

激光技术在木材加工中的应用与发展

彭晓瑞¹, 张 玲², 张占宽¹

(1. 中国林业科学研究院 木材工业研究所; 国家林业和草原局 木材科学与技术重点实验室, 北京 100091;

2. 中国科学院 半导体研究所, 中国科学院 半导体材料科学重点实验室, 北京 100083)

摘 要:激光加工具有速度快、材料变形小、精度高等优点,近年来在木材加工领域得到广泛应用。本研究指出了木材加工中激光技术的优势和重要性,介绍了现阶段激光技术在木材加工中的应用方式,重点探讨了几种激光器的性能特点及在木材加工中的加工条件,最后论述了新型木材激光加工技术的发展动向与趋势。

关键词:激光技术;木材加工;应用;发展

中图分类号:S781.63

文献标志码:A

文章编号:1001-7461(2021)05-0202-05

Application and Development of Laser Technology in Wood Processing: A Review

PENG Xiao-rui¹, ZHANG Ling², ZHANG Zhan-kuan¹

(1. Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry/Key Laboratory of Wood Science and Technology of National

Forestry and Grassland Administration, Beijing 100091, China; 2. Key Lab of Semiconductor Materials Science,

Institute of Semiconductors, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: Laser processing has the advantages of high processing speed, small material deformation and high precision. It has been widely used in the field of wood processing in recent years. In this paper, the advantages and importance of the development of laser technology in wood processing were discussed, the current application were introduced, The performance characteristics of several laser devices and the processing conditions were highlighted. Developmental trends of the new wood laser processing technology was stated.

Key words: laser technology; wood processing; application; development

激光加工是使用的基于热能的非接触式先进加工工艺之一,具有刀具无磨损、加工速度快、材料变形小、加工噪音小、切缝损失少、效率和精度高、有利于实现数字化加工等优点,由此被各工程材料加工领域誉为“21 世纪万能的加工工具”^[1-4]。目前激光加工在金属、陶瓷、塑料制品和木材加工等领域都已经展开大量的研究与应用^[5-6]。我国木材资源相对匮乏,特别是珍贵木材资源更是供不应求。面对日益增长的木材需求量,如何提高木材综合利用率,增加产品附加值,成为木材加工制造的重要问题。采取激光加工先进制造技术,可提升加工产品的出材率,提高加工后的表面胶合和涂饰性能,对缓解木材

资源匮乏与需求增大的供需矛盾、提高加工产品质量等具有重要意义^[7-8]。采用激光进行木材加工时对不同的激光加工方法、条件、对应树种和工艺参数等的研究至关重要^[9-10]。本研究就激光技术在木材加工中的应用、研究现状、发展动向等作出相对综合的探讨。

1 激光技术在木材加工中的应用方式

激光技术在木材加工中的应用主要包括:木材工件的切削加工(如钻孔、切断等)、木材工件的表面装饰加工(如雕刻、成型和纹理加工)及木质材料热处理等^[6-7]。

收稿日期:2020-09-21 修回日期:2020-12-10

基金项目:国家自然科学基金青年基金(31800490);“十三五”国家重点研发计划(2016YFD0600702)。

作者简介:彭晓瑞,博士,副研究员。研究方向:木制品制造与表面饰面。E-mail:pengxr@caf.ac.cn

1.1 激光切割

激光切割在激光加工技术中应用广泛,其切割速度快,精度和适应性高,割缝细,热影响区小,切割过程易实现自动化控制。木质材料激光切割是利用聚焦的高功率密度激光束照射工件,在超过阈值功率密度时,光束能量及部分燃烧产生的热能被切割处的木质材料所吸收,从而引起温度急剧上升,部分材料汽化逸出,部分材料燃烧形成熔渣,被辅助气体吹走的一种加工方式。近年来针对木材和木质复合材料切割加工的研究较多^[11-12]。木材激光切割中,以CO₂激光器切割加工研究居多,主要集中于激光模式、输出功率、焦点位置以及喷嘴形状等问题的研究。选用不同功率的CO₂激光器,分别针对不同木质材料种类进行了参数设计与对应产品质量的研究。

V. Barnekov^[13]利用功率300~400 W的CO₂激光切割机对木材进行切割,证明了激光切割速度明显高于传统切割方法。H. Z. Bai *et al*^[14]利用不同CO₂激光功率和不同工件切削速度切割木材和人造板等材料,提出了一种根据材料特性和切削速度来估算切削深度的理论模型,对研究CO₂激光在木材切割领域的应用具有重要参考价值。N. Kort-salioudakis *et al*^[15]研究了激光切割对木材强度的影响,得到当使用波长为532 nm的Nd:YAG激光器并且激光能量大于最大能量的70%时,切割木材会出现碳化现象的重要结论。H. A. Eltawahni *et al*^[16]使用CO₂激光分别对4、6 mm和9 mm的中密度纤维板(MDF)进行切割,研究了激光功率、切割速度、气压和焦点位置等对切割质量的影响,得出了焦点位置、切割速度、气压和功率对平均上、下切口宽度的影响规律,提出了激光切割MDF的粗糙度随着焦点位置的增加和激光功率的增大而减小,随着切削速度和气压的增加而增大的重要观点。

1.2 激光雕刻

木质材料激光雕刻是极具潜力的木材表面装饰技术,为木制品表面增值提供重要技术手段。木材激光雕刻主要是高功率激光束辐射作用在待刻木制品表面,随即转化为热能,通过瞬时热流作用使木材表层产生热分解和炭化,从而将木质材料表面局部去除,以形成软件提供的图案和文字等雕刻纹样^[17]。由于激光雕刻中,热能变化对激光雕刻质量有直接影响,且对热能区的木材力学强度会有一定影响,由此,目前对于热影响区的结构变化和切割表面组成研究正在展开。

激光雕刻无木屑和噪声污染,易于加工复杂形状的零件,可广泛应用于木制品雕刻、木模制作、图

案镶嵌等领域。激光雕刻在某种程度上类似于端面铣削,激光光束直径比机械切割机直径小得多。但由于被激光烧掉表层的下表层仍然保留在待处理物体上,因此在激光雕刻中应注意避免损坏“下表面层”。由此,激光雕刻中对激光功率和光束特性相关的温度场和加热时间的控制要求相对较高。木材激光雕刻有两方面的局限性,第一是局限于采用低功率激光器的均匀性好且去除深度较浅的雕刻;第二是木材材料的不均匀性和各向异性^[18]。事实上,木材为纤维结构,通常体现为不同纤维尺寸、形状和密度等特征,它们会以不同的模式与激光束相互作用,因此获得雕刻表面光滑或明确界定的网状结构有一定技术难度。

近年来,对于木材激光雕刻的研究日益广泛。20世纪80年代中期,国外已采用电热燃烧雕刻法制作木雕制品,之后又推出了木制品激光雕刻技术,我国也逐步引进此类技术。针对木质材料激光雕刻加工工艺参数的研究,主要探索切割速度、电流、焦距等因素与切槽深度、宽度以及热影响区碳化层的厚度之间的相互关系,优化工艺参数,提升激光雕刻的品质,延长其使用寿命等^[9]。乐磊等^[19]完成了一种激光切割单板拼花装饰制品的工艺研究,采用Smart Carve软件优化激光参数,完成单板的激光切割及背板的雕刻,最终形成满足家具、墙体板等使用要求的单板激光切割拼花装饰制品。传统木材激光加工技术容易使木材表面产生严重的烧蚀现象并带有残炭等残留物,造成木制品外观和表面质量较差,针对这一系列问题,杨春梅等^[2]提出将纳秒激光技术与水射流冷却技术相结合,利用水射流降低工件表面由激光加工导致的温升,解决木材表面激光雕刻引起的局部变黑、烧焦等质量问题。当YAG固体激光功率6 W、切割速度为50 mm·s⁻¹时,对厚度为2 mm的水曲柳进行切割,可获得较好的切缝表面质量,切缝宽度为0.18 mm。

1.3 激光热处理

木材表层激光热处理,是目前市场上木材改性手段之一,主要是通过激光热源辐射作用,使待处理木材表层发生有利于促成其内部性能和外观效果改变的物理和化学变化。目前,激光热处理主要可用于木质材料表面颜色调控、表面润湿性能改善、表面涂膜性能提升及材料防腐抗菌性能提高等^[20-22]。具体实施过程中,可通过不同激光参数对木材不同纹理和位置的热源辐射,利用对木材中发色基团数量的改变,实现激光热处理木材表面颜色变化工艺。采用激光热处理对木质材料内部结构进行物理和化学改性,以提高材料表面粗糙度和润湿性,极有利于

涂饰性能和防霉耐菌性能的提升。N. Subhasisa *et al*^[23]研究得出 CO₂ 激光热处理对木材结构改性作用很明显,木材经 CO₂ 激光切割后可明显观察到木材表面残留物沉积和木材结构的熔化,由此可对防腐处理的木材渗透性产生积极影响。

1.4 激光打标

早期的激光加工被广泛用于切割和焊接工艺中。由于激光光源的脉冲宽度从纳秒到飞秒不等,近年来,已被应用于其他机械加工,如标记、划线、选择性烧蚀和金属、陶瓷、聚合物以及木材等材料表面雕刻等。激光打标和激光雕刻的原理是相通的,即利用高功率激光束辐射热效应在木材表面形成的标记性图案、文字等。激光打标主要包含掩模式、阵列式和扫描式打标^[24]。激光打标与激光器波长和类型有直接关系,一般光纤激光打标机对木材雕刻打标不适用,而 CO₂ 激光器可达到良好的打标效果。木材激光打标必须根据材料的吸收特性和表面质量要求,选择优化的工艺参数,如波长、光斑直径、脉冲重复频率、扫描速度和光束功率等。李尧等^[24]采用 ME-50 振镜扫描式激光打标机对竹木制品进行激光打标,通过优化不同声光 Q 开关重复频率和打标速度,获得优化的竹木制品激光打标工艺参数,当重复频率 30 kHz、扫描速度 4 mm · s⁻¹ 时,竹木制品表面的激光打标图案清晰、质量较好。

2 不同激光器在木材加工中的应用现状

在木材激光加工领域,通常包含 YAG 固体激光、CO₂ 激光和光纤激光器,根据它们的不同激光波长,应用领域也有所不同。另外,将纳秒激光技术与水射流冷却技术相结合的复合型水导纳秒激光加工技术,越来越受到精密加工行业的重视^[25-26]。

2.1 YAG 激光器

YAG 激光器可分为连续波和脉冲 YAG 激光器。脉冲 YAG 激光器分为纳秒、皮秒、飞秒等,其单脉冲能量高,且具有一定的重复频率,比连续激光更适合加工木材。国内外有大量学者采用 YAG 脉冲激光器搭建实验平台,研究不同木材所需的激光能量等。东北林业大学搭建了木材激光切割实验台,研究了高光束质量固体激光谐振腔和固体激光器冷却系统等关键技术,利用 YAG 脉冲激光器对厚度为 2 mm 的红松、核桃楸、黄波罗、水曲柳、槭木等不同木材进行了激光切割试验,从切缝表面微观形貌和切割工艺性能两方面分析讨论了切割工艺参数和木材宏观、微观构造等对切缝表面质量的影响,得出激光能量、切割速度和木材气干密度等对切缝

宽度的影响较大,一般而言,环孔材激光切割的切缝表面质量相对较好,散孔材的相对较差^[27-28]。

2.2 CO₂ 激光器

CO₂ 激光器是利用 CO₂ 分子的振动和转动能级间的跃迁产生激光,输出激光波长为 10.6 μm,是木材激光切割中最常用的方式。木材对 CO₂ 激光的吸收性相对较好,在对木材表面进行简单的打标或雕刻时,通常小功率 CO₂ 激光即可达到较理想效果。而对大面积木材进行厚度较深的图案雕刻或切割时,需较大功率的 CO₂ 激光器来实现。CO₂ 激光器进行木材加工时,其加工效果与木材材种、质地等特性有直接关系。北京林业大学团队采用 CO₂ 激光器对三倍体毛白杨、樟子松和落叶松、桦木、三合板和五合板、竹材等不同硬度木质材料进行雕刻,研究了加工工艺参数(对焦距离、激光功率、气流类型和压力以及进给速度等)、工件材性、含水率及纤维方向,对切割质量(切缝宽度、深度、平整度、质量等)以及切割效率等因素的相关影响^[29-30]。研究得出,对 CO₂ 激光切割而言,切割深度深、切缝宽度窄、切割表面光洁、切割表面平行度高以及热影响层小,是表征切割效果良好的重要评价指标。一般来说,切割速度越小,激光电流越大,切槽宽度和深度则越大。P. A. A. Khan *et al*^[31]研究得出由于木材是具有异质性和各向异性等特性的天然产品,因此 CO₂ 激光切割效果与木材的种类与材性有直接关系。对木材而言,木材颜色浅淡的,更容易被激光气化,从而相对更适合雕刻。而对于材质致密、密度相对较大的木材,则通常采用功率较大的 CO₂ 激光器进行切割操作。在胶合板上进行激光雕刻时,一般情况下雕刻深度不可太深。山东大学利用 CO₂ 激光器,开展了木材表面激光直接标刻二维条码技术研究,选用不同树种木材,对其表面直接标刻 DM 条码,探明了激光参数与标刻条码深度的关系,揭示了木材在激光标刻下所呈现的材料特性,得出了影响条码识别的相关因素和基于效应曲面法的参数优化,并得到以落叶松材料为例的理想 DM 条码对比度激光参数:离焦量 -10 mm、线间距 0.2 cm、扫描速度 40 mm · s⁻¹、激光功率 18 W^[32]。

2.3 光纤激光器

光纤激光器是把泵浦物质掺入到光纤中,由半导体激光器发出的特定波长激光耦合后,由光纤产生激光,通常在金属切割中应用较多。波长约 1 μm 的光纤激光器,木材对其吸收率相对较低,与其他波长激光对比,以相同工艺参数切割木板时,其切割深度较小,切缝不均匀,易受板材纹理密度的影响;当激光光束移动方向与木纹纹理方向平行时,其切割

深度相对较大且切缝较窄;当激光光束移动方向与木纹纹理方向垂直时,其切割深度相对较小且切缝较宽。传统的光纤激光器切割木板时,由于木板对光纤激光的吸收率较低,切割木板主要依靠高密度激光传导加热,由此光斑处局部通常伴有明显的高温燃烧现象。但光纤激光器的能量转换效率相对较好(在20%~30%),且具有物理尺寸小,功率稳定性好,窄聚焦,高亮度和光束质量良好等优点,故大量研究者将其进行掺铒(Tm)、掺镱等处理^[33-34]。现阶段,有企业开发出了高功率超短脉冲(飞秒、皮秒)掺铒(Tm)光纤激光器,可实现2 μm波段高重复频率、高稳定性的超短脉冲激光输出,有利于提高木材对激光的吸收率,从而实现木材表面的切割雕刻。

3 新型紫外激光在木材加工中的应用趋势

木材激光切割、雕刻等加工中的激光能量利用率与木材对激光的吸收能力有直接关系。因此,在选择激光器时,需重点考虑木材不同成分对激光能量的吸收波长。木材成分构造中,纤维素分子对波长8.30~10.00 μm的激光吸收能力最强,CO₂激光波长通常在10.6 μm,因此,木质材料切割、雕刻和热处理过程中,CO₂激光器应用相对较多。但CO₂激光器的光束质量和能量转换效率都有一定缺陷,转换效率一般为10%~15%,且存在光束引导和聚焦元件的刚性以及整个系统的体积大等问题。木质素分子对波长355 nm紫外短波长激光吸收能力相对最好,其切缝位置的热影响层较薄,切口外观质量好^[16,35]。355 nm超快激光有窄的脉冲宽度和高的单脉冲能量,加工时热效应小,加工效果好、精度高,在木材精细加工领域具有广阔的应用前景。

紫外激光主要可用于激光雕刻和打标,对于木材激光切割,目前还处于探索阶段,木材科学与技术研究领域尚未对其展开广泛研究。紫外激光为短波长,允许较小的理论焦点直径和短脉冲宽度,可进行微加工处理,同时热影响区周围的处理区相对易于控制。在对木材进行紫外激光切割时,可能只能对表层进行选择性的化学改性,而不会破坏木材的纹理,因此具有良好的加工适用性。木质材料的热降解以及木质素和纤维素的热解均具有特征,木材激光加工过程中热影响区(HAZ)的形成一定程度上会影响木材拉伸强度,但目前激光对木材加工处理的热影响区组成研究相对较少,特别是热塑性木质素在木材激光切割表面上富集或降解的情况,可能

对紫外激光加工木材过程机理的研究具有重要意义。紫外激光在木材加工中的应用研究目前相对较少,而事实上,随着家具与木制品智能制造的不断盛行,家具零部件二维码的制作与机器视觉识别的匹配等,都是家具实现智能化制造的关键核心技术,而传统采用印刷或张贴等方式的二维码标识,容易在砂光、喷底漆等工序中被磨损或损坏,由此,采用紫外激光打标,进行二维码植入,是未来家具与木制品智能制造的重要方式。

4 结论

随着新型紫外激光器、CO₂激光器、自由电子激光器的不断研制和开发,激光技术在木材加工中的应用越来越广泛,其在木质材料的雕刻、打标、切割和热处理等领域,均具有广阔的应用前景。未来将会开展更多针对不同激光加工木材的原理、工艺及增值性能方面的科学研究,以期提升木材加工的生产效率和产品质量,并为智能化制造提供更多可能性。

参考文献:

- [1] 吴哲,陈哲,马岩,等.激光烧灼后的木材表面特征比较研究[J].西北林学院学报,2018,33(5):189-194.
WU Z, CHEN Z, MA Y, *et al.* Comparative study on wood surface characteristics after laser burning[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2018, 33(5): 189-194. (in Chinese)
- [2] 杨春梅,蒋婷,马岩,等.木材水导纳秒激光加工设备设计与试验[J].林产工业,2019,46(5):11-16.
YANG C M, JIANG T, MA Y, *et al.* Design and experimental study on water-jet assisted nanosecond laser equipment for wood[J]. China Forest Products Industry, 2019, 46(5): 11-16. (in Chinese)
- [3] SUN J, WANG M M, LI M. Research on laser engraving technology for fabric [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014 (633/634): 777-781.
- [4] BAI H Z, MAHDAVIAN S M. Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO₂-laser [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004 (146): 188-192.
- [5] 汤晓华,任洪娥,姜新波,等.木材的激光去除成型技术方法研究[J].林业机械与木工设备,2002,30(7):10-12.
- [6] 马岩,缪蓁,杨春梅,等.基于LOM技术激光切割薄木模型构建[J].西北林学院学报,2020,35(1):268-272.
MA Y, MIAO Q, YANG C M, *et al.* Modeling of laser cutting of thin wood based on LOM technology[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(1): 268-272. (in Chinese)
- [7] 赵洪刚,刘彦龙,孙耀星,等.激光切割工艺参数对切割樟子松切缝效率的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2016,40(6):203-206.
ZHAO H G, LIU Y L, SUN Y X, *et al.* Effects of parameters of laser cutting on the cutting seam efficiency of Pinus sylves-

- tris wood[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Science Edition, 2016, 40(6): 203-206.
- [8] LORENZ P, ZAJADACZ J, BAYER L, *et al.* Nanodrilling of fused silica using nanosecond laser radiation [J]. Applied Surface Science, 2015, 351: 935-945.
- [9] 赵静. 木质材料激光雕刻加工技术的研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007.
- [10] 朴永守. 木材特种切削加工[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社, 1990.
- [11] 王炳云. 激光切削在木材加工中的应用[J]. 林业科技开发, 1994, (1): 25-27.
- [12] PANZNER M, WIEDEMANN G, HENNEBERG K, *et al.* Experimental investigation of the laser ablation process on wood[J]. Appl Surf Sci., 1998, 127-129: 787-792.
- [13] BARNEKOV V. Laser machining wood composites[J]. Forest Products Journal, 1989, 10: 176-178.
- [14] BAI H Z, MAHDAVIAN S M. Experimental and theoretical analyses of cutting nonmetallic materials by low power CO₂-laser[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004 (146): 188-192.
- [15] KORTSALIOUDAKIS N, PETRAKIS P, MOUSTAIZIS S, *et al.* An application of a laser drilling technique to fir and spruce wood specimens to improve their permeability, Innovation in Woodworking Industry and Engineering Design, ISSN 2367-6663, 2015, pp. 5-13.
- [16] ELTAWAHNI H A, OLABI A G, BENYOUNIS K Y. Investigating the CO₂ laser cutting parameters of MDF wood composite material[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(3): 648-659.
- [17] 赵静, 钱桦, 张厚江, 等. 激光雕刻木材工艺参数的研究[J]. 木材加工机械, 2006, 28(6): 15-17.
- [18] LEONE A C, LOPRESTO V, DEIORIO I. Wood engraving by Q-switched diode-pumped frequency-doubled Nd: YAG green laser[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47: 161-168.
- [19] 乐磊, 王举伟, 唐朝发. 一种激光切割单板拼花装饰制品的工艺研究[J]. 林产工业, 2017, 44(12): 37-39.
- [20] KAČÍK F, KUBOVSKÝ I. Chemical changes of beech wood due to CO₂ laser irradiation[J]. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 2011, 222(1): 105-110.
- [21] VIDHOLDOVÁ Z, REINPRECHT L, IGAZ R. The impact of laser surface modification of beech wood on its color and occurrence of Molds [J]. Bioresources, 2017, 12 (2): 4177-4186.
- [22] PAPP G, BARTA E, PREKLET E, *et al.* Changes in DRIFT spectra of wood irradiated by UV laser as a function of energy [J]. Journal of Photochemistry and Photobiology a-Chemistry, 2005, 173(2): 137-142.
- [23] SUBHASISA N, WAUGH A D G, ORMONDROYD B G A, *et al.* CO₂ laser interactions with wood tissues during single pulse laser-incision[J]. Optics and Laser Technology, 2020, 126: 106069.
- [24] 李尧, 张家骅, 马玉莹. 竹木材料激光打标工艺分析及应用[J]. 林业机械与木工设备, 2015, 43 (4): 34-36.
- [25] KALYANASUNDARAM D, SHEHATA G, NEUMANN C, *et al.* Design and validation of a hybrid laser/water-jet machining system for brittle materials[J]. Journal of Laser Applications, 2008, 20(2): 127.
- [26] FENG S, HUANG C, WANG J, *et al.* Investigation and modelling of hybrid laser-waterjet micromachining of single crystal Si C wafers using response surface methodology[J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2017, 68: 199-212.
- [27] 李晋哲. 木材激光加工质量的微观分析与实验研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [28] 杨铁滨, 侯玉婷, 刘一星, 等. 基于图像的木材机械加工表面质量评价研究[J]. 森林工程, 2015, 31(1): 59-62.
- YANG T B, HOU Y T, LIU Y X, *et al.* Image-based evaluation of machining wood surface quality[J]. Forest Engineering, 2015, 31(1): 59-62. (in Chinese)
- [29] HERNANDEZ-CASTANEDA J C, SEZER H K, LI L. Dual gas jet-assisted fibre laser blind cutting of dry pine wood by statistical modelling [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 50(1/4): 195-206.
- [30] ELTAWAHNI H A, ROSSINI N S, DASSISTI M, *et al.* Evaluation and optimization of laser cutting parameters for plywood materials[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(9): 1029-1043.
- [31] ELTAWAHNI H A, ROSSINI N S, DASSISTI M, *et al.* Evaluation and optimization of laser cutting parameters for plywood materials[J]. Optics and Lasers in Engineering, 51(9): 1029-1043.
- [32] WANG Z, WANG A Q, MA Z. Research of using laser direct marking two-dimensional car code technology on wood[M]. France: Altantis press, 2015.
- [33] GAPONTSEV V. Ultra high power ytterbium fiber lasers [C]. Australia: 1st Pacific International Conference on Laser Materials Processing, Micro, Nano and Ultrafast Fabrication, 2004.
- [34] VERHAEGHE G. The fiber laser: a newcomer for material welding and cutting[J]. Welding Journal, 2005, 84(8): 56-60.
- [35] SATOSHI F, MASAKI N, TAKESHI I, *et al.* Wavelength dependence of machining performance in UV-, VIS- and NIR-laser cutting of wood[J]. Journal of Wood Science, 2016, 62 (4): 316-323.