

引言

近 20 年，我国太阳能光伏发电成绩斐然。截至 2018 年底，中国太阳能光伏累计装机容量 174GW，当年光伏发电量达到 1775 亿 kWh，同比增长 50%，中国光伏发电量居世界首位。与此同时，中国太阳能光伏发电的系统成本逐年下降，进入 2019 年，中国西部大型光伏地面电站的度电成本可以达到 0.2~0.3 元/kWh。太阳能光伏发电在全国范围内、不同用电性质的平价上网即将在未来的 5 年内实现。这些亮眼的数字背后，离不开作为光伏主流技术的晶体硅技术持续发展和创新的贡献。

铸锭单晶作为晶体硅光伏技术路线中的一颗新星，在近期以其优异的性价比引起了光伏行业人士的广泛重视。经过近 10 年的磨练和积淀，铸锭单晶在传统的铸锭多晶装备和工艺路线基础上，通过装备、工艺和产品等一系列创新，逐渐形成了成熟、高效率、低成本的单晶光伏产品。铸锭单晶的成熟和产业化应用，推动了产业技术的良性竞争和发展，为光伏终端客户提供了多样化和高性价比的技术路线产品，加快了光伏发电平价上网的步伐！

本白皮书旨在向光伏制造、光伏发电行业从业者和其他关注光伏行业的人士，介绍并普及铸锭单晶这一不断成熟、发展和有巨大产业潜力的技术。铸锭单晶产品为什么可以保证更低的光致衰减和可靠性？为什么能提供更低的制造成本？为什么能兼容所有电池和组件工艺方案？为什么有更优异的碳足迹表现？这些问题都将在文中得到回答和解释。

另外，本白皮书也预测了铸锭单晶和晶体硅技术未来的发展趋势，希望通过不同晶体硅技术路线的创新与竞争，继续促进光伏发电技术的持续快速发展！

目录

引言.....	0
第一章 铸锭单晶技术路线.....	2
1.1 产业技术路线背景及趋势.....	2
1.2 铸锭单晶技术及发展历程.....	3
1.3 产品性能.....	6
1.3.1 晶体结构.....	6
1.3.2 掺杂与光衰减.....	7
1.3.3 电池效率与组件功率.....	8
1.4 成本优势与市场价格.....	11
1.4.1 铸锭单晶产品成本优势.....	11
1.4.2 铸锭单晶技术产品价格竞争力.....	12
1.5 铸锭单晶技术产业链匹配兼容性.....	12
1.5.1 硅片尺寸.....	12
1.5.2 制绒工艺.....	13
第二章 组件产品与发电保障.....	14
2.1 铸锭单晶组件.....	14
2.2 发电性能保证.....	15
2.2.1 光致衰减.....	15
2.2.2 可靠性.....	16
2.2.3 线性质保.....	16
第三章 发电收益.....	18
3.1 实证发电数据.....	18
3.2 高性价比铸锭单晶组件助力平价上网.....	19
3.2.1 铸锭单晶组件是性价比最高的组件.....	19
第四章 铸锭单晶技术与应用前景.....	30
4.1 铸锭单晶硅片技术路线.....	30
4.2 大硅片与组件功率提升.....	31
4.3 铸锭单晶硅片供应计划.....	32
结束语.....	33
致谢.....	34

第一章 铸锭单晶技术路线

1.1 产业技术路线背景及趋势

到目前为止，光伏产业主要采用直拉单晶和铸锭多晶两种主流技术路线，直拉单晶与铸锭多晶原理如图 1.1 所示。通过使用不同形态的多晶硅料作为原材料，通过旋转提拉法（直拉法）和铸锭法生产出单晶硅棒和多晶硅锭。直拉单晶棒和铸锭多晶锭通过后续通过相类似的切方、切片等工艺生产出单晶和多晶电池，电池经过排串、焊接和封装等环节最终产出太阳能光伏组件。



图 1.1 太阳能光伏晶体硅生长的主要技术

不同晶体硅技术路线在市场中所占份额受其转换效率和成本变化的直接影响，某一时期的主流技术路线，一定是拥有最佳的效率/成本性价比。

得益于铸锭多晶比直拉单晶在单炉产量、材料消耗、氩气消耗以及电耗方面的成本优势，铸锭多晶硅技术在 2018 年之前一直占据着晶

体硅组件市场的领导地位，市场占有率曾经一度高达 80%-90%。随着硅片切割环节金刚线切割工艺和电池环节 PERC 工艺的成熟，直拉单晶技术的成本下降和效率提升幅度加大，路线的整体性价比在不断提升，到 2018 年年底，多晶硅组件和单晶硅组件的市场占有率比例为 6:4。未来，单晶技术路线将占有更大的市场份额，未来 5 年各种类型硅片出货量占比如图 1.2 所示。

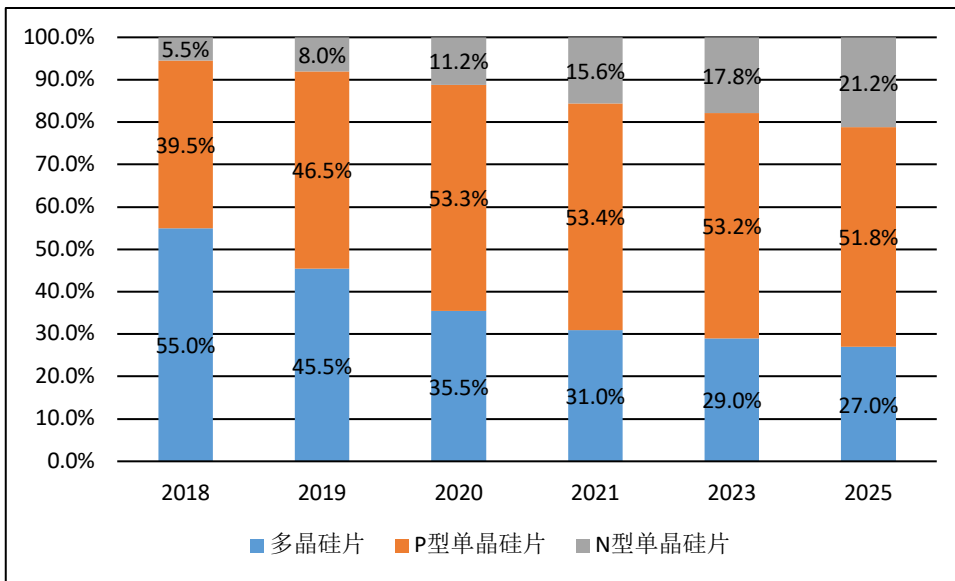


图 1.2 不同类型晶体硅硅片市场占有率 数据来源：CPIA

1.2 铸锭单晶技术及发展历程

铸锭单晶 (cast-mono wafer)，是指采用多晶铸锭炉，在常规多晶铸锭工艺的基础上加入单晶籽晶，定向凝固后形成方型硅锭，并通过开方、切片等环节，最终制成单晶硅片。基于该技术路线，保利协鑫目前已顺利推出第三代产品“铸锭单晶 G3” (GCL cast-mono G3 wafer)，其生长过程如图 1.3 所示：

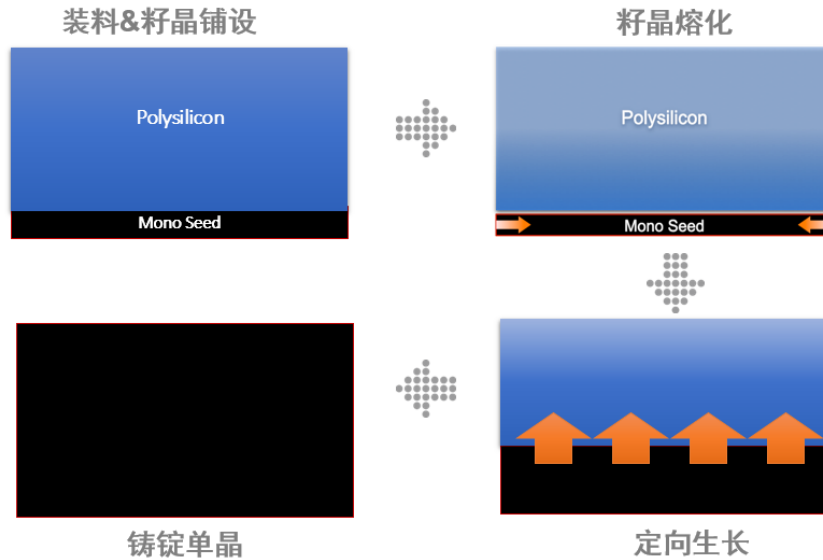


图 1.3 铸锭单晶定向凝固晶体生长示意图

铸锭单晶并非新兴技术，它与硅晶体铸锭技术的发展和变迁息息相关，从铸锭多晶到铸锭单晶大致经历了五个历史阶段，如图 2.2 所示。

第一阶段，2010 年以前。这一阶段，铸锭多晶在成本和规模上占据行业统治地位，技术上经历了从热交换法（HEM）到定向凝固法（DSS）的迭代。

第二阶段，2011~2012。这一阶段，保利协鑫就已经开始第一代和第二代铸锭单晶产品的研发。除保利协鑫外，赛维 LDK、晶澳、昱辉、凤凰光伏等企业都陆续推出过类似产品。在当时的市场上，这类产品被称之为准单晶（quasi-mono wafer）或类单晶（mono-like wafer）硅片。

第三阶段，2012~2016。这一阶段，基于小晶粒技术方向的高效多晶取得了突破并大规模量产应用，很快占据了光伏硅片市场的主流地位，市占率接近 80%。

第四阶段，2016~2018。这一阶段，金刚线切割技术使直拉单晶在硅片环节的生产效率和成本得到明显改善，PERC 电池工艺的成熟应用使得单晶电池的转换效率增益更为明显，成为单、多晶技术路线竞争格局的分水岭。

第五阶段，2019~至今。保利协鑫第三代铸锭单晶技术取得突破，产品开始进入量产，并以多晶的低成本、单晶的高效率，再次受到业界广泛关注。第三代产品较之传统铸锭单晶产品，消灭了以往铸锭生产中容易产生的二类片及曾占成品高比例的三类片，铸锭单晶无论是外观还是内在的位错密度，都无限接近直拉单晶硅片，为日趋多元化的光伏材料市场提供了一个极具竞争力的高效产品。

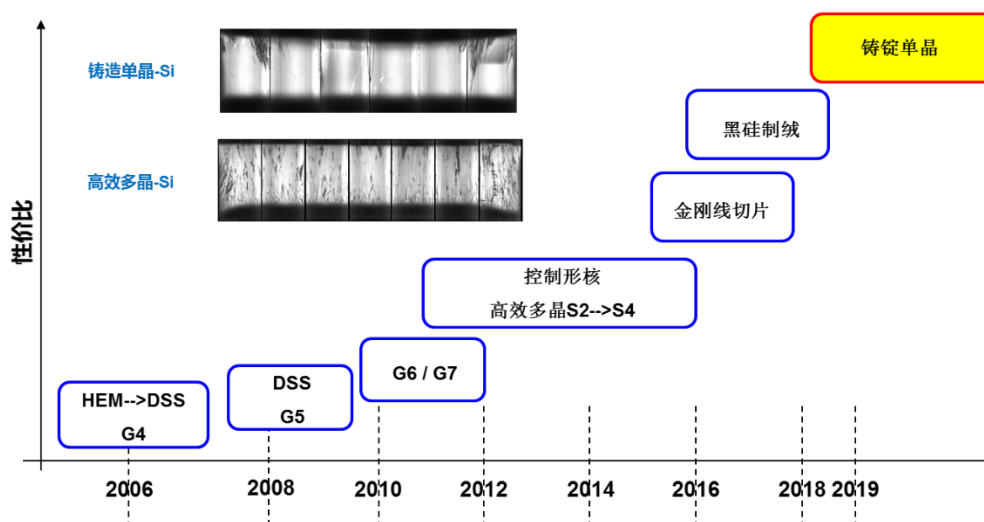


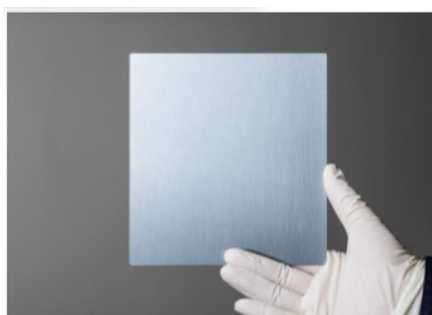
图 1.4 光伏用硅晶体与硅片技术发展历程

1.3 产品性能

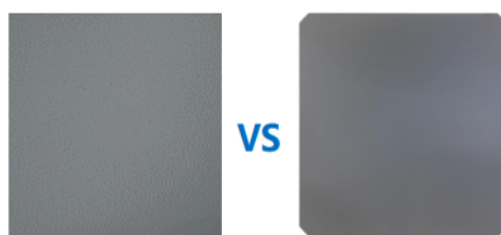
1.3.1 晶体结构

单晶体是指样品中所含分子（原子或离子）在三维空间中呈规则、周期排列的一种固体状态。有多个杂乱无章排列着的单晶体组成的物体叫多晶体。铸锭单晶则是通过定向铸锭工艺而非传统旋转提拉法制备的单晶体。从晶体结构、微观缺陷和表面形貌上来看，铸锭单晶和直拉单晶都已相差无几。

铸锭单晶硅片采用与直拉单晶相同的碱制绒，制绒后表面微观结构与直拉单晶一样，同样为规整的金字塔结构。铸锭单晶就其硅片品质而言，已与直拉单晶无异，而铸锭单晶技术本质上是“物美价廉”的铸锭技术进一步升级，是多晶硅片从大晶粒到小晶粒再到单晶粒的方向转换，也印证了事物的发展是螺旋式上升、波浪式前进的辩证规律。



金刚线切割铸锭单晶硅片外观



铸锭单晶硅片与直拉单晶硅片制绒后对比

图 1.5 铸锭单晶硅片外观及与直拉单晶硅片碱制绒后对比

如图 1.5 所示，仅凭肉眼观察铸锭单晶硅片，与直拉单晶硅片几无区别，只能从是否存在四个圆弧型倒角来判断。

1.3.2 掺杂与光衰减

目前绝大多数 P 型单晶或多晶皆采用硼掺杂，由于硼氧四面体会带来电池的光致衰减（LID），在同样电阻率、同样硼掺杂浓度的前提下，硅片中的间隙氧杂质含量就会成为影响电池衰减的重要因素。对比铸锭单晶和直拉单晶的制造过程，单晶提拉旋转的过程中硅液与二氧化硅为原料的石英坩埚壁面冲刷腐蚀，将氧带入硅液从而进入晶体，而铸锭技术中硅液与石英陶瓷坩埚之间有层氮化硅涂层，防止了硅液与二氧化硅直接接触，大大减少了氧在硅晶体中的含量。目前直拉单晶可以做到的平均氧含量先进水平为 11-12ppma，而铸锭单晶只有该数值的一半左右，如图 1.6 所示。

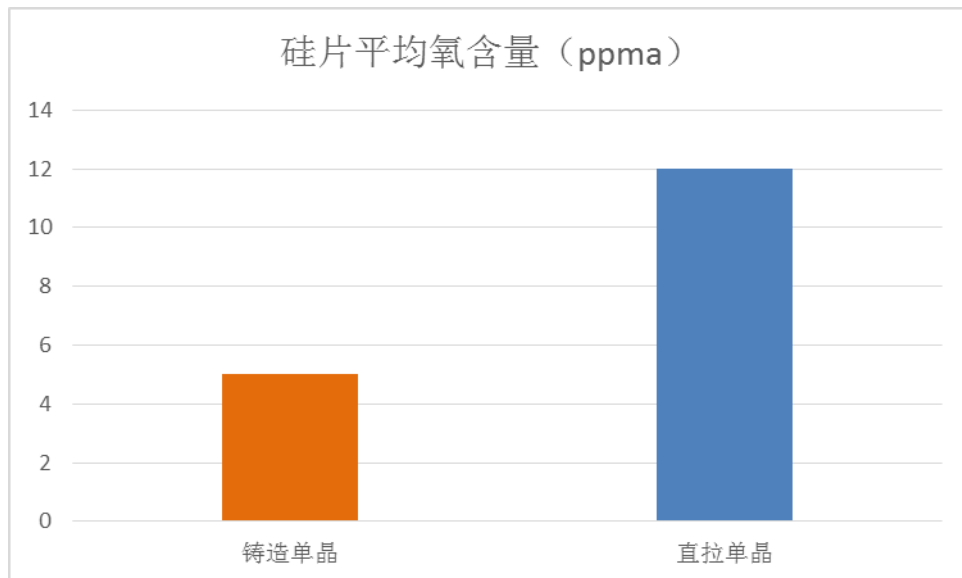


图 1.6 铸锭单晶与直拉单晶硅片平均氧含量对比

源自铸锭单晶硅片体内相对直拉单晶硅片低的硼氧复合体浓度，铸锭单晶光伏组件拥有较直拉单晶组件更优异的抗光致衰减表现，依据 IEC 标准对铸锭单晶和直拉单晶电池进行光致衰退测试，结果如图 1.7 所示。铸锭单晶显示了优异的光致衰减性能，相同剂量的辐照实验后，组件功率衰减为 0.96%，低于直拉单晶产品的 1.44%，也低于 IEC 指导标准的 2.0%。

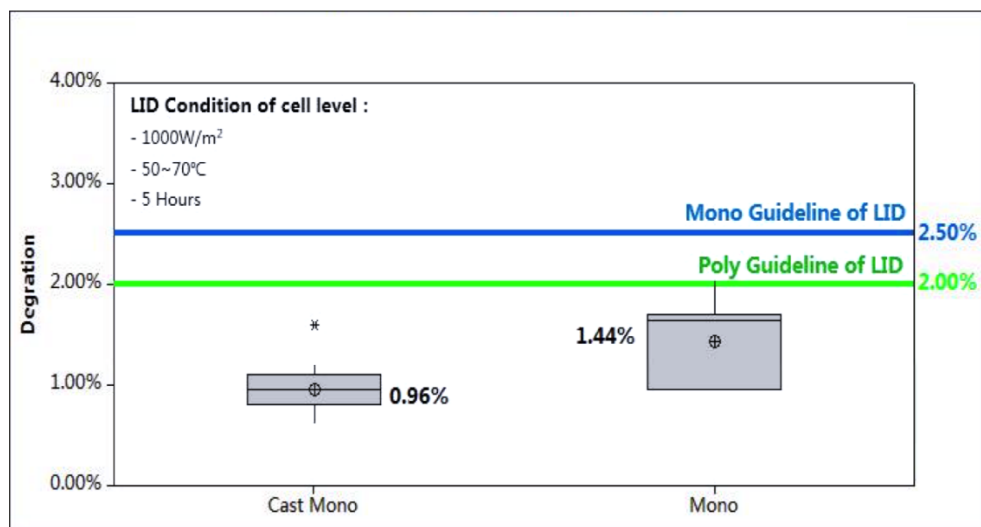


图 1.7 铸锭单晶与直拉单晶电池的光致衰减对比

1.3.3 电池效率与组件功率

成本与铸锭多晶几乎一样低的同时，铸锭单晶的电池效率也有大幅提升。铸锭单晶硅片可以兼容全部现有电池技术，与此同时，铸锭单晶硅片在电阻率的集中分布上与直拉单晶比较也有优势，如图 1.8 所示。

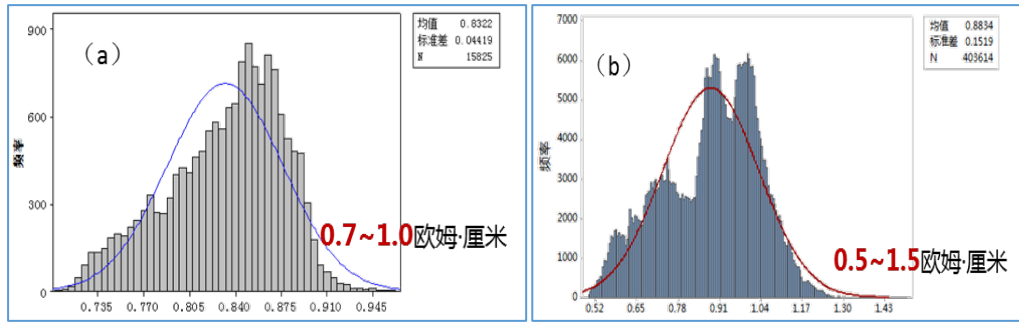
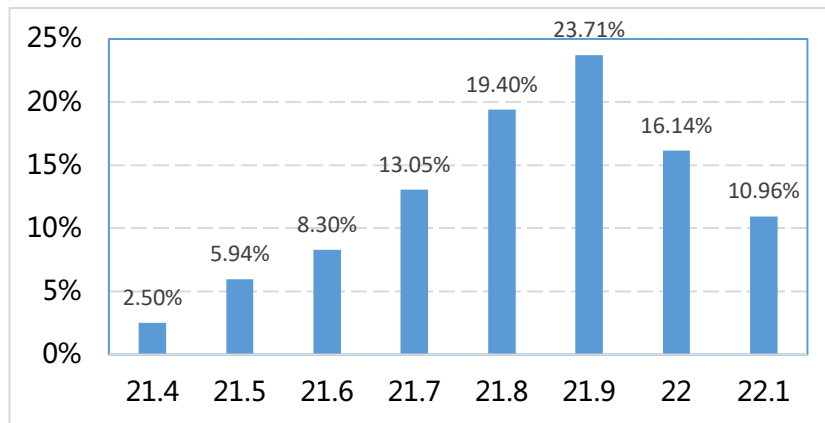


图 1.8 铸锭单晶硅片 (a) 与直拉单晶硅片 (b) 电阻率分布

铸锭单晶在多家电池制造商大批量应用结果显示，使用目前主流的 PERC 电池工艺，铸锭单晶与直拉单晶电池的转换效率绝对值差值，相差不到 0.3%。铸锭单晶硅片采用 PERC 工艺的电池效率分布如图 1.9 所示。



Process	QTY	Eta	Uoc	Isc	FF
PERC	100K	21.95	0.6732	10.020	80.98

图 1.9 铸锭单晶 PERC 电池效率分布

对于组件来讲，在相同电池工艺下，156.75mm 的铸锭单晶硅片与同尺寸带倒角的直拉单晶硅片所制作的组件可以做到同瓦输出。例如，铸锭单晶 72 片组件主流功率可以做到 380 瓦以上。相较于 158.75mm 尺寸的单晶全方片 72 版型组件，同尺寸铸锭单晶硅片 72 片组件的输出功率与前者相差也不到 5 瓦，如图 1.10 所示。

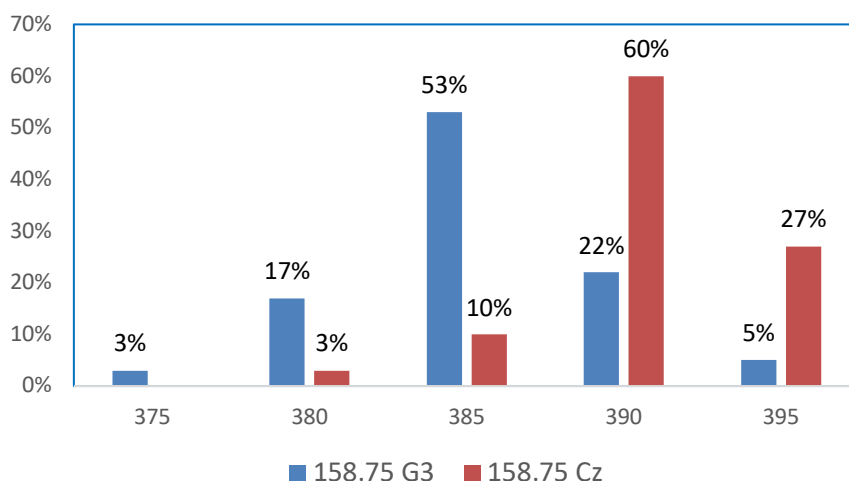


图 1.10 158.75mm 基于铸锭单晶与同尺寸直拉单晶全方片的 72 整片 PERC 组件功率对比

综上所述所述，铸锭单晶与直拉单晶产品的主要性能参数如表 1-1 所示。

表 1-1 铸锭单晶与直拉单晶主要产品规格及性能参数

技术路线		铸锭单晶		直拉单晶	
技术规格		G3		M2	
硅片	尺寸	158.75 方片		156.75 带倒角	
	面积 (cm ²)	251.99		244.32	
	厚度 (μm)	180		170	
	氧含量 (ppma)	5		12	
电池 (PERC)	效率	21.8%		22.0%	
	功率 (W)	5.44		5.35	
组件 (72 全片单玻)	功率 (W)	380		375	
	首年衰减保证	2.5%		3.0%	
	线性衰减保证/年	0.60%		0.70%	

作为一种新型产品，铸锭单晶的电池效率进一步提升仍有较大空间，进一步优化电阻率分布就是方向之一。与此同时，考虑铸锭单晶产品相较单晶产品更优异的首年 2.5% 的衰减保证，在实际发电运行中，铸锭单晶组件完全可以做到与直拉单晶组件同功率输出。

1.4 成本优势与市场价格

1.4.1 铸锭单晶产品成本优势

铸锭单晶技术产品的成本优势主要源自多晶硅原料、铸锭电耗两个环节。由于铸锭单晶对多晶硅料的纯度、致密度和外观形状要求较低，较直拉单晶所需硅料成本低约 18 元/kg（来源：PVinfolink 7 月数据）。

另一方面，铸锭单晶的铸锭电耗与直拉单晶的拉棒电耗相差悬殊。如图 1.11 所示，2018 年，光伏行业铸锭多晶平均电耗水平为 7.8kWh/kg-Si,直拉单晶电耗为 33.5kWh/kg-Si。两者的差距始终保持在 20-27kWh/kg 之间。

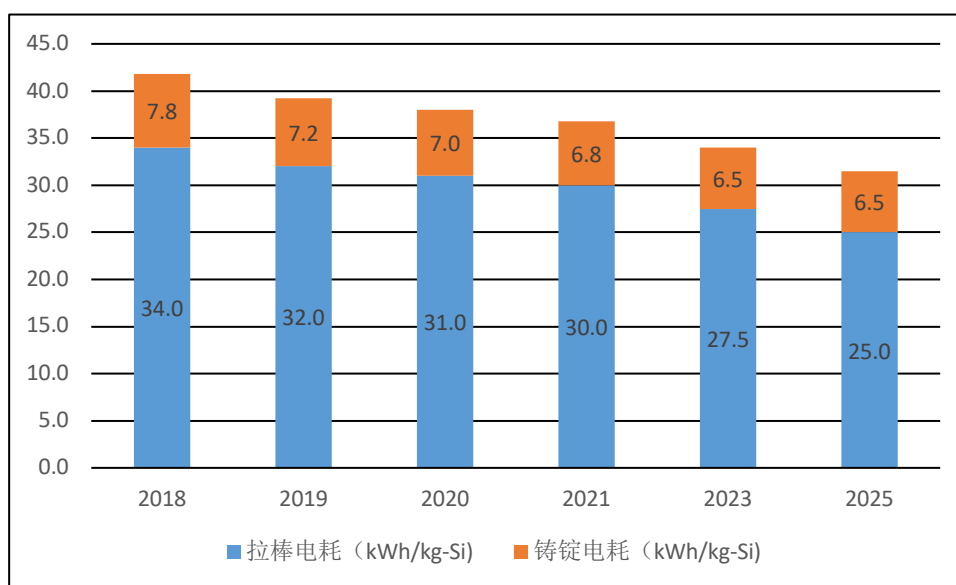


图 1.11 拉棒与铸锭电耗对比

数据来源：CPIA

1.4.2 铸锭单晶技术产品价格竞争力

由于在电池和组件加工环节，铸锭单晶产品与直拉单晶产品使用完全相同的生产装备、技术和辅材，铸锭单晶硅片的成本优势可以传导至电池和组件产品的价格上。目前，相同尺寸硅片条件下，铸锭单晶电池和直拉单晶电池效率差异约为 0.2%，组件产品功率差在 5W 以内。从节约电站 BOS 投资的角度考虑高功率组件应有的溢价，组件功率每高 5W，其溢价约为 0.02 元/W。

根据 PV Infolink 发布的光伏产品最新现货价格表数据显示，2019 年 7 月份，158.75mm 铸锭单晶硅片的价格为 2.85 元/片，比同样尺寸的单晶硅片价格低 0.62 元/片。由 158.5mm 铸锭单晶和直拉单晶生产的组件主档位功率分别为 380W 和 385W。与此同时，铸锭单晶组件市场报价低于直拉单晶组件约 0.05-0.1 元/W 左右，远超出应有的理论差价 0.02 元/W，给终端客户带来更低初始投入和更低度电成本。

1.5 铸锭单晶技术产业链匹配兼容性

1.5.1 硅片尺寸

铸锭单晶从凝固之初即为大面积立方体，而直拉单晶拉制的是一定直径的圆棒，须由圆棒开方成为长方体的硅锭。从方到方，比从圆到方更经济，铸锭单晶生产过程中切除余料的比例更低；同时铸锭单晶尺寸也更为灵活，一个大方锭变动开方尺寸，无论 157、158 还是

166 的尺寸，都轻而易举。与此同时，无论硅片大小，都是全方片，不必纠结于大倒角还是小倒角。相反对于单晶而言，小倒角意味着圆转方的得率低、硅片成本高，而大倒角，必然会在光伏组件上产生更多的留白，降低组件效率。灵活尺寸才更加“经济适用”，这一优势使得铸锭单晶更能满足客户的定制化尺寸需求。采用 166mm 边长的铸锭单晶硅片，叠加 MBB、PERC 电池工艺以及半片等组件技术，量产平均组件功率输出可达到 425~430 瓦。

1.5.2 制绒工艺

PERC、MBB、双面、MWT、半片、叠瓦、拼片……无论是什么样的电池组件技术，铸锭单晶都能完美适配。由于铸锭单晶硅片为全方片，可采用直拉单晶电池通用的碱制绒或高效多晶电池采用的黑硅制绒，对 PERC 电池、MWT 电池都显示出良好的适用性。其中对于 MWT 电池更能发挥其充分利用受光面积的优势、进一步提高组件效率。

第二章 组件产品与发电保障

2.1 铸锭单晶组件

从下游电池和组件产能匹配来看，现有行业内电池和组件产线都可以兼容铸锭单晶产品的生产，无需技术改造或新建产能。

当前，铸锭单晶组件产品的海外需求旺盛，海外客户对铸锭单晶的高性价比显著提升电站发电收益最看重。为了应对海外和国内即将启动的铸锭单晶产品市场，行业内部分领先企业已经在电池和组件产品的开发和生产技术储备提前布局，未来主要组件产品方向为高效铸锭单晶产品，涵盖 5BB、多主栅和双面的电池技术，组件技术兼容半片、高密度和双面组件等类型。行业内领先企业铸锭单晶主要组件类型和功率的爬升计划如图 2.1 和表 2-1 所示。

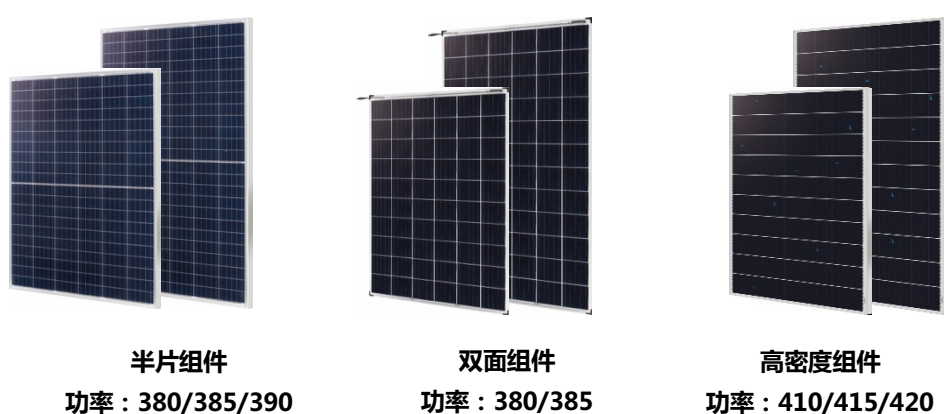


图 2.1 行业领先企业铸锭单晶组件功率爬升计划

从光伏组件未来的发展趋势来看，高功率密度和双面发电是两个主旋律。半片、叠瓦组件提升了电池排布的密度，双面组件提供了额外的背面发电增益。铸锭单晶技术面对这些电池和组件技术方向的变

化，积极参与其中，从产品设计、工艺改进到产业化匹配，一直走在前沿。行业中越来越多的领先电池组件制造商业开始扩大或布局铸锭单晶产品，这其中就包括协鑫集成、通威、阿特斯、正泰和日托等等。

表 2-1 行业领先企业铸锭单晶组件功率爬升计划 单位：W

组件类型 (72 版型)	Q3'19	Q4'19	Q1'20	Q2'20	Q3'20	Q4'20
铸锭单晶 PERC	380	380	385	385	390	390
铸锭单晶 PERC 半片	385	385	390	390	395	395
铸锭单晶 PERC 双面	375	375	380	380	385	385
铸锭单晶 PERC 半片双面	380	380	385	385	390	390
铸锭单晶叠瓦	410	410	415	415	420	420

2.2 发电性能保证

2.2.1 光致衰减

依据 IEC 测试标准，对大量铸锭单晶组件进行光致衰退测试，结果如图 2.2 所示。铸锭单晶组件经历了 60kWh/m² 的辐照量后，显示了优异的抗光致衰减性能，平均组件功率衰减为 0.79%，小于 IEC 标准的 5%。

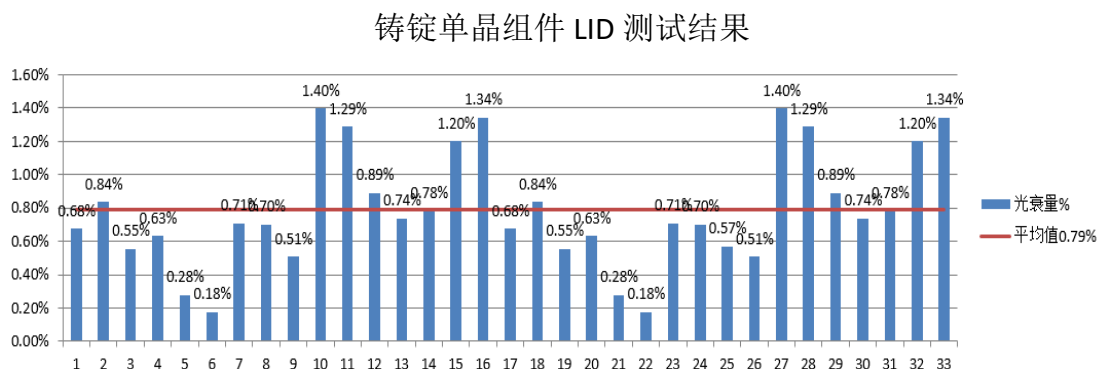


图 2.2 铸锭单晶组件光致衰退测试结果

2.2.2 可靠性

实验室加速老化测试结果显示，铸锭单晶组件具备优异的抗老化性能，如图 2.3 所示。铸锭单晶组件在经历了加严双倍 IEC 标准的温度循环（TC400）、湿热（DH1000）和湿冻（HF20）后，组件功率衰减分别为 0.87%、3.2%和 1.18%，均低于 5%的通过标准。

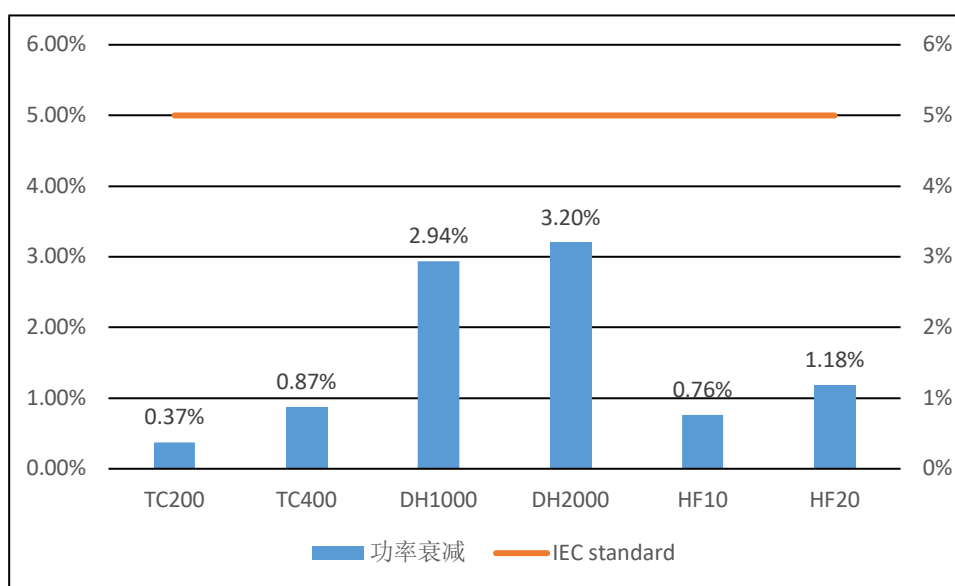


图 2.3 铸锭单晶组件双倍加严 IEC 标准可靠性测试结果

2.2.3 线性质保

基于铸锭单晶组件在实验室和户外实测发电性能的测试，铸锭单晶组件企业承诺的功率衰减为：首年功率衰减小于 2.5%，其余 24 年中，功率线性衰减保证,每年衰减小于 0.6%。目前，直拉单晶组件的首年功率衰减为 3%，剩余年限内功率衰减线性保证为每年 0.7%。

两者功率输出保证的差异如图 2.4 所示。按照以光伏组件 25 年承诺最低使用寿命计算，铸锭单晶组件比直拉单晶组件为广大终端用户提供了高出 2%的电力输出，以 380W 组件为例，25 年多发电约

260kWh，对一个 100MW 的大型地面电站来说，25 年累计多发电 7000 万 kWh。

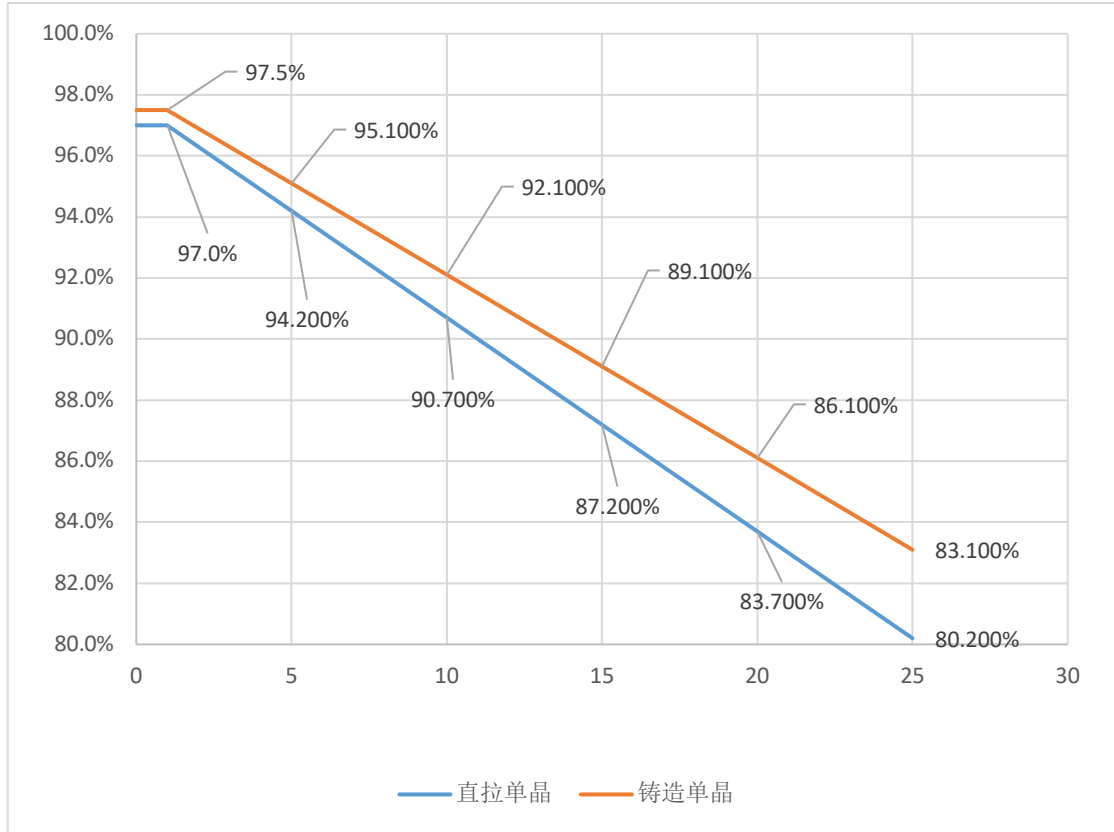


图 2.4 铸锭单晶与直拉单晶组件功率输出保证

第三章 发电收益

3.1 实证发电数据

保利协鑫在陕西榆林的第三方电站对铸锭单晶、常规多晶和直拉单晶三种光伏产品进行了实证测试，目前项目已经稳定运行超过 3 个月，积累了户外发电数据，电站外景如图 3.1 所示。电站方案基本信息见表 3-1 所示。



图 3.1 榆林实证电站

表 3-1 户外电站发电性能测试基本信息

项目地址	装机容量	安装倾角	逆变器
陕西榆林	100kW	最佳倾角 35°	华为 50KTL
硅片类型	电池技术	组件技术/版型	组件功率
铸锭单晶	PERC+5BB	全片+单面+单玻/72	365W
直拉单晶	PERC+5BB	全片+单面+单玻/72	375W
常规多晶	BSF+5BB	全片+单面+单玻/72	330W

截止 8 月 15 日的的数据表明，在电站装机容量、安装地点和安装方式相同的条件下，铸锭单晶产品单瓦发电量高于常规多晶组件 0.79%，高出直拉单晶组件 2.76%，如图 3.2 所示。关于铸锭单晶与其他类型产品的户外测试会继续进行，以提供长期的户外实证数据为行业做参考。

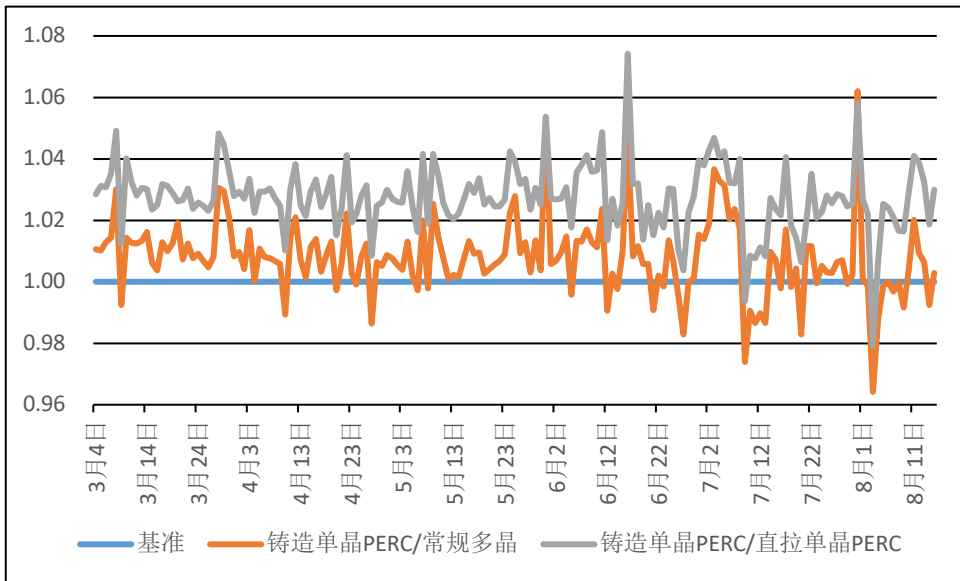


图 3.2 不同技术路线光伏组件户外发电性能对比

3.2 高性价比铸锭单晶组件助力平价上网

3.2.1 铸锭单晶组件是性价比最高的组件

在光伏电站应用端，投资方的关注重点是设备性价比与质量稳定性，即度电成本最低的技术路线。光伏电站度电成本是指光伏电站在整个寿命期内的发电成本，数值上等于电站寿命周期内各种成本（包括投资、运维成本、土地成本）的折现值除以寿命期内的发电量折现值。太阳能组件是影响度电成本的关键设备。

组件价格占光伏电站总投资的一半左右，组件技术路线的选择直接影响光伏电站的总投资。铸锭单晶产品本身价值内涵高，与单晶的功率差可控制在 5W 之内，成本方面又具有明显的比较优势，前面章节已经做了充分的论述，本节不再赘述。本节主要分析目前主流的两种直拉单晶产品与铸锭单晶产品在光伏电站应用端的表现，分析三种

组件的电站系统成本与度电成本。在同一地区，以 100MW 光伏电站建设为例，拟分别选用三种组件，其他设备、基础、设计等暂不考虑差异性，组件技术参数见表 3-2。

表 3-2 组件技术参数

组件参数	单面+单玻		
	M2 单晶 PERC	158.75 铸锭单晶 PERC	158.75 方单晶 PERC
功率 (W)	375	380	385
电池规格	156.75mm	158.75mm	158.75
组件尺寸	1956*991*35mm	1980*1000*35mm	1980*1000*35mm
首年衰减	3%	2.50%	3%
线性衰减	0.70%	0.60%	0.70%

电站设计方案与主要工程量见表 3-3。

表 3-3 电站设计方案与主要工程量

组件参数	单面+单玻		
	M2 单晶 PERC	158.75 铸锭单 晶 PERC	158.75 方单 晶 PERC
功率(W)	375	380	385
设计容量 (MW)	100	100	100
组件数量 (块)	266672	263200	259784
组串数量 (块一串)	28	28	28
汇流箱数量 (直流 24 进 1 出)	408	391	391
逆变器、箱变一体机数 量 (3125kW)	24	23	23
固定支架	4*14 横	4*14 横	4*14 横
支架套数	4762	4700	4639
支架基础数量	33334	32900	32473
一组支架的重量	813.24	819.16	819.16
支架重量 (t/MW)	38.73	38.49	37.99
容配比	1.371	1.389	1.407
占地面积(亩/MW)	23.76	23.76	23.14

表 3-3 可以很清楚的看到，组件功率越大，建设相同容量光伏电站使用的组件数量越少，支架、基础、电缆的用量减少，电站容配比

增加，土地面积减少，同时电站的施工费用也会降低。经过电站造价计算，除组件外的成本差异见表 3-4。

表 3-4 除组件外的系统成本

组件参数	单面+单玻		
	M2 单晶 PERC	铸锭单晶 PERC	M4 单晶 PERC
功率(W)	375	380	385
除组件外的系统成本 (元/W)	1.836	1.817	1.798
组件合理价格 (元/W)	X-0.019	X	X+0.019

表 3-4 可以发现组件价格与功率之间呈现一定的相关性：组件功率每提升 5W，可以带来系统成本下降 2 分钱。由此，不同类型组件之间的定价策略就很清晰的呈现出来，合理的组件价格差为：功率增加 5W 溢价不超过 2 分。

根据 PV infolink 8 月 21 日更新的直拉单晶 PERC 组件的现货价格为 1.92 元/W，铸锭单晶电池现货价格为 1.85 元/W。将组件价格代入，三种组件选型的电站投资见表 3-5。

表 3-5 不同组件的光伏电站总投资

组件参数	单面+单玻		
	M2 单晶 PERC	158.75 铸锭单晶 PERC	158.75 方单晶 PERC
功率(W)	375	380	385
组件价格 (元/W)	1.9	1.85	1.92
除组件外的系统成本 (元/W)	1.836	1.817	1.798
光伏电站总投资 (元/W)	3.736	3.667	3.718

使用铸锭单晶建设光伏电站的总投资最低，较直拉单晶低 0.05~0.07 元/W。铸锭单晶在光衰方面的表现更加优异，意味着使用铸锭单晶的光伏电站可以获取更多的电量，实证数据也证实了这一点。综合电站投资、发电量、土地成本，进行度电成本分析，边界条件假设与财务指标计算结果见表 3-6。

表 3-6 使用三种组件的度电成本分析与收益测算

组件参数	单面+单玻		
	M2 单晶 PERC	158.75 铸锭单晶 PERC	158.75 方单晶 PERC
功率(W)	375	380	385
光伏电站总投资 (元/W)	3.736	3.667	3.718
衰减率 (首年/2~25 年)	3%/0.7%	2.5%/0.6%	3%/0.7%
边界条件假设			
项目地	江苏北部地区		
装机容量	100MW		
基准折现率	7%		
电价 (元/kWh)	0.391		
最佳倾角峰值利用小时 (h)	1580		
系统效率	83%		
运维成本 (元/W)	0.04	0.04	0.04
土地租金 (元/亩)	600	600	600
占地面积 (亩)	2376	2376	2314
财务评价指标			
度电成本 (元/kWh)	0.3442	0.3344	0.3425
全部投资内部收益率 (所得税后)	6.74%	7.13%	6.81%
资本金内部收益率	8.94%	9.98%	9.12%
年均发电量 (万 kWh)	11848	12039	11848
年均销售收入 (万元)	4633	4707	4633

使用铸锭单晶组件建设光伏电站，度电成本最低，投资收益最好。较直拉单晶度电成本低接近 1 分钱，全部投资内部收益率提高约 0.3%~0.4%，资本金内部收益率提高约 1%，年均发电量提高约 191

万度（1.6%），年均售电收入增加 74 万元。因此使用铸锭单晶组件是目前市场上具有高性价比的技术路线。

3.2.2 平价上网解决方案

1. 平价项目实施地区

随着光伏技术不断进步，成本不断下降，光伏发电平价上网会由点及面逐步实现。影响光伏发电实现平价的因素既包括系统成本，也包括地区的光资源、电价、电力消纳、土地等非技术成本。综合来看，当前我国河北、山东、东北三省、山西、陕西等地申报光伏平价基地比较有优势，投资企业可以重点关注。

2. 组件技术路线的选择

投资企业需要选择一款性价比高的组件，确保平价项目顺利实施。现在市场上的主流组件类型有直拉单晶、多晶、铸锭单晶、HIT、IBC，各类技术路线的对比见表 3-7。

表 3-7 组件技术路线对比

	多晶	单晶 PERC	铸锭单晶 PERC	HIT	IBC
电池效率	18.8%	22%	>21.7	>23%	>23.5%
组件功率 (W)	275	315	310	325	340
组件功率初始光衰	2.5%	3%	2.5%	<1%	<1%
经年光衰	0.7%	0.7%	0.6%	0.4%	/
成本	低	中	中低	高	极高
性价比	效率已到瓶颈	性价比高	性价比优异	低光衰，效率提升潜力最大，成本高	效率最高，成本最高，工艺复杂

铸锭单晶组件具有成本的比较优势与低衰减率，是一款性价比优

异的组件。同时，铸锭单晶一样能够叠加双面、半片、叠瓦、MBB 等技术。尤其是双面技术，双玻双面组件的经年光衰更低（0.5%），且背面发电增益不同场景可达到 5%~25%，性价比更高。

平价项目推荐组件：铸锭单晶高效半片双面双玻组件&铸锭单晶高效半片组件。组件选择需结合光伏电站建设场景：

- 1) 在地表反射率高的场景（沙地、雪地、砾石等）选用铸锭单晶高效半片双面双玻组件。尤其是项目自身有高支架要求的农光互补项目，反面增发量更加可观，可以大幅降低电站度电成本，提高投资收益。
- 2) 在反射率较低的场景，选用铸锭单晶高效半片组件，效率更高，进一步降低电站系统成本。



GCL 铸锭单晶高效半片双面双玻产品

GCL-M3/72GD(F) 380-390 W

- 超高组件功率**
如多晶电池的直角结构，同等面积下比单晶多 2%有效面积
- 背面发电效率增益最高可达到25%**
双面率大约 70%
- 30mm边框可选择**
适配跟踪支架

GCL 协鑫

图 3-3 铸锭单晶高效半片双面双玻组件



图 3-4 铸锭单晶高效半片双面双玻组件

3. 设计方案选择的建议

- 3.1 铸锭单晶组件耐压等级全面升级到 1500V，可以增加组串的电池数量，降低支架、电缆、汇流箱的投资，提高的直流电压等级可以较少线损，提高系统效率。
- 3.2 使用双面双玻组件优先选用组串式逆变器，多路 MPPT 可以适应双面发电的不均衡性，提高系统效率，提高发电量。
- 3.3 支架选型方面，光资源好、高直射比的平地项目优先选择水平单轴跟踪支架，水单轴跟踪支架与双面组件结合发电量更高。

4. 案例分析

拟在青海格尔木地区建设 100MW 光伏电站，地表为戈壁滩，冬天为雪地，地表反射率高。对比分析铸锭单晶高效半片 380W 组件与高效半片双玻双面 275W 组件，平单轴与固定支架四种组合方案度电成本与电价。双面组件发面增发 8%，平单轴支架较固定支架增发

12%。计算结果见下表 3-8。

表 3-8 四种设计方案度电成本分析

组件参数	铸锭单晶	铸锭单晶	铸锭单晶	铸锭单晶
	高效半片组件	高效半片+ 双面双玻组件	高效半片组件	高效半片+ 双面双玻组件
功率(W)	380	375	380	375
支架形式	固定支架		平单轴支架	
工程造价（元/W）	3.8	4.033	4.209	4.466
峰值有效利用小时	2200	2376	2464	2640
系统效率	83%	83%	83%	83%
首年发电小时(h)	1780	1923	1994	2136
组件衰减	2.5%/0.6%	2.5%/0.5	2.5%/0.6%	2.5%/0.5
运维成本（元/W）	0.03	0.03	0.035	0.035
度电成本	0.2357	0.2283	0.2337	0.2281
电价（全投资IRR7%反算）	0.2739	0.2649	0.2715	0.2647

结论：

1. 使用双玻双面组件（带边框）会增加投资约 0.21 元/W，发电量提升提高 8%，可降低度电成本约 0.007 元/kWh，降低电价 0.009 元/kWh，优势明显。
2. 使用高效半片双面双玻组件+平单轴支架方案度电成本最低，竞价能力最强，是青海格尔木地区最具竞争力的技术路线与设计方
案。

第四章 铸锭单晶技术与应用前景

4.1 铸锭单晶硅片技术路线

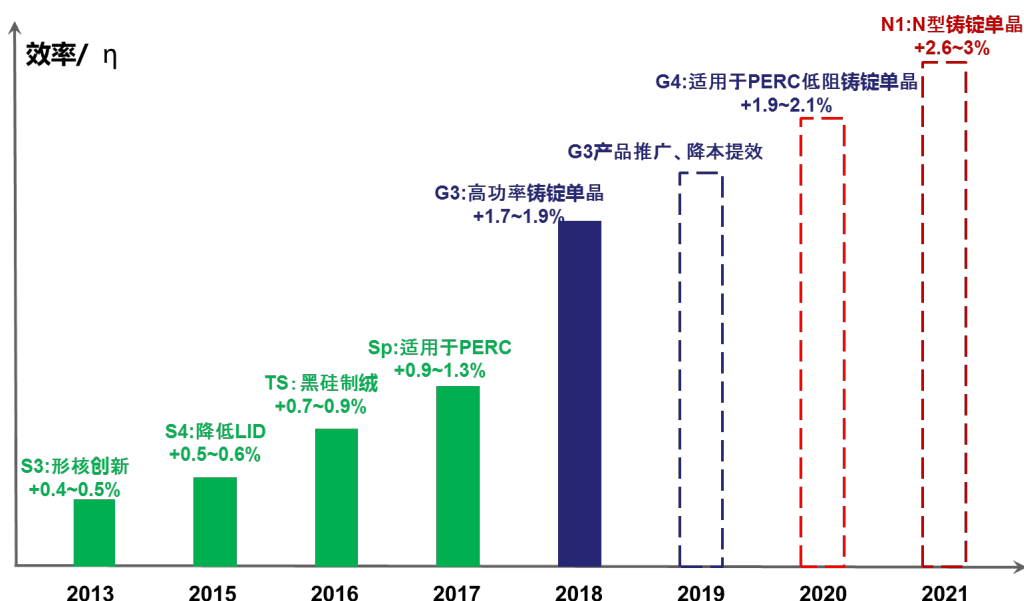


图 4.1 保利协鑫铸锭单晶技术路线

未来，铸锭单晶硅片产品通过铸锭形核技术提升、掺杂技术应用、电阻率控制、氧含量降低等措施，不断提升硅片性能；铸锭单晶硅片也可以通过稳定生产工艺、籽晶的低成本化技术，等进一步降低生产成本。铸锭单晶技术的技术路线如图 4.1 所示。

今明两年，保利协鑫将继续开发“G4 铸锭单晶”产品，适用于 PERC 电池工艺的低电阻铸锭单晶，可以提升电池效率绝对值 1.9-2.1%。届时，铸锭单晶与直拉单晶的电池效率将持平，铸锭单晶组件和直拉单晶组件可以做到“同瓦输出”，考虑到铸锭单晶首年 2.5% 的衰减保证（小于直拉单晶 3% 的首年衰减保证），铸锭单晶组件实

际运行中的功率输出将更具优势。另外，铸锭单晶技术可以应用于 N 型硅片，满足更高效率的 N-PERT，N-TOPCON，HJT 等电池的需要。

4.2 大硅片与组件功率提升

铸锭单晶在适应硅片大尺寸的发展趋势上也有着独特的优势。得益于铸锭工艺中方坩埚的使用，在切方环节，铸锭单晶在尺寸不断扩大的趋势中能够保持较直拉单晶产品较低的材料损耗。这使得铸锭单晶技术在未来硅片尺寸扩大、叠加不同组件工艺的发展需求中抢占先机。

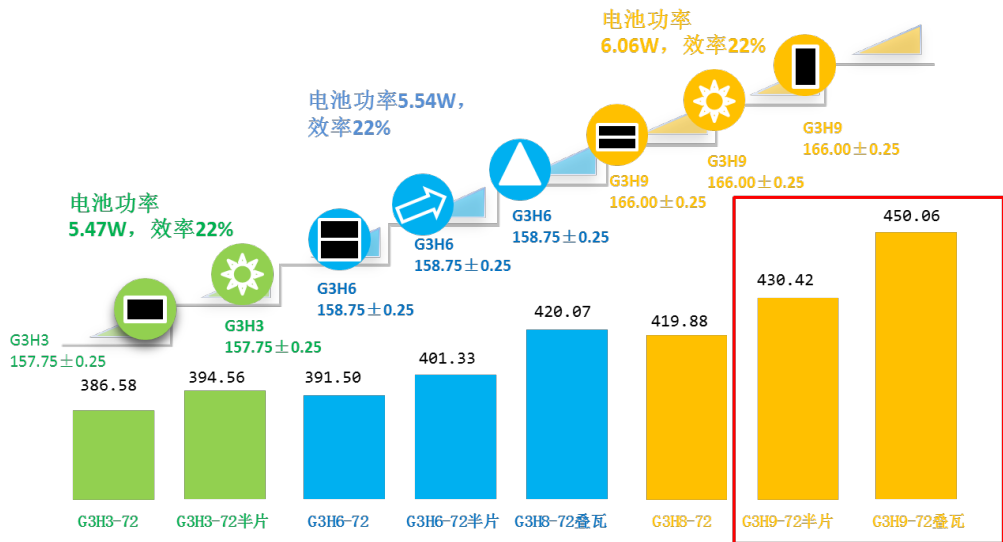


图 4.2 铸锭单晶硅片尺寸与电池、组件功率提升路线

如图 4.2 所示，仅仅考虑硅片尺寸提升和组件半片、叠瓦等新技术的组合，在电池效率保持不变的情形下，光伏组件功率即将迈入 400W+ 的时代，谱写光伏产业链和市场新的篇章。

4.3 铸锭单晶硅片供应计划

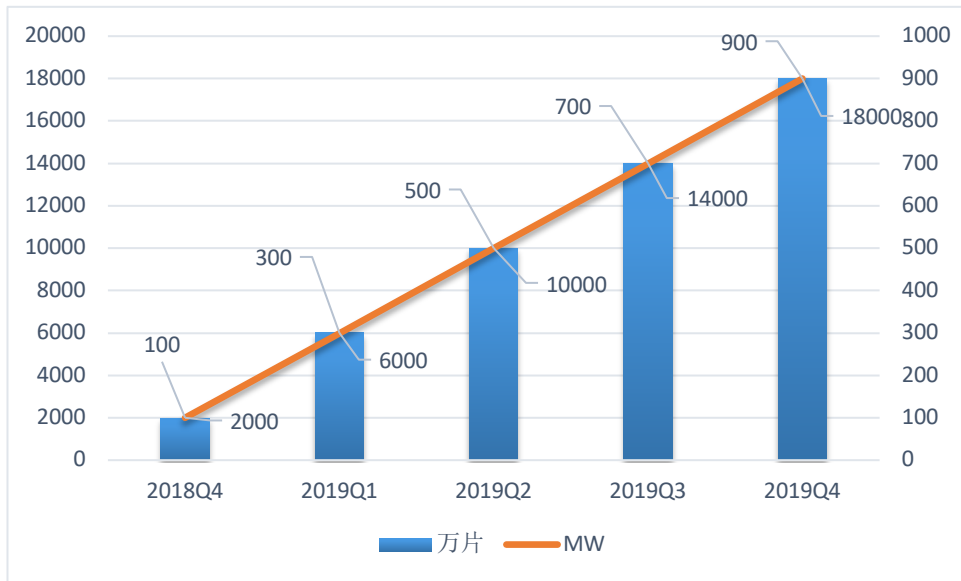


图 4.3 协鑫铸锭单晶硅片产能爬升计划

根据保利协鑫的供应计划，如图 4.3 所示。通过增加炉台改造数量、单台装料量提升，不断快速增加总产能，2019 年铸锭单晶的产能将达到 8~10GW。另外，行业中的其他主要硅片供应商赛维和荣德新能源也在不断提升各自铸锭单晶产品的技术成熟度，以满足客户日益增长的需求。预计，全行业铸锭单晶和类似产品将在保利协鑫的引领下快速成熟、扩展。

最后，铸锭单晶产品作为一个新兴事物，仍然有一些需要进一步改善提高的方向。相信通过硅片的研发、制造端的不断努力，以及产业链上下游的紧密配合，高性价比的铸锭单晶技术和产品在未来一定会大放异彩，不仅能为企业带来可观利润，更能为光伏发电平价上网贡献一份力量。

结束语

中国光伏产业近十年的快速发展得益于全球市场的兴起、得益于国家政策的引导、得益于产业技术的不断突破创新。

光伏行业未来发展的趋势就是平价上网并不断降低发电成本。包括光伏组件在内的主要光伏发电核心设备产品仍然有不断降本的压力和潜力。中国光伏制造产业生态的发展也越来越成熟，不同技术路线之间的竞争与合作从来也没有停止。铸锭单晶技术作为晶体硅技术路线中的新成员，根源于晶体硅技术，也促进了晶体硅技术的迭代和跨越！未来的光伏制造，唯有不断创新、竞争、合作与再创新才是出路！

致谢

本白皮书在编写过程中得到了从电站开发商、电站规划设计院、光伏制造企业、光伏设备和材料供应商、光伏协会、高等院校和科研机构、光伏行业媒体及大众媒体以及广大关心我国太阳能光伏行业发展的各界人士的关心和帮助!

这里也要特别感谢阿特斯阳光电力、正泰新能源、通威和日托等光伏电池和组件企业在铸锭单晶电池和组件产品的生产数据收集中所提供的大力协助!