

增强型阻燃发泡水泥复合板的制备及力学性能

牛二彦, 张丽芳, 梁善庆, 陈志林

(中国林科院木材工业研究所; 国家林业局木材科学与技术重点实验室, 北京 100091)

摘要: 以阻燃中密度纤维板(FR-MDF)为面板、发泡水泥板为芯板, 制备阻燃发泡水泥复合板, 研究其制备工艺及面板对复合板力学性能的增强作用。结果表明: 1) 较优工艺参数为: 芯板密度 0.38 g/cm^3 , 聚氨酯发泡胶涂胶量 90 g/m^2 , 可保证复合板的耐水性能及胶合强度达到 DB 21/T 2353-2014《泡沫混凝土板隔墙系统技术规程》要求; 2) FR-MDF贴面可全面增强发泡水泥板的侧压强度、抗弯强度、冲击韧性。

关键词: 复合板; 阻燃中密度纤维板; 发泡水泥; 耐火强度; 力学性能

中图分类号: TS653; TU525.2 文献标识码: A 文章编号: 1001-8654(2016)06-0014-05

Preparation and Mechanical Properties of Foamed Cement Composite Boards Reinforced with Fire-retardant Medium Density Fiberboard

NIU Er-yan, ZHANG Li-fang, LIANG Shan-qing, CHEN Zhi-lin

(Research Institute of Wood Industry, Chinese Academy of Forestry;

Key Lab of Wood Science and Technology of State Forestry Administration, Beijing 100091, China)

Abstract: A composite board made with fire-retardant medium density fiberboard (FR-MDF) as face layer and foamed cement as core layer was prepared by the authors. The effects of overlaying technology and the FR-MDF layer on mechanical properties of the composite board were evaluated. The results showed that: 1) When density of the core material was 0.38 g/cm^3 and polyurethane foam adhesive consumption was 90 g/m^2 , the bonding strength of the composite board could meet the requirements of DB 21/T 2353-2014; 2) Overlaying with FR-MDF could improve the overall mechanical properties of the board, including edgewise compressive strength, flexural strength and impact strength.

Key words: composite board; fire-retardant medium density fiberboard; foamed cement board; fire resistance limit; mechanical properties

发泡水泥又叫泡沫混凝土, 是将泡沫与水泥浆均匀混合, 通过现浇施工或模具成型而制成的一种含有大量封闭气孔的新型轻质保温材料^[1], 具有良好

的隔热、隔声、阻燃性能, 广泛应用于地暖、屋面、墙体的保温层等领域^[2]。但发泡水泥存在易脱粉掉渣、脆性大、强度低等缺陷, 国外多使用彩钢板贴面以改善其性能。由于这种彩钢贴面发泡水泥板密度通常高于 1.0 g/cm^3 , 水泥用量大且泡孔少, 保温性能不理想^[3-4]。因此, 研究开发低密度发泡水泥板的增强工艺十分必要。

笔者选用阻燃中密度纤维板(FR-MDF)为贴面材料, 并以普通中密度纤维板(MDF)为对照, 探

收稿日期: 2016-02-28; 修改日期: 2016-09-20

基金项目: 引进国际先进林业科学技术计划(“948”计划)项目“阻燃发泡水泥纤维材料制造关键技术引进”(2015-4-45)。

作者简介: 牛二彦(1989—), 女, 中国林科院木材工业研究所硕士研究生。

责任作者: 陈志林, 男, 中国林科院木材工业研究所研究员。

讨论贴面材料对不同厚度发泡水泥板力学强度的增强作用,并确定低密度发泡水泥复合板的制备工艺,旨在增强型发泡水泥复合板的生产及应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1) 面板 选择性能相近的FR-MDF与普通MDF作为面板,规格600 mm×300 mm×5 mm,含水率8%~9%,密度0.81 g/cm³,均外购。其中:

FR-MDF: 静曲强度 32.16 MPa, 弹性模量 4060.53 MPa; 阻燃等级 B₁。

普通 MDF: 静曲强度 33.02 MPa, 弹性模量 4120.43 MPa; 阻燃等级 B₂。

2) 芯板 三种发泡水泥板,密度分别为0.33、0.38和0.43 g/cm³,对应编号为330、380、430。含水率均为10%~12%,幅面规格600 mm×300 mm,外购。

3) 胶黏剂 三种。

① 双组份聚异氰酸酯乳液: 黏度 8 000 mPa·s, pH 值 6.0~7.0, 凝胶时间 40 min (25 ℃), 记作双组份胶, 外购;

② 水泥与白乳胶混合胶: 白乳胶与普通硅酸盐水泥以质量比 6:4 均匀混合, 黏度 8 400 mPa·s, pH 值 7.1~8.2, 凝胶时间 60 min (25 ℃), 记作水泥胶, 自制;

③ 聚氨酯发泡胶: 主要成分为二甲苯基-4, 4 二异氰酸酯, 罐装喷剂, 记作发泡胶, 外购。

1.2 试验仪器

万能力学试验机, 冲击试验机, 多功能构件耐火试验炉等。

1.3 试验方法

通过单因素试验, 探讨芯板密度、面板材料、胶种及涂胶量的影响, 并确定较优参数。试验因子水平列于表 1。

采用冷压法制备复合板, 根据前期试验结果, 冷压工艺参数设置为: 单位压力 1 MPa; 冷压时间 30 min。在此基础上, 采用优选的工艺参数制备复合板, 并测试其力学性能, 分析面板对发泡水泥板力学强度的增强作用。

每种处理工艺制板 4 张。

表 1 试验因子与水平

Tab.1 Experimental factors and levels

变量因子	变量水平	其他因子
芯板密度/(g·cm ⁻³)	0.33、0.38、0.43	-
面板材料	MDF、FR-MDF	发泡胶, 涂胶量 90 g/m ²
	水平: 1 2 3	
胶种及涂胶量/(g·m ⁻²)	双组份胶: 240、280、320 水泥胶: 240、280、320	
	聚氨酯发泡胶: 70、90、110	

1.4 性能检测

复合板制备完成陈放 24 h 后, 进行力学性能及耐火强度检测。因我国尚无增强型发泡水泥复合板性能的专用检测标准, 故参考以下标准进行。

1) 力学性能

参考 DB 21/T 2353-2014《泡沫混凝土板隔墙系统技术规程》, 测试不同密度发泡水泥板的软化系数、复合板的胶合强度和胶层的耐水性能;

参考 GB/T 1453-2005《夹层结构或芯子平压性能试验方法》、GB/T 1454-2005《夹层结构侧压性能试验方法》、GB/T 1456-2005《夹层结构弯曲性能试验方法》、GB/T 17657-1999《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》, 测试发泡水泥板和复合板的抗压强度、侧压强度、弯曲强度和冲击韧性。

2) 耐火强度

根据发泡水泥受火 0.5 h 后强度损失已趋于平稳的研究结果^[5], 测试不同密度发泡水泥板及其复合板受火 0.5 h 后的强度保存率, 以表征材料耐火强度。

具体测试方法: 将试样固定于耐火试验炉正中间, 单面受火, 参照 GB/T 9978.1-2008《建筑构件耐火试验方法 第 1 部分: 通用要求》标准升温曲线升温, 0.5 h 后取出试块, 冷却至室温并测定其抗压强度, 计算抗压强度损失率。试样尺寸 100 mm×100 mm, 每组重复 2 次。

2 结果与分析

2.1 制备工艺优选

2.1.1 芯板密度

发泡水泥存在吸水率高的缺陷, 常用软化系数, 即发泡水泥浸水前后强度的比值, 表征发泡水泥的耐水性^[6-7]。不同密度发泡水泥板的软化系数测试结果, 列于表 2。

表 2 不同密度发泡水泥板的抗压强度和软化系数

Tab.2 Compressive strength and softening coefficient of foamed cement board samples with different densities

编号	原强度/MPa	浸泡后强度/MPa	软化系数
330	1.297±0.198	1.067±0.058	0.823
380	1.491±0.035	1.307±0.131	0.877
430	1.606±0.104	1.428±0.263	0.889
DB21/T 2353-2014 抹灰面隔墙用发泡水泥			≥0.85

由表 2 结果可知, 浸水后发泡水泥板的强度均有不同程度的降低, 且密度越小时强度的降幅越大。这是因为发泡水泥板的密度越小, 其孔隙率越大, 泡孔储存的水份越多, 软化作用增强, 故强度降低越严重。

根据 DB 21/T 2353-2014 对发泡水泥软化系数≥0.85 的要求, 发泡水泥板的密度须≥0.38 g/cm³。综合考虑密度对发泡水泥自重、成本及保温性能的影响^[8], 本试验优选编号 380 (密度为 0.38 g/cm³) 的发泡水泥板作为芯板材料。

2.1.2 面板材料

研究建筑构件受火后的强度保存率, 具有重要意义。以密度 0.38 g/cm³ 的发泡水泥板为芯板, 分别采用普通 MDF 和 FR-MDF 贴面制备的复合板(编号分别为 380、380-1、380-2), 受火 0.5 h 后的强度保存率检测结果列于表 3。

表 3 不同试样的抗压强度和强度保存率

Tab.3 Compressive strength and strength preserving rate of different samples

编号	原始强度/MPa	受火 0.5 h 后强度/MPa	强度保存率/%
380	1.49±0.035	0.88±0.018	58.92
380-1	1.51±0.027	0.80±0.021	52.61
380-2	1.51±0.042	0.96±0.025	63.64

由表 3 可知, 发泡水泥板受火 0.5 h 后抗压强度明显降低, 这是因为水泥基材料在高温作用时会发生分解反应^[5]; FR-MDF 贴面复合板受火 0.5 h 后的强度保存率最高, 比普通 MDF 贴面复合板提高近 21%, 比发泡水泥板提高 8%。可见 FR-MDF 贴面对发泡水泥芯板起到了有效保护作用, 提高了发泡水泥板的耐火强度, 而普通 MDF 贴面不仅没有增强, 反而会降低发泡水泥板的耐火强度。

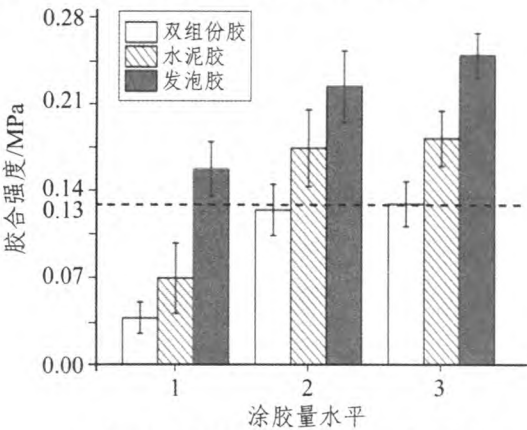
主要原因是 FR-MDF 在燃烧时形成的碳层, 阻碍热量的传递, 对发泡水泥形成保护作用, 从而提

高了强度保存率; 而普通 MDF 贴面复合板在燃烧时, MDF 燃烧放出大量的热, 加速了发泡水泥基体材料的破坏, 使其强度降低。

综上, 优选 FR-MDF 作为发泡水泥板的贴面增强材料。

2.1.3 胶种与涂胶量

采用 FR-MDF 为面层材料、密度 0.38 g/cm³ 的发泡水泥为芯板, 在不同胶种及涂胶量条件下制备复合板, 胶合强度测试结果如图 1 所示。



注: --- 为 DB 21/T 2353-2014 的最低限值。

图 1 不同胶种制备复合板的胶合强度

Fig.1 Effect of internal bonding strength of composite samples bonded with different adhesives and consumption

由图 1 可知, 3 种胶制备的复合板的胶合强度, 均随着涂胶量的增加而增大, 但强度增幅逐渐减小。这主要是因为发泡水泥板为多孔性材料, 涂胶量小时, 仅发泡水泥孔壁与 FR-MDF 接触, 接触面积较小, 因此复合板的胶合强度小; 涂胶量增大时, 胶黏剂填充到发泡水泥的泡孔中, 接触面积增大, 故胶合强度提高; 但当增加到发泡水泥的泡孔填满胶黏剂, 接触面积近于饱和, 故对胶合强度的增强作用又变弱。

DB 21/T 2353-2014 要求胶合强度≥0.13 MPa, 且破坏应发生在发泡水泥上。双组份胶涂量为 320 g/m²、水泥胶涂量为 280 g/m² 时, 复合板的胶合强度可达到该标准要求; 水泥胶的胶合强度大于双组份胶, 这是因为发泡水泥与水泥胶为同质材料, 更容易结合形成牢固的胶合界面。

聚氨酯发泡胶各种涂胶量制备复合板的胶合强度均达标。这是因为发泡胶粘结性能好, 涂胶时可形成质量极轻的泡沫, 以较小涂胶量即可覆盖整个

胶合界面，并在压力作用下，挤入发泡水泥泡孔中，形成机械啮合作用，且发泡胶的主要成分为二甲苯基-4,4 二异氰酸酯，其中异氰酸酯基（-NCO）和氨基甲酸酯基（-NHCOO-），具有较高的极性和活泼性，可与基材表面微量水分或活泼氢产生交联反应^[9-10]，因此胶合性能较优。

选择水泥胶和聚氨酯发泡胶制备的复合板进行胶层耐水性试验，胶层经 48 h 浸泡后的胶合强度检测结果列于表 4。

表 4 不同胶种及涂胶量时胶层的耐水性能
Tab.4 Water-resistant properties of the glue layer with different adhesives and consumption

涂胶量水平	胶种	
	水泥胶	聚氨酯发泡胶
A	0.010	0.120±0.008
B	0.035±0.006	0.140±0.009
C	0.043±0.015	0.163±0.010

由于水泥胶中的白乳胶为水溶性胶，耐水性差，导致水泥胶整体耐水性差。聚氨酯发泡胶为非水溶性胶，具有较好的耐水性，当涂胶量为 90 g/m² 时，复合板的胶合强度已能达到 DB 21/T 2353-2014 的要求。考虑耗胶成本，确定 90 g/m² 为较优涂胶量。

2.2 复合板的力学强度

采用上述优选的单因素工艺参数，以密度 0.38 g/cm³、厚度分别为 40、60、80 mm 的发泡水泥为芯板制备复合板，发泡水泥素板及复合板的力学性能测试结果如图 2 所示。

由图 2a 可知，复合板相对发泡水泥板，抗压强度提高。这主要是因为复合板的抗压强度取决于最弱部分发泡水泥的抗压强度，但因表层贴面使复合板受压面的平整度提高，故其抗压强度略高于发泡水泥板^[11]。

图 2b 中，复合板较发泡水泥板的侧压强度有大幅提高，但随着厚度的增大，增幅逐渐减小，不同厚度的复合板分别提高约 216%、100%、95%。主要原因是复合板侧压测试时，压缩力大部分由面板承受，破坏表现为面板的屈曲破坏，发泡水泥板起分隔面板、增强面板刚度的作用。随着芯层发泡水泥板厚度的增大，两面板间距离变大，面板就更容易发生屈曲破坏，故侧压强度逐渐减小^[12]。

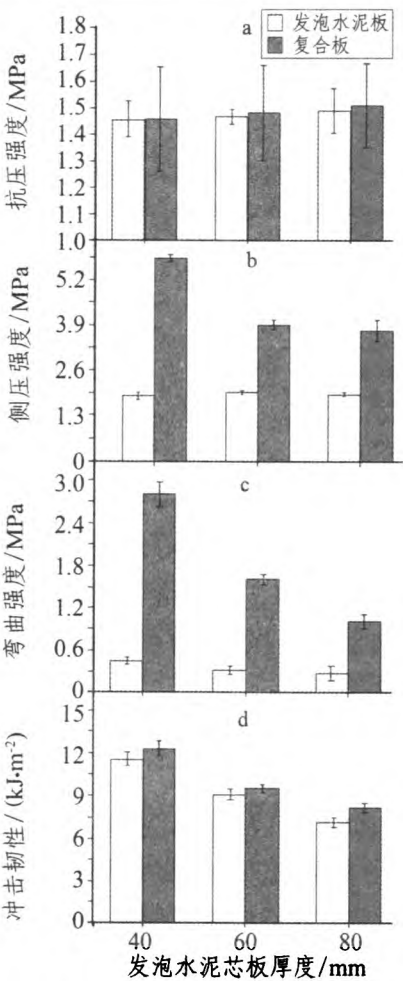


图 2 发泡水泥板和复合板的力学性能
Fig.2 Mechanical properties of foamed cement and composite board samples

由图 2c 可知，FR-MDF 贴面显著提高了发泡水泥板的弯曲强度，复合板作为夹芯结构材料整体承受外力，轻而厚的芯板增加了整体结构的转动惯量，从而使结构可以有效抵抗弯曲变形^[13]。复合板 MOR 测试时，首先是芯板发生剪切破坏，然后芯板的变形引起胶层开裂，复合板失去结构整体性，强度迅速降低，最后发生面板折断破坏，弯曲强度降为零。复合板的弯曲强度随着发泡水泥厚度的增加而减小，主要原因是发泡水泥厚度越大，越容易发生剪切破坏。

由图 2d 可知，FR-MDF 贴面使发泡水泥冲击韧性提高约 6%、5%、15%。冲击韧性是表征材料的变脆倾向，发泡水泥板为脆性材料，FR-MDF 贴面使其脆性降低，韧性增高，但随着发泡水泥板厚度增加，FR-MDF 所占比重极为有限，故复合板整体冲击韧性降低，向变脆方向发展。

表 5 列出 90 mm 厚 FR-MDF 贴面复合板, 与芯板密度相近的纤维水泥板贴面复合板^[14]的力学性能的比较结果。

表 5 两种增强水泥复合板的力学性能比较

Tab.5 Comparison of performance between two kinds of cement composite samples with different surface materials

板种	芯板密度/ (g·cm ⁻³)	厚度/ mm	侧压强度/ MPa	弯曲强度/ MPa
FR-MDF 贴面 发泡水泥板	0.38	90	3.73	1.01
纤维水泥板增强 发泡水泥复合板 ^[14]	0.30	100	3.40	0.50
	0.50	100	4.20	0.90

由表 5 结果可知两种材料增强水泥复合板的力学性能相当, 且 FR-MDF 贴面复合板的弯曲强度更高, 说明以 FR-MDF 为增强材料制备增强型发泡水泥复合板是可行的。

3 结论

1) 以 FR-MDF 为面板、密度 0.38 g/cm³ 的发泡水泥为芯板, 聚氨酯发泡胶为胶黏剂, 涂胶量 90 g/m² 时, 复合板具有较好的耐火性能, 受火 0.5 h 后的强度保存率近 64%, 较普通 MDF 增强复合板的提高约 21%, 较发泡水泥板提高 8%。

2) FR-MDF 贴面可显著提高发泡水泥板的力学强度, 且提高幅度与发泡水泥芯板的厚度有关。芯板厚度为 80 mm 时, 复合板的侧压强度、抗弯强度、冲击韧性, 较发泡水泥板分别提高约 95%、261%和 15%。

3) 不同厚度复合板的其他物理性能指标, 如隔热、隔声性能等, 有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 徐建军, 高子栋, 赵大军. 高强度轻质泡沫混凝土在复合夹芯墙板中的应用研究[J]. 新型墙材, 2015 (1): 50-52.
- [2] 陈瑞芸. 发泡水泥复合板材料力学性能试验研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [3] Isabel B Valente, Paulo J S Cruz. Experimental analysis of shear connection between steel and lightweight concrete[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65 (10-11): 1954-1963.
- [4] Md Azree Othuman Mydin, Y C Wang. Structural performance of lightweight steel-foamed concrete-steel composite walling system under compression[J]. Thin-Walled Structures, 2011, 49 (1): 66-76.
- [5] 于水军, 张鹏飞, 赵红. 火灾条件下轻质泡沫混凝土抗压强度衰减规律研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 13 (5): 198-200.
- [6] 杜传伟, 李国忠. 发泡水泥保温材料的耐水性能研究[J]. 砖瓦, 2013 (3): 56-58.
- [7] 贺彬, 黄海鲲, 杨江金. 轻质泡沫混凝土的吸水率研究[J]. 墙材革新与建筑节能, 2007 (12): 24-28.
- [8] 常僊宇, 张金花, 王小安, 等. 常见保温材料密度与导热系数关系的研究[J]. 工程质量, 2009, 27 (2): 66-70.
- [9] 陆冬贞. 我国聚氨酯胶粘剂发展概况与展望[J]. 聚氨酯, 2007 (5): 68-78.
- [10] 顾继友. 胶粘剂与涂料[M]. 北京: 中国林业出版社, 1999: 194-200.
- [11] 张龙飞, 牛二彦, 陈志林, 等. 增强型酚醛泡沫板的性能[J]. 木材工业, 2015, 29 (3): 22-25.
- [12] 张龙飞. 酚醛泡沫夹芯复合板制备及性能研究[D]. 北京: 中国林科院, 2015.
- [13] Flores-Johnso E A, Li Q M. Structural behavior of composite sandwich panels with plain and fiber-reinforced foamed concrete cores and corrugated steel faces[J]. Composite Structures, 2012, 94 (5): 1555-1563.
- [14] 于蕾, 张君, 王振波, 等. 纤维水泥板-泡沫混凝土复合块体力学性能研究[J]. 新型建筑材料, 2015, 42 (7): 48-52.

(责任编辑 向 琴)

行业简讯

FMC CHINA 2016 圆满落幕

2016 年 9 月 11 日, 历时 4 天的第 22 届中国国际家具生产设备及原辅材料展览会 (FMC China 2016), 于上海新国际博览中心完美谢幕。本届展会 FMC 全体移师新国际, 材料部分阔别多年后与家具展在新国际博览中心重新聚首。木工机械等板块与 3 500 家家家具制造商同台, 实现了上下游产业链的无缝对接, 满足了来自 158 个国家和 119 975 人次海内外观众不同层次的需求。以产业优势布局家具业, 汇聚一站式家具上下游资源, 呈上一场行业盛筵。

同期的 FMC Premium 2016 (FMP) 精品展为家具制造提供精良的材料配件, 汇聚行业中的龙头品牌和高端展品, 今年有 28 家美国当地的木材公司组团参展, 相比去年美国展团面积扩大了 15%。

2017 年 FMC CHINA 将全面调整升级。展会中文名更改为“中国家具高端制造展”, 主题色将由原来标识性的橙色改为蓝色。以崭新的姿态于上海新国际博览中心, 与第 23 届中国国际家具展、中国国际家具配件及材料精品展同期同地举办。