PENG X K, WUHRER R, HENESS G, et al. Rolling strain effects on the inter laminar properties of roll bonded copper/aluminum metallaminates[J]. *Journal of Materials Science*, 2000, 35:4357 – 4363.
- [19] XIE Guangming, LUO Zongan, WANG Guanglei, et al. Interface characteristic and properties of stainless steel/HSLA steel clad plate by vacuum rolling cladding[J]. *Materials Transactions*, 2011, 52(8):1709 – 1712.
- [20] 陈泽军, 刘庆, 王国军, 等. 复合板热轧复合和热处理工艺[J]. *材料热处理学报*, 2015, 36(6):154 – 158.
CHEN Zejun, LIU Qing, WANG Guojun, et al. Fabrication of aluminum alloy clad sheet by hot roll bonding and heat treatment[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2015, 36(6):154 – 158. (in Chinese)
- [21] 李海斌, 黄庆学, 周存龙, 等. 热轧碳钢/不锈钢复合板结合界面碳钢的组织演变[J]. *材料热处理学报*, 2014, 35(4):57 – 61.
LI Haibin, HUANG Qingxue, ZHOU Cunlong, et al. Microstructure evolution of carbon steel at interface steel/stainless steel clad plate by hot rolling[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2014, 35(4):57 – 61. (in Chinese)
- [22] 孟海波, 韩鲁佳, 刘向阳. 秸秆揉切机用刀片磨损的研究[J]. *农业机械学报*, 2003, 34(5):61 – 64.
MENG Haibo, HAN Lujia, LIU Xiangyang. Study on cutter wear of a rubbing and cutting machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2003, 34(5):61 – 64. (in Chinese)
- [23] 梅敦, 张瑞英. 割草机动刀片磨损机理探讨[J]. *内蒙古工业大学学报(自然科学版)*, 2000, 19(2):115 – 118.
MEI Dun, ZHANG Ruiying. A study on wear mechanism of mower blade[J]. *Journal of Inner Mongolia Polytechnic University (Natural Science)*, 2000, 19(2):115 – 118. (in Chinese)
- [24] 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 Binbin, XU Yang, JIAN Jianming. The actuality of development and research of wear resistant part for agricultural machinery[J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2013, 34(5):53 – 57. (in Chinese)
- [25] NIRANATLUMPONG P, SUKHONKET C, NAKNGOENTHONG J. Wear resistant surface treatment of pulverizer blades[J]. *Wear*, 2013, 302:878 – 881.
- [26] 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]. *Biomass and Bioenergy*, 2018, 109:166 – 171.