

ACQ-D 防腐改性对速生杨木蠕变性能的影响

程秀才¹, 岳孔^{2*}, 贾翀³

(1. 南京市产品质量监督检验院, 南京 210019; 2. 南京工业大学土木工程学院, 南京 211800;
3. 南京林业大学材料科学与工程学院, 南京 210037)

摘要: 通过试验研究, 分析室内常规环境条件下承受不同应力水平作用的速生杨木及其氨溶季铵铜 (ACQ-D) 防腐处理木材的蠕变规律, 对试验数据进行拟合分析, 得到蠕变变形曲线, 建立速生杨木及其 ACQ-D 防腐改性材的相对蠕变模型, 并对不同受荷时间的速生杨木及其 ACQ-D 防腐改性材的相对蠕变变形进行预测。结果表明, 速生杨木及其 ACQ-D 防腐改性材蠕变变形规律相似, 其蠕变变形均随着应力水平和受荷时间的增大而增大; 由于 ACQ-D 不显著改变速生杨木的力学性能, 速生杨木及其 ACQ-D 防腐改性材初始弹性变形接近, 低应力水平下蠕变变形也相差不大, 但 ACQ-D 防腐提高了速生杨木的吸湿性, 从而导致高应力水平下防腐改性木材较大的相对蠕变变形。

关键词: 木材防腐; 速生杨木; 氨溶季铵铜; 蠕变性能

中图分类号: S782.33

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2017)06-1038-05

The effect of ACQ-D treatment on creep properties of fast-growing poplar wood

CHENG Xiucan¹, YUE Kong², JIA Chong³

(1. Nanjing Institute of Product Quality Inspection, Nanjing 210019;

2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800;

3. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037)

Abstract: The creep property of the fast-growing poplar wood and its ACQ-D treated group at different stress levels under uncontrolled interior grade conditions was analyzed. The relative creep deformation was fitted and then models for the control and ACQ-D treated groups were developed. The models can be used to forecast the long-term deformation of the wood. The results showed the creep deformation of ACQ-D-treated specimens was similar to that of the control group and the creep deformation increased with an increase of stress level and loading time. The difference in total creep deformations between the control and ACQ-D-treated groups was not obvious according to their similar bending strength. Under a higher stress level, the relative creep deformation of ACQ-D-treated poplar wood was increasingly greater than that of the control, which may be caused by the hygroscopicity of ACQ-D.

Key words: wood preservation; fast-growing poplar; ammoniacal copper quaternary; creep property

中国天然林木材目前已全面禁伐, 木材资源的供给结构已发生根本改变, 除了一半左右为进口材外, 国产速生木材已成为国内木材工业原材料的主力军, 且在将来一段时间继续发挥更大的作用。中国人工速生木材资源丰富, 以江苏北部地区的速生杨木为例, 由于其生长周期短、成材速度快等优点, 在木制品中的应用越来越广, 但其材质松软、密度

低、硬度小、含水率高且分布不均匀、天然耐久性差及易产生干缩变形等天然和加工缺陷限制了其高效利用, 特别是用作承重构件方面, 只有通过增强、阻燃和防腐等一系列处理才能安全使用^[1-3]。

采用防腐措施对木材进行改性, 是延长木材使用寿命、提高木材服役品质的可靠手段, 尤其在环境温暖湿润等木材易为虫、菌等微生物侵害的条件

收稿日期: 2017-05-02

基金项目: 江苏省质量技术监督局科技项目 (KJ155425) 和江苏省高校自然科学基金项目 (14KJB220001) 共同资助。

作者简介: 程秀才, 博士, 高级工程师。E-mail: xiucaicheng@126.com

* 通信作者: 岳孔, 博士, 副研究员。E-mail: yuekong@njtech.edu.cn

下使用速生木材等情况。水载型木材防腐剂改性木材,其表面清洁无污染,也不掩盖木材纹理,后续能够进一步进行涂饰、胶合等常规加工,已成为广泛使用的木材防腐剂。氨溶季胺铜(ammoniacal copper quaternary, ACQ-D)对常见的木腐菌具有广普性,不影响木材的力学性能,成本与上一代重铬砷酸铜(CCA)接近,且对人友好,对环境危害小,因此成为当前阶段水载型木材防腐剂的首选^[4-6]。

作为承载型结构用材,由蠕变产生的附加变形效应将增大结构的总体变形,严重时甚至导致结构破坏,因此蠕变成为其安全使用中首要考虑的重要参数^[7]。

目前,中国木材防腐已初具规模,且逐渐成为产业,防腐木材也已实现规模化工业生产和广泛应用,针对主要的 ACQ-D 防腐改性速生木材,其作为受力构件的蠕变性能尚未得到广泛关注和研究。同时,有关学者对木材、复合木构件的蠕变机理、蠕变性能进行了大量的试验研究^[8-14],但大多基于恒温恒湿理想环境条件开展,研究结果尚缺少对实际工程的指导意义。因此,本研究目的是考察在常规环境条件下 ACQ-D 防腐改性对速生杨木蠕变性能的影响,以期可为 ACQ-D 防腐改性材的结构安全使用提供数据和参考。

1 材料与方法

1.1 材料

试验用材采用速生杨木 I-69,木材选自江苏淮安楚州区白马湖农场圆满通直树木主干,树龄 16 a,取其中边材,通过人工干燥将其含水率调整至 10%~12% 范围内,加工成尺寸为 38 mm×180 mm×3 050 mm 的规格材。

ACQ-D 防腐剂购自国内木材防护剂生产单位,为蓝绿色透明液体、微黏,其有效成分的质量百分数为 15%,其中铜(CuO)的质量百分数为 10%,季胺盐(DDAC)的质量百分数为 5%。根据中国《木结构工程施工质量验收规范(GB 50206-2012)》中 C4A 使用环境的要求^[12],通过蒸馏水稀释将其调整至活性成分质量百分数为 2.0%。

1.2 方法

1.2.1 木材防腐改性处理方法 根据参考文献[4]和[6],速生杨木试样的改性处理工艺为:

- (1) 将木材试样置于真空罐内,抽取真空度至 0.08~0.09 MPa,并保持 1 h;
- (2) 加入 ACQ-D 防腐液,完全浸没试样;
- (3) 调整至常压,同时升温至 55~65℃;

- (4) 加压至 0.45~0.5 MPa,保温保压 3 h;
- (5) 卸压,抽真空至真空度 0.06~0.07 MPa,并保持 30 min,以排除多余防腐液;
- (6) 调整至常压状态,试样冷却后出罐;
- (7) 浸渍后试样在遮阴、通风条件下静置 7 d;
- (8) 在不高于 60℃ 的环境下干燥至含水率在 10%~15% 范围内;

(9) 防腐改性材在温度(20±2)℃、相对湿度(65±5)%条件下至少调质 10 d,直至质量恒定。

1.2.2 木材蠕变性能测试方法 木材抗弯强度根据文献[15]中的规定进行,每种条件下试样的重复数量为 5 个,极限抗弯承载力取其算数平均值。蠕变性能试验参照文献[16]和[17]的方式进行,试样尺寸为 15 mm×30 mm×320 mm(横纹径向×横纹弦向×顺纹纵向),每种条件下试样的重复数量为 3 个,测试结果取其算数平均值,测试采取跨中集中静载的方式,跨度为 300 mm,应力采用试件极限荷载的 30%和 50% 2 种水平,测试周期为 1 000 h,蠕变试验环境条件为常规室内条件,温度和相对湿度分别在 15.7~23℃和 36%~67% 范围内。

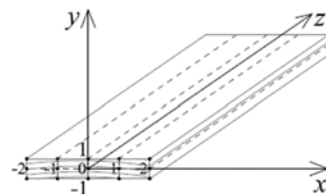


图 1 抗弯强度和蠕变性能试样取样方法

Figure 1 Sampling method for bending strength and creep properties

蠕变变形通过人工读数的方式,采用百分表在试样跨中测定,读数采取前密后疏的方式,前 12 h 内每 5 s 记录 1 次,之后的 2 d 内每 15 s 记录 1 次,然后 1 周内每小时记录 1 次,之后每天记录 1 次。

木材的抗弯强度和蠕变性能试样取材见图 1。其中,试样 $X_{2,-1}Y_{1,0}$ 、 $X_{-1,0}Y_{0,1}$ 和 $X_{1,2}Y_{1,0}$ 为蠕变性能测试试样,其余 $X_{2,-1}Y_{0,1}$ 、 $X_{-1,0}Y_{1,0}$ 、 $X_{-1,1}Y_{1,0}$ 、 $X_{-1,1}Y_{0,1}$ 和 $X_{1,2}Y_{0,1}$ 为抗弯强度测试试样。

2 结果与分析

2.1 应力水平

ACQ-D 质量百分数为 2.0%,速生杨木试样内防腐剂沉积量为 6.43~6.60 kg·m⁻³,根据文献[18],ACQ-D 防腐改性材满足 C4A 环境的使用要求。

不同应力水平下空白试件(速生杨木未处理材)和 ACQ-D 防腐改性材蠕变变形曲线见图 2 和图 3。

蠕变试验过程中环境温度和相对湿度等测试条件见图4。

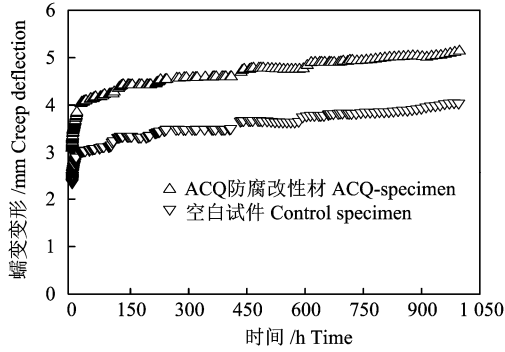


图2 速生杨木及其ACQ防腐改性材30%应力水平下蠕变 Figure 2 Creep curves of the control and ACQ-specimen under 30% stress level

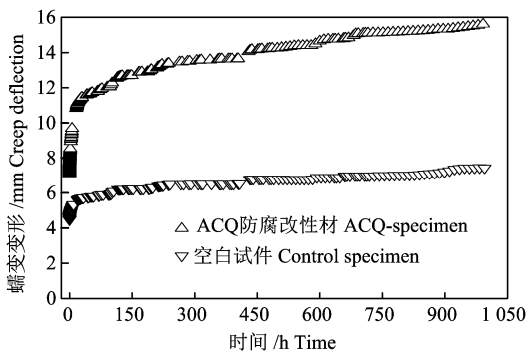


图3 速生杨木及其ACQ防腐改性材50%应力水平下蠕变 Figure 3 Creep curves of the control and ACQ-specimen under 50% stress level

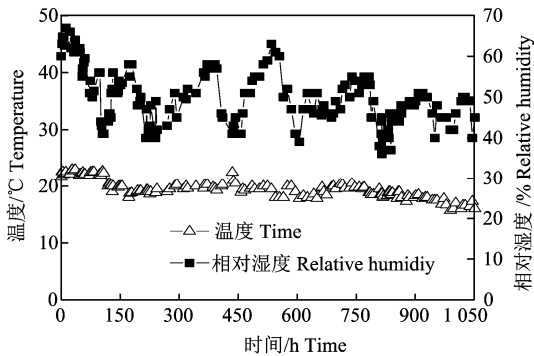


图4 蠕变试验环境条件

Figure 4 Environment condition during creep test

由图2和图3可见：在不同应力水平下，空白试件和ACQ-D防腐改性材的蠕变变形遵循类似的规律：随着试验时间的持续，试样蠕变变形以非线性规律增加；试样蠕变变形随着应力水平的提高而增加；在低应力水平下，试样蠕变变形在经历短暂的瞬态蠕变后，随即进入稳态蠕变过程，其变形增长非常缓慢，该情况不会导致试样的最终破坏；在高应力水平下，试样蠕变变形的速度明显高于低应

力水平，试样可能由于过大的蠕变变形而破坏。

根据文献[4]，ACQ-D防腐改性处理后，速生杨木的抗弯强度下降5.42%，变化幅度不大，因此，在低应力水平下，二者的蠕变变形相近；蒋明亮^[19]的研究结果表明，ACQ处理后的毛白杨，其吸湿性强于素材，这是由防腐剂较强的吸湿性造成的。因此试样经ACQ-D防腐改性处理后，其吸湿性发生变化，更易受环境湿度的影响，木材的短周期力学性能不仅与环境湿度有负相关关系，蠕变变形也随着环境湿度的变化而增大。因此，在实际工程应用中，速生杨木及其ACQ-D防腐改性材在设计时要控制好合适的应力水平。

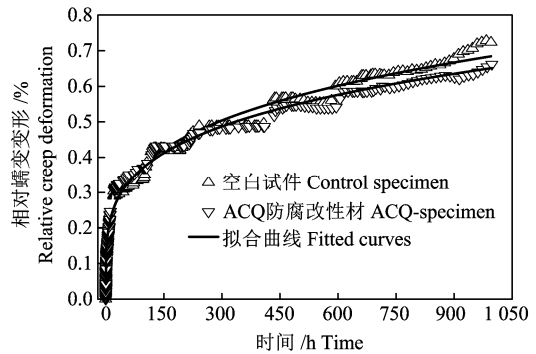


图5 速生杨木及其ACQ防腐改性试件30%应力水平下相对蠕变变形及其拟合曲线和相关系数 Figure 5 Model fitted to relative creep deformation at 30% stress level for the control group and ACQ-specimens; the goodness of fit values was 0.9857 and 0.9768, respectively

2.2 ACQ-D防腐改性

本研究采用的速生杨木及其ACQ-D防腐改性材蠕变本构模型由虎克弹性体、Kelvin模型和粘性体模型串联构成，是一个由Maxwell模型和Kelvin模型串联而成的4-element模型，该模型能够较全面描述胶合木梁的蠕变过程。

蠕变变形测试中，所有试样在所采用应力水平下均没有进入到破坏阶段，因此只研究试样瞬态蠕变和稳态蠕变变形，不涉及加速蠕变变形，即总蠕变变形为：

$$\epsilon(t) = \sigma(1 + at^b) / E \tag{1}$$

式中， t 为蠕变变形试验时间； a 、 b 均为试验系数。

根据式(1)，有总变形与时间的关系，见式(2)：

$$\delta(t) = \delta_0 + \delta_c(t) \tag{2}$$

式中： $\delta(t)$ 为总变形； δ_0 为初始弹性变形； $\delta_c(t)$ 为蠕变变形，且 $\delta_c(t) = At^b$ 。

在蠕变试验进行中, 所测量总变形中包含弹性变形, 为更直观清晰分析速生杨木及其 ACQ-D 防腐改性材的非线性粘弹性和粘性变形规律, 采用相对蠕变变形进行进一步讨论, 相对蠕变变形定义见式 (3):

$$\frac{\delta(t)-\delta_0}{\delta_0} = \frac{At^b}{\delta_0} = at^b \quad (3)$$

利用 Origin 软件对试验数据进行拟合分析, 并对试样长期变形进行预测, 拟合结果见图 5 和图 6。

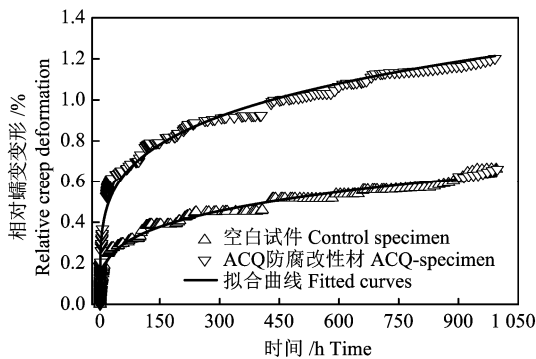


图 6 速生杨木及其 ACQ 防腐改性试件 50% 应力水平下相对蠕变变形及其拟合曲线和相关系数

Figure 6 Model fitted to relative creep deformation at 50% stress levels for the control group and ACQ-D-treated specimens; the goodness of fit values were 0.9844 and 0.9752, respectively

图 5 中, 30% 应力水平下, 速生杨木空白试件和 ACQ 防腐改性材总变形拟合公式分别为式 (4)

和 (5):

$$\frac{\delta(t)-\delta_0}{\delta_0} = 0.1179 \times t^{0.2548} \quad (4)$$

$$\frac{\delta(t)-\delta_0}{\delta_0} = 0.1231 \times t^{0.2413} \quad (5)$$

图 6 中, 50% 应力水平下, 速生杨木空白试件和 ACQ 防腐改性材总变形拟合公式分别为式 (6)

和 (7):

$$\frac{\delta(t)-\delta_0}{\delta_0} = 0.0977 \times t^{0.2697} \quad (6)$$

$$\frac{\delta(t)-\delta_0}{\delta_0} = 0.2437 \times t^{0.2327} \quad (7)$$

从图 5 和图 6 可以看出, 相对蠕变变形拟合曲线的精度较高, 相关系数 R^2 均在 0.97 以上, 接近 1, 说明建立的模型精度较高, 并具有较好的长期蠕变变形预测特点。

根据图 5 和图 6, 结合试验过程中所记录环境条件图 4, 可知在环境湿度有剧烈变化之处, 试样的蠕变变形均会有小幅度的跃升, 扣除掉弹性变形的相对蠕变变形曲线平滑度下降, 这更能反映真实使用环境条件下速生杨木及其 ACQ-D 防腐改性材的使用特性, 因此, 其在设计时要控制好合适的应力水平, 同时, 应采取材料表面防护措施, 以降低环境温湿度对其蠕变性能的影响。

根据得到的速生杨木及其 ACQ-D 防腐改性材相对蠕变变形式 (4) ~ 式 (7), 其不同应力水平下的长期变形预测见表 1。

表 1 不同应力水平下速生杨木及其 ACQ-D 防腐改性材相对蠕变变形预测

Table 1 The forecast of relative creep deformation of control groups and ACQ-D-treated specimens at different stress levels

时间/年 Time/a	空白试样 Control group		ACQ-D 防腐改性材 ACQ-specimen	
	30 %	50 %	30%	50%
0.5	93.41	99.50	92.79	170.94
1	112.61	118.72	109.68	200.85
2	135.76	141.66	129.65	236.01
5	173.81	178.91	161.73	292.10
10	209.54	213.47	191.18	343.23

由表 1 可见, 所有试样的相对蠕变变形均随着荷载作用时间的延长而增加, 且随着应力水平的提高, 其相对蠕变变形增大。如材料不发生过大变形而导致的破坏, 则空白试样在 30% 和 50% 应力水平作用下, 半年后的相对蠕变变形分别为 93.41% 和 99.50%, 10 年后分别为 209.54% 和 213.47%; 经过 ACQ-D 防腐改性处理后, 其半年后的相对蠕变变形分别为 92.79% 和 170.94%, 10 年后分别为 191.18% 和 343.23%。考虑到速生杨木及其 ACQ-D

防腐改性材的初始变形较大, 其更长服役周期时的变形将更大, 如果依照《木结构设计规范 (GB 50005-2003)》^[20]或《胶合木结构技术规范 (GB/T 50708-2012)》^[21], 仅按荷载效应的标准组合计算, 可能导致长期受荷构件的挠度偏大。

3 结论

速生杨木及其 ACQ-D 防腐改性材蠕变变形规律相似, 总体上具有较为典型的瞬态蠕变和稳态蠕

变变形特征,且其蠕变变形均随着应力水平和受荷时间的增大而增大。

ACQ-D防腐改性不显著改变速生杨木的短周期力学性能,其初始弹性变形接近,低应力水平下蠕变变形相差不大;但ACQ-D防腐提高了速生杨木的吸湿性,从而导致高应力水平下防腐改性木材较大的相对蠕变变形,因此在设计时要控制好合适的应力水平,必要时,应采取材料表面防护措施,以降低环境温湿度对其蠕变性能的影响。

参考文献:

- [1] 刘盛全, 鲍甫成. 我国杨树人工林材性与加工利用研究现状及发展趋势[J]. 木材工业, 1999, 13(3): 14-16.
- [2] 叶克林, 王金林. 人工林杨树木材的加工利用[J]. 木材工业, 2003, 17(1): 5-7, 10.
- [3] 骆士寿. 化学改性杨木的抗白蚁和抗霉耐腐性能研究[J]. 林业科技开发, 1999(6): 33-34.
- [4] 岳孔, 刘伟庆, 卢晓宁, 等. ACQ-D防腐处理对速生杨木力学性能和等温吸着特性的影响[J]. 南京林业大学学报, 2010, 34(2): 122-125.
- [5] 王雅梅, 刘君良, 王喜明. ACQ防腐剂处理竹材的防腐性能和抗流失性能[J]. 木材工业, 2008, 22(2): 14-16.
- [6] 岳孔, 刘伟庆, 卢晓宁. 化学改性对速生杨木木材力学性能和天然耐久性的影响[J]. 安徽农业大学学报, 2011, 38(3): 453-457.
- [7] 徐咏兰, 华毓坤. 不同结构杨木单板层积材的蠕变和抗弯性能[J]. 木材工业, 2002, 16(6): 10-12.
- [8] 金维洙, 贾娜. 单板层积梁弯曲蠕变特性[J]. 东北林业大学学报, 2007, 35(10): 30-32.
- [9] 刁海林, 罗建举. 马占相思木材蠕变特性的研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, 32(6): 146-151.
- [10] 李大纲. 意杨木材弯曲蠕变特性的初步研究[J]. 四川农业大学学报, 1998, 16(1): 99-101.
- [11] PIERCE C B, DINWOODIE J M. Creep in chipboard. Part 1: Fitting 3- and 4- element response curves to creep data[J]. J Mater Sci-Mater, 1977, 12(10): 1955-1960.
- [12] PIERCE C B, DINWOODIE J M, PAXTON B H. Creep in chipboard. Part 2: The use of fitted response curves for comparative and predictive purposes[J]. Wood Sci Technol, 1979, 13(4): 265-282.
- [13] GERHARDS C G. Bending creep and loads duration of douglas-fir 2 by 4 under constant load for up to 12-plus years[J]. Wood Fiber Sci, 2000, 32(4): 489-501.
- [14] CHEN T Y, LIN J S. Creep behavior of commercial wood based boards under long-term loading at room conditions in Taiwan[J]. Holz als Roh- und Werkstoff, 1997, 55(6): 371-376.
- [15] 国家林业局. 木材抗弯强度试验方法: GB/T 1936.1-2009 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [16] YUE K, LIU W Q, CHEN Z J, et al. Investigation of the creep property of fast-growing poplar wood modified with low molecular weight resins[J]. Bioresources, 2016, 11(2): 1620-1633.
- [17] 那斌, 岳孔, 卢晓宁, 等. 速生杨木改性材蠕变性能的初步研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2009, 29(3): 90-94.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 木结构工程施工质量验收规范: GB 50206-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [19] 蒋明亮. 低毒防腐剂百菌清及铜制剂对木材尺寸稳定及力学性能的影响[J]. 林业科学, 2001, 37(4): 107-110.
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 木结构设计规范: GB 50005-2003 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [21] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 胶合木结构技术规范: GB/T 50708-2012 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.