

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.073

基于仿生微织构的电动修剪机刀具磨损性能研究

孙健峰 霍东飞 李波 邢凯峰 王伟强 杨洲

(华南农业大学工程学院, 广州 510642)

摘要: 针对普通电动修剪机刀具易磨损、崩刃等情况,设计了一种蚯蚓仿生微织构刀具,以蚯蚓体表形貌为基础,利用激光成型技术加工刀具表面微织构,研究激光成型参数对成型沟槽几何尺寸的影响;通过摩擦磨损对比试验研究了仿生微织构刀具和普通刀具的摩擦系数和磨损情况,分析仿生刀具减磨机理;通过自制剪切试验平台对不同直径龙眼树枝进行刀具剪切试验,验证仿生刀具减磨特性。研究表明:优化后激光成型仿生刀具的工艺参数为:激光功率 75 W、激光扫描速度 4.8 mm/s;仿生刀具微织构实际尺寸为:沟宽 138.3 μm ,沟深 33.5 μm ;与普通刀具相比,载荷 400 g 下沟槽间距 1.6 mm 时微织构仿生刀具表现出最小摩擦系数 0.2619 和体积磨损量 616.70 mm^3 ,具有明显减磨特性;随载荷增加磨损机制逐渐由黏着磨损、微切削磨损向磨粒磨损和氧化磨损的复杂磨损形式转变;磨损稳定时,沟槽间距 1.6 mm 微织构仿生刀具所需剪切次数 50~55 次,比普通刀具剪切次数(45~50 次)高 5~10 次,沟槽间距 1.6 mm 微织构仿生刀具在剪切直径 10、15、20 mm 的树枝磨损面积稳定次数分别为 35~40 次、45~50 次、50~55 次,树枝直径越大微织构刀具抗磨效果越明显。

关键词: 电动修剪机刀具; 仿生微织构; 激光刻蚀; 磨损性能

中图分类号: TG71; Q811 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0593-10

Wear Performance of Electric Pruning Scissors Based on Bionic Micro-structure

SUN Jianfeng HUO Dongfei LI Bo XING Kaifeng WANG Weiqiang YANG Zhou

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A biomimetic micro-texture tool for earthworm was designed. Based on the surface morphology of earthworm, the micro-texture of tool surface was processed by laser molding technology. The friction coefficient and wear of the bionic texture tool and the ordinary tool were studied through the comparative test of friction and wear, and the wear reduction mechanism of the bionic tool was analyzed. The cutting test of longan branches with different diameters was carried out by the self-made cutting test platform to verify the wear reduction characteristics of the bionic cutting tools. The results showed that the optimized process parameters of the bionic laser forming tool were as follows: laser power was 75 W, laser scanning speed was 4.8 mm/s; the actual size of the micro-texture of the bionic cutter was 138.3 m wide and 33.5 m deep. Compared with ordinary cutting tools, the texture bionic cutting tools showed the minimum friction coefficient of 0.2619 and the volume wear amount of 616.70 mm^3 when the groove spacing width was 1.6 mm under the load of 400 g, which had obvious wear reduction characteristics. With the increase of load, the wear mechanism was gradually changed from adhesive wear and micro-cutting wear to the complex wear forms of abrasive wear and oxidation wear. When the wear was stable, the required cutting times of 1.6 mm texture bionic tool were 50~55 times higher than that of ordinary tool (45~50) times, and the stable times of 1.6 mm texture bionic tool in cutting the wear area of branches with a diameter of 10 mm, 15 mm and 20 mm were 35~40, 45~50 and 50~55 respectively. The larger the diameter of the branch was, the more obvious the anti-wear effect of the texture tool was.

Key words: electric pruning scissors tool; bionic micro-structure; laser etching; wear performance

收稿日期: 2020-08-01 修回日期: 2020-09-12

基金项目: 广州市珠江科技新星项目(201710010105)、广东省自然科学基金项目(2019A1515011039)、现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-31-10)和广东省山区特色农业资源保护与精准利用重点实验室项目(2020)

作者简介: 孙健峰(1983—),男,副教授,博士,主要从事农业机械化研究,E-mail: sunjianfeng@scau.edu.cn

通信作者: 杨洲(1972—),男,教授,博士生导师,主要从事水果生产机械化研究,E-mail: yangzhou@scau.edu.cn

0 引言

中国是水果种植和生产大国,截至2016年中国水果产量(不包括瓜类)居世界第一^[1]。果树修剪是果园管理中的一项重要作业,在盛果期通过合理修剪能有效改善果树营养分布,提升果实品质和产量^[2-3]。随着中国城镇化速度加快,农村青壮年劳动力逐渐流向城市,造成农村年轻劳动力严重不足^[4-5]。传统果园修剪机械以无动力源的手动修剪为主^[6],工人劳动强度大,作业效率低,人工成本高,果农经济负担重,同时手动修剪容易造成枝干表皮破裂,切口品质差,伤口愈合慢易感染病虫害,影响果实品质和产量^[7],严重制约中国荔枝、龙眼在国际市场中的竞争力^[8]。推广便携、高效的助力型电动修剪机能够有效解决该问题^[9]。龙眼修剪期,修剪树枝直径从10 mm到50 mm不等,直径大于30 mm的树枝通常采用油锯进行切割,直径小于30 mm的树枝采用动力型修剪机剪切^[10]。由于荔枝、龙眼树枝硬度较大,纤维剪切强度高于其它林果类树枝,在高强度密集型作业环境下,电动修剪机刀头受纤维和树皮挤压、磨损,刀头常常会发生卷刃、崩刃等失效情况,降低了刀具使用寿命,同时制约工人作业效率,不利于果园电动修剪机的应用和推广^[11-13]。

目前工业上常采用仿生结构,改变刀具表面形貌来提升刀具使用性能。文献[14]在硬质合金车刀的前刀面加工出沟槽型微织构。结果显示,在切削时与无微织构刀具相比前刀面摩擦因数减小14%,切削力降低10%,进给力降低23%,并且前刀面的粘合接触面积显著减小。文献[15]在硬质合金铣刀的前刀面采用飞秒激光成型周期性条纹沟槽微织构,与无微织构刀具相比,在湿切削和干切削条件下,平行于切削刃的槽型微织构都能够减小前刀面的月牙洼磨损。文献[16]采用激光在硬质合金刀具的前刀面加工凹坑微织构槽微织构,降低了刀具切削1045钢时的粘附性,同时增加了刀刃的切削稳定性。文献[17]受蛇皮和蜥蜴皮上鳞片的启发采用激光在100Cr6钢销上加工仿生表面纹理,结果表明窄纹理表面形态比宽纹理表面形态显示出更低的摩擦系数。

文献[18]提出一种仿生波纹形开沟器,利用蚯蚓体表特征和聚乙烯优良的减黏性在原有普通开沟器基础上设计制造仿生开沟器,结果表明:仿生开沟器具有减黏降阻作用,与普通开沟器相比减黏降阻性能提高9%左右,并测得仿生开沟器最优使用条件为土壤含水率16.3%,入土深度6 cm,开沟速度1.8 km/h。文献[19]研究发现在不同摩擦速率下,0°平行微织构与90°平行微织构减磨效果各有优异,不同工况下需选择不同排布方式的沟槽型微织构;文献[20]利用ABAQUS软件对织构硬质合金和无织构刀具进行切削仿真试验,结果表明织构表面能改善刀具应力分布,降低切削力,且不同几何尺寸织构刀具减磨效果不同。

目前研究表明,沟槽型微织构具有储存润滑油并起到二次润滑的作用,且不同方向的沟槽织构具有不同的减磨效果,在没有油润滑情况下,刀具发生干摩擦,摩擦副表面直接接触,摩擦因数与摩擦副材料接触面形貌及粗糙度相关^[21],而在摩擦过程中由于摩擦副材料的脱落会发生粘着磨损、磨粒磨损,导致摩擦因数增大加重刀具表面磨损,甚至产生物理咬死现象破坏刀具结构^[22]。而添加微织构的刀具表面能有效降低磨屑对刀具表面的磨损^[23],具有贯通且分布均匀连续的沟槽结构能起到储屑作用,减轻摩擦副之间黏着磨损,而且沟槽型微织构设计能有效降低摩擦面积并产生附加流体动压力,从而实现减磨降阻作用^[24-26]。

为了提高果树修剪刀具的耐磨性与使用寿命,本文在文献[27-28]研究基础上,采用蚯蚓头部舒张态形貌参数为依据,设计一种沟槽型微织构修剪机刀具,搭建剪切试验平台,采用步进电机实现自动化送枝剪切,通过多次自动剪切,判定电动修剪机刀具主要磨损区域;采用激光刻蚀技术在SK-5材质刀具表面的主要摩擦磨损区域成型仿生微织构。通过对有微织构仿生刀具和普通刀具开展摩擦磨损试验,分析仿生微织构减磨机理,并通过实际剪切试验,验证仿生刀具减磨特性。

1 仿生微织构刀具设计

参考赤子爱胜蚯蚓头部舒张态^[27](图1a),在

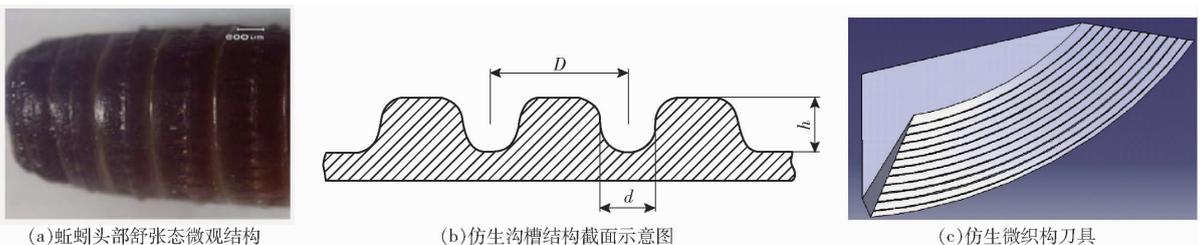


图1 仿生微织构刀具设计过程图

Fig. 1 Bionic texture tool design process diagrams

电动修剪机 SK-5 弹簧钢刀具前刀面刻蚀沟槽型微织构。蚯蚓头部各个形态形貌结构参数如表 1 所示,沟槽型微织构主要包含沟槽宽度 d 、沟槽深度 h 以及沟槽间距 D 3 个参数。沟槽截面形状与所用加工设备有较大关系,一般激光加工微织构形貌为圆弧形,沟槽微织构截面示意图如图 1b 所示。

根据电动修剪机刀具实际形貌与赤子爱胜蚯蚓头部结构参数,设计一种仿生微织构刀具(图 1c),其中沟槽宽度和沟槽深度参考蚯蚓舒张态取 d 为 $140\ \mu\text{m}$, h 为 $30\ \mu\text{m}$,沟槽间距参考收缩态、舒张态和试验参数选取, D 设计为 1.0、1.3、1.6 mm。

表 1 蚯蚓头部舒张态形貌尺寸参数

Tab.1 Dilatation state size parameters of head μm

参数	收缩态	舒张态	试验值
体节宽	1 000	1 300	1 600
节间沟深	100	30	30
节间沟距	100	140	140

2 试验材料与方法

2.1 试验条件

(1) 仿生微织构刀具材料及成型设备

电动修剪机刀具常用材料包含 65Mn、SK-5、硬质合金等,试验选择 SK-5 弹簧钢刀具,尺寸为 $90\ \text{mm} \times 30\ \text{mm} \times 4\ \text{mm}$,刃倾角 20° 。成型设备选用广州数控设备有限公司生产的 GS301A 型工业机器人激光制造工作站,进行微织构成型研究。

(2) 摩擦磨损试验材料与设备

根据 ASTM B611-13 (2018)^[29] 磨损试验中上磨样硬度应高于下磨样,但电动修剪机刀具的剪切对象为树枝,木材硬度小于刀具硬度,所以本文试验采用钨钢球作为上磨样,其硬度为 92 HRA,SK-5 刀具硬度为 56 HRC,钨钢球硬度大于刀具硬度,满足试验要求。试验设备选用 MS-ECT3000 型摩擦磨损试验仪,载荷 200~500 g。

(3) 剪切试验材料与设备

磨损试验中获得刀具摩擦因数,为了验证实际修剪过程中仿生微织构刀具磨损情况,在自制的剪切试验平台上进行验证试验(图 2)。剪切试验树枝选取南方典型水果龙眼树枝。采样果树品种为石峡,采样时间为果树落果后的修剪期,采样树枝直径变化均匀(直径为 10~30 mm)、通直少节,将树枝去掉分枝,剪切为等长(240 mm),共有 8 个试样。

试验时,先将树枝放入转盘式树枝导向机构中的树枝导向管内,树枝推送机构在控制系统操控下实现树枝定量推进,到达指定剪切工位后,控制系统发出信号控制电动修剪机进行剪切。依次循环进行剪切

试验,当树枝剪切达到设定次数后,树枝推送机构复位,控制系统通过旋转电机控制导向机构转过一定角度,使下一个树枝导向管中心与推杆对齐。依次循环进行树枝的推送与剪切,直至树枝导向管内所有树枝剪切完毕。该剪切试验平台可进行直径 30 mm 以下的林果类树枝剪切试验,兼容多种型号手持式电动修剪机,一次装填树枝可自动修剪 232 次。

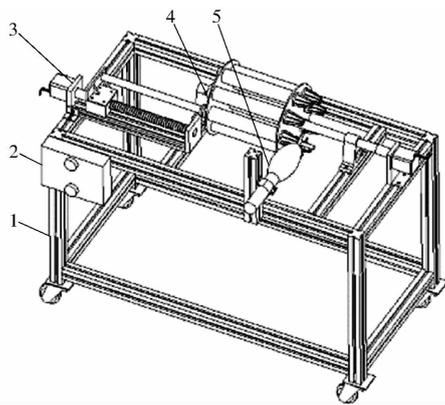


图 2 剪切试验平台

Fig. 2 Shear test platform

- 1. 机架 2. 控制器 3. 树枝推进机构 4. 转盘式树枝导向机构
- 5. 树枝剪切机构

2.2 试验方法

(1) 仿生微织构成型试验

根据蚯蚓头部舒张态表面微织构形貌参数,在 SK-5 弹簧钢样件上利用激光进行刻蚀,通过超景深显微镜(VHX-900F 型)观测微织构形貌(图 3)。试验数据如表 2 所示,每组数据刻蚀 3 次,每条凹槽宽度和深度测量 3 次,取平均值。



图 3 VHX-900F 型超景深三维显微镜

Fig. 3 VHX-900F super depth of field 3D microscope

- 1. 显示成像系统 2. 遥控器 3. Z 轴电动载物平台

表 2 试验参数

Tab. 2 Test parameter

参数	保护气	功率 P/W	速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$
数值	氩气	60、70、80、90、100、110	3.2、4.0、4.8、5.6、6.4、7.2

(2) 摩擦磨损试验

将待检测刀具通过螺栓销钉固定在 MS-ECT3000 型摩擦磨损试验仪载物台上。砝码台上加载砝码,通过计算机设置试验参数。启动电机使主

轴带动载物台转动,样件随载物台一起转动,与上磨样进行滑动摩擦磨损。通过传感器测取试验台温度、载荷及压强等参数。由计算机计算分析得出摩擦因数,获得摩擦因数随时间变化曲线,试验指标参数如表3所示。

表3 试验指标参数

Tab.3 Test index parameter

参数	载荷/ g	磨擦 时间/ min	上磨擦 副半径/ mm	下磨擦副 旋转半径/ mm	电机转速/ ($r \cdot \text{min}^{-1}$)	试验 温度/ $^{\circ}\text{C}$
数值	200 ~ 500	60	2	3	200	25

(3) 剪切试验

由于树枝剪切试验中电动修剪机刀具材料硬度和耐磨性远高于树枝材料,因此试验中对刀具前刀面做均匀喷漆处理,在自制电动修剪机智能剪切试

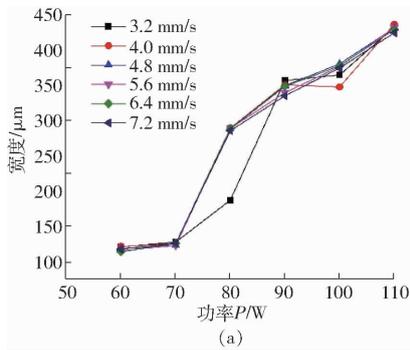


图4 激光功率与扫描速度对仿生微织构宽度与深度的影响

Fig.4 Influence of laser power and scanning speed on depth and width of bionic micro-texture

表4 激光功率与扫描速度对微织构宽度的影响

Tab.4 Influence of laser power and scanning speed on width of micro-texture

功率 P/W	随扫描速度增加微织构	波动幅度/ μm
	宽度波动范围/ μm	
60	113.8 ~ 121.1	7.3
70	122.6 ~ 127.5	4.9
80	186.9 ~ 289.1	102.2
90	334.6 ~ 356.5	21.9
100	347.2 ~ 380.0	32.8
110	423.8 ~ 436.1	12.3

由图4b和表5可知,同一扫描速度下,随激光功率增加,微织构深度先增加后降低。功率80W时达到本次试验最深刻蚀49.0 μm 。刀具经超声波清洗器处理后晾干,通过超景深显微镜进行微织构宽度和深度测量。微织构刀具表面形貌测量结果如图5所示。

根据以上试验结果,在同一激光功率下,不同激光扫描速度对微织构宽度影响较小,对微织构深度影响较大。可以通过控制激光功率来控制微织构宽度。同一扫描速度下,随着激光功率增加微织构深

度先增加后降低,这是因为随着激光功率增加,样件吸收激光能量增加,但导热环境不变,热传导散失能

3 试验与结果分析

3.1 仿生微织构成型试验

由图4a和表4可知,相同扫描速度下,微织构宽度随着激光功率增加而增加,在同一功率下,不同扫描速度对微织构宽度影响较小。激光功率变化更易影响微织构宽度的变化,激光功率越高,微织构宽度越大。

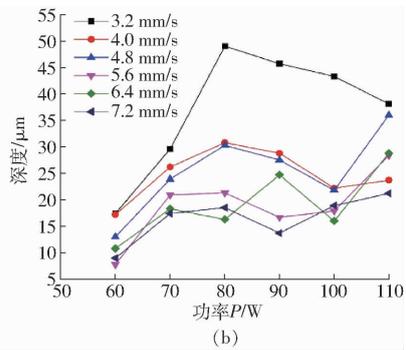


表5 激光功率与扫描速度对微织构深度的影响

Tab.5 Influence of laser power and scanning speed on depth of micro-texture

扫描速度/ ($\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$)	随激光功率增加微织构	波动幅度/ μm
	深度波动范围/ μm	
3.2	17.4 ~ 49.0	31.6
4.0	17.2 ~ 30.8	13.6
4.8	13.0 ~ 36.0	23.0
5.6	7.8 ~ 28.4	20.6
6.4	10.8 ~ 28.8	18.0
7.2	9.0 ~ 21.1	12.1

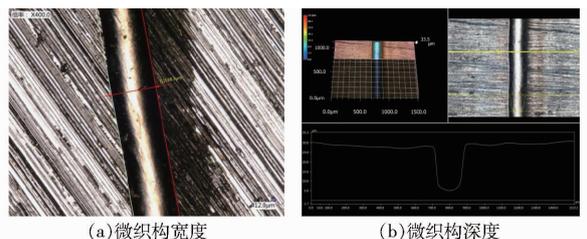


图5 微织构形貌图

Fig.5 Micro-texture topography

度先增加后降低,这是因为随着激光功率增加,样件吸收激光能量增加,但导热环境不变,热传导散失能

量增加不明显,当吸收能量大于散失能量时,能量在零件表面积累,对零件表面产生刻蚀,零件深度增加,反之零件深度减小。加工本文所需微结构尺寸工艺参数为:扫描速度 4.8 mm/s,功率 75 W,氩气保护。微结构实际成型尺寸为:方向槽宽度 138.3 μm ,

沟槽深度 33.5 μm 。

3.2 摩擦磨损试验结果与分析

3.2.1 不同载荷下刀具表面平均摩擦因数

图 6 为在载荷 200 ~ 500 g 下,刀具表面摩擦因数随时间变化的曲线。

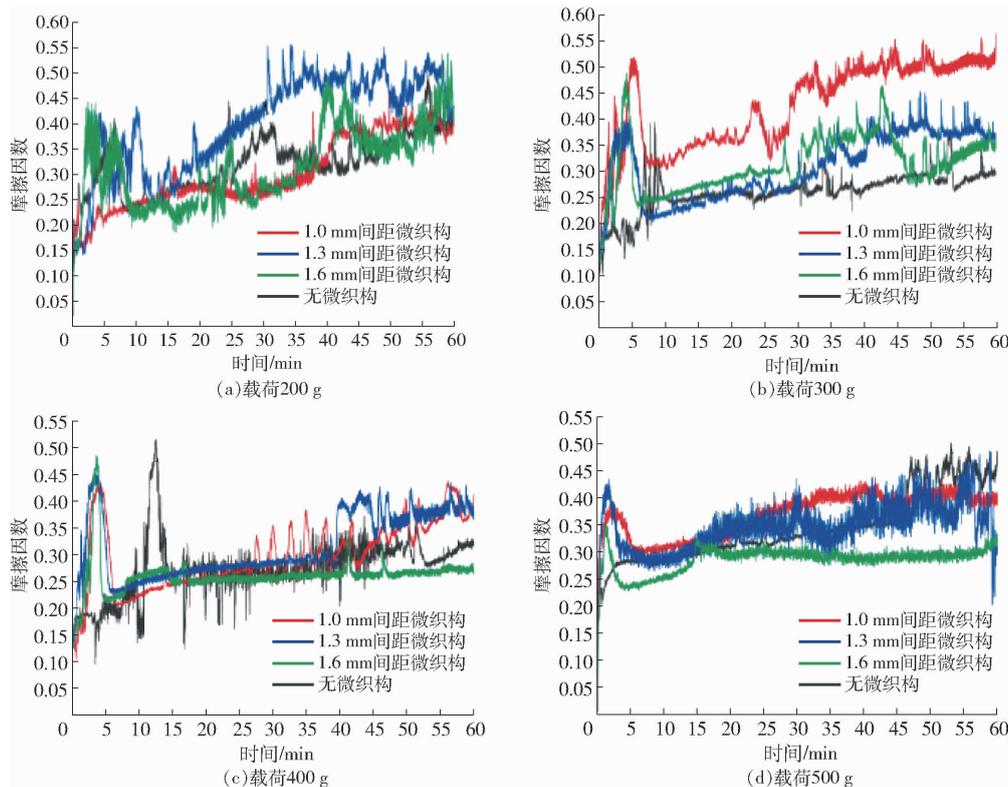


图 6 不同载荷下刀具摩擦因数随时间的变化曲线

Fig. 6 Real-time friction factor of tool changed with time under different loads

如图 6 和表 6 所示,载荷 200 g 时,普通刀具的表面平均摩擦因数为 0.318 7,摩擦因数在 0.082 6 ~ 0.504 6 波动;1.0 mm 间距微结构刀具表面的平均摩擦因数随着磨损时间的增加由 0.318 7 降低到 0.300 6,降幅为 5.7%;1.3 mm 间距微结构刀具表面的平均摩擦因数突增,随着磨损时间的增加,由 0.300 6 增加到 0.399 2,增幅 24.7%;1.6 mm 间距微结构刀具表面的平均摩擦因数由 0.399 2 降低 0.086 3,达到 0.312 9,降幅达 21.6%,与普通刀具摩擦因数接近。

表 6 不同载荷下平均摩擦因数

Tab. 6 Average friction coefficient under different loads

刀具类型	载荷/g			
	200	300	400	500
无微结构	0.318 7	0.257 2	0.274 9	0.342 5
1.0 mm 间距微结构	0.300 6	0.423 6	0.298 5	0.368 3
1.3 mm 间距微结构	0.399 2	0.306 1	0.317 1	0.345 3
1.6 mm 间距微结构	0.312 9	0.310 0	0.261 9	0.285 4

载荷 300 g 时,无微结构刀具表面平均摩擦因数为本组试验中最小值,为 0.257 2,摩擦因数在

0.113 8 ~ 0.390 7 区间波动;1.0 mm 间距微结构刀具表面平均摩擦因数突变,由 0.257 2 增大到 0.423 6,增幅 64.7%,为本组试验中最大平均摩擦因数;1.3 mm 间距微结构刀具表面平均摩擦因数由 0.423 6 降低了 0.117 5,达到 0.306 1,降幅达 27.7%;1.6 mm 间距微结构刀具表面平均摩擦因数由 0.306 1 升高了 0.003 9,达到 0.310 0,波动幅度较小与 1.3 mm 间距微结构刀具摩擦因数相接近。载荷 300 g 下微结构刀具均未体现出减磨性能。

载荷 400 g 下,无微结构刀具表面平均摩擦因数为 0.274 9,摩擦因数在 0.120 2 ~ 0.518 9 区间波动;1.0 mm 间距微结构刀具表面平均摩擦因数由 0.274 9 增加了 0.023 6,达到 0.298 5,增幅 8.6%;1.3 mm 间距微结构刀具表面平均摩擦因数继续增加,由 0.298 5 增加到 0.317 1,增幅 6.2%,为本组试验中最大摩擦因数;1.6 mm 间距微结构刀具表面平均摩擦因数发生突变,由 0.317 1 降到 0.261 9,降幅达 17.4%,为本组试验中最小摩擦因数。载荷 400 g 下 1.6 mm 间距微结构刀具表面平均摩擦因数与无微结构刀具相比降低了 4.7%,差值为 0.013,

具有一定的减磨效果。

载荷 500 g 时,无微织构刀具表面平均摩擦因数为 0.342 5,摩擦因数在 0.124 8~0.501 5 区间波动;1.0 mm 间距微织构刀具表面摩擦因数由 0.342 5 增加到 0.368 3,增幅 7.5%,为本组试验中最大摩擦因数;1.3 mm 间距微织构刀具表面摩擦因数由 0.368 3 降低 0.023,达到 0.345 3,降幅 6.2%;1.6 mm 间距微织构刀具表面平均摩擦因数发生突变,由 0.345 3 降低 0.059 9,达到 0.285 4,降幅 17.3%,为本组试验中最小摩擦因数。载荷 500 g 下,1.6 mm 间距微织构刀具表面平均摩擦因数比无微织构刀具减少 0.057 1,降幅达到 16.7%,具有良好的减磨效果。

由图 6 和表 6 可以看出,普通刀具和仿生微织构刀具在摩擦试验开始阶段都需经历一段不稳定期,此阶段刀具原始表面粗糙度对刀具摩擦因数波动影响较大,随着载荷增加刀具表面摩擦因数均先增加后降低。载荷 300、400 g 时普通刀具大约 13 min 进入稳定摩擦阶段,仿生微织构刀具大约 8 min 进入稳定摩擦阶段,仿生微织构刀具表面比普通刀具表面提前进入稳定摩擦阶段,这是由于添加仿生微织构刀具表面较普通刀具表面更粗糙,初始摩擦因数较高,摩擦剧烈,更快进入稳定摩擦阶段。载荷 200 g 下收缩态 1.0 mm 间距仿生微织构刀具摩擦因数较小,具有减磨特性;载荷 300 g 下仿生微织构刀具摩擦因数与普通刀具摩擦因数差别较小,减磨特性不明显;载荷 400~500 g 下 1.6 mm 间距微织构刀具摩擦因数较小,具有明显减磨特性。

3.2.2 不同载荷下刀具表面体积磨损量计算与分析

根据文献[30],摩擦磨损试验中的体积磨损量 ΔV 计算公式为

$$\Delta V = L_0 \left[R^2 \arcsin \left(\frac{D_1}{2R} \right) - \frac{D_1}{2R} \sqrt{R^2 - \left(\frac{D_1}{2} \right)^2} \right] \quad (1)$$

式中 L_0 ——磨痕周长,mm

R ——YG6 钨钢球半径,mm

D_1 ——磨痕宽度,mm

体积磨损率 Q 为

$$Q = \frac{\Delta V}{vt} \times 100\% \quad (2)$$

式中 v ——磨球线速度,mm/min

t ——磨损时间,min

由式(2)获得试验中样品体积磨损率,并利用超景深三维显微镜测量磨痕实际宽度和磨损形貌情况。

不同刀具体积磨损量随载荷的变化曲线如图 7 所示。

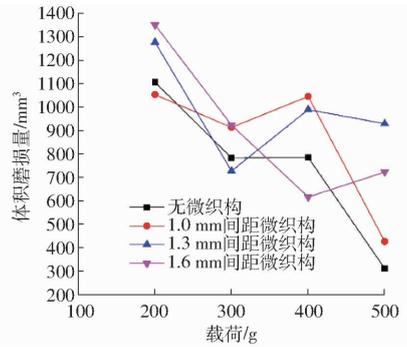


图 7 不同微织构刀具体积磨损量随载荷的变化曲线

Fig. 7 Curves of volumetric wear of different micro-structure tools with load

由式(1)、(2)可知,磨痕宽度、体积磨损量、体积磨损率三者呈正相关性,因此三者变化幅度及趋势基本一致,因此只分析体积磨损量的变化趋势。由图 7 和表 7 可知,200 g 载荷下 1.0 mm 间距微织构刀具体积磨损量最小,为 1 053.65 mm³;300 g 载荷下 1.3 mm 间距微织构刀具体积磨损量最小,为 728.67 mm³;400 g 载荷下 1.6 mm 间距微织构刀具体积磨损量最小,为 616.70 mm³;500 g 载荷下无微织构刀具体积磨损量最小,为 312.28 mm³。

表 7 磨损试验数据

Tab. 7 Wear test data

刀具类型	载荷/g	磨痕宽度/ μm	体积磨损量/ mm^3	体积磨损率/%
无微织构刀具	200	1 030	1 106.37	0.004 9
	300	734	783.55	0.003 5
	400	736	785.77	0.003 5
	500	294	312.28	0.001 4
1.0 mm 间距微织构	200	982	1 053.65	0.004 7
	300	854	913.75	0.004 0
	400	975	1 045.86	0.004 6
	500	402	427.32	0.001 9
1.3 mm 间距微织构	200	1185	1276.97	0.005 6
	300	683	728.67	0.003 2
	400	924	989.99	0.004 4
	500	869	930.07	0.004 1
1.6 mm 间距微织构	200	1 250	1 350.62	0.006 0
	300	863	923.58	0.004 1
	400	579	616.70	0.002 7
	500	678	723.10	0.003 2

3.2.3 磨痕形貌检测与分析

图 8 为不同刀具在不同载荷下磨痕形貌对比。

由图 8a 可以看出,无微织构刀具随载荷增加磨痕宽度逐渐变小,磨痕宽度在 1 030~294 μm 递减,200 g 载荷时,磨痕出现较浅的犁沟和剥离断面,磨痕宽度为 1 030 μm ,磨损试验前未对刀具进行表面处理,表面粗糙度较大,载荷 200 g 较小,上磨样摩

擦刀具表面, 刀具表面的微小起伏影响摩擦因数, 因此载荷 200 g 时摩擦因数波动范围大; 载荷 500 g 时, 磨痕宽度降低, 由 1 030 μm 降至 294 μm , 降幅达

71.5%, 从磨痕中能清晰看到黏着磨损和磨粒磨损, 犁沟明显加深, 载荷过大产生塑性变形, 因此摩擦因数增大。

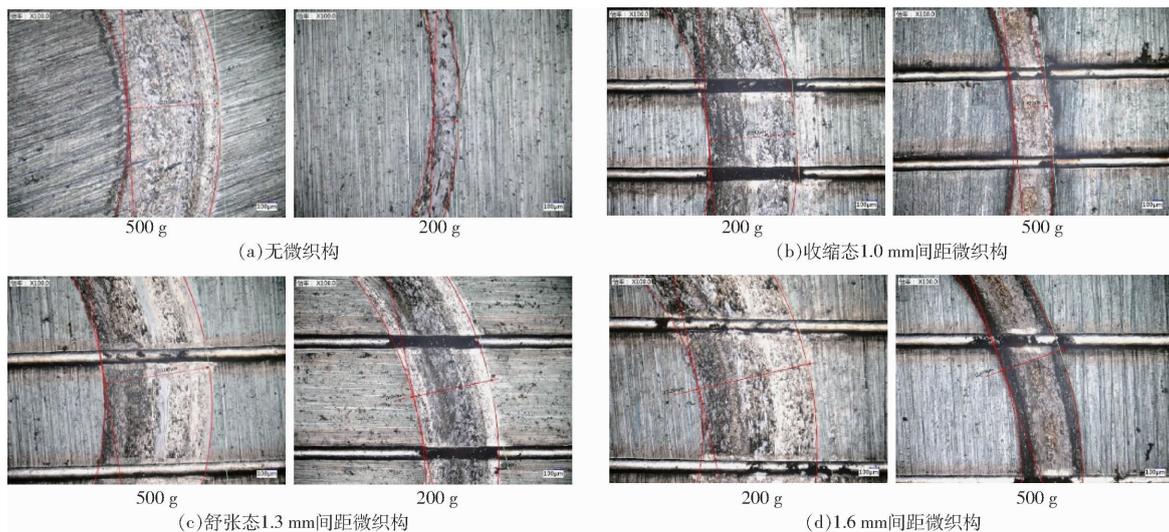


图 8 不同刀具在不同载荷下磨痕形貌

Fig. 8 Wear profile of different tools under different loads

由图 8b 可知收缩态 1.0 mm 间距微结构刀具表面磨痕宽度随载荷增加逐渐减小, 从图 8b 中可以看出, 载荷 200 g 时沟槽内储存大量磨屑, 存在轻微黏着磨损, 载荷增加到 500 g 时表面压强增大, 犁沟深度加深, 产生切削磨损, 该间距沟槽微结构储屑作用减弱, 磨痕表面黏着磨损严重, 并伴随有氧化磨损, 磨损机制复杂, 摩擦因数较大减磨效果不明显; 图 8c 为舒张态 1.3 mm 间距微结构刀具表面磨痕, 磨痕宽度随载荷增加而降低, 载荷 200 g 下磨痕较浅, 主要磨损刀具表面, 摩擦因数波动幅度大, 随着载荷增加到 500 g 时, 磨痕出现较深犁沟, 在该间距下沟槽储屑作用显著, 降低磨屑黏着磨损, 摩擦因数波动稳定。

图 8d 为 1.6 mm 间距微结构刀具表面磨痕形貌, 磨痕宽度随载荷增加而降低, 载荷 200 g 下, 磨痕犁沟较浅磨损刀具表面, 由于沟槽间距增加, 摩擦因数与普通刀具摩擦因数基本持平, 随着载荷增加到 500 g 时, 犁沟加深, 磨球磨损沟槽严重, 沟槽间距增大减小了沟槽切削磨损对摩擦因数的影响, 沟槽储屑作用明显, 磨屑黏着磨损较小, 在该载荷下 1.6 mm 间距微结构刀具摩擦因数比无微结构刀具摩擦因数降低 16.7%, 具有良好的减磨效果。

通过以上分析可知, 载荷 200 g 状态下, 主要为表面磨损, 犁沟较浅, 摩擦因数反映表面粗糙程度, 摩擦因数波动较大; 载荷 300 ~ 400 g 下, 磨损机制接近, 主要为黏着磨损和微切削磨损, 摩擦因数较稳定; 重载荷 500 g 下, 磨损机制增加氧化磨损和磨粒磨损, 变为更复杂的复合磨损方式。

3.3 剪切试验

由摩擦磨损试验可知, 1.6 mm 间距微结构刀具摩擦因数低于无微结构刀具, 表现出优良的抗磨性能, 因此剪切试验在智能剪切试验平台进行无微结构刀具与 1.6 mm 间距微结构刀具剪切同一直径树枝, 进行对比分析。定义首次检测面积即在相同剪切次数下第一次漆面磨损面积。

图 9 为剪切直径 10 mm 树枝时刀具漆面磨损面图和修剪后实物图。由图 9 可以看出, 无微结构刀具随着剪切次数增加, 漆面磨损面积由 45 mm^2 增加到 115 mm^2 , 增加了 70 mm^2 , 剪切 30 ~ 35 次后漆面磨损面积趋于稳定; 1.6 mm 间距微结构刀具随着剪切次数增加, 漆面磨损面积由 45 mm^2 增加到 112 mm^2 , 增加了 67 mm^2 , 与无微结构刀具首次检测磨损面积相同, 剪切 35 ~ 40 次后漆面磨损面积趋于稳定。在达到稳定磨损面积时, 织构刀具剪切次数比无微结构刀具多 5 次, 磨损面积少 3 mm^2 。剪切直径 10 mm 树枝时, 微结构刀具的表面耐磨性更好。

图 10 为剪切直径 15 mm 树枝时刀具漆面磨损面图和修剪后实物图。由图 10 可以看出, 无微结构刀具随着剪切次数增加, 漆面磨损面积由 62 mm^2 增加到 142 mm^2 , 增加了 80 mm^2 , 剪切 35 ~ 40 次后漆面磨损面积趋于稳定; 1.6 mm 间距微结构刀具随着剪切次数的增加漆面磨损面积由 51 mm^2 增加到 145 mm^2 , 增加了 94 mm^2 , 与无微结构刀具首次检测磨损面积相比, 微结构刀具首次检测漆面磨损面积减小 11 mm^2 , 剪切 45 ~ 50 次后漆面磨损面积趋于稳定。无微结构刀具与 1.6 mm 间距微结构刀具达

到稳定磨损面积时,微织构刀具磨损面积比无微织构刀具多3 mm²,但微织构刀具剪切次数比无微织

构刀具多10次,说明在剪切直径15 mm树枝时,微织构刀具表面更耐磨。

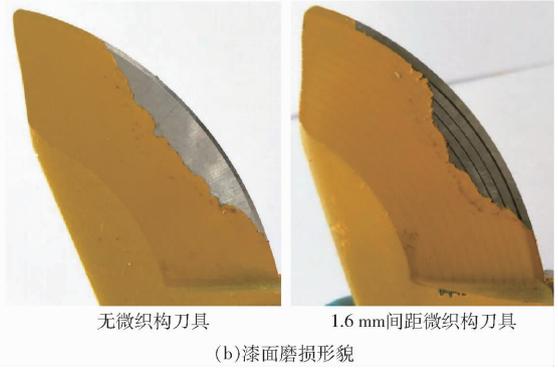
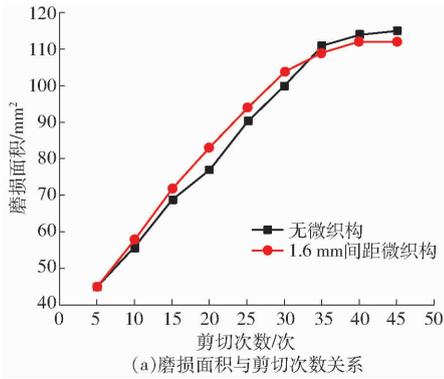


图9 直径10 mm树枝剪切试验

Fig. 9 10 mm diameter branch shear test

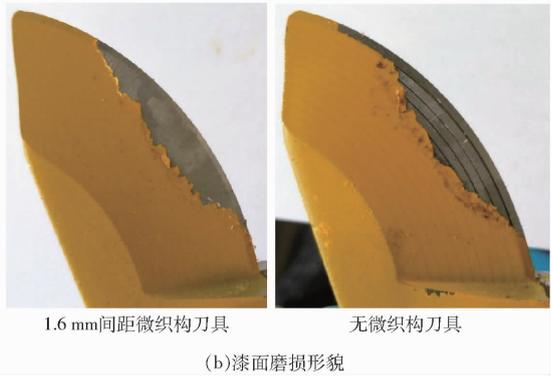
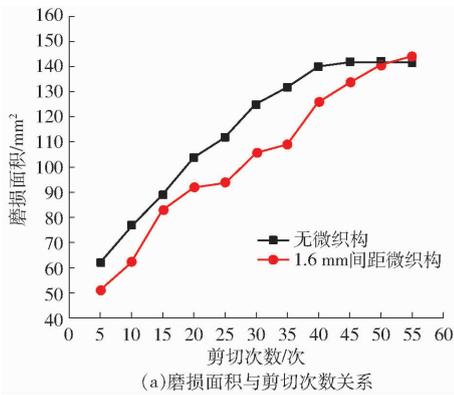


图10 直径15 mm树枝剪切试验

Fig. 10 15 mm diameter branch shear test

图11为剪切直径20 mm树枝刀具漆面磨损面积图和修剪后实物图。由图11可以看出,无微织构刀具随剪切次数增加,漆面磨损面积由68 mm²增加到156 mm²,增加了88 mm²,剪切45~50次后漆面磨损面积趋于稳定;1.6 mm间距微织构刀具随剪切次数的增加漆面磨损面积由56 mm²增加到154 mm²,增加了98 mm²,与无微织构刀具首次检测磨损面积相比,微织构刀具小12 mm²,剪切50~55次后漆面磨损面积趋于稳定。无微织构刀具与1.6 mm间距微织构刀具达到稳定磨损面积时,微织构刀具剪切

次数比无微织构刀具多5次,磨损面积减少2 mm²,说明在剪切直径20 mm树枝时,微织构刀具表面耐磨性得到提升。

综上分析随剪切树枝直径增加,漆面最大磨损面积与稳定剪切次数均增加,动刀刃切入树枝的深度增加。由漆面磨损面积增加趋势可知,漆面磨损面积先快速增加后缓慢增加,说明动刀刃前端切入时受摩擦力影响较大,随着切入深度增加在刀具刃倾角的影响下,动刀刃后端受到的挤压力和摩擦力减小,随剪切次数增加漆面磨损面积增加缓慢。随

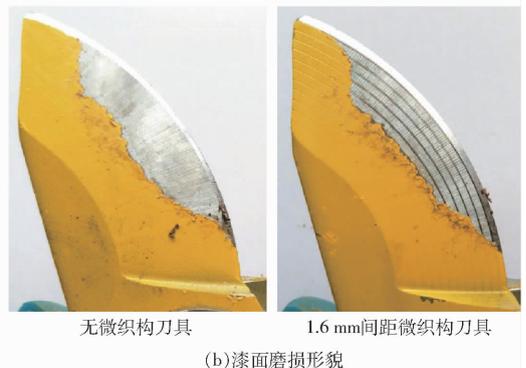
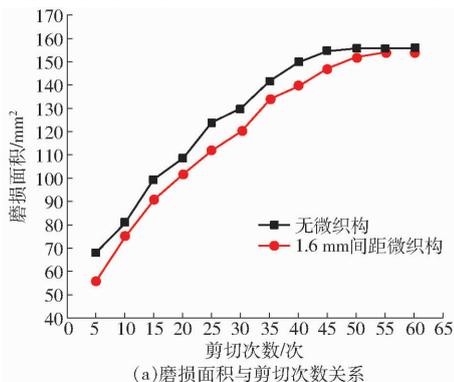


图11 直径20 mm树枝剪切试验

Fig. 11 20 mm diameter branch shear test

树枝直径的增加,1.6 mm 间距微织构刀具与无微织构刀具首次检测到的漆面磨损面积差值越来越大,添加有微织构刀具的表面体现出良好的减磨性能,因此在相同剪切次数下,有微织构刀具漆面磨损面积更小,且随着树枝直径增加这种减磨效果越明显。因此剪切树枝直径越大,微织构刀具减磨效果越好,1.6 mm 间距微织构刀具在实际应用中能显著提升刀具抗磨性能,延长刀具的使用寿命。

4 结论

(1)采用激光刻蚀技术成型仿生微织构刀具,加工工艺参数:激光功率 75 W,激光扫描速度 4.8 mm/s,氩气氛围保护,最终获得成型微织构形貌实际参数:沟槽宽度 138.3 μm ,沟槽深度 33.5 μm ,沟槽间距 1.0、1.3、1.6 mm 与微织构物理模型的几何

尺寸基本一致。

(2)载荷 200 g 下收缩态 1.0 mm 间距仿生微织构刀具摩擦因数和体积磨损量较小,具有减磨特性;载荷 300 g 下微织构刀具与无微织构刀具摩擦因数差别较小,舒张态 1.3 mm 间距仿生微织构刀具体积磨损量最小;载荷 400 g 下 1.6 mm 间距微织构刀具摩擦因数和体积磨损量最小,具有明显减磨特性。载荷 500 g 下 1.6 mm 间距微织构刀具摩擦因数最小,无微织构刀具体积磨损量最小。随载荷增加磨损机制逐渐向氧化磨损、磨粒磨损等复杂磨损机制转化。

(3)相同剪切次数下 1.6 mm 间距微织构刀具能有效提升刀具抗磨性能;漆面磨损面积稳定时,1.6 mm 间距微织构刀具所需的剪切次数多于无微织构刀具。

参 考 文 献

- [1] 中国农业年鉴编辑委员会. 中国农业年鉴[M]. 北京:中国农业出版社,2016:222-225.
- [2] 胡桂英. 浅论果树修剪的意义及技术要领[J]. 农业与技术,2018(7):27-28.
HU Guiying. On the significance and technical essentials of fruit tree pruning[J]. Agriculture and Technology, 2018(7):27-28. (in Chinese)
- [3] 祁海英. 果树修剪的意义及技术要领[J]. 现代园艺,2014(14):45.
QI Haiying. The significance and technical essentials of fruit tree pruning[J]. Modern Gardening,2014(14):45. (in Chinese)
- [4] 孙健峰,杨洲,张庆茂,等. 果园电动修剪刀片摩擦磨损性能研究[J]. 江苏农业科学,2016,44(4):371-373.
SUN Jianfeng, YANG Zhou, ZHANG Qingmao, et al. Research on friction and wear performance of electric pruning blade in orchard[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2016,44(4):371-373. (in Chinese)
- [5] 李守根,康峰,李文彬,等. 果树剪枝机械化及自动化研究进展[J]. 东北农业大学学报,2017,48(8):88-96.
LI Shougen, KANG Feng, LI Wenbin, et al. Progress advance on pruning mechanization and automation of fruit trees[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2017,48(8):88-96. (in Chinese)
- [6] 葛云,方珏,李远. 修枝剪刀刀具夹紧更换机构的设计[J]. 石河子大学学报(自然科学版),2013,31(1):119-121.
GE Yun, FANG Jue, LI Yuan. Design of clamping and changing mechanism of pruning scissors[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science Edition),2013,31(1):119-121. (in Chinese)
- [7] 曹涤环,刘建武. 果树林木修剪创伤及伤口处理技术[J]. 果农之友,2012(12):29.
CAO Dihuan, LIU Jianwu. Pruning wounds and wound treatment techniques of fruit trees[J]. Friends of Fruit Growers,2012(12):29. (in Chinese)
- [8] 罗洁,庄丽娟. 中泰荔枝龙眼贸易的竞争力分析[J]. 广东农业科学,2013,40(2):209-211.
LUO Jie, ZHUANG Lijuan. Analysis on the competitiveness of Sino-Thai litchi and longan trade[J]. Guangdong Agricultural Sciences,2013,40(2):209-211. (in Chinese)
- [9] 杨洲,郭晓伶,汪刘一,等. 果园电动修剪机具与技术研究进展[J]. 果树学报,2015,32(4):712-719.
YANG Zhou, GUO Xiaoling, WANG Liuyi, et al. Research progress of orchard electric pruning equipment and technology[J]. Journal of Fruit Science,2015,32(4):712-719. (in Chinese)
- [10] 吴良军. 龙眼树枝剪切机理与修剪机具优化研究[D]. 广州:华南农业大学,2014.
WU Liangjun. Research on longan branch shearing mechanism and pruning machine optimization[D]. Guangzhou:South China Agricultural University,2014. (in Chinese)
- [11] 吴良军,杨洲,段洁利,等. 龙眼树枝修剪机具刀片切割力的影响因素试验[J]. 农业工程学报,2012,28(24):8-14.
WU Liangjun, YANG Zhou, DUAN Jieli, et al. Experiment on the influencing factors of cutting force of longan branch pruning machine blade[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(24):8-14. (in Chinese)
- [12] 吴良军,杨洲,洪添胜,等. 荔枝树枝力学特性的试验研究[J]. 农业工程学报,2012,28(16):68-73.
WU Liangjun, YANG Zhou, HONG Tiansheng, et al. Experimental study on the mechanical properties of litchi branches[J]. Transactions of the CSAE,2012,28(16):68-73. (in Chinese)
- [13] 王慰祖,吴良军,杨洲,等. 树枝直刃剪切数学模型与试验[J]. 华南农业大学学报,2016,37(4):105-111.
WANG Weizhu, WU Liangjun, YANG Zhou, et al. Mathematical model and experiment of straight-edge shear of branches[J].

- Journal of South China Agricultural University, 2016,37(4):105-111. (in Chinese)
- [14] FATIMA A, MATIVENGA P T. A comparative study on cutting performance of rake-flank face structured cutting tool in orthogonal cutting of AISI/SAE 4140[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015,78(9-12):2097-2106.
- [15] SUGIHARA T, ENOMOTO T. Crater and flank wear resistance of cutting tools having micro textured surfaces[J]. Precision Engineering, 2013,37(4):888-896.
- [16] KÜMMEL J, BRAUN D, GIBMEIER J, et al. Study on micro texturing of uncoated cemented carbide cutting tools for wear improvement and built-up edge stabilisation[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015,215:62-70.
- [17] GREINER C, SCHÄFER M. Bio-inspired scale-like surface textures and their tribological properties[J]. Bioinspiration & Biomimetics, 2015,10:440014.
- [18] 马云海, 马圣胜, 贾洪雷, 等. 仿生波纹形开沟器减黏降阻性能测试与分析[J]. 农业工程学报, 2014,30(5):36-41. MA Yunhai, MA Shengsheng, JIA Honglei, et al. Test and analysis of viscosity and resistance reduction performance of bionic corrugated opener[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(5):36-41. (in Chinese)
- [19] 陈平, 项欣, 李俊玲, 等. 沟槽型织构摩擦学性能的数值模拟与实验研究[J]. 材料工程, 2016,44(6):31-37. CHEN Ping, XIANG Xin, LI Junling, et al. Numerical simulation and experimental research on the tribological properties of grooved texture[J]. Materials Engineering, 2016,44(6):31-37. (in Chinese)
- [20] 邵世超, 谢峰. 仿生微结构对刀具切削性能影响的有限元分析[J]. 工具技术, 2013,47(5):8-12. SHAO Shichao, XIE Feng. Finite element analysis of the influence of bionic micro-texture on the cutting performance of tools[J]. Tool Technology, 2013,47(5):8-12. (in Chinese)
- [21] 纪敬虎, 管采薇, 符昊, 等. 粗糙度对微凹坑织构化表面摩擦学性能的影响[J]. 润滑与密封, 2018,43(1):20-25. JI Jinghu, GUAN Caiwei, FU Hao, et al. The effect of roughness on the tribological properties of micro-pit texture surface[J]. Lubrication and Sealing, 2018,43(1):20-25. (in Chinese)
- [22] 逢明华, 聂永芳, 申福猴, 等. 刀具表面织构对刀-屑界面摩擦学特性的影响[J]. 表面技术, 2018,47(11):109-118. PANG Minghua, NIE Yongfang, SHEN Fuhou, et al. The effect of tool surface texture on the tribological characteristics of tool-chip interface[J]. Surface Technology, 2018,47(11):109-118. (in Chinese)
- [23] 逢明华, 马利杰. 刀具表面微结构对刀-屑界面特性的影响研究[J]. 工具技术, 2018,52(10):32-38. PANG Minghua, MA Lijie. Research on the effect of tool surface micro-texture on the characteristics of tool-chip interface[J]. Tool Technology, 2018,52(10):32-38. (in Chinese)
- [24] 熙鹏, 丛茜, 滕凤明, 等. 提高耐磨与破碎性的仿生凹坑形磨辊设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018,34(8):55-61. XI Peng, CONG Qian, TENG Fengming, et al. Design and test of the bionic pit-shaped grinding roller to improve the wear resistance and crushability[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(8):55-61. (in Chinese)
- [25] 孙建芳, 李傲松, 苏峰华, 等. 表面织构钛合金的干摩擦和全氟聚醚油润滑下的摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2018,38(6):658-664. SUN Jianfang, LI Aosong, SU Fenghua, et al. Study on dry friction of surface-textured titanium alloy and tribological properties under perfluoropolyether oil lubrication[J]. Chinese Journal of Tribology, 2018,38(6):658-664. (in Chinese)
- [26] 张振夫, 周飞, 王晓雷, 等. 滑动表面仿生微结构的摩擦学效应[J]. 机械制造与自动化, 2009,38(3):65-70. ZHANG Zhenfu, ZHOU Fei, WANG Xiaolei, et al. Tribological effect of bionic microstructure on sliding surface[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2009,38(3):65-70. (in Chinese)
- [27] 刘国敏, 李建桥, 邹猛, 等. 蚯蚓非光滑体表形貌与降阻特性[J]. 农业工程学报, 2008,24(12):62-65. LIU Guomin, LI Jianqiao, ZOU Meng, et al. Earthworm non-smooth surface morphology and resistance reduction characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2008,24(12):62-65. (in Chinese)
- [28] 刘国敏. 蚯蚓体表减粘降阻功能耦合仿生研究[D]. 长春:吉林大学, 2009. LIU Guomin. Research on coupling bionics of earthworm body surface viscosity and resistance reduction function[D]. Changchun: Jilin University, 2009. (in Chinese)
- [29] ASTM B611-13(2018) [EB/OL]. [2019-10-18]. <https://www.astm.org/Standards/B611.htm>.
- [30] 沈龙光, 张庆茂, 宋杰. 铁基合金激光熔覆层高温润滑磨损性能[J]. 强激光与粒子束, 2009,21(11):1628-1632. SHEN Longguang, ZHANG Qingmao, SONG Jie. High temperature lubrication and wear properties of iron-based alloy laser cladding layer[J]. Power Laser and Particle Beam, 2009,21(11):1628-1632. (in Chinese)