

落叶松为基材的木榫旋转焊接性能及机理研究

张吉荣,高颖*,徐霖,罗翔亚,朱旭东

(北京林业大学 木质材料科学与应用教育部重点实验室,木材科学与工程北京市重点实验室,北京 100083)

摘要:选取国产落叶松为木榫旋转焊接基材,对其抗拉拔性能及反应机理进行研究。通过对基材上不同预钻孔/木榫直径比抗拉拔试验,以及木榫直接敲入方式的抗拉拔的对比试验,研究了各因素对焊接性能的影响,并将其结果与欧洲云杉基材进行比较。通过 FTIR 对落叶松焊接基材情况下木榫及焊接界面进行了化学机理分析。结果表明,木榫旋转焊接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;不同预钻孔径对落叶松基材的抗拉拔强度影响不大,但对欧洲云杉影响较大;木榫旋转焊接能够极大提高木榫与基材连接节点的抗拉拔强度,其中落叶松基材提高了 416%,而欧洲云杉仅提高了 177%。FTIR 表明木榫旋转焊接过程中纤维素、半纤维素、木质素发生热解与熔融,冷却后形成高强度的焊接界面。

关键词:木榫旋转焊接;落叶松;抗拉拔强度;刚度;预钻孔径;FTIR

中图分类号:S781.21 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2017)04-0229-06

Properties and Mechanism of Larch with Wood-dowel Rotation Welding

ZHANG Ji-rong,GAO Ying*,XU Lin,LUO Xiang-ya,ZHU Xu-dong

(Beijing Forestry University,MOE Key Laboratory of Wooden Material Science and Application,Beijing Key Laboratory of Wood Science and Engineering,Beijing 100083,China)

Abstract:In order to study the pullout resistance properties and reaction mechanism of wood-dowel rotation welding, this paper discussed the effects of different pre-drilling diameters and difference between hammered method. Larch was selected as the research object and was compared with European spruce welding substrate. The chemical mechanism of the wood-dowel and joint interface was studied by FTIR. The test results indicated that the larch showed higher pullout resistance strength and stiffness than European spruce. The different pre-drilling diameters had little effect on the pullout resistance of larch substrate, but a significant impact on European spruce. Application of wood-dowel rotation welding could greatly improve the pullout resistant strength of the joint. The larch substrate increased by 416%, while European spruce increased by 177%. FTIR analysis indicated that heat degradation of cellulose, hemicellulose and lignin occurred during the process of wood-dowel welding by high-speed rotation finally it formed a high-strength weld interface.

Key words:wood-dowel rotation welding; larch; pullout resistance; stiffness; pre-drilling diameter; FTIR

焊接技术在热塑性材料领域已取得巨大进展,主要工作原理是通过摩擦生热使热塑性材料软化、融合、冷却后形成“胶合”界面层。木材是一种天然

高分子材料,摩擦生热后可将热量传递给木材细胞,导致木质素和半纤维素受热发生软化、融合,并在界面层生成交联网络结构,冷却固化后实现无胶胶

收稿日期:2016-10-31 修回日期:2017-01-03

基金项目:国家林业局林业公益性行业科研专项:低质人工林木材家具制造关键技术与示范(201404502);北京市支持中央在京高校共建项目:户外木结构景观建筑材料特性及应用研究(2015GJ-01);北京林业大学热点追踪项目(2016BLRD03)。

作者简介:张吉荣,女,在读硕士,研究方向:木质复合材料。E-mail:zhangjirong@bjfu.edu.cn

*通信作者:高颖,女,博士,副教授,研究方向:木质结构和木质复合材料。E-mail:gaoying@bjfu.edu.cn

合^[1]。木材焊接主要分为线性摩擦焊接和木榫旋转焊接 2 大类,是一种环境友好型工艺技术,回收再利用率高,价格低廉、操作方便,符合绿色低碳、健康环保的社会要求,具有广阔的应用前景^[2]。

影响木材焊接效果的因素很多,线性焊接的影响因素主要包括:树种、木材含水率、纹理方向、焊接时间、压力、预处理、焊接进给速度等。对于木榫旋转焊接,除了以上因素外,还包括转速、插入角度以及木榫直径与预钻孔直径的差异关系等。国内外众多学者针对树种对焊接强度的影响进行了研究,G. Rodriguez^[3]等对比了桦木与枫木对木榫焊接强度的影响,发现枫木具有更加优异的焊接性能,即桦木焊接强度与使用 PVAc 胶合强度相当,而枫木则明显强于 PVAc 胶合强度。B. Belleville^[4]等于 2013 年研究发现,木榫旋转焊接界面层的性能更多地取决于木榫的树种,因为在焊接过程中,胶合界面上的熔融物质大多来自木榫。对于木榫直径与基材预钻孔径差异对焊接强度的影响,J. F. Bocquet^[5]等研究发现木榫直径略大于基材预钻孔直径 2 mm 左右时,得到的焊接强度最大。F. Kanazawa^[6]等也证实了木榫与基材预钻孔的直径比为 1.25 的时候,焊接性能最佳。

落叶松(*Larix gmelinii*)是我国主要用材树种,分布面积已超过 1 050 万 hm^2 ,蓄积量达到 9.2 亿 m^3 。落叶松木材顺纹抗压强度和静曲强度在针叶材中位居前列,力学性能优良,是常用的结构用工程材料^[7]。本研究选用落叶松作为木榫旋转焊接基材进行研究并与欧洲云杉进行对比,分析了国产材与国外常用树种的力学性能差异,为国产材在木材焊接领域的高效利用提供重要试验依据;通过探讨摩擦焊接与非焊接连接方式的差异,揭示了木榫旋转焊接的化学反应机理;通过比较不同预钻孔径与木榫直径的焊接试件的抗拉拔强度,为木榫旋转焊接技术提供理论依据和工艺基础。

1 材料与方法

1.1 材料

试验材料分为木榫和基材。木榫采用桦木(*Betula* spp.)树种,直径分别为 10 mm 和 12 mm,长度为 100 mm。基材选用落叶松和欧洲云杉(*Picea abies*),其规格尺寸为 60 mm×60 mm×40 mm(长×宽×高)。木榫和基材分别放置于温度 20℃、相对湿度 65% 的恒温恒湿环境中,调节含水率至 12%。

1.2 试验方法

1.2.1 试件制备 试件分为焊接试验组和非焊接

试验组。对于焊接试验组,分别在落叶松和欧洲云杉基材弦切面上预钻孔,孔径分别为 7.5、8.5 mm 和 9.5 mm,深度为 30 mm。其中,7.5 mm 孔径用于直径 10 mm 木榫焊接试件的制备,作为焊接试验组 7.5/10^[6],8.5 mm 和 9.5 mm 孔径用于直径 12 mm 木榫焊接试件的制备,作为焊接试验组 8.5/12 和焊接试验组 9.5/12^[8]。试件制备示意图如图 1,使用设备为 PROXXON-TBH 型台式钻床(图 2),所有焊接试验中采用的转速均为 $980 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ ^[9],进给速度为 $15 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ ^[10-11],焊接深度为 30 mm。另外,对于非焊接试验组,分别在落叶松和欧洲云杉基材弦切面预钻直径 7.5 mm、深度 30 mm 的孔,采用木槌将 10 mm 直径木榫直接敲入基材预钻孔中,作为非焊接试验组 7.5/10。试件制备完成后放置于恒温恒湿环境中 7 d。

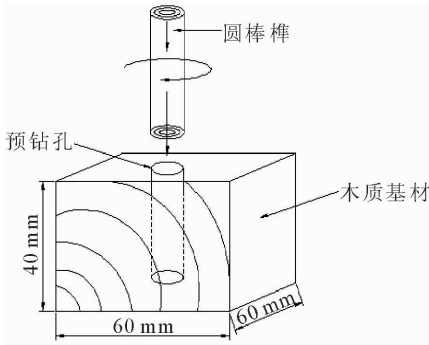


图 1 木榫旋转焊接试件示意

Fig. 1 Wood-dowel rotation welding drawing



图 2 台式钻床

Fig. 2 Desktop drilling machine

1.2.2 力学性能检测 参照国家标准 GB/T 14018-2009《木材握钉力试验方法》,测定木榫旋转焊接节点抗拉拔强度。试验设备为万能力学试验机 MMW-50(图 3),利用特制夹具对试件进行固定,木榫穿过下端带有孔的 U 字型固定装置并使基材贴于下表面,上端夹持装置将木榫夹紧,夹持长度约为 40 mm。测试过程中采用 $2.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 加载速度下拉木质基材,直至试件被完全破坏,测试停止。

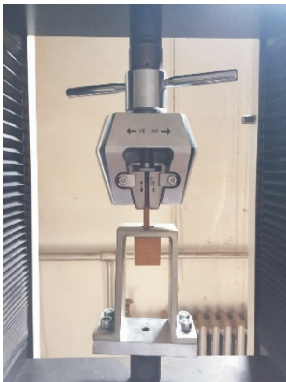


图 3 抗拉拔测试夹具示意

Fig. 3 Pullout resistance test fixture drawing

焊接试验组与非焊接试验组均采用此方法和设备进行力学性能测试。

2 结果与分析

2.1 落叶松基材对抗拉拔强度性能的影响

试验结果表明,不同树种基材对木榫旋转焊接试件的抗拉拔性能具有较大的影响。由表 1 可知,在相同条件下,落叶松作为基材的木榫旋转焊接抗拉拔强度均>欧洲云杉,其中,7.5/10 试验组高 135%,8.5/12 试验组高 35.1%,9.5/12 试验组高 75.5%。7.5/10 焊接试验组 2 种基材各制备试件 12 组,其中欧洲云杉焊接试验组有效试件 12 组,落叶松焊接试验组由于在加工过程中局部扭矩过大以及测试过程木榫断裂等原因导致 6 组试件失效,有效试件 6 组。当使用落叶松作为基材时,平均抗拉拔强度能够达到 2.345 kN,但由于木榫的节子等缺陷导致木榫自身抗拉强度较低,从而引起试验中木榫提前断裂,所以木榫的质量需要作为一个重要的考虑因素。当使用欧洲云杉作为基材时,平均抗拉拔强度仅能够达到 0.998 kN。8.5/12 焊接试验组落叶松基材与欧洲云杉基材的有效试件各 21 组,9.5/12 焊接试验组有效试件各 13 组,其测试结果也同样表明使用落叶松作为焊接基材的平均抗拉拔强度>欧洲云杉。

选取荷载-位移曲线的 0.1 P_{max} 与 0.4 P_{max} 2 点连线的斜率作为弹性阶段刚度,其中 P_{max} 为抗拉拔最大荷载。由图 4 可知,在相同条件下,落叶松作为基材的木榫旋转焊接抗拉拔弹性阶段刚度均>欧洲云杉,其中,7.5/10 试验组高 33.4%,8.5/12 试验组高 22.2%,9.5/12 试验组高 36.8%。这主要是由于落叶松的材质较欧洲云杉更密实,木榫在旋转焊接插入基材预钻孔的过程中,落叶松基材能够提供更大的侧压力和更多的木质材料,促进焊接过程中木榫与落叶松基材木质组分的充分接触摩擦与融

表 1 木榫旋转焊接及直接敲入基材的抗拉拔性能

Table 1 The pullout resistance of welded joints and hammered joints

基材树种	预钻孔直径/ 木榫直径	最大荷载 /kN	加工方式
落叶松	7.5/10	2.345	木榫旋转焊接
欧洲云杉		0.998	
落叶松		0.454	木榫直接敲入
欧洲云杉		0.360	
落叶松	8.5/12	2.508	木榫旋转焊接
欧洲云杉		1.856	
落叶松	9.5/12	2.712	木榫旋转焊接
欧洲云杉		1.545	

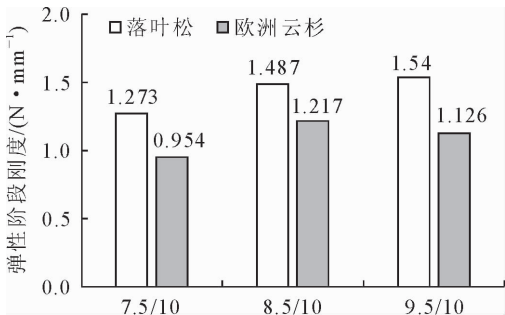


图 4 不同树种基材对弹性阶段刚度的影响

Fig. 4 Effects of different specimens on the stiffness

合^[12]。所以,在木榫旋转摩擦焊接技术中,国产材落叶松较欧洲云杉性能更为优越。

观察 2 组木榫表面及断裂处,发现木榫有节子等微小缺陷。对拉拔出的木榫部分进行观察后发现,木榫焊接端部有 3 mm 左右未能够与木材充分接触焊接,落叶松焊接试验组较为明显(图 5),主要是由于在旋转焊接过程中,木榫与基材预钻孔内壁的摩擦导致木榫端部有较大的磨损,当旋转焊接至预钻孔底部时,木榫端部没有充足的材料与基材发生摩擦反应^[13-14]。在焊接过程中,木材组分热解产生的熔融物质流动、冷却固化后导致木榫与预钻孔内壁紧密的结合在一起。观察对比 2 组木榫的外观性状,落叶松焊接试验组木榫表面有一层黑色粉末状熔融物质(图 5),起到了粘结的作用,欧洲云杉焊接试验组木榫表面呈现光滑的透明状(图 6),虽然有旋转摩擦的作用力,但是木榫与基材未能够充分挤压形成融合反应,没有产生足够的熔融物质^[15]。

2.2 不同预钻孔径对抗拉拔性能的影响

3 种不同预钻孔径对木榫旋转焊接试件的抗拉拔性能影响如图 7,采用落叶松作为焊接基材,不同的预钻孔径与木榫直径因素对抗拉拔强度影响不大,而采用欧洲云杉作为基材时,预钻孔径对抗拉拔强度影响较大,其中,8.5/12 试验组最大,分别比 7.5/10 试验组高出 86%,比 9.5/12 试验组高出 20.0%。

不同预钻孔径与木榫直径对落叶松的弹性阶段

刚度具有一定影响(图 8),其中 9.5/12 试验组的弹性阶段刚度最大,比 8.5/12 试验组高 3.6%,说明不同孔径对弹性阶段刚度稍有影响,比 7.5/10 试验组高出 21.0%,说明木榫直径越大,焊接强度越高。弹性阶段刚度主要用于衡量焊接部位在承受相同荷载条件下的位移变化量。所以针对材质密实的落叶松,本试验范围内,在抗拉拔强度相当的情况下,当设计具有一定位移缓冲量的构件时,则需要选用弹性阶段刚度较小的 7.5/10 试验组,因为弹性阶段刚度越小,则在同等受力情况下能够承受的位移量越大,越能维持构件的整体性;当设计刚性连接构件时,需要选用弹性阶段刚度较大的 9.5/12 试验组,对构件的刚接稳定性影响较小,不易产生变形。采用欧洲云杉作为焊接基材时,弹性阶段刚度受孔径影响较大,其中 8.5/12 试验组最大,分别比 7.5/10 试验组高出 27.6%,比 9.5/12 试验组高出8.1%。



图 5 木榫端部 3 mm 未充分焊接

Fig. 5 Wood-dowel ends 3 mm not fully welded



图 6 木榫表面光滑透明状

Fig. 6 Wood-dowel surface smooth and transparent

2.3 焊接试验组与非焊接试验组的抗拉拔强度对比

采用木榫旋转焊接和非焊接法(即直接敲入法)得到不同加工方式对试件连接的抗拉拔强度(表 1),将 10 mm 直径木榫直接敲入预钻孔径均为 7.5 mm 的 2 种基材,采用落叶松基材得到的抗拉拔强

度为 0.454 kN,欧洲云杉基材为 0.36 kN。而采用木榫旋转焊接方式时,落叶松基材得到的抗拉拔强度为 2.345 kN,欧洲云杉为 0.998 kN。这说明与木榫旋转焊接方式相比,2 种基材采用直接敲入方式得到的抗拉拔强度均<木榫旋转焊接,主要是由于在直接敲入的过程中,木榫和基材预钻孔挤压变形,没有形成较好的融合状态,所以在进行抗拉拔测试时,仅是木榫和基材孔壁之间的挤压摩擦力起抗拉作用。

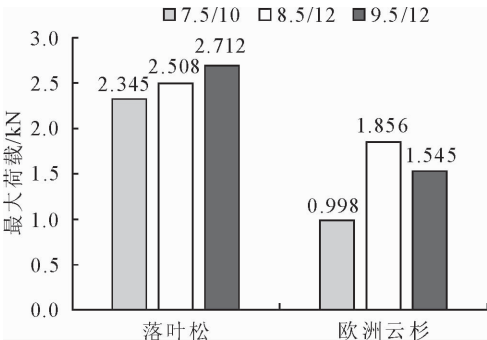


图 7 不同预钻孔径对抗拉拔强度的影响

Fig. 7 Effects of different diameters of holes on the pullout resistance

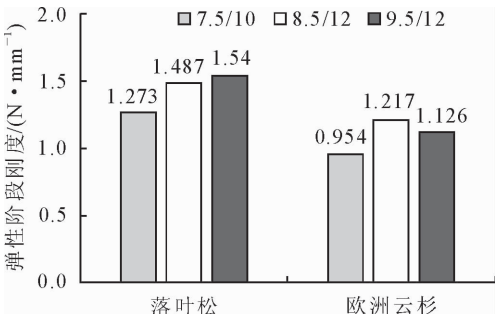


图 8 不同预钻孔直径对弹性阶段刚度的影响

Fig. 8 Effects of different diameters of holes on the stiffness

由图 9 可知,木榫旋转焊接基材的典型荷载-位移曲线呈现 3 个阶段:弹性上升阶段、屈服阶段、延展破坏阶段,而非焊接试验组基材的典型曲线呈现 3 种不同的阶段:缓慢上升阶段、低幅震荡阶段、破坏阶段。木榫旋转焊接典型荷载-位移曲线所呈现出的现象是由于木榫旋转摩擦焊接基材过程中形成了新的融合界面层,起到粘结作用,使得曲线具有一段明显的弹性上升阶段,而在其达到粘结最大抗拉荷载后,融合界面层发生破坏,荷载开始下降。但是,界面层破坏后,木榫与基材之间的摩擦作用仍然存在,所以在延展破坏阶段,曲线仍然能够呈现一段荷载缓慢降低的过程。对于非焊接试验组,由于木榫与基材之间仅仅存在摩擦挤压作用力,而不具备熔融界面层的粘结作用,所以没有明显的弹性上升阶段,仅有一段缓慢的荷载上升过程。在达到最大

荷载之后,荷载呈现出震荡变化,主要是因为木榫由于被挤压插入基材预钻孔,在被外力缓慢拔出时,其受到的挤压摩擦力发生阶段性变化而导致,最终木榫从基材预钻孔中被拔出^[16]。

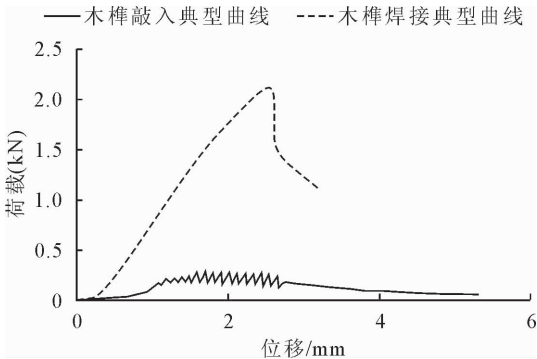


图 9 典型的木榫敲入和木榫旋转焊接抗拉拔荷载-位移曲线

Fig. 9 The load displacement curves of welded joints and hammered joints

2.4 木榫旋转焊接反应机理

从不同树种基材对抗拉拔性能的影响结果可知,落叶松较欧洲云杉更适合于木榫旋转焊接。为明晰木榫旋转焊接反应机理,利用 FTIR 光谱仪测定了木榫及落叶松焊接基材界面,得到红外光谱图(图 10、图 11)。图中焊接界面代表木榫和基材的焊接融合部位。观察焊接界面和木榫的红外光谱图可知,除了在少数波数区域稍有不同外,焊接界面的特征峰与木榫的特征峰基本相似,因此木榫旋转焊接界面层上的熔融物质大多来自木榫。特征峰略有差异的原因主要是由于木榫旋转焊接属于过盈配合,木榫直径>预钻孔直径,在旋转焊接的过程中木榫受旋转挤压的摩擦作用,纤维等被撕裂后与基材、预钻孔内壁相融合,从而导致木榫与焊接界面层的红外光谱不完全相同。

FTIR 谱图分析表明旋转摩擦焊接能够引起木材组分中一些官能团的明显改变。1 370、1 425 cm^{-1} 附近波数代表纤维素中 CH 弯曲振动和 CH_2 剪式振动吸收峰,图 10 中可以看出此特征峰的红外光谱图发生明显改变,原因可能是在木榫焊接摩擦过程中,纤维素发生热解导致。半纤维素的红外光谱因单糖残基和其他侧基不同,但 1 730 cm^{-1} 附近的乙酰基和羧基上的 $\text{C}=\text{O}$ 伸缩振动吸收峰是半纤维素区分于其他组分的特征^[17-18],图 10 显示其在焊接界面图谱上吸收强度明显降低,半纤维的热解是主要原因。另外,1 235 cm^{-1} 代表半纤维素乙酰氧基的伸缩振动和苯环-氧键伸缩振动,在红外光谱图谱中焊接界面明显<木榫,说明在焊接过程中半纤维素与木质素均发生了热解反应。1 506 cm^{-1} 和

1 596 cm^{-1} 波数附近代表木质素的芳香族骨架^[19],其振动吸收带明显增强,证明木质素因侧链断裂而发生热聚合反应。3 200~3 500 cm^{-1} 焊接界面图谱明显增强,说明氢键增多,木材纤维重组形成交织的界面层。

从木榫旋转焊接反应机理可知,木榫直接敲入预钻孔基材的抗拉拔强度远小于木榫旋转焊接基材的原因就在于在木榫旋转焊接过程中,纤维素、半纤维素、木质素等因热解与熔融,冷却后形成高强度的焊接界面,而非焊接试验组的连接强度仅依靠因过盈配合而产生的木榫和基材孔壁之间的挤压摩擦力。

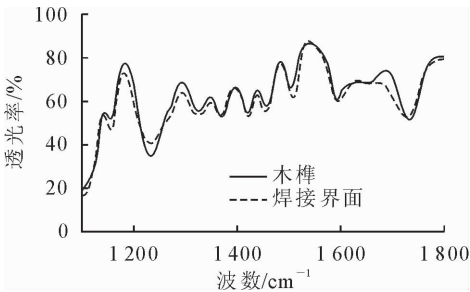


图 10 波数 1 100~1 800 cm^{-1} 范围内的红外光谱

Fig. 10 Infrared wave number range of 1 100—1 800 cm^{-1}

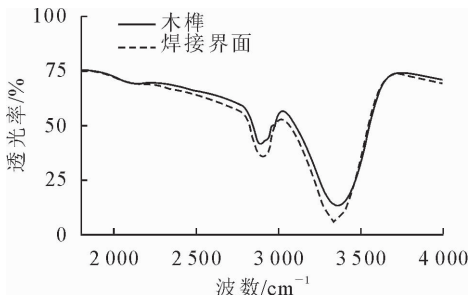


图 11 波数 1 800~4 000 cm^{-1} 范围内的红外光谱

Fig. 11 Infrared wave number range of 1 800—4 000 cm^{-1}

3 结论与讨论

试验结果表明,不同树种基材对木榫旋转焊接性能具有较大影响,国产落叶松作为基材的木榫旋转焊接的抗拉拔强度与弹性阶段刚度明显>欧洲云杉。对于抗拉拔强度,7.5/10 试验组落叶松比欧洲云杉高 135%,8.5/12 试验组高 35.1%,9.5/12 试验组高 75.5%;对于初始刚度,7.5/10 试验组落叶松比欧洲云杉高 33.4%,8.5/12 试验组高 22.2%,9.5/12 试验组高 36.8%。

焊接试验组与非焊接试验组的抗拉拔强度结果表明,木榫旋转焊接能够极大提高木榫与基材连接节点的抗拉拔强度,其中落叶松基材提高了 416%,欧洲云杉提高了 177%。不同预钻孔径与木榫直径对落叶松为基材的木榫旋转焊接的抗拉拔强度影响不大,对弹性阶段刚度具有一定影响;对欧洲云杉为

基材的木榫旋转焊接抗拉拔强度和弹性阶段刚度影响较大,说明落叶松基材在木榫旋转焊接技术中受孔径影响较小。

FTIR 分析表明,木榫旋转摩擦焊接引起木材组分中,代表纤维素中 CH 弯曲振动和 CH₂ 剪式振动吸收峰、半纤维素乙酰基和羧基上的 C=O 伸缩振动吸收峰以及代表木质素的芳香族骨架振动吸收带发生了明显的改变。木榫与基材能够牢固连接主要是因为旋转摩擦焊接过程中,纤维素、半纤维素、木质素发生热解与熔融,冷却后形成高强度的焊接界面,从而将基材与木榫紧紧的粘结在一起。

参考文献:

[1] STAMM B. Development of friction welding of wood: physical mechanical and chemical studies[D]. Lausanne, Switzerland: EPFL, 2006.

[2] 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.

[3] 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(8-10): 1423-1436.

[4] BELLEVILLE B, STEVANOVIC T, CLOUTIER A, *et al.* Production and properties of wood-welded panels made from two Canadian hardwoods[J]. Wood Science and Technology, 2013, 47(5): 1005-1018.

[5] BOCQUET J F, PIZZI A, DESPRES A, *et al.* Wood joints and laminate wood beams assembled by mechanically-welded wood dowels[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007, 21(3-4): 301-317.

[6] KANAZAWA F, PIZZI A, PROPERZI M, *et al.* Parameters influencing wood-dowel welding by high-speed rotation[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2005, 19(12): 1025-1038.

[7] 邵亚丽, 安珍, 邢新婷. 落叶松木材力学性质及应用研究进展[J]. 木材加工机械, 2011(3): 46-49.

SHAO Y L, AN Z, XING X T. Advance on mechanical properties and application of *Larix*[J]. Wood Processing Machinery, 2011(3): 46-49. (in Chinese)

[8] BOCQUET J F, PIZZI A, RESCH L. Full-scale industrial wood floor assembly and structures by welded-through dowels[J]. Holz.

Roh. Werkst. , 2007, 65: 149-155.

[9] 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.

[10] LEBAN J M, MANSOURI H R, OMRANI P, *et al.* Dependence of dowel welding on rotation rate [J]. Holz. Roh. Werkst. , 2008, 66: 241-242.

[11] GANNE 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: 761-773.

[12] PIZZI A, DESPRES A, MANSOURI H R, *et al.* Wood joints by through-dowel rotation welding: microstructure, ¹³C NMR and water resistance[J]. J. Adhesion Sci. Technol. , 2006, 20(5): 427-436.

[13] MOUGEL E. , SEGOVIA C , PIZZI A, *et al.* Shrink-fitting and dowel welding in mortise and tenon structural wood joints [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011, 25: 213-221.

[14] OMRANI P, BOCQUET J F, PIZZI A , *et al.* Zig-zag rotational dowel welding for exterior wood joints[J]. J. Adhesion Sci. Technol. , 2007, 21(10): 923-933.

[15] 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: 1383-1400.

[16] SEGOVIA C , PIZZI A . Performance of dowel-welded wood furniture linear joints[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009, 23: 1293-1301.

[17] 邓启平, 李大纲, 张金萍. FTIR 法研究出土木材化学结构及化学成分的变化[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(2): 149-153.

DENG Q P, LI D G, ZHANG J P. FTIR Analysis on changes of chemical structure and compositions of waterlogged archaeological wood[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(2): 149-153. (in Chinese)

[18] 李坚. 木材波普学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.

[19] 孙泉雄, 多化琼, 王振柱. 基于红外光谱的木材自身耐久性分析[J]. 西北林学院学报, 2016, 31(2): 255-258.

SUN X X, DUO H Q, WANG Z Z. Wood durability analysis based on FTIR spectra[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2016, 31(2): 255-258. (in Chinese)