

基于响应面法的不同锯料角锯齿的木材切削力模型

李伟光, 张占宽

(中国林业科学研究院 木材工业研究所, 北京 100091)

摘要: 木材锯切为闭式切削, 其中侧刃的作用不可忽视。为探寻锯切过程中侧刃对切削力的影响并将其量化, 采用不同锯料角锯齿对樟子松 *Pinus sylvestris* 和水曲柳 *Fraxinus mandshurica* 做单齿切削力试验, 利用响应面分析法中的四因素三水平的 Box-Behnken Design(BBD)试验设计和建模方法, 研究了锯料角、切削厚度、含水率和刀具前角等参数对切削力的影响, 并建立切削力模型。结果发现: 采用响应面法建立的木材切削力多元回归数学模型, 可较为有效地反映切削力与各因素之间的关系 ($R^2=0.92$ 和 $R^2=0.94$); 在闭式切削过程中, 锯齿的锯料角对切削力有一定影响, 且随着锯料角的增加, 切削力缓慢降低; 切削厚度对切削力影响显著, 其次是刀具前角, 木材含水率、锯料角对切削力的影响最小。图 5 表 2 参 12

关键词: 木材科学与技术; 木材锯切; 切削力; 锯料角; 响应面法; 模型

中图分类号: S781.61; TS65 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2018)03-0524-05

Modeling the cutting force in wood sawing with different radial clearance angles based on a response surface methodology

LI Weiguang, ZHANG Zhankuan

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: Wood sawing is a closed cutting process. The side edges are involved in wood sawing and the influence of the radial clearance angle becomes particularly important. To explore the influences of the side edges on the cutting force in the wood sawing and quantify it, this study with *Pinus sylvestris* (pinus) and *Fraxinus mandshurica* (ash) as samples, used the four factors three levels of BBD test Design in the modeling response surface methodology for a cutting force experiment that was carried out with a single sawtooth having different radial clearance angles. The multiple response surface regression model of a cutting force was established by considering the effects of radial clearance angles, cutting thickness, moisture content, and rake angle. Results using the response surface methodology showed that the multiple regression mathematical model of the cutting force had a high accuracy and reliability ($R^2 = 0.92$ and $R^2 = 0.94$). The radial clearance angle had a certain impact on the cutting force in wood closed cutting. Also with an increase in radial clearance angle, the cutting force decreased slowly. Overall for both kinds of wood, cutting thickness had an extremely important impact on cutting force, followed by the rake angle, then wood moisture content, and finally the radial clearance angle. [Ch, 5 fig. 2 tab. 12 ref.]

Key words: wood science and technology; wood sawing; cutting force; radial clearance angle; response surface methodology; model

建立木材切削力模型主要考虑影响切削力的各因素与切削力之间的关系。影响切削力的因素较多^[1],

收稿日期: 2017-04-28; 修回日期: 2017-09-18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31270605)

作者简介: 李伟光, 助理研究员, 博士, 从事木材切削原理与刀具研究。E-mail: liwg@caf.ac.cn。通信作者: 张占宽, 研究员, 博士, 博士生导师, 从事木制品工艺与装备研究。E-mail: zhangzk@caf.ac.cn

EYMA 等^[2]在考虑了力学(木材硬度、断裂韧性、顺剪强度、顺压强度)和物理(木材密度、收缩性)参数影响的基础上,建立了常见的 13 种木材纵向铣削模型,发现切削力与木材密度、顺剪强度、顺压强度、断裂韧性等物理力学性质有良好的相关性。MARCHAL 等^[3]发现刀具材料的选择、刀具寿命、切削表面质量、切屑形成、刀具参数和切削条件等,均与切削力密切相关。CRISTÓVÃO 等^[4]利用 D 最优设计方法建立了 2 种热带难加工木材的切削力模型,着重分析木材含水率、锯切方向、刀具前角以及磨损量等参数的影响。管宁等^[5-6]分别采用拉丁方正交试验设计和 D 最优设计对切削力与切削厚度、刀具角度、刀具材料及刀具磨损等因素之间的关系进行了研究。这些研究建立的切削力模型较好地解释了刀具主刃宽度或刀具前、楔角对切削力的影响,却忽视了侧刃的作用。木材锯切为闭式切削,木材切削时侧刃作用不可忽视;不同锯料角锯齿对切削力的影响有一定差异,因此,需考虑侧刃参数对切削力的影响。响应面优化法是一种对实验条件寻优的建模方法,适宜解决线性或非线性数据处理的相关问题^[7];其中的中心组合设计方法(box-behnken design, BBD)采用多元方程拟合因素和响应值之间的函数关系,是一种基于三水平的一阶或多阶试验设计建模方法,具有试验次数少,结果准确性高等优点^[8-9]。本研究采用响应面分析法,分析锯料角、切削厚度、刀具前角和含水率等因素对切削力的综合影响,建立包括锯料角在内的多元回归切削力数学模型,旨在进一步完善木材锯切理论,指导木工刀具生产。

1 材料与方 法

1.1 工件材料及刀具

1.1.1 材料 木材试样选取水曲柳 *Fraxinus mandshurica*, 初始含水率为 12%, 气干密度为 $0.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$; 樟子松 *Pinus sylvestris*, 初始含水率为 14%, 气干密度为 $0.48 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。取待测木材的径切板制成 $70 \text{ mm} \times 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ (长 \times 宽 \times 高)规格试件,调节含水率;为保证含水率的一致性,将 2 种木材试材进行常温浸泡,当含水率大于 80%以后,将木材分为 3 组 \cdot 种⁻¹,分别干燥,将其调节到 3 个不同等级含水率分别为 $(19\pm 1)\%$, $(12\pm 1)\%$ 和 $(5\pm 1)\%$ 。

1.1.2 刀具材料与参数 刀片采用硬质合金材料,锯片刀头材料牌号为 YG6X。锯齿由蓝帜(南京)工具有限公司加工制造,锯齿结构参数如图 1 所示,锯身基材材料为金属锰,切削刃宽度为 2.6 mm,锯身厚度为 1.8 mm,后角为 15.0° ,切向侧后角 λ' 为 3.0° ,锯料量 S' 为 0.4 mm。

1.2 试验方法

切削实验台由数控加工中心(NC-1325IP,中国台湾恩德科技有限公司)改装。加工工件固定后用锯齿单齿进行切削;测力仪(型号 9257A,瑞士 KISTLER 公司)受力产生电荷,经电荷放大器(型号 5806,瑞士 KISTLER 公司)放大并转为电压信号,由信号分析仪(型号 RA2300,日本 NEC 公司)记录并保存到计算机上进行分析。设定切削速度为 $15.00 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,切削方向为弦切面纵向切削。将锯齿单齿固定在加工中心主轴安装臂的支架上,通过主轴 Z 方向运动,实现不同切削厚度,采样频率为 $1.0 \times 10^4 \text{ Hz}$ 。测量前先标定测力传感器所产生电压信号值和力值之间的关系。图 2A 为使用奇石乐传感器测定切削力电信号变化情况;使用 Origin 9.0 软件对保留的木材切削阶段的波峰值进行多项式拟合,选取 20 个拟合点进行拟合,得到图 2B。设定拟合置信度 $\geq 95\%$,将各拟合点标定结果进行力值与电信号值之间的转换,以平均值作为试验数据。设置 3 次 \cdot 重复⁻¹并取平均值。

使用 Design Expert 软件(版本 8.0.5b,生产商 Stat-Ease, Inc.),采用四因素三水平(表 1)的中心组合设计方法(BBD),以锯料角(λ),切削厚度(h),含水率(C_M),前角(γ)的值为自变量,以切削力(F)为因变量,研究切削力的影响因素并建立切削力模型。在中心点共有 29 次试验,进行 5 次零点重复试验(切削条件为锯料角 1.5° ,切削厚度 0.12 mm ,木材含水率 12%,切削速度 $10.00 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$),用来估算试验误差。

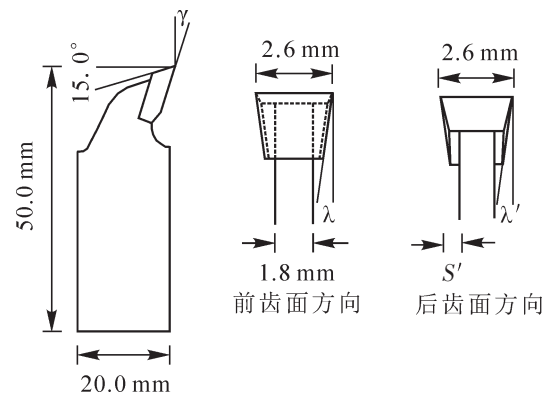


图 1 试验用锯齿结构参数示意图

Figure 1 Sawtooth structure parameters

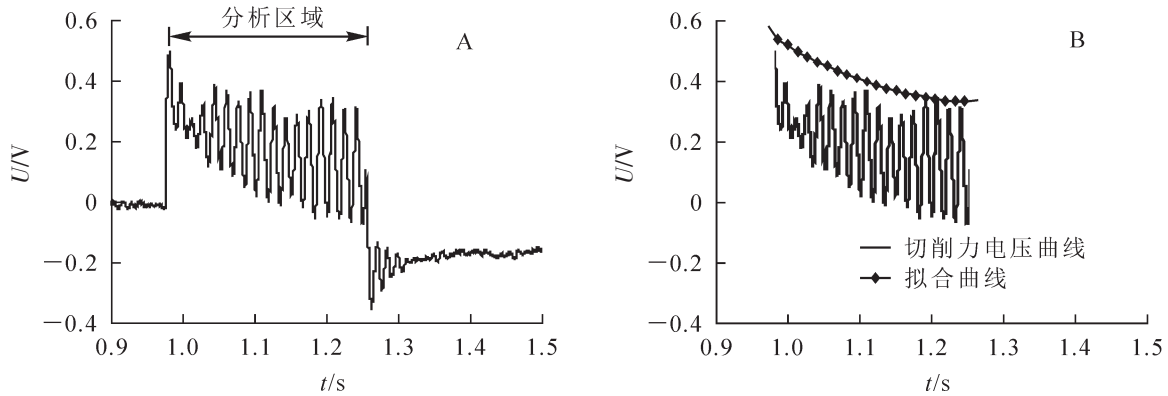


图2 切削力数据处理与分析

Figure 2 Processing and analysis for cutting force signals

表1 响应面试验因素与水平

Table 1 Factors and levels with response surface test

因素水平	试验因素			
	$\lambda/(\circ)$	h/mm	$C_M/\%$	$\gamma/(\circ)$
1	0	0.08	5	10
0	1.5	0.12	12	20
-1	3.0	0.16	19	30

2 结果与分析

2.1 模型的建立与分析

对试验数据进行多项式拟合回归，初步得到切削樟子松和水曲柳时的回归方程：

$$F_{\text{樟子松}} = 22.416\ 88 - 1.100\ 36\lambda + 226.793\ 96h - 0.344\ 69C_M - 0.341\ 95\gamma; \quad (1)$$

$$F_{\text{水曲柳}} = 27.633\ 06 - 1.074\ 28\lambda + 225.272\ 92h - 0.353\ 57C_M - 0.340\ 77\gamma. \quad (2)$$

对回归模型的方差分析可知：2种木材切削时各因素的交互项和二次项均没有显著性差异。由表2可知回归模型P值均小于0.0001，达到极显著水平，说明所得回归方程能够正确反映切削力与锯料角、切削厚度、含水率以及前角之间的关系。响应值的变异系数(V_C)值分别为3.52%和2.92%，均处于较低水平，说明试验操作是可信的。通过对回归方程模型因变量的方差分析可知：模型中的锯料角、切削厚度、含水率以及前角差异均极显著，说明各变量对切削力均有影响。由F值大小可知：各因素对切削力的影响程度为切削厚度>前角>含水率>锯料角。模型(1)和模型(2)的调整确定系数分别为0.92和

表2 回归模型的方差分析

Table 2 Analysis of variance for quadric regression model

树种	变异来源	模型	$\lambda/(\circ)$	h/mm	$C_M/\%$	$\gamma/(\circ)$	残差	失拟项	纯误差	总和	R^2	R^2_{adj}
樟子松	平方和	1 230.43	32.69	987.56	69.86	140.31	40.75	7.06	0.83	1 271.17	0.967 9	0.92
	自由度	4	1	1	1	1	24	10	4	28		
	均方	307.61	32.69	987.56	69.86	140.31	1.7	0.71	0.21			
	F	181.19	19.26	581.69	41.15	82.65		3.4				
	P	**	**	**	**	**		0.124 6				
	$V_C/\%$	3.52										
水曲柳	平方和	1 218.37	31.16	974.36	73.51	139.35	6.23	6.23	2.33	1 254.4	0.971 3	0.94
	自由度	4	1	1	1	1	14	10	4	28		
	均方	304.59	31.16	974.36	73.51	139.35	0.62	0.62	0.58			
	F	202.94	20.76	649.18	48.98	92.84		1.07				
	P	**	**	**	**	**		0.516 9				
	$V_C/\%$	2.92										

说明： R^2 为模型确定系数， R^2_{adj} 为模型调整确定系数；**表示差异极显著($P<0.01$)，*表示差异显著($P<0.05$)

0.94, 说明模型(2)的自变量与响应值之间的线性关系显著; 而失拟项检验 P 值分别是 0.124 6 和 0.516 9, 均大于 0.05, 没有显著性差异, 说明回归方程试验的拟合度较高, 与实际的试验拟合度也比较高, 可以用来计算切削樟子松和水曲柳时切削力的理论预测(图3)。

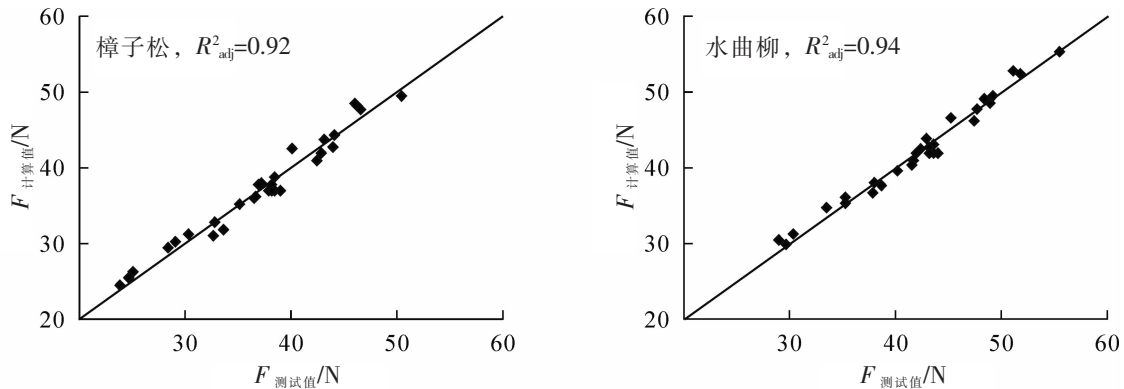


图 3 回归方程的计算值与真实值的关系

Figure 3 Observed and predicted cutting force

2.2 响应面结果分析

利用 Design Expert 软件对回归结果做响应面和等高线, 得到切削 2 种木材时, 锯料角、切削厚度、含水率和刀具前角等因素对切削力影响的结果。刀具前角对木材切削中产生的切削力有显著影响(图 4), 随着刀具前角的增加, 切削力降低。这与 KIVIMAA^[10]和 FRANZ^[11]的研究结果一致。切削水曲柳时前角对切削力的影响要比切削樟子松时大; 随着锯料角的增加, 切削力缓慢降低。原因是随着锯料角增大, 侧刃与木材的接触面积减小, 会在已完成的加工表面形成回弹区, 减小对侧刃和刀具侧面的挤压, 而该挤压作用会产生与运动方向相反的摩擦力; 锯料角增大时, 摩擦力减小, 使得刀具在运动方向上产生的切削力降低。设计刀具角度的主要目的之一是减小切削时产生的切削力从而降低切削能耗。本研究发现: 当刀具前角为 30.0°, 锯料角为 3.0°时, 产生的切削力最小(图 4)。但是, 前角增大会使刀具的强度和断裂韧性降低从而影响刀具寿命, 而锯料角的增大也会影响表面质量。

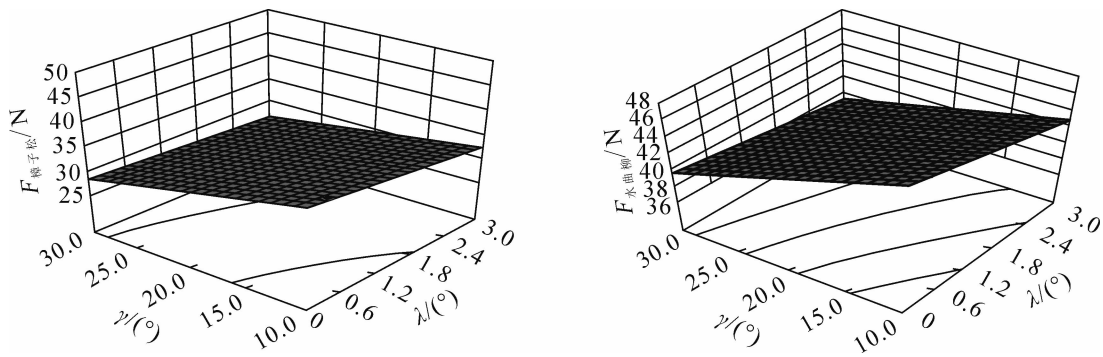


图 4 不同锯料角和前角与切削力的关系

Figure 4 Relationship between cutting force on radial clearance angle and rake angle

对木材含水率和切削厚度与切削力的关系分析(图 5)可知: 木材含水率增加时, 切削力缓慢降低。原因可能是木材含水率增加会降低木材强度; 有研究称^[12], 当木材含水率在纤维饱和度以下时, 含水率每增加 1%, 其抗拉强度降低约 3%, 木材容易被破坏。切削厚度对切削力的影响极为显著, 切削厚度增加, 刀具抵抗切屑变形的阻力越大, 其切削力相应增大。小厚度切削可以减小切削力, 但会增加切削工作量, 影响切削效率。

3 结论

采用响应面法建立的木材切削力多元回归数学模型, 可较为有效地反映切削力与锯料角(λ), 切削

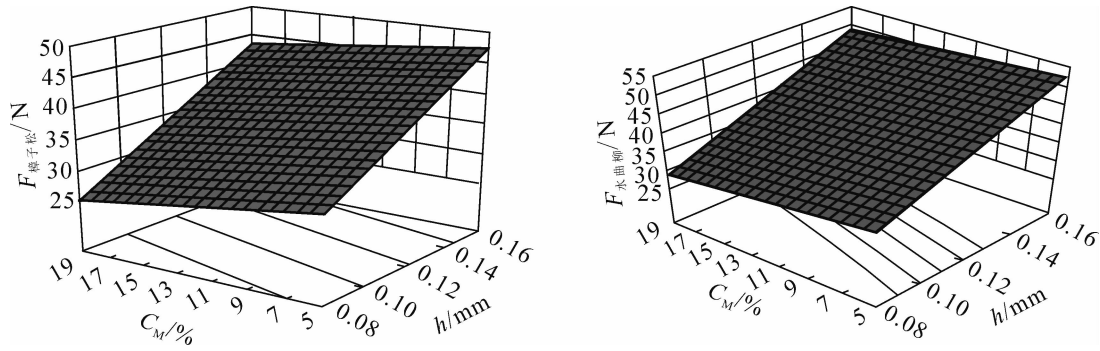


图5 不同含水率和切削厚度与切削力的关系

Figure 5 Relationship between cutting force on moisture content and cutting thickness

厚度(h), 木材含水率(C_M)以及前角(γ)之间的关系, 具有一定的可靠性和准确性。木材锯切为闭式切削, 在闭式切削过程中, 锯齿的锯料角对切削力有一定影响, 且随着锯料角的增加, 产生的切削力缓慢降低。对樟子松和水曲柳2种木材而言, 切削厚度对切削力影响显著, 其次是刀具前角, 木材含水率和锯料角对切削力的影响则较小。

4 参考文献

- [1] 管宁. 不同树种木材切削阻力变动模型[J]. 林业科学, 1994, **30**(5): 451 - 457.
GUAN Ning. Modelling the variation in cutting resistance of various wood species [J]. *Sci Silv Sin*, 1994, **30**(5): 451 - 457.
- [2] EYMA F, MÉAUSOONE P J, MARTIN P. Study of the properties of thirteen tropical wood species to improve the prediction of cutting forces in mode B [J]. *Ann For Sci*, 2004, **61**(1): 55 - 64.
- [3] MARCHAL R, MOTHE F, DENAUD L E, *et al.* Cutting forces in wood machining-basics and applications in industrial processes: a review [J]. *Holzforschung*, 2009, **63**(2): 157 - 167.
- [4] CRISTÓVÃO L, BROMAN O, GRÖNLUND A, *et al.* Main cutting force models for two species of tropical wood [J]. *Wood Mater Sci Eng*, 2012, **7**(3): 143 - 149.
- [5] 管宁. 11种针叶树材的切削厚度、刀具前角和木材含水率对切削阻力影响的研究[J]. 林业科学, 1992, **28**(2): 146 - 152.
GUAN Ning. Studies on the effects of chip thickness, knife rake angle and wood moisture content on the cutting resistance of 11 coniferous woods [J]. *Sci Silv Sin*, 1992, **28**(2): 146 - 152.
- [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.
GUAN Ning. Effects of chip thickness knife rake angle and wood moisture content on the cutting resistance of 15 hardwoods [J]. *Sci Silv Sin*, 1994, **30**(2): 134 - 139.
- [7] KIM M S, KIM J S, YOU Y H, *et al.* Development and optimization of a novel oral controlled delivery system for tamulosin hydrochloride using response surface methodology [J]. *Int J Pharm*, 2007, **341**(1/2): 97 - 104.
- [8] 葛宜元. 试验设计方法与 Design-Expert 软件应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2014.
- [9] 沈慧慧, 王万强, 何薇, 等. Box-Behnken 设计优化甘草浸膏中甘草苷的超声提取[J]. 生物加工过程, 2016, **14**(4): 43 - 47.
SHEN Huihui, WANG Wanqiang, HE Wei, *et al.* Optimization of ultrasonic extraction of liquiritin from licorice extract by Box-Behnken design [J]. *Chin J Bioproc Eng*, 2016, **14**(7): 43 - 47.
- [10] KIVIMAA E. *Cutting force in wood-working* [R]. Helsinki: The State Institute for Technical Research, Finland, Julkaisu 18 Publication, 1950.
- [11] FRANZ N C. *Analysis of the Wood-Cutting Process* [D]. Ann Arbor: University of Michigan, 1958.
- [12] KOLLMAN F F P, COTE W A. *Principles of Wood Science and Technology (I) Solid Wood* [M]. New York: Springer-Verlag, 1968.