

电热传导及电磁屏蔽型 高分子复合材料的 物性与力学松弛

*The Chemical and Physical Properties and Mechanical Relaxation
of Electroless Copper Plating Poplar Composites*

化学镀铜杨木单板的表面特性与晶体结构
化学镀铜杨木单板及其多层复合材料的电热传导性
镀铜杨木单板多层复合材料的干缩湿胀
镀铜杨木单板多层复合材料的蠕变
镀铜杨木单板多层复合材料的应力松弛

秦 静 沈德君 / 著

吉林人民出版社

图书在版编目(CIP)数据

电热传导及电磁屏蔽型高分子复合材料的物性与力学松弛 / 秦静, 沈德君著.
—长春: 吉林人民出版社, 2017.2
ISBN 978-7-206-12506-5

- I. ①电…
- II. ①秦… ②沈…
- III. ①高分子材料—复合材料—研究
- IV. ①TB324

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第040283号

电热传导及电磁屏蔽型高分子复合材料的物性与力学松弛

著 者: 秦 静 沈德君

责任编辑: 陆 雨

封面设计: 孙浩瀚

吉林人民出版社出版 发行(长春市人民大街7548号 邮政编码: 130022)

咨询电话: 0431-85378033

制 版: 吉林人民出版社图文设计印务中心

印 刷: 长春市中海彩印厂

开 本: 700mm×1000mm 1/16

印 张: 7.25 字 数: 130千字

标准书号: ISBN 978-7-206-12506-5

版 次: 2017年3月第1版

印 次: 2017年3月第1次印刷

定 价: 39.80元

如发现印装质量问题, 影响阅读, 请与出版社联系调换。

摘 要

本书分析了镀铜杨木单板多层复合材料的化学物理特性及其力学松弛现象,为木质材料行业用地热地板基材研究与应用提供基础理论与技术参数,并用 XRD、XPS、近红外谱、力学松弛等方法,对化学镀铜杨木单板及其多层复合材料的晶体结构、表面化学结构、导电性、导热性、电磁屏蔽性及其干缩湿胀性、蠕变及应力松弛等物理力学性能进行了定性、定量的分析研究。

本书的主要内容归纳如下:

1. 在镀铜杨木单板 XRD 谱中观测到 Cu 衍射峰,呈面心立方结构。基于施镀过程中一些化学物质的原因,木材中的纤维素晶体结构有所降低,且表面被铜层覆盖。

2. XPS 谱表明,杨木单板镀层中除了含有 Cu 元素以外还有 CuOH 和 Cu₂O。随着施镀时间的延长,Cu⁺的歧化反应趋于完全,CuOH 与 Cu₂O 逐渐还原为金属 Cu。当施镀时间达到 25min 后,CuOH 与 Cu₂O 的反应渐趋完全。

3. 在 800-1200MHz 范围内,镀铜杨木单板电磁屏蔽效能达 100 dB 以上,属于反射型电磁屏蔽材料。镀铜杨木单板多层复合材料素镀结构(A 结构)的体积电阻率小于镀镀结构(B 结构)。在相同含水率条件下,素镀结构(A 结构)和镀镀结构(B 结构)的导热性比素素结构(C 结构)高出 2 倍多,且随着施镀时间的增加,导热率也随之增大。

4. 在温度恒定,湿度周期变化条件下,A/B/C 三种结构试材长宽方向干缩率在 0.1% -0.6% 之间,厚度方向干缩率是长宽方向的 2-3 倍。由于连续非平衡态的叠加效应,两条曲线始终偏离各自的同一平衡态,使解吸含水率变化曲线终



点始终高于吸湿含水率变化曲线的始点。B 结构在吸湿过程中达到的平衡含水率高于 A 结构和 C 结构。

5. 在吸湿解吸过程中，三种结构镀铜杨木单板多层复合材料的蠕变符合机械吸湿蠕变规律。A 结构抗蠕变性能优于 B 结构、C 结构。单板镀铜处理以及恰当的组合结构能够提高镀铜杨木单板多层复合材料的抗蠕变能力。

6. D、E、F 三种结构的相对应力松弛随接合尺寸的增加趋于缓慢变化。在相同温度条件下，相对应力变化速度为 D 结构>E 结构>F 结构。其原因在于 D 结构中素单板被水分润胀加剧了材料的应力松弛。F 结构由于表面镀铜层中铜离子对水分的阻隔，阻缓了应力松弛。E 结构兼具 D、F 两因素作用，应力松弛变化居中。

关键词：化学镀铜复合材料；电热传导性；干缩湿胀；蠕变；力学松弛

ABSTRACT

In order to analysis the chemical and physical properties and mechanical relaxation phenomena of copper plated poplar veneer composite, and provide the basic theory and technical parameters for the research and application of the geothermal floor substrate, the crystal structure、the surface chemical structure, the electrical conductivity、the thermal conductivity、the electromagnetic shielding and the mechanical properties such as hygroexpansion、the creep properties and the stress relaxation are studied through the method of XRD、XPS、NIR spectra and mechanical relaxation and so on in this dissertation.

Research results are summed up as follows:

1. The Cu diffraction peaks observed in the XRD spectra of the copper plating poplar veneer which is cubic structure. The crystal of cellulose was changed to a certain extent and covered by copper layer because of the chemical substances in chemical copper plating.

2. XPS spectra show that Cu is in the presence of Cu^{2+} in the single plate copper plating of poplar. The disproportionation of Cu^+ tends to be completely when CuOH and Cu_2O gradually reduced to metallic Cu with the extension of the plating time. The reaction of Cu_2O and CuOH gradually complete when the plating time reached 25min.

3. The electromagnetic shielding of electroless copper plating poplar veneer can reach 100dB within the range of 800–1200MHz, which is belong to the reflective electromagnetic shielding material. The volume resistivity of structure A which is the composition of single plate and electroless copper plating veneers is less than structure B which is the composition of electroless copper plating veneer. The thermal conductivity of struc-



ture A and B is more than 2 times higher than structure C which is the composition of single plating veneers under the condition of the same moisture content and the thermal conductivity is increased with the extension of plating time.

4. The dry shrinkage rate of length and width direction of material A / B / C is changed between 0.1% -0.6% and the dry shrinkage rate of thickness direction is 5-7 times the length and width directions at constant changing of temperature and humidity cycles. The two curves always deviate from the same equilibrium state, so that the end of the curve of the change of the desorption water content is always higher than that of the curve of the change of moisture content because of the superposition effect of continuous non equilibrium state. The equilibrium moisture content of structure B is higher than that of structure A and C in the process of moisture absorption.

5. In the process of continuous moisture absorption and desorption, the creep deflection of three kinds of electroless copper plating poplar composites are all increased which correspond with general rules of mechano sorptive creep of wood materials. The creep resistance of structure A electroless copper plating poplar composites is better than structure B and structure C. The copper plating and proper structure can improve the creep resistance ability of electroless copper plating poplar composites.

6. The relative stress relaxation of structure D、E and F tends to change slowly with the increase of the joint size. The relative stress appears the trend of structure D>structure E>structure F in the same temperature because of the water swelling increase of structure D which is single plate composites. The stress relaxation of structure F is slow due to the barrier of the surface of copper plating layer. The stress relaxation of structure E changes in the middle because of the combination of single plate and copper plating.

Key words: electroless copper plating composites; electrothermal conductivity; dry-wet effect; creep; stress relaxation

目 录

1. 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 国内外研究现状	1
1.2.1 化学镀单板	1
1.2.2 化学镀木质复合材料	4
1.2.3 导电及电磁屏蔽型木质复合材料	5
1.2.4 木质材料的干缩湿胀	7
1.2.5 木质材料的蠕变	11
1.2.6 木质材料的应力松弛	13
1.3 存在的科学问题	15
1.4 目的与意义、研究内容及书构成	16
1.4.1 目的及意义	16
1.4.2 主要内容	16
1.4.3 书构成	17
1.4.4 技术路线	18
2. 化学镀铜杨木单板的表面特性与晶体结构	19
2.1 引言	19
2.2 材料与方法	20
2.2.1 材料	20
2.2.2 方法	20



2.2.3	性能测试	21
2.3	结果与讨论	23
2.3.1	表面润湿性	23
2.3.2	晶体结构	24
2.3.3	表面化学结构	26
2.3.4	近红外光谱	28
2.4	小结	35
3.	化学镀铜杨木单板及其多层复合材料的电热传导性	36
3.1	引言	36
3.2	材料与方法	37
3.2.1	材料	37
3.2.2	方法	38
3.2.3	性能测试	38
3.3	结果与讨论	40
3.3.1	电磁屏蔽性能	40
3.3.2	导电性	45
3.3.3	导热性	47
3.4	小结	49
4.	镀铜杨木单板多层复合材料的干缩湿胀	50
4.1	引言	50
4.2	材料与方法	51
4.2.1	材料	51
4.2.2	方法	52
4.2.3	性能测试	53
4.3	结果与讨论	53
4.3.1	干缩湿胀各向异性	53

4.3.2	不同结构复合材干缩湿胀的湿度响应	55
4.3.3	不同结构复合材的吸湿、解吸滞后现象	58
4.3.4	二阶动力学分析	58
4.4	小结	61
5.	镀铜杨木单板多层复合材料的蠕变	62
5.1	引言	62
5.2	材料与方法	63
5.2.1	材料	63
5.2.2	方法	64
5.2.3	性能测试	65
5.3	结果与讨论	65
5.3.1	三种结构复合材的机械吸湿蠕变	65
5.3.2	动态含水率下三种结构复合材的蠕变	67
5.3.3	动态温度下三种结构复合材的蠕变	69
5.3.4	三种不同结构复合材的蠕变	70
5.4	小结	71
6.	镀铜杨木单板多层复合材料的应力松弛	73
6.1	引言	73
6.2	材料与方法	74
6.2.1	材料	74
6.2.2	方法	75
6.2.3	性能测试	76
6.3	结果与讨论	77
6.3.1	相同接合尺寸、不同结构的应力松弛	77
6.3.2	相同结构不同接合尺寸的应力松弛	79
6.3.3	不同温度条件下相同结构的应力松弛	80



6.3.4	温度恒定条件不同结构影响下的应力松弛	82
6.3.5	含水率变化过程中三种结构复合材的应力松弛	83
6.4	小结	85
7.	总结论	87
	参考文献	90
	个人简介	104
	获得成果目录	105
	致谢	106

1. 绪 论

1.1 引 言

为了能够合理有效，高效科学的利用低质高产的人造林木材资源，克服人造林木材自身的缺点和不足，就需要利用各种新的技术对人造林木材进行物性及力学等功能性改良。对人造林木材进行化学镀铜可以赋予木材电热传导性与电磁屏蔽性，并且对化学镀铜单板进行复合后，能够赋予木材新的装饰性和功能性。

关于化学镀单板国内外已经开展了诸多研究，这里归纳了迄今为止化学镀单板、与之相关的干缩湿胀、应力松弛等方面的研究现状，提出了该领域值得研究的科学问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 化学镀单板

铜镀膜技术由 Nircus 在 1947 年首次报道的 (Henry. J, 1995)。在研究的初级阶段，化学镀铜液的稳定性极差，所配的溶液很容易自动进行分解，并且镀液的施镀范围不能得到很好的控制，所有接触镀液的地方都有沉积物。今天化学镀铜相似的技术最早是由 Cahill 在 1959 年 (申丹丹, 2007) 提出的，采用了酒石酸盐碱性镀铜液，溶液主要以甲醛作还原剂。经过 50 多年后，化学镀技术形成了相对完善的基础理论，并建立了初步的技术体系，具备了较高的工业化基础。



化学镀铜技术相对于电镀铜来说，其优势主要有以下几点：施镀基体广泛；镀层厚度一致；工艺设备不繁琐；镀层传导性能好。

自 20 世纪 80 年代，化学镀木材主要集中在日本做了大量的研究。首先选用杉木、杨木等常用的树种，对木材进行基材处理。其次对其进行树脂道封闭、脱脂、附着活化剂等预处理。最后对木材进行化学镀。研究表明，有机溶剂比水系溶剂的洗净效果更明显，木材种类、镀液温度、镀液质量参数以及施镀时间对沉积在木材上金属镀膜的影响较大，处理后木材的力学性都会不同程度的降低，镀铜工艺还需要更加完善（长泽长八郎等，1992）。Nagasawa C. 等（Nagasawa C. , 1999）对木材颗粒进行了化学镀镍，并解释了镀后木材颗粒的表面电阻率、体积电阻率与电磁屏蔽效能的关系，研究表明，通过增加金属化木材颗粒的数量和应用压力可有效提高木材颗粒的电磁屏蔽效能，木材颗粒的电磁屏蔽性大于 30dB。长泽长八郎和熊谷八百三（长泽长八郎，1991，1992）采用 Dual-Chamber 法分析了木质刨花板中心金属层的电磁屏蔽效能，指出了木质刨花制成刨花板中心层的金属化可以通过覆盖样品两表面的非导体获得，电磁屏蔽效能的测量值会通过调整频率变化的不同而不同，依数据转换而定的电磁屏蔽效能的测量值也不相同。

截至目前，化学镀的研究包括铜、镍、金、银、铂、钯以及化学复合镀层和化学镀多种合金层。如长泽长八郎等（長澤長八郎和熊谷八百三，1991，1992；長澤長八郎，梅原博行，1990，1991，1992）对木材薄片刨花、木材单板化学镀以及制成品的导电性和电磁屏蔽性，品川俊一等（品川俊一，1989；Brenner A. , 1954）的研究是对于纸板的化学镀。日本富山县试验场木材研究员长谷川益夫（木質新素材ハンドブック編集委員会，1996）等的研究是针对木材装饰性化学镀材树种的适应性。结果显示，采用有机溶剂进行镀后处理比水系溶剂的效果更明显，木材种类、镀液温度、镀液质量参数以及施镀时间对沉积在木材上金属镀膜的影响较大，施镀后木材的力学性能都存在不同程度的降低。基材处理，合适的树种，脱脂、封闭树脂道、附着活化剂等预处理对化学镀效果的影

响较大。Nagasawa C. 等 (Nagasawa C. , 1999) 对木材颗粒进行了化学镀镍, 并解释了镀后木材颗粒的表面电阻率、体积电阻率与电磁屏蔽效能的关系, 研究表明, 通过增加金属化木材颗粒的数量和应用压力可有效提高木材颗粒的电磁屏蔽效能, 木材颗粒的电磁屏蔽性大于 30dB。品川俊一等 (品川俊一, 1989) 对添加经过化学镀的导电纤维、金属纤维到木粉中制成的板材进行了研究, 如需要所制成板材的电磁屏蔽性能达到 20dB 和 50dB 左右, 则导电纤维金属的添加量为 7.3% 和 9.0%, 铝纤维的添加量为 8%、14%。结果表明: ①金属沉积和表面电阻率成反比, 低电阻率的金属沉积量较大; ②沉积在所镀单板表面的金属量大于横纹理方向的表面金属量, 镀后单板在沿顺纹理方向的电阻率比沿横纹理方向的电阻率低。③对杉木单板进行化学镀, 在所配镀液含量不同的情况下, 镀液的容量越多, 电磁屏蔽效能更高。

目前, 国内关于化学镀木质复合材料电磁屏蔽性的研究又有了新的发展方向与目标。周杲等 (周杲, 2005) 人对木材化学镀铜后的镀铜层性质进行了探讨。Wang 等 (Wang, 2006) 通过 EDS、XRD 以及 SEM 等检测方法测得在溶液为 500ml、施镀时间在 30min 且施镀温度为 60℃ 时化学镀铜单板的电磁屏蔽效能接近 55-60dB。黄金田 (黄金田, 2006) 通过光学显微镜对化学镀镍单板的观察发现, 树种不同, 金属镍渗入到木材的组织结构和路径也不相同。单板在经过化学镀镍以后, 所镀单板在木材内部结构以及纤维组织上都有金属镍的沉积。霍栓成 (霍栓成, 2007) 对常见的镀铜工艺进行了详细的介绍, 并比较了各种镀铜工艺的利弊和解决办法。王立娟等 (王立娟, 2007) 利用化学镀法在桦木单板表面沉积 Ni-P 合金镀层制得镀镍桦木单板。测试了镀层与单板表面的结合强度, 对比分析测试了镀镍前后单板的抗拉强度、胶合强度、表面润湿性及导热性, 同时还分析了其环境适应性 (如抗低温、耐高温和耐腐蚀性等性能)。结果表明, 镀镍层与单板表面的结合非常牢固, 经表面镀镍后, 木材的一些性能有所提高, 如表面耐磨性、抗拉强度和导热性, 一些性能有所下降, 如胶合强度和表面润湿性。研究还显示, 镀镍桦木单板能够满足实际生活中的应用要求, 并具有良好的抗低

温、耐高温和耐腐蚀性能。商俊博等（商俊博，2009）从制备工艺入手，综合考虑色差和沉积速率等因素，制定了新型镀液配方，发现在施镀时间为 25min 以上时，可以满足 9KHZ—1.5GHz 范围内对电磁屏蔽效能的要求。Lili Sun 等（Lili Sun, 2012）用壳聚糖尝试改变桦木单板的表面电阻率，当壳聚糖的浓度为 0.8% 时，镀铜桦木单板的表面电阻率可达 $119\text{m}\Omega/\text{cm}^2$ ，通过 EDS、XPS 等检测结果表明，镀覆在表面的 Cu 元素是以 CuO 的形式存在的，并且镀后桦木单板的电磁屏蔽性能大于 60dB。

1.2.2 化学镀木质复合材料

长泽长一郎等（長澤長一郎和熊谷八百三，1989；Chohachior, 1999）选用日本赤松为施镀材料，对木片进行化学镀镍，用镀镍后的木片制成的刨花板进行了防静电和电磁屏蔽的研究。木材刨花通过 12-20 目的筛网获得，条件设定在室内相对温度为 $23\pm 2^\circ\text{C}$ ，相对湿度为 $50\pm 5\%$ 的情况下。之后对刨花进行表面处理，首先对刨花进行化学镀，采用的方法为点滴法（Mallory G. O., 1984），镀液容量为 500ml，镀液温度为 85°C 、pH 值为 6.5 ~ 7.0。其次，将处理的刨花在 105°C 条件下干燥 2 小时，在室温下，用一定浓度的硅烷偶联剂乙醇或水溶液对刨花进行浸渍，这样活化层会在刨花的表面形成，再用氯化钯含量为 250mg、盐酸含量为 2.5ml 的水溶液浸渍刨花，之后常温下干燥。最后，把镀镍木片冲洗干净，并在烘箱中干燥以得到化学镀的刨花，然后压制刨花板。条件设定如下：热压温度 100°C ，时间 15 分钟，压力 2.5MPa 或 5.0MPa。之后对所得刨花进行性能测试，结果显示：①在导电条件相同的情况下，塑料物质中含有 1/2 的导电刨花板；②在金属沉积量相同的情况下，刨花板经过化学镀后其体积电阻率与压力成反比；③刨花板经过化学镀后金属沉积量与刨花板的体积电阻率成反比；刨花板的体积电阻率与电磁屏蔽效能也成反比关系。

朱江等（朱江，2009）利用轻质木材刨花热压制成具有导电功能的电磁屏蔽

材料，并通过比较分析氯化钯乙醇溶液活化工艺、银氨溶液常温活化工艺和铜盐溶液活化工艺这三种活化工艺，择优选取铜盐活化工艺作为基材活化处理的方法。处理后利用环氧树脂双组份胶粘剂将化学镀铜后的导电单元热压复合后检测其电磁屏蔽效能。结果显示，通过此种方法所制成木质电磁屏蔽复合材料在 9kHz-1.5GHz 电磁波频率下，电磁屏蔽效能平均值可达 60.44dB，可以满足民用电磁屏蔽材料的要求。

1.2.3 导电及电磁屏蔽型木质复合材料

Lambuth (Lambuth, 1990) 用木刨花、导电性炭黑、木质纤维素等加胶粘剂制成一种中密度或高密度的导电刨花板，其中片状木质纤维素长宽比为 1 : 1 ~ 20 : 1，束状木质纤维素长宽比为 1 : 1 ~ 40 : 1，炭黑的应用面积需要大于 20 m²/g。此种刨花板具有防静电的功能，可以用于地板或隔墙等地方。加藤昭四郎等 (加藤昭四郎, 1991) 在 5 cm 厚的胶合板表面覆盖一层金属箔，如铜箔、铝箔、铁箔、金属粉末等，再在金属粉末层上贴上装饰板，或在金属箔上贴上 PCM (聚合物水泥砂浆) 膜。结果显示，在 30MHz ~ 500MHz 范围内，复合后的材料 (胶合板/金属箔/PCM) 具有良好的电磁屏蔽性能，表面覆盖铜箔和铝箔的复合板电磁屏蔽效能为 50dB ~ 80dB；表面覆盖铁箔的复合板为 30dB ~ 60dB；用金属粉末制成的复合材料电磁屏蔽效能较差，小于 10dB。唐沢健司等 (唐沢健司, 1992) 研究了碳纤维板的力学性能与电屏蔽性能，所用碳纤维板是由碳素材料 (如碳素纤维纸和石墨板等材料) 与多种木质材料复合而成，结果显示，复合后的碳纤维板的磁屏蔽效果不好，但是力学性能和电屏蔽性能较好。井出勇等制造两面有 10% GPS 覆盖的刨花板的电磁屏蔽复合材料，其中 GPS (Graphite phenol—formaldehyde spheres) 达到 30mm 厚时，其电磁屏蔽效能可以高达 40dB。朴钟莹等 (朴钟莹, 1993) 将碳纤维束 (Carbon Fiber Strand) 和钢纤维垫 (Steel Fiber Mat) 与木质纤维混合制造中密度纤维板。结果显示，当碳纤维束含量达到



25%时，所制成的中密度纤维板在 30MHz ~ 1000MHz 范围内的电磁屏蔽效能大于 30dB；同时用钢纤维垫（Steel Fiber Mat）制造成的中密度纤维板，其电磁屏蔽效能可在 30MHz ~ 1000MHz 范围内可以达到 35dB ~ 75dB。Ivan 等（Ivan, 1996）研究具有导电性能的刨花板，用添加碳的方法找到了提高刨花板导电性能的工艺，并借助于几何和渗滤模型分析导电添加剂（碳）用量与刨花的形状尺寸对刨花板导电性能的影响。石原茂久（石原茂久, 2002）把酚醛树脂（32.5%）和木炭（67.5%）混合在一起制造木炭薄板，薄板厚度为 1mm，结果发现，当碳化温度达到 800℃ 或以上时，混合后薄板的电磁屏蔽效能可以达到 30dB 以上。

华毓坤等（华毓坤, 1995）在意杨单板中添加导电粉，热压复合制成导电胶合板，复合后的导电胶合板的电阻率下降到 100Ω 以下，导电性能得到了很好的提高。导电粉的加入不仅可以降低胶层的脆性，还可以提高胶合板的导电性能，特别是粒度较大的导电金属粉末的作用比粒度小的导电金属粉末更加明显，但是导电金属粉末的粒度小其电阻的均匀性比较好。而导电液的加入对胶合板的胶合强度反而会产生不利影响。李坚等（李坚, 1995）研究了在木材中加入金属元素后，使木材的比重增加了 2 ~ 6 倍，力学强度提高了 2 ~ 4 倍。其处理方法与用水或水注入木材中制得木质复合材料的工艺相似：在较高温度条件下（130 ~ 150℃），把木材中注入熔化的合金以及一些金属元素制得复合材料，复合后的木材-金属复合材料可以用于有射线辐射的空间，也可以用于壁板、地板等装饰材料中。王二壮（王二壮, 1996）利用传统的胶合板生产流水线和设备，以热熔性粘合剂，如聚乙烯膜、聚丙烯膜、聚氯乙烯膜等，把木材和金属片（箔）粘结在一起制造复合型的胶合板。王广武（王广武, 1998）采用冷弯轧制法，将铝板、铁板、铜板、金属复合板等等金属板复合在木材表面。张丰等（张丰, 1999）发明了一种抗静电的复合地板，以层压刨花板为基材，基板上有按坐标网络节点布置的孔，孔中填充有导电性棒式抗静电材料，基板的上下表面用导电材料板粘贴。黄耀富等（黄耀富, 2000）把不同网目的铜网、铁网、不锈钢网以及

碳纤维布、铝箔、铜箔作为介电物质加入纤维板中，研究表明，在纤维板的上下表面各覆盖一层或二层等金属材料时，在 1.5% ~ 2.7% 频率范围内，其电磁屏蔽效能可以达到 70 dB 以上，属于反射型电磁屏蔽材料。

1.2.4 木质材料的干缩湿胀

上世纪 60 年代以来，Harris 等 (Harris, 1961; Stevens, 1963) 将木材干缩的湿胀从平衡态引入到非平衡态领域。通过测定湿度周期变化环境中木材从吸湿-解吸水分循环过程中干缩率和含水率的变化及木材的干缩湿胀特性。结果表明，试材的弦、径向干缩率与含水率在含水率小于 20% 时近似于线性关系；当含水率大于 20% 时，试材弦、径向的干缩率吸湿时比解吸时小。当含水率大于 30% 时，木材发生变形，开始发生横向收缩。研究还表明，温度对木材干缩湿胀影响也较大，温度的高低不仅会对木材干缩湿胀和含水率关系的线性范围产生影响，还会影响木材干缩湿胀的大小。Espena (Espena, 1971) 对美国西部异叶铁杉 (*Tsuga heterophylla*)、冷杉 (*Abies spp.*) 和美国西部红崖柏 (*Thuja plicata*) 的研究表明，木材发生收缩时的含水率，不仅因木材的弦向、径向而不同，而且还因纹理方向而异。在含水率小于 12% 时，树种主要发生纵向收缩。Chomcham (Chomcham, 1983) 对美国黑樱桃木 (*Prunus serotina*)、美国椴木 (*Tilia*) 和黄桦 (*Betula alleghaniensis*) 生材气干干燥时径向收缩时的含水率进行了研究，研究表明，弦向开始收缩时的含水率比径向开始收缩时的含水率高 5% - 10%。Noack 等 (Noack, 1973) 提出用参数“膨胀率 (ratio of swelling)”作为评价木材尺寸稳定性的指标，来表征含水率变化对木材膨胀行为的影响，还将该参数划分为大小不同的等级。研究显示，当含水率范围在 7% 至 20% 时，木材的弦、径向膨胀率接近于常数。Keylwert (Keylwert, 1964) 测定了欧洲桦木 (*Betula spp.*) 的体积、弦向、径向膨胀、与含水率之间的关系，结果表明，水分膨胀系数 (moisture expansion coefficient) 在含水率处于 5% 至 25% 之间时，在该含水率