

光伏组件单位功率耗硅量降幅预测

原创 杭州研究中心 永安研究 2024-02-22 08:55 北京

杭州研究中心有色团队

2023年，多晶硅在光伏终端的带动下产量同比大幅增长，成功超越有机硅成为工业硅第一大下游。而对于多晶硅的需求结构，太阳能电池占其应用的比重较高，因此光伏电池单位功率所消耗多晶硅数量的变化，将对多晶硅的实际消费量产生较大影响。提高未来单耗系数变化趋势与幅度的预测精度，多晶硅中长期供需平衡的判断精度才有保证。

本文首先对硅片制作环节的工艺与损耗原料进行介绍，再对硅料到光伏组件各个环节的原料单耗进行分析，更加准确的推导出当前光伏组件单位功率的多晶硅耗量。此外，本文依据光伏协会对未来技术参数的预估值进行计算，预测2025年光伏硅片的单耗相比当前的主流型号将有24%以上的下降空间。可见，光伏装机虽处于快速增长的周期当中，但单耗下降将抵消未来较大一部分装机增量带来的多晶硅需求。

可见，对于未来光伏领域工业硅消耗量的预估，硅片厚度、金刚线总线径与转换效率等技术参数变化的预测，与终端装机增速的判断同为重要。而在当前光伏技术快速更迭、多晶硅单耗不断降低的背景下，工业硅在光伏领域的中长期需求增速与光伏终端增速的差异预计将不断扩大。若技术更迭与应用的速度超预期，单位功率耗硅量快速下行，则将导致工业硅中长期的供需平衡格局更为宽松。

一、硅片制作工艺与损耗分析

1.1 拉棒工艺与损耗

单晶硅按晶体生长方法的不同，可分为直拉（CZ）和区熔（FZ）两种。由于成本和性能的原因，CZ方式应用最广。直拉法工艺的具体过程为：

（1）配料、装料：将硅料（免洗多晶硅料、破碎清洗后的单晶硅废料）与单晶掺杂剂按工艺比例配比，装入石英坩埚内。

（2）装炉：单晶炉开始生产时，在单晶炉内部装入石墨件及其附件，炉壁放置毛毡隔热，然后将石英坩埚放入石墨件之中。

（3）熔料：装炉完成后关闭炉体，用干泵将炉体抽真空，充入氩气作为保护气，使之维持于一定压力范围内，然后打开石墨加热器电源，加热至熔化温度（1420℃）以上，将硅料熔化。

（4）晶棒拉制：主要包括种晶、缩颈生长、放肩生长、等径生长、收尾等一些列工序。

(5) 拆炉：取出单晶硅棒、石英坩埚、石墨件、坩埚底料。石墨件清理：石墨件属于热传导物件，可反复使用，拆炉后石墨件运至石墨清理间进行清理。

(6) 晶棒加工：机械加工区分为三个区域，分别是截断区、开方区和磨倒区。将单晶硅圆棒运至机械加工区，使用截断机（钢丝切割）切掉头尾两端，中间部分按规定长度切断，之后将圆棒开方加工为正方形表面，最后将方棒四条边角打磨平整，将成品单晶硅棒制成准方形硅棒。

(7) 单晶硅废料回收、破碎、酸洗、清洗：单晶硅棒加工过程中产生的头尾料、边皮料统称为单晶硅废料，回收后去往清洗车间，在破碎间破碎（人工敲打破碎）成一定大小的单晶硅块。破碎好的废料放入氢氟酸与硝酸的混合酸液中对单晶硅废料进行酸洗，去除单晶硅料表面氧化层，保证单晶硅料的纯度。

在拉棒过程中，硅元素的损耗在装料、熔料、拆炉、晶棒加工与废硅料的回收等各个环节均有发生：

(1) 拉晶过程损耗：熔料过程中产生的废气造成了硅料的损耗。此外，拉晶过程的损耗还包括拆炉过程中炉膛清理的废气。

(2) 投料、坩埚破碎及配件处理损耗：包括装料过程中硅料加入料桶时产生的灰尘、拆炉过程中石英坩埚破碎与石墨件清理所产生的废气与灰尘。

(3) 坩埚内残留物料中含硅部分：含大量石英，少量硅和其他杂质。

(4) 废硅料破碎损耗：单晶硅废料回收、破碎过程中产生的废气与灰尘。

(5) 硅料清洗损耗：破碎好的废料在酸洗过程中产生的废气与废液。

(6) 机械加工损耗：硅棒机加工全过程为湿法加工，机加废水主要污染物为细硅粉，用泵打入板框压滤机过滤，滤饼（湿硅粉、硅泥）装入吨袋。

1.2 切片工艺与损耗

拉棒后的切片主要包括粘棒、切片、脱胶清洗与分选检测包装等工序，具体流程为：

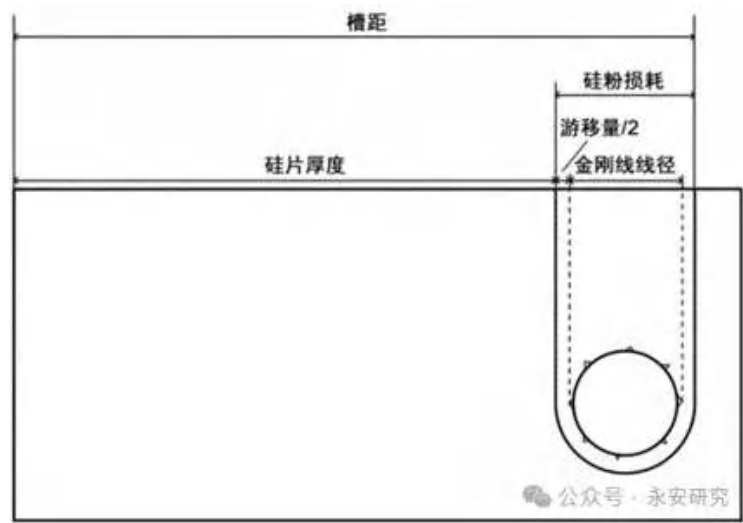
(1) 粘棒：粘胶的目的是将粘有硅棒的工件板夹在夹具上，便于切片。(2) 切片：采用先进的金刚线切割技术，切片工序将粘在工件板上的硅棒用夹紧装置夹住放入线切机内，采用湿式切割，切割过程在密闭条件下进行。(3) 脱胶：利用添加有脱胶剂的热对线切机出来的硅片进行预清洗，去除硅片上粘附的的粘胶、切割液和硅粉。

(4) 清洗：脱胶后自动插片进行超声波清洗并烘干，超声波清洗机使用清洗剂+双氧水清洗，去除硅片表面的硅粉、切割液等脏污，然后用纯水漂洗。(5) 分选检测包装：清洗烘干后的硅片经自动分选检测，合格品包装入库，部分不合格品剔除送到划片间进行二次加工。该工序主要产生不合格品。

切片环节的损耗主要发生在切片与分选检测等步骤：

（1）切片环节损耗：金刚线上的金刚石颗粒紧压在硅棒的表面进行研磨时，自身线径的存在将导致单晶硅棒被磨削为废硅粉而发生损耗。理论上，槽距=硅片厚度+金刚线总线径+游移量，理论废硅粉损耗占原料硅棒的比重=1-(硅片厚度/槽距)。

图1：硅片厚度与槽距



资料来源：CPIA，Solarzoom、永安期货研究中心

（2）分选检测包装损耗：分选检测时将检验产品外观质量、电特性。按照检测结果，将检测合格的产品进行电阻率分档，按照规格、数量要求进行包装。

二、光伏组件单位功率耗硅量分析

2.1 硅棒的硅料单耗分析

以某单晶拉棒项目为例，在刨除机械加工边角料、坩埚内残留物料的可回收部分，拉晶过程损耗硅料、投料与坩埚破碎及配件处理损耗、坩埚内残留物料中含硅部分、废硅料破碎损耗、硅料清洗损耗与机械加工损耗所占多晶硅原料比重分别为2.3%、1.5%、0.9%、1.5%、0与0.6%，产成品占93.3%，即硅棒的硅料单耗约为1.07。

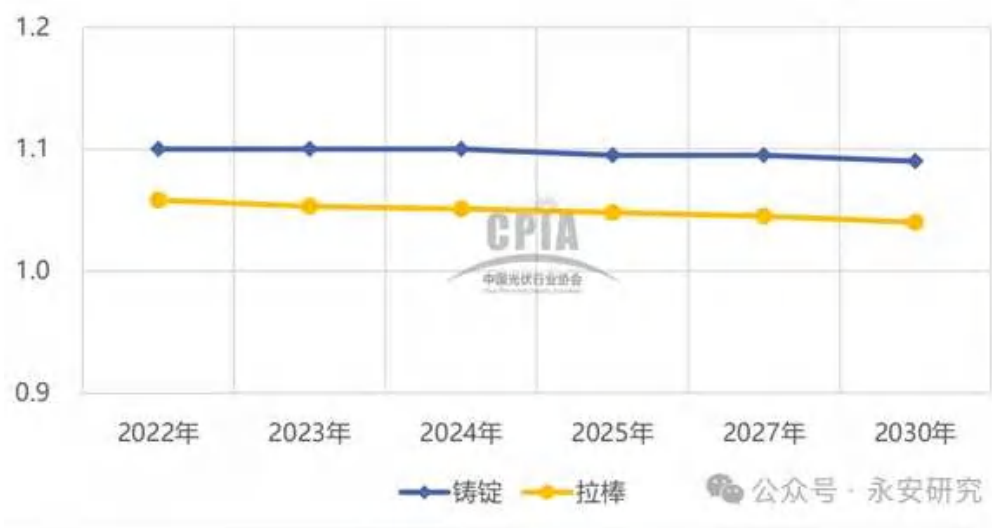
表1：XX年产20GW单晶硅拉棒生产线项目物料平衡分析

| 进料 | | 出料 | | |
|-------|----------|-----------------------|------------------------|---------|
| 物料名称 | 数量 (t/a) | 物料名称 | 数量 (t/a) | 占原生硅料比重 |
| 多晶硅原料 | 76526 | 单晶硅方棒 | 71424 | 93.3% |
| 破碎后硅料 | 28200 | 拉晶过程损耗硅料 | 1722 | 2.3% |
| | | 投料、坩埚破碎及配件处理损耗 | 1131 | 1.5% |
| | | 坩埚内残留物料中含硅部分 | 659 | 0.9% |
| | | 废硅料破碎损耗 | 1148 | 1.5% |
| | | 硅料清洗损耗 | 污泥产生量约171.14，按比例硅含量1 | 0.0% |
| | | 机械加工损耗 | 机加工压滤污泥约1737，按比例硅含量441 | 0.6% |
| | | 机械加工边角料、坩埚内残留物料的可回收部分 | 28200 | |
| 总进料 | 104726 | 总出料 | 104726 | |

来源：公开资料整理、永安期货研究中心

根据中国光伏行业协会统计，2022年行业平均的拉棒耗硅量为1.06kg/kg，与2021年基本持平。清洗、破碎环节的损耗降低，生产环节环境控制，降低坩埚底料比例，优化机加环节精度控制，减少加工余量，提升降级硅料的分级和处理技术等，是降低硅料单耗的核心因素。

图2：2022-2030年铸锭耗硅量变化趋势（单位：kg/kg）



来源：《中国光伏产业发展路线图（2022年版）》、永安期货研究中心

对比以下不同拉棒项目的硅料单耗，可见单耗系数大部分集中于1.05-1.09区间内，与行业平均值基本保持一致。

表2：单晶硅拉棒项目产品方案与硅料单耗

| 项目名称 | 产品方案 | 切片尺寸 | 单位硅棒原生硅料单耗 |
|-----------------------------|-------------------------|---------------------------|------------|
| XX年产 20GW 单晶硅拉棒生产线项目 | 20GW 单晶硅拉棒，单晶方棒 71424t | 未知 | 1.071 |
| XX隆基年产 6GW 单晶硅棒建设项目 | 6GW 单晶硅棒，硅棒19843.75t | 182.13*182.13mm，210*210mm | 1.089 |
| 青海XX能源有限公司 20GW 拉棒切片建设项目 | 20GW | 210mm | 1.071 |
| 宁夏XX光伏材料有限公司50GW(G12)太阳能级项目 | 50 GW，225294t/a | 210mm | 1.054 |
| XX半导体（云南）年产 20GW 单晶硅拉棒生产线项目 | 20GW，单晶硅棒（方棒）71301.2t/a | 未知 | 1.073 |
| XX隆基硅材料有限公司年产 10GW 单晶硅棒建设项目 | 10GW 单晶硅棒，准方形硅棒35712t/a | 156*156mm，125*125mm | 1.089 |

来源：公开资料整理，永安期货研究中心

2.2 硅片的硅棒单耗分析

每KG硅棒的理论出片数可通过每公斤方棒长度除以槽距（硅片厚度 + 金刚线母线直径 + 砂径 + 游离量）得出，而每KG硅棒的理论出片重量KG则为硅片厚度除以槽距，可见其中硅片厚度与金刚线母线直径是决定出片数与硅料单耗的核心因素。

在金刚线母线直径38μm，金刚线砂径13μm，游离量5μm的假设下，以210边长、155微米厚的G12硅片为例，每千克方棒理论可切片46.12片，每千克方棒理论出片重量为0.73KG，计算过程如下：

表3：硅片属性与单位方棒切片数量

| 硅片属性 | | | | | | | |
|----------------------|----------------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| 序号 | 硅片类型 | M10 | M10 | M10 | G12 | G12 | 计算公式 |
| (1) | 硅片边长 (mm) | 182 | 182 | 182 | 210 | 210 | — |
| (2) | 硅片对角线长 (mm) | 247 | 247 | 247 | 295 | 295 | — |
| (3) | 圆角半径 (mm) | 7.51 | 7.51 | 7.51 | — | — | — |
| (4) | 三角面积 (mm²) | 28.20 | 28.20 | 28.20 | — | — | (3)²/2 |
| (5) | 硅片总面积 (cm²) | 330.11 | 330.11 | 330.11 | 441.00 | 441.00 | ((1)²-4*(4))/100 |
| (6) | 硅片厚度 (μm) | 160 | 155 | 150 | 160 | 155 | 估计值，非准确数 |
| (7) | 硅料密度 (g/cm³) | 2.33 | 2.33 | 2.33 | 2.33 | 2.33 | — |
| (8) | 理论切片重量 (g) | 12.31 | 11.92 | 11.54 | 16.44 | 15.93 | (5)*(6)/(7) |
| 方棒的切片数量 | | | | | | | |
| 序号 | 硅片类型 | M10 | M10 | M10 | G12 | G12 | 计算公式 |
| (9) | 每公斤方棒长度 (mm) | 13.00 | 13.00 | 13.00 | 9.73 | 9.73 | 1/(5)/(7) |
| (10) | 金刚线母线直径 (mm) | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 0.040 | 估计值，非准确数 |
| (11) | 圆角-游离量 (mm) | 0.018 | 0.018 | 0.018 | 0.018 | 0.018 | 估计值，非准确数 |
| (12) | 槽距 (mm) | 0.22 | 0.21 | 0.21 | 0.22 | 0.21 | (6)+(10)+(11) |
| (13) | 理论每KG硅棒出片数 (片) | 59.64 | 61.04 | 62.51 | 44.64 | 45.69 | (8)/(12) |
| (14) | 理论每KG硅棒出片重量KG | 0.73 | 0.73 | 0.72 | 0.73 | 0.73 | (8)*((13)-(7))/(6)*(7)/(9)*(12)=(6)*(7)/(7)/(12)=(6)/(12) |
| (15) | 理论每KG硅片的硅料单耗KG | 1.36 | 1.37 | 1.39 | 1.36 | 1.37 | (8)/(13) |
| (14) | 切片良率 (%) | 98.0% | 98.0% | 98.0% | 97.0% | 97.0% | 估计值，非准确数 |
| (15) | 实际每KG出片数 (片) | 58.45 | 59.82 | 61.26 | 43.30 | 44.32 | (13)*(14) |
| 实际每KG方棒切出硅片的总重量 (kg) | | 0.72 | 0.71 | 0.71 | 0.71 | 0.70 | (15)*((14)) |

资料来源：公开资料整理，永安期货研究中心

2.3 单位功率耗硅分析

通过将拉棒环节单耗、切片环节单耗与单位功率单耗相乘，即可得到单位功率的硅料单耗系数。以155μmG12硅片为例，在电池片良率、组件良率与每片功率分别为98%、99.5%与10W的假设下，单位功率硅料单耗为0.0024759KG/W，即每GW耗多晶硅量为2475.9吨。

表4：单位光伏组件发电功率硅料单耗

| 光伏组件单位功率耗硅量降幅预测 | | | | | | | |
|------------------------------|-------------------|------------|-----------|-----------|----------|------------|-----------|
| 序号 | 硅片类型 | M10 | M10 | M10 | G12 | G12 | G12 |
| (6) | 硅片厚度 (μm) | 160 | 155 | 150 | 160 | 155 | 150 |
| (16) | 单位功率 硅耗量耗 (kg/kW) | 1.0700 | 1.0700 | 1.0700 | 1.0700 | 1.0700 | 1.0700 |
| (17) | 单位功率 硅耗量耗 (kg/kW) | 0.0171 | 0.0167 | 0.0163 | 0.0231 | 0.0226 | 0.0220 |
| (18) | 电池片效率 (%) | 98% | 98% | 98% | 98% | 98% | 98% |
| (19) | 组件效率 (%) | 99.5% | 99.5% | 99.5% | 99.5% | 99.5% | 99.5% |
| (20) | 组件功率 (W) | 7.84 | 7.84 | 7.84 | 10 | 10 | 10 |
| (21) | 单位功率 硅耗量耗 (kg/kW) | 0.00245747 | 0.0024011 | 0.0023447 | 0.002534 | 0.00247592 | 0.0024178 |
| 单位功率 硅耗量耗 (kg/kW) | | | | | | | |
| 116, 117, 118, 119, 120, 121 | | | | | | | |

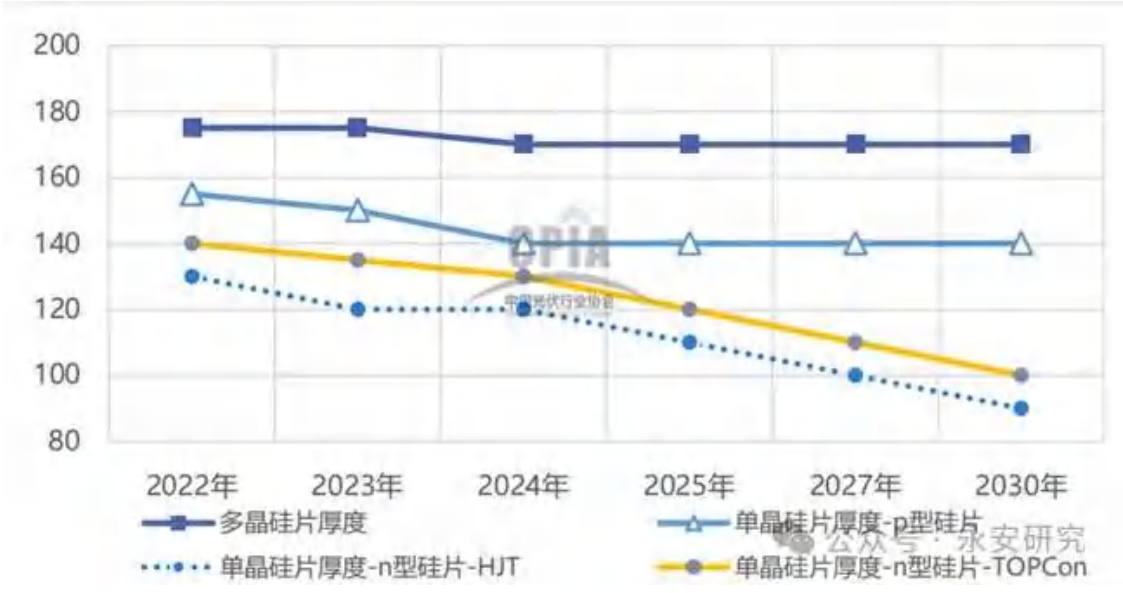
资料来源：公开资料整理，永安期货研究中心

三、光伏组件单位功率耗硅量预测

由上文可见，单位发电功率耗硅量的主要影响因素为拉棒损耗、切片损耗与单片功率。其中拉棒损耗系数较为稳定，而切片损耗的关键参数——硅片厚度、金刚线母线直径，以及单片功率仍有变动空间。

对于硅片厚度，当前用P型硅片的主流厚度为150μm，相比N型主流的130μm高20μm。虽然P型片厚度已接近极限，但是伴随N型片市占率的提升与薄片化的加快，未来硅片整体厚度仍有下降空间。根据中国光伏行业协会统计，2022年p型单晶硅片平均厚度在155μm左右，且后续维持稳定，而N型硅片有望在2030年降低至100μm以下。

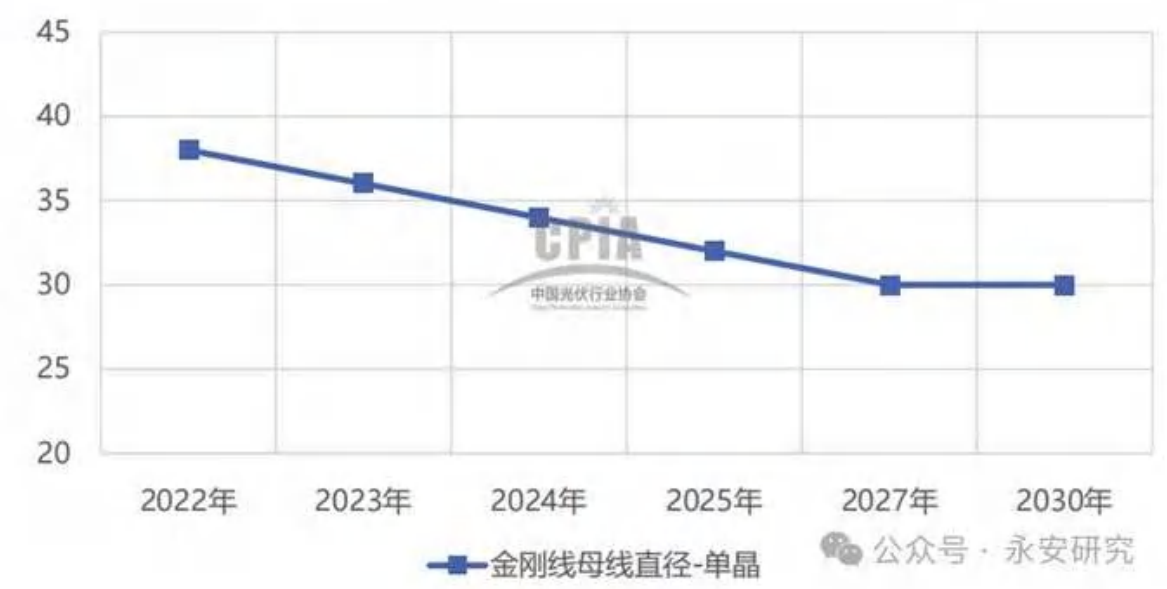
图3：2022-2030年硅片厚度变化趋势（单位：μm）



来源：《中国光伏产业发展路线图（2022年版）》、永安期货研究中心

对于金刚线母线直径，较小的线径有利于降低切削损耗和生产成本。2022年，用于单晶硅片的金刚线母线直径为38μm，降幅较大，且未来呈不断下降趋势。目前主流金刚线为碳钢，而钨丝母线的预计产业化极限能到24-25μm，预计在2024年后钨丝线市占率将不断提高，使行业平均母线直径进一步减小。

图4：金刚线母线直径-单晶



来源：《中国光伏产业发展路线图（2022年版）》、永安期货研究中心

对于电池功率，伴随组件转化效率的提升以及n型电池片市占率的不断增加，光伏电池的单片功率仍有提升空间。

表5：2022-2030年不同类型组件功率变化趋势

| 晶硅电池组件平均功率（W） | | 2022 年 | 2023 年 | 2024 年 | 2025 年 | 2027 年 | 2030 年 |
|---------------|-----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 多晶 | BSF 多晶黑硅组件（157mm） | 345 | 350 | - | - | - | - |
| | PERC p 型多晶黑硅组件（166mm） | 425 | 425 | - | - | - | - |
| | PERC p 型铸锭单晶组件（166mm） | 450 | 450 | 455 | - | - | - |
| p 型单晶 | PERC p 型单晶组件（166mm） | 455 | 460 | 465 | 465 | 470 | 475 |
| | PERC p 型单晶组件（182mm） | 550 | 555 | 555 | 560 | 560 | 565 |
| | PERC p 型单晶组件（210mm） | 660 | 665 | 665 | 670 | 675 | 675 |
| n 型单晶 | TOPCon 单晶组件 | 570 | 575 | 580 | 585 | 595 | 600 |
| | 异质结组件（210mm） | 690 | 700 | 710 | 720 | 725 | 730 |
| | XBC 组件（166mm） | 470 | 480 | 490 | 495 | 500 | 505 |
| MWT 封装 | MWT 单晶组件 | 550 | 555 | 560 | 565 | 570 | 570 |

注：1. 本指标均以采用 11BB 的 PERC 电池片，采用 16BB 的 TOPCon 电池片的单玻单面组件为基准。双面组件为正面功率；
2. p 型 PERC 单晶组件（210mm）和异质结组件（210mm）以 66 片为基准，其他组件均以 72 片为基准；
3. 非特殊注明，均以 182mm 尺寸电池为基准。

来源：《中国光伏产业发展路线图（2022年版）》、永安期货研究中心

依据中国光伏行业协会对2025年的技术参数的预测，假设25年的主流G12硅片厚度达到120μm，而碳钢线与钨丝线的金刚线母线直径分别降低至0.038mm与0.025mm，单片功率提升至 10.09W/片，则对应的多晶硅单耗量为 0.0018769KG/W 与 0.0017383KG/W，相比当前155μm的G12硅片分别将下降24%与29%。由此可见，当前虽然仍处于光伏装机量快速增长的周期当中，但技术进步带来的单耗下降，同样将抵消较大一部分未来装机量增量带来的多晶硅消费。

表6：单位功率硅料单耗预测

| 硅片属性 | | | | | |
|--------|--------------------------|----------|------------|-------------|-------------|
| 序号 | 硅片类型 | G12 | G12 | G12-N型 碳钢线 | G12-N型 铜丝线 |
| (1) | 硅片边长（mm） | 210 | 210 | 210 | 210 |
| (2) | 硅片对角线长（mm） | 295 | 295 | 295 | 295 |
| (3) | 倒角圆长（mm） | — | — | — | — |
| (4) | 二角形面积（mm ² ） | — | — | — | — |
| (5) | 硅片总面积（cm ² ） | 441.00 | 441.00 | 441.00 | 441.00 |
| (6) | 硅片厚度（μm） | 160 | 155 | 120 | 120 |
| (7) | 硅料密度（g/cm ³ ） | 2.33 | 2.33 | 2.33 | 2.33 |
| (8) | 每片硅片重量（g） | 16.44 | 15.95 | 12.33 | 12.33 |
| 方棒切片数量 | | | | | |
| 序号 | 硅片类型 | G12 | G12 | G12 | G12 |
| (9) | 每公斤方棒长度（mm） | 9.73 | 9.73 | 9.73 | 9.73 |
| (10) | 金刚线母线直径（mm） | 0.040 | 0.040 | 0.038 | 0.025 |
| (11) | 砂轮-磨前量（mm） | 0.018 | 0.018 | 0.018 | 0.015 |
| (12) | 磨后（mm） | 0.22 | 0.21 | 0.18 | 0.16 |
| (13) | 理论每KG能切片数（片） | 44.64 | 45.69 | 55.30 | 59.71 |
| | 理论每KG硅棒切片重量KG | 0.73 | 0.73 | 0.68 | 0.74 |
| | 理论每KG硅片的硅棒单耗KG | 1.36 | 1.37 | 1.87 | 1.36 |
| (14) | 切片效率（%） | 97.0% | 97.0% | 97.0% | 97.0% |
| (15) | 实际每KG出片数（片） | 43.70 | 44.32 | 53.64 | 57.91 |
| | 实际每KG方棒切片重量KG | 0.71 | 0.71 | 0.66 | 0.71 |
| 方棒切片重量 | | | | | |
| 序号 | 硅片类型 | G12 | G12 | G12 | G12 |
| (6) | 硅片厚度（μm） | 160 | 155 | 120 | 120 |
| (16) | 单根硅棒 硅料单耗（KG/KG） | 1.0700 | 1.0700 | 1.0700 | 1.0700 |
| (17) | 单根硅棒 硅棒单耗（KG/片） | 0.0231 | 0.0226 | 0.0186 | 0.0173 |
| (18) | 切片良率（%） | 98% | 98% | 98% | 98% |
| (19) | 损耗良率（%） | 99.5% | 99.5% | 99.5% | 99.5% |
| (20) | 每片功率（W） | 10 | 10 | 10.09 | 10.09 |
| (21) | 单位功率 硅片单耗（片/W） | 0.1026 | 0.1026 | 0.1016 | 0.1016 |
| | 单位功率 硅料单耗（KG/W） | 0.002534 | 0.00247592 | 0.002027384 | 0.001877819 |

来源：公开资料整理-、永安期货研究中心

免责声明：

以上内容所依据的信息均来源于交易所、媒体及资讯公司等发布的公开资料或通过合法授权渠道向发布人取得的资讯，我们力求分析及建议内容的客观、公正，研究方法专业审慎，分析结论合理，但我司对信息来源的准确性和完整性不作任何保证，也不保证所依据的信息和建议不会发生任何变化。我们提供的全部分析及建议内容仅供参考，不构成对您的任何投资建议及入市依据，您应当自主做出期货交易决策，独立承担期货交易后果，凡据此入市者，我司不承担任何责任。我司在为您提供服务时已最大程度避免与您产生利益冲突。未经我司授权，不得随意转载、复制、传播本网站中所有研究分析报告、行情分析视频等全部或部分材料、内容。对可能因互联网软硬件设备故障或失灵、或因不可抗力造成的全部或部分信息中断、延迟、遗漏、误导或造成资料传输或储存上的错误、或遭第三人侵入系统篡改或伪造变造资料等，我司均不承担任何责任。

喜欢此内容的人还喜欢

永安研究 | 天然橡胶：供应上量前的博弈
永安研究

永安研究 | 欧央行有望降息，影响几何？
永安研究

