新型稻壳砂浆轻质节能复合墙板

王 英，陈 睿，闫 凯，郑文忠

（哈尔滨工业大学 土木工程学院，150090 哈尔滨）

摘 要：为了有效降低建筑能耗，提供适用于建筑领域的节能型墙体材料和密闭性好的围护结构，研制了可作为墙体材料的轻质稻壳砂浆，通过试验研究了该轻质稻壳砂浆的强度、密度、导热性能和抗冻性等物理力学性能．将轻质稻壳砂浆与钢筋和岩棉板复合成稻壳砂浆轻质节能复合墙板，研究了稻壳砂浆轻质节能复合外墙板的隔声和保温等物理性能，以及耐火极限和力学性能，试验结果表明，稻壳砂浆轻质节能复合墙板具有良好的耐火、隔声和保温性能，能够满足相关规范和标准对建筑材料物理力学性能的要求．给出稻壳砂浆复合墙板的设计方法和构造措施，对此类型复合墙板经济效益进行了分析．

关键词：稻壳砂浆复合墙板；耐火极限；隔声性能；保温性能

中图分类号：TU525.2 **文献标志码**：A **文章编号**：0367－6234(2012)10－0013－05

Rice-hull mortar lightweight composite wall panel

WANG Ying, CHEN Rui, YAN Kai, ZHENG Wen-zhong

(School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, 150090 Harbin, China)

Abstract: To efficiently reduce building energy wasting, and to provide the energy conservation material and good airtightness enclosure to building field, rice-hull mortar is researched and developed as a material for wall. The strength, density, thermal conductivity and freezing resistance are studied by experiments. The rice-hull mortar lightweight composite wall panel is composed by compositing rice-hull mortar, steel bar and rock wool panel, and the fire resistance, and the sound insulation and heat-insulating properties are studied. The experimental result shows that this wall panel has good properties in fire resistance, sound insulation and heat-insulating, it can satisfy the related code for physical and mechanical properties. The design method and structural measures of rice-hull mortar lightweight composite wall panel are put forward, and the economic benefit of the wall panel is analyzed.

Key words: rice-hull mortar composite wall panel; fire resistance; sound insulation; heat-insulating property

稻壳砂浆轻质节能复合墙板是以钢筋和稻壳砂浆为板材骨架，与具有隔音、保温功效的岩棉板复合而成．稻壳是农副产品，常用作燃料或废弃物处理，污染环境且浪费能源．为此以稻壳、普通硅酸盐水泥、砂、水为原材料，加入一定量的外加剂，研制了轻质高强、保温隔声的稻壳砂浆．考察了该复合墙板的保温性能、耐火性能以及隔声性能，在国家相关标准的基础上，给出了稻壳砂浆轻质节能复合墙板的适用范围．提出了分户墙板以及外墙板设计方法和构造措施，以确保使用阶段该复合墙板满足承载力及变形要求．

1 墙板主要材料

1.1 稻壳砂浆

目前种植水稻的国家超过75个，每年水稻生产总量约为5亿吨，我国的稻谷生产量居首位，近5年的年产量约2亿吨，稻壳年产量约4千万吨，占世界总产量的30%以上[1]．因此，稻壳是一种量大面广价格低廉的可再生资源．

收稿日期：2011－07－21．

基金项目：国家教育部长江学者奖励计划资助(2009－37)；黑龙江省自然科学基金资助项目(E200916)；哈尔滨工业大学“985工程”优秀科技创新团队建设项目(2011)．

作者简介：王 英(1968—)，女，博士，副教授；
郑文忠(1965—)，男，博士生导师，长江学者特聘教授．

通信作者：郑文忠，zhengwenzhong@hit.edu.cn．

稻壳是木质纤维素材料,其成分为纤维素(约占40%),木质素(约占20%),五碳糖聚合物(约占20%,主要为半纤维素),灰分(约占20%),以及较少含量的粗脂肪、粗蛋白等有机物. 其中 SiO_2 分布形式为网络状,作用相当于钢筋骨架,纤维素将骨架包裹其中,稻壳结构见图1. 稻壳的高灰分含量及其微观结构使稻壳具有孔隙率大、重量轻、保温性能好及耐腐蚀能力强的特性. 稻壳的自然堆积密度为83~160 kg/m^3,导热系数为0.084~0.209 W/(m·K). 此外,稻壳不仅具有良好的韧性,还具有一定的强度,且稻壳颗粒均匀,粒度适中,湿润后体积不膨胀,易于压实,有利于拌和均匀和提高混合料的密实度[2].

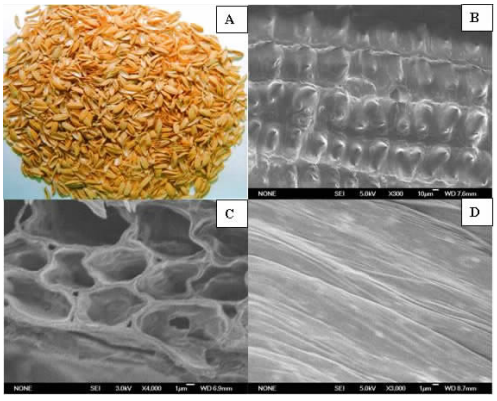

图1 稻壳结构

目前,我国对稻壳利用水平比较低,农村地区稻壳除作燃料之外,几乎都作为废物处理,既占用土地资源,又污染了环境. 针对这一问题,研制开发了由水泥、砂、粉煤灰、稻壳、水和高效减水剂拌制而成的稻壳砂浆,并对4种配合比的稻壳砂浆进行物理力学性能测试. 4种稻壳砂浆质量配合比见表1.

表1 稻壳保温砂浆配合比

编号	水泥	工程砂	粉煤灰	稻壳
A	1	1.10	0	0.13
B	1	1.10	0	0.20
C	1	0.55	0.55	0.20
D	1	0.55	0.55	0.20

注:试件D添加聚乙烯醇界面改性剂;所有试件砂浆均掺加高效减水剂,质量为水泥的0.5%.

按照JGJ70—90《建筑砂浆基本性能试验方法》、JGJ144—2004《外墙外保温工程技术规程》、JGJ149—2003《膨胀聚苯板薄抹灰外墙保温系统》和JG/T169—2005《建筑隔墙用轻质条板》对稻壳砂浆物理力学性能进行试验,表2为试验测得的稻壳砂浆各项物理力学性能. 普通水泥材料的密度为3 000 kg/m^3,稻壳砂浆的密度约为水泥的1/2,稻壳的加入使水泥材料的密度大幅度降低. 与水泥材料相比,稻壳砂浆的抗压强度和抗折强度均有一定的提高,试件A、C、D的抗压强度均大于20 MPa,满足规范对承重砂浆抗压强度的要求.

表2 稻壳砂浆物理力学性能

试件	抗折强度/MPa	抗压强度/MPa	烘干体积密度/(kg·m^{-3})	含水率/%	软化系数	常温导热系数/W·(m·K)$^{-1}$	抗冻性(单面冻融循环)-20~20 ℃10次
A	4.95	21.20	1 733	3.1	0.92	0.394	
B	4.14	14.13	1 467	3.5	0.89	0.233	表面无裂纹、
C	4.49	20.60	1 633	3.4	0.89	0.380	龟裂、剥落现象
D	5.27	24.09	1 650	3.6	0.91	0.415	

稻壳砂浆的导热系数为0.9 W/(m·K),水泥材料导热系数为1.8~3.0 W/(m·K),普通混凝土1.51 W/(m·K),普通红砖0.81 W/(m·K),可见稻壳砂浆的导热系数低于常用墙体材料. 与普通墙体材料相比,稻壳砂浆具有较好的保温性能.

1.2 岩棉板

岩棉是以玄武岩或辉绿岩为主要原料,掺加一定质量的补助料,经高温熔融和离心工艺制成的人造无机纤维,主要成分为 SiO_2、Al_2O_3、CaO_2、MgO_2 以及 Fe_2O_3. 与普通保温材料相比,岩棉具有容重轻、导热系数小、不燃烧、防火无毒、化学性能稳定等优点. 在建筑领域,岩棉可作为建筑物外保温材料、内隔墙隔声填充材料以及室内吊顶吸声材料. 表3给出了岩棉板基本物理性能指标[3].

表3 岩棉板的物理性能指标

密度/(kg•m^{-3})	导热系数/(W•(m•K)$^{-1}$)(平均温度70 ℃)	有机物含量/%	燃烧性能	热荷重收缩温度/℃
40~80	≤0.044	≤4.0	不燃材料	≥500
81~100				
101~160	≤0.043			≥600
161~300	≤0.044			

2 外墙板性能

2.1 耐火极限

《建筑设计防火规范》以及《高层民用建筑设计防火规范》强制性条文针对墙体不同耐火等级提出耐火极限和燃烧性能2项规定,火灾下结构构件在满足耐火极限的同时,应符合规范对燃烧性能的规定[4-5].

外墙板试件尺寸为3 270 mm×3 270 mm×

250 mm，由两块稻壳砂浆轻质复合墙板拼装而成. 墙体试件自背火面至向火面的断面依次为 1 层 25 mm 轻质稻壳保温砂浆、1 层 60 mm 岩棉、1 层 80 mm 空气层、1 层 60 mm 岩棉板以及 1 层 25 mm轻质稻壳保温砂浆，如图 2 所示. 为使墙板具有较好的整体力学性能，采用设置冷拔钢丝以及镀锌电焊网等措施进行加固，并配置聚苯板条作为隔断.

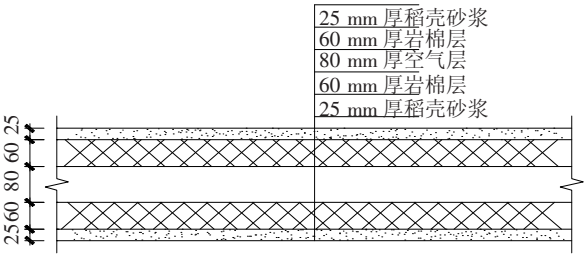

图 2　外墙板构造

外墙板耐火极限试验按照 GB/T9978—1999《建筑构件耐火试验方法》进行，在墙体中部共埋设了 8 个热电偶，见图 3. 外墙板耐火极限试验时间为 2 h. 当试验进行到 2h 时，试件背火面最高单点温升为 30.6 ℃，最高平均温升为 20.8 ℃；墙体没有出现宽度 >6 mm 的贯穿裂缝. 由试验结果可知，墙体试件保持较好的完整性和隔热性，墙体试件耐火极限 >2.0 h.

（a）外墙板试件　　（b）高温下试件破坏形式

图 3　外墙板抗火试验

由耐火试验结果可知：(1) 从燃烧性能角度分析，稻壳砂浆轻质节能复合保温墙板应视为非燃烧体或者不燃烧体. (2) 厚度为 250 mm 的此类墙板耐火极限 >2.0 h. 按现行规范的规定，稻壳砂浆轻质节能复合保温墙板适用于 9 层及 9 层以下的住宅，单层、多层以及高层工业建筑，耐火等级为一级非承重外墙.

2.2　外墙板隔声性能

声音遇到障碍物时，部分声能被障碍物反射，部分声能被障碍物吸收，剩余部分声能则通过障碍物辐射到相邻空间，入射声能包括透射声能，其数值大于透射声能. 由障碍物引起声能降低的现象称为隔声[6]. 为评价围护结构隔声性能优劣，常采用考虑隔声频率特性曲线隔声低谷与人主观感受的隔声效果相符的单值评价量[7]，称为计权隔声量，用 R_w 表示，单位为 dB.

稻壳砂浆轻质节能复合外墙板的隔声性能试验依据 JG/T169—2005《建筑隔墙用轻质条板》进行. 试件尺寸为 2 500 mm ×1 800 mm ×250 mm，2 块试件的空气声隔声量检测值均达到 51 dB. 可见该类墙板的计权隔声量满足住宅、学校和医院建筑一级隔声标准，以及旅馆建筑特技隔声标准，可作为围护构件应用于对隔声量有相应要求的建筑物中.

2.3　外墙板保温性能

稻壳砂浆轻质节能复合外墙板的保温性能，通过对 1 块外观尺寸为 4 200 mm ×3 000 mm × 250 mm 的外墙板进行热工计算，并考虑外墙板周边钢筋混凝土梁和柱的热桥效应的影响，得到该墙板的加权平均热阻为 2.04 （m^2 · K）/W，导热系数为 0.490 W/（m^2 · K）.

为实际测定稻壳砂浆外墙体结构传热系数，制作了 1 500 mm ×1 500 mm ×250 mm 试件，进行导热系数试验，测得试件导热系数为 0.434 W/（m^2 · K）. 由 JGJ26—95《民用建筑节能设计标准（采暖居住建筑部分）》的规定可知，外墙导热系数不应大于 0.52 W/（m^2 · K）. 故此类墙板的导热系数较低，可满足规范对导热系数限值的要求.

2.4　外墙板其他物理性能

依据 JG/T169—2005《建筑隔墙用轻质条板》的规定，对 5 块标准稻壳砂浆轻质节能复合外墙板试件的面密度、抗冲击性能和含水率等性能进行试验研究. 取试验结果的平均值，稻壳砂浆轻质节能复合外墙板的各项物理力学性能指标见表 4.

表 4　外墙板各项物理力学性能

检测结果与标准	面密度/（kg · m^{-2}）	抗冲击性能/J	含水率/%	干燥收缩值/（mm · m^{-1}）	吸水量（24 h）/（g · m^{-2}）	不透水性（浸水 2 h）	吊挂力/N	抗冻融性（−20 ~ 20 ℃ 冻融 50 次）	抗弯荷载，板自重倍数
检测结果	85	达到 10J 级要求	4.5	0.27	184	面板内侧无水珠渗透	1 000 N 无破坏	表面无裂纹，空鼓，起泡和剥离现象	3.0
标准要求	≤90	10	≤10	≤0.35	≤350	面板内侧无水珠渗透	≥1 000	表面无裂纹，空鼓，起泡和剥离现象	≥2.0

3 稻壳砂浆轻质节能复合墙板结构设计

稻壳砂浆轻质节能复合外墙板与分户墙板由于在建筑中布设位置及其承受荷载不同，应分别对框架与墙板连接构造以及两类墙板结构进行设计，确保该类墙板在外荷载作用下具有足够的承载力和刚度[8].

3.1 外墙板结构

依据框架结构实际层高和实际柱距，对外墙板尺寸分割，其长度应取为实际柱距，高度取为实际层高. 当柱距 >6 m 时，可采用相邻两柱间设置 2 块外墙板的方式. 将凹槽设置于墙板端部以形成工艺柱，以便连接相邻外墙板. 外墙板的分割见图 4.

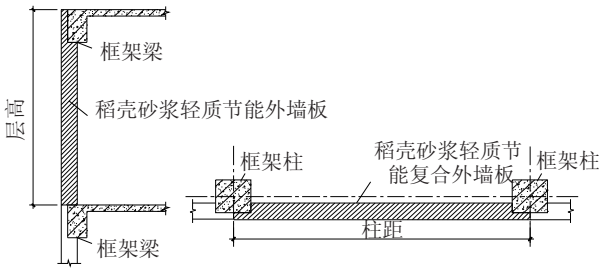

图 4 外墙板的分割

沿板长度和高度方向均布设贯通板厚度的稻壳砂浆筋肋，肋宽 50 mm，稻壳砂浆筋肋作为主要受力部件承担墙板自重以及外荷载. 筋肋内部沿水平和竖直方向布置钢筋，两个方向钢筋交点采用点焊连接，以形成钢筋网片. 墙板外侧和内侧均布设钢筋网片，两层钢筋网片采用斜向钢筋作为腹杆的方式连接，形成由两层钢筋网片和斜向钢筋腹杆组成的三维钢筋网架. 外墙板的构造与图 2 相同，依靠相互正交的竖直筋肋和水平筋肋承受风荷载及自重，故需对筋肋内的钢筋进行配筋计算，计算方法与普通混凝土板相同.

安装施工过程中，外墙板与框架结构可按如下连接方式：外墙板底部的水平筋肋与每根竖直筋肋相交处设置两块预埋铁件. 外墙板安装就位时，其中一块预埋铁件坐落在楼板上，与楼板上的预埋件可靠焊接连接；另一块预埋铁板坐落在下层外墙板水平筋肋上，对二者进行可靠焊接连接.

外墙板与框架梁间可采用锚固钢筋连接的方式，锚固钢筋设置于外墙板梁模槽及柱模槽边缘的水平筋肋和竖直筋肋上. 施工过程中，在浇筑框架梁柱混凝土前，先将外墙板固定就位，然后安装梁柱构件的模板，锚固钢筋伸入梁柱构件的模板中，浇筑混凝土使外墙板与框架结构形成统一整体. 图 5 和图 6 为外墙板与框架梁柱的连接.

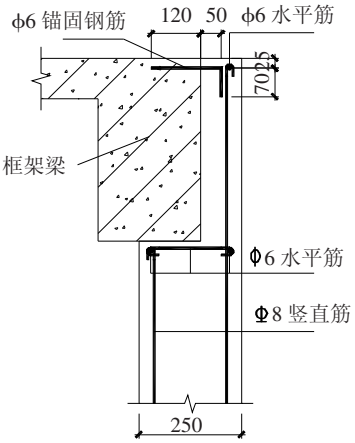

图 5 外墙板与框架梁连接方式

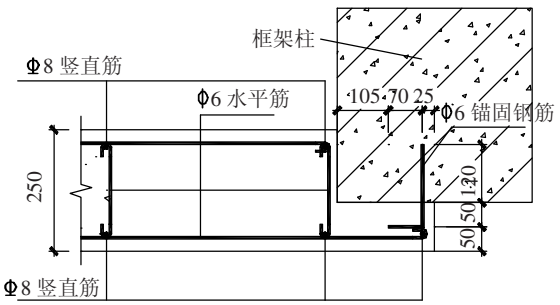

图 6 外墙板与框架柱连接方式

3.2 分户墙板结构

稻壳砂浆轻质节能复合分户墙板作为建筑的分隔构件，其尺寸划分方法与外墙板类似，外形尺寸依据框架结构实际层高以及实际相邻框架柱的间距分块，墙板长度取为实际柱间净距，高度取为楼面至梁底面的净高. 图 7 为分户墙板在框架结构中的划分.

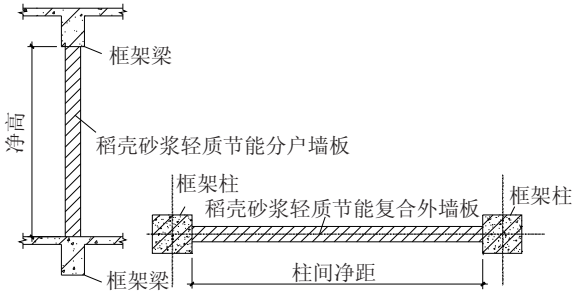

图 7 分户墙板在框架中的划分

稻壳砂浆轻质节能复合分户墙板板度取为 200 mm，沿板厚度方向由内到外依次设置空气间层（厚度为 30 mm）、岩棉板层（厚度为 60 mm）以及稻壳砂浆层（厚度为 25 mm）. 图 8 为沿板厚度方向材料层的分布.

在使用阶段分户墙板不承担风荷载，只承担自重荷载以及一定的分户墙板外表面装修荷载. 有计算分析可知，外墙板板格内配置镀锌钢丝网 ϕ2@50 mm × 50 mm，即可满足设计风荷载作用下外墙板承载力以及变形验算，与外墙板相比，分

户墙板承担的荷载较小，故分户墙板的板格内镀锌电焊网尺寸可适当放大，取为 ϕ2@60 mm × 60 mm.

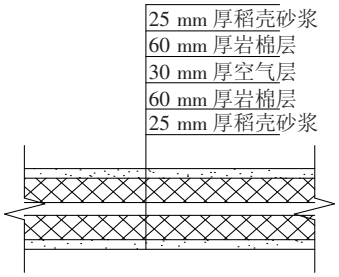

图 8　分户墙板断面构造

分户墙板与框架梁柱可采用预埋件可靠焊接连接的形式，将预埋件设置于分户墙板的四边筋肋相交处，施工安装过程中，先将分户墙板吊装就位，在楼板相应位置埋设预埋件，采用可靠焊接连接. 分户墙板周边的框架梁柱拆模后，在框架梁柱设置预埋件，与分户墙板上相应位置的预埋件焊接连接，完成分户墙板的安装. 图 9 为分户墙板与楼板、框架梁柱的连接.

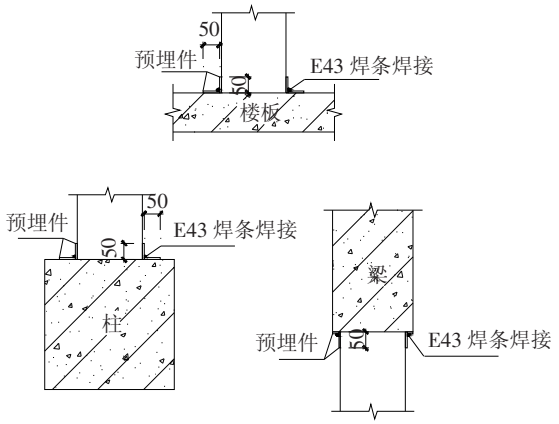

图 9　分户墙板与楼板、框架梁柱的连接

4　效益分析

稻壳砂浆轻质节能复合外墙板每平方米的生产成本为 138.76 元，以建筑面积同为 216 m^2 的房间为例，将传统红砖墙和稻壳砂浆轻质节能复合外墙板的造价进行比较，见表 5.

表 5　新型墙板与传统红砖墙工程造价比较

墙体类型	建筑面积/ m^2	使用面积/ m^2	使用面积造价/（元 · m^{-2}）	墙体造价/（元 · m^{-2}）
红砖（厚 50 cm）	216	187	311.53	367.63
新型墙体（厚 25 cm）	216	201.25	221.91	299.09

由表 5 可见，采用稻壳砂浆轻质节能复合外墙板时，建筑使用面积比采用传统红砖墙增加了 6.6%，而每平方米使用面积造价比传统红砖墙造价降低了 28.8%，每平方米墙体造价比红砖墙体造价降低 18.5%. 因此，使用稻壳砂浆轻质节能复合外墙板比采用传统红砖具有更客观的经济效益和社会效益.

5　结　语

稻壳砂浆抗压强度较高，导热系数小，保温性能好，可视为物理力学性能良好的轻质保温材料. 将轻质稻壳砂浆与钢筋和岩棉板复合成稻壳砂浆轻质节能复合墙板，研究了稻壳砂浆轻质节能复合外墙板的隔声和保温等物理性能，以及耐火极限和力学性能，试验结果表明，稻壳砂浆轻质节能复合墙板具有良好的耐火、隔声和保温性能，能够满足相关规范标准对建筑材料物理力学性能的要求，满足住宅、学校和医院建筑的一级隔声标准要求，耐火极限及燃烧性能满足相关防火设计规范的要求，适用于 9 层及 9 层以下的住宅，单层、多层以及高层工业建筑，耐火等级为一级的非承重外墙.

参考文献：

[1] 任素霞. 稻壳资源的综合利用研究[D]. 长春：吉林大学，2009.

[2] 宋长友，黄振利，陈丹林，等. 岩棉外墙外保温系统技术研究与应用[J]. 建筑科学，2008，24(2)：84－85.

[3] 中国国家标准化管理委员会. GB/T11835—2007 绝热用岩棉、矿渣棉及其制品[S]. 北京：中国标准出版社，2007：3－6.

[4] 冯葆纯，胡小媛，慕苏庆，等. 复合保温墙体的耐火问题[J]. 墙材革新与建筑节能，2002，20(7)：39－43.

[5] ELINEA A，SALMON D C，TADROS M K，*et al.* A new structurally and thermally efficient precast sandwich panel system[J]. PCI Journal，1994，39(4)：90－10.

[6] 王海生. 浅谈轻质墙体隔声性能存在的问题及对策[J]. 声频工程，2009，33(8)：11－12.

[7] 张树燕. 轻质墙体隔声性能研究[D]. 西安：西安建筑科技大学，2009.

[8] BENAYOUNE A，SAMAD A，TRIKHA D N，*et al.* Flexural behaviour of precast concrete sandwich composite panel-experimental and theoretical investigations[J]. Construction and Building Materials，2008，22(4)：580－592.

（**编辑**　赵丽莹）