

麦秸石膏复合材料力学性能和防火性能研究

岳 孔^{1,2}, 李萌禹¹, 刘 健¹, 王 璐¹, 刘伟庆¹, 陆伟东¹

(1. 南京工业大学土木工程学院, 南京 211800; 2. 聚合物分子工程国家重点实验室(复旦大学), 上海 200433)

摘 要: 为提高麦秸利用率, 增强石膏板力学性能, 改善现有木基石膏板的防火性能, 试验以粒径分别为 0.30~0.60 和 0.18~0.30 mm 的粗、细 2 种麦秸纤维为增强相, 以建筑石膏为连续相, 采用复合常温固化型结构胶粘剂代替添加石膏缓凝剂的传统方式, 提出了麦秸石膏复合材料初步成型和加湿增强的两步法制备工艺, 并与杉木纤维和杉木刨花石膏复合材料的力学性能和防火性能进行对比。结果表明, 细麦秸纤维石膏复合材料的物理力学性能优于粗麦秸纤维石膏复合材料, 其内结合强度、静曲强度、弹性模量和吸水厚度膨胀率分别为 0.33 MPa、7.1 MPa、2370 MPa 和 2.82%, 满足《LY/T 1598-2011 石膏刨花板》标准的要求。由于麦秸本身具有较低的导热系数和较高的灰分含量, 麦秸石膏复合材料具有较杉木石膏复合材料更优的防火性能, 其点燃时间较杉木纤维石膏复合材料高, 无明显热释放速率峰值。与杉木纤维石膏材料和杉木刨花石膏材料相比, 细麦秸纤维石膏复合材料的总热释放量分别低 48.18%和 35.87%, CO₂ 生成速率主峰分别低 42.25%和 38.81%, CO 生成速率主峰相近, 残重率略高。试件残照表明麦秸石膏复合材料试件燃烧后外观形貌更完整, 炭化程度减轻。通过扫描电镜发现, 麦秸纤维的外表面较光滑, 石膏主要吸附在麦秸的内表面, 较小纤维单元有利于增加石膏与麦秸内表面的接触面积。因此, 从微观上说明了细麦秸纤维石膏复合材料的力学性能较高的原因。麦秸秆光滑的外表面几乎充满 SiO₂, 这也说明了麦秸石膏复合材料有较好防火性能的原因。研究可为石膏基复合材料的功能提升和麦秸石膏复合材料产品的工程应用提供参考。

关键词: 复合材料; 物理性能; 力学性能; 麦秸; 杉木; 制备工艺; 防火性能

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.037

中图分类号: S216.2; TB332

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-18-0308-09

岳 孔, 李萌禹, 刘 健, 王 璐, 刘伟庆, 陆伟东. 麦秸石膏复合材料力学性能和防火性能研究[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 308—316. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.037 <http://www.tcsae.org>
Yue Kong, Li Mengyu, Liu Jian, Wang Lu, Liu Weiqing, Lu Weidong. Mechanical properties and fire resistance of gypsum-based composites with wheat straw[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(18): 308 — 316. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.18.037 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

中国作为农业大国, 秸秆资源丰富, 2015 年全国农作物秸秆总资源量达 9.3 亿 t, 但其利用率较低, 出现焚烧大量秸秆现象, 致使环境污染, 提高农作物秸秆利用率已成为亟需解决的问题^[1-2]。中国小麦秸秆约占秸秆总量的 19%, 小麦秸秆中纤维素、木质素和半纤维素含量分别为 30.5%、18.0%和 23.5%, 可替代传统木基板材用原材料, 是减小木材供需矛盾的重要途径^[3-4]。

因石膏板轻质、环保、节能, 在建筑领域中广泛应用^[5]。石膏板在制造过程中, 水化完成后, 形成天然存在的二水石膏是石膏板成型的核心^[6-7]。由于含有大量结晶水, 火灾时石膏板能够吸收大量热, 因此石膏板普遍被用作防火材料^[8]。以 16 mm 厚石膏板为覆面材料、以木材或轻钢为龙骨的墙体, 其耐火极限可达到 120 min^[9-10]。但是, 相比于其他结构板材, 石膏板的力学性能明显不

足, 其抗拉强度和抗压强度分别仅为 1.10 和 3.28 MPa^[11], 在加工、运输和施工过程中易发生撕裂或折断^[12-13], 因此传统石膏板仅用作不受力的室内隔墙和装饰板等材料。同时, 石膏板耐水性能较差, 不能应用于浴室和厨房等高湿环境。

石膏刨花板以熟石膏为胶凝材料、木质刨花为增强相, 外加缓凝剂压制成型, 因此兼具石膏板和普通刨花板的优点, 有一定的耐火性能和较好的力学性能^[14-15]。石膏刨花板的传统制备工艺决定了缓凝剂和增强相种类是其性能优劣的关键参数。现有研究表明, 缓凝剂能够减缓石膏的硬化速度, 为石膏与增强相的混合和板材成型争取了操作时间, 但缓凝剂破坏了石膏晶体的结构, 使其硬化后的孔径增大, 导致板材强度降低^[16]。拌和用水量也是影响石膏强度的一个重要参数, 当用水量减少时, 可降低硬化体孔径, 提高强度^[17]。除了传统的木质刨花, 增强相还可以采用竹材^[18]、洋麻杆^[19]、麦秸以及甘蔗渣^[20]等。研究表明, 以麦秸为增强相、石膏为胶凝材料, 能够制备麦秸石膏复合材料^[21-23]。但麦秸表皮被蜡层覆盖, 该层降低了麦秸与水的湿润性, 从而阻止了石膏浆体渗入到秸秆细胞壁, 降低了石膏与麦秸的胶合性能^[24], 导致其力学性能较低。

收稿日期: 2019-03-26 修订日期: 2019-08-03

基金项目: 聚合物分子工程国家重点实验室开放研究课题(K2019-22), 江苏省建筑产业现代化专项引导资金科技支撑项目(苏财建[2016]226号-12)。

作者简介: 岳 孔, 博士后, 副研究员。主要从事木结构研究。

Email: yuekong@njtech.edu.cn

大量试验表明, 当石膏刨花板中木膏比为 0.25~0.30、水膏比为 0.4 时, 板材力学性能最优^[25-28]。考虑到石膏刨花板传统制备工艺均是建立在添加缓凝剂基础上^[25-28], 但缓凝剂的添加会导致二水石膏晶体尺寸增加、孔结构劣化, 是板材强度下降的主要原因^[29]。结合不同增强相尺寸对石膏板性能有显著影响的研究发现^[30], 以及石膏基复合材料在应用中主要起到抗火作用, 但现有研究少有同时基于力学性能和降低热量、烟气释放等抗火性能的研究现状^[25-28, 31-32], 为将麦秸石膏复合材料应用于建筑结构领域。试验在最优原材料配比(木膏比为 0.30、水膏比为 0.4)的既有研究基础上, 以不同形态的麦秸纤维、石膏和室温固化型结构用三聚氰胺-脲醛树脂为原材料, 提出了免加缓凝剂的麦秸纤维石膏板两步法生产工艺, 并开展麦秸石膏复合材料物理和力学性能和燃烧性能研究, 以期对石膏基复合材料的功能提升和麦秸石膏复合材料产品的工程应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

1.1.1 试验材料

建筑石膏粉由湖北美基石膏制品有限公司提供。粗、细两种麦秸纤维, 以及杉木纤维和杉木刨花均由实验室自制。其中, 麦秸产自山东省济宁市, 为 2018 年 6 月收割, 阴凉通风处储存, 试验前烘干至含水率达 8%~12%, 其堆积密度为 27.89 kg/m³, 无发霉、变色、腐朽等可视缺陷; 杉木分别产自浙江省湖州市, 20℃和 65%相对湿度环境中平衡后, 其平均气干密度分别为 0.486 g/cm³。粗、细麦秸纤维和杉木纤维的粒径分别为 0.30~0.60、0.18~0.30 和 0.24~0.56 mm, 杉木刨花的宽度和厚度分别为 1.60~3.16 和 0.16~0.82 mm。胶黏剂为双组份三聚氰胺-脲醛树脂(melamine-urea formaldehyde, MUF), 由 Akzo Nobel Adhesives Pte. Ltd 提供, 主剂为白色粉状固体, 固化剂为黄色液体。

1.1.2 仪器与设备

BX-218 型双鼓轮刨片机(郑州荣铭机械设备有限公司); BX-216 型鼓式削片机(郑州一铭机械设备有限公司); ZSP-300 型高浓盘磨机(吉林造纸(集团)有限公司造纸机械厂); HN-50 型搅拌机(上海菲力博实业有限公司); XLB-D680 型平板硫化机(青岛信本科技有限公司); WDW-50E 型电子万能试验机(济南鑫光试验机制造有限公司); FTT0007 型锥形量热仪(Fire Testing Technology LTD, UK), Phenom Pro 型台式扫描电镜(复纳科学仪器(上海)有限公司)。

1.2 石膏基复合材料制备

预设粒径的杉木刨花先由削片机粗加工, 再由刨片机细加工得到。麦秸纤维和杉木纤维首先通过削片机加工成刨花, 再采用高浓盘磨机通过不同热磨次数加工制成, 其中, 细麦秸纤维和杉木纤维的热磨次数均为 3 次, 粗麦秸纤维的热磨次数为 2 次。

根据文献[25], 确定石膏基复合材料制备参数中水膏比为 0.4, 木膏比为 0.3。根据单层刨花板施胶量为 6%~

10%时板材性能最优的研究^[33], 本文取施胶量为 8%, 并通过换算, 取 MUF 主剂质量为干纤维或干刨花质量的 33%, 再将质量比为 5:1:9 的 MUF 主剂、MUF 固化剂和水混合形成胶液, 均匀喷洒在增强相表面, 再与石膏粉进行充分混合。在室温条件下(22℃)对搅拌后的混合料冷压, 时间为 6 h, 压力为 4 MPa, 压合全过程采用厚度规控制板材厚度, 使石膏基复合材料初步成型。在初步成型的板材表面喷水, 水分施加量由水膏比(0.4)计算得到, 喷水后对板材二次冷压, 时间不少于 8 h, 压力为 1 MPa, 以使其强度达到终强度的 80%以上, 压合全过程采用厚度规控制板材厚度; 将成型后的板材置于 45℃环境中, 直至含水率达到 2%~3%, 最后将板材在(20±2)℃、65%±5%相对湿度环境中养护 7 d。试验板材尺寸为 400 mm×400 mm×10 mm, 密度为 1.2 g/cm³。

1.3 试验方法

材料的力学性能测试根据文献[34]进行, 测试指标包括密度和 24 h 吸水厚度膨胀率(thickness swelling, TS) 2 个物理性能参数, 以及内结合强度(internal bond strength, IB)、静曲强度(modulus of rupture, MOR)和弹性模量(modulus of elasticity, MOE)共计 3 个力学性能参数, 力学性能指标重复试件数量均为 8 个, 测试结果取平均值。麦秸和杉木的灰分含量测试根据文献[35]进行, 重复试件数量为 5 个, 测试结果取平均值。

燃烧性能测试根据文献[36]进行, 测试指标包括点燃时间、热释放速率、总热释放量、CO₂ 和 CO 生成速率、烟生成速率和残重率, 垂直热辐射强度设定为 50 kW/m², 利用电弧点燃, 数据采集频率为 1 次/5s。燃烧性能测试的重复试件数量为 2 个, 测试结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 物理力学性能

经测试, 麦秸和杉木的灰分质量分数分别为 5.33%和 0.74%。经刨片和热磨后得到的不同粒径的麦秸纤维以及杉木纤维和杉木刨花, 其形态见图 1。

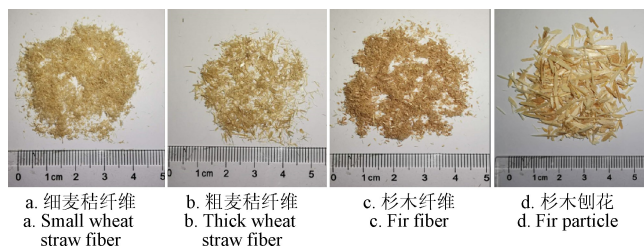


图 1 石膏基复合材料增强相形态

Fig.1 Morphology of reinforcements for gypsum-based composites

由于麦秸表层含有蜡质成分和二氧化硅, 硬度较木材高, 因此在相同热磨条件下, 得到的木材纤维粒径较麦秸更小、且更加均匀。经测量, 细麦秸纤维的粒径在 0.18~0.30 mm 范围内, 杉木纤维粒径在 0.12~0.20 mm 范围内, 粗麦秸纤维的粒径在 0.30~0.60 mm 范围内, 杉木刨花的粒径在 0.60~2.00 mm 范围内。

采用不同粒径的麦秸纤维、杉木纤维和杉木刨花等增强相所制备的石膏基复合材料见图 2。

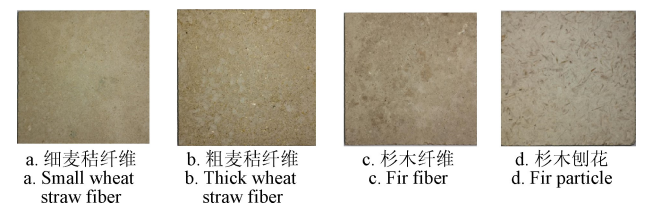


图 2 不同增强相的石膏基复合材料

Fig.2 Gypsum-based composites with different reinforcements

由图 2 可知, 由于纤维粒径远小于刨花, 因此, 不同增强相石膏复合材料表面的粗糙度明显不同, 其中, 增强相采用细麦秸纤维和杉木纤维的石膏基复合材料, 其表面平整度和光洁度更高 (见图 2a 和 2c), 增强相为粗麦秸纤维的次之 (见图 2b), 杉木刨花的平整度最低 (见图 2d)。

增强相种类和形态对石膏基复合材料力学性能影响的对比结果见表 1。

表 1 不同增强相石膏基复合材料力学性能

Table 1 Mechanical properties of gypsum-based composites with different reinforcements

文献 Literatures	增强相 种类 Reinforcement types	内结合 强度 Internal bond strength/ MPa	静曲强度 Modulus of rupture/ MPa	弹性模量 Modulus of elasticity/ MPa	密度 Density/ (g·cm ⁻³)	吸水厚度 膨胀率 Thickness swelling/ %
本试验	粗麦秸纤维	0.11	3.3	1 070	1.07	3.42
	细麦秸纤维	0.33	7.1	2 370	1.22	2.82
	杉木纤维	0.45	8.8	2 770	1.35	1.38
	杉木刨花	1.28	16.5	7 350	1.25	1.23
文献 ^[20]	麦秸碎料	0.18	5.07	2 481	1.20	1.10
文献 ^[21]	麦秸碎料	0.20	6.0	1 310	1.13	—
文献 ^[22]	麦秸碎料	0.02~0.16	0.7~1.7	377~1 800	—	—
文献 ^[23]	麦秸碎料	0.12~0.30	4.2~6.6	1 876~2 364	1.28~1.30	—

由于两相间黏结性能对石膏基复合材料力学性能有显著影响^[14], 采用 MUF 代替缓凝剂, 在起到增强石膏与增强相之间的黏结作用的同时, 还避免了传统制备工艺中添加缓凝剂导致石膏晶体孔径劣化的影响。提出的石膏基复合材料初步成型和加湿养护两步法生产工艺, 第一阶段借助胶黏剂的黏结作用使材料有一定的初强度, 满足板材运输等基本操作要求; 第二阶段通过添加水分, 使得复合材料的强度进一步提高, 直至达到终强度。该工艺分成两步依次进行, 解决了石膏水化对水分的需要和过多水分稀释胶黏剂浓度、降低两相黏结效果的矛盾。

因此, 采用该工艺的石膏基复合材料具有较优的物理力学性能 (见表 1)。细麦秸纤维石膏复合材料的物理力学性能满足《LY/T 1598-2011 石膏刨花板》标准^[37]的要求。同时, 其内结合强度、静曲强度、弹性模量分别较文献^[21]高 65.00%、18.33%和 80.92%, 较文献^[22]最优工艺下对应指标高 106.25%、255.00%和 31.67%。文献

[20]所采用的麦秸与石膏质量比为 0.308, 与本研究的料膏比 0.3 接近, 对比发现, 细麦秸纤维石膏复合材料的弹性模量较文献^[20]低 4.47%, 但内结合强度和静曲强度分别高 83.33%和 40.04%。

根据表 1, 细麦秸纤维石膏复合材料的各项力学性能均是粗麦秸纤维石膏复合材料的 2 倍以上, 杉木纤维石膏复合材料的力学性能仅略大于细麦秸纤维石膏复合材料, 杉木刨花石膏复合材料的力学性能均远高于其他 3 组材料。由此看出, 增强相的形态和种类均是影响复合材料力学性能的参数。

相同工艺条件下, 细麦秸纤维石膏复合材料的内结合强度、静曲强度、弹性模量和密度分别比粗麦秸纤维石膏复合材料高 200.00%、115.15%、121.50%和 14.02%, 吸水厚度膨胀率低 17.54%。主要原因是当纤维尺寸越大, 与石膏胶合后的孔隙就越大, 在加湿养护阶段, 过多的水就会更容易存在于石膏与麦秸的孔隙当中, 破坏板材初成型阶段的原有粘结, 降低石膏与麦秸之间的胶合强度, 从而使板材厚度发生部分回弹。

杉木纤维的形态与细麦秸纤维相似, 与细麦秸纤维石膏复合材料相比, 杉木纤维石膏复合材料的内结合强度、静曲强度、弹性模量和密度分别高 36.36%、23.94%、16.88%和 10.66%, 吸水厚度膨胀率低 51.06%。可以看出, 杉木纤维石膏复合材料的物理力学性能较优, 主要是因为麦秸表面由憎水的蜡层覆盖^[24], 降低了材料之间的黏结, 使板材在养护过程中产生厚度回弹。此外, 麦秸的密度小于杉木, 在相同料膏比的情况下, 麦秸有更大的比表面积, 单位面积上的石膏和胶黏剂相对较少, 从而影响了石膏与麦秸之间的粘结。除界面黏结外, 与杉木纤维相比, 麦秸纤维自身的强度较低^[38], 这也是麦秸纤维石膏复合材料力学性能低于杉木纤维材料的原因。

表 1 表明, 杉木刨花石膏复合材料的物理力学性能明显优于杉木纤维, 其内结合强度、静曲强度和弹性模量分别比杉木纤维石膏复合材料高 184.44%、87.50%和 165.34%, 密度和吸水厚度膨胀率分别低 7.41%和 10.87%。可以看出, 尽管杉木刨花石膏复合材料的密度略小, 但力学性能却更高。主要是因为, 纤维与刨花之间的形态差异较大, 当采用相同的料膏比时, 纤维的比表面积更大, 则单位面积所覆盖的石膏和胶黏剂的量相对较少, 使得其胶合性能不及杉木刨花石膏复合材料。

2.2 燃烧性能

2.2.1 点燃时间

点燃时间指从材料表面受热到稳定燃烧所用的时间, 是衡量建筑材料是否易于被点燃的重要参数^[39-40], 材料的点燃时间越短, 其越易被点燃, 火灾危险性越大^[41]。

增强相分别为粗、细麦秸纤维的石膏复合材料点燃时间, 以及与杉木纤维和杉木刨花的对比见图 3。

从图 3 可以看出, 杉木纤维石膏复合材料的点燃时间为 171 s, 杉木刨花石膏复合材料较前者推迟了 589 s, 而麦秸纤维石膏复合材料在试验测试中未被点燃, 其点燃时间超过 1 200 s, 表明材料在试验过程中没有形成稳

定燃烧,一直处于阴燃状态,这可能与材料的导热系数相关,麦秸导热系数较木材低,能够阻碍热量传递,使燃烧难以进行^[38,42]。此外,麦秸灰分质量分数为 5.33%,远高于木材中 0.74% 的灰分含量,而灰分可以有效抑制燃烧^[38,43]。因此,采用麦秸生产的复合材料可以有效延迟点燃时间,起到较好的防火作用。

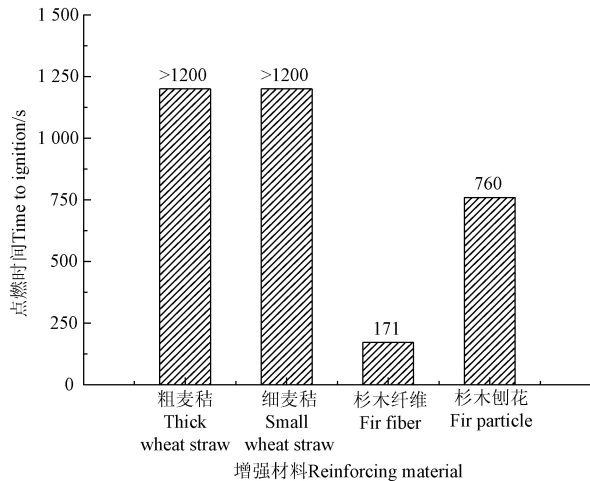


图 3 点燃时间

Fig.3 Time to ignition

2.2.2 热量释放

1) 热释放速率

热释放速率指单位面积的热量释放速率,能够表示燃烧过程中材料热解和挥发性可燃物生成的程度^[39-40]。4 组石膏基复合材料的热释放速率见图 4。

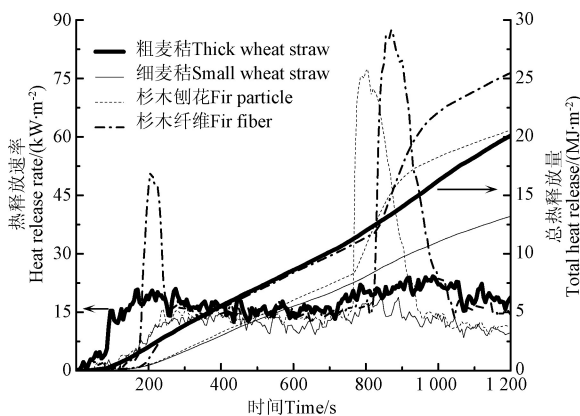


图 4 热释放速率和总热释放量曲线

Fig.4 Curves of heat release rate and total heat release with testing time

图 4 表明,以杉木纤维为增强相的石膏基复合材料有两个明显的热释放速率峰值,分别对应第一燃烧阶段和第二燃烧阶段,且第二燃烧阶段中的热释放速率峰值更高,为热释放速率主峰。杉木纤维石膏复合材料的第一个放热峰在 210 s 处出现,峰值为 51.00 kW/m²;第二个放热峰出现在 870 s,为 87.45 kW/m²。燃烧性能试验开始阶段表层材料在热辐射作用下,先受热分解析出可燃气体,并在表面点燃,形成持续燃烧,出现第一个放

热峰,但由于在第一燃烧阶段木材燃烧所形成的炭化层以及石膏成分均有一定的阻燃效果,使热量传递受阻,热释放速率迅速下降^[40]。随着表层材料的炭化龟裂和石膏脱水,内层材料逐渐接受到热量辐射,引起内部材料的热分解和燃烧,形成第二个放热峰。

杉木刨花石膏复合材料仅在第二燃烧阶段出现峰值,出现的时间点比杉木纤维石膏复合材料提前 65 s 左右,峰值约是它的 89%。麦秸纤维石膏复合材料没有形成明显的峰值,主要原因是材料一直处于阴燃状态,燃烧速度较为缓慢,抑制了热释放峰的出现。此外,细麦秸纤维石膏复合材料的热释放速率一直低于粗麦秸纤维石膏复合材料,可能是因为前者的密度比后者大,则导热系数较小,使得材料内各点温度趋于一致能力较弱^[44],从而延缓热量从受火面传递到背火面。

2) 总热释放量

总热释放量为单位面积材料燃烧释放出的总热量,数值越大,越多的热量就会释放出,从而引起更大的火灾风险^[39-40]。4 组石膏基复合材料的总热释放量见图 4。

从图 4 可以看出,杉木纤维石膏复合材料有两次总热释放量快速增长阶段,分别对应热释放速率峰值出现的时间点,第二阶段的增长期比第一阶段持续的时间更长,且增长率更大,表明第二阶段的燃烧更为剧烈。杉木刨花石膏复合材料仅在第二燃烧阶段出现总热释放量快速增长阶段,其余阶段增长率相对较缓,此结果与热释放速率的结果一致。

相比于杉木石膏复合材料,麦秸纤维石膏复合材料的总热释放量变化相对平缓,未出现快速增长时期,这也与麦秸石膏复合材料的阴燃状态有关,粗麦秸纤维石膏复合材料最终的总热释放量分别较杉木纤维石膏材料和杉木刨花石膏材料低 21.07% 和 2.33%,细麦秸纤维石膏复合材料分别低 48.18% 和 35.87%。进一步对比发现,细麦秸纤维石膏复合材料最终的总热释放量比粗麦秸纤维石膏复合材料低 45.36%,主要还是密度差异导致。

2.2.3 总烟释放

1) CO₂ 生成速率

CO₂ 生成速率指材料燃烧时生成 CO₂ 的速率^[45-46]。4 组石膏基复合材料的 CO₂ 生成速率见图 5。

对比图 4 和图 5 可以发现,二者中对应曲线趋势基本相同,说明板材燃烧时的热量释放和 CO₂ 生成是同步进行,且有相同的变化趋势。

杉木纤维石膏复合材料有两个 CO₂ 生成速率峰值,分别对应于两个燃烧阶段,而其余阶段变化相对平缓。第一个峰值在 215 s 时出现,为 0.049 g/s;第二个在 870 s 时出现,为 0.071 g/s。麦秸纤维石膏复合材料和杉木刨花石膏复合材料的 CO₂ 生成速率曲线仅在第二燃烧阶段出现峰值,各自的峰值分别是杉木纤维石膏复合材料的 56%、58% 和 96%。由此可以看出增强相采用麦秸,其复合材料燃烧过程中 CO₂ 生成速率峰值远小于杉木,粗麦秸纤维石膏复合材料的峰值分别较杉木纤维石膏复合材料和刨花复合材料低 43.66% 和 40.30%,细麦秸纤维石膏

复合材料分别较杉木纤维石膏复合材料和刨花复合材料低 42.25% 和 38.81%，这主要是归结于麦秸较好的阻燃性能。4 种复合材料燃烧性能试验的 CO_2 释放峰值点出现的时间有差异，主要是因为材料进入第二燃烧阶段的时间不同。

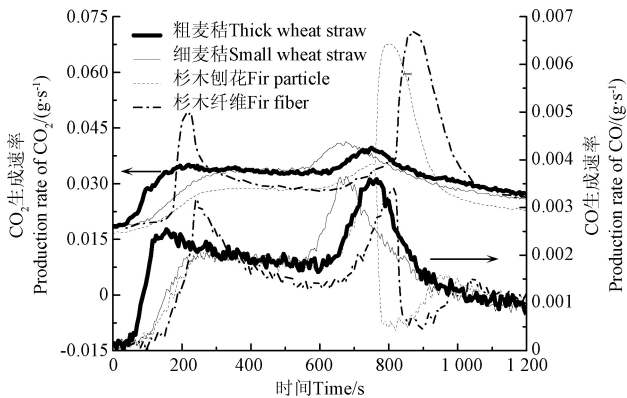


图 5 CO_2 和 CO 生成速率曲线

Fig.5 Curves of production rate of CO_2 and CO with testing time

2) CO 生成速率

CO 生成速率指材料燃烧时生成 CO 的速率^[45-46]。4 组石膏基复合材料 CO 生成速率如图 5 所示。

从图 5 可以看出，粗、细麦秸纤维石膏复合材料的变化规律基本一致，出现两个 CO 生成速率峰值，而杉木纤维和刨花石膏复合材料均出现 3 个峰值，且在 800 s 左右，曲线出现突然下降段。曲线突然下降的主要原因是，此时所对应的是第二燃烧阶段，杉木纤维和刨花石膏复合材料发生了较为剧烈的燃烧，使得大量的 C 元素反应完全，生成了较多 CO_2 （见图 5），导致 CO 生成速率迅速下降，但随着燃烧变缓，曲线出现回升，达到第 3 个峰值点，随后接近燃烧结束，曲线开始缓慢下降。然而，麦秸纤维石膏复合材料在第二燃烧阶段之后的 CO 生成速率曲线一直呈现下降趋势，主要是因为材料在此阶段燃烧不剧烈，未发生大量 C 元素被氧化成 CO_2 现象（见图 5）。

图 5 表明，杉木纤维石膏复合材料的第一个峰值最大，为 0.003 2 g/s，分别是粗、细麦秸纤维和杉木纤维石膏复合材料的 1.28 倍、1.52 倍和 1.45 倍，可以发现，细麦秸纤维和杉木纤维石膏复合材料的值比较接近，均低于另外两组。在第二燃烧阶段，4 种材料的 CO 生成速率峰值差异较小，粗麦秸纤维、细麦秸纤维、杉木纤维和杉木刨花石膏复合材料的峰值分别为 0.003 6、0.003 7、0.003 4 和 0.003 8 g/s。杉木纤维和杉木刨花石膏复合材料的第三个峰值均为 0.001 6 g/s，在此之后，4 组曲线以相同的趋势变化。因此，前期细麦秸纤维和杉木刨花石膏复合材料的 CO 生成速率较低，而后期因材料燃烧程度存在差异出现两种不同的变化形式。

3) 烟生成速率

烟生成速率指材料燃烧时生成烟的速率^[45-46]。4 组石膏基复合材料的烟生成速率如图 6 所示。

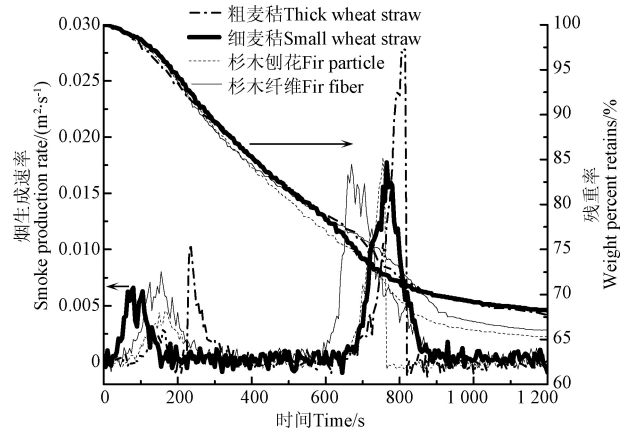


图 6 烟生成速率和残重率曲线

Fig.6 Curves of smoke production rate and weight percent retains with testing time

图 6 表明，4 组曲线有相同的变化趋势，均出现两次烟生成速率峰值，分别对应于第一和第二燃烧阶段，而其余阶段的烟生成速率较小，表明两个燃烧阶段是烟生成的主要时期。此外，第二燃烧阶段的峰值大于第一个峰值，说明第二燃烧阶段的反应更加剧烈。在第一燃烧阶段，杉木纤维石膏复合材料的峰值最大，达到 0.010 5 m^2/s ，而粗、细麦秸纤维和杉木刨花石膏复合材料分别为其的 63%、77% 和 43%，可以发现，杉木刨花石膏复合材料的峰值最小，可能是因为木材单元较大，且单位面积所覆盖的石膏较多，使得燃烧程度相对较慢，所释放的烟气相对较少。在第二燃烧阶段，仍然是杉木纤维石膏复合材料的峰值最大，为 0.028 2 m^2/s ，分别是粗、细麦秸纤维和杉木刨花石膏复合材料的 1.59 倍、1.60 倍和 1.55 倍，后三组的第二个烟生成速率峰值较为接近。

2.2.4 残重率

残重率为材料燃烧后剩余质量占燃烧前质量的比值^[45-46]。4 组石膏基复合材料的残重率见图 6。

从图 6 可以看出，对于植物纤维型可燃性增强相，4 组石膏基复合材料残重率曲线有相同的变化趋势，第一和第二燃烧阶段质量损失较快，约损失掉材料初始质量的 25%，而后期变化较为缓慢，表明两个燃烧阶段是材料损失的主要时间段。

图 6 表明，增强相种类较形态对石膏基复合材料有更显著的影响。增强相采用麦秸，所制备的石膏复合材料的最终残重率基本相同，为 68.00%，与杉木石膏复合材料残重率 65.00% 相比，高 4.62%，这主要是因为麦秸较低的导热系数和较高的灰分含量使其阻燃性能优于杉木材料。

由于材料的密度与强度间为正相关关系^[46-47]，残重率的增多表明材料在受火后还能提供相对更高的承载能力，其对应的耐火时间也相应延长，防火性能更高。

2.2.5 试件残照

防火性能试验后不同增强相的石膏基复合材料试件的外观形貌见图 7。

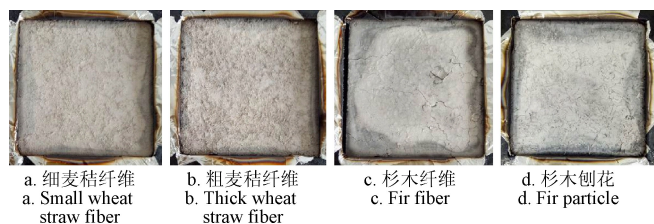


图 7 不同增强相石膏复合材料燃烧试验后外观形貌

Fig.7 Appearance of gypsum-based specimen with different reinforcements after burning tests

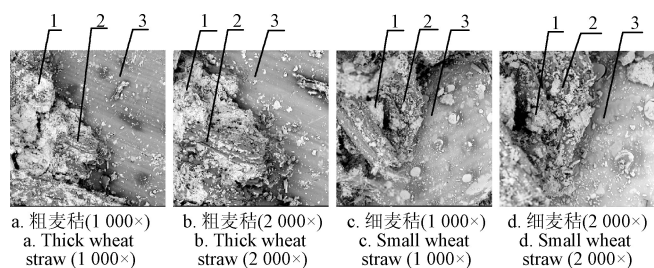
从图 7 可以看出, 4 种石膏基复合材料燃烧后的外观形貌较为接近, 并基本保持较好的完整性, 主要是因为复合材料中石膏占比较大, 而石膏具有优异的防火性能。

对比分析发现, 增强相为麦秸纤维的石膏复合材料 (见图 7a 和 7b), 其整体性保持的更加完整, 结构相对更加致密, 而增强相为杉木的石膏复合材料 (见图 7c 和 7d) 的表面出现大量微裂纹, 表层石膏有部分脱落现象, 且边缘出现较为严重的炭化痕迹, 这主要是源于麦秸相对于木材具有更高的灰分含量和更低的导热系数, 其有利于防火性能的增强, 因此以麦秸为增强相的复合材料, 其防火性能优于杉木。

火灾作用下较为致密结构有利于阻碍表层燃烧热的传递及内部分解的可燃气体与氧气接触, 因此能够有效地起到延迟燃烧的作用, 降低材料的可燃性。

2.3 微观形态

采用扫描电镜对麦秸纤维石膏复合材料的微观形貌进行观测, 结果如图 8 所示。



1.石膏 2.麦秸纤维内表面 3.麦秸纤维外表面

1.Gypsum 2.Internal surface of wheat straw fiber 3.Outside surface of wheat straw fiber

图 8 不同放大倍率和粒径下麦秸纤维石膏复合材料扫描电镜观测图

Fig.8 SEM observation of gypsum-based composites with thick and small wheat straw fiber at varied magnification

图中较暗部分为纤维, 较亮部分为石膏。从图 8 可以看出, 石膏主要附着在麦秸纤维内表面, 因麦秸纤维外表面较光滑, 石膏与麦秸黏结相对较弱, 石膏的附着量少。

当麦秸纤维粒径较小时, 增加了纤维内表面和石膏以及胶黏剂的接触面积, 从微观上说明了细麦秸纤维石膏复合材料物理力学性能高于粗麦秸的原因。麦秸秆外表面几乎充满 SiO_2 , 占麦秸灰分质量分数的 95%, 起到了较好的阻燃作用^[37,42], 这也说明了麦秸纤维石膏复合材料拥有较好阻燃性能的原因。

3 结 论

1) 提出了麦秸纤维石膏复合材料两步法生产工艺。细麦秸纤维石膏复合材料的吸收厚度膨胀率、内结合强度、静曲强度和弹性模量等物理力学指标分别达到 2.82%、0.33 MPa、7.1 MPa 和 2 370 MPa, 满足《LY/T 1598-2011 石膏刨花板》标准的要求。

2) 增强相种类和形态均对石膏复合材料力学性能有较大影响。采用细麦秸纤维石膏复合材料的内结合强度、静曲强度和弹性模量分别较粗麦秸纤维高 200.00%、115.15%、121.50%; 杉木刨花石膏复合材料内结合强度、静曲强度和弹性模量分别比杉木纤维高 184.44%、87.50% 和 165.34%。

3) 与木材相比, 麦秸导热系数较低、灰分含量较高, 因此麦秸石膏复合材料具有更好的防火性能。燃烧性能试验中麦秸石膏复合材料一直处于阴燃状态, 测试时间内材料未被点燃, 且无明显热释放速率峰, 总热释放量和 CO_2 主峰分别降低 35.87% 和 38.81%。燃烧试验后麦秸石膏复合材料较杉木石膏复合材料的整体性保持的更加完整, 结构相对更加致密。

4) 麦秸纤维形态对石膏复合材料燃烧性能有较为明显的影响。与粗麦秸纤维石膏复合材料相比, 细麦秸纤维石膏复合材料热量释放明显较小, 尤其总热释放量降低 45.36%。

5) 与内层相比, 麦秸外层富含蜡质和 SiO_2 , 石膏的附着量少。减小麦秸纤维粒径, 有助于增加内层石膏的相对附着量, 从而改善麦秸石膏复合材料的力学性能和防火性能。

[参 考 文 献]

- [1] Shi T, Liu Y, Zhang L, et al. Burning in agricultural landscapes: An emerging natural and human issue in China[J]. Landscape Ecology, 2014, 29(10): 1785—1798.
- [2] 冯伟, 张利群, 庞中伟, 等. 中国秸秆废弃焚烧与资源化利用的经济与环境分析[J]. 中国农学通报, 2011, 27(6): 350—354.
Feng Wei, Zhang Liqun, Pang Zhongwei, et al. The economic and environmental analysis of crop residues burning and reutilization in China[J]. Transactions of the Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(6): 350—354. (in Chinese with English abstract)
- [3] 郭冬生, 黄春红. 近 10 年来中国农作物秸秆资源量的时空分布与利用模式[J]. 西南农业学报, 2016, 29(4): 948—954.
Guo Dongsheng, Huang Chunhong. Spatial and temporal distribution of crop straw resources in past 10 years in china and its use pattern[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2016, 29(4): 948—954. (in Chinese with English abstract)
- [4] 王珏, 寇巍, 卞永存. 秸秆资源现状及秸秆沼气效益分析[J]. 环境保护与循环经济, 2009, 29(12): 39—41.
Wang Jue, Kou Wei, Bian Yongcun. Current status of straw resources and benefit analysis of straw biogas[J].

- Environmental Protection and Circular Economy, 2009, 29(12): 39—41. (in Chinese with English abstract)
- [5] 马丽丽, 龚先政, 高峰, 等. 纸面石膏板生产的资源消耗和环境影响分析[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(3): 120—123.
Ma Lili, Gong Xianzheng, Gao Feng, et al. Resource depletion and environmental impact analysis of plasterboard[J]. Journal of WuHan University of Technology, 2012, 34(3): 120—123. (in Chinese with English abstract)
- [6] Rivero A J, Navarro J G. Indicators to measure the management performance of end-of-life gypsum: From deconstruction to production of recycled gypsum[J]. Waste and Biomass Valorization, 2016, 7(3): 913—918.
- [7] Cardoso F A, Agopyan A K, Carbona C, et al. Squeeze flow as a tool for developing optimized gypsum plasters[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(3): 1349—1353.
- [8] Asimakopoulou E K, Kolaitis D I, Founti M A. Fire safety aspects of PCM-enhanced gypsum plasterboards: An experimental and numerical investigation[J]. Fire Safety Journal, 2015, 72: 50—58.
- [9] Dias Y, Keerthan P, Mahendran M. Fire performance of steel and plasterboard sheathed non-load bearing LSF walls[J]. Fire Safety Journal, 2019, 103: 1—18.
- [10] Dias Y, Mahendran M, Poologanathan K. Full-scale fire resistance tests of steel and plasterboard sheathed web-stiffened stud walls[J]. Thin-Walled Structures, 2019, 137: 81—93.
- [11] Petrone C, Magliulo G, Manfredi G. Mechanical properties of plasterboards: Experimental tests and statistical analysis[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2016, 28(11): 04016129.
- [12] Amer S, Hamoush S, Abu-Lebdeh T. In-plane performance of gypsum board partition wall systems subjected to cyclic loadings[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 124: 23—36.
- [13] 李元齐, 刘飞, 沈祖炎, 等. 高强超薄壁冷弯型钢低层住宅足尺模型振动台试验[J]. 建筑结构学报, 2013, 34(1): 36—43.
Li Yuanqi, Liu Fei, Shen Zuyuan, et al. Shaking table test on a full-scale model of low-rise high-strength cold-formed thin-walled steel framing buildings[J]. Journal of Building Structures, 2013, 34(1): 36—43. (in Chinese with English abstract)
- [14] 李萌禹, 岳孔, 刘健, 等. 石膏刨花板研究综述[J]. 世界林业研究, 2018, 31(1): 46—51.
Li Mengyu, Yue Kong, Liu Jian, et al. A review of gypsum particleboard research[J]. Transactions of the World Forestry Research, 2018, 31(1): 46—51. (in Chinese with English abstract)
- [15] Kojima Y, Yasue T. Synthesis of large plate-like gypsum dihydrate from waste gypsum board[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2006, 26(4): 777—783.
- [16] 彭家惠, 彭志辉, 瞿金东, 等. 缓凝剂对建筑石膏结构与强度的负面影响[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2004, 36(9): 1177—1181.
Peng Jiahui, Peng Zhihui, Qu Jindong, et al. The negative effects of retarders on structure and strength of building gypsum[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2004, 36(9): 1177—1181. (in Chinese with English abstract)
- [17] 孙婧, 元敬顺, 张会芳, 等. 纸面石膏板芯材性能的实验研究[J]. 河北建筑工程学院学报, 2012, 30(3): 17—21.
Sun Jing, Yuan Jingshun, Zhang Huifang, et al. Experimental study on property of core material of gypsum plaster board[J]. Journal of Hebei Institute of Architectural Engineering, 2012, 30(3): 17—21. (in Chinese with English abstract)
- [18] Araújo P C, Arruda L M, Menezzi C H S, et al. Lignocellulosic composites from brazilian giant bamboo (*Guadua magna*) part 1: Properties of resin bonded particleboards[J]. Maderas Ciencia Y Tecnologia, 2011, 13(1): 49—58.
- [19] Rangavar H, Payani M H. Investigation of the sound absorption properties of gypsum particleboard produced with kenaf stalks and nano clay[J]. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 2014, 29(3): 434—442.
- [20] Nazerian M, Kamyab M. Gypsum-bonded particleboard manufactured from agricultural based material[J]. Forest Science and Practice, 2013, 15(4): 325—331.
- [21] 周大勇, 张显权, 李小宇, 等. 纸面稻草(麦秸)/石膏复合板的应用性能研究[J]. 新型建筑材料, 2010, 37(1): 11—15.
Zhou Dayong, Zhang Xianquan, Li Xiaoyu, et al. Study on the application performance of rice straw(wheat straw)/gypsum composite[J]. Transactions of the New Building Materials, 2010, 37(1): 11—15. (in Chinese with English abstract)
- [22] 孙克亮, 张付花. 新型石膏麦秸复合材料的制备工艺研究[J]. 木材加工机械, 2013(3): 13—16.
Sun Keliang, Zhang Fuhua. New gypsum straw composites technology[J]. Transactions of the Wood Processing Machinery, 2013(3): 13—16. (in Chinese with English abstract)
- [23] 张显权, 韩景泉, 周大勇, 等. 麦秸预处理方式对麦秸-无机凝胶复合材的影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(2): 45—46.
Zhang Xianquan, Han Jingquan, Zhou Dayong, et al. Effects of pretreatment of wheat straw on properties of wheat-inorganic gelatin composite[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(2): 45—46. (in Chinese with English abstract)
- [24] Mantanis G, Berns J. Strawboards bonded with urea formaldehyde resins[C]// 35th International Particleboard/Composite Material Symposium, 2001, 137—144.
- [25] 宣玲, 邓玉和, 冯谦, 等. 有机硅防水剂对石膏刨花板性能的影响[J]. 林产工业, 2006, 33(2): 23—26.
Xuan Ling, Deng Yuhe, Feng Qian, et al. Effects of organosilicon waterproofing agent on the properties of gypsum particleboard[J]. Transactions of the China Forest Products Industry, 2006, 33(2): 23—26. (in Chinese with English abstract)
- [26] 宋孝金, 许若璇, 施权陆. 石膏刨花板的研制[J]. 福建林

- 学院学报, 1990, 10(3): 288—296.
- Song Xiaojin, Xu Ruoxuan, Shi Quanlu. Development of gypsum particleboard[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 1990, 10(3): 288—296. (in Chinese with English abstract)
- [27] 骆嘉言, 韩振华, 邓玉和, 等. 石膏木屑板制作中工艺影响因子分析[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(5): 89—94.
- Luo Jiayan, Han Zhenhua, Deng Yuhe, et al. The effects of wood-gypsum ratio, water-gypsum ratio and temperature on the properties of the gypsum saw dust board[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2008, 32(5): 89—94. (in Chinese with English abstract)
- [28] 宰德欣, 邓玉和, 宣玲, 等. 缓凝剂对石膏刨花板性能的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2007, 31(2): 63—67.
- Zai Dexin, Deng Yuhe, Xuan Ling, et al. Effects of different retarders on the properties of gypsum particleboard[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2007, 31(2): 63—67. (in Chinese with English abstract)
- [29] 吴莉, 彭家惠, 万体智, 等. 缓凝剂对建筑石膏水化过程和硬化体微结构的影响[J]. 新型建筑材料, 2003, 30(7): 1—3.
- Wu Li, Peng Jiahui, Wan Tizhi, et al. The effects of retarders on the hydration process and microstructure of calcined gypsum[J]. New Building Materials, 2003, 30(7): 1—3. (in Chinese with English abstract)
- [30] 王伟宏, 侯志义, 郝建秀, 等. 木纤维增强石膏板性能研究[J]. 林业工程学报, 2018, 3(4): 19—24.
- Wang Weihong, Hou Zhiyi, Hao Jianxiu, et al. Performance of gypsum board reinforced by wood fibers[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(4): 19—24. (in Chinese with English abstract)
- [31] 晋强, 冯勇, 何金春, 等. 石膏-EPS-棉花秸秆纤维复合材料保温与防火性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2014(2): 51—53.
- Jin Qiang, Feng Yong, He Jinchun, et al. Study on thermal insulation and fireproof performance of gypsum-EPS-cotton stalk fiber composites[J]. China Concrete and Cement Products, 2014(2): 51—53. (in Chinese with English abstract)
- [32] 高子栋. 农作物秸秆纤维/脱硫石膏复合材料的制备与性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2011.
- Gao Zidong. Study on Preparation and Properties of Crop Straw Fiber/Desulfurization Gypsum Composite Material[D]. Jinan: University of Jinan, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [33] 王志新. 林业实用技术大全[M]. 北京: 世界图书出版公司北京公司, 2011: 1010—1011.
- [34] 人造板及饰面人造板理化性能试验方法: GB/T 17657-2013[S].
- [35] 林业生物质原料分析方法灰分的测定: GB/T 36057-2018[S].
- [36] Reaction-to-fire tests — Heat release, smoke production and mass loss rate—part 1: Heat release rate (cone calorimeter method): ISO 5660-1: 2015[S].
- [37] 石膏刨花板: LY/T 1598-2011[S].
- [38] 潘亚鸽, 朱凌波, 唐钱, 等. 麦秸/木材均质复合无机碎料板的阻燃性能研究[J]. 功能材料, 2017, 48(5): 164—168.
- Pan Yage, Zhu Lingbo, Tang Qian, et al. Study on flame retardant properties of inorganic particleboard with a uniform mixture of wheat straw and wood[J]. Journal of Functional Materials, 2017, 48(5): 164—168. (in Chinese with English abstract)
- [39] 李坚, 王清文, 李淑君, 等. 用 CONE 法研究木材阻燃剂 FRW 的阻燃性能[J]. 林业科学, 2002, 38(5): 108—114.
- Li Jian, Wang Qingwen, Li Shujun, et al. A study on the fire retardancy of FRW fire retardant for wood by cone calorimeter[J]. Transactions of the Scientia Silvae Sinicae, 2002, 38(5): 108—114. (in Chinese with English abstract)
- [40] 王奉强, 王清文, 张志军, 等. CONE 法研究木材阻燃剂的阻燃性能[J]. 消防科学与技术, 2010, 29(11): 990—992.
- Wang Fengqiang, Wang Qingwen, Zhang Zhijun, et al. The fire retardancy study of wood fire retardant by cone calorimeter[J]. Transactions of the Fire Science and Technology, 2010, 29(11): 990—992. (in Chinese with English abstract)
- [41] 岳孔, 程秀才, 王磊磊, 等. 改性处理对杨木力学和燃烧性能的影响[J]. 燃烧科学与技术, 2016, 22(5): 426—432.
- Yue Kong, Cheng Xiucui, Wang Leilei, et al. Effect of modification on mechanical property and fire-retardant behavior of fast-growing poplar wood[J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2016, 22(5): 426—432. (in Chinese with English abstract)
- [42] 傅志前. 不同密度的麦秸砖墙导热系数试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(2): 289—292.
- Fu Zhiqian. Experimental research on thermal conductivity of wheat straw-bale wall of different densities[J]. Journal of Building Materials, 2012, 15(2): 289—292. (in Chinese with English abstract)
- [43] 陈云, 张喜燕, 雷亚芳, 等. 麦秸的微观构造及化学成分分析[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(2): 179—183.
- Chen Yun, Zhang Xiyan, Lei Yafang, et al. Microstructure and chemical composition of wheat straw[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015, 43(2): 179—183. (in Chinese with English abstract)
- [44] 刘一星, 赵广杰. 木质资源材料学[M]. 北京: 中国林业出版社, 2004.
- [45] 王磊磊. 硼酸复配低分子酚醛树脂改性速生材阻燃性能研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2015.
- Wang Leilei. Study on Flame Retardancy of Fast-growing Wood Modified with Low Molecular Weight Boracic Acid Compounding Phenol-formaldehyde Resin[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [46] Yue K, Chen Z J, Lu W D, et al. Evaluating the mechanical and fire-resistance properties of modified fast-growing Chinese fir timber with boric-phenol-formaldehyde resin[J]. Construction and Building Materials, 2017, 154: 956—962.
- [47] Manríquez M J, Moraes P D. Influence of the temperature on the compression strength parallel to grain of paricá[J]. Construction and Building Materials, 2010, 24(1): 99—104.

Mechanical properties and fire resistance of gypsum-based composites with wheat straw

Yue Kong^{1,2}, Li Mengyu¹, Liu Jian¹, Wang Lu¹, Liu Weiqing¹, Lu Weidong¹

(1. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;

2. State Key Laboratory of Molecular Engineering of Polymers (Fudan University), Shanghai 200433, China)

Abstract: In order to improve the full utilization of wheat straw, to enhance the mechanical properties of gypsum board and to increase the fire resistance of wood-based gypsum board, a new preparation process of gypsum-based composites with wheat straw was put forward in this study. The thick and small wheat straw fiber were used as the reinforcing materials in gypsum-based composites, and their dimension were in the range of 0.30-0.60 and 0.18-0.30 mm, respectively. The gypsum was employed as the continuous phase in the composites. The ambient temperature curing structural adhesive was used to replace the traditional gypsum retarder in the new preparation process of gypsum-based composites. The preparation process consisted of an initial forming stage for initial strength and a curing stage, where the objectives were gypsum hydration and the strength further increased, respectively. Compared with the conventional gypsum composites with Chinese fir fiber and Chinese fir particle, the mechanical properties and fire resistance of gypsum-based composites by adding wheat straw fiber with different dimension were tested and analyzed. The results showed that the physical and mechanical properties of gypsum-based composites with small wheat straw fiber were lower than those of gypsum-based composites with Chinese fir fiber, but were better than gypsum-based composites with thick wheat straw fiber. The internal bond strength, modulus of rupture, modulus of elasticity and thickness swelling of gypsum-based composites with small wheat straw fiber were 0.33 MPa, 7.1 MPa, 2 370 MPa and 2.82%, respectively, and could meet the requirements of gypsum particleboard standard. According to the lower thermal conductivity and higher ash content of wheat straw than wood materials, the time to ignition of gypsum-based composites with wheat straw was higher than that of gypsum-based composites with Chinese fir fiber, and there was no obvious peak heat release rate in the fire resistance test. Compared with the gypsum-based with Chinese fir fiber and Chinese fir particle, the total heat release of gypsum-based composites with small wheat straw fiber was 48.18% and 35.87% lower, respectively. The main peak of CO₂ production rate was 42.25% and 38.81% lower than that of Chinese fir fiber and particle gypsum composites, respectively. The main peak of CO production rate was comparable to wood-gypsum composites. The weight percent retains of small wheat straw fiber gypsum composites was slightly higher than that of Chinese fir gypsum composites, and the appearance after burning test was more complete and the degree of carbonization was lighter obviously. Due to the smooth outer surface of the wheat straw, the gypsum was mainly attached to the internal surface of the wheat straw by microscopic observation using scanning electron microscope. Therefore, the small straw fiber could increase the contact area between the internal surface and the gypsum, which indicated the inherent reason for the better physical and mechanical properties of small wheat straw fiber gypsum composites. The smooth outer surface of the wheat straw was almost covered with SiO₂, which also explained the superior fire resistance of wheat straw gypsum composites. The study can be a reference for the performance improving on the gypsum-based composites with wheat straw fiber and its application in project.

Keywords: composite materials; physical properties; mechanical properties; wheat straw; Chinese fir; preparation process; fire resistance