

DOI:10.12171/j.1000-1522.20240176

## 自然老化杉木梁的分区可处理性

方旋 张景朋 熊怡心 李嘉欣 姜琀 马星霞

(中国林业科学研究院木材工业研究所, 北京 100091)

**摘要:**【目的】分区域研究自然老化对杉木梁可处理性的影响,为木质文物建筑的保护以及古旧木材的再利用提供科学依据。【方法】以现代杉木为对照,将一根使用约100年的自然老化杉木木梁沿着径向从外到内分为边材、外心材和内心材3个区域,通过真空浸渍法测定各区域的可处理性,并从化学成分、微观结构和孔隙结构方面深入分析各区域可处理性变化的机理。【结果】老化杉木各区域中孔径较大的孔隙数量和比例明显提高,改善了木材内部孔隙之间的连通性,造成老化杉木各区域的可处理性明显高于现代杉木。横截面显示:防腐剂在各区域的渗透深度明显增加,边材、外心材和内心材的载药量分别是现代杉木的2.98、3.17和6.94倍。化学成分分析表明:老化杉木边材中主要是木质素和半纤维素发生降解,且木质素降解程度更高;外心材中主要是半纤维素发生降解;内心材的化学成分没有发生明显降解。微观结构分析显示:老化杉木梁在径向上越靠近内部,管胞被压缩的程度越高,可能是由木梁长期承受径向载荷导致的。这个规律很大程度上解释了老化杉木载药量相对于现代杉木的倍数从边材到内心材依次增长的现象。【结论】老化杉木木梁径向上不同区域的老化程度和机理明显不同,因此各区域可处理性出现不同程度的提高。长期载荷对老化木梁内部微观构造的影响程度更大。

**关键词:** 孔隙结构; 孔径; 微观结构; 化学成分; 载荷; 材料老化; 杉木梁; 可处理性

**中图分类号:** S781 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1522(2024)11-0124-09

**引文格式:** 方旋, 张景朋, 熊怡心, 等. 自然老化杉木梁的分区可处理性 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(11): 124-132.  
Fang Xuan, Zhang Jingpeng, Xiong Yixin, et al. Sub-regional treatability of a naturally aging Chinese fir beam [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(11): 124-132.

### Sub-regional treatability of a naturally aging Chinese fir beam

Fang Xuan Zhang Jingpeng Xiong Yixin Li Jiaxin Jiang Hui Ma Xingxia

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

**Abstract:** [Objective] This paper investigates the effects of natural aging on treatability of a Chinese fir beam in a sub-regional manner to provide a scientific basis for preservation of wooden heritage buildings as well as reuse of old timber. [Method] Taking a modern Chinese fir wood as a control, a naturally aging Chinese fir beam in service for about 100 years was divided into three parts, namely sapwood, outer heartwood and inner heartwood, along the radial direction from outside to inside, and the treatability of each part was determined by vacuum impregnation. The mechanism of treatability change in each part was further analyzed from the chemical compounds, microstructure and pore structure. [Result] The number and proportion of pores with larger pore diameters in each part of aging Chinese fir were obviously higher, which improved connectivity between internal pores of wood, and resulted in significantly higher treatability in each part of aging Chinese fir than in modern Chinese fir. In cross-section, the penetration depth of preservatives in each part increased markedly, with the retention in sapwood, outer heartwood and inner

收稿日期: 2024-06-03 修回日期: 2024-09-18

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(CAFYBB2023PA004、CAFYBB2019ZB008), 国家自然科学基金项目(31971588)。

第一作者: 方旋, 博士生。主要研究方向: 木材保护。Email: 3194367323@qq.com 地址: 100091 北京市海淀区东小府2号中国林业科学研究院木材工业研究所。

责任作者: 马星霞, 研究员, 博士生导师。主要研究方向: 木材和古建筑木结构保护。Email: mxxyl@139.com 地址: 同上。

本刊网址: <http://j.bjfu.edu.cn>; <http://journal.bjfu.edu.cn>

heartwood being 2.98, 3.17 and 6.94 times of modern Chinese fir, respectively. The chemical compounds in aging Chinese fir showed that the sapwood was degraded mainly by lignin and hemicellulose, with a higher degree of lignin degradation, the outer heartwood was degraded mainly by hemicellulose, and the inner heartwood had no obvious degradation of its chemical composition. The microstructure showed that the tracheids closer to the interior in radial direction of aging Chinese fir beam were compressed to a higher degree, which might result from the long-term radial loading. It largely explained the phenomenon that the retention multiple of aging Chinese fir to modern Chinese fir raised from sapwood to the inner heartwood. [Conclusion] The degree and mechanism of aging varies obviously in different parts of radial direction of aging Chinese fir beam, which lead to the treatability increase in each part. A long-term loading has large effect on internal microstructure of an aging beam.

**Key words:** pore structure; pore size; microstructure; chemical compounds; loads; aging of materials; Chinese fir beam; treatability

木材作为可再生的生物质材料,具有美丽的纹理和高强重比,且易于加工,自古以来被广泛应用于各种建筑中<sup>[1]</sup>。目前现存的以木结构为主的历史建筑,是了解当时社会状况和生活背景的重要历史资料,具有极高的文物、历史和艺术价值。然而,木结构建筑由于长期暴露在外界环境下,受阳光、水分、真菌和虫害等因素的影响,出现木材材性的劣化<sup>[2]</sup>。化学药剂处理是木结构建筑保护和维修中最常见和有效的措施<sup>[3]</sup>。一般来说,只有达到合格的载药量和渗透深度才能达到长期的保护效果。可处理性表示液体(如木材防腐剂、阻燃剂、改性剂等)渗透多孔材料(如木材)的程度和能力<sup>[4]</sup>。因此,探究自然老化过程中木构件可处理性的变化及机理对于历史木结构建筑的修缮保护以及古旧木材的再利用至关重要。

木材的可处理性主要取决于木材内部各孔隙之间的连通性<sup>[5]</sup>。老化会对木材的化学成分和解剖结构造成一定程度的影响,进而改变木材内部孔隙之间的连通性。现有研究已经在很大程度上阐明了真菌和风化对木材细胞壁的影响和机理。在温湿度适宜的陆地条件下,真菌对木材的降解似乎起着主导地位。褐腐菌优先降解木材的多糖类物质,留下木质素,使木材呈深褐色,而白腐菌可以几乎分解木材的所有成分,使木材呈白色<sup>[6]</sup>。此外,即使在没有生物危害的情况下,自然风化(即紫外线、温度和水分)也会影响木材的表面甚至内部<sup>[7]</sup>。同时,风和雨水会加速木材降解产物的流失,也会造成木材表面的机械磨损。而且,木材因反复收缩和膨胀产生的裂纹使真菌、光照、水分更容易进入木材内部,造成木材进一步劣化。除此之外,长期承载的木构件,即使表面没有变形开裂,内部细胞也会受到压缩<sup>[8]</sup>,进而导致细胞壁和胞间层出现裂纹<sup>[9]</sup>。这些化学成分和微观结构的变化可能会改善木材内部孔隙之间的连通性,进而使木构件更容易被药剂处理。

目前,有关历史建筑木材材性的研究主要集中在化学成分和力学性能等方面。从已有的文献中可以总结出自然老化的古旧木材的半纤维素含量降低<sup>[10]</sup>,亮度降低,色度增加<sup>[11]</sup>,吸湿性降低,尺寸稳定性提高<sup>[12]</sup>,声速提高,声学性能有所改善<sup>[13]</sup>。同时,大部分研究认为老化对保存完好的木材的力学性能影响较小<sup>[14]</sup>,而且相关研究<sup>[15]</sup>表明未被真菌和昆虫破坏的老化木材可以再利用。但是,在纤维素含量<sup>[16]</sup>、木质素含量<sup>[16]</sup>和力学性能<sup>[14]</sup>等方面还存在一定的分歧,这主要是因为新老木材的对比受多种因素的影响,如老化木材未知的初始性能、使用环境、木材的变异性和取材部位等。由于光照、温湿度和受力情况等因素变化,即使外表完好的老化木构件,其不同部位的老化也存在一定差异。老化会影响木材的使用性能和可处理性能,因此同一构件不同部位的老化程度和差异直接关系到木构件的有效保护、修缮和再利用。目前,对古木构件不同部位老化的系统研究很少,因此分区域研究自然老化对木构件可处理性的影响是十分有必要的。

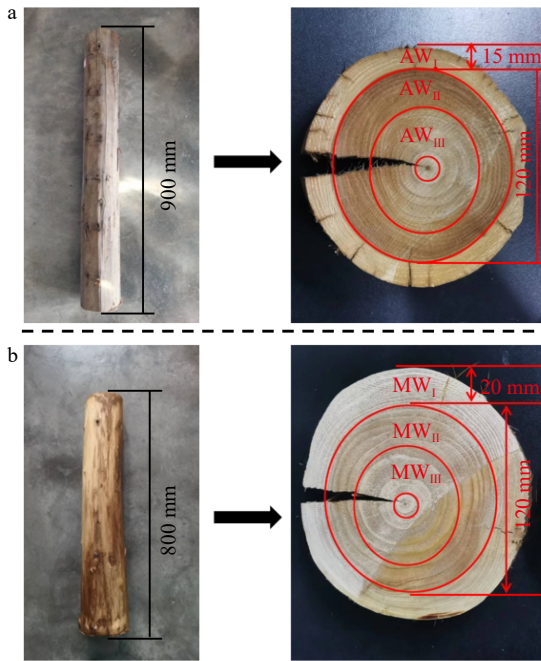
本研究以历史建筑中重要的承重构件—木梁为代表,将一根使用约 100 年的自然老化杉木梁沿径向从外到内被分为边材、外心材和内心材 3 个区域,通过真空浸渍法测定各区域的可处理性,并从化学成分、微观结构和孔隙结构方面深入分析各区域可处理性的变化机理,以期为历史建筑中木构件的有效保护、修缮和再利用提供科学指导。在每种情况下,都将未使用的现代杉木与老化杉木进行比较;同时,也对老化和现代杉木径向上材性的变化规律进行对比和分析。

## 1 材料与方法

### 1.1 材 料

老化杉木木梁构件取自浙江省宁波市鄞州区的

文物保护单位云龙学校的维修现场,该建筑建于1922年,在2020年6月进行全方面维修。该木梁取自走廊,在承重状态下使用了约100年,2021年从维修现场取样后存放于实验室中。老化杉木木梁构件保存比较完好,外观没有明显腐朽和虫害的痕迹(图1a)。老化杉木的树龄为22年,该构件长900 mm,直径150 mm,其中边材的厚度约15 mm,心材的直径约120 mm(图1a)。



AW<sub>I</sub>、AW<sub>II</sub>和AW<sub>III</sub>分别代表老化杉木边材、外心材和内心材, MW<sub>I</sub>、MW<sub>II</sub>和MW<sub>III</sub>分别代表现代杉木边材、外心材和内心材。AW<sub>I</sub>、AW<sub>II</sub> and AW<sub>III</sub> represent aging Chinese fir sapwood, outer heartwood and inner heartwood, respectively. MW<sub>I</sub>、MW<sub>II</sub> and MW<sub>III</sub> represent modern Chinese fir sapwood, outer heartwood and inner heartwood, respectively.

图1 老化(a)和现代杉木(b)木梁构件尺寸以及取样示意图

Fig. 1 Dimension sketch and sampling diagram of aging (a) and modern (b) Chinese fir beam components

现代杉木砍伐于浙江,树龄为18年,砍伐后在实验室存放了1~2年。其边材的厚度约为20 mm,心材直径约120 mm(图1b)。

## 1.2 杉木的区域划分

从老化杉木中截取一段圆盘,沿着径向将老化的杉木圆盘分为边材(区域I),外心材(区域II)和内心材(区域III)3个区域,分别标记为AW<sub>I</sub>、AW<sub>II</sub>和AW<sub>III</sub>(图1a)。其中,AW<sub>II</sub>和AW<sub>III</sub>是心材去髓心后被等距离平分的两部分。AW<sub>I</sub>、AW<sub>II</sub>和AW<sub>III</sub>区域的平均绝干密度分别为0.373、0.311和0.302 g/cm<sup>3</sup>。

现代杉木同样划分为3个区域,并将各区域分别标记为MW<sub>I</sub>、MW<sub>II</sub>和MW<sub>III</sub>(图1b)。现代杉木横截面的颜色比老化杉木横截面的颜色浅, MW<sub>I</sub>、MW<sub>II</sub>和MW<sub>III</sub>区域的平均绝干密度分别为0.489、

0.384和0.363 g/cm<sup>3</sup>。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 化学成分测定

将老化和现代杉木各区域木材磨成40~80目的粉末,采用范氏洗涤法测定各区域的纤维素、半纤维素和木质素的含量。范氏洗涤法的原理可简单的描述为:通过中性洗涤液(丙酮)去除脂肪等可溶性物质,剩余NDF(纤维素、半纤维素、木质素和灰分),通过酸性洗涤液(0.50 mol/L 硫酸)洗掉半纤维素,剩余纤维素、木质素和灰分,通过酸泡(72% 硫酸)洗掉纤维素,剩余木质素和灰分,最后通过灰化去除木质素。每组重复3次,结果取平均值。

将杉木研磨成200目的木粉,利用傅里叶红外光谱分析化学成分中官能团的变化。采用溴化钾压片法,红外仪器(iS10 FT-IR spectrometer, 美国尼高力公司)波数范围是400~4 000 cm<sup>-1</sup>。光谱仪分辨率4 cm<sup>-1</sup>,信噪比50 000:1,扫描32次。

### 1.3.2 微观结构观察

利用滑走切片机(RM2245, 德国Leica)制作尺寸为5 mm(径向)×5 mm(弦向)×5 mm(轴向)的现代和老化杉木的横切面和弦切面试件。将制作好的切片在80℃的烘箱中干燥4 h后进行喷金,然后使用扫描电子显微镜(SEM, SU8010, 日本日立)观察老化杉木的微观结构。

### 1.3.3 孔隙结构测定

制作老化和现代杉木各区域尺寸为8 mm(径向)×8 mm(弦向)×5 mm(轴向)的小试件,每个区域选择两个小试样,然后利用压汞仪(AutoPore IV9500, 美国Micromeritics公司)对木材各区域的累计进汞量和孔径分布进行测定。

### 1.3.4 可处理性测定

防腐剂的载药量和渗透深度用来衡量木材的可处理性。制作尺寸为10 mm(径向)×20 mm(弦向)×60 mm(轴向)的现代和老化杉木试件,为了避免纵向的影响,真空浸渍处理前使用环氧树脂将试件的轴向封端。按照GB/T 27654—2023《木材防腐剂》<sup>[17]</sup>,配制质量分数为0.2%铜唑木材防腐剂(CuAz-4)。将自然气干2个月的试件称质量后,放入3 L的大烧杯中,接着向烧杯中注入1.5 L的防腐剂,用铁片压着试件使药剂完全淹没试件,然后将烧杯放入真空干燥箱,抽真空至-0.09 MPa下保持30 min,然后恢复常压浸渍30 min。处理完毕后,用试纸擦去试件表面的药液后再次测质量。根据前后的质量差获得吸药量,计算老化和现代杉木各部位的载药量。每个区域重复8次,结果取平均值。

$$R = c(m_2 - m_1)/V$$

式中:  $R$  为试件中防腐剂的载药量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $m_1$  为浸渍前试件的质量,  $\text{kg}$ ;  $m_2$  为浸渍后试件的质量,  $\text{kg}$ ;  $c$  为防腐剂中有效成分质量分数;  $V$  为防腐处理试件的体积,  $\text{m}^3$ 。

浸渍的试件自然气干一周后, 沿着轴向从中间截断, 喷洒铜离子显色剂<sup>[18]</sup>, 通过显色反应观察防腐剂在横截面的渗透深度。渗透深度取横截面四周的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 化学成分

老化和现代杉木的化学成分相对含量比值趋于 1, 表明老化杉木化学成分的降解程度低。由老化/现代的比值(表 1)可以初步判断: 老化杉木边材中木质素(0.92)和半纤维素(0.96)发生了降解, 且木质素降解程度更高, 木质素和半纤维素的降解导致纤维素(1.04)的相对含量增加; 在老化杉木外心材中主要是半纤维素被降解; 在内心材中主要成分的比值都小于 1, 可能是由于老化杉木内心材的抽提物含量比现代杉木略高。另外, 内心材中主要化学成分的比值相近且都接近 1, 这说明老化杉木内心材主要化学成分没有发生明显降解。

由于树龄、气候和产地等因素影响, 即使同树种的不同个体的化学成分也可能存在一定的差异, 因此对老化和现代杉木径向主要化学成分的变化规律进行比较分析。对于木质素而言, 现代杉木边材中木质素的含量比外心材和内心材分别高了 13.4% 和 8.5%, 而老化杉木边材中木质素的含量分别比外心材和内心材高了 2.9% 和 1.1%(表 1), 这印证了老化杉木边材中木质素发生了降解。对于半纤维素而言, 现代杉木边材半纤维素相对含量(14.18%)低于

外心材(14.99%)和内心材(15.11%), 而老化杉木边材半纤维素(13.68%)却高于外心材(12.69%), 这说明老化杉木外心材半纤维素发生了降解。由表 1 分析可知, 老化杉木边材和外心材中半纤维素都发生了降解, 但边材中木质素的降解程度要高于半纤维素, 导致半纤维素相对降解程度变低, 进而造成老化杉木边材中半纤维素含量反而要高于外心材。综上, 老化杉木边材中主要是木质素和半纤维素被降解, 且木质素降解程度更高, 外心材主要是半纤维素发生降解, 内心材的主要化学成分没有明显降解。

为进一步了解老化杉木降解区域的主要化学成分变化, 对老化杉木和现代杉木的边材和外心材区域进行红外光谱分析(图 2)。由于老化杉木中纤维素保存比较完好, 因此, 对波长为  $1\ 425\ \text{cm}^{-1}$  处归属于纤维素中  $\text{CH}_2$  剪式振动的特征峰进行了归一化处理。对于半纤维素,  $1\ 735\ \text{cm}^{-1}$  附近归属于木聚糖乙酰基的  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动, 波长为  $1\ 453\ \text{cm}^{-1}$  附近归属于聚糖中  $\text{C}-\text{H}$  的弯曲振动。老化杉木边材和外心材相对于现代杉木在  $1\ 735\ \text{cm}^{-1}$  处峰值明显下降, 在  $1\ 453\ \text{cm}^{-1}$  处峰值略微下降, 这说明老化杉木边材和外心材木聚糖中的乙酰基降解, 但木聚糖主链保存相对较完好。木质素的红外光谱复杂, 特征峰较多。其中,  $1\ 658\ \text{cm}^{-1}$  附近吸收峰归属于木质素侧链的共轭羧基  $\text{C}=\text{O}$  伸缩振动,  $1\ 510\ \text{cm}^{-1}$  附近吸收峰归属于木质素  $\text{C}=\text{C}$  芳香族骨架的伸缩振动,  $1\ 268\ \text{cm}^{-1}$  附近吸收峰归属于木质素中甲氧基和苯基丙烷单元的芳香  $\text{C}-\text{O}$  伸缩振动。老化杉木外心材木质素特征峰没有明显变化, 也说明了外心材中木质素保存相对完好。但是, 老化杉木边材在波长为  $1\ 510$  和  $1\ 268\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰均出现下降, 其中  $1\ 658\ \text{cm}^{-1}$  的吸收峰消失, 说明木质素中芳香族

表 1 老化和现代杉木各区域主要化学成分

Tab. 1 Main chemical compositions in each part of aging and modern Chinese fir wood

区域 Part	化学成分 Chemical composition	相对含量 Relative content/%		老化/现代 Aging/modern
		现代木材 Modern wood	老化木材 Aging wood	
边材 Sapwood (I)	纤维素 Cellulose	46.59(0.74)	48.47(0.91)	1.04
	半纤维素 Hemicellulose	14.18(0.32)	13.68(0.21)	0.96
	木质素 Lignin	31.58(0.42)	28.93(0.93)	0.92
外心材 Outer heartwood (II)	纤维素 Cellulose	43.85(0.30)	43.92(0.29)	1.00
	半纤维素 Hemicellulose	14.99(0.05)	12.69(0.36)	0.85
	木质素 Lignin	27.86(0.02)	28.11(0.07)	1.01
内心材 Inner heartwood (III)	纤维素 Cellulose	43.48(0.46)	43.05(0.47)	0.99
	半纤维素 Hemicellulose	15.11(0.05)	14.61(0.06)	0.97
	木质素 Lignin	29.10(0.55)	28.62(0.41)	0.98

注: 括号内为标准差。老化/现代为老化和现代杉木化学成分相对含量的比值。Notes: standard deviations are showed in parentheses. Aging/modern is the ratio of relative chemical contents of aging and modern Chinese fir wood.

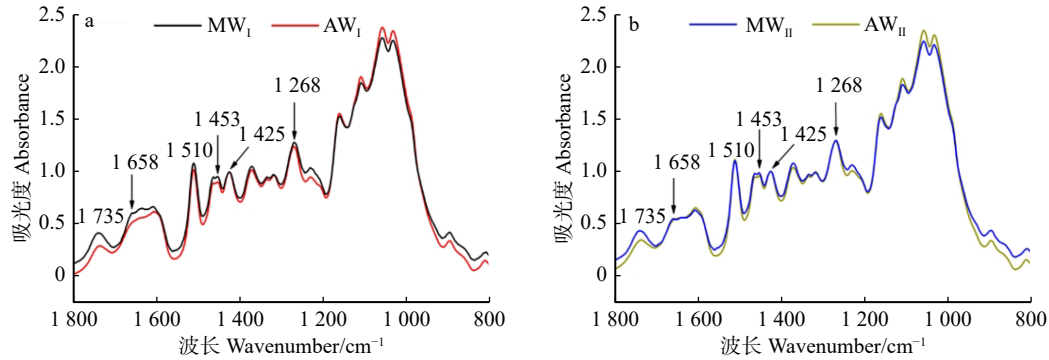


图2 老化、现代杉木边材(a)和外心材(b)的红外光谱

Fig. 2 Fourier infrared spectroscopy of aging, modern Chinese fir sapwood (a) and outer heartwood (b)

骨架发生降解,且侧链降解更加严重。

木材三大主要组分中,半纤维素由于分子链较短且带有支链,最不稳定,在长期老化中普遍会发生降解<sup>[6]</sup>;木质素是天然高分子聚合物,易受光照降解<sup>[9]</sup>;纤维素聚合度高,不容易受到干燥老化的影响<sup>[20]</sup>。根据化学成分分析,半纤维素的降解主要发生在老化杉木的边材和外心材区域。风化和真菌的入侵通常是从木材的表面到内部的。老化杉木边材因长期暴露在外界环境中,最不稳定的半纤维素在自然老化(水分、阳光、氧气、热和真菌等)作用下发生降解。老化杉木边材较薄且有大量裂纹,促使外心材中的半纤维素在外界因子的作用下降解;内心材由于离表面较远且被外心材包围(该区域裂纹很少),因此几乎没有被降解。木质素虽然易受光照(紫外线)降解,但光照只会导致木材表层的木质素发生降解。多数针叶材的光老化速率约为每100年6mm<sup>[7]</sup>,这说明老化杉木边材表层几毫米的木质素可能发生严重降解。但是,老化杉木边材有大量的裂纹,光可以通过裂纹进入边材内部,进而使整个边材区域的木质素发生更严重的降解。老化杉木边材中木质素的降解程度比半纤维素更高(表1),也很大程度上印证了这点。综上,在老化杉木中越靠近内部区域的降解程度越低,这与老化杉木各区域密度的变化趋势一致(老化杉木边材、外心材和内心材密度分别为

现代杉木的76.3%、80.9%和83.3%)。

## 2.2 微观结构

现代杉木横截面管胞壁光滑,排列整齐(图3a)。相反,老化杉木细胞壁表面粗糙且出现不同程度的破坏(图3b, 3c)。这可能是由于老化杉木化学成分降解,导致细胞壁发生一定程度的皱缩,进而细胞壁出现裂纹、分离和压缩。老化杉木边材的部分管胞壁出现轻微裂纹,管胞腔可见少量菌丝(图3b)。老化杉木心材细胞结构发生更大幅度的变形,管胞壁出现大量裂缝,且胞间层出现明显分离(图3c)。这种不可逆的微观损伤可能是由木材受到大的径向载荷导致的<sup>[21]</sup>。

为了进一步了解老化杉木木梁径向上微观结构的变化规律,对老化杉木边材、外心材和内心材的横切面和弦切面进行观察。从横切面可见,老化杉木由外到内管胞被压缩得越来越紧密,且早材的压缩明显比晚材更严重(图4a~c)。这种现象可能是由于木梁构件长期受径向载荷,导致内部细胞被压缩的程度更高,之前的研究<sup>[8]</sup>也有类似的发现。相比晚材,早材由于腔大壁薄,所以压缩变形的程度更高。从弦切面可见,老化杉木边材和外心材中部分纹孔膜被降解,菌丝通过纹孔进入相邻细胞(图4d和e)。然而,内心材中几乎看不到菌丝,管胞壁上的具缘纹孔保持闭塞状态(图4f),这说明真菌曾经入侵

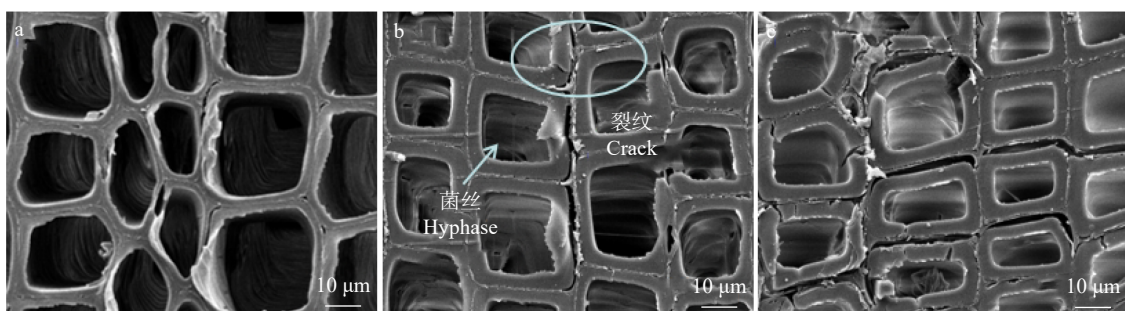


图3 现代杉木(a)、老化杉木边材(b)和心材(c)的横切面图片

Fig. 3 Transverse sections of modern Chinese fir wood (a), aging Chinese fir sapwood (b) and aging Chinese fir heartwood (c)

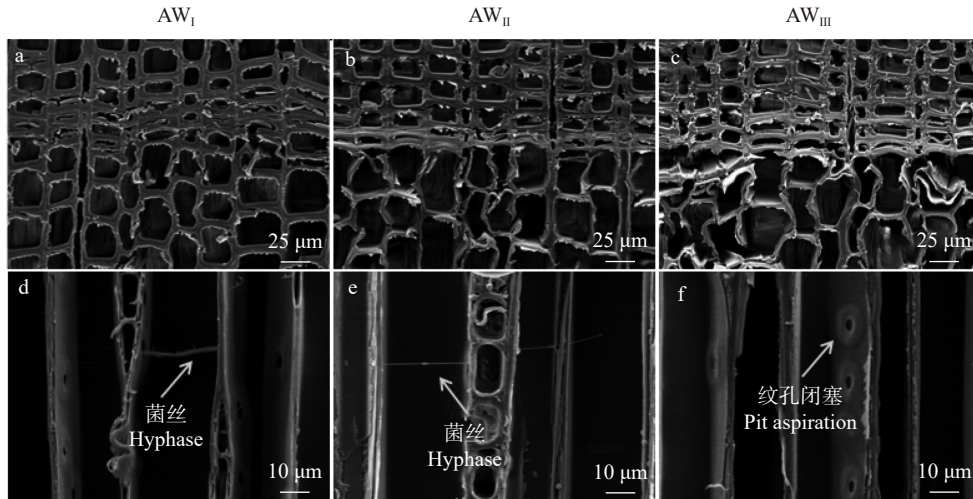


图 4 老化杉木边材(a, d)、外心材(b, e)和内心材(c, f)的横截面和弦切面图片

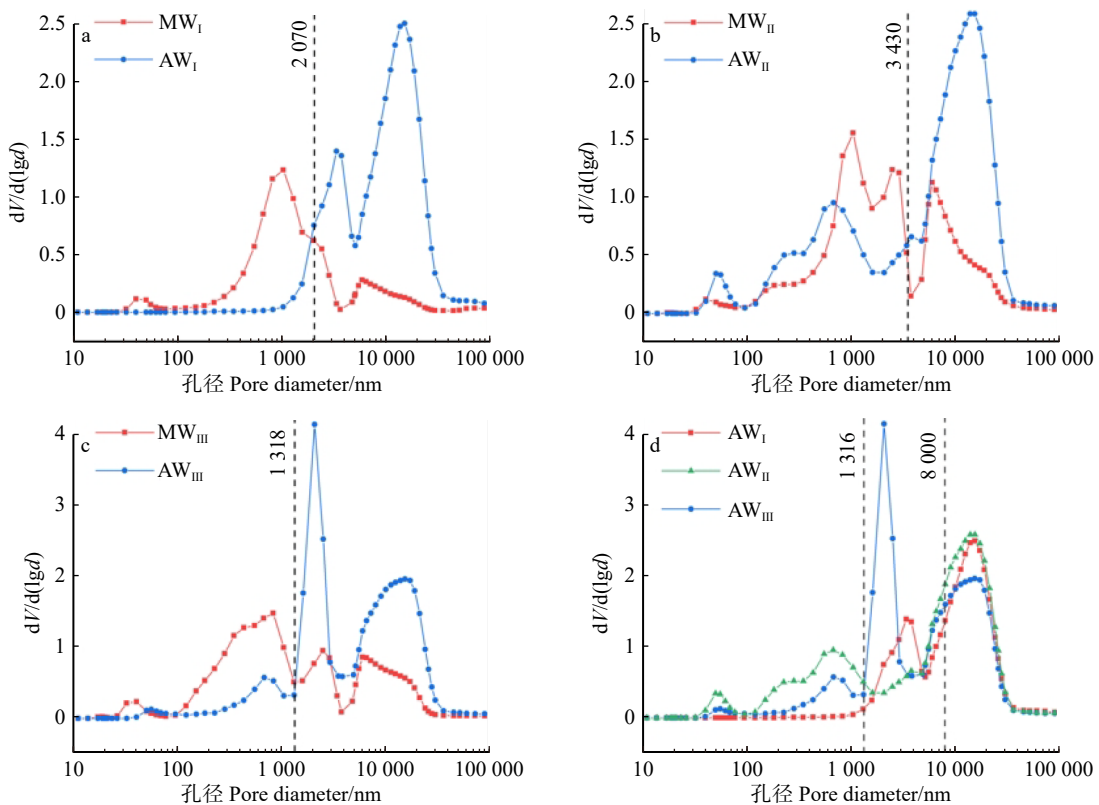
Fig. 4 Transverse and tangential sections of sapwood (a, d), outer heartwood (b, e), and inter heartwood (c, f) of aging Chinese fir wood

过老化杉木的边材和外心材区域。化学成分的结果表明:在老化杉木中,越靠近内部的部分被降解的程度越低。然而,微观结构显示:老化杉木中,越靠近内部的管胞被压缩破坏的程度越高。从化学成分和微观结构的结果可以看出,老化杉木各区域的老化机理和程度存在明显差异。此外,尽管老化杉木中靠内部区域的化学成分降解的程度较低,但细胞壁被破坏的程度却更高,表明长期径向载荷对老化杉

木木梁内部的微观结构影响更大。老化杉木中靠内部区域结构破坏程度高于靠外部区域,这会导致靠内部区域孔隙的连通性更好。

### 2.3 孔隙结构

化学成分和微观结构的改变必然会导致木材孔隙结构发生变化,进而直接影响木材的可处理性。图 5 展示了材料在对应孔径下的孔体积变化率,变化率越高表示该孔径下的孔隙数量越多。图 5a ~



V. 体积 Volume; d. 孔径 Pore diameter

图 5 老化(d)和现代杉木边材(a)、外心材(b)和内心材(c)的孔径与积分孔体积  $dV/d(lgd)$  的关系

Fig. 5  $dV/d(lgd)$  versus pore diameter in sapwood (a), outer heartwood (b), inner heartwood (c) of aging (d) and modern Chinese fir wood

c 显示:老化杉木各区域峰值(变化率越高)对应的孔径比现代杉木更大,而且老化杉木边材在孔径 > 2 070 nm,外心材在孔径 > 3 430 nm,内心材在孔径 > 1 318 nm 范围内,孔隙数量均明显高于现代杉木。这说明老化杉木中孔径较大的孔隙数量和比例要明显高于现代杉木,老化杉木的孔隙集中在孔径更大的区域。在针叶材中,管胞的直径在 15 ~ 50  $\mu\text{m}$ ,纹孔口的直径在 0.4 ~ 6.0  $\mu\text{m}$ ,纹孔膜上的小孔在 10 nm ~ 8  $\mu\text{m}$ ,细胞壁孔隙的孔径在 1 ~ 100 nm<sup>[22]</sup>。结合化学成分和微观构造结果分析,老化杉木中大孔径孔隙的增多,一方面可能是具缘纹孔和细胞壁被降解,导致小孔隙孔径增大,另一方面可能是细胞壁被压缩,产生尺寸更大的裂纹。这些新增的大孔径孔隙降低了渗透压力,改善了老化杉木内部孔隙之间的连通性。

化学成分的降解和细胞壁的压缩导致木材中孔径较大的孔隙数量和比例上升,造成老化杉木各区域的累计进汞量分别是现代杉木的 1.96、1.56 和 1.34 倍(图 6)。老化杉木中各区域孔径分布存在明显差异,外心材和内心材在孔径 < 1 316 nm 的孔隙数量和体积高于边材(图 5d)。其中,老化杉木边材的进汞量主要来源于孔径 > 1 316 nm 的孔隙,占总进汞量的 99.7%;老化杉木外心材中,71.9% 的进汞量来源于孔径 > 1 316 nm 的孔隙,28.1% 的进汞量来源于孔径 < 1 316 nm 的孔隙;老化杉木内心材 88.1% 的进汞量来源于孔径 > 1 316 nm 的孔隙,11.9% 的进汞量来源于孔径 < 1 316 nm 的孔隙(图 6)。这说明老化杉木中外心材区域微米级以下的孔隙数量及体积占比最高,内心材次之,边材最少。微米级以下孔隙的来源与纹孔口、纹孔膜上的微孔和细胞

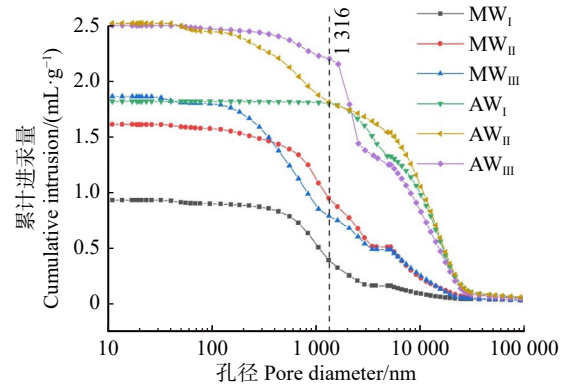


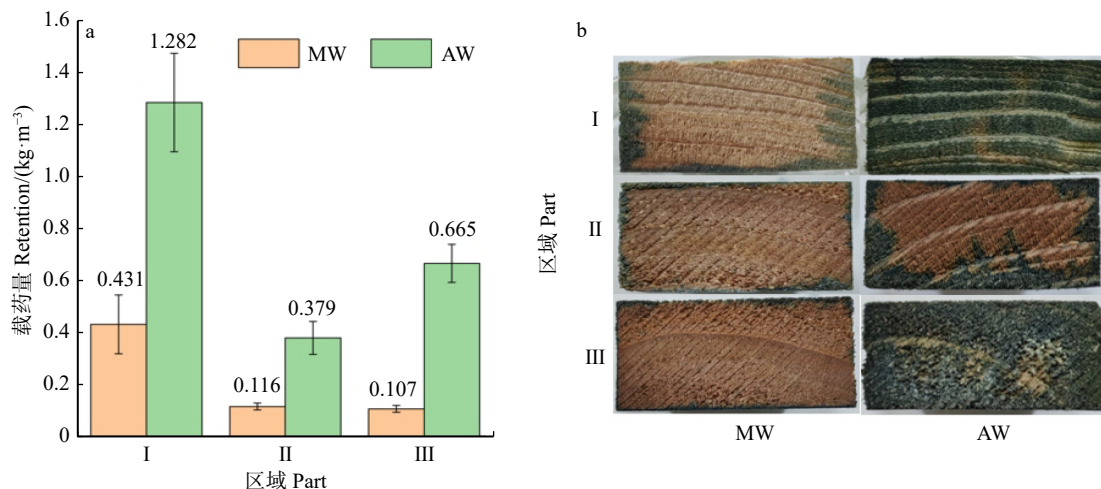
图 6 老化和现代杉木各区域累计进汞量与孔径的关系

Fig. 6 Relationship between cumulative intrusion and pore diameter in each part of aging and modern Chinese fir wood

壁孔隙等有关。一般而言,孔径与流体渗透过程中需要克服的毛细管压力成反比<sup>[23]</sup>,当孔径较小的孔隙数量越多,且占比越大时,对液体渗透的阻力越大。

#### 2.4 可处理性及其机理

老化杉木边材、外心材和内心材的载药量分别是现代杉木的 2.97、3.27 和 6.21 倍(图 7a)。横截面防腐剂的渗透深度显示:现代杉木难以处理,其边材中防腐剂仅仅在弦向上有较低的渗透深度,外心材和内心材几乎无法被药剂渗透;老化杉木各区域的渗透深度比现代杉木高,边材和内心材甚至可以被药剂完全渗透,这表明老化杉木各区域的可处理性明显高于现代杉木。另外,由于老化杉木各区域可处理性的提高程度不同,这导致现代和老化杉木径向上可处理性的变化规律存在差异。现代杉木中,内心材比外心材更难处理,内心材的载药量是外心材的 0.92 倍,而老化杉木中内心材的载药量却是外



MW 和 AW 分别代表现代杉木和老化杉木;区域 I、II 和 III 分别代表边材、外心材和内心材。MW and AW represent modern Chinese fir and aging Chinese fir, respectively. I, II and III represent sapwood, outer heartwood and inner heartwood, respectively.

图 7 防腐剂在老化和现代杉木各区域的载药量(a)和透入度(b)

Fig. 7 Retention (a) and penetration (b) of preservatives in each part of aging and modern Chinese fir wood

心材的 1.76 倍,横截面上防腐剂的渗透深度也明显高于外心材,表明老化杉木中内心材反而比外心材更容易处理(图 7)。

针叶材中具缘纹孔是管胞间液体渗透的唯一通道,纹孔闭塞和抽提物堵塞纹孔(纹孔口和纹孔膜上的微孔等)会极大地降低木材的可处理性<sup>[4]</sup>。从化学成分和微观结构的结果可知,老化杉木各区域的老化机理和程度存在明显不同。老化杉木边材细胞壁压缩程度较低,但化学成分降解最严重,纹孔膜和细胞壁等结构的降解连通了相邻的管胞,从而使边材被完全渗透;外心材细胞壁被压缩的程度要高于边材,但心材抽提物含量比边材高,这些抽提物可能堵塞纹孔口和细胞壁上产生的微裂纹,导致外心材没有被完全渗透;内心材化学成分几乎没有降解,但细胞壁被压缩破坏的程度明显比外心材更大,这导致内心材在微米级以下的孔隙数量和比例更低,内部孔隙的连通性更好,因此能够被完全渗透。

综上,老化杉木细胞壁成分的降解和压缩,造成木材中孔径较大的孔隙数量和比例明显提高,改善了木材内部孔隙之间的连通性,使各区域的可处理性较现代杉木明显提高。各区域老化机理和程度不同,导致各区域的可处理性出现不同程度的提高。

### 3 结 论

本研究从化学成分、微观构造和孔隙结构方面,分区域系统地研究了老化杉木边材、外心材和内心材的可处理性变化及机理,以期为历史建筑中木构件的有效保护和再利用提供科学指导。研究得到以下 3 点结论。

(1)老化杉木越靠近内部的化学成分降解程度越低。其中边材主要是木质素和半纤维素被降解,且木质素降解程度更高,外心材主要是半纤维素被降解,内心材的化学成分没有发生明显降解。微观结构显示,老化杉木中纹孔膜被降解,胞间层出现分离,管胞壁出现裂纹。而且,径向上越靠近内部的细胞壁被压缩的程度越高,分析认为这是由木梁长期承受径向载荷导致的。化学成分和微观结构的结果表明,老化杉木各区域的老化机理和程度存在明显区别。

(2)化学成分的降解和细胞壁的压缩,导致老化杉木各区域中孔径较大的孔隙数量和比例明显提高,改善了木材内部孔隙之间的连通性,造成老化杉木各区域的可处理性明显高于现代杉木。但是各区域老化机理和程度不同,导致老化杉木中各区域可处理性不同程度的提高,其中边材、外心材和内心材的载药量分别是现代杉木的 2.97、3.27 和 6.21 倍。

(3)老化杉木内部化学成分降解程度低,但细胞

壁被压缩破坏的程度却高于外部,说明长期载荷对木梁构件内部微观结构的影响程度更大,这导致了老化杉木内心材反而比外心材更容易被药剂处理。

综上,老化杉木各区域的可处理性比现代杉木有明显的提高,这有利于药剂的浸渍和保护。本研究结果为旧木材的药剂处理和再利用奠定了基础。老化会对木材的力学性能产生负面影响,因此需要进一步研究药剂处理前后老化木材各区域的力学性能。

### 参 考 文 献

- [1] Yang R Y, Sun Y F, Zhang X F. Application and progress of reinforcement technology for Chinese ancient buildings with wood structure[J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2020, 38(6): 5695-5701.
- [2] Loferski J R. Technologies for wood preservation in historic preservation[J]. *Archives and Museum Informatics*, 1999, 13(3-4): 273-290.
- [3] 马星霞, 乔云飞, 黎冬青, 等. 古建筑木构件生物危害预防性保护体系框架构建[J]. *木材科学与技术*, 2023, 37(1): 83-90.  
Ma X X, Qiao Y F, Li D Q, et al. Biological hazard prevention and protection system for wood components in ancient buildings[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2023, 37(1): 83-90.
- [4] Tarmian A, Zahedi T I, Oladi R, et al. Treatability of wood for pressure treatment processes: a literature review[J]. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2020, 78(4): 635-660.
- [5] Zimmer K P, Høibo O A, Vestøl G I, et al. Variation in treatability of Scots pine sapwood: a survey of 25 different northern European locations[J]. *Wood Science and Technology*, 2014, 48(5): 1049-1068.
- [6] 马星霞, 蒋明亮, 李志强. 木材生物降解与保护[M]. 北京: 中国林业出版社, 2011.  
Ma X X, Jiang M L, Li Z Q. *Wood degradation and protection*[M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2011.
- [7] 余泓琛, 彭辉, 詹天翼, 等. 木材光老化表征与评价方法研究进展[J]. *世界林业研究*, 2023, 36(2): 63-68.  
Yu H C, Peng H, Zhan T Y, et al. Research progress in characterization and evaluation of wood photo-aging[J]. *World Forestry Research*, 2023, 36(2): 63-68.
- [8] Guo J, Zhou H B, Stevanic J S, et al. Effects of ageing on the cell wall and its hygroscopicity of wood in ancient timber construction[J]. *Wood Science and Technology*, 2018, 52(1): 131-147.
- [9] Xin Z B, Fu R Y, Zong Y Y, et al. Effects of natural ageing on macroscopic physical and mechanical properties, chemical components and microscopic cell wall structure of ancient timber members[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 359: 129476.
- [10] 陈凯强, 龙克莹, 初石民, 等. 自然老化对古建筑木材细胞壁结构与成分的影响[J]. *木材科学与技术*, 2023, 37(5): 30-37.

- Chen K Q, Long K Y, Chu S M, et al. Effects of natural aging on the cell wall structure and chemical composition of ancient architectural wood[J]. *Chinese Journal of Wood Science and Technology*, 2023, 37(5): 30–37.
- [11] Matsuo M, Yokoyama M, Umemura K, et al. Aging of wood: analysis of color changes during natural aging and heat treatment[J]. *Holzforschung*, 2011, 65(3): 361–368.
- [12] Kurtoglu A. The properties of sorption of old spruce timber[J]. *Holzforsch Holzverw*, 1983, 35(6): 125–126.
- [13] Obataya E. Effects of natural and artificial ageing on the physical and acoustic properties of wood in musical instruments[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2017, 27: 63–69.
- [14] Cavalli A, Cibecchini D, Togni M, et al. A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber[J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 114: 681–687.
- [15] Thaler N, Humar M. Performance of oak, beech and spruce beams after more than 100 years in service[J]. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 2013, 85: 305–310.
- [16] Kránitz K, Sonderegger W, Bues C T, et al. Effects of aging on wood: a literature review[J]. *Wood Science and Technology*, 2016, 50(1): 7–22.
- [17] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 木材防腐剂: GB/T 27654—2023[S]. 北京: 中国质检出版社, 2023.  
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Wood preservatives: GB/T 27654—2023[S]. Beijing: Quality Press of China, 2023.
- [18] 崔新宇, 邓代千, 靳革, 等. 混合表面活性剂-铬天青 S 与铜显色反应研究及应用[J]. *光谱实验室*, 2011, 28(5): 2428–2430.
- Cui X Y, Deng D Q, Jin G, et al. Research and application of color reaction of mixed surfactant-CAS and copper[J]. *Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory*, 2011, 28(5): 2428–2430.
- [19] 郭洪武, 闫昊鹏, 王金林, 等. I-214 杨木光变色的规律及机理研究[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(1): 89–91.
- Guo H W, Yan H P, Wang J L, et al. Laws and mechanism of photodiscoloration of I-214 poplar veneer[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(1): 89–91.
- [20] Borgin K, Parameswaran N, Liese W. The effect of aging on the ultrastructure of wood[J]. *Wood Science and Technology*, 1975, 9(2): 87–98.
- [21] Tabarsa T, Chui Y H. Characterizing microscopic behavior of wood under transverse compression ( part II): effect of species and loading direction[J]. *Wood and Fiber Science*, 2001, 33(2): 223–232.
- [22] Yin J, Song K, Lu Y, et al. Comparison of changes in micropores and mesopores in the wood cell walls of sapwood and heartwood[J]. *Wood Science and Technology*, 2015, 49(5): 987–1001.
- [23] Lowell S, Shields J E, Thomas M A, et al. Pore size and surface characteristics of porous solids by mercury porosimetry[M]// Lowell S, Shields J E, Thomas M A, et al. Characterization of porous solids and powders: surface area, pore size and density. Amsterdam: Springer, 2004: 189–212.

(责任编辑 吴娟  
责任编辑 曹金珍)