



BEIGE Paper

2026 年 10 月

澳大利亚光伏回收产业

开启澳大利亚最大银矿的钥匙

BEIGE



关于 Beige Advisory

Beige Advisory 是一家跨境咨询机构，专注于连接中国技术、企业与澳大利亚市场需求，协助客户探索可持续发展领域的商业机会。

我们帮助客户明确市场需求，识别和评估潜在技术、供应商、客户及合作伙伴，并支持其在澳大利亚开展商务接洽、合作评估与市场拓展。

我们的工作不止于提供企业名单或市场信息，而是帮助客户判断哪些技术、企业与合作模式值得进一步推进，并在合适的情况下支持市场进入、商业合作，以及投资与合资机会的探索与推进。

Beige Papers 聚焦于技术、产业链与可持续发展交汇处的新兴市场和商业机会，为有意进入澳大利亚市场、寻找合作伙伴或评估投资机会的企业提供商业洞察。

执行摘要

澳大利亚正迎来大规模光伏（PV）组件寿命终止（EOL）潮。这一新兴废物流中含有大量玻璃、铝、硅、铜和银，形成了价值数十亿澳元的资源回收机会。当前市场仍处于早期发展阶段，为技术供应商和投资者提供了在更大规模退役量到来之前建立合作关系的机会。

约 1 亿块 澳大利亚已安装光伏 组件	20 万–30 万吨 潜在年 EOL 退役量	5,000–7,000 吨/年 当前处理能力	约 1,000 吨/年 实际处理量
---------------------------	---------------------------	---------------------------	----------------------

主要发现：

1. 当前瓶颈是原料供应，而非已建回收产能。

澳大利亚目前估计拥有每年 5,000–7,000 吨的处理能力，但实际处理量似乎仅约为每年 1,000 吨。改善收集、集中归集和物流体系，可释放现有产能，并为未来投资提供支撑。

2. 仅靠价格竞争力并不足够。

部分低价进口设备被认为在耐用性和可靠性方面有所妥协。

3. 更高价值的材料回收并不必然带来更好的经济效益。

最适合澳大利亚市场的技术，很可能需要在回收价值、自动化程度、处理能力、能源消耗、环保合规和资本效率之间取得平衡。

4. 下游机会并不局限于光伏回收。

澳大利亚目前对回收硅和银的精炼能力仍然有限，但国内硅加工和先进制造领域的大规模投资已开始出现。未来这可能带来资源承购、精炼合作，以及将再生材料导入澳大利亚制造业供应链的机会。

对中国技术供应商的启示

在大规模 EOL 退役潮到来之前，澳大利亚为企业进入这一新兴市场提供了机会。最具潜力的市场定位，很可能来自针对澳大利亚实际条件设计的解决方案：更低的资本性支出（CAPEX）、更低的人工投入，以及具有商业价值的回收产物。

执行摘要.....0

引言.....3

澳大利亚光伏回收产业.....5

 澳大利亚退役光伏组件中的资源价值.....6

 光伏装机预测与未来废物流.....6

 光伏组件寿命—一个关键假设.....6

 退役光伏组件规模.....7

 行业特征.....9

 澳大利亚当前光伏回收运营情况.....9

 原料收集模式.....10

 设备与处理.....10

澳大利亚行业面临的挑战.....11

 挑战：物流与原料供应.....13

 挑战：技术.....16

 挑战：市场与下游加工.....17

 政府政策与行动.....19

 全国性产品责任管理.....19

 联邦政府资金支持.....20

 州级监管与投资.....20

 政府介入可能带来的突破.....21

澳大利亚光伏回收的商业可行性.....22

 光伏组件材料构成.....24

 光伏回收商业可行性与单位经济性.....26

 回收工艺经济性对比.....28

原料供应量的影响.....29

CAPEX 敏感性 30

商业可行性分析中的关键考量.....31

光伏回收技术.....32

1. 拆解.....33

2. 脱层——关键技术决策 34

3. 材料分选 37

4. 精炼——银、硅和铜的深度回收 38

对商业合作伙伴的启示与机会.....39

技术与处理.....40

下游市场与合作.....40

参考文献.....42



引言

澳大利亚最重要的关键矿产资源之一，并不埋藏在地下，而是铺设在约三分之一澳大利亚家庭的屋顶上——光伏（PV）组件。自 21 世纪初以来，澳大利亚已发展成为全球最大的光伏市场之一，屋顶光伏装机规模快速增长，近年来大型商业光伏项目也加速部署。随着光伏市场持续扩大、技术不断升级，以及越来越多组件进入寿命终止（EOL）阶段，老旧、废弃及技术淘汰的光伏组件所形成的废物流也在持续增长。2025 年，预计约有 340 万块光伏组件退役，重量约为 6.8 万吨 [13]。未来 10 年内，澳大利亚每年的光伏组件退役量可能达到 20 万–30 万吨 [14]。

这些退役组件不仅带来了废弃物管理挑战，也蕴含着商业机会。

澳大利亚的 EOL 光伏组件中含有大量玻璃、铝、硅、铜和银。按 2030 年代中期的退役规模估算，可回收材料价值预计超过 AUD 10 亿 [1, 16]。到 2040 年代中期，累计资源价值可能超过 AUD 73 亿，其中银的价值约为 AUD 40 亿 [14]。

然而，澳大利亚光伏回收产业仍处于早期发展阶段。现有光伏回收企业正在测试不同的收集模式、处理技术和下游市场，而当前运营仍受到原料供应不稳定以及全国性光伏回收体系尚未成熟的制约。

目前，三个相互关联的挑战正在塑造澳大利亚光伏回收产业：

- 收集并运输足够的退役组件原料
- 识别经济上可行的回收技术
- 为回收材料建立可持续的下游市场

价值链可简化为：



技术不能脱离整体商业体系单独评估。成功的解决方案需要在工业化材料回收能力与资本性支出（CAPEX）、人工成本、能源消耗、处理能力要求、材料纯度以及澳大利亚环保法规之间取得平衡。能够降低处理成本或提高回收产物价值的技术，是当前行业所需要的。

对于中国技术供应商、设备制造商及其他商业合作伙伴而言，澳大利亚正在发展的光伏回收产业，可能为其在大规模 EOL 退役量到来之前进入市场并提供技术解决方案创造机会。



澳大利亚光伏回收产业

澳大利亚退役光伏组件中的资源价值

据估计，澳大利亚现有光伏基础设施中已含有约 2,700–4,500 吨银[14]。到 2030 年代中期，澳大利亚 EOL 光伏组件中所含的可回收材料价值可能超过 AUD 10 亿 [1, 16]；到 2040 年代中期，这一潜在价值可能超过 AUD 73 亿，其中银的价值约为 AUD 40 亿 [14]。

光伏装机预测与未来废物流

澳大利亚已发展成为全球最大的光伏市场之一，约三分之一的家庭安装有屋顶光伏系统[2]。截至 2023 年底，全国光伏累计装机容量约为 34 GW [1]，相当于约 1 亿块光伏组件，其中包括来自 139 家制造商的 3,388 种不同型号 [1]。尽管型号众多，晶体硅（c-Si）组件仍约占市场的 90–95% [1, 8]。

预计澳大利亚的光伏装机容量将继续增长，到 2030 年达到约 50 GW，到 2050 年达到 138 GW[1]。换个角度来看，到 2050 年，澳大利亚的光伏装机规模将相当于约 4 亿块组件，即人均约 11 块。

进入澳大利亚回收体系的第一波原料中，预计超过 80%将来自退役的屋顶光伏组件 [1, 16]。此后，预计大型商业光伏系统将在 2030 年以后开始进入较大规模退役阶段，并逐步成为重要的废物流来源 [10]。

光伏组件寿命—一个关键假设

光伏组件通常被认为具有约 25 年的使用寿命，之后可退役并进入回收处理[6, 8]。然而，许多组件在达到 25 年使用寿命之前就已经退役。

光伏组件可能在安装过程中受损，也可能在运行期间因极端天气事件受到损坏。技术升级同样会导致组件提前退役，例如家庭用户为了提高发电效率而更换现有组件 [14]。过去 20 年中，澳大利亚国家光伏组件标准也快速发展，因此对于 2016 年以前安装的光伏阵列，如果其中一块组件损坏，由于整个阵列无法按照新的国家标准进行局部更新，可能需要将整套阵列退役。



关键洞察

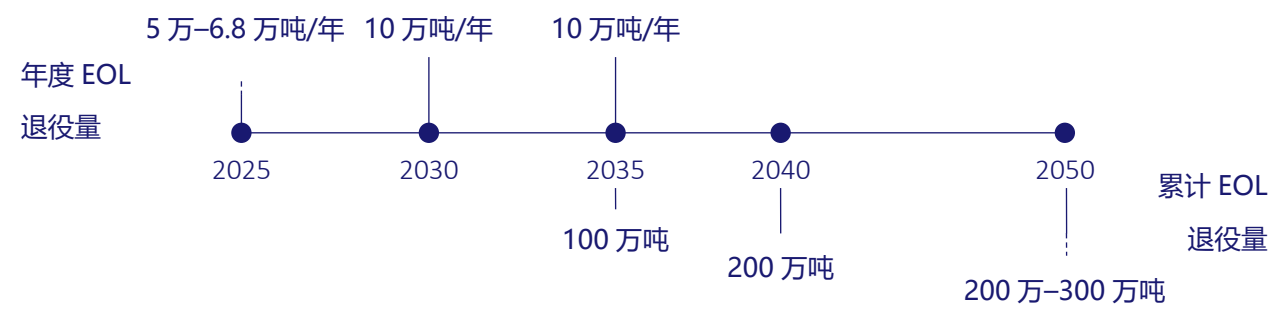
由于光伏组件存在提前退役的情况，在预测 EOL 光伏组件数量时，假设其使用寿命为 25 年可能会高估实际寿命。

基于这些因素及其他原因，约 50–70%的退役光伏组件可能仍适合再利用，而非直接进入回收处理。

退役光伏组件规模

2025 年，预计约有 340 万块光伏组件退役 [14]，相当于约 6.8 万吨可回收资源。

EOL 光伏组件年度与累计退役量预测

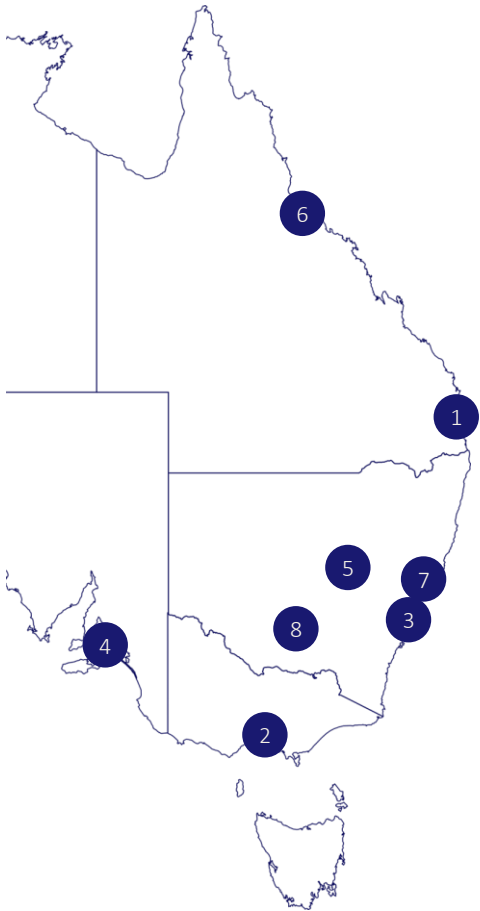


来源：根据 [1, 2, 6, 10, 16] 数据整理

与一项考虑组件提前退役的估算相比，上述时间线可能属于较为保守的预测。该估算预计，到 2043 年，澳大利亚全国累计退役光伏组件将达到 290 万吨（约 1.45 亿块） [14]；到 2030 年代中期，每年新增退役量可能达到 20 万-30 万吨 [14]。

未来预测显示，初期退役光伏组件废物流预计主要来自 Queensland、New South Wales 和 Victoria 的屋顶光伏系统[1]。根据这些预测，在主要城市周边布局回收设施，似乎最有利于承接预期增长的退役组件量。

预计退役量 (吨/年)		
	2029	2035
1 Brisbane, QLD	20,000	20,000
2 Melbourne, VIC	14,000	14,000
3 Sydney / Penrith, NSW	10,000	11,000
4 Adelaide / Adelaide Hills, SA	9,000	9,000
5 Dubbo / Wellington, NSW	7,000	9,000
6 Townsville, QLD	5,000	5,000
7 Newcastle, NSW	4,000	5,000
8 Murrumbidgee, NSW	4,000	4,000



来源：根据 [1] 整理

行业特征

澳大利亚平均每个住宅光伏系统约安装 16 块组件（不到欧洲平均水平的 30%）[14]。然而，超过 70% 的光伏装机集中在大都市周边地区 [1]。这一特点为发展新的退役光伏（EOL）相关产业创造了独特条件，因为铝和玻璃回收设施、金属精炼厂等配套基础设施可能距离较近 [1]，有利于形成具有成本效益的下游供应链。

7–10
年

昆士兰试点回收的退役组件
主要使用年限

这一机会的吸引力在澳大利亚智慧能源委员会（Smart Energy Council）于昆士兰开展的光伏组件回收试点中得到体现。由于该试点缓解了原料供应瓶颈，期间出现了 3 家新的光伏回收企业，另有 5 家新的市场参与者表示有意进入该行业 [14]。试点收集的组件中，62% 的使用年限仅为 7–10 年 [14]，进一步印证了一个市场趋势：技术升级是光伏组件提前退役的重要原因之一。

过去，将 EOL 光伏组件运往海外曾具有经济吸引力。企业无需付费处置组件，反而可以通过海外再利用机构获得收入 [10]。据估计，2024 年以前，多达 80% 的 EOL 光伏组件被运往海外 [14]。然而，全球光伏组件供应快速增长，已大幅降低新组件的单位千瓦成本。再加上 2025 年《巴塞尔公约》修正案实施，实际上禁止了光伏废弃物出口 [1]，将 EOL 光伏组件运往海外的市场激励已基本消失。

澳大利亚当前光伏回收运营情况

澳大利亚光伏回收产业仍处于早期发展阶段，目前仅有少量专业运营商（不足 20 家企业）采用不同的处理方式和商业模式。在尚未建立全国统一回收要求或全国性光伏回收基础设施的情况下，行业仍在逐步形成从 EOL 光伏组件中回收材料价值的 ability。

然而，大规模光伏废弃物浪潮正在临近。行业中的先行企业正加强现有运营能力，以应对未来需求增长，并为显著增加的 EOL 退役量进入废弃物处理体系做好准备。

澳大利亚目前的光伏回收年处理能力约为 5,000 吨 [14]至 7,000 吨，相当于约 25 万–35 万块组件。但实际处理量似乎仅接近 1,000 吨，约为 5 万块组件。

当前行业的主要瓶颈并非回收产能，而是原料供应的规模与数量。

运营商正在尝试优化跨较大区域的物流体系，以获取足够的原料并实现商业可行性。因此，在无法确保稳定原料供应之前，运营规模难以进一步扩大 [13]。这一挑战也促使部分运营商尝试不同的收集模式和循环商业模式，但这些模式目前仍处于行业边缘。

原料收集模式

为优化大范围内 EOL 光伏组件的收集，目前已观察到以下几种模式：

- 光伏组件制造商建立自有回收渠道。
- 企业提供覆盖光伏系统全生命周期的一体化服务。
- 专业回收商直接对接负责拆除退役组件的光伏安装商。
- 回收商与地方政府合作，将光伏组件回收纳入当地废弃物管理体系。具体方式可以是设立专门的光伏废弃物处理渠道，也可以利用现有废弃物管理基础设施作为 EOL 光伏组件的收集点。对于区域性地区而言，如果当地废弃物处理设施拥有足够的组件储存空间，这种合作模式可能尤其具有实用价值。

设备与处理

对于商业规模的晶体硅（c-Si）光伏组件回收，机械分选仍是当前主流基准路径，多数回收企业主要集中于铝、铜和玻璃的回收[14]。与此同时，一些回收企业已开始投入并看好适用于银和硅商业化回收的技术开发。

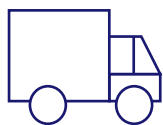
与澳大利亚其他行业类似，人工成本也是光伏回收的重要成本驱动因素。因此，行业希望通过创新和改进提高回收流程的自动化水平。一些回收企业也正在关注海外技术，以优化分选、回收和精炼流程。



澳大利亚行业面临的挑战

澳大利亚光伏回收产业：价值数十亿澳元的机会，却受制于单位经济性。

光伏回收面临的经济性挑战主要来自三个方面：



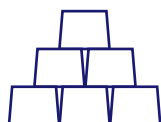
物流

收集 EOL 光伏组件并将其运输至回收设施所涉及的协调工作与物流成本。



人工成本

光伏组件拆除及后续回收处理过程中产生的人工成本。相关分析显示，人工成本约占运营支出（OPEX）的 45–60%。



下游市场

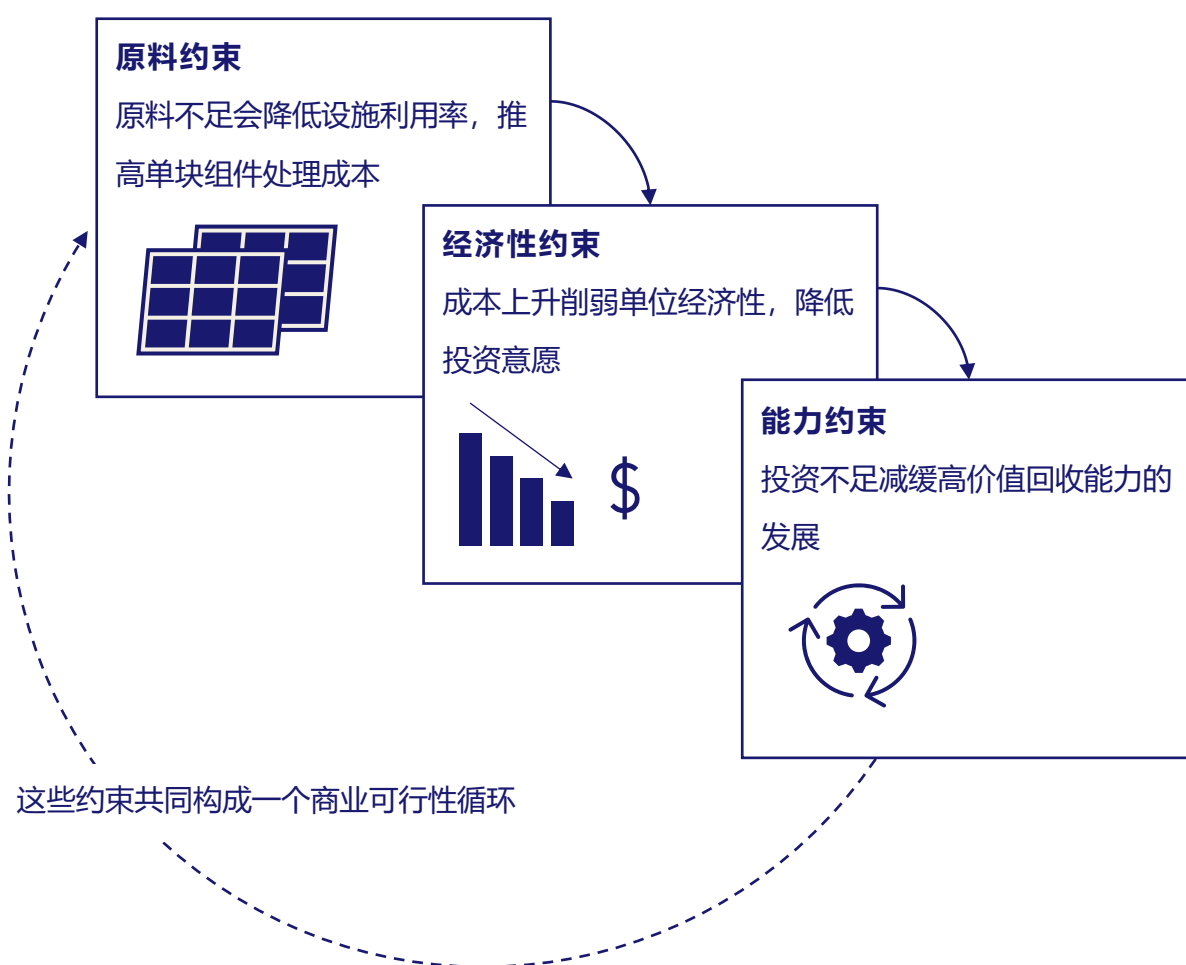
废铝回收在澳大利亚已形成成熟产业，但再生玻璃、硅和银的本地市场仍较为有限。

贯穿整个回收流程的成本效益，比追求新颖创新更为重要。



挑战：物流与原料供应

无论从研究还是实际运营角度来看，原料供应都是当前行业面临的首要制约因素。虽然行业需要并期待更具创新性的资源回收解决方案，但这些技术仍需建立在一个尚不足以充分释放其潜力的回收体系之上。回收企业需要稳定且可预期的处理量，才能形成规模经济 [1, 12, 13, 14]；然而，目前的原料供应并不稳定，存在明显的高峰与低谷。



来源：根据[14]整理

这一问题在澳大利亚市场尤为突出，因为目前的回收原料主要来自屋顶光伏组件的退役。现阶段，太阳能电站等大型光伏系统在升级过程中，通常每年只会分批退役少量组件，例如总组件数量的 10%。因此，在填埋和储存仍然成本更低的情况下，这些大型商业光伏系统目前可能尚缺乏足够的商业动因选择回收路径。未来，政策变化或经济因素可能改变这一选择。

回收企业可能会先在新的地区设立或测试收集点，以判断当地是否存在足够的原料量，再决定是否进一步投资和扩大运营规模。虽然扩大规模是解决问题的一部分，但仅以“规模不足”来概括问题，也容易忽略单个回收企业真正面临的核心约束。如果每座设施周边仍缺乏足够的本地原料供应，那么增加回收设施或运营地点的数量，只会将同样的原料供应问题扩大到更大的区域范围。

运输是造成物流与原料供应问题的重要因素之一 [2]。一项估算显示，运输成本可能占整个回收系统总成本的约 60% [13]。对于澳大利亚区域性地区而言，这一问题尤为突出，因为运输距离较长，使集中式回收的经济性进一步下降。

行业参与者指出，将光伏组件从区域性地区运输至回收设施的成本，甚至可能高于目前可回收材料本身的价值[3]。一种提出的模式是在区域当地先进行脱层处理，再将体积更小、价值更高的材料集中运输至大都市地区的处理设施 [1]。

运输成本占回收系统总成本约

60%

目前，退役方支付的光伏组件回收费约为 AUD 5–15/块 [10, 14]。然而，一旦计入收集和物流成本，整个系统成本会大幅上升至 AUD 40–80/块；在区域性及偏远地区，这一成本可能更高 [14]。

回收最大的竞争对手——填埋处理——成本约为 AUD 2–30/块 [13]，部分地方政府废弃物处理系统中观察到的费用约为 AUD 10/块。

仅从最终处置环节来看，回收的成本未必明显高于填埋。两者之间的成本差距，主要是在将完整的收集和物流体系纳入计算后才显现出来。

AUD 355

光伏组件填埋的总 ESG 成本

如果仅从直接货币成本的角度看待处置问题，就会忽略填埋所带来的环境和社会成本。澳大利亚智慧能源委员会（Smart Energy Council）估算，若将社会和环境成本计入，光伏组件填埋的总成本可达到 AUD 355/块 [14]。这一数字表明，处置决策还涉及更广泛的环境、社会和治理（ESG）因素；但在澳大利亚当前市场环境下，这些因素未必足以显著改变私人投资决策。

因此，光伏组件安装商（或拆卸方）的行为可能是回收体系能否有效运作的关键因素之一。

潜在收集模式：

新组件配送



安装商将退役光伏组件送回供应商/处理设施



集中归集



回收企业

或

便捷的收集网络



集中归集



回收企业

建立便捷的收集网络，需要地方政府、安装商和/或产品责任管理机制的支持。

据行业反馈，许多安装商希望有一个可行的光伏废弃物处理方案，但这一方案必须对安装商和回收企业而言都操作简便且具备成本效益。如果回收流程增加额外的时间或成本，那么将退役组件送往废弃物处理设施或直接堆存等既有做法，往往很难改变。

长期来看，光伏回收体系需要在规模效应与接近 EOL 光伏组件来源地之间取得平衡。一份报告提出，建设大型光伏回收设施（>5,000 吨/年）的较优地点，是澳大利亚主要首府城市：Sydney、Melbourne、Brisbane、Perth 和 Adelaide [1]，随后再逐步向区域性地区扩展 [1]。

然而，真正的挑战并不只是在人口集中城市建设更多回收产能，而是建立一套具有成本效益的收集与物流体系，将分散的退役组件集中起来，形成稳定、可预测且具备商业可行性的原料供应量。



挑战：技术

行业已经认识到，需要更先进的解决方案，以实现光伏组件中各类材料的更全面回收 [1]。未来技术需要在不显著增加处理成本的前提下，提高具有经济价值材料的回收率和回收价值 [1, 15, 16]。

研究文献表明，许多针对银和硅深度回收的先进工艺，目前仍难以实现经济上的商业化。这些研究认为，主要原因包括工艺设计问题、能源效率偏低，以及回收过程中使用危险化学品所带来的高成本 [8, 12, 15]。同时，当前针对光伏电池片的回收解决方案数量仍然有限 [16]，进一步加剧了这一问题。澳大利亚智慧能源委员会（Smart Energy Council）认为，目前尚未出现能够对高价值银和硅实现商业可行回收的成熟技术 [14]。行业运营商也确实在期待更优的银、硅回收方案。部分业内人士认为，相关技术可能已经存在，但要实现商业规模化应用，可能仍需数年时间。

据估计，光伏组件中的电池片约占整块组件总价值的 40–50% [1]，主要原因是其中含有银和硅。

实现经济可持续性，需要真正适配市场的技术方案。

目前，高纯度银提取和精炼技术高度依赖危险化学品。这不仅给本身强调环境责任的行业带来矛盾，也会增加监管要求，从而延长项目实现商业运营所需的周期。

在实际运营中，光伏电池片提取工艺较难实现规模化，而目前增加的处理成本往往高于其所带来的额外收入。部分业内人士也认为，银以及其他关键矿产的价值本身，并不会成为推动整个行业发展的“万能解法”。

因此，这一技术挑战需要一种既具备经济可行性，又符合澳大利亚环境法规要求的解决方案。这也为新技术进入澳大利亚市场创造了较大机会，尤其是能够在不依赖有害化学品的情况下提取银和硅的技术。

挑战：市场与下游加工

澳大利亚已经形成较成熟的铝和铜市场 [4, 10]，但其他光伏回收材料的市场相对薄弱 [1, 10, 16]，因此仍需要进一步发展玻璃、硅和银的下游市场。

玻璃面临的是一种典型的下游市场挑战。虽然玻璃是光伏组件回收材料中占比最大的部分 [4, 16]，但由于其单位价值较低，运输成本很容易削弱其经济性。污染以及较小的颗粒尺寸 (<1 mm) 也可能使回收玻璃只能用于附加值较低的应用 [1]，例如混凝土、道路和建筑材料。澳大利亚回收企业正在积极探索更高价值的再利用途径，但目前尚未形成成熟的高价值商业市场。

银和硅则面临另一类下游挑战。虽然这两类材料具有更高的价值潜力，但澳大利亚国内对再生硅和银的需求仍然有限，因此降低了光伏回收企业投资高成本回收设施的动力。目前较常见的做法，是将混合硅银物料出售给下游回收企业或冶炼厂。虽然澳大利亚国内存在一定需求，但回收企业也在通过国际市场弥补本地需求不足。考虑到关键矿产的战略重要性，从长期来看，将这些在澳大利亚本地“开采”出来的资源出口海外，可能并非最理想的选择。

澳大利亚目前缺乏商业规模的先进精炼能力，难以将回收材料进一步加工为高纯度银和硅 [10, 14]。这意味着回收企业可能能够生产适合进一步精炼的中间物料，但澳大利亚本地的下游产业目前尚缺乏将这些材料转化为更高价值产品的能力。

不过，澳大利亚的下游硅产业可能正在开始发展。2026 年 8 月，一项新的石英到硅一体化制造项目在 Townsville, Queensland 宣布。该项目旨在支持更高附加值的硅生产，并有望进一步延伸至光伏硅片、半导体及其他先进技术的下游制造[5]。该项目已获得澳大利亚政府重大项目 (Major Project) 认定，首阶段预计投资约 AUD 45 亿 [5]。在澳大利亚 EOL 光伏组件退役量预计加速增长的同时，这一项目代表了对本土硅价值链的一项重大投资。如果回收硅能够达到所需的纯度和规格要求，这一下游产业的发展未来可能为光伏回收企业带来本地精炼、资源承购及合作机会。

值得注意的是，本报告此前已将 Townsville 列为一个潜在的区域性原料中心，预计规模约为 5,000 吨/年。目前这两项发展之间并不存在直接联系，但未来 EOL 光伏退役量与新兴硅加工能力在同一区域集聚，可能使 North Queensland 成为未来光伏回收及下游合作特别值得关注的地区。

这些发展可能开始缓解澳大利亚光伏回收产业面临的一项结构性制约。更强的本土硅加工和先进制造能力，将为回收材料创造更多潜在市场 [10]，同时改善投资高价值回收技术的商业可行性。随着澳大利亚进一步发展关键矿产和先进制造供应链，银及其他回收材料也可能出现类似的机会。

政府政策与行动

澳大利亚针对寿命终止（EOL）光伏组件的政策框架仍相对不完善，目前在组件收集和回收方面的全国性监管仍较有限。行业参与者认为，更明确的政府政策，尤其是联邦层面的政策，可以提高行业运营模式的确定性，从而加快投资和基础设施建设。

推动光伏回收市场发展，也符合澳大利亚政府实现更广泛环境目标的政策方向。随着这些目标推动光伏部署持续增长，未来需要进行 EOL 管理的退役组件数量也将随之增加。澳大利亚已承诺，到 2030 年将碳排放量较 2005 年水平减少 43%，并于 2050 年实现净零排放 [1]。与此同时，《国家废弃物政策行动计划》（National Waste Policy Action Plan）提出，到 2030 年各类废弃物的平均资源回收率达到 80% [1]。这一政策目标也进一步凸显了将 EOL 光伏组件作为可回收资源进行管理的重要性。



全国性产品责任管理

全国性产品责任管理机制（Product Stewardship Scheme）正成为可能对行业产生重大影响的政策变化之一。澳大利亚生产力委员会（Productivity Commission）已建议建立一种责任共担模式，由制造商、进口商和零售商共同承担光伏组件寿命终止后的管理责任 [3]。澳大利亚气候变化、能源、环境与水资源部（DCCEEW）也已考虑通过产品责任管理相关法规进行规范 [1]。这也表明，对于全球供应链合作伙伴而言，持续关注澳大利亚相关政策变化十分重要。

行业反馈认为，全国性产品责任管理机制有望解决当前行业最大的障碍之一：地理分散的退役组件收集与运输成本。这一问题可能正是制约回收企业快速扩大规模的关键瓶颈。现有运营商认为，更积极的政府参与能够提高行业对未来体系如何运行的确定性，并帮助现有回收业务加快发展。

联邦政府资金支持

在全国性产品责任管理机制尚未建立的情况下，澳大利亚政府已经开始投入资金，支持未来全国性回收体系所需的基础设施、数据和技术建设。

Solar Sunshot Program (AUD 10 亿) —— 主要用于扩大澳大利亚本土光伏制造及更广泛的供应链能力，其中第二轮资金范围包括回收领域 [10]。

Recycling Modernisation Fund (AUD 2 亿) —— 旨在更新和升级澳大利亚全国的回收基础设施[18]。

Solar Panel Recycling Pilot (AUD 2,470 万) —— 旨在收集全国范围内有关光伏组件收集、回收及运输成本的数据[2]。

这些项目表明，在相关政策和监管体系进一步完善之前，政府已经越来越重视光伏组件 EOL 管理问题，并认为其值得提前投入公共资金。

州级监管与投资

在尚未形成全面联邦监管体系的情况下，部分州已开始制定各自的政策和措施。在全国性框架建立之前，也存在个别州率先推出自身产品责任管理机制的可能性 [14]。

目前，Victoria 的监管要求最为明确。自 2019 年起，光伏组件已被纳入该州禁止电子废弃物进入填埋场的规定范围 [1]。Victoria 还通过 Breakthrough Victoria 对光伏回收创新投入约 AUD 1,000 万，支持相关回收技术开发 [1]。

New South Wales 主要侧重于发展收集与处理基础设施。州政府已投入约 AUD 1,000 万，以减少光伏组件和电池系统进入填埋场处置 [1]。

Western Australia 已投入 AUD 1,300 万，用于建立新的退役组件收集、运输及处理渠道 [19]。

Queensland 目前尚无强制性光伏回收制度，回收主要依靠行业自愿安排。不过，未来引入 EOL 管理要求或处置限制，已被视为可能的政策方向 [1]。

政府介入可能带来的突破

EOL 光伏组件既被视为废弃物，也被视为潜在资源机会。然而，目前仍需要政策进一步明确：谁来承担成本、谁负责收集，以及如何以经济可行的方式将组件送至回收企业。行业认为，如果建立组件收集征费、收费或其他支付机制，可能会显著改变目前困扰原料供应问题的经济性。

全国性产品责任管理框架可能成为连接这些环节的关键机制：在整个供应链中明确责任分配，同时为组件收集和运输提供资金支持，从而提高单个回收项目的商业可行性。



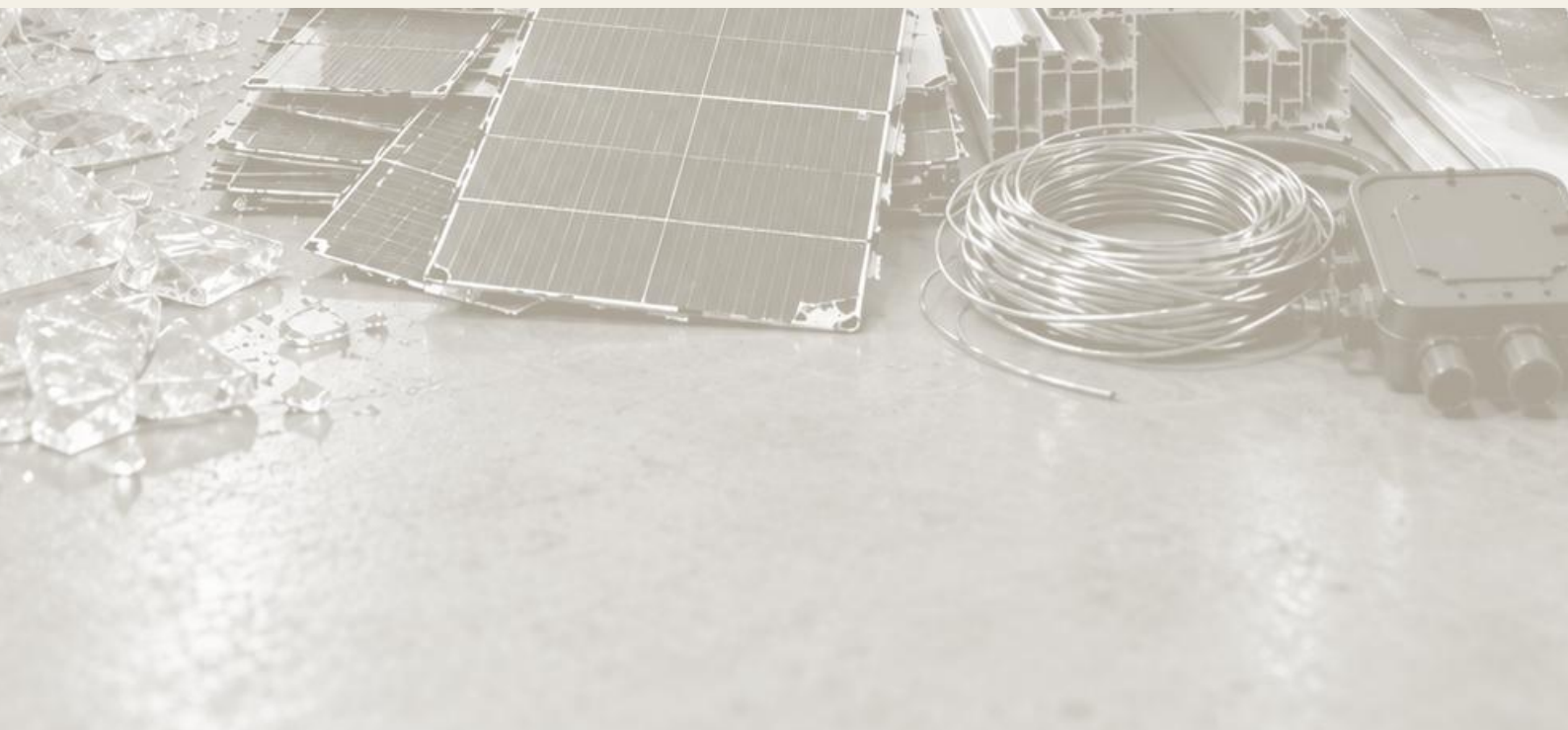
澳大利亚光伏回收的 商业可行性



AUD 1,000+

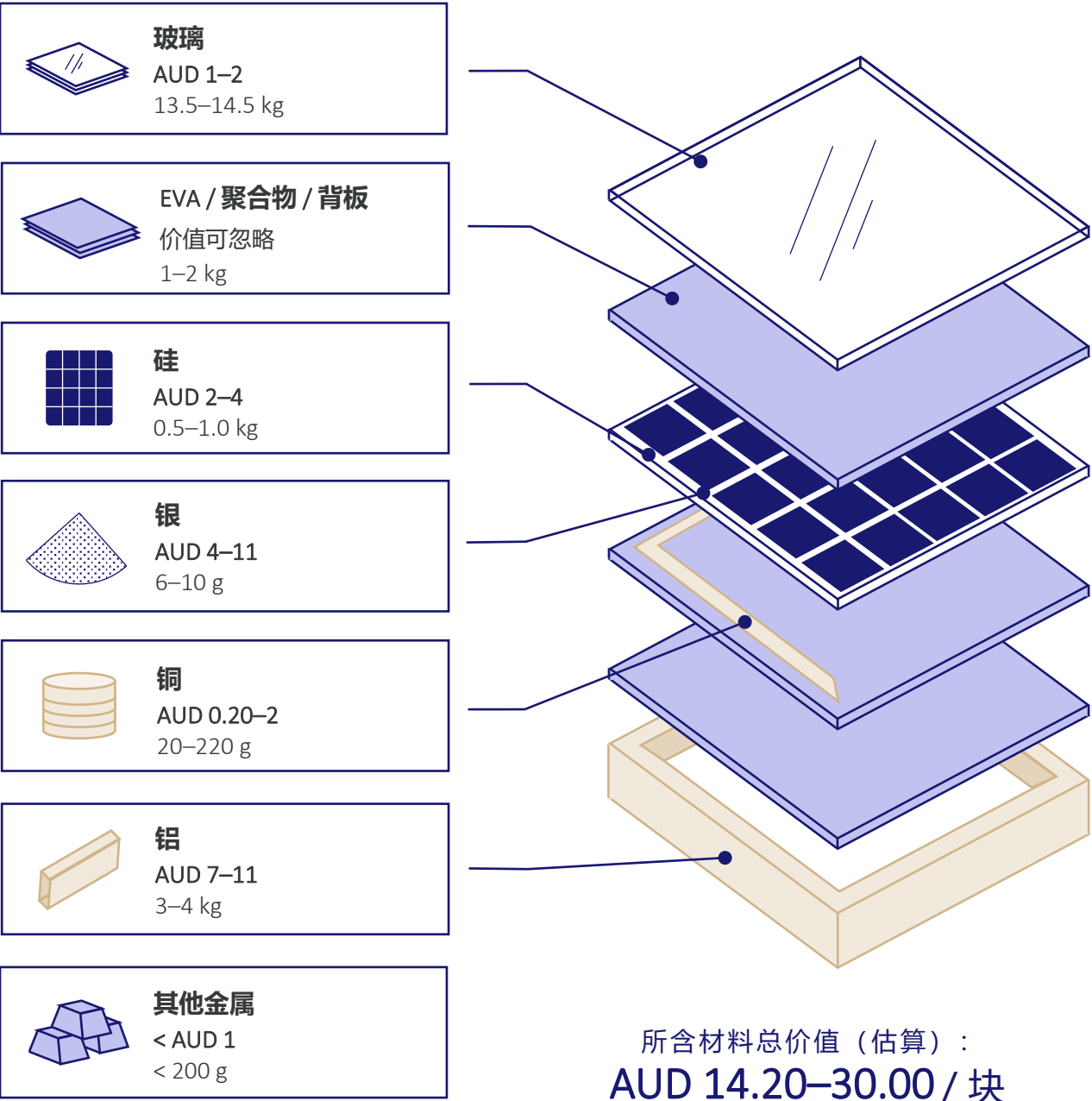
每吨晶体硅（c-Si）光伏组件的可回收材料总价值

在相对有利的材料回收率和大宗商品价格假设下，每吨晶体硅（c-Si）光伏组件所含的可回收材料总价值预计超过 AUD 1,000 [1]。但回收企业实际能够实现的价值可能明显更低，具体取决于材料纯度、回收效率以及可进入的下游市场。



光伏组件材料构成

研究表明，光伏组件中约 95% 的材料可能具备回收价值 [13]，但不同材料的经济价值差异很大。玻璃约占组件重量的 70% [1, 4, 16]，但仅占材料总价值的 6% [1]。相比之下，银仅约占组件重量的 0.04% [1, 9, 15]，却约占材料总价值的 34–47% [1, 4]。



以上范围为基于不同组件类型和数据来源的参考值，不应直接相加作为单块组件的材料构成。来源：根据 [1, 4, 11, 12, 15] 整理。

总体而言，一块重量约 20 kg 的光伏组件，其材料参考价值约为 AUD 14–30。《*Scoping Study: Solar Panel End-of-Life Management in Australia*》给出的平均参考值为 AUD 22.60/块，即约 AUD 1,100/吨。

在理解这些数值时，需要注意以下几点：

材料构成会随时间发生变化。

新一代光伏组件中银和硅的用量正在逐步减少。因此，如果商业可行性分析是基于澳大利亚第一批 EOL 光伏组件中的银、硅含量，那么这一分析未必适用于未来 20 年后续批次的退役组件。

组件所含材料价值并不等于实际回收价值。

玻璃尤其能说明这一点。经过清洁分离的光伏玻璃可能具有较好的回收市场，但破碎或研磨处理可能使其受到银、铜等金属污染。与受污染玻璃相比，采用高纯度玻璃回收系统可使玻璃产物的价值提高至两倍以上[4]。这一差异可能对回收企业的运营利润产生重要影响。

光伏回收商业可行性与单位经济性

关键商业数据

参考值



来源：根据 [1] 整理。

光伏回收商业模式的核心经济杠杆，是在尽可能提高产出数量与价值的同时，尽量降低实现这些产出的成本。更先进的回收技术可能提高回收产物的价值，但通常也需要更高的前期资本投入，因此更加依赖稳定、持续的退役组件供应。

最大化处理量与回收水平：

- 原料供应量
- 设施利用率
- 回收效率

最大化回收产物价值：

- 材料纯度与回收深度
- 下游需求与大宗商品价格
- 原料构成

最小化成本：

- 设备及设施资本性支出（CAPEX）
- 人工成本
- 原料收集与运输
- 能源、公用工程及废弃物处理
- 技术 / 工艺复杂度

一项引用研究表明，如果处理成本能够控制在 AUD 450/吨，回收玻璃板、银、铜和硅粉的设施可能具备较好的经济吸引力；如果进一步回收高纯度硅，则当处理成本达到约 AUD 650/吨 时，该工艺可能更具投资可行性 [8]。

近期澳大利亚相关资料通常估计，光伏组件回收处理成本约为 AUD 500–1,000/吨，相当于每块 20 kg 组件约 AUD 10–20 [1, 13, 16]。随着处理量增加，这些成本可能进一步下降。总体而言，这表明部分回收路径已经接近具有吸引力的处理成本水平，而成本较高的运营模式，仍有赖于设施利用率、技术水平和资本效率的进一步改善。

回收工艺经济性对比

Scoping Study: Solar Panel End-of-Life Management in Australia 对大宗材料回收（静电分选回收）与全回收退役光伏（FRELP）工艺进行了有价值的经济性对比。

	大宗材料回收	FRELP
设备 CAPEX	AUD 110 万	AUD 1,780 万
年度维护成本	设备成本的 12%	设备成本的 12%
公用工程、材料及废弃物处理	AUD 118/吨	AUD 91/吨
人工	10,000 吨/年时 30 名员工	4,000 吨/年时 25 名员工
材料销售收入	AUD 655/吨	AUD 1,168/吨
盈亏平衡规模	>2,500 吨/年	4,000 吨/年
10 年净现值（NPV）为正的测试规模	3,000 吨/年	5,000 吨/年
5,000 吨/年时的单位成本	AUD 503/吨	AUD 978/吨

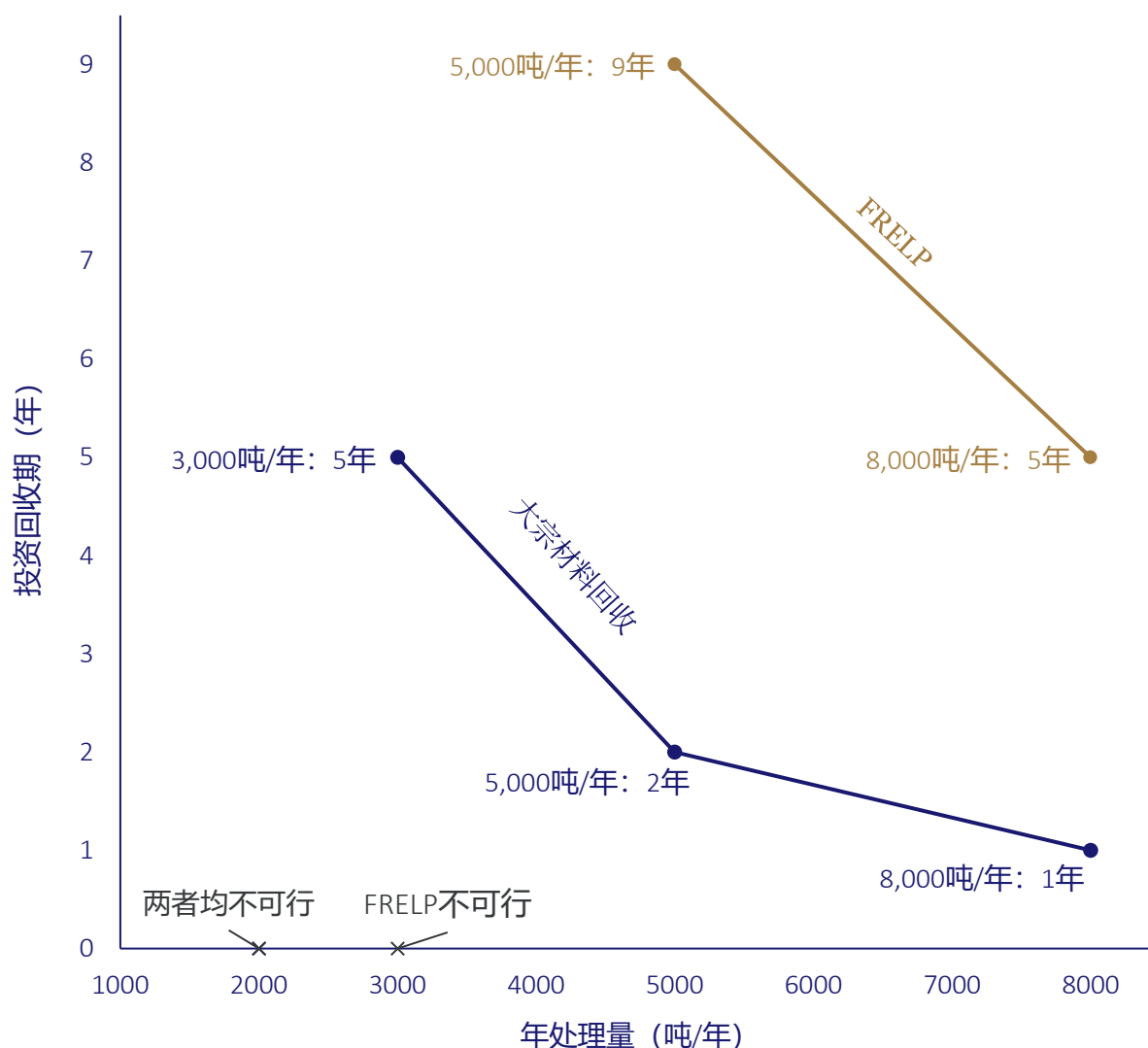
注：单位成本包含设备成本，并按设施 10 年使用寿命采用直线法折旧。来源：根据[1]整理。

上表反映了光伏回收中的一个核心决策：提高材料销售收入或回收产物价值，通常需要显著增加资本投入。因此，回收银、硅及其他高价值材料是否具有商业优势，取决于其带来的额外收入能否覆盖更高的资本性支出和处理要求。

原料供应量的影响

正如本报告前文所述，优化光伏组件收集体系、提高原料供应量，对于光伏回收设施和处理线的投资可行性至关重要。

不同处理量下的模拟投资回收期



注：投资回收期估算基于采用 7%折现率的折现现金流分析，因此不能直接使用本报告中的资本性支出（CAPEX）、材料销售收入和单位成本数据进行简单计算。来源：根据[1]整理。

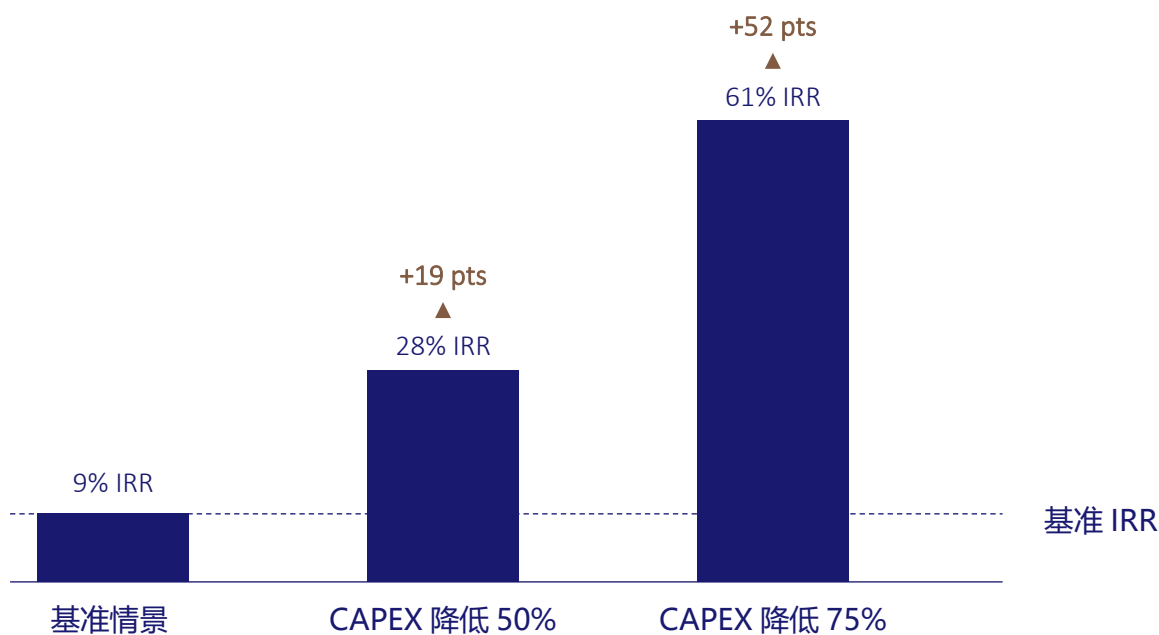
从上图可以看出，在处理量较低时，固定成本使两种回收路径都难以实现商业可行性，其中全回收路径尤为明显。以 5,000 吨/年的处理规模为例，大约需要每周收集 4,800 块光伏组件才能满足所需原料量。

CAPEX 敏感性

资本性支出（CAPEX）似乎是决定项目可行性的最重要因素之一。

CAPEX 下降对 10 年内部收益率（IRR）的影响

5,000 吨/年 FRELP 设施



来源：根据[1]整理。

这表明，降低设备和设施成本，可能会显著提升光伏回收项目的投资吸引力。但澳大利亚设备买家对于主要依靠低价竞争的设备可能会较为谨慎，尤其是在此前部分低价设备进入市场后，已经形成了可靠性不足、故障频繁的负面印象。

商业可行性分析中的关键考量

材料含量随时间下降。

一个明确的趋势是，新一代光伏组件中银和硅的用量持续减少[3, 7, 12, 13]，这可能降低未来每吨退役组件可回收的材料价值。当 2020 年代生产的组件逐渐成为回收原料主体后，这一影响可能在依赖银、硅回收来支撑经济性的先进回收工艺中表现得尤为明显。

投资回收期较长。

高资本性支出（CAPEX）的回收设施，尤其是在处理量低于最佳水平时，其折现投资回收期可能超过 10 年[7]。

固定成本和运营成本较高。

主要经济成本驱动因素包括设施 CAPEX、人工成本，以及原料收集和运输。因此，设施利用率十分关键；当原料供应持续不稳定时，高价设备和固定运营成本将更难获得商业上的合理性。

回收深度与处理成本之间的权衡。

回收企业可以通过更先进的设备获取价值更高的回收产物，但由此增加的成本，需要与实际新增的回收收入进行平衡。



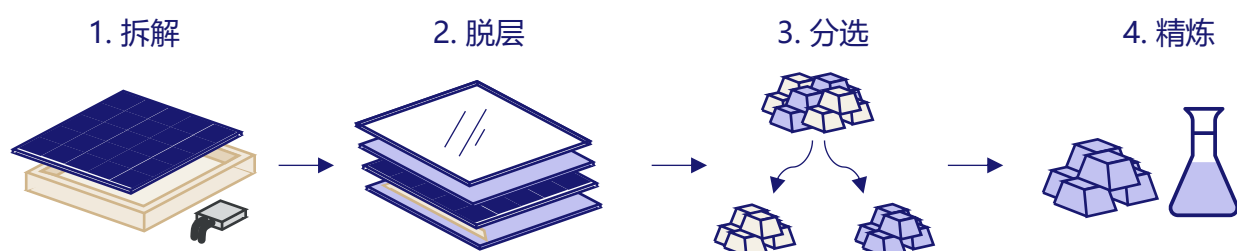
光伏回收技术

对于澳大利亚回收企业而言，技术挑战并不只是尽可能提高回收率。真正需要的是一种能够在保证足够处理量、材料质量以及高价值材料回收能力的同时，又不会使处理线在资本投入、能源消耗或人工需求方面高到失去经济可行性的解决方案。

澳大利亚目前尚未形成主导性的 EOL 光伏回收技术路径。随着行业持续发展，市场仍在探索成本、能源消耗、材料纯度与回收深度之间的权衡。

海外商业化运营已经证明，按重量计算，技术上可以实现 95% 以上的回收率[1]。然而，较高的总体回收率并不一定意味着能够获得经济性最优的高纯度回收材料。

光伏回收简化流程



1. 拆解

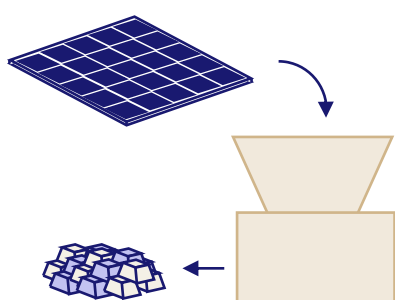
大多数回收路径首先通过机械方式拆除铝框、接线盒和电缆。这一步可以优先分离出部分最容易进入回收体系的材料。

虽然初步拆解本身相对直接，但设备仍需要具备足够的适应能力，以处理不同尺寸、结构以及不同损坏程度的光伏组件。

在这些部件被拆除后，剩余的光伏层压结构中仍包含玻璃、EVA/聚合物层、光伏电池片以及嵌入其中的金属材料。

2. 脱层——关键技术决策

将光伏组件的层压结构分离，是更具技术挑战、也需要更多权衡的环节。EVA 封装层将玻璃、光伏电池片以及背板（双玻组件中则为另一层玻璃）粘合在一起，因此需要通过机械、热处理或化学方式破坏这些结合层。不过，为了适应不同类型和状态的光伏组件，回收设施可能需要配置不止一种处理路径。



机械 / 破碎

通过撕碎、破碎或研磨，将光伏层压结构处理成较小碎片，再进行后续分选。

优势： 工艺相对简单、易规模化、成本较低；可处理严重破损的组件。

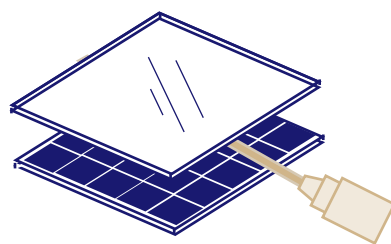
局限： 容易污染玻璃，并产生混合度较高、纯度较低的材料组分。

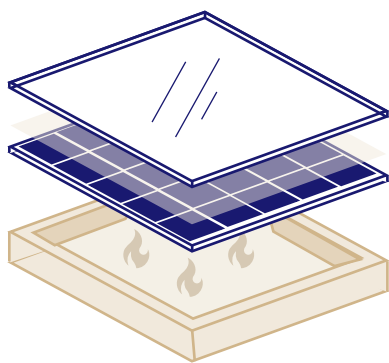
选择性切割

采用热刀、金刚线或水刀系统，在不过度破碎组件的情况下，将玻璃与光伏层压结构分离。

优势： 可保留更清洁、甚至完整的玻璃；提高材料质量，并减少进入后续分选环节的物料量。

局限： 设备更专业；通常更适合完整组件，严重破损的组件可能仍需配套破碎处理路径。





热处理 / 热解

通过加热分解 EVA 及其他聚合物。

优势： 可实现较清洁的玻璃与光伏电池片分离；适合更深度的材料回收。

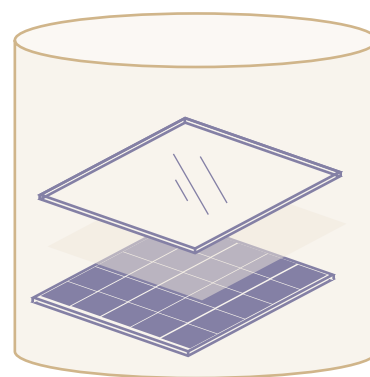
局限： 能耗较高；排放需要处理；澳大利亚回收企业对监管要求和运营成本存在顾虑。

化学法

使用有机或无机溶剂溶解 EVA / 聚合物层。

优势： 可保留高质量玻璃，并提高金属和硅的回收效果。

局限： 涉及化学品消耗与处置；成本可能较高；部分工艺可能需要数天。



脱层技术的选择似乎是当前回收运营中最重要的技术决策之一，因为分离质量会影响几乎所有后续材料处理路径，尤其是玻璃。虽然银回收往往最受关注，但玻璃约占光伏组件重量的 70–75%[1, 3, 12, 15]，因此在选择脱层技术时，玻璃回收质量本身也是一项重要的经济性考量[3, 5, 14]。

关键并不只是能否回收玻璃，而是回收出来的玻璃处于什么状态。

采用破碎或研磨方式进行脱层时，银、铜、硅及聚合物杂质可能混入回收玻璃中，降低其纯度，并限制其下游价值，使其往往只能用于建筑骨料等低附加值二次应用。

而在深度破碎前先将玻璃板分离出来的脱层工艺——如选择性切割、热解和化学法——则有望获得更清洁、价值更高的玻璃产物，甚至可作为新光伏组件玻璃的原料[3, 14]，从而形成更具循环性的材料利用模式。

此外，提前去除玻璃还有一个额外优势：可以减少后续分选设备需要处理的物料总量。

机械处理

通过撕碎、破碎或研磨进行机械处理，通常是最简单、成本最低的回收路径之一，也是目前澳大利亚最常见的处理方式。光伏组件首先被破碎成较小碎片，再进行后续分选和材料分离。对于严重破损、无法采用其他方式处理的组件，这一方法尤其具有实用性。

其主要权衡在于材料质量。破碎过程可能使玻璃与硅、银、铜及聚合物碎片混合，形成纯度较低的材料流，从而降低回收产物的潜在价值，尤其是玻璃[3]。

选择性切割

热刀、金刚线和水刀系统可以在不过度破碎组件的情况下，将玻璃与层压结构分离。这种方法有望保留更清洁、甚至完整的玻璃板，提高其质量和价值，同时减少后续分选环节需要处理的物料量。

不过，选择性切割很难成为完全独立的单一解决方案。严重损坏或破碎的组件可能无法通过选择性切割设备处理，因此回收设施可能仍需要配置辅助的机械处理路径。

热解

热解，也称热脱层，是通过加热光伏层压结构，直至聚合物层分解，从而较为清洁地分离玻璃与光伏电池片。

热解被认为是实现高质量材料回收的一种可行路径[8, 11, 14]，但同时也是能耗最高的工艺之一。由于该过程本质上是通过高温分解粘结材料，会产生挥发性化合物，因此需要配套适当的气体收集与净化系统。

不过，热解也具有其他潜在优势。热解设备制造商指出，与机械结构更复杂的替代方案相比，这类系统的长期维护成本可能更低。

在澳大利亚，热解工艺会受到额外监管，以保护环境、社区和作业人员；部分地区甚至完全禁止热解工艺。环境影响、监管要求和高能耗等因素，使市场对热解作为长期可行脱层方式的接受度受到一定影响。

化学法

化学脱层使用溶剂溶解或削弱将组件各层粘合在一起的聚合物层。

其主要优势在于能够保留高质量的玻璃、硅和金属组分，因此对深度材料回收具有吸引力[11, 14]。但这种先进回收方式需要付出的代价，是较长的处理时间以及危险化学品的管理要求。

化学脱层可能需要数天时间才能将聚合物与光伏电池片分离，因此较难直接应用于每周需要处理数千块组件的工业化场景[8]。此外，溶剂的处理与处置也必须纳入整个回收系统，为运营商增加额外的环境与安全监管要求。

3. 材料分选

在完成脱层或破碎后，需要将产生的玻璃、光伏电池片和金属碎片进一步分离。

常见的分选技术包括：

- 筛分
- 密度 / 重力分选
- 静电分选

简单的机械分选具有成本相对较低、工艺较直接的优势，但传统方法在将玻璃与光伏电池片及金属碎片彻底分离方面可能存在局限。

研究表明，工艺设计会显著影响回收率。一项研究中，传统筛分工艺的银回收率仅约为 31.7%；而采用分选助剂改进筛分处理后，银回收率提高至约 96.3%[8]。

静电分选通过区分导电与非导电材料进行分离。研究表明，在适当条件下，其按重量计算的整体分选效率可达到约 95%[6]。

这些研究说明，机械脱层本身并不一定意味着较低的回收率；最终回收效果同样取决于后续分选系统的设计。

4. 精炼——银、硅和铜的深度回收

物理分选可以回收大宗材料，但要提取高纯度银和硅，还需要进一步进行精炼处理。

化学浸出是目前研究较多的主要方法之一。研究表明，硝酸（ HNO_3 ）因具有较高的银浸出效率而尤为有效，同时也可使用硫酸和盐酸[8]。

这些额外的处理环节可以显著提高回收产物的价值，但同时也会增加化学品消耗、废弃物处理要求、能源使用以及额外的资本性支出（CAPEX）。



对商业合作伙伴的启示 与机会

尽早进入市场可能具有价值。

澳大利亚目前尚未形成主导性的回收技术路线，也尚未建立成熟的下游市场结构。因此，能够在更大规模 EOL 光伏组件退役量到来之前进入市场的企业，可能更有机会在行业发展过程中建立长期市场地位。

技术与处理

降低成本可能比追求最高回收率更有价值。

澳大利亚当前更迫切的需求，是实现具备商业可行性的光伏回收。因此，更受市场青睐的技术可能是那些在保持有效回收率的同时，能够降低资本性支出（CAPEX）、人工、能源消耗和处理成本的解决方案。

低 CAPEX 系统可能更具优势。

回收设施的经济性对资本成本和设施利用率高度敏感。因此，与大型、高资本投入的设施相比，模块化、可扩展或成本较低的处理线可能更适合澳大利亚市场。

不过，澳大利亚市场对于低价设备也已更加谨慎，因为部分低前期投入设备曾伴随可靠性和维护方面的问题。

银、硅回收仍是尚未充分验证的技术机会。

目前的先进回收路径仍受到成本和化学品使用的限制。能够在提高银、硅回收效果的同时降低这些负担的技术，有望填补一个重要的市场空缺。

下游市场与合作

未精炼银/硅物料的国际买家，可能在市场早期发挥重要作用。

如果能够建立稳定的海外市场，为混合或半加工回收产物提供可靠销路，回收企业将有机会进一步提高收入水平。

下游精炼是一个重要的延伸机会。

澳大利亚目前将回收银、硅进一步精炼为高价值产品的商业规模能力仍然有限，因此为专业化下游加工企业创造了潜在市场机会。

合作机会贯穿整个价值链。

潜在合作模式包括：设备供应、精炼合作、资源承购协议，以及与澳大利亚合作伙伴成立合资企业。

参考文献

1. Australian Centre for Advanced Photovoltaics (2024), Scoping Study: *Solar Panel End-of-Life Management in Australia*.
2. Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water (2026), *Solar Panels*.
3. ABC News (2026), 'Australia's solar panel waste is mounting. Will the government's recycling scheme solve it?'
4. Bowen, O. et al. (2026), 'Beyond assumptions: Experimental characterization of end-of-life photovoltaic panels composition for recycling in Australia', *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
5. Carroll, D. (2026), 'Quinbrook advances plans for polysilicon factory in Australia', *pV magazine*.
6. Chowdhury, H. et al. (2026), 'Life cycle assessment and techno-economic analysis of a laser-based end-of-life solar panel recycling process', *Solar Energy Materials and Solar Cells*.
7. Deng, R., Zhuo, Y. & Shen, Y. (2022), 'Recent progress in silicon photovoltaic module recycling processes', *Resources, Conservation and Recycling*.
8. Dias, P.R. et al. (2022), 'High yield, low cost, environmentally friendly process to recycle silicon solar panels: Technical, economic and environmental feasibility assessment', *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
9. He, C., Zhuo, Y. & Shen, Y. (2026), 'Improving particle separation and recovery of valuable materials from end-of-life solar panels', *Resources, Conservation and Recycling*.
10. IEA Photovoltaic Power Systems Programme (2025), *Status of PV Module Recycling in IEA PVPS Task 12 Countries*.
11. Mahmoudi, S., Huda, N. & Behnia, M. (2020), 'Environmental impacts and economic feasibility of end of life photovoltaic panels in Australia: A comprehensive assessment', *Journal of Cleaner Production*.
12. Smart Energy Council (2026), *Solar Module Recycling in Australia: A Guide to the Future*.
13. Smart Energy Council (2026), *Solar PV Panels Product Stewardship Update*, presentation to the Solar Victoria Industry and Consumer Reference Group.
14. Smart Energy Council (2026), *Submission to the Inquiry into Solar Panel Reuse and Recycling in Australia*, Parliament of Australia.
15. UNSW Sydney (2023), *End-of-Life, Highly Efficient, Low-Cost and Eco-Friendly Recycling Technology for Silicon Photovoltaic Panels: Interim Public Dissemination Report*.
16. UNSW Sydney (2024), 'Bigger and better solar panel recycling centres needed to deal with PV waste, says report'.
17. UNSW Sydney (n.d.), 'A new beginning for end-of-life solar panels'.
18. Australian Government Department of Climate Change, Energy, the Environment and Water (2026), *Investing in Australia's Waste and Recycling Infrastructure*.
19. Vorrath, S. (2026), 'Solar recycling: State tips \$17.8 million into waste PV and battery collection, processing', *Renew Economy*.

对澳大利亚光伏回收市场感兴趣？

Beige Advisory 支持企业探索中澳之间的技术、
供应商、客户、合作伙伴及商业机会。

欢迎就市场进入、技术合作、下游加工、
投资或合资机会与我们交流。

Beige Advisory

邮箱: beige@beigeadvisory.com

网站: beigeadvisory.com

White papers, but Beige.

