新型太阳能电池技术迭代驱动产业模式升级

中国金属矿业经济研究院(五矿产业金融研究院)宋雨彤 张炀

新型太阳能电池是全球向低碳清洁能源转型的关键推动力，在材料学、工程学等基础学科驱动下快速发展，为全球摆脱化石能源依赖提供了现实路径。当前，晶硅光伏凭借数十年的技术积淀与完善的产业链布局，稳固占据市场主导地位;钙钛矿光伏则依托材料、工艺与应用层面的代际优势，成为最具发展潜力的新兴技术路线，研究表明，兼顾技术优势与产业稳态的并行格局符合新型太阳能电池迭代的发展规律。这场由技术迭代引发的光伏产业变化将对上游金属原料需求产生影响，还会拓展传统应用边界，推动下游从单一发电向发电与产品、服务融合的模式升级，从而带来金属原料需求的新一轮变化。

一、钙钛矿光伏性能优势明显，但大规模产业化仍有障碍

钙钛矿光伏是人工合成材料，呈现ABX_3型三维立方晶体结构(A位为有机、无机阳离子，B位为二价金属阳离子，X位为卤族元素)。该材料可通过元素掺杂精准调控光电性能，吸光层本身材料成本极低。与传统晶硅光伏相比，因材料基础和制备工艺的先天差异，展现出效率、工艺、形态等多方

面的显著优势，具备迭代传统晶硅电池的核心基础。

表 1：钙钛矿与晶硅光伏核心指标对比表

对比维度	钙钛矿光伏	晶硅光伏
组件性能	1.轻、薄、柔、半透明，可弯曲或异形加工，厚度最低可达 0.3mm; 2.弱光响应好，温度系数优异，高温下效率衰减率低; 3.实验室效率上限高（单结>27%，叠层>34%），但当前量产组件效率仍偏低（行业领先水平约 18%-22%）。	1.以刚性结构为主，厚度通常在 3-5mm，形态适配性有限; 2.寿命长、稳定性高（行业标准提供 25-30 年质保），户外可靠性高; 3.量产效率已接近其理论极限（主流 N 型技术量产效率在 24%-26%区间），良率高(>95%)。
成本结构	1.领先企业百兆瓦级产线的单结组件生产成本测算约为 1.2 元/瓦; 2.成本结构中材料占比高达约 76%，核心为 TCO 导电玻璃、靶材、封装材料等专用材料，行业目标是在 2026 年左右将组件生产成本降至 1.0 元/瓦水平。	1.组件价格已低至 0.6-0.7 元/瓦的区间 2.成本结构高度固化，硅料、玻璃等大宗原材料采购成本占比超 60%，非硅成本已降至极低水平，通过技术与管理实现进一步降本的边际空间有限。
产业化现状	1.处于规模化扩张初期，2025 年被行业视为“吉瓦（GW）级产线投产元年” 2.已披露的 7 吉瓦（GW）级产线规划合计投资额约为 85.1 亿元; 3.其产业链尚未成熟，核心材料与设备依赖定制，专用测试标准、认证体系及回收闭环仍在完善。	1.已进入完全成熟的存量竞争阶段，拥有太瓦（TW）级产能规模，占据全球光伏发电装机量的绝大部分份额; 2.在产能过剩背景下，行业发展由市场与成本驱动，并进入淘汰整合阶段。

资料来源:根据公开资料整理

钙钛矿光伏的代际特征体现在四大核心优势上，成为其技术迭代的核心支撑。**一是效率天花板高，**实验室单结效率超 27%、叠层效率超 34%，远高于晶硅光伏的量产效率区间，为度电成本的持续下降提供了理论可能；**二是绿色制造属性突出，**低温溶液法大幅降低生产能耗，全产业链能耗仅为晶硅光伏的十分之一，高度契合全球绿色制造发展趋势；**三是产品形态适配性广，**轻、薄、柔、半透明的特性使其可实现

弯曲或异形加工，能切入晶硅光伏难以覆盖的差异化应用场景；**四是降本与投资潜力巨大，**吸光层材料成本极低，降本路径清晰，且单位产能投资门槛快速下降，吸引大量资本入局加速产业化进程。

当前，钙钛矿光伏尚未完成从实验室技术到大规模产业化的全面跨越，亟待突破的瓶颈包括：**长期可靠性缺乏实证验证，**钙钛矿材料对水、氧、光、热敏感，尽管封装技术优化已通过基础认证，但缺乏晶硅光伏那样长达 25 年以上的多气候区户外实证数据，难以进入大型地面电站等对可靠性要求极高的主流市场；**大面积制备的工程瓶颈，**实验室平方厘米级的高效电池技术无法顺利复现至平方米级商用组件，当前量产良率仅约 50%，与晶硅光伏良率差距悬殊；**产业生态未完整闭环，**器件结构与量产工艺尚未收敛，核心材料和设备依赖定制化开发，含铅组件的回收体系、专用测试标准与认证体系仍在完善，配套支撑体系远不及晶硅光伏成熟。

二、兼顾技术优势与产业稳态的并行发展是当前新型太阳能电池发展的现实路径

依托材料与工艺的先天优势，钙钛矿光伏具备对晶硅光伏的显著代际迭代潜力，可以作为光伏产业摆脱同质化竞争、向高端化升级的优化方向。但受限于现实瓶颈，光伏产业还没有进入钙钛矿光伏取代晶硅光伏的阶段，而是兼顾技术优势与产业稳态，形成以晶硅技术为主导、钙钛矿技术为补充的并行发展态势，其中叠层技术成为二者融合升级的重要领域。

钙钛矿晶硅叠层电池技术以晶硅为底部电池、钙钛矿为顶部电池，既能最大程度利用现有成熟的晶硅产业链，又能充分发挥钙钛矿的效率优势，量产效率有望突破 30%。目前主流晶硅龙头企业均已布局该技术，不同叠层技术路线的产业化特征各异，其中组件级四端（4T）技术成为中期发展主流。

表 2：钙钛矿晶硅叠层技术类型表

叠层技术类型	核心工艺特点	产业化难度	成本潜力	产业化节奏
组件级四端（4T）	工艺灵活，无需电流匹配	低	中	率先实现产业化，为中期主流
电池级两端（2T）	结构简化，集成度更高	高	大	长期技术方向，逐步突破

资料来源: 根据公开资料整理

表 3：截至 2025 年初的全球钙钛矿电池效率纪录示例

电池结构	研究机构	效率 (%)	面积 (平方厘米)	认证、报道时间
钙钛矿/晶硅叠层	隆基绿能	34.6	1.004	2024 年 4 月
钙钛矿/晶硅叠层	隆基绿能	30.1	212.1	2023 年 5 月
钙钛矿单结	苏州大学/悉尼新南威尔士大学	27.0	0.0583	2025 年 2 月
钙钛矿单结	中国科学技术大学	26.7	0.0519	2024 年 4 月
钙钛矿单结（大面积）	深圳市光因科技有限公司	21.1	843.5	2024 年 12 月

数据来源: 中商产业研究院

整体来看，钙钛矿光伏若要实现对晶硅光伏的全面技术迭代，需依次突破三大关键拐点：**长期可靠性实证验证、规模化成本竞争力形成、产业生态体系完善。**在三大拐点实现技术突破之前，光伏产业将长期维持以晶硅为主导、钙钛矿为补充、叠层融合为路径的并行发展格局。

三、并行发展格局驱动上游金属需求存量优化与增量创造

研究认为，光伏产业的并行发展格局不会引发上游金属需求的简单单向替代（锡、铅、铟、铋、铯替代铜、铝、硅、银），而是带来结构性分化与增量性创造的双重影响，推动上游金属供应与精加工的变化。

（一）晶硅路线：核心金属需求进入存量精耕与技术替代

晶硅技术已步入高度成熟的存量竞争阶段，行业发展主线从产能规模扩张转向极致降本增效，其对核心金属材料的需求不再体现为总量的持续增长，而是呈现显著的结构性调整，硅、银两大核心金属的需求逻辑发生根本性变化。

1.硅：需求向高纯化升级，产品结构加速优化

经历前期高速扩张后，全球光伏装机增速趋于平稳，同时硅料环节面临产能过剩压力，硅料需求总量的增长已显著放缓，行业竞争焦点从产能规模转向成本控制与产品品质。N 型电池正在快速扩张，对硅料纯度提出严苛要求，关键金属杂质需控制在十亿分之一级，由此催生了适用于 N 型电池的超高纯硅料需求。这使得能够满足 N 型电池要求的硅料与普通太阳能级硅料之间出现持续的价格分化，前者享有明确的市场溢价。同时，颗粒硅因其在降低碳足迹和更好适配 N 型工艺方面的潜在优势，市场关注度与渗透率正稳步提升。一系列变化推动硅料产业进入以技术、成本与品质为核心竞争力的深度整合阶段。

2.银：技术替代趋势明确，需求迎来结构性拐点

N 型电池的银耗量显著高于传统的 P 型电池，在技术转换初期推高光伏行业的银浆需求。但快速上涨的银价，倒逼产业加快推进减少银用量的技术研发。其中，银包铜浆料已成为当前降低银耗的主流过渡方案，而旨在完全取代银浆的电镀铜技术也在加速研发与产线导入，这场技术替代已形成高度的产业共识。因此，行业普遍预测，光伏用银需求将在“十五五”时期达峰，随后进入长期下降通道，产业对白银的依赖度预计将逐步降低。

（二）钙钛矿路径：催生小金属全新刚性高附加值需求

钙钛矿产业处于规模化起步扩张阶段，其独特的材料体系与制备工艺，创造出全新的高纯特种材料市场，对多款小金属形成刚性新增需求。而核心材料的供应约束也成为其产业化推进的关键瓶颈，其中铷、铯、铅、锡铟成为需求核心标的。

1.铷与铯：产业化核心制约，供应体系存挑战

铷、铯是提升钙钛矿电池效率与稳定性的关键掺杂剂，目前是高性能钙钛矿电池配方中的必要元素。根据行业初步测算，生产 1 吉瓦（GW）钙钛矿组件对铷铯盐（以碳酸盐等化合物计）的需求量约在十吨至数十吨量级（具体数值因电池结构、掺杂比例及组件功率等因素而异，目前尚无统一的行业标准）。当前全球铷、铯的年产量极小，且供应链高度集中、原料提取难度大。钙钛矿产业一旦实现规模化发展，对铷、铯的需求将呈指数级增长，其供应保障与成本控制能

力，很可能成为制约钙钛矿产业化速度与规模的关键战略约束。

2.铅：需求总量影响有限，全生命周期管理成核心

以主流组件尺寸和典型配方估算，一块标准钙钛矿组件的含铅量可低至约 2 克水平，即便实现大规模应用，其对全球铅市场的总量影响也有限。行业关注的核心，在于建立覆盖高纯铅化合物原料供应、组件生产、报废回收的绿色闭环体系。这不仅是技术与管理层面的问题，更是钙钛矿技术获取大规模市场准入与社会认可的前置条件。

3.锡与铟：TCO 玻璃核心原料需求迎来增量空间

透明导电氧化物（TCO）玻璃是钙钛矿组件的核心基板材料，其主流技术路线中，氟掺杂氧化锡（FTO）玻璃需使用锡原料，氧化铟锡（ITO）玻璃需使用铟原料。基于当前主流组件功率密度进行估算，生产 1 吉瓦（GW）钙钛矿组件对应的透明导电氧化物玻璃需求在数百万平方米量级。随着钙钛矿产能逐步上量，锡、铟市场将迎来显著的新增需求，同时也将推动高端透明导电氧化物玻璃的国产化替代进程。

四、技术迭代驱动下游应用场景拓展，推动应用模式与价值体系重构

光伏产业双技术路线的并行迭代，带来产品性能的全方位升级，**彻底打破了传统光伏集中式电站的单一应用边界，推动下游应用向分布式、高附加值细分场景深度延展**。同时，这一迭代重构了应用场景的价值创造逻辑，使光伏产业从单一发电收益升级为发电、碳资产与场景服务的复合价值体系，

应用生态的竞争逻辑也随之发生根本性转变。

（一）光伏建筑一体化（BIPV）：从产品集成到价值运营的深度变革

钙钛矿组件轻、薄、柔、可定制的特性，有效解决了传统光伏组件在建筑美学与结构集成上的矛盾，让光伏组件从“建筑附属设备”转变为“建筑本体构件”，推动光伏建筑一体化实现从产品集成到价值运营的深度变革。随着光伏建筑自愿减排核算方法论的成型，上述融合不仅能带来发电收益与建材成本节约的直接价值，更可依托国家温室气体自愿减排机制，将发电量核证为碳减排量（CCER）进行碳交易，带来碳资产运营价值的增长空间。

同时，绿色金融与产业政策形成协同赋能，低息长期绿色信贷、土地出让与容积率奖励等政策，大幅提升光伏建筑一体化项目的经济可行性。对于企业而言，布局光伏建筑一体化不仅是降低用电成本的财务决策，更是塑造绿色企业形象、满足 ESG 信息披露的战略举措，助力企业构建差异化的环保竞争壁垒。

（二）车载光伏（CIPV）：从续航补充到移动能源节点的价值跃升

钙钛矿技术的轻质与柔性优势使其能贴合汽车曲面，使车身具备移动发电站功能，实现车辆续航的常态化、无感化补充。而车载光伏的核心价值，更在于与车辆到电网（V2G）技术的融合，完成从续航补充到移动能源节点的价值跃升。

搭载光伏的电动汽车成为可调度的分布式储能单元，车

主可在电价高峰时段向电网售电获利；海量光伏车辆通过聚合平台形成移动式虚拟电厂，参与电网调频、削峰填谷等辅助服务，创造远高于自发自用的社会与经济价值。同时，在光伏、储能、充电、放电一体化智慧能源站中，车载光伏与站端光伏、储能系统协同运作，进一步优化区域微电网的运行效率与经济性，为新型电力系统提供重要的灵活性资源。

（三）太空光伏：钙钛矿技术的战略高地与商业化新场景

太空成为钙钛矿技术规模化商业应用的独特优势场景，其真空、无氧环境恰好规避了钙钛矿材料在地面应用中最主要的水、氧衰减问题；而其高功率重量比与潜在的抗辐射性能，精准匹配航天领域对重量极度敏感的核心需求。钙钛矿晶硅叠层等高效光伏技术，可为低轨通信卫星星座提供充沛能源，也为未来太空数据中心、太空电站等构想奠定能源基础。

尽管当前太空光伏市场规模有限，但该领域技术壁垒高、战略意义重大，且长期增长潜力广阔，成为光伏技术竞赛中的价值制高点，也是钙钛矿技术实现差异化突破的重要方向。

（四）生活场景：光伏应用的场景拓展潜力

技术迭代推动光伏技术向更广泛的碎片化、长尾化场景渗透，逐步形成覆盖多场景的分布式应用网络。在消费电子与物联网领域，超薄柔性光伏组件为智能手表、无线传感器等设备实现超长续航；在农业领域，半透明光伏组件应用于温室大棚，实现发电与种植的协同发展；在城市公共设施领域，光

伏与隔音屏、公交站台、路灯等融合应用，提升城市能源自给能力与绿色形象。生活场景虽然单体规模有限，但其优势在于应用场景广泛且需求持续，积少成多形成光伏产业未来重要的增量市场，推动光伏应用从集中式电站向分布式、场景化方向全面渗透。