

Review of the Prediction Model for Durability of Structural Wood under Decay and Termite Attack

Xiaoli Wang^{1*}, Haotian Liu¹, Xueliang Wang²

¹School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

²Hubei Key Laboratory of Roadway Bridge & Structure Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei

Email: *1095025885@qq.com

Received: Sep. 1st, 2015; accepted: Sep. 16th, 2015; published: Sep. 23rd, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The mechanical properties of the structural wood are affected by its surrounding such as shrinkage cracks, decay fungi, termite attack and duration of load effect. It is necessary to study how these factors affect the resistance of the wood member during service life in order to predict the residual life of timber structure. Decay fungi induce the depth of decay increasing as time and the termite attack makes the wood have more pinholes. Both of them will greatly reduce the effective area of the wood member and meanwhile decay fungi decrease the strength properties in wood. In this paper the research development and achievement of the prediction model for durability of structural wood under decay and termite attack are reviewed in detail including decay model of in-ground timber, exposed timber in ground contact, above-ground exposed timber, protected timber and a reliability model under termite attack, and then it is concluded that it is the key problem and main future research to study on the mechanics of timber decay and to develop the quantitative prediction model under decay and termite attack considering various environmental factors.

Keywords

Prediction Model under Decay Fungi, Reliability Model under Termite Attack, Structural Wood

*通讯作者。

腐朽虫蛀木构件的耐久性预测模型研究进展

王小丽^{1*}, 刘昊天¹, 王雪亮²

¹武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉

²武汉理工大学道路桥梁与结构工程湖北省重点实验室, 湖北 武汉

Email: *1095025885@qq.com

收稿日期: 2015年9月1日; 录用日期: 2015年9月16日; 发布日期: 2015年9月23日

摘要

对木结构进行剩余寿命预测需要从材料层面考虑木材的腐朽、虫蛀、干缩裂缝和持续荷载对木材长期抗力的影响。木构件腐朽深度的增大和木材强度的降低是腐朽引起木材长期抗力降低的主要原因, 构件中的虫洞数量和虫洞深度减小了构件的有效横截面积是虫蛀对木材长期抗力降低的主要影响。因此, 本文从木材腐朽和虫蛀的角度, 分析总结了木构件耐久性预测模型研究进展, 包括地面木构件腐蚀随时间变化的模型, 与土壤接触的地面木构件的腐朽模型, 地下木桩的腐蚀模型和虫蛀的可靠度模型等。并在此基础上, 指出腐朽机理的研究, 考虑各种环境因素建立更加合理的腐朽规律和虫蛀规律是有待解决的关键问题。

关键词

腐朽预测模型, 虫蛀可靠度模型, 木构件

1. 引言

木材是由纤维素、半纤维素和木质素等多种组分构成的复杂高分子聚合物, 具有粘弹性和可回收性, 而且, 废弃建筑木材也不会对环境造成污染, 因此在国外, 如美国, 澳大利亚、日本等都在进行大规模木结构的建设。但由于木材受外界环境影响较大, 温湿度变化、木材腐朽、虫蛀、干缩裂缝和扣件腐蚀都会引起木构件长期强度的降低, 从而造成木结构的抗风抗震承载力和耐久性的降低[1]。例如: 澳大利亚的很多住宅由于扣件腐蚀引起构件退化, 致使很多木结构住宅在风荷载的作用下发生破坏; 在1994年的美国Northridge地震和1995年神户大地震中多数木结构住宅倒塌破坏严重[2], 究其原因, 主要就是由于木材腐朽和白蚁攻击引起的结构承载力降低所致。因此, 国内外学者对木材的耐久性的进行了深入细致的研究。

木结构耐久性的研究主要集中在外界因素对木材承载力的影响和木构件防腐防蛀方法两个方面。而各种外界因素对木材长期承载力影响规律和预测模型构建, 是评价木结构耐久性的基础, 可为木结构的维护和修复提供依据, 有效地预测木结构的承载性能变化, 减少木结构事故的发生以及由此造成的生命财产的损失。因此, 本文对木构件在长期使用条件下, 构件腐朽和虫蛀随时间变化的规律进行了分析总结, 并对考虑各种环境因素下的木材腐朽随时间变化的模型, 包括地面木构件材料腐蚀随时间变化的模型, 与土壤接触的地面木构件的腐朽模型, 地下木桩的腐蚀模型, 以及虫蛀随机模型等进行了分析综述。在此基础上, 提出今后重点研究的方向, 以期为国内木结构的现状评价和剩余寿命预测奠定基础。

2. 木构件的腐朽虫蛀预测模型的研究现状

影响木构件承载力的因素除了持续荷载(duration of load, DOL)效应[3]外,还有木材的腐朽、虫蛀、干缩裂缝和连接件的腐蚀等。澳大利亚以 Robert H. Leicester 为首的 CSIRO 研究机构从上世纪九十年代开始进行这方面的研究,他们分别对地下埋置的木材、地面上的木材、在海洋环境下的木材的随时间变化的腐朽规律[4]-[6]进行长期的系统的理论和试验研究,得到了木材腐朽规律;并对木材在白蚁攻击引起的木材虫洞的出现规律进行了调查和专家咨询统计[4]-[8],得到虫蛀随时间变化的关系。这些研究成果对分析木材强度随时间降低的规律有非常重要的意义。综合各项研究成果,Robert H. Leicester 等人编制了相应的木结构耐久性分析软件,考虑了澳大利亚各个地区的气候特点,如年平均降雨量、平均温度、大气压等[6]。部分研究成果已编入澳大利亚木结构耐久性设计规范中。最近,考虑木材种类、腐朽深度、虫洞的出现及周围环境的随机性,又提出的各类情况下木构件的随机设计过程[8] [9],并将其应用到木构件设计的可靠度分析中。而在我国由于地域宽广,树种繁多,现代木结构才刚刚起步,尚未引起国内学者对木结构耐久性的重视,关于木材腐朽规律研究也才刚刚开始,中国林业科学研究院木材工业研究所的杨忠和江泽慧等人从 2003 年开始对木材的初期腐朽规律进行了研究,重点在于对初期腐朽对木材的危害及快速检测的研究[10] [11],关于木材随时间的腐朽规律的研究未见报道。

3. 腐朽 - 时间模型

影响木结构耐久性的一个关键因素是木材的腐朽程度,因此,对木结构进行耐久性设计首先要有一个合理有效的耐久性预测模型。澳大利亚的 Leicester R.H.等人[5] [9] [12]-[14]对澳大利亚的各个区域不同外界环境下的木构件进行了长期系统的地理腐朽试验,得到了不同外部环境下的木构件的腐朽时变模型。

影响真菌对木材腐朽速度的因素有木材种类、含水量、温度、防腐处理和周围可获得氧气等。如果木材与土壤相接触,土壤中的水分将影响木材的含水量,同时还可能带入化学物质。对未做防腐处理的结构,长期外露的木构件会出现干缩裂缝,导致雨水和真菌孢细胞较容易地通过木材的坚硬保护层进入木材内部,加速木材的腐朽[12] [13]。因此,木材腐朽预测模型根据所处位置的不同应分别考虑地下木材(in-ground timber)、与土壤接触的外露木材(exposed timber in ground contact)、地面以上不与土壤接触的木材(above-ground, exposed timber)和防腐木材(protected timber) [14]。研究表明:只有当木材中存在自由水时真菌才会成活,即含水量接近或超过木纤维饱和点时,木材才会被真菌攻击。因此,不论哪种情况,在地域条件、木材种类确定的前提下,确定木材腐朽预测模型的关键问题是对木构件温度的历史预测和获得含水量随时间变化的规律。

3.1. 地下木材(In-Ground Timber)的腐朽预测模型

该模型适用于在结构中埋入地下的木桩的腐朽预测。它是建立在澳大利亚不同气候条件下的木试件的长期地理试验数据的基础上,根据这些数据,Leicester R.H.等人[9]将澳大利亚的树种分为四个地下退化等级,并且对这些数据进行标准化,得到木材腐朽率的理想量化模型,如图 1 所示。

由图 1 可以看出,该模型为线性变化模型, t_{lag} 为木材从埋入地下到开始腐朽的时间,斜率 r 为木材腐朽率。虽然该模型是针对澳大利亚的地域和气候条件提出的,但是综合了澳大利亚各种地理环境后得到的理想模型,适合各类外界条件,关键要确定适合国内木材的相应的 t_{lag} , 和腐朽率 r 即可。

3.2. 与土壤接触的外露木材的腐朽预测模型(Exposed Timber in Ground Contact)

这类模型适合在木结构中部分埋入地下的木桩或电线杆的腐朽预测。对这类模型必须考虑土壤和木材间水的移动、土壤性质和气候等。Leicester R.H.等[4] [5]曾在澳大利亚的近 15 个地区对 $50 \times 50 \times 500$ mm

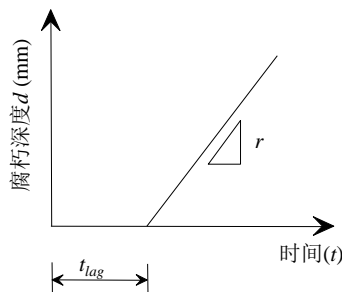


Figure 1. Decay depth-time model of in-ground timber
图 1. 地下木材的腐朽深度 - 时间模型[9]

的木方进行了的现场土埋耐腐试验。最初的目的是为了对木材进行耐久性分级，但该数据按腐朽深度整理分析后分别得到了未做防腐处理和 CCA 防腐处理的木方的腐朽深度与引起构件破坏的时间之间的关系，如图 2、图 3 所示。由图 3 可以看出，CCA 防腐剂的残留量对木构件使用期的耐腐性有很大影响，残留量越大，防腐效果越好。虽然这组曲线具有较强的地域局限性，但发展规律应适合任意地区，具体参数的标定需由具体试验得到。即便如此，对预测模型的标准化也非常有意义。

3.3. 地面以上不与土壤接触的木材(Above-Ground, Exposed Timber)

这种情况适合对木结构中的木梁、木楼板和不与土壤接触的木柱(如有柱础的木柱)的腐朽程度进行预测。要获得这种情况的量化模型，考虑的主要因素是湿度和时间的关系(time-of-wetness)，它可以通过统计年雨水量、风向、风速和雨滴的终速等得到；另外木构件外表面的处理对减小表面湿度吸附的影响也很大，由于气候的影响使木材出现的干缩裂缝也会使有效截面减小，加速真菌入侵。根据这一思路，澳大利亚已经获得一些有助于建立量化模型的研究成果；而我国则在对一些古旧木材的测量加固中获得一些数据，提出了一个初步古旧变质层厚度的计算公式。

3.3.1. 澳大利亚的预测模型

Leicester R.H.等人[6]采用了大量统计数据形成关于澳大利亚境内的所有地区的腐朽灾害地图索引，在进行木结构的耐久性设计研究中，通过查找对应地区的地图索引值，再考虑其他各种因素影响后进行修正。修正系数包括自然耐久性参数、木材参数、安装影响参数、防腐处理参数和干缩率影响参数等。这种方法仍然没有使模型量化，不能满足对木结构的剩余寿命预测的量化模型的要求。

建立量化腐朽模型的主要困难在于没有足够的地面伤木材腐朽试验数据进行模拟和验证，无法获得地面上木材的腐朽随时间变化的规律。文献[5]给出了 1972 年在墨尔本测得的两条暴露在外的墙表面和有悬挑遮盖的墙表面的时间-湿度曲线，这条曲线表明一栋房屋的不同部位含水量也不同，这就使地面上木材的腐朽规律更加复杂。如果在进行耐久性分析时，只考虑平均含水量较大，湿度变化较剧烈的结构部位对结构的影响，这一问题将得到简化。在对这些关键部位进行分析时，若假定在一般的外界环境下木材的湿度变化曲线形式具有相同的趋势，那么，通过气象部门统计数据即可得到该地区的平均湿度和湿度变化规律，在已知木构件初始含水量的前提下，根据毛细管流的 Brook-Corey 模型[5]，推导木构件的含水量随时间变化的曲线，当木材的含水量达到纤维饱和点时，真菌腐蚀开始，从而进一步推导木材腐朽随时间变化的规律。

虽然到目前位置，由于受试验数据的限制，还没有得到确定的腐朽率，但至少已经知道，腐朽率 r 可以表示为关于温湿度和树种的某种函数形式：

$$r = Af(T, t_w) \quad (2)$$

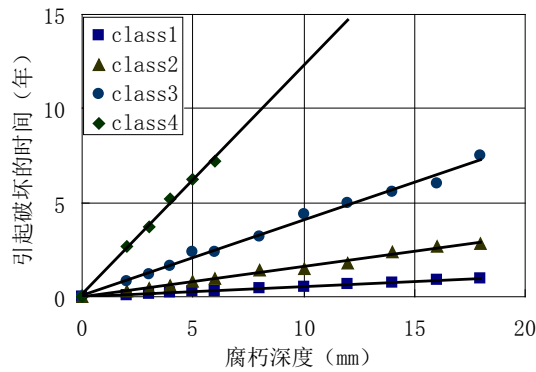


Figure 2. Model of decay depth with time caused damage for untreated graveyard stakes
图 2. 未经防腐处理的地面接触木材的腐朽深度 - 时间模型[5]

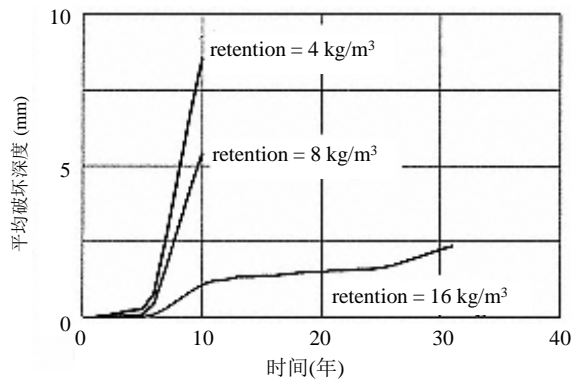


Figure 3. The average decay depth-time model of in-ground CCA treated timber (retention means the residual amount of CCA preservative)
图 3. 地下 CCA 防腐木材的平均腐朽深度 - 时间模型[5] (retention 表示 CCA 防腐剂残余量)

式中， A 为与采用树种相关的常数，可以通过现场试验数据标定得到， $f(T, t_w)$ 表示温度和含水量超过标准值为 28% 的纤维饱和点的时间的函数，还需要进一步研究得到。

3.3.2. 国内古旧木材腐朽变质厚度模型

国内根据对古建筑木结构维修加固时的一些数据进行整理，给出了古旧木材的腐朽变质厚度的初估公式[15]：

$$\delta = \frac{\delta_0}{2} \left(1 + \frac{t}{T_0} \right)^a \tag{3}$$

式中： δ_0 为古旧木材实际的变质层厚度，可现场多点抽样实测，统计标定。 T_0 为古旧木材的历史年代数， t 为预期木材今后的继续使用年代数， δ 为估计达到预期年代的变质层厚度， a 为考虑变质层厚度发展速度的指数参数，随年代而变化。根据少量的资料初步取：当

$T_0 < 400$ 年	$\alpha = 1$
$400 < T_0 < 800$ 年	$\alpha = 1.5$
$T_0 > 800$ 年	暂不考虑

该模型没有较强的理论依据，但已经反应出腐朽深度与时间的关系，且在 $T_0 < 400$ 年 时与澳大利亚提出的地理木材的腐朽模型不谋而合，因此在有实测数据支撑的前提下，可以用来模拟地面上木构件腐朽规律。

3.4. 防腐木材的腐朽模型

如果在建造木结构房屋时对构件都进行了防腐处理，那么木构件的含水量的变化规律与以上各类情况不同，需专门对此类模型进行研究。由图 3 可以看出，CCA 防腐剂的使用大大改变了木材腐朽速率；而且，防腐剂用来越大，腐朽速率越低。由图 3 可以推测，当防腐剂用量在一定范围时，腐朽深度与时间是双线性关系，当超过某一值时，这种关系将被打破。因此对防腐木材的腐朽预测模型不能简单套用以上的结论，需针对不同防腐剂种类、不同用量、不同树种和位置做系统研究。

4. 虫蛀随机模型

4.1. 虫洞与时间的关系

为了得到房屋的虫蛀规律，Leicester R.H.等人[4] [5]还对澳大利亚的木房屋进行了大量的统计分析，得到木结构内虫洞与时间的关系、虫洞深度随时间变化的关系，如图 4、图 5 所示。同时还提出了白蚁攻击房屋的随机模型。

4.2. 白蚁攻击房屋的随机模型

白蚁攻击房屋的随机模型包含了图 6 所示的一系列事件[7]。这些事件包括在距离房屋 50 m 处白蚁建巢所用的时间 t_1 、由巢移动到建筑物的时间 t_2 ，突破防蚁屏障的时间 t_3 ，在建筑中移动和使构件破坏的时间 t_4 。

因此，可以认为虫蛀引起木构件破坏的时间模型可以表述为：

$$T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (4)$$

其中， t_i 为时间随机变量，主要是根据以往的害虫控制器的调查记录和进行专家问卷统计得到的[16] [17]。

在对大量统计分析的基础上，Leicester R.H.等人提出了房屋被虫蛀的时间的概率密度函数：

$$p = a + bt \quad (5)$$

式(5)中， a 、 b 为分别参数， t 为自房屋建成到被白蚁攻击的时间。由上述调查的数据分析得到，式中 $b = 0.0002$ ， a 为随机变量 t 的期望值，如图 7 所示。并由此得到了房屋被白蚁攻击的时间均值和方差。

5. 关键问题

根据对木材腐朽机理和在不同环境下的腐朽规律以及虫蛀规律的研究现状的分析可知，在我国未来需要解决的关键问题是：

1) 在国内对各个区域的主要木材进行腐朽规律的研究。虽然我国树种繁多，很难得到可以反映各个区域各个树种的统一的腐朽规律，但可以像澳大利亚一样分为几个主要区域对几种常见的在建筑结构中应用较多的木材的腐朽规律进行研究；

2) 木材腐朽影响构件的承载力的主要原因是引起了木构件横截面的有效面积、弹性模量和强度的减小，因此木材的腐朽规律主要放在木材腐朽深度随时间变化的规律上；在统计获得某区域的温湿度变化规律后，关键应分析温湿变化对木材腐朽规律的影响，并得到量化的腐朽深度 - 时间模型；由于腐朽深度受诸多因素影响，本身具有随机性，可以用随机理论来综合考虑得到腐朽深度的变化规律；

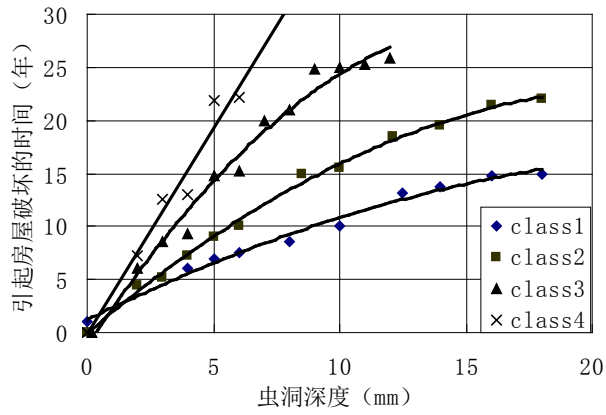


Figure 4. Model of pinhole depth by termite with time to cause damage
图 4. 虫洞深度与引起房屋破坏的时间关系[4]

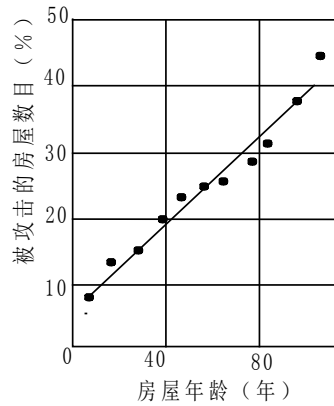


Figure 5. Effect of house age on probability of attack by termite
图 5. 房龄对虫蛀房屋比例的影响[5]

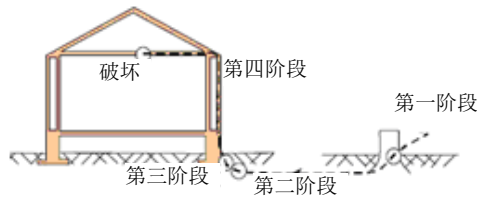


Figure 6. Time process of termite attack on houses
图 6. 白蚁攻击木结构的时间历程[7]

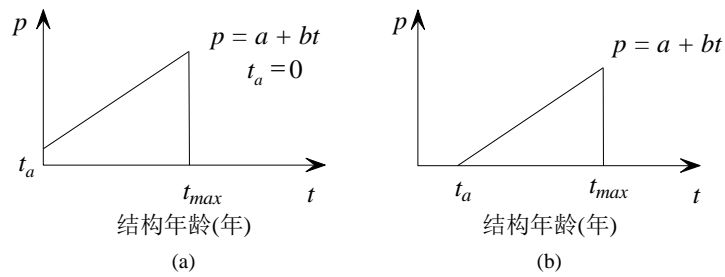


Figure 7. Probability density functions p of the time of a termite attack: (a) for positive a ; (b) for negative a
图 7. 房屋被白蚁攻击的概率密度函数: (a) a 为正数; (b) a 为负数[7]

3) 虫蛀影响构件的承载力的主要原因是引起了木构件横截面的有效面积的减小, 研究重点应放在虫洞数量和深度对构件承载力的影响上, 但目前关于虫洞数量和深度随时间变化的规律还不明确, 虽然澳大利亚已建立了白蚁攻击房屋的时间的概率密度函数, 但各个阶段的时间变异系数太大, 明显地影响了木结构的剩余寿命预测的准确度, 而且无法据此建立虫蛀与木结构长期承载力之间的关系, 因此, 建立标准化的虫洞对构件有效面积损伤的规律是非常重要的。

基金项目

国家自然科学基金(51208399)。

参考文献 (References)

- [1] Watanabe, K. (1998) Prediction of evolution in time of dynamic behaviour of wood structure. *The 5th World Conference on Timber Engineering*, **2**, 11-17.
- [2] Sørensen, J.D., Svensson, S. and Stang, B.D. (2005) Reliability-based calibration of load duration factors for timber structures. *Structural Safety*, **27**, 153-169. <http://dx.doi.org/10.1016/j.strusafe.2004.10.001>
- [3] Rosowsky, D.V. and Bulleit, W.M. (2002) Load duration effects in wood members and connections: order statistics and critical loads. *Structural Safety*, **24**, 347-362. [http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730\(02\)00031-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0167-4730(02)00031-0)
- [4] Leicester, R.H., Cole, I.S., Foliente, G.C., et al. (1998) Prediction models for durability of timber construction. *The 5th World Conference on Timber Engineering*, **2**, 2-10.
- [5] Leicester, R.H. and Foliente, G.C. (1999) Models for timber decay and termite attack. *Durability of Building Materials and Components*, **1**, 756-765.
- [6] Foliente, G.C., Leicester, R.H., Wang, C.-H., et al. (2002) Durability design for wood construction. *Forest Products Journal*, **52**, 10-19.
- [7] Leicester, R.H., Wang, C.-H. and Cookson, L.J. (2008) A reliability model for assessing the risk of termite attack on housing in Australia. *Reliability Engineering and System Safety*, **93**, 468-475. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2006.12.016>
- [8] Nguyen, M.N., Leicester, R.H., Wang, C.-H., et al. (2008) Probabilistic procedure for design of untreated timber piles under marine borer attack. *Reliability Engineering and System Safety*, **93**, 482-488. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2006.12.012>
- [9] Wang, C.-H., Leicester, R.H. and Nguyen, M. (2008) Probabilistic procedure for design of untreated timber poles in-ground under attack of decay fungi. *Reliability Engineering and System Safety*, **93**, 476-481. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ress.2006.12.007>
- [10] 杨忠, 江泽慧, 费本华 (2006) 木材初期腐朽研究综述. *林业科学*, **3**, 99-103.
- [11] 杨忠, 江泽慧, 任海青, 等 (2007) 木材加速腐朽试验方法的研究. *木材工业*, **4**, 12-14.
- [12] Leicester, R.H., Wang, C.-H., Nguyen, M., et al. (2005) Engineering models for biological attack on timber structures. *10DBMC International Conference on Durability of Building Materials and Components*, Lyon, 17-20 April 2005, TT4-217.
- [13] Leicester, R.H., Wang, C.-H., Nguyen, M.N., et al. (2003) An engineering model for the decay of timber in ground contact. *Proceedings of the 34th IRGWP Annual Meeting*, Brisbane, **2**, 19-23.
- [14] Leicester, R.H., Wang, C.-H., Nguyen, M., Thornton, et al. (2004) Structural durability of exposed timber. *Proceedings of 8th World Conference on Timber Engineering*, Lahti, 14-17 June 2004, 571-576.
- [15] 李铁英 (2004) 应县木塔现状结构残损要点及机理分析. 硕士论文, 太原理工大学, 太原.
- [16] Leicester, R.H., Wang, C.-H. and Cookson, L.J. (2003) A risk model for termite attack in Australia. *The 34th IRGWP Annual Meeting*, Brisbane, 2003, NO. IRG/WP/03.
- [17] Leicester, R.H., Wang, C.-H. and Cookson, L. (2004) A probabilistic model for termite attack. *Proceedings of 8th World Conference on Timber Engineering*, Lahti, 14-17 June 2004, 201-204.