

轻型木结构建筑节能墙体稳态热工性能研究

席飞¹, 阮雪君², 孙友富³

(1. 南京财经大学艺术设计学院, 江苏南京 210023; 2. 南京机电职业技术学院机械工程系, 江苏南京 211135;

3. 南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210037)

摘要: 以正交试验设计改造常规轻型木结构墙体, 探索不同内外保温材料、墙骨柱尺寸、覆面板类型与厚度等因素对墙体稳态热工性能的影响。结果表明, 使用自制秸秆砖保温材料, 夹心填充截面为 38 mm×140 mm、相距 400 mm 的墙骨柱间隙, 内外覆面板分别为 11 mm 厚定向秸秆板和石膏板时, 墙体冬季、夏季传热系数分别为 0.41、0.45 W/(m²·K), 冬夏热惰性指标达到 3.22, 可实现保温、隔热性能的同步提升, 节约建筑能耗的目的。

关键词: 轻型木结构; 节能墙体; 稳态传热; 热工性能

中图分类号: S781.37; TS63; TU111.4; TU366.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-8654 (2020) 06-0015-05

Study on Steady-State Thermal Performance of Energy-Saving Wall in Light-Frame Wood Construction

XI Fei¹, RUAN Xue-jun², SUN You-fu³

(1. College of Art & Design Nanjing University of Finance & Economics, Nanjing 210023, Jiangsu, China;

2. Department of Mechanical Engineering Nanjing Institute of Mechatronic Technology, Nanjing 211135, Jiangsu, China;

3. College of Materials Science and Engineering Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: The common light-frame wood structure wall was reformed in a laboratory. The influences of steady-state heat transfer were explored at various factors, including different insulation materials, wall stud size, and type and thickness of sheathing. The 400 mm-gap between studs was filled with lab-made straw brick as an insulation material and the sheathing panel was covered on both sides by oriented structural straw board (OSSB) and plasterboard. The heat transfer coefficient of the wall was measured at 0.41 W/(m²·K) and 0.45 W/(m²·K) in winter and summer respectively, and the thermal inertia index was 3.22. This research design can provide an energy-saving solution for the insulated light-frame wood wall construction for both winter and summer.

Key words: light-frame wood structure; energy saving wall; steady-state heat transfer; thermal performance

收稿日期: 2020-04-23; 修改日期: 2020-05-23

基金项目: 江苏省自然科学基金项目“建筑信息模型技术在传统木构民居传热机理优化与生态技术整合设计中的应用研究—以江南地区为例”(BK20190796); 江苏省社科应用研究精品工程“基于 BIM 体系的财经类院校优势学科与艺术学科交叉建设体系研究”(19SYC-133); 江苏省高校哲学社会科学研究一般项目“基于全生命周期评价的江南村落民宿生态设计传承与模块化创新策略研究”(2020SJA0256)。

作者简介: 席飞(1990—), 男, 讲师。Email: 476726084@qq.com

外墙体是建筑围护结构中面积最大的组成部分, 通过外墙体的传热损失通常会达到建筑总能耗的 30%^[1]左右, 造成大量的热损失, 影响建筑整体保温隔热节能性。因此, 提高建筑墙体的保温隔热节能性, 以达到建筑节能及室内人体舒适度要求, 一直是科研人员重要的研究课题。

轻型木结构常规墙体结构由轻质结构材木材以及轻质保温材料玻璃棉组成,平均传热系数较小,在冬季可减少室内高温气体与室外低温气体的热对流,维持室内温度;但在夏季易受太阳辐射和室外温度波动的影响,造成室内温度波动较大。现有文献主要针对木结构墙体建造技术^[1-2]、组成材料的热工参数^[3-6]、墙体的传热状态^[7-10]等进行研究分析,还有些木结构建筑墙体的保温材料综述^[11-12],但针对由石膏板、墙骨柱、玻璃棉、定向刨花板等材料组成的常规轻型木结构墙体进行节能改造的研究较少,有的改造过程中通常只针对墙体稳态热工性能中的传热系数进行优化,虽然提升了建筑冬季保温性能,但仍未解决因热惰性指标小、建筑夏季隔热性能差,而造成的冬季保温和夏季隔热的矛盾问题。

鉴于此,笔者对轻型木结构建筑节能墙体结构进行了试验研究,选择了几种不同保温材料、覆面板以及不同截面的墙骨柱,通过正交试验探究了不同材料构成对墙体稳态热工性能的影响,以期利用不同的覆面板材料和保温材料优化轻型木结构墙体模块,实现建筑墙体保温与隔热性能同步提升、节约建筑能耗的目的。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 保温材料 ① 麦秸秆砖:规格尺寸 500 mm×500 mm×140 mm,密度 0.07~0.12 g/cm³,比热容 2.01 kJ/(kg·K),导热系数 0.08 W/(m·K),由自制秸秆砖压缩装置制备。② 玻璃棉:规格尺寸 20 000 mm×1 200 mm×70 mm,密度 0.025 g/cm³,比热容 1.22 kJ/(kg·K),导热系数 0.04 W/(m·K),外购。

2) 覆面板 ① 定向刨花板(OSB):幅面尺寸 2 440 mm×1 220 mm,厚度 9、11 mm,密度为 0.7 g/cm³,比热容为 1.68 kJ/(kg·K),导热系数为 0.17 W/(m·K)。② 定向秸秆板(OSSB):幅面规格 2 440 mm×1 220 mm,厚度 9、11 mm,密度为 0.65 g/cm³,比热容为 2.51 kJ/(kg·K),导热系数 0.14 W/(m·K)。均外购。

3) 石膏板:规格尺寸为 3 000 mm×1 200 mm×11 mm,密度 1.05 g/cm³,比热容 1.05 kJ/(kg·K),导热系数 0.33 W/(m·K),外购。

4) 墙骨柱:Ⅱc级加拿大 SPF,截面尺寸为 38 mm×89 mm、38 mm×140 mm,长度均为 3 660 mm,密度为 0.5 g/cm³,比热容为 2.51 kJ/(kg·K),导热系数为 0.14~0.29 W/(m·K),外购。

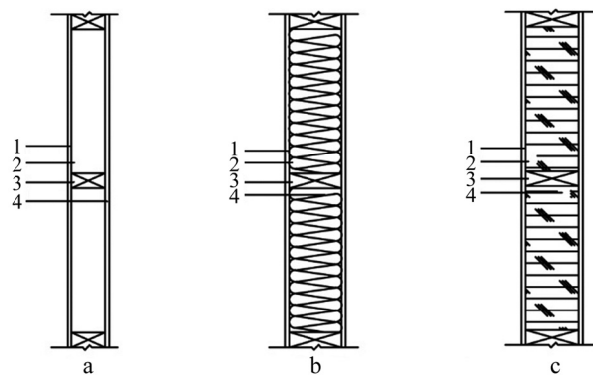
1.2 试验设备

JTRG-B 型建筑热工温度与热流自动检测仪;JTRG-B 型和 BC-25 型冷热箱及其温度控制仪,分别模拟夏季和冬季环境;热电偶、热流计等。

1.3 试验方法

1.3.1 试验设计

轻型木结构墙体构成因素较多,以外墙墙体为研究对象,依据 GB 50005—2017《木结构设计标准》设计墙体构造如图 1 所示,确定内覆面板为厚度 11 mm 的石膏板、墙骨柱间距为 400 mm,以不同保温材料和外覆面板设计 12 面不同构成的外墙体,变量因子及水平见表 1,按正交表 $L_{12}(3 \times 2^4)$ 进行试验。表中最后一个因素留作空列,用于极差分析时,估算试验误差。



注:1—OSB或OSSB;2a/b/c—空气/玻璃棉/麦秸秆砖;
3—SPF墙骨柱;4—石膏板。

图1 试验墙体构造

Fig.1 The structural diagram of testing walls

表1 试验因子与水平

Tab.1 Experimental design factors and levels

因子	水平		
	1	2	3
A 保温材料	空气	玻璃棉	麦秸秆砖
B 外覆面板类型	OSB	OSSB	
C 墙骨柱截面/mm	38×89	38×140	
D 外覆面板厚度/mm	9	11	
E 空白			

墙体的制备过程：1) 将 SPF 截断成试验框架设计的墙骨柱、顶梁板、底梁板尺寸，将内外覆面板也切割成试验框架所需尺寸。2) 利用 80 mm 普通圆钉以垂直钉入的方式，将墙骨柱与顶梁板先固定，然后用同样的方式固定墙骨柱与底梁板，形成试验墙体框架（由于冷热箱尺寸限制，每面墙体只在框架两侧和中间设置共 3 根墙骨柱，距离约为 50 mm）。3) 将 30 mm 干壁钉打入内覆面石膏板，使其与墙骨柱固定，钉子距离石膏板边缘 10 mm，板边钉间距 100 mm，板中钉间距 300 mm。4) 在墙骨柱框架之间放置保温材料。5) 将切割好的外覆面板用 50 mm 普通圆钉（位置同步步骤 3）与墙骨柱固定，覆盖墙体框架另一面。制备墙体试样规格为：长度 1 100 mm；宽度 900 mm；厚度 109、111、160、162 mm。

1.3.2 试验步骤

1) 温度设置：将制备的墙体试样放入 JTRJ-B 型和 BC-25 型冷热箱的黑色箱体中。

JTRJ-B 型冷热箱模拟夏季室内外环境，冷箱、热箱温度分别设置为 20、40 °C，墙体框架尺寸与冷热箱尺寸匹配，因此，将墙体试样直接放入并在墙体裸露处覆盖玻璃棉，防止墙体传热不均。

BC-25 型冷热箱模拟冬季室内外环境，冷箱、热箱温度分别设置为 -10、25 °C。由于冷热箱尺寸大于墙体试样尺寸，需要用聚氨酯发泡剂将试样四周密封，防止冷热箱空气对流，造成试验误差。

2) 测点布置：在墙体试样外覆面板及内覆面板的对应位置各布置 9 个热电偶，用于测试墙体冷热面温度，在距墙体 100 mm 以上的冷热箱内也各布置一个热电偶，测试箱内温度；墙体热面墙骨柱表面布置 1 个，热面保温材料填充处表面分别布置 2 个热流计，用于测试通过墙体的热流。

将热电偶、热流计与 JTRG-B 型建筑热工温度与热流自动检测仪连接，每隔 20 分钟自动记录一次检测数据。

3) 数据记录：采用控温箱-热流计法，测定墙体试样的稳态热物理性能。观察 JTRG-B 型建筑热工温度与热流自动检测仪显示的各测点温度变化情况，当冷热箱温差大于 20 °C 且温度波动小于 1%，认为墙体进入稳态传热，可记录读取数据。当记录 20 组以上稳态传热数据之后可关闭设备，试验结束。

1.3.3 性能测试

当墙体进入稳态传热 7 小时后，可得到 20 组以上墙体冷热面温度和热流计读数。按照 GB/T 13475—2008《绝热稳态传热性质的测定标定和防护热箱法》和 GB/T 10295—2008《绝热材料稳态热阻及有关特性的测定 热流计法》，计算各墙体试样的传热系数、热阻、热惰性指标等热工性能参数。

2 结果与分析

2.1 墙体传热系数及热阻

取墙骨柱表面 3 个测点和保温材料填充处表面 6 个测点的传热系数和热阻数据的平均数，为墙体试样保温材料填充处及墙骨柱处的传热系数及热阻，再通过面积加权法，计算墙体试样的平均传热系数和平均热阻值，列于表 2；极差分析结果列于表 3。

由表 3 结果可知，在模拟夏季和冬季环境试验条件下，各因素对平均传热系数影响的主次顺序均为 $A > C > B > D$ ，即保温材料类型对夏季墙体平均传热系数的影响最大，其次为墙骨柱截面尺寸，而覆面板类型和覆面板厚度对夏季墙体平均传热系数的影响较小，且较为接近。并且 4 个因素对应的 R 值均大于因素 E 即空列的 R 值（试验误差），说明各因素水平之间的交互影响作用是实际存在的，不是由试验误差造成。

表 2 墙体传热系数及热阻值

Tab.2 Heat transfer coefficient and heat resistance of testing walls

序号	夏季环境模拟试验				冬季环境模拟试验			
	传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)		R/(m ² ·K·W ⁻¹)		传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)		R/(m ² ·K·W ⁻¹)	
	K _{BW}	K _{QG}	K		K _{BW}	K _{QG}	K	
1	2.41	3.04	2.50	0.40	2.32	2.90	2.38	0.42
2	2.12	2.56	2.22	0.45	2.00	2.50	2.05	0.49
3	1.91	2.45	1.97	0.51	1.74	2.38	1.80	0.56
4	1.71	2.39	1.79	0.56	1.57	2.20	1.63	0.61
5	0.44	0.89	0.49	2.04	0.40	0.86	0.45	2.22
6	0.39	0.8	0.43	2.33	0.35	0.75	0.39	2.56
7	0.56	1.01	0.6	1.67	0.52	0.95	0.56	1.79
8	0.51	0.93	0.56	1.79	0.48	0.90	0.52	1.92
9	0.46	0.91	0.50	2.00	0.41	0.88	0.46	2.17
10	0.55	0.95	0.59	1.69	0.51	0.93	0.55	1.81
11	0.59	1.03	0.63	1.60	0.56	0.96	0.60	1.67
12	0.41	0.84	0.45	2.22	0.37	0.81	0.41	2.44

注：K_{BW}、K_{QG}、K 分别为保温材料、墙骨柱、墙体的传热系数。

表3 平均传热系数极差分析和因素排名

Tab.3 Analysis of mean heat transfer coefficient and design factors

模拟环境	因素	A	B	C	D	E
夏季	$\bar{K}_1$	2.12	1.12	1.18	1.11	1.07
	$\bar{K}_2$	0.52	1.00	0.94	1.01	1.05
	$\bar{K}_3$	0.54				
	R (极差)	1.60	0.12	0.24	0.11	0.02
	R' (折算极差)	1.664	0.209	0.417	0.191	0.035
	排名	1	3	2	4	5
冬季	$\bar{K}_1$	1.97	1.05	1.11	1.04	1.00
	$\bar{K}_2$	0.48	0.92	0.86	0.93	0.97
	$\bar{K}_3$	0.51				
	R	1.49	0.13	0.25	0.12	0.03
	R'	1.55	0.23	0.43	0.21	0.05
	排名	1	3	2	4	5

由于传热系数是望小特性,根据试验结果可判断各因素的最优水平,夏季和冬季环境均为: $A_2B_2C_2D_2$,即当用11 mm厚OSSB,墙骨柱截面规格为38 mm×140 mm且中间填充玻璃棉。

2.2 墙体热惰性指标

墙体热惰性指标D主要评价整个墙体的热稳定性,按照GB 50176—2016《民用建筑热工设计规范》计算D值,结果列于表4;极差分析结果列于表5。

表4 试验墙体热惰性指标

Tab.4 Thermal inertia index of testing walls

序号	1	2	3	4	5	6
D	0.82	0.99	1.38	1.24	2.45	2.56
序号	7	8	9	10	11	12
D	2.2	2.24	2.96	2.74	2.61	3.22

表5 热惰性指标极差分析和因素排名

Tab.5 Analysis of thermal inertia index and design factors

因素	A	B	C	D	E
$\bar{K}_1$	1.11	2.09	1.93	2.07	2.11
$\bar{K}_2$	2.36	2.15	2.30	2.17	2.12
$\bar{K}_3$	2.88				
R	1.78	0.06	0.37	0.10	0.01
R'	1.85	0.10	0.64	0.17	0.017
排名	1	4	2	3	5

由于墙体的热惰性指标由墙体各层材料的热惰性指标组成,与温度相关性低,并且冬季热量由室

内向室外传递,墙体主要发挥保温作用,即通过墙体平均传热系数的减小,热阻的提高,减少室内高温气体与室外低温气体的热对流,维持室内温度,对与墙体热传导和辐射传热相关的热惰性指标的关联较小,因此在对热惰性指标分析时无需分季节。

表5极差分析结果表明各因素对墙体热惰性指标影响的主次顺序为: $A > C > D > B$,即保温材料类型对墙体热惰性指标的影响最大,其次为墙骨柱截面尺寸,且截面尺寸的增大对于热惰性指标增强的贡献率要大于平均传热系数。但与平均传热系数的不同点在于覆面板厚度的增加对于增强墙体热惰性指标的能力要高于覆面板类型改变的影响,说明墙体组成每一层厚度的增加,都有利于墙体热惰性指标的提升。

结合热惰性指标为望大特性,得到最优水平组合为: $A_3B_2C_2D_2$,即用11 mm厚OSSB和石膏板,墙骨柱截面规格为38 mm×140 mm,墙骨柱相距400 mm且中间填充自制麦秸秆砖时,墙体的热惰性指标最高。此组合与以墙体平均传热为指标的最佳组合的差异在于,保温材料由自制麦秸秆砖代替了玻璃棉。自制麦秸秆砖的平均密度可以达到0.12 g/cm³,而玻璃棉的密度仅0.025 g/cm³,也就是说,相同体积的秸秆砖和玻璃棉,秸秆砖的重量是玻璃棉的5倍,属于相对重质的保温材料,有利于墙体热惰性指标提高和热稳定性加强,符合夏季隔热节能要求。

2.3 基于传热系数及热惰性指标的最佳组合分析

通过以上分析可知,以冬夏两季墙体的平均传热系数和平均热阻为评价指标,得出优化工艺组合为 $A_2B_2C_2D_2$;而以墙体热惰性指标来考核,则最优组合为 $A_3B_2C_2D_2$ 。两者区别仅在于保温材料,前者使用玻璃棉作为保温材料填充墙骨柱间隙,与轻型木结构常规墙体结构基本一致,虽然平均传热系数最低,但其热惰性指标较差,夏季易受太阳辐射和室外温度波动影响,导致热稳定性不足。后者 $A_3B_2C_2D_2$ 的组合,即12号墙体,使用自制麦秸秆砖作为保温材料,其传热系数与 $A_2B_2C_2D_2$ 组合墙体仅相差0.02 W/(m²·K),但热惰性指标提高了0.6,从而达成墙体传热系数和墙体热惰性指标的平衡:在冬季,墙体传热系数较小,可减少室内热空气向室外冷空气的热对流;在夏季,在热对流同样减小的前提下,因为热

惰性指标较高,可减弱室外高温墙面向室内低温墙面的热传导和辐射传热对室内温度的影响。

由此可见,使用相对重质保温材料自制麦秸秆砖,可解决墙体保温与隔热的矛盾问题,从而实现冬夏墙体保温和隔热性能同时提升,以达到减小建筑能耗,满足室内人体舒适度需求的目标。

3 结论

1) 利用正交试验设计改造轻型木结构基础墙体结构,使用自制麦秸秆砖保温材料填充截面为38 mm×140 mm、相距400 mm的墙骨柱间隙、外覆11 mm厚OSSB、内覆11 mm厚石膏板时,墙体的传热系数较小,热惰性指标较大,可实现建筑冬季保温性能和夏季隔热性能的平衡,有利于节约建筑能耗。

2) 本墙体模块在实际应用时,需根据具体气候分区进一步选择和优化,并建立模块化墙体结构体系,为其在装配式木结构建筑中的应用奠定基础。

参考文献:

- [1] 李峻宇. 夏热冬冷地区胶合木结构农房墙体构造技术研究:以张渚镇茶亭村木结构农房项目为例[D]. 郑州: 郑州大学, 2019.
- [2] 龚健. 昆山某建筑装配式木结构柱-预制保温板墙体施工技术[J]. 居舍, 2019(19): 31-32.
- [3] 杨慧君, 何恩霞, 宋怡, 李英洁, 姚利宏. 轻型木结构墙体组成材料导热系数研究[J]. 中国人造板, 2019(2): 5-9.
YANG H J, HE E X, SONG Y, LI Y J, YAO L H. Study on thermal conductivity of wood structure wall materials[J]. China Wood-Based Panels, 2019(2): 5-9.
- [4] 杨晓丽, 周定国. 麦秸秆隔热保温材料在木结构墙体中的应用[J]. 山西建筑, 2010(3): 1-2.

- YANG X L, ZHOU D G. Application of wheat straw heat insulation material in wood structure wall[J]. Shanxi Architecture, 2010(3): 1-2.
- [5] 王戈, 费本华, 徐兰英, 等. 落叶松胶合板复合墙体设计及其保温隔热性能计算[J]. 木材工业, 2007, 21(6): 1-3, 6.
WANG G, FEI B H, XU L Y, et al. Structural design and calculation of heat preservation/insulation of a composite wall made with larch plywood[J]. China Wood Industry, 2007, 21(6): 1-3, 6.
 - [6] 刘晓娜, 薛硕, 王晓欢, 等. 面板种类和芯板厚度对结构用木质保温板力学性能的影响[J]. 木材工业, 2018, 32(4): 9-13.
LIU X N, XUE S, WANG X H, et al. Effect of face panel type and core board thickness on mechanical properties of wood-based structural insulated panels[J]. China Wood Industry, 2018, 32(4): 9-13.
 - [7] 王晓欢, 费本华, 周海宾, 等. 国产轻型木结构墙体的稳态热量传递性质[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(4): 76-79.
WANG X H, FEI B H, ZHOU H B, et al. Steady-state heat transfer performance of domestic light-frame wood wall[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2010, 32(4): 76-79.
 - [8] 王晓欢, 费本华, 王永兵. 木框架外墙保温性能试验研究[J]. 木材加工机械, 2013(6): 11-15.
 - [9] 王晓欢, 费本华, 任海青, 等. 轻型木结构墙体传热数值计算与试验研究[J]. 建筑材料学报, 2011, 14(4): 517-522.
WANG X H, FEI B H, REN H Q, et al. Heat transfer calculation and experimental study of the light-frame wood wall[J]. Journal of Building Materials, 2011, 14(4): 517-522.
 - [10] 张晓凤, 孙友富, 杨茹元. 预制木质外墙挂板在建筑节能改造中的应用[J]. 木材工业, 2019, 33(2): 30-34.
ZAHNG X F, SUN Y F, YANG R Y. Application of prefabricated wooden exterior siding panels for energy saving building renovation[J]. China Wood Industry, 2019, 33(2): 30-34.
 - [11] Aditya T M I Mahlia, B Rismanchi, H M Ng, M H Hasan, H S C Metselaar, Oki Muraza, H B Aditiya. A review on insulation materials for energy conservation in buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 73: 1353-1365.
 - [12] Jan Kosny, Andi Asiz, Ian Smith, Som Shrestha, Ali Fallahi, A review of high R value wood framed and composite wood wall technologies using advanced insulation techniques[J]. Energy and Buildings, 2014, 72: 441-456.

(本文编校 向 琴)

(上接第14页)

- [3] 徐信武, 汤正捷, 杨刚, 等. 单板/HDF复合木地板的制造工艺与产品性能研究[J]. 林产工业, 2012, 39(2): 23-26.
XU X W, TANG Z J, YANG G, et al. A study on manufacture and performances of veneer/HDF composite laminate flooring[J]. China Forest Products Industry, 2012, 39(2): 23-26.
- [4] 郭秀华, 余丽萍, 吴志刚. 人造板在建筑工程中的应用探讨[J]. 绿色科技, 2019(12): 222-234.
GUO X H, YU L P, WU Z G. Discussion on the application of wood-based panel in architectural engineering[J]. Journal of Green Science and Technology, 2019(12): 222-234.
- [5] 郭文静. 人造板制造新技术及新产品开发[J]. 木材工业, 2016, 30(2): 29-32.
GUO W J. Development of new technology and new products for wood-based panels[J]. China Wood Industry, 2016, 30(2): 29-32.
- [6] SONG J, CHEN C, ZHU S, et al. Processing bulk natural wood into a high-performance structural material[J]. Nature, 2018, 554(7691):

224-228.

- [7] 唐启恒, 谭宏伟, 韦淇峰, 等. 低甲醛释放高密度纤维板的制备及性能[J]. 林业工程学报, 2019, 4(2): 26-30.
TANG Q H, TAN H W, WEI Q F, et al. Preparation of low formaldehyde emission of high-density fiberboard and its properties[J]. Journal of Forestry Engineering, 2019, 4(2): 26-30.
- [8] PHAM Tuong Lam, 王新洲, 邓玉和, 等. 废弃杨木水泥模板纤维特性及纤维板的研究[J]. 浙江农林大学学报, 2014, 31(6): 940-946.
PHAM T L, WANG X Z, DENG Y H, et al. Characteristics of recycled poplar cement formwork fiber and its fiberboard manufacturing[J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2014, 31(6): 940-946.
- [9] 余翔. 木材工业中合成树脂胶黏剂的应用研究[J]. 化工管理, 2018(15): 135.
YU X. Study on the application of synthetic resin adhesives in wood industry[J]. Chemical Enterprise Management, 2018(15): 135.

(本文编校 孟凡丹、向 琴)