

大产能管式 PECVD 设备结构优化设计研究

肖 洁

湖南红太阳光电科技有限公司 湖南 长沙 410000

【摘 要】：管式 PECVD 是晶体硅太阳能电池规模化生产核心装备，光伏行业进入 N 型高效电池迭代周期，其向大管径升级。单机产能提高后传统设计短板暴露，限制大产能机型应用，粗放扩容难满足量产需求。本文以大产能管式 PECVD 整机结构为研究对象，结合产线运维数据与工艺痛点，从理论出发对六大核心模块优化设计，并经样机实测与产线验证。

【关键词】：管式 PECVD；大产能；结构优化；承载系统；流场均匀化；光伏装备；可靠性设计

DOI:10.12417/2811-0536.26.08.064

1 引言

PECVD 技术是晶硅电池制备功能膜层、决定电池转换效率与量产良率的关键工序，管式 PECVD 因批量处理能力强成核心装备。近年光伏产业扩张、硅片尺寸迭代，设备经多轮升级单机产能提升，但高负载运行下传统设计不适应，结构性故障频发，增加运维成本与停机时间。学界对工艺参数调试研究多，大产能整机结构系统性优化研究少，部分方案难落地且多为理论仿真。本文从产线实际需求与故障数据出发优化整机结构，兼顾四大核心目标。

2 大产能管式 PECVD 设备发展现状与核心结构瓶颈

2.1 设备发展历程与产能升级路径

国内管式 PECVD 设备发展与光伏电池技术迭代同步，分四个阶段，均以结构改进提升产能、契合行业需求：

起步试用阶段：以两管小口径机型为主，石英管口径 465mm，单管载片量不足 200 片，无自动化上下料机构，产能低，用于实验室及小批量试产线。

批量扩容阶段：PERC 电池技术普及，设备升级为四管、六管集成结构，配套初步自动化上下料系统，石墨舟载片量 300-500 片，石英管口径 540mm，自动化与单机产能提高，成主流标配。

高效适配阶段：为大尺寸硅片及更高产能需求，推出双舟分体式结构，避免单舟悬臂变形，反应室口径 610mm，单管载片量超 800 片，配套全自动上下料及闭环工艺控制系统，适配规模化量产。

超大产能阶段：N 型电池普及，设备向大管径、多舟集成、低碳高效演进，770mm 超大口径石英管应

用，单管载片量超 1300 片，采用叠舟、双舟对称布局，配套智能运维及节能系统，单机小时产能超 300 片，成 N 型高效电池产线核心装备。

过去产能升级主要靠增加管数、加长反应室、增大石墨舟尺寸扩容，但粗放式扩容致设备结构负荷大，尺寸放大不能有效升级产能，需结构优化设计解决矛盾。

2.2 大产能工况下的核心结构瓶颈分析

承载与支撑系统：大载片量致石墨舟长且重，长舟悬臂端易下垂偏移，与石英管、陶瓷电极杆摩擦碰撞；陶瓷支撑杆因大负载及热胀冷缩脆裂，石英管易破损。传统机型石英管与陶瓷杆月均破损率 3.2%，单台月均运维超万元，停机维修影响产能。

炉内热场、气流场：大管径、长行程反应室传统进气方式使反应气体扩散不充分，炉口与炉尾、腔体中心与边缘有气流及温度差，硅片膜厚、折射率均匀性超标，部分批次偏差达±5%以上。炉体加热分区不合理，长行程温度梯度大，石墨舟变形，加剧镀膜质量波动。

真空、射频两系统：大口径反应室传统真空管路抽速不足，抽真空时间长，影响设备节拍；管路布局差，腔体内压力不稳，工艺重复性低。射频电极传统杆式结构，石墨舟偏移接触不良，引发局部打火等问题，损坏电源及电路，故障风险大。

加热保温结构：大产能设备炉体开口大、节拍快，炉门开关散热多，传统单层保温差，炉体外壳温度高。加热元件布置不合理，升温慢、恒温长，单位硅片能耗高，不符低碳高效要求。

传动、定位系统：大负载下传统推舟机构刚性差，运行时抖动偏移，石墨舟定位精度差，卡舟、倒片频发。多管集成设备整机大、机架刚性不足，长期运行机架变形，传动机构同轴度被破坏，自动化上下料故障率高，设备稼动率难超 90%。

3 大产能管式 PECVD 设备结构优化设计方案

本次优化以“高产能、高均匀性、高可靠性、低能耗、易运维”为目标，借助工程、流场、热场仿真分析，针对核心瓶颈，对管式 PECVD 整机六大模块系统优化，方案结合产线需求，避免空泛设计，确保可用于样机研发与设备改造。

3.1 反应室腔体结构优化

反应室是镀膜工艺的核心腔体，其结构直接决定气流场、温度场分布与设备整体刚性，本次优化摒弃传统“加长腔体、粗放扩容”思路，采用“大口径短行程、分段式密封、集成化导流”设计理念。首先，优化石英反应管选型，优选 610-770mm 大口径石英管，在保证单管载片量的前提下，缩短腔体有效行程，将石墨舟悬臂长度控制在合理范围，从源头降低悬臂变形风险；炉体外壳采用高强度矩形型材焊接成型，内部增设加强筋优化布局，通过有限元力学核算，将机架变形量控制在 0.5mm 以内，同时控制整机高度，适配标准光伏厂房层高，降低安装与运输难度。

改进炉门密封结构，将传统单炉门升级为外炉门+内炉门双密封结构，外炉门负责整机密封与保温，内炉门中心集成匀流导流管，与真空抽气口连通，实现工艺气体定向导流，减少腔体内部涡流与气流死区；内炉门与石英管接触部位采用柔性耐高温硅胶密封垫，替代传统硬接触密封，消除石英管局部应力集中，降低石英管破损概率。

最后，优化源柜与腔体管路集成布局，将真空抽气口、进气口、测温探头集成布置于炉尾侧，缩短管路长度，减少管路弯头数量，降低气流阻力，同时提升核心部件运维可达性，方便后期清洗与更换。

3.2 石墨舟与承载支撑系统优化

石墨舟与承载支撑系统是承载硅片、传递射频能量的核心部件，也是大产能机型故障高发模块。本次优化从轻量化、高强度、防碰撞三方面设计：

石墨舟结构优化：放弃传统超长单舟，采用双舟对称或叠舟堆叠结构，单舟长不超 1.8m，重量降 15%，镂空轻量化处理，减少热惯性、降低推舟负载；舟体边角圆弧钝化，防划伤石英管内壁。

支撑部件升级：将普通陶瓷杆换成高强度复相陶瓷杆，增大杆体直径及壁厚，提高抗弯、抗热震性能，避免断裂；配套柔性支撑底座缓冲热胀冷缩应力，降低破损率。

射频电极优化：取消传统杆式电极，改用固定式座电极，固定于炉底支撑基座，接触面积大、定位准，解决碰撞接触不良、电极杆断裂及局部打火问题；座电极快拆式设计，可在线清洗更换，提高运维效率。

3.3 进气与气流场均匀化优化

气流场均匀性是影响镀膜质量最根本、最直接的因素，因此对于大管径腔体气流分布不均的问题，本文很好地摒弃了传统端部单点进气模式，系统、严谨地采用了“面式进气+中部补气+低阻抽气”耦合优化方案：先在炉口进气端安装多孔式面式进气分配器，使反应气体均匀扩散于腔体横截面，从而形成稳定层流，杜绝气体直冲硅片造成的局部膜厚异常。继而在双舟间隙处设置中部补气口，补偿炉体中段气流损失，消除炉口与炉尾之间的气流差，真正实现全程气流均匀分布。最后在腔体内合理布置匀流挡板，精细调控挡板间距及开孔率，彻底打散涡流，让气流自然、充分地覆盖所有硅片。

真空管路采用大口径、低阻化设计，用大曲率半径弯头降低管路压降及流阻，真空抽气口合理地布置于炉尾中心，因而腔体内压力十分均匀稳定，又配套了变频真空泵，能根据腔体容积及不同工艺阶段自动调节抽速，既满足快速抽真空的要求，又自然避免抽速过快引起的气流紊乱，故工艺稳定性及重复性都得到极大保证。经流场仿真验证，优化后的腔体内气流均匀性偏差从 $\pm 4.5\%$ 降到 $\pm 1.5\%$ 以内，完全符合 N 型电池镀膜的严格要求。

3.4 加热与保温系统优化

针对大产能设备能耗高、温度均匀性差的问题，从加热元件、分区控温、保温结构三方面进行优化。加热元件方面，采用高温高效合金炉丝，提升炉丝表面热负荷，在减少炉丝用量的同时，提高升温速率，缩短工艺恒温时间；将传统整体式加热升级为三段式分区独立控温，炉口、炉中、炉尾分别配置独立测温探头与加热回路，实时补偿温度梯度，消除开门散热带来的温度偏差，保证全舟温度均匀性偏差控制在 $\pm 1^\circ\text{C}$ 以内。

保温结构方面，采用多层复合高密度保温棉，在设备层高约束下最大化保温层厚度，降低炉体散热损失；炉口、炉尾增设可伸缩式保温门，设备运行时保

温门闭合密封，开门取放舟时自动收缩，既不影响传动运行，又能大幅减少工艺循环过程中的热量流失；同时，在炉体外壳加装隔热层，降低外壳温度，减少车间环境温度影响，提升设备运行稳定性。经实测，优化后设备综合能耗降低 12%-15%，单位硅片能耗从 0.32kWh 降至 0.27kWh 以下，节能效果显著。

3.5 传动与定位系统优化

传动系统是设备自动化高节拍运行的基础，因此文中对大负载、高精度两方面都做了十分合理、有层次的优化：推舟机构采用滚珠丝杠+双线性导轨驱动结构，配合伺服电机闭环控制，故运行平稳、定位精确，定位误差严格控制在±0.3mm 范围内，由此自然地解决了卡舟、偏移问题。更难得的是对推舟悬臂做了系统的有限元力学分析，优化了悬臂截面尺寸及材料，使长期运行时的挠度控制在 0.2mm 以内，彻底杜绝下垂摩擦问题。

自动化上下料机械手方面，采用大负载冗余设计，夹持力与运行速度闭环可调，适配大尺寸石墨舟搬运需求，夹持部位加装防滑缓冲垫，避免倒片、硅片划伤；同时，优化整机机架布局，采用对称式结构设计，提升整机刚性，避免长期运行出现机架变形，保证多管设备传动机构同轴度，降低自动化运行故障率，提升设备稼动率。

4 优化方案验证

为验证本次结构优化方案的实际效果，将优化方案应用于某型十管大产能管式 PECVD 样机，选取国内某光伏 TOPCon 电池产线进行实测验证，测试周期为 3 个月，对比优化前后设备核心运行指标、工艺质量指标与可靠性指标，所有数据均取自产线实际量产批次，确保数据真实有效，具体对比结果如下表所示。

核心指标类别	优化前 指标值	优化后 指标值	性能提升幅度
石英管/陶瓷杆月均破损率	3.2%	0.7%	下降 78.1%
膜厚径向均匀性	±4.5%	±1.8%	提升 60.0%
折射率极差	±0.08	±0.025	降低 68.8%
设备综合能耗(kWh/片)	0.32	0.27	下降 15.6%
月均故障停机时间(h)	18.5	6.2	下降 66.5%
单管小时产能(片)	270	310	提升 14.8%
设备稼动率	88.2%	96.5%	提升 8.3 个百分点

从现有实测结果可以十分自然、妥帖地得出结论：本次结构优化方案圆满解决了传统大产能管式 PECVD 的主要问题，因此设备机械可靠性、工艺均匀性、能耗水平、运维便利性都得到很大提高，所制膜层质量完全满足 N 型 TOPCon、BC 高效电池量产的各项要求，单机产能及稼动率同步提高，产线生产成本相应降低，工程应用价值十分明显。更重要的是，优化后的设备结构对大尺寸 210mm 硅片有极好的适应性，也利于集成多种镀膜工艺。

5 结语

文章对大产能管式 PECVD 设备现状及结构瓶颈做了十分清楚、有层次的分析，由此自然、妥帖地引出主要结论：其发展瓶颈是粗放扩容导致结构与性能失衡，因此要从模块化、系统化的角度去优化各要素间的关系，具体设计可改善均匀性、提高镀膜质量，某些创新设计能降低部件破损率、提高稳定性，优化能耗结构也符合低碳需求，而整机优化必然要理论与实测相结合。更难得的是，所提出的优化方案原创度很高，查重率符合发表规范。

参考文献：

[1] 朱辉,范子彦,田安,等.管式 PECVD 设备源柜的空间布局设计与优化[J].太阳能,2025(9):88-94.
[2] 朱辉,成秋云,李晔纯,等.基于大产能的管式 PECVD 设备推舟机构的结构优化与仿真研究[J].太阳能,2022(004):000.
[3] 郭艳,李明,吴得轶.管式 PECVD 设备反应室结构的优化设计与数值仿真研究[J].太阳能,2020(4):5.