

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026056

木塑复合材料超临界 CO₂辅助低温切削性能研究

张丰¹, 李小娟², 张天揽¹, 郭勇³, 庆振华⁴, 朱兆龙⁵

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210037; 2. 成都壹佰科技有限公司, 四川成都 611332;
3. 安徽农业大学材料与化学学院, 安徽合肥 230036; 4. 合肥工业大学机械工程学院, 安徽合肥 230009;
5. 南京林业大学家居与工业设计学院, 江苏南京 210037)



摘要: 为探究低温切削技术对木塑复合材料 (wood plastic composite, WPC) 加工性能的影响, 以60目杨木 (*Populus* sp.) 粉与高密度聚乙烯 (high-density polyethylene, HDPE) 共混制备、密度为1.24 g/cm³的WPC为研究对象, 在环境温度为10℃条件下, 采用硬质合金刀具开展超临界CO₂辅助低温直角自由切削 (简称低温切削) 试验, 并与干切削进行对比, 分析不同切削深度 (0.1、0.4和0.7 mm) 和切削速度 (12.5、17.9和25 m/min) 对切削温度、切削力及表面粗糙度的影响。结果表明, 低温切削的切削温度、切削力和表面粗糙度均显著低于干切削 ($P<0.05$), 最大降幅分别为22.92%、33.54%和22.95%。低温切削和干切削的切削温度、切削力和表面粗糙度, 均随着切削深度和切削速度的增大而增加。三因素方差分析表明, 切削方式、切削速度和切削深度对切削温度、切削力和表面粗糙度均有显著影响 ($P<0.05$); 对于二因素交互作用, 仅切削温度与切削深度的交互作用对表面粗糙度具有显著影响 ($P<0.05$), 其余均不显著 ($P>0.05$)。环境扫描电子显微镜 (environmental scanning electron microscopy, ESEM) 观察结果显示, 在相同切削深度和切削速度下, WPC低温切削时产生的加工表面毛刺和凹坑更少, 这是因为低温切削可显著降低切削区域温度 ($P<0.05$), 减弱材料黏附及高密度聚乙烯HDPE基体塑性流动, 维持木粉/HDPE界面稳定性, 进而改善WPC的切削稳定性和加工表面质量。研究阐明低温切削条件下WPC表面质量改善的作用机制, 可为木塑复合材料的高效加工提供理论依据。

关键词: 木塑复合材料; 低温切削; 切削力; 表面粗糙度; 切削深度; 切削速度

中图分类号: TS642 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 04-0068-09

Cryogenic Cutting Performance of Wood Plastic Composites Assisted by Supercritical CO₂

Zhang Feng¹, Li Xiaojuan², Zhang Tianlan¹, Guo Yong³, Qing Zhenhua⁴, Zhu Zhaolong⁵

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;
2. Chengdu Yibai Technology Co., Ltd., Chengdu 611332, Sichuan, China;
3. School of Materials and Chemistry Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, Anhui, China;
4. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, Anhui, China;
5. College of Furnishings and Industrial Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

收稿日期: 2026-04-22; 修改日期: 2026-06-25

基金项目: 国家自然科学基金项目“面向低温高速铣削的WPCs脆性破坏机理及其切削表面缺陷抑制研究”(32471791)。

作者简介: 张丰 (1997—), 男, 博士研究生。Email: njfuzhangfn@njfu.edu.cn

通讯作者: 朱兆龙, 男, 讲师。Email: njfuzzlong@outlook.com

Abstract: To investigate the effects of cryogenic cutting on the cutting performance of wood-plastic composites (WPCs), orthogonal free cutting tests were conducted using a cemented carbide cutting tool under supercritical CO₂ assisted cryogenic conditions, with dry cutting used for comparison. The effects of cutting depth (0.1, 0.4, and 0.7 mm) and cutting speed (12.5, 17.9, and 25 m/min) on cutting temperature, cutting force, and surface roughness were systematically evaluated. The results showed that supercritical CO₂-assisted cryogenic cutting significantly reduced cutting temperature, cutting force, and surface roughness compared with dry cutting ($P<0.05$), with maximum reductions of 22.92%, 33.54%, and 22.95%, respectively. Under both dry and cryogenic cutting conditions, cutting temperature, cutting force, and surface roughness increased with increasing cutting depth and cutting speed. Three-factor analysis of variance showed that cutting condition, cutting speed, and cutting depth significantly affected all three response variables ($P<0.05$). Among the two-factor interactions, only the interaction between cutting condition and cutting depth had a significant effect on surface roughness ($P<0.05$), whereas the other interactions were not significant ($P>0.05$). Environmental scanning electron microscopy revealed fewer burrs and pits on surfaces produced by cryogenic cutting than on those produced by dry cutting at the same cutting depth and cutting speed. This improvement was attributed to the reduction in cutting-zone temperature, which suppressed material adhesion and plastic flow of the high-density polyethylene (HDPE) matrix while helping maintain the stability of the wood flour/HDPE interface. A cutting depth of 0.1 mm, the cutting speed could therefore be appropriately increased while maintaining acceptable surface quality, thereby balancing cutting quality and efficiency. These findings clarify the mechanism by which supercritical CO₂-assisted cryogenic cutting improves the surface quality of WPCs and provide a theoretical basis for their efficient cutting.

Key words: WPC; cryogenic cutting; cutting force; surface roughness, cutting speed; cutting depth

木塑复合材料 (wood plastic composites, WPC) 以木质纤维与热塑性塑料为主要原料, 通过加热混合、挤出成型等工艺制备而成^[1-2]。可采用回收塑料和木材残渣作为主要原料, WPC不仅有助于循环经济发展, 还能减少对化石燃料的依赖, 从而降低碳排放^[3-4]。WPC具有优良的耐腐蚀性、抗湿性及良好的可加工性, 在建筑装饰及家具等领域得到广泛应用^[5-6]。在WPC产品的制造过程中, 切削加工作为关键工艺之一, 直接影响终端产品的尺寸精度与表面质量^[7]。然而, 在传统切削过程中, 切削区域温度过高易导致材料局部软化, 并黏附在刀具前刀面上^[8], 这不仅增加切削力, 还会导致表面加工质量降低^[9]。

不同于金属材料切削加工, 切削液的使用会对木质材料表面造成严重污染, 难以将其用于木质材料切削区域的冷却^[10-11]。近年来, 低温切削技术为控制切削热积聚和改善加工表面完整性提供

了新的思路。低温切削技术是一种利用低温介质 (如超临界CO₂) 冷却切削区域的先进加工技术, 在纤维复合材料的加工中展现出显著的优势^[12]。与干切削相比, 低温切削碳纤维增强复合材料可降低切削力、表面粗糙度 (R_a)、切削温度和刀具磨损, 并改善表面质量^[13]。此外, 低温冷却条件可改善复合材料切削过程中的热-力耦合状态, 并有助于降低刀具磨损和表面缺陷^[14]。

WPC切削加工研究多采用响应面法、粒子群优化算法等参数优化方法, 达到控制切削温度、降低切削力、改善加工表面粗糙度等目的^[15-16]。近年来, 低温切削技术被用于改善WPC等木质复合材料的加工性能, 相关研究表明其能够降低切削温度、切削力, 调控表面粗糙度^[17]。然而, 现有研究多侧重于宏观试验数据的对比分析, 关于低温作用对WPC加工表面微观损伤行为的影响机制仍缺乏深入探究。

鉴于此,本研究开展干切削和超临界CO₂辅助低温切削(简称低温切削)对比试验,分析切削深度和切削速度对切削温度、切削力和表面粗糙度的影响规律,并结合微观特征,分析低温条件下WPC加工表面毛刺、凹坑及界面失效等损伤特征,阐明低温切削改善WPC表面质量的作用机制。为WPC的高质量加工提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

杨木(*Populus sp.*)粉(60目)、高密度聚乙烯(high-density polyethylene, HDPE)、马来酸酐(maleic anhydride, MAH),外购。

硬质合金刀具,钨(W)、钴(Co)和碳(C)的质量分数分别为84%、10%和6%。前角为12°,后角为23°;密度14.5 g/cm³,弹性模量600 GPa,泊松比0.22,导热系数4.5 W/(m·K),比热容220 J/(kg·K),熔点2 870 °C。

1.2 试验设备

刨床、三向测力仪(Kistler 9257B)、红外热像仪(Thermo Vision A20-M)、三维激光扫描共聚焦显微镜(VK-X100)、环境扫描电子显微镜(FEI QUANTA200)、超临界CO₂低温喷射装置。

1.3 试验方法

1.3.1 WPC制备 采用马来酸酐MAH作为偶联剂,增强木粉与HDPE基体之间的界面结合力。根据前期试验结果,将木粉、HDPE及MAH按质量比28.5:66.5:5混合均匀,经熔融共混造粒得到WPC颗粒;随后将所得颗粒置于模具中进行热压成型,制备尺寸为200 mm×150 mm×10 mm(长×宽×厚)的试样90块,冷却后裁切成试验所需尺寸的工件。

制备的WPC密度为1.24 g/cm³,弹性模量为4.79 GPa,导热系数为0.991 W/(m·K),泊松比为0.38,比热容150.586 J/(kg·K),熔点128.7 °C。

1.3.2 切削试验 如图1所示,在刨床上进行切削试验。试验期间实验室环境温度为10 °C。切削刀具安装在测力计平台上,整体牢固地固定在机床平台上。夹具夹持工件进行水平移动。试验参考关于WPC直角自由切削的研究^[18-19],并结合试验设备的加工参数范围,设计一个2因素、3水平的全因子试验,以切削深度和切削速度为试验因素,切削深度设定为0.1、0.4和0.7 mm,切削速度设定为12.5、17.9和25 m/min。每组参数组合均重复5次。

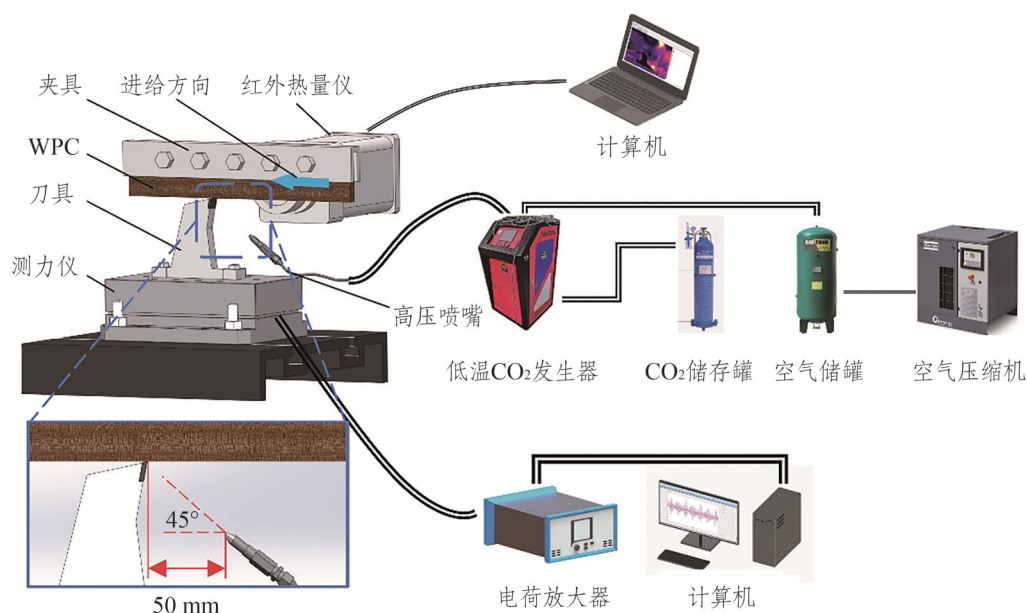


图1 低温切削试验示意

Fig.1 Schematic diagram of of the experimental setup for supercritical CO₂-assisted cryogenic cutting

试验中, CO₂首先在低温切削系统中经增压泵加压, 并通过热交换器进行温度调控, 使其处于超临界状态。临界压力 $P_c=7.38$ MPa, 临界温度 $T_c=31.1$ °C。低温切削过程中, CO₂质量流量为 0.375 g/s。喷嘴出口朝向切削区域, 喷嘴出口与切削刃之间的水平距离约为 50 mm, 喷射方向与工件表面之间的夹角约为 45°。超临界 CO₂经喷嘴喷射至常压环境下的切削区域后快速膨胀, 形成低温冷却作用, 从而吸收并带走切削区域的热量。

1.4 性能表征

1.4.1 切削温度表征 采用红外热像仪测量切削区域温度, 采样频率设置为 50 Hz。切削过程中, 将切削刃与工件接触区域的最高温度作为单次切削过程的代表性切削温度。对于每组加工参数组合, 记录 5 次重复切削过程中的最高温度, 并取其平均值作为该参数组合下的代表性切削温度。

1.4.2 切削力表征 采用测力计测量切削过程中的切削力, 采样频率设为 7 142 Hz。根据公式 (1) 计算合力 F 。

$$F = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} \quad (1)$$

式中: F_x 为法向力, F_y 为切向力。

对于每组相同加工参数组合, 在同一工件上进行 5 次重复切削试验。每次切削过程中分别采集法向力和切向力, 并计算对应的切削合力。随后对 5 次重复切削所得合力取平均值, 作为该参数组合下的代表性切削力。

1.4.3 表面粗糙度和微观形貌表征 切削试验结束后, 利用三维激光扫描共聚焦显微镜 (laser

scanning confocal microscope, LSCM) 观察加工表面的三维形貌, 并测量表面粗糙度。表面粗糙度测量在 80 倍放大倍率下进行。对于每组加工参数组合, 在加工表面沿切削方向均匀选取 5 个测量区域, 并取 5 个区域测量结果的平均值作为该参数组合下加工试样的最终表面粗糙度值。随后, 利用环境扫描电子显微镜 (environmental scanning electron microscope, ESEM) 观察加工样品的表面损伤形貌特征。

1.5 数据处理与分析

试验所得切削温度 t 、切削力 F 和表面粗糙度 Ra 数据均采用平均值和标准差进行统计, 每组参数组合包含 5 次重复试验。采用单因素方差分析, 判定低温切削和干切削两组之间切削温度、切削力和表面粗糙度显著性, 统计显著性被设定为 95% 的置信水平。

以切削方式 M 、切削速度 v 和切削深度 a_p 为因素, 分别以切削温度 t 、切削力 F 和表面粗糙度 Ra 为响应变量, 在 Minitab 中进行三因素方差分析, 考察各因素主效应及两两交互作用的显著性。采用决定系数 R^2 评价方差分析结果对响应变量变异的解释程度, 统计显著性设定 95% 的置信水平。

2 结果与分析

2.1 切削深度和切削速度对切削温度的影响

图 2 显示切削深度和切削速度对切削温度的影响。在相同切削速度下, 切削温度随切削深度的增加而升高; 在相同切削深度下, 切削温度随切

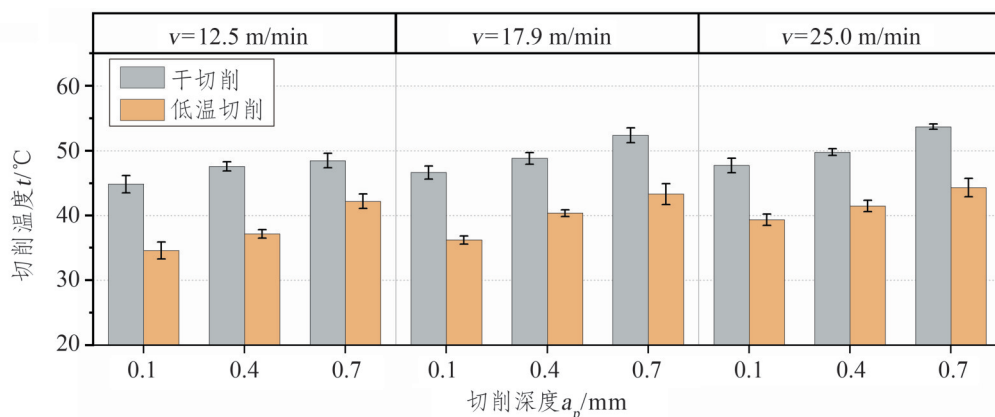


图 2 切削深度和切削速度对切削温度的影响

Fig.2 Effects of cutting depth and cutting speed on the cutting temperature of WPCs under dry and cryogenic cutting conditions

削速度的增加而升高。但干切削和低温切削在相同切削参数下,低温切削可以显著降低切削温度 ($P<0.05$)。

刀具与工件之间的摩擦会产生热量,这是切削区域温度升高的原因。随着切削深度的增加,材料去除量增加,所需能量增加,产生的热量增加,切削区域温度进一步升高^[20]。随着切削速度的增大,刀具与工件、刀具与切屑之间的相对滑动速度提高,摩擦产生的热量也随之增大,进而导致切削区域温度上升^[21]。因此,切削温度随切削深度和切削速度的增加而呈现出上升的趋势。

在WPC干切削过程中,切削热主要集中于刀具与切屑接触区。由于切削区域的散热条件有限,切削过程中产生的热量易聚集在切削区,导致切削温度持续升高。同时,切削区域中刀具与WPC之间的挤压和摩擦进一步增强了热量的产生,使得切削温度进一步升高。当引入超临界CO₂辅助低温冷却后,切削热会被快速吸收并带走,从而降低切削区域温度。此外,该方法可能对积屑瘤形成起到一定抑制作用^[22]。

2.2 切削深度和切削速度对切削力的影响

图3显示切削深度和切削速度对WPC切削力的影响。在相同切削速度条件下,试样加工过程中的切削力随切削深度的增加而增大;在相同切削深度条件下,切削力随切削速度的提高而增大。在相同切削参数下,低温切削可以显著降低切削力 ($P<0.05$)。

在切削过程中,随着切削深度的增加,切削层厚度增大,材料去除量增加,工件抵抗变形的能力增强,从而导致切削力增大^[23]。随着切削速度的提高,刀具与WPC材料之间的相对滑动加剧,摩擦作用增强。切削深度和切削速度的增大会使切削温度升高,WPC在高温的作用下可能出现软化和黏附现象,从而改变刀具与材料的接触状态,引起切削力增大^[24]。在引入超临界CO₂辅助低温冷却后,切削区域的温度显著降低,减轻材料在刀具表面的黏附倾向,并在一定程度上改善切削界面状态,从而降低切削力。因此,低温切削条件下的切削力始终低于干切削条件,且在较小切削深度下表现出更优的效果。

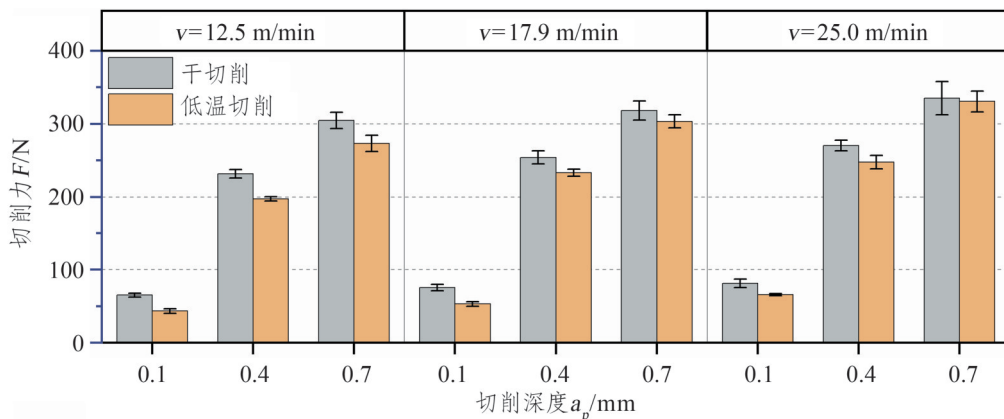


图3 切削深度和切削速度对WPC切削力的影响

Fig.3 Effects of cutting depth and cutting speed on cutting force of WPC under dry and cryogenic cutting conditions

2.3 切削深度和切削速度对表面质量的影响

图4显示切削深度和切削速度对WPC表面粗糙度的影响。在固定切削速度条件下,WPC表面粗糙度随切削深度增加呈上升趋势;在固定切削深度条件下,WPC表面粗糙度随切削速度的增加而增大。在相同切削参数下,低温切削可以显著降低WPC的表面粗糙度 ($P<0.05$),有效改善WPC加工表面质量。

图5是不同切削深度、切削速度条件下,采用2种切削方式加工WPC的微观形貌。图5a为切削速度 $v=17.9$ m/min时,2种切削深度下WPC加工表面的ESEM图像。可以看出,干切削加工的WPC表面具有明显的切削痕迹。当切削深度从0.1 mm增加到0.7 mm,干切削WPC的表面上出现了毛刺和凹坑,且毛刺尺寸和凹坑面积不断扩大。这些凹坑主要是由于木粉相与HDPE相之间的结合界面

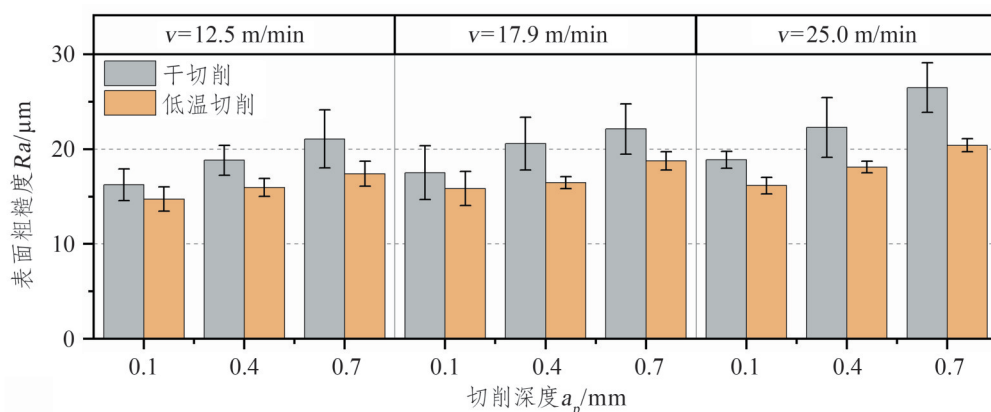


图4 切削深度和切削速度对WPC表面粗糙度的影响

Fig.4 Effects of cutting depth and cutting speed on surface roughness of WPC under dry and cryogenic cutting conditions

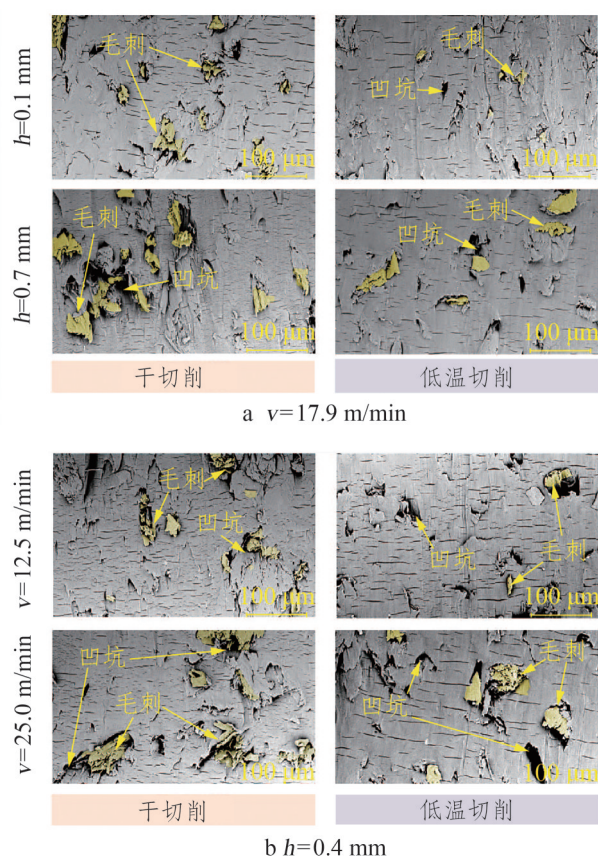


图5 切削深度和切削速度对WPC加工表面微观形貌的影响

Fig. 5 Effect of cutting depth and cutting speed on microscopic morphology of WPC processing surface

完全失效, 导致木粉脱落而形成的。凹坑周围可见明显的毛刺, 表明在木粉拔出过程中, HDPE相发生一定程度的塑性变形, 进而形成毛刺结构。

相比之下, 低温切削加工表面的毛刺和凹坑明显减少, 表明WPC在材料去除过程中塑性变形

程度降低, 切削表面完整性得到改善。超临界CO₂释压膨胀形成的低温射流能够降低切削温度, 减弱HDPE相的热软化行为, 从而抑制HDPE相的塑性变形。此外, 低温使材料更易以脆性断裂形式被去除, 降低木粉拔出和基体塑性流动的可能性^[25]。因此, 低温切削方式能够减少毛刺、凹坑等表面缺陷的形成, 从而有效改善WPC加工表面的质量。

图5b显示固定切削深度为0.4 mm时, 在2种切削速度条件下WPC加工表面的ESEM图像。采用干切削方式时, 当切削速度为12.5 m/min时, WPC试样加工表面已出现较多毛刺和凹坑; 随着切削速度增加至25 m/min, 试样表面的缺陷未发生明显变化。相比之下, 在相同切削速度下, 采用低温切削时试样表面的毛刺显著减少。这表明低温切削比干切削更有效地提高表面质量, 尤其是在减少毛刺和凹坑形成方面。

2.4 切削温度、切削力和表面粗糙度的方差分析

表1列出切削温度、切削力和表面粗糙度的三因素方差分析结果。三因素方差分析的决定系数 R^2 分别为0.954 7、0.998 3和0.972 1, 表明方差分析对响应变量变异的解释程度较好。主效应分析表明, 切削方式 M 、切削速度 v 和切削深度 a_p 均对切削温度、切削力以及WPC试样表面粗糙度有显著影响($P < 0.05$)。对于切削温度和切削力, 各二因素交互作用均不显著($P > 0.05$)。对于WPC表面粗糙度, 仅切削方式与切削深度的交互作用显著($P < 0.05$)。

表1 切削力和表面粗糙度的方差分析结果
Tab.1 ANOVA results for cutting force and surface roughness of WPC

响应指标	R^2	P					
		M	v	a_p	M^*v	M^*a_p	v^*a_p
T	0.954 7	0.000	0.002	0.003	0.898	0.598	0.953
F	0.998 3	0.001	0.000	0.000	0.104	0.315	0.060
Ra	0.972 1	0.000	0.001	0.000	0.095	0.030	0.137

2.5 表面损伤机理分析

如图6所示,在加入MAH作为偶联剂后,WPC中木粉相与HDPE相之间的界面结合主要包

括机械结合和化学结合两种形式^[26]。当熔融的HDPE渗入木粉表面的微观结构中,并在其表面冷却和固化后形成物理交联结构,即发生机械结合^[27]。化学接枝主要通过偶联剂MAH实现,MAH中的碳原子能够与HDPE主链中的碳原子形成共价键,其酸酐环结构还能与木粉的羟基发生开环酯化反应生成酯键,从而在两相之间构建化学键合界面^[28]。此外,木粉之间也可能存在氢键,可有效增强界面结合强度,进一步提高复合材料内部结构的稳定性^[29]。

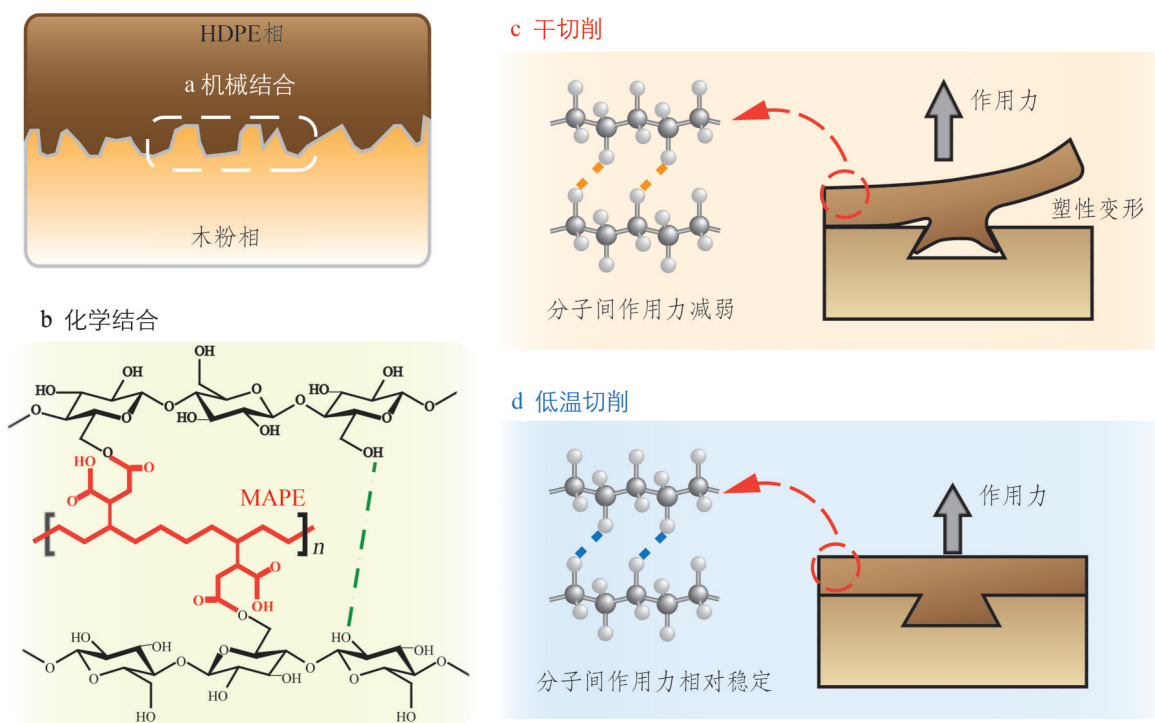


图6 木粉与HDPE在干切和低温切割条件下的界面失效示意

Fig. 6 Schematic diagram of the interfacial failure between wood flour and HDPE under dry and cryogenic cutting

干切削过程中,随着切削深度和切削速度的增加,刀具与WPC材料之间的挤压和摩擦作用增强,切削区域温度随之升高。在较高温度作用下,HDPE分子链热运动加剧,分子链间作用力减小,链段活动能力增强,使HDPE基体发生软化,抵抗塑性变形的能力降低^[30]。因此,在刀具挤压和剪切作用下,HDPE相更容易发生塑性变形,进而在加工表面形成毛刺。同时,HDPE分子链活动性的增强会削弱其对木粉的包覆作用,使木粉相与HDPE相之间的界面结合强度降低^[31]。在较大切削力作用下,木粉与基体之间的界面更易发生破坏,导致

木粉从基体中拔出,从而在加工表面形成凹坑。随着切削深度增大,材料去除量增加,切削过程中的挤压和摩擦作用进一步增强,使HDPE相塑性变形和界面破坏程度加剧,因此毛刺尺寸和凹坑面积逐渐增大。

相比之下,低温切削时候 CO_2 气流能够快速吸收并带走切削热,降低切削区域温度。降低了HDPE分子链的热运动,维持了分子链间作用力,从而降低HDPE基体的软化程度,使其保持较高刚性^[25]。因此,HDPE相在刀具作用下塑性变形减小,加工表面毛刺明显减少^[32]。此外,低温环境有

助于维持木粉相与HDPE相之间的界面结合强度,减少木粉在切削过程中发生拔出现象^[33],加工表面的凹坑范围有所降低。与此同时,低温作用提高WPC整体脆性,使材料更倾向于以脆性断裂方式被去除,减少表面损伤。综上,超临界CO₂辅助低温切削主要通过降低切削热积聚、抑制HDPE基体热软化与塑性流动、维持木粉/HDPE界面稳定性,从而减少加工表面的毛刺、凹坑等缺陷。

3 结论

1) 木塑复合材料(WPC)超临界CO₂辅助低温切削性能研究结果表明,低温切削的切削温度、切削力和加工试样的表面粗糙度显著低于干切削($P<0.05$),最大降幅分别为22.92%、33.54%和22.95%;并且,无论干切削还是低温切削,切削温度、切削力和表面粗糙度均随着切削速度和切削深度的增大而增加。切削方式、切削速度和切削深度均显著影响切削温度、切削力和表面粗糙度($P<0.05$);除切削方式与切削深度的交互作用对WPC表面粗糙度影响显著($P<0.05$)外,其余各交互作用对切削温度、切削力和表面粗糙度的影响均不显著。

2) 在相同切削深度和切削速度条件下,低温切削WPC产生的毛刺和凹坑更少。这是因为低温切削能有效地抑制WPC表面的塑性变形,维持木粉与HDPE之间的界面结合强度。

参考文献:

- [1] 潘明珠,丁春香,张帅,等.木塑复合材料阻燃研究新进展[J].林业工程学报,2020,5(5):1-12.
Pan Mingzhu, Ding Chunxiang, Zhang Shuai, et al. Progress on flame retardancy of wood plastic composites[J]. China Forestry Science and Technology, 2020, 5(5): 1-12.
- [2] 王海刚,张京发,王伟宏,等.纤维增强木塑复合材料研究进展[J].林业科学,2016,52(6):130-139.
Wang Haigang, Zhang Jingfa, Wang Weihong, et al. Research of fiber reinforced wood-plastic composites: a review[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(6): 130-139.
- [3] Xu J N, Sun J M, Zhao J Q, et al. Eco-friendly wood plastic composites with biomass-activated carbon-based form-stable phase change material for building energy conversion[J/OL]. Industrial Crops and Products, 2023, 197: 116573. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.116573.
- [4] Ramesh M, Rajeshkumar L, Sasikala G, et al. A critical review on wood-based polymer composites: processing, properties, and prospects[J/OL]. Polymers, 2022, 14(3): 589. DOI: 10.3390/polym14030589.
- [5] 王清文,易欣,沈静.木塑复合材料在家具制造领域的发展机遇[J].林业工程学报,2016,1(3):1-8.
Wang Qingwen, Yi Xin, Shen Jing. Tailoring wood-plastic composites for furniture production: possibilities and opportunities[J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(3): 1-8.
- [6] 易欣,梁家明,方庆宁,等.基于成型工艺特点的木塑家具设计现状与展望[J].木材科学与技术,2024,38(1):80-88.
Yi Xin, Liang Jiaming, Fang Qingning, et al. Current progress and trends of wood-plastic furniture design based on molding characteristics[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2024, 38(1): 80-88.
- [7] Zhang Z Y, Yan J W, Kuriyagawa T. Manufacturing technologies toward extreme precision[J/OL]. International Journal of Extreme Manufacturing, 2019, 1(2): 022001. DOI: 10.1088/2631-7990/ab1ff1.
- [8] Assaf I, Belkheir M, Mokaddem A, et al. Effect of fiber-matrix interface decohesion on the behavior of thermoset and thermoplastic composites reinforced with natural fibers: a comparative study[J]. Materials Science, 2022, 28(1): 93-100.
- [9] Zhang F, Dong W H, Huang Y B, et al. Effects of cryogenic minimum quantity lubrication on milling force and surface quality of wood-plastic composites[J]. Precision Engineering, 2026, 97: 804-816.
- [10] Merhar M. Influence of temperature distribution on circular saw blade natural frequencies during cutting[J]. BioResources, 2020, 16(1): 1076-1090.
- [11] 张天揽,钱利云,郝展鹏,等.基于低温CO₂的相思木车削加工性能分析[J].林业工程学报,2025,10(4):61-68.
Zhang Tianlan, Qian Liyun, Hao Zhanpeng, et al. Analysis on the turning performance of Acacia mearnsii using cryogenic CO₂[J]. Journal of Forestry Engineering, 2025, 10(4): 61-68.
- [12] 段鹏飞,乔阳,王相宇,等.低温切削加工技术的研究进展[J].工具技术,2019,53(9):8-13.
Duan Pengfei, Qiao Yang, Wang Xiangyu, et al. Overview of cryogenic cutting machining technology[J]. Tool Engineering, 2019, 53(9): 8-13.
- [13] Yang K, Cao Z Y, Zhao X, et al. Experimental study of micro-milling carbon fibre reinforced composites under variable cooling and lubrication strategies[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2025, 12(4): 1247-1260.
- [14] Kumar D, Gururaja S. Machining damage and surface integrity evaluation during milling of UD-CFRP laminates: Dry vs. cryogenic[J/OL]. Composite Structures, 2020, 247: 112504. DOI: 10.1016/j.compstruct.2020.112504.
- [15] Srivabut C, Rawangwong S, Hiziroglu S, et al. Multi-objective optimization of turning process parameters and wood sawdust contents using response surface methodology for the minimized surface roughness of recycled plastic/wood sawdust composites[J/OL]. Composites Part C: Open Access, 2024, 14: 100477. DOI: 10.1016/j.jcomc.2024.100477.
- [16] Murugesan S, Kayaroganam P, Natarajan S, et al. Optimization of surface roughness in drilling wood plastic composite (WPC) using hybrid Taguchi-response surface methodology and metaheuristic algorithms[J/OL]. European Journal of Wood and Wood Products, 2026, 84(1): 18. DOI: 10.1007/s00107-025-02372-3.
- [17] Zhang F, Qian L Y, Buck D, et al. Influence of cryogenic CO₂ on wood-plastic composite (WPC) turning-performance characteristics: a comparison with dry machining[J]. Wood Material Science & Engineering, 2026, 21(1): 138-148.
- [18] Guo X L, Wang J X, Buck D, et al. Machinability of wood fiber/polyethylene composite during orthogonal cutting[J]. Wood Science and Technology, 2021, 55(2): 521-534.
- [19] Wu Z W, Wang J X, Zhang F, et al. Investigation of the orthogonal

- cutting of wood-plastic composites for obtaining better stability and quality[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2023, 81(2): 399-410.
- [20] 林洁琼, 闫东, 卢明明, 等. 超声振动辅助切削三维 SiCp/Al 复合材料温度仿真研究[J]. *制造技术与机床*, 2023(1): 36-43.
Lin Jieqiong, Yan Dong, Lu Mingming, et al. Temperature simulation of ultrasonic assisted cutting of three-dimensional SiCp/Al composites[J]. *Manufacturing Technology & Machine Tool*, 2023(1): 36-43.
- [21] 张浩, 孙非瑀, 沈号伦, 等. 切削速度对锯齿形切屑形成的影响规律[J]. *机床与液压*, 2023, 51(15): 117-121.
Zhang Hao, Sun Feiyu, Shen Haolun, et al. The influence law of cutting speed on the formation of sawtooth chips[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2023, 51(15): 117-121.
- [22] Zhu Z L, Buck D, Wu Z W, et al. Built-up edge formation mechanisms in orthogonal cutting of wood-plastic composite[J]. *Wood Material Science & Engineering*, 2022, 17(5): 388-396.
- [23] 宋美琪, 管军, 唐其, 等. 三聚氰胺浸渍纸饰面刨花板钻削轴向力分析[J]. *林业工程学报*, 2025, 10(5): 39-46.
Song Meiqi, Guan Jun, Tang Qi, et al. Analysis of axial force in drilling of melamine-impregnated paper veneer particleboards[J]. *Journal of Forestry Engineering*, 2025, 10(5): 39-46.
- [24] 孙伟, 王培军, 陈俊云, 等. SiCp/Al 复合材料切削过程的颗粒损伤研究[J]. *机械工程学报*, 2023, 59(15): 366-376.
Sun Wei, Wang Peijun, Chen Junyun, et al. Research on particle damage during SiCp/Al composite machining[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2023, 59(15): 366-376.
- [25] Lamri A, Shirinbayan M, Pereira M, et al. Effects of strain rate and temperature on the mechanical behavior of high-density polyethylene[J/OL]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(23): 48778. DOI: 10.1002/app.48778.
- [26] Zhou Y H, Fan M Z, Chen L H. Interface and bonding mechanisms of plant fibre composites: an overview[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 101: 31-45.
- [27] Fatima Ezzahrae M, Nacer A, Latifa E, et al. Thermal and mechanical properties of a high-density polyethylene (HDPE) composite reinforced with wood flour[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2023, 72: 3602-3608.
- [28] Yang A, Liao Z Y, Xu Z S, et al. Scalable production of robust and creep resistant ultra-high filled wood-plastic composites[J/OL]. *Composites Part B: Engineering*, 2025, 289: 111937. DOI: 10.1016/j.compositesb.2024.111937.
- [29] Zhang T, Hu Y D, Dong Y Y, et al. The influence of hydrogen bonding in wood and its modification methods: a review[J/OL]. *Polymers*, 2025, 17(15): 2064. DOI: 10.3390/polym17152064.
- [30] Viljoen W D, Labuschagné F J W J. The thermal stability of highly filled high-density polyethylene quaternary composites: Interactive effects and improved measures[J/OL]. *Polymer Testing*, 2020, 85: 106424. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2020.106424.
- [31] Kaiser M S, Ahmed S R. Investigation of chip formation characteristics during surface finishing of HDPE samples[J]. *International Journal of Materials and Metallurgical Engineering*, 2019, 13(9): 462-466.
- [32] Yang W J, Xie Y J, Wang H G, et al. Impacts of freezing and thermal treatments on dimensional and mechanical properties of wood flour-HDPE composite[J]. *Journal of Forestry Research*, 2013, 24(1): 143-147.
- [33] Sewda K, Maiti S N. Mechanical properties of teak wood flour-reinforced HDPE composites[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2009, 112(3): 1826-1834.

(责任编辑 方长华/编校 曹惠敏 向琴)

(上接第36页)

- [21] Wang W, Hu J J, Zhang R D, et al. A pH-responsive carboxymethyl cellulose/chitosan hydrogel for adsorption and desorption of anionic and cationic dyes[J]. *Cellulose*, 2021, 28(2): 897-909.
- [22] Jafari S, Soleimani M, Badinezhad M. Application of different mathematical models for further investigation of *in vitro* drug release mechanisms based on magnetic nano-composite[J]. *Polymer Bulletin*, 2022, 79(2): 1021-1038.
- [23] Salahuddin A, Ashraf A, Ahmad K, et al. Recent advances in chitosan-based smart hydrogel for drug delivery systems[J/OL]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2024, 280: 135803. DOI: 10.1016/j.ijbiomac.2024.135803.
- [24] Zhang Y, Chen H, Bai M Y, et al. Convert bamboo into high-performance, long-time durability, and fire-retardant with hyperbranched polyethylene glycol and boron[J/OL]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 491: 152107. DOI: 10.1016/j.cej.2024.152107.
- [25] 文世涛, 徐茹婷, 孙康, 等. 热处理对竹材结构与力学性能的影响[J]. *生物质化学工程*, 2024, 58(6): 53-59.
Wen Shitao, Xu Ruting, Sun Kang, et al. Effect of heat treatment on structure and mechanical properties of bamboo[J]. *Biomass Chemical Engineering*, 2024, 58(6): 53-59.
- [26] 吴华平, 饶瑾, 杨秀树, 等. 甲基丙烯酸羟乙酯/甲基丙烯酸甲酯交联聚合物在木材中原位构建及其尺寸稳定性影响[J]. *西北林学院学报*, 2018, 33(4): 193-197.
Wu Huaping, Rao Jin, Yang Xiushu, et al. Dimensional stability improvement of wood via in situ construction of polyhydroxyethyl methylacrylate and polymethyl methylacrylate networks[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2018, 33(4): 193-197.
- [27] Zhou M, Yue R H, Liu Y X, et al. Preparation and properties of poly(stearyl methacrylate-co-acrylamide)/konjac glucomannan-borax double-network hydrogels[J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2026, 130(16): 5935-5948.
- [28] Chu S M, Li Y Q, Lin L Y, et al. Thermal modification-induced degradation and toughness reduction of bamboo: Insights into multi-scale structural and interfacial changes[J/OL]. *Polymer Degradation and Stability*, 2025, 240: 111513. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2025.111513>.
- [29] Xue J, Cui D R, Zhou M, et al. Fungal specificity in degradation of Moso bamboo: White-rot versus brown-rot fungi[J/OL]. *Industrial Crops and Products*, 2025, 236: 122047. DOI: 10.1016/j.indcrop.2025.122047.
- [30] Li W W, Cai G X, Zhang P D. A simple and rapid Fourier transform infrared method for the determination of the degree of acetyl substitution of cellulose nanocrystals[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(10): 8047-8056.
- [31] Essoua GGE, Blanchet P, Landry V, et al. Maleic anhydride treated wood: effects of drying time and esterification temperature on properties[J]. *BioResources*, 2015, 10(4): 6830-6860.
- [32] Yang J, Shen T, Wei J H, et al. pH-responsive intrinsic self-healing coating via in-situ confined solid-liquid transition of hydrogel microdomains[J]. *npj Materials Degradation*, 2025(9): 98.

(责任编辑 曹金珍/编校 向琴)