

# 石膏刨花板研究综述\*

李萌禹<sup>1</sup> 岳孔<sup>1,2</sup> 刘健<sup>1</sup> 刘伟庆<sup>1</sup> 宋永明<sup>2</sup> 汤丽娟<sup>1</sup> 吕城龙<sup>1</sup>

(1 南京工业大学,南京 211800;2 生物质材料科学与技术教育部重点实验室(东北林业大学),哈尔滨 150040)

**摘要:**石膏板具有优异的抗火性能,在轻型木结构中主要用作楼板和墙板的抗火覆面板。通过在石膏基体中复合木材刨花等植物纤维制备石膏刨花板,可不改变板材原有的生产制备工艺而提高其力学性能。生产石膏刨花板的石膏原料主要来源于工业石膏,刨花主要为农业或工业副产品,兼顾变废为宝和材料成本可控等优势,因此具有广泛的应用前景。文中综述了石膏刨花板中不同缓凝剂的作用机理、不同植物纤维类型的增强效果、后处理方式和外加剂对板材性能改善的机理等板材制备工艺,以及石膏刨花板的物理力学性能和抗火性能等研究现状,指出目前土木工程用石膏刨花板存在的不足及需进一步研究的方向,可为石膏刨花板的进一步系统研究以及工程应用提供参考。

**关键词:**石膏刨花板,制备工艺,抗火性能,力学性能

中图分类号:S781,TS653

文献标识码:A

文章编号:1001-4241(2018)01-0046-06

DOI:10.13348/j.cnki.sjlyyj.2017.0078.y

## A Review of Gypsum Particleboard Research

Li Mengyu<sup>1</sup> Yue Kong<sup>1,2</sup> Liu Jian<sup>1</sup> Liu Weiqing<sup>1</sup>

Song Yongming<sup>2</sup> Tang Lijuan<sup>1</sup> Lyu Chenglong<sup>1</sup>

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

2 Key Laboratory of Bio-Based Material Science & Technology, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China )

**Abstract:** Gypsum board is mainly used as the fire-resistant panel in the floor and wall of light wood frame structure, owing to its excellent fire resistance. The gypsum particleboard, which is made by adding wood particles and other plant fibre in gypsum, would improve the mechanical properties without changing the original pressing technology of gypsum board. The gypsum particleboard, with the gypsum mainly derived from industrial gypsum and wood particle from agricultural or industrial residues, boasts the advantages of full use of waste materials and controlled material cost, and thus have the wide application. This paper reviewed the action mechanism of different retarders in gypsum particleboard, the enhancement effect of different types of plant fiber, the post-treatment methods and the performance improvement mechanism of panels by adding agents. The research on physical and mechanical properties and fire resistance of the gypsum particleboard was also summarized. Finally, the shortages of gypsum board used in civil engineering as well as the future research focus was discussed. This study is expect to provide a reference for further study and engineering application.

**Key words:** gypsum particleboard, manufacturing technique, fire resistance, mechanical properties

\* 收稿日期:2017-06-07;修回日期:2017-08-24。

基金项目:生物质材料科学与技术教育部重点实验室开放基金(SWZCL2016-13);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:李萌禹,男,硕士研究生,主要从事木基石膏板材研究,E-mail:dayujs@163.com。

通信作者:岳孔,男,副研究员,E-mail:yuekong@njtech.edu.cn。

纸面石膏板以建筑石膏为主要原料,掺入适量外加剂,在与水搅拌后浇注于护面纸之间,并与护面纸牢固地粘结在一起,其强度主要由护面纸提供。石膏板被广泛用于木结构墙体和楼板的覆面板,主要起防火和装饰作用。由于石膏板的力学性能较差,在使用中容易出现局部破坏,如受剪撕裂、角部压溃、拼接脱开和挤压破坏等<sup>[1-2]</sup>。与之相比,具有较好力学性能的石膏刨花板是一种由刨花和石膏复合而成的无机胶合板材,其中刨花作为增强材料,石膏作为胶粘剂。与其他木基板材(定向刨花板、中密度板、层压板等)相比,石膏刨花板具有环保、高耐火性以及较好的隔音等优点,也可以进行锯切、碾磨及抛光等机械加工<sup>[3-4]</sup>。在石膏刨花板的制备过程中,木材单元无需干燥,板坯在常温条件下压制,生产能耗低。此外,所生产的石膏刨花板多是采用工业废弃的石膏,是许多化学过程的副产物<sup>[3,5]</sup>;在刨花原料方面除了传统的木材外,还可以用竹子<sup>[6]</sup>、洋麻秆<sup>[7]</sup>、麦秸以及甘蔗渣<sup>[8]</sup>等,不仅可以达到充分利用资源的目的,还可以生产出符合特定要求的板材,而且更有利于生态环境的保护。因此,国内外学者在石膏刨花板的制备、微观表征和性能分析等方面开展了大量研究。

在石膏刨花板中,纤维的存在弥补了石膏原本的高脆性,使得板材具有很好的力学性能,尤其是具有较高的弹性模量。一方面,板材力学性能的提高有助于其物理性能的改善,特别是在其他条件不变的情况下,当内结合强度提高时板材的吸水厚度膨胀率会有所下降。另一方面,石膏自身具有优异的防火性能,因此石膏刨花板具有较好的火灾抵抗能力。国内外学者对影响石膏刨花板性能的因素进行了深入研究,主要包括纤维种类及形态、各组分比例、后处理工艺和复合助剂等。其中,纤维形态除了使用传统扁平形态的刨花外,还可以使用木屑<sup>[9]</sup>;各组分比例因纤维种类不同而有所区别,当采用木材作为增强纤维,当木膏比和水膏比分别为0.3~0.4和0.2~0.3时,所制备的石膏刨花板具有较好的物理力学性能<sup>[10]</sup>;同时,采用加热后处理<sup>[11]</sup>、添加硅酸盐水泥复合助剂<sup>[12-14]</sup>等都是提高石膏刨花板物理力学性能的有效措施。

## 1 石膏刨花板制备工艺

下面从石膏刨花板中不同缓凝剂的作用机理、不同植物纤维类型的增强效果、后处理方式的影响和外

加剂对板材性能改善的机理等方面综述石膏刨花板的生产制备工艺研究情况。

### 1.1 缓凝剂的作用机理

通常石膏的凝结硬化速度很快,无法提供足够的时间以满足工业化生产的要求,因此常采用添加复合缓凝剂的方式来延缓石膏的凝固速度。缓凝剂种类主要有有机酸类、磷酸盐类、蛋白类、复配体系等4大类<sup>[15-16]</sup>。不同缓凝剂的作用机理各不相同<sup>[17]</sup>,总的来说,骨胶在新生二水石膏晶核表面产生化学吸附,覆盖在二水石膏晶核表面降低晶核的表面能,通过抑制二水石膏晶核生长,使建筑石膏水化凝结时间延长;柠檬酸通过吸附在半水石膏颗粒表面阻碍其溶解,或吸附在新生成的二水石膏晶核上,使晶核达到临界成核尺寸的时间延长<sup>[18]</sup>,从而达到使石膏凝固时间延长的目的;六偏磷酸钠缓凝离子在半水石膏晶体表面与 $\text{Ca}^{2+}$ 形成难溶物,降低半水石膏的溶解速度,使其水化进程降低,从而使石膏的凝结时间延长<sup>[19]</sup>。

Marcos Lanzón 等<sup>[20]</sup>以恒定的水膏比研究了不同浓度柠檬酸的缓凝作用,结果表明,当柠檬酸在500~1 000 mg/m时可达到制造所需时间;当柠檬酸浓度高于1 500 mg/m时,石膏的凝固时间变化不显著;但柠檬酸的添加对石膏强度有负面影响,当剂量高于1 000 mg/m时尤其显著,其主要原因是柠檬酸降低了石膏晶体显微结构之间的互锁效应。总体而言,缓凝剂的加入降低了胶凝材料水化早期液相过饱和度,改变了二水石膏结晶习性和晶体形貌,石膏晶体明显粗化,晶形也由针状转变为短柱状,大大削弱了晶体间的搭接程度,硬化体孔径增大,大孔比例明显增加,孔结构劣化,并最终导致石膏强度的降低。其中,强度损失与其缓凝效果基本呈正比,掺量越高,缓凝时间越长,强度损失越大<sup>[21]</sup>。研究表明,在生产石膏刨花板时,酸性缓凝剂优于碱性缓凝剂,且对石膏刨花板性能的影响较小<sup>[22]</sup>。采用适量的柠檬酸三钠或柠檬酸,石膏刨花板可以获得较好的性能,并且石膏的初凝时间可延长至2 h。当添加碱性缓凝剂时,石膏的初凝时间较短,同时石膏刨花板的内结合强度、弹性模量以及静曲强度等力学性能明显下降。由于石膏固化在弱酸条件下完成,因此强碱会降低石膏与刨花的结合强度。然而,强酸也会影响石膏的结合强度,并使刨花的强度有所下降。热分析表明,石膏固化属于吸热反应,高的吸热量可以使石膏更好地固

化,使其具有更高的结合强度。

## 1.2 复合纤维的增强效果

Dasong Dai 等<sup>[9]</sup>研究了木材化学组成对石膏刨花板性能的影响,结果表明,单宁、乙酸、半纤维素和木质素等组份对石膏刨花板的力学性能无不良影响,当加入消泡剂后,石膏刨花板的力学性能明显提高。石膏刨花板强度较低与木材中化学成分无直接关系,而是由木材单元较高的吸水率所致。采用水性环氧树脂改性木刨花制备的石膏刨花板,由于水性环氧树脂具有较好的附着力<sup>[23-24]</sup>,改善了石膏与木刨花的粘结性,降低了木刨花的吸水率,从而具有较高的力学性能<sup>[9]</sup>。

Morteza Nazerian 等<sup>[8]</sup>利用甘蔗渣和麦秸制备石膏板材,结果表明,当木膏比一定时,麦秸所占比例越大,板材的吸水率越低,这主要源自麦秸自身较低的吸水率。除此之外,密度也是影响板材吸水率的一个重要因素,密度越低吸水率就越大。在相同木膏比条件下,麦秸量越高,厚度膨胀率就越高。原因在于麦秸表皮细胞是最外侧的表面细胞且被憎水的蜡层所覆盖<sup>[25]</sup>,该层降低了秸秆与水的润湿性,因此阻止石膏糊剂渗透到细胞壁中,且在矿物基质和颗粒之间没有产生良好的机械互锁,这是导致内结合强度额外损失的主要原因,从而影响板材的厚度膨胀率。研究还发现,木膏比的降低将导致静曲强度和弹性模量的降低,这是石膏的高脆性和低弹性模量造成的。潘淑清等<sup>[26]</sup>以石膏和蔗渣为主要原料制造石膏刨花板,试验表明,该板材具有较高的强度、耐燃性、保温吸音性和透气性,其表面洁白,不影响后续表面的喷涂和贴面,可用作装修材料。

张显权等<sup>[27]</sup>开展了原材料形态、料膏比、乳白胶加入量和原材料预处理方式等对麦秸石膏复合材料性能影响的试验研究,并利用体视显微镜和扫描电子显微镜观察复合材料的胶结状况,结果表明,当料膏比为 10%、水膏比为 35%、原料筛网目数为 10~20 目、乳白胶加入量为 12.5%、麦秸经热水处理时间为 3 h 时,所制备的麦秸/石膏复合材料的各项物理力学性能达到最优,并满足标准规定。

Deng 等<sup>[28]</sup>研究了不同长度和含量的聚丙烯纤维对石膏刨花板性能的影响,结果表明,当纤维长度为 9 mm、质量分数为 9% 时,石膏刨花板的内结合强度最高;当纤维长度为 12 mm、质量分数为 12% 时,板材的静曲强度最高;适量的聚丙烯纤维有助于提高

板材的力学性能,但加入过多的聚丙烯纤维将会因纤维的结团而导致石膏刨花板内结合强度、静曲强度和弹性模量的下降;此外,聚丙烯纤维的加入导致刨花比例的相对减少,因此石膏刨花板的厚度膨胀率和吸水率得到改善。

Tiziano 等<sup>[29]</sup>对定向刨花板和石膏纤维板的钉连接性能进行了试验研究,结果表明,石膏纤维板与定向刨花板的钉连接极限承载力和刚度接近,但定向刨花板钉连接节点的延性和耗能能力优于石膏纤维板。

## 1.3 后处理方式的影响

邓玉和等<sup>[11]</sup>通过用加热法研究了热量与石膏刨花板性能的关系,结果表明,在 30~40 °C 温度范围内,加热有助于提高石膏刨花板的内结合强度。这是因为石膏凝结固化是吸热反应,通过给板坯加适量的热量以增加石膏凝结固化过程中的吸热量,使石膏水化完全,从而提高其内结合强度。但当温度超过 40 °C 时,板材的内结合强度下降,这是由于温度过高导致石膏结晶水化过度造成的。为了缩短加热时间,提高实际生产效率,可采用加压 1 h 工艺。温度对石膏刨花板的静曲强度和弹性模量的影响与板内结合强度有相同的趋势,对板材的吸水率和吸水厚度膨胀率的影响不显著,但在试验范围内,石膏刨花板的吸水率和厚度膨胀率均满足标准要求。

## 1.4 复合助剂的影响

研究表明,在干燥状态下,复合硅酸盐水泥可以增加石膏刨花板的静曲强度和内结合强度,并有效降低板材的 2 h、24 h 吸水率和吸水厚度膨胀率<sup>[12]</sup>。

Rangavar 等<sup>[13]</sup>在石膏中复合不同比例的葡萄藤和硅酸盐水泥以改善其性能,结果表明,当水泥质量从 0 增加至石膏质量的 10% 时,板材的吸水率和吸水厚度膨胀率均降低;当水泥从 0 增加到 5% 时,板材的静曲强度、弹性模量和内结合强度提高,但添加量从 5% 提高至 10% 时,结果则相反。其原因在于,过多的水泥加速了石膏凝结,阻碍了化学反应的完成,从而也阻止其形成强化学键,最终影响板材的力学性能。其中,当发生快速固化时,混合物温度升高,体积显著增加,产生微裂纹,微裂纹在板材中传播并导致板材弯曲强度下降。研究还发现,水泥的加入有助于改善石膏板材的尺寸稳定性<sup>[30]</sup>。Halim 等<sup>[14]</sup>提出,添加的水泥比例必须适量才能改善石膏刨花板的物理力学性能。

宣玲等<sup>[31]</sup>研究了有机硅防水剂对石膏刨花板物理力学性能的影响,试验表明,添加适量的有机硅防水剂能改善石膏刨花板的吸水厚度膨胀率和吸水率,并得到较好的力学性能。特别是当有机硅防水剂添加量为3%时,板材的防水性能最优,且板材的内结合强度、静曲强度和弹性模量也达到最高值。过多地添加防水剂对石膏刨花板的防水性能改进不明显,反而会降低板材的力学性能,其原因在于过量的有机硅防水剂使石膏固化体呈碱性,阻碍石膏的水化反应,

板材的内结合强度降低,吸水厚度膨胀率和吸水率增加。

## 2 石膏刨花板的物理力学性能

国内外学者开展了石膏刨花板的制备工艺、力学性能和抗火性能等大量的基础性研究工作,主要集中在材料层面的抗弯强度、抗弯弹性模量、内结合强度和24 h吸水厚度膨胀率等指标,其基本性能对比如表1所示。

表1 石膏刨花板物理力学性能对比

24 h 吸水厚度膨胀率/%	抗弯强度/MPa	抗弯弹性模量/MPa	内结合强度/MPa	参考文献
1.40 ~ 3.30	3.10 ~ 8.50	1 800 ~ 3 500	0.18 ~ 0.40	[28]
0.66 ~ 1.28	5.07 ~ 13.26	2 481 ~ 4 992	0.17 ~ 0.63	[8]
1.63 ~ 3.30	3.15 ~ 3.65	2 100 ~ 2 600	0.25 ~ 0.38	[31]
2.40 ~ 3.10	3.50 ~ 6.10	1 500 ~ 2 250	0.25 ~ 0.46	[11]

## 3 石膏刨花板的抗火性能

石膏刨花板的抗火性主要源于石膏( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )晶体中质量占比约21%的结合水<sup>[32]</sup>。板材在受火过程中石膏的化学分解(化学结合水的解离)发生在2个阶段<sup>[33]</sup>,在第1阶段二水硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )损失75%的水,形成半水硫酸钙( $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ );进一步加热石膏,则发生第2阶段的反应,半水硫酸钙失去剩余的水形成无水硫酸钙石膏( $\text{CaSO}_4$ )。2个反应都是吸热的,需要大量的能量来完成。因此,通过石膏的热传递实际上被阻碍,直到脱水过程完成,石膏刨花板的抗火特性主要归功于这一效果。

在轻型木结构中石膏板用作墙体和楼板的覆面板主要起抗火作用。Kolaitis等<sup>[32]</sup>开展了全尺寸木结构的火灾试验,研究了石膏板和常规木基板材抗火性能的差异,结果表明,与木基板材相比,石膏板具有更好的抗火性能,由其包覆的木构件没有出现炭化现象,而木基板材的抗火性能不足。在整个试验过程中石膏板均没有出现失效,但由刨花板作为覆面板的墙体在受火35 min后坍塌。

Byoung - Ho Lee等<sup>[34]</sup>使用锥形量热计研究了石膏刨花板的抗火性能,并与其他木基板材进行了对比分析,试验表明,其他木基板材都有点燃时间,而当石

膏刨花板暴露于火灾条件下时,无法测出其点燃时间,同时石膏刨花板的热释放速率及其峰值、烟生成速率和一氧化碳生成速率均显著低于木基板材,从材性角度证明了石膏刨花板比其他木基板材具有更高的抗火性以及更好的热稳定性,以其为室内材料可以有效提高建筑物的抗火性。研究表明<sup>[35]</sup>,来自刨花板当中的甲醛和总挥发性有机化合物的排放量随着温度的升高而增加,因此在发生火灾时刨花板会释放出有毒气体,而石膏刨花板由于自身较好的抗火性以及材料组成简单,相对来说会更安全。

## 4 结论及研究展望

石膏刨花板所用原材料大多是农业或工业副产品,量大面广,且其生产过程能源消耗少,材料成本较低,生产和使用过程中均不会释放出有毒气体,是一种绿色的建筑材料。同时,石膏刨花板具有木材单元较高的物理力学性能,以及石膏单元良好的抗火性能,因此具有良好的应用前景。

对石膏刨花板的研究已经取得一定的成果,但仍处于材料研究的实验室阶段,在石膏刨花板的制备工艺、性能提升、作用机理研究等方面还需要进一步研究,具体有以下几个方面:

1)在石膏刨花板中两相界面之间的粘结对板材的力学性能尤为重要,现有研究表明其多为物理作

用,粘结强度较弱,难以大幅度提升石膏刨花板的力学性能。与之相比,通过化学粘结等方式进一步提高界面间作用的研究较少。

2) 土木建筑作为石膏板材应用的最主要领域,由于石膏板力学性能低,以其作为覆面板的墙体和楼盖等构件的结构性能一般不考虑石膏板的贡献。与常规石膏板相比,石膏刨花板的力学性能已有大幅度提高,但与承载型的结构用胶合板、定向刨花板等板材相比,其力学性能仍需进一步提高。同时,目前以石膏刨花板为覆面板的墙体、楼盖等构件的结构性能研究尚未涉及。另外,石膏刨花板的钉连接性能、石膏刨花板覆面的结构构件承载中应力重分配及其协同工作等在结构领域中应用的主要问题需要进一步明确,并开展针对性的深入研究。

3) 用作结构构件覆面板的木基板材,由于含有大量可燃性木材单元,不具备良好的抗火性能,需要在其表面进行防火材料的包覆,以满足抗火性能的要求。石膏刨花板由于石膏晶体中结晶水的存在,其抗火性能有所提升,但对其在火灾中力学性能、钉连接性能等的演变规律研究较少,不同强度等级(不同木刨花质量分数)的石膏刨花板的耐火极限及其在火灾条件下对内部材料的防火机理等还需要进一步深入研究。

## 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] FENG Q, DENG Y H, KIM H, et al. Observation and analysis of gypsum particleboard using SEM[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2007, 22(1): 44 - 47.
- [4] 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.
- [5] DENG Y H, FURUNO T. Study on gypsum - bonded particleboard reinforced with jute fibres[J]. Holzforschung, 2002, 56(4): 440 - 445.
- [6] De ARAÚJO P C, ARRUDA L M, Del 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 Tecnología, 2011, 13(1): 49 - 58.
- [7] 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.
- [8] NAZERIAN M, KAMYAB M. Gypsum - bonded particleboard manufactured from agricultural based material[J]. Forest Science and Practice, 2013, 15(4): 325 - 331.
- [9] DAI D, FAN M. Preparation of bio - composite from wood sawdust and gypsum[J]. Industrial Crops & Products, 2015, 74: 417 - 424.
- [10] 智言钢. 石膏刨花板生产工艺与发展前景[J]. 湖南林业科技, 2009, 36(3): 38 - 40.
- [11] 邓玉和, 周梅, 骆嘉言, 等. 加热法对石膏刨花板性能影响的研究[J]. 林产工业, 2006, 33(5): 22 - 24.
- [12] ESPINOZA - HERRERA R, CLOUTIER A. Physical and mechanical properties of gypsum particleboard reinforced with Portland cement [J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2011, 69(2): 247 - 254.
- [13] RANGAVAR H, KHOSRO S K, PAYAN M H, et al. Study on the possibility of using vine stalk waste (*Vitis vinifera*) for producing gypsum particleboards[J]. Mechanics of Composite Materials, 2014, 50(4): 501 - 508.
- [14] HALIM A A G, SHAHARIN H, AINI N S, et al. Effect of adding cement to the mechanical properties of red gypsum particleboard made of kelempayan wood[M]. Singapore: Springer, 2016: 797 - 805.
- [15] 曹晓梅, 牟晓芳, 钱中秋, 等. 建筑石膏缓凝剂的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(增刊2): 298 - 301.
- [16] LI X L, LI G Z, LIU Y Z, et al. Study on effect of the ternary composite retarder on properties of FGD gypsum plaster material[J]. Applied Mechanics & Materials, 2014, 541/542: 45 - 48.
- [17] 彭家惠, 张建新, 陈明凤, 等. 大分子缓凝剂对建筑石膏水化进程的影响及缓凝机理[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(7): 896 - 900.
- [18] SINGH M, GARG M. Retarding action of various chemicals on setting and hardening characteristics of gypsum plaster at different pH [J]. Cement & Concrete Research, 1997, 27(6): 947 - 950.
- [19] 丁益, 方有春, 任启芳, 等. 不同类型缓凝剂对建筑石膏的缓凝作用[J]. 材料导报, 2016, 30(6): 121 - 124.
- [20] LANZÓN M, GARCÍA - RUIZ P A. Effect of citric acid on setting inhibition and mechanical properties of gypsum building plasters[J]. Construction & Building Materials, 2012, 28(1): 506 - 511.
- [21] 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.
- [22] DENG Y H, FURUNO T, WU Y F. Effect of buffers on gypsum particleboard properties[J]. Journal of Wood Science, 2001, 47(5): 356 - 361.
- [23] 李坚辉, 孙明明, 张绪刚, 等. 水性环氧树脂的研究进展[J]. 黑龙江科学, 2013, 4(8): 49 - 51.
- [24] 郭翠. 水性环氧树脂的制备与性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014: 5 - 6.
- [25] 陈云, 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.
- [26] 潘淑清, 丁丹, 陈舜卿. 蔗渣石膏刨花板生产工艺特点[J]. 林产工业, 2002, 29(3): 27-28.
- [27] 张显权, 韩景泉, 刘一星, 等. 麦秸/石膏复合材的工艺研究[J]. 林产工业, 2010, 37(3): 26-30.
- [28] DENG Y H, FURUNO T. Properties of gypsum particleboard reinforced with polypropylene fibers[J]. Journal of Wood Science, 2001, 47(6): 445-450.
- [29] SARTORI T, TOMASI R. Experimental investigation on sheathing - to - framing connections in wood shear walls [J]. Engineering Structure, 2013, 56(6): 2197-2205.
- [30] KHOJASTEH KHOSRO S, RANGAVAR H, PAYAN M H, et al. Improvement of dimensional stability and mechanical properties of gypsum particleboard by adding white cement[J]. Iranian Journal of Wood and Paper Science Research, 2015, 30(1): 132-143.
- [31] 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.
- [32] KOLAITIS D I, ASIMAKOPOULOU E K, FOUNTI M A. Fire protection of light and massive timber elements using gypsum plasterboards and wood based panels: a large - scale compartment fire test [J]. Construction & Building Materials, 2014, 73: 163-170.
- [33] KOLAITIS D I, FOUNTI M A. Development of a solid reaction kinetics gypsum dehydration model appropriate for CFD simulation of gypsum plasterboard wall assemblies exposed to fire[J]. Fire Safety Journal, 2013, 58(2): 151-159.
- [34] LEE B H, KIM H S, KIM S, et al. Evaluating the flammability of wood - based panels and gypsum particleboard using a cone calorimeter[J]. Construction & Building Materials, 2011, 25(7): 3044-3050.
- [35] JIANG C, LI D, ZHANG P, et al. Formaldehyde and volatile organic compound (VOC) emissions from particleboard: identification of odorous compounds and effects of heat treatment [J]. Building & Environment, 2017, 117: 118-126.