引用格式：赵鹏振. 柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性提升策略研究进展[J]. 中国材料进展，2026，45(10)：1003-1015.
ZHAO P Z. Research Progress on Strategies for Enhancing the Mechanical Durability of Flexible Perovskite Solar Cells[J]. Materials China，2026，45(10)：1003-1015.

特约专栏

柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性提升策略研究进展

赵鹏振
（江苏海洋大学海洋工程学院，江苏 连云港 222005）

摘 要：随着光伏建筑一体化和太空光伏的发展需求日益高涨，柔性钙钛矿太阳能电池因优异的光电转换效率、低廉的制备成本、良好的可弯曲特性以及高功率质量比等优势展现出巨大的应用潜力，成为光伏技术最热门的研究方向之一。然而，作为活性层的钙钛矿薄膜虽然具有一定的软晶格特性，但其固有的多晶性质和晶格脆性致使器件在弯曲变形时易产生结构破坏。除此以外，柔性钙钛矿太阳能电池各功能层的特性和界面结合状态也会严重影响器件的机械耐久性，成为限制其商业化发展的主要因素之一。因此，系统回顾了近年来为提升柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性，国内外科研团队针对器件柔性基底、钙钛矿活性层、电极及界面工程等方面所开展的相关科研工作，全面综述了器件机械耐久性提升的主要策略，并对柔性钙钛矿太阳能电池面向商业化的未来发展方向进行了展望。

关键词：柔性钙钛矿太阳能电池；机械耐久性；界面工程；柔性基底；组分工程
中图分类号：TM914.4 **文献标识码**：A **文章编号**：1674-3962(2026)10-1003-13

Research Progress on Strategies for Enhancing the Mechanical Durability of Flexible Perovskite Solar Cells

ZHAO Pengzhen
(School of Ocean Engineering, Jiangsu Ocean University, Lianyungang 222005, China)

Abstract: Driven by the increasing demand for building-integrated photovoltaics and space photovoltaics, flexible perovskite solar cells have demonstrated tremendous application potential and have emerged as one of the most active research frontiers in photovoltaic technology, owing to their outstanding power conversion efficiency, low-cost fabrication, excellent mechanical flexibility and high power-to-weight ratio. Nevertheless, the perovskite thin films serving as the photoactive layer exhibit a certain degree of soft-lattice characteristics, their intrinsically polycrystalline nature and lattice brittleness render them susceptible to structural damage under bending and mechanical deformation. Moreover, the mechanical durability of flexible perovskite solar cells is strongly governed by the mechanical properties of the individual functional layers and the interfacial bonding states between them, collectively constitute a critical bottleneck for their practical deployment and large-scale commercialization. In this context, this review systematically summarizes recent advances in enhancing the mechanical durability of flexible perovskite solar cells, with particular emphasis on flexible substrates, perovskite active layers, electrodes, and interface engineering. The major approaches for improving the mechanical durability of flexible perovskite solar cells are comprehensively reviewed, and the future prospects and key development directions for advancing flexible perovskite solar cells toward commercialization are further discussed.

Key words: flexible perovskite solar cells; mechanical durability; interface engineering; flexible substrates; composition engineering

收稿日期：2026-06-03 **修回日期**：2026-08-27
第一作者：赵鹏振，男，1993 年生，讲师，
Email：pengzhen_zhao2026@163.com
DOI：10.7502/j.issn.1674-3962.202606004

1 前 言

柔性钙钛矿太阳能电池凭借优异的光吸收性能、低

温可加工性及高功率重量比等优势，在可穿戴电子、柔性显示、光伏建筑一体化以及航空航天能源等领域展现出巨大的应用潜力。然而，相较于快速提升的光电转换效率，机械耐久性不足仍是制约其进一步商业化应用的关键瓶颈。在持续弯曲、拉伸或循环应变作用下，柔性钙钛矿光伏器件容易发生裂纹萌生、层间剥离或性能衰减，从微观机制来看，弯曲应变引起的应力集中会诱导脆性钙钛矿晶界处萌生微裂纹，而裂纹的扩展会进一步加剧层间应力积聚，从而通过“裂纹-界面”的强耦合失效路径引发大面积的宏观界面脱粘，进而导致器件可靠性和服役寿命显著下降。

围绕上述问题，研究者从柔性基底、透明电极、钙钛矿体相及异质界面等多个层面开展了大量研究，通过应力调控、界面强化、弹性网络构筑以及缺陷钝化等策略提升器件的结构完整性与机械适应能力。例如，通过引入弹性聚合物网络和超分子，可有效缓解应力集中并增强薄膜韧性；通过界面分子桥、交联结构修饰，可提升层间结合强度并抑制层间剥离。

此外，随着原位力学表征、多尺度模拟与应力分析技术的发展，柔性钙钛矿器件在外界应变作用下的微观演化机制逐渐得到揭示。这些研究不仅深化了对器件力学失效行为的理解，也为实现高效率与高机械耐久性兼具的柔性光伏器件开发提供了理论依据与设计思路。

虽然目前已有诸多综述总结了柔性钙钛矿太阳能电池的发展进展，但多聚焦于器件的环境与运行稳定性。相比之下，柔性钙钛矿太阳能电池在实际应用过程中会受到弯曲、拉伸、扭转及循环机械应变的作用，机械耐久性是决定其可靠性和服役寿命的关键因素之一，但目前针对其机械失效行为及耐久性提升的系统性综述仍相对有限。因此，本文系统回顾了近年来为提升柔性钙钛矿太阳能电池的机械耐久性，国内外科研团队针对器件柔性基底、钙钛矿活性层、电极及界面工程等方面所开展的科研工作，全面综述了器件机械耐久性提升的主要策略，并对未来实现柔性钙钛矿太阳能电池的商业化发展方向进行了展望。

2 柔性钙钛矿太阳能电池的机械耐久性

稳定性是当前制约钙钛矿太阳能电池商业化应用的核心挑战之一，与刚性钙钛矿太阳能电池相比，柔性太阳能电池所面临的稳定性问题更为复杂。一方面来源于器件的化学稳定性，由于常用的聚合物柔性基底对水分和氧气的阻隔能力通常弱于刚性玻璃基底，因此外界环境中的水氧更容易渗透进入柔性器件内部，诱导钙钛矿薄膜的相变、离子迁移甚至化学降解。另一方面是显著区别于刚性器件，柔性器件在实际应用过程中面临弯曲、扭转、拉伸等外部应力影响，由此产生的应力集中可能导致柔性器件内部出现功能层开裂、层间剥离等结构失效现象，致使柔性器件整体性能急剧衰减。因此，机械耐久性已成为柔性钙钛矿太阳能电池区别于刚性器件的重要研究内容之一。

机械耐久性是评估柔性钙钛矿太阳能电池服役可靠性的关键指标，通常指器件在受到反复机械变形如弯曲、扭曲或应力循环后，仍能维持较高的光电转换效率、开路电压、短路电流和填充因子，同时维持钙钛矿薄膜膜层连续性、界面结合稳定性以及电荷传输通路完整性的能力。

柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性评估通常围绕弯曲、扭转、拉伸及折叠等多种机械载荷条件展开。其中，最常采用的循环弯曲测试通过设定弯曲半径和弯曲次数，模拟器件在实际穿戴中反复形变的环境，并进行周期性电流密度-电压测量，以追踪器件光电转换效率的衰减过程。除了循环弯曲测试外，扭曲测试、往复折叠测试以及单轴拉伸测试也被广泛用于揭示柔性钙钛矿太阳能电池在不同变形模式下的机械耐久性。辅助以光学显微镜、扫描电子显微镜、X 射线衍射等手段，研究者能够在监测光电效率衰减的同时解析裂纹萌生、层间脱粘等微观机制，对裂纹萌生、扩展及层间剥离等过程进行原位或后续分析，从而建立宏观性能衰减与微观结构演化之间的关联关系。值得指出的是，目前不同研究工作采用的弯曲半径、循环次数及测试装置差异较大，导致不同文献之间的机械耐久性数据难以直接比较。因此，建立统一的测试标准和评价体系已成为柔性钙钛矿太阳能电池领域的重要发展方向。未来应进一步推动测试条件、评价指标及失效判据的规范化，以实现不同研究成果之间的横向对比，并为器件的工程化应用提供可靠依据。

柔性钙钛矿太阳能电池的机械耐久性本质上取决于材料本征力学性能、界面结合强度以及器件整体应力分布状态。围绕这些关键因素，研究者从柔性基底、透明电极、钙钛矿体相、晶界以及异质界面等多个层面提出了一系列针对性的优化策略。下文将围绕这些典型研究方向，对近年来国内外相关研究进展进行系统综述。

3 机械耐久性提升策略研究进展

3.1 柔性基底

柔性基底是区分柔性和刚性钙钛矿太阳能电池的重要组成部分，是构筑柔性光伏器件的基础，它不仅对功能层起到支撑作用，还直接影响柔性光伏器件的光透过性、热稳定性和机械耐久性等关键参数。在众多候选柔

性基底材料中，高分子聚合物因柔性高、易加工、质量轻和成本低廉等优势，成为目前柔性钙钛矿太阳能电池应用最广泛的一类基底材料。常见的高分子聚合物柔性基底材料包括聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)、聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)、聚酰亚胺(PI)、聚碳酸酯(PC)和聚醚酰亚胺(PEI)以及热塑性聚氨酯(TPU)等[1-4]，其中，PET 和 PEN 因优异的光学透过率、低密度、低成本而广泛应用于柔性钙钛矿太阳能电池的制备中[5, 6]。然而，两者较低的玻璃化转变温度(PET 约 70 ℃，PEN 为 120 ℃)严重限制了后续钙钛矿结晶和其他功能层的热处理工艺[6-8]。PI 虽然具有突出的耐温能力，可承受高达 400 ℃的高温以及低至-200 ℃的低温，然而传统 PI 材料通常呈现黄色或者棕黄色，光学透过率不足。尽管已经开发了高透过率的 PI，但制备成本过高，在大规模商业化应用方面仍面临一定挑战[9]。除聚合物外，不锈钢箔片[10, 11]、钛箔[12, 13]、镍箔[14]以及铝箔[15]等金属箔片也应用于柔性钙钛矿太阳能电池的构筑，如图 1a 所示。这类基底通常具有优异的机械强度、热稳定性和阻隔性能，但由于缺乏透明性，导致器件结构设计往往受到一定限制。

除此之外，为进一步提高柔性器件的机械耐久性，领域内针对更为适配的柔性基底材料进行了广泛的探索。Jia 等[16]利用高度柔韧的二维层状结构云母片作为基底构筑了柔性钙钛矿太阳能电池(图 1b)，云母不仅具备优异的耐高温特性和化学稳定性，而且云母的二维层状结构能够有效阻隔水分渗透，同时可以通过范德华外延生长透明导电氧化铟锡(indium tin oxide，ITO)薄膜，有效提高器件稳定性和机械耐久性。此外，Xing 等[17]开发了一种基于改性竹基纤维素的动态共价网络基底(图 1c)。通过与自聚合铵盐构建可渗透界面网络，有效抑制了应变循环过程中的界面退化行为，从而显著提升了柔性器件在大应变下的机械耐久性。柔性基底的发展趋势正逐步由单纯追求柔韧性向兼顾热稳定性、阻隔性能以及应力调控能力转变。开发兼具高透明度、高热稳定性和高机械韧性的新型基底材料，将是未来推动柔性钙钛矿太阳能电池实用化的重要方向。

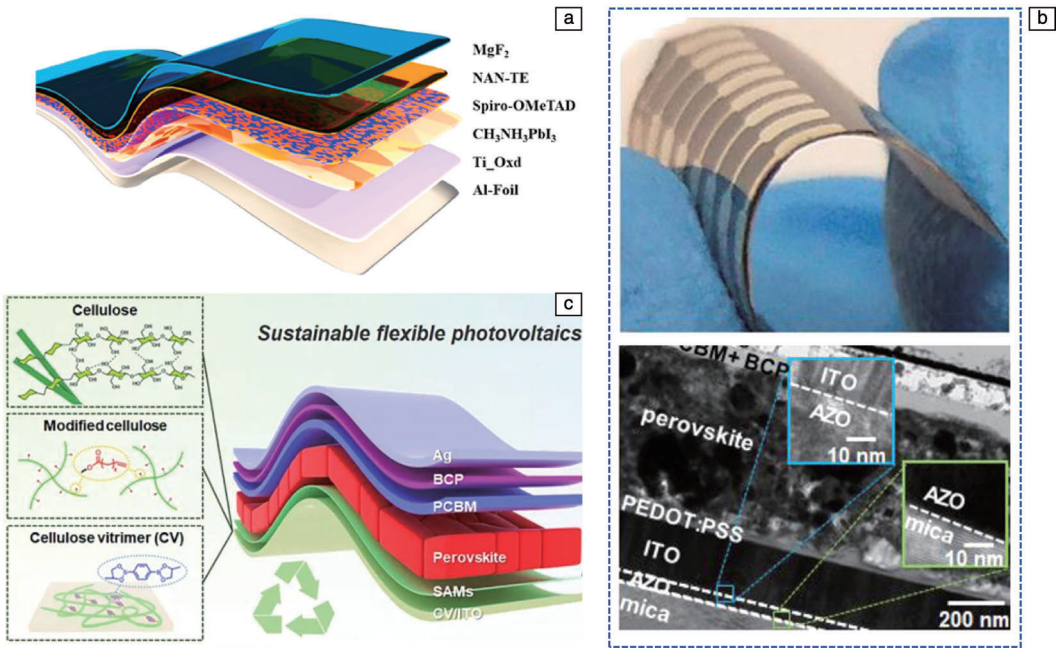


图 1　不同基底的柔性钙钛矿太阳能电池结构：(a)铝箔[15]，(b)云母片[16]，(c)改性竹基纤维素[17]

Fig. 1　Schematic structures of flexible perovskite solar cells fabricated on various substrates: (a) aluminum foil[15], (b) mica sheet[16], (c) modified bamboo cellulose[17]

3.2　透明电极

透明电极是柔性钙钛矿光伏器件的重要组成部分，其主要功能是在保证高透光率的同时实现高效的载流子收集与传输。与刚性光伏器件相比，柔性光伏器件对透明电极提出了更高的要求，即在维持低方块电阻和高透光率的基础上，还需具有优异的弯曲、扭转等循环机械变形的耐久性，因此，如何协调导电性、透光性与机械柔性的关系，已成为透明柔性电极研究的核心问题之一。

3.2.1　透明导电氧化物

透明导电氧化物(transparent conductive oxides，TCO)是当前柔性钙钛矿太阳能电池结构中应用最为广泛的电极材料。其中，氟掺杂的氧化锡和 ITO 玻璃凭借高透光

率和低片层电阻，成为钙钛矿光伏器件应用最为广泛的 TCO 材料。然而，氟掺杂的氧化锡一般通过喷雾热解法或化学气相沉积法制备，制备温度通常超过 450 ℃，因此难以兼容聚合物柔性基底[18]。相比之下，ITO 可以通过低温磁控溅射法制备，制备温度通常低于 200 ℃，可以较好地兼容到 PET 或 PEN 基底上[19]，因此成为柔性钙钛矿太阳能电池中最常用的透明电极材料。尽管 ITO 具有优异的光电性能，但其本质上属于脆性的无机陶瓷，在反复的机械变形过程中极易产生微裂纹，进而对柔性钙钛矿太阳能电池的机械耐久性产生消极影响[20]。此外，铟元素的稀缺性与高昂成本，也在一定程度上限制了柔性 ITO 电极在光伏产业的大规模商业化应用。

为了克服这些局限性，领域内的研究者重点向两个方向开展了相关的工作，一方面是向 TCO 表面引入具有粘弹性的超薄缓冲层，以缓解因器件内部应力集中所导致的机械耐久性衰减，详细内容会在下文 3.5 节进行详细介绍。另一方面是探索锌掺杂氧化铟(IZO)[21, 22]、铝掺杂氧化锌(AZO)[23]以及锑掺杂氧化锡(ATO)[24]等新型非晶或纳米 TCO 材料，如图 2 所示。这些新型氧化物在保持高透光率与导电性的同时，往往展现出比传统晶态 ITO 更优异的内在抗弯曲特征，进而可以有效解除因电极材料导致的器件机械耐久性限制。

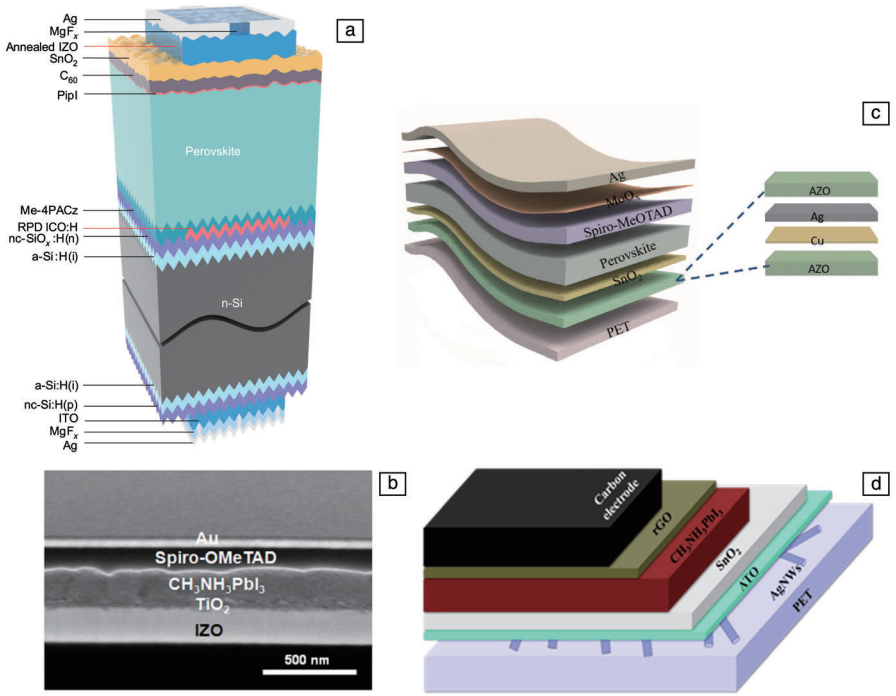


图 2 IZO 作为前透明电极(a)[21]，IZO 作为底部透明电极(b)[22]，AZO/Ag/AZO 结构透明电极(c)[23]，ATO 作为透明电极(d)[24]

Fig. 2 IZO as a front transparent electrode (a)[21], IZO as a bottom transparent electrode (b)[22], AZO/Ag/AZO-structured transparent electrode (c)[23], ATO as transparent electrode (d)[24]

3.2.2 碳基与高分子聚合物

为从根本上解决 TCO 材料固有脆性带来的机械失效问题，研究者们将具有本征柔韧性的碳基纳米材料(如碳纳米管、石墨烯、碳浆料)与导电高分子聚合物(如聚(3,4-乙烯二氧噻吩)∶聚(苯乙烯磺酸)(PEDOT∶PSS))引入到光伏器件体系[25]。这类材料不仅具备优异的本征柔韧性，而且表现出良好的化学稳定性，不与钙钛矿光吸收层中的卤素离子发生有害副反应，在柔性钙钛矿光伏器件的机械耐久性与服役稳定性的提升方面展现出广阔的应用前景[20]。

得益于稳固的 sp^2 杂化网络，碳基材料展现出优异的机械强度，而内部独特的范德华力连接机制，又赋予它极高的柔韧性[25]。Zhang 等[26]探索了采用单壁碳纳米管(SWCNTs)替代 ITO 用作窗口电极材料，柔性器件实现了超过 23%的光电转换效率，SWCNTs 薄膜具备卓越的稳定性，有效提升了柔性钙钛矿太阳能组件在外界应力下的耐久性，在 5 mm 弯曲半径下，弯曲 1000 次，效率损失只有约 5%，如图 3a 所示。Yoon 等[27]合成了一种厚度为 7 μm 的单壁碳纳米管-聚酰亚胺(SWCNT-PI)复合膜，超薄的 SWCNT-PI 透明导体机械弹性优异、表面形貌平整光滑且具有较高的直流-光学电导率比，如图 3b 所示，以它作透明电极的柔性钙钛矿太阳能电池在 0.5 mm 弯曲半径下，经过 10 000 次弯曲后效率基本没有衰减。Yoon 等[28]通过典型湿法转移工艺，

将单层化学气相沉积石墨烯转移至超薄 PEN 薄膜上，并以此作为透明导电电极制备了柔性钙钛矿太阳能电池，如图 3c 所示，通过 MoO_x 层诱导石墨烯空穴掺杂，有效提高了器件的机械耐久性，ITO/PEN 基底的器件在弯曲半径为 4 mm 下经历 1000 次弯曲后，光电转换效率显著下降至初始值的 40%以下，而石墨烯/PEN 基底的器件在 2 mm 弯曲半径下仍可保持 90%以上光电转化效率。

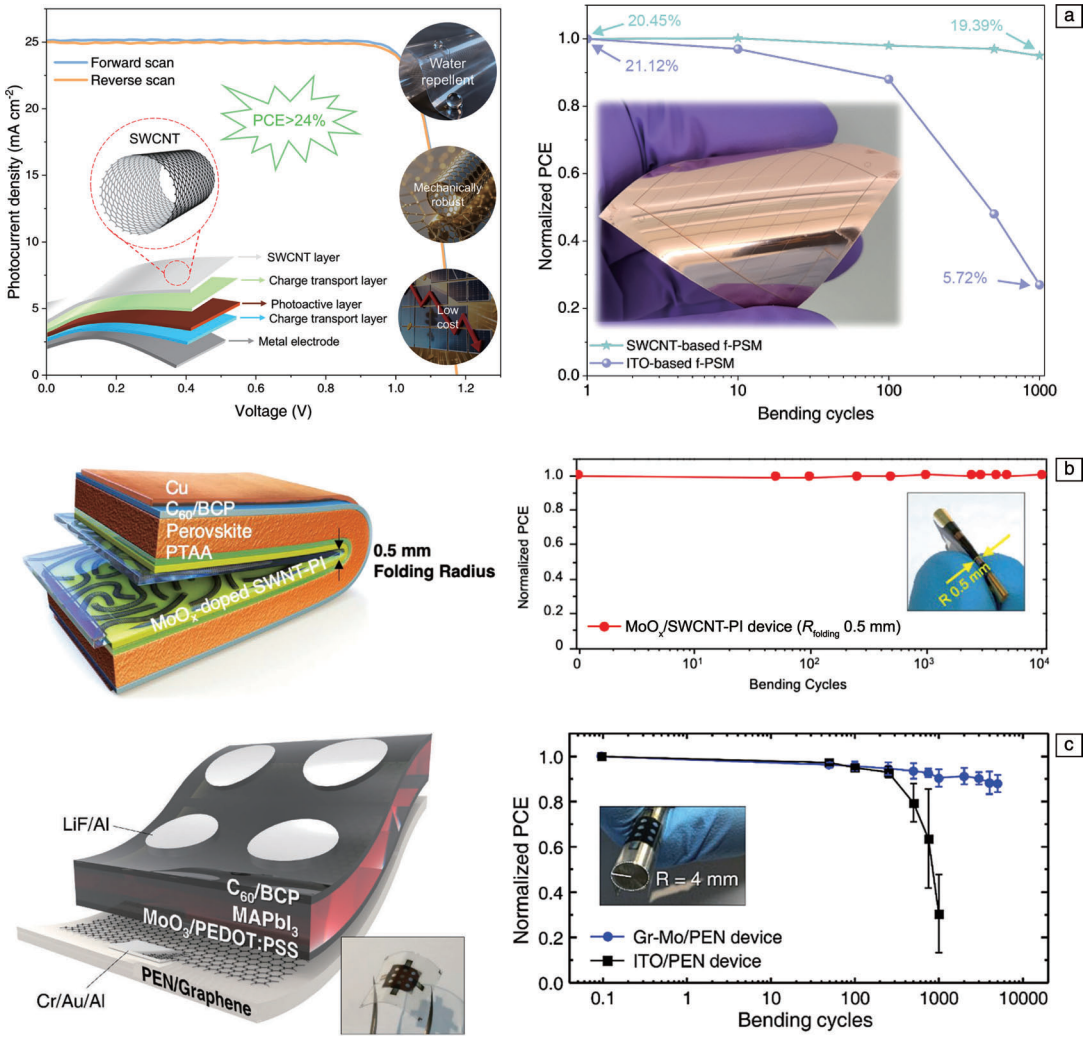


图 3　SWCNTs 作为窗口电极(a)[26]，SWCNT-PI 复合薄膜作为电极(b)[27]，石墨烯作为透明电极(c)[28]的柔性钙钛矿太阳能电池器件及其机械耐久测试结果

Fig. 3　Flexible perovskite solar cells employing SWCNTs as the window electrode (a)[26], SWCNT-PI composite films as the electrode (b)[27], graphene as the transparent electrode(c)[28] along with their mechanical durability testing results

高分子聚合物导电材料的导电机制来源于共轭主链上的 π-π 电子离域，其力学行为主要由柔性的高分子链段网络决定，因此，与 TCO 材料相比，导电聚合物能够从根本上避免晶界开裂问题。此外，PEDOT∶PSS 作为高分子聚合物电极材料的绝对核心代表，是由导电性 PEDOT 与可水分散的 PSS 构成的复合材料，具有溶液加工性、良好透光率以及较低杨氏模量，已成为研究最广泛的聚合物透明电极材料。Hu 等[29]向 PEDOT∶PSS 体系中引入氟表面活性剂以调控导电聚合物网络的相分离行为，构建了一种兼具高导电性和机械韧性的 PEDOT 网络电极，该策略不仅有效解决了原始 PEDOT 导电性不足的问题，还克服了 PEDOT 天然靛蓝色所导致的低透光率问题，使它兼具高导电性(>4000 S/cm)、高透光率(>80%)和优异的柔韧性。所制备的柔性钙钛矿太阳能电池器件在弯曲半径为 3 mm 条件下经过 5000 次弯曲循环后，仍保留初始效率的 90%，而此时 ITO 电极的器件已衰减至 0。Lai 等[30]向 PEDOT∶PSS 体系中引入非离子表面活性剂 Triton X-1000，以弱化 PEDOT 和 PSS 之间的静电缔合与

相互作用，从而抑制表面 PSS 富集与界面偶极，制备的柔性全钙钛矿叠层微型组件在 15 mm 弯曲半径下，2000 次弯曲后效率基本保持不变。尽管 PEDOT∶PSS 展现出优异的机械柔韧性，但其导电性能仍普遍低于 ITO 等无机透明电极。此外，PSS 组分的吸湿性还可能影响器件长期稳定性。因此，如何进一步提高电导率并改善环境稳定性，仍是其未来研究的重要方向。

3.2.3 金属纳米线与纳米网络

金属纳米线与纳米网格兼具金属材料优异的导电性能和网络结构赋予的柔性特征，被广泛认为是最有潜力替代 ITO 的透明电极体系之一。典型代表包括银纳米线、铜纳米线、镍网格等。与碳基和聚合物材料相比，金属纳米线与纳米网格表现出可媲美大块金属的电导率、优异的透光性以及可溶液法加工特性，同时能够通过网络结构变形实现应力释放，因此在柔性光伏器件领域受到广泛关注。

然而金属纳米线与纳米网络在应用中仍面临两方面挑战：一是溶液法制备的电极表面粗糙度偏高；二是纳米线交叉节点处较大的接触电阻可能引发焦耳热效应，从而影响器件长期稳定性。围绕上述问题，相关研究者展开了很多研究，比如 Jin 等[31]使用溶胶凝胶法制备的 ZnO 作为银纳米线的修饰层，有效降低其表面粗糙度，并抑制了纳米线连接处的焦耳热效应，基于此复合电极的柔性钙钛矿太阳能电池表现出良好的机械耐久性，在 6 mm 弯曲半径下，进行 2000 次循环弯曲后仍可保持其初始效率的 77%。而 Chen 等[32]开发了一种基于银纳米线的织物电极，并用聚丙烯腈来优化织物结构，减少表面不规则性，以满足柔性钙钛矿太阳能电池导电基材的要求，所制备的柔性钙钛矿太阳能电池在 4 mm 弯曲半径下，2000 次循环弯曲后，仍能保持初始效率的 81.4%。Zhou 等[33]使用高柔性银纳米线电极制备的柔性钙钛矿太阳能电池实现了 23%的光电转换效率且可在超小弯曲半径 0.75 mm 下，经历 2000 次循环后保持 94%的初始效率。

综合来看，透明电极的发展经历了由传统 TCO 向柔性导电网络的演变过程。ITO 等 TCO 材料在导电性和透光率方面仍具有明显优势，但其固有脆性限制了器件的机械耐久性；碳基和导电聚合物材料能够显著提升柔性适应能力，但其导电性能仍有进一步提升空间；金属纳米线与纳米网络则在导电性与机械柔性之间实现了较好的平衡，被认为是最具应用潜力的下一代柔性透明电极体系之一。未来通过多材料协同复合设计构建兼具高透光率、高导电性和高机械稳定性的透明电极，将是推动柔性钙钛矿太阳能电池实用化的重要方向。

3.3 体相修饰

金属卤化物钙钛矿材料虽然具备一定的软晶格特性，但它作为典型的离子晶体，本征机械脆性仍较为显著[34, 35]。在柔性光伏器件反复弯曲、拉伸或扭转过程中，由于晶界、空位及位错等缺陷区域存在应力集中，局域张应力与剪切应力容易诱导微裂纹萌生与扩展，最终导致钙钛矿薄膜断裂、界面失效以及光伏性能衰减[36]。因此，柔性钙钛矿太阳能电池中的体相修饰策略已逐渐由传统缺陷钝化向“力-电协同增韧”方向发展，即在优化载流子输运与缺陷态的同时，实现应力耗散、裂纹抑制及结构强化。目前，针对柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性的体相修饰策略主要包括：组分工程、低杨氏模量弹性聚合物网络或超分子的引入以及应力缓冲剂的引入等。

3.3.1 组分工程

大量研究表明，钙钛矿材料的本征力学性能与其晶体组成密切相关。组成 ABX_3 钙钛矿的 A 位、B 位及 X 位离子的尺寸、极化率及键合作用的差异，会显著影响材料的弹性模量、硬度及断裂韧性[37-40]。例如，较大尺寸的 A 位有机阳离子(如 FA^+)通常有助于降低晶格刚度，使材料表现出较低的弹性模量和更高的形变适应能力；而随着 X 位卤素离子半径增大和晶格键能降低，钙钛矿材料通常表现出更柔软的力学行为，如图 4 所示[39]。通过组分调控改变晶格刚性和应力传递方式，可在一定程度上改善钙钛矿薄膜的机械适应能力[37]。然而，组分工程对器件性能的影响具有多维耦合特征。例如，混合阳离子与混合卤素体系在改善力学性能的同时，也可能引发能级偏移、相稳定性变化以及离子迁移行为改变。因此，如何在力学性能、光电转换效率及环境稳定性之间实现平衡，是柔性钙钛矿太阳能电池组分设计的重要研究方向。

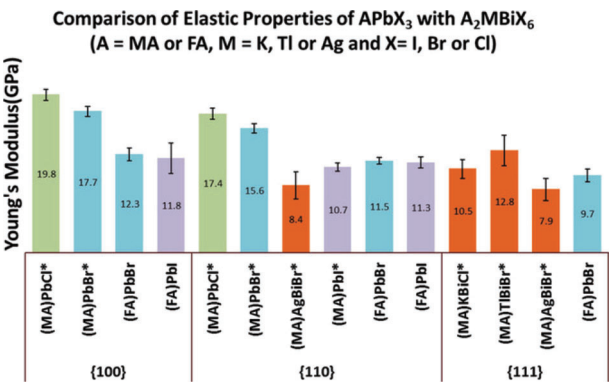


图 4 单、双混合卤化物钙钛矿分别垂直于{100}、{110}和{111}晶面的杨氏模量[39]

Fig. 4 Young's modulus of single and double hybrid halide perovskites normal to the {100}, {110}, and {111} planes, respectively[39]

需要指出的是，组分工程更多地通过调控材料的本征力学性质实现增韧，但对抑制裂纹扩展和应力耗散能力的改善仍相对有限。因此，研究者进一步尝试通过构建柔性聚合物网络和超分子结构实现更有效的应力缓冲与结构强化。

3.3.2　弹性聚合物网络或超分子的引入

针对柔性钙钛矿太阳能电池在外界循环应变作用下因本征脆性和晶界缺陷诱导的结构失效问题，在钙钛矿体相中引入低杨氏模量弹性聚合物网络或功能化超分子骨架，被认为是提升机械耐久性最具潜力的策略之一。其核心机制在于通过低杨氏模量网络实现应力缓冲、裂纹抑制及晶界强化，同时借助动态化学键或非共价键相互作用赋予材料一定的自适应修复能力，从而实现力学性能与光电性能的协同优化。

在弹性聚合物网络的构建方面，研究者们通常采用多官能团的可原位交联低聚物或长链高分子[41]。如 Wu 等[42]通过在钙钛矿体相中引入季戊四醇三丙烯酸酯(PETA)构建了三维聚合物网络(图 5a)。该网络能够在晶粒之间形成柔性连接，缓解应力集中并抑制裂纹扩展，同时增强薄膜结构完整性。得益于此，对应柔性器件在 5 mm 弯曲半径下，20 000 次循环弯曲后仍可保持 92%的初始效率。Ning 等[43]在前驱体溶液中引入了一种可聚合小分子配体丙烯酰氧乙基三甲基氯化铵-丙烯胺(DAC-AA)，如图 5b 所示，DAC-AA 一方面可以稳定碘化铅胶体，调控结晶速率，另一方面能够形成聚合物网络，增强钙钛矿薄膜机械耐久性，对应柔性器件在 6 mm 弯曲半径下，20 000 次弯曲后，仍可保持初始效率的 86.7%。Lu 等[44]将透明质酸钠引入到钙钛矿薄膜中(图 5c)，通过强相互作用连接的细分晶粒形成网络拓扑结构，并借助晶粒滑移和晶粒细分耗散积累的应力，提高钙钛矿薄膜的韧性，使得柔性器件在 2 mm 曲率半径下弯曲 6000 次后，仍保持 90%的初始效率。

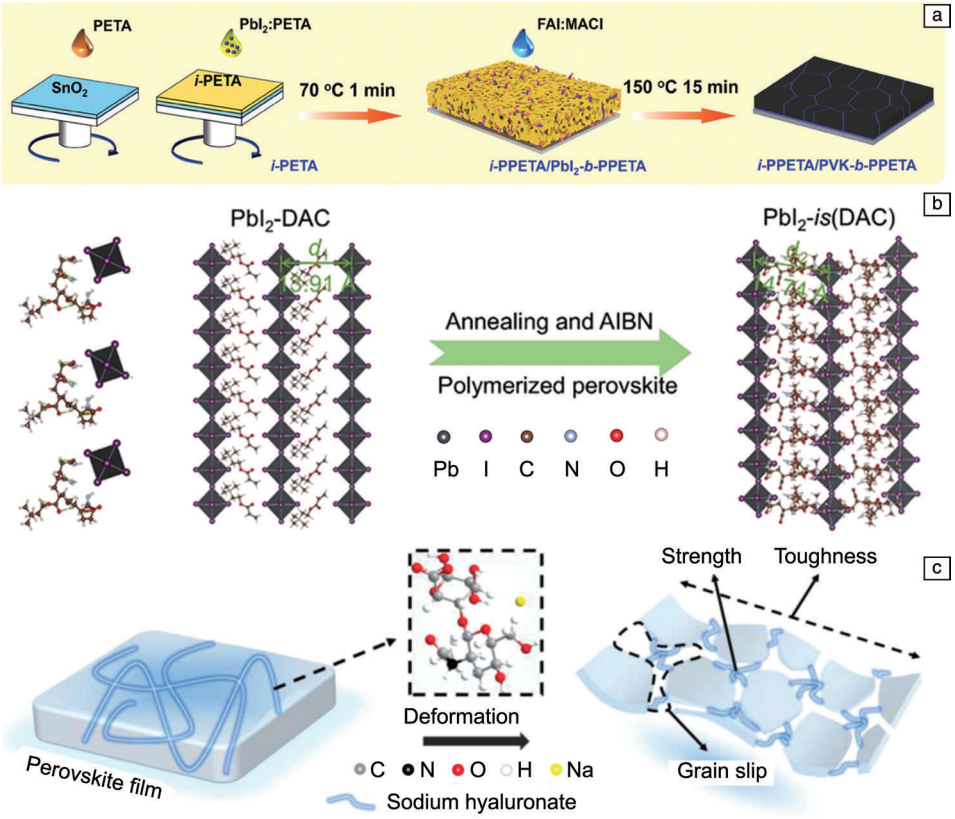


图 5　聚合物原位交联增韧策略：PETA 三维聚合物网络构建策略(a)[42]，DAC-AA 原位聚合策略(b)[43]，透明质酸钠拓扑网络形成策略(c)[44]

Fig. 5　*In-situ* polymer cross-linking toughening strategy: (a) PETA 3D polymer network construction strategy[42], (b) *in-situ* polymerization strategy of DAC-AA[43], (c) sodium hyaluronate topological network formation strategy[44]

除聚合物网络外，功能化超分子体系也被广泛应用于柔性钙钛矿薄膜增韧。该策略主要依赖多重氢键、主客体相互作用及动态可逆相互作用所带来的黏弹性行为与结构自适应能力。典型研究对象包括富含多齿配位位点的小分子、大环主体(如环糊精)以及具有自修复能力的聚氨酯衍生超分子体系[45-48]。

一方面，超分子中的特定官能团(如羰基、氨基或磺酸根)能够与钙钛矿晶格中的未配位 Pb^{2+} 发生强化学配位，或与有机阳离子建立稳定的氢键网络，从而降低晶界表面能，抑制离子迁移并钝化深能级缺陷。另一方面，基于动态共价键(如二硫键)或非共价强氢键的独特黏弹性行为，在连续循环弯曲中，因应力集聚而断裂的超分子链段能够自发进行界面重构与自愈合。这种界面重构与自愈合的特性不仅可以自主修复裂纹处的电荷传输通道，还可以显著抑制水汽在裂纹处的毛细渗透，从而有效提升柔性钙钛矿太阳能电池的机械耐久性。因此，引入超分子策略兼具“缺陷钝化-应力耗散-结构强化”的多重优势，在提升柔性器件机械耐久性方面展现出良好前景。

3.3.3 应力缓冲剂的引入

由于钙钛矿层与聚合物柔性基底之间存在热膨胀系数与杨氏模量的不匹配，器件在退火冷却过程中通常会积累大量的残余应力。该残余应力不仅可能加速离子迁移和缺陷演化，还会在后续弯曲或拉伸过程中进一步诱导晶界和缺陷区域的应力集中，从而促进微裂纹萌生与扩展。因此，在钙钛矿体相中引入应力缓冲剂调控应力传递、耗散局域应变并降低残余应力积累，已成为提升柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性的重要策略之一。

领域内经常用到的应力缓冲剂很多，比如在上一节提到的弹性聚合物网络和超分子，可以有效调控钙钛矿薄膜内部的应力。此外，学者们也积极进行了其他的探索，Xu 等[49]设计了一系列金属螯合物作为体相应力缓冲剂。该类分子能够借助静电相互作用与钙钛矿的晶界进行选择性锚定，在相邻晶粒间构筑柔性“分子桥”，并诱导形成均匀分布的拉伸应变场，从而降低局域应力集中并优化杨氏模量分布。这一策略有效释放了薄膜残余应力，同时延缓了循环变形条件下的裂纹扩展，提高了柔性器件的机械耐久性。Li 等[50]将具有逆热膨胀特性的焦磷酸钾引入到钙钛矿前驱体体系中。由于焦磷酸钾在升温过程中表现出“热缩”行为，可部分抵消钙钛矿层在退火过程中的热膨胀效应，从而降低冷却后的残余拉应力，甚至使薄膜处于轻微压应力状态。得益于应力场调控与结构稳定性的同步改善，柔性钙钛矿太阳能电池在 5 mm 的弯曲半径下经历 10 000 次循环弯折后仍保持 92% 的初始效率。总体而言，应力缓冲剂引入策略的核心在于通过调控钙钛矿薄膜内部残余应力分布，实现局域应变耗散与裂纹萌生抑制。相比单纯依赖组分调控改善材料本征力学性能，应力缓冲剂能够更直接地作用于器件服役过程中的力学失效行为。

3.4 晶界工程

晶界工程是克服多晶钙钛矿薄膜本征脆性、提升柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性的关键策略之一。由于钙钛矿薄膜晶界区域往往具有更高缺陷密度和更明显的应力集中现象，因此成为裂纹萌生、扩展以及离子迁移的重要通道。围绕晶界区域的结构调控，研究者主要提出了晶界缓冲和晶界强化两类策略，其核心目标分别是实现应力耗散与裂纹抑制。

晶界缓冲策略主要通过在晶界区域引入低杨氏模量材料或柔性功能组分，降低局域应力集中并促进应变耗散。例如，透明质酸钠通过构筑拓扑网络促进钙钛矿晶粒滑移，从而缓解应力累积并提高薄膜韧性[44]；金属螯合剂则通过选择性锚定晶界调控局域拉伸应变场，实现晶界区域的应力缓冲[49]。此外，有机铵盐[51]、光异构分子[52]、柔性长链分子[53]以及二维层状材料[54]等功能组分也能够利用其柔性结构或特殊化学相互作用，实现晶界区域的应力释放与裂纹抑制。

晶界强化是提升柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性的另一有效手段，作为多晶薄膜，柔性钙钛矿太阳能电池的失效常常发生在薄膜的晶界处，晶界处由于通常是缺陷的富集区和应力集中处，因此是裂纹萌生和扩展的主要区域。如果晶界可以得到有效的强化，将极大提高器件的机械耐久性。晶界处的原位聚合已被证明是一种行之有效的策略。Jia 等[55]提出一种基于氟化聚酰胺酸(PIF)的原位晶界密封策略，如图 6a 所示。通过 PIF 聚合物在晶界处发生原位聚合，在钙钛矿内部形成互穿三维聚合物网络，该聚合物网络通过增强晶粒间连接和界面粘附力，实现了裂纹扩展阻断与应力再分布。得益于此，PIF 改性的柔性器件在 10 000 次弯曲后保留 93% 的初始效率。Fahim 等[56]向前驱体中引入了一种支化聚乙烯亚胺功能化的硅氧烷弹性体(s-ELA)作为晶界增强组分(图 6b)，s-ELA 可以作为骨架控制薄膜成核成长，并选择性富集在多晶薄膜的晶界区域，同时可通过动态黏附与可逆键合作用充当“晶界缝合线”，强化相邻晶粒间连接，并赋予晶界一定的应变自适应能力。因此，柔性器件即使在 20% 的大拉伸应变下，经受 10 000 次连续拉伸测试后，器件仍能维持 81% 的初始光电转换效率。此外，利用二维层状钙钛矿进行体相或晶界修饰，是目前最有效的“力-化学协同强化”策略之一，除钝化晶界缺陷外，低维钙钛矿较低的晶格维度和较强层间相互作用能够在裂纹扩展路径上形成“阻裂层”，从而实现晶界强化与应力缓冲的双重作用。Yan 等[57]利用 4-溴苄胺在特定湿度下通过在晶界处原位构筑杨氏模量匹配的二维钙钛矿弹性网络，构建了一种跨晶界的二维/三维耦合结构，如图 6c 所示，该结构表现出优异的钝化效果，并显著增强了柔性器件的机械耐久性，对应器件在 4 mm 弯曲半径下，8000 次弯曲循环后仍可保持初始光电转换效率的 80%

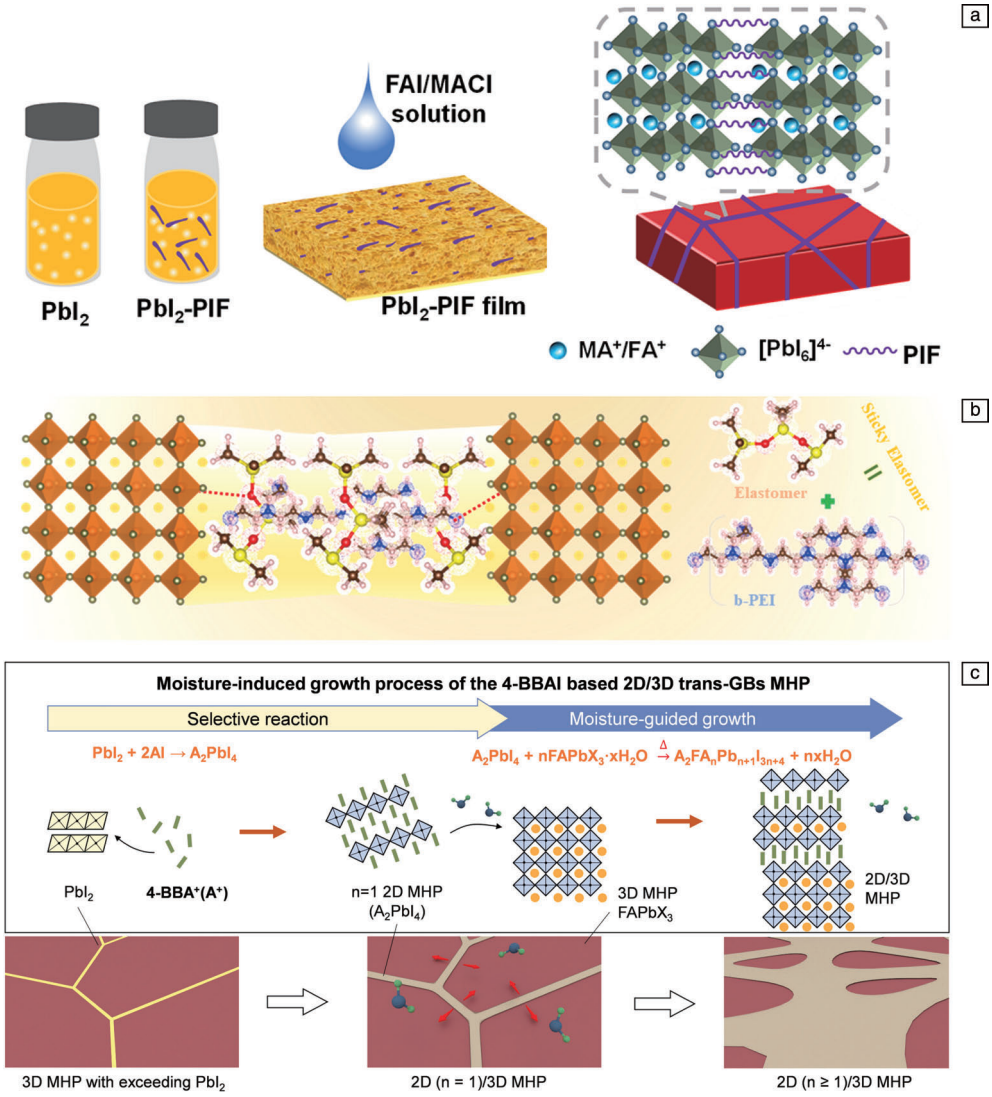


图 6　晶界强化策略：(a)PIF 原位晶界密封[55]，(b) s-ELA 晶界缝合[56]，(c)跨晶界的 2D/3D 耦合结构增强[57]

Fig. 6　Grain boundary strengthening strategies: (a) *in-situ* grain boundary sealing by PIF[55], (b) grain boundary stitching via s-ELA[56], (c) 2D/3D coupled structure enhancement across grain boundaries[57]

左右。总体来看，晶界工程的本质在于通过局域微观结构调控降低应力集中并阻断裂纹扩展。其中，晶界缓冲侧重于赋予晶界更高的柔性与应变耗散能力，而晶界强化则通过构筑跨晶界连接增强结构完整性。未来，通过柔性缓冲与刚性增强协同设计实现“刚柔并济”的晶界力学调控，有望进一步突破柔性钙钛矿太阳能电池在机械耐久性方面的性能瓶颈。

3.5　功能层异质界面工程

各功能层之间通常具有显著不同的杨氏模量、热膨胀系数以及表面化学性质，因此在制备与服役过程中容易形成局域应力集中，并最终诱导界面脱粘、层间剥离及裂纹扩展等失效行为。尤其在持续弯曲或循环应变条件下，异质界面往往成为器件最先发生结构损伤的区域。因此，相较于单纯改善钙钛矿体相力学性质，通过功能层异质界面工程优化应力传递路径、增强界面黏附强度并降低界面失配，被视为提升柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性的关键策略[2, 58, 59]。

根据调控位置的不同，柔性钙钛矿太阳能电池中的界面工程策略主要可分为埋底界面调控和上表面界面修饰 2 类。埋底界面调控主要针对钙钛矿层与底部载流子传输层之间的界面，通过增强界面接触、诱导钙钛矿异相成核与有序结晶、降低界面缺陷密度、优化能级匹配以及调节残余应力分布等方式改善器件性能[60-62]，目前常见的界面调控材料包括有机小分子、无机盐、二维材料和聚合物等[63-66]。Wang 等[67]采用 N-(4-氰基苯基)胍盐酸盐(NCGCl)修饰自组装分子层，如图 7a 所示，

NCGCl 与自组装分子间苯环的 π-π 共轭作用，以及氰基、胍基与钙钛矿组分形成的氢键与配位作用，显著增强了埋底界面与钙钛矿层之间的结合强度。得益于界面黏附力和应力缓释能力的提升，制备的柔性器件在 10 mm 弯曲半径，5000 次弯曲后仍保持初始效率的 90%，而对照组仅保留了 79%。Liu 等[68]将具有动态亚胺交联的超分子聚合物与 SiO_2 纳米颗粒复合，构筑了一种自修复疏水涂层(SHC)，并将该涂层引入柔性钙钛矿太阳能电池埋底界面，如图 7b 所示。该界面层能够有效减少残留 PbI_2，提高薄膜结晶质量和致密性。最终制备的柔性器件取得 25.74%的认证效率，并在 5 mm 弯曲半径下经历 10 000 次弯曲后仍保持初始效率的 90.35%(对照组仅剩 26.15%)。此外，Cai 等[53]利用两性离子凝胶单体 3-(1-乙烯基-3-咪唑)丙磺酸盐(VIPS)原位聚合，在钙钛矿晶界和埋底界面同步构筑柔性离子凝胶网络，如图 7c 所示，该网络通过界面和晶界的双区域锚定作用，同时缓解晶格应变和界面应力集中，实现了缺陷钝化与机械强化的协同调控。基于该策略构筑的柔性器件在 5 mm 弯曲半径下经过 20 000 次循环弯曲后，仍能够保持 97.3%的初始效率。

与埋底界面工程不同，上表面界面修饰主要通过物理或化学后处理手段对钙钛矿薄膜顶部缺陷进行钝化，并构筑兼具环境防护和力学增强功能的表面保护层。Li 等[69]在钙钛矿薄膜表面通过氨基丙基双端聚二甲基硅烷(AP-PDMS)进行界面钝化，如图 8a 所示，得益于独特的分子空间结构特点，AP-PDMS 可以像“钳子”一样捕获

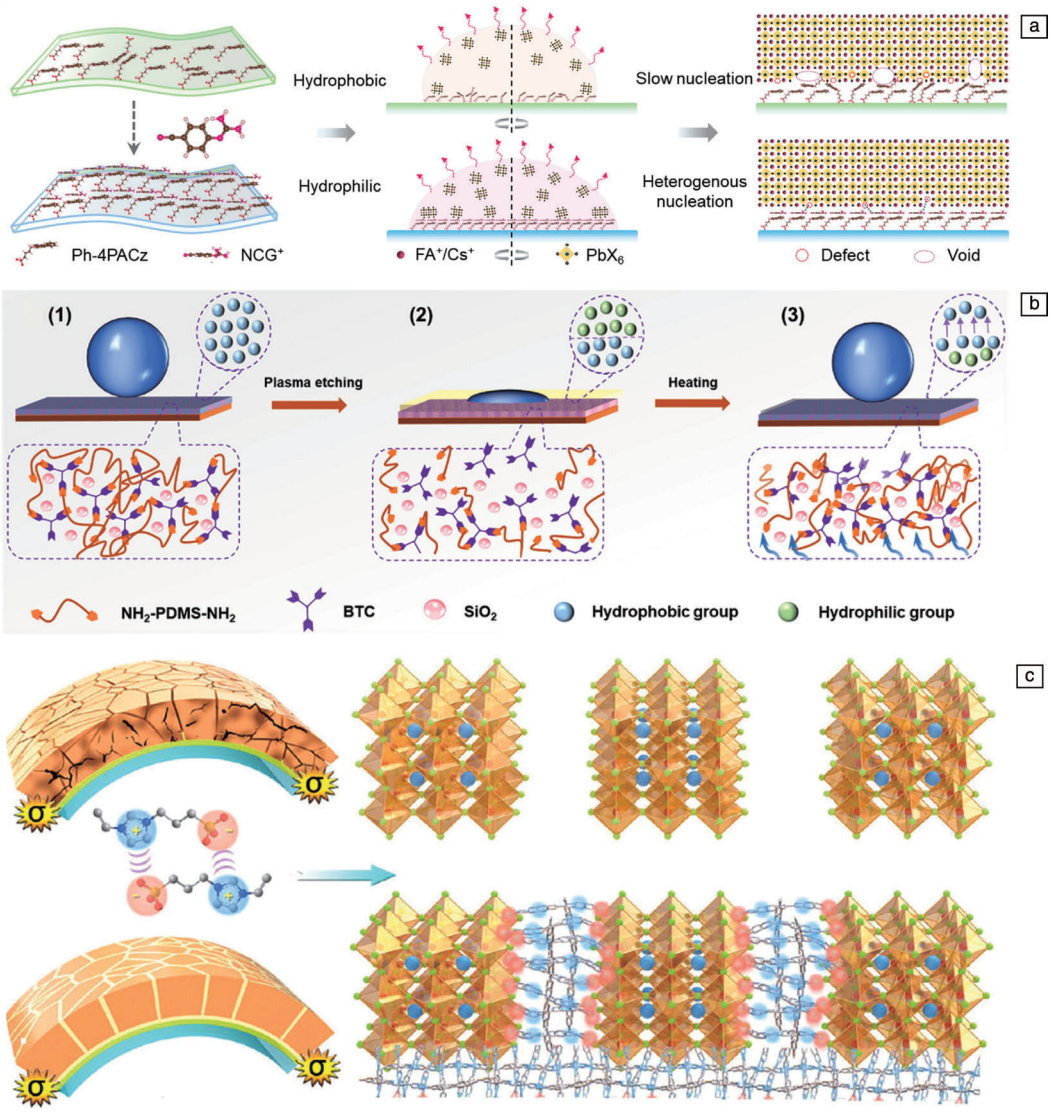


图 7 埋底界面增强策略：(a)异相成核策略[67]，(b)自修复疏水策略[68]，(c)离子凝胶原位聚合策略[53]

Fig. 7 Buried interface enhancement strategies: (a) heterogeneous nucleation strategy[67], (b) self-healing hydrophobic strategy[68], (c) *in-situ* ionogel polymerization strategy[53]

两个 Pb^{2+} 并与 FA^{+} 形成氢键，并借此实现残余应力的释放，柔性器件表现出优异的机械耐久性，弯曲半径为 5 mm 条件下，10 000 次弯曲循环后仍保留初始效率的 90%以上。在钙钛矿表面原位构筑低维钙钛矿保护层也是目前应用广泛的上界面修饰策略之一。Dong 等[70]在三维钙钛矿薄膜上引入 3-氯苄基碘化铵，使它选择性与表面过量的 PbI_2 反应，在三维钙钛矿薄膜表面生长一层低维钙钛矿覆盖层。如图 8b 所示，该覆盖层不仅提高了光生载流子的提取效率，而且封闭了薄膜表面的缺陷，在表面增加了一层防护，得益于此，柔性钙钛矿太阳能电池在 5 mm 弯曲半径下，进行 10 000 次的弯曲仍保持初始效率的 88%。

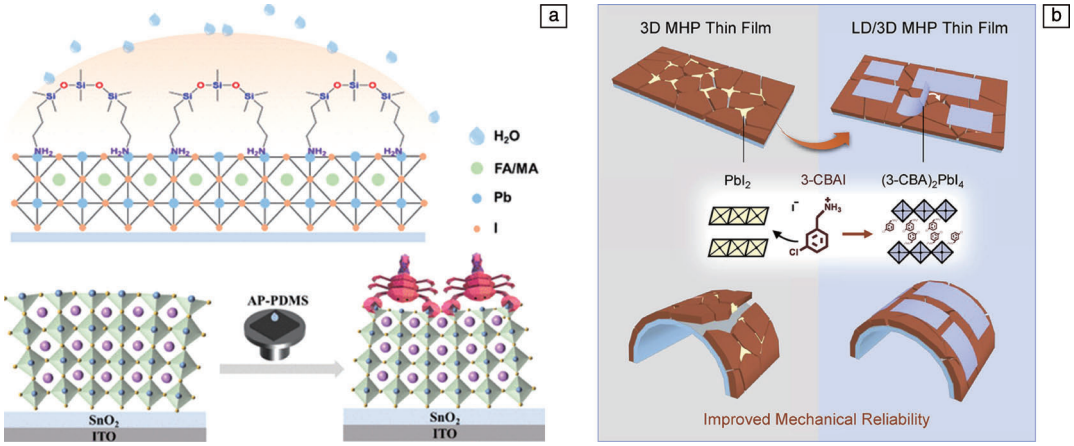


图 8　上界面增强策略：(a) AP-PDMS 表面处理[69]，(b) 低维钙钛矿表面覆盖[70]

Fig. 8　Top interface enhancement strategies: (a) AP-PDMS surface treatment[69], (b) low-dimensional perovskite surface capping[70]

埋底界面调控通过增强底部粘附力构筑抗裂基石，而上表面处理(如引入低维钙钛矿覆盖层)则能有效钝化表层缺陷，避免裂纹从顶部萌生。此外，为了进一步提高柔性器件的机械耐久性，双界面优化研究日益增多，全方位、多维度的界面协同优化，有助于协同攻克柔性钙钛矿太阳能电池在光电转换效率与机械耐久性方面的核心技术难题。

4　结　语

本文综述了近年来国内外科研团队在柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性提升方面的研究进展。从作用层级来看，柔性基底与透明电极为器件提供机械支撑和柔性导电框架；钙钛矿体相修饰通过组分调控、聚合物/超分子增韧以及应力缓冲剂引入改善薄膜韧性与残余应力分布；晶界工程通过晶界缓冲与强化抑制裂纹萌生和扩展；功能层异质界面工程则通过分子桥连接、柔性缓冲层及界面化学耦合增强界面结合能力并优化应力传递。总体而言，柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性的提升本质上依赖于应力耗散、裂纹抑制、模量匹配与界面强化的协同作用。

尽管相关研究已取得显著进展，但仍面临整体力学协同设计不足、机械耐久性评价标准缺失以及机械稳定性与光电性能难以兼顾等问题。未来研究可重点聚焦上述问题展开，并进一步推动柔性钙钛矿太阳能电池机械耐久性测试体系标准化。随着材料设计、界面调控及力学研究的不断深入，柔性钙钛矿太阳能电池有望实现高效率与高机械耐久性的协同突破，为下一代柔性光伏器件的实际应用提供支撑。

参考文献　References

[1] GAO Y, HUANG K, LONG C, *et al*. ACS Energy Letters[J], 2022, 7(4): 1412-1445.

[2] SONG F, ZHENG D, FENG J, *et al*. Advanced Materials[J], 2024, 36(18): 2312041.

[3] JUNG H S, HAN G S, PARK N G, *et al*. Joule[J], 2019, 3(8): 1850-1880.

[4] LI M, YUE Y, ZHANG D, *et al*. Journal of Materials Chemistry A [J], 2025, 13(41): 35547-35557.

[5] SOLDERA M, WANG Q, SOLDERA F, *et al*. Advanced Engineering Materials[J], 2020, 22(4): 1901217.

[6] XU Y, ZHANG S, YUAN H, *et al*. ACS Nano[J], 2025, 19(4): 4867-4875.

[7] PARK B W, KWON H W, LEE Y, *et al*. Nature Energy[J], 2021, 6(4): 419-428.

[8] TANG G, CHEN L, CAO X, *et al*. Solar RRL[J], 2025, 9(5): 2400844.

[9] VIANA J, CRUZ S, ROCHA L. Printing Technologies on Flexible Substrates for Printed Dlectronics[M]. London: IntechOpen. 2018.

[10] ZHENG J, XUE C, WANG G, *et al*. ACS Energy Letters[J], 2024, 9(4): 1545-1547.

[11] LEE H J, KIM K, LEE S, *et al*. EES Solar[J], 2025, 1(5): 736-747.
[12] HAN G S, LEE S, DUFF M L, *et al*. ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2018, 10(5): 4697-4704.
[13] HEO J H, SHIN D H, LEE M L, *et al*. ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2018, 10(37): 31413-31421.
[14] WEI L, SHAO Y, ZHENG G, *et al*. Materials Letters[J], 2025, 396: 138794.
[15] KUMAR A, RANI S, SUNDAR G D. Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2024, 268: 112737.
[16] JIA C, ZHAO X, LAI Y H, *et al*. Nano Energy[J], 2019, 60: 476-484.
[17] XING Z, XIAO Y, ZHOU Y, *et al*. Advanced Functional Materials [J], 2026, 36(34): e30978.
[18] PREMALAL E V A, DEMATAGE N, KANEKO S, *et al*. Thin Solid Films[J], 2012, 520(22): 6813-6817.
[19] CHEN X, WANG M, HUANG Z, *et al*. Thin Solid Films[J], 2026, 837: 140892.
[20] HU X, LI F, SONG Y. ACS Energy Letters[J], 2019, 4(5): 1065-1072.
[21] WANG S, LI W, YU C, *et al*. Nature[J], 2026, 649(8095): 59-64.
[22] WEERASINGHE H C, DKHISSI Y, SCULLY A D, *et al*. Nano Energy[J], 2015, 18: 118-125.
[23] JIANG S, FENG L, ZHANG W, *et al*. Solar Energy Materials and Solar Cells[J], 2022, 246: 111895.
[24] RI K, JU J, KIM Y, *et al*. Applied Physics Letters[J], 2025, 126 (15): 153903.
[25] LIU L, ZHU W, ZI L, *et al*. Nanoscale[J], 2026, 18(12): 6221-6248.
[26] ZHANG J, MENG Y, WU A P, *et al*. Joule[J], 2026, 10(1): 102225.
[27] YOON J, KIM U, YOO Y, *et al*. Advanced Science[J], 2021, 8(7): 2004092.
[28] YOON J, SUNG H, LEE G, *et al*. Energy & Environmental Science [J], 2017, 10(1): 337-345.
[29] HU X, MENG X, ZHANG L, *et al*. Joule[J], 2019, 3(9): 2205-2218.
[30] LAI H, ZHU J, KUO R T, *et al*. Nature Communications[J], 2025, 16: 11468.
[31] JIN T Y, LI W, LI Y Q, *et al*. Advanced Optical Materials[J], 2018, 6(24): 1801153.
[32] CHEN L, INGABIRE P B, SUN J, *et al*. Nano Energy[J], 2025, 142: 111197.
[33] ZHOU B, WU X, JIANG Z, *et al*. Advanced Energy Materials[J], 2025, 15(26): 2405093.
[34] SHEN Y, ZHANG T, XU G, *et al*. Nature[J], 2024, 635(8040): 882-889.
[35] ZHAO J, DENG Y, WEI H, *et al*. Science Advances[J], 2017, 3 (11): eaao5616.
[36] ZHANG H, PARK N G. Angewandte Chemie International Edition [J], 2022, 61(48): e202212268.
[37] ROLSTON N, PRINTZ A D, TRACY J M, *et al*. Advanced Energy Materials[J], 2018, 8(9): 1702116.
[38] RAKITA Y, COHEN S R, KEDEM N K, *et al*. MRS Communications [J], 2015, 5(4): 623-629.
[39] SUN S, ISIKGOR F H, DENG Z, *et al*. ChemSusChem[J], 2017, 10 (19): 3740-3745.
[40] WANG Y, YU Z, ZHANG C, *et al*. Advanced Science[J], 2026, 13 (12): e22620.
[41] MA M, BI W, CHU Y, *et al*. Advanced Functional Materials[J], 2025, 35(23): 2419067.
[42] WU Y, XU G, SHEN Y, *et al*. Advanced Materials[J], 2024, 36 (30): 2403531.
[43] NING L, SONG L, YIN X, *et al*. Advanced Functional Materials[J], 2026, 36(24): e24919.
[44] LU Z, LOU Y, XIAO L, *et al*. Advanced Energy Materials[J], 2022, 12(39): 2202298.
[45] LI Z, JIA C, WAN Z, *et al*. Nature Communications[J], 2025, 16: 1771.
[46] HE M, MA Y, WU S, *et al*. Nature Energy[J], 2026, 11(2): 262-273.
[47] DUAN R, LUO J, WEI L, *et al*. Advanced Functional Materials[J], 2026, 36(21): e75916.
[48] YANG Z, JIANG Y, WANG Y, *et al*. Small [J], 2024, 20 (9): 2307186.
[49] XU Z, YU R, LV Q, *et al*. Nature Communications[J], 2025, 17: 322.
[50] LI Y, LIU C, XIANG W, *et al*. Advanced Materials[J], 2026, 38 (34): e73390.
[51] FAN X, CHEN J, WANG J, *et al*. Energy & Environmental Science [J], 2025, 18(6): 2905-2917.
[52] ZHANG Z, ZHU R, LI G, *et al*. Nature Energy[J], 2026, 11(4): 623-632.
[53] CAI W, WANG J, ZHU X, *et al*. Advanced Energy Materials[J], 2026, 16(7): e05869.
[54] ZHAO P, GONG Z, FANG Z, *et al*. Advanced Functional Materials [J], 2025, 35(34): 2501166.
[55] JIA C, LI Z, LIU Z, *et al*. ACS Energy Letters[J], 2025, 10(11): 5870-5879.
[56] FAHIM M, FIRDOUS I, TSANG S W, *et al*. Nano Energy[J], 2022, 96: 96107058.
[57] YAN Y, WANG R, DONG Q, *et al*. Energy & Environmental Science [J], 2022, 15(12): 5168-5180.
[58] ZHOU H, CHEN Q, LI G, *et al*. Science[J], 2014, 345(6196): 542-546.
[59] DOU J, CHEN Q. Energy Material Advances[J], 2022, 2022: 0002.
[60] CAO Y, YANG L, YAN N, *et al*. Energy & Environmental Science [J], 2025, 18(8): 3659-3667.

[61] LUO C, ZHENG G, GAO F, *et al*. Nature Photonics[J], 2023, 17(10): 856-864.

[62] XU R, PAN F, CHEN J, *et al*. Advanced Materials[J], 2024, 36(7): 2308039.

[63] CAO Y, FENG J, WANG M, *et al*. Advanced Energy Materials[J], 2023, 13(40): 2302103.

[64] YOU S, ZENG H, KU Z, *et al*. Advanced Materials[J], 2020, 32(43): 2003990.

[65] YI Z, LI X, XIAO B, *et al*. Science China Materials[J], 2022, 65(12): 3392-3401.

[66] LI Z, JIA C, WAN Z, *et al*. Nature Communications[J], 2023, 14: 6451.

[67] WANG F, JIN C, KONG S, *et al*. Advanced Materials[J], 2026, 38(33): e73358.

[68] LIU W, XU G, WU Y, *et al*. Advanced Materials[J], 2026, 38(9): e19163.

[69] LI Y, LIU C, CAI H, *et al*. ACS Applied Materials & Interfaces[J], 2025, 17(35): 49993-50001.

[70] DONG Q, CHEN M, LIU Y, *et al*. Joule[J], 2021, 5(6): 1587-1601.