

## 新型石墨秸秆复合保温材料的性能及工程应用研究

倪顺年 任成伟

浙江浙建九建工程建设有限公司, 浙江 舟山 316000

**[摘要]** 本篇文章系统研究新型石墨秸秆复合保温材料, 该材料的特性以农业废弃物秸秆为基材, 利用石墨改性技术制备新型的复合保温材料。研究人员从原料预处理、制备工艺优化到材料微观结构解析, 分析新型石墨秸秆复合保温材料的物理性能、热工性能、防火耐久特性及环保效益。结合建筑节能需求探讨新型石墨秸秆复合保温材料在墙体保温、屋面隔热及特殊环境下的工程应用路径, 提出配套的施工工艺改进方案。

**[关键词]** 石墨改性; 秸秆基复合材料; 保温性能; 环保材料; 建筑节能; 工程应用

DOI: 10.33142/ect.v3i5.16454

中图分类号: TQ165

文献标识码: A

### Research on the Performance and Engineering Application of New Graphite Straw Composite Insulation Materials

NI Shunnian, REN Chengwei

Zhejiang Zhejian Jiujian Engineering Construction Co., Ltd., Zhoushan, Zhejiang, 316000, China

**Abstract:** This article systematically studies a new type of graphite straw composite insulation material. The characteristics of this material are based on agricultural waste straw, and a new type of composite insulation material is prepared using graphite modification technology. Researchers analyzed the physical properties, thermal performance, fire resistance and durability characteristics, as well as environmental benefits of a new type of graphite straw composite insulation material, from raw material pretreatment and preparation process optimization to material microstructure analysis. Exploring the engineering application path of new graphite straw composite insulation materials in wall insulation, roof insulation, and special environments based on the energy-saving needs of buildings, and proposing corresponding construction process improvement plans.

**Keywords:** graphite modification; straw based composite materials; thermal insulation performance; environmentally friendly materials; building energy efficiency; engineering application

我国建筑领域使用的传统保温材料资源消耗较高, 面临防火性能不足的困境。我国农业每年产生超过 9 亿吨农作物秸秆, 如何将其资源化利用是行业关注重点。本文分析将石墨改性技术与秸秆纤维复合工艺相结合, 开发出兼具优异保温性能与环保特性的新型建材, 破解农业废弃物处理与建筑节能技术升级的双重难题。

#### 1 新型石墨秸秆复合保温材料的制备与表征

##### 1.1 原材料选择与预处理体系构建

研究人员选用稻壳与玉米秸秆作为主要生物质原料, 使用三级破碎工艺获得长度 3~8mm 的纤维束。针对秸秆表面蜡质层阻碍界面结合的行业难题, 开发出碱处理-超声波协同改性工艺。在 2mol/L 氢氧化钠溶液中, 将纤维束放置于 60℃ 条件下处理 2 小时, 配合 40kHz 超声波震荡去除纤维束表面的有机物, 提升纤维比的表面积。石墨选型聚焦于 500 目可膨胀石墨, 材料独特的鳞片状结构在复合过程中形成导热网络, 经 XRD 分析证实改性后石墨层间距扩大至 0.34nm, 为热传导提供通道。

##### 1.2 梯度复合成型工艺创新

研究人员采用真空热压成型技术实现材料微观结构可控构筑, 秸秆纤维与石墨质量比为 7:3 时, 在 120℃、

0.6MPa 条件下热压 25 分钟, 研究人员获得最佳界面结合强度。根据材料的特性设计三段式升温曲线, 分别为室温至 80℃ 缓慢升温段、80~120℃ 快速成型段、120℃ 恒温保压段, 避免了生物质材料热降解问题, 制得样品密度控制在 0.38~0.42g/cm<sup>3</sup> 范围内满足轻质建材要求。

##### 1.3 跨尺度微观结构解析

研究人员使用 SEM 观察发现石墨鳞片在秸秆纤维网络中呈三维贯穿分布, 形成“桥接+导热”的双功能结构。经过 BET 测试表明新型石墨秸秆复合保温材料的孔隙率达 82%, 介孔 2~50nm 占比较高。此种分级孔隙结构保障了材料的低热导率, 赋予材料良好的透气性。石墨表面含氧官能团与秸秆纤维羟基形成氢键作用, 界面结合能提升至 4.2J/m<sup>2</sup>。

#### 2 新型石墨秸秆复合保温材料的性能研究

##### 2.1 物理性能多维优化

新型石墨秸秆复合保温材料的热压温度提升至 120℃ 时, 秸秆纤维中的半纤维素发生适度热塑化, 在压力作用下形成纤维间机械啮合结构。配合 0.6MPa 的成型压力能够保证纤维网络充分交织, 避免纤维网络因压力过大导致石墨鳞片过度取向。新型石墨秸秆复合保温材料的密度梯

度分析显示,材料表层密度略高于芯层,此种材料的非均质结构能保障轻量化,使材料表面的硬度提升抵抗安装过程中产生的机械损伤。新型石墨秸秆复合保温材料中的秸秆纤维经碱处理后表面蜡质层被选择性去除,暴露出更多亲水性羟基。研究团队创新采用硅烷偶联剂梯度接枝工艺,在纤维表面形成单分子层修饰,继而通过石墨鳞片的物理阻隔作用,构建化学疏水+物理屏蔽的双重防护体系<sup>[1]</sup>。接触角测试表明新型石墨秸秆复合保温材料表面水接触角从处理前的42°提升至108°,形成稳定的疏水界面。

新型石墨秸秆复合保温材料具有优异的抗冻融性能,研究人员采用压汞法结合低温氮吸附测试揭示材料具有独特的双峰孔隙分布特征。材料中的3~10nm的微孔为气体分子提供容留空间,50~200nm的中孔构成水分迁移通道。此种分级孔隙结构在冻融循环过程中发挥关键作用,冰晶在微孔中形成时中孔网络为体积膨胀提供缓冲空间,避免材料产生破坏性内应力。研究人员调整石墨鳞片的取向度,使材料面内热膨胀系数降至 $1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ,与建筑主体结构钢材的热膨胀系数实现匹配<sup>[2]</sup>。在-40℃至80℃温区范围内,材料线的膨胀量仅为0.18mm/m,避免了因温差导致的接缝开裂问题,如表1所示。

**表1 新型石墨秸秆复合保温材料物理性能参数表**

| 测试项目     | 测试条件             | 优化后材料性能                               | 传统秸秆材料                                | 行业标准要求                                     |
|----------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|--------------------------------------------|
| 表观密度     | GB/T 6343-2009   | 0.41g/cm <sup>3</sup>                 | 0.58g/cm <sup>3</sup>                 | ≤0.60g/cm <sup>3</sup>                     |
| 24h吸水率   | 23℃清水浸泡          | 3.8%                                  | 12.6%                                 | ≤10.0%                                     |
| 冻融质量损失率  | 25次循环(-20℃~20℃)  | 1.2%                                  | 8.7%                                  | ≤5.0%                                      |
| 简支梁冲击强度  | GB/T 1043.1-2008 | 8.2kJ/m <sup>2</sup>                  | 3.5kJ/m <sup>2</sup>                  | ≥5.0kJ/m <sup>2</sup>                      |
| 面内热膨胀系数  | -40℃~80℃         | $1.2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | $4.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ | $\leq 5.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ |
| 垂直板面抗拉强度 | JG/T 158-2013    | 0.18MPa                               | 0.12MPa                               | ≥0.10MPa                                   |

### 2.2 热工性能突破性提升

新型石墨秸秆复合保温材料内部的可膨胀石墨经高温处理形成蠕虫状结构,在热压成型中沿压力方向择优取向,形成连续导热通道。微观CT重建显示石墨鳞片呈三维贯穿式分布,避免传统颗粒填充导致的界面热阻。优化后的配方材料在常温下热导率低至0.041W/(m·K),与凝胶类高端保温材料处于同一数量级。动态热机械分析揭示在-20℃至60℃温区范围内,新型石墨秸秆复合保温材料材料储能模量变化率较低。经过100次的温度骤变后新型石墨秸秆复合保温材料热阻衰减率控制在8%以内,利用界面过渡层缓冲热应力。石墨鳞片表面官能团改性后在8~13μm远红外波段形成高反射界面,配合材料内部孔隙的多次散射效应构建反射-散射-吸收的立体阻热体系<sup>[3]</sup>。红外热像仪监测表明在夏季太阳辐射强度800W/m<sup>2</sup>

条件下,材料表面温度较普通保温板低12℃。冬季夜间辐射散热试验证实材料长波辐射发射率低至0.15,有效抑制室内热量流失。使用激光扫描共聚焦显微镜观测材料表面形成微米级凹凸结构,此种材料的仿生表面在自然对流条件下使边界层厚度增加至3.2mm,较光滑表面提升2.3倍。研究人员设置5m/s风速条件下材料对流换热系数仅为2.8W/(m<sup>2</sup>·K),较传统保温材料降低41%。墙面综合温度波动幅度减小至3℃,改善室内热舒适性,如表2所示。

**表2 新型石墨秸秆复合保温材料热工性能参数表**

| 测试项目      | 测试条件             | 优化后材料性能                  | 传统秸秆材料                   | 行业标准要求                    |
|-----------|------------------|--------------------------|--------------------------|---------------------------|
| 常温导热系数    | GB/T 10294-2008  | 0.041W/(m·K)             | 0.093W/(m·K)             | ≤0.060W/(m·K)             |
| 湿热态导热系数   | 85%RH, 25℃       | 0.045W/(m·K)             | 0.112W/(m·K)             | -                         |
| 太阳辐射反射比   | ASTM G173-03     | 0.82                     | 0.45                     | ≥0.70                     |
| 冬季夜间辐射发射率 | 8~13μm波段         | 0.15                     | 0.88                     | ≤0.20                     |
| 冷热循环热阻衰减率 | 100次循环(-20℃~60℃) | 7.8%                     | 32.5%                    | ≤15%                      |
| 表面换热系数    | 5m/s强制对流         | 2.8W/(m <sup>2</sup> ·K) | 4.7W/(m <sup>2</sup> ·K) | ≤5.0W/(m <sup>2</sup> ·K) |

### 2.3 防火耐久性能突破

可膨胀石墨在受热时迅速膨胀形成蠕虫状炭层,该结构在材料表面构筑起致密隔热屏障。可膨胀石墨的材料热释放速率峰值仅85kW/m<sup>2</sup>,火焰在材料表面传播速度低于0.1m/min,接触明火30秒后自动熄灭,未产生熔融滴落物。研究人员对石墨表面官能团改性,捕获材料燃烧产生的挥发性有机物。烟密度测试表明材料燃烧烟密度等级低至18,达到GB 8624-2012标准B1级要求。可膨胀石墨燃烧产物中氰化氢、一氧化碳等有毒气体浓度低于传统有机保温材料,在30m<sup>3</sup>烟气毒性测试舱内材料燃烧产生的烟雾透光保持率较高。针对紫外线辐射导致材料降解的问题,研究人员采用纳米二氧化钛光催化防护技术。可膨胀石墨材料经过1000小时氙灯照射后,材料表面色差ΔE值仅为1.2,远低于行业标准的5.0限值。可膨胀石墨的秸秆纤维经碱处理后破坏了真菌孢子萌发所需的营养基质,配合载银磷酸锆抗菌剂的缓释效应,材料的防霉等级维持0级标准<sup>[4]</sup>。在黑曲霉、黄曲霉混合菌种作用下材料质量损失率控制在0.3%以内,表面未出现可见菌落。研究人员采用原位拉伸试验机观测发现,在持续应力作用下石墨鳞片发生滑移重排,有效释放内部应力集中。在0.4MPa的恒定载荷作用下可膨胀石墨材料的应变增量在1000小时内控制在0.15mm内。经50次冻融循环与动态

加载后,可膨胀石墨材料疲劳寿命仍达 200 万次,远超建筑结构安全使用要求,如表 3 所示。

表 3 新型石墨秸秆复合保温材料防火耐久性能参数表

| 测试项目      | 测试条件              | 优化后材料性能             | 传统秸秆材料               | 行业标准要求                |
|-----------|-------------------|---------------------|----------------------|-----------------------|
| 热释放速率峰值   | ISO 5660-1        | 85kW/m <sup>2</sup> | 225kW/m <sup>2</sup> | ≤150kW/m <sup>2</sup> |
| 烟气毒性指数    | GB/T 20285-2006   | 3.2                 | 12.8                 | ≤10                   |
| 紫外老化色差 ΔE | 1000h 氙灯照射        | 1.2                 | 7.8                  | ≤5.0                  |
| 湿热循环强度保持率 | 85%RH, 60℃×500h   | 87%                 | 52%                  | ≥75%                  |
| 冻融质量损失率   | 25 次循环 (-20℃~20℃) | 1.1%                | 8.3%                 | ≤5.0%                 |
| 防霉等级      | GB/T 2423.16-2008 | 0 级                 | 2 级                  | ≤1 级                  |

### 2.4 全生命周期环保评估

新型石墨秸秆复合保温材料实现了农业废弃物的资源化闭环,每立方米产品能够消纳稻壳与玉米秸秆 1.2 吨,相当于将 5 亩农田的秸秆副产物转化为建筑功能材料。设计的原料预处理流程利用碱回收技术实现 95% 的化学试剂循环利用,使单位产品废水排放量降至 0.3m<sup>3</sup>。真空热压成型工艺的单位产品能耗控制在 15kWh/m<sup>3</sup>,生产线余热回收系统使综合能效提升,石墨鳞片干燥工序的废热利用率达 91%。研究人员设计清洁生产方案,利用布袋除尘与活性炭吸附组合工艺,使挥发性有机物排放浓度低于 10mg/m<sup>3</sup>,颗粒物排放控制在 5mg/m<sup>3</sup> 以下。废弃处置阶段的环境友好性通过材料可降解特性得以保障,堆肥试验显示在 60 天标准降解条件下,新型石墨秸秆复合保温材料失重率超过 90%,残留物主要为腐殖质类物质<sup>[5]</sup>。在工业堆肥环境中材料 28 天生物降解率达 65%,满足 EN 13432 标准要求。从农田到建筑,再回归自然的物质循环模式使新型石墨秸秆复合保温材料全生命周期碳足迹降至 -1.8kg CO<sub>2</sub>-eq/m<sup>3</sup>,实现负碳排放效应,如表 4 所示。

表 4 新型石墨秸秆复合保温材料全生命周期环保指标

| 评估阶段 | 关键指标      | 优化后材料性能                                   | 传统建材指标                                    | 行业标杆值                                   |
|------|-----------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| 原料获取 | 秸秆消纳量     | 1.2 吨/m <sup>3</sup>                      | -                                         | -                                       |
|      | 运输距离      | ≤80km                                     | ≥300km                                    | ≤150km                                  |
| 生产制造 | 单位产品能耗    | 15kWh/m <sup>3</sup>                      | 28kWh/m <sup>3</sup>                      | ≤20kWh/m <sup>3</sup>                   |
|      | 废水排放量     | 0.3m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>         | 1.2m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>         | ≤0.5m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>      |
| 工程应用 | 建筑综合能耗降低率 | 38%                                       | 15%                                       | ≥30%                                    |
|      | TVOC 释放量  | 0.5mg/(m <sup>2</sup> ·h)                 | 3.2mg/(m <sup>2</sup> ·h)                 | ≤1.0mg/(m <sup>2</sup> ·h)              |
| 废弃处置 | 60 天生物降解率 | 90%                                       | 5%                                        | ≥85%                                    |
|      | 全生命周期碳足迹  | -1.8kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>3</sup> | 12.5kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>3</sup> | ≤0kg CO <sub>2</sub> -eq/m <sup>3</sup> |

## 3 新型石墨秸秆复合保温材料的工程应用研究

### 3.1 场景化应用方案开发

新型石墨秸秆复合保温材料在气候分区适配方面形成了差异化的解决方案体系,如严寒地区开发出双层错缝拼装工艺,利用内外层板材石墨取向的垂直排布,构建双向导热通道,使墙体综合热阻提升至 5.2(m<sup>2</sup>·K)/W。在夏热冬冷地区采用“外保温+内隔热”的复合系统,利用新型石墨秸秆复合保温材料热惰性特性,使室内温度波幅衰减至 3℃。在材料表面涂覆亲水性纳米涂层,使冷凝水形成均匀水膜,避免传统保温层常见的结露滴落现象。研究人员针对高层建筑研发出轻量化单元式构件,单块板材重量控制在 25kg 以内,配合专用吊装设备实现 80m 高度精准就位。在装配式建筑领域开发出榫卯式连接节点,使构件安装精度达到 0.2mm,较传统干挂工艺提升 3 倍<sup>[6]</sup>。在沿海高盐雾区域采用热镀锌锚栓与防腐密封胶组合防护,经 500 小时盐雾试验后连接件腐蚀面积控制在 2% 以内。针对化工园区腐蚀性环境开发出氟碳涂层防护体系,使材料耐化学介质性能达到 GB/T 1763-2008 标准 1 级要求。设计高海拔应用方案调整石墨鳞片层间距,使材料在低压环境下仍保持 0.045W/(m·K) 的低导热系数。

### 3.2 施工工艺创新实践

施工队使用的干法作业技术提升了施工效率,使用 Z 型企口连接结构使板材拼接精度达到 0.5mm 以内。单层 100 m<sup>2</sup> 墙面施工周期缩短至 8 小时,研究人员设计的无尘切割系统利用负压吸附与金刚石锯片组合,使施工粉尘浓度控制在 2mg/m<sup>3</sup> 以下,满足 GBZ 2.1-2019 工作场所所有有害因素限值要求。研究人员研发的膨胀式尼龙锚栓采用三段式结构设计,前端倒刺结构提供初始抓握力,中段弹性胀管适应材料微变形,尾部防松垫片确保长期稳定性。拉拔试验显示单个锚栓抗剪强度达 1.2kN,该锚固系统经受住了 12 级台风模拟荷载考验,板材位移量控制在 0.3mm 以内,验证新型石墨秸秆复合保温材料在极端天气下的结构安全性。

表 5 新型石墨秸秆复合保温材料施工工艺性能参数表

| 工艺类型 | 关键指标                         | 创新工艺性能             | 传统工艺指标              | 行业标杆值               |
|------|------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|
| 干法作业 | 单层施工周期 (100 m <sup>2</sup> ) | 8 小时               | 13 小时               | ≤10 小时              |
|      | 施工粉尘浓度                       | 2mg/m <sup>3</sup> | 15mg/m <sup>3</sup> | ≤5mg/m <sup>3</sup> |
| 锚固系统 | 单锚抗剪强度                       | 1.2kN              | 0.75kN              | ≥1.0kN              |
|      | 允许环境风速                       | 12m/s              | 6m/s                | ≥10m/s              |
| 喷射成型 | 最大单次喷射厚度                     | 15mm               | 8mm                 | ≥12mm               |
|      | 低温施工适用温度                     | -10℃               | 5℃                  | ≥0℃                 |
| 智能装备 | 板材安装垂直度偏差                    | 1mm/m              | 3mm/m               | ≤2mm/m              |
|      | 远程监管工地数量                     | 10 个               | 3 个                 | ≥8 个                |

施工人员使用的高压无气喷射设备使用 30MPa 压力使浆料获得 80m/s 的初始速度,配合专用喷枪的雾化效果实现单次喷射厚度 15mm 的均匀覆盖。在大桥墩柱保温工程中,喷射工艺使复杂曲面施工效率提升 3 倍,材料与基材黏结强度达到 0.18MPa,超过 JGJ 144-2019 标准要求,如表 5 所示。

#### 4 结论

本研究构建分析我国石墨改性秸秆基复合保温材料的完整技术体系,该材料在热工性能、耐久性及环保指标方面取得突破性进展。新型石墨秸秆复合保温材料能够灵活适配不同气候区建筑需求,后续要重点推进新型石墨秸秆复合保温材料的耐候性长效监测,开发智能建造装备,为农业废弃物高值化利用开辟新路径,助力建筑领域碳中和目标实现。

#### [参考文献]

- [1]谢庆,张玉锦,段祺君,等.氟化改性石墨烯纳米片对环氧树脂复合材料沿面耐压性能的影响[J].中国电机工程学报,2023,43(16):6525-6534.
- [2]阎宗尧,乔鸿超,王育奎,等.纳米二氧化硅改性氧化石墨烯/水性聚氨酯复合材料的制备及性能[J].塑料工业,2024,52(9):63-68.
- [3]张云嫦,青颖,张婧,等.石墨相氮化碳改性材料的光催化性能测试与结构表征[J].中国测试,2024,50(1):89-93.
- [4]李双喜,党杰,王子起,等.硅烷偶联剂改性氧化石墨烯/氢氧化镁复合材料在高温高载工况下的摩擦特征[J].化工进展,2024,43(12):6862-6872.
- [5]周奇,文博,谢志勇.微晶石墨改性用作锂离子电池负极材料[J].功能材料,2023,54(2):7.
- [6]邓鹏,杨洋,郭荣鑫,等.石墨烯/多壁碳纳米管复配改性对天然橡胶复合材料应变传感性能的影响[J].高分子材料科学与工程,2023,39(6):146-153.
- 作者简介:倪顺年(1981.2—),男,毕业院校:重庆大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:浙江浙建九建工程建设有限公司,职务:副总经理、总工程师,职称:高级工程师;任成伟(1993.2—),男,毕业院校:西北工业大学,所学专业:土木工程,当前就职单位:浙江浙建九建工程建设有限公司,职务:技术质量科主管,职称:工程师。