复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第29卷 第1期 2月 2012年
Vol. 29 No. 1 February 2012

文章编号：1000-3851(2012)01-0062-07

工业废碱渣高密度纤维板制备与阻燃性能

许国志[1]，陈小随[2,3]，张 胜*[2,3]，谷晓昱[2,3]，董明哲[2,3]，孙 军[2,3]，李雪艳[2,3]

（1. 北京工商大学 材料科学与工程系，北京 100048；2. 北京化工大学 北京市新型高分子材料制备与加工重点实验室，北京 100029；3. 北京化工大学 教育部先进炭材料重点实验室，北京 100029）

摘 要： 以工业废碱渣（主要组分为氢氧化铝（$Al(OH_3)$））、硼酸锌（$2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$）、硼酸（$H_3BO_3$）等为阻燃剂，制备出具有良好阻燃性能的阻燃高密度松木纤维板（HDF），对其物理及力学性能、阻燃性能、残炭形貌等进行了分析表征。结果表明：在满足物理及力学性能的条件下，废碱渣 $Al(OH_3)$ 与 $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$ 和 H_3BO_3 之间具有良好的阻燃协效性，提高了纤维板的成炭性，残炭量达到22.2%，降低了总释热量，降低幅度为32%，使其氧指数提高到36.4%，垂直燃烧等级达到V-0级。

关键词： 纤维板；阻燃；氢氧化铝；硼酸锌；硼酸

中图分类号： TB332 **文献标志码：** A

Properties of flame-retardant high density fiberboard synergized with industrial by-product

XU Guozhi[1], CHEN Xiaosui[2,3], ZHANG Sheng*[2,3], GU Xiaoyu[2,3], DONG Mingzhe[2,3], SUN Jun[2,3], LI Xueyan[2,3]

(1. Department of Materials Science and Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China; 2. Preparation and Processing of Novel Polymeric Materials, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 3. Key Laboratory of Carbon Fiber and Functional Polymers, Ministry of Education, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: High density pine fiberboard (HDF) with good fire performance was successfully prepared by using flame retardants of industrial by-product (mainly composed of aluminum trihydrate $Al(OH)_3$), zinc borate ($2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$) and boric acid ($H_3BO_3$). The mechanical properties, flame retardancy and char morphology were characterized and analyzed. The results show that there is a good synergistic effect on the flame-retardancy between $Al(OH)_3$ and $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$ and H_3BO_3 which can enhance the char formation up to 22.2% and reduce the total heat release with a dop of 32%, while the mechanical properties are well maintained. The limited oxygen index (LOI) of the flame retardancy board can reach up to 36.4% and the vertical burning test can reach V-0.

Keywords: fiberboard; flame retardant; aluminum trihydrate; zinc borate; boric acid

由于木材需求日益旺盛，各种替代材料应运而生，其中应用最广泛的是人造板[1]。与锯材相比，人造板的优点是幅面大、结构性能好、施工方便、膨胀收缩率低、尺寸稳定，且不易变形开裂，同时可在加工过程中添加其他成分，从而获得阻燃、防腐、耐磨等各种功能，因此人造板获得了迅速发展，产量日增[2-7]。人造板主要包括胶合板、刨花（碎料）板和纤维板等三大类产品，其延伸产品和深加工产品达上百种。纤维板（Fiberboard）广泛应用于建筑、装修、车辆及船舶等领域，却存在着一个非常严重的缺陷，即易燃性[8-10]。因此，纤维板阻燃功能的开发与研究非常重要。目前国内外采用的木材阻燃剂的主要成分为含磷、氮、硼、铝、卤等元素的化合物。但主流的木材阻燃剂仍是氮、磷、硼系阻燃剂[11-14]。无机型阻燃剂具有无毒无公害、价格低廉等优点，应用广泛。目前市场上应用到纤维板上大部分的无机阻燃剂均为酸性化合物，如各类磷酸盐、硫酸盐、硼化物等，而酸性阻燃剂会降

收到初稿日期： 2010-12-16；**收到修改稿日期：** 2011-06-27；**网络出版时间：** 2011-09-01 09:57:25
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20110901.0957.002.html
DOI： CNKI:11-1801/TB.20110901.0957.002
通讯作者： 张 胜，教授，研究方向：高分子阻燃，高分子加工改性 E-mail：zhangsheng@mail.buct.edu.cn

低纤维的强度；降低纤维板中脲醛树脂的贮存期，加速其性能老化甚至固化，从而影响纤维板的力学性能和寿命[15-16]。本文中制备的高密度松木纤维板(HDF)采用工业副产品废碱渣(主要组分为氢氧化铝($Al(OH)_3$))为主阻燃剂，以硼酸锌($2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$)、硼酸($H_3BO_3$)为辅阻燃剂，不仅可以变废为宝、降低成本、减少环境污染，而且该复合阻燃剂呈弱碱性，对阻燃纤维板的力学性能和使用寿命影响较小。本文中主要研究了上述复合阻燃剂对 HDF 的阻燃性能和力学性能的影响。

1 实验部分

1.1 实验材料

松木纤维：北京市木材厂有限责任公司，平均长度 0.5～1.0 mm，直径 150～18 μm，长径比 27.8～66.7，绝干密度 0.435 g/cm^3，含水率 6.0%～8.5%；脲醛树脂胶：DY101，广州原野实业有限公司，固化温度 80～105 ℃，固含量 50%；废碱渣：白色粉末，粒径 37 μm，密度 2.42 g/cm^3，99%为 $Al(OH)_3$；$2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$、$H_3BO_3$、石蜡、氯化铵、乙醇：市场自购，分析纯；钛酸酯偶联剂：LD-27，扬州立达有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 阻燃处理方法

为简化工艺和尽量保持现有生产流程，采用在常规的生产过程中施加阻燃剂的处理方法，如图 1 所示。

1.2.2 废碱渣表面改性

在三口瓶中注入含废碱渣的乙醇悬浮液(废碱渣：乙醇＝1：2，质量比)，在搅拌过程中加入钛酸酯偶联剂(废碱渣质量的 1%)的乙醇溶液(偶联剂：水：乙醇＝20：8：72，质量比)在室温下搅拌30 min 左右，抽滤，产物在 120 ℃下干燥 4 h 后即可。

1.2.3 高密度松木纤维板(HDF)的制备

将干燥后的松木纤维置入喷雾式搅拌机(自制，主要由空气压缩机、喷枪和搅拌器组成)中，依次喷入阻燃剂、胶黏剂和防水剂，边喷入边搅拌。其中将阻燃剂配置成乙醇的悬浮溶液(质量比为 1：2)，以乙醇为介质，便于阻燃剂与纤维混合均匀；然后将固化剂逐滴滴入胶黏剂中，搅拌均匀后再喷胶。接着将上述纤维放入干燥箱中干燥至要求的含水率后在自制成型框内手工铺装板坯，采用厚度规控制纤维板厚度，在平板硫化机(QLB－D，铁岭化工机械厂)上先预压，后热压，成型后取出冷却即可。

纤维板的预期密度为 0.8 g/cm^3；幅面尺寸为 320 mm×320 mm×10 mm；预压压力为 2.0 MPa；热压压力为 4.0 MPa，热压温度为 120～130 ℃，热压速率为 45 mm/s；板坯含水率为 8%～12%；施胶量质量分数为 15%，固化剂(质量分数为 20%的氯化铵溶液)质量分数为 1%，石蜡乳液质量分数为 1%。

1.3 表征与测试

采用傅里叶红外光谱仪(Z10，美国 Nicolet 公司)对偶联剂改性前后废碱渣的红外光谱与普通纤维板和阻燃纤维板的红外光谱进行了分析，采用溴化钾压片法制备样品。纤维板在测试之前需先将样品研磨成木粉之后方可压片。

采用微机控制木材万能试验机(MWD－50，济南试金集团有限公司)按照国标 GB/T 11718－2009[17]测试纤维板的密度、静曲强度、内结合强度、弹性模量、吸水厚度膨胀率、含水率等；并采用甲醛测试仪(JC－3，徐州锦程环保科技有限公司)对纤维板的甲醛释放量进行测试。

分别采用南京市江宁县分析仪器厂的氧指数分析仪(CZF－3)和水平垂直燃烧分析仪(JF－3)测试纤维板的阻燃性能。参考塑料氧指数检测标准 GB/T 2406－1993[18]和垂直燃烧检测标准 GB/

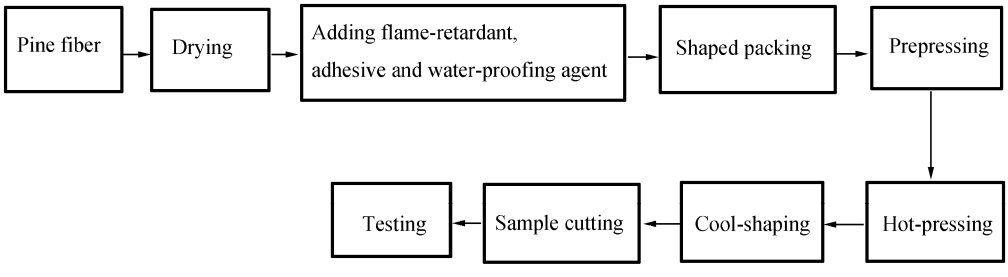


图 1 高密度松木纤维板(HDF)的制备工艺流程图

Fig. 1 Preparation flow diagram of high density pine fiberboard (HDF)

T 2408－1996[19]。

采用北京恒久科学仪器厂的 HCT－1 型 TG－DTA 联合仪对试样进行热重分析和差示热分析试验。试验条件为：静态空气氛下，升温速率为 10 ℃/min，温度范围为室温～700 ℃，试样用量 5～6 mg。

采用 SEM(S－4700，日本 Hitachi 公司)观察试样燃烧后的炭层形貌。样品表面镀炭处理。

2　结果与分析

2.1　红外光谱分析

图 2 为偶联剂改性前后废碱渣 $Al(OH)_3$ 的红外光谱图。比较可以发现，改性后的 $Al(OH)_3$ 分别在 2970～2840 cm^{-1} 处出现了新的吸收峰，为甲基和亚甲基中 C—H 的伸缩振动吸收峰；同时在 1510 cm^{-1} 及 1455 cm^{-1}(发生了红移)处也出现了新的吸收峰，为甲基、亚甲基中 C—H 的弯曲振动吸收峰，表明钛酸酯偶联剂与 $Al(OH)_3$ 表面发生吸附键合，形成了化学键，从而降低了 $Al(OH)_3$ 表面的极性，提高了 $Al(OH)_3$ 与纤维之间的界面相容性[20-21]。

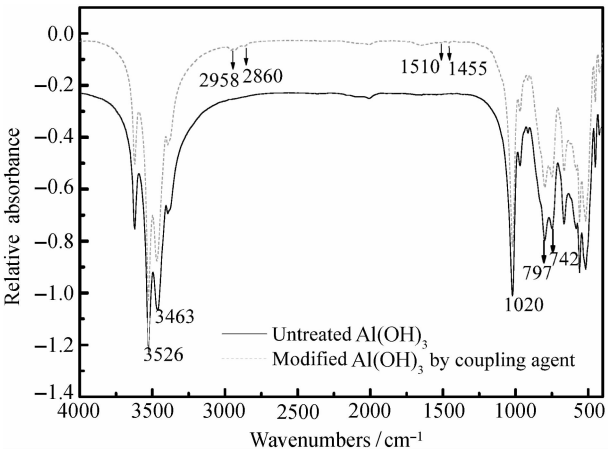


图 2　偶联剂改性前后废碱渣 $Al(OH)_3$ 的红外光谱图

Fig. 2　FTIR spectra of untreated $Al(OH)_3$ and modified $Al(OH)_3$ by coupling agent

图 3 为普通纤维板和阻燃纤维板($Al(OH)_3$ 质量分数为 30%)的红外光谱比较图。在普通纤维板的红外光谱图中出现的主要特征峰中 3670～3200 cm^{-1} 处为 O—H 的伸缩振动吸收峰；2970～2840 cm^{-1} 处为脂肪族中 C—H 的伸缩振动吸收峰；1653 cm^{-1} 处为脲醛树脂中 C═O 的伸缩振动吸收峰；1051 cm^{-1} 处为纤维素中 C—OH 的伸缩振动峰[22]。而在阻燃纤维板的红外光谱曲线上，分别

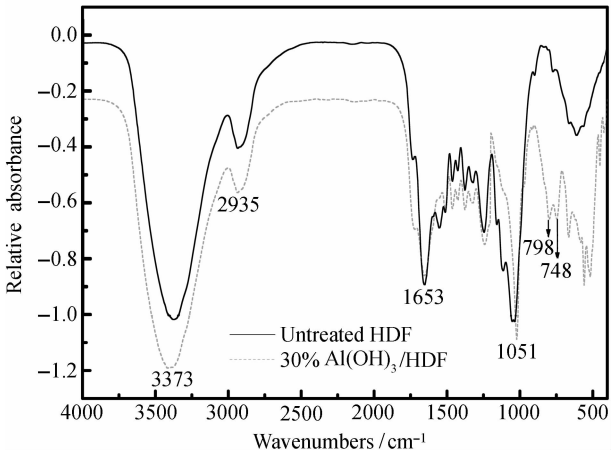


图 3　普通纤维板和阻燃纤维板($Al(OH)_3$ 质量分数为 30%)的红外光谱图

Fig. 3　FTIR spectra of untreated HDF and HDF treated with a mass fraction of 30% $Al(OH)_3$

在 798 cm^{-1}、748 cm^{-1} 处出现了新的双峰为 Al—O—Al 的特征峰，这与 $Al(OH)_3$ 红外光谱曲线中的双峰位置一致，然而普通纤维板的特征峰的位置并未发生明显变化，表明阻燃剂 $Al(OH)_3$ 与纤维素之间的界面主要以物理结合为主。但是 $Al(OH)_3$ 表面已经过有机化处理，降低了其表面极性，使其与纤维素之间的界面性能得到了改善，减少了因阻燃剂的加入对阻燃纤维板物理及力学性能产生的不利影响。

2.2　物理及力学性能

表 1 列出了四种该密度松木纤维板(HDF)试样的物理及力学性能，其中包括了密度、静曲强度、弹性模量、内结合强度和吸水厚度膨胀率等。可以看出，阻燃剂的添加会降低 HDF 的静曲强度、弹性模量和内结合强度，但是各项物理性能指标仍然可以达到甚至超过国家一等品的要求(室内型中/高密度纤维板公差厚度范围为 9～12 mm 的物理性能指标为：静曲强度 22 MPa；弹性模量2500 MPa；内结合强度优等品 0.6 MPa，一等品0.55 MPa，合格品0.50 MPa；吸水厚度膨胀率4%～13%)。力学性能的降低、吸水厚度膨胀率的增加是由于阻燃剂颗粒吸附在纤维表面或镶嵌在胶粘剂内部，降低了胶黏剂与纤维之间的粘合力及纤维与纤维之间的键合力，从而降低了脲醛胶的胶合性和防水性。

根据 GB 18580－2001[23]的规定可直接应用于室内的中/高密度纤维板的甲醛释放量≤9 mg/100 g，经过饰面处理后可用于室内的释放值≤30 mg/100 g。从表 1 可知，四种 HDF 样品的甲醛释放量均

表 1 高密度松木纤维板(HDF)试样的物理及力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of high density pine fiberboard (HDF) samples

Term	Untreated HDF	25%$Al(OH)_3$/HDF	30%$Al(OH)_3$/HDF	25% $Al(OH)_3$ - 5%2ZnO · $3B_2O_3$ · $3.5H_2O$ - H_3BO_3/HDF
Density/(g · cm^{-3})	0.82	0.86	0.89	0.88
Static bending strength/MPa	30.98	26.42	24.24	24.53
Elastic modulus/GPa	3750	3109	2997	3014
Internal bonding strength/MPa	0.78	0.65	0.57	0.55
Thickness swelling rate of water/%	9.81	10.20	11.51	11.75
Moisture content/%	4.2	5.3	5.8	6.4
Formaldehyde emission/(mg · (100 g)$^{-1}$)	7.6	8.1	8.6	7.9

小于 9 mg/100 g，满足国家标准中环保级 E1 级产品的要求。阻燃纤维板的甲醛释放量要稍高于普通纤维板，这是因为阻燃剂呈弱碱性，使脲醛树脂胶固化过程延长，从而使甲醛释放量有所提高。

2.3 阻燃性能

表 2 列出了四种 HDF 试样的阻燃性能，包括氧指数、垂直燃烧等级和熔滴情况。材料的氧指数(LOI)表示材料燃烧的难易程度。LOI 越高表示材料越不易燃烧，阻燃性能越好。根据日本 JID1202—77 规定[24]，LOI≥31%为难燃一级；31%＞LOI≥28%为难燃二级；28%＞LOI≥25%为难燃三级。由表 2 可知，普通纤维板的 LOI 为 27.2%，应属难燃三级材料，但是在垂直燃烧测试过程中，其燃烧时间较长，直至样品完全损毁，仍达不到 UL - 94 等级。当添加 25%(质量分数，下同)的 $Al(OH)_3$ 作为纤维板的阻燃剂时，LOI 稍有提高，为 30.0%，为难燃二级材料，垂直燃烧速率减缓，但燃烧时间延长至完全烧毁，也达不到 UL - 94 等级。当 $Al(OH)_3$ 含量提高至 30%时，阻燃纤维板的 LOI 达到 33.2%，为难燃一级材料，此时样品在垂直燃烧测试中离火自熄，几乎无损毁，为 UL - 94 V - 0 级；此时将部分的 $Al(OH)_3$ 用 2ZnO · $3B_2O_3$ · $3.5H_2O$ - H_3BO_3 取代，其垂直燃烧等级保持不变，而 LOI 达到 36.4%，为难燃一级材料，较试样 30% $Al(OH)_3$/HDF 的 LOI 提高了 9%，表明 $Al(OH)_3$ 与 2ZnO · $3B_2O_3$ · $3.5H_2O$ - H_3BO_3 在纤维板中具有较好的阻燃协同性。这是因为 2ZnO · $3B_2O_3$ · $3.5H_2O$ - H_3BO_3 能促进成炭，提高纤维板的残炭量，在纤维板表面形成更厚、更致密的隔热隔氧层，从而提高了其阻燃性能。

图 4 为四种 HDF 试样的 TG - DTA 曲线图，具体的残炭量和放热量数值列于表 2 中。表 3 分析了普通纤维板和阻燃纤维板的热降解过程。从图 4 的 TG 曲线中得知，HDF 的热降解主要分为以下三个阶段：(1) 25～200 ℃为 HDF 中纤维吸附水和结晶水的失去。(2) 200～360 ℃为 HDF 中半纤维素、纤维素、木质素等的降解；同时 $Al(OH)_3$、2ZnO · $3B_2O_3$ · $3.5H_2O$ 开始分解，吸收热量并释放水蒸气稀释可燃气体，初步形成不可燃炭层，阻隔氧气、热量及可燃气体的交换。(3) 360～600 ℃

表 2 HDF 试样的阻燃性能

Table 2 Fame retardancy of HDF samples

Sample name	Char residue/%	Total heat release/(kJ · g^{-1})	LOI/%	UL - 94
Untreated HDF	0.7	7.98	27.2	No rating
25% $Al(OH)_3$/HDF	8.7	6.95	30.0	No rating
30% $Al(OH)_3$/HDF	14.5	6.51	33.2	V-0
25%$Al(OH)_3$ - 5%2ZnO · $3B_2O_3$ · $3.5H_2O$ - H_3BO_3/HDF	22.2	5.43	36.4	V-0

表 3　普通纤维板和阻燃纤维板的热降解分析

Table 3　Thermal degradation analysis of untreated HDF and flame-retardant HDF

Sample name	Temperature/℃	Thermal degradation analysis
Untreated HDF	25～200	Lose of absorbed water and crystal water
	130～360	Decomposition of hemicellulose, cellulose and lignin in HDF
	360～600	Continuous decomposition of combustion residue
Flame-retardant HDF	25～180	Lose of absorbed water and crystal water
	180～350	Decomposition of hemicellulose, cellulose and lignin in HDF; initial decomposition of $Al(OH)_3$ and $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$; fibers start to form charred cover
	350～600	Further decomposition of $Al(OH)_3$ and $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$; the charred cover grows thicker

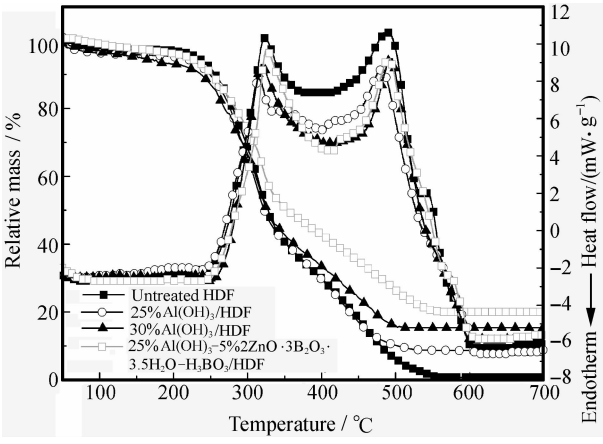


图 4　HDF 试样的 TG-DTA 曲线图

Fig4.　TG-DTA curves of HDF samples

阻燃剂进一步分解，促进纤维炭化并进一步形成阻隔层，使 HDF 表面的覆盖层变得更加厚实，从而保护了纤维板内部纤维的降解[25-26]。在第二阶段，$Al(OH)_3$ 率先开始分解（初始分解温度为 190～230 ℃），$2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$ 稍后分解（分解温度在 300℃左右），两者的分解化学方程式如下：

$$2Al(OH)_3 \xrightarrow[210\sim350\ ℃]{Air} Al_2O_3 \cdot 0.5H_2O + 2.5H_2O (28.82\%)$$

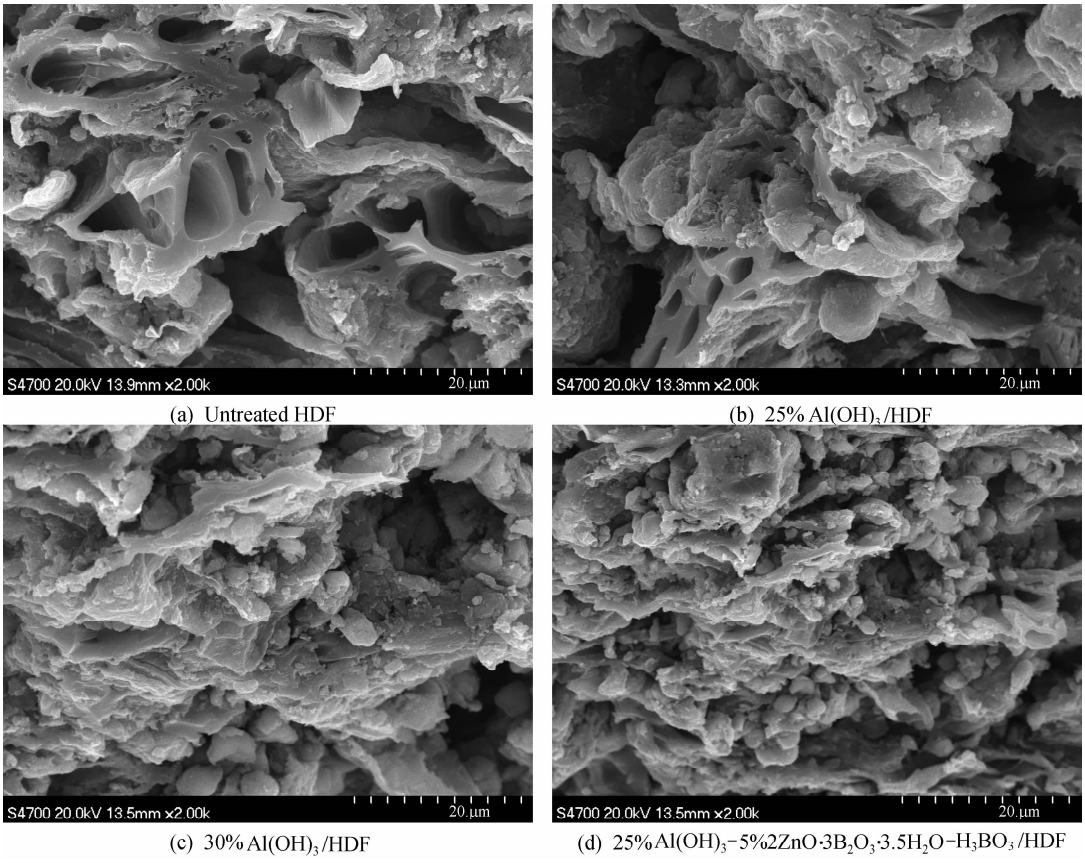
$$Al2O_3 \cdot 0.5H_2O \xrightarrow[350\sim600\ ℃]{Air} Al_2O_3 + 0.5H_2O\uparrow (5.77\%)$$

$$2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O \xrightarrow[above\ 300\ ℃]{Air} 2ZnO + 3B_2O_3 + 5H_2O$$

由上式可以看出，两者皆在高温下脱去结晶水，同时吸收大量的热量（$Al(OH)_3$ 可以到达 1.9 kJ/mol），一方面形成具有覆盖和稀释作用的水蒸气覆盖层，另一方面在纤维板表面生成厚实的氧化铝和玻璃状涂层，以隔绝氧气、热量及可燃气体的传递，从而起到阻燃作用。由表 2 得知，试样 25% $Al(OH)_3$ - 5%$2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$ - H_3BO_3/HDF 的残炭量要明显高于试样 25% $Al(OH)_3$/HDF 和 30% $Al(OH)_3$/HDF，达到 22.%。这是由于 $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$ 分解产生的 H_3BO_3 具有促进纤维成炭的作用，两者之间具有良好的阻燃协效性[27-28]。此外，从图 4 中的 DTA 曲线图中可以发现，$Al(OH)_3$ 含量越高，HDF 的放热量越低，而试样 25% $Al(OH)_3$ - 5%$2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$ - H_3BO_3/HDF 的放热量最低，只有 5.43 kJ·g^{-1}，与普通纤维板相比降低了 32%，这是因为增加的炭层覆盖在材料表面，阻隔了氧气和可燃性气体的接触，减缓了燃烧热量的传递，从而抑制了燃烧反应速率，降低了燃烧释放热的总量，从而使反馈到燃烧火焰区的热量减少，使燃烧速率进一步降低，如此循环，从而使 HDF 的阻燃性能得到明显改善。

2.4　残炭分析

图 5 为四种 HDF 试样燃烧后残炭的 SEM 图。其中图 5(a)为普通纤维板的燃烧残余炭层，可以看出，残余物上有许多孔洞，而氧气和热量可以沿着这些空洞进入到 HDF 内层，使燃烧继续进行，直到 HDF 完全燃烧，从而导致普通纤维板的阻燃性能非常差。图 5(b)～5(d)中的孔洞逐渐减少至完全消失，这是因为 $Al(OH)_3$ 和 $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$- H_3BO_3 的分解产物覆盖在 HDF 表面形成了致密、厚实的阻隔层，可以阻止 HDF 内层的纤维与氧气的接触，同时隔绝可燃气体和热量的传递，保护 HDF 内部纤维的降解，从而提高 HDF 的阻燃性能。进一步证实 $Al(OH)_3$ 和 $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O$ - H_3BO_3 在 HDF 中具有较好的阻燃协效性。



(a) Untreated HDF (b) 25% $Al(OH)_3$/HDF

(c) 30% $Al(OH)_3$/HDF (d) 25% $Al(OH)_3$-5%$2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O-H_3BO_3$/HDF

图 5 HDF 试样燃烧后残炭的 SEM 照片

Fig. 5 SEM photos of HDF char after combustion

3 结 论

(1) 阻燃剂的加入会降低高密度松木纤维板(HDF)的力学性能、增大吸水厚度膨胀率，但仍能达到甚至超过国家一等品的要求，试样 30% $Al(OH)_3$/HDF 和 25% $Al(OH)_3$ - 5% $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O - H_3BO_3$/HDF 均合格。

(2) HDF 中 $Al(OH)_3$ 的质量分数提高到 30% 时其垂直燃烧可以达到 V - 0 级别，氧指数达到 33.2%，而当用 $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O - H_3BO_3$ 取代部分 $Al(OH)_3$ 时，HDF 的阻燃性能进一步提高，氧指数达到 36.4%。

(3) 在 HDF 中，$Al(OH)_3$ 和 $2ZnO \cdot 3B_2O_3 \cdot 3.5H_2O - H_3BO_3$ 之间具有良好的阻燃协效性，可以提高 HDF 的成炭量，降低其放热量，并形成致密厚实的具有隔热隔氧作用的阻隔层。

参考文献：

[1] 肖小兵. 我国纤维板生产发展现状与分析 [J]. 林产工业，2009，36(1)：8-9.
Xiao Xiaobing. Situation and circumstances of China's MDF production [J]. China Forest Products Industry，2009，36(1)：8-9.

[2] 刘迎涛，李 坚，杨文斌，等. 阻燃中密度纤维板的研究现状和发展趋势 [J]. 东北林业大学学报，2002，30(6)：73-77.
Liu Yingtao，Li Jian，Yang Wenbin，et al. The status and development tendency of fire - retardant medium density fiberboard (MDF) [J]. Journal of Northeast Forestry University，2002，30(6)：73-77.

[3] 许方荣. 我国中密度纤维板生产现状、发展趋势和应用前景 [J]. 林产工业，2010，37(4)：3-5.
Xu Fangrong. Production state，development tendency and application prospect of MDF in China [J]. China Forest Products Industry，2010，37(4)：3-5.

[4] 中国林学会木材工业分会秘书处. 2009 我国人造板产量 [J]. 中国人造板，2010(7)：37.
Chinese Society of Wood Industry Secretariat. 2009 production of wood-based panels in China [J]. China Wood-based Panels，2010(7)：37.

[5] 徐 峰，史铁钧，张克宏，等. SiO_2/杉木粉复合材料的制备和表征 [J]. 复合材料学报，2007，24(3)：84-88.
Xu Feng，Shi Tiejun，Zhang Kehong，et al. Preparation and characterization of SiO_2/wood hybrid materials [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2007，24(3)：84-88.

[6] 符韵林，赵广杰，全寿京. 二氧化硅/木材复合材料的微观结

构与物理性能 [J]. 复合材料学报，2006，23(4)：52-59.
Fu Yunlin，Zhao Guangjie，Chun Sukyoung. Microstructure and physical properties of silicon dioxide/wood composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2006，23(4)：52-59.

[7] 陈志林，王　群，左铁镛，等. 无机质复合木材的复合工艺与性能 [J]. 复合材料学报，2003，20(4)：128-132.
Chen Zhilin，Wang Qun，Zuo Tieyong，et al. Techniques and properties of the wood inorganic composite [J]. Acta Materiae Compositae Sinica，2003，20(4)：128-132.

[8] 谷天硕，陈志林，曾　灵. 抑烟性阻燃中密度纤维板 [J]. 灭火剂与阻燃材料，2010，29(6)：516-518.
Gu Tianshuo，Chen Zhilin，Zeng Ling. Fire-retardant and smoke suppressed MDF [J]. Fire Science and Technology，2010，29(6)：516-518.

[9] 张　建，李光沛. 环保阻燃中密度纤维板的研制 [J]. 中国人造板，2006(6)：26-28，31-33.
Zhang Jian，Li Guangpei. Research on manufacturing environmentally friendly and fire-retardant medium-density fiberboard [J]. China Wood-based Panels，2006(6)：26-28，31-33.

[10] 纪　磊，陈志林，傅　峰. 磷酸三聚氰胺阻燃中密度纤维板燃烧性能 [J]. 消防科学与技术，2010，29(4)：279-281.
Ji Lei，Chen Zhilin，Fu Feng. A preliminary study of the fire retardant of melamine phosphate to medium density board [J]. Fire Science and Technology，2010，29(4)：279-281.

[11] Ayrilmis N，Kartal S N，Laufenberg T，et al. Physical and mechanical properties and fire，decay，and termite resistance of treated oriented strandboard [J]. Forest Products Journal，2005，55(5)：74-81.

[12] Ayrilmis N. Effect of fire retardants on internal bond strength and bond durability of structural fiberboard [J]. Building and Environment，2007，42(3)：1200-1206.

[13] 曾　灵，黄庆平，毛四发，等. 阻燃纤维板的生产技术 [J]. 中国人造板，2009(10)：11-15.
Zeng Ling，Huang Qingping，Mao Sifa，et al. Production technology of fire retardant fiberboard [J]. China Wood-based Panels，2009(10)：11-15.

[14] Lee B H，Kim H S，Kim S，et al. Evaluating the flammability of wood-based panels and gypsum particle board using a cone calorimeter [J]. Construction and Building Materials，2011，25(7)：3044-3050.

[15] 崔会旺，杜官本. 木材阻燃研究进展 [J]. 世界林业研究，2008，21(3)：43-48.
Cui Huiwang，Du Guanben. Advances on wood fire-retardance [J]. World Forestry Research，2008，21(3)：43-48.

[16] Hashima R，Sulaimana O，Kumara R N，et al. Physical and mechanical properties of flame retardant urea formaldehyde medium density fiberboard [J]. Alicjournal of Materials Processing Technology，2009，209(2)：635-640.

[17] 全国人造板标准化技术委员会. GB/T 11718—2009 中密度纤维板 [S]. 北京：中国标准出版社，2009.

[18] 国家质量技术监督局. GB/T 2406—1993 塑料燃烧性能试验方法：氧指数法 [S]. 北京：中国标准出版社，1993.

[19] 国家质量技术监督局. GB/T 2408—1996 塑料燃烧性能试验方法：水平法和垂直法 [S]. 北京：中国标准出版社，1996.

[20] Wang D G，Guo F，Chen J F，et al. A two-step way to synthesize nano inner-modified aluminum trihydroxide [J]. Colloids and Surfaces A，2007，293(1-3)：201-209.

[21] 张　新，贾立香，彭小弟，等. 氢氧化铝改性对 $Al(OH)_3$/LLDPE 复合物性能影响的研究 [J]. 电线电缆，2010(4)：32-35.
Zhang Xin，Jia Lixiang，Peng Xiaodi，et al. Affect of surface modification of $Al(OH)_3$ powder on the properties of the complex $Al(OH)_3$/LLDPE [J]. Electric Wire and Cable，2010(4)：32-35.

[22] 刘迎涛，李　坚，王清文，等. FRW 阻燃中密度纤维板的 FTIR 分析 [J]. 东北林业大学学报，2003，31(5)：40-41.
Liu Yingtao，Li Jian，Wang Qingwen，et al. FTIR analysis on FRW fire-retardant medium density fiberboard(MDF) [J]. Journal of Northeast Forestry University，2003，31(5)：40-41.

[23] 全国人造板标准化技术委员会. GB 18580—2001 室内装饰装修材料人造板及其制品中甲醛释放限量 [S]. 北京：中国标准出版社，2001.

[24] 张　建. 环保阻燃中密度纤维板的工艺技术研究 [D]. 北京：北京林业大学，2005.
Zhang Jian. Study on technology of flame-retarded medium-density fiberboard with environmental concern [D]. Beijing：Beijing Forestry University，2005.

[25] 刘迎涛，李　坚，王清文. FRW 阻燃中密度纤维板的性能及其制板工艺 [J]. 东北林业大学学报，2006，34(5)：61-62.
Liu Yingtao，Li Jian，Wang Qingwen. Properties and pressing variables of medium density fiberboard (MDF) with FRW fire retardant [J]. Journal of Northeast Forestry University，2006，34(5)：61-62.

[26] 张　建，李光沛，汪奎宏，等. 阻燃中密度纤维板阻燃特性的研究 [J]. 浙江林业科技，2008，28(3)：34-38.
Zhang Jian，Li Guangpei，Wang Kuihong，et al. Study on retardant property of fire-retardant medium density fiberboard [J]. Journal of Zhengjiang Foresty Science and Technology，2008，28(3)：34-38.

[27] 宋　超，苏俊杰. $Mg(OH)_2$、$Al(OH)_3$ 的阻燃机理与性能研究 [J]. 中国新科技新产品，2010(17)：1.
Song Chao，Su Junjie. Flame-retardant mechanism and properties research of $Mg(OH)_2$ and $Al(OH)_3$[J]. China New Technologies and Products，2010(17)：1.

[28] 黄中柏，叶旭初，张林进. 无机阻燃剂硼酸锌及其协同效应 [J]. 材料导报，2008，22 (Ⅺ)：372-374.
Huang Zhongbai，Ye Xuchu，Zhang Linjin. Inorganic flame retardant of zin borate and its synergistic effect [J]. Materials Review，2008，22 (Ⅺ)：372-374.