

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2021.272



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



古建筑落叶松木构件自然老化材性变化

张典

(故宫博物院, 北京 100009)

摘要:为探究古建筑木构件自然老化材性变化,以距今约 350 a 的一段古建筑华北落叶松木构件及与其具有相似年轮宽度的落叶松新材为研究对象,加工标准力学试件,测定试件的材性参数(颜色、全干密度、力学性能参数)及无损检测参数(微钻阻力值、超声波波速),对比分析自然老化木材试件的无损检测参数与材性参数的变化及分布规律,并基于所测得的新旧材两类试件的材性及无损检测参数建立落叶松木材物理力学性能参数的多元回归模型;研究结果表明:所测老化木材试件物理力学参数及无损检测参数均衰减明显,且颜色具有极显著差别;自然老化木材试件各参数变异系数均高于新材试件,但两者均符合正态分布,建立的落叶松木构件物理力学性能参数的评估模型具有较高评估性能。

关键词:古建筑;木构件;故宫养心殿;自然老化;材性;衰减

中图分类号: TU531.15 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2024)03-0144-08

Properties change under natural aging of ancient building larch members

ZHANG Dian

(The Palace Museum, Beijing 100009, P. R. China)

Abstract: In order to explore the change of wood properties of ancient building members under natural aging, a part of larch (*Larix principis-rupprechtii* Mayr) timber member of ancient building, which is about 350 years old, and a new timber with the same species and similar annual wheel width were used in this study. Small clear specimens were processed to measure the material properties (color, dry density and material mechanics property parameters) and non-destructive testing (NDT) parameters (micro-drill resistance value and velocity of ultrasonic wave). The nondestructive testing, physical and mechanical properties parameters of specimens were compared to analyze the variation and distribution, and then the multiple regression model for the physical and mechanical properties of ancient building timber were established based on the parameters measured in this study. The study results showed that the measured material property parameters and NDT parameters of the natural ageing wood specimens were significantly attenuated. And there is a highly significant difference in the color of natural aging specimens and new timber specimens. It was also found that the coefficients of variation of the parameters of natural aging specimens were all higher than those of new timber specimens, but both of them conformed to a normal distribution. Moreover, the developed model for the evaluation of physical and

收稿日期: 2021-10-22

基金项目: 中国博士后科学基金(2018M641225);故宫博物院科研项目(201909012)

作者简介: 张典(1985-),女,高级工程师,主要从事古建筑保护研究, E-mail: zhangdian126@126.com。

Received: 2021-10-22

Foundation items: China Postdoctoral Science Foundation (No. 2018M641225); Project of the Palace Museum (No. 201909012)

Author brief: ZHANG Dian (1985-), senior engineer, main research interest: protection of ancient buildings, E-mail: zhangdian126@126.com.

mechanical property parameters of larch timber members has a good evaluation performance.

Keywords: ancient building; timber members; Yangxin Hall of the Palace Museum; natural aging; property of wood; attenuation

中国木结构建筑文化灿烂辉煌,在世界建筑历史中占有重要地位。木构件是木结构古建筑的重要组成部分,其物理力学性能对古建筑稳定性和安全性具有重要影响。木构件材性主要包括木材外观颜色及物理力学参数等,木构件在长时间的服役过程中,除受腐朽、虫蛀等生物性明显破坏外,还会受到光照、水分、持续载荷效应等的影响发生自然老化,导致未遭受生物破坏的木材材性发生变化,影响其力学性能与承载力。因此,进行自然老化对木材材性影响规律的研究对木结构古建筑的保护具有重要的意义。

已有一些学者对木材自然老化后的物理力学性能的变化规律进行了研究。早在1976年 Attar-Hassan^[1]就对始建于1834年的建筑上采集到的白松木构件进行力学试验,发现其弯曲强度与抗弯弹性模量均降低。Cai等^[2]对服役90 a的火炬松木梁与具有相似密度和含水率的新材木梁分别测定其抗弯弹性模量,进行对比试验,结果表明老化木构件的弹性模量衰减率在14.22%~47.16%之间。但部分学者认为自然老化对木材物理力学性能具有积极作用,如祝英明^[3]通过试验发现距今约50~100 a的旧杉木的顺纹抗压强度优于新木材约7.47%; Ooka等^[4]对具有约130~375 a使用历史的榉木、雪松、柏树进行物理力学试验发现,老化后木构件的各项力学性能优于新材。同时,部分研究者认为自然老化对木材的物理力学性能没有影响,如Katalin^[5]和 Sonderegger等^[6]通过力学试验分析发现具有约230~250 a使用历史的云杉、冷杉及橡木等自然老化木材与新材的物理力学性能没有明显差异。由此可见,现阶段虽对木材自然老化后物理力学性质的变化情况进行了一些研究,但结论仍具有一定的争议,最主要的原因是缺少合适的研究对象,因为古建筑中木构件一般不允许进行拆卸,使可得到的受自然老化效应影响的木构件数量很少,而人工加速老化实验所得木材和自然老化木材各方面参数又有较大差别,对新材进行人工加速老化处理难以完全模拟实际自然老化的木材^[7]。

故宫养心殿始建于明代嘉靖年间,约有500 a历史,具有特殊的政治、文化、历史意义,是我国皇家木结构古建筑的典型代表。2015年养心殿启动了百余年来首次研究性保护大修,拆卸了少量木构件,其中包括西配殿明间北擎檐柱。该檐柱位于西

配殿最前端,属于暴露于室外的独立木柱,是受光、热、水分、持续载荷效应等自然老化因素影响的典型木构件,也是研究自然老化影响木材材性变化的良好对象,极具研究价值。

木构件保有密度及力学性能是古建筑木结构修缮方案定制的重要依据,而鉴于古建筑的珍贵性,无损检测方法是古建筑木构件保有材性评估的主要方法,其中微钻阻力和波速法是现场使用的主要无损检测方法^[8]。但无损检测参数如何随木材自然老化而改变,现阶段这一问题尚未引起学者关注,缺少无损检测参数在新、旧木材间变化情况的研究。

笔者以故宫养心殿在修缮过程中获得的西配殿明间北擎檐柱及与其具有相似年轮宽度的落叶松新材为研究对象,加工标准试件并分别测定无损检测参数及物理力学性质参数,分析其材性变化与分布规律,并最终基于所测的无损检测参数建立物理力学性质参数的多元线性回归模型。

1 研究对象与试验方法

1.1 研究对象

自然老化木构件来自故宫养心殿西配殿。该擎檐柱位于室外,直接与光、热、水分等接触并受持续载荷等自然老化效应的影响,属于典型的自然老化木构件,如图1(a)所示。该木构件在使用过程中,与地面接触的根部发生了局部腐朽,为避免该檐柱腐朽对建筑整体造成更为严重的破坏,在养心殿的修缮过程中,对其进行了墩接,拆修下的部分用于研究。拆修下的部分长度约为1 000 mm,宽度与高度均约为217 mm,呈阶梯状,如图1(b)所示。根据故宫博物院修缮记录与树种鉴定确定该木构件树种为华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii* Mayr),树种鉴定委托北京林业大学木材学实验室进行,树种显微结构照片如图1(c)所示。

为确定该木构件的服役时间,通过加速器质谱仪对该木构件进行了年代测定。加速器质谱(AMS)碳-14测定木构件年代的主要原理为树木被砍伐后与外界的¹⁴C交换停止,¹⁴C的含量会通过放射衰变逐步减少,¹⁴C的半衰期约为5 730 a,因此这个衰变可以用于计量生物停止与外界碳交流的时间;而由于1950年以来大规模的核爆炸试验造成¹⁴C放射性水平增大^[9]。故而可以首先测定被砍

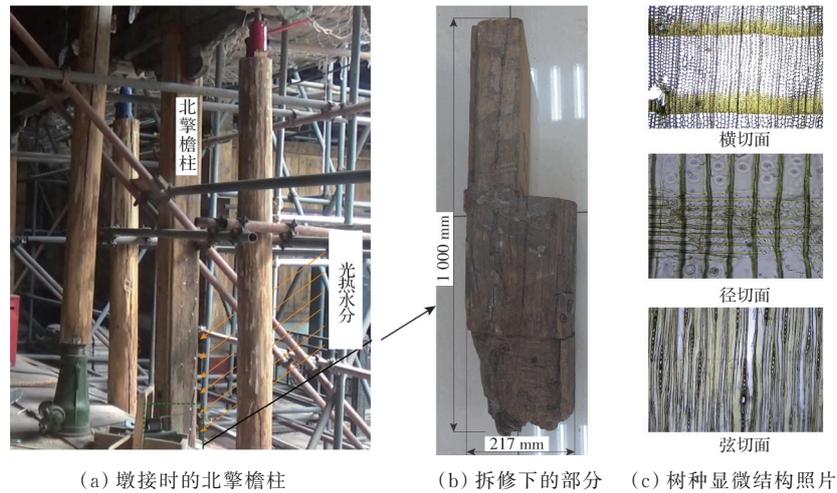


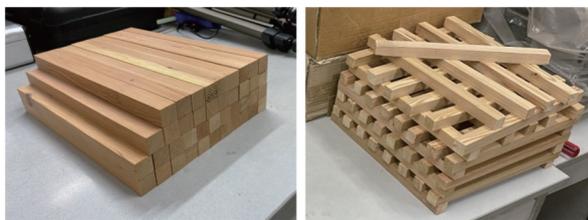
图 1 养心殿西配殿北擎檐柱及其拆修下部分照片与树种鉴定显微结构照片

Fig. 1 North Qing eave column and its disassembling, repairing part and tree species identification microstructure of the west annex hall in Yangxin Hall

伐停止碳交换到 1950 年的 ^{14}C 年代 t_1 , 并计算 1950 年至今的时间 t_2 , 便可计算得到木材被砍伐至今的时间 $t, t = t_1 + t_2$ 。

加速质谱仪 (AMS) 碳-14 测试委托北京大学考古文博学院科技考古实验室进行, 结果表明该擎檐柱碳-14 年代 t_1 为 $(280 \pm 20)\text{a}$, 故而可以得到该木构件距今约有 $(350 \pm 20)\text{a}$ 的历史。

首先对所获取的试材 (图 1(b)) 进行初步处理, 去除腐朽区域, 然后于其心材位置加工尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 300\text{ mm}$ 的标准试件, 长度为顺纹方向, 如图 2(a) 所示, 并从中选取年轮方向与试件棱边垂直的 27 根无疵标准试件, 记为 A 类试件, 编号依次为 A_1 - A_{27} 。另外, 使用华北落叶松新材的心材位置加工标准尺寸试件, 并选取年轮方向符合要求的无疵试件 30 根进行对比研究, 记为 N 类试件, 编号为 N_1 - N_{30} , 如图 2(b) 所示。



(a) 旧木构件 A 类试件 (b) 新材 N 类试件

图 2 老化木构件与落叶松新材所加工试件

Fig. 2 Standard specimens of aging timber and new *Larix principis-rupprechtii* Mayr wood

为确保所对比新材 N 类试件与老化木构件 A 类试件具有相似的初始材性性质, 基于《木材年轮宽度和晚材率测定方法》^[10], 分别测定了两类试件的平均年轮宽度, 测得旧木构件 A 类试件平均年轮宽度为 0.7827 mm , 测得 N 类试件平均年轮宽度为

0.8068 mm , 两种试件的平均年轮宽度仅相差 3.08% 。年轮宽度是影响木材初始力学性能的主要因素之一^[11], 所使用的两种试件均取自相同树种且试件取样位置及年轮宽度相似, 因此, 可以认定新材的材性与旧材的初始材性相同, 可用于自然老化对木材物理力学性能参数影响的对比研究。

1.2 试验方法

在进行试件无损检测参数及材性参数测定前, 首先通过恒温恒湿箱 (CTHI 100B, STIK, 美国) 将所有试件含水率调整为 12% , 且所有试验均在该含水率下进行。

1.2.1 无损检测参数测试

微钻阻力法和超声波波速法是评估古建筑木构件保有密度及力学性能的常用无损检测方法。首先对所加工两种试件在 12% 含水率下分别进行微钻阻力检测及超声波波速检测, 分别获取微钻阻力值 M_{mr} (rel) 及超声波波速 V_{us} (m/s) 这两个无损检测参数, 以实现对所加工新旧试件无损检测参数的对比研究。

首先使用超声波微秒计 (UltraSonic Timer, Fakopp BT., 匈牙利) 测量超声波在试件内的传播时间 T_{us} , 并根据试件长度 $L = 30\text{ cm}$ 计算该试件的 V_{us} , 最终取 3 次测量平均值为该试件的 V_{us} 。

使用微钻阻力仪 (Resistograph 4452-P, RinnTech, 德国) 对试件在不影响力学试验的两端部沿径向进行微钻阻力检测, 检测深度为所加工试件的宽度 (20 mm), 获得微钻阻力曲线后, 根据式 (1) 计算该试件的微钻阻力值 M_{mr} , 3 次测试的平均值作为该试件的 M_{mr} 。

$$M_{\text{mr}} = \frac{\sum_{i=0}^R M_{\text{mr}}}{R} \quad (1)$$

式中: M_{mr} 为微钻阻力曲线所对应的微钻阻力值,rel; R 为试件径向方向尺寸,mm。

1.2.2 试件材性测定

木材材性主要包括外观颜色参数及物理力学性质参数,为得到新旧落叶松木材材性的变化情况,对所加工试件的颜色、全干密度 ρ_0 、力学性质(抗弯强度 M_{OR} 、抗弯弹性模量 M_{OE} 及顺纹抗压强度 C_{SPG})分别进行测定。

通过 Colormeter Pro 装置(杭州彩谱科技有限公司,中国)基于 CIElab 颜色标准对所有试件的颜色进行测定,测定每个试件长度方向的4个面,获取其颜色参数(L^* 、 a^* 、 b^*)值,3次测定取其平均值。

物理力学性质参数测定中,首先测定试件的抗弯性能参数 M_{OR} 及 M_{OE} ,根据 GB/T 1936.1—2009 及 GB/T 1936.2—2009 对所加工试件进行三点弯曲试验(图3(a)),试验仪器为瑞格尔 RGM-4050 型万能力学试验机,两端支座及压头端部的曲率半径均为 30 mm,两支座跨距 l 为 240 mm,加载速度为 5 mm/min,直至试件被弯曲破坏,获取试件试验的位移-载荷曲线,并通过式(2)、式(3)计算试件 M_{OE} 及 M_{OR} 。

$$M_{OE} = \frac{23\rho l^3}{108RT^3 f} \quad (2)$$

$$M_{OR} = \frac{3P_{max}l}{2RT} \quad (3)$$

式中: l 为两支座跨距; ρ 为试件弹性阶段的上下加载荷差; R 、 T 分别为试件的径向及弦向尺寸; f 为对应载荷的变形值; P_{max} 为试件破坏时的载荷。

在三点弯曲试验后,从两端完好区域分别截取纵向长度分别为 20 mm 和 30 mm 的试件,测定试件的全干密度 ρ_0 和顺纹抗压强度 C_{SPG} 。

试件的 C_{SPG} 基于 GB/T 1935—2009 标准利用万能力学试验机使用球面滑动支座进行测定(图3(b)),试验加载速度为 2 mm/min,试件被压溃后获取试件试验时的位移-载荷曲线,通过式(4)计算试

件的 C_{SPG} 。

$$C_{SPG} = \frac{P_{max}}{RT} \quad (4)$$

试件的全干密度 ρ_0 基于 GB/T 1933—2009 标准进行测定,测定首先时使用烘干箱在 $(103 \pm 2)^\circ\text{C}$ 的温度下烘干 8 h,之后每 0.5 h 测定其质量,当测量前后质量差不超过 0.002 g 时认定试件达到全干,并测定此时的全干质量 m_0 ,然后通过排水法测定试件体积 v_0 ,通过式(5)计算试件的全干密度 ρ_0 。

$$\rho_0 = \frac{m_0}{v_0} \quad (5)$$

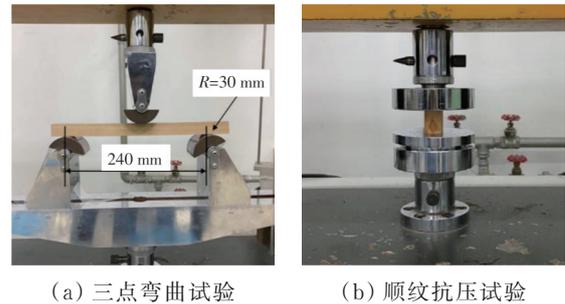


图3 力学性能参数测定

Fig. 3 Determination of mechanical property parameters

2 结果与分析

2.1 物理力学性能对比分析

为对老化后木材的物理力学性能进行对比研究,如表1所示,对A类试件及N类试件的物理力学参数的测定结果进行对比分析。因年轮宽度、含水率等是影响木材初始物理力学性能的重要因素^[11],为满足对老化后木材的物理力学性能衰减研究的合理性与严谨性,所加工新材试件来自具有相似年轮宽度(相差 3.08%)的落叶松,且均在 12% 含水率下进行的测定试验,因此,以所加工落叶松新材N类试件的物理力学参数为参考,对老化后养心殿旧木构件A类试件的衰减情况进行分析合理有效。

表1 试件物理力学性能对比

Table 1 Comparison of physical and mechanical properties of specimens

试件	数据指标	全干密度 ρ_0 /(kg/m ³)	抗弯强度 M_{OR} /MPa	抗弯弹性模量 M_{OE} /MPa	顺纹抗压强度 C_{SPG} /MPa
A类试件 ($n=27$)	平均值AV	533.02	84.71	5 009.38	65.29
	标准差SD	37.59	15.36	1 035.38	7.37
	变异系数COV/%	7.05	18.13	20.67	11.28
N类试件 ($n=30$)	平均值AV	622.66	106.12	6 544.92	76.63
	标准差SD	24.25	11.27	810.70	8.80
	变异系数COV/%	3.98	11.01	12.27	11.04
	衰减量	-89.64	-21.41	-1 535.54	-11.34
	衰减率/%	-14.40	-20.18	-23.46	-14.80

从所测得结果的衰减情况分析。全干密度与顺纹抗压强度衰减率相似,分别为14.40%、14.80%;而抗弯性能参数衰减率相似,抗弯强度衰减20.18%,抗弯弹性模量衰减23.46%,老化后木材在垂直年轮方向上力学性能衰减明显,该结论与Yokoyama等^[12]的研究相一致,即抗弯强度及抗弯弹性模量的衰减高于顺纹抗压强度的衰减。

从所得结果的变异系数分析,两类试件的变异系数COV不同,A类试件的COV明显高于N类新材试件;且A类试件中抗弯强度及弹性模量的COV明显高于全干密度 ρ_0 及顺纹抗压强度CSPG。主要原因分析为:A类试件各物理力学参数的变异系数均高于落叶松新材N类试件的COV,擎檐柱中不同区域受自然老化效应的影响不同,导致该擎檐柱内部区域的老化程度不同,因而相对新材各物理力学性质具有较高COV;受自然老化效应影响的木材,

其韧性降低而脆性增大^[11],因此,在三点弯曲试验中,试件受弯曲荷载时,断裂的随机性增大,导致所加工A类试件的抗弯性能参数(MOR、MOE)的变异系数明显高于 ρ_0 及CSPG的变异系数。

另外,为得到所测新旧木材试件物理力学性能结果的分布规律,对物理力学性能检测结果给予统计分析,如表2所示,绘制分布直方图如图4所示。按已有文献所述计算方法^[13],对物理力学性能参数结果进行K-S正态分布检验,发现K-S检验值均低于K-S临界值,同时 p 值均高于0.05,说明 ρ_0 、 M_{OR} 、 M_{OE} 及 C_{SPG} 均符合正态分布,可以用正态分布函数对物理力学性能参数的分布进行描述。由图4还可以发现,N类试件全干密度 ρ_0 结果分布明显较A类试件结果更加集中,而两种试件的力学性能参数的分布情况较为相似。

表2 物理力学性能检测结果分析

Table 2 Analysis of physical and mechanical properties test results

数据指标	A类试件 ($n = 27$)				N类试件 ($n = 30$)			
	全干密度 ρ_0 / (kg/m^3)	抗弯强度 M_{OR} /MPa	抗弯弹性模量 M_{OE} /MPa	顺纹抗压强度 C_{SPG} /MPa	全干密度 ρ_0 /(kg/m^3)	抗弯强度 M_{OR} /MPa	抗弯弹性模量 M_{OE} /MPa	顺纹抗压强度 C_{SPG} /MPa
p 值 p -value	0.522 2	0.320 5	0.725 5	0.848 1	0.841 1	0.938 9	0.659 7	0.236 8
K-S 检验值	0.155	0.143	0.082	0.081	0.119	0.069	0.096	0.146
K-S 临界值	0.261 7	0.261 7	0.261 7	0.261 7	0.248 2	0.248 2	0.248 2	0.248 2
正态分布	是	是	是	是	是	是	是	是

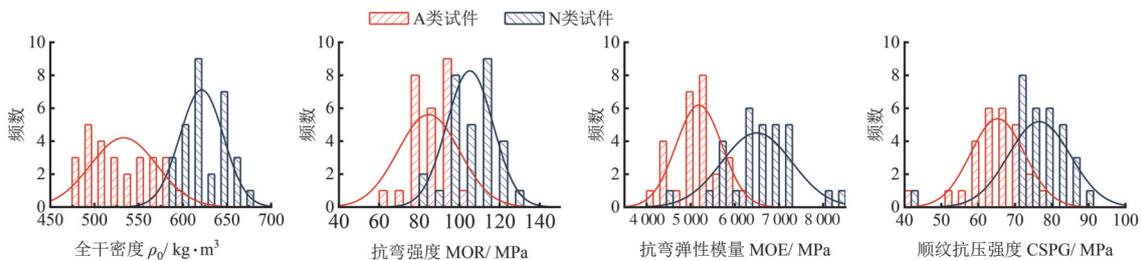


图4 物理力学性能参数分布直方图

Fig. 4 Distribution histogram of physical and mechanical properties parameters

2.2 外观颜色对比分析

CIElab颜色标准是现阶段最常用的测色标准,是一种基于生理特征的系统,用数字化的方法来描述人的视觉感受。其中: L^* 分量用于表示像素的亮度,取值范围是 $[0, 100]$,表示从纯黑到纯白; a^* 表示从红色到绿色的范围,取值范围是 $[127, -128]$; b^* 表示从黄色到蓝色的范围,取值范围是 $[127, -128]$ 。为对两类试件的颜色进行比较分析,分别基于CIElab标准测定了试件的 L^* 、 a^* 、 b^* 。

两类试件颜色的测定结果如表3所示。可以发现,相对于落叶松新材,A类试件的明度差 ΔL^* 约减小10.37%,表明试件颜色朝黑色方向变化,亮度降低,而红绿色度差 Δa^* 增大,变化幅度达到88.92%,

表明试件朝红色方向变化,黄蓝色度 Δb^* 同样增大,表明试件朝黄色方向发展,增幅达到了23.18%。由此可见,以落叶松新材试件颜色为参考,落叶松木材在老化后颜色朝红、黄的方向发展且亮度降低,其中红色参数的变化最为明显。

色度差 ΔE 是指用数值的方法表示两种颜色的差别,CIElab标准下色度差 ΔE 可用式(6)计算,其中 ΔE 低于0.5时可以认为两者没有区别,在 ΔE 在0.5~1.5之间时,两颜色为稍有区别,而 ΔE 在1.5~3之间时,颜色表现为具有明显差别,当 $3 < \Delta E < 6$ 时,表现为两者间具有显著差异,而当 $6 < \Delta E < 12$ 时,表明两者具有极显著差异,当 $12 < \Delta E$ 时,表明两者具有不同的颜色差异^[5]。以测得30根新材试件

表 3 试件颜色测定结果

Table 3 determination results of color of specimens

颜色参数	N类试件(n=30)			A类试件(n=27)			色度差 ΔE	变化率/%
	平均值AV	标准差SD	变异系数COV/%	平均值AV	标准差SD	变异系数COV/%		
L^*	70.42	2.75	3.91	63.12	3.24	5.13	-7.30	-10.37
a^*	7.04	0.78	11.08	13.30	2.65	19.92	6.26	88.92
b^*	25.80	1.05	4.07	31.78	1.79	5.63	5.98	23.18

表面颜色参数的平均值($L_n^*=70.42, a_n^*=7.04, b_n^*=25.80$)为参考,计算 27 根 A 类试件的色度差 ΔE ,以获取试件颜色的变化情况。

$$\Delta E = \sqrt{[(a_n^* - a^*)^2 + (b_n^* - b^*)^2 + (L_n^* - L^*)^2]} \quad (6)$$

27 根 A 类试件色度差 ΔE 的分布直方图如图 5 所示,通过图 5 可以发现,A 类试件与落叶松新材试件的色度差 ΔE 均较大,其中所有试件的总色差 ΔE 超过 6,表明所有 A 类试件颜色与新材颜色产生了极显著差别,同时 48.15% 的试件色度差 ΔE 超过 12,表明 A 类试件已经与落叶松新材 N 试件具有了明显不同的颜色。

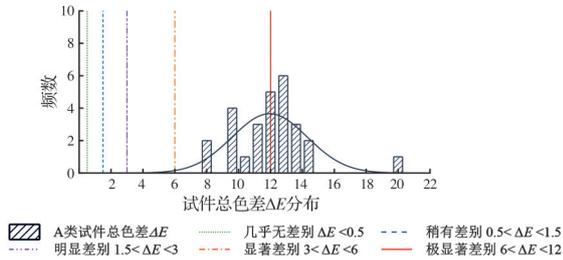


图 5 旧木构件试件总色度差 ΔE 直方图

Fig. 5 Histogram of color difference ΔE of ancient timber specimens

已有研究^[14-15]表明,木材颜色主要受其化学成分控制,色度差 ΔE 与木材木质素含量呈显著正相关,同时 $\Delta L^*、\Delta a^*$ 与 Δb^* 与木质素中存在的黄酮、酚

和芪类结构的相对含量有关,在老化效应的持续影响下,纤维素和半纤维素等多糖类物质含量相对降低,生成更多的羰基和羧基,木素含量的相对增加以及氧化反应等变化最终导致木材颜色逐步向红、黄及暗的方向变化。

2.3 无损检测参数的变化规律

2.3.1 新旧试件无损检测参数对比

表 4 所示为旧木构件 A 类和新材 N 类试件的无损检测结果。可以发现,A 类试件的平均微钻阻力值 M_{mr} 的平均值为 22.12 rel,而新材 N 类试件的平均微钻阻力值 M_{mr} 值为 39.74 rel,A 类试件的 M_{mr} 明显低于 N 类试件约 44.34%。进一步对新旧试件 M_{mr} 的变异系数 COV 进行分析发现,养心殿旧木构件 A 类试件的 COV(48.08%)显著高于新材 N 类试件 M_{mr} 的 COV(9.4%)。其主要原因为:对木构件来说,自然老化过程中受光、热及含水率变化等的影响,所加工木构件为养心殿擎檐柱,服役时虽包裹有地仗层,但在夏季阳光直射下产生的光、热效应与含水率变化及其互作效应使得该檐柱内不同区域自然老化程度有较大区别;外部区域在长期的自然老化效应下会导致纤维素和半纤维素发生较为严重降解,相对含量降低,同时力学强度相对较低的木质素含量相对增大,因而该区域所加工试件的 M_{mr} 较低,而受自然老化效应的影响较小的内部区域所测得 M_{mr} 相对较高,这造成了旧木构件所加工试件的 M_{mr} 具有较大 COV。

表 4 无损检测结果分析

Table 4 Analysis of NDT results

数据指标	A类试件(n=27)		N类试件(n=30)	
	平均微钻阻力值 M_{mr}/rel	超声波波速 $V_{us}/(km/s)$	平均微钻阻力值 M_{mr}/rel	超声波波速 $V_{us}/(km/s)$
平均值AV	22.12	3 934.64	39.74	4 263.64
最小值MinV	4.69	3 409.12	31.61	3 614.52
最大值Max V	55.24	4 477.64	47.29	4 477.61
标准差SD	10.64	336.52	3.74	184.53
变异系数COV/%	48.08	8.55	9.40	4.33
ρ 值 ρ -value	0.886 7	0.524 71	0.830 93	0.248 75
K-S 检验值	0.115	0.151	0.114	0.148
K-S 临界值	0.261 7	0.261 7	0.248 2	0.248 2
是否符合正态分布	是	是	是	是

超声波在试件内的传播属于一维波动方程,其波速 V_{us} 与材料的密度 ρ 及动态弹性模量相关^[16],因此, V_{us} 可用试件物理力学性能的评估。对两种试件的 V_{us} 进行分析,发现养心殿旧木构件试件 V_{us} 略低于落叶松新材试件(7.71%),且旧木构件试件的变异系数略大于新材试件,但两者变异性均较小(小于10%),差别不大。

为对木材无损检测参数的分布规律进行研究,绘制无损检测参数的分布直方图如图6所示,测定结果的K-S检验与 p 值计算结果如表4所示。可以发现,N类试件的 M_{mr} 及 V_{us} 的检测结果分布更加集中,这与新旧材试件测定结果的COV分析一致。K-S检验与 p 值计算结果显示4组无损检测参数的 p 值均大于0.05,且K-S检验值高于K-S临界值,说明4组试验结果均符合正态分布,可以通过正态分布函数对无损检测参数进行描述。

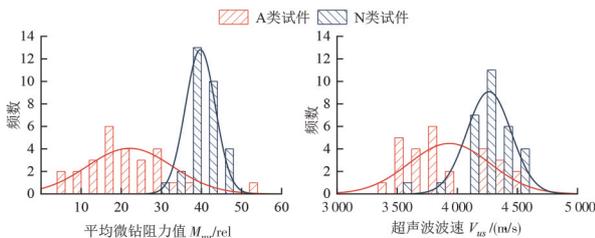


图6 平均微钻阻力及超声波波速分布直方图

Fig. 6 Distribution histogram of M_{mr} and V_{us}

综上所述,自然老化后木材无损检测参数均降低,其中,平均微钻阻力值 M_{mr} 降低明显,达到44.34%,超声波波速 V_{us} 略低于N类新材试件约7.71%;且A类试件无损检测参数的变异系数COV

均高于新材N类试件,但两类试件的无损检测参数均符合正态分布。

2.3.2 保有密度及力学性能的多元线性回归评估

以上研究表明,木材在自然老化效应下,物理力学性能会发生较为严重衰减,尤其是抗弯性能参数的衰减接近25%,对古建筑的安全性与稳定性带来了隐患。为对落叶松木材物理力学性能进行评估,基于所测的新旧落叶松木材试件的无损检测参数平均微钻阻力值 M_{mr} 及超声波波速 V_{us} 建立落叶松保有密度及力学性能多元线性回归模型如式(7)~式(10)。

$$\rho_0 = 201.76 + 1.905x_1 + 0.0738x_2 \quad (7)$$

$$M_{OR} = -2.294 + 0.1707x_1 + 0.0202x_2 \quad (8)$$

$$M_{OE} = -126.653 + 16.75x_1 + 1.466x_2 \quad (9)$$

$$C_{SPG} = 25.482 + 0.3025x_1 + 0.0063x_2 \quad (10)$$

式中: x_1 为平均微钻阻力值 M_{mr} , rel; x_2 为超声波波速 V_{us} , m/s。

为对所拟合落叶松木材物理力学性能参数公式进行拟合优度分析,计算了所建立模型的决定系数 R^2 并进行了显著性检验,如表5所示。结果显示,全干密度 ρ_0 、抗弯强度 M_{OR} 、抗弯弹性模量 M_{OE} 与顺纹抗压强度 C_{SPG} 的决定系数 R^2 分别为0.6792、0.5349、0.4848和0.5996,同时模型显著性检验结果显示所建立4个评估模型均在0.01水平显著 ($p < 0.01$),说明所建立4个模型的拟合效果均较好。综上所述,基于平均微钻阻力值 M_{mr} 及超声波波速 V_{us} 使用多元线性回归方法对落叶松木材物理力学参数 (ρ_0 、 M_{OR} 、 M_{OE} 与 C_{SPG}) 进行评估有效可行。

表5 拟合模型显著性检验

Table 5 Significance test of fitting model

	自由度	平方和	均方	F值	p 值	决定系数 R^2
全干密度/(kg/m ³)	2	112 240.34	56 120.17	57.16	0.00	0.6792
抗弯强度/MPa	2	5 898.06	2 949.03	25.40	0.00	0.5349
抗弯弹性模量/MPa	2	2.29×10^7	1.15×10^7	27.15	0.00	0.4848
顺纹抗压强度/MPa	2	2 244.96	1 122.48	39.64	0.00	0.5996

3 结论

为探究古建筑木材材性变化情况,以故宫养心殿西配殿修缮中获得的距今(350±20)a的华北落叶松擎檐柱为研究对象,以年轮宽度及试件加工位置与之相似的华北落叶松新材作为对比,分别加工标准试件,对自然老化后试件的无损检测参数及外观颜色和物理力学性能参数的变化情况进行试验研究与分析,并基于无损检测参数建立落叶松保有密度及力学性能多元线性回归模型,得到以下

结论:

1) 所测的自然老化木材试件物理力学参数与无损检测参数衰减明显,其中全干密度 ρ_0 、抗弯强度 M_{OR} 、抗弯弹性模量 M_{OE} 及顺纹抗压强度 C_{SPG} 的衰减率分别为14.40%、20.18%、23.46%及14.80%,抗弯性能衰减明显;平均微钻阻力 M_{mr} 相对新材试件降低约44.34%,而超声波波速 V_{us} 降低约7.71%。同时A类试件各参数的变异系数COV均高于N类新材试件,但两类试件的物理力学性能

参数及无损检测参数均符合正态分布。

2) 老化木材颜色朝红、黄的方向发展且亮度降低,其中红色参数 a^* 的变化最为明显,相对新材 a^* 增大88.92%;老化试件与落叶松新材试件相比,外观颜色发生了极为显著的差别。

3) 基于无损检测参数建立了落叶松材质物理力学性能参数的多元线性回归模型全干密度 ρ_0 、抗弯强度 M_{OR} 、抗弯弹性模量 M_{OE} 及顺纹抗压强度 C_{SPG} 的决定系数 R^2 分别为0.679 2、0.534 9、0.484 8和0.599 6,表明建立多元回归模型可用于落叶松物理力学参数的无损评估。

参考文献

- [1] ATTAR-HASSAN G. The effect of ageing on the mechanical properties of eastern white pine [J]. Bulletin of the Association for Preservation Technology, 1976, 8(3): 64.
- [2] CAI Z, HUNT M O, ROSS R J, et al. Static and vibration moduli of elasticity of salvaged and new joists [J]. Forest Products Journal, 2000, 50(2): 35-40.
- [3] 祝英明. 基于力学试验和无损检测的古建筑杉木构件材料性能研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
ZHU Y M. Experimental and nondestructive examination studies on the material mechanical properties of Chinese fir structural timber [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018. (in Chinese)
- [4] OOKA Y, TANAHASHI H, IZUNO K, et al. Effects of aged wooden members on seismic performance of old traditional wooden structures [C]//The 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, 2012.
- [5] KATALIN K. Effect of natural aging on wood [D], Sopron: University of West Hungary, 2014.
- [6] SONDEREGGER W, KRÁNITZ K, BUES C T, et al. Aging effects on physical and mechanical properties of spruce, fir and oak wood [J]. Journal of Cultural Heritage, 2015, 16(6): 883-889.
- [7] 高悦文, 呼梦洁, 俞君宝. 木材材性退化的试验研究进展综述[J]. 山西建筑, 2020, 46(10): 110-111.
GAO Y W, HU M J, YU J B. Review of experimental research on wood degradation [J]. Shanxi Architecture, 2020, 46(10): 110-111. (in Chinese)
- [8] 张厚江, 管成, 文剑. 木质材料无损检测的应用与研究进展[J]. 林业工程学报, 2016, 1(6): 1-9.
ZHANG H J, GUAN C, WEN J. Applications and research development of nondestructive testing of wood based materials [J]. Journal of Forestry Engineering, 2016, 1(6): 1-9. (in Chinese)
- [9] 彭勇刚, 廖红建, 钱春宇, 等. 古建筑木材料损伤强度特性研究[J]. 地震工程与工程振动, 2014, 34(Sup1): 652-656.
PENG Y G, LIAO H J, QIAN C Y, et al. Damage strength characteristic of wood of ancient building [J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamics, 2014, 34(Sup1): 652-656. (in Chinese)
- [10] 木材年轮宽度和晚材率测定方法: GB/T 1930—2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
Method for determination of the annual rings width and latewood rate of wood: GB/T 1930—2009 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2009. (in Chinese)
- [11] 徐有明, 徐姗姗, 林汉, 等. 火炬松种源建筑材抗弯性质的变异及与树龄、晚材率、木材密度的关系[J]. 林业科学, 2007, 43(2): 77-83.
XU Y M, XU S S, LIN H, et al. Variation in wood bending properties of exotic loblolly pine provenances for building lumber and their relationships to tree age, tree growth and wood density [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2007, 43(2): 77-83. (in Chinese)
- [12] YOKOYAMA M, GRIL J, MATSUO M, et al. Mechanical characteristics of aged Hinoki wood from Japanese historical buildings [J]. Comptes Rendus Physique, 2009, 10(7): 601-611.
- [13] 龚迎春, 叶琦, 武国芳, 等. 基于蒙特卡洛模拟预测正交胶合木(CLT)顺纹抗压强度[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(6): 234-237.
GONG Y C, YE Q, WU G F, et al. Prediction of the compressive strength of cross-laminated timber based on Monte Carlo simulation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2020, 35(6): 234-237. (in Chinese)
- [14] 王军, 龚德才, 潘彪. 南京明代宝船厂遗址出土大型木构件材质分析研究[J]. 文博, 2019(4): 34-42.
WANG J, GONG D C, PAN B. Material analysis and research on the large wooden components excavated from Baochuan shipyard site of the Ming dynasty in Nanjing [J]. Journal of Archaeology and Museology, 2019(4): 34-42. (in Chinese)
- [15] 江京辉, 吕建雄. 高温热处理对木材颜色变化影响综述[J]. 世界林业研究, 2012, 25(1): 40-43.
JIANG J H, LV J X. Review on color change of heat treated wood at high temperature [J]. World Forestry Research, 2012, 25(1): 40-43. (in Chinese)
- [16] LIU F L, XU P F, ZHANG H J, et al. Use of time-of-flight ultrasound to measure wave speed in poplar seedlings [J]. Forests, 2019, 10(8): 682.