BC 光伏组件封装技术与长期可靠性研究

薛 超 武 健 糜宇亮 刘学祥 杨可凡
江苏辉伦太阳能科技有限公司国机新能源研究院，江苏 南京 210061

[摘要]背接触（BC)电池将正负金属电极全部放置在背面，消除了正面栅线的遮挡，量产组件的效率已经达到了 25%以上的水平。但是背面密集的 P/N 交错区、单面焊接带来的非对称热应力、背面绝缘和金属化长时间处于湿热气场中，使得封装环节成了 BC 技术由电池效率优势转为组件长期可靠性的主要障碍。文章主要针对 BC 组件封装结构及工艺的特殊性，对单面焊接翘曲、背面绝缘胶老化、焊带应力和隐裂等主要工程问题进行梳理，分析湿热、电势诱导衰减、热斑和机械载荷下失效的途径，指出目前 IEC 基础标准对于 BC 特有的失效模式覆盖不够，从焊接结构、绝缘材料、阻水封装和加严检测四个方面提出可以实施的改进措施。

[关键词]背接触电池；组件封装；单面焊接；绝缘胶
DOI：10.33142/hst.v9i9.20639 中图分类号：TM31 文献标识码：A

Research on BC Photovoltaic Module Packaging Technology and Long-term Reliability

XUE Chao, WU Jian, MI Yuliang, LIU Xuexiang, YANG Kefan
State Machinery New Energy Research Institute of Jiangsu Huilun Solar Energy Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu, 210061, China

Abstract: Back contact (BC) batteries place all positive and negative metal electrodes on the back, eliminating the obstruction of the front grid lines. The efficiency of mass-produced components has reached a level of over 25%. However, the dense P/N staggered area on the back, asymmetric thermal stress caused by single-sided welding, and long-term exposure of the back insulation and metallization to a humid and hot gas field have made the packaging process the main obstacle for BC technology to shift from battery efficiency advantages to long-term reliability of components. The article mainly focuses on the special characteristics of BC component packaging structure and process, and summarizes the main engineering problems such as single-sided welding warpage, aging of backside insulation adhesive, solder stress and hidden cracks. It analyzes the failure pathways under damp heat, potential induced attenuation, hot spot and mechanical load, and points out that the current IEC basic standards do not cover the unique failure modes of BC enough. Improvement measures that can be implemented are proposed from four aspects: welding structure, insulation material, waterproof packaging and stricter testing.

Keywords: back contact battery; component encapsulation; single sided welding; insulating adhesive

引言

BC 电池正面没有金属栅线，组件外观和受光面积具有天然的优势，2026 年量产的组件效率达到 25%～25.2%。但是电池到组件（CTM）比率并没有同步领先，BC 正面省去的焊带遮挡收益，部分被背面互连电阻和封装耦合增益的缺失所抵消，CTM 比率反而比 TOPCon 低一些。更重要的是，BC 封装天生就存在结构上的矛盾，单面焊接在温变中会产生明显的翘曲，层压时胶膜局部受压变薄，破片风险成倍增大，背面正负极间距很小，绝缘胶一旦在湿热中老化或者粘结衰减，短路失效直接威胁到组件的安全。BC 组件在单玻湿热环境中由于结构上避免了正面栅线腐蚀，因此具有一定的优势，但是背面金属化腐蚀和 PID 风险并没有消失，只是转移到了背面。封装技术能不能在量产过程中控制住翘曲、绝缘和阻水，决定着 BC 电池效率优势能不能在 25 年的使用周期内转化为发电量的优势。

1 BC 电池的结构特征与封装约束

BC 电池的正极和负极金属接触都在硅片背面，前表面全部钝化，没有栅线遮挡。电流收集依靠背面焊带和 PAD 点相连，背面 P 区和 N 区交错分布。该结构决定 BC 封装不能采用双面焊接组件的应力平衡方式和绝缘布局，其与双面焊接结构在封装层面的主要不同如表 1 所示。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

表 1 BC 与双面焊接结构在封装层面的主要差异

对比项	BC（全背面电极、单面焊接）	双面焊接参照（TOPCon/HJT 典型结构）	对封装的含义
焊接应力	焊带与硅片热失配无法通过正面焊接应力对称抵消，温变中产生朝向背面的弯矩	正、背面焊接应力可部分对称抵消	BC 翘曲控制只能从焊带形态、焊接方式和互连工艺入手
翘曲量级	0.13mm 厚电池片单面焊接 21 根焊带时，110℃降至 22℃翘曲可达 4.9mm；增厚至 0.18mm 仅下降约 18%	同等仿真条件下翘曲最大约 0.07mm	增厚硅片不是可行解，需依靠打拱焊带、0BB、覆膜压接等结构措施
层压破片风险	非对称翘曲使胶膜局部受压减薄甚至被穿刺，单面焊接组件破片率比双面焊接高数倍	翘曲小，胶膜受压相对均匀	BC 层压不能直接沿用 TOPCon 工艺参数模板，需围绕焊带构型和胶膜流动性重新匹配
背面绝缘	正负极均位于背面且 P/N 交错，焊带跨越相反极性区域时必须依靠绝缘胶隔离	正面栅线不涉及背面相反极性密集隔离	绝缘胶是功能层，局部脱粘、开裂或刺穿即可构成短路通道
湿热失效路径	正面栅线腐蚀通道被消除，但背面金属化、绝缘胶界面和焊带连接点成为新的水汽侵入路径	正面栅线在湿热中存在电化学腐蚀通道	BC 湿热失效更隐蔽，早期外观和 EL 图像可能无明显异常，需关注背面绝缘电阻和接触电阻
检测重点	除功率衰减外，应关注背面绝缘电阻、绝缘胶粘结强度、焊带和 PAD 点区域 EL 隐裂密度	常规 EL 和功率测试对正面栅线腐蚀、隐裂较易发现	BC 量产监控应提高背面绝缘耐压抽检频率和焊带区域 EL 检出灵敏度

2 BC 光伏组件封装技术

2.1 焊接与互连结构

BC 组件的焊接方式直接影响到它的翘曲量级。有限元仿真结果表明，0.13mm 厚度的 BC 电池片单面焊接 21 根焊带时，从 110℃ 降到 22℃ 的过程中翘曲可以达到 4.9mm；即使把电池厚度增加到 0.18mm，翘曲值也只下降 18%左右，双面焊接构型下翘曲最大也只有 0.07mm。增加硅片厚度不是可行的方案，只能从焊带形状和互连工艺方面入手[1]。打拱焊带是在焊接前将焊带弯曲成拱形结构，利用拱形结构部分抵消热应力，但是拱高达到 0.35mm（接近常规胶膜厚度极限）的时候翘曲仍然达到 2.2mm，并且预拱工序增加了工艺时间，层压过程中胶膜侧向推力增大，PAD 点虚焊的风险也随之增大。0BB 路线取消了电池片表面主栅，只用超细焊带收集电流，从结构上减少了焊带与硅片的接触面积和遮光损失，但是焊带应力问题并没有自动消失，反而由于焊丝更细、接触点更集中而对覆膜工艺提出了更高的要求。直接覆膜（IFC）用低温一次压接完成焊带和电池片的准确连接，TPO 皮肤膜由于具有低模量、高柔性的特点可以吸收外界应力，为薄片化条件下隐裂的抑制提供了一种可以量产的工艺途径。

2.2 绝缘与背面保护

BC 电池背面的绝缘胶不是辅助材料，而是决定组件是否发生短路失效的功能层。焊带和相反极性的细栅线之间完全依靠绝缘胶的覆盖完整性和长期粘结稳定性[2]。环氧树脂类绝缘胶在焊接高温下容易软化变形，固化收缩率大，会造成印刷后电池翘曲，也会在焊带刺穿或者老化开裂的时候形成漏电通道。有机硅绝缘胶对耐焊带刺穿和湿热粘结保持有较好的适应性，但是 UV 固化胶在 BC 背面凹凸表面上普遍存在填充不充分、剥离强度低的问题，胶层与界面分离就构成了局部短路的隐患。2025 年 T/CPIA0111-2025 光伏组件用双组分热固化绝缘胶的标准出台之后，将 BC 绝缘胶纳入到标准化体系中，但是标准中只给出了准入门槛，湿热 1000 小时后粘结强度衰减不超过 20%，氟化改性环氧体系衰减约 15%等数据，反映出目前材料体系之间还存在着较大的老化性能差距。

2.3 层压工艺与应力控制

层压是 BC 封装中翘曲从电池片级放大到组件级破片风险的环节。单面焊接产生的非对称翘曲造成电池片边缘和中心区域对胶膜产生不均匀挤压，胶膜在局部减薄甚至被穿刺，应力集中点就是 EL 隐裂和破片的开始。层压工艺的调节空间很小，升温速率、压力曲线可以大致对应胶膜的流动行为，但是不能改变焊带和硅片体系的热应力方向。0BB 配合皮肤膜方案中“零偏移控制”“微米级填缝”，本质上就是在层压阶段用低流动性胶膜来限制焊丝位移、填充细焊丝边缘空隙，用工艺窗口的收窄来换取互连结构的稳定。因此 BC 层压不能使用 TOPCon 的工艺参数模板，而应该根据焊带构型、胶膜流动性来建立匹配关系。

2.4 封装材料体系

BC 组件背面有金属化栅线、绝缘胶层和焊带，封装胶膜的功能由原来的粘接和透光变为阻水、抑酸、离子捕获和绝缘协同。常规 EVA 在水汽作用下水解生成醋酸，醋酸迁移到背面的金属化区，加快了接触腐蚀的过程。对于 BC 来说，腐蚀后果比正面栅线更加敏感，因为正负电极间距小、绝缘胶界面多。高阻水膜依靠抗水解树脂体系和离子捕获填料来降低水汽渗透以及可迁移离子的浓度，在 DH2000 序列中可以将 PID 和金属化腐蚀风险控制在较

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

低水平。UVB 截止膜主要针对背面钝化层和绝缘胶的光老化途径，减小短波紫外对有机界面和钝化结构的破坏。材料选择的关键并不在于单项指标的好坏，而在于阻水、抑酸和绝缘胶耐老化三者之间的匹配，高阻水胶膜如果和绝缘胶的固化体系或者界面粘结不相容，那么阻水的收益就会被绝缘层局部脱粘所抵消。

3 BC 组件长期可靠性失效模式

3.1 机械失效：翘曲、隐裂与破片

单面焊接翘曲是 BC 机械可靠性之始。温变循环时焊带和硅片之间存在热失配，反复受弯曲应力影响，翘曲电池片在层压及安装后承受的机械载荷作用下，其应力分布更加不均匀。户外实证数据给这条途径提供时间尺度上的参照，在河北地区半年实证中，TBC 组件平均功率衰减为 2.17%，TOPCon 衰减为 0.49%，两者之间差异同两者热循环应力状态不同直接相关。隐裂一旦在层压或者运输过程中产生，就会在之后的热循环中扩展成贯穿性的裂纹，在 EL 图像上表现为沿焊带方向的线性暗区。破片多发生在层压过程中，是由于翘曲造成胶膜局部减薄、应力集中而产生的。

3.2 湿热与电势诱导衰减

BC 的全背面接触结构消除了正面栅线在湿热中形成的电化学腐蚀通道，在户用和工商业场景中给单玻 BC 赋予了结构上的湿热优势，但是背面密集的金属化区、绝缘胶界面以及焊带连接点形成新的水汽侵入途径。水汽到达背面之后，EVA 水解产生的醋酸在电场的作用下向电极界面迁移，造成金属化接触腐蚀，同时可迁移离子在系统电压的作用下向电池表面积累，形成 PID 衰减路径。BC 的湿热失效比 TOPCon 的正面栅线腐蚀更加隐蔽，正面外观和 EL 图像在早期不会出现明显的异常，但是背面绝缘电阻下降或者接触电阻上升已经发生了。这就意味着仅仅依靠正面外观检查以及常规功率测试来判断 BC 在湿热环境下实际的退化情况是不够的。

3.3 热斑与遮挡耐受

BC 电池的效率提高和遮挡耐受之间存在着必须正视的矛盾。在没有特殊结构设计的前提下，BC 电池效率越高，遮挡耐受能力就越低，高效 BC 电池通过绝缘层或者增大间距来更严格地隔离正负电极，从而限制了遮挡条件下电流的旁路绕行能力，局部遮挡时被遮挡电池片的反向偏置电压升高，热斑温度随之上升。量产层面的抗阴影设计可以将热斑温升控制在明显低于常规组件的水平，但是这些措施的有效性依靠电池片级的结构设计和组件级的电路配置，不是封装环节单独可以解决的。封装角度的贡献是，层压结构、背面材料的导热路径影响热斑条件下热量的扩散，背板或者背面胶膜的耐温等级以及导热性会一定程度上决定局部高温是否会引起封装材料的退化或者焊点失效。

3.4 绝缘胶老化与短路失效

绝缘胶的长期可靠性属于 BC 组件与其他技术路线不同的失效维度。短路失效的触发并不需要绝缘层全部崩溃，只要焊带边缘、PAD 点附近或者胶层和硅片界面出现局部脱粘、开裂或者刺穿。湿热老化使胶层粘结强度下降，焊带在热循环中出现微位移，再叠加胶层受力，造成局部缺陷的产生。一旦短路通道形成，组件的功率损失就会表现为突然下降，并且很难找到故障点，因为早期时外观以及红外图像上没有明显的特征。目前绝缘胶的选型验证大多依靠 DH1000 粘结强度衰减指标，但是实际失效却多发生在焊带、胶层和硅片三者之间的界面耦合处，单靠一个材料指标很难完全预测出组件级绝缘寿命。

4 封装可靠性的优化与改进方向

4.1 焊接结构与工艺优化

减少翘曲的方向不是消除焊带应力，而是使焊带应力在组件结构中得到对称或者可控地释放。双面焊接在 BC 上受到背面电极布局的限制，但是局部对称的焊带布置、背面应力补偿层的加入以及焊带截面形状的改善，能减小单面构型下净弯矩[3]。0BB 和 IFC 的组合把焊带从焊接连接变成了覆膜压接，用低温工艺降低热应力输入，TPO 皮肤膜的柔性缓冲层吸收一部分机械应力，是目前和薄片化趋势相适应的量产路线。在设备端，新型焊带整形工艺以及低能耗焊接方式，目的是在不提高破片率的情况下把翘曲控制在层压可接受范围之内。需要注意的是，这些措施的目的并不是把翘曲降为零，而是把翘曲及其产生的应力控制在胶膜和绝缘层可以长期承受的范围内。

4.2 绝缘材料与界面工程

绝缘胶的改进要同时解决施工窗口和长期界面稳定这两个问题。施工方面，UV 固化胶在 BC 背面凹凸表面的填充不充分问题，说明热固化或者双组分体系对于复杂形貌的适应性更好；快速热固化绝缘胶已经在量产节拍中具有可行性，但是 UV 固化体系还需要在树脂配方和光照条件下进行进一步的匹配。长期稳定性上，氟化改性环氧和有机硅体系在 DH1000 之后粘结衰减的不同说明树脂基体的耐水解性以及界面偶联方式要比初始粘结强度更为主导[4]。界面工程还要考虑绝缘胶和封装胶膜之间的相容性，胶膜中助剂迁移会干扰绝缘胶的固化程度或者界面粘结，反之亦然。绝缘胶的验证应该由原来的单个材料测

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.

试，变为绝缘胶、焊带、硅片、胶膜组合的序列老化测试。

4.3 封装材料匹配与阻水设计

BC 组件的阻水设计不能只停留在提高胶膜阻水率这一单一角度上。水汽到达背面金属化、绝缘界面的途径有胶膜本体渗透、边框密封失效、背板边缘侵入，任何一个环节的短板都会降低高阻水膜的实际效果。高阻水胶膜的价值在于延缓 EVA 水解、醋酸生成，但是如果绝缘胶本身的耐水解性不够，水汽还会在胶层界面局部富集，因此封装材料匹配的关键就是使胶膜的阻水速率、抑酸能力以及绝缘胶的耐水解等级形成梯度匹配，而不是追求单一最优。UVB 截止膜在该体系中起到抑制背面有机界面、钝化层光老化的功能，它同高阻水膜的叠层顺序以及光学匹配要在组件 BOM 设计阶段一起决定。

4.4 可靠性测试与检测方法

IEC61215、IEC61730 基础序列包括热循环、湿热、机械载荷等常规应力，但是 BC 特有的失效模式，即单面焊接翘曲引起的层压破片、绝缘胶界面脱粘造成的局部短路、背面金属化在醋酸环境中接触腐蚀等，在基础序列的针对性检测中没有被包含。加严测试的方向已经形成，PID2 倍加严、热循环加严、高温环境加严测试开始在 BC 产品的认证中使用，KiwaPVEL 的 PQP 加严序列也将 BC 产品扩展到评价中。更具有价值的是检测参数的选择，除了功率衰减之外，应该把背面绝缘电阻、绝缘胶粘结强度、EL 图像中焊带区域的隐裂密度加入到序列测试的判定指标当中。对于量产监控，在线 EL 对焊带和 PAD 点区域的检出灵敏度以及抽样进行背面绝缘耐压测试的频率，都是比最终组件功率测试更早发现绝缘胶工艺波动的指标。

5 结束语

BC 组件封装的核心矛盾不是效率，而是结构：单面焊接的非对称应力、背面高密度电极的绝缘隔离要求、金属化区域在湿热中长期稳定的可靠性问题，都构成了与 TOPCon 和 HJT 不同的可靠性问题集合。现有的量产实践已经证明了 0BB 配合覆膜工艺、低模量皮肤膜、高阻水胶膜和热固化绝缘胶的组合在工程上可以应对这些约束，但是材料之间、工艺参数和结构设计之间的匹配关系仍然以经验调校为主，系统的失效机理认识和加速测试方法还不充分。BC 封装的可靠性提高，并不是依靠添加更多的新材料来实现，而是要把翘曲控制、绝缘界面稳定性和阻水抑酸作为一个耦合系统进行设计和验证，保证电池效率的优势在组件整个生命周期内不被封装损耗和退化路径所侵蚀。

[参考文献]

[1]黄琪伟,谭小春,夏正月,等.背接触光伏组件用有机硅绝缘胶的研究与应用[J].太阳能,2024(10):77-84.
[2]左燕,周西勇,王锐,等.背接触电池组件封装损失研究[J].中国新技术新产品,2024(5):89-92.
[3]杨增英,郭强强,赵邦桂,等.背接触电池锡膏印刷工艺优化及焊接性能提升研究[J].材料导报,2024,38(2):338-341.
[4]叶安城,李伟京,石洪涛,等.高效光伏电池封装材料与0BB 封装技术研究进展[J].中国胶粘剂,2026,35(9):1-9.

作者简介：薛超（1988—），男，汉族，江苏南京人，中级工程师，大学本科，毕业于解放军理工大学通信工程专业，研究方向/现从事工作为光伏组件新产品开发与技术管理工作，主要涉及高效组件封装工艺、材料验证及可靠性评价。

Copyright © 2026 by authors and Viser Technology Pte. Ltd.