

石英坩埚产业深度解析报告

一、概述

石英坩埚是光伏及半导体领域高纯石英砂的主要制品，主要应用于支持高温条件下连续拉晶，是用来装放多晶硅原料的消耗型石英器件。

石英坩埚具有洁净、同质、耐高温等性能。从物理热学性能上看，石英坩埚的形变点约为 1100℃，软化点约为 1730℃，其最高连续使用温度约为 1100℃，短时间内可达到 1450℃，其高纯和高耐温持久性为硅棒单晶拉制以及单晶品质提供保障，是单晶拉制系统的关键辅料之一。

石英坩埚可主要分为方形和圆形两类，其中方形石英坩埚用于多晶硅锭铸造环节，圆形石英坩埚则用在单晶硅棒拉制环节。

	单晶石英坩埚	多晶石英坩埚
形状	圆形	方形
产品	单晶硅棒	多晶硅锭
成本	高	低
原材料	高纯石英砂	普通石英砂
示意图		

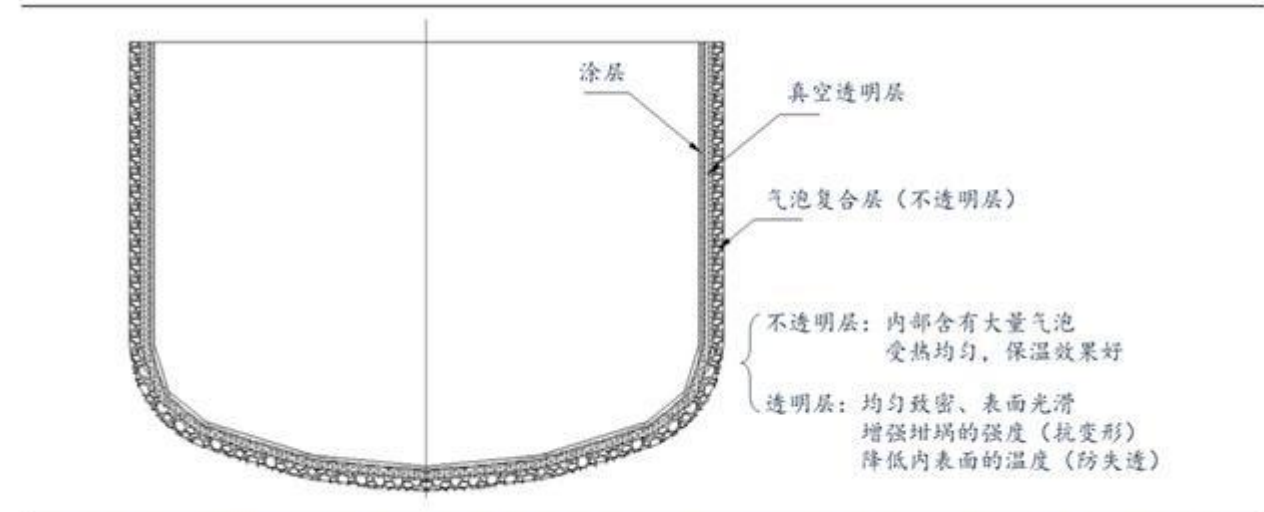
在单晶硅片生产流程中，石英坩埚是光伏单晶炉的关键部件。基于单晶硅片纯度的要求，石英坩埚一次至几次加热拉晶完成后即报废，需要购置新的石英坩埚用于下次拉晶，因而在单晶硅产业链中具备较强的消耗品属性特征。



并购家 免费行业报告网

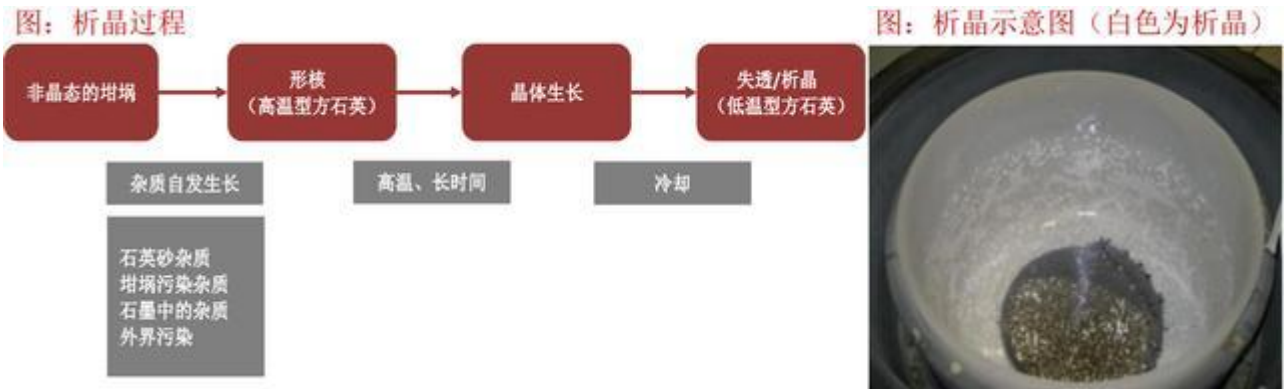
IPOIPO.CN 每日更新 不用注册会员 无广告 永久免费

石英坩埚为半透明状，可分为外层（不透明层）、中内层（真空透明层）。外层（不透明层）是高密度区域，内部含有大量气泡，被称为气泡复合层，其受热均匀，保温效果好；中内层是 3-5mm 的透明层，均匀致密、表面光滑，可以增强坩埚的强度（抗形变），降低内表面的温度（防失透），被称为气泡空乏层。



数据来源：《一种石英坩埚及其采用石英坩埚拉制硅单晶的方法》（申请公布号 CN

石英坩埚具有较强的消耗品属性，需在 1500℃高温下连续工作，具有趋向变成 SiO₂ 的晶体（方石英），即再结晶，该过程称为“失透”或者“析晶”。



在拉晶过程中，内层与溶液直接接触，对硅成晶状况和单晶硅的质量影响更为显著。与此同时，目前全球范围内高品质石英原矿资源稀缺、海外高纯石英矿行业扩产积极性不足，高品质的内层砂的供应或面临较为严重的供给缺口。

目前，下游各厂家工艺不同，一般情况下，内层：中层：外层的用沙比例约为 4:3:3，内层沙对纯度的要求最高。我国目前内层砂基本靠进口，中外层砂逐步可以实现国产替代。

石英砂种类	需求占比	对石英砂的要求	价格	国产化程度
中内层砂	30%—40%	对高纯、低铝、低碱、抗析晶的要求更高	均价较高	国产化率较低，但随着质量和客户认可度的提升，渗透率有望持续优化
外层砂	60%—70%	对高纯、低铝、低碱、抗析晶的要求相对低	均价较低	国产化率较高，已逐步实现国产替代

石英坩埚不断往高纯度、大尺寸、低成本、长寿命发展。随着坩埚制作工艺、拉棒技术的不断优化，为了满足多次加料工艺，石英坩埚的尺寸从原有的 16 英寸发展到 32 英寸及以上。

根据 CPIA 数据，2021 年拉棒单炉投料量（一只坩埚用于多次拉棒生产的总投料量）从 2020 年的 1,900kg 已上升至 2,800kg。目前，长寿命石英坩埚使用寿命已经可达 300~400 小时。下图为欧晶科技坩埚产品规格及参数示例，红虚线框内为欧晶当前主流产品。

规格(Spec)	直径D (mm)	高度H (mm)	直壁厚度W1 (mm)	曲壁厚度W2 (mm)	底厚W3 (mm)	曲壁直径R1 (mm)	曲壁直径R2 (mm)
14inch	355±2	240±3	10±3	10±3	11±3	89	381
16inch	405±2	280±3	9.0±2	9.0±2	9.0±2	90	450
18inch	457±2	355±2	7-12	7-12	7-12	88-120	457-500
20inch	505±2	385±3	11.0±2	11.0±2	11.0±2	120	508
22inch	555-560	406±3	11+3/-1	11+3/-1	11+3/-1	127	560
24inch	609+2/-3	440±3	11-2/+3	12-2/+3	12-2/+3	120	610
26inch	654±3	500±3	12+3/-1	12+3/-1	14+4/-2	120	660
28inch	708±3	556±3	13.5±2	13.5±2	19.0±3	120	710
32inch	810±3	680±3	15.0±3	15.0±3	21.0±4	120	812
S32inch	834±4	680±3	15.0±3	15.0±3	21.0±4	120	834
S36inch	943±4	760±3	15.0±3	15.0±3	22.0±4	160	947
40inch	1016±4	760±3	15.0±3	15.0±3	25.0±5	160	1016

二、产品工艺

（一）应用现状

一、概述

石英坩埚是光伏及半导体领域高纯石英砂的主要制品，主要应用于支持高温条件下连续拉晶，是用来装放多晶硅原料的消耗型石英器件。

石英坩埚具有洁净、同质、耐高温等性能。从物理热学性能上看，石英坩埚的形变点约为 1100℃，软化点约为 1730℃，其最高连续使用温度约为 1100℃，短时间内可达到 1450℃，其高纯和高耐温持久性为硅棒单晶拉制以及单晶品质提供保障，是单晶拉制系统的关键辅料之一。

石英坩埚可主要分为方形和圆形两类，其中方形石英坩埚用于多晶硅锭铸造环节，圆形石英坩埚则用在单晶硅棒拉制环节。

在单晶硅片生产流程中，石英坩埚是光伏单晶炉的关键部件。基于单晶硅片纯度的要求，石英坩埚一次至几次加热拉晶完成后即报废，需要购置新的石英坩埚用于下次拉晶，因而在单晶硅产业链中具备较强的消耗品属性特征。

石英坩埚为半透明状，可分为外层（不透明层）、中内层（真空透明层）。外层（不透明层）是高密度区域，内部含有大量气泡，被称为气泡复合层，其受热均匀，保温效果好；中内层是 3-5mm 的透明层，均匀致密、表面光滑，可以增强坩埚的强度（抗形变），降低内表面的温度（防失透），被称为气泡空乏层。

石英坩埚具有较强的消耗品属性，需在 1500℃高温下连续工作，具有趋向变成 SiO₂ 的晶体（方石英），即再结晶，该过程称为“失透”或者“析晶”。

在拉晶过程中，内层与溶液直接接触，对硅成晶状况和单晶硅的质量影响更为显著。与此同时，目前全球范围内高品质石英原矿资源稀缺、海外高纯石英矿行业扩产积极性不足，高品质的内层砂的供应或面临较为严重的供给缺口。

目前，下游各厂家工艺不同，一般情况下，内层：中层：外层的用沙比例约为 4:3:3，内层沙对纯度的要求最高。我国目前内层砂基本靠进口，中外层砂逐步可以实现国产替代。

石英坩埚不断往高纯度、大尺寸、低成本、长寿命发展。随着坩埚制作工艺、拉棒技术的不断优化，为了满足多次加料工艺，石英坩埚的尺寸从原有的 16 英寸发展到 32 英寸及以上。

根据 CPIA 数据，2021 年拉棒单炉投料量（一只坩埚用于多次拉棒生产的总投料量）从 2020 年的 1,900kg 已上升至 2,800kg。目前，长寿命石英坩埚使用寿命已经可达 300~400 小时。下图为欧晶科技坩埚产品规格及参数示例，红虚线框内为欧晶当前主流产品。

二、产品工艺

（一）应用现状

在直拉法生产单晶硅棒过程中，石英坩埚是不可缺少的必备品。

根据生产得到的硅晶体的不同，可将石英坩埚分为太阳能级和电子级两种。其中，电子级的按照不同类型的晶硅产品对石英坩埚又有不同的要求，所用原材料要求颗粒分布均匀、纯度较高且一致性好。对石英坩埚质量造成影响的，主要是有害成分对熔制过程中产品耐温性的不同，同时还可能会出现脱皮、气泡、色斑等现象，对石英坩埚的质量造成了严重影响。

多年来，通过石英坩埚与硅原料供应商之间的相互支持，在产品的质量和统一技术方面，均得到了发展与进步。不过，国产石英坩埚与外国高质量的产品在实际使用性能与工艺技术方面还存在较大的差距。主要原因在于原材料的锁定和后期工艺两方面。头部大厂可以通过规模优势锁定进口砂的供应，在制作工艺上可以用更少的进口砂实现同等质量的产品输出。

直拉法生长单晶硅的制备步骤主要包括：多晶硅的装料、熔化、种晶、缩颈、放肩、等径、收尾等环节。

1.多晶硅的装料&熔化

将多晶硅的原料及掺杂剂（用于控制单晶电阻率）放入石英坩埚中，装料时底部不应有过多空隙（因为加热后底部的多晶硅先熔化，有空隙会导致硅溅）。之后长晶炉必须抽真空然后输入高纯惰性保护气，再加热至 1412℃以上；

2.种晶

先将籽晶降至液面数毫米处暂停片刻，使得籽晶温度尽量接近熔硅温度，然后将籽晶进入熔硅，使头部溶解，接着籽晶上升，生长单晶硅；

3.缩颈

将籽晶快速提升，缩小结晶直径

4.放肩

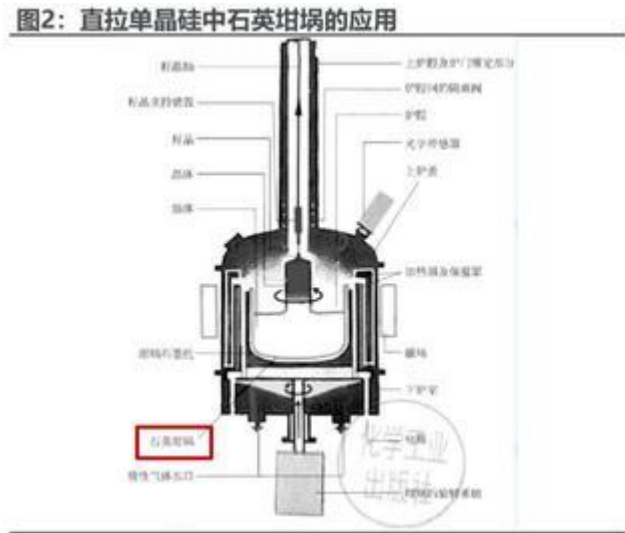
放慢生长速度，晶体硅直径增大

5.等径

稳定生长速度，将晶体硅直径保持不变

6.收尾

加快提升速度，同时升高熔硅温度，使晶体硅直径不断缩小，形成一个圆锥形最终离开液面。



(二) 材质规格

石英坩埚内、中、外三层所用石英砂品质有所差异。内层坩埚使用的高纯石英砂纯度要求达 4N8（大于 99.998%），且对气液包裹体、晶格杂质、稳定性也有较高要求，目前行业内层石英砂主要使用尤尼明、TQC 产品。石英坩埚外涂层、石英管、石英棒、石英舟和石英锭等产品达到 4N5 即可。由于供应紧缺，国产石英砂亦在导入中。中外层石英砂品质要求相对较低，目前已基本实现国产替代。

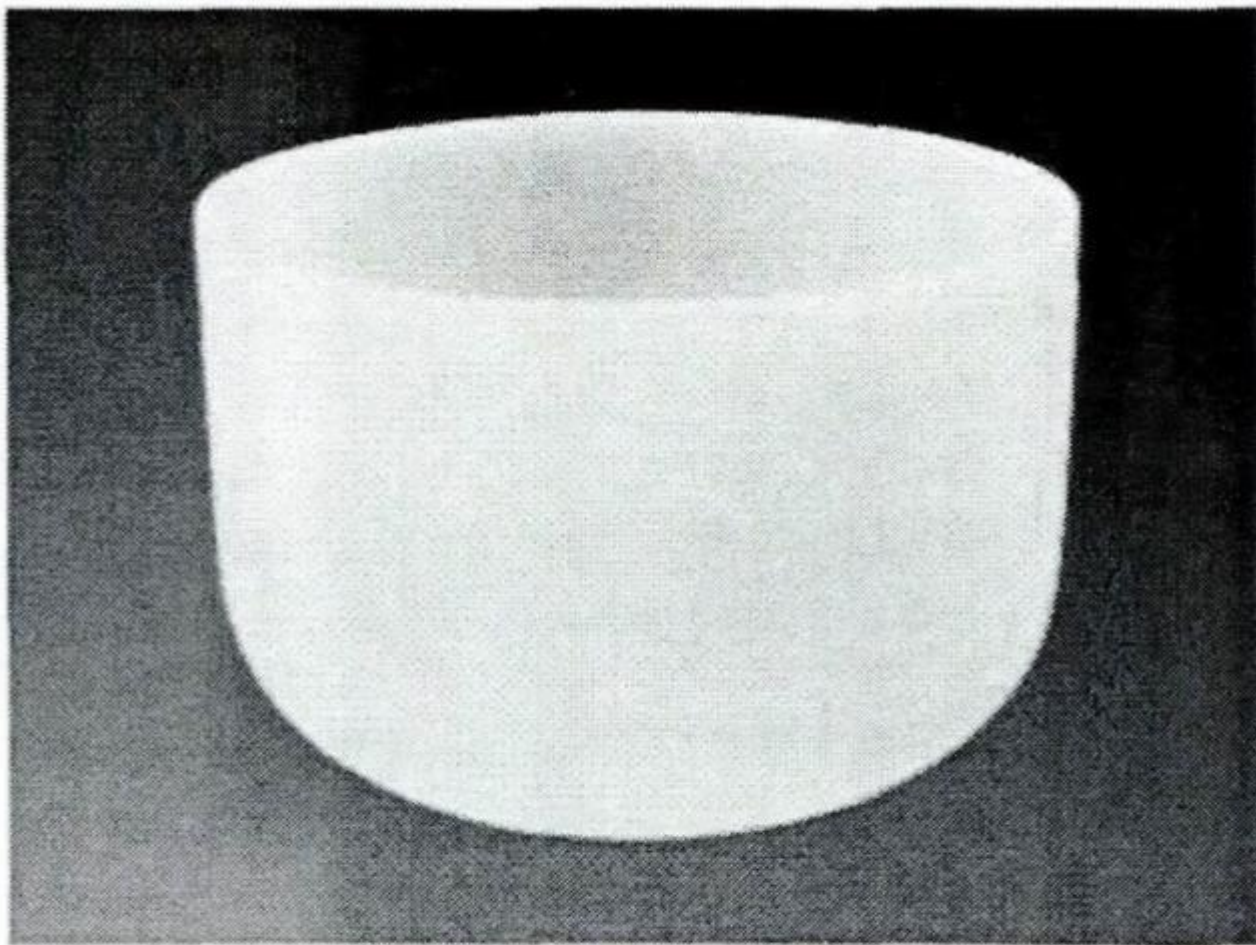


图 1-6 直拉单晶硅用石英坩埚^[34]

Fig. 1-6 Quartz crucible for Czochralski single crystal silicon

(三) 产品制备

直拉法生产单晶硅用标准石英坩埚制造所使用的生产技术已有 40 余年历史。

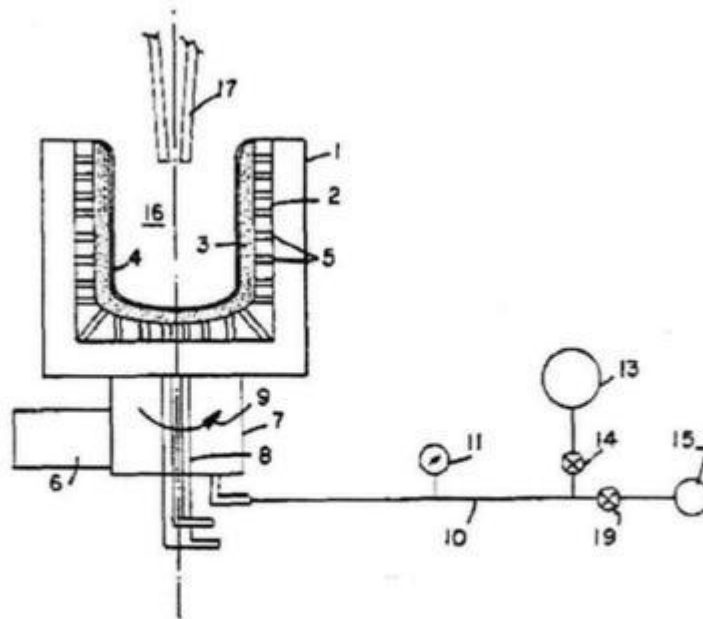


图 1-9 石英坩埚的制备 (3 为石英坩埚的内层、4 为外层、17 为加热器、1&2 为石墨模具) [34]

Fig.1-9 Manufacture of quartz crucible (3 is the inner layer of the quartz crucible, 4 is the outer layer, 17 is the heater and 1&2 are the graphite molds)

由于硅的熔化温度高 (1412°C) 及熔融硅在高温下的反应性, 适合用于制造石英坩埚的材料种类较少, 比如大部分的金属材料, 因为它们只被允许存在于浓度非常低的晶体中, 通常在万亿分之一的原子 (PPTA) 范围内。在元素周期表中第 III、V 族中的材料常被用作晶体中的掺杂, 但允许的浓度也非常低即无法用于实际生产制造石英坩埚。为解决这一问题, 目前所采用的材料之一是无定形二氧化硅也被称为石英, 它也是光伏行业中使用最多的材料, 使用高纯度石英砂作为原料制造的应用于直拉单晶硅的石英坩埚也被称为熔融二氧化硅坩埚。

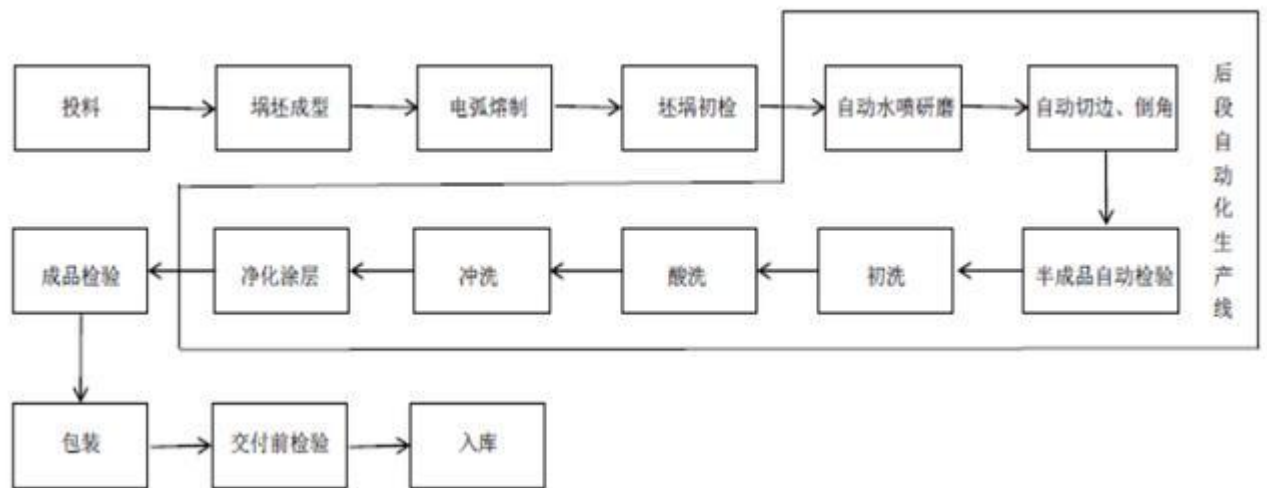
石英坩埚是用提炼后的石英石即二氧化硅制作的, 直径大于等于 250mm 的坩埚目前均采用电弧法生产, 直径较小的还维持原来的气炼法生产。

目前实际生产中广泛采用的直拉单晶硅用石英坩埚制备方法是电弧熔融法, 因单晶硅棒的形状往往被制造为圆形, 虽然具体的制造工艺被不同的生产厂商所保密, 但通过对不同的发明专利和实体石英坩埚产品进行分析, 可以探究出所采用的主要原理。通过石墨电极之间的电弧放电, 将预先放置在旋转模具中的石英砂原料熔融为致密的玻璃态, 在制备的过程中通过两个连续的熔融步骤产生一个内外分层结构, 内层的成分主要为高纯度的熔融硅而外层为天然石英。



石英坩埚的制备过程步骤如下：

将高纯石英粉装入可任意倾动角度的旋转成型模内，利用离心力作用和成型棒手工成型，将已成坩埚形的旋转装置移动至电极棒处，然后将电极通电启弧并插入已成型的粉料腔内，同时启动真空系统，使其快速熔化成坩埚形状的熔融石英，经冷却后取出，即完成一个石英坩埚的毛坯生产。它的工艺特点是利用电弧产生的高温，使坩埚内表面石英砂开始熔融，然后向外表面扩展逐渐加厚熔融层所以内表面是透明光滑的，而外表面要经过磨削成型，去掉黏附的石英砂形成磨砂面所以是不透明的，再经过切断、倒角、检验、清洗和包装后可以进行销售。



电弧法生产效率高、成本低，而且可以制作大直径坩埚而备受欢迎。

（四）工艺要求

晶硅棒生长耗时长、成本高，因此生长的质量成功率至关重要；而石英坩埚是唯一与硅棒直接接触的部件，对生产有重要影响。在直拉硅晶体生长的过程中，由于各种原因，无位错单晶生长会失败，从而造成很大的资源和时间损失。

在目前直拉硅单晶炉及其热场设计都很稳定成熟的条件下，与硅熔体直接接触的石英坩埚的纯度及其生长时释放微小方石英颗粒被普遍认为是导致大直径无位错直拉晶体生长失败的主要原因之一。对应的对石英坩埚的羟基含量、杂质含量、气泡含量均有要求。

1.羟基问题

坩埚中羟基（-OH）是对坩埚强度影响的核心因素，由于羟基的存在，改变了 SiO_2 的键合结构，致使坩埚的耐温性能大幅降低，例如坩埚中的羟基含量超过 150ppm，1050 摄氏度就会开始软化变形，无法正常使用。坩埚中羟基含量主要与坩埚制备所选取的工艺路线直接相关（其次与环境湿度以及原料选取等有关）。

2.杂质扩散

石英坩埚中杂质的扩散会影响单晶硅的生长质量。石英坩埚的性能，直接影响单晶硅的成晶率，当石英坩埚的表面产生失透时石英结晶片就会脱落，并黏着到单晶硅上从而降低单晶硅的成晶率；为了达到内表面高纯度化，需要使用高纯度的石英砂原料，并且在严格的管理下进行高清洁环境下洗净。杂质扩散影响质量：高温下，不同杂质由于其物理性质不同而在石英坩埚中的扩散快慢不同，但杂质扩散的现象说明高品质石英砂的使用，是单晶品质保障的关键。

3.形变析晶

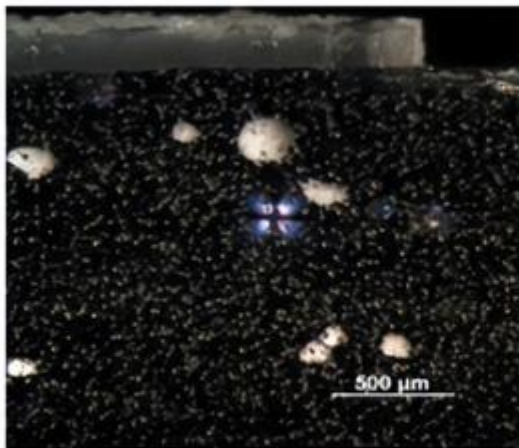
杂质的存在，也会影响坩埚的强度以及导致表面结晶片脱落，均会影响单晶硅生长的成功率。

（1）杂质影响坩埚强度

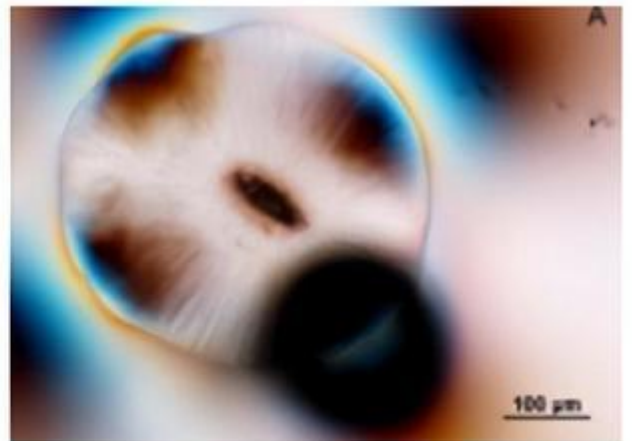
坩埚所用石英砂的杂质含量，决定了坩埚的强度。杂质含量高的石英坩埚高温强度低，易变形，直接对单晶拉制构成影响。石英坩埚变形后，在拉晶过程中随着坩埚位的上升，石英坩埚变形的凸出部分将碰撞到导流筒，轻则影响正常拉晶，严重时将无法拉晶；熔料中发生挂边，会造成石英坩埚变形，坩埚上口向内凸出过多，当熔完料坩埚上升到引晶位置时，已碰撞到导流筒，这将直接导致不能拉晶的严重后果；熔料中发生鼓包且鼓包较大时，在拉晶过程中随着液位的下降，鼓包会渐渐露出液面，这时已经拉出的晶棒会碰擦鼓包，如不及时停炉会发生晶棒跌落的情况。

(2) 析晶

由于采用低档次石英砂或者在生产制程中的污染而带来的坩埚中的杂质含量过高，往往会带来石英坩埚在本体上的析晶。如果析晶靠近内表面，则由于局部的析晶壳层过厚而极易脱落使单晶拉制无法继续。如果析晶造成外壁较厚的析晶，这种现象往往伴随着坩埚外壁在析晶前期已经过度软化贴紧石英坩埚，而极易产生在底部或者弧度的鼓包现象。如果这种析晶有可能贯穿坩埚本体的话，就会引起漏硅等一系列严重后果。



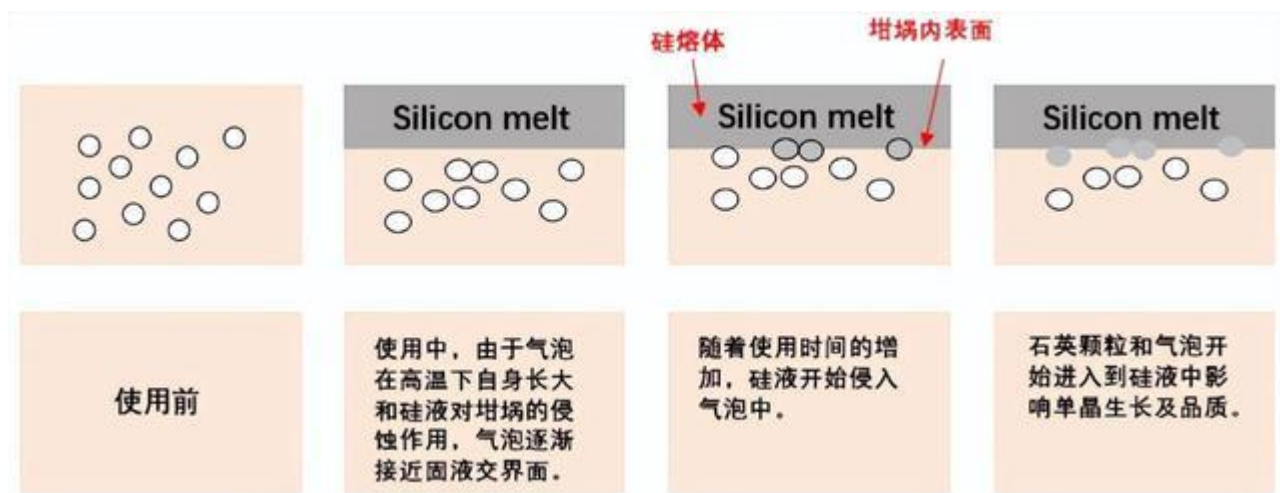
坩埚使用后本体中产生的微小析晶点



杂质点诱发析晶

4. 气泡

坩埚最内表层是指透明层中最靠近内表面 1-2mm 的部分。下图中表明了在使用过程中，坩埚对硅液起作用的机理--由于与硅液接触的内表面不断向硅液中熔解，并且伴随着透明层中的微气泡不断的长大，靠近最内表面的气泡破裂，伴随着硅液释放石英微颗粒以及微气泡。而这些杂质会以微颗粒以及微气泡的形式伴随着硅液流遍整个硅熔体，直接影响到硅的成晶（整棒率、成晶率、加热时间、直接加工成本等）以及单晶硅的质量（穿孔片、黑芯片等）。



普通坩埚，使用前内表面气泡较多，使用中内表面气泡不断破裂，直接污染硅熔体、影响单晶控制，气泡破裂现象随着时间的增加愈加严重，无法满足长时间拉晶的需要。

高品质坩埚，使用前内表面基本无气泡，使用中内表面气泡破裂现象极少，为长时间拉晶（如多次复投料）提供保障。

图9：普通坩埚气泡较多

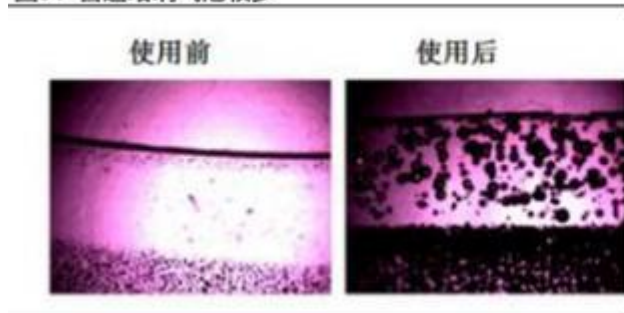
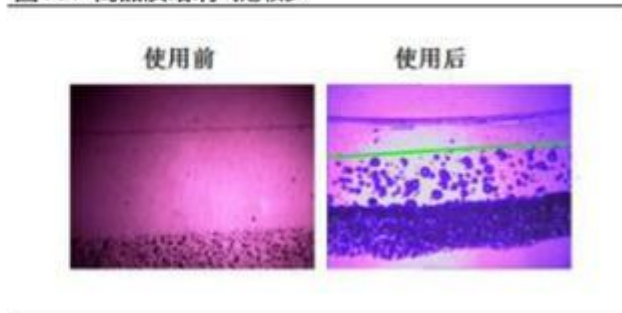


图10：高品质坩埚气泡较少



三、产品演进

由于下游行业对于石英坩埚的纯度、洁净度、精度具有严格标准，同时大硅片的演进也对坩埚产品提出更高的要求，石英坩埚工艺技术一直向“高纯度、大尺寸、长寿命”方向发展，行业内公司需要具备较长时间的技术经验积累，逐渐提高产品尺寸、纯度和其他性能指标。

单晶发展方向	坩埚综合性能	坩埚具体性能要求
大幅增加投料量，拉制多根单晶棒； RCZ 复投料/CCZ 连续性补料	大尺寸	各方面性能（尤其是内表层气泡性能）满足拉晶需求
	长寿命	坩埚核心性能——内表层低气泡含量
	高强度	坩埚内表层气泡抗生长能力
整棒率、成品率提升	内表层结构稳定性	坩埚在拉晶温度下的高粘度
高晶棒品质（低少于寿命、低氧）	高纯度	坩埚核心性能——内表层低气泡含量
低非硅成本	低造价	内表层低杂质含量
	品质一致性	低成本石英砂和低加工成本
		各方面性能保持长期的稳定性，无对单晶构成影响的波动

（一）高纯度

行业层面，2018 年最新的单晶硅生长用石英坩埚行业标准中，提高了对 T 级坩埚的杂质含量要求，13 种杂质元素之和由原来的小于 25 微克提升至了 20 微克；Li、Na、K 三种元素之和由原来的小于 2.5 微克提升至了 2.0 微克。高纯度的趋势下内层砂目前还是要依赖进口，国产较难替代。

类别	13 种杂质元素含量之和	Li、Na、K 元素含量之和	Fe 元素含量	B 元素含量
T 级	≤ 20.00	≤ 2.00	≤ 0.50	≤ 0.20
B 级	≤ 17.00	≤ 2.00	≤ 0.30	≤ 0.10

(二) 大尺寸

石英坩埚尺寸大小（容积大小）取决于晶体生长的直径和长度，同时还要考虑拉晶工艺中对坩、晶直径比的要求，一般坩-晶直径比以 3:1 为佳。主要原因是石英坩埚与熔液直接接触，熔硅与石英坩埚的 SiO₂ 后生成 SiO，它同时向熔体内部扩散并向熔体表面挥发，有一部分到达固-液界面附近，混入到正在生长的晶体中，从而使单晶体中的氧含量增高。采取较大的坩-晶直径比，将有利于氧的大量挥发，提升晶棒的质量。此外，大尺寸的石英坩埚装料量较大，有助于摊薄拉晶厂商的生产成本。目前，硅片逐渐向大尺寸化发展，182 硅片逐步成为主流，182 片需要拉制出 10 英寸的硅棒，对应需要 30 英寸及以上尺寸的坩埚，210 片需要 12 英寸的硅棒，对应需要 36 英寸以上的坩埚。

从行业视角看，2018 年单晶硅生长用石英坩埚新行业标准实施，外径分界提升至 559 毫米(对应 22 英寸)。2000 年以后，随着技术的进步中国国内的坩埚尺寸从 12 英寸一直发展到 40 英寸，近年来中国拉晶生产的主流是 28 英寸坩埚，新项目普遍采用 32 英寸-36 英寸坩埚，小部分已经开始向 40 英寸迈进。

外径	外径偏差	直壁壁厚偏差	弯弧壁厚偏差	底部壁厚偏差	高度偏差	圆度公差	偏壁值
d ≤ 559	±2.0	±1.0	±1.5	±1.0	±2	0.5	0.5
d > 559	±3.0	±1.5	±2.5	±2.0	±3	1.0	1.0

从头部公司角度看，欧晶科技 28 英寸太阳能级石英坩埚获得了内蒙古自治区经济和信息化委员会颁发的“关键零部件首批次产品认定证书”。目前，欧晶已完成了 40 英寸太阳能级石英坩埚和 32 英寸半导体级石英坩埚的研发工作；36 英寸太阳能级石英坩埚和 28 英寸半导体级石英坩埚已正式量产并为下游客户供货，为未来布局下游大硅片配套提供前瞻性的技术支持和技术储备。

(三) 长寿命

近年来，为了提高直拉单晶硅的质量和产量，连续加料、多次加料等一炉多根直拉单晶硅生长技术被开发和应用。直拉单晶硅中，石英坩埚的一次性消耗和拆装炉的耗时在成本费用中占较高比重。

在传统直拉法下，石英坩埚只能用一次，一次仅能产出一根晶棒。而连续直拉法可以在拉晶过程中持续往石英坩埚内加料，并不断产出多根新的晶棒，对石英坩埚的寿命提出了更高要求。国内公司开发的长寿命石英坩埚，连续拉晶时间可以达到 200 小时左右。通过优化多次加料的拉晶工艺，设计出新型石英加料器，配合长寿命石英坩埚，可最大程度实现石英坩埚利用率，提高生产效率。

石英坩埚内壁用尤尼明的石英砂，寿命可达 450 小时，若用从印度进口的石英砂（石英股份主要从印度进口）做内壁，坩埚使用寿命在 200 小时左右。

1.析晶影响使用寿命

在高温环境下，长时间使用产生的析晶层会使坩埚破裂。石英坩埚在高于 1000℃以上使用过程中（拉晶温度 1430-1500℃），坩埚外表面 SiO₂ 分子振动加速，随着使用时间的加长，析晶层越来越厚，若析晶层达到一定厚度，则石英坩埚随之破裂。

析晶主要出现在石英坩埚内外表面，原因是内外表面容易沾污，引起杂质离子的局部聚集，特别是碱离子如 K、Na、Li、Ca、Mg 等（熔制石英坩埚的石英砂均含有以上这些元素）高温后引起粘度降低，促使失透加速，形成析晶。

2.气泡

目前，长寿命石英坩埚主要表现在坩埚透明层微气泡含量的控制，因为石英坩埚选取的原材料为天然石英砂，石英砂中本身含有大量气液包裹体，导致透明层里面微气泡含量不可能完全去除。所以石英坩埚一般运行一段时间后，石英坩埚透明层内表面深度 0.55mm 范围内的微气泡基本膨胀破裂，既让气体进入硅液形成后期的硅孔导致报废，破裂后的石英颗粒也进入硅液，造成硅棒断棱，影响拉晶成晶率。

四、上游原料

石英坩埚的上游是高纯石英砂，下游应用广泛，主要包括光伏、半导体、光纤、通信、照明等市场。

上游高纯石英砂供应由于矿产资源的稀缺和提纯工艺研发难度大，壁垒较高。而下游随着能源价格上涨，全球“双碳”目标不断推进，光伏领域市场需求大幅提升，而随着 5G 通信、汽车电子等市场需求，半导体、光纤领域市场需求也保持高景气，带动下游硅片厂商积极扩产，相较于 6-9 个月的硅片扩产周期，石英砂扩产周期较长，供需短期内难以匹配。

高纯石英砂主要来源于石英矿物，石英矿物资源主要有天然水晶、石英砂岩、石英岩、脉石英等。高纯石英最初是从一、二级天然水晶中深度提纯得到的，工艺相对简单，但随着水晶资源匮乏和成本的上升，美国等国家开始研究用普通石英砂进行替代的技术。目前，从天然岩石矿物提取高纯石英砂原料是世界上生产天然高纯石英砂的最先进技术之一，对矿石的品质要求高，提纯技术复杂。国际公认的高纯石英砂是以美国尤尼明（UNIMIN）公司 IOTA-CG 为标准，SiO₂ 含量≥99.9%，十二种元素杂质含量小于 20ppm（0.002%），其中碱金属（K,Na,Li）分别小于 1ppm（0.0001%）。

随着新兴战略行业的不断发展，市场对高纯石英的需求量逐渐增多，高纯石英原料存储量呈现下滑的趋势。SiO₂ 含量≥99.9%为口径，2014 年以来，高纯石英原料的存储量从 9,494 万吨下降至 2019 年的 7,287 万吨。美国斯普鲁斯派恩(Spruce Pine)矿的高纯石英原料资源规模最大，提供全球 90%的高纯石英砂。储量结构方面，巴西是高纯石英砂全球第一大资源量国，2019 年存储量 2,111 万吨，占比 28.97%，矿石类型主要为天然水晶，但由于巴西基础设施的落后和矿石质量变化大，出口量较小；美国是第二大资源量国，2019 年资源量为 1,822 万吨，在全球占比 25.0%，矿石类型主要为花岗伟晶岩；加拿大位列全球第三，2019 年资源量为 1,000 万吨，占比 13.72%，矿石类型主要为脉石英。

图表：2019年全球高纯石英砂原矿储量情况

国家	储量（万吨）	占比	矿石类型
巴西	2111	29%	天然水晶
美国	1822	25%	花岗岩石英
加拿大	1000	14%	脉石英
中国	685（水晶仅占0.69）	9%	脉石英和水晶
全球	7287		

我国高纯石英资源匮乏，此外，还存在原料评价和勘探技术不足等，目前需求绝大部分依赖进口。我国用于制备高纯石英原料主要为天然水晶和脉石英，根据美国地质调查局 2019 年的数据统计，我国的脉石英和水晶 2019 年资源量为 685 万吨，其中水晶资源量仅为 0.69 万吨，主要分布在四川、广西、贵州、黑龙江等地区。

矿产检测技术和提纯技术也构筑了提升原材料供应能力的技术壁垒。高纯石英砂对 SiO₂ 原材料纯度要求极高，纯度取决于矿源本身的质量特性和提纯技术。目前高纯物料微量化学成分检测的常用方法是电感耦合等离子体发射光谱法（ICP-OES），但由于技术专利等因素，在高纯石英质量的 ICP 检测分析方法方面，国内与国际先进水平相比，还存在着明显差距。但在提纯技术方面，国内石英股份在纯度方面在接近世界领先水平，自给率在逐步提升。

进口石英砂主要有两方面优势：

（1）进口石英砂生产出的坩埚透明层，气泡和杂质方面的质量表现更好，在晶体生长过程中能够稳定多次运行，提升产能。

（2）目前进口石英砂与国内相比纯度更高，杂质含量少，稳定性强，异常事故少。纯度高意味着进入到硅熔液中的金属杂质更少，生长出的晶体金属浓度更低，不易发生断裂事故。特别是在大尺寸的坩埚领域，会进行多次拉晶，对稳定性要求更高，因此下游厂商更换供应商的意愿更低。

国内高纯石英砂与国际先进水平相比有害杂质含量仍然过高。我国《重点新材料首批应用示范指导目录 2019 版》中明确指出高纯石英砂应用于高品质石英制品领域的性能要求是：Fe、Mg、Cr、Ni、Cu、Mn、Ca、Al、Na、Li、K 和 B 共 12 种杂质元素总量小于 6×10^{-6} 。其中，Al 和 Fe 是石英中危害最大的杂质。

由于高提纯技术壁垒和矿石来源的稀缺性，龙头高纯石英砂供应商占据较多市场份额，海外供应商主要为美国尤尼明、挪威 TQC 公司、日本的石英砂公司等，国内为石英股份。美国尤尼明、挪威 TQC 公司和石英股份是少数具备规模化量产高纯石英砂的能力的公司。高纯石英砂的扩产周期较长，新增 1 万吨石英砂产能大约需要 1.5-2 年的建设周期，预计短期内石英砂产能难以大幅提升。

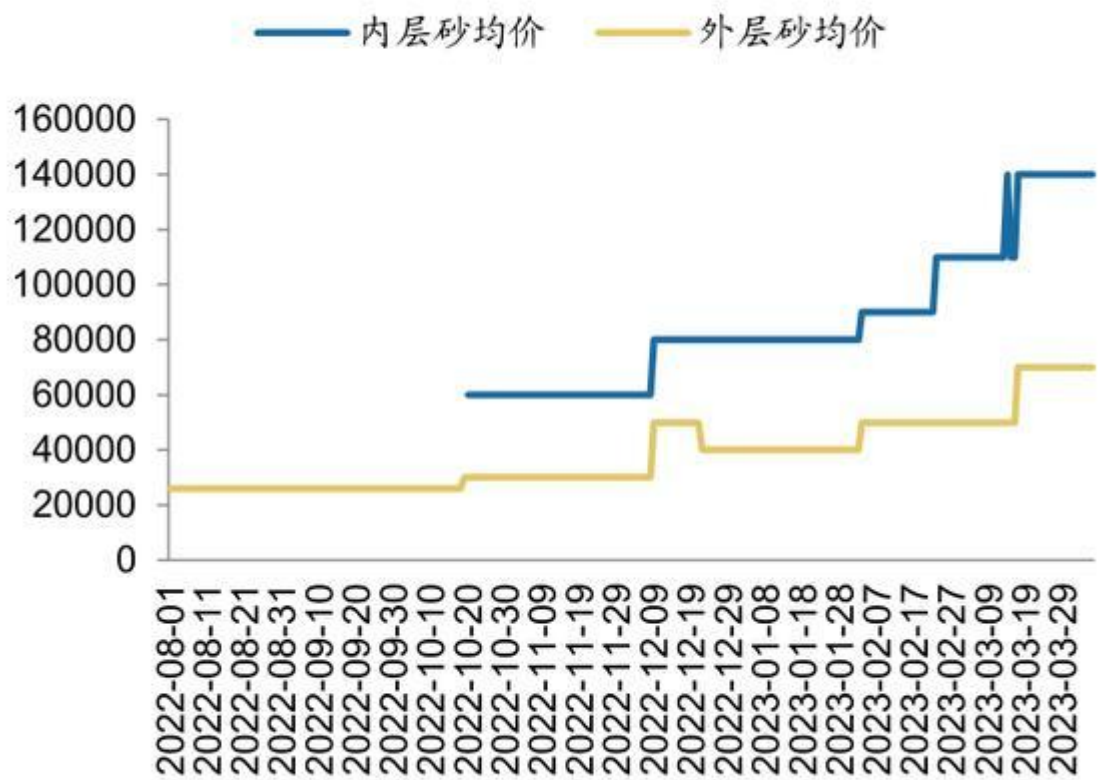
企业	尤尼明	挪威TQZ	石英股份
市场地位	公司为高纯石英砂行业长期的全球行业龙头，垄断了80-90%的高纯石英砂市场	全球第二大高纯石英砂供应商	■ 2018 年在高纯石英砂提纯技术取得突破，成为全球第三家、国内唯一一家掌握高纯石英砂大规模量产技术的企业 ■ 公司加工后的高纯石英砂一部分自用，也有一定的外销，外销比例近年逐年提升，公司已经隆基、晶澳等建立稳定合作关系
矿源	美国Spruce Pine地区的高品质石英矿资源，可满足数十年开采资源量	美国Spruce Pine地区的高品质石英矿资源及挪威本地矿源（约26.7万吨储量）	进口（印度、挪威、美国）
产能	未披露	3万吨（其中供给中国光伏行业1.2万吨左右）	■ 2021年：2万吨（外销1.4万吨） ■ 2022年：4.5万吨（外销3.2万吨） ■ 2023年：6万吨（外销4.6万吨）
价格	超过8万元/吨（3Q22）	参考尤尼明价格	■ 5.8万元/吨（3Q22） ■ 30%价格优势

今年以来，高纯石英砂价格飙涨，内层砂需求持续紧张。

产能端统计来看，截至 2022 年底，除了尤尼明 1.3 万吨、TQC1.2 万吨、石英股份 3.2 万吨外，其余中小厂商产能总体约 0.8 万吨，行业总体产能约 6.5 万吨。不过据上市公司反馈数据，至去年底，石英股份的 3.2 万吨产能未完全释放，实际产能在 2.4 万吨左右。2023 年，尤尼明、TQC 虽然都有扩产计划，但实际产能释放最快也要到 24Q1，具体规模据说连签了框架协议的企业也不清楚。今年，除了石英股份确定的 5 万吨扩产计划外，行业内其他企业的产能规模预计较 2022 年变化不大（有消息说 TQC 已放弃 6,000 吨高纯石英砂扩产计划）。

石英砂价格方面，据有色金属网数据显示，截至 5 月 28 日，高纯石英砂（石英坩埚外层用）价格区间为 7-12 万元/吨，今年年初外层砂价格约为 5 万元/吨；高纯石英砂（石英坩埚中层用）价格为 19-23 万元/吨，年初中层砂价格为 6-7 万元/吨。该网站未提供内层砂报价，从市场人士处获悉，目前内层砂价格为 34 万元/吨至 37 万元/吨，价格同比上涨已超 400%。

图 19：光伏坩埚用高纯石英砂价格走势（元/吨）



数据来源：中国粉体网，广发证券发展研究中心

从需求端看，按照内层砂占比 35%估算未来内层砂供需情况，预计 22-24 年全球光伏用高纯石英砂的总需求为 6.12、10.22、12.91 万吨，其中，内层砂需求分别约为 2.14、3.58、4.52 万吨。

供给侧，主要三大厂商仅石英股份积极扩产。根据广发电新组统计，海外企业高纯石英砂内层砂 22-24 年供给为 2.00/2.50/2.63 万吨。另据石英股份年报，2022 年石英股份高纯石英砂外销量达 3.08 万吨。假设石英股份正在建设的赣榆经开区 6 万吨/年产能自 2023 年下半年起陆续投产爬坡，23-24 年总产能预计为 6.00/10.00 万吨。石英股份目前正在提高内层砂的比例，保守估计 22-24 年石英股份内层砂供给量为 0.35、0.73、1.85 万吨（随技术水平提升，内层砂比例有望继续提升）。

综上，预计 22-24 年内层砂供需缺口为 0.21、-0.35、-0.04 万吨，供需关系持续紧张，24 年由于石英股份新产能完全释放，供需形势相对缓和，如果后续厂家扩产计划调整，缺口可能继续放大。

供需测算	2022E	2023E	2024E
全球石英砂总需求（万吨）	6.12	10.22	12.91
内层砂占比	35%	35%	35%
全球内层砂总需求（万吨）	2.14	3.58	4.52
海外企业内层砂供给（万吨）	2.00	2.50	2.63
石英股份内层砂供给（万吨）	0.35	0.73	1.85
全球内层砂总供给（万吨）	2.35	3.23	4.48
全球内层砂供需缺口（万吨）	0.21	-0.35	-0.04

此外，在内层砂紧缺的背景下，外层砂需求量存在超预期的可能性。一是下游硅片厂商呈双寡头格局，大小厂商内层砂保有量存在明显差异，小厂商可能减薄内层而强拉硅片开工率。

据中国有色金属工业协会硅业分会 2023 年 3 月 16、17 日消息，近期进口石英砂短缺问题持续发酵，除签订保供协议的企业外，大部分专业化企业迫不得已使用低质坩埚，坩埚更换频率加快，单位时间硅片产量降低；二是尤尼明、TQC 砂是当前品质最佳的光伏坩埚用高纯石英砂，总供应结构中尤尼明、TQC 这类最高品级砂占比预计持续减少，而国产砂掺杂提升；三是 N 型渗透趋势存在提速可能，以上三者均有可能造成全市场石英坩埚平均使用寿命缩短，从而增加外层砂需求量。

据部分专家访谈反馈，目前国内能拿到内层砂进口矿源的只有石英股份。行业内内层砂紧缺直接导致下游企业的开工不足。

从下游具体企业看，2022 年欧晶、晶盛、中昱基本是满负荷开工。2023 年三家企业均宣布扩产。欧晶 2023 年新扩 8 条线，一共 20 条产线，但是开工的产线是 12-13 条；中昱有 22 条线，今年目前开工的仅有 7-8 条。内层砂的紧缺情况可见一斑。

其余小部分企业通过保供来锁砂，隆基、中环及其各自配套坩埚厂今年锁定了行业内约 60%左右的中内层砂。

具体企业来看，隆基今年锁定进口砂 4,000 吨，石英股份中内层砂 3,000-4,000 吨；中环今年锁进口砂 3,000 吨，石英股份中内层砂 2,500-3,000 吨；晶盛（给中环做配套）锁进口砂 3,000 吨，石英股份中内层砂 2,000 吨左右；中昱进口砂 3,000 吨，石英股份中内层砂 3,000 吨；晶科、双良、上机去年 11 月交付了进口砂预付款，但是锁砂量不高，三家合计规模约 1,000 吨。

五、财务组成

（一）投资强度

以欧晶科技宁夏石英坩埚一期项目为例，根据公司发布的项目资金募集说明书（20230531）介绍，欧晶计划总投资 15,000 万元，建设石英坩埚熔制线 8 条，实现太阳能级半导体级石英坩埚 8 万只/年，其中 36 英寸坩埚 7.9 万只，28 英寸坩埚 0.1 万只。

资本构成中，工程建筑费用 2,720.10 万元，占比 18.13%；设备购置费用 9,887.58 万元，占比 55.92%；两项占比合计约为 84%。剩余资本构成为预备费 639.52 万元，流动资金 1,570 万元。

单位：万元

序号	投资内容	投资额	投资比例
1	工程及设备费用	12,790.48	85.27%
1.1	建筑工程费	2,720.10	18.13%
1.2	工程建设其他费用	182.80	1.22%
1.3	设备购置及安装费	9,887.58	65.92%
2	预备费	639.52	4.26%
3	铺底流动资金	1,570.00	10.47%
4	项目总投资	15,000.00	100.00%

根据欧晶公司项目资金募集说明书介绍，该项目建设周期约 24 个月。达产后，预计实现年销售收入 67,550 万元，实现净利润 14,158.94 万元，税后 IRR 约 32.92%，项目投资回收期 5.39 年（含建设期）。

（二）成本构成

石英坩埚的原材料主要为高纯石英砂，辅助材料为石墨电极、石英板，坩埚的生产成本中原材料为主要成本，占比约 66%；燃料动力主要是消耗水电。

以欧晶科技宁夏一期项目作为衡量标准，据欧晶测算，其项目建成后，达产年总成本费用 51,096.25 万元（8 万只），包括生产成本、管理费用、销售费用和研发费用等，其中，生产成本 45,692.25 万元；项目达产后计划年实现营收 67,550 万元，毛利率 32.36%。

	金额（万元）	占比
营业收入	67,550.00	
生产成本	45,692.25	100.00%
原材料	30,407.50	66.55%
辅材	5,026.15	11.00%
人工	2,781.93	6.09%
燃料动力	2,382.70	5.21%
制造费用	5,093.97	11.15%
折旧与摊销	1,338.62	
其他	3,755.35	
毛利	21,857.75	
毛利率	32.36%	
管理费用	2,702.00	
销售费用	337.75	
研发费用	2,364.25	
总成本费用	51,096.25	
利润总额	16,453.75	所得税率15%
净利润	13,985.69	

六、竞争格局

（一）产能梯队

石英坩埚生产商和下游客户深度绑定，规模效应明显，主要的海外供应商为 MPM、Heraeus Holding，国内主要供应商为晶盛机电、欧晶科技等，目前国内光伏石英坩埚国产化率已较高。

据浙商证券统计,2022 年国内石英坩埚总产能约为 106 万只/年,预计 2023 年石英坩埚行业总产能达 142 万只,其中晶盛机电、欧晶科技产能规模较大,但行业格局整体处分散状态,中游坩埚的生产企业较多,如浙江美晶、宁夏鑫晶、江阴龙源、锦州佑鑫、丽江华品、天宜上佳、江阴龙源、江西中显等。

表4：竞争格局：有望头部集中，石英砂保障+绑定下游大客户为核心竞争力（据不完全统计）

公司名称	项目	产能规划 (万只/年)	2022 (万只/年)	2023 (万只/年)
晶盛机电	宁夏银川鑫晶（一期、二期、三期）	14.4	14.4	30
	宁夏银川鑫晶-扩产项目（一期、二期）	9.6		
	内蒙古包头鑫晶	6		
欧晶科技	高品质石英制品生产线改扩建项目	12.8	12.8	20.8
	宁夏石英坩埚一期项目	8		
	宁夏石英坩埚二期项目	10		
江阴龙源石英	半导体及光伏用石英坩埚搬迁扩能项目	6	4.5	6
丽江华品石英	丽江华品石英坩埚一期项目	10	10	10
宁夏盾源聚芯半导体	石英坩埚生产建设项目	10.2	8	10.2
天宜上佳	江苏徐州石英坩埚项目	6.48	6.48	15.08
	江苏徐州石英坩埚扩建项目	8.6		
	四川江油绿能新材料产业园石英坩埚项目	21.6		
宁夏晶隆		5	5	5
锦州佑鑫石英		12	12	12
江西上饶中显	公司 20GW 光伏配套热场材料项目	9	9	9
常州裕能石英	光伏辅助设备及电极棒扩建项目	6	6	6
无锡市尚领石英		3	3	3
连云港福鼎石英	太阳能用石英坩埚项目	15	15	15
预计产能合计		129	106	142
预计年新增产能				36

资料来源：各公司公告、官网、新闻，浙商证券研究所整理（以上数据为不完全统计，2023 年达产为我们预测值，可能与实际产能有所出入）

此外，双良节能孙公司澄利新材料（包头）有限公司石英坩埚已经于 22 年底全面投产，今年产能可达 6 万只，2024 年产能增至 12 万只，2025 年产能将增至 15 万只，上述表格统计产能有可能进一步增加。

国内石英坩埚生产厂商和下游客户深度绑定，龙头效应明显，部分下游硅片厂商可进行自主生产。

全球光伏龙头中环股份、隆基股份供应商的欧晶科技、江阴龙源、宁夏晶隆因客户产能占全球产能比重较高形成规模产能，欧晶科技生产的石英坩埚主要供给中环科技，2017 年-2020 年欧晶科技从中环股份中获得的收入占比可达 86%以上，2020 年达到了 90.6%，晶盛机电、江阴龙源也是中环股份的石英坩埚供应商之一。宁夏晶隆石英有限公司可生产销售半导体级单晶硅石英坩埚，是隆基股份的石英坩埚供应商，其他坩埚下游客户较为分散。部分光伏厂商通过设立子公司进行自主生产，例如隆基股份、晶澳太阳能。晶澳太阳能有限公司旗下的阳光硅谷电子科技有限公司可生产多晶硅、单晶硅棒、多晶硅片、单晶硅片、石英坩埚等，其中石英坩埚以 28-36 英寸为主。

（二）竞争壁垒

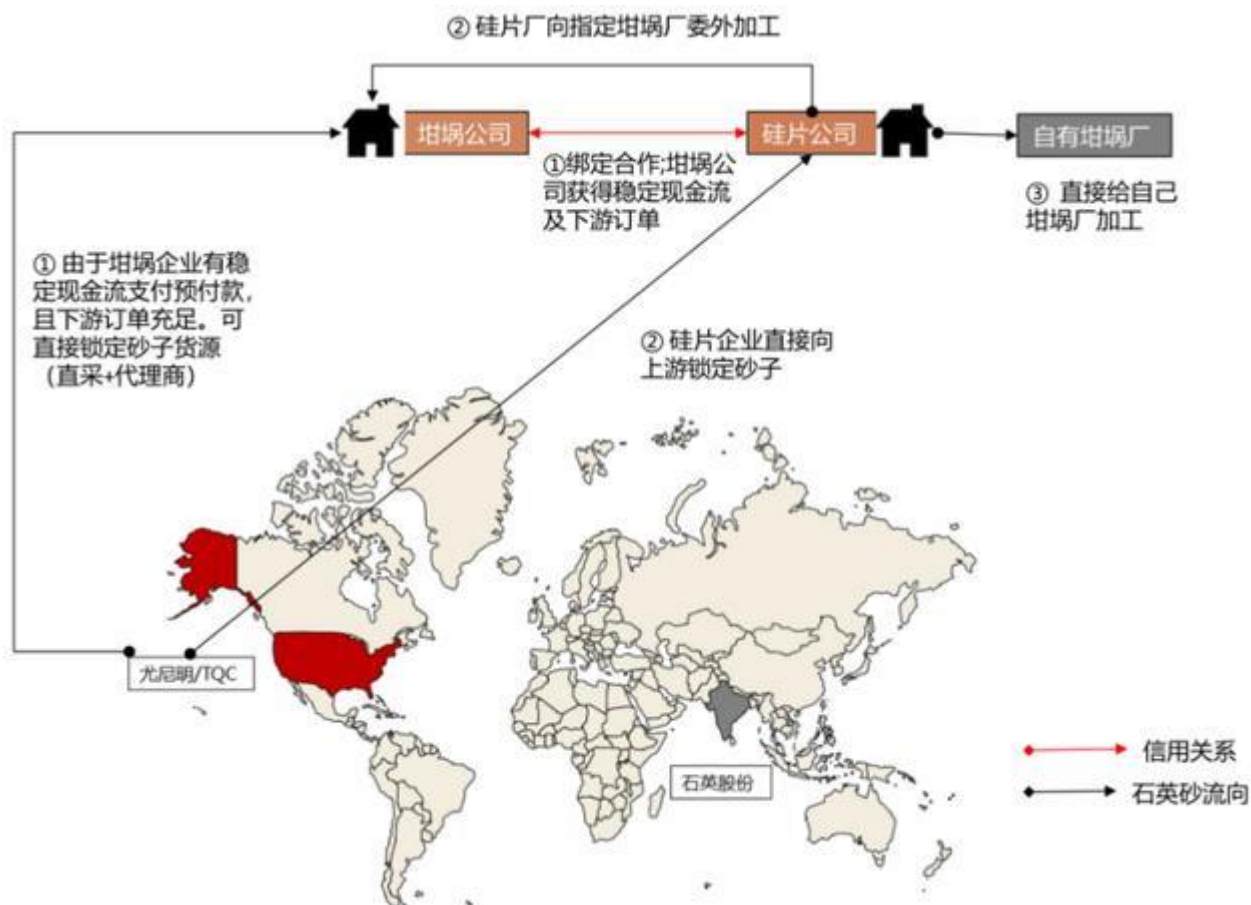
石英坩埚厂商的核心竞争力来自于：（1）优质的客户资源；（2）稳定的原材料来源；（3）充足的、先进的产能；（4）良好的成本控制能力。

1.技术方面，出于对性价比的追求，大尺寸可重复利用的高纯度石英坩埚成为主流发展趋势。硅片大片化已成为确定性趋势，预计随着技术逐步突破，大尺寸石英坩埚需求占比将不断提升，同时，大尺寸石英坩埚的制作难度更大，单价更高。

2.客户资源方面，和大客户稳定的合作关系是保障公司正常运营，实现增长重要因素。晶科能源对江西中昱的平均采购单价相较于其他公司更高，主要系公司和中昱提前签订大额订单，而其他供应商随着市场竞争，2021 年上半年价格处于下降趋势。而华品石英将产能主要布局在隆基股份生产基地附近，保障了货品的快速交付和低成本运输；欧晶科技则和中环股份建立了稳定合作关系，2019-2021 年对中环股份的销售额占营业收入的比例分别达到 86.52%/90.61%/89.12%。

3.原材料方面，在石英砂原料相对紧张的情况下，坩埚生产商主要通过和原材料厂商签订长期协议，达成战略协议，从而保障有限供货。由于高纯石英砂的供应量有限且用途多样，上游原材料厂商议价能力较强，石英坩埚制造企业通常通过签订长期协议保障供应，保证了高纯石英砂供应的长期稳定。上游石英砂供应商在签订长单时，主要考虑下游坩埚厂和硅片厂的合作关系，以及是否具备长期稳定规模化交付的能力，因此客户资源及充足、先进的产能是坩埚厂获取石英砂资源能力的关键。此外在技术层面，目前内层砂占光伏石英坩埚质量的 40-50%左右，而头部厂商可以将内层砂含量降低至 25-30%，且不影响质量，从而降低进口砂消耗量，降低生产成本。

4.成本控制方面，电弧法生产石英坩埚中电力成本占非石英成本的比例较高，厂商生产基地的当地电力价格和限电情况影响公司生产成本。一般而言，随着省级电网输配电改革试点推进，部分地区的电力价格低于平均水平，叠加运输至光伏主要应用场地的考量，光伏用石英坩埚厂商优先在内蒙古等电力价格相对低廉的地区进行生产布局。



七、需求测算

随着全球光伏装机量持续高增长,中国新增装机量保持首位,“双碳”目标驱动之下,石英坩埚及石英砂需求或将迎来快速增长。根据光伏装机量,硅片制造设备单晶炉需求及石英坩埚的使用寿命,可测算出对应石英坩埚与石英砂的需求。

(1) 全球硅片产量: 预计 23 年全球光伏新增装机量为 370GW, 新增装机量对应硅片产量损耗系数为 1.3, 对应光伏硅片产量为 481GW。

(2) 单晶炉产能: 36 寸坩埚单 GW 所需单晶炉数量为 80 台, 32 寸坩埚单 GW 所需单晶炉数量为 85 台。

(3) 石英坩埚寿命及单价: 为了进一步降低光伏发电成本, 对石英坩埚提出长寿命, 大尺寸的需求。根据晶盛机电公司公告和欧晶科技招股说明书, 结合市场调研, 石英坩埚的寿命约在 300-400 小时, 假设 23 年 32 寸坩埚使用寿命为 320 小时, 36 寸坩埚使用寿命为 400 小时, 损耗系数为 1.1, 库存系数为 1.063, 32 寸对应每月单晶炉所需的坩埚数量为 2.5 只, 36 寸对应每月单晶炉所需的坩埚数量为 2 只。

(4) 石英坩埚价格: 不同尺寸的石英坩埚由于工艺难度和用料重量不同, 价格存在差异, 而随着大尺寸硅片占比不断提升, 36 寸逐步成为主流, 预计 32 寸 1.8 万元/只、36 寸 2.2 万元/只作为石英坩埚的平均价格作为测算依据。

(5) 石英砂需求: 根据 CPIA 数据, 182mm+210mm 尺寸硅片市场占比已经从 2020 年的 4.5%提升至 2023 的 75%以上 (23 年为预估值), 对应需要的是 36 寸及更大尺寸的石英坩埚。根据欧晶科技官网披露的石英坩埚尺寸进行测算, 32 寸的石英坩埚重量大约为 64kg, 考虑到制作过程中可能存在一定的损耗,

对应石英砂原材料需求约在 80kg，而 36 寸坩埚大约需要使用 120kg 的石英砂。内层砂基本采购进口石英砂，外层可采用国产石英砂，初步假设内外层石英砂需求比例约为 4：6。

	2021	2022	2023E	2024E	2025E
光伏装机量（GW）	170	250	370	450	550
库存系数	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
硅片产量（GW）	221	325	481	585	715
单GW所需单晶炉数量（台）					
32寸	85	85	85	85	85
36寸	80	80	80	80	80
单台单晶炉月消耗坩埚数量（台）					
32寸	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
36寸	2	2	2	2	2
不同尺寸市场占比					
32寸	90%	70%	50%	35%	15%
36寸	10%	30%	50%	65%	85%
坩埚年需求量（只）	549,627	767,325	1,075,035	1,252,193	1,440,368
单只坩埚石英砂耗量（kg）					
32寸	80	80	80	80	80
36寸	120	120	120	120	120
石英砂总体需求总量（万吨）	45.67	68.87	104.47	129.38	161.90

与此同时，各家主流厂商也在纷纷扩充自身的硅片产能，截至 2022 年底，我国硅片产能约 670GW。

序号	公司名称	2021产能	2022产能	拟扩产能
1	隆基绿能	105GW	150GW	46GW
2	TCL中环	85GW	140GW	40GW详见注释
3	协鑫科技	-	50GW	-
4	双良节能	-	50GW	50GW
5	上机数控	-	35GW	65GW
6	高景太阳能	-	30GW	50GW
7	京运通	20.5GW	40.5GW	22GW
8	宁泽半导体	-	-	50GW
9	美科股份	10GW	10GW	35GW
10	晶科能源	-	55GW	-
11	晶澳科技	-	40GW	20GW
12	阿特斯	11.5GW	20GW	-
13	通威股份	-	-	15GW
14	阳光能源	4.1GW	14.6GW	-
15	高测股份	-	约21GW	-
16	宇晶股份	-	10GW	15GW
17	和邦生物	-	10GW投产	-
18	沐邦高科	-	1.5GW	2.5GW
合计		236.1GW	677.6GW	470.5GW

以中环为例，据公司公告显示，TCL 中环将进一步加速实现晶体宁夏银川 50GW(G12) 太阳能级单晶硅材料智工厂（晶体六期）、晶片年产 25GW 高效太阳能超薄硅单晶片智慧工厂项目（“DW 三期”）、年产 35GW 高纯太阳能超薄单晶硅片智慧工厂及其配套项目。

八、结论

在进口砂很可能出现实际供需缺口时，深度绑定硅片厂的头部坩埚公司与其他中小坩埚厂的差距有可能会拉大。2023 年有望出现长期格局优化，其中差距将主要体现在：1) 中小坩埚厂由于没有稳定的进口砂石英砂货源，毛利率承压甚至部分时间停产，这从中昱目前仅 8 条线在生产就可见一斑；2) 被迫在内层砂使用更高比例的进口砂，但这类技术方案往往只适用于 28 英寸以下的坩埚，而现在大型硅片厂的主流都是 32、36 英寸坩埚产品，以生产大尺寸硅片，中小坩埚厂进一步丢失主流市场，中长期在技术壁垒更深厚的 36 英寸坩埚产品上持续落后，未来也有可能更难进入头部硅片厂的供应链。

具体的演绎路径可能为：进口砂总供给短缺→优先供给有采购框架协议的龙头坩埚厂、硅片厂→中小坩埚公司只能用高价从贸易商买到剩余进口砂，或者半导体级石英砂，甚至没有砂子→中小坩埚公司毛利率承压甚至停产，收入/利润均差距均被拉大→内层砂使用更高比例的国产砂，进一步退出主流高端的 36 英寸产品线→与未来硅片大尺寸趋势相远背，差距被持续拉大。

拉长至中期，由于硅料产能扩张，下游硅片厂产能增速不会放缓，大尺寸化的趋势也不可逆。而进口砂的供给相对稳定（尤尼明/TQC 即使扩产，也需要 1 年时间达产），因此与硅片厂绑定更深的头部坩埚公司有很长的时间窗口期，在资金、技术、客户信任关系上进一步拉大同中小坩埚公司的差距。