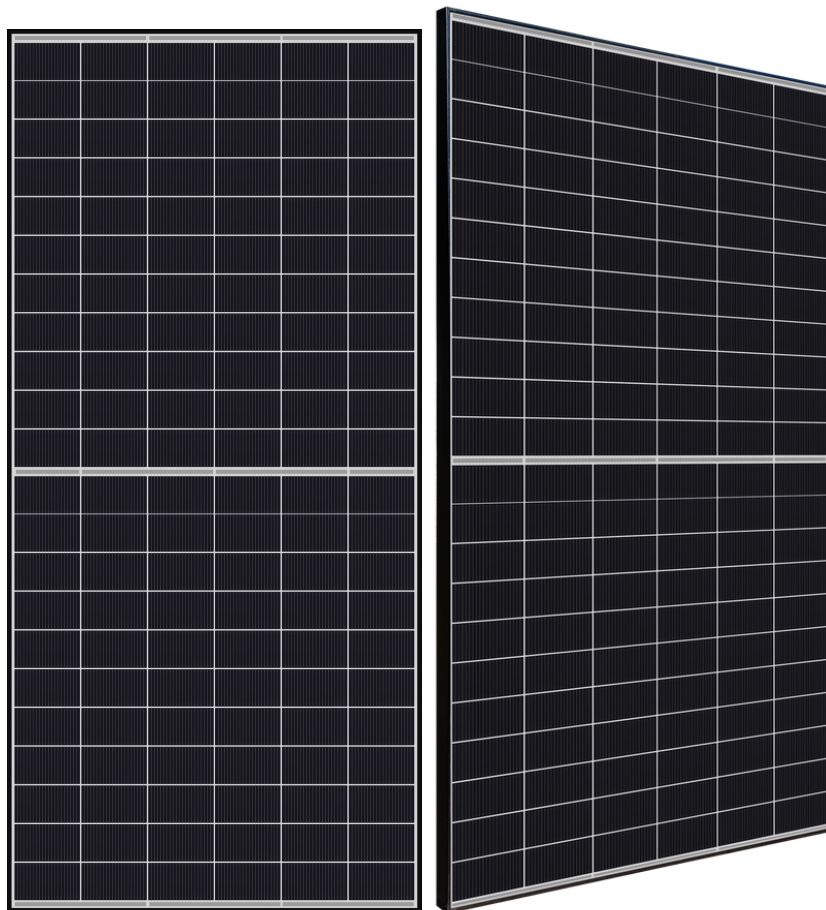




阿特斯高性能复合边框组件技术 白 皮 书

阿特斯阳光电力集团

2026年7月

本白皮书系统介绍阿特斯高性能复合边框组件的核心技术、设计理念及其在光伏行业中的创新应用。通过采用GFRP（玻璃纤维增强塑料）材料边框，组件在耐腐蚀性、机械强度、绝缘性能和低碳价值方面实现综合提升，为可再生能源领域提供更加可靠、高效和可持续的组件解决方案。

第1章 产业挑战：推动组件设计创新

1.1 多元化应用场景带来结构挑战

当前光伏已覆盖海上、高盐雾、极寒、高雪载、沙漠、高温差、工商业屋顶等多种应用场景，对组件结构提出更高要求。这些应用场景从高湿度的海洋环境到干旱的沙漠地带，从极低温的寒带地区到高温差的内陆区域，每种环境都对光伏组件的可靠性和耐久性形成了不同维度的挑战。

- 海上高盐雾环境：高盐雾、高湿度和强腐蚀条件会加速金属边框电化学反应，加快组件性能退化。
- 极寒地区：大温差造成应力集中，材料热膨胀系数不匹配导致结构应力不均匀。
- 沙漠地区：昼夜温差大，材料之间应力变化不均匀导致玻璃破损风险高，同时面临风沙侵蚀问题。
- 高温环境：PID衰减加剧，水汽渗透影响电气性能和长期可靠性。
- 高风载区域：结构强度要求高，边框连接处易出现疲劳失效。



因此，多元化应用场景带来的核心挑战，首先体现在组件结构对复杂环境的适配能力上。未来组件需要在不同气候区、不同安装方式和不同载荷条件下保持稳定服役，边框、玻璃、封装体系及连接结构之间的协同设计将变得更加重要。相较于单一性能指标的提升，面向复杂场景的组件设计更强调结构安全裕度、应力分布控制、环境耐受能力和长期可靠性的一体化优化。

1.2 全球光伏低碳浪潮带来ESG合规挑战

在全球能源转型与绿色贸易规则加速重构的背景下，光伏组件的竞争维度正从单一的效率、功率和成本，逐步拓展至碳足迹、材料低碳化、供应链透明度和全生命周期价值。以产品碳足迹、环境产品声明、绿色供应链评价及碳边境调节机制等为代表的合规要求，正在推动光伏产品从“清洁发电设备”进一步向“低碳制造产品”升级。对于组件企业而言，未来的产品竞争不仅取决于更高的发电性能，也取决于其在制造、运输、安装、运行及回收环节中的低碳表现和可验证能力。

在组件全生命周期碳排放构成中，边框、玻璃、硅片、封装材料等关键部件的材料选择与制造工艺，正在成为影响组件碳足迹的重要因素。其中，铝边框作为当前光伏组件广泛采用的结构件，主要依赖电解铝及挤压、表面处理等高能耗工艺。公开生命周期评价数据显示，原铝生产阶段的碳排放通常处于约 10–20 kg CO₂e/kg 区间，具体水平受电力结构、再生铝比例和工艺路线影响较大。对于一块大尺寸光伏组件而言，边框用铝量通常约为 3–4 kg，仅边框材料本身即可能带来约 30–80 kg CO₂e 的制造端碳排放。因此，在全球市场逐步强化产品碳足迹披露和低碳材料采购的趋势下，组件结构材料的低碳化已成为行业需要系统应对的重要课题。

这一变化表明，组件设计创新正在被纳入更广义的低碳合规框架之中。对于面向全球市场的组件产品而言，关键材料的碳足迹、供应链可追溯性、回收利用潜力以及生命周期环境影响，将逐步成为客户采购、项目融资和市场准入的重要评价维度。因此，组件企业需要在保障性能与可靠性的基础上，将低碳材料选择、碳排放核算和绿色供应链管理前置到产品设计阶段，使组件不仅具备更强的发电能力，也具备更清晰、可验证的可持续价值。

第2章 问题与解决方案

复合边框技术通过材料和结构创新从根本上解决传统铝边框面临的实际问题。本章展示传统铝边框组件主要共性问题的根因分析和复合边框的针对性解决方案。

核心创新思路：

- 从材料本征特性出发，而非表面处理
- 系统性解决，而非单点优化

通过GFRP材料体系的四大核心特性（高绝缘、低热膨胀系数、非金属、高强度），复合边框在失效机理层面实现突破性改进。

问题与解决方案

传统铝合金边框问题	诱因	复合边框解决机制	技术参数
PID衰减	导电路径形成电位差	高体积电阻率材料	10 ¹⁵ Ω·cm级
腐蚀问题	金属电化学反应	非金属材料本征抗腐蚀	无电化学腐蚀
运维成本高	接地要求和后期腐蚀老化	本征绝缘免接地，免维护	绝缘材料体系
碳排放高	电解铝与挤压、表面处理工艺能耗高	低能耗材料体系与低温拉挤工艺，减少高碳金属用量	复合边框碳足迹约为铝边框的15~20%

该表从失效机理出发，梳理了传统铝边框的主要挑战及复合边框的针对性解决路径，体现了复合边框在可靠性、运维和低碳价值方面的综合优势。

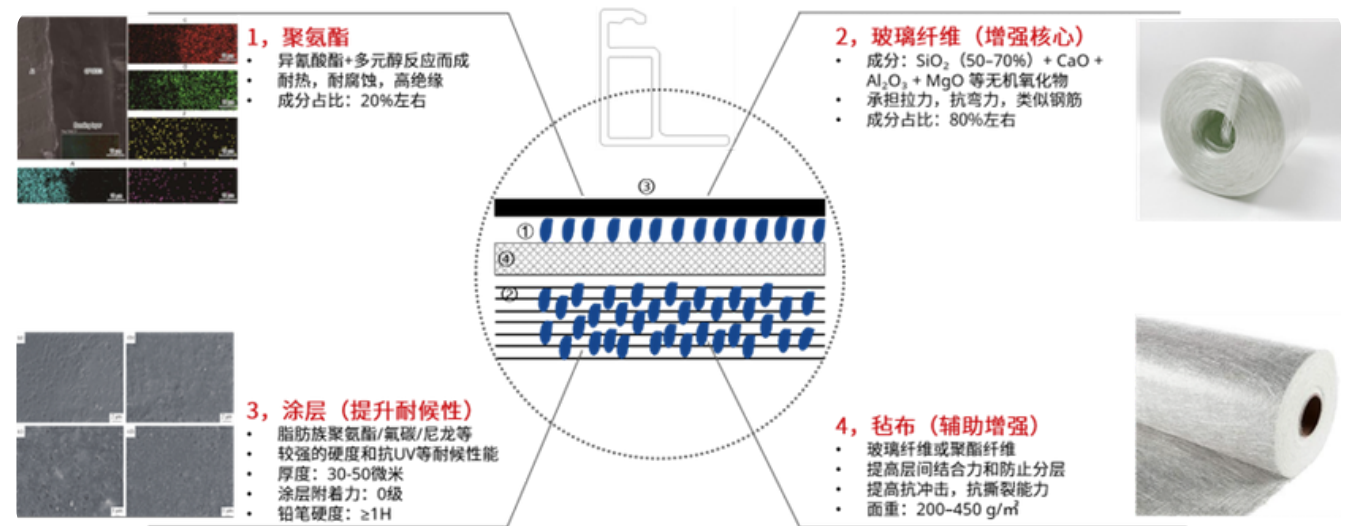
第3章 技术概述：GFRP复合边框

3.1 材料结构

复合边框采用玻纤增强聚氨酯(GFRP)材料体系，是一种多层复合结构。

- 聚氨酯基体：**提供韧性和耐候性，优异的抗UV性能，良好的尺寸稳定性，适应温度变化
- 玻璃纤维层：**提供主要结构强度，抗拉强度超过1000 MPa，纤维体积分数优化设计，确保最佳性能
- 功能涂层：**提升抗UV和耐候性能，表面保护与美观功能，增强粘结性能
- 毡布层：**改善树脂浸润与表面稳定性，提升横向强度和边角抗裂能力

这种多层结构设计使复合边框同时具备高强度、高韧性和优异的环境适应性。



3.2 材料特性

基于玻纤增强聚氨酯材料体系，复合边框兼具高绝缘、耐腐蚀、高强度和高可靠性。这些特性来源于非金属绝缘基体、连续纤维增强结构及表面防护体系的协同作用，可满足组件长期户外服役和复杂场景应用需求。

高绝缘性

复合边框采用非金属绝缘材料体系，体积电阻率可达 $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 量级。相较于导电的铝合金边框，复合边框不易形成组件边框与电池片之间的导电通道，有助于降低高湿、高压环境下的漏电流和离子迁移风险，从机理上抑制PID衰减，并为组件免接地设计提供材料基础。

热膨胀匹配

复合边框的线性热膨胀系数约为 $4 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，明显低于铝边框的 $23.2 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ ，并更接近组件玻璃的 $9 \mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 。其低热膨胀特性主要来源于连续玻璃纤维增强结构，可降低温度循环下边框与玻璃之间的变形差异，从而减少边缘应力和玻璃破损风险。

材料	热膨胀系数 $\mu\text{m}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$	初始 温度	终点 温度	长度L @25°C	长度L @-40°C	ΔT (°C)	ΔL (mm)
铝	23.2	25	-40	2278	2274.6	65	3.4
组件玻璃	9	25	-40	2272	2270.7	65	1.3
复合材料	4	25	-40	2278	2277.4	65	0.6

耐腐蚀性

复合边框不含金属基体，能够避免铝边框在盐雾、湿热和酸碱环境中可能发生的电化学腐蚀问题。聚氨酯基体与表面功能涂层共同形成稳定的防护体系，可降低水汽、盐分和紫外老化对边框结构的影响，提升组件在海上、沿海、高湿热等严苛环境中的长期耐久性。

高强度

复合边框以连续玻璃纤维作为主要增强相，并通过拉挤工艺实现纤维方向、树脂含量和截面结构的稳定控制，使材料在边框长度方向具备较高抗拉强度和抗弯承载能力。其抗拉强度可达1000 MPa量级，高于常规铝合金边框，有助于提升组件在风载、雪载、运输和安装过程中的结构安全裕度。

高可靠性

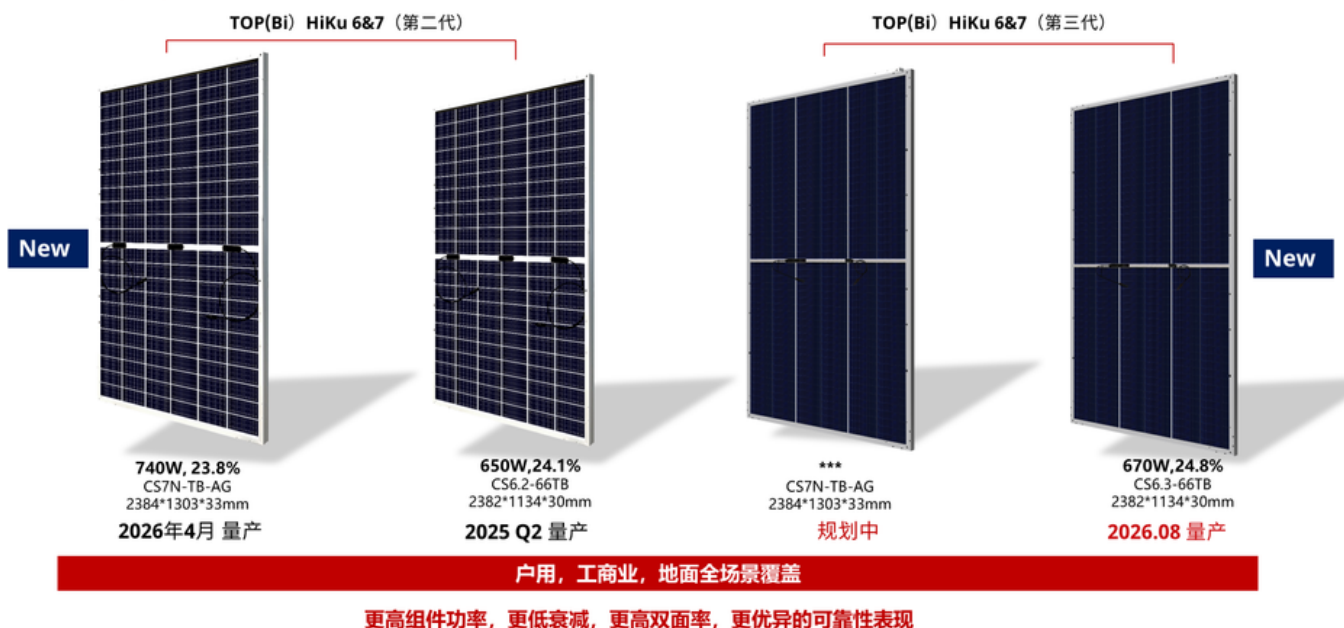
复合边框的高可靠性并非来自单一性能提升，而是高绝缘、耐腐蚀、高强度和低热膨胀特性的综合结果。其热膨胀系数更接近组件玻璃，可降低温度循环下的边缘应力 and 界面失配风险；同时，多层复合结构在长期湿热、紫外、机械载荷和温度循环条件下保持结构稳定，有助于降低玻璃破损、边框腐蚀、接地失效和PID衰减等长期风险。

第4章 阿特斯高性能复合边框组件

4.1 产品介绍

阿特斯高性能复合边框组件是面向海上光伏、极寒地区、高盐雾、高腐蚀及高风载等严苛场景开发的新一代高可靠组件解决方案。产品采用GFRP（玻璃纤维增强聚氨酯）复合边框，以聚氨酯树脂为基体、连续玻璃纤维为增强骨架，并通过拉挤成型工艺实现稳定截面和一致性制造。

TOP(Bi)HiKu 6&7



目前, 阿特斯210N/182矩形复合边框组件已获得VDE认证, 覆盖TOPBiHiKu6与TOPBiHiKu7等主流产品平台, 可满足户用、工商业屋顶和大型地面电站等多场景应用需求。该产品并非简单的边框材料替换, 而是围绕复杂环境适应性、长期可靠性、系统降本和低碳价值进行的组件结构升级。

4.2 产品特点

阿特斯高性能复合边框组件的产品特点主要体现在高可靠性和复杂环境适应能力上。基于GFRP复合边框的高绝缘、耐腐蚀、高强度和低热膨胀特性, 组件可在高温高湿、高盐雾、极寒、高风载及强腐蚀等环境下保持稳定运行, 降低PID衰减、边框腐蚀、玻璃破碎和接地维护等长期风险。

在组件性能层面, 复合边框有助于提升结构安全裕度和长期服役稳定性。连续纤维增强结构使边框具备更高的抗拉、抗弯能力; 与玻璃更接近的热膨胀系数可降低温度循环下的边缘应力; 非金属绝缘体系则可减少漏电流和电化学腐蚀风险, 从而提升组件在全生命周期内的可靠性。

在系统价值层面, 复合边框组件可简化等电位连接设计, 减少安装与后期维护工作量, 并通过较低碳足迹提升产品ESG表现。上述特点使其特别适用于海上光伏、沿海滩涂、盐碱地、化工区域、极寒地区及高风载区域等对组件可靠性和环境适应性要求更高的应用场景。

4.3 核心优势

阿特斯高性能复合边框组件形成了六大核心优势:

第一, 更低PID衰减。复合边框高绝缘特性可减少漏电流和离子迁移风险。加严PID测试后, 组件衰减可控制在1%以内, 同等条件下约为铝边框组件的三分之一。

第二, 更高机械强度。连续玻璃纤维增强结构使复合边框拉伸强度和抗弯强度可达1000 MPa量级, 约为常规铝合金边框的4倍, 有助于提升组件在风载、雪载、运输和安装过程中的结构安全裕度。

第三, 更低玻璃破碎风险。复合边框热膨胀系数约为 $4\mu\text{m}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, 更接近组件玻璃, 可减少温度循环下边框与玻璃之间的热变形差异, 降低边缘应力和玻璃破碎风险。

第四, 免等电位连接, 降低系统成本。基于高体积电阻率, 复合边框组件可免除组件层级等电位连接, 减少接地材料、安装人工和后期维护成本。以100 MW地面电站为例, 系统LCOE可降低约1.0%–1.7%。

第五，优异耐腐蚀性能。复合边框属于非金属高分子复合材料，不存在金属电化学腐蚀风险。盐雾测试外观无明显变化，适合海上光伏、沿海滩涂、盐碱地和化工区域等高腐蚀场景。

第六，更低碳排放。以一个大尺寸版型为例，复合边框碳足迹约为3.5 kgCO₂e/kg，铝边框约为18 kgCO₂e/kg，约为铝边框的20%。在组件层面，复合边框组件碳足迹约为450 kgCO₂e/kWp，较铝边框组件约降低50 kgCO₂e/kWp，有助于提升ESG表现并降低潜在碳成本。

综上，阿特斯高性能复合边框组件通过材料、结构和工艺协同创新，在可靠性、环境适应性、系统成本和低碳价值方面实现综合提升，是面向高可靠、低碳化光伏应用的重要技术路径。

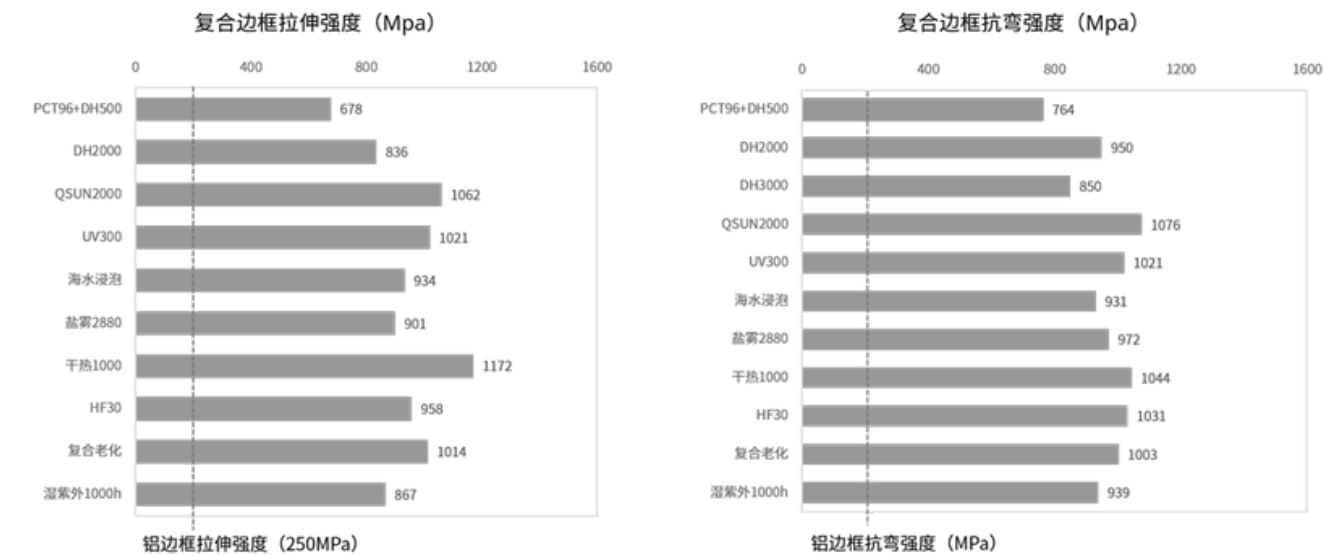
4.4 产品可靠性

为验证复合边框组件在长期户外服役中的可靠性，阿特斯从材料级和组件级两个层面建立了系统化验证体系。材料级验证重点评估边框材料本体、涂层附着力、涂层硬度、耐酸碱、耐盐雾及加严老化后的强度保持能力，针对跟踪支架等安装方式，重点优化和加强了复合边框材料的界面强度，使其性能进一步提升；组件级验证则关注复合边框装配成组件后的机械载荷、PID衰减、环境可靠性和免等电位连接可行性。

4.4.1 材料级验证

4.4.1.1 力学老化测试

为验证复合边框材料在长期户外服役条件下的强度保持能力，阿特斯对其开展了多项加严老化测试。测试结果显示，经过不同老化条件后，复合边框材料强度仍保持在678–1172 MPa范围内，满足严苛应用场景下的使用要求。



UV老化测试中，材料经过300小时紫外线照射后性能保持稳定，未出现明显降解。

湿热老化测试按照IEC标准要求执行，材料在高温高湿环境下表现优异。综合测试结果表明，复合边框材料性能完全满足25年使用寿命要求，为组件长期可靠运行提供材料基础保障。

4.4.1.2 涂层耐久性测试

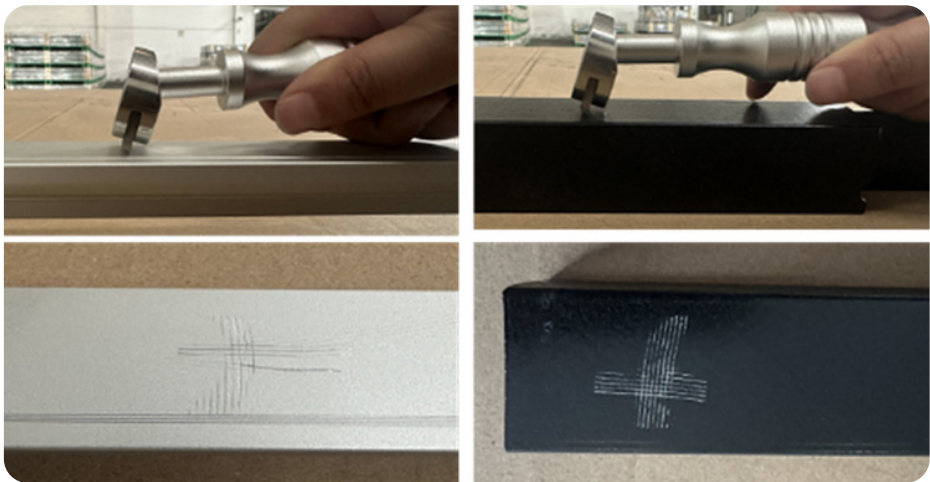
此外，为验证光伏组件用玻纤增强复合材料边框（以下简称"复合边框"）涂层在工程应用中的可靠性，我们依据国家标准对涂层附着力及涂层硬度两项关键指标进行了测试，并与传统阳极氧化铝边框（以下简称"铝边框"）进行对照评估。

一、涂层附着力（划格法）

依据 GB/T 9286—2021《色漆和清漆 划格试验》对复合边框及铝边框涂层附着力进行评定。

测试结果

样品	涂层成分	膜厚	测试结果
复合边框	聚氨酯	≥30 μm	0 级
铝边框	阳极氧化铝 AA10	—	0 级



铝边框

复合边框

标准要求

- 团体标准 T/CPIA 0081—2024《光伏组件用玻纤增强复合材料边框》规定：复合边框涂层附着力不低于 1 级；
- CSI 内部控制标准：0 级；
- 团体标准 T/CPIA 0117—2025（铝边框）：未作明确要求。

测试结果表明，复合边框涂层附着力达到 GB/T 9286—2021 标准中的最高等级 0 级，优于团体标准要求，并与铝边框保持同等水平。

二、涂层硬度（铅笔硬度法）

依据 GB/T 6739—2022《色漆和清漆 铅笔法测定漆膜硬度》对复合边框及铝边框涂层硬度进行评定。

测试结果

样品	涂层成分	膜厚	测试结果
复合边框	聚氨酯	≥30 μm	≥6H
铝边框	阳极氧化铝 AA10	—	≥6H

标准要求

- 团体标准 T/CPIA 0081—2024：铅笔硬度 $\geq F$ ；
- CSI 内部控制标准：铅笔硬度 $\geq 1H$ ；
- 团体标准 T/CPIA 0117—2025（铝边框）：未作明确要求。

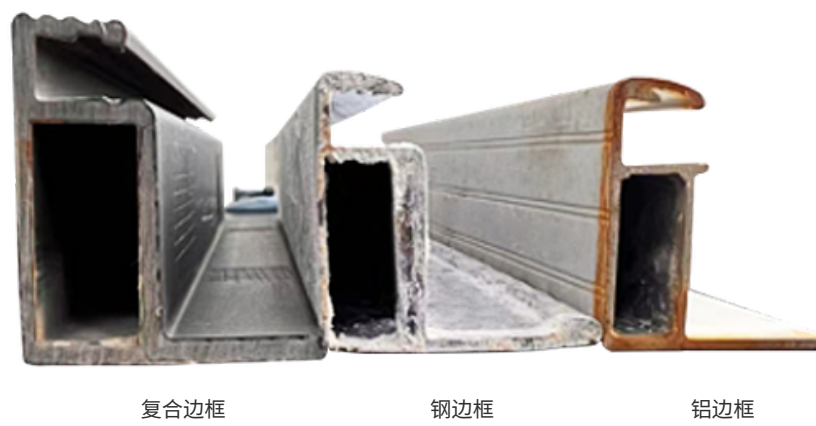
测试结果表明，复合边框涂层铅笔硬度达到 $\geq 6H$ ，显著高于团体标准 $\geq F$ 及 CSI 内部 $\geq 1H$ 的要求，与铝边框性能相当。

4.4.1.3 耐腐蚀性测试

复合边框耐腐蚀性测试覆盖耐酸、耐碱、耐溶剂及连续盐雾等典型腐蚀环境，用于验证边框涂层及基材在高盐雾、强酸碱和复杂化学环境下的长期稳定性。测试结果显示，复合边框样品在耐酸（pH=3）、耐碱（pH=12）、耐溶剂和连续盐雾测试后均通过外观及颜色指数评价，测试后色差 $\Delta E < 1.5$ ，未出现涂层脱落、开裂、边框变形等异常现象。

测试项目	测试条件/表征方法	测试结果	结果说明
耐酸测试	pH=3，外观及颜色指数 ΔE	通过	色差 $\Delta E < 1.5$ ，无涂层脱落、开裂或变形
耐碱测试	pH=12，外观及颜色指数 ΔE	通过	色差 $\Delta E < 1.5$ ，无涂层脱落、开裂或变形
耐溶剂测试	外观及颜色指数 ΔE	通过	涂层表面保持稳定，无明显异常
连续盐雾测试	盐雾腐蚀环境	通过	表面无锈斑、发黄或腐蚀迹象

在进一步的海上项目实测中，复合边框经盐雾测试后外观无明显变化，未出现锈蚀、发黄、涂层脱落或结构变形。与金属边框相比，复合边框属于非金属高分子复合材料体系，不存在异种金属接触引发的电化学腐蚀风险，因此在海上光伏、沿海滩涂、盐碱地和化工区域等高腐蚀环境中具备更高的长期可靠性。



综上，材料级验证结果表明，复合边框在材料本体强度、涂层附着力、涂层硬度及耐腐蚀性能方面均表现稳定。经过紫外、湿热、酸碱、溶剂和盐雾等多维度测试后，复合边框仍能保持良好的力学性能、表面完整性和环境耐受能力，说明其材料体系具备长期户外服役所需的基础可靠性。

材料级测试验证的是边框材料本身及其表面防护体系的稳定性，而在实际应用中，边框还需要与玻璃、封装材料、电池片和安装系统共同构成完整组件。因此，下一节将进一步从组件端出发，通过机械载荷、环境可靠性、PID及免等电位连接等测试，验证复合边框在实际组件结构中的综合可靠性和系统应用价值。

4.4.2 组件级验证

材料级测试验证的是边框材料本身及其表面防护体系的稳定性，而在实际应用中，边框还需要与玻璃、封装材料、电池片和安装系统共同构成完整组件。因此，组件级验证将进一步关注复合边框装配成完整组件后的协同可靠性。本节将从机械载荷、环境可靠性、PID抑制能力及免等电位连接可行性等方面，评估复合边框在实际组件结构中的综合表现和系统应用价值。

4.4.2.1 机械载荷测试

组件级机械载荷测试包括静态载荷和动态载荷两个方面。对于固定支架安装：静态载荷测试中，组件正面承受6000 Pa压力，背面承受3000 Pa压力，均通过测试要求；动态载荷测试进行10000+次不同梯度载荷的循环加载测试，模拟实际使用中的风载、雪载等动态应力，相比常规恒定加载的动态载荷更严苛。对于跟踪支架安装：在保持应用端安装便捷性的前提下，阿特斯通过特殊设计加强了边框的横向强度，使得安装方式与常规铝边框可保持一致，提升安装效率，组件正、背面均可承受高达3000Pa静态压力，以及该压力程度对应的动态载荷测试。

	测试项目	测试条件	标准要求	复合边框表现
静态载荷	固定支架安装	6000/3000 Pa	通过	通过✓
	跟踪支架安装	±3000Pa	通过	通过✓
耐碱测试	固定支架安装	10000+次循环	通过	通过✓
	跟踪支架安装		通过	通过✓
老化载荷	跟踪支架安装	HF30+静态载荷±2800 Pa	通过	通过✓
		HF30+动态载荷（10000+次循环）	通过	通过✓

测试结果显示，复合边框组件顺利通过静态载荷、动态载荷及老化后载荷测试，未出现裂纹、变形等结构性问题。其中，“老化+动态载荷”组合验证进一步模拟了组件在长期服役后仍需承受风载循环的实际工况，有助于更全面评估复合边框在复杂安装场景和长期运行条件下的结构稳定性与可靠性。

4.4.2.2 环境可靠性测试

环境可靠性测试涵盖热循环、湿冻和湿热三大类测试项目。热循环测试在-40℃至85℃温度范围内进行400次循环，验证组件在温度剧变环境下的稳定性。湿冻测试在相同温度范围内，配合85%相对湿度进行30次循环。湿热测试在85℃/85%RH条件下持续3000小时。

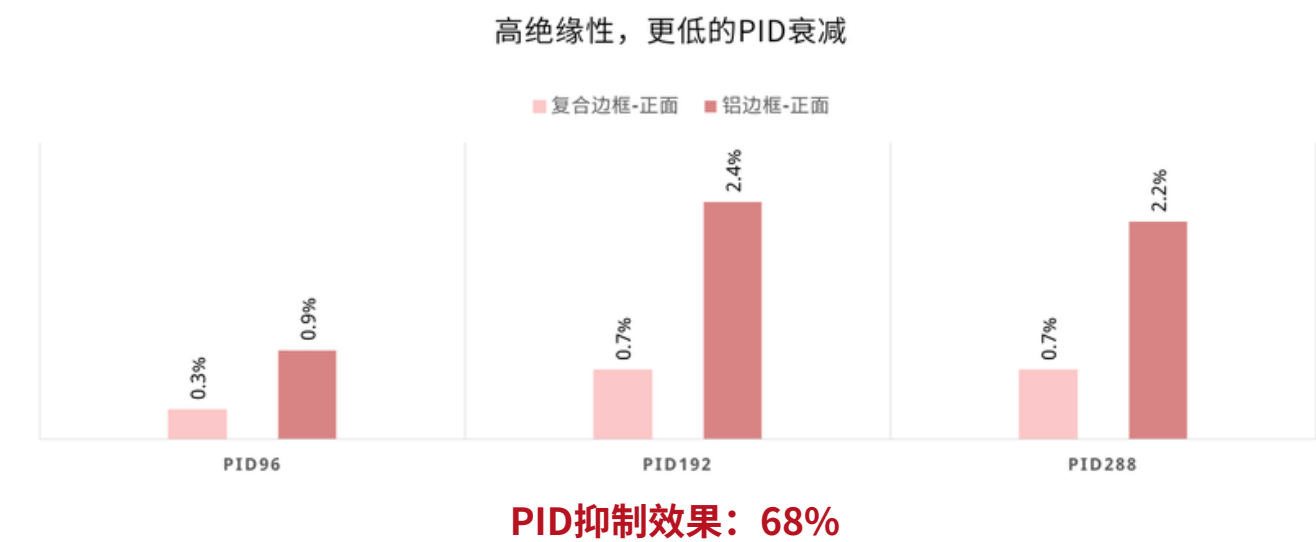
测试项目	测试条件	标准要求	复合边框表现
热循环	-40~85℃, 400次	通过	通过✓
湿冻	-40~85℃, 30次	通过	通过✓
湿热	85℃/85%RH, 3000h	通过	通过✓

所有测试项目均通过国际标准要求，部分性能指标超过标准2-3倍，充分验证了复合边框组件在高湿热、温度循环、机械载荷等严苛条件下的可靠性和耐久性。这些验证结果证明复合边框可提升组件在复杂环境中的边框可靠性。

4.4.2.3 PID测试

测试结果对比（PID288）

传统铝边框组件：功率衰减2.2%，衰减速率持续增加，恢复能力部分可恢复。
复合边框组件：功率衰减0.7%，衰减速率极低且趋于稳定，恢复能力优异。



这一显著改善得益于复合边框的高体积电阻率（ $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 级），从根本上切断了钠离子迁移的导电路径。测试结果表明，复合边框组件在严苛的PID测试条件下表现出卓越的抗衰减性能，功率衰减仅为传统铝边框组件的约三分之一。这使得复合边框更加适用于高温、高湿及高系统电压的大型地面电站与水面光伏项目。在沿海滩涂、水塘湖泊、多雾山区等高PID风险环境中，组件依然能够保持长期、稳定的功率输出，显著降低电站首年及全生命周期的衰减风险，为您带来更高的发电收益与可靠性保障。

4.5 产品质保

目前，阿特斯高性能复合边框组件全系列提供12年产品质保和30年功率质保，为客户在长期户外运行、复杂环境应用及全生命周期收益评估中提供持续可靠的保障。

4.6 产品价值

4.6.1 更低的系统初始投资成本（OPEX）和度电成本（LCOE）

传统铝合金边框（如6063-T5）体积电阻率仅约 $3 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{cm}$ ，属良导体，在运行中可能因绝缘失效、漏电流或雷击形成对地电位差，威胁人身与设备安全。依据DL/T 1364—2014《光伏发电站防雷技术规程》等规范，铝边框组件的金属框架必须逐块进行等电位连接并接入保护接地系统，这不仅增加了接地铜排、跨接线、防松垫片等BOS物料与施工工时，也带来长期巡检、紧固和防腐维护的持续OPEX支出。

5.3 防雷击电磁脉冲

5.3.1 等电位连接

5.3.1.1 光伏方阵等电位连接：

- a) 每排光伏方阵组件金属框架应相互电气连通，组件金属框架或夹件应与金属支架可靠连接，连接点过渡电阻值不应超过 0.03Ω ；
- b) 每排光伏金属支架应至少两端接地；
- c) 屋面光伏方阵组件金属框架应就近与屋面避雷带连接。

相较之下，高性能玻纤增强聚氨酯（GFRP）复合边框体积电阻率可达 $2\times 10^{15}\Omega\cdot\text{cm}$ 量级，较铝合金高约23个数量级，属电工级绝缘材料。根据《GB 47739-2026 光伏组件安全要求》标准，复合边框（如聚合物/玻纤复合材料边框）光伏组件在等电位连接连续性试验项目下被明确标注为“不适用”。也就是说，采用绝缘非金属材料边框的光伏组件无需进行等电位连接连续性试验。

这一差异带来了明确的系统级价值：通过取消组件层级接地需求，复合边框组件可简化电气设计，减少接地材料和安装人工，并降低长期巡检与维护工作量。这些节约可直接转化为更低的初始投资成本（CAPEX）、更低的运维成本（OPEX）以及更优的项目度电成本（LCOE）。

以100MW中国地面光伏电站为例（约16.1万块组件、年发电量1.5亿kWh、基准LCOE 0.30元/kWh）进行模拟测算，免等电位方案可一次性节约CAPEX约300万元、降低年度OPEX约40万元，25年总节约现值约863.8万元，对应LCOE降低约1.0%~1.7%（典型值1.36%）。

项目	单位	数值	说明
CAPEX节约	万元	300.0	接地材料+人工
年OPEX节约	万元/年	40.0	等电位连接维护
25年OPEX节约现值	万元	563.8	/
总节约现值	万元	863.8	/
25年发电量现值	亿kWh	21.14	年发电量1.5亿kWh，25年折现：1.5亿 × 14.094
LCOE降低	元/kWh	0.0041	863.8万元 / 21.14亿kWh ≈ 0.00409元/kWh
基准LCOE	元/kWh	0.30	行业典型值
LCOE降低比例	%	1.36%	0.00409 / 0.30 ≈ 1.36%

4.6.2 更低的碳税成本

随着欧盟碳边境调节机制（CBAM）、产品碳足迹披露、绿色采购及低碳供应链评价体系逐步推进，光伏组件的制造端碳排放正逐渐从环境指标转化为可量化的经济成本。对于面向欧洲、日本、澳洲等高低碳合规要求市场的光伏项目而言，组件碳足迹越低，未来在碳税、碳配额、绿色招投标和项目融资中的不确定性越低。

复合边框的低碳价值主要来自材料体系和制造工艺两方面。相比传统铝边框，复合边框减少了高能耗电解铝及挤压、阳极氧化等工艺环节的依赖，其边框材料碳足迹约为铝边框的15%–20%。在组件层面，复合边框组件较铝边框组件可降低约50 kgCO₂e/kWp的制造端碳排放。当碳价格或碳税机制被纳入项目成本测算时，该减排量可直接转化为潜在碳成本节约。

原料	铝边框	复合边框
电池片	68.37%	76.44%
玻璃	10.40%	11.63%
铝边框	13.93%	3.79%
EVA/POE	2.2%	2.47%
其他	5.08%	5.68%

组件各材料对产品碳排放的贡献（%）

区域	碳税 (元/吨)	铝合金边框组件 (元/W)	复合边框组件 (元/W)	复合边框替代铝合金后碳税节省 (元/W)
欧洲	600	0.3	0.27	0.03
美国	385	0.19	0.17	0.02
中国	70	0.04	0.03	0.01

铝合金边框组件 Vs 复合边框组件碳税比较

**以阿特斯TOPBiHiKu7系列66片210组件，铝边框组件37.8kg，复合边框组件38.5kg（铝边框重量2.8kg/套，复合边框重量3.5kg/套）*

以100MW大型地面电站为例，采用复合边框组件可在制造端减少约5,000t CO₂碳排放。若按照不同区域未来可能适用的碳价格进行折算，项目可获得相应的碳成本节约空间，以组件出口欧洲为例，按照碳税节约0.03元/W，100MW组件进口时可以节约300万元。

该价值不仅体现在直接碳税成本降低，也体现在更低的产品碳足迹、更高的绿色采购竞争力以及更好的ESG评价表现，从而提升项目在国际市场中的综合竞争力。

第五章实证验证

实证1：银川实证基地

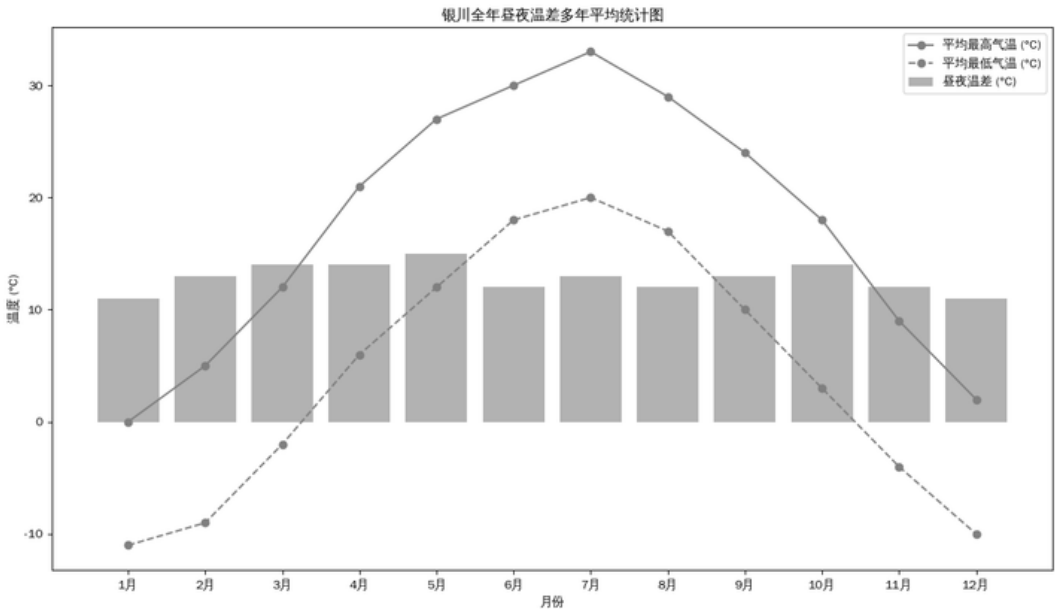
实证地点：银川强光照实证基地。该基地属典型中温带大陆性气候，风大沙多，年日照时间约3000h，年总辐射量约8400MJ/m²。

环境条件：银川地区昼夜温差超过55℃（约-20℃至35℃），紫外辐照强，可用于验证复合边框组件在强光照、风沙和温度循环环境下的耐候稳定性。

组件类型：复合边框组件

运行周期和监测项目：2023.11–2024.10，监测发电量、外观状态和结构可靠性。

测试：外观保持完好；实证前后均通过5400/2400Pa常规载荷和6000/3000Pa极限载荷测试；边框材料拉伸强度和弯曲强度基本保持稳定。



实证2：山东烟台海上项目—首个海上漂浮式实证平台项目

实证地点：山东烟台—首个海上浮式平台

环境条件：山东烟台近海海域，离岸约7 km。

- 高盐雾、高湿度、强腐蚀，易加速金属腐蚀。
- 海风、风浪和漂浮平台动态载荷，对边框强度和连接可靠性要求更高。

组件类型：复合边框组件

运行周期和监测项目：实证周期为2023.3–2023.11，持续监测系统发电量，外观状态和结构可靠性。

测试：复合边框组件外观和结构保持完好；



结束语

面向光伏行业高可靠、低碳化与全生命周期价值竞争的新阶段，高性能复合边框不仅是对传统铝边框的材料替代，更是组件结构设计理念的一次系统升级。通过高绝缘、低热膨胀、本征抗腐蚀和高强度等材料优势，复合边框从失效机理源头提升组件可靠性，降低玻璃破损、PID衰减、腐蚀失效和接地维护等长期风险。

从技术验证、实证运行到经济测算结果来看，复合边框组件在严苛环境适应性、长期发电稳定性和系统降本方面均展现出明确价值。其在降低LCOE、减少运维成本、提升项目收益确定性的同时，也为光伏产品满足全球ESG、碳足迹与绿色供应链要求提供了更具前瞻性的解决路径。

未来，随着光伏应用场景持续向海上、高盐雾、极寒、高湿热及大型地面电站等复杂环境延伸，组件边框将不再只是结构支撑件，而将成为决定系统可靠性、经济性与可持续竞争力的关键技术环节。阿特斯高性能复合边框组件将持续以材料创新驱动产品升级，为全球客户提供更可靠、更经济、更低碳的清洁能源解决方案。

阿特斯高性能复合边框组件技术白皮书
2026年7月版

阿特斯阳光电力集团股份有限公司
地址：江苏省苏州市高新区鹿山路199号
网站：<https://cn.csisolar.com/>



官方微信公众号