

中国·南京

2022年度科学报告会



# 高性能麦秸石膏复合材料研发及应用

报告人：岳孔

完成单位：南京工业大学

二〇二二年十二月

# 目录



南京工业大学  
NANJING TECH  
UNIVERSITY

一

研究背景

二

研究思路

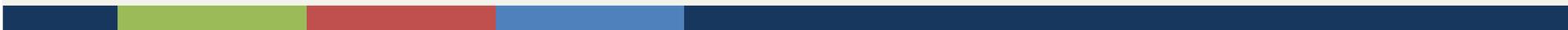
三

研究内容

四

研究结论

# 第一部分：研究背景





# 生物质建筑材料与结构发展意义

## 我国建筑业现状：

- 连续**11年**世界上200m以上高层建筑竣工面积最多；
- 钢材、水泥超全球**1/2**，建筑业碳排放占比超**四成**。



世界最大的单体曲线形钢结构—国家体育场



上海中心632m



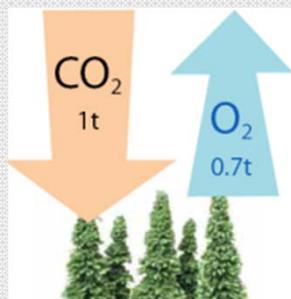
资源过度消耗导致环境污染加剧

## 生物质建材

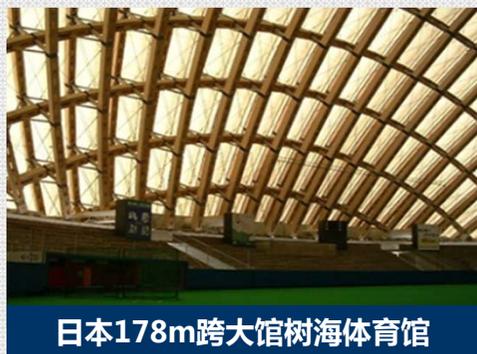
- 我国古代建筑以木结构为代表，是中华民族的文化瑰宝！
- 现代木结构规模化应用是助力双碳目标实现的重要路径！
- 木结构高质量发展是实现乡村振兴战略目标的有力措施！

## 可持续结构

- 木材是唯一可再生建材。每生长1m<sup>3</sup>材积，净吸收1吨CO<sub>2</sub>(木材生长是**美化环境**和**固碳**的过程)。
- 木材保温隔热、调节室内环境、有益健康；木结构**绿色生态**、**健康宜居**、**工业化程度高**。



木材固碳释氧



日本178m跨大馆树海体育馆



加拿大18层宿舍楼



应县木塔  
67.3m,1056年



北京故宫-世界最大木结构建筑群



## 发展生物质建材需要解决的问题：**资源**

**整体情况：**■ 2019年我国木材消耗2.04亿m<sup>3</sup>，其中进口1.14亿m<sup>3</sup>，对外依存度达**56%**；国产木材供应达9025万m<sup>3</sup>，占比**44%**；

**外部环境：**■ 森林大火、病虫害，环保因素，逐步禁限伐，供应**难度增加**；

**内部因素：**■ 1998年长江和黄河上中游天然林限伐；2000年“天保”工程；2014年东北林区天然林禁伐；2016年我国**全面停止天然林商业性采伐**。我国人工林面积占林地总面积的**36%**，占全球人工林总面积的33%，居全球首位；

**解决措施：**■ 我国大规模发展木结构建筑，近期以进口木材为主、国产木材为辅；长期应坚持**国产森林资源**为主，积极开展**农作物资源**的利用。



2019年9月澳洲森林大火



1998年长江嫩江松花江洪灾



速生丰产林工程的木材资源



秸秆建材化利用率极低



## 发展生物质建材需要解决的问题：关键技术

- 木材可燃，易成为**火灾**发展和蔓延的导火索，燃烧释放烟和热，助长火势；
- 多高层和大跨木结构难以实施主动防火措施，**火灾**时疏散和扑救难度高；
- 装配式木结构部件多为集成式，地震后引发的**火灾**次生灾害是潜在隐患；
- **抗火**性能关键技术是木结构在我国推广应用的瓶颈因素。



日本冲绳那霸市首里城



法国巴黎圣母院



重庆黔江濯水古镇风雨廊桥



绵竹灵官楼



挪威80m木结构建筑

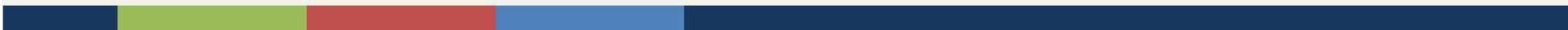


山东蓬莱6层企业木结构研发中心



加拿大温哥华里士满奥林匹克速滑馆

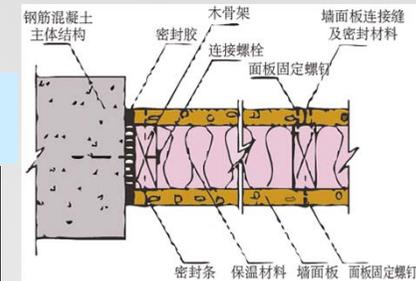
# 第二部分：研究思路



# 我国相关标准规范

- ✓ 研发基于**国产速生材、农作物秸秆**的高性能**结构材料**，是产品基础；
- ✓ 开展材料**阻燃、增强**研究，为结构耐火抗震性能提升提供技术支持。

**木结构墙体**  
(石膏板、木基结构板)



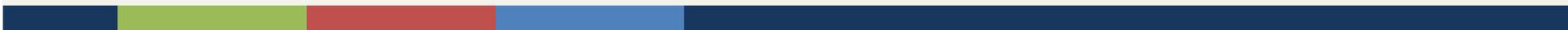
## 木结构建筑构件燃烧性能和耐火极限

Combustion behavior and fire endurance of structural wood-based elements

构件名称	GB 50016-2014 GB 50005-2017	GB/T 51226- 2017	GB 50016-2014(2022年送审稿)		
	1-3层	4-5层	I级	II级	III级
防火墙	不燃性3.00	不燃性3.00	不燃性3.00	不燃性3.00	不燃性3.00
承重墙	难燃性1.00	难燃性2.00	难燃性2.00	难燃性1.00	难燃性0.50
非承重外墙	难燃性0.75	难燃性1.00	难燃性1.00	难燃性0.75	可燃性—
电梯井的墙	不燃性1.00	不燃性1.50	不燃性1.00	不燃性1.00	难燃性0.50
楼梯间和前室墙、住宅建筑单元之间的墙和分户墙	难燃性1.00	难燃性2.00	难燃性2.50	难燃性1.00	难燃性0.50
疏散走道两侧的隔墙	难燃性0.75	难燃性1.00	难燃性1.00	难燃性0.75	难燃性0.25
房间隔墙	难燃性0.50	难燃性0.50	难燃性0.75	难燃性0.50	难燃性0.25
承重柱	可燃性1.00	难燃性2.00	可燃性2.50	可燃性1.00	可燃性1.00
梁	可燃性1.00	难燃性2.00	可燃性2.00	可燃性1.00	可燃性1.00
楼板	难燃性0.75	难燃性1.00	难燃性1.50	难燃性0.75	可燃性
屋顶承重构件	可燃性0.50	难燃性0.50	可燃性1.00	可燃性0.50	可燃性
疏散楼梯	难燃性0.50	难燃性1.00	难燃性1.50	难燃性0.50	可燃性
吊顶	难燃性0.15	难燃性0.25	难燃性0.25	难燃性0.15	可燃性

**覆面板(石膏板、木基结构板)是轻型木结构建筑耐火抗震性能的决定性因素。**

# 第三部分：研究内容





# 创新了木基石膏复合材料制备技术， 揭示了复合材料高强耐火性能机理。



传统石膏板力学性能低



地震次生火灾隐患高

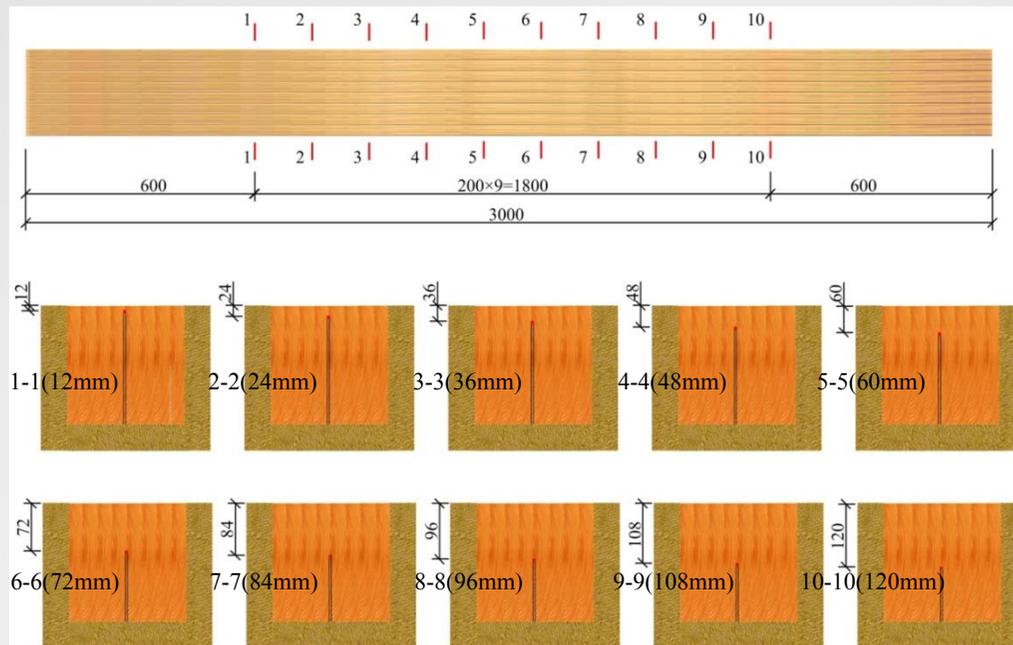
# 结构用木基石膏复合材料(IGP)研发

■ 阐明了不同树种对胶合木构件抗火性能的影响，为结构板材制备合理选材提供了依据。

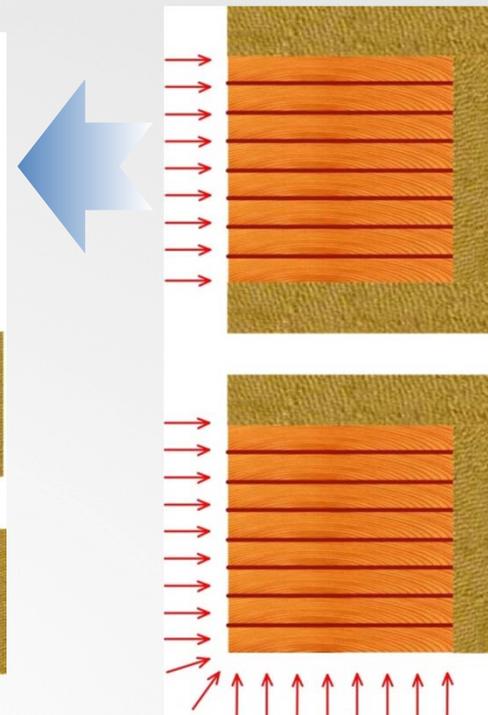
- 条件：ISO 834标准升温曲线；
- 对象：24根250mm×250mm×3m全尺寸胶合木柱。

胶合木构件用材基本材性

性能指标	杉木	云杉	铁杉	杨木	花旗松	落叶松
密度 $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	345	426	471	545	523	710
含水率/%	14.4	13.5	12.3	13.8	14.6	14.8
强度等级	C18	C22	C24	C30	C40	C45



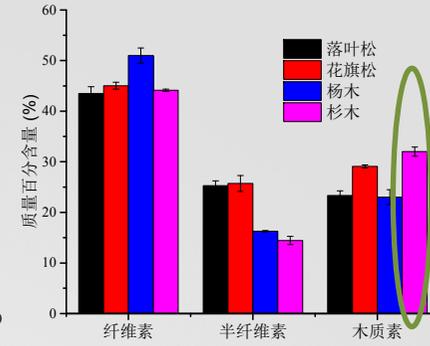
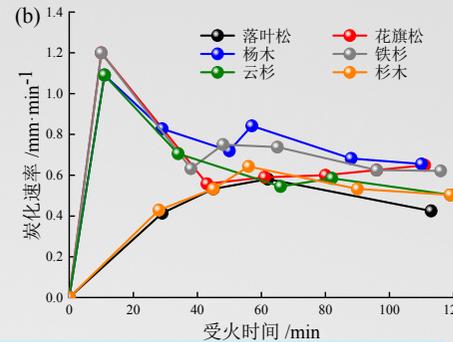
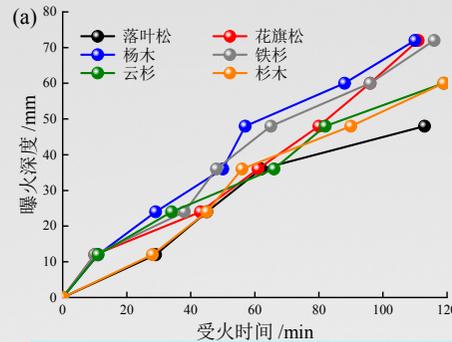
单面受火木柱温度测点布置图



单面(a)和相邻两面受火(b)木柱截面

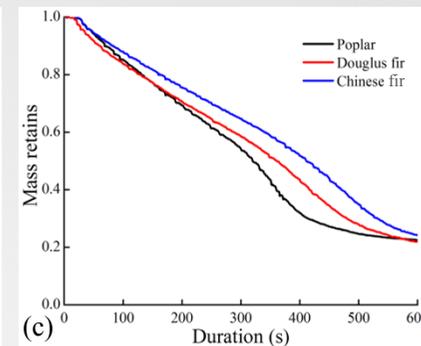
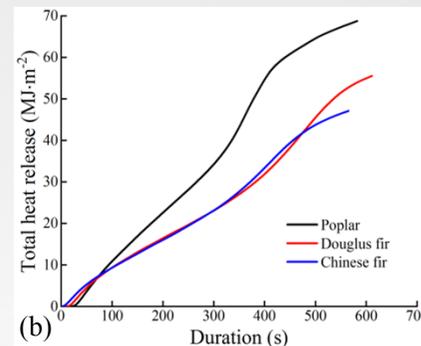
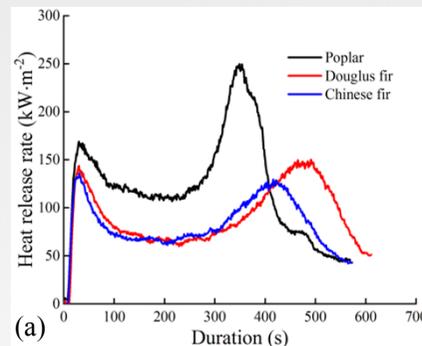


# 结构用木基石膏复合材料(IGP)研发



受火2h不同树种胶合木构件炭化深度(a)和炭化速率(b)  
Charring depth (a) and rate (b) of glulam in 120 min fire tests

木材主要化学分组含量  
Chemical composition content



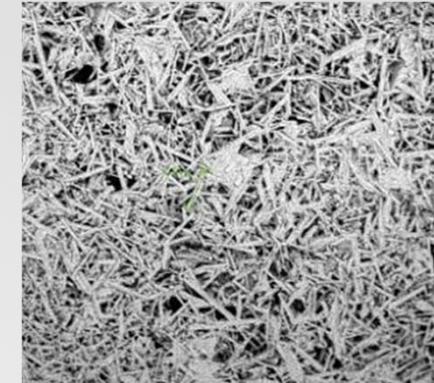
基于锥形量热仪法的木材热释放速率、总热释放量和质量保持率曲线  
Heat release rate (a), total heat release (b) and mass retains (c) in CONE tests

- 燃烧性能试验全过程，杉木的热释放速率最低、质量保持率最高；
- 受火1h的杉木、花旗松和落叶松构件炭化速率分别为0.633、0.605和0.601g/cm<sup>3</sup>；
- 木材密度越大、木质素含量越高，构件炭化速率越低。

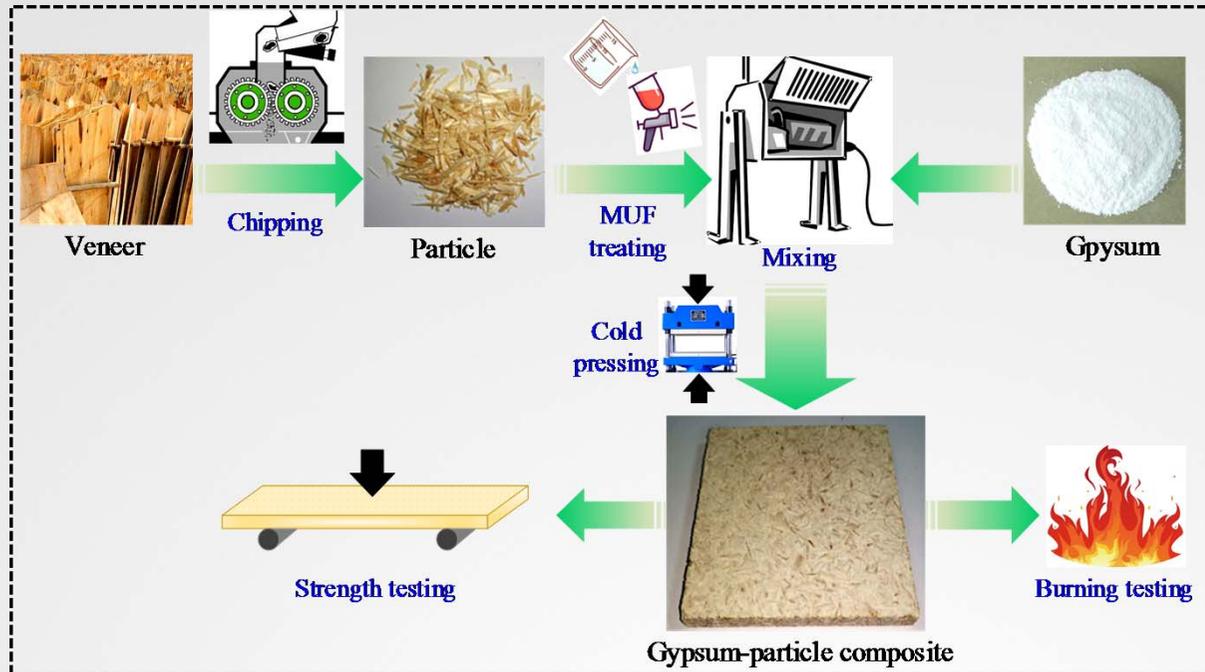


# 结构用木基石膏复合材料(IGP)研发

■ 揭示了传统板材力学性能不足的原因，创新了制备工艺，开展了关键参数对产品力学性能影响的材性试验研究。



石膏板微观图  
SEM observation of GP



木基石膏复合材料制备及性能测试流程图

Schematic illustration of production and selected properties tests for wood-gypsum composites

木基石膏复合材料制备参数

Group Specification of IGP

试件	木膏比	改性剂用量
IGP <sub>1</sub>	0.30	0
IGP <sub>2</sub>		3.4
IGP <sub>3</sub>		4.8
IGP <sub>4</sub>		6.2
IGP <sub>5</sub>		7.6
IGP <sub>6</sub>		9.0
IGP <sub>7</sub>	0.35	7.6
IGP <sub>8</sub>	0.40	



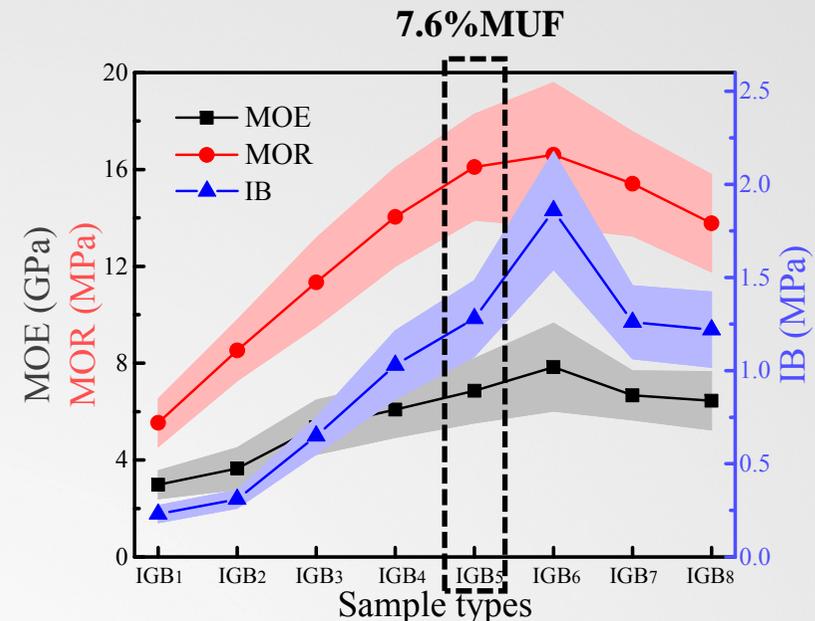
# 结构用木基石膏复合材料(IGP)研发

- 优化了工艺参数，提出了粘结初步成型和增湿固化2阶段创新制备工艺；力学性能满足产品标准和结构用板材标准规范值，优于国内外同类产品。

木基石膏复合材料力学性能测试结果与已有技术比较

Comparison of selected properties of IGP, GP, and structural panels

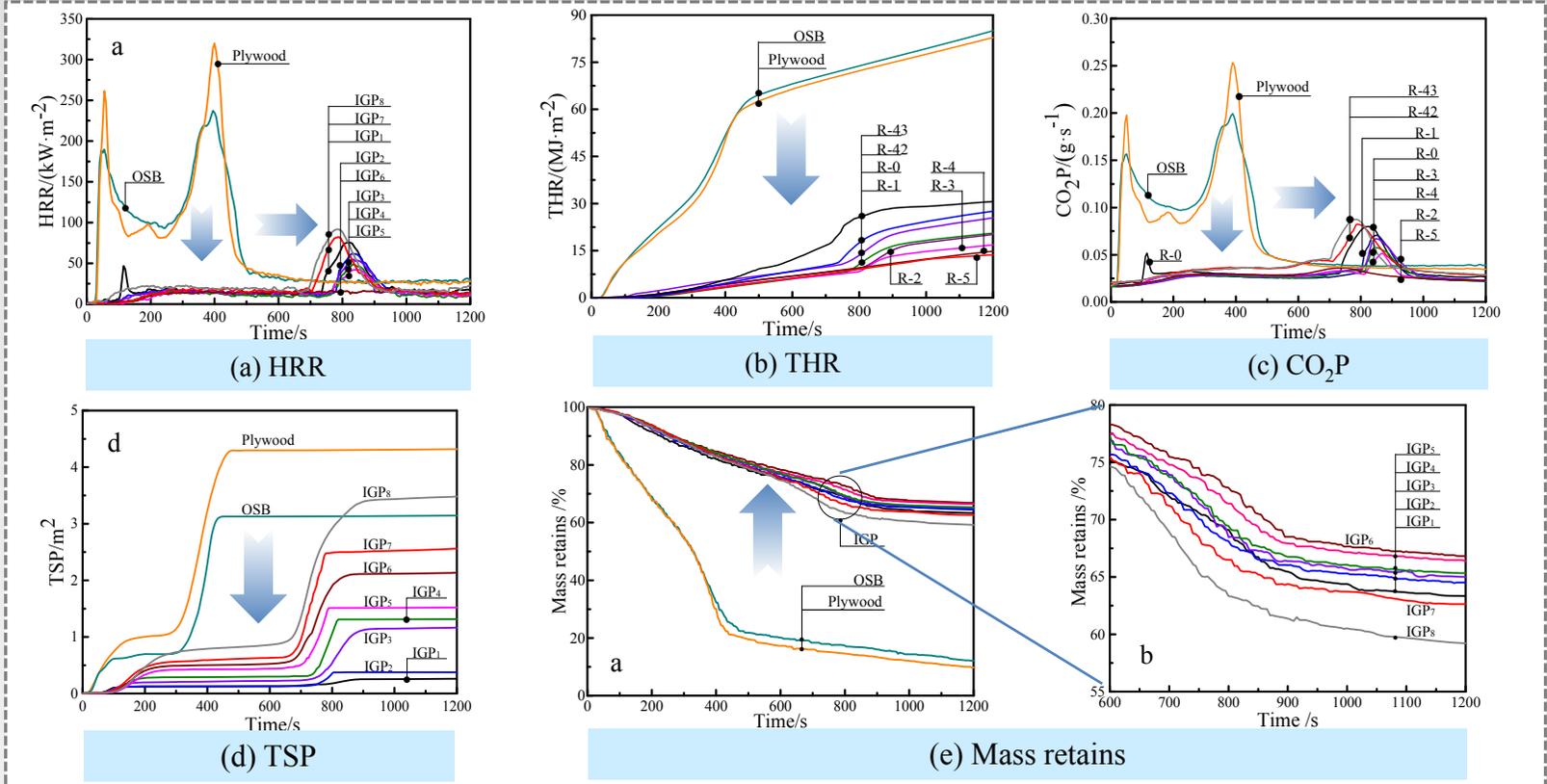
Samples		IB /MPa	MOR /MPa	MOE /MPa	TS /%
<b>Present study</b>		1.28	16.10	6861	1.23
Dai and Fan (2015)		-	4.59	-	-
Deng and Furuno (2001)		0.40	8.50	3500	1.40
Nazerian and Kamyab (2013)		0.63	13.2	4992	0.66
LY/T 1598 (2011)		≥ 0.30	≥ 6.5	≥ 2000	≤ 3.0
GB/T 35216 (2017) E5.0-F16.0强度等级	顺纹	-	≥ 16.0	≥ 5000	-
	横纹	-	≥ 10.0	≥ 2200	-
LY/T 1580 (2010)	顺纹	≥ 0.32	≥ 22	≥ 3500	≤ 20
	横纹	≥ 0.32	≥ 11	≥ 1400	≤ 20



木基石膏复合材料主要力学性能  
Mechanical properties of wood-gypsum composite

# 结构用木基石膏复合材料(IGP)研发

■ 明确了关键参数对燃烧性能的影响，明确了高温中热、烟、质量变化规律。



基于CONE法的木基石膏复合材料燃烧性能  
Combustion behavior of IGP and structural wood-based panels according to Cone calorimeter tests.



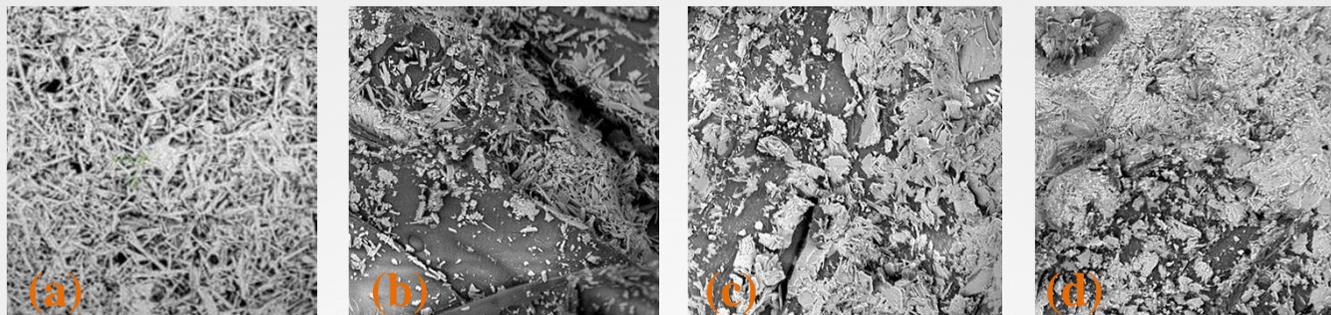
## 结构用木基石膏复合材料(IGP)研发

- 多尺寸表征揭示了创新工艺在产品燃烧和力学性能提升中的利用机理。



高温后IGP (a,b), 结构胶合板(c)和定向刨花板(d)剩余物形态

Residual cross sections of IGP1 (a), IGP6 (b), structural plywood (c), and OSB (d) after cone calorimeter tests.



石膏板及MUF用量为0% (b), 7.6% (c) 和9.0% (d)的木基石膏复合材料微观形态

SEM images of GB (a) and IGP with 0% (b), 7.6% (c) and 9.0% (d) MUF content.

在产品制备工艺上实现了原始创新，解决了传统板材力学性能不足的行业共性技术难题，MOR和MOE较国际同类产品提升22%和37%，达到结构板材强度等级。

# 木基石膏复合材料覆面墙体抗火性能

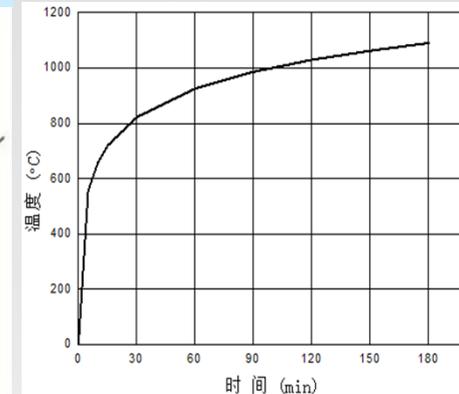
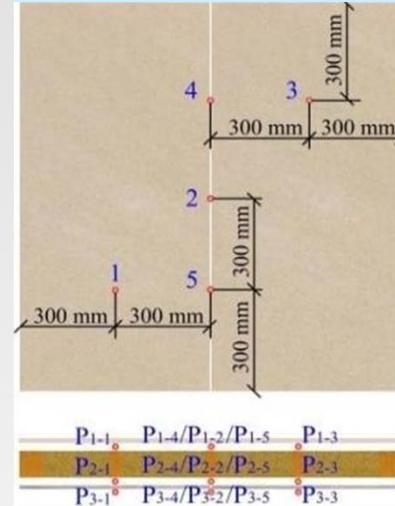
## 木基石膏复合材料覆面墙体抗火性能设计

Group specification according to the variables

试件 Specimen	测试指标 Testing	受火时间 Duration (min)	曝火侧覆面板类型 Fire-side panel types
W-1	Fire endurance	-	GB
W-2			GPB
W-3			GB (2) <sup>a</sup>
W-4	Residual lateral performance	20	GB
W-5			GPB
W-6			GB
W-7	Residual lateral performance	30	GPB
W-8			-

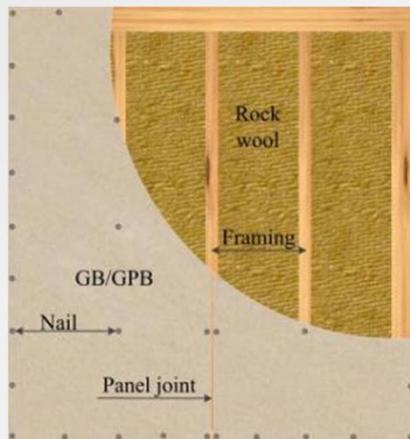
## 温度测点布置图

Thermocouples distribution



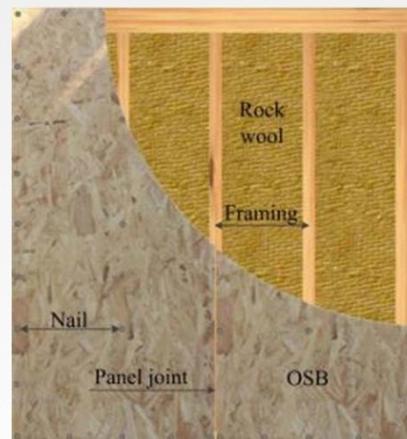
ISO 834标准火灾温度曲线

ISO 834 standard fire curve



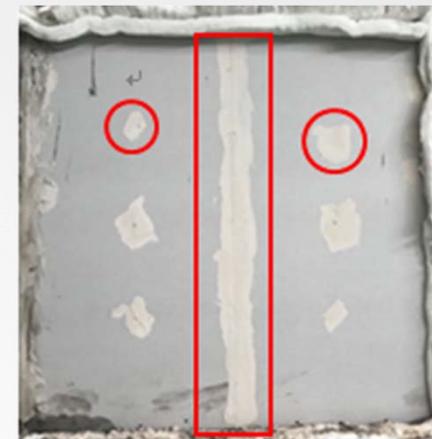
墙体曝火侧

Fire-side views of the wall



墙体背火侧

Back-side views of the wall



墙板拼缝和节点预处理

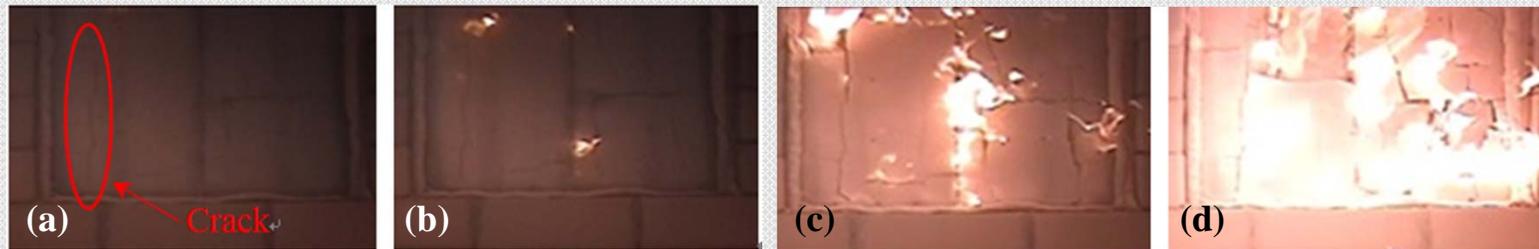
Pretreatments on connection in the wall



# 木基石膏复合材料覆面墙体抗火性能

## 试验现象

## 耐火极限



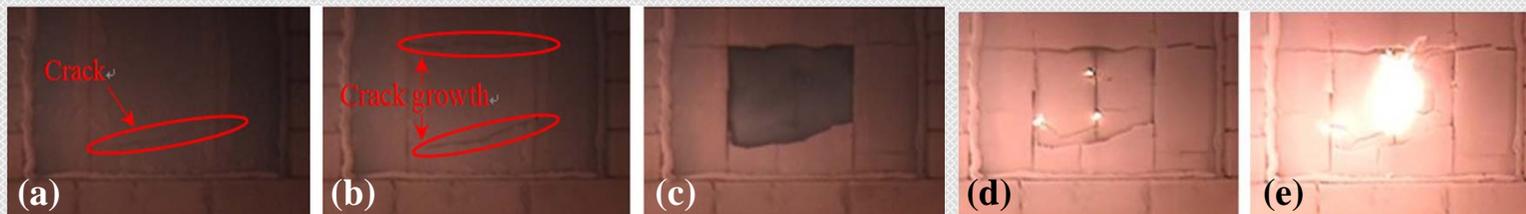
受火17、19、28和40min后单层石膏板覆面墙体试验现象  
Observations of Wall-1 after 17 (a), 19 (b), 28 (c) and 40 min (d) duration in fire

0.75 h



受火22、28和40min后单层木基石膏复合材料覆面墙体试验现象  
Observations of Wall-2 after 22 (a), 28 (b) and 40 min (c) duration in fire

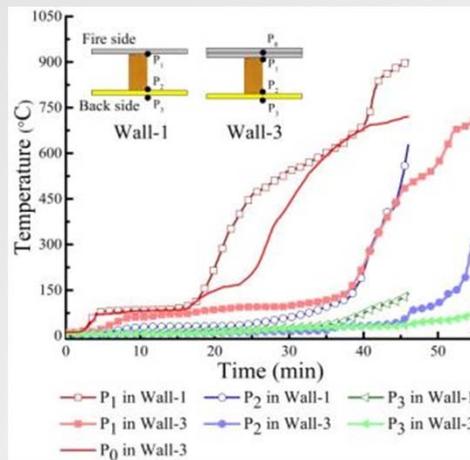
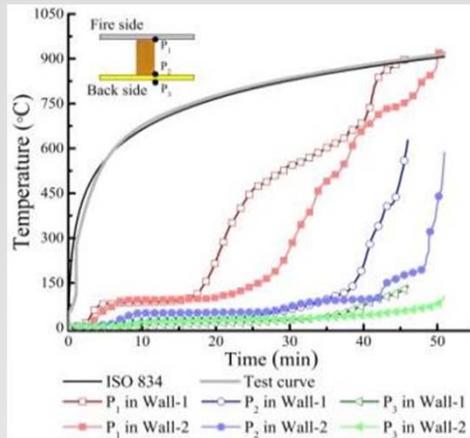
0.85 h



受火18、20、23、32和37min后单层石膏板覆面墙体试验现象  
Observations of Wall-3 after 18 (a), 20 (b), 23 (c), 32 (d) and 37 min (e) duration in fire

0.93 h

# 木基石膏复合材料覆面墙体抗火性能

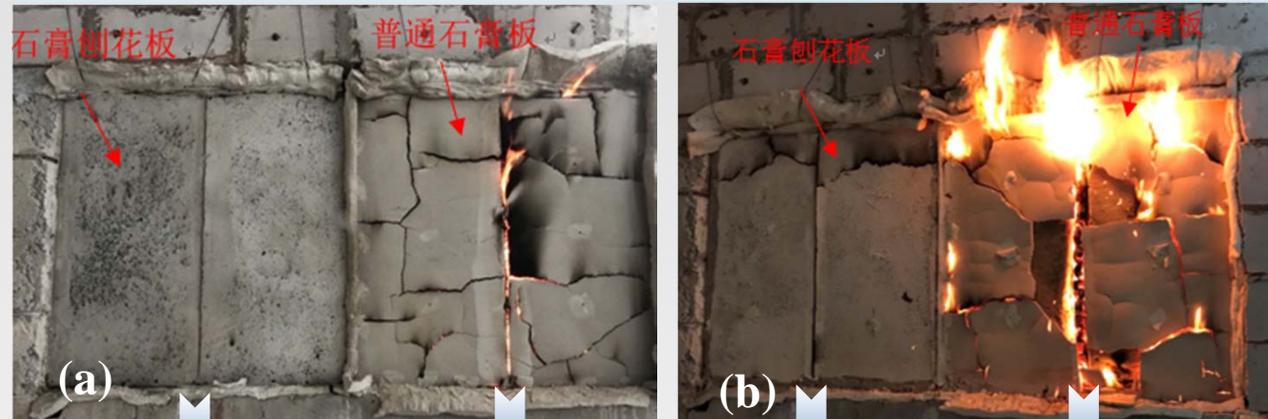


火场中墙体内温度场

Temperature profiles of the walls

受火20min(a)和30min(b)后墙体曝火侧试验现象

Observation of the GPB walls and GB walls after 20 (a) and 30 min (b) fire



火灾后墙体内拼缝处木龙骨炭化深度

Charring depth of the middle wood stud in walls after fire

- 以木基石膏复合材料为墙体曝火侧覆面板，其隔热性能优于普通石膏板；
- 木基石膏复合材料覆面墙体耐火极限高于普通石膏板覆面墙体。



# 发明了麦秸石膏复合材料， 改变了木基结构板材燃烧性能。



木材可燃/易燃



燃烧时释放热量/烟气



炭化，强度下降

# 强耐火麦秸石膏复合材料研发

研究表明：曝火侧墙面板隔热性能和高温下**结构完整性**，是轻木墙体抗火性能决定性因素。



火灾中轻木墙体石膏板开裂脱落

## 采取的对策：

- 复合**菱镁凝胶**，在石膏晶体粗结构中引入细结构，提高连续相**致密性**；
- 以**导热系数**远低于木材的**麦秸**为增强相，且麦秸灰分含量远高于木材，可有效抑制燃烧；
- 麦秸/石膏界面相容性提升：麦秸表面**热碱**和**偶联剂**联合处理。

## 存在的不足：

- 木基石膏复合材料含**添加有机胶黏剂**，受火后**产生有毒气体**；
- 石膏**晶体结构粗**，高温下抗开裂和抗脱落性能提升幅度有限；
- 木刨花导热性相对较高，木基石膏复材**隔热性能**提升不足。
- 麦秸表面蜡质层**亲水性差**，影响胶凝材料与增强相间的界面**相容性**。

### 杉木与麦秸性能比较

Selected properties of Chinese fir and wheat stras

Samples	Ash content (%)	Thermal conductivity (W/(m·K))
Chinese fir	0.74	0.15
Wheat straw	5.33	0.06



# 强耐火麦秸石膏复合材料研发

## 力学性能

试验工况 Test schedule			
水平	因素	料膏比	菱镁用量
1		0.1	30%
2		0.2	35%
3		0.3	40%
			70°C , 0.6wt%NaOH
			2%填料量KH602
			联合处理

方差分析 Variance analysis					
	Parameters	MOR	MOE	IB	TS
F值	料膏比	0.19	0.49	2.32	2.75*
	菱镁/石膏	1.21	1.59*	2.70*	1.02
	处理方式	2.43*	0.92	0.97	0.87

### 制备工艺优化结果：

- 料膏比为0.2、菱镁/石膏为0.35、麦秸采用热碱和偶联剂联合处理；
- 满足《石膏刨花板》LY/T 1598力学指标要求，高于国际国际同类产品。

麦秸石膏复合材料物理力学性能 Physical and mechanical properties of wheat straw/gypsum composite					
序号	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	MOR (MPa)	MOE (MPa)	IB (MPa)	TS (%)
1	1.44	5.26	4579.66	0.12	5.13
2	1.42	6.37	6795.97	0.28	1.24
3	1.35	5.40	3705.26	0.49	7.06
4	1.35	3.76	4062.27	0.45	0.26
5	1.41	6.83	4094.03	0.35	1.01
6	1.40	7.62	5201.98	0.70	0.67
7	1.36	7.44	3054.24	0.22	1.34
8	1.40	5.13	3446.72	0.46	1.47
9	1.39	8.41	3718.97	0.30	1.99
张**	1.29	6.60	2365	0.30	/
孙**	/	1.7	1800	0.16	/
Rangavar	1.20	6.5	4203	0.63	1.28
LY/T 1598	≥1.0	≥6.0	≥2000	≥0.30	≤3



# 强耐火麦秸石膏复合材料研发

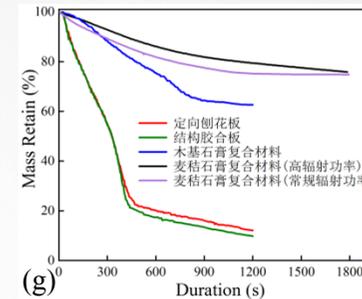
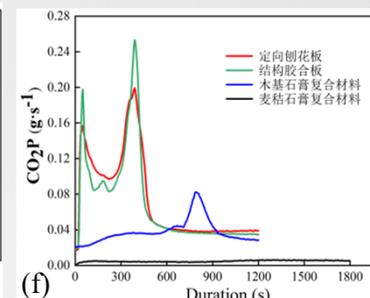
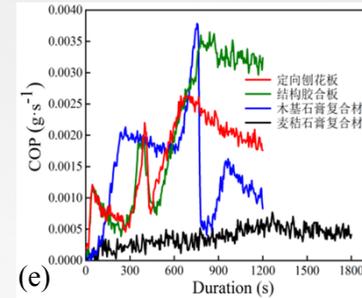
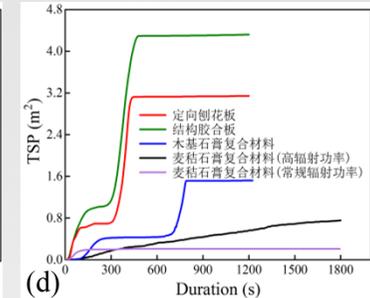
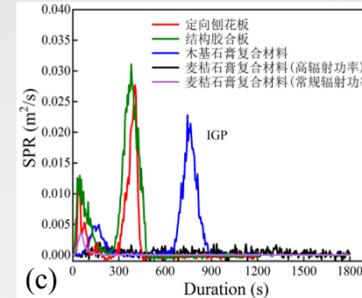
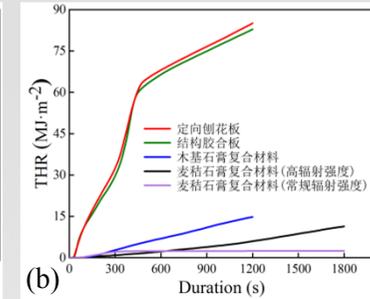
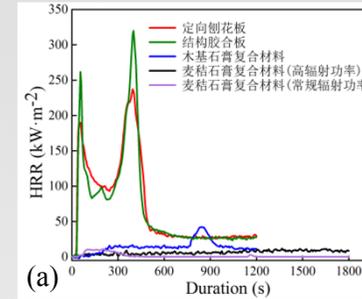
## 燃烧性能

麦秸石膏复合材料燃烧性能

Combustion performance of wheat straw gypsum composites

指标	麦秸石膏复材	木基石膏复材	定向刨花板	结构胶合板	
辐射强度 (kW/m <sup>2</sup> )	75	50			
受热时间 (s)	1800	1200			
TTI (s)	1103	未测出	815	19	22
WPR (%)	75.2	79.4	62.6	12.1	9.8
THR (MJ/m <sup>2</sup> )	6.0	2.5	14.8	85.1	82.9
HRR (Kw/m <sup>2</sup> )	11.06	未测出	42	237.2	319.8
CO <sub>2</sub> P (g/s)	0.08	未测出	5.02	0.26	0.20
COP (g/s)	0.005	未测出	0.0038	0.0026	0.0037
SPR (m <sup>2</sup> )	0.236	未测出	1.436	/	/

■ 试验根据ISO 1716燃烧总热值测定标准进行总热值测试，采用EN 13501-1评估板材燃烧性能等级。麦秸石膏复材燃烧总热值为1.6MJ/kg < 3.0 MJ/kg，因此板材的燃烧性能达到A2级（不燃性）等级。

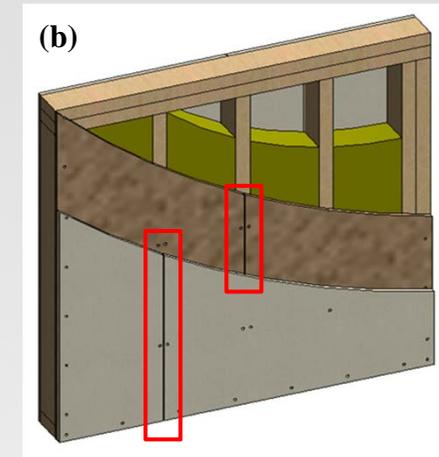
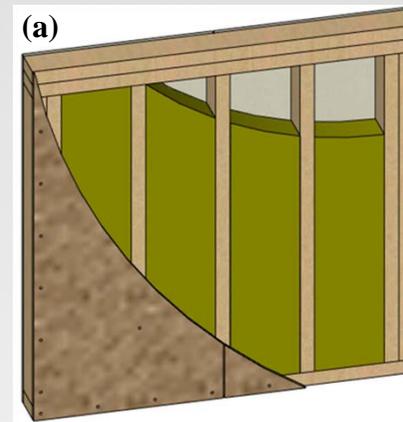


麦秸石膏复合材料热释放速率(a),总热释放量(b),烟释放速率(c),总烟释放量(d),CO释放速率(e),CO<sub>2</sub>释放速率(f)和质量保持率(g)

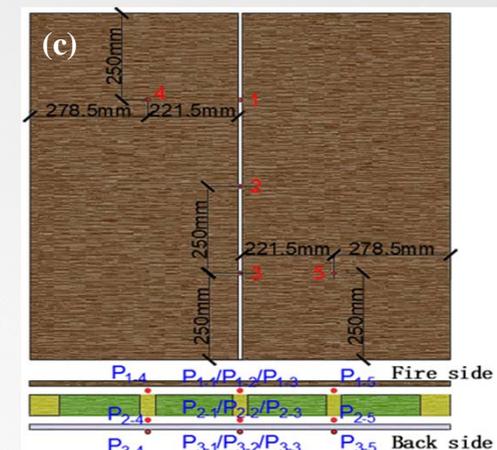
HRR (a), THR (b), SPR (c), TSP (d), COP (e), CO<sub>2</sub>P (f), mass retains (g) of wheat straw gypsum composites in CONE tests

# 麦秸石膏复合材料覆面墙体抗火性能

- 条件：ISO 834标准升温曲线；
- 墙体构造
  - 骨架：木、轻钢；
  - 曝火面墙板：石膏板  
麦秸石膏复材
  - 背火面墙板：石膏板



火灾试验炉

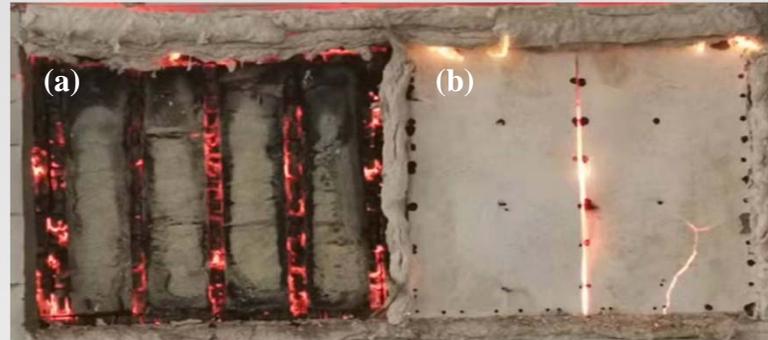


单层(a),双层(b)墙面板覆面轻木墙体及火灾中温度测点布置(c)

# 麦秸石膏复合材料覆面墙体抗火性能



轻木墙体火灾试验



石膏板和麦秸石膏复材覆面墙体火灾现象

试件编号	曝火侧覆面材料	构造形式	失效模式	耐火极限(min)
W1	12mm厚石膏板	I型木框架	隔热性	88
W2	12mm厚石膏板	II型木框架	隔热性	87
W3	12mm厚麦秸石膏复材	II型木框架	隔热性	127
W4	12mm厚麦秸石膏复材	I型钢框架	隔热性	117
W5	双层12mm厚石膏板	III型木框架	完整性	111
W6	12mm厚石膏板 +12mm厚麦秸石膏复材	III型木框架	隔热性	162

耐火极限提升  
>39min

- 石膏板覆面墙体：石膏板燃烧发黑(0~1min)、裂缝出现并持续扩展(15~27min)、脱落直至墙体失效(27~45min)；
- 麦秸石膏复材覆面墙体在达到耐火极限时，板材始终保持结构完整性，受火全过程未脱落。



# 麦秸石膏复合材料覆面墙体抗火性能



受火后墙体剩余承载力试验

不同构造轻木墙体火灾后剩余竖向承载力

编号	曝火侧材料	构造	受火时间 ( min )	炭化深度 ( mm )	承载力 ( kN )
W <sub>I</sub>	/	I 型	/	/	273.86
W <sub>II</sub>	/	II 型	/	/	260.15
W <sub>7</sub>	12mmGB	I 型	30	17 ( 18 )	201.3
W <sub>8</sub>	12mmGB	II 型	30	5 ( 14 )	255.87
W <sub>9</sub>	12mmGB	II 型	60	41 ( 50 )	/
W <sub>10</sub>	12mmWKGP	II 型	30	0 ( 5 )	255.80
W <sub>11</sub>	12mmWKGP	II 型	60	14 ( 27 )	170.02
W <sub>12</sub>	12mmGB	I 型	30	/	54.31
W <sub>13</sub>	12mmWKGP	I 型	60	/	57.60
W <sub>14</sub>	12mmGB+12 mmWKGP	III 型	60	1(0.5)	262.26

→74%

→0

→94%

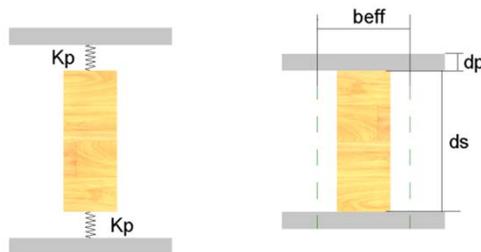
→62%

■ 提出了麦秸石膏复材覆面的墙体抗火性能提升技术。受火后承载力保持率由0提升至62%。

# 麦秸石膏复合材料覆面墙体抗火性能

## 考虑覆面板作用

- 考虑背火面石膏板对骨柱刚度的贡献



$$EI = 2 \left[ E_p A_p \left( \frac{d_p}{2} + \frac{d_s}{2} \right)^2 + E_p I_p \right] + E_s I_s$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad b_{eff} = \frac{\frac{L^2 P_{cr}}{\pi^2} - E_s I_s}{2E_p \left[ d_p \left( \frac{d_p + d_s}{2} \right)^2 + \frac{d_p^3}{12} \right]}$$

根据试验结果，引入刚度放大系数  $\alpha = 1.37$

## I. 覆面板保护下骨柱炭化深度

GB覆面II型构造:

$$d_{GPBef} = 1.64053 \times 10^{-4} \cdot t^{3.03562}$$

WKGP覆面II型构造:

$$d_{WKGPef} = 0.00127 \cdot t^{2.43296}$$

## II. 基于剩余截面法剩余承载力

单根骨柱受火后剩余承载力:

$$N_{ef} = \frac{\varphi_2 h_2 N_u}{\varphi_1 h_1}$$

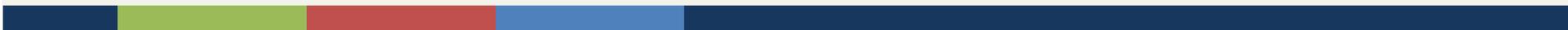
$$h_2 = h_1 - d_{ef} \quad \varphi_1 = \frac{N_u}{A f_{ck}} \quad \varphi_2 = \frac{\alpha_c \pi^2 \beta \cdot \alpha E_k}{\lambda^2 f_{ck}}$$

### 火灾后剩余承载力计算

Specimen	Duration / min	$N_{ef}$ (kN)	$N_{\alpha \cdot ef}$ (kN)
W11	30	51.08 (9.86%)	53.42 (5.72%)
W10	60	33.26 (11.70%)	35.79 (4.97%)

- 构建了考虑覆面板保护作用的墙骨柱炭化深度与受火时间关系。墙体受火后剩余承载力计算结果误差 < 6%。

# 第四部分：研究结论



# 主要结论



瞄准**工程实际需求**和**行业共性技术难题**，研发了基于**国产低质速生木材**和**农作物秸秆废弃物**的高性能覆面材料，通过微观表征、材性试验、全尺寸墙体结构性能研究等多尺度分析，揭示了材料创新在构件耐火性能提升中的作用机制：

- 创新了结构用木基石膏复合材料，力学性能较国际水平提升**>22%**；
- 发明了强耐火麦秸石膏复合材料(不燃)，墙体耐火极限提升**>45%**。

通过工艺创新，突破了限制生物质建材的关键技术瓶颈，为其在建筑结构中的安全高效应用提供了**原创性产品**和**技术**。

**感谢各位专家的关照和支持！**  
**敬请批评指正！**

