

引用格式: 蒋洋, 蒋序来, 张晴楠, 等. 从 BIPV(光伏建筑一体化)到 BIPVES(光伏储能建筑一体化)[J]. 南方能源建设, 2024, 11(4): 156-163. JIANG Yang, JIANG Xulai, ZHANG Qingnan, et al. From BIPV (building integrated photovoltaic) to BIPVES (building integrated photovoltaic and energy storage) [J]. Southern energy construction, 2024, 11(4): 156-163. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.16.

# 从 BIPV (光伏建筑一体化) 到 BIPVES (光伏储能建筑一体化)

蒋洋<sup>1</sup>, 蒋序来<sup>2,✉</sup>, 张晴楠<sup>3</sup>, 闵杰<sup>4</sup>, 蔡如剑<sup>5</sup>, 王亚杰<sup>1</sup>

(1. 中国能源建设集团有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 新加坡国立大学, 肯特岗 119077; 3. 查尔姆斯理工大学, 哥德堡 44497; 4. 武汉大学, 湖北 武汉 430000; 5. 北京锦石光宇新能源有限公司, 北京 100124)

**摘要:** [目的]随着光伏、储能、新型建材及装配式建筑产业的发展, 将光伏组件与屋面、墙体、遮阳等构件进行一体化设计与制造的光伏建筑一体化 (Building Integrated Photovoltaic, BIPV) 技术开始延伸为光伏储能建筑一体化 (Building Integrated Photovoltaic and Energy Storage, BIPVES) 技术。[方法]文章提出世界首个可充电水泥电池, 将建筑墙体与光伏发电装置、储放电装置相融合; 对设备和材料进行跨界创新, 在玻璃表面打印高清晰度、高透光率花纹图案, 制造高效光伏建材; 研发预制式储能墙体, 与各类钢结构装配式建筑体系进行结合, 实现订制式生产、装配式施工, 形成建筑构件与光伏、储能一体化的变革趋势。[结果]水泥基电池实现了建筑墙体具有光伏发电、储电以及供电等多种功能; 新一代光伏建材可节省建筑外立面装饰材料的成本, 降低建筑物碳排放; 光伏和储能等可再生能源技术在建筑中的一体化集成, 可取得最大化收益。[结论]新型光伏建材技术和水泥电池等新型储能技术具有发展前景, 将可充电电池构件、光伏外墙板与装配式建筑墙体及预埋件进行组合集成并推广应用具有可行性。

**关键词:** 光伏建筑一体化 (BIPV); 可充电水泥电池; 光伏储能建筑一体化 (BIPVES); 光伏外墙组件; 新能源建筑

中图分类号: TK11; TU209

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)04-0156-08

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.4.16

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

## From BIPV (Building Integrated Photovoltaic) to BIPVES (Building Integrated Photovoltaic and Energy Storage)

JIANG Yang<sup>1</sup>, JIANG Xulai<sup>2,✉</sup>, ZHANG Qingnan<sup>3</sup>, MIN Jie<sup>4</sup>, CAI Rujian<sup>5</sup>, WANG Yajie<sup>1</sup>

(1. China Energy Engineering Co., Ltd., Wuhan 430000, Hubei, China; 2. National University of Singapore, Kent Ridge 119077, Singapore; 3. Chalmers University of Technology, Gothenburg 44497, Sweden; 4. Wuhan University, Wuhan 430000, Hubei, China; 5. Beijing Jinshi Guangyu New Energy Co., Ltd., Beijing 100124, China)

**Abstract:** [Introduction] With the development of photovoltaics, energy storage, new building materials and prefabricated construction industry, Building Integrated Photovoltaic (BIPV) technology which features the integrated design and manufacturing of photovoltaic modules with components such as roofs, walls and sunshades is evolving as Building Integrated Photovoltaic and Energy Storage (BIPVES) technology. [Method] The article proposed the world's first rechargeable cement-based battery, promoting the integration of building walls with photovoltaic power generation and storage and discharging devices. Cross-disciplinary innovation was applied to equipment and materials, where high-definition, high transmittance patterned designs were printed on glass surfaces to manufacture high-efficiency photovoltaic building materials. Prefabricated energy storage walls were developed and integrated with various steel-structure prefabricated building systems to achieve customized production and prefabricated construction, leading to a transformative trend of

收稿日期: 2023-11-15 修回日期: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金委资助项目“一种快速且非接触式的有效器体性能优化方法: 应用于异质结有机光伏电池”(51773157)

integrating building components with photovoltaics and energy storage. [Result] Cement-based batteries allow building walls to have multiple functions, including photovoltaic power generation, energy storage and power supply; The new generation of photovoltaic building materials helps save costs on building facade decoration materials and reduce building carbon emissions; The integration of photovoltaics, energy storage and renewable energy technologies in buildings can achieve maximum benefits. [Conclusion] The new photovoltaic building materials and new energy storage technologies such as cement-based batteries show promising prospects. Combining and integrating rechargeable battery components, photovoltaic exterior panels, prefabricated building walls and embedded parts for widespread application is feasible.

**Key words:** building integrated photovoltaic (BIPV); rechargeable cement-based battery; building integrated photovoltaic and energy storage (BIPVES); photovoltaic exterior wall components; energy-efficient buildings

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

## 0 引言

BIPV 是将光伏组件作为建筑材料中可发电的部分制作成为建材化构件, 可做为屋顶及墙体材料, 承担外装饰、保温、防水等建筑功用, 同时可以发电。当前, 在瞄准碳中和、推动碳达峰成为热议话题, 随着全球多个国家制定和出台碳中和目标和零碳建筑相关技术标准, 未来的建筑将最终实现未来碳的“双控”, 清洁能源的开发利用成为了即将再次爆发的产业风口<sup>[1-2]</sup>。这其中最大的分布式应用场景必将是 BIPV, 且已经成为业界的共识。各地 BIPV 项目需求如雨后春笋般大批量出现, BIPV 的万亿级巨大市场已经开启。各组件生产企业都在积极借鉴国内外应用经验、探索适合自身实际的发电玻璃与建筑材料有机融合的应用方案。

蒋洋在 2012 年提出了“新能源房屋”的理念<sup>[3]</sup>, 即将光伏等可再生能源与储能、新型建筑结构体系、高性价比保温隔热材料及构件、智能化能源管理系统结合, 成为创能、节能、储能、智能一体化功能的新型房屋系统, 并指出: 新能源房屋的核心技术应至少包括如下几个方面: (1) 太阳能建筑一体化技术, 包括光伏、光热组件与屋面、墙体乃至遮阳等构件的一体化设计与制造技术; (2) 高效低成本储能技术, 包括高效电池、蓄热/蓄冷材料; (3) 建筑节能技术; (4) 房屋一体化集成制造技术; (5) 能量智能化网络管理技术。只有上述材料和技术实现一体化融合, 才能实现工厂化制造、装配式安装, 进一步降低成本和碳排放, 实现大规模应用和推广。但现有的材料和技术仍存在较多局限性, 不能满足一体化融合和双碳目标的需求。例如, 储能部分作为光伏和风电

等新能源装机消纳的卡脖子环节, 对光伏和风电装机目标的达成, 乃至“碳达峰”和“碳中和”目标的实现, 已经越来越重要, 问题也越来越突出。现有的储能方案基本上是在建筑内部安装锂电池器件, 而现有锂电池储能技术和装备由于成本高、安全性差(起火、爆炸事件层出不穷)、产业链污染, 还占用了相当多的室内空间。尤其是国家锂、钴等矿产不足和稀缺等问题, 已经对未来国家新能源装机规模形成了制约, 成为我国实现双碳目标的卡脖子环节。

## 1 水泥基电池的研发与储能/建筑一体化

使用建筑物作为能源来源和存储的概念可能是革命性的, 通过提供大量的能源存储设施来促进新能源的消纳, 解决能源危机。由于建筑物结构体积大, 即使单位体积的能量不高, 储能的容量也是很高的。

要使得水泥储电, 首先要解决导电问题。在过去的几十年里, 不断的有科研人员为这个方向而努力。赵文艳等<sup>[4]</sup>将石墨掺加到导电混凝土中后, 发现含量不同的石墨会降低混凝土的抗压强度。黄永辉等<sup>[5]</sup>将石墨烯作为导电相材料发明 1 种新型石墨导电混凝土, 这种混凝土具有导电性优良、力学强度高、电阻率稳定和寿命长等优点。可以解决普通石墨导电混凝土强度低, 耐久性差的问题。杨玉山等<sup>[6]</sup>在混凝土中掺加 16.9% 的石墨, 混凝土电阻率降低至 200  $\Omega \cdot \text{cm}$ 。石墨掺量较高时, 导电混凝土虽然具有良好的导电性能, 但是抗压强度随石墨掺量增加而急剧下降。因此, 石墨导电混凝土只适用于电力接地和实现电热功能等对力学性能要求较低的情况。

碳纤维导电混凝土拥有良好的电热性能和力学性能。李红英等<sup>[7]</sup>将碳纤维掺入混凝土,所制造出来的导电混凝土具有十分良好的导电性和抗折强度;但随着碳纤维掺入的不断增多,导电混凝土的抗折强度在下降。Liu 等<sup>[8]</sup>发现使用半干混合法和纤维素醚对碳纤维有良好的分散效果。并且对导电混凝土在实验室和现场的性能进行了比较,结果表明导电混凝土在现场施工中具有良好的工作性能、较高的强度和较低的电阻率。周文键等<sup>[9]</sup>以碳纤维作为导电基元材料,制备了一种导电性能良好的碳纤维导电混凝土,并利用羧甲基纤维素钠(CMC)改善碳纤维在混凝土中的分散性。研究发现所制备的碳纤维导电混凝土具有纤维分散性好、电阻率低且稳定、施工方便等特点,为工程中应用碳纤维导电混凝土、提高工程结构的功能性提供了基础。吴献等<sup>[10]</sup>将炭黑掺入混凝土中通过增加炭黑的百分含量,降低炭黑粒子间的距离,使得炭黑粒子在混凝土内部形成一个完全相互连接的联通的导电网络,让混凝土内部的导电形式以炭黑粒子导电为主,并且随着炭黑粒子导电网络的形成,混凝土内部水化反应对混凝土的导电影响逐渐减少。

由于单一导电相导电混凝土存在制作成本高、稳定性差、强度不够等缺点<sup>[11-12]</sup>,因此,目前学者着眼于研究复合相导电混凝土。学术界有大量学者将钢纤维与石墨共同作为导电混凝土的导电填料。研究发现,掺加石墨和钢纤维两种导电材料,钢纤维会连接由石墨形成的导电链团,提高混凝土的导电性能,同时混凝土的塑性和抗压强度也得到了保证,混合掺加钢纤维和石墨,避免了石墨因自身片状结构和片状连接增大混凝土的脆性,同时也减少了钢纤维用量较大导致纤维聚团现象,可获得力学与电学性能均较好的导电混凝土<sup>[13]</sup>。

导电性优良的导电混凝土可以用来做水泥基电池。建筑行业占总能源消耗的 40%,占大气排放的 40%,占原材料使用的 30%,占用水的 25%<sup>[14]</sup>。如果我们可以把身边建筑物建造成 1 种储存能源的器件,那将对自然资源的枯竭、能源需求增加、燃料困难、能源不安全和全球变暖起到一定的缓解作用<sup>[15]</sup>。

目前,锂离子电池和燃料电池面临以下问题:(1)在电解质为液体的通常情况下,与电解质相关的安全(泄漏)和环境问题;(2)大量使用钴、锂等稀有金

属,成本高昂;(3)安全性差,时有起火爆炸;(4)由于尺寸和质量的限制,可以提供的能量有限。为了解决上述问题,Meng 等<sup>[16]</sup>以水泥膏体为基体,水泥中的孔隙溶液为电解质,分散在基体中的锌颗粒为阳极,分散在基体中的二氧化锰颗粒为阴极,分散在基体中的炭黑作为正极和阴极区域的导电添加剂。电解液在整个电池中是连续的,该电池由先后铸造和共固化的阳极、电解液和阴极层组成。功率输出达  $1.4\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,容量达 0.2 mAh。为了用电池模块取代桌面电源,一些科研人员正在努力提高单块电池的电流与功率。Byrne 等<sup>[17]</sup>发现密封电池提供了更好的电阻负载电流(0.101 mA)。密封块的相对湿度平均比未密封块高 1%。相对湿度每增加 1%,未密封和密封电池的电流分别增加 0.01 mA 和 0.02 mA。通过增加单块电池的数量,有效地极化腐蚀过程中产生的内部电流。

以往关于水泥基电池的研究主要集中在不可充电类型,即电化学过程定义的不可充电类型,2021 年 5 月,张晴楠等<sup>[18]</sup>通过将阳极活性物质和阴极活性物复合到碳纤维网上,以水泥基材料作为电池核心材料,研发出世界第 1 个可充电水泥电池(图 1),峰值电流输出达到 10 mA,放电 12 h 后,通过 165  $\Omega$  的电阻,电流输出仍有 3.8 mA。单体电池连续测试 6 个轮次,所有轮次电池充放电性能均表现稳定,平均能量密度达到  $6.8\text{Wh}/\text{m}^2$  ( $0.8\text{Wh}/\text{L}^2$ )。2021 年 11 月,蒋洋、张晴楠等研制并安装完成中国首个试验水泥电池构件,也是世界首个水泥储能墙体样品(图 2),通过活性层与纤维的复合,既能提升电池能量输出,又加固了水泥力学结构,展现了新材料使可反复充电式水泥变为现实的前景(图 3),有望解决新能源与建筑储能一体化的问题。

可充电水泥电池坚固耐用,对过放充电耐受性高;原料来源广泛;使混凝土建筑物、桥梁、道路、风光电站的水泥基础等都有变成巨大的能源储存设施的潜力(图 3),安全、廉价,有助于解决目前新能源推广和应用的瓶颈,刺激电力能源基础设施的重构,帮助国家早日实现双碳目标。

通过设计,团队将光伏外墙板设置在外墙面上,预埋件设置在墙体内,可充电水泥电池构件设置在墙体内,与所述墙体构成一体式结构或结构组合,光伏外墙板通过预埋件与可充电电池构件电连接,可

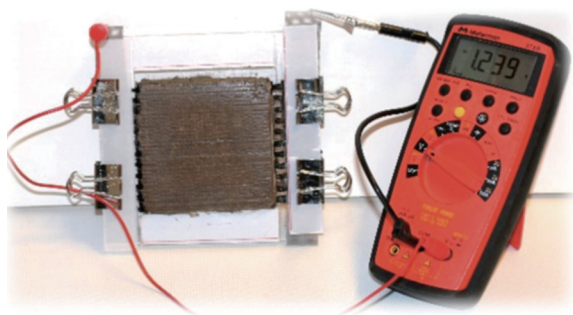


图1 可充电式水泥基电池

Fig. 1 Rechargeable cement-based battery

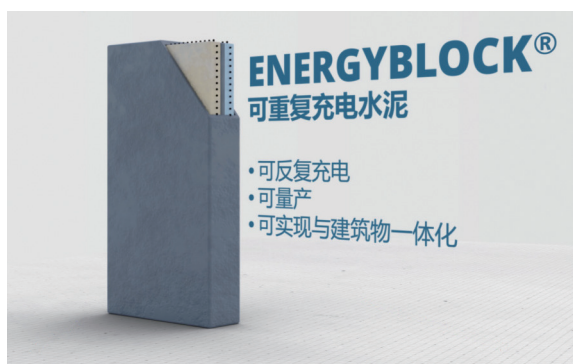


图2 世界首个水泥储能墙体样品

Fig. 2 Sample of the world's first cement energy storage wall

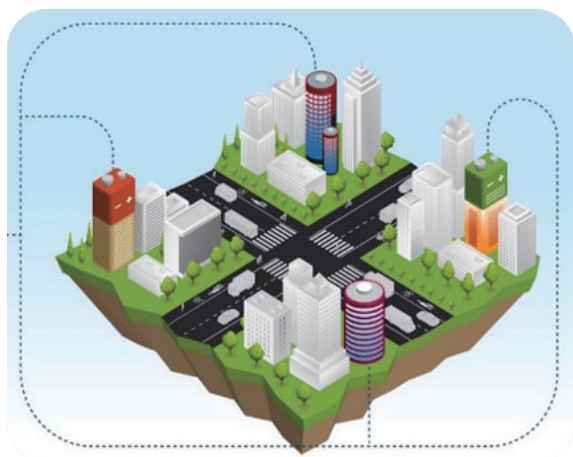


图3 新能源与建筑储能一体化

Fig. 3 Integration of new energy and building energy storage

充电电池构件用于为用电设备供电<sup>[18]</sup>。这样,未来的建筑墙体,将可以集光伏发电装置、储放电装置于一体,具有光伏发电、储电以及供电的功能,形成建筑构件与光伏、储能一体化的变革。我们将其进一步命名为 BIPVES, 即光伏储能建筑一体化。

水泥作为建筑墙体常用的建筑材料,其固化后

强度高,可有效保证建筑墙体的坚固性。水泥预制墙体可由模板预制,其形状、厚度、尺寸大小可以根据设计需求在工厂中预制,做成装配式建筑墙体,有利于提高建筑施工效率,水泥预制墙体还可以根据实际的需要设置成多种形状、厚度及尺寸,以便于更好地适应多种建筑墙体的需求。可充电式储能水泥电池构件的主要材料为水泥基材料,可方便地做成板、块等结构,更好地与建筑复合墙体融合,成为墙体结构的一部分,实现可充电电池构件与墙体的一体化,还起到一定的结构功能,和其它构件一起达到墙体结构的强度要求。储能水泥电池构件的材料来源广泛,工业量产化程度高,整个产品成本可望十分低廉<sup>[19]</sup>;再者,相对于商用锂电池从材料结构设计角度有更高的安全性能,不会起火、爆炸,并且耐过充放,耐短路,随着技术指标的提升,未来将有望用于大型储能。通过在预制墙体内部设置预埋件,通常为钢筋龙骨等高强度金属制品,可以为水泥预制墙体提供额外强度支撑。预埋件一端与可充电式储能水泥电池构件连接,另一端连接或挂装光伏外墙板并实现相关安装,预埋件也可以同时传导电能,光伏外墙板可以通过特殊内部设计,将光伏发电产生的电能通过预埋件传输给可充电电池构件并用于储存。这样,可以大大简化电线安装以及节省电传导所用物料成本,最后实现当前光伏外墙组件安装成本的综合性降低。

建筑墙体中的可充电电池构件可以进一步与用电设备连接,为用电设备提供电能,使设备正常运转。这类建筑墙体将具有光伏发电、储电以及供电的多种功能,可以充分利用太阳能并平衡发电波动,节省能源消耗,实现低碳环保用电(图4)<sup>[20]</sup>。

电池能量密度比较高,重量轻,广泛应用于数码产品如手机、笔记本电脑等产品,在新能源汽车领域也有广泛的应用<sup>[21-22]</sup>。那么,锂电池等传统可充电电池是否可以做成建筑构件?刚才我们已经提到其安全是1个核心问题。这也是我们正在研究的1个新方向。固态锂电池和当前主流的液态或半固态电解质锂电池相比,安全性明显提升。我们将固态锂电池与防火建筑材料结合,制成锂电池构件设置在墙体内部,光伏外墙板通过预埋件与锂电池构件正负极通路,从而实现电能传输,将外墙光伏电或电网低谷电存储到墙体中,在用电高峰时释放使用,平衡电

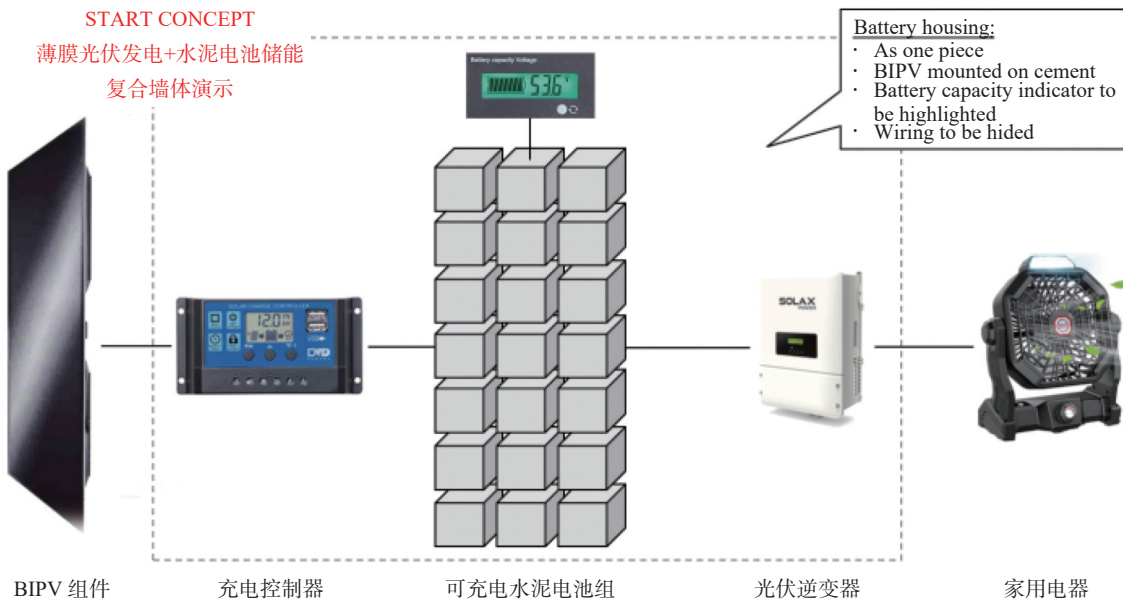


图 4 光伏发电+建筑储能一体化复合墙体分解示意图

Fig. 4 Illustration of building wall integrated with photovoltaic power generation and building energy storage

网电力,也做出了如图 4 的样品,能量密度和可充放次数性能优于水泥电池。但这里面还有很多技术问题,包括寿命、维修等问题需要解决,安全性也需要进一步提高。

## 2 满足未来需求的新一代光伏建材

近年来,光伏建筑一体化材料和技术取得了一系列发展,但仍存在很多问题。除了构件体系和标准规范亟待尽快完善外,还包括:

1)传统光伏组件外观差,建筑设计师不愿意选用其作为外墙。

2)彩色光伏组件技术尚处于初期,光损耗较高,造成组件效率低下。

3)还未真正实现顾客定制化、未实现高档花纹。

4)传统丝网印刷制造的彩色光伏组件在审美上偏低俗,色彩土艳,贼光居多。

光伏外墙板应根据各地特点与需求,兼具装饰、封装等功能。光伏外墙板的外表面除传统黑色之外,还可以有多种纹路图案和颜色,多种色彩、多种纹路图案的光伏外墙板作为建筑墙体的外立面装饰件,同时具备发电和装饰的功能,成为“挂在外墙上的油田”,可以节省建筑外立面装饰材料的成本,助力清洁能源在建筑外立面的应用和推广,从而降低建筑物碳排放。

团队通过对设备和材料的跨界创新,实现了在玻璃表面打印高清晰度、高光透率图案和花纹的技术,可以制造出各类逼真木纹、大理石、砖墙效果的组件——光伏锦石,如图 5 所示:

1)高端:相对于传统建筑装饰材料更高档,颜色图案可以定制。

2)高效:特殊打印材料和工艺技术,相比其他装饰性光伏组件产品光透过率大大提升,保持全球最高的发电效率。

3)高性价比:1 种产品、3 种功能(外墙板材+建筑外装饰+光伏发电)。

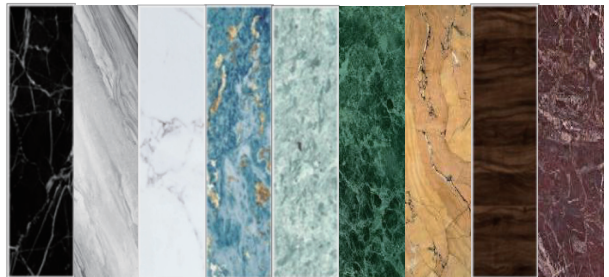


图 5 具有木纹、大理石等效果的新一代高效光伏建材组件

Fig. 5 A new generation of high-efficiency photovoltaic building materials with wood, marble and other patterns

这种特殊打印技术同时适用于各类晶硅与薄膜等光伏组件,长期稳定性好,比天然材料增加了光伏发电收益,如表 1 所示。以一幢位于上海的中型

表1 光伏锦石部分性能与传统建筑外墙产品比较  
Tab. 1 Comparison of partial performance of the photovoltaic patterned panel with traditional building exterior wall products

	光伏锦石	天然石材	玻璃幕墙	金属幕墙
光污染	低	低	高	低
自重/(kg·m <sup>-2</sup> )	17~36	75~100	50~60	3~4
安全隐患	低	高	低	低
投资回报率	好	无	无	无
客户定制化	高	一般	一般	一般

(12层)商务办公楼为例,建筑总表面积5 700 m<sup>2</sup>,光伏外墙安装总面积2 949 m<sup>2</sup>。预计安装光伏锦石组件,将比进口天然大理石,节省初始投资10万元~120万元,并通过发电额外节省用电成本540万元~814万元,二氧化碳减排3 921~5 322 t,共可节省投资及运营费用550万元~870万元(不含碳减排交易收益)。目前外墙BIPV市场尚处于蓝海,如果得到广泛的推广应用,将让建筑物从能耗和排放大户

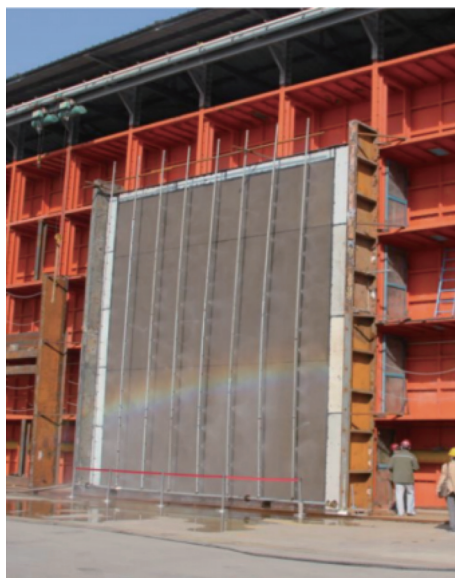


图6 装有预埋件的装配式墙体构件和光伏大理石组件形成组合

Fig. 6 Integration of prefabricated wall components with embedded parts and photovoltaic marble components

#### 4 结论

本文介绍了一系列新技术的进展,包括团队制备出世界首个可充电水泥电池的情况,以及通过研制新型打印工艺和打印介质,实现了在玻璃上打印高清晰度、高透光率花纹和图案,制造出高效、高装饰效果的光伏建材的技术。结合以上进展,提出了

变为清洁能源发电厂,让建筑外墙成为蓝天下的油田。

#### 3 储能电池+新型光伏建材+装配式墙体的一体化结合

目前,蒋洋团队正在研发预制式储能墙体,并和各类钢结构装配式建筑体系进行结合,实现订制式生产、装配式施工。

通过在类复合墙板制造过程中预制预埋件,直接挂装光伏建材组件,和光伏外墙组合成为BIPV产品,如图6所示。再和前述水泥基储能电池、新型钢结构装配式建筑结构体系进一步集成成为BIPVES一体化墙体构件。通过工厂化制造和装配式安装,不仅提高效率,降低人力、物力成本,还提升了建筑美观度,降低了建筑碳排放,真正实现了光伏和储能等可再生能源技术在建筑中的一体化集成,取得成本收益的最大化。

在设计和制造上进一步继续跨界融合创新,形成建筑构件与光伏、储能一体化的变革,提出将可充电电池构件、光伏外墙板与装配式建筑墙体及预埋件进行组合集成并推广应用的可行性,拓展了以往单纯的BIPV概念,将其进一步命名为BIPVES,即光伏储能建筑一体化。

展望未来,通过将装配式建筑、BIPV和未来的

新型储能构件进行集成,使得建筑物同时具备发电和储电功能,这一创新将房屋建筑从被动节能为主,全面走向被动+主动双节能,辅以智能能源管理系统,既可实现离网运行,也能与城市电网进行良好的耦合,真正实现建筑智慧化、灵活化和低碳化,推动建筑物从碳排放大户向清洁能源生产大户的转变,将形成巨大的市场需求。

#### 参考文献:

- [1] 房文轩,公维炜,郭琪,等. 太阳能光伏/光热一体化系统性能研究 [J]. *内蒙古电力技术*, 2020, 38(6): 17-22. DOI: [10.3969/j.issn.1008-6218.2020.00.102](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-6218.2020.00.102).
- FANG W X, GONG W W, GUO Q, et al. Research on performance of solar photovoltaic thermal integrated system [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2020, 38(6): 17-22. DOI: [10.3969/j.issn.1008-6218.2020.00.102](https://doi.org/10.3969/j.issn.1008-6218.2020.00.102).
- [2] 黄斌,赵伟,廖力达,等. 政策视角下光伏全产业链的地区差异性分析 [J]. *南方能源建设*, 2024, 11(2): 179-188. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.18](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.18).
- HUANG B, ZHAO W, LIAO L D, et al. Analysis on regional difference of the whole PV industry chain from the perspective of policy [J]. *Southern energy construction*, 2024, 11(2): 179-188. DOI: [10.16516/j.ceec.2024.2.18](https://doi.org/10.16516/j.ceec.2024.2.18).
- [3] 蒋洋. 新能源房屋的探索与实践 [J]. *中国建材*, 2012(10): 101-105. DOI: [10.16291/j.cnki.zgjc.2012.10.037](https://doi.org/10.16291/j.cnki.zgjc.2012.10.037).
- JIANG Y. Exploration and practice of new energy houses [J]. *China building materials*, 2012(10): 101-105. DOI: [10.16291/j.cnki.zgjc.2012.10.037](https://doi.org/10.16291/j.cnki.zgjc.2012.10.037).
- [4] 赵文艳,张文福,马昌恒,等. 石墨导电混凝土力学性能与热电特性 [J]. *大庆石油学院学报*, 2008, 32(6): 83-85, 92. DOI: [10.3969/j.issn.2095-4107.2008.06.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4107.2008.06.022).
- ZHAO W Y, ZHANG W F, MA C H, et al. Mechanical and thermoelectric property of graphite electrically conductive concrete [J]. *Journal of Daqing Petroleum Institute*, 2008, 32(6): 83-85, 92. DOI: [10.3969/j.issn.2095-4107.2008.06.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.2095-4107.2008.06.022).
- [5] 黄永辉,饶瑞,刘春晖,等. 一种石墨烯导电混凝土: 106082837A [P]. 2016-11-09.
- HUANG Y H, RAO R, LIU C H, et al. Graphene electric-conduction concrete: 106082837A [P]. 2016-11-09.
- [6] 杨玉山,董发勤. 掺石墨导电功能基元材料电热混凝土的研究 [J]. *功能材料*, 2008, 39(3): 385-387. DOI: [10.3321/j.issn:1001-9731.2008.03.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-9731.2008.03.012).
- YANG Y S, DONG F Q. On electrothermal concrete of doping graphite electricity-conductive elementary materials [J]. *Journal of functional materials*, 2008, 39(3): 385-387. DOI: [10.3321/j.issn:1001-9731.2008.03.012](https://doi.org/10.3321/j.issn:1001-9731.2008.03.012).
- [7] 李红英. 导电混凝土的配制及力学和导电性能研究 [J]. *防护工程*, 2020, 42(3): 26-31. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1854.2020.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1854.2020.03.004).
- LI H Y. Study on preparation of conductive concrete and its mechanical and conductive properties [J]. *Protective engineering*, 2020, 42(3): 26-31. DOI: [10.3969/j.issn.1674-1854.2020.03.004](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-1854.2020.03.004).
- [8] LIU S H, GE Y C, WU M Q, et al. Properties and road engineering application of carbon fiber modified-electrically conductive concrete [J]. *Structural concrete*, 2021, 22(1): 410-421. DOI: [10.1002/suco.201900510](https://doi.org/10.1002/suco.201900510).
- [9] 周文键,蓝文坚,左晓宝,等. 碳纤维混凝土的导电性及其影响因素分析 [J]. *烟台大学学报(自然科学与工程版)*, 2012, 25(1): 65-69. DOI: [10.3969/j.issn.1004-8820.2012.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-8820.2012.01.014).
- ZHOU W J, LAN W J, ZUO X B, et al. Conductivity of carbon fiber concrete and its influencing factors [J]. *Journal of Yantai University (Natural Science and Engineering Edition)*, 2012, 25(1): 65-69. DOI: [10.3969/j.issn.1004-8820.2012.01.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-8820.2012.01.014).
- [10] 吴献,崔玉茜,回国臣,等. 炭黑导电混凝土和碳纤维炭黑导电混凝土电热试验 [J]. *沈阳建筑大学学报(自然科学版)*, 2015, 31(3): 449-457. DOI: [10.11717/j.issn:2095-1922.2015.03.09](https://doi.org/10.11717/j.issn:2095-1922.2015.03.09).
- WU X, CUI Y X, HUI G C, et al. Experimental study on the electro-thermal behavior of conductive concretes with carbon black and carbon fiber-carbon black [J]. *Journal of Shenyang Jianzhu University (Natural Science Edition)*, 2015, 31(3): 449-457. DOI: [10.11717/j.issn:2095-1922.2015.03.09](https://doi.org/10.11717/j.issn:2095-1922.2015.03.09).
- [11] GWON S, KIM H, SHIN M. Self-heating characteristics of electrically conductive cement composites with carbon black and carbon fiber [J]. *Cement and concrete composites*, 2023, 137: 104942. DOI: [10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.104942](https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2023.104942).
- [12] CHEN B, WU K R, YAO W. Conductivity of carbon fiber reinforced cement-based composites [J]. *Cement and concrete composites*, 2004, 26(4): 291-297. DOI: [10.1016/S0958-9465\(02\)00138-5](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(02)00138-5).
- [13] 赵若红,钱兴,傅继阳,等. 碳纤维石墨导电混凝土微观结构及其机理分析 [J]. *新型建筑材料*, 2014, 41(6): 41-44. DOI: [10.3969/j.issn.1001-702X.2014.06.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-702X.2014.06.010).
- ZHAO R H, QIAN X, FU J Y, et al. Analysis on the microstructure and mechanism of fiber and graphite in

- conductive concrete [J]. *New building materials*, 2014, 41(6): 41-44. DOI: [10.3969/j.issn.1001-702X.2014.06.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-702X.2014.06.010).
- [14] ASIF M. Growth and sustainability trends in the buildings sector in the GCC region with particular reference to the KSA and UAE [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, 55: 1267-1273. DOI: [10.1016/j.rser.2015.05.042](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.042).
- [15] MAHMOUD A S, ASIF M, HASSANAIN M A, et al. Energy and economic evaluation of green roofs for residential buildings in hot-humid climates [J]. *Buildings*, 2017, 7(2): 30. DOI: [10.3390/buildings7020030](https://doi.org/10.3390/buildings7020030).
- [16] MENG Q L, CHUNG D D L. Battery in the form of a cement-matrix composite [J]. *Cement and concrete composites*, 2010, 32(10): 829-839. DOI: [10.1016/j.cemconcomp.2010.08.009](https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.08.009).
- [17] BYRNE A, HOLMES N, NORTON B. An overview of the development of cement-based batteries for the cathodic protection of embedded steel in concrete [J]. *Civil engineering research in Ireland*, 2016, 1(1): 593-597. DOI: [10.21427/D7ZZ3P](https://doi.org/10.21427/D7ZZ3P).
- [18] ZHANG Q N, TANG L P. Rechargeable concrete battery [J]. *Buildings*, 2021, 11(3): 103. DOI: [10.3390/buildings11030103](https://doi.org/10.3390/buildings11030103).
- [19] 王泽旭, 李冰辰, 许瑶, 等. 基于过冷相变材料热开关的锂离子电池热管理系统 [J]. *发电技术*, 2022, 43(2): 328-340. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.21058](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.21058).
- WANG Z X, LI B C, XU Y, et al. Lithium-ion battery thermal management system based on the combination of supercooled phase change material and thermal switch [J]. *Power generation technology*, 2022, 43(2): 328-340. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.21058](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.21058).
- [20] 李泽航, 周浩, 李浩秒, 等. 面向电力系统的液态金属电池储能技术 [J]. *发电技术*, 2022, 43(5): 760-774. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.22154](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.22154).
- LI Z H, ZHOU H, LI H M, et al. Liquid metal battery energy storage technology for power system [J]. *Power generation technology*, 2022, 43(5): 760-774. DOI: [10.12096/j.2096-4528.pgt.22154](https://doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.22154).
- [21] 申永鹏, 谢俊超, 梁伟华, 等. 电动汽车混合储能系统 CEEMD-PE 能量管理策略 [J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(13): 122-131. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.221497](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.221497).
- SHEN Y P, XIE J C, LIANG W H, et al. Electric vehicle hybrid energy storage system CEEMD-PE energy management strategy [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(13): 122-131. DOI: [10.19783/j.cnki.pspc.221497](https://doi.org/10.19783/j.cnki.pspc.221497).
- [22] 徐海铭, 黄鹏, 张润樾. 一种汽车锂电池监控系统的设计与实现 [J]. *机电工程技术*, 2022, 51(6): 173-176. DOI: [10.3969/j.issn.1009-9492.2022.06.041](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-9492.2022.06.041).
- XU H M, HUANG P, ZHANG R Y. Design and implementation of a monitoring system for automotive lithium battery [J]. *Mechanical & electrical engineering technology*, 2022, 51(6): 173-176. DOI: [10.3969/j.issn.1009-9492.2022.06.041](https://doi.org/10.3969/j.issn.1009-9492.2022.06.041).

## 作者简介:



蒋洋

蒋洋(第一作者)

1972-, 男, 教授级高级工程师, 国务院政府特殊津贴专家, 博士, 主要从事新型玻璃陶瓷、固废再生利用、新能源材料、绿色建筑建材等的研究工作(e-mail)[yj8929@ceec.net.cn](mailto:yj8929@ceec.net.cn)。



蒋序来

蒋序来(通信作者)

2001-, 男, 硕士在读, 主要从事可充电水泥储能电池的研究工作(e-mail)[jiangxulai011223@163.com](mailto:jiangxulai011223@163.com)。

张晴楠

1985-, 女, 博士, 主要从事固废综合利用、特种胶凝材料、可充电水泥储能电池的研究工作(e-mail)[emma.qingnan@gmail.com](mailto:emma.qingnan@gmail.com)。

闵杰

1985-, 男, 武汉大学教授, 青年长江学者, 博士, 主要从事有机太阳电池, 钙钛矿太阳电池、BIPV 应用等的研究工作(e-mail)[min.jie@whu.edu.cn](mailto:min.jie@whu.edu.cn)。

蔡如剑

1982-, 男, 主要从事陶瓷制造、原料提纯、打印介质及装备等的研究工作(e-mail)[335416005@qq.com](mailto:335416005@qq.com)。

王亚杰

1997-, 男, 硕士, 主要从事可充电水泥储能电池的研究工作(e-mail)[yjwang3574@ceec.net.cn](mailto:yjwang3574@ceec.net.cn)。

(编辑 孙舒)