

木材切削过程中摩擦行为的研究进展

李伟光¹, 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: 总结国内外木材切削摩擦现象的研究进展, 探讨木材切削中的摩擦行为, 分析影响木材切削过程摩擦系数的主要因素, 并介绍常用的木工刀具减摩技术, 为完善木材切削摩擦学理论提供参考和依据。

关键词: 木材; 切削; 摩擦; 摩擦系数

中图分类号: S781.6; TS643 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2018) 06-0023-05

Research Progress of Friction Behavior in Wood Cutting

LI Wei-guang¹, 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: Friction plays an important role in the wood cutting process. By summarizing relevant published articles on friction in wood cutting worldwide, the authors reviewed research progress on friction phenomena in wood cutting and introduced basic friction models of wood cutting. They emphasized main factors which influence friction coefficient and presented commonly used anti-friction technology for woodworking cutters in order to explain physical friction phenomena in the wood cutting process and to provide reference to wood cutting theory.

Key words: wood; cutting; friction; friction coefficient

在木材切削中, 消耗的能量很大一部分用于克服木材工件和刀具表面产生的摩擦力^[1]。特别是作用在刀具前刀面的摩擦力, 不仅直接影响刀具磨损程度, 而且影响加工工件的表面质量, 包括已加工工件的表面质量和切屑的表面质量, 如旋切、刨切等方式加工的单板质量。

降低木材切削过程中刀具与木材间的摩擦系数, 一直是木材切削加工领域的核心课题, 对提高切削刀具使用寿命、保证产品加工质量、降低切削

能耗, 均具有十分重要的意义^[2]。围绕木材切削过程中的摩擦力产生原理、摩擦模型以及影响摩擦系数的主要因素等, 国内外诸多学者进行了广泛深入的研究。笔者在总结归纳前人研究的基础上, 对木材切削过程中的摩擦行为进行探讨, 为丰富木材切削摩擦学理论提供参考和依据。

1 木材切削过程中摩擦力的产生

木材切削过程中摩擦力的产生如图 1 所示。由于刀具和切屑表面并不是完全光滑平面, 随着切屑沿前刀面移动, 两粗糙表面的相互作用产生摩擦力; 当刀具刃口变钝时, 会在刀具后刀面和刃口位置, 对已加工木材表面具有挤压作用而产生摩擦力。作用在刀具前刀面的切向力为 T_a , 垂直于 T_a 的正压力

收稿日期: 2018-03-28; 修改日期: 2018-10-08

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结构减摩机理研究”(CAFYBB2018SZ015)。
作者简介: 李伟光(1983—), 男, 中国林科院林业新技术研究所助理研究员。

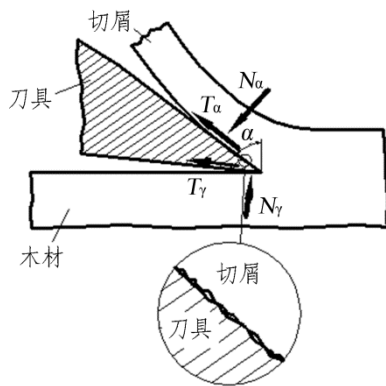


图1 木材切削过程中摩擦力的产生

Fig.1 Schematic diagram of tool-chip surface interaction in wood cutting

为 N_α 。当考虑工件与刀具后刀面之间相互作用的弹性效益时，作用在刀具后刀面的切向力为 T_γ ，垂直于 T_γ 的正压力为 N_γ 。

以直角自由切削为例，在木材切削过程中，木材形成的切屑对前刀面、已加工木材表面对刀具后刀面，均产生较大的压力，且后刀面与已加工表面的摩擦效益大于切屑与前刀面的摩擦效益。

木材切削时刀具表面与木材表面的接触状态，可分为粘结区和滑动区^[3]。由于木质材料的羟基基团和刀具金属表面的氧化层形成的氢键，以及范德华力的作用，粘接区刀具表面与木材表面呈紧密接触状态。

木材与刀具表面接触区域中，粘接区以外部分为滑动区。在该区域内，刀/木材间的摩擦仅为外摩擦，即滑动区的摩擦，摩擦力的大小与法向力成正比，而与接触面积无关。其摩擦机理主要考虑两方面^[3]：

- 1) 木材与刀具之间材料粘结的破坏和生成；
- 2) 木材滑过刀具表面的非弹性变形^[4]。

假设粘结和变形摩擦机理是相互独立的，这两种机理可以归纳为刀-屑粘结模型和刀-屑非弹性模型。一般认为，木材与金属刀具之间的总摩擦力由粘着剪切力和犁沟力两项组成，与金属切削不同，由于刀具和木材表面的硬度差较大，其中犁沟力占有相当大的分量，故在考虑总摩擦系数时必须考虑犁沟力，且视木材切削情况而定。如车削、刨切、旋切时粘结现象较为明显，锯切、铣削时粘结不严重，而磨削时犁沟作用较为突出。

2 影响摩擦系数的主要因素

2.1 木材

木材是一种含有水分的多孔性和各向异性材料，由不同形状和尺寸的管状细胞纵横交错组成。当刀具切削木材时，木材中存在易造成刀具机械擦伤的硬质点^[5-6]，如节子、树脂、石英砂等，因此，木材是影响摩擦系数的重要因素之一。

2.1.1 水分

因木材中不同水分含量，对其材性的影响不同，特别是在木材纤维饱和点上下时，摩擦系数变化存在差异。可分为两种情况：

1) 当木材含水率 $\leq 30\%$ 时，随着含水率增加，摩擦系数缓慢增加。其主要原因是较湿木材比干燥木材的材质软，与金属接触时，接触表面的粘结力增大，使摩擦系数增大。

2) 当木材含水率在 $40\% \sim 50\%$ 时，其表面摩擦系数随着含水率的增加呈先增大后缓慢减小的趋势，且摩擦系数峰值出现得越早，之后的下降趋势越缓慢^[7]。峰值之前摩擦系数增加，主要原因是摩擦表面自由水的损失；随着木材中更多的自由水在恒定压力下向木材表面渗透，在摩擦中起到了润滑作用，使表面摩擦系数降低。

水分在木材与刀具材料摩擦过程中扮演重要角色：① 木材中的自由水以及外界附加的水分，都可以在摩擦界面起到润滑作用，从而减小表面摩擦系数；② 木材含自由水越多，摩擦系数下降越明显。对于饱水木材，表面水分的微小改变，也会使摩擦系数显著改变^[8]；③ 对于外界附加的水分，当少量的水分施加到相对干燥的木材表面上时，只会增大摩擦系数。这是由于木材微毛细管的吸收作用将这部分水分吸收，并使其表面软化，并没有在摩擦界面起到润滑作用。

当外界水分的施加量远大于木材自身水分的吸收量时，即使是干燥的木材，其表面也可明显产生润滑现象^[9]。

2.1.2 木材切面

木材切削可分为纵向、横向和端向三个主要切削方向，不同切面的纤维方向有所差异，通常木材横切面的摩擦系数大于径切面和弦切面。木材切面对摩擦系数的影响也会因含水率不同而异。以松

木为例,当木材含水率由90%降低到45%时,径切面摩擦系数与横切面摩擦系数的比值由0.8增加到0.92,这是由于木材的横切面相对于径切面粗糙,且有更多的纤维卷曲,在高含水率情况下,横切面上的木材更软。而木材纤维方向的差异对表面摩擦系数的影响不大^[10]。

2.1.3 树种

不同树种对表面切削摩擦系数的影响亦不同。针叶树材表面的摩擦系数变化趋势比阔叶树材明显,尤其在摩擦系数范围内。这可能是由于针叶树材材质较软,容易引起实际接触粘结力增大所致。

2.2 切削刀具

2.2.1 刀具材料

理想的切削刀具材料必须具有较好的导热系数及抗黏结性能。刀具材料的热传导率主要影响摩擦过程中的热量传递,热传导率低的刀具材料表面,被刀具材料带走的热量少,未带走的热量引起木材软化,接触面黏结,产生的摩擦系数相对较大。

一般而言,在相同切削情况下,硬质合金表面产生的摩擦系数略低于高速钢和碳钢^[11]。

2.2.2 表面粗糙度

刀具材料表面粗糙度增加,其与木材表面间的摩擦系数越大。刀具材料表面与高含水率木材产生的摩擦系数,比与低含水率木材表面的摩擦系数变化显著。接触表面中的很小部分真正参与接触而产生分子键吸引力^[5],必须足够紧密地接触,才会产生粘附力^[12]。

2.3 其他因素

2.3.1 滑动速度

滑动速度对摩擦系数的影响,也与木材的含水率有较大关系^[12-13]。

1) 木材含水率较低时,随滑行速度增加,接触区域木材的温度增加并发生热软化现象,从而引起表面摩擦系数增大^[14]。此外,由于实际接触面积相对于名义接触面积要小,且当实际接触区的温度达到一定值时,木材可产生塑性流变^[5, 15],而随着滑动速度的增加,实际接触区域的温度升高,促使塑性流变和实际接触面积扩大,使得摩擦系数增大。

2) 木材含水率适中时,表面摩擦系数随滑行速度增加而减小的趋势变缓。这主要是由于摩擦实际

接触区域的水分可以降低温度,并阻止摩擦系数的增大。此外,水的存在还可缓解由于热软化现象产生的摩擦系数增大。

3) 木材含水率较大时,表面摩擦系数反而随滑行速度的增大而降低。滑动摩擦过程是不断更换粘结点的过程,紧密接触点较小,而且粘接力在固定键的作用下并不稳定,这种粘结的不稳定性,减小了粘结强度,并使摩擦系数降低。随着滑动速度的增加,粘结稳定性变弱,摩擦系数亦随之降低。

2.3.2 接触面积和压力

对辐射松(*Pinus radiata*)等28种木材在金属摩擦过程中接触面积与正压力关系的研究显示^[10],基本趋势是随压力和接触面积的增加,摩擦系数略有升高。但对含水率80%以上的木材,在正压力分别为110、440 N,接触面积为30 mm²的情况下,其平均摩擦系数分别为0.46和0.33^[10]。这种摩擦系数随压力增加而减小的现象,可归结为流体动力效应。

3 木工刀具减摩技术

采用有效的技术改进刀具性能,改善切削时的摩擦状态,降低切削力和切削温度,从而抑制刀具过快磨损,保证产品质量,进一步提高加工效率,已成为各国学者研究的热点。

3.1 新型表面处理技术

该技术主要包括:表面渗层技术、镀层技术和涂层技术等,用以改善刀具材料的表面性能。

1) 渗层技术 可使刀具表面具有高硬度、低摩擦系数、良好耐腐蚀性。常用的渗层材料有:硼、钒、铬、氮等。

2) 镀层技术 使用电镀的方法,将锌、镍、铬、镉等材料沉积析出在刀具表面,用以改善刀具的表面摩擦性能。

3) 表面涂层技术 近年来应用最为广泛,根据涂层基体材料的不同,可分为涂层高速钢和涂层硬质合金,主要使用涂层材料如TiAlN、TiAlCN、C₃N₄(氮化碳)、金刚石及聚四氟乙烯(PTFE)等^[16-18]。

使用TiN、Ti(C, N)、ZrN、(Ti, Zr)N、TiAlN等作为涂层的硬质合金材料,刀具寿命可以提高几倍;使用CrN或Cr₂N作为涂层,可明显改善刀具与木质材料的摩擦阻力;使用NCD(Nanocrystalline

Diamond) 涂层, 也可以减小摩擦系数。刀具磨损的减小量与涂层厚度、木材种类甚至其微观结构有密切联系。此外, 刀具的尺寸及切削角度的几何形状, 对刃磨后涂层的完整性具有较大影响^[17]。

金刚石具有硬度高、耐磨性好、化学惰性好的优点, 金刚石涂层是一种理想的木工刀具抗磨手段, 其耐磨性是硬质合金的 100~250 倍, 并具有耐强酸和强碱的性能, 但韧性很差。需选韧性较好的刀具材料为基体, 涂覆层使刀具既具有一定的强度和韧性, 又具有很好的耐磨性和切削性能, 满足木材切削刀具减摩降磨的特性要求。

但是, 金刚石涂装刀具也存在热稳定性差的缺点, 当切削温度在 700~800 °C 范围内, 涂层硬度降低, 发生薄膜剥离现象^[6]。因此, 进一步改进涂层工艺与设备, 提高金刚石薄膜与基体的结合力, 控制薄膜剥离, 是金刚石涂层技术研究的主要方向。

3.2 优化刀具结构

包括刀具仿生自锐技术、锯齿齿形结构优化以及微织构刀具等^[19-20]。

我国学者早在 1997 年就以河狸牙齿为仿生对象, 选择硬质合金 (YG8) 作为强化电极材料, 通过高速切削试验, 研究强化刀刃在切削过程中的磨损形态, 建立了用电火花强化刀刃的刀具在切削过程中自磨锐效应的切削条件^[19]。同时根据正交设计试验, 考察刀具材料、强化放电电容、被切试材及铣削深度对刀具磨损及自锐性能的影响^[19]; 采用铁谱仪及工具显微镜观察刀具磨损, 并通过石蜡复形, 及时了解切削刃几何形状的变化^[20]。

德国学者以啮齿类动物作为模型, 研究粉碎刀具的自锐性^[21], 分析了啮齿类动物啃切木材的原理, 提出了改进木材切削刀具 (主要是铣刀) 自锐性切削的一般原理, 从而减小切削过程中的摩擦力, 降低刀具磨损。

基于对自然界动物体表现现象的观察, 摩擦学研究领域提出了表面微织构的概念^[22]。表面微织构属于表面功能结构的一种, 为微米级的表面功能结构, 是仿照生物的这些性能, 在物体表面加工出不同尺寸不同形貌的结构。相关研究表明^[23], 参数合理的微织构硬质合金, 表面的浸润性优于平面, 亲水性较强。在不同含水率情况下, 微坑型的微织构形式

均可以有效降低桦木与硬质合金间的摩擦系数, 其作用机理受木材含水率和作用载荷等因素的影响而有所不同。

当桦木的含水率足够高时, 水分在一定压力下会渗透向木材表面, 微织构上的每一个凹坑都相当于一个流体动压润滑轴承, 在摩擦副相互运动过程中, 增强了流体动压力, 促进摩擦副表面形成流体动压润滑膜, 实现减摩耐磨的作用。当木材含水率降低时, 木材中的自由水较少, 微织构上的凹坑能够减少摩擦副表面间的实际接触面积, 同时, 表面微织构具有储存和容纳木屑或木材中石英等硬质点的作用, 减少由于木屑或硬质点存在而导致表面粗糙度增大的问题, 亦可达到降低摩擦系数的目的。

3.3 新型超硬、陶瓷等刀具材料

除通常使用的碳素工具钢、合金工具钢、高速钢、硬质合金钢等刀具材料外, 具有良好摩擦性能的新型刀具材料层出不穷, 如超细硬质合金、立方氮化硼以及陶瓷等材料^[21]。

奥地利学者提出了超细硬质合金的概念, 将合金粒度范围控制在 0.2~0.5 μm , 这种超细硬质合金表现出优良的硬度与韧性, 且表面摩擦性能优异。

陶瓷材料具有极其优异的耐热性、耐磨性、化学稳定性以及高硬度, 已经广泛应用于金属切削加工领域。常见的陶瓷基材料有 Al_2O_3 基陶瓷和 Si_3N_4 基陶瓷等。

近年来开发的亚微米级陶瓷材料, 晶粒粒度低于 μm 级。木工刀具刃口圆弧半径一般也小于 5 μm 。由于微细结构和微纳米效应, 切削时刀具表面的摩擦系数降低约 1/3, 同时也满足了制造木工刀具刃口的要求, 并且增强了刃口强度^[24]。

此外, 陶瓷材料晶粒的细化也降低了陶瓷材料的空隙率, 改善了刀具材料的硬度、抗弯强度及断裂韧性。

聚晶金刚石和立方氮化硼具有极高的硬度和耐磨性, 特别是聚晶金刚石, 其显微硬度可达 10 000 HV, 是刀具材料中最硬的材料。同时, 其摩擦系数小, 热膨胀系数低, 与木材等非金属无亲和力, 切削时切屑易流出, 导热率高, 不易产生积屑瘤, 可以避免热量对刀刃和工件的影响。因此, 刀刃不易钝化, 切削变形小, 可以获得极高质量的加工表面。

4 结语

虽然木材与刀具材料间摩擦现象的研究开始较早,但由于木材为各向异性材料,且构造复杂,有关木材切削摩擦学的研究仍处于初级阶段,尚未形成系统的理论和设计指南。目前的研究大多聚焦于新型刀具材料、刀具结构以及减摩耐磨涂层技术的开发,对木材切削摩擦现象的关注相对较少。

近年来各种新型刀具材料和刀具结构层出不穷,但是均存在制造成本高、刀具涂层在切削时易破损、热稳定性低等问题,故木工刀具材料仍以硬质合金为主。要进一步提升加工效率和延长刀具寿命,只有通过改善刀具/工件表面摩擦状态,降低切削力和切削温度,进而抑制刀具磨损的方法来实现。

如何在刀具工作表面形成优异的工作面,是木工刀具减摩技术一个重要的研究方向。微织构技术在木材切削中的应用^[22],不同刀具基体材料上涂层制备工艺的优化,多组元涂层及多层涂层的设计和制备工艺,纳米尺度涂层技术,涂层内应力的控制,以及涂层减摩抗磨机理方面的研究,将是进一步深入研究方向。

参考文献:

- [1] McKENZIE W M. Friction in wood cutting[J]. Forest Products Journal, 1967, 17(2): 38.
- [2] 曹平祥. 木工刀具抗磨技术进展[J]. 林业科技开发, 1997(6): 10-12.
- [3] Klamecki B E. Friction mechanisms in wood cutting[J]. Wood Science & Technology, 1976, 10(3):209-214.
- [4] Mamoun M M. On the theories of friction of solids[J]. Amer Soc Mechanical Eng, 1975, 75(3):8-10
- [5] Bowden F, Tabor D. The friction and lubrication of solids[M]. London: Oxford University Press, 1950.
- [6] 曹平祥,王毅,周兆斌. 木工刀具磨损机理及抗磨技术[J]. 林产工业, 2003, 30(4): 13-16.

- [7] N Gnan, B Thunell, K Lyth. On the friction between steel and some common Swedish wood species[J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 1983, 41(3): 55-60.
- [8] Mcmillin C W, Lemoine T, Manwiller F G. Friction coefficient of oven-dry Spruce Pine [*Pinus glabra*] on steel, as related to temperature and wood properties[J]. Wood & Fiber, 1970, 4(1): 12-18.
- [9] Murase Y. Effect of surface roughness of steel and wood variables on repeated friction between wood and steel[J]. Japan Wood Res. Soc. 1978, 24(5): 865-872.
- [10] McKENZIE W M, KARPOVICH H. The frictional behaviour of wood[J]. Wood Science and Technology, 1968, 2(2): 139-152.
- [11] McKenzie, W. M. Friction coefficient as a guide to optimum rake angle in wood machining[J]. Wood Science and Technology, 1991, 25(5): 397-401.
- [12] Murase Y. Coefficient of friction and surface temperature in the sliding friction between wood and steel[J]. Japan Wood Res Soc, 1980, 26(3): 571-575.
- [13] Murase Y. Effect of temperature on friction between wood and steel (in Japanese)[J]. Mokuzai Gakkaishi, 1979, 25(2): 264-271.
- [14] Murase Y. Friction properties of wood at high sliding speed[J]. Japan Wood Res. Soc. 1980, 26(1): 61-65.
- [15] Marian J, Stumbo D. Adhesion in wood. Part 1. Holzforschung[J]. 1962, 16(2): 135-146.
- [16] 曾娟,张占宽. 润滑耐磨功能涂料在木工刀具上的应用[J]. 木材加工机械, 2007(2): 48-50.
- [17] Kato C, Kawai Y, Soga K, et al. The wear characteristic of a wood working knife with Chromium[J]. Plant IV Journal of Wood Science, 1991, 37(11): 1004-1010.
- [18] 李黎. 表面涂层木工刀具的研究进展[J]. 木材工业, 2007, 21(4): 1-4.
- [19] 谢迪武. 电火花强化涂层木工刀具自锐性初步研究[D]. 南京: 南京林业大学, 1997: 11-40.
- [20] 马岩. 国外木材切削理论研究的进展[J]. 木材加工机械, 2008(4): 35-39.
- [21] 马岩. 国外木材切削刀具设计理论研究新进展[J]. 林业机械与木工设备, 2007, 35(3):4-8.
- [22] Volchok A, Halperin G, Etsion I. The effect of surface regular micro topography on fretting fatigue life[J]. Wear, 2002, 253(3-4): 509-515.
- [23] 李伟光,张占宽. 表面微织构硬质合金对桦木摩擦特性的影响[J]. 林业工程学报, 2018, 3(1): 103-108.
- [24] 郭晓磊,刘会楠,曹平祥,等. 陶瓷刀具材料与木质复合材料的摩擦特性分析[J]. 东北林业大学学报, 2012, 40(10): 131-133.

(责任编辑 向琴)

“顶立”举办品牌战略暨新品发布会

聚“胶”二十载 顶立品牌战略发布会暨 2018 新品发布会 2018 年 10 月在浙江台州举办。

成立 20 年来,顶立新材料科技有限公司不断沉淀和突破,面对新的市场需求,通过产品设计、工艺设计、品控设计,实现环保、安全、高效生产。本次发布的新品涵盖民用胶、木工胶、热熔胶、纸品类胶等多品类,在生产过程中,通过模拟用户使用场景,提升产品的使用体验。

20 年的发展,顶立现已成为国内最大水性胶生产企业之一,是我国胶黏剂行业的龙头企业之一,在浙江、河南、四川、山东拥有 4 个智能化制造基地,用户遍及全球,年均增长 20%以上。

未来,顶立将通过研发创新,共建生态、智造升级、营销赋能、加强品牌建设等方式,提升企业核心竞争力,做行业“胶胶”者。

劳万里