

引用格式: 胡晓军, 田泽, 徐云杰, 等. 铣削参数对毛竹切削力及维管束纤维提取质量的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2025, 42(3): 622–630. HU Xiaojun, TIAN Ze, XU Yunjie, *et al.* Effect of milling parameters on cutting force and quality of vascular bundle fiber extraction in bamboo[J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2025, 42(3): 622–630.

铣削参数对毛竹切削力及维管束纤维提取质量的影响

胡晓军, 田泽, 徐云杰, 管珣

(湖州师范学院工学院, 浙江湖州 313000)

摘要: 【目的】探究采用铣削方式提取毛竹 *Phyllostachys edulis* 维管束纤维时切削力及提取质量的最优切削参数, 为高效获取粗细、长度等一致性好的优质天然维管束纤维提供理论参考。【方法】以切削速度 (V_c)、每齿进给量 (f_z)、切削深度 (A_p) 为变量, 使用双刃直槽硬质合金木工雕刻刀, 对竹板开展单向顺铣正交切削试验; 运用极差和方差分析方法, 交互验证切削参数对切削力的影响; 利用多元非线性回归方法对试验数据进行分析, 建立切削力经验公式; 基于瞬态切削几何模型和单因素试验, 探究切削三要素对维管束纤维提取质量的影响。【结果】切削过程中, 刀具对工件产生 X 、 Y 向切削力, Z 向切削力在 0 附近持续波动。切削深度对切削力影响极其显著。平行刀具进给方向主要受切削力作用, 每齿进给量比切削速度对切削力的影响更显著; 垂直刀具进给方向主要受挤压力作用, 切削速度比每齿进给量对切削力的影响更显著。沿刀具进给方向切削力的非线性回归方程决定系数 (R^2) 为 0.956, 可以较准确地预测切削力大小; 垂直刀具进给方向切削力的非线性回归方程决定系数为 0.697, 但其预测值与理论值之间误差为 ± 5 N, 可以反映该方向切削力的总体变化趋势。采用铣削方式获得的平均纤维长度与目标长度误差为 ± 0.1 mm, 在切削参数范围内, 当切削参数为: $V_c=188.5$ m·min⁻¹, $A_p=12$ mm, $f_z=0.2$ mm 时, 得到较大直径和较大纵横比的维管束纤维。【结论】切削深度是影响切削力大小的最主要因素。平行刀具进给方向, 每齿进给量比切削速度对切削力的影响大; 垂直刀具进给方向, 切削速度比每齿进给量对切削力的影响大。切削力非线性回归模型可以较准确计算各方向的切削力和总体变化趋势; 采用的铣削方式可准确控制维管束纤维的目标长度, 采用较高切削速度、较大切削深度和较小每齿进给量有助于获得较大长径比和直径的维管束纤维。图 9 表 5 参 26

关键词: 维管束纤维; 铣削参数; 切削力; 纤维形态

中图分类号: S784 文献标志码: A 文章编号: 2095-0756(2025)03-0622-09

Effect of milling parameters on cutting force and quality of vascular bundle fiber extraction in bamboo

HU Xiaojun, TIAN Ze, XU Yunjie, GUAN Xun

(School of Engineering, Huzhou University, Huzhou 313000, Zhejiang, China)

Abstract: [Objective] This study aims to explore the optimal cutting parameters for cutting force and extraction quality when extracting bamboo (*Phyllostachys edulis*) vascular bundle fibers by milling, and provide theoretical reference for efficient acquisition of high-quality natural vascular bundle fibers with uniform thickness and good consistency in length and size. [Method] Cutting speed (V_c), feed per tooth (f_z), and cutting depth (A_p) were taken as variables, unidirectional milling and orthogonal cutting experiments were conducted on bamboo boards using a double-edged straight groove hard alloy woodworking carving knife. The influence of cutting parameters on cutting force was verified by range analysis and variance analysis. The experimental data were analyzed by multivariate nonlinear regression method to establish an empirical formula

收稿日期: 2024-09-11; 修回日期: 2024-12-13

基金项目: 浙江省基础公益研究计划项目 (LGN21C160008); 湖州市公益性技术应用研究项目 (2020GZ15)

作者简介: 胡晓军 (ORCID: 0009-0002-5132-8199), 从事数控加工工艺、竹材加工、竹纤维制备及应用研究。

E-mail: 02431@zjhu.edu.cn. 通信作者: 徐云杰 (ORCID: 0000-0001-6514-7773), 教授, 博士, 从事机电一体化工程研究。E-mail: 02455@zjhu.edu.cn

for cutting force. Based on transient cutting geometric model and single-factor experiments, the effects of cutting speed, cutting depth, and feed per tooth on the quality of vascular bundle fiber extraction were investigated. [Result] During the cutting process, only X - Y -directional cutting forces were generated on the workpiece, while the Z -directional cutting force continuously fluctuated near zero value. Cutting depth had an extremely significant impact on cutting force. Within the X - Y plane, cutting force mainly acted along parallel the feed direction of the tool, and feed per tooth had a more significant influence on cutting force than cutting speed. The vertical tool feed direction was mainly affected by extrusion force, and cutting speed had a more significant effect on cutting force than feed per tooth. The coefficient of determination (R^2) of nonlinear regression equation for cutting force along the tool feed direction was 0.956, which could accurately predict the magnitude of cutting force. The determination coefficient of the nonlinear regression equation for cutting force in the vertical tool feed direction was 0.697, but the error between its predicted and theoretical value was within ± 5 N, reflecting the overall trend of cutting force in this direction. The error between the average fiber length obtained by milling and the target length was within ± 0.1 mm. Within the range of cutting parameters, when cutting parameters were $V_c=188.5$ m $\cdot$ min $^{-1}$, $A_p=12$ mm, and $f_z=0.2$ mm, vascular bundle fibers with larger diameters and higher aspect ratio were obtained. [Conclusion] Cutting depth is the most important factor affecting the magnitude of cutting force. In the parallel tool feed direction, feed per tooth has a greater impact on cutting force than cutting speed. In the vertical tool feed direction, cutting speed has a greater impact on cutting force than feed per tooth. The nonlinear regression model of cutting force can accurately calculate cutting force in various directions and the overall trend of change. The milling method can accurately control the target length of vascular bundle fibers. Higher cutting speed, greater cutting depth, and smaller feed per tooth can help obtain vascular bundle fibers with larger aspect ratio and diameters. [Ch, 9 fig. 5 tab. 26 ref.]

Key words: vascular bundle fibers; milling parameters; cutting force; fiber morphology

竹材和竹制品的环保特性已成为竹产业的标志属性。毛竹 *Phyllostachys edulis* 的微观结构是由维管束纤维与基体组成的两相复合材料，维管束纤维是影响毛竹宏观力学性能的关键。现有竹纤维分离方法可分为高温蒸煮和机械冲击摩擦 2 类，如蒸汽爆破、碾压捶打、机械梳解、化学分离等^[1-8]。以上分离方法关注的焦点均在于所得纤维产品的性能优劣，而忽视了维管束与薄壁组织的分离效果评价。在分离过程中，常存在纤维热损伤、比强度降低、生产效率低、纤维尺寸一致性差等问题。

数控加工中心可通过数控程序精确控制刀具路径和切削方向，并通过合理设置刀具路径和铣削条件精确控制纤维形状。杨永福等^[9]分析了不同刀具前角、切削速度以及进给量等切削参数对竹片平面直角自由切削过程中切削力的影响；郭莹洁等^[10-11]研究了铣削加工参数的改变对竹片表面质量及超前劈裂的影响。OGAWA 等^[12-13]通过设定合适的加工中心切削参数，切削提取得到了长度均匀、无热损伤的竹纤维。上述研究主要围绕竹制品的切削特性和切削提取原竹纤维的加工条件展开，并未深入探讨天然竹维管束纤维制取过程中切削力及切削特性等变化。

为揭示天然毛竹维管束纤维提取过程中铣削参数对切削力及维管束纤维形态的影响，本研究以切削加工三要素为变量，使用双刃直槽硬质合金木工雕刻刀对竹板开展单向顺铣正交切削试验，运用极差、方差分析方法，验证分析铣削参数对切削力的影响，并建立切削力经验公式；基于瞬态切削几何模型和单因素试验，探究切削速度 (V_c)、切削深度 (A_p) 和每齿进给量 (f_z) 对维管束纤维提取质量的影响，以期合理选取切削参数，高效获取优质竹纤维提供理论以及技术指导。

1 试验条件及方法

1.1 试验条件

选取浙江湖州 5 年生毛竹，并截取直径约 110 mm，竹壁厚度约 10 mm 的竹段作为试材。去除竹节

后放入烘箱中,在 70~80 ℃ 下烘烤 8 h。然后,用破竹器将每段试材分成 8 根竹条,并去除 0.8 mm 厚度的竹青表皮,最后对竹条进行切割,得到高度分别为 36、40 和 44 mm 的竹板毛坯。加工机床采用宁波其锐达机械有限公司生产的 KMD-80120 型三轴高速雕铣机,主轴最高转速达到 $12\,000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$;试验刀具为直径 10 mm 的双刃直槽硬质合金木工雕刻刀。在试验过程中,刀刃径向跳动调整在 $6\text{ }\mu\text{m}$ 以下。切削力测量系统为宁波灵元测控工程有限公司生产的压电晶体测力仪。

1.2 试验方法

对于纤维增强复合材料,具有大长径比的纤维是理想的^[14-17],因此本研究以纤维长度、纤维直径和纵横比评判维管束纤维质量。设计正交切削试验并获取各参数下的切削力数据,再基于切削力数据分析切削参数对切削力及维管束纤维质量的影响规律。

参考以往研究^[18-20],本研究将竹壁沿径向划分为图 1 所示的内、中、外 3 层,其中外部维管束纤维呈半开放型,纤维长轴平均长度为 0.39 mm,短轴平均长度为 0.23 mm。经测量,竹壁外部维管束纤维在水平方向的平均间隙为 0.2~0.4 mm。切削过程中,为得到尽可能完整的维管束纤维,切削步进距 (A_0) 设置为 0.4 mm。在以上加工参数的基础上,

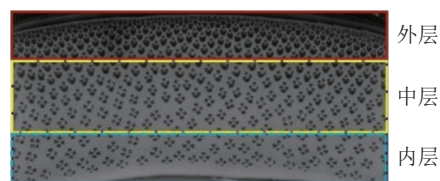


图 1 竹壁分层示意图

Figure 1 Schematic diagram of bamboo wall layering

将切削速度、每齿进给量及切削深度分别定义为因素 A、B、C,制定正交试验方案(表 1)。试验采用刀刃平行于维管束纤维,沿 X 轴单向顺铣,干式切削方式进行,对每个试件连续切削 3 个步距,每组参数重复切削 5 个试件。通过以上正交试验,可得到 135 组切削力数据。

表 1 正交试验及切削力

Table 1 Forces of orthogonal experimental cutting

序号	切削速度(A)/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	每齿进给量(B)/ mm	切削深度(C)/ mm	切削力/N		序号	切削速度(A)/ ($\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$)	每齿进给量(B)/ mm	切削深度(C)/ mm	切削力/N	
				F_x	F_y					F_x	F_y
1	62.8	0.2	4	23.70	-8.89	6	125.7	0.4	4	34.78	-10.86
2	62.8	0.3	12	81.04	-25.87	7	188.5	0.2	8	37.22	-24.62
3	62.8	0.4	8	69.56	-23.88	8	188.5	0.3	4	27.01	-15.82
4	125.7	0.2	12	55.84	-19.59	9	188.5	0.4	12	85.16	-42.63
5	125.7	0.3	8	51.97	-16.12						

在切削速度为 $62.8\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,每齿进给量为 0.2 mm,切削深度为 4 mm,切削步进距为 0.4 mm 条件下,对高度为 36 mm 的竹块毛坯进行切削试验,每个切削刀的部分切削分力 (F_x 、 F_y 、 F_z) 的动态分布曲线如图 2 所示。切削力呈周期性变化。由于竹壁维管束纤维呈错列排布,铣削过程中维管束纤维的切削厚度不尽相同,因此加工过程中切削力的最大值变化显著。1 个切削周期内, F_x 先增后减,且为正值,表明在切削过程中,切削刀始终沿进给方向对竹板产生拉力,且随着切削厚度增至最大,切削力也增至最大; F_y 向切削刀始终对竹板产生挤压作用,且顺铣时切削刀切出工件侧面过程中,切削厚度逐渐减小为 0,故 F_y 始终为负值。此外,不同于螺旋铣刀,双刃直槽硬质合金木工雕刻刀在切削过程中对材板无 Z 轴方向作用力,但机床系统振动会导致 Z 轴方向作用力产生如图 2C 所示的微小波动^[21],因此本研究忽略 Z 轴方向作用力的影响^[22-23]。为保证试验数据的一致性,均在切削力曲线中选取重复频率较高、数值较大的切削力数值进行记录。每组试验参数记录 15 组切削力数据,并计算其平均值作为该组正交试验参数的切削力,正交试验方案及切削力如表 1 所示。

图 3 为维管束纤维切削瞬态几何模型^[24]。定义纤维纵横比为 $\alpha=L/a_{\max}$,用以标定维管束纤维的长度和窄度,其中 L 为切割弧长, $a_{\max}$ 为最大纤维切削厚度。 $a_{\max}$ 与 L 可根据下式得到:

$$a_{\max}=f_z\sin\varphi_0; \quad (1)$$

$$L=2\pi R\varphi_0/360。 \quad (2)$$

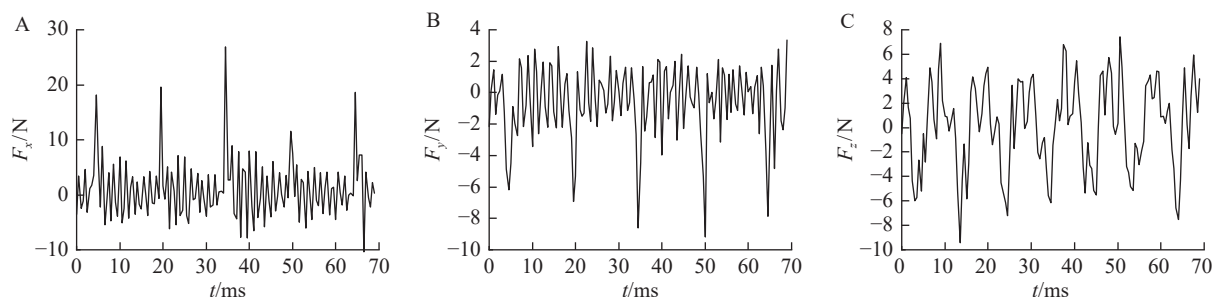


图 2 切削力动态分布

Figure 2 Dynamic distribution of cutting force

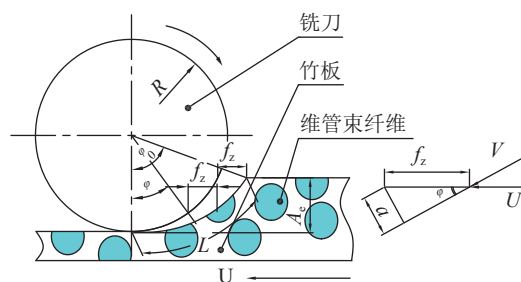
式 (1)~(2) 中: f_z 为每齿进给量, φ_0 为最大接触角, R 为刀具半径。定义维管束纤维理论直径为 $D_e = (L + a_{\max})/2$ 。从每组试验中随机选取的 100 根维管束纤维, 使用游标卡尺分别测量纤维厚度、切割弧长和纤维长度 (L_0), 并分别以各自平均值作为对应参数的最终数据。

2 结果与讨论

2.1 切削速度对切削力及竹纤维质量的影响

在每齿进给量为 0.4 mm, 切削深度为 12 mm, 切削步进距为 0.4 mm 条件下, 切削速度与切削力平均值的关系如图 4 所示。切削过程中, F_x 为正值, 为主要切削力。 F_y 为负值, 切削刃对工件产生挤压作用。随着切削速度的增加, 刀具单次切削竹维管束的体积减小, 单次切削功率也随之减小, 因此 F_x 随切削速度的增加而减小; F_y 在 -40 N 附近轻微波动。由此可见: 切削速度的变化对 F_y 方向的切削力影响不大, 其轻微波动主要由切削系统共振造成。

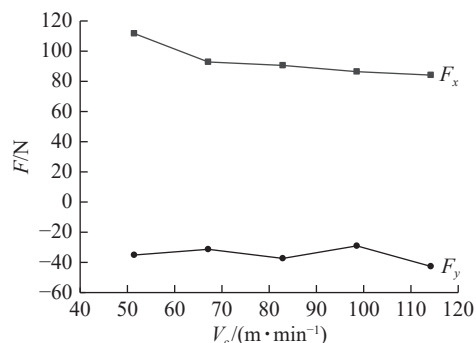
在每齿进给量为 0.4 mm, 切削深度为 12 mm, 切削步进距为 0.4 mm 条件下, 切削速度对维管束纤维形态的影响如图 5 所示。随着切削速度的增加, 维管束纤维直径 (D_0) 先减小后增大, 且数值只有维管束纤维理论直径的 0.5~0.7 倍 (图 5A)。这是因为理论切割弧长大于维管束纤维直径, 即使维管束纤维被完整切割也无法达到理论值。各参数铣削获得的维管束纤维长度比较稳定, 且与理论值的误差极小 (图 5B)。维管束纤维纵横比随着切削速度的增大而增大, 且当切削速度大于 $125.7 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, 纤维纵



f_z : 每齿进给量; φ : 瞬时接触角; φ_0 : 最大接触角; R : 刀具半径; a : 瞬时纤维厚度; A_c : 切削步距; V : 瞬时切削速度; U : 进给速度; L : 切割弧长。

图 3 维管束纤维切削瞬态几何关系

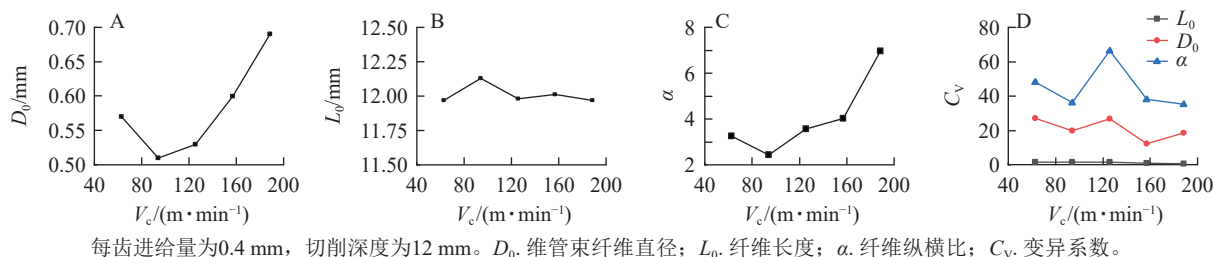
Figure 3 Transient geometry of vascular bundle fiber cutting



每齿进给量为 0.4 mm, 切削深度为 12 mm。

图 4 切削速度对切削力影响

Figure 4 Influence of cutting speed on cutting force



每齿进给量为 0.4 mm, 切削深度为 12 mm。 D_0 : 维管束纤维直径; L_0 : 纤维长度; α : 纤维纵横比; C_v : 变异系数。

图 5 切削速度对竹纤维形态的影响

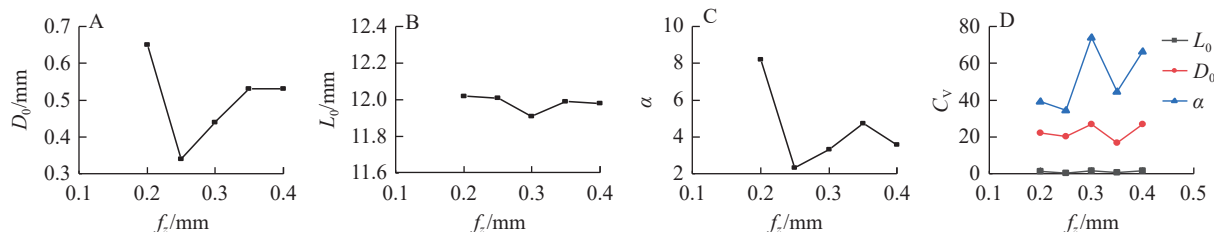
Figure 5 Effect of cutting speed on the shape of bamboo fiber

横比有较明显的提高(图5C)。由纤维直径、纤维长度及纤维纵横比的变异系数(C_V)可知(图5D):随着切削速度的变化,纤维长度并未产生明显的变化,纤维直径和纤维纵横比均在切削速度为 $160.0\sim 188.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ 时出现最小值且变化幅度较小。综上,提高切削速度有助于获得尺寸稳定且有较大纵横比和直径的维管束纤维。

2.2 每齿进给量对切削力及竹纤维质量的影响

在切削速度为 $125.7\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,切削深度为 12 mm ,切削步进距为 0.4 mm 条件下,每齿进给量与切削力平均值的关系如图6所示。随着每齿进给量增加,单位时间内切下切屑的体积增大,切削功率也随之增大,因此随着每齿进给量的增加, F_x 呈近似线性增大, F_y 呈近似线性减小。

在切削速度为 $125.7\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,切削深度为 12 mm ,切削步进距为 0.4 mm 条件下,每齿进给量对维管束纤维形态的影响如图7所示。不同每齿进给量下获得维管束纤维直径先减小后增大,且当每齿进给量为 0.2 mm 时出现最大值(图7A);各参数铣削获得的维管束纤维长度比较稳定,且与理论值接近(图7B);纤维纵横比随着每齿进给量增加,呈先下降后上升再下降的趋势,且当每齿进给量为 0.2 mm 时出现最大值(图7C);纤维长度、纤维直径和纤维纵横比随每齿进给量变化而产生明显的变化,但均在每齿进给量为 0.2 mm 时获得最优维管束纤维(图7D)。综上,减小每齿进给量有利于获得较高质量的维管束纤维。



切削速度为 $125.7\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,切削深度为 12 mm 。 D_0 :维管束纤维直径; L_0 :纤维长度; α :纤维纵横比; C_V :变异系数。

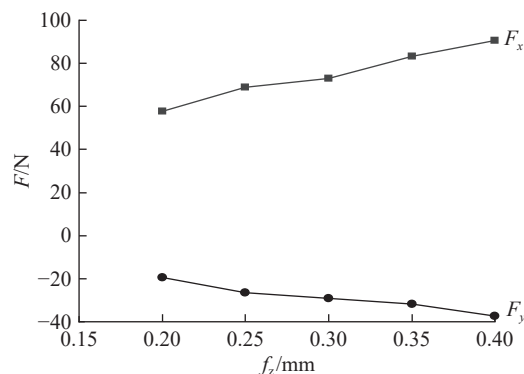
图7 每齿进给量对竹纤维形态的影响

Figure 7 Effect of feed rate per tooth on bamboo fiber morphology

2.3 切削深度对切削力及竹纤维质量的影响

在切削速度为 $188.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,每齿进给量为 0.3 mm ,切削步进距为 0.4 mm 条件下,切削深度与切削力平均值的关系如图8所示。随着切削深度增加,单位时间内切下切屑的体积增大,切削功率也随之增大,因此 F_x 随切削深度的增加而增大,而 F_y 随切削深度的增加而减小。

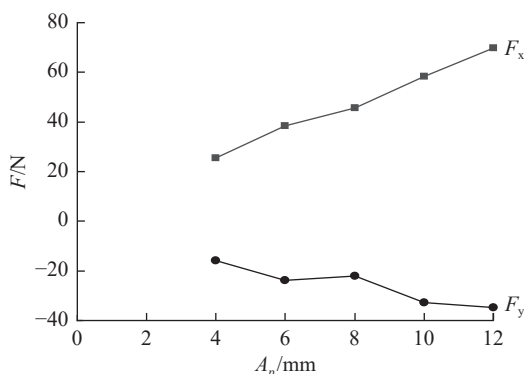
在切削速度为 $188.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,每齿进给量为 0.3 mm ,切削步进距为 0.4 mm 条件下,切削深度对维管束纤维形态的影响如图9所示。不同切削深度下获得维管束纤维直径变化不大,且为理论值的一半左右(图9A);维管束纤维长度随切削深度增加而增加,且曲线斜率为1,表明纤维长度与理论值保持一致(图9B);纤维纵横比随着切削深度增加,呈先下降后上升的趋势(图9C);图9D为切削深度对纤维形态变异系数的影响,其中纤维长度和纤维直径的变异系数基本保持恒定,纤维纵横比的变异系数先降低后升高且在切削深度大于 10 mm 后基本保持恒定。综上,增加切削深度有利于获得较高质量的维管束纤维。



切削速度为 $125.7\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,切削深度为 12 mm 。

图6 每齿进给量对切削力的影响

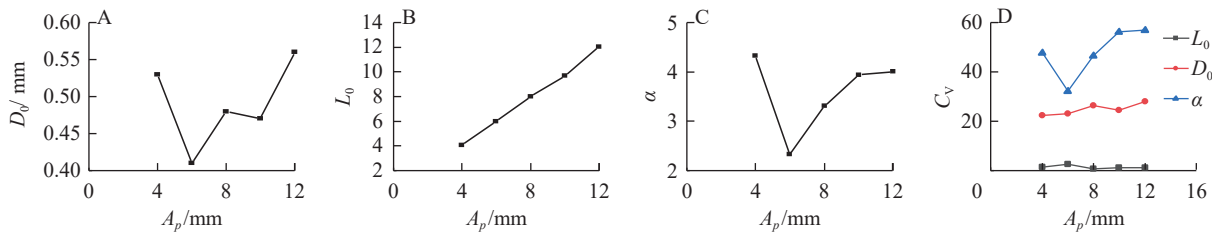
Figure 6 Influence of feed rate per tooth on cutting force



切削速度为 $188.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$,每齿进给量为 0.3 mm 。

图8 切削深度对切削力的影响

Figure 8 Influence of cutting depth on cutting force



切削速度为 $188.5\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ ，每齿进给量为 0.3 mm 。 D_0 ：维管束纤维直径； L_0 ：纤维长度； α ：纤维纵横比； C_v ：变异系数。

图 9 切削深度对竹纤维形态的影响

Figure 9 Effect of cutting depth on the shape of bamboo fiber

2.4 分析总结

对切削力正交试验结果进行极差分析，结果如表 2 所示。由表 2 可知：切削深度 (C) 对 F_x 和 F_y 的影响最大，切削速度 (A) 和每齿进给量 (B) 分别对 F_x 和 F_y 的影响最小。因此，可以得到对 F_x 和 F_y 影响最小的最优加工参数方案为 $A_2B_1C_1$ 。

表 2 切削力正交试验极差

Table 2 Range of cutting force orthogonal experiment									
切削力	参数	切削参数			切削力	参数	切削参数		
		切削速度(A)/ (m·min ⁻¹)	每齿进给量(B)/ mm	切削深度(C)/ mm			切削速度(A)/ (m·min ⁻¹)	每齿进给量(B)/ mm	切削深度(C)/ mm
F_x	K_1	174.301	116.764	85.497	F_y	K_1	-58.638	-53.102	-35.573
	K_2	142.582	160.022	158.749		K_2	-46.577	-57.819	-64.624
	K_3	149.399	189.497	222.037		K_3	-83.078	-77.373	-88.096
	k_1	58.100	38.921	28.499		k_1	-19.546	-17.701	-11.858
	k_2	47.527	53.341	52.916		k_2	-15.526	-19.273	-21.541
	k_3	49.800	63.166	74.012		k_3	-27.693	-25.791	-29.365
	R	10.573	24.244	45.514		R	12.167	8.090	17.507
主次因素		$A_p > f_z > V_c$			主次因素		$A_p > V_c > f_z$		
最优方案		$A_2B_1C_1$			最优方案		$A_2B_1C_1$		

说明： K_i ：满足要求的单元格求和； k_i ： K_i 的算术平均值； R ：极差。

对切削力数据进行方差分析，结果如表 3 所示。在单向顺铣过程中，切削深度对 F_x 影响极显著 ($P<0.01$)，对 F_y 影响显著 ($P<0.05$)。每齿进给量对 F_x 影响显著 ($P<0.05$)，对 F_y 影响不显著。切削速度对 F_x 和 F_y 切削力影响均不显著。因此，单向顺铣过程中，切削深度是影响切削力的最主要因素，每齿进给量对切削力的影响大于切削速度。方差分析结果与极差分析结果一致，表明正交试验设计的有效性。

表 3 切削力方差分析

Table 3 Variance analysis of cutting force											
方差来源		离差平方和	均方	F	显著性	方差来源		离差平方和	均方	F	显著性
F_x	V_c	245.647	122.823	14.032	0.067	F_y	V_c	230.558	115.279	18.291	0.052
	f_z	860.307	430.153	49.144	0.020*		f_z	110.412	55.206	8.760	0.102
	A_p	3 125.755	1 562.877	178.556	0.006**		A_p	461.497	230.748	36.613	0.027*
	误差	17.506	8.753				误差	12.605	6.302		

说明：*：差异显著($P<0.05$)，**：差异极显著($P<0.01$)。

对不同切削状态下的切削数据进行多元非线性回归分析^[25-26]。 F_x 非线性回归方程决定系数 (R^2) 为 0.956，说明对应模型能解释 95.6% 的变异，模型拟合效果很好。 F_y 非线性回归方程 R^2 为 0.697，说明对应模型仅能解释 69.7% 的变异。

$$F_x = 37.818\,3A_p^{0.865}f_z^{0.688}V_c^{-0.135},\,R^2 = 0.956;$$

(3)

$$F_y = 1.832\,4A_p^{0.842}f_z^{0.65}V_c^{0.312}, R^2 = 0.697。$$
 (4)

式 (3)~(4) 中： F_x 和 F_y 为切削分力； A_p 为切削深度； f_z 为每齿进给量； V_c 为切削速度； R^2 为决定系数。正交试验与回归方程预测的对比结果如表 4 所示。 F_x 的预测值与试验值的误差为±6% 左右，说明回归方程具有较高的可靠性。 F_y 的预测值与试验值的偏差较大，是因为切削刃对竹板反复产生挤压作用，导致切削系统振动。但对比 F_y 的试验值与预测值可知，预测值与理论值之间的差值在±5 N 以内，且 F_y 的切削力数值相对较小，因此 F_y 的回归模型能够一定程度上反映其实际切削状态。

表 4 正交试验参数回归方程预测值检验

Table 4 Test of predicted value of regression equation of orthogonal experimental parameters

序号	F_x/N			F_y/N			序号	F_x/N			F_y/N		
	试验值	预测值	误差/%	试验值	预测值	误差/%		试验值	预测值	误差/%	试验值	预测值	误差/%
1	24.31	23.70	-2.57	-8.89	-7.53	-18.06	6	33.16	34.78	4.66	-10.86	-14.66	25.92
2	77.81	81.04	3.99	-25.87	-24.71	-4.69	7	37.25	37.22	-0.08	-24.62	-19.01	-29.51
3	73.81	69.56	-6.11	-23.88	-21.17	-12.80	8	25.41	27.01	5.92	-15.82	-13.80	-14.64
4	57.63	55.84	-3.21	-19.59	-23.57	16.89	9	84.00	85.16	1.36	-42.63	-41.97	-1.57
5	49.00	51.97	5.71	-16.12	-21.80	26.06							

为进一步验证回归模型的可靠性，设计各切削要素条件下的非正交试验，试验结果如表 5 所示。回归方程对各参数的切削力预测与上述非正交试验结果基本一致，说明回归方程具有较高的可靠性。

表 5 非正交试验参数回归方程预测值检验

Table 5 Test of predicted values of regression equations of non-orthogonal experimental parameters

序号	切削速度/(m·min ⁻¹)	每齿进给量/mm	切削深度/mm	F_x/N			F_y/N		
				试验值	预测值	误差/%	试验值	预测值	误差/%
1	62.8	0.3	4	31.33	32.72	4.25	-9.80	-13.73	28.62
2	62.8	0.4	12	98.78	104.34	5.33	-29.79	-35.13	15.20
3	125.7	0.2	4	21.59	22.24	2.92	-9.35	-8.35	-11.98
4	125.7	0.2	8	39.32	39.29	-0.08	-16.75	-14.65	-14.33
5	125.7	0.3	12	73.80	73.09	-0.97	-30.67	-29.17	-5.14
6	125.7	0.4	8	63.34	62.86	-0.76	-26.29	-20.00	-31.45
7	125.7	0.4	12	89.95	90.53	0.64	-36.98	-37.37	1.04
8	188.5	0.2	12	52.86	56.42	6.31	-26.75	-37.78	29.20
9	188.5	0.3	8	49.20	46.38	-6.08	-24.74	-22.04	-12.25

3 结论

切削深度对维管束纤维切削力的影响最大，平行于刀具进给方向受力主要为切削力，每齿进给量相对于切削速度对切削力的影响更明显，垂直于刀具进给方向主要受挤压力作用，切削速度比每齿进给量对切削力的影响大。对不同切削状态下的切削数据进行多元非线性回归分析，得到切削力非线性回归模型。试验值与模型预测值的对比结果显示：该模型可以较为准确地计算各方向的切削力。

采用铣削方法可提取长度一致性好的维管束纤维，且可通过控制铣刀的切削深度，得到不同长度的维管束纤维。采用较高切削速度、较大切削深度和较小每齿进给量有助于获得较大长径比和直径的维管束纤维。

4 参考文献

[1] 闫实, 杨正勇, 周晓剑, 等. 竹龄和竹秆纵向部位对籐竹材性及纤维性能的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(4): 861-869.

- YAN Shi, YANG Zhengyong, ZHOU Xiaojian, *et al.* Effects of bamboo age and longitudinal position on wood and fiber properties of *Bambusa blumeana* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2024, **41**(4): 861–869.
- [2] 李文婷, 李明鹏, 程海涛, 等. 环保高效制备竹纤维研究进展[J]. 林业科学, 2022, **58**(11): 160–173.
- LI Wenting, LI Mingpeng, CHENG Haitao, *et al.* Development of environmentally friendly and efficient bamboo fiber processing [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2022, **58**(11): 160–173.
- [3] 牛思杰, 王娜, 崔百祥, 等. 不同竹龄和部位对毛竹纤维形态及结晶度的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2023, **40**(2): 446–452.
- NIU Sijie, WANG Na, CUI Baixiang, *et al.* Effects of different ages and positions on fiber morphology and crystallinity of *Phyllostachys edulis* [J]. *Journal of Zhejiang A&F University*, 2023, **40**(2): 446–452.
- [4] 李卫林, 林维晟, 杨雯, 等. 碱煮氧化工艺制备竹纤维及结构性能表征[J]. 林产工业, 2021, **58**(1): 6–10.
- LI Weilin, LIN Weisheng, YANG Wen, *et al.* Preparation and structure characterization of bamboo fiber by alkali-boiling and NaClO oxidation [J]. *China Forest Products Industry*, 2021, **58**(1): 6–10.
- [5] 王春红, 陈祯, 李园平, 等. 竹原纤维的分级提取及其性能[J]. 纺织学报, 2017, **38**(11): 9–15.
- WANG Chunhong, CHEN Zhen, LI Yuanping, *et al.* Classified extraction and properties of bamboo fiber [J]. *Journal of Textile Research*, 2017, **38**(11): 9–15.
- [6] 黄慧, 王玉, 孙丰文, 等. 分丝方法对竹纤维提取及机械性能的影响[J]. 林业工程学报, 2016, **1**(6): 23–28.
- HUANG Hui, WANG Yu, SUN Fengwen, *et al.* Effect of splitting method on bamboo fiber extraction and its mechanical properties [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, **1**(6): 23–28.
- [7] 束必清, 任琴, 何倩, 等. 基于蒸爆法的无胶混杂型纤维板构成[J]. 扬州大学学报 (自然科学版), 2020, **23**(1): 54–58, 67.
- SHU Biqing, REN Qin, HE Qian, *et al.* Study on the formation cause of binderless hybrid fiberboard based on steam explosion method [J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2020, **23**(1): 54–58, 67.
- [8] LUO Hai, YUE Lei, WANG Naiwen, *et al.* Manufacture of binderless fiberboard made from bamboo processing residues by steam explosion pretreatment [J]. *Wood Research*, 2014, **59**(5): 861–870.
- [9] 杨永福, 习宝田, 李黎. 切削参数对竹材切削力影响的研究[J]. 木材加工机械, 2005(3): 13–15.
- YANG Yongfu, XI Baotian, LI Li. Study on the effects of cutting parameters for bamboo on cutting forces [J]. *Wood Processing Machinery*, 2005(3): 13–15.
- [10] 郭莹洁, 杨永福. 铣削参数对毛竹表面粗糙度影响的研究[J]. 林产工业, 2009, **36**(4): 21–23.
- GUO Yingjie, YANG Yongfu. Study on the effects of milling parameters for moso bamboo on its surface roughness [J]. *China Forest Products Industry*, 2009, **36**(4): 21–23.
- [11] 郭莹洁, 杨永福, 白雪. 铣削参数对毛竹超前劈裂的影响[J]. 北京林业大学学报, 2009, **31**(增刊 1): 193–196.
- GUO Yingjie, YANG Yongfu, BAI Xue. Effects of milling parameters for moso bamboo on its advance splitting [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, **31**(suppl 1): 193–196.
- [12] OGAWA K, HIROGAKI T, AOYAMA E, *et al.* Fabrication of binder-free green composite using bamboo fibers extracted with a machining center [J]. *Key Engineering Materials*, 2010, **447/448**: 760–764.
- [13] OGAWA K, HIROGAKI T, AOYAMA E, *et al.* Bamboo fiber extraction method using a machining center [J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 2008, **2**(4): 550–559.
- [14] 薛昊, 徐灿, 白天, 等. 竹纤维-环氧树脂复合材料的树脂传递模塑成型制备工艺及界面改性[J]. 东北林业大学学报, 2020, **48**(12): 106–111, 123.
- XUE Hao, XU Can, BAI Tian, *et al.* Preparation and interfacial modification of bamboo fiber/epoxy resin composites via RTM process [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2020, **48**(12): 106–111, 123.
- [15] 赵鹤, 苗庆显, 黄六莲, 等. 竹原长纤维制备及其增强聚丙烯复合材料研究[J]. 林业工程学报, 2021, **6**(5): 96–103.
- ZHAO He, MIAO Qingxian, HUANG Liulian, *et al.* Preparation of long bamboo fiber and its reinforced polypropylene membrane composites [J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2021, **6**(5): 96–103.
- [16] 韩雨潼, 王旷, 卜香婷, 等. 长竹纤维束定向增强聚丙烯复合材料[J]. 包装工程, 2022, **43**(13): 17–23.
- HAN Yutong, WANG Kuang, BU Xiangting, *et al.* Long bamboo fiber bundle directional reinforced polypropylene composite [J]. *Packaging Engineering*, 2022, **43**(13): 17–23.
- [17] 詹绍彬, 毛钱鑫, 童文瑄, 等. 竹纤维长径比及含量对环氧树脂基复合材料性能的影响[J]. 塑料工业, 2023, **51**(12):

82–87.

ZHAN Shaobin, MAO Qianxin, TONG Wenxuan, *et al.* Effect of length-diameter ratios and contents of bamboo ribber on properties of epoxy resin based composites[J]. *China Plastics Industry*, 2019, **51**(12): 82–87.

- [18] 陈海鸟, 田伟, 金肖克, 等. 基于三维显微成像的毛竹横截面结构表征[J]. 纺织学报, 2021, **42**(12): 49–54.

CHEN Hainiao, TIAN Wei, JIN Xiaoke, *et al.* Analysis on cross-sectional structure of moso bamboo using three-dimensional microscope imaging[J]. *Journal of Textiles Research*, 2021, **42**(12): 49–54.

- [19] 袁晶, 张雪霞, 余雁, 等. 维管束分布及结构对竹材宏观压缩性能的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2019, **39**(6): 121–127.

YUAN Jing, ZHANG Xuexia, YU Yan, *et al.* Effects of the distribution and structure of vascular bundles on the compressive properties of bamboo[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2019, **39**(6): 121–127.

- [20] 尚莉莉, 孙正军, 江泽慧, 等. 毛竹维管束的截面形态及变异规律[J]. 林业科学, 2012, **48**(12): 16–21.

SHANG Lili, SUN Zhengjun, JIANG Zehui, *et al.* Variation and morphology of vascular bundle in moso bamboo[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2012, **48**(12): 16–21.

- [21] 郭晓磊, 朱南峰, 王洁, 等. 切削速度和切削厚度对纤维板切削力和表面粗糙度的影响[J]. 林业工程学报, 2016, **1**(4): 114–117.

GUO Xiaolei, ZHU Nanfeng, WANG Jie, *et al.* Effect of cutting speed and chip thickness on cutting forces and surface roughness of fiberboard[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2016, **1**(4): 114–117.

- [22] 蒋荣升, 郭晓磊, 曹平祥. 主轴转速和刀具前角对木塑复合材料切削性能的影响[J]. 林业工程学报, 2022, **7**(3): 144–149.

JIANG Rongsheng, GUO Xiaolei, CAO Pingxiang. Effect of spindle speed and milling tool rake angle on cutting forces and surface roughness of wood plastic composites[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2022, **7**(3): 144–149.

- [23] 孙成岗, 朱梦男, 郭晓磊. 刀具前角对木塑复合材料加工表面质量的影响[J]. 林业科技, 2023, **48**(5): 51–55.

SUN Chenggang, ZHU Mengnan, GUO Xiaolei. Effect of cutting tool angle on surface quality of wood-plastic composite[J]. *Forestry Science and Technology*, 2023, **48**(5): 51–55.

- [24] 李黎. 木材切削原理与刀具[M]. 北京: 中国林业出版社, 2024.

LI Li. *Principles of Wood Cutting and Cutter Tools*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2024.

- [25] 汪林, 姜增辉, 王书利, 等. 切削参数对 316H 不锈钢切削力影响的仿真研究[J]. 制造技术与机床, 2022(6): 80–83.

WANG Li, JIANG Zenghui, WANG Shuli, *et al.* Simulation study of influence of cutting parameters on cutting force of 316H stainless steel[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2022(6): 80–83.

- [26] 赵晓进, 梁芝栋, 邵立杰, 等. SPSS 软件非线性回归功能的分析与评价[J]. 统计与决策, 2021, **37**(23): 20–22.

ZHAO Xiaojin, LIANG Zhidong, SHAO Lijie, *et al.* Analysis and evaluation on nonlinear regression function of SPSS software[J]. *Statistics & Decision*, 2021, **37**(23): 20–22.