Sustainable Development 可持续发展, 2026, 16(2), 378-389
Published Online February 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/sd
https://doi.org/10.12677/sd.2026.162089

Hans汉斯

退役太阳能发电硅板资源化利用研究进展

张稼捷[1]，高　超[2*]

[1]青海华汇新能源有限公司，青海　德令哈
[2]昆明理工大学冶金与能源工程学院，云南　昆明

收稿日期：2025年12月30日；录用日期：2026年2月2日；发布日期：2026年2月28日

摘　要

随着全球光伏装机规模持续增长，退役光伏组件数量快速增加，其资源化利用已成为制约光伏产业绿色可持续发展的关键问题。退役晶硅光伏组件中蕴含大量玻璃、金属及高纯硅资源，其中硅材料的高值化回收对缓解资源约束、降低碳排放具有重要意义。本文系统梳理了退役太阳能发电硅板资源化利用的研究进展，重点围绕硅材料的回收与再利用路径，从材料特性、技术原理及工程适用性角度构建了梯级利用框架。相关路径包括回归光伏与电子材料前端的纯度宽容型利用、材料体系嵌入式的规模化消纳，以及通过结构重构实现向储能材料和功能陶瓷等高附加值产品的转化。进一步分析了当前在标准体系、主体参与和商业模式等方面存在的主要挑战，并从技术、装备、产业链与政策层面提出了未来发展方向。研究表明，通过分级利用策略和多路径协同，有望推动退役光伏硅资源由线性消耗向闭环循环转变，为光伏产业高质量发展和“双碳”目标实现提供重要支撑。

关键词

退役光伏组件，硅材料资源化，梯级利用，高值化回收，循环经济

Research Progress on the Resource Utilization of End-of-Life Silicon-Based Photovoltaic Panels

Jiajie Zhang[1], Chao Gao[2*]

[1]Qinghai Huahui New Energy Co., Ltd., Delingha Qinghai
[2]Faculty of Metallurgy and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

Received: December 30, 2025; accepted: February 2, 2026; published: February 28, 2026

*通讯作者。

文章引用: 张稼捷, 高超. 退役太阳能发电硅板资源化利用研究进展[J]. 可持续发展, 2026, 16(2): 378-389.
DOI: 10.12677/sd.2026.162089

Abstract

With the continuous expansion of global photovoltaic (PV) installations, the number of end-of-life (EoL) PV modules is increasing rapidly, making their recycling and reutilization a critical challenge for the sustainable development of the PV industry. Crystalline silicon PV modules contain large amounts of recoverable glass, metals, and high-purity silicon, among which the high-value utilization of silicon plays a key role in alleviating resource constraints, reducing carbon emissions, and enhancing supply chain resilience. This review systematically summarizes recent progress in the resource utilization of retired photovoltaic silicon panels and proposes a hierarchical utilization framework based on material properties, technical principles, and engineering applicability. The reviewed pathways include purity-tolerant reuse of recycled silicon in the upstream photovoltaic and electronic material chains, low-threshold incorporation of recycled silicon into material systems, and high-value upgrading through structural reconstruction into energy storage materials and functional ceramics. The major technical, industrial, and institutional challenges, such as insufficient standards, low stakeholder participation, and immature business models, are further discussed. Finally, future development directions are proposed from the perspectives of technology, equipment, industrial systems, and policy. The results indicate that a graded utilization strategy combined with multi-path coordination can effectively promote the transition of retired photovoltaic silicon resources from linear consumption to closed-loop circulation, thereby supporting the high-quality development of the PV industry and long-term carbon neutrality goals.

Keywords

End-of-Life Photovoltaic Modules, Silicon Resource Utilization, Hierarchical Utilization, High-Value Recycling, Circular Economy

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

21 世纪以来，全球能源体系加速向低碳化和可再生化转型，太阳能光伏发电凭借技术成熟、运行稳定、零排放和可规模化部署等优势，已成为增长最快的新能源形式之一[1] [2]。在“双碳”目标的系统驱动下，光伏产业实现跨越式发展，装机规模持续攀升，至 2020 年底光伏装机规模已达 2.53 亿千瓦，成为可再生能源增量的依附力量(如图 1 所示)。然而，随着光伏产业链规模的不断扩大，其全生命周期内的资源消耗与环境压力逐渐显现，尤其是硅资源利用效率偏低以及退役光伏组件集中出现所带来的资源浪费问题，正成为制约产业可持续发展的重要因素。晶硅太阳能发电硅板并非一般意义上的消耗性材料，其核心组成单元为高纯度晶体硅。服役 20~25 年后，尽管光电转换性能会因环境侵蚀、热循环和界面老化等因素而衰减，但硅材料本体的晶体骨架和化学组成仍具有较高完整性。这使得退役发电硅板本质上是一类具有明确结构基础和再利用潜力的二次硅资源，而非简单的固体废弃物。

目前，退役晶硅光伏组件中蕴含的资源价值尚未得到充分释放。一方面，硅材料作为光伏产业链中关键、且具有战略意义的基础材料，其制备过程能耗高、碳排放强度大，对原生资源依赖度高；另一方面，退役硅板中硅的纯度和含量仍显著高于多数天然硅资源，具备开展资源化利用的现实基础。因此，从低碳制造和循环经济的角度出发，系统推进退役发电硅板的资源化利用具有重要意义。近年来，相关

研究逐步从单纯的材料分离转向硅材料的高值化利用探索，资源化利用路径日趋多元化。总体来看，退役发电硅板的资源化利用方向主要包括以下几个方面：其一，将再生硅用于对纯度要求相对宽松的光伏或电子材料领域，实现硅资源的梯级利用；其二，通过结构重构、掺杂或表面调控，将退役硅材料转化为功能硅材料，用于储能、电化学、催化或复合材料体系；其三，突破“回到原点”的再制造思路，将退役硅板作为原料引入新型材料体系构建，实现由材料再生向功能转化和性能升级的转变[3]-[7]。

总之，退役太阳能发电硅板资源化利用不仅是缓解硅资源供需矛盾的重要途径，也是推动光伏产业链绿色低碳转型、构建材料循环利用体系的关键环节，具有显著的现实意义和长远战略价值。此外，废弃光伏组件资源化不仅能够产生巨大的经济回报，同时也能显著降低环境影响，是实现光伏产业链绿色低碳转型的关键环节。随着退役规模的不断扩大，构建覆盖拆解、分离、提纯及高价值再利用的完整技术体系，对于促进光伏产业可持续发展具有重要现实意义和战略价值。

2. 退役光伏与风电设备资源化利用现状

退役光伏组件中硅材料在纯度、结构完整性及功能潜力方面存在显著差异，其资源化利用难以依赖单一技术路线实现整体优化。从材料状态演化与技术干预强度角度出发，现有研究可将退役光伏硅材料的高价值利用路径概括为由“物理修复”到“化学提纯”，再到“冶金级回用”与“跨领域功能转化”逐级递进的梯级技术体系。该分类方式有助于系统揭示不同路径在材料保持程度、技术复杂度与价值层级上的差异与衔接关系。

2.1. 物理修复与完整回用路径

在所有梯级利用路径中，物理修复与完整回用对退役硅材料结构干预最小、价值保持度最高，其核心是在不引入新材料体系的前提下，通过去除失效功能层与电极结构，使再生硅/电池片重新进入光伏制造链，实现从“器件级性能失效”向“材料级功能延续”的转化。针对退役组件的失效解剖与微观表征研究表明，组件退役主要源于封装材料老化、焊带腐蚀、湿热循环诱导的界面退化以及微裂纹的逐步扩展，而硅晶体内部的长程有序结构和主体化学组成通常并未发生本征性破坏[8]-[10]。在去除金属电极、减反射层及扩散层后，硅材料仍可保持较高的结晶度和稳定的晶格参数，这一事实构成了再生硅回归光伏制造链的材料学基础。

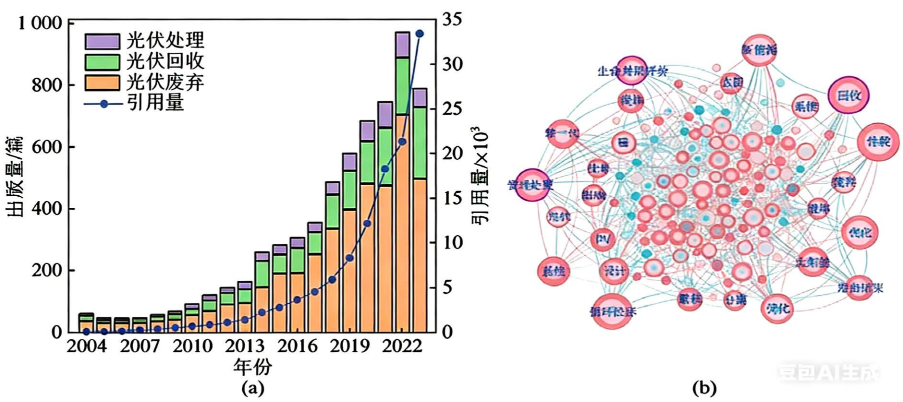

Figure 1. (a) Publication and citation counts of different search terms; (b) Word frequency map with waste photovoltaic modules as the research topic [1]
图 1. (a) 不同检索词的出版物和被引数量，(b) 废气光伏组件为主题的词频图[1]

再生硅回用于光伏制造链通常需要经历多步净化与重构工艺，包括金属电极去除、功能层剥离、杂

质控制以及裂纹与尺寸完整性筛选等关键环节。其中，杂质控制被认为是制约该路径工程化应用的首要限制因素。研究表明，Ag、Cu、Ni、Fe 等过渡金属杂质在光伏级硅中的容许浓度极低，即使在 ppm 甚至 ppb 水平，也可能通过形成深能级复合中心显著降低少子寿命，进而对电池转换效率产生不可逆影响[11] [12]。此外，服役及处理过程中产生的微裂纹不仅影响拉晶过程中的成晶稳定性，也会显著降低硅片切割良率和后续电池制程的可靠性。如，Fraunhofer ISE 与 Fraunhofer CSP 于 2022 年报道的示范性工作，为再生硅回归光伏制造链提供了直接和具有说服力的工程证[13]。该研究以退役晶硅组件中回收的硅电池片为原料，通过逐步化学处理去除银电极、铝背场、氮化硅减反射层及扩散层后，在未掺入任何原生硅的条件下，成功制备了单晶硅锭、硅片及 PERC 太阳能电池，其电池转换效率达到约 19.7%。在此基础上，研究者进一步提出将再生硅与一定比例的原生硅混合后用于多晶或准单晶硅锭制备的“掺混回用(blending reuse)”策略[14]-[16]。该策略通过原生硅对杂质和缺陷的稀释效应，在一定程度上放宽了对再生硅材料状态的要求，同时维持拉晶过程和器件性能的稳定性，被认为是当前光伏制造条件下更具现实可行性的折中方案。此外，再生硅回用于光伏制造链在理论上具有显著优势。Laura Méndez 等[17]基于生命周期评价结果指出，在杂质控制和工艺设计合理的前提下，再生硅替代部分原生硅可有效降低光伏级硅材料的单位能耗和碳排放。然而，该优势高度依赖于处理工艺复杂度的合理控制。

总体而言，回归光伏制造链的高品质再利用代表了再生硅梯级利用体系中的最高层级，其学术价值在于系统揭示了退役硅材料在结构和功能层面仍具备回归高端制造环节的潜在可能性；其工程意义则在于明确了该路径的适用边界和现实约束，为后续梯级利用路径的合理分流提供了清晰的逻辑起点。

2.2. 化学提纯驱动的硅源功能恢复路径

在退役光伏硅材料的梯级利用体系中，除少量材料可通过物理修复实现直接回用外，绝大多数再生硅在杂质谱、裂纹密度或尺寸完整性等方面难以满足光伏硅片和电池制造对材料纯度与结构完整性的严格要求。若仅依赖高品质回用路径，不仅会导致大量可利用硅资源被迫降级处理，也会显著降低整体资源化体系的覆盖率和工程可行性。因此，通过化学或物理化学手段对再生硅进行提纯处理，恢复其作为“硅源”的基础功能属性，逐渐成为拓展高价值利用通道的重要技术路径。

化学提纯驱动的硅源功能恢复路径并不以直接回归光伏器件制造为目标，而是通过杂质控制与结构重整，使再生硅具备进入后续工业提纯或材料制备环节的条件。其中，升级冶金级硅(upgraded metallurgical-grade silicon, UMG-Si)路线是当前研究与工程实践中具有代表性的技术方向之一[9] [10] [18]。该路线主要依托定向凝固、区域熔炼等物理提纯过程，利用杂质在硅固液界面处的偏析行为，实现对 Fe、Al、Ti 等金属杂质的有效削减，从而在不完全依赖高能耗化学提纯的前提下显著提升硅材料纯度。

多项研究表明，在合理控制初始杂质含量的条件下，退役光伏硅在定向凝固等过程中的提纯行为与传统冶金级硅具有高度相似性。如，Anyao Liu 等[16]指出再生硅在合理控制杂质初始浓度的前提下，其提纯行为与冶金级硅具有高度相似性。Yves Delannoy 等[18]进一步表明，通过多次定向凝固和切除富集杂质区，可显著降低 Fe、Al、Ti 等杂质含量，使硅材料满足太阳能级应用要求。Laura Méndez [17]等指出，将再生硅与 UMG-Si 路线耦合，是未来降低光伏级硅材料成本和碳足迹的重要发展方向。

相较于直接回归光伏制造链，化学提纯驱动的硅源功能恢复路径对再生硅的裂纹密度、粒径分布及初始纯度具有更高的容忍度，更适合处理来源复杂、状态差异较大的退役硅资源。然而，该路径的局限性同样明确：由于对硼、磷等轻元素杂质的去除能力有限，UMG-Si 通常难以完全替代高纯多晶硅，在高效率光伏电池领域的应用仍受到一定限制。因此，该路径更适合作为连接高品质回用与工业级利用之间的过渡层级，在梯级利用体系中发挥“硅源功能恢复”的承接作用。

尽管化学法在杂质控制方面具有较高效率，但其工程化应用高度依赖于废液处理与资源化回用体系

的完善程度。强酸、强碱或复合溶剂体系在实验室尺度下表现出良好效果，但在放大过程中，废液处理成本和环境合规压力将显著抬升整体工艺成本。若缺乏闭路循环、酸碱再生或副产物资源化设计，化学法回收的经济性优势将被显著削弱。因此，该路径更适合作为与物理预处理或后续冶金/硅化工路线耦合的功能性环节，而非独立运行的主导工艺。

2.3. 冶金级与硅化工链回用路径

在化学提纯难以完全满足高纯度硅材料需求，或对材料状态容忍度进一步放宽的情况下，将退役光伏硅引入成熟的冶金级或硅化工原料体系，作为工业硅源参与后续深度提纯与材料制备，逐渐成为当前工程实践中具有现实可行性的高价值利用路径之一。该路径的核心特征在于，其不再要求再生硅本身达到光伏级或电子级纯度，而是依托成熟、规模化的工业体系，通过后续化学反应实现材料性能的“等效重构”。

其中，以氯硅烷体系为核心的硅化工路线被认为是最易与现有光伏和半导体产业体系对接的利用通道[17] [19]。该路线通常以再生硅为硅源，通过氯化反应生成三氯氢硅($SiHCl_3$)，再经西门子法或流化床法沉积制备高纯多晶硅。Laura Méndez [17]指出，硅化工路线是目前最容易与现有半导体和光伏级多晶硅产业体系对接的梯级利用通道。R. Einhaus D 等[19]通过实验研究表明，再生硅在氯化反应中的反应行为与原生硅高度一致，不会引入额外不可控杂质，为其作为硅化工原料提供了技术依据。Wang YK 等[20]进一步指出，在适当的预处理条件下，再生硅完全可作为西门子法的硅源，实现深度提纯和高品质多晶硅制备。

从系统层面看，冶金级与硅化工链回用路径在退役硅梯级利用体系中具有明显的“中枢层级”特征。一方面，该路径对原始材料状态的容忍度显著高于直接回归光伏制造链，使大多数退役硅资源具备进入高价值利用通道的可能；另一方面，其最终产物仍可回流至光伏或电子产业链上游，在功能和性能上实现与原生硅的等效替代。多项生命周期评价研究表明，在合理控制工艺复杂度的前提下，该路径在单位能耗、碳排放和资源利用效率等方面均优于完全依赖原生硅的传统生产路线[21]-[23]。

然而，需要指出的是，该路径在梯级利用体系中具有“中枢层级”特征：既显著扩大了高价值利用的资源覆盖面，又能够在功能上实现与原生硅的等效替代。但其经济优势高度依赖于产业集群与规模效应，更适合与区域性回收体系协同布局。

2.4. 跨领域功能转化与价值跃迁路径

当再生硅在纯度与结构完整性方面难以支撑硅源回用时，通过结构重构与功能重塑，将其直接导入储能、陶瓷等领域，实现跨行业价值跃迁，成为退役光伏硅高值化利用中具有弹性的发展方向。各工艺路线对比如表 1 所示，退役晶硅光伏组件中硅材料的高价值利用并不存在单一最优技术路径，不同路线在材料保持程度、工艺复杂度与潜在市场价值之间呈现出明显的梯级分布特征。

Table 1. Comparison of parameters for different process routes
表 1. 各工艺路线参数对比

技术路线	工艺复杂度	能耗水平 ($kWh \cdot kg^{-1}$ Si)	硅回收/转化率	产物纯度或功能等级	潜在市场价值	技术成熟度与定位
物理修复与完整回用	高	80~150	低–中(受完整率限制)	光伏级或接近光伏级	★★★★★	高价值闭环路径，适用于高完整性电池片，工程化难度高
化学提纯驱动的硅源功能恢复 (UMG-Si)	中	30~70	中–高	太阳能级(对 B、P 有限)	★★★★☆	高价值承接层，兼顾资源覆盖率与成本

续表

冶金级/硅化工链回用	中–高	50~100 (依赖规模)	高	电子级或光伏级	★★★★★	工业成熟路径，依赖产业集群与规模化
储能领域：纳米硅/硅基负极材料	中	20~60	高	高容量储能功能材料	★★★★☆	高附加值跃迁路径，仍以实验室/中试为主
陶瓷化升级(SiC、Si_3N_4)	中	15~40	高	高温结构/功能陶瓷	★★★★☆	跨行业升级路径，适合低完整性硅
结构/功能填料(兜底层)	低	<10	很高	非关键功能材料	★★☆☆☆	大规模消纳路径，附加值有限

2.4.1. 储能领域：纳米硅与硅基负极材料

在前述路径中，退役光伏硅材料主要通过保持或恢复其“硅源属性”实现回用。然而，对于在拆解、分离及处理过程中已发生严重破碎、难以满足晶体完整性要求的硅资源，若仍以回归光伏制造链或前端提纯为目标，不仅工艺难度大、成本高，而且整体资源利用效率有限。在此背景下，通过结构重构与功能转化，将退役硅材料直接导入储能体系，尤其是锂离子电池负极材料领域，逐渐成为退役光伏硅高值化利用中具有发展潜力的重要方向之一。这一利用路径也构成了梯级利用体系中由“材料回用”向“功能升级”转变的关键环节。

纳米硅通常指粒径在百纳米量级以下的晶体硅颗粒，作为新一代光电与储能功能材料，具有比表面积大、反应活性高等特点。与石墨、碳纳米管等碳材料复合后，可显著提升锂离子电池负极的比容量，有望突破传统石墨负极容量瓶颈，因此被广泛视为退役光伏组件硅材料高值化利用的重要技术方向之一[24]。Dan Mao 等[10]通过对硅废料进行预处理、杂质去除及粒径调控，成功制备了高纯微纳米硅粉，实现了硅废料向高附加值功能粉体的转化。鉴于退役光伏组件在拆解和分离过程中电池片极易发生破碎，完整硅片回收难度较大，将破碎硅片或切割废料转化为高容量锂电负极材料，逐渐成为退役组件硅材料高值化回收的研究重点。

在具体结构调控方面，Gohatre OK 等[25]提出电热冲击技术，并借助氧化石墨烯薄膜的限域空间效应，在瞬时高温条件下将光伏硅废料转化为硅纳米线(SiNWs) (如图 2 所示)。所得复合电极中硅含量高达76%，初始库仑效率达到89.5%，在 1 $A\cdot g^{-1}$ 电流密度下循环 500 次后容量仍保持在 2381.7 $mAh\cdot g^{-1}$，表现出优异的循环稳定性。Rashid ESA 等[23]利用流化床原子层沉积(Forge Nano PROMETHEUS)技术，在硅颗粒表面构建 Li_2O/TiO_2 双层包覆结构，有效缓解了硅材料在充放电过程中的体积膨胀并抑制了电解液副反应，所得 $Si@Li_2O@TiO_2$ 负极在 0.5 C 倍率下循环 300 次后容量仍稳定在约 1000 $mAh\cdot g^{-1}$。进一步地，研究者通过构建多尺度复合结构以提升硅基负极的结构稳定性和导电性。Rong Deng 等[26]将 WSi@SiOx 嵌入经阳离子表面活性剂处理的 Ti_3C_2 层间空间，构筑 WSi@SiOx/Ti_3C_2 复合负极材料，在 500 $mA\cdot g^{-1}$ 条件下循环 800 次后容量仍高达 1130 $mAh\cdot g^{-1}$。Vasilis M 等[27]通过酸腐蚀与热解手段调控硅废料表面杂质赋存状态，获得了储锂性能显著提升的改性硅颗粒。Ji 等[11]以低成本硅废料与生物质蚕砂为原料，通过水热–热处理联合法制备了硅碳复合负极材料(FP-Si@C-2)。李贤宰等[28]利用光伏切割废料(SKW)，结合化学反应和碳封端技术制备了 P-SKW@C 复合负极材料。赵明才等[29]将退役光伏组件回收硅颗粒经酸洗与热解净化后，采用牺牲模板法构筑蛋黄–壳多孔结构(pSi@void@C、pSi@V@C)复合材料，有效缓解了硅材料体积效应。Lu J 等[30]则将光伏切割废料(SCW)经酸洗、高温热解与球磨处理转化为纳米级 SiNPs，并与碳纳米管(CNTs)复合，通过改进静电纺丝技术制备 Si/CNTs@CNFs 复合纤维材料，并引入聚乙烯基吡咯烷酮(PVP)作为稳定剂以抑制 SiNPs 团聚，显著提升了电极的导电性与结构稳定性。

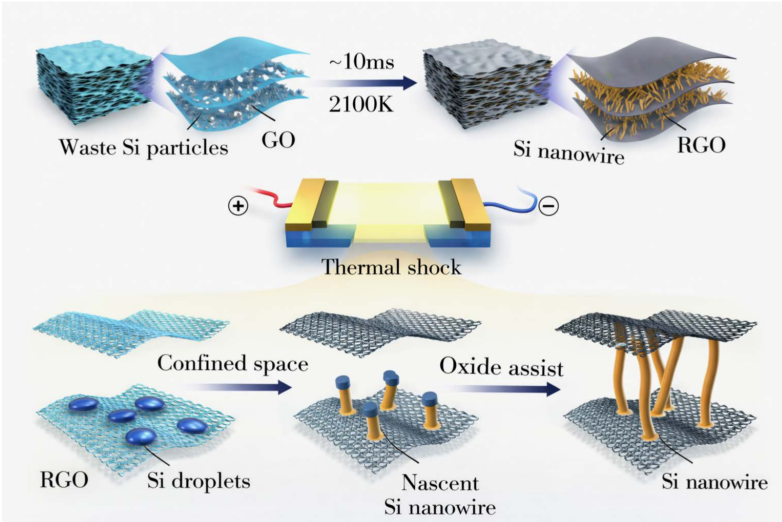

Figure 2. Schematic diagram of preparing SiNWs via electrothermal shock method [25]
图 2. 电热冲击法制备 SiNWs 示意图[25]

在器件层面，相关研究进一步验证了退役光伏硅在高能量密度电池体系中的应用潜力。基于光伏废料回收的 μm-Si 颗粒作为锂离子电池负极材料，并通过合理的电解液体系设计，使 NCM811|μm-Si 软包电池在苛刻测试条件下实现了 340.7 Wh·kg^{-1} 的质量能量密度和 1147.7 Wh·L^{-1} 的体积能量密度。此外，云南大学马文会教授团队联合德国伊尔梅瑙工业大学雷勇教授等，通过粘结剂调控喷雾制粒技术，实现了光伏硅废料向高性价比 Si/C 复合负极材料的高产率转化，为硅废料增值循环制备锂离子电池负极材料及其产业化提供了可行路径[31]。

除锂离子电池负极外，退役光伏硅材料还可通过化学转化实现进一步升级。南京师范大学姜小祥教授团队提出闪蒸焦耳加热(Flash Joule Heating, FJH)技术，在毫秒级时间尺度内实现废弃晶硅电池向高纯度碳化硅(SiC)的转化(工艺流程如图 3 所示) [32]。通过将粉碎硅粉与导电炭黑混合，在约 2200℃的瞬时高温下触发固相反应，实现硅碳化合与金属杂质的同步蒸发脱除。经多轮闪蒸－研磨循环后，所得 β-SiC 纯度超过 98%，能耗较传统方法降低约 75%，碳排放减少约 68%，为光伏废料向高端功能陶瓷材料升级提供了高效、低碳的新路径。

Figure 3. Schematic diagram of the flash Joule heating process [32]
图 3. 闪蒸焦耳加热流程示意图[32]

总体来看，退役电池片的纳米硅及硅基负极材料研究仍主要处于实验室和中试阶段，但已充分展示出退役光伏硅材料在高性能储能领域的巨大潜力。这类研究不仅显著拓展了废硅资源的高值化利用空间，也为构建“光伏－储能”跨行业闭环利用模式提供了重要的技术储备与理论支撑，是未来退役光伏组件硅材料资源化利用中潜在发展方向之一。然而，该路径的工程化仍面临原料异质性带来的性能一致性风险。退役光伏硅在来源、服役历史及拆解方式上的差异，可能导致杂质谱和粒径分布的显著波动，并在电池体系中放大为首圈效率不稳定、循环寿命离散性增加等问题。因此，该方向未来需从单一材料性能验证，转向围绕原料标准化、杂质容忍窗口及批次一致性控制的系统研究。

2.4.2. 陶瓷化升级：SiC 与 Si_3N_4 等高温功能材料

除储能应用外，基于退役硅材料的高温反应活性，通过碳化、氮化等化学转化途径制备碳化硅(SiC)和氮化硅(Si_3N_4)等高性能陶瓷材料，是另一条兼具工程意义和产业前景的跨领域利用路径。以闪蒸焦耳加热(Flash Joule Heating, FJH)为代表的新型快速转化技术，可在毫秒级时间尺度内实现硅向 SiC 的高效转化，并伴随金属杂质的同步挥发脱除，在能耗和碳排放方面显著优于传统高温烧结工艺。此外，通过直接氮化反应制备 Si_3N_4 粉体及陶瓷材料，也被认为是退役硅资源向高端结构陶瓷领域升级的重要方向。该类路径对原始硅料的晶体完整性和电学性能要求较低，更强调其作为高活性硅源参与化学反应的能力，为难以通过其他路径高值化利用的硅资源提供了新的出路。

首先，硅向碳化硅(SiC)的快速升级转化在近年得到显著推进。SiC 兼具高硬度、高导热、耐腐蚀和高温稳定性，在功率器件衬底、耐磨部件、化工与能源装备等领域需求增长迅速。典型代表是闪蒸焦耳加热(Flash Joule Heating, FJH)路线，实现一步碳化并伴随金属杂质的挥发脱除，获得高纯 β-SiC，同时能耗与碳排放显著低于传统长时高温烧结路线[33]。除粉体 SiC 外，亦有研究将废弃 PV 晶硅衍生为 SiC 纳米线并探索其光催化等功能应用，进一步拓展了“Si→SiC→功能材料”的转化链条[34]。

其次，硅向氮化硅(Si_3N_4)粉体及陶瓷的转化是另一条兼具工程意义与产业前景的路线。Si_3N_4 以高强度、高韧性、耐热震、耐磨损等特性，在轴承、刀具、发动机部件以及电子封装基板等领域应用广泛。针对退役硅粉或回收硅粉体，研究者提出了直接氮化(N_2/H_2 气氛、两步氮化)等方法制备 Si_3N_4，并通过球磨与粒径调控提升反应均匀性，实现从回收硅到 Si_3N_4 粉体的可行转化[35]。同时，亦有工作直接以光伏产业硅废料作为硅源制备 α-Si_3N_4 粉体，强调成本优势与规模化潜力[36]。这一方向的学术要点在于：退役硅料即便无法满足高纯光伏回用，其仍可作为高活性硅源参与氮化反应，通过相组成(α/β 相比例)、粒径分布与烧结助剂体系的设计，实现结构陶瓷性能的工程化可控。

再次，在“SiC/Si_3N_4 陶瓷化”之外，退役硅及其衍生硅基材料还可拓展至膜材料与多孔支撑体等方向。以 SiC 为例，利用回收 SiC 粉体制备多孔膜支撑体，可用于高温腐蚀环境下的过滤、分离与催化载体等场景，具有“材料耐受性强、服役寿命长”的优势[37]。

此外，退役硅在光催化与化学转化方面也出现了可关注的新方向。例如，基于金属辅助化学刻蚀(MACE)等手段将硅废粉构筑为多孔硅/硅纳米片结构，并负载氧化物组分形成异质结，可用于光驱动产氢等反应体系，体现出“废硅→多孔化→功能化”的典型技术范式[38]。此类方向的意义主要体现在学术创新与功能材料储备层面，工程化仍需进一步解决原料波动、表面氧化层控制与规模制备一致性等问题。

综上，退役太阳能发电硅板的资源化利用不应被限定在“回收硅本体”这一单一目标上，而应在梯级利用框架下形成“回用－提纯－功能转化－结构嵌入－工程消纳”协同并行的多路径格局。其中，SiC/Si_3N_4 等陶瓷化与化学转化路径为退役硅提供了面向高端装备与极端工况的材料升级通道，是优秀综述论文中不可缺失的重要补充方向。

2.4.3. 其他功能转化方向

除上述主要方向外，退役硅材料还可通过多孔化、表面改性及复合构筑等方式，拓展至膜分离、光催化及其他功能材料领域。例如，通过金属辅助化学刻蚀等手段构筑多孔硅结构，并负载功能组分形成异质结体系，可用于光催化制氢等反应。尽管此类方向目前仍以探索性研究为主，但其在功能材料储备和学术创新层面具有重要意义，为退役硅资源的多路径利用提供了必要补充。

未来退役光伏组件中硅材料的回收将向以下两方面发展：(1) 电池片的完整修复和再生技术将是未来退役光伏组件资源化回收技术发展的新趋势。当前太阳能电池的效率逐年提高，不同地区、不同年份、不同企业生产的电池成分和结构会随之变化，硅片的厚度也不断减小，因此电池片完整修复和再生技术面临的挑战不小，但是退役光伏组件回收的初衷是降低退役组件对环境的潜在危害，提高资源利用率，降低硅材料在开采和冶炼过程中的污染物排放量，因此电池片的完整修复和再生技术潜在的环保价值和经济价值极大，需要电池设计制造、回收拆解、修复再生等全产业链相关人员一起努力。(2) 退役光伏组件硅材料高值化回收利用是确保行业可持续发展的必要条件。目前，退役光伏组件回收行业重点关注的是对 Ag、Al、Cu 等金属资源的回收，但是有关硅材料的高值化回收方面的工作仍然不充分，同时在回收过程中用到大量的强酸强碱，导致回收成本过高。然而，退役光伏组件回收过程的经济性是维持整个行业健康持续发展的关键。因此，应该持续加强硅材料高值化回收利用的技术研究和产业化推广，切实提高回收过程的经济效益，这是整个行业长期健康发展的动力和根本。

在退役太阳能发电硅板的梯级利用体系中，仍有相当比例的再生硅在纯度、结构完整性和功能潜力等方面均难以通过上述方法实现高价值利用。这类硅资源往往杂质谱复杂、裂纹密度高、粒径分布不均，若强行追求高端利用，不仅技术难度大、成本高，而且整体资源化效率反而降低。因此，研究者提出将该种类再生硅嵌入既有材料体系中作为结构或功能填料，使其在不承担关键电学或光学功能的前提下发挥材料价值。这种方法不要求再生硅具备光伏级或电子级纯度，也不依赖其晶体完整性，而是更多关注其物理属性(如硬度、热稳定性、化学惰性)以及与基体材料的相容性。再生硅颗粒在适当处理后可作为填料广泛应用于聚合物基、无机基或复合材料体系中，用于改善材料的力学性能、热稳定性或尺寸稳定性[39] [40]。例如，将再生硅微粒引入环氧树脂、聚酰亚胺或热塑性塑料中，可在一定填充比例下提高材料的模量和耐热性能，同时降低对原生无机填料的依赖。在电子与电气领域，再生硅还被探索用于电子封装材料和功能涂层体系中[41]。与金属或高端陶瓷填料相比，再生硅在成本和资源可获得性方面具有一定优势，使其在对性能要求不极端的封装或结构部件中具备实际应用潜力。

从工程消纳能力角度看，该方法的显著优势在于其容量大、约束少、适配性强。与其他方法相比，该路径对再生硅来源、初始状态和处理精度的依赖显著降低，能够有效吸纳那些无法通过高端路径消化的低品质硅资源。因此，在梯级利用体系中，该层级在保障整体系统稳定运行方面发挥着基础性作用。然而，需要指出的是，作为结构或功能填料在单次利用中的附加值相对有限，其经济性更多体现在规模效应和系统层面的资源效率提升，而非单一产品价值最大化[42]。

从生命周期评价角度看，多项研究指出，将难以高值化利用的再生硅导入低门槛材料体系，可显著降低填埋或焚烧带来的环境负担，并减少对原生矿物资源的开采需求[43] [44]。尽管其对单个产品性能提升有限，但在宏观层面有助于降低固废压力、缓解资源约束，符合循环经济与材料可持续发展的基本理念，该路径为构建完整、稳健且具有工程可行性的退役硅梯级利用体系提供了必要支撑。

3. 结论

本文围绕硅材料的再利用路径系统梳理并提出了以“梯级利用”为核心的技术框架：通过整片修复与前端提纯实现高品质硅源回用，通过材料体系嵌入实现低门槛规模化消纳，并通过纳米化、复合化和

陶瓷化等结构重构手段，将破碎硅片和切割废料升级为储能材料、功能陶瓷或高端结构材料。相关研究表明，采用分级利用策略，将退役硅资源按其纯度、结构完整性和功能潜力进行合理分流，实现“整片回用－破碎入储能－细粉入冶金或功能材料”的多路径协同，有望在技术可行性、经济性和环境效益之间取得更优平衡，最大化退役光伏硅资源的整体价值。从产业与系统层面看，退役光伏组件资源化利用并非单一技术问题，而是一个涉及材料科学、装备制造、产业组织和制度设计的系统工程。当前回收体系仍面临标准体系不完善、主体参与积极性不足以及商业模式不成熟等结构性瓶颈，导致高价值回收路径难以规模化推广。未来资源化利用体系的构建，应从“末端回收”向“全生命周期管理”转型，在制造端引入可拆解、可回收设计理念，在回收端构建多材料协同利用体系，并通过硅材料跨领域高值化应用增强回收体系的内生经济动力。

总体而言，退役光伏组件资源化利用的本质，是通过技术、产业与政策的协同优化，推动光伏产业链由“线性消耗”向“闭环循环”转变。只有在坚持减量化、再利用和高价值化并重的原则下，构建覆盖设计、制造、使用、回收与再利用的完整体系，才能持续支撑光伏产业的高质量发展，并为全球低碳能源体系和“双碳”目标的长期实现提供坚实基础。

参考文献

[1] Shin, J., Park, J. and Park, N. (2017) A Method to Recycle Silicon Wafer from End-of-Life Photovoltaic Module and Solar Panels by Using Recycled Silicon Wafers. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **162**, 1-6. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2016.12.038

[2] Tawalbeh, M., Al-Othman, A., Kafiah, F., Abdelsalam, E., Almomani, F. and Alkasrawi, M. (2021) Environmental Impacts of Solar Photovoltaic Systems: A Critical Review of Recent Progress and Future Outlook. *Science of the Total Environment*, **759**, Article ID: 143528. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528

[3] 李炜垚. 废弃光伏组件热解产物中晶硅资源化回收和反应机理[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2023.

[4] Sim, Y., Tay, Y.B., Ankit, Lin, X. and Mathews, N. (2023) Simplified Silicon Recovery from Photovoltaic Waste Enables High Performance, Sustainable Lithium-Ion Batteries. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **257**, Article ID: 112394. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2023.112394

[5] Xu, X., Lai, D., Wang, G. and Wang, Y. (2021) Nondestructive Silicon Wafer Recovery by a Novel Method of Solvothermal Swelling Coupled with Thermal Decomposition. *Chemical Engineering Journal*, **418**, Article ID: 129457. https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.129457

[6] Lee, J., Lee, J., Ahn, Y., Kang, G., Song, H., Kang, M., *et al*. (2017) Simple Pretreatment Processes for Successful Reclamation and Remanufacturing of Crystalline Silicon Solar Cells. *Progress in Photovoltaics*: *Research and Applications*, **26**, 179-187. https://doi.org/10.1002/pip.2963

[7] 罗淼思. 退役晶硅太阳电池片中银的湿法高效回收及银粉制备工艺研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南大学, 2022.

[8] Deng, R., Dias, P.R., Lunardi, M.M. and Ji, J. (2021) A Sustainable Chemical Process to Recycle End-of-Life Silicon Solar Cells. *Green Chemistry*, **23**, 10157-10167. https://doi.org/10.1039/d1gc02263f

[9] Wang, X., Tian, X., Chen, X., Ren, L. and Geng, C. (2022) A Review of End-of-Life Crystalline Silicon Solar Photovoltaic Panel Recycling Technology. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **248**, Article ID: 111976. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2022.111976

[10] Mao, D., Yang, S., Ma, L., Ma, W., Yu, Z., Xi, F., *et al*. (2024) Overview of Life Cycle Assessment of Recycling End-of-Life Photovoltaic Panels: A Case Study of Crystalline Silicon Photovoltaic Panels. *Journal of Cleaner Production*, **434**, Article ID: 140320. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140320

[11] Kim, S., Kim, J., Cho, S., Seo, K., Park, B., Lee, H., *et al*. (2024) Development of Eco-Friendly Pretreatment Processes for High-Purity Silicon Recovery from End-of-Life Photovoltaic Modules. *RSC Advances*, **14**, 31451-31460. https://doi.org/10.1039/d4ra04878d

[12] Raji, M., Gurusamy, A., Manikkam, S. and Perumalsamy, R. (2024) Monocrystalline Silicon Wafer Recovery via Chemical Etching from End-Of-Life Silicon Solar Panels for Solar Cell Application. *Silicon*, **16**, 3669-3688. https://doi.org/10.1007/s12633-024-02936-7

[13] Keerthivasan, T., Madhesh, R., Srinivasan, M. and Ramasamy, P. (2024) Photovoltaic Recycling: Enhancing Silicon Wafer Recovery Process from Damaged Solar Panels. *Journal of Materials Science*: *Materials in Electronics*, **35**, Article

No. 880. https://doi.org/10.1007/s10854-024-12662-w

[14] Yu, Y., Bai, X., Li, S., Shi, J., Wang, L., Xi, F., *et al*. (2023) Review of Silicon Recovery in the Photovoltaic Industry. *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, **44**, Article ID: 100870. https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2023.100870

[15] Celep, O., Deveci, H. and Yazici, E.Y. (2025) A Comprehensive Review on Recycling End of Life Solar Photovoltaic Panels. *Waste Management*, **206**, Article ID: 115092. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.115092

[16] Liu, A., Phang, S.P. and Macdonald, D. (2022) Gettering in Silicon Photovoltaics: A Review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, **234**, Article ID: 111447. https://doi.org/10.1016/j.solmat.2021.111447

[17] Méndez, L., Forniés, E., Garrain, D., Pérez Vázquez, A., Souto, A. and Vlasenko, T. (2021) Upgraded Metallurgical Grade Silicon and Polysilicon for Solar Electricity Production: A Comparative Life Cycle Assessment. *Science of the Total Environment*, **789**, Article ID: 147969. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147969

[18] Delannoy, Y. (2012) Purification of Silicon for Photovoltaic Applications. *Journal of Crystal Growth*, **360**, 61-67. https://doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.12.006

[19] Einhaus, R., Sarti, D., Hassler, C., Trassy, C., Delannoy, Y., De Wolf, S., *et al*. (2000) Purification of Low-Quality Silicon Feedstock [for Solar Cell Fabrication]. *Conference Record of the Twenty-Eighth IEEE Photovoltaic Specialists Conference*—2000, Anchorage, 15-22 September 2000, 221-224. https://doi.org/10.1109/pvsc.2000.915795

[20] Wang, Y., Zhu, C., Qiu, J., Li, W., Wang, H., Yang, J., *et al*. (2025) A Unique Two-Step Process Combining Acid and Alkaline Etching for Recovering High-Purity Silicon from Waste Crystalline Silicon Solar Panels. *Physica Status Solidi* (*A*), **222**, Article ID: 2400961. https://doi.org/10.1002/pssa.202400961

[21] Das, H.J. and Sarmah, N. (2025) Photovoltaic Module Recycling: A Review on Material Recovery Methods and Waste Management Approach. *Solar Energy*, **299**, Article ID: 113708. https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113708

[22] Rocchetti, L. and Beolchini, F. (2015) Recovery of Valuable Materials from End-of-Life Thin-Film Photovoltaic Panels: Environmental Impact Assessment of Different Management Options. *Journal of Cleaner Production*, **89**, 59-64. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.11.009

[23] Rashid, E.S.A., Ariffin, K., Akil, H.M. and Kooi, C.C. (2008) Mechanical and Thermal Properties of Polymer Composites for Electronic Packaging Application. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, **27**, 1573-1584. https://doi.org/10.1177/0731684407086328

[24] Cosnita, M., Manciulea, I. and Cazan, C. (2019) All-Waste Hybrid Composites with Waste Silicon Photovoltaic Module. *Polymers*, **12**, Article No. 53. https://doi.org/10.3390/polym12010053

[25] Gohatre, O.K., Biswal, M., Mohanty, S. and Nayak, S.K. (2020) Effect of Silane Treated Fly Ash on Physico-Mechanical, Morphological, and Thermal Properties of Recycled Poly(vinyl Chloride) Composites. *Journal of Applied Polymer Science*, **138**, Article No. 50387. https://doi.org/10.1002/app.50387

[26] Deng, R., Chang, N.L., Ouyang, Z. and Chong, C.M. (2019) A Techno-Economic Review of Silicon Photovoltaic Module Recycling. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **109**, 532-550. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.020

[27] Fthenakis, V.M. (2000) End-of-Life Management and Recycling of PV Modules. *Energy Policy*, **28**, 1051-1058. https://doi.org/10.1016/s0301-4215(00)00091-4

[28] 李贤宰，等. 硅泥制备储热材料的研究[Z]. 韩国陶瓷学会志, 2016.

[29] 赵明才，等. 一种利用光伏硅切割废屑液制备微纳米硅粉的方法[P]. 中国发明专利 CN114563782A, 2022.

[30] Lu, J., Liu, S., Liu, J., Qian, G., Wang, D., Gong, X., *et al*. (2021) Millisecond Conversion of Photovoltaic Silicon Waste to Binder-free High Silicon Content Nanowires Electrodes. *Advanced Energy Materials*, **11**, Article ID: 2102103. https://doi.org/10.1002/aenm.202102103

[31] Wang, L., Lu, J., Li, S., Xi, F., Tong, Z., Chen, X., *et al*. (2024) Controllable Interface Engineering for the Preparation of High Rate Silicon Anode. *Advanced Functional Materials*, **34**, Article ID: 2403574. https://doi.org/10.1002/adfm.202403574

[32] Niu, Y., Wei, M., Xi, F., Li, S., Ma, W., Wang, L., *et al*. (2024) Preparation of Wsi@siox/Ti_3C_2 from Photovoltaic Silicon Waste as High-Performance Anode Materials for Lithium-Ion Batteries. *iScience*, **27**, Article ID: 110714. https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.110714

[33] Wang, K., Zhong, X., Song, Y., Zhang, Y., Zhang, Y., You, X., *et al*. (2024) Regeneration of Photovoltaic Industry Silicon Waste toward High-Performance Lithium-Ion Battery Anode. *Rare Metals*, **43**, 4948-4960. https://doi.org/10.1007/s12598-024-02783-w

[34] Ji, H., Li, J., Li, S., Cui, Y., Liu, Z., Huang, M., *et al*. (2022) High-Value Utilization of Silicon Cutting Waste and Excrementum Bombycis to Synthesize Silicon-Carbon Composites as Anode Materials for Li-Ion Batteries. *Nanomaterials*, **12**, Article No. 2875. https://doi.org/10.3390/nano12162875

[35] Yang, H., Li, Y., Chen, W., Zhang, C., Huang, L. and Luo, X. (2024) Scalable Synthesis of a Si/C Composite Derived

from Photovoltaic Silicon Kerf Waste toward Anodes for High-Performance Lithium-Ion Batteries. *Energy & Fuels*, **38**, 5568-5579. https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.3c05121

[36] Zhang, Y., Zhang, Z., Chen, W., Zhang, X. and Guan, Z. (2024) Recycling of Waste Silicon Powder from the Photovoltaic Industry into High Performance Porous Si@void@carbon Anodes for Li-Ion Battery. *Materials Today Communications*, **40**, Article ID: 109322. https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.109322

[37] Liu, T., Dong, T., Wang, M., Du, X., Sun, Y., Xu, G., *et al*. (2024) Recycled Micro-Sized Silicon Anode for High-Voltage Lithium-Ion Batteries. *Nature Sustainability*, **7**, 1057-1066. https://doi.org/10.1038/s41893-024-01393-9

[38] Shen, L., Li, S., Wang, Y., Lu, J., Xi, F., Zhao, H., *et al*. (2025) Upcycling Photovoltaic Silicon Waste into Cost-Effectiveness Si/C Anode Materials. *Carbon Energy*, **7**, e70004. https://doi.org/10.1002/cey2.70004

[39] Zhang, X., Guo, F., Jiang, X., Hamadamin, A.H., Lee, A.F., Wilson, K., *et al*. (2025) Upcycling Waste Photovoltaic Cells into Silicon Carbide *via* Flash Joule Heating. *Energy & Environmental Science*, **18**, 7470-7480. https://doi.org/10.1039/d5ee01509j

[40] Zhang, Y., Hu, Y., Zeng, H., Zhong, L., Liu, K., Cao, H., *et al*. (2017) Silicon Carbide Recovered from Photovoltaic Industry Waste as Photocatalysts for Hydrogen Production. *Journal of Hazardous Materials*, **329**, 22-29. https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.01.023

[41] Raju, K., Moon, S., Kim, M., Kim, H., Lee, H. and Cho, J. (2023) Cost-Effective Preparation of High-Quality Silicon Nitride Powders from Silicon Scrap through Direct Nitridation. *Ceramics International*, **49**, 34872-34879. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.08.161

[42] Xu, C., Yang, L., Su, J., Zhang, J., Cao, J., Li, X., *et al*. (2025) Cost-Effective Synthesis of A-Si_3N_4 Powders from Recycled Silicon Waste. *Ceramics International*, **51**, 30233-30238. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2025.04.218

[43] Saighi, N., Hecini, M., Kerchich, Y., Lallali, H., Meribai, N., Kouaci, K., *et al*. (2025) Recycling of Photovoltaic Silicon Carbide Waste into Green Porous Ceramic Supports via Low-Temperature Sintering. *Silicon.* https://doi.org/10.1007/s12633-025-03564-5

[44] Sun, H., Chen, J., Liu, S., Agrawal, D.K., Zhao, Y., Wang, D., *et al*. (2019) Photocatalytic H_2 Evolution of Porous Silicon Derived from Magnesiothermic Reduction of Mesoporous SiO_2. *International Journal of Hydrogen Energy*, **44**, 7216-7221. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.01.270