

竹子“外套”变身光电核心材料

■本报记者 王昊昊 通讯员 李佳

厨房里，醋泡鱿鱼，手指轻扯，一层薄皮整片脱落——这个烹饪技巧却成为一项科研成果的灵感来源。

中国工程院院士、中南林业科技大学教授吴义强团队受鱿鱼皮剥离机制启发，开发出一种仿生精准剥离技术。他们从废弃竹青中制备出厚度仅 10 微米的天然纤维素光学模板，在透明度高达 80% 的基础上仍有 88% 的雾度特性，实现既能让光进得去又能把光散得开。近日，该成果发表于《纳微快报》(Nano-Micro Letters)，已成功申请国家发明专利。

受鱿鱼皮剥离术启发 给竹子“剥皮”

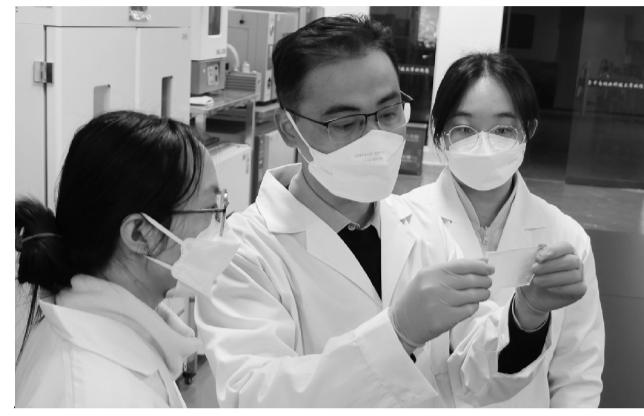
光电器件的核心功能是实现光能与电能的相互转换，捕捉并利用光线尤为关键。以太阳能电池为例，理想的光学材料需具备高透明度，让更多太阳光能穿透材料到达电池核心；也需高雾度，让光线在材料内部充分散射，避免局部强光直射导致能量浪费，从而提升光电转换效率。然而，传统的生物质衍生纤维素材料，始终无法突破兼具高透明度和高雾度的瓶颈。

目前制备这类材料有两种方法，一种是自下而上的分子级重构法，比如通过复杂工艺制造纳米纤维，能做出透明度超 90% 的材料，但能耗极高、工艺繁琐且很难精准调控雾度；另一种是自上而下的天然模板法，直接利用木材、竹材的天然结构加工，但其最小可加工厚度通常大于 1 毫米，材料透明度不足 40%，透光性差。

正当科研人员为这一难题发愁时，被长期忽视的废料竹青进入他们的视野。

竹青就是竹子外层带蜡质的“皮”，通常呈鲜亮的青绿色，自然老化或被砍伐后变为黄绿色甚至黄褐色。竹材加工过程中，竹青因为表面覆盖着一层蜡质，很难与其他材料粘接，大多被当作废料丢弃。

“我们研究发现，竹青有着独特的细胞层级结构和均匀的孔隙分布，天然



左迎峰(中)和
团队成员讨论竹青
薄膜封装工艺。
王昊昊 / 摄

的纤维素网络让它具备成为高性能光学材料的潜力。”吴义强团队成员、中南林业科技大学教授左迎峰说。

“我们最初的思路是仿照透明木材的制备方法，将竹片脱木素后制成薄膜。但竹子和木材不一样，它的结构松散，处理过程中容易发黄、散架，难以形成理想的膜态。”左迎峰说，团队需要制造一把“化学手术刀”，只切断竹青与竹肉之间的粘连，而不伤害竹青本身的核心结构。

基于这一仿生思路，团队尝试了多种酸法、碱法，发现强碱会使材料变黑，有些方案反应强度不足难以实现理想剥离。由于没找到最佳“配方”，他们转而研究关键试剂体系，希望反应过程从经验走向可控。经过无数次实验筛选，过氧甲酸进入了他们的视线。

“我们通过监测温度曲线，找到了反应的‘最佳窗口期’。”论文第一作者、中南林业科技大学博士生张源说，这个窗口既要保证反应强度足够切断连接，又不能过强以至于破坏竹青本身的纤维素骨架。当反应窗口被调控到位，竹青就可以稳定、快速地剥离。

记者看到，团队成员将切割好的竹片浸入过氧甲酸试剂中，在温和的温度下进行水浴加热。大约半小时后，薄壁细胞被逐渐破坏，原本与竹肉紧密相连的竹青慢慢分离出来，最终形成了厚度仅为 10 微米的天然纤维素模板。这一厚度仅为传统木材基模板的百分之一，相当于一张薄纸的十分之一。

找到“缝线”给竹子“脱外套”

如何将竹青从竹子上完整、无损地

剥离下来？“传统脱木素更多是为了提取纤维素或改善颜色，而竹青整体剥离需要破坏连接组织、扰动细胞结构，这个过程更像‘拆线’，而不是把整块材料煮烂。”左迎峰说，团队需要制造一把“化学手术刀”，只切断竹青与竹肉之间的粘连，而不伤害竹青本身的核心结构。

“竹青纤维素模板像个全能选手，既轻薄又坚韧，光学性能还优异。”左迎峰表示，研究团队将这种竹青纤维素模板应用于多晶硅太阳能电池进行性能测试发现，将其作为多晶硅太阳能电池的光管理层后，器件光电转换效率从原来的 18.74% 提升至 19.15%，绝对效率提升了 0.41%。

“别小看这 0.41% 的提升，在太阳能发电领域，每提升 0.1% 的转换效率，都能带来显著的经济效益。”左迎峰说，按大型光伏电站的规模计算，这一提升意味着每平方米光伏组件的年发电量可增加约 5 千瓦时，对于百万平方米的大型电站来说，累计发电量增长十分可观。

吴义强表示，这项研究开创了一种变废为宝的循环经济新模式，既解决了林业废弃物的处理难题，又为光电子产业提供了低成本、可持续的新型功能材料。

相关论文信息：

<https://doi.org/10.1007/s40820-025-01867-1>

薄如蝉翼且高透高雾

这张薄如蝉翼的竹青纤维素模板展现出优异性能，其在可见光范围内透明度约 80%，同时雾度高达 80% 至 88%。这一性能组合不仅远超传统木竹材基模板，甚至可与高能耗制备的纳米纤维素复合材料相媲美，且无需复杂的纤维原纤化处理，大幅降低了生产成本。

这种“透明 + 高散射”的特性，是光电元件光管理层非常想要的能力。竹青纤维素模板的力学性能也不容小觑，这让它在柔性器件中保持良好的结构稳定性，不易破损。

“竹青纤维素模板像个全能选手，既轻薄又坚韧，光学性能还优异。”左迎峰表示，研究团队将这种竹青纤维素模板应用于多晶硅太阳能电池进行性能测试发现，将其作为多晶硅太阳能电池的光管理层后，器件光电转换效率从原来的 18.74% 提升至 19.15%，绝对效率提升了 0.41%。

“别小看这 0.41% 的提升，在太阳能发电领域，每提升 0.1% 的转换效率，都能带来显著的经济效益。”左迎峰说，按大型光伏电站的规模计算，这一提升意味着每平方米光伏组件的年发电量可增加约 5 千瓦时，对于百万平方米的大型电站来说，累计发电量增长十分可观。

吴义强表示，这项研究开创了一种变废为宝的循环经济新模式，既解决了林业废弃物的处理难题，又为光电子产业提供了低成本、可持续的新型功能材料。

相关论文信息：

<https://doi.org/10.1007/s40820-025-01867-1>

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸竹青纤维素模板，超过了标准晶硅太阳能电池片的最大尺寸——243.4 平方厘米，为后续规模化应用奠定了基础。

高透高雾

这种剥离工具具有良好的可扩展性。

科研人员从一节 10 厘米长、直径 8.4 厘米的竹茎中，成功剥离出面积达 270 平方厘米的大尺寸