技术专论

有机蒙脱土插层脲醛(OMMT/UF)树脂的制备与性能研究

秦 蓓
(西安医学院，西安 710021)

摘要：实验采用十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)和十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)为改性剂，对蒙脱土(MMT)进行了有机化处理，得到了有机蒙脱土(OMMT)，并采用聚合反应过程中的插层复合法制备了有机蒙脱土插层脲醛树脂(OMMT/UF)胶粘剂。通过 XRD 和 SEM 对 OMMT 的结构变化进行表征，结果表明：有机改性剂已进入 OMMT 的层间，OMMT 具有较 MMT 优良的层间结构。考察了 OMMT 的投加量对 OMMT/UF 胶粘剂的各项性能的影响，结果表明 OMMT 加入量越大，越有利于增强除固化时间以外的各项性能，与 UF 胶粘剂相比，当 OMMT 质量分数为 3%～5%时，得到的 OMMT/UF 胶粘剂的表观粘度提高了 2 倍，耐水时间增加了 100 min 左右，甲醛释放量降至了 5.6 mg/L 以下，但是固化时间则增加了近 1 倍。将 OMMT/UF 胶粘剂用于胶合板的压制，发现 OMMT/UF 胶粘剂能够改善板材的强度，同时减少板材甲醛的释放。

关键词：插层；脲醛树脂；有机蒙脱土
中图分类号：TB484.3；TB487 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-3563(2011)17-0036-05

Preparation and Property Study of UF Resin Modified with Organophilic Montmorillonite

QIN Bei
(Xi'an Medical University, Xi'an 710021, China)

Abstract: The montmorillonite (MMT) was treated by cetyl trimethyl ammonium bromide (CTAB) and dodecyl trimethyl ammonium bromide (DTAB) to obtain the organophilic montmorillonite (OMMT), and then the organophilic montmorillonite/urea-formaldehyde resin (OMMT/UF) was prepared by intercalated composite method during the polymerization process. The XRD and SEM showed that the organic reagent has intercalated into the layers of MMT, and the interlayer space of OMMT modified by CTAB and DTAB is larger than that of MMT. The influences of OMMT content on apparent viscosity, water resistance, curing time and free-formaldehyde content were discussed. The results showed that the apparent viscosity is 2 times of UF, the water resistance time of OMMT/UF is 100 min more than UF, the free-formaldehyde content is 5.6 mg/L which is much lower than UF, but the curing time increases to 118 min, when the OMMT content is 3～5%. Plywood prepared by using OMMT/UF as adhesive was discussed, which showed that the OMMT/UF can significantly improve the strength of the plywood and reduce the release of formaldehyde.

Key words: intercalation; UF; organophilic montmorillonite (OMMT)

脲醛(UF)树脂是一种生产工艺简单、原料来源广泛的胶粘剂，具有固化快、强度高、成本低等优点，是包装用胶合板应用最为广泛的一类胶粘剂[1]。然而，作为一种传统的合成胶粘剂，UF 胶粘剂还存在诸多不可避免的问题，其中最主要的缺点是 UF 胶粘剂中存在大量游离甲醛，严重影响环境安全和人类健康，因此提高其性能的同时减少游离甲醛量，已成为现今研究热点[2-5]。目前通过 UF 胶粘剂与一些无

收稿日期：2011-06-08
基金项目：国家自然科学基金项目(50573046)；陕西科技厅社会发展攻关项目(2010K17-04-01)
作者简介：秦蓓 (1966－)，女，四川人，硕士，西安医学院副教授，主要从事高分子的改性研究工作。

机插层材料(蒙脱土、膨润土等)进行插层复合是改善其性能、减少甲醛释放的一种有效手段[6-8]。最为常见的插层方式是通过直接在胶粘剂中加入无机插层材料来实现,使用该法聚合物不易插入到无机材料结构中,存在插层效果不佳、层状剥离不显著、插层不均匀等问题[9-12],见图 1a。

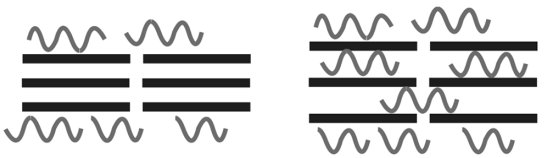


图 1　UF 在 MMT 中的分散状态

Fig. 1 The typical dispersion states of UF with MMT

以具有良好层状结构的有机蒙脱土(OMMT)为无机复合材料,采用反应过程中的插层复合,将 UF 插入到 OMMT 的层间,见图 1b,由此制得新型有机蒙脱土插层脲醛树脂(OMMT/UF)胶粘剂,并将其用于胶合板的压制,测定其粘接强度及甲醛释放量。

1　实验

1.1　材料与设备

材料:尿素(化学纯)、37%甲醛(分析纯)、三聚氰胺(化学纯)、聚乙烯醇(PVA)(化学纯)、氯化铵(化学纯)、甲酸(化学纯)、氢氧化钠(化学纯)、氯化铵(化学纯)、盐酸(分析纯),均购自西安化学试剂厂;MMT(工业级),购自青岛泰勒硅藻土有限公司;乙醇(分析纯),购自洛阳市化学试剂厂;十六烷基三甲基溴化铵(分析纯)、十二烷基三甲基溴化铵(分析纯),购自厦门市先端科技有限公司;去离子水,自制。

仪器:EDM-10 型万能材料试验机;pHSJ-3F 型酸度计;NDJ-4 型旋转粘度计;ZK-072 型真空干燥箱;DZK-4 型恒温水浴锅;UV-265FW 型紫外分光光度计;JSM6460 型扫描电子显微镜(SEM);D/max 2000PC 型 X 射线衍射(XRD);TA 公司的 Thermoanalyzer Systems。

1.2　OMMT 制备

将 2.5 g MMT 分散于 100 mL 蒸馏水中制成浆液,加热至 60～80 ℃,调节 pH 值至 8～9,加入2.5%的十六烷基三甲基溴化铵(CTAB)与十二烷基三甲基溴化铵(DTAB)混合改性剂(质量比 1∶1),搅拌反应一定时间后,进行抽滤,用去离子水反复洗涤,再用 50%的乙醇水溶液洗涤 1 次,80 ℃真空干燥,研磨得 OMMT。

1.3　插层法制备 OMMT/UF 胶粘剂

1) UF 的制备[12]。将 500 g 甲醛、6 g PVA 加入到反应容器中,用质量分数为 20%的 NaOH 溶液调节体系 pH 值为 8.0～9.0,加入 190 g 尿素后升温至 90 ℃,保持 30 min,用甲酸调节 pH 值为 5.5 左右,88～90 ℃反应 30 min,用质量分数为 20%的 NaOH 溶液调节 pH 值至 7.5～8.0,加入 50 g 甲醛和 68 g 三聚氰胺,保温(83～85 ℃)反应若干时间;待胶水比为 1∶3 时,降温至 75 ℃,加入 170 g 尿素,保温反应 30 min 后降温出料。

2) OMMT/UF 的制备。实验采用聚合反应过程中的复合插层法制备 OMMT/UF,合成工艺同 UF,制备前需要将 OMMT 与 PVA 一起加入反应体系,控制 OMMT 与最终胶液的比率为 1%～5%。

1.4　OMMT 和 OMMT/UF 的性能测试

1) SEM 分析:采用 SEM 喷金观测 MMT 和 OMMT 的表面形貌。

2) XRD 分析:采用 XRD 对 MMT 和 OMMT 进行表征。

3) 热性能分析:采用 Thermoanalyzer Systems 对样品的热学性质进行分析。

1.5　OMMT/UF 胶粘剂性能测试

1) 表观黏度:采用旋转黏度计测定(25 ℃)。

2) 耐水性:将胶接好的松木试样(3 cm×3 cm)在 60 ℃干燥箱中干燥 30 h,投入沸水中,记录开裂时间。

3) 固化时间:在试管中加入 10 g 样品和 2 mL 质量分数为 25%的氯化铵溶液,插入搅拌棒,迅速放入沸水中,计时(搅拌棒停止转动的时间)。

4) 游离甲醛含量[13]:按照 GB/T 14074.16－1993 进行测定。

1.6　胶合板的制备及其性能测定

1) 制备。将 UF 胶粘剂和 OMMT/UF 胶粘剂用于胶合板的压制,压制工艺:温度为 110 ℃,压力 1 MPa,时间为 6.5 min,采用的板材规格为 500 mm×500 mm×1.5 mm,5 层杨木,板含水率为 8%～12%,涂胶量 300 g/m^2。

2) 甲醛释放量测定[14]。按照 GB/T 17657－

1999 干燥器法测定胶合板 24 h 甲醛释放量((20±2)℃,湿度为 60%～70%)。

3) 胶合强度测定[14]。按照 GB/T 17657－1999,使用 EDM-10 型万能材料试验机测定杨木胶合板的表面胶合强度。

2 结果与讨论

2.1 改性对 OMMT 的影响

OMMT 的层间距决定了 UF 和 OMMT 的结合状态,见图 1,当 OMMT 的层间距过小时,OMMT 和 UF 树脂之间无法实现插层,只是以混合的形式存在。该状态下 OMMT 的加入对 UF 胶粘剂的性能影响并不是很显著。当层间距较大时,聚合过程中单体能够在 OMMT 的层间聚合使得部分 UF 分子能够进入到 OMMT 的层间,树脂分子与 OMMT 相互作用得到复合插层 OMMT/UF 胶粘剂。由此可见,层间距越大越有利于单体或聚合物插入,因此层间距是决定复合胶粘剂性能的一项重要指标,分别考察了 CTAB 和 DTAB 对 MMT 的性能改善。

MMT 具有整齐的片层结构,该结构在 XRD 上会出现对应的衍射峰,通常根据 Bragg 方程[15](见式 1)可计算 MMT 的层间距,MMT,CTAB-MMT 和 DTAB-MMT 的 XRD 数据结果见表 1。

表 1 MMT 和 OMMT 的 XRD 数据

Tab. 1 XRD data of MMT and OMMT

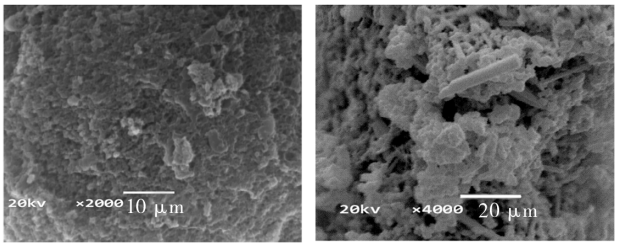
	θ /(°)	d/nm	Δd/nm
MMT	3.65	1.20	—
DTAB-MMT	2.05	2.15	0.95
CTAB-MMT	1.83	2.41	1.21
OMMT	1.53	2.88	1.68

$$2d\sin\theta=\lambda \quad (1)$$

式中:d 为层间距;θ 为半衍射角;λ 为入射 X 射线的波长(0.154 nm)。

由表 1 可见 MMT 经 CTAB 和 DTAB 有机化处理后,其衍射角向小角度方向移动,DTAB-MMT 和 CTAB-MMT 的层间距比 MMT 的层间距明显增加,分别增大了 0.95 nm 和 1.21 nm。对比 2 种改性剂发现,DTAB 和 CTAB 对层间距的增大均具有良好的效果,当采用 2 种改性剂复合改性,发现层间距变化更为显著,可达 1.68 nm,可见 2 种改性剂的协同作用对 MMT 的层间距增大更有利。因此实验采用复合改性后的 OMMT 为原料,对 UF 胶粘剂进行改性。

为了进一步验证改性前后的结构形态变化,对 OMMT 和 MMT 的 SEM 图片进行了对比,见图 2。



a MMT b OMMT

图 2 MMT 与 OMMT 的 SEM 照片

Fig. 2 SEM image of MMT and OMMT

从图 2a 可见 MMT 表面舒展平坦,结构规整,不存在卷边现象,表现为显著的晶体特征;图 2b 显示 OMMT 结构存在破碎、折叠,这是由于 OMMT 层间存在季铵盐阳离子,所以呈现出松散的片状形态。

2.2 UF 和 OMMT/UF 的热性能分析

分别取一定量的 UF 树脂和 OMMT/UF 树脂真空干燥研磨,用于 TG 表征。UF 与 OMMT/UF 的热降解测试结果见图 3。由图 3 可见,降解主要分为

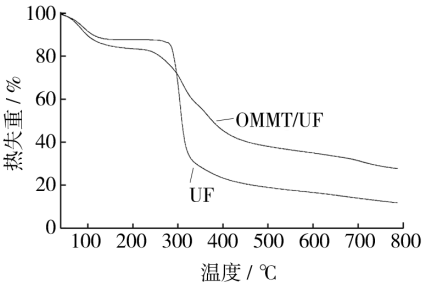


图 3 UF 与 OMMT/UF 的 TG 曲线

Fig. 3 The TG curves of UF and OMMT/UF

2 个阶段。从室温至 200 ℃之间为第 1 阶段,UF 与 OMMT/UF 的失重量分别约为 11%和 16%。与 UF 相比,OMMT/UF 的第 1 阶段热降解的起始点出现的温度较低,分析研究表明,该阶段的失重量主要是吸附水的离去所致,OMMT/UF 失水温度的降低和含水率的增大,与 OMMT 的存在使树脂内部孔隙率增大、游离水比例增加有关,也在一定程度上表明了水分子与 OMMT 的层间结构具有一定的相互作用

力,而这一现象的存在可能会对胶粘剂的固化时间和耐水性能造成一定的影响。第 2 阶段的降解对应于 UF 树脂结构的热降解。在一定的温度范围内,UF 的失重率急剧增大,而 OMMT/UF 的失重率增大趋势则平缓得多。这是由于 UF 树脂进入到 OMMT 的层状结构中,OMMT 的表面活性基团和 UF 树脂相互作用,大大提高了树脂的结构稳定性,进而减缓了其失重速率。

2.3　OMMT 用量对 OMMT/UF 胶粘剂的性能影响

从胶粘剂的表观粘度、耐水时间、固含量、甲醛释放量等角度考察了 OMMT 用量(质量分数)对胶粘剂品质的影响。OMMT 用量对 UF 胶粘剂耐水性能和表观粘度的影响见图 4。由图 4 可见,OMMT/UF

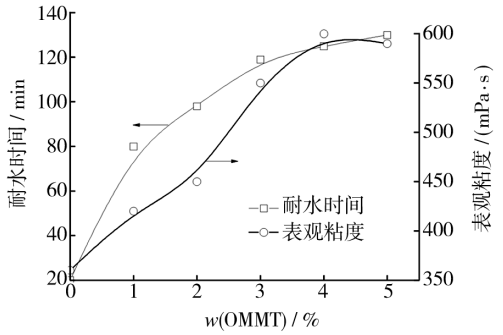


图 4　OMMT 用量对 UF 表观粘度和耐水性的影响

Fig. 4 Effect of OMMT contents on viscosity of and water-resistance

胶粘剂的耐水性随着 OMMT 用量的增加而明显提高,这是由于 OMMT 的片层结构与水分子之间的相互作用力[16],使得渗入胶芯的水分附着在其表面,减缓了其对胶芯结构的破坏,进而有效改善了 UF 胶粘剂的耐水性能。UF 胶粘剂的表观粘度随 OMMT 用量的增加而增大,当 w(OMMT)=3%时,表观粘度达到最大值,这是由于 OMMT 的颗粒细小,结构具有不规则性,且具有较大的比表面积,同时改性后晶体表面含有丰富的电荷[17],这些性质大大提高了 OMMT 的吸附性能和粘结性能,进而加大了 UF 分子之间的作用力,提高了胶粘剂的粘度。

OMMT 用量对胶粘剂固化时间和甲醛释放量的影响见图 5。随着 OMMT 的投料比的增加,OMMT/UF 胶粘剂的甲醛释放量呈显著的下降趋势,分析原因可能是由于 OMMT 具有层状结构、颗粒细小、分散度较高,赋予了其良好的物理吸附性能,同时 OMMT 具有四面体和八面体晶型结构,这种结构存

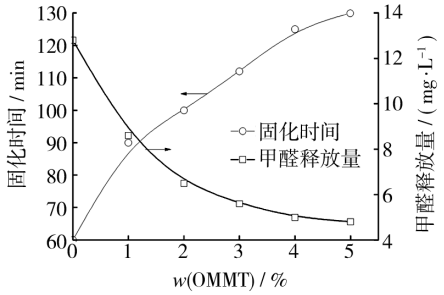


图 5　OMMT 用量对 UF 固化时间和甲醛释放量的影响

Fig. 5 Effect of OMMT contents on curing time and free-formaldehyde content

在广泛的同晶置换现象,易发生离子交换反应,具有离子交换吸附的特性[18],所以 OMMT 能吸附 UF 胶粘剂中的游离甲醛。

随着 OMMT 投料比的提高,OMMT/UF 胶粘剂的固化时间呈上升趋势,这是由于 UF 树脂只能在酸性介质下才能实现迅速缩聚固化,即分子质量迅速增长,交联成不溶不熔的体型聚合物,所以酸性的物质或是与树脂混合时能够释放酸的物质常被用作脲醛树脂的固化剂[19]。实验采用的固化剂氯化铵可与甲醛反应,间接产生酸,促使树脂的固化;而 OMMT 的加入降低了游离甲醛的含量,从而造成了树脂固化时间增长,由此可见 OMMT 不易加入过多。

综上分析可知,OMMT 加入量越大越有利于除固化时间以外的各项性能,然而对于木材用胶粘剂而言,固化时间也是不可忽视的一项指标,因此综合考虑各项性能可知,当 w(OMMT)=3%～5%时得到的 OMMT/UF 胶粘剂品质较优,与单纯的 UF 胶粘剂相比,其表观粘度提高了 2 倍,耐水时间增加了 100 min,甲醛释放量降至了 5.6 mg/L,但是固化时间增加了近 1 倍。

2.4　OMMT/UF 胶粘剂压制胶合板的性能

将制备得到的 OMMT/UF 用于胶合板压制,考察其各项性能(胶合强度、板材 24 h 甲醛的释放量)。

1～2 样品为 UF 胶粘剂压制的参比样, 3～7 样品为 OMMT/UF 胶粘剂压制的样品。

3～7 样品的胶合强度明显优于 1～2 样品 2 个对比板样,见图 6,这是由于 OMMT 可与 UF 胶粘剂分子结构中的活性基团相互作用,改善部分低聚的 UF 胶粘剂的交联度,增强了 UF 胶粘剂分子结构的内聚力,进而提升了胶合板的粘结强度。对比 3～7 板样发现,随 OMMT 的增加胶合强度增加,当 OMMT 用

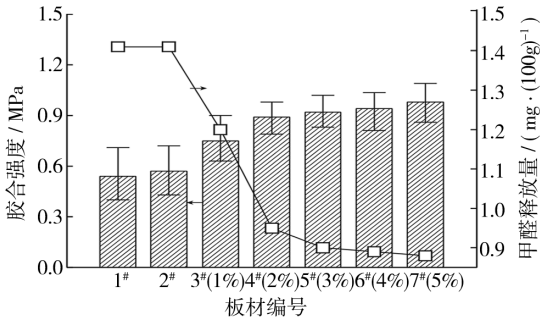


图 6 胶合板主要性能指标

Fig. 6 Main performance indices of plywood

量为 3%～4%时,强度较强,当 OMMT 用量超过 4%以后,胶合板强度变化并不大。

由图 6 可知,OMMT 的存在大大降低了胶合板甲醛的释放量,这与胶粘剂甲醛释放量的探讨结果一致。对比 3～7 板样的甲醛释放量可见,当 OMMT 用量为 2%时其甲醛的释放量明显低于 OMMT 用量为 1%的胶合板,而 OMMT 含量大于 2%的板样,甲醛释放量变化并不是很大。综合考虑强度性能和甲醛释放情况,OMMT 用量为 4%时可得到强度性能优良、甲醛释放量较小的胶合板。

1,5 号板样连续 4 d 每天的甲醛释放情况见表 2,

表 2 胶合板的甲醛释放量

Tab. 2 Formaldehyde emission of UF

样品	第 1 天	第 2 天	第 3 天	第 4 天
1	1.41	1.20	1.12	1.32
5	0.95	1.05	0.85	1.10

可见 1 号板样的甲醛释放较快,其释放速率和释放量均高于 5 号板样。固化后 UF 胶粘剂中甲醛的释放不仅仅是游离甲醛的释放,树脂自身结构的降解是板材甲醛的重要来源之一,OMMT 的存在首先对甲醛有一定的吸附作用,减少了胶本身游离甲醛的释放,再者 OMMT 的存在改善了 UF 树脂的交联度,提高了其化学稳定性,从而使其分解释放甲醛的可能性降低。

3 结论

1) 通过 XRD,SEM 对 OMMT 的结构变化进行表征,结果表明有机改性剂已进入 OMMT 的层间,OMMT 具有较 MMT 优良的层间结构。

2) 考察了 OMMT 的投加量对 OMMT/UF 胶粘剂的各项性能的影响,结果表明 OMMT 加入量越大越有利于除固化时间意外的各项性能,当 w(OMMT)=3%～5%时,与 UF 相比,OMMT/UF 胶粘剂的表观粘度提高了 2 倍,耐水时间增加了 100 min 左右,甲醛释放量降至 5.6 mg/L 以下,但是固化时间增加了近 1 倍。

3) 采用 OMMT/UF 胶粘剂压制胶合板,可大大提高胶合板的强度,改善了其甲醛释放情况,当 OMMT 质量分数为 4%时得到的样品最优。

参考文献:

[1] 郭嘉,郑治超. 绿色环保脲醛树脂的研究进展[J]. 中国胶粘剂,2006(2):40－44.

[2] KIM Su-min,KIM Hyun-Joong. Comparison of Standard Methods and Gas Chromatography Method in Determination of Formaldehyde Emission from MDF Bonded with Formaldehyde-based Resins[J]. Bioresource Technology,2005,96(13):1457－1464.

[3] 黄纾洁,钟锦标,吕建,等. 改性低毒脲醛树脂的研究进展[J]. 塑料工业,2006,34(Z):78－80.

[4] 林巧佳,杨桂娣,刘景宏. 纳米二氧化硅/脲醛树脂性能的研究[J]. 林业科学,2005,41(2):129－135.

[5] 韩井伟,孙敬忠,裴道国,等. 滴定法测定脲醛树脂中游离甲醛含量的不确定度评定[J]. 中国胶粘剂,2009,18(10):11－14.

[6] 郭治遥,戴春皓,田森林. 基于膨润土的脲醛树脂填料的开发与性能研究[J]. 中国胶粘剂,2008,17(10):18－22.

[7] ARUP K G,WOO E M. Analyses of Crystal Forms in Syndiotactic Polystyrene Intercalated with Layered Nano-clays [J]. Polymer,2004,45:4749－4759.

[8] 陈海群,李英勇,朱俊武,等. 十二烷基磺酸钠改性蒙脱土的制备与表征[J]. 无机化学学报,2004,20(3):251.

[9] 刘钦甫,糜家铃,付正. 聚乙烯/蒙脱土纳米复合材料的制备及性能研究[J]. 硅酸盐学报,2004(11):1394－1398.

[10] 阿伦,张显权,刘一星,等. 福建杉/改性脲醛树脂胶制备轻质人造板的实验研究[J]. 包装工程,2010,31(21):33－36.

[11] 龙盛如,黄锐,杨杰. 纳米 $CaCO_3$/高分子复合材料的研究进展[J]. 合成树脂及塑料,2004,21(1):77－79.

[12] 沈新安,郑苏. 环保型脲醛树脂胶粘剂的合成[J]. 中国胶粘剂,2011,20(4):10－13.

[13] GB/T 14074.16－1993,木材胶粘剂及其树脂检验方法游离甲醛含量测定法[S].

(下转第 97 页)

数不宜太高。

3　结语

用一次拟合和二次多项式拟合建立了 CIERGB → CIEL* a* b* 转换模型，结果发现，项数为 9 和 11 时，2 种模型都达到了很高的精度，二次拟合比一次拟合效果好。项数为 20 时，模型出现了较大的震荡，误差较大，不适于建模。本研究对于远程打样中颜色的匹配具有应用价值，但其研究设备具有局限性，是否适合多种显示设备需进一步研究，只是远程软打样的一部分，下一步还需研究标准色空间到设备色空间的转化。

参考文献：

[1] 李艳妮. L* a* b* 与 CMY 转换方程的研究[D]. 西安：西安理工大学，2007.

[2] 胡涛，刘睿，张志刚. 基于 BP 网络的扫描仪色彩空间转化模型的研究[J]. 印刷杂志，2003(3)：43－44.

[3] 余鸿飞，石俊生，杨卫平. 扫描仪的颜色表征、校正和 ICC Profile 建立方法[J]. 云南师范大学学报，2002，22(6)：35－37.

[4] 周瑞. 彩色数码相机色彩空间转换模型的研究[D]. 西安：西安理工大学，2007.

[5] Windows Color System Schemas and Algorithms[EB/OL]. [2006-06-10]. http://msdn. microsoft. com/library/default. asp? url =/library/en － us/icm/wcs _ cdmpschema. asp.

[6] 马艳满，刘浩学，刘昕. 数码相机的颜色特征化研究[J]. 北京印刷学院学报，2006(12)：9－12.

[7] 闵涛，秦新强，赵凤群. 数值分析[M]. 北京：中国科学文化出版社，2003.

[8] 王沫然. MATLAB 与科学计算[M]. 北京：电子工业出版社，2003.

（上接第 40 页）

[14] GB/T 17657－1999，造板及饰面人造板理化性能试验方法[S].

[15] 王珂，朱湛，郭炳南，等. 有机蒙脱土的制备及其结构表征[J]. 北京理工大学学报，2002，22(2)：240－243.

[16] PAN J J，YANG G Y，HANG B X，et al. Studies on Interaction of Dodecyltrimethylammonium Bromide with Na and Al-Montmorillonite[J]. Jounral of Colloid and Interface Science，1997，194：276－280.

[17] TLIM S，HYUAN Y H，CHOI H J，et al. Synthetic Biodegradable Aliphatic Polyester/montmorillonite Nanocomposites [J]. Chemistry of Materials，2002，14(4)：1839－1844.

[18] 刘彦龙，唐朝发. 纳米蒙脱土对脲醛树脂性能的影响[J]. 林产工业，2006，33(5)：34－35.

[19] JI You-gu，HIGUCHI Mits，MORITA Mitsuhiro，et al. Synthetic Condition and Chemical Structures of Urea-formaldehyde Resins I. Properties of the Resins Synthesized by Three Different Procedures[J]. Japan Wood Research Society，1995，4(12)：1151－1121.

（上接第 46 页）

学性能分析，得到了捆带及钢板的受力情况，并应用有限元软件进行计算和对比分析。为提高钢板包装捆带的捆扎效果，降低钢板之间的静力摩擦，就必须减少捆带与板垛以及托架的摩擦系数，可采用在捆带上涂抹润滑油的方法；在工艺允许的情况下，也可将捆带对称捆扎，即锁扣位置均匀分布在板垛的 4 个端面上，这样可以使板垛捆扎产生的静摩擦力相互抵消。

参考文献：

[1] 刘明利，于革刚，孙瑞涛. 钢卷包装工艺技术研究[J]. 冶金设备，2005(3)：35－38.

[2] 于革刚，刘明利，孙瑞涛. 钢卷包装技术现状与发展趋势浅析[J]. 冶金设备，2005(2)：48－50.

[3] 王浩宇，石焱，饶洪宇. 我国冷轧钢卷包装工艺现状分析[J]. 中国钢铁业，2007(3)：33－34.

[4] 王群，周廷美，莫易敏. 钢板包装捆扎的力学性能分析[J]. 武汉理工大学学报，2010(12)：111－115.

[5] 杜庆华. 工程力学手册[K]. 北京：高等教育出版社，1998.

[6] 刘宝朋，陆佳平. 薄钢板材包装用木托架的受力分析和结构优化[J]. 包装工程，2010，31(11)：42－45.

[7] 周晓欢，于革刚. 钢板带材包装捆带受力分析研究[D]. 北京：机械科学研究院，2006.

[8] 于开平，周传月，谭惠丰，等. HyperMesh 从入门到精通[M]. 北京：科学出版社，2005.