

# 温湿度对水性木器漆干燥速率及漆膜性能的影响

徐康<sup>1</sup>, 张家祖<sup>2</sup>, 李琴<sup>1</sup>, 袁少飞<sup>1</sup>, 逯柳<sup>3</sup>, 张建<sup>1</sup>, 王洪艳<sup>1</sup>

(1. 浙江省林业科学研究院; 浙江省竹类研究重点实验室, 浙江杭州 310023;

2. 浙江农林大学工程学院, 浙江临安 311300; 3. 龙泉市产业创新服务中心, 浙江龙泉 323700)

**摘要:** 探究不同温湿度对水性聚氨酯木器漆干燥速率及漆膜性能的影响。试验结果表明, 随着干燥温度升高, 底漆第1道(BI)和面漆第1、2道(SI、SII)的表干、实干时间均逐步缩短, 且SI和SII间的表、实干时间差值均逐步缩小; 随着相对湿度增加, BI表、实干时间平稳延长, 在高相对湿度时, SI和SII的表、实干时间亦明显延长; 不同温湿度干燥对漆膜硬度和附着力均无影响, 相对湿度增加后试样耐磨性降低。

**关键词:** 水性木器漆; 表干时间; 实干时间; 漆膜性能; 底漆; 面漆

中图分类号: TQ630.7; TS66 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654 (2019) 02-0001-05

## Influence of Drying Temperature and Relative Humidity on Drying Rate and Coating Film Properties of Waterborne Wood Coatings

XU Kang<sup>1</sup>, ZHANG Jia-zu<sup>2</sup>, LI Qin<sup>1</sup>, YUAN Shao-fei<sup>1</sup>, LU Liu<sup>3</sup>, ZHANG Jian<sup>1</sup>, WANG Hong-yan<sup>1</sup>

(1. Key Lab of Bamboo Research of Zhejiang, Zhejiang Academy of Forestry, Hangzhou 310023, Zhejiang, China;

2. School of Engineering, Zhejiang Agriculture and Forestry University, Lin'an 311300, Zhejiang, China;

3. Longquan Industrial Innovation Service Center, Longquan 323700, Zhejiang, China)

**Abstract:** Influence of drying temperature and relative humidity (RH) on drying rate and coating film properties of waterborne polyurethane wood lacquers were explored.

The results showed that surface and hard drying time of the base-coat first finishing (BI), the top-coat first finishing (SI) and the top-coat secondary finishing (SII) all reduced gradually with temperature increase, and time interval of the surface and the hard drying time between SI and SII became short. The surface and hard drying time of the BI increased smoothly with RH increase. The surface and hard drying time of the SI and SII elongated when RH was high. No obvious differences were found of the hardness and adhesion of the coating films under different drying conditions. Abrasion resistance of the coating films decreased with RH increase.

**Key words:** waterborne wood coating; surface drying time; hard drying time; properties of coating film; base-coat; top-coat

传统溶剂型涂料以有机溶剂为分散介质, 在建

筑涂饰、汽车、家具涂装等领域广泛应用<sup>[1]</sup>, 但由于高VOC排放的特点, 应用逐步受到限制。而以水作为溶剂或分散介质的水性涂料, 是一种无闪点涂料, 从根本上解决了溶剂型涂料高VOC排放以及易燃易爆等问题, 表现出巨大的市场潜力和应用前景<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2018-08-30; 修改日期: 2019-02-03

基金项目: 浙江省科技计划项目“家具用水性环保漆的研制及应用”(2016F50025)。

作者简介: 徐康(1988—), 男, 浙江省林业科学研究院助理研究员。

水性木器漆的主成分包括：水性丙烯酸树脂、水性聚氨酯树脂、聚氨酯-丙烯酸树脂杂化分散体、水性醇酸树脂等，其 VOC 排放量远低于标准阈值（750 g/L），部分高端产品的 VOC 排放量仅为 5 g/L，环保性能优异<sup>[3-4]</sup>。

尽管水性木器漆的优点明显，但在实际应用中，存在固体含量较低、水乳化和水分散体漆料无法长时间保存、漆膜成膜时间长，干燥过程易受温度和相对湿度影响等问题<sup>[1, 5]</sup>；相比有机溶剂，水更容易被木质基材吸收；另外，水的蒸发潜热是一般有机溶剂的 5~7 倍<sup>[2]</sup>，干燥成本高。这些均为限制水性木器漆推广应用的重要因素。

热空气干燥以电或蒸汽为热源，以 40~60 ℃ 的热空气为载体，适用性强，应用普遍，但目前关于热空气干燥对水性木器漆干燥速率及漆膜质量影响的研究相对较少。鉴于此，笔者探讨干燥温度、相对湿度对漆料干燥速率以及干燥后漆膜性能的影响规律，以为水性木器漆的干燥技术和工艺优化提供参考和依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

1) 樱桃木 (*Prunus serotina*) 贴面胶合板，规格为 100 mm (长) × 100 mm (宽) × 3 mm (厚)，表面未经涂饰处理，含水率 8.6%。

2) 单组份水性聚氨酯木器漆：自制，乳白色。分为底漆 (B) 和面漆 (S)，涂饰前用蒸馏水将面漆的固体含量调整为 28%。

两种漆的技术指标如下：

漆种	pH 值	黏度/(mPa·s)	固体含量/%	平均粒径/nm
底漆 (B)	6.5~7.0	58.23	28	20.19
面漆 (S)	6.0~6.5	190.47	32	827.30

3) 其他材料：脱脂棉、400#、600#砂纸、马口铁板 70 mm × 150 mm、定性滤纸、9B 至 9H 铅笔。

### 1.2 试验设备

JW-500-20 程式恒温恒湿试验机，QGS 漆膜干燥时间测定器，BY-750 铅笔硬度计，JM-IV 漆膜磨耗仪，2 mm 间距 HGQ 漆膜划格器等。

### 1.3 试验设计

采用单因素试验。依据实际生产工艺，设置干

燥温度分别为：20、35、50、65 ℃，恒定相对湿度为 50%；设置相对湿度分别为：20%、35%、50%、65%，恒定干燥温度为 50 ℃。

### 1.4 试验方法

1) 涂饰：利用 400#砂纸对试样表面进行适当的砂光和清洁处理，采用“一底两面”的工艺，用漆刷顺木纹方向进行涂饰。

涂布量：底漆 (BI) 为 100 g/m<sup>2</sup>，面漆 (SI, SII) 均为 120 g/m<sup>2</sup>，通过重量控制误差 ± 3 g/m<sup>2</sup>。

涂饰后立即进行干燥。待每道漆膜实干后，用 600#砂纸顺着木纹方向轻轻打磨后，再进行下一道涂饰工序。

为排除木质基材对漆膜干燥速率的影响，在马口铁板上，按同样涂布（不打磨）和干燥工艺参数进行涂饰和干燥，考察温湿度对水分挥发量及挥发速率的影响。

2) 干燥：根据设定的干燥条件进行，出风口风速为 0.5 m/s，每个干燥条件重复五次试验。

### 1.5 性能测试

1) 采用 GB/T 1728-1979 (1989) 《漆膜、腻子膜干燥时间测定法》中的指触法和压滤纸法，测试干燥过程中漆料表干时间、实干时间；

2) 参照 GB/T 6739-2006 《涂膜铅笔硬度测定法》，测定漆膜硬度；

3) 参照 GB/T 4893.8-2013 《家具表面漆膜理化性能试验》，测试漆膜耐磨性和附着力；

4) 采用称重法，测试漆料水分挥发速率和水分累计挥发量。

每个指标重复测试 5 次，结果取平均值。

## 2 结果与讨论

### 2.1 温湿度对漆料干燥速率的影响

#### 2.1.1 干燥温度对表、实干时间的影响

不同干燥温度条件下，贴面胶合板涂饰底漆 (BI) 和面漆 (SI, SII) 后的表干、实干时间见图 1。

表干是成膜物质在表层刚刚相互交联后形成的一个相对封闭、光滑的平面，灰尘质点落在漆膜上面可吹走不被粘住，也称指触干燥或防尘干燥，是个暂时的稳定状态；实干是漆膜中的成膜物质完全交联达到的稳定状态<sup>[6-7]</sup>。

图1显示,恒定相对湿度(50%)条件下,随着干燥温度升高,底、面漆的表干、实干时间均呈逐步缩短的趋势;相同温度条件下,底、面漆的表干、实干时间依次延长。

其原因:1)底漆涂布量(100 g/m<sup>2</sup>)小于面漆涂布量(120 g/m<sup>2</sup>);2)底漆涂饰后形成了上下两个蒸发面:一部分漆料与水分一起渗入基材中,使留在基材表面的漆料固体含量减少,干燥时间缩短;同时,基材表面漆料中的水分向空气中蒸发。BI实干后,对基材起到了较好的封闭效果。

而SI涂饰后,水分只能向空气中蒸发,表干、实干时间相应延长;此外,面漆的平均粒径较大,微粒间相互融合的难度加大,对漆料干燥成膜影响不利。SI实干后,由于表面结构及孔隙、表面张力的改变,使SII的表干、实干时间进一步延长<sup>[8-9]</sup>。

随着干燥温度升高,两道面漆间的表干时间和实干时间差值均明显缩小,说明底漆将基材封闭之后,干燥温度对面漆成膜起主导作用。温度升高,分子热运动平均动能增加,液体表面张力降低,表面漆料易于铺展<sup>[10]</sup>,水分子蒸发速率以及聚合物颗粒靠拢、聚集、变形、融合成膜的速度加快。

但并非干燥温度越高越好,温度过高易导致漆料表面固化形成一层较薄的干膜<sup>[11-12]</sup>,阻碍后续水分继续挥发,反而延长实干时间。

### 2.1.2 相对湿度对表、实干时间的影响

不同相对湿度条件下,贴面胶合板涂饰底漆和面漆后的表干、实干时间见图2。

由图2可知,随着相对湿度增加,BI的表干、实干时间平稳增加,而SI和SII的表干、实干时间则明显延长,说明相对湿度对面漆的影响大于底漆。

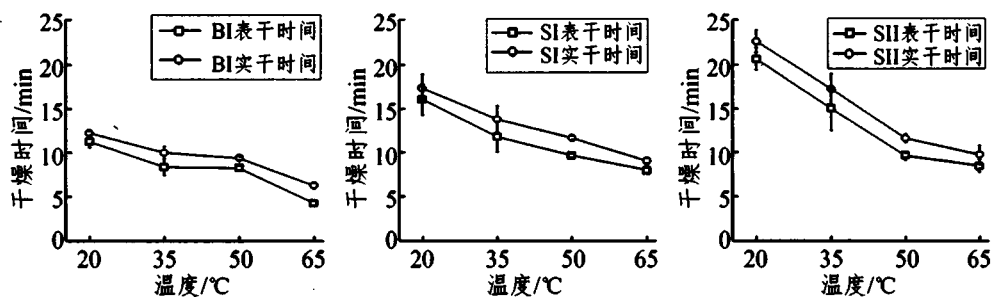


图1 干燥温度对漆料表干、实干时间的影响

Fig.1 Effect of drying temperature on surface drying time and hard drying time of coatings

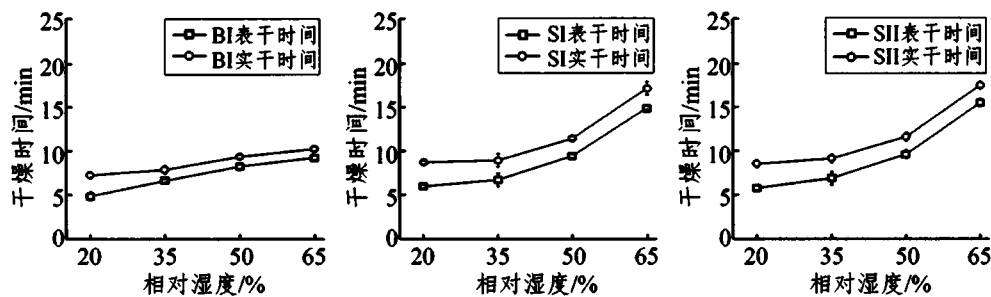


图2 相对湿度对漆料表干、实干时间的影响

Fig.2 Effect of relative humidity on surface drying time and hard drying time of coatings

这主要与BI的蒸发特点有关。即水分既向基材中渗透一部分,又向空气中挥发一部分;面漆涂饰后,随相对湿度增加,水分向空气中蒸发的阻力增加,漆料表面及以下邻近层的水分蒸发速度变慢,达到表干的时间较长,进而更难达到稳定的实干状态。

### 2.1.3 温湿度对水分挥发量及挥发速率的影响

马口铁板涂饰漆料后,在不同条件下干燥时,水分累计挥发量及挥发速度见图3。

图3显示,不同温湿度条件下,底、面漆涂饰后漆膜的水分累计挥发量均先快速增加后逐步稳定;水分挥发速度先小幅增加达到峰值后,逐步降低直至趋于稳定。干燥前期,漆表面的水分先吸收热量快速蒸发,形成了具有一定机械性能的薄膜;漆膜达到表干状态后,扩散是内部水分向表面迁移的主要途径<sup>[13-14]</sup>,蒸发速度变慢。相对于干燥温度,相对湿度对水性漆的干燥成膜影响更为显著。

水性漆的干燥成膜包含了复杂的固液相态变化,粒子堆积聚并融合成膜过程,受水分挥发进程影响<sup>[15]</sup>。一定干燥温度条件下,相对湿度越大,越不利于水分散失而引发乳聚合物粒子间的聚拢融合。整体上,干燥速度亦并非越快越好,干燥速度过快,

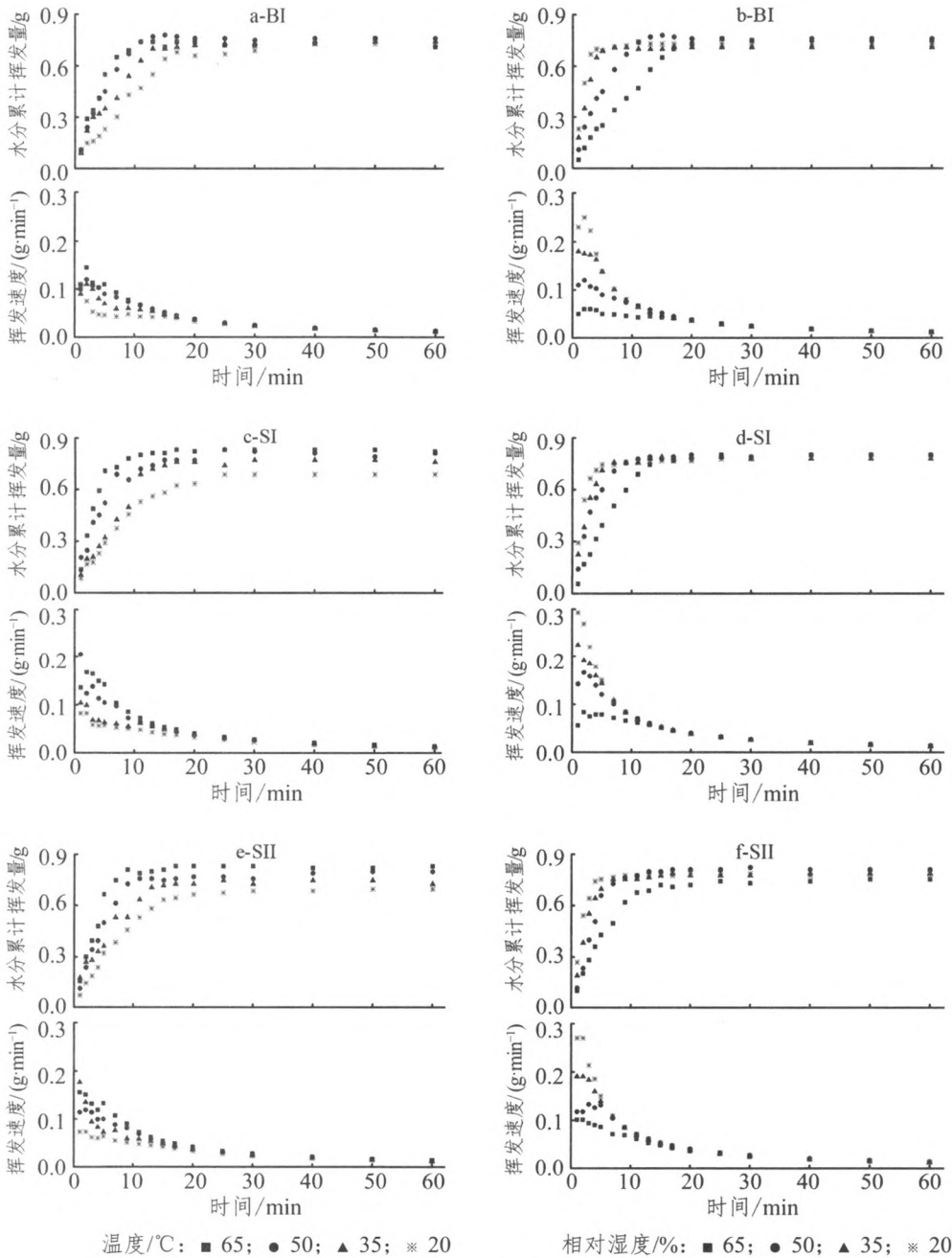


图3 不同温湿度对漆料水分累计挥发量及挥发速率的影响

Fig.3 Effect of drying temperature and relative humidity on accumulative amount and volatilization rate of water of coatings

可能导致漆料未充分流平即已凝固，或导致部分助剂不能充分溢出而被残留在漆膜中<sup>[16]</sup>；而干燥速度过慢，又容易引起漆膜发白等缺陷。可见干燥工艺的合理选择至关重要。

## 2.2 温湿度对漆膜性能的影响

### 2.2.1 硬度和附着力

贴面胶合板涂饰 BI、SI、SII，经不同温、湿度干燥后，漆膜硬度和附着力的测试结果，见表 1。

表 1 显示，在不同温湿度条件下，干燥后的漆膜硬度和附着力无区别，分别均为 2H 和最高等级的 0 级。

由图 3 可知，虽然在不同温、湿度条件下干燥，但 BI、SI 和 SII 水分累计挥发量非常接近，当水分蒸发到一定程度后，漆膜已经充分固化。漆膜硬度与漆料的种类及干燥后的固化程度密切相关，随着干燥进程逐步推进<sup>[17]</sup>，干燥越充分，固化越完全，硬度越高。

基材表面粗糙度是影响其附着力的首要因素<sup>[18]</sup>，另外，水性漆的渗透性较好，易于和木质基材形成胶钉式机械咬合或燕尾楔效应，表现出良好的附着力。因此，干燥条件对漆膜附着力亦无影响。

表 1 温湿度对试样表面漆膜硬度和附着力的影响

Tab.1 Effect of drying temperature and relative humidity on film properties of waterborne coatings

相对湿度/%	温度/°C	硬度/H	附着力/级	温度/°C	相对湿度/%	硬度/H	附着力/级
50	20	2	0	50	20	2	0
	35	2	0		35	2	0
	50	2	0		50	2	0
	65	2	0		65	2	0

### 2.2.2 耐磨性能

贴面胶合板经过“一底两面”工艺涂饰,在不同温、湿度条件下干燥后,其漆膜耐磨性能随着温湿度的变化,如图4所示。

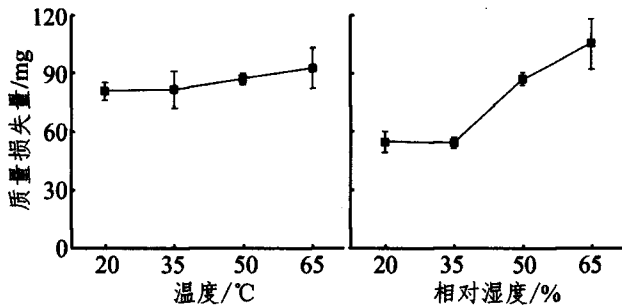


图4 温湿度对试样表面漆膜耐磨性能的影响

Fig.4 Effect of drying temperature and relative humidity on abrasion resistance of waterborne coatings

耐磨性是漆膜硬度、附着力、柔韧性以及内聚力等性能的综合体现,与漆料类型、涂布量、固化程度、测试方法等因素密切相关<sup>[18-21]</sup>。

图4显示,相比于干燥温度,不同相对湿度下干燥后漆膜的耐磨性差异较大。其原因可能是本试验采用的砂带法,导致漆膜磨损量较大,底、面漆在完成100转磨损前可能部分被磨穿,木质基材因而承受了一部分质量损耗。在不同相对湿度条件下干燥时,木质基材因吸湿、解吸,产生含水率变化,进而影响力学强度的变化,最终导致试样的质量损失差异较大。

事实上,当漆料涂布量小、涂层较薄时,即使是在较低温度或较高相对湿度条件下干燥,漆料厚度方向上也基本不存在水分梯度,固化程度从表至里较为一致,此时漆膜的耐磨性主要取决于漆料本身及基材的性能。

### 3 结论

1) 在本试验范围内,随着干燥温度升高,底、面漆表干、实干时间均逐步缩短;随着相对湿度增加,底漆表干、实干时间平稳增加,面漆表干、实干时间在高湿条件下明显延长。

2) 干燥温度升高或相对湿度增加,对漆膜硬度和附着力影响不大,均可达2H和0级;但相对湿度对试样耐磨性影响较大。

3) 综合考虑干燥质量及能耗成本,建议在实际干燥过程中,基于水分挥发速率或水分挥发量,确定适宜的干燥温度和相对湿度范围,避免采用较高的干燥温度及较高的相对湿度。

4) 后续将进一步研究热空气干燥工艺优化,并探索热空气干燥与微波、红外干燥等一体化干燥技术的应用。

### 参考文献:

- [1] 黄伟,邱祖民,肖建军,等.水性涂料的应用现状及研究进展[J].化工新型材料,2015,43(8):210-212.
- [2] 罗帅.水性涂料的研究进展[J].现代涂料与涂装,2015,18(12):1-6.
- [3] 袁腾,胡剑青,王锋,等.水性木器涂料的研究进展[J].中国涂料,2012,27(6):18-25.
- [4] 李幕英,程璐,刘艳菲,等.水性木器涂料的发展现状及应用[J].上海涂料,2013,51(3):28-30.
- [5] 申文权,陆晓平,沈黄桥,等.水性涂料涂膜脱落问题研究[J].涂料工业,2013,43(7):72-75.
- [6] 王恺.木材工业实用大全:涂饰卷[M].北京:中国林业出版社,1998.
- [7] 谭建辉,陈炳耀,毛秋燕,等.环境温湿度对气雾漆漆膜光泽度的影响[J].现代涂料与涂装,2018,21(4):22-24.
- [8] 高海伟.表面张力对乳胶漆及其漆膜性能的影响[J].涂料工业,2005,35(12):47-49.
- [9] 穆元春,李晓晨,邱藤,等.成膜助剂对核壳结构乳胶粒子成膜过程的影响[J].北京化工大学学报(自然科学版),2011,38(3):44-49.
- [10] 黄红云,曹洪亮.液体表面张力系数随温度升高而减小的定量证明[J].常州工学院学报,2006,19(4):51-52.
- [11] 申利明,路则光,陈秀兰.热空气温湿度对木器水性封闭底漆漆膜附着力的影响[J].南京林业大学学报(自然科学版),2008,32(3):64-66.
- [12] 张岱远,申黎明,闫小星.水性聚氨酯丙烯酸树脂和聚丙烯酸酯面漆漆膜性能评价[J].林业工程学报,2017,2(5):138-142.
- [13] 袁显永,霍东霞,王红英.高分子乳液的成膜理论研究现状[J].高分子通报,2006(8):64-69.
- [14] Du C A, Bojkova A, Gapinski J, et al. Film formation and redispersion of waterborne latex coatings[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2000, 224(1): 91-98.
- [15] 王小荣.水性聚氨酯丙烯酸酯水性漆制备及性能研究[D].西安:陕西科技大学,2014.
- [16] 程福广.水性木器涂料在实木家具上的涂装应用探究[J].建材与装饰,2016(14):167-165.
- [17] 黄秉升.涂膜硬度及其测定方法[J].现代涂料与涂装,2011,14(1):35-37.
- [18] 王泽坤,龙涛,夏俊伟,等.火力楠木材涂饰聚氨酯清漆工艺研究[J].西北林学院学报,2016,31(1):265-270.
- [19] 方旭升.漆膜磨损时的质量损失与厚度损失—地坪漆耐磨性评价标准探讨[J].现代涂料与涂装,2008,11(4):31-34.
- [20] 路则光,申利明,黄河浪,等.木器用水性涂料涂布量对漆膜耐磨性的影响[J].涂料工业,2007,37(3):56-58.
- [21] 孙伟圣,姜俊,沈斌华,等.新型弹性漆面实木地板漆膜耐磨性的测试[J].木材工业,2011,25(2):40-42.

(责任编辑 孟凡丹、向琴)