

木材锯切锯齿锯料角对切向力和法向力的影响

李伟光^{1, 2}, 张占宽²

(1. 中国林科院林业新技术研究所, 北京 100091; 2. 中国林科院木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 采用开式和闭式切削对比方式, 对不同锯切条件下侧刃参数中锯料角对切向力和法向力的影响规律进行研究, 为刀具设计和加工参数的合理设置提供依据。研究发现: 锯齿侧刃产生的力占总切向力的 4.6%~20.2%, 以侧刃切向力为主。当锯料角增加或切削厚度减小时, 侧刃力占比呈减少趋势; 随切削速度增加, 侧刃切向力增大, 但切削速度对侧刃法向力的影响不明显。在相同锯料角条件下, 横向切削时的侧刃切向力最大。

关键词: 木材锯切; 锯齿; 侧刃; 锯料角; 切向力; 法向力

中图分类号: TS643; S781.6

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654 (2019) 06-0019-05

Effect of Radial Clearance Angle on Tangential Force and Normal Force in Wood Sawing

LI Wei-guang^{1, 2}, ZHANG Zhan-kuan²

(1. Research Institute of Forestry New Technology, Chinese Academy of Forestry (CAF), Beijing 100091, China;

2. Research Institute of Wood Industry, CAF, Beijing 100091, China)

Abstract: In this paper, influence of radial clearance angle of the sawtooth side edge in closed cutting and open cutting on the tangential force and normal force in different sawing conditions were evaluated. It was found that the tangential force which accounted for 4.6% to 20.2% of the total tangential force was the main force from the side edge while the normal force had no obvious changes. When the radial clearance angle increased or the cutting thickness decreased, the side edge cutting force decreased. The tangential force increased with increased cutting speed which had no obvious influence on the normal force. With the same radial clearance angles, the tangential force from the side edge in transverse cutting showed the biggest.

Key words: wood sawing; sawtooth; side edge; radial clearance angle; tangential force; normal force

木材锯切是木材切削中普遍使用的加工方式之一^[1], 为闭式切削。在锯切中, 锯齿具有三条切削刃: 一条横刃(主切削刃)和两条侧刃; 锯切所形成的加工表面由两条侧刃切削, 锯齿前齿面侧刃和与锯身平面的夹角为锯料角(也称径向侧后角)。

影响木材锯切力的因素包括: 木材的树种和材性^[2-5]、刀具材料和角度以及切削厚度和速度^[6-12]等工艺参数。目前, 已有研究多集中在对横刃长度(锯口宽度)和形状改变方面, 而很少考虑锯齿侧刃长度和锯料角对锯切能耗的影响。

近年来木工超薄圆锯片广泛应用^[13], 锯齿主刃宽度不断缩小, 有的刃口宽度仅 1.2 mm, 因此, 锯切过程中侧刃几何参数中锯料角的影响尤为重要。

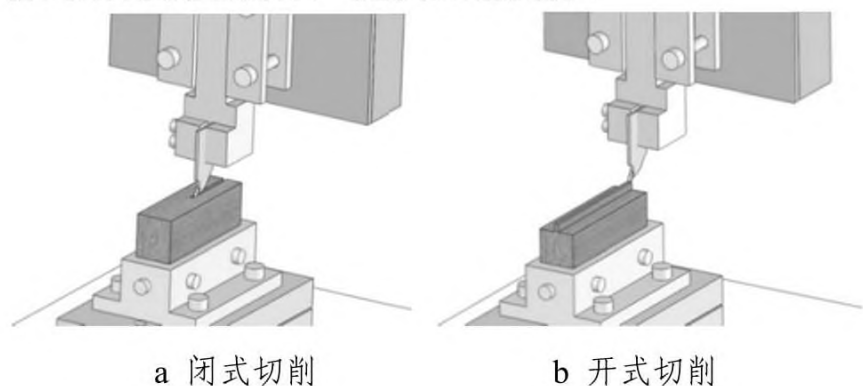
开式切削时仅主刃参与切削, 如木材刨切或旋

收稿日期: 2018-12-26; 修改日期: 2019-10-22

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金“基于木材切削的刀具表面微织构减摩机理研究”(CAFYBB2018SZ015)。

作者简介: 李伟光(1983—), 助理研究员。Email: liwg@criwi.org.cn。

切,侧刃不参与切削。而闭式切削除主刃外,还有两条侧刃参与,因此,通过比较闭式切削和开式切削(图1)锯切力的差异,即可得出侧刃参数对锯切力的影响规律。笔者进行了多种切削条件下的闭式和开式切削试验,分析重要侧刃参数锯料角对锯切力的影响规律及切削过程的基本特征,以期为新型锯齿结构模型设计,提供理论支持。



a 闭式切削 b 开式切削

图1 开式切削与闭式切削示意图

Fig.1 Open cutting and closed cutting

1 材料与方法

1.1 材料

木材试样:水曲柳 (*Fraxinus* spp.), 外购, 平均气干含水率 12%, 气干密度 0.65 g/cm^3 , 规格 $70 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ (长 $\times$ 宽 $\times$ 高)。

硬质合金刀具:锯片刀头材料牌号为 YG6X, 锯身基体材料为 65Mn。切削刃宽度为 2.6 mm , 锯身厚度为 1.8 mm , 如图 2 所示。

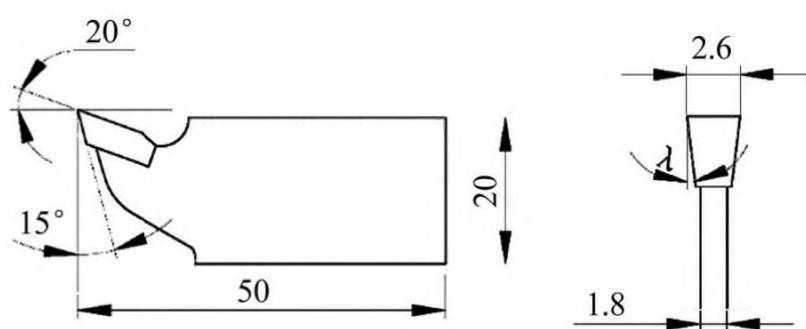


图2 锯齿结构参数

Fig.2 Sawtooth structural parameters

1.2 试验设备与仪器

切削实验台由数控加工中心改装,可实现不同的进给速度(即单锯齿切削时的切削速度)和切削厚度。主要装置包括:数控加工中心,可调节 X 、 Y 和 Z 方向位置,位置精度达 0.01 mm ;压电晶体三维测力传感器(9257A), F_z 范围为 $-5 \sim 5 \text{ kN}$, F_y 范围为 $-5 \sim 10 \text{ kN}$;电荷放大器(5806);信号分析仪(NEC Omniace II RA2300)。

1.3 试验方法

根据切削时的受力方向,锯齿受力可分为:平行切削速度方向的切向力 F_y 、垂直切削速度方向的法向力 F_z 。单个锯齿上的作用力分别作用在锯齿的主刃和侧刃上,即主刃受力和侧刃受力。

主刃可分解为在切向产生的主刃切向力 F_{zy} ,在法向产生的主刃法向力 F_{zz} 。根据主刃受力坐标系,侧刃受力亦可分为侧刃切向力 F_{cy} (Y 向)和侧刃法向力 F_{cz} (Z 向)。其关系为:

$$F_y = F_{zy} + F_{cy} \quad (1)$$

$$F_z = F_{zz} + F_{cz} \quad (2)$$

选用具有不同锯料角 (0° 、 1.5° 、 3°) 的硬质合金单齿,采用单因素试验,考察在不同厚度 (0.08 、 0.12 、 0.16 mm),切削速度 (5 、 10 、 15 m/min) 及切削方向(弦切面纵向 $90^\circ - 0^\circ$ 、弦切面横向 $0^\circ - 90^\circ$,垂直于年轮端向 $90^\circ - 90^\circ$) 条件下的切向力和法向力。

通过数控编程,在同一位置进行连续 $20 \sim 30$ 次闭式切削,产生一个锯路,然后将锯齿错开该锯路,再进行下一个 $20 \sim 30$ 次的连续闭式切削,产生另一个锯路,锯齿错开的距离为切削刃宽度的 2 倍 ($2.6 \times 2 \text{ mm}$)。待两条锯路形成后,对锯路间的木材进行开式切削。每种条件重复测试 3 次,以尽量避免因木材部位不同造成的差异,减少试验误差。

闭式切削与开式切削在切向和法向所产生力的差值,统称为侧刃力 F_c ,即:

$$\text{侧刃力 } F_c = \text{闭式切向力} - \text{开式切向力}$$

侧刃切向力和侧刃法向力分别与切向力和法向力的比值,得到侧刃占比 K ,单位为%。

$$\text{切向方向 } K = F_{cy}/F_y \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{法向方向 } K = F_{cz}/F_z \times 100\% \quad (4)$$

2 结果和讨论

2.1 不同切削厚度条件下的切向力和法向力

以 10 m/min 速度进行纵向切削,在不同切削厚度时,侧刃受力随锯齿锯料角的变化如图 3 所示。

由图 3a 可知,随着切削厚度增加,侧刃切向力随之增大;且锯料角越小,侧刃切向力越大。锯料角为 0° 时,随切削厚度从 0.08 mm 增加到 0.16 mm ,侧刃切向力增大了近 2.5 倍。

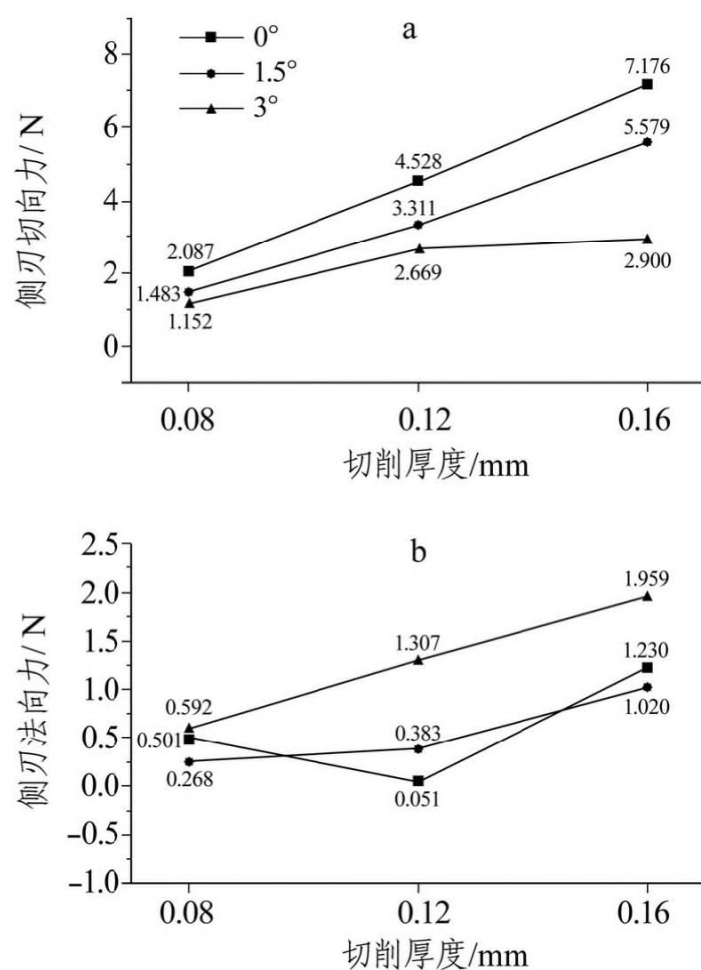


图3 不同切削厚度时锯料角对侧刃切向力和侧刃法向力的影响

Fig.3 Effect of radial clearance angle on side edge forces in different cutting thicknesses

图3b显示,在同样切削厚度条件下,侧刃法向力亦是在锯料角为0°时最大。

对切向力和法向力进行主刃、侧刃受力分解,如图4所示。

由图4a可知,不同锯料角时,总切向力随切削厚度的增加而增大,但不同条件下的侧刃切向力占比K值都很小,且随着锯料角增大及随着切削厚度减小,侧刃占比总体呈减少趋势。

图4b亦显示,不同锯料角时,总法向力随切削厚度的增加而增大,其中侧刃法向力占比不高于18%,且随着锯料角和切削厚度的改变,侧刃法向力占比变化没有明显规律。这可能是由于木材切削本身产生的法向力相比切向力就较小,而引起法向力变化的主要原因是刀具的圆弧形主刃刃口以及前、后刀面对切削平面和切屑作用力,法向力受侧刃的影响较小。

2.2 不同切削速度条件下的切向力和法向力

固定切削厚度为0.12 mm时,进行纵向切削。在不同切削速度条件下,锯齿锯料角对侧刃切向力和法向力的影响,如图5所示。

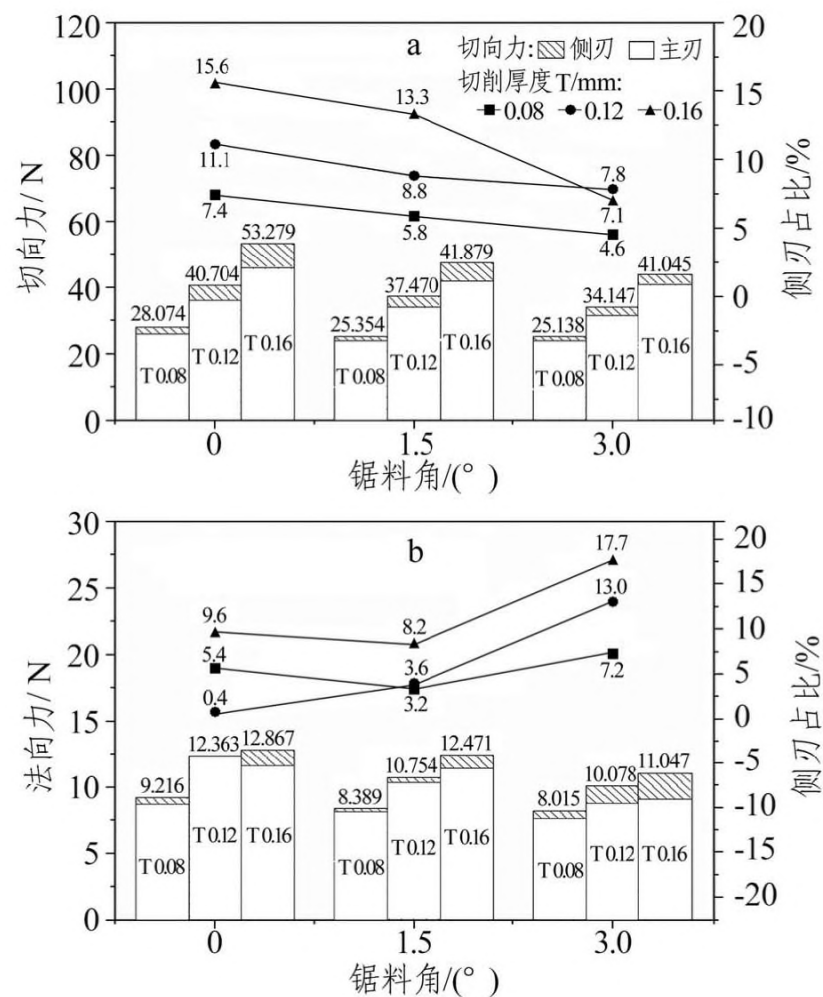


图4 不同锯切厚度时锯料角对主刃、侧刃切向和法向受力的影响

Fig.4 Effect of radial clearance angle on main edge and side edge forces in different cutting thicknesses

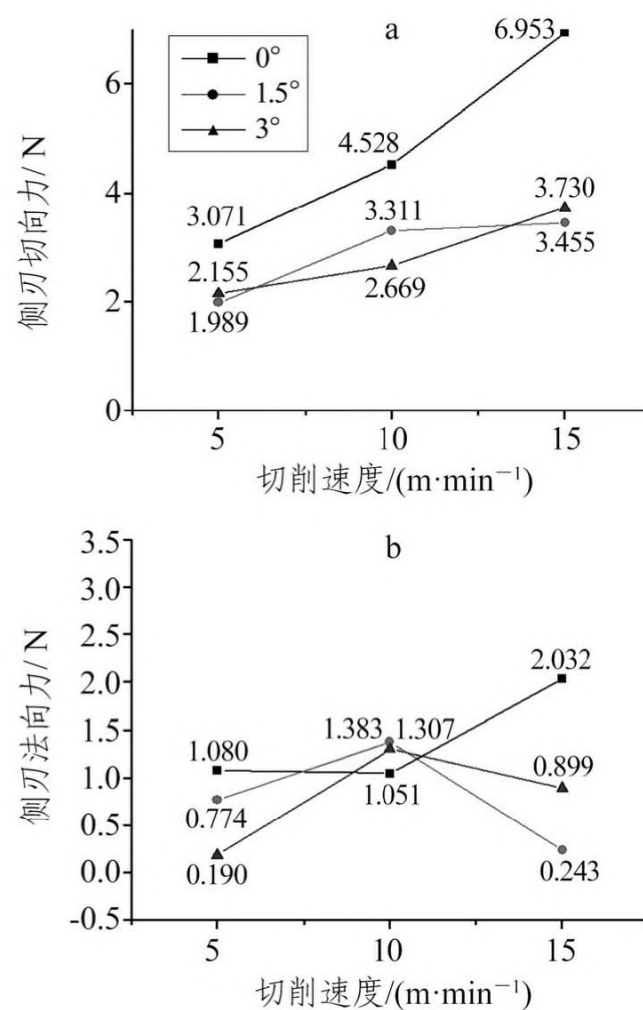


图5 不同切削速度时锯料角对侧刃切向力和法向力的影响
Fig.5 Effect of radial clearance angle on side edge forces in different cutting speed

由图 5a 可知,随着切削速度的增加,侧刃切向力随之增大。这可能是由于切削过程中,运动的刀具切入木材后,刀具前的木材层被刀具带动,由静止状态瞬时变成高速运动状态,从而产生很大的加速度,虽然切屑本身质量很小,但引起的惯性力却能够阻碍木材变形,从而加大切向力的消耗。随着切削速度加快,需要抵抗木材变形的作用力增大,从而使切向力变大。

图 5b 可知,随切削速度的变化,侧刃法向力的变化很小,在 0.19~2.203 N 之间,无明显规律。

不同切削条件下主刃、侧刃的切向力和法向力,及侧刃占比计算结果,如图 6 所示。

由图 6a 可知,随着切削速度的增加,不同锯料角产生的切向力和法向力均增大。其中侧刃切向力占比仍很小,最大值仅 15.1% (锯料角 0°, 切削速度 15 m/min)。随着锯料角的增大,以及切削速度的降低,侧刃切向力占比呈减少趋势。且速度越低,侧刃切向力占比随锯料角的变化越不明显。

由图 6b 可知,侧刃法向力占比也低于 16%,随锯料角和切削速度的改变,侧刃法向力大小和占比变化均无明显规律。由于木材切削时,法向力相比切向力小,而引起法向力变化的主要原因是圆弧形主刃刃口以及前、后刀面对切削平面和切屑作用力引起,故侧刃对其影响很小。

2.3 不同切削方向上的切向力和法向力

固定切削速度 10 m/min、厚度 0.12 mm 时,不同切削方向上,锯齿锯料角对侧刃切向力和法向力的影响,如图 7 所示。

由图 7a 可知,不同锯料角条件下,侧刃切向力均以横向切削时最大,纵向切削时次之,端向切削时最小。

当木材横向切削时,主刃平行于纤维长度方向,刀具运动方向垂直于纤维长度方向,此时侧刃及其运动方向均近似于垂直于纤维长度方向,侧刃相当于进行端向切削。同理可知,当进行纵向切削时,侧刃相当于纵向切削;而当端向切削时,侧刃相当于进行横向切削。故纵向切削时,侧刃产生的切向力次之;端向切削时,侧刃产生的切向力最小。对于同一切削方向,随锯料角的增大,其侧刃切向力逐渐减小。

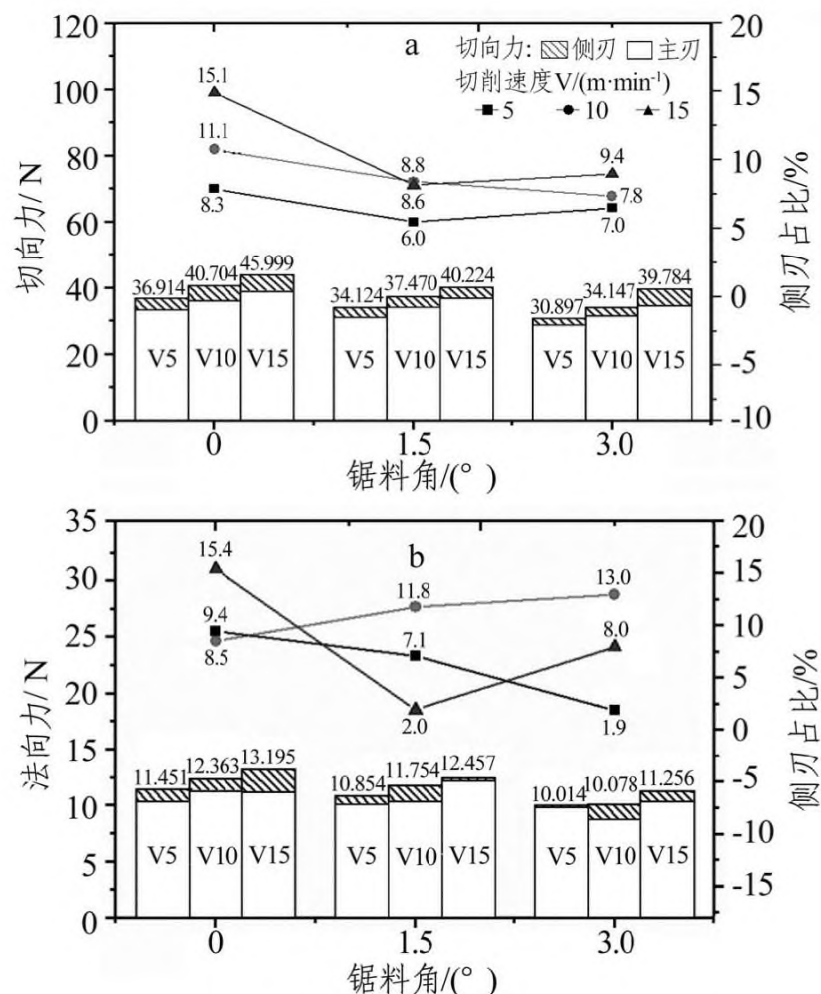


图 6 不同锯切速度时锯齿锯料角对侧刃与主刃在切向和法向受力的影响

Fig.6 Effect of radial clearance angle on main edge and side edge forces in different cutting speed

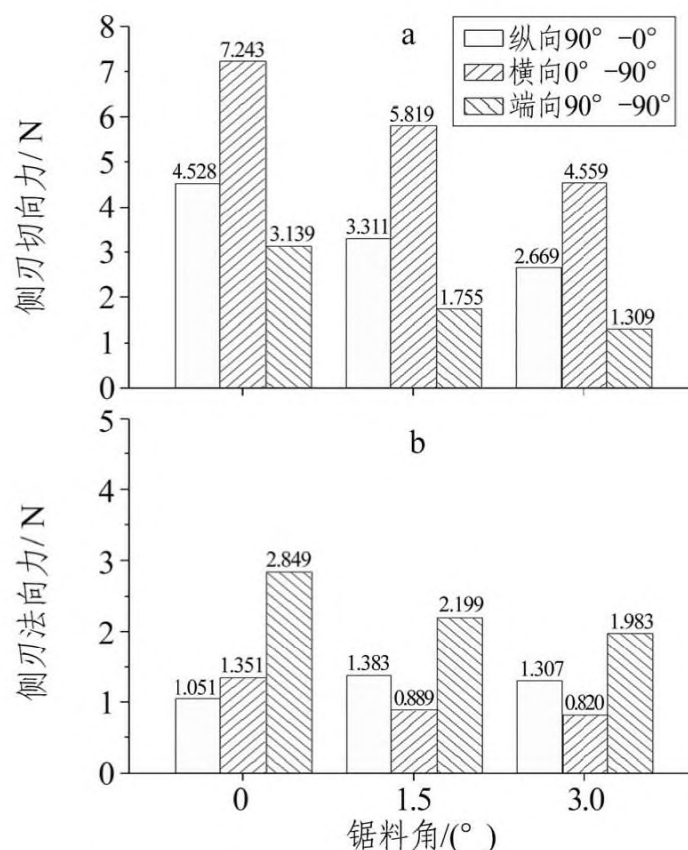


图 7 不同切削方向时锯齿锯料角对侧刃切向力和侧刃法向力的影响

Fig.7 Effect of radial clearance angle on tangential and normal forces of side edge in different cutting directions

由图 7b 可知,侧刃法向力在端向最大,但无明显规律。

在不同切削方向时,主刃、侧刃的切向力和法向力以及侧刃占比,如图8所示。

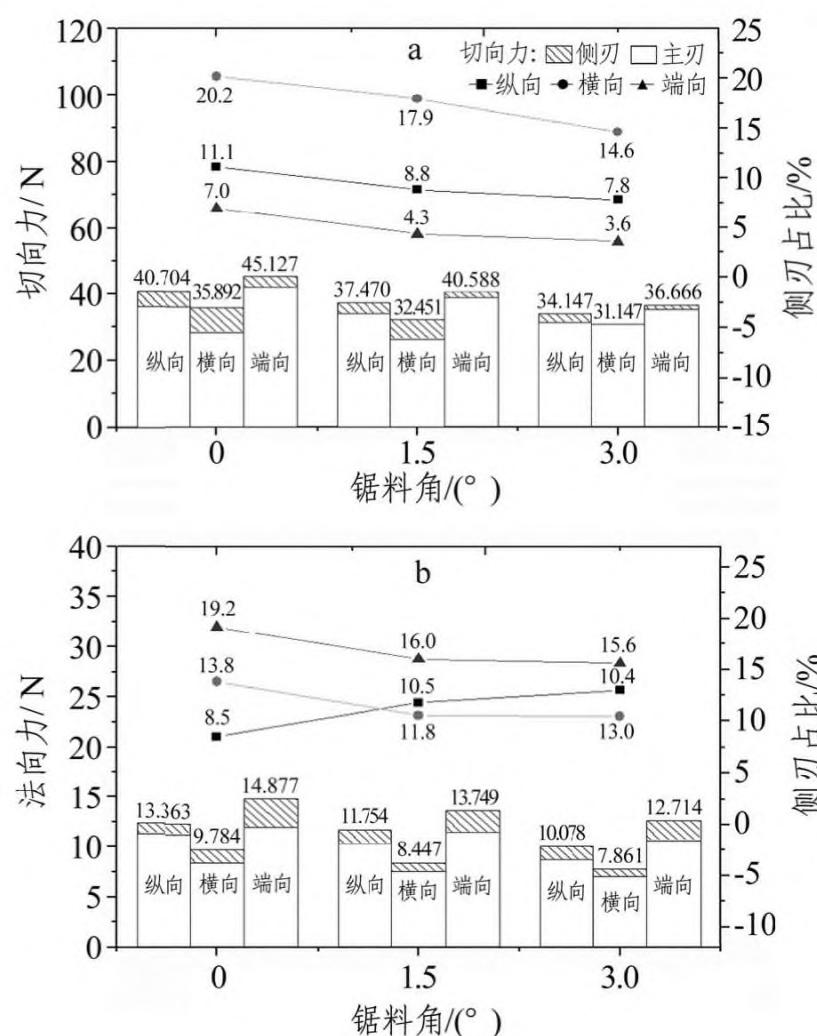


图8 不同切削方向时锯料角对侧刃与主刃在切向和法向受力的影响

Fig.8 Effect of radial clearance angle on main edge and side edge forces in different cutting directions

由图8a可知,切向力中,侧刃占比最大为20.2%,此时的锯料角为0°、横向切削。而端向切削时的侧刃占比最小,且与横向切削时差距最大,随着锯料角的增大,侧刃占比减小。

图8b显示,法向方向上侧刃占比低于20%,随锯料角和切削方向上的改变,侧刃法向力和侧刃占比变化亦无明显规律。

3 结论

1) 主刃产生的切向力占总切向力的80%左右,而侧刃产生的切向力占比最高约20%,且主要是侧刃切向力。锯齿锯料角增大,侧刃切向力呈减小趋势。当锯齿锯料角为0°时,其侧刃切向力最大。

2) 随着切削速度的增加,侧刃切向力增大;但随着锯齿锯料角增大,侧刃切向力占比减小。但随锯齿锯料角和切削速度的改变,侧刃法向力和其占比变化均没有明显规律。

3) 锯齿锯料角相同条件下,侧刃切向力在横向切削时最大;随锯齿锯料角增大,侧刃切向力占比减小;侧刃法向力在端向切削时最大,随锯齿锯料角和切削方向的变化较小。

4) 通过比较闭式切削和开式切削,得到的侧刃力以锯齿侧刃切向力为主,因此,在设计圆锯片齿形,特别是薄锯路圆锯片时,应考虑侧刃齿形参数的影响,在不影响加工质量的前提下,考虑使用小锯料角锯齿,优化齿形结构。

参考文献:

- [1] 李黎. 木材切削原理与刀具[M]. 北京: 中国林业出版社, 2005.
- [2] Kivimaa E. Cutting force in wood working[M]. Helsinki: State Institute for Technical Research, 1950.
- [3] Marchal R, Mothe F, Denaud LE, Thibaut B, Bléron L, Cutting forces in wood machining – Basics and applications in industrial processes. A review COST Action E35 2004–2008: Wood machining – micromechanics and fracture[J]. Holzforschung, 2009, 63: 157-167.
- [4] 马岩. 国外木材切削理论研究的进展[J]. 木材加工机械, 2008, 19(4): 35-39.
- [5] MA Y. The development of theory of wood cutting abroad[J]. Wood Processing Machinery, 2008, 19(4): 35-39.
- [6] 管宁. 15种阔叶树材中切削厚度、刀具前角和木材含水率对切削阻力的影响[J]. 林业科学, 1994, 30(2): 134-139.
- [7] GUAN N. Effects of chip thickness knife rake angle and wood moisture content on the cutting resistance of 15 hardwoods[J]. Scientia Silvae Sinicae, 1994, 30(2): 134-139.
- [8] Koch P. Wood Machining Preocesses[M]. New York: The Ronald Press Co, 1964.
- [9] McKenzie WM. Effects of bevelling the teeth of rip saws[J]. Wood Sci Technol, 2000, 34(3): 125-133.
- [10] MATS EKEVAD, LUI'S CRISTO' VA' O, BIRGER MARKLUND. Lateral cutting forces for different tooth geometries and cutting directions[J]. Wood Material Science and Engineering, 2012, 7: 126-133.
- [11] 曹平祥. 木材切削力的研究[J]. 木材加工机械, 1997(4): 2-5.
- [12] CAO P X. The study on wood cutting force[J]. Wood Processing Machinery, 1997(4): 2-5.
- [13] 张占宽, 彭晓瑞, 李伟光. 切削参数对人造板切削力的影响研究[J]. 木材加工机械, 2011, 22(2): 1-4.
- [14] 张占宽, 彭晓瑞, 李伟光, 等. 切削参数对木材切削力的影响[J]. 木材工业, 2011, 25(3): 7-10.
- [15] ZAHNG Z K, PENG X R, LI W G, et al. Influence of cutting direction on cutting forces in wood[J]. Influence of cutting parameters on cutting forces in wood sawing[J]. China Wood Industry, 2011, 25(3): 7-10.
- [16] 张占宽, 彭晓瑞, 李伟光, 等. 切削方向对木材切削力的影响[J]. 木材工业, 2011, 25(6): 7-9.
- [17] ZAHNG Z K, PENG X R, LI W G, et al. Influence of cutting direction on cutting forces in wood[J]. China Wood Industry, 2011, 25(6): 7-9.
- [18] 曹平祥. 薄锯路硬质合金圆锯片应用浅释[J]. 木材加工机械, 2003, 14(3): 9-12.
- [19] CAO P X. Application of thin kerf tungsten carbide saw blades[J]. Wood Processing Machinery, 2003, 14(3): 9-12.

(责任编辑 向琴)