·前沿综述 Frontier Review·

面向工程木(竹)的旋转摩擦焊接技术研究进展

汪晓宇，张宝琼*
（云南农业大学 热带作物学院，云南 普洱 665099）

摘　要：旋转摩擦焊接技术作为一种无需化学胶黏剂的连接方法，逐渐成为木（竹）材加工的重要研究方向。为此，系统梳理焊接过程的反应机理及影响焊接强度的关键因素，分析旋转摩擦焊接技术在工程木制品中的适用性，分析表明，该技术不仅能有效提升接头的力学性能，还具有降低碳排放及提高材料的可回收性等优点，在层板销接木、胶合木梁等工程木制品中展现出良好的应用潜力；竹材因木质素质量分数较高，在该技术中也具有潜在优势，但仍面临硅质质量分数高、工艺窗口窄等工业化挑战。对目前木材旋转摩擦焊接应用中存在的问题，如现有设备不适应工业化生产、工艺参数优化不全面等进行分析，提出需推进旋转摩擦焊接设备的专业化与自动化水平、系统优化焊接性能与控制参数、深化竹材焊接技术的研究与工业化应用等建议。

关键词：工程木制品；木（竹）材焊接；旋转摩擦焊接；焊接机理；无胶胶合
中图分类号：S781.6　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.7525/j.issn.1006-8023.2026.05.001

Advances in Rotational Friction Welding Technology for Engineered Wood (Bamboo)

WANG Xiaoyu, ZHANG Baoqiong*
(College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Puer 665099, China)

Abstract: Rotational friction welding technology, as a bonding method that does not require chemical adhesives, has gradually become an important research direction in wood (bamboo) processing. This paper systematically reviews the reaction mechanisms of the welding process and key factors influencing weld strength. It analyzes the applicability of rotary friction welding in engineered wood products, concluding that this technology not only effectively enhances joint mechanical properties but also offers advantages such as reduced carbon emissions and improved material recyclability. It demonstrates promising application potential in engineered wood products like laminated dowel-jointed wood and glued laminated beams. Due to higher lignin content, bamboo also holds potential advantages in this technology, but still faces industrialization challenges such as high silica content and a narrow process window. It analyzes existing challenges in rotational friction welding applications, such as equipment unsuitability for industrial production and incomplete process parameter optimization. Recommendations include advancing the specialization and automation of rotational friction welding equipment, systematically optimizing welding performance and control parameters, and deepening research and industrial application of bamboo welding technology.

Keywords: Engineered wood products (EWP); wood (bamboo) welding; rotational friction welding; welding mechanism; adhesive-free bonding

0　引言

随着中国“双碳”目标的深入推进，木材加工产业凭借绿色、可再生的特性以及显著的固碳潜力，迎来了重要发展契机[1]。未来产业将聚焦能耗强度降低与总量控制，借助木材资源充分发挥木制品固碳作用，促进

收稿日期：2026-02-03
基金项目：云南省边境村科技特派队项目(202304BI090032)。
第一作者简介：汪晓宇，硕士，助教。研究方向为木材科学与工程。E-mail：amber990601@163.com
***通信作者：**张宝琼，硕士，副教授。研究方向为园艺植物栽培与育种。E-mail：153512421@qq.com
引文格式：汪晓宇，张宝琼. 面向工程木(竹)的旋转摩擦焊接技术研究进展[J]. 森林工程，2026，42(5)：877-892.
Wang Xiaoyu, Zhang Baoqiong. Advances in rotational friction welding technology for engineered wood (bamboo)[J]. Forest Engineering, 2026, 42(5): 877-892.

低碳化转型[2]。为满足持续增长的需求，木材加工技术不断创新，各类工程木制品(engineered wood products，EWP)不断涌现并得到应用。目前，这些产品已广泛应用于建筑结构，不仅表现出优异的结构性能，还具有成本竞争力与环境友好特性。同传统建材比较，工程木制品在生产与使用过程均呈现出明显可持续性优势[3]。能有效地提升建筑能效，减少碳足迹，成为钢材和混凝土等高碳材料理想替代品[4]。同时，常温压制胶合技术逐渐成熟，工程竹材等生物质材料开始在现代建筑中推广应用，显示出巨大潜力[5]。但工程木制品制造过程对石化基胶黏剂依赖较强，一定程度上制约了产业绿色转型与规模扩张，为突破此瓶颈，需依靠技术创新与工艺优化推动产业向更环保、高效的方向发展。

在此背景下，木材焊接技术凭借其高效与环境友好特性，成为一种受关注的无胶连接方法，该技术摒弃了传统石化基胶黏剂，能有效避免甲醛释放问题[6]。木材焊接技术主要可应用于家具制造、木结构建筑构件连接及各类工程木制品(EWP)的组装领域，适用于临时装配式木结构的现场快速组装、古建筑的修复和加固以及室内木制品的无污染连接。其中，旋转摩擦焊接因机械强度高、操作简便、加工成本低等优势，显示出良好的推广应用潜力[7]。该技术依靠高速旋转木销在预制孔中摩擦产生热量，可在几秒钟内完成连接，并且所得接头强度能与传统胶黏工艺相当。本研究综述国内外学者对木材焊接的机理、影响因素以及在工程木(竹)产品领域中的发展与应用方面所取得研究进展，为后续研究和实际应用提供参考依据。

1 木材焊接技术概述

近十多年来，木材焊接技术作为一种免用胶黏剂的新型连接工艺逐渐兴起。该技术通过木材接触界面间的高速相对摩擦运动，在短时间内产生高温，使木质素、半纤维素等天然聚合物熔融，并在冷却后形成牢固连接，从而实现木材的有效胶合[8]。根据焊接过程中构件相对运动方式的不同，目前木材焊接技术主要分为两大类：线性振动摩擦焊接和旋转摩擦焊接。

线性振动摩擦焊接是一种在特定压力、振幅和频率作用下，用两块或多块木材界面发生高速线性往复摩擦的连接技术[9]。此过程的关键工艺参数包括运动振幅、频率、摩擦压力以及压力持续时间等[10]。线性振动摩擦焊接技术因设备成本较高、能耗较大，且对构件尺寸的适应性有限，在实际工程应用中受到较多限制。因此，本研究将重点讨论旋转摩擦焊接的机理、影响因素及应用。

旋转摩擦焊接是在木构件上预先钻孔，然后将木棒榫在高速旋转的状态下，利用外力以一定的速度将其插入基材的预制孔内，利用摩擦产生的高温高压进行连接，见图 1。在木销到达预定深度后停止旋转并短暂保持压力，熔融层在冷却过程中固化，最终在木销与基材间形成牢固的胶合界面[11]。

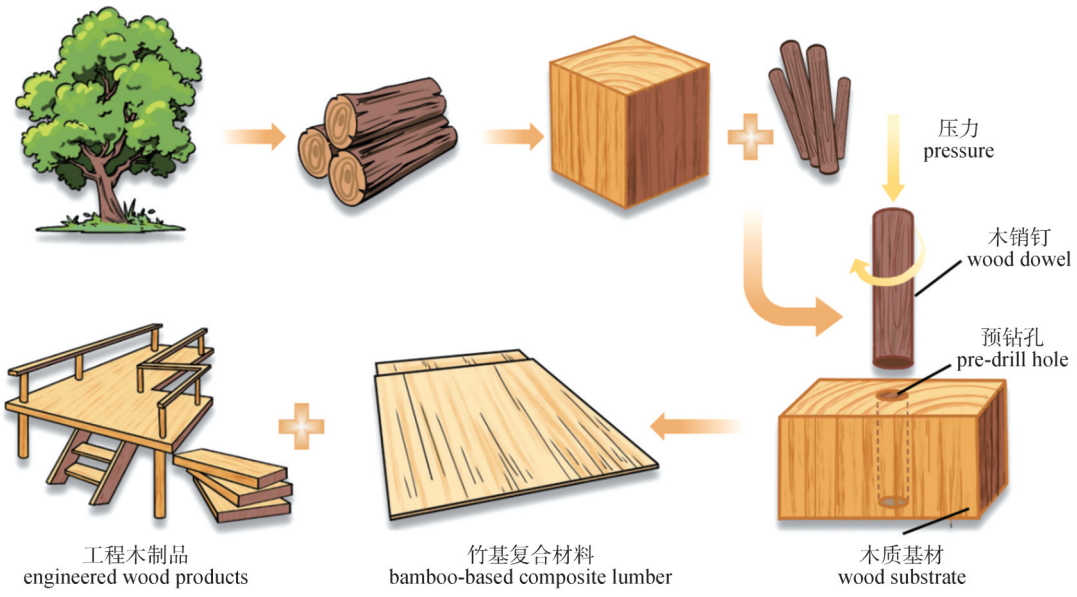


图 1 旋转摩擦焊接技术流程

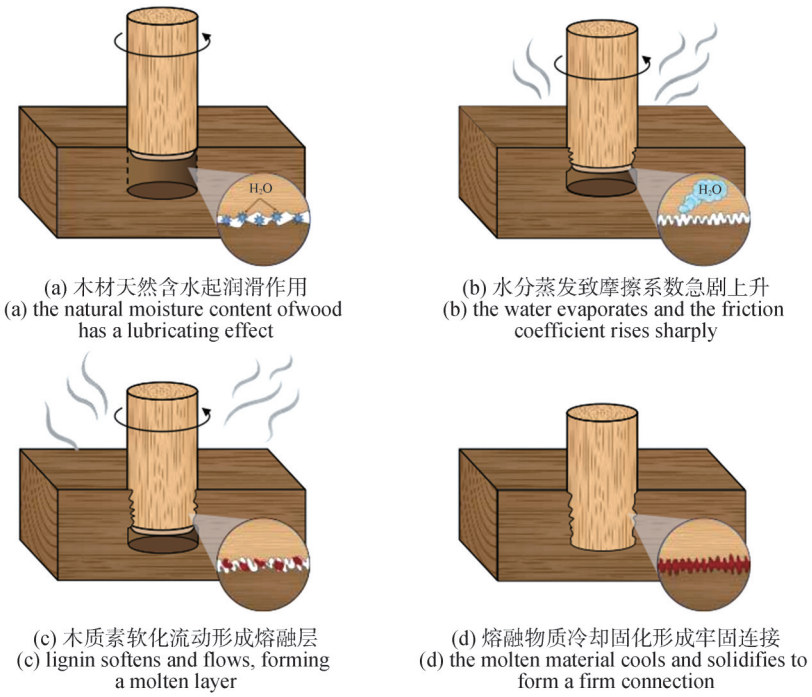
Fig. 1 Flowchart of rotational friction welding technology

2　旋转摩擦焊接过程机理

2.1　化学反应

摩擦焊接与木材的组成成分(木质素、纤维素和半纤维素)在摩擦过程中发生的变化密切相关。木材细胞壁中的纤维素构成骨架,木质素具有热塑性,玻璃化转变温度约为170 ℃。由图2可知,当摩擦温度超过此阈值时,木质素发生软化并流动,停止摩擦后随冷却重新固化,形成牢固的焊接界面[12]。机械摩擦所产生的热量使温度提高,是诱发木材组分熔融和化学变化的关键条件。根据焊接类型与工艺条件的不同,界面温度存在显著差异。利用红外测温技术测定线性摩擦焊接过程中的温度变化发现,线性振动焊接因摩擦面积大、持续时间长,界面最高温度可达320~440 ℃[13-14],旋转摩擦焊接因热释放集中且作用时间短,在常规参数下最高温度为183 ℃[15]。

木材焊接过程中涉及的主要反应集中于焊接初期。高温首先诱发木材组分的物理化学变化,木质素、半纤维素等聚合物在界面熔融,冷却后固化形成连续致密的黏结线[9]。与此同时,一系列化学反应随之发生。部分水解与缩合反应为放热反应,又进一步推升界面温度[16],半纤维素等组分发生热解,同时木质素分子间发生交联,形成三维网络结构[17]。焊接完成后,焊接区域的纤维素结晶度有所增加,半纤维素部分降解,同时产生了糠醛[18]。木质素与糠醛之间持续进行交联反应,不断增强焊接界面的机械强度[14]。



(a) 木材天然含水起润滑作用
(a) the natural moisture content ofwood has a lubricating effect

(b) 水分蒸发致摩擦系数急剧上升
(b) the water evaporates and the friction coefficient rises sharply

(c) 木质素软化流动形成熔融层
(c) lignin softens and flows, forming a molten layer

(d) 熔融物质冷却固化形成牢固连接
(d) the molten material cools and solidifies to form a firm connection

图2　木材旋转摩擦焊接过程机理示意图

Fig. 2　Schematic diagram of mechanism in wood rotational friction welding process

2.2　挥发物化学组成

木材焊接加工时会产生一定的烟雾,研究者对构成此类烟雾的化合物类型关注度颇高。分析表明,焊接界面产生的烟雾主要包含水蒸气、CO_2、木材中聚合碳水化合物与非晶态木质素的降解产物,以及部分挥发性萜烯。焊接过程中,CO_2排放量极低,且未检出CO或甲烷排放,体现出良好的环境友好性[19]。在不同焊接类型中,旋转摩擦焊接产生的烟雾量明显低于线性焊接。这一差异主要源于焊接过程中达到的最高温度不同,旋转摩擦焊接的最高温度显著低于线性焊接,导致木材聚合物热降解程度较轻,烟雾生成量相应减少。

3　旋转摩擦焊接强度的影响因素

旋转摩擦焊接的连接强度影响因素主要包括木材树种、纹理方向、木销与预钻孔的直径比、预处理方式以及关键加工工艺参数等。

3.1　木材树种及纹理方向

当使用相同树种进行焊接时,纹理方向对焊接性能具有显著影响。在相同工艺参数设置下,沿木材顺

纹方向进行焊接所获得的抗拉拔力优于横纹焊接，观察焊接后木销形态发现，横纹焊接对木销直径的削减作用更显著，而顺纹焊接形成的接头整体更接近圆台形状，且直径过渡更为平缓，表现出更优的连接性能[20]。

若采用不同树种进行焊接，焊接质量可能取决于树种的木质素化学组成差异。木质素在针叶材中主要以愈创木基丙烷的形式存在，在阔叶材中主要以愈创木基丙烷和紫丁香基丙烷的形式存在[21]。其中，愈创木基在焊接过程中会发生显著的脱甲醛反应，释放的甲醛参与木质素片段之间的缩合反应，形成更稳定的交联网络。而紫丁香基在焊接过程中相对稳定，无显著缩合反应，缺乏有效交联位点[22]。因此，基材与木销的树种组合会显著影响连接强度。目前的研究多集中于山毛榉、糖枫、桦木和云杉等树种。Belleville等[23]以糖枫和加拿大黄桦为研究对象，比较了二者作为基材与销钉时的焊接抗拔强度。结果表明，加拿大黄桦作基材、糖枫作销钉的组合最佳，抗拔强度可达到(5.8±0.2) MPa。Sun等[22]通过分析糖枫和黄桦在焊接前后的化学差异发现，同为阔叶材，糖枫具有更高比例的愈创木基，而黄桦的紫丁香基比例相对较高。用山毛榉木销旋转摩擦焊接松树-云杉-冷杉(spruce-pine-fir，SPF)层板基材并进行单剪与双剪试验。结果显示，焊接界面结合良好，未出现木销滑脱现象，说明阔叶材与针叶材也可进行焊接[24-25]。此外，即使同为针叶材，密度和木质素质量分数的差异也会影响焊接强度。张吉荣等[26]以桦木作为销钉，对比国产落叶松和欧洲云杉分别作为基材发现，国产落叶松基材的抗拉拔强度与弹性阶段刚度均明显高于欧洲云杉基材。

3.2 木销与预钻孔直径比

木销与预钻孔的直径比(简称孔径比)可增强木销与孔壁间的侧向压力，促进摩擦热积累，同时也为界面提供更充足的熔融木质素，强化焊接带的结构完整性，是影响焊接界面热量生成重要参数。当木销直径远大于预钻孔直径时，界面摩擦力过大，木材过度降解、碳化，反而破坏了结合界面，导致木销难以插入甚至断裂；而当木销直径等于或小于预钻孔时，则因摩擦不足难以达到木质素熔融所需的温度，无法形成有效焊接界面[27]。因此，优化孔径比能避免基材劈裂或木销损伤，保障焊接节点的力学性能与耐久性[28]。在桦木作为销钉的焊接实验中，采用落叶松作为基材，预钻孔径对抗拉拔强度影响不显著，而采用欧洲云杉作为基材时，预钻孔径则表现出较大影响[26]。相关文献中不同树种组合及孔径比的试验结果对比见表1。

表1 文献中不同树种组合及孔径比试验结果对比

Tab. 1 Comparison of experimental results for different species combinations and diameter ratio in literature

基材树种 substrate species	木销树种 dowel species	孔径比 diameter ratio	机械性能 mechanical properties	试验结果 experimental results	参考文献 references
红松 red pine	红松 red pine	1.25	抗拉拔力 pullout resistance	1.217 kN	[20]
黄桦 yellow birch	糖枫 sugar maple	1.26	抗拔强度 withdrawal strength	(5.8 ± 0.2) MPa	[23]
云杉-松木-冷杉 spruce-pine-fir	山毛榉 beech	1.12	抗剪切力 shear resistance	6.127 kN	[24]
云杉-松木-冷杉 spruce-pine-fir	山毛榉 beech	1.20	抗剪切力 shear resistance	3.530 kN	[25]
落叶松 larch	桦木 birch	1.41	抗拉拔力 pullout resistance	2.508 kN	[26]
欧洲云杉 european spruce		1.41	抗拉拔力 pullout resistance	1.856 kN	
落叶松 larch		1.33	抗拉拔力 pullout resistance	2.345 kN	
欧洲云杉 european spruce		1.33	抗拉拔力 pullout resistance	0.998 kN	
糖枫 sugar maple	糖枫 sugar maple	1.26	抗拉强度 tensile strength	(9.2 ± 1.0) MPa	[27]
		1.31	抗拉强度 tensile strength	(3.7 ± 1.1) MPa	
		1.35	抗拉强度 tensile strength	(4.0 ± 0.8) MPa	

3.3　木材的预处理

现有研究对木材进行改性处理的方法主要包括利用天然添加剂以及合成化学制剂等。其中,自然添加剂因对环境与人体影响较小,更具绿色可持续性优势。葵花籽油中含高达80%的亚油酸,具有良好的渗透性和柔软性。经葵花籽油浸渍预处理后的木销在焊接过程中能够有效填充木材孔隙,增强界面结合力,同时增强构件耐水性[29]。经葵花籽油浸渍处理后,焊接接头在24 h水浸泡后的强度保持率显著高于未处理组,同时并未降低其初始胶合强度,显著改善了焊接节点在潮湿环境下的性能稳定性和耐久性,见表2。

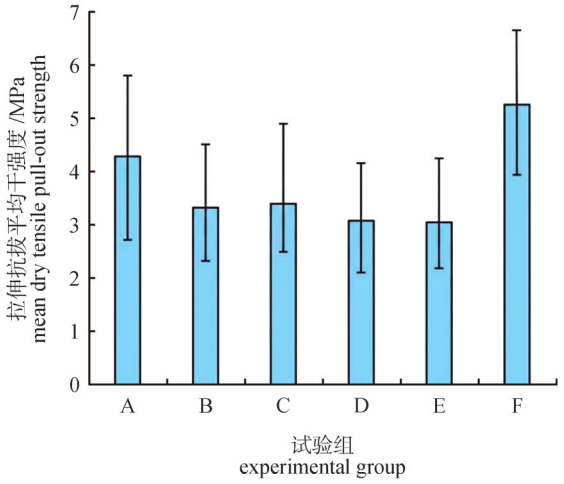
表2　葵花籽油处理与未处理木销焊接接头性能对比

Tab. 2　Comparison of the performance of welded dowel joints between sunflower oil-treated and untreated

处理方法 treatment method	最大弯曲荷载/kN maximum bending load	强度保持率/% strength conserved
非油处理木销 non-oiled dowels	0.98	55.4
油处理木销 oiled dowels	1.08	76.6

桐油作为一种优良的干性油,主要成分是脂肪酸甘油三酯,表现为淡黄色至棕黄色的油状液体,具有特殊的气味。吴嘉伟等[30]对木荷销进行桐油处理发现,不同处理方式均能有效提升试件的抗拉强度。在焊接前进行桐油蒸煮处理,可使桐油充分进入待接合的表面,减轻木材中半纤维素和纤维素在焊接高温下的过量降解,从而避免接合层出现过度碳化的情况。而焊接后涂覆则通过桐油形成的疏水油膜阻隔水分侵入,提升焊接节点的耐水性能。由图3可知,桐油蒸煮与焊接后涂覆组分别使焊接干强度较未处理组提升41.8%和73.4%。图4的电子显微镜(scanning electron microscope,SEM)扫描显示,未处理组焊接界面熔融物质排列分散且存在裂纹,而桐油处理组形成了更连续致密的焊接层,其中焊接后涂覆呈现为厚度不均的叠层结构,显著提高了界面承载能力。

松香是从松树中提取的天然聚合物,含量丰富、可再生且成本低,目前在造纸工业中已成为重要的生物质基化工原料[31]。由于松香优秀的疏水特性和对木材的亲和力,采用松香浸渍处理木材可显著提升耐水性、尺寸稳定性与力学性能[32]。经松香乙醇溶液预处理后,旋转摩擦焊接接头的初始抗拉拔力可达3 178 N,较未处理组提升约156%。在15°C冷水中浸泡142 d后,处理组仍保持1 863 N的湿态强度,显著延长了焊接接头在潮湿环境下的承载寿命[33],见表3。



A. 蒸煮10 min;B. 蒸煮20 min;C. 蒸煮30 min;D. 直接涂覆;E. 无处理对照;F. 焊接后涂覆

A. boiling 10 min; B. boiling 20 min; C. boiling 30 min; D. direct coating; E. untreated control; F. post-welding coating

图3　不同试验组的焊接干强度[30]

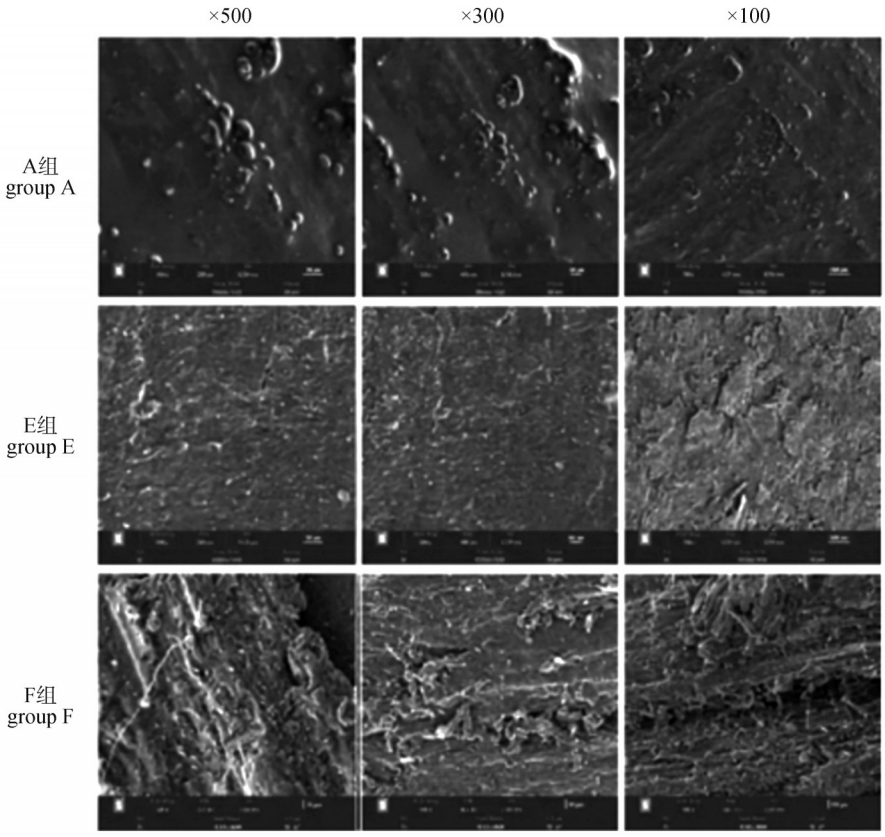
Fig. 3　Dry welding strength of different experimental group[30]

表3　松香处理对旋转摩擦焊接接头耐水性的影响

Tab. 3　Effect of rosin treatment on water resistance of rotational friction welded joints

浸泡时间/d days immersed in water	未处理组抗拉拔力/N tensile strength, untreated	预处理组抗拉拔力/N tensile strength, pretreated
0	1 239	3 178
1	1 678	2 568
10	1 269	2 276
142	1 305	1 863

为更大程度提高木材的耐水性和力学性能,一些化学添加剂被尝试用于处理构件。将木销在浓度为0.1 mol/L的$CuCl_2$溶液中浸渍处理后进行焊接,可显著提高抗拉性能。机制主要源于$CuCl_2$在浸渍过程中诱导半纤维素和纤维素发生酸水解反应,促进木质素等组分的解聚与热解,从而在焊接界面形成更多熔融物质,改善界面结合均匀性[34]。经浓度0.1 mol/L $CuCl_2$溶液浸渍预处理后,旋转摩擦焊接接头的抗拔力显著提升。在最佳焊接时间3 s条件下,处理组抗拔力达4 695 N,较未处理组提升68.3%。氧化磺化联合醋酸锌涂覆的处理方法也能有效提升焊接性能。该处理使焊接层保留大量木纤维,并在摩擦压力下相互缠结,提高胶合强度。表面改性过程中,纤维素与半纤维素部分降解,木质素相对质量分数增加,进一步增强了焊



A. 蒸煮 10 min；E. 无处理对照；F. 焊接后涂覆

A. boiling 10 min; E. untreated control; F. post-welding coating

图 4 木榫焊接界面表面 SEM 扫描[30]

Fig. 4 SEM scanning images on the surface of wood dowel welding interface[30]

接界面的黏接强度。未处理杨木基材的平均干拉伸强度为 1. 04 MPa，而经氧化磺化涂覆醋酸锌处理后，干拉伸强度达到 3. 27 MPa，较未处理组提升 213. 6%，显著优于单一氧化处理或单一磺化处理[35]，见图 5。

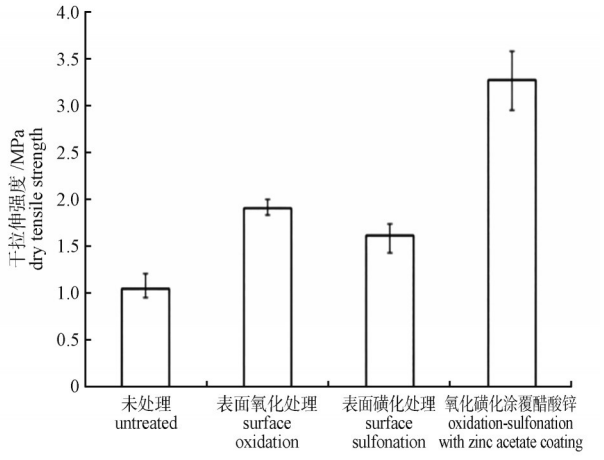


图 5 杨木旋转摩擦焊接干拉伸强度[35]

Fig. 5 The dry tensile strength of poplar rotational friction welding[35]

尽管化学添加剂在提升焊接性能方面展现出良好效果，但其对环境潜在的负面影响仍需关注。部分添加剂在生产和使用过程中可能通过废水排放或挥发进入环境，造成水体污染或空气污染。因此，未来研究应致力于开发更多绿色、低污染的添加剂体系。相关文献中不同添加剂处理方法及结果对比见表 4。

3. 4 旋转速度

当销钉与基材为同种木材时，转速通常设定在 1 000~2 500 r/min，常见取值为 1 000、1 500、2 500 r/min[20]。在异种木材组合中，最佳转速存在差异，例如，山毛榉木销与云杉基材焊接时，转速为 1 500 r/min 可获得最佳抗拉强度。然而，转速过高会导致界面温度急剧上升，引起木质素过度热解甚至炭化，反而会降低焊接强度。当转速升高至 4 000~4 500 r/min 时，接头的抗拉力可降至约 1. 5 kN[36]。采用响应面法进行参数优化发现，在黑云杉基材与糖枫或山核桃木销组合中，最佳焊接转速可进一步降低至 900 r/min[37]。因此，在实际应用中需根据材料组合和目标性能，在中等转速范围内进行优选，以平衡热释放与界面反应程度。

表 4　文献中预处理方法及提升性能对比

Tab. 4 Comparison of pre-processing methods and performance improvements in literature

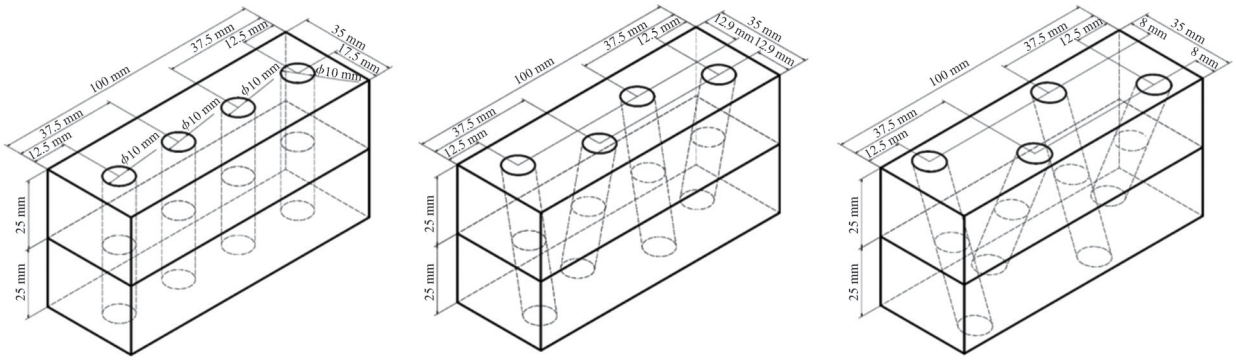
添加剂类型 additive type	材料 material	处理对象 treated component	处理方式 treatment method	提升性能 performance improvement	适用材料类型 applicable material types	参考文献 references
自然添加剂 natural additives	葵花籽油 Sunflower oil	山毛榉木销 Beech wood dowels	深度120 mm浸泡10 min 120 mm immersion for 10 min	耐水性焊接深度 water resistance and welding depth	长尺寸销钉 longer dowels	[29]
	桐油 Tung oil	木荷木销 Wood camphor dowel	10~30 min蒸煮 boiling for 10–30 min	抗拉强度 tensile strength	家具行业连接件 joining components for furniture	[30]
			先涂覆再焊接 coating before welding	表面开裂程度 surface cracking		
			先焊接再涂覆 coating after welding	耐水性 water resistance		
化学添加剂 chemical additives	$CuCl_2$溶液 $CuCl_2$ solution	白桦木销 Birch dowel	0.1 mol/L $CuCl_2$溶液浸泡30 min immersion in 0.1 mol/L $CuCl_2$ solution for 30 min	抗拉性能 tensile properties	建筑材料 building materials	[34]
	氧化磺化联合醋酸锌 Zinc acetate composite	杨木、樟子松、龙脑香基材 Poplar,mongolian pine, Gurjan substrate	喷涂于基材预钻孔内,重复10次 sprayed into pre-drilled holes, 10 cycles	干、湿抗拉强度 dry/wet tensile strength	气干密度较高木材 high air-dry density wood	[35]

3.5　插入速度

销钉的插入速率及加速度是影响焊接接头强度的关键参数,较短的焊接时间通常能获得更高强度的接头。在手工钻焊接等插入速率较低且控制精度有限的场景中,采用加速插入模式(加速度为4~7 m/s^2)可获得较优的接头性能。而在计算机控制的设备中,由于插入速率更高且运动更稳定,采用恒定插入速率反而能取得最佳效果[38]。因此,在实际应用中,若设备控制精度有限,可优先采用较低速率下的加速插入策略;若设备具备高精度控制能力,则宜选用较高且恒定的插入速率,以在较短时间内实现高质量的焊接连接。

3.6　插入角度

在山毛榉不同角度的焊接试验中,插入角度为20°时,试件的抗拉强度明显高于10°和0°的垂直插入条件,见图6。倾斜插入一方面会增大界面剪切应力,另一方面,在相同焊接深度下可获得比垂直插入更大的接触面积,提升连接强度[39]。贾贺然等[40]通过山毛榉木销与SPF基材的旋转摩擦焊接试验,对比了45°、90°和135°三种插入角度的力学性能,见图7。结果表明,135°插入试件因存在绳索效应,平均峰值荷载、初始刚度、极限荷载及延性系数均为最高;而45°插入试件受横向分力影响,各项力学指标均为最低。



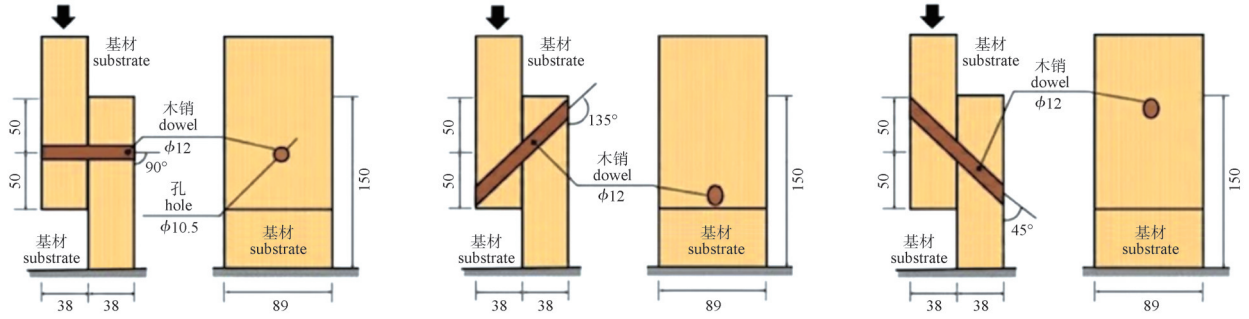
(a) 插入角0°
(a) at 0° insertion angle

(b) 插入角10°
(b) at 10° insertion angle

(c) 插入角20°
(c) at 20° insertion angle

图6　不同插入角度构件示意图[39]

Fig. 6 Schematic diagram of components at different insertion angles[39]



(a) 插入角90°
(a) at 90° insertion angle

(b) 插入角135°
(b) at 135° insertion angle

(c) 插入角45°
(c) at 45° insertion angle

单位: mm
Unit: mm

图7 不同插入角度构件示意图[40]

Fig. 7 Schematic diagram of components at different insertion angles[40]

4 旋转摩擦焊接技术在工程木制品中的应用

目前,工程木制品主要依赖黏合剂或金属紧固件进行连接,在产品使用寿命结束时影响重复利用性、可回收性及整体可持续性,对环境造成较大负担[41]。采用旋转摩擦焊接技术制备的木制品,不仅具备良好的结构强度与稳定性,还显著提升了材料的可回收性。

层板销接木(dowel laminated timber, DLT)是一种无胶无钉、近似全实木的工程木制品,仅由木销和层板组成,常用于梁、墙体和楼板等构件[42]。Omrani等[43]将旋转摩擦焊接技术引入DLT的制造中,采用转速1 600 r/min、插入角度53°、插入时间2~3 s的工艺参数,将木销插入2块木板进行Z字形焊接,见图8。结果表明,该工艺能够使DLT产生足够的强度,且增加销钉数量可进一步提升接头的强度和耐久性。在2 h沸水加速老化测试中,由于Z字形几何构型对焊接界面的物理保护作用,构件表现出良好的耐湿性,焊接界面在湿态及再干燥后仍能保持残余强度,能够抵抗短期极端潮湿环境。

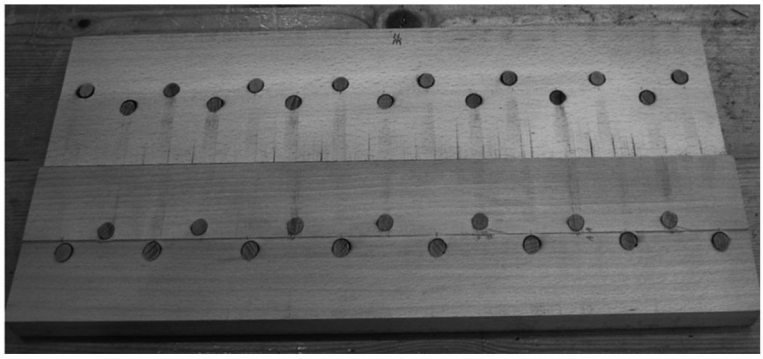


图8 采用Z字形焊接的两块木板[43]

Fig. 8 Two wood pieces joined by zigzag pattern of welded dowels[43]

19世纪末以来,胶合木(glulam)凭借材料利用率高、造型灵活的特点,开始在木结构建筑领域广泛应用[44]。与传统实木锯材相比,胶合木具有更均匀的含水率分布和更稳定的力学性能,而采用旋转摩擦焊接技术替代传统的聚醋酸乙烯酯(PVAc)胶黏剂制备胶合木产品,有助于减少二氧化碳和挥发性有机物(VOCs)的排放,提升材料的可回收性。O'Loinsigh等[45]利用旋转摩擦焊接制备了多层木梁试件,并通过四点抗弯试验证实,该工艺能使梁体有效抵抗层间剪切力与垂直分离拉力。后续研究进一步建立了数值模型,进行参数化分析,优化了梁体的几何参数[46]。Bocquet等[47]通过旋转摩擦焊接技术制备了不同插入角度的双层木梁,并开展四点弯曲试验以评估其力学性能。结果表明,与传统胶合木梁相比,旋转摩擦焊接的木梁在破坏荷载和刚度方面均表现出更优的性能,同时两层木材之间的层间相对位移显著减小,反映出其连接节点具有更高的刚度。当木销以90°垂直植入时,节点主要承受剪切力;而当植入角度调整为30°或45°时,

木销可同时发挥抗剪和抗拔作用。以上研究充分验证了焊接木梁在即时承载条件下的可靠性。然而从结构设计规范的完整性角度来看,目前的研究主要集中在瞬时力学响应,对于持续荷载下的性能尚未充分探索,长期蠕变和湿热机械性能是未来需深入研究的工程基础问题。除了在胶合木中的应用,旋转摩擦焊接技术也被应用于更大尺寸的构件与体系中,例如木悬架楼板。4 m×4 m的木悬架结构楼板,总厚度为216 mm,与标准活动地板的225 mm的厚度相当。楼板在主、次梁交叉节点处采用木销焊接,在实现轻量化的同时,整体刚度较未使用销钉连接的结构提升了14%,见图9和图10。静载试验结果表明,楼板的静位移与振动响应均满足欧洲规范要求[48]。在此基础上,后续研究可进一步拓展至长期蠕变监测和湿度环境下的性能研究,以完善该技术从可行性验证向长期设计寿命评估的转变。相关文献中旋转摩擦焊接技术应用于不同工程木制品的对比见表5。

尽管旋转摩擦焊接技术在工程木产品中已展现出应用潜力,但其与传统机械连接方式在综合力学性能及耐久性等方面的对比研究仍较为缺乏。为突破这一局限,作者此前参与的研究采用木销垂直插入、木销旋转焊接以及金属螺栓3种连接方式制备了工程木构件(图11),并通过施加纵向荷载测试了力学性能,包括峰值荷载、初始刚度、屈服荷载和延展性[49]。3种连接

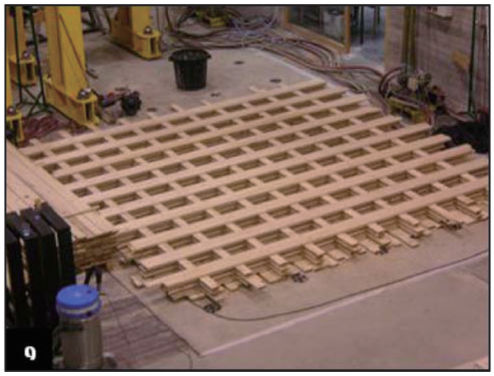


图9　木楼板建造初期照片[48]

Fig. 9　Photo of floor at the beginning of its construction[48]



图10　木楼板建造完成准备测试[48]

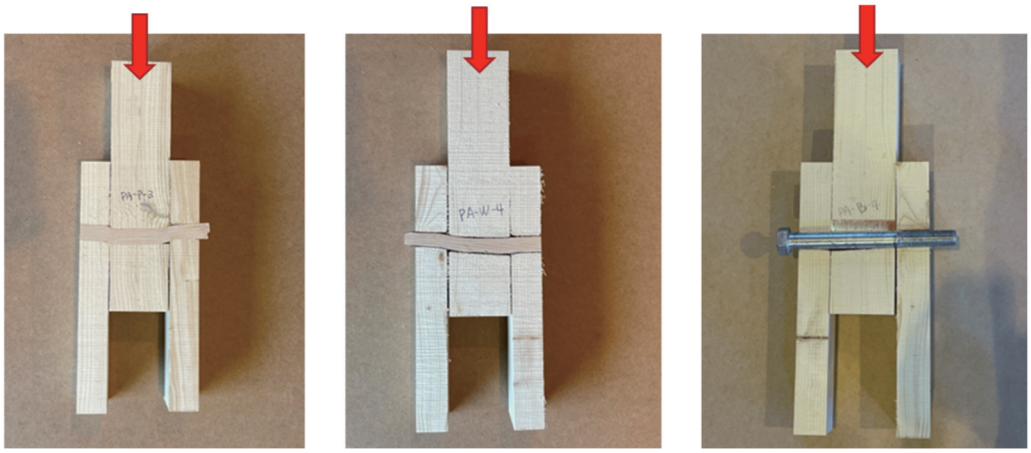
Fig. 10　Photo of floor being completed and ready for testing[48]

表5　旋转摩擦焊接技术应用于不同工程木制品

Tab. 5　The application of rotational welding technology in different engineered wood products

基材树种 substrate species	木销树种 dowel species	工程木制品类型 engineered wood products type	插入角度/(°) insertion angle	机械性能 mechanical properties	试验结果 experimental results	参考文献 references
山毛榉 Commercial beech	山毛榉 Commercial beech	层板销接木 dowel laminated timber	53	抗拉强度 tensile strength	0.77 MPa	[43]
				抗拉刚度 tensile stiffness	4.20 kN/mm	
爱尔兰云杉 Irish spruce	山毛榉 Commercial beech	多层梁 glulam beam	60	抗弯强度 flexural strength	24 MPa	[45]
				抗弯刚度 flexural stiffness	0.56 kN/mm	
云杉 Spruce	山毛榉 Commercial beech	双层梁 double-layer beam	90	剪切应力 shear stress	3.94 MPa	[47]
			45	剪切应力 shear stress	5.38 MPa	
云杉 Spruce	山毛榉 Commercial beech	木楼板 suspended wood floor	90	最大荷载 maximum load	15.52 kN	[48]
				静位移 static deflection	3.02 mm	
				振动频率 vibration frequency	13.73 Hz	

方式的机械性能对比见表6。总体而言，金属螺栓连接的工程木构件在峰值荷载方面表现最佳，而木销垂直插入与旋转焊接的构件则在初始刚度和延展性方面更具优势。在2种木销连接方式中，旋转焊接与垂直插入构件的力学性能相近，但旋转焊接能有效避免加工过程中产生裂纹，显著降低应力集中。这表明该技术在提升工程木构件性能、减少加工损伤方面具有明显优势，同时在层压梁的修复与加固方面展现出巨大潜力。未来工作可深入探索该技术在现代化木结构建筑建造过程中的具体应用与工艺规范，进一步验证工程可靠性并拓展适用范围。



(a) 木销垂直插入 (a) wood dowel push-in
(b) 木销旋转焊接 (b) wood dowel rotational welding
(c) 金属螺栓 (c) metal bolt

图11 3种连接方式制作的构件横切面[49]

Fig. 11 Cross-sections of components made with three connection methods[49]

表6 3种连接方式的工程木机械性能对比[49]

Tab. 6 Comparative mechanical properties of engineered wood with three connection methods[49]

基材树种 substrate species	连接类型 connection type	峰值荷载/kN peak load	初始刚度/(kN·mm^{-1}) initial stiffness	屈服荷载/kN yield load	延展性 ductility
云杉-松木-冷杉 spruce-pine-fir	木销垂直插入 wood dowel push-in	16	14	13	5
	木销旋转焊接 wood dowel rotational welding	14	9	13	3
	金属螺栓 metal bolt	33	5	33	1

综上所述，与传统胶合木销或金属紧固件相比，旋转摩擦焊接木销连接展现出优秀的性能。未来，该技术有望广泛应用于桥梁、养老设施、图书馆、体育场馆等公共建筑中的梁、柱等承重构件制造，为绿色木结构发展提供新的技术路径。

5 竹材焊接研究现状与机理特性

5.1 竹材焊接研究现状

随着全球木材需求持续增加与森林资源日益减少，竹材已成为木材的重要替代材料[50]。在我国，竹材是仅次于木材的第二大工业生物质资源，广泛用于生产梁、柱、板材等建筑构件[51-52]。根据第九次全国森林资源普查数据，中国拥有的竹林资源总面积为641.16万hm^2，在全球竹林总面积中约占三分之一[53]。因此，探索以竹销钉替代传统木销钉的旋转摩擦焊接工艺，不仅能够为工程木竹领域带来高强度的快速装配技术，也有助于拓宽竹材的利用途径。

近年来，越来越多的国内外学者对竹材的焊接表现出兴趣。不同于木材焊接已进入工程应用阶段，竹材焊接研究目前尚处于起步探索阶段，主要聚焦于焊接机理阐释与基础工艺参数优化。Hu等[54]首次将线性焊接应用于木竹夹层复合材料连接工艺。结果表明，竹-木复合焊接界面的拉伸-剪切强度约为4 MPa，可以满足家具行业甚至木材工业的标准。张海洋等[55]对展平毛竹材进行线性焊接研究后发现，毛竹线性焊接可以获得5.9~7.2 MPa的胶合强度，达到了家

具的胶合要求。采用响应面法优化展平毛竹的线性焊接工艺参数,发现焊接压力、振动幅度和焊接时间是影响焊缝抗剪强度的关键因素,其中振动幅度的影响最为显著,焊接压力次之,而焊接时间的影响相对较小[56]。

李素瑕等[57]探讨了以毛竹销与桦木为基材进行旋转摩擦焊接的可行性以及胶合机理。竹销可有效用于旋转摩擦焊接,接头抗拉强度显著高于白乳胶(PVAc)胶接方式。机理分析表明,焊接过程中摩擦热导致竹材中半纤维素部分降解,提高木质素的相对质量分数;同时高温促使木质素发生缩合反应,芳香环结构增多,增强了界面的胶合强度。在毛竹旋转摩擦焊接工艺参数中,孔径比是影响接头性能的关键因素。接头的抗拉强度随孔径比的增大而提高,但当孔径比超过7/10(约1.43)时,强度出现下降趋势[58]。杨鸿达等[59]进一步优化毛竹销旋转摩擦焊接云杉基材的工艺参数,得出较优组合为:竹销含水率12%、孔径比7/10、转速1 270 r/min、插入速度600 mm/min。在此条件下,竹销焊接节点的抗拉拔力较木销提升49.3%。相关文献中毛竹线性摩擦焊接与旋转摩擦焊接的对比见表7。

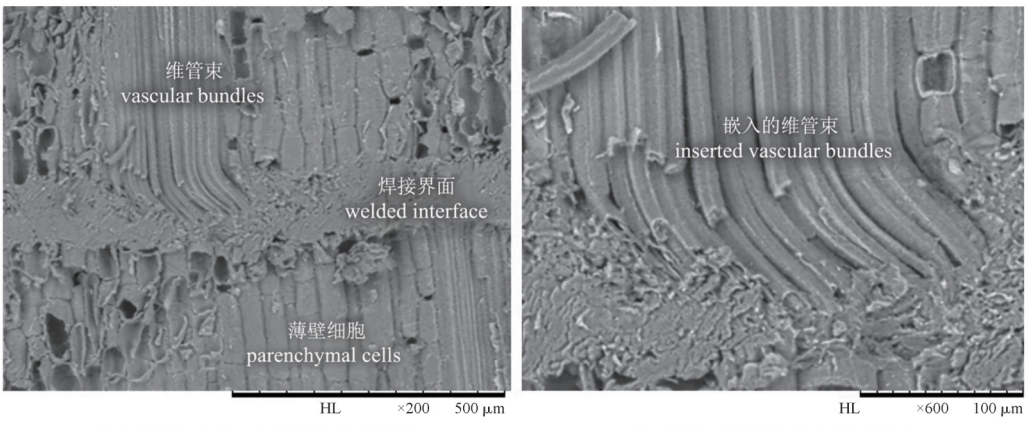
表7　毛竹线性摩擦焊接与旋转摩擦焊接对比

Tab. 7　Comparison of linear friction welding and rotational welding of moso bamboo

焊接类型 welding type	工艺参数影响 influence of process parameters	焊接机理 welding mechanism	胶合力类型 type of bonding force	温度作用 role of temperature	参考文献 references
线性摩擦焊接 linear friction welding	影响由大到小排序为:振动幅度、焊接压力、焊接时间 in descending order of influence:vibration amplitude, welding pressure, welding time	维管束交错形成指状交织,抑制纤维开裂 interlacing of vascular bundles into a finger-like weave, inhibiting fiber cracking	机械摩擦力 mechanical interlocking	软化薄壁细胞 softening of parenchyma cells	[56-57]
旋转摩擦焊接 rotational friction welding	孔径比 diameter ratio	木质素质量分数较高,软化包裹纤维,形成焊接层 high mass fraction content, softening and encapsulating fibers to form a welded layer	化学黏合力 bonding properties	熔融木质素与半纤维素 molten lignin and hemicellulose	[58-59]

5.2　竹材与木材焊接行为的差异分析

尽管竹材与木材同属木质纤维素材料,但二者在焊接机理上存在显著差异。首先,竹材解剖结构与木材明显不同,木材具有同心层状年轮结构,而竹材为维管束散生结构,缺乏横向射线细胞,导致内侧密度较低。在线性焊接中,木材界面通常形成木纤维缠绕于熔融胞间材料的均质化缠结结构。但在多数中低密度木材的端面焊接中,常因摩擦产生裂纹,导致纤维分离。相比之下,竹材主要由维管束和薄壁细胞组成。在毛竹端面对接焊接过程中,坚硬的维管束在摩擦作用下弯曲并突出于焊接表面,承担主要剪切力,周围的薄壁细胞则在高温下熔融,冷却后将维管束牢固黏结,从而有效抑制了端面纤维在磨损过程中的开裂倾向。最终,焊接接头呈现指状交织形貌[60],见图12。此外,竹材密度梯度变化大,从竹青到竹黄密度变化幅度达30%,导致其热传导特性不均匀,与木材相对均质的导热行为形成对比。



(a) 焊接界面下的毛竹端粒对接焊缝
(a) welded end-grain butt joints of moso bamboo

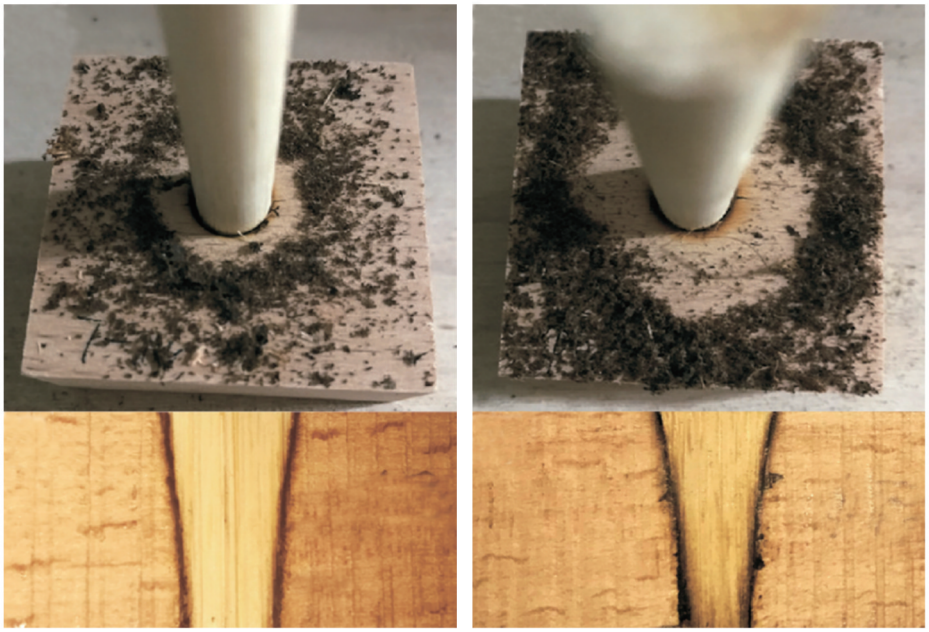
(b) 焊接工艺导致的维管束弯曲
(b) bent vascular bundles resulting from welding process

图12　毛竹端面对接焊接接头的指状交织微观形貌[61]

Fig. 12　Finger-like interwoven microscopic morphology of end-grain butt welded joints in moso bamboo[61]

此外，竹材的化学组成特征显著影响焊接过程。毛竹的木质素质量分数约为25%，普遍高于一般阔叶材[61]。在摩擦焊接中，木质素是主要的黏合成分，焊接过程中游离酚基含量增加，增强了与纤维素间的氢键，从而显著提高接头胶合强度[21]。然而，竹材外层常覆有蜡质层，且表皮存在角质与硅质沉积，这些成分在刨削中难以彻底去除。焊接时，硬质颗粒会增大界面摩擦系数，引起机械振动，导致焊接效果变差[54,62]。

竹材焊接过程中的热行为与木材存在定量差异。焊接高温的维持时间越长，界面处竹材燃烧并形成低强度焊接接头的概率越大[63]。竹销焊接时，界面温度可在2 s内迅速升至300 ℃以上，随后随竹销停止旋转摩擦而逐渐下降，这与木榫摩擦焊接的温度变化曲线相似。当孔径比为10/7时，界面温度可达350~360 ℃，焊接溢出物量适中且颜色较浅，焊缝界面颜色均匀，未出现明显热损伤。若孔径比过大（如10/6），界面温度超过350 ℃且持续时间过长，将导致焊接物质过度碳化，有效胶合面积因过度热降解而减小，反而降低接头强度[57]，见图13。



(a) C组：孔径比10/7
(a) group C: diameter ratio 10/7

(b) D组：孔径比10/6
(b) group D: diameter ratio 10/6

图13 不同孔径比下竹销焊接接头的宏观形貌对比[57]

Fig. 13 Macroscopic morphology of bamboo dowel welded joints with different diameter ratios[57]

5.3 竹材焊接技术难点与发展瓶颈

尽管竹材焊接展现出优异的力学性能，但工业化应用仍面临诸多技术瓶颈。竹材外表皮硅元素质量分数高达9.63%，主要富集于外表皮、气孔及邻近竹青的薄壁细胞中，形成硬质硅质沉积[64]。这些硬质颗粒在旋转焊接过程中会严重磨损焊接工具，增加生产成本。目前缺乏针对高硅质材料的专用耐磨焊接头设计。与木材相比，竹材焊接的工艺参数优化区间更为狭窄。木材旋转焊接的适宜孔径比范围较宽（1.2~1.4），而竹材最优孔径比集中在1.40~1.43。当孔径比小于1.40时，摩擦力过大导致竹销过度磨损、碳化；当孔径比大于1.43时，摩擦力不足，界面温度难以达到木质素熔融要求[57]。此外，竹材对转速的敏感性也高于木材，转速超过1 430 r/min易出现明显碳化，而木材通常可耐受2 500 r/min[59]。同时，现有实验室设备难以满足工业化生产的稳定性要求。旋转摩擦焊接设备多为针对木材特性设计，缺乏适应竹材高硬度、高硅质量分数的专用夹持系统与刀具耐磨处理。

6 结论与建议

在木制品工业化、自动化及智能化生产进程中，旋转摩擦焊接作为一种高效、绿色的无胶连接工艺，不仅符合市场需求和消费者对高品质家居环境的期待，也在环保型室内装饰及部分结构应用中展现出广阔前景。通过对旋转摩擦焊接技术相关文献的系统综述，得出以下结论。

1）旋转摩擦焊接依靠摩擦热使木材胞间层木质素发生玻璃化转变并熔融固化，同时伴随半纤维素热解

及交联反应,形成胶合界面。

2)孔径比、树种类型及预处理是优化焊接性能的主要工艺途径;插入角度的优化也有助于提升接头的综合力学性能。

3)该技术在层板销接木、胶合木梁等工程木制品中已显示出替代传统胶黏工艺的潜力,接头力学性能相当,且具有无甲醛释放、可拆卸回收等绿色优势。然而,该技术在工程竹制品中的应用研究仍较为缺乏,规模化推广尚待推进。

4)竹材因木质素质量分数高、维管束结构特殊,展现出优于木材的焊接强度潜力,但硅质沉积与狭窄的工艺窗口仍是其工业化应用的主要瓶颈。

为推动该技术向工业化、高性能方向发展,可对以下3方面展开探究。

1)推进焊接设备的专业化与自动化开发。现有设备多局限于实验室规模,亟须研发适应工业化生产的高效、可控专用焊接装备,以提升技术适用性与生产效率。通过将摩擦焊接技术与智能化技术深度融合,可构建智能化木材焊接系统,实现工艺参数的自动优化与实时监控,显著提升生产自动化水平,推动技术向智能化方向演进。

2)系统优化旋转摩擦焊接性能与控制参数。系统优化并标准化焊接工艺参数,借助有限元分析等手段深入研究焊接界面的结合与破坏机制。综合考量树种、孔径比、转速、插入速度等多因素的交互影响,建立适用于不同应用场景的工艺参数组合库,从而提升摩擦焊接接头质量的一致性与工艺稳定性。

3)竹材焊接技术的研究与工程应用。竹材旋转摩擦焊接的胶合机理已初步明确,相关工艺参数也为工程竹构件制造提供了基础。后续可建立竹材专用的热传导模型、探索适合竹材高硅质量分数的预处理方法,推动该技术在高性能竹基复合材料、竹木复合梁等工程竹产品中的规模化应用。应重点挖掘其在复合材料组合、复杂结构设计与智能制造场景中的创新应用模式,充分发挥竹材的绿色资源潜力。

参 考 文 献

[1] 张震宇,王雨,李露霏. 浅析“双碳”背景下我国木材加工产业发展趋势[J]. 森林防火,2022,40(2):90-92.
Zhang Zhenyu, Wang Yu, Li Lufei. Analysis on the development status and trend of wood processing industry against the background of carbon peaking and carbon neutralization[J]. Journal of Wildland Fire Science, 2022, 40(2):90-92.

[2] 彭华福,杨诺. 我国林业产业高质量发展策略研究[J]. 林产工业,2023,60(8):84-86.
Peng Huafu, Yang Nuo. Research on the high-quality development strategy of forestry industry in China[J]. China Forest Products Industry, 2023, 60(8):84-86.

[3] Harte A M. Mass timber – the emergence of a modern construction material[J]. Journal of Structural Integrity and Maintenance, 2017, 2(3):121-132.

[4] 张晓凤. 国家“双碳”目标背景下木材在现代建筑中的多元化应用与设计创新[J]. 造纸装备及材料,2024,53(3):68-70.
Zhang Xiaofeng. Diversified application and design innovation of timber in modern architecture under China's national “dual-carbon” target[J]. Papermaking Equipment & Materials, 2024, 53(3):68-70.

[5] 杨世玉,王晓欢,张秀标,等. 展平竹与木材正交胶合材性能研究进展[J]. 世界林业研究,2021,34(3):68-74.
Yang Shiyu, Wang Xiaohuan, Zhang Xiubiao, et al. Research progress in the properties of cross-laminated flattened bamboo and timber[J]. World Forestry Research, 2021, 34(3):68-74.

[6] 何佳容,吴嘉伟,杨洋,等. 圆棒榫旋转摩擦焊接技术的研究进展[J]. 林产工业,2024,61(8):32-38.
He Jiarong, Wu Jiawei, Yang Yang, et al. Research progress on the rotary friction welding technology[J]. China Forest Products Industry, 2024, 61(8):32-38.

[7] Župčić I, Đukić I, Jug M, et al. The influence of different wood modifications on pull-out force of rotary welded dowels[J]. Drvna Industrija, 2023, 74(1):93-103.

[8] 周晓剑,Pizzi A,杜官本. 木材焊接技术(无胶胶合)的研究进展[J]. 中国胶粘剂,2014,23(6):47-53.
Zhou Xiaojian, Pizzi A, Du Guanben. Research progress of wood welding technology (bonding without adhesive)[J]. China Adhesives, 2014, 23(6):47-53.

[9] Gfeller B, Zanetti M, Properzi M, et al. Wood bonding by vibrational welding[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003, 17(11):1573-1589.

[10] Horman I, Busuladžić I, Hajro I, et al. Optimization of friction parameters in the process of wood welding without additional adhesives[C]//26TH DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. 2016.

[11] Leban J M, Pizzi A, Properzi M, et al. Wood welding: a challenging alternative to conventional wood gluing[J]. Scandinavian Journal of Forest Research, 2005, 20(6): 534-538.

[12] Ross R J. Wood handbook: wood as an engineering material[M]. Madison: USDA Forest Service, 1999.

[13] Vaziri M, Berg S, Sandberg D, et al. Three-dimensional fi-

nite element modelling of heat transfer for linear friction welding of Scots pine[J]. Wood Material Science & Engineering, 2014, 9(2): 102-109.

[14] Stamm B. Development of friction welding of wood: physical, mechanical and chemical studies [D]. Lausanne, Swiss: École Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2005.

[15] Zoulalian A, Pizzi A. Wood-dowel rotation welding - a heat-transfer model[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007, 21(2): 97-108.

[16] Ganne-Chédeville C, Properzi M, Leban J M, et al. Wood welding: chemical and physical changes according to the welding time[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008, 22(7): 761-773.

[17] Cornuault P H, Carpentier L. Tribological mechanisms involved in friction wood welding [J]. Tribology International, 2020, 141: 105963.

[18] Yin W, Zheng Y, Lu H, et al. Tribological and mechanical properties of wood dowel rotation welding with different additives [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2023, 37(3): 411-425.

[19] Omrani P, Masson E, Pizzi A, et al. Emission gases in linear vibration welding of wood[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009, 23(1): 85-94.

[20] 朱海, 陈家瑞, 张剑, 等. 木榫旋转摩擦焊接抗拉拔力的影响因素[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(6): 75-79.
Zhu Hai, Chen Jiarui, Zhang Jian, et al. Influencing factors of pullout resistance on wood-dowel rotary friction welding [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2020, 48(6): 75-79.

[21] 周晓剑, 杜官本. 木材焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 35-36.
Zhou Xiaojian, Du Guanben. Wood welding technology [M]. Beijing: Science Press, 2019: 35-36.

[22] Sun Y, Royer M, Diouf P N, et al. Chemical changes induced by high-speed rotation welding of wood—application to two Canadian hardwood species [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2010, 24 (8/9/10): 1383-1400.

[23] Belleville B, Stevanovic T, Pizzi A, et al. Determination of optimal wood-dowel welding parameters for two North American hardwood species[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013, 27(5/6): 566-576.

[24] 贾贺然, 高颖, 孟鑫淼, 等. 木榫旋转焊接节点剪切试验研究与理论分析[J]. 林业工程学报, 2022, 7(1): 38-44.
Jia Heran, Gao Ying, Meng Xinmiao, et al. Shear tests and theoretical analysis of wood-dowel rotation welding joints [J]. Journal of Forestry Engineering, 2022, 7(1): 38-44.

[25] 马瑞煜, 王宁, 高颖, 等. 不同构造尺寸下山毛榉木销旋转焊接SPF基材连接节点的抗剪性能[J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(5): 143-153.
Ma Ruiyu, Wang Ning, Gao Ying, et al. Shear performance of beech dowel rotary welded SPF substrate joints with different structure dimensions [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(5): 143-153.

[26] 张吉荣, 高颖, 徐霖, 等. 落叶松为基材的木榫旋转焊接性能及机理研究[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 229-234.
Zhang Jirong, Gao Ying, Xu Lin, et al. Properties and mechanism of larch with wood-dowel rotation welding[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(4): 229-234.

[27] Rodriguez G, Diouf P, Blanchet P, et al. Wood-dowel bonding by high-speed rotation welding—application to two Canadian hardwood species [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2010, 24(8/9/10): 1423-1436.

[28] Zhu X, Gao Y, Yi S, et al. Mechanics and pyrolysis analyses of rotation welding with pretreated wood dowels [J]. Journal of Wood Science, 2017, 63(3): 216-224.

[29] Segovia C, Zhou X, Pizzi A. Wood blockboards for construction fabricated by wood welding with pre-oiled dowels [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013, 27(5/6): 577-585.

[30] 吴嘉伟, 李素瑕, 何佳容, 等. 桐油处理对木材摩擦焊接界面的保护机理[J]. 西北林学院学报, 2024, 39(6): 223-230.
Wu Jiawei, Li Suxia, He Jiarong, et al. Characterization of protection mechanism of wood friction welding interface by tung oil treatment [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2024, 39(6): 223-230.

[31] Zhang J, Gao Y, Zhang J, et al. Influence of pretreated wood dowel with $CuCl_2$ on temperature distribution of wood dowel rotation welding [J]. Journal of Wood Science, 2018, 64(3): 209-219.

[32] Dong Y, Yan Y, Wang K, et al. Improvement of water resistance, dimensional stability, and mechanical properties of poplar wood by rosin impregnation [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2016, 74(2): 177-184.

[33] Pizzi A, Mansouri H R, Leban J M, et al. Enhancing the exterior performance of wood joined by linear and rotational welding[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011, 25(19): 2717-2730.

[34] Belgacem M N, Gandini A. Monomers, polymers and composites from renewable resources [M]. Amsterdam: Elsevier, 2011.

[35] 孙启禹. 提高杨木摩擦焊接胶合性能研究[D]. 南京:南京林业大学,2019.
Sun Qiyu. Study on enhancement gluability of poplar friction welding [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2019.

[36] Leban J M, Mansouri H R, Omrani P, et al. Dependence of dowel welding on rotation rate [J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 2008, 66(3): 241-242.

[37] Pu X. Optimization of machining parameters of rotational welding technology [D]. Fredericton: University of New Brunswick, 2020.

[38] Auchet S, Segovia C, Mansouri H R, et al. Accelerating vs constant rate of insertion in wood dowel welding [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2010, 24(7): 1319-1328.

[39] Belleville B, Segovia C, Pizzi A, et al. Wood blockboards fabricated by rotational dowel welding [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011, 25(20): 2745-2753.

[40] 贾贺然,王宁,孟鑫淼,等. 倾斜角度对木销旋转焊接节点抗剪性能的影响[J]. 广西林业科学,2021,50(3):252-258.
Jia Heran, Wang Ning, Meng Xinmiao, et al. Effects of inclined degree on shear performance of wood-dowel rotation welding joints [J]. Guangxi Forestry Science, 2021, 50(3): 252-258.

[41] Chang W S, Nearchou N. Hot-pressed dowels in bonded-in rod timber connections [J]. Wood and Fiber Science, 2015, 47(2): 199-208.

[42] 付海燕,何敏娟. 层板销接木性能研究进展[J]. 建筑材料学报,2023,26(10):1117-1128.
Fu Haiyan, He Minjuan. Performance of dowel laminated timber [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(10): 1117-1128.

[43] Omrani P, Bocquet J F, Pizzi A, et al. Zig-zag rotational dowel welding for exterior wood joints [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007, 21(10): 923-933.

[44] Anshari B, Guan Z, Komatsu K, et al. Explore novel ways to strengthen glulam beams by using compressed Japanese cedar [C]//2010 11th World Conference on Timber Engineering (WCTE). 2010: 20-24.

[45] O'loinsigh C, Oudjene M, Shotton E, et al. Mechanical behaviour and 3D stress analysis of multi-layered wooden beams made with welded-through wood dowels [J]. Composite Structures, 2012, 94(2): 313-321.

[46] O'loinsigh C, Oudjene M, Ait-Aider H, et al. Experimental study of timber-to-timber composite beam using welded-through wood dowels [J]. Construction and Building Materials, 2012, 36: 245-250.

[47] Bocquet J F, Pizzi A, Despres A, et al. Wood joints and laminated wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007, 21(3/4): 301-317.

[48] Bocquet J F, Pizzi A, Resch L. Full-scale industrial wood floor assembly and structures by welded-through dowels [J]. Holz als Roh-und Werkstoff, 2007, 65(2): 149-155.

[49] Wang X Y. Mechanical performance of timber connection made by wood welding technique [D]. Fredericton: University of New Brunswick, 2022.

[50] 刘学莘. 竹材特征对层积材性能的响应及环境效益影响研究[D]. 哈尔滨:东北林业大学,2020.
Liu Xueshen. Study on the effect of bamboo characteristics on the properties of laminated lumber and its environmental benefits [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.

[51] Li Y J, Xu B, Zhang Q S, et al. Present situation and the countermeasure analysis of bamboo timber processing industry in China [J]. Forestry Science and Technology Development, 2016, 30(1): 2-7.

[52] 罗蓓,何蕊,杨燕,等. 竹材资源分布及其在建筑中的应用[J]. 西南林业大学学报(社会科学),2019,3(5):44-47.
Luo Bei, He Rui, Yang Yan, et al. Distribution of bamboo resource and its application in architecture [J]. Journal of Southwest Forestry University (Social Sciences), 2019, 3(5): 44-47.

[53] 国家林业和草原局. 中国森林资源报告(2014—2018)[M]. 北京:中国林业出版社,2019:10-11.
National Forestry and Grassland Administration. China forest resources report (2014—2018) [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2019: 10-11.

[54] Hu J B, Pizzi A. Wood - bamboo - wood laminated composite lumber jointed by linear vibration - friction welding [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2013, 71(5): 683-686.

[55] 张海洋,周曦禾,卢晓宁,等. 毛竹线性振动摩擦焊接无胶胶合的研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2015,39(5):135-138.
Zhang Haiyang, Zhou Xihe, Lu Xiaoning, et al. Study on the bonding strength of the linear-vibration mechanical welded Moso bamboo [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2015, 39(5): 135-138.

[56] Zhang H, Pizzi A, Lu X, et al. Optimization of tensile shear strength of linear mechanically welded outer-to-

inner flattened moso bamboo (Phyllostachys pubescens) [J]. BioResources, 2014, 9(2): 2500-2508.

[57] 李素瑕, 张海洋, 程良松, 等. 毛竹销(钉)的高速旋转摩擦焊接性能研究[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(4): 225-232, 248.
Li Suxia, Zhang Haiyang, Cheng Liangsong, et al. Bonding properties of bamboo dowel (nail) welded to wood with high speed rotation[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2021, 36(4): 225-232, 248.

[58] Li S, Zhang H, Shu B, et al. Study on the bonding performance of the moso bamboo dowel welded to a poplar substrate joint by high-speed rotation[J]. Journal of Renewable Materials, 2021, 9(7): 1225-1237.

[59] 杨鸿达, 王宁, 孟鑫淼, 等. 竹榫旋转焊接工艺参数及机理探究[J]. 北京林业大学学报, 2022, 44(2): 141-150.
Yang Hongda, Wang Ning, Meng Xinmiao, et al. Study on process parameters and mechanism of bamboo dowel rotation welding[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2022, 44(2): 141-150.

[60] Zhang H, Pizzi A, Lu X, et al. Study of the end-grain butt joints obtained by friction welding of moso bamboo[J]. BioResources, 2017, 12(3): 6446-6457.

[61] 张齐生. 中国竹材工业化利用[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995: 35-41.
Zhang Qisheng. Industrial utilization of bamboo in China [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 1995: 35-41.

[62] Amada S, Ichikawa Y, Munekata T, et al. Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo[J]. Composites Part B: Engineering, 1997, 28(1/2): 13-20.

[63] Pizzi A, Leban J M, Kanazawa F, et al. Wood dowel bonding by high-speed rotation welding[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004, 18(11): 1263-1278.

[64] 马欣欣, 王游, 王佳军, 等. 热解过程中竹材灰分组成变化及硅的转化分布规律[J]. 林业科学, 2025, 61(2): 172-179.
Ma Xinxin, Wang You, Wang Jiajun, et al. Changes in ash composition of bamboo during pyrolysis and the distribution pattern of silicon transformation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2025, 61(2): 172-179.