

# 木丝增强脱硫石膏板制备及性能研究

曹旭东,艾文兵,母军\*

(北京林业大学 材料科学与技术学院,北京 100083)

**摘要:**为开发一种轻质高强、保温隔热的绿色建筑墙体材料,以绿色可持续的木丝作为增强增韧材料,添加到工业副产废弃物脱硫建筑石膏中制备新型木丝增强脱硫石膏板材。探究木丝尺寸、木丝含量和不同处理方式对石膏复合材料性能的影响。结果表明,木丝的添加能减小石膏板的脆性,20%的木丝添加量对于板材的增强效果最好,增强木丝长度和宽度对材料的抗折强度、握螺钉力和导热系数均有影响显著,当添加量为20%,木丝长度( $100\pm0.5$ )mm、宽度( $0.9\pm0.05$ )mm的板材的抗折强度最高,木丝长度( $100\pm0.5$ )mm、宽度( $1.8\pm0.05$ )mm的板材的握螺钉力最高,较纯石膏板分别提高了67.12%和193.4%。木丝的添加使板材的导热系数满足建筑保温材料的要求。研究证明,木丝形态的优化选择有利于提高石膏板的增强效果,提高板材的物理力学性能。

**关键词:**木丝;脱硫建筑石膏;石膏板;性能

**中图分类号:**TQ177.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2021)04-0220-05

Preparation and Performance of Wood Filaments Reinforced Desulfurized Gypsum Board

CAO Xu-dong, AI Wen-bing, MU Jun\*

(College of Materials Science and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** In order to develop a lightweight, high-strength, heat-insulating and green building wall material, green and sustainable wood wool was used as a reinforcing and toughening material, which was added to industrial by-product waste desulfurization building gypsum to prepare a new wood wool reinforced desulfurization gypsum board. The effects of wood wool size, wood wool content and different treatment methods on the performance of gypsum composite materials were explored. The experimental results showed that the addition of wood wool could reduce the brittleness of the gypsum board. The addition of 20% wood wool had the best effect on the reinforcement of the board. The length and width of the wood wool exhibited significant effects on the bending strength, screw holding force and thermal conductivity of the material. When the addition amount was 20%, the wood wire length and the width were ( $100\pm0.5$ ) mm and ( $0.9\pm0.05$ ) mm, respectively, the plate had the highest flexural strength; when the wood wire length and the width were ( $100\pm0.5$ ) mm and ( $1.8\pm0.05$ ) mm, the plate had the highest screw holding force with 67.12% and 193.4% increments compared with pure gypsum board. The addition of wood wool made the thermal conductivity of the board meet the requirements for the building insulation materials. The results proved that the optimization of wood wool morphology was conducive to improving the reinforcement effect of gypsum board and the mechanical properties of the board.

**Key words:** wood filament; desulfurization building gypsum; gypsum board; performance

石膏板具有隔音阻燃、生产清洁环保、自动化程度高、原料回收利用等优势<sup>[1]</sup>,广泛应用于商业地

产、公共建筑和家庭住宅等建筑空间的吊顶装饰、建筑隔墙等领域<sup>[2]</sup>。目前纸面石膏板和纤维石膏板是

收稿日期:2020-07-08 修回日期:2020-07-28

基金项目:中央高校基本业务费(2015ZCQ-CL-01);北京林业大学中央高校基本科研业务费专项资金项目(2017ZY28)。

作者简介:曹旭东。研究方向:木质材料制备及阻燃。E-mail:bjfuj130554103@163.com

\*通信作者:母军,博士生导师,教授。研究方向:木质生物质材料利用。E-mail:mujun@bjfu.edu.cn

市场上主要的石膏板产品。纸面石膏板产量约占石膏总产品的 80%<sup>[3]</sup>,但其力学强度较低,握钉力差,使用中易出现受剪撕裂、角部压溃、拼接脱开和挤压破坏等问题<sup>[4]</sup>。而纤维石膏板通过在石膏基质中加入纤维增强材料,可有效提升石膏板综合性能<sup>[5]</sup>,除具有纸面石膏板的优点外,其内部结合牢固,具有较高的抗弯强度和内结合强度,同时在防火、防潮、保温、隔音等方面也优于纸面石膏板<sup>[6]</sup>。因此,越来越多研究者将目光集中于研发纤维增强石膏板<sup>[7]</sup>。

实际生产中,玻璃纤维、碳纤维等合成纤维和天然纤维作为纤维石膏板的增强纤维,均在不同程度上提升了纤维石膏板的性能<sup>[8]</sup>。出于对环保的需求,石膏基纤维材料的增强纤维逐渐从合成纤维向可再生的生物质材料过度。天然纤维不仅具有来源广泛、可持续发展等特点<sup>[9]</sup>,并且天然纤维的抗拉强度较高,弹性模量较低,具有良好的韧性和强度,物理力学性能不低于甚至优于合成纤维<sup>[10-11]</sup>。李新功等<sup>[12]</sup>研究了石膏刨花板的生产工艺,并对生产环节的各个工段及注意事项进行了介绍。F. Iucolano 等<sup>[13]</sup>对蕉麻纤维与石膏基质之间的相互作用进行了分析,探究了纤维尺寸、纤维添加量等因素对板材物理及机械性能的影响,发现在石膏中加 2% 的蕉麻纤维可以提高复合材料的韧性,同时保证复合材料具有良好的抗弯强度和可加工性。M. Nazerian 等<sup>[14]</sup>分别用秸秆和甘蔗渣作为原材料制备了石膏刨花板,分析了不同木膏比对板材抗弯强度、抗弯弹性模量、内结合强度和吸水厚度膨胀率等指标的影响,发现添加较低比例的木质纤维会导致板材 MOR 和 MOE 降低。目前针对天然纤维增强石膏板的制备工艺问题已进行了大量基础性研究,并就增强材料层面物理力学性能的研究得到了众多成果。其中木纤维具有无毒、无味、无污染、成本低、循环利用等特点,吸引了众多研究者关注<sup>[15]</sup>。

木丝以木材枝桠材,小径材和木材加工剩余物等为原材料,经专门抽丝机加工而成,是一种拉伸强度高、韧性好、易加工、密度低的绿色可持续性生物质增强材料<sup>[16]</sup>,在建材领域利用广泛<sup>[17]</sup>。木丝作为复合板材的增强材料,其尺寸和含量对复合材料性能具有重要影响,本研究采用 6 种不同规格尺寸的木丝对脱硫石膏板材进行制备和性能测试,确定了较优的工艺参数。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

桦木木丝,含水率为 3.94%,细木丝(宽度 0.90 ± 0.05 mm,厚度 0.46 ± 0.02 mm)、粗木丝(宽度

1.80 ± 0.05 mm,厚度 0.46 ± 0.02 mm)均由秦皇岛裕源木业有限公司提供;脱硫建筑石膏粉,主要成分为半水石膏,初凝时间 44 s,终凝时间 130 s,北新建材集团涿州石膏厂提供;一水合柠檬酸、分析纯购自国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 木丝增强石膏板制备

按比例称量脱硫建筑石膏粉、木丝、水(室温 20℃)和柠檬酸缓凝剂,水与石膏的质量比为 1:1。先将柠檬酸颗粒加入水中溶解,后加入脱硫建筑石膏粉,在 JJ-5 型搅拌机中搅拌均匀,之后迅速加入木丝,混合均匀后,将浆料浇注铺装在不锈钢模型中制成尺寸为 300 mm × 300 mm × 12 mm 的样品。在石膏初凝开始前将混合浆料迅速放入冷压机中,压力 2.5 MPa,直到石膏水化结束。取出试件将其放置在温度 40℃ 的烘箱内干燥 48 h 至恒重,然后取出样品之后在室温下保养 7 d,锯割成试件,进行性能检测及表征。

将粗(1.8 ± 0.05)mm、细(0.9 ± 0.05)mm 的木丝裁剪成(10 ± 0.5)mm、(50 ± 0.5)mm、(100 ± 0.5)mm 3 种长度,木丝质量分数为 5%、10%、15%、20% 制备木丝增强石膏复合材料,研究木丝的不同尺寸形态和木丝含量对木丝增强石膏复合材料性能的影响。

### 1.3 性能测试与分析方法

板材力学强度测试:参照标准《LY/T 1598-2011 石膏刨花板》和《GB/T 17657-2013 人造板及饰面人造板理化性能实验方法》,使用 MMW-50 微机控制人造板万能实验机,对板材的抗折强度和握螺钉力进行检测。其中抗折强度样品尺寸为 290 mm × 50 mm × 12 mm,跨距 240 mm,加载速度 5 mm/min,每组测试 12 个试件;握螺钉力的样品尺寸为 75 mm × 50 mm × 12 mm,将 2 个试件胶合成 1 件,总厚度 >15 mm,测试板面握螺钉力,每组测试 8 个试件,一张板的板面握螺钉力是同一张板内全部握螺钉力的算数平均值。

导热系数测试:参照标准《GB/T 10294-2008 绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 防护热板法》,使用 DRH-300 导热系数测试仪,对板材的导热系数进行分析检测。样品尺寸 300 mm × 300 mm × 12 mm,环境温度 23.5℃,冷面设置温度 25.5℃,护热板设置温度 45.5℃,每组试样测试 3 次。

## 2 结果与分析

### 2.1 木丝尺寸及添加量对板材性能的影响

由图 1 可以看到,木膏比 <5% 时,板材的抗折强度与纯石膏板相比均有所下降,强度损失达

21.29%~40.70%。木膏比为5%~20%时,添加木丝纤维长度为50、100 mm的板材的抗折强度明显提升。尤其是当长度为100 mm的木丝质量分数增加到20%时,与纯石膏板相比,(0.9±0.05)mm、(1.8±0.05)mm 2种尺寸的木丝复合材料的抗折强度分别提高了67.12%和44.20%。

木丝尺寸对板材强度的影响明显大于木丝添加量的影响。当木丝含量为20%时,木丝长度为100 mm的板材与10 mm的板材相比,细(0.9±0.05)mm、粗(1.8±0.05)mm 2组复合材料的抗折强度分别上升了130.48%和205.71%;100 mm长的细木丝组较粗木丝组的抗折强度增加了15.89%;而添加长度为10 mm的木丝所制得板材的强度均低于纯石膏板。

分析其原因可知,当木丝的添加量较少、尺寸较小时,复合材料中木丝间的互锁和层叠作用减小,无法起到明显的增强作用,且细小纤维比表面积大,易吸水,阻碍了石膏基质间的水化凝结硬化<sup>[6]</sup>,这些都导致复合材料的抗折强度越低。当木丝的长宽比较大时,木丝自身具有较高的抗拉强度,且板材内部木丝彼此搭接交错形成交叉网状结构,有效交接点增多,增强了交接作用和互锁效应,提升了复合材料的抗折强度。

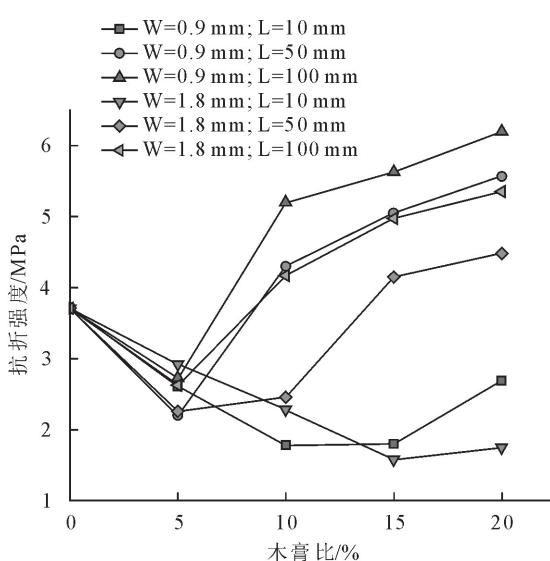


图1 木丝增强石膏复合材料的抗折强度变化

Fig. 1 The bending strength of the wood filaments reinforced gypsum composite material

由图2可以看出,当施加载荷达到最大时,没有添加木丝的试样会突然破坏断裂成两部分,说明石膏材料韧性较差。添加木丝的试样在施加最大荷载后,横截面出现较多的裂纹,但尺寸上仍能保持较好的完整性,说明木丝的添加能够显著地改善复合材料的脆性,起到增韧作用。



(a)未添加木丝的试样



(b)添加木丝的试样

图2 未添加和添加木丝组的破坏示意图

Fig. 2 The failure models of the gypsum-based composites with wood-wool

## 2.2 木丝尺寸及添加量对复合材料握螺钉力的影响

握螺钉力是衡量建筑墙体材料性能的重要指标。不同尺寸木丝下的复合材料的握螺钉力见图3。纯石膏板的握螺钉力较低,仅为136 N,而木丝的添加明显提升了板材的握螺钉力。对于木丝长度为10 mm的细(0.9±0.05)mm、粗(1.8±0.05)mm 2组复合材料而言,木膏比为5%时握螺钉力较纯石膏板分别增加了41.9%和78.7%,当木丝添加量增加到20%时,握螺钉力较纯石膏板分别提高了156.6%和193.4%。可见复合石膏板材的握螺钉力随着木丝添加量的增加有了显著改善。10、50 mm 和 100 mm 木丝组间的握螺钉力差值不大,说明木丝长度对材料的握螺钉力影响不大。

木丝增强石膏分析其原因可知,由于木丝能在石膏中形成交叉网状结构,当螺钉受力拔出时,木丝能额外提供水平方向的阻力,从而提高复合材料的握螺钉力;而且木质材料相比于石膏材料握螺钉力更大,因此木丝含量越高的板材表现出更好的握螺钉力。此外,木丝宽度越大,与螺钉的接触面积越大,较粗的木丝和螺钉的啮合作用越强,也导致板材的握螺钉力显著增强。

## 2.3 木丝尺寸及添加量对复合材料导热性能的影响

由图4可知,尺寸较小的木丝在添加量较少的情况下,板材的导热系数和对照组相比无显著差异,且木丝的尺寸对导热系数的影响不大,这是因为木丝在复合材料中所占体积分数较低,使得材料的导

热系数没有太大变化。随着各组木丝的含量不断增大,复合材料的导热系数均下降,尤其是随着木丝长度的增加,材料导热系数下降的趋势越明显。这可能是纤维长度的增加,导致复合材料内部纤维热量通道变长,热损失增加,从而使复合材料的导热系数降低。

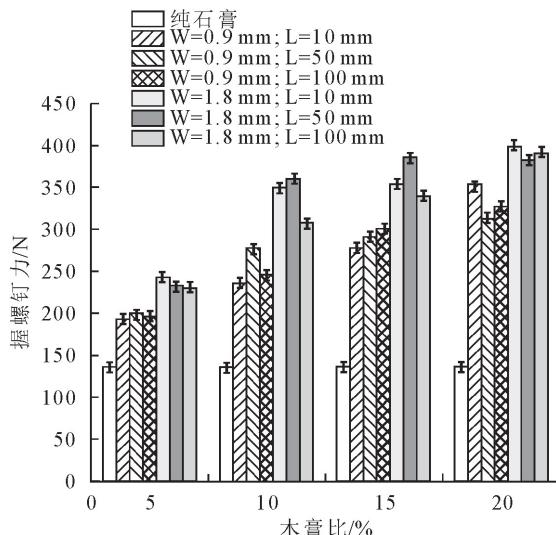


图3 木丝增强石膏复合材料的握螺钉力的变化

Fig. 3 The nail-holding ability of the wood filaments reinforced gypsum composite material

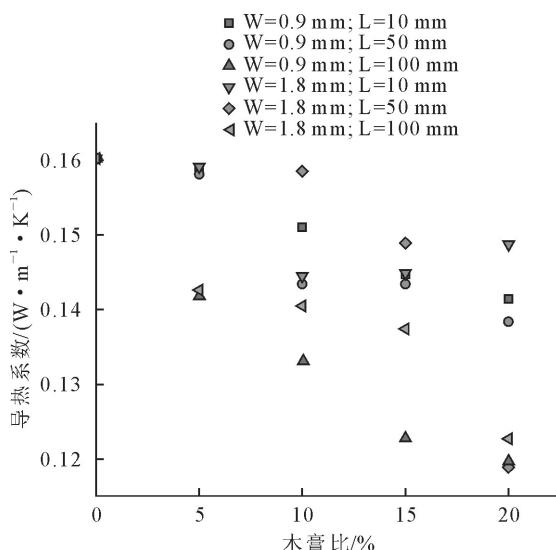


图4 木丝增强石膏复合材料的导热系数的变化

Fig. 4 The thermal conductivity of the wood filaments reinforced gypsum composite material

当复合材料中木丝的质量分数为20%、宽长比为0.018,即100 mm细木丝和50 mm粗木丝时,板材的导热系数分别为0.119 7 W/(m·K)和0.118 9 W/(m·K),均<0.25 W/(m·K),符合建筑保温材料的定义<sup>[18]</sup>。

### 3 结论与讨论

木丝长度和宽度对材料的抗折强度影响显著。

当木膏比为20%,木丝长度100 mm,宽度0.9 mm时,板材的抗折强度为6.20 MPa,与纯石膏板相比提高了67.12%。

木丝宽度对材料的握螺钉力影响显著而长度对其影响不显著。当木膏比为20%、木丝长度100 mm、宽度1.8 mm时,板材的握螺钉力为391 N,较纯石膏提高了193.4%。

木丝含量的增加对材料导热系数的降低影响显著。添加20%含量的100 mm细木丝和50 mm粗木丝时,板材的导热系数均<0.25 W/(m·K),符合建筑保温材料的定义。

在试验条件范围内,添加木丝质量分数为20%、长度为100 mm的复合石膏板材具有较好的抗折强度、握螺钉力及导热系数。所制备的木丝增强脱硫石膏板材在建筑内墙墙体材料方面具有一定的应用优势。该板材的制备可将桦木废片加工而成的木丝作为增强材料,以工业副产物脱硫石膏为无机凝胶材料,在提高传统无纸面石膏力学强度的基础上,既可以为国内脱硫石膏的循环利用和深加工提供解决思路,也为天然纤维增强石膏材料的进一步研究及在建材领域的应用提供了一定的理论依据。

### 参考文献:

- [1] LI M, WU Z, CHEN M. Preparation and properties of gypsum-based heat storage and preservation material[J]. Energy & Buildings, 2011, 43(9): 2314-2319.
- [2] 金波. 论建筑工程轻钢龙骨石膏板隔墙施工技术措施[J]. 科协论坛(下半月), 2012(2): 17-18.
- [3] 王建强, 俞日银. 轻质高强纸面石膏板的生产质量控制[J]. 新型建筑材料, 2004(5): 50-51.
- [4] 陈伟, 陈励纬, 陈盛根, 等. 冷成型钢龙骨-石膏板自攻螺钉连接低周往复荷载试验[J]. 建筑科学与工程学报, 2018, 35(6): 88-93.
- [5] CHEN W, CHEN L W, CHEN S G, et al. Low cyclic load experiment of cold-formed steel self tapping screw connection of keel-plasterboard[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(6): 88-93. (in Chinese)
- [6] ZHU C, ZHANG J, PENG J, et al. Physical and mechanical properties of gypsum-based composites reinforced with PVA and PP fibers[J]. Construction and Building Materials, 2018, 163: 695-705.
- [7] 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.
- [8] WANG W H, HOU Z Y, HAO J X, et al. Performance of gypsum board reinforced by wood fibers[J]. Journal of Forestry Engineering, 2018, 3(4): 19-24. (in Chinese)
- [9] 李扬涛, 马玉薇, 李刚, 等. 棉秸秆纤维增强脱硫石膏复合材料研究[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(3): 20-22, 63.
- [10] LI Y T, MA Y W, LI G, et al. Research on the cotton stalk fi-

- ber reinforced gypsum composite material [J]. New Building Materials, 2018, 45(3): 20-22, 63. (in Chinese)
- [8] DENG Y, FURUNO T. Study on gypsum-bonded particleboard reinforced with jute fibres [J]. Holzforschung, 2002, 56(4): 440-445.
- [9] 汤正捷, 关成, 吴商, 等. 刨花高温处理对水泥刨花板水化热和弯曲性能影响的研究 [J]. 西北林学院学报, 2019, 34(5): 195-201.
- TANG Z J, GUAN C, WU S, et al. Effects of high temperature treatment of wood chips on the hydration heat and modulus of rupture of cement particleboard [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(5): 195-201. (in Chinese)
- [10] DAI D, FAN M. Preparation of bio-composite from wood sawdust and gypsum [J]. Industrial Crops and Products, 2015, 74: 417-424.
- [11] 张杨, 马岩. 碳纤维增强木基复合材料的制备及其力学性能 [J]. 西北林学院学报, 2015, 30(6): 232-236.
- ZHANG Y, MA Y. The preparation and mechanical properties of wood-based composite materials reinforced by carbon fibre [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2015, 30(6): 232-236. (in Chinese)
- [12] 李新功, 郑霞. 石膏刨花板生产工艺简介 [J]. 林业机械与木工设备, 2001, 29(2): 30-31.
- [13] IUCOLANO F, CAPUTO D, LEBOFFE F, et al. Mechanical behavior of plaster reinforced with abaca fibers [J]. Construction & Building Materials, 2015, 99: 184-191.
- [14] NAZERIAN M, KAMYAB M. Gypsum-bonded particleboard manufactured from agricultural based material [J]. Forest Science and Practice, 2013, 15(4): 325-331.
- [15] IZAGUIRRE A, LANAS J, ALVAREZ J I. Effect of a polypropylene fibre on the behaviour of aerial lime-based mortars [J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(2): 992-1000.
- [16] 张晓滕, 母军. 新型木丝板吸声性能的试验分析 [J]. 木材工业, 2014, 28(3): 34-38.
- ZHANG X T, MU J. Evaluation of sound absorption performance of light wood wool board [J]. China Wood Industry, 2014, 28(3): 34-38. (in Chinese)
- [17] 陈燕. 石膏建筑材料 [M]. 北京: 中国建材工业出版社, 2003: 422-423.
- [18] 王寿华. 实用建筑材料学 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1988: 593-599.

## (上接第 203 页)

- [14] 王磊, 张斌, 孙明朋, 等. MUF-MF 共缩合改性树脂胶黏剂的研究 [J]. 化学与粘合, 2013, 35(5): 31-33.
- WANG L, ZHANG B, SUN M M, et al. Study on the resin adhesives modified with MUF-MF copolycondensation [J]. Chemistry and Adhesion, 2013, 35(5): 31-33. (in Chinese)
- [15] 王辉. MUF 共缩聚树脂的合成、结构及性能研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
- [16] 邹国政, 蔡家斌, 鄢志博, 等. 脲醛树脂浸渍工艺对杨木物理力学性能的影响 [J]. 木材工业, 2014, 28(4): 47-50.
- ZHOU G Z, CAI J B, FENG Z B, et al. Effect of a urea-formaldehyde resin impregnation process on physical and mechanical properties of poplar [J]. China Wood Industry, 2014, 28(4): 47-50. (in Chinese)
- [17] FURUNO T, IMAMURA Y, KAJITA H. The modification of wood by treatment with low molecular weight phenol-formaldehyde resin: a properties enhancement with neutralized phenolic-resin and resin penetration into wood cell walls [J]. Wood Science and Technology, 2004, 37(5): 349-361.
- [18] 姜小萍. 红外光谱定性解析原则 [J]. 河北北方学院学报: 社会科学版, 2001, 17(6): 56-58.
- JANG X P. About the principle of IR in the characteristics of analyses [J]. Journal of Hebei North University: Social Science Edition, 2001, 17(6): 56-58. (in Chinese)
- [19] 顾继友, 程瑞香. 采用 DSC 和 FTIR 对木材和 API 胶粘剂间反应的研究 [J]. 中国胶粘剂, 2005, 14(4): 10-14.
- GU J Y, CHENG R X. Study on gluing mechanism between wood and API adhesive by means of DSC and FTIR [J]. China Adhesive, 2005, 14(4): 10-14. (in Chinese)
- [20] WU N, XU L, ZHANG C. The influence of emulsifiers on preparation and properties of microencapsules of melamine-urea-formaldehyde resins with n-dodecanol as phase-change material [J]. Advances in Polymer Technology, 37(8) (2018) 3492-3498.
- [21] 谢序勤, 邱坚, 李君. 酚醛树脂改性处理对人工林轻木性能的影响 [J]. 木材工业, 2014, 28(3): 49-52.
- XIE X Q, QIU J, LI J. Effect of phenolic resin modification on the performance of artificial forest light wood [J]. China Wood Industry, 2014, 28(3): 49-52. (in Chinese)
- [22] MERCER A T, PIZZI A. A <sup>13</sup>C-NMR analysis method for MF and MUF resins strength and formaldehyde emission from wood particleboard. I. MUF resins [J]. Journal of Applied Polymer Science, 1996, 61(10): 1687-1696.
- [23] 李琪, 李明, 孙刚, 等. 高醚含量三聚氰胺改性脲醛树脂合成及结构特征 [J]. 化工新型材料, 2017(7): 95-97.
- LI Q, LI M, SUN G, et al. Synthesis and structure characteristics of melamine-modified urea-formaldehyde resin with high ether content [J]. New Chemical Materials, 2017(7): 95-97. (in Chinese)
- [24] 杜官本. 摩尔比对脲醛树脂初期产物结构影响的研究 [J]. 粘接, 1999, 20(3): 1-5.
- DU G B. The influence of molar ratio on the structure of urea-formaldehyde adducts [J]. Adhesing, 1999, 20(3): 1-5. (in Chinese)