

腐朽对山杨木材吸水性和电阻的影响

王兴龙,王立海*

(黑龙江省森林持续经营与环境微生物工程重点实验室 东北林业大学,黑龙江 哈尔滨 150040)

摘 要:以山杨木材试件为研究对象,研究在健康状态和腐朽状态下木材电阻和含水率的关系、木材腐朽前后绝干质量、含水率、电阻的变化及关系。结果表明,腐朽木材电阻受含水率的影响规律与健康木材相似,即随着含水率升高木材电阻下降;纤维饱和点以上相同含水率下,健康木材的电阻远远高于腐朽木材电阻,而木材腐朽后吸水性增强含水率升高使得电阻进一步降低,木材腐朽之后电阻明显减小;腐朽后木材电阻与健康木材电阻和增水率整体显著相关,木材减阻率与其失重率和增水率间具较强的二元线性关系。

关键词:木材腐朽;含水率;电阻;失重率

中图分类号:S792.114 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)03-0257-05

The Effects of Decay on Electrical Resistance and Moisture Content
of *Populus davidiana* Wood

WANG Xing-long, WANG Li-hai*

(Key Laboratory of Forest Sustainable Management and Environmental Microorganism Engineering of Heilongjiang Province,
Northeast Forestry University, Harbin, Heilongjiang 150040, China)

Abstract: In order to research the relationships between the wood electrical resistance and moisture contents for sound and decayed wood samples, respectively, the changes and relationships among resistance, moisture content and absolutely dry mass, *Populus davidiana* wood was selected as objective. The results showed that the relationship between decayed wood electrical resistance and moisture contents was similar to that for the sound wood samples that the wood electrical resistance decreased with the increase of wood moisture content. Decayed wood electrical resistance was lower several times than that of the sound wood below the fiber saturation point at the same moisture content. Moreover, the increasing moisture contents in decayed wood samples lowered the wood electrical resistance more, so the electrical resistance of decayed wood decreased significantly. Through regression analysis, decayed wood resistance was significantly correlated with the sound wood electrical resistance and moisture contents. The correlation between the ratio of the decrement of decayed wood electrical resistance to normal wood electrical resistance and the ratio of increment of decayed wood moisture contents to the normal wood moisture contents and the weight loss ratio were significant as well.

Key words: wood decay; moisture content; wood electrical resistance; weight loss ratio

我国是一个缺林少绿、生态脆弱的国家,森林覆盖率远低于全球 31% 的平均水平,人均森林面积仅为世界人均水平的 1/4,人均森林蓄积仅有世界人均的 1/7。森林资源总量相对不足,质量不高,但是作为国民经济建设中不可或缺的原料,其需求不断上升,而采伐及进口受限,因此,提高木材利用率非

收稿日期:2015-08-06 修回日期:2016-02-25
基金项目:国家林业局 948 项目(2014-4-78)。
作者简介:王兴龙,男,在读硕士,研究方向:木材无损检测。E-mail:823390979@qq.com
* 通信作者:王立海,男,教授,研究方向:森林工程。E-mail:lihuiwang@yahoo.com

常必要^[1]。木材检测是提高木材利用率的重要手段,超声波断层成像、应力波断层扫描、电阻断层成像、地探雷达、红外检测及射线检测等无损检测技术为树木内部腐朽的程度和类型判断提供了可靠的信息^[2]。其中电阻断层成像技术对于立木早期腐朽变色的检测比其它方法更敏感,可以尽早防止立木腐朽扩散,达到保护资源的目的^[3]。

木材是具有多孔性、吸湿性的复杂天然有机高分子材料。绝干状态下的木材属于电绝缘体,但木材的绝缘程度受其含水率的影响,这是由构成木材的聚合物中的离子基缔合在一起的离子和木材中的无机成分中含有的杂质产生的离子引起的^[4]。尤其是含水率达到纤维饱和点的木材已经可以作为导体^[5]。因此,电阻是木材的一个重要物理性质,也是木材各种性质中为数不多可以量化的。然而,涉及木材电阻的研究相对较少,研究内容也仅为木材介电系数与木材含水率和木材密度的关系、木材电阻与含水率的关系和木材的其他电学性质等^[4,6-7],这些研究主要应用仅限于电阻法测含水率、高频电热技术、电阻法测定植物抗寒性耐热性等方面^[8-10]。且这些研究基本都是针对健康木材的试验,未对腐朽木材电学性质进行试验研究,国内对木材腐朽研究多专注于腐朽对木材力学性质,化学成分变化的影响^[11]。本研究以健康木材和腐朽木材为试件,对腐朽前后测量的绝干质量、含水率和电阻进行对比分析,探讨各指标间的关系,为利用电阻测试法进行木材腐朽检测提供新的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与设备

1.1.1 木材试件 试件为山杨(*Populus davidiana*)木材。取健康的山杨边材加工成 15 个 20 mm×20 mm×50 mm 的长方体试件,编号 1~15 作为待测样品,鉴于木材存在各向异性,试验测定的为试件顺纹方向的电阻(图 1)。

1.1.2 电阻测试设备 电阻测试设备主要有深圳驿生胜利科技有限公司生产的 VC2002 型函数信号源、北京普源精电科技有限公司生产的 DS1025E 型示波器、深圳鸿昌滨江电子仪器有限公司生产的 DT9206 型数字式万用表和碳膜电阻等。

1.1.3 木材受菌腐朽培养材料与设备 试验使用的菌种为密粘褶菌(*Gloeophyllum trabeum*),属于褐腐菌,简称 *G. t.* 菌种用 PDA 琼脂培养基培养于培养皿中。培养基为国家标准《木材耐久性性能第一部分:天然耐腐性实验室试验方法》(GB/T 13942.1

—2009)中的河砂锯屑培养基。饲木为杨木,尺寸为 20 mm×20 mm×5 mm。试验仪器有 500 mL 锥形瓶、玻璃棒、烧杯、接种针和郑州时代仪器设备有限公司生成的 BS210 型电子天平。试验设备有上海博讯实业有限公司生产的 YXQ-LS-30SII 型高温灭菌锅、上海福玛实验设备有限公司生产的 HSX-450 型恒温恒湿培养箱和超净工作台等。

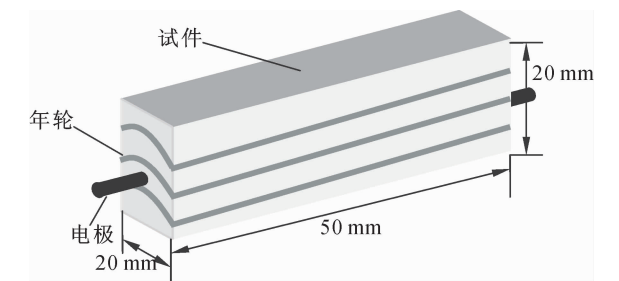


图 1 试件纹理及电极位置图

Fig. 1 Sample grain and electrode locations

1.2 试验方法

1.2.1 健康木材试件的电阻测试 高温消毒后,在超净工作台上对健康试件进行电阻测试。根据相关研究,测试信号为 5 V、1 000 Hz 的正弦波信号比较适宜进行木材电阻测试^[3]。考虑到测试时,由于含水率变化可能引起的电阻变化,在电阻测量时使用平均值作为电阻测量值。木材试件两侧各串联 1 个电阻,在测量木材试件的负载电压前后分别测量 2 个电阻的电压,并计算出通过 2 电阻的电流值,用 2 个电流的平均值来计算试件电阻,这样就更加接近测量试件负载电压时的电阻。

按电路图(图 2)连接电路,打开信号发生器和示波器预热,选择波形为正弦波,调频率至 1 000 Hz,调幅至 5.0 V,在示波器上观察到波形后,确认信号正确。将试件两端插入电极接入电路,并闭合开关。万用表调至交流电压档,量程为 2 V,交流电路中使用万用表时不用区分正负极,依次测出 ab、bc、cd 之间的电压并分别记为 U_{R1} 、 U_R 、 U_{R2} 。

初步试验显示,健康木材试件的电阻在 100 kΩ 以上,因此使用标定为 100 kΩ 的电阻与之串联。试验后用万用表的欧姆档测量出 2 个串联电阻的准确值 R_1 、 R_2 。用式(1)即可计算出测试试件电阻时电路中的平均电流 \bar{I} 。

$$\bar{I}=\frac{U_1+U_2}{R_1+R_2} \tag{1}$$

据欧姆定律,由式(2)计算木材试件的电阻 R 。

$$R=\frac{U_R}{\bar{I}}\approx\frac{U_R}{I} \tag{2}$$

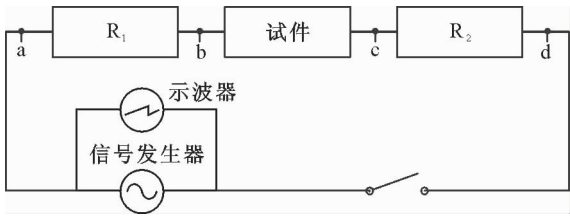


图 2 电阻测试电路图

Fig. 2 Circuit diagram for measuring resistance

1.2.2 实验室木材受菌腐朽培养 将编号 1~12 号待测试件分别放置 12 个培养瓶内进行腐朽培养, 13~15 号试件也分别放置 3 个无菌培养瓶作为对照试验组。首先配置河砂锯屑培养基, 制作 15 个培养瓶, 每个培养基上放置 4 块饲木。参考国家标准《木材耐久性能第一部分: 天然耐腐性实验室试验方法》(GB/T 13942. 1—2009) 的要求。然后, 在培养瓶的培养基上进行木腐菌接种和培养。在超净工作台上, 用无菌接种针取菌落边缘直径 5 mm 的带有琼脂培养基的密粘褶菌菌丝块, 接入饲木之间的培养基上, 每个培养瓶内放置 5 块菌丝块, 接种完成后用封口膜将培养瓶密封好。随后将培养瓶放入恒温恒湿箱, 恒温恒湿箱的温度设为 28℃, 相对湿度为 80%, 进行木腐菌培养。最后, 待培养基上长满菌丝时, 进行木材试件的受菌腐朽。将已经测试完的健康木材试件放置培养瓶内, 将培养瓶放入恒温恒湿箱 (28℃, 相对湿度 80%) 恒温恒湿箱进行腐朽培养。

1.2.3 腐朽木材试件的电阻测试 为研究早期腐朽对电阻的影响试件放入培养瓶受木腐菌感染腐朽 14 d 后, 进行电阻测试。测试方法与健康木材试件的电阻测试唯一不同是由于腐朽后木材电阻减小, 为了使测量结果更为准确, 在电阻测试电路中使用 2 个 10kΩ 串联电阻, 其它相同。取出 3 个无菌对照组培养瓶, 测试对照组试件的电阻。

1.2.4 腐朽前后木材试件的绝干质量和含水率的测定 对于健康木材, 首先将木材试件在 105℃ 烘干至恒重 (GB/T 1931—2009), 用电子天平称重记为试件绝干质量 m_d 。若将试验中用蒸馏水浸泡后的含水木材质量记为 m_i , 则试件试验前的含水率 MC_j 可以用式 (3) 算出。

$$MC_j = \frac{m_i - m_d}{m_d} \times 100\%$$

(3)

对腐朽木先称量其湿重, 记为 m_f 。待所有试验结束后再将试件放置在 105℃ 的烘箱中烘干至恒重, 用电子天平称重记为腐朽后试件绝干质量 $m_{d'}$ 。木材腐朽后的含水率 MC_i 可用式 (4) 计算出来。

$$MC_i = \frac{m_f - m_{d'}}{m_{d'}} \times 100\%$$

(4)

用蒸馏水浸泡健康木材试件, 当含水率达到 140% 左右时, 取出来每隔一段时间测量一次电阻, 腐朽后的木材试件先高温消毒, 然后用蒸馏水浸泡至含水率 140% 左右, 再取出来每隔一段时间测量 1 次电阻, 通过这种方法研究分别在健康状态和腐朽状态下木材电阻和含水率的关系。

2 结果与分析

2.1 腐朽对木材吸水性的影响

选择初始含水率介于 50%~100% 区间内的试件作为研究对象, 试件受木腐菌感染腐朽后的木材含水率高于腐朽前健康木材的含水率 (表 1), 表明木材腐朽后的吸水性增强。

2.2 腐朽对木材电阻的影响

腐朽后的木材电阻明显小于健康时的电阻, 健康木材的含水率低于纤维饱和点时, 木材电阻很大, 随着含水率的增加电阻急剧减小, 当含水率超过纤维饱和点后电阻减小的速度开始变得越来越缓慢, 最后基本趋于平稳, 腐朽木材的电阻随含水率的变化规律与健康木材的规律基本相同, 并且在纤维饱和点以上, 相同含水率下, 腐朽木材的电阻明显小于健康木材的电阻, 腐朽后含水率增加, 电阻进一步降低, 木材腐朽之后的电阻明显减小 (图 3)。

2.3 腐朽后木材电阻的影响因素

为进一步寻求影响腐朽后木材电阻的因素, 引入了减阻率、失重率和增水率 3 个影响因素 (表 2), 其中减阻率用 R_d 表示, R_j 表示健康试件的电阻, R_i 表示试件受感染腐朽后的电阻。则 R_d 可以被表示为:

$$R_d = \frac{R_j - R_i}{R_j} \times 100\%$$

(5)

失重率用 M_l 表示, M_j 表示健康试件的质量, M_i 表示试件受感染腐朽后的质量。则:

$$M_l = \frac{M_j - M_i}{M_j} \times 100\%$$

(6)

增水率用 MC_i 表示, MC_j 表示健康试件的含水率, MC_i 表示试件受感染腐朽后的含水率。则 MC_i 可以被表示为:

$$MC_i = \frac{MC_j - MC_f}{MC_j} \times 100\%$$

(7)

基于 SPSS20.0 软件采用逐步回归法, 做腐朽后木材电阻对表 1 和表 2 数据类型的回归分析, 保留腐朽前电阻和增水率 2 个解释变量。建立的回归模型: $R_i = 5.259 + 0.057R_j - 2.018MC_i$, R^2 为 0.84 ($p < 0.01$), 表明腐朽后的木材电阻受健康木材

表 1 12 个试件的初始数据

Table 1 The initial data of 12 specimens

试件编号	腐朽前 电阻值/kΩ	腐朽后 电阻值/kΩ	腐朽前 含水率/%	腐朽后 含水率/%	腐朽前 绝干质量值/g	腐朽后 绝干质量值/g
1	102.479	10.254	71	115	7.866	7.750
2	96.209	7.301	66	146	8.075	7.700
3	51.236	6.555	87	199	7.880	6.820
4	84.192	10.057	71	99	7.667	7.360
5	54.019	6.506	96	186	7.707	6.630
6	96.981	7.532	59	137	8.032	7.630
7	52.654	5.972	92	199	8.104	7.108
8	43.702	5.258	90	200	7.780	7.220
9	49.831	6.005	84	162	7.805	6.868
10	63.133	4.959	75	193	7.653	7.028
11	53.773	5.728	88	178	7.684	6.950
12	89.022	7.026	66	207	8.128	7.243

表 2 12 个试件的数据处理与分析

Table 2 Data processing and analysis of 12 specimens

编号	电阻 减小值/kΩ	含水率 增大值	重量 损失值/g	减阻率 /%	失重率 /%	增水率 /%
1	92.22	0.44	0.12	90.00	1.50	61.00
2	88.91	0.80	0.37	92.40	4.60	121.20
3	44.68	1.12	1.06	87.20	13.50	129.50
4	74.14	0.28	0.31	88.10	4.00	39.70
5	47.51	0.90	1.08	88.00	14.00	94.30
6	89.45	0.78	0.40	92.20	5.00	132.80
7	46.68	1.07	1.00	88.70	12.30	116.40
8	38.44	1.10	0.56	88.00	7.20	121.40
9	43.83	0.77	0.94	87.90	12.00	91.40
10	58.17	1.19	0.62	92.10	8.20	158.60
11	48.04	0.90	0.73	89.30	9.60	101.50
12	82.00	1.41	0.89	92.10	10.90	215.00

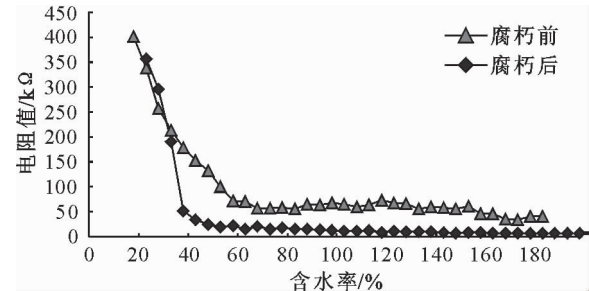


图 3 健康木材与腐朽木材电阻和含水率的关系

Fig. 3 The relationship of wood moisture content and electrical resistance

的电阻和木材增水率的影响显著。从偏回归系数来看,经过 MC_i 调整后, R_j 对 R_f 的贡献为 0.057,呈正相关,同理 MC_i 的贡献为 -2.018,呈负相关,可见,当木材腐朽前的电阻越小,增水率越大,腐朽后的电阻值就会越小。

减阻率、失重率和增水率 3 个无量纲影响因素二元线性回归分析, $R_d=0.885+0.036MC_i-0.348$

M_l, R^2 为 0.744($p=0.002$),表明线性相关性较为显著。从偏回归系数来看,增水率的贡献度为正,即当木材的失重率固定不变时,增水率越大,木材导电能力越强,电阻减小的幅度越大,则减阻率越大,腐朽后的木材电阻越小。失重率的贡献度为负,即当木材的增水率固定不变时,失重率越大,孔隙度越大,木材电阻减小的幅度越小,则减阻率越小。

3 结论与讨论

健康木材的电阻随着含水率的增加逐渐减小直至趋于平稳,木材腐朽后电阻快速减小,同时随着含水率的增加在逐渐减小,在纤维饱和点以上相同含水率下,健康木材的电阻都远高于腐朽木材的电阻,而木材腐朽后吸水性增强含水率明显增加使得电阻降低,使得腐朽后的木材电阻远小于健康时的木材电阻。与许多研究结果类似,枫树、桦木和橡树等立木腐朽变色的立木含水率较健康立木的含水率更

高^[12]。立木腐朽后含水率升高,高出变色和健康的立木的含水率^[13]。腐朽木材的含水率比健康木材的高,差异显著^[14]。木材腐朽期间含水率的变化较大,很大程度上影响了木材力学强度的降低^[11]。水是构成木材腐朽菌菌丝的主要成分,适当的水是病菌孢子萌发的基本条件,且木材腐朽菌分泌的酶在分解木材的时候需水作为媒介,因此腐朽区域吸水性增强,使得腐朽后的木材含水率升高^[15]。

在纤维饱和点以下,腐朽木材的电阻大于健康木材的电阻。虽然与健康木材相比腐朽木材的金属离子含量增多,但是因为含水率特别小,未能形成更多自由移动的导电离子且腐朽破坏了木材结构使得已形成的自由移动的导电离子的迁移率变小,在纤维饱和点以下,相同含水率下的腐朽木材电阻比健康木材的电阻大,但这并不能表明腐朽后木材电阻会变大,因为腐朽后含水率会显著增加,而且纤维饱和点以下电阻随含水率增加呈现快速减小的趋势,因此,当木材腐朽后的含水率增加到一定时,腐朽后的电阻将小于腐朽前的电阻,与许多研究结果类似。使用直流脉冲电流测量立木电阻,发现腐朽变色的立木比健康立木的电阻值小^[12]。应用 Shigometer 对活立木中的腐朽研究发现随着立木变色及腐朽面积的增加,立木的电阻值会变小^[16-17]。使用化学方法分析腐朽木材的成分变化,并与导电溶液浸泡过的木材相比较,腐朽后金属离子增加是腐朽木材电阻减小的重要原因^[18],本研究木材腐朽后的电阻与健康时的木材电阻和腐朽前后的含水率有显著的相关性,拟合后得回归方程 $R_t = 5.259 + 0.057R_j - 2.018(MC_j - MC_t)/MC_j$ 。减阻率对增重率和失重率的二元线性回归方程为 $R_d = 0.885 + 0.036MC_i - 0.348M_i$,该 2 预测模型的建立既可以通过电阻值判断立木有无腐朽,又可定量分析立木的腐朽程度,有助于对立木的长期监测和保护。

参考文献:

[1] 鲍震宇,王立海.电阻测试法在立木腐朽检测中的应用研究进展[J].森林工程,2013,29(6):47-51.

[2] 杨慧敏,王立海.立木与原木内部腐朽二维成像检测技术研究进展[J].林业科学,2010,46(7):170-175.

YANG H M, WANG L H. Research and development on 2D imaging technology of the decay in trees and logs [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2010, 46(7): 170-175. (in Chinese)

[3] 鲍震宇,王立海.激励信号对山杨木材电阻测量的影响[J].林业科技开发,2015,29(1):79-82.

[4] 李坚.木材科学[M].北京:高等教育出版社,2002:231-240.

[5] 张久荣.木材含水率测试技术水平及其前景[J].世界林业研究,1993,6(1):46-53.

[6] 付琼,羿宏雷,贾丽华.木材含水率测量方法概述[J].林业机械与木工设备,2003,31(8):32-33.

[7] 费益元,曾石祥.木材中的压电效应[J].南京林业大学学报:自然科学版,1987,20(3):100-104.

FEI Y Y, ZENG S X. Piezoelectric in wood [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 1987, 20(3): 100-104. (in Chinese)

[8] 董军生,张军,周素锐,等.电阻抗法测定杨树无性系抗寒性[J].西北林学院学报,2014,29(3):105-108.

DONG J S, ZHANG J, ZHOU S R, *et al.* Measurement of cold resistance of poplar clones by electrical impedance spectroscopy [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(3): 105-108. (in Chinese)

[9] 杨丽,杨际双.切花菊耐热性鉴定方法研究[J].西北林学院学报,2010,25(3):32-35.

YANG L, YANG J S. Methods of identification of thermotolerance of cutting *Chrysanthemum* [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2010, 25(3): 32-35. (in Chinese)

[10] 林树燕,丁雨龙.电导法对 7 种观赏竹的抗寒性测定[J].西北林学院学报,2008,23(1):34-38.

LIN S Y, DING Y L. Establishment of cold resistance of 7 ornamental bamboo species by electric conductivity [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(1): 34-38. (in Chinese)

[11] 杨忠,江泽慧,费本华.木材初期腐朽研究综述[J].林业科学,2006,42(3):99-103.

YANG Z, JIANG Z H, HUI B H. Review of literature on incipient decay in wood [J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(3): 99-103. (in Chinese)

[12] SKUTT H R, SHIGO A L, LESSARD R A. Detection of discolored and decayed wood in living trees using a pulsed electric current[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1972, 2(1):54-56.

[13] TATTAR T A, SAUFLEY G C. Comparison of electrical resistance and impedance measurements in wood in progressive stages of discoloration and decay[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1973, 3(4):593-595.

[14] NICOLOTTI G, SOCCO L, MARTINIS R, *et al.* Application and comparison of three tomographic techniques for detection of decay in trees[J]. Journal of Arboriculture, 2003, 29(2): 66-78.

[15] 张新玲.小兴安岭地区主要树种化学指标对腐朽程度的响应[D].哈尔滨:东北林业大学,2011.

[16] SHORTLE W S, SHIGO A L, BERRY P, *et al.* Electrical resistance in tree cambium zone: relationship to rates of growth and wound closure[J]. Forest Science, 1977, 23(3):326-329

[17] SHORTLE W C, SMITH K T. Electrical properties and rate of decay in spruce and fir wood[J]. Phytopathology, 1987, 77(6):811-814.

[18] TATTAR T A, SHIGO A L, CHASE T. Relationship between the degree of resistance to a pulsed electric current and wood in progressive stages of discoloration and decay in living trees[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1972, 2(3):236-243.