

# 基于成本和区域优势视角的光伏多晶硅 产业发展格局

陈敏<sup>1</sup> 陈辉<sup>2</sup> 常欣<sup>2</sup> 严大洲<sup>1</sup> 万焯<sup>1,2</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 洛阳中硅高科技有限公司, 河南 洛阳 417023)

**[摘要]** 光伏发电因具有清洁、安全、资源丰富等优点,正逐渐占据世界能源格局的重要席位,未来将成为世界能源供应的“主力军”之一。随着光伏产业链上、下游的迅猛发展,作为基础原材料的多晶硅价格持续高涨,导致多晶硅产业投资热度不断高涨。本文介绍目前光伏多晶硅产业的发展现状、未来趋势,分析对比目前国内外多晶硅生产采用的主要技术路线三氯氢硅法和硅烷法,剖析三氯氢硅法的能耗及成本构成,基于成本和区域优势的视角,对光伏多晶硅产业发展格局提出合理的研判和建议。多晶硅的生产成本主要受电耗和金属硅粉价格影响较大,未来多晶硅产业将向能源禀赋且硅矿产资源丰富的西部地区转移。

**[关键词]** 多晶硅; 改良西门子法; 硅烷法; 成本控制; 能耗; 区域优势; 产业转移

**[中图分类号]** TQ127.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1008-5122(2023)01-0053-12

**DOI:**10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2023.01.008

## 0 前言

我国作为能源大国,为了提高广大人民群众物质生活水平和实现社会的可持续发展,近年来一直致力研究“碳达峰”与“碳中和”<sup>[1]</sup>,以期减少温室气体排放,建立低能耗和低污染的经济体系。光伏产业作为实现“双碳”目标的最重要与有效途径之一,近年来得到诸多政策支持,迎来了快速发展的机遇。多晶硅是光伏产业的基础原材料,受2018年以来价格持续走低的影响,新增产能有限。2020年9月,我国正式提出“2030年碳达峰、2060年碳中和”的目标后,光伏行业得到快速发展,多晶硅价格不断推高,多晶硅产能也在不断快速扩张。据统计,

2021年我国新增光伏装机54.93 GW,同比增长14.0%,多晶硅价格也随之前上涨至269元/kg;2022年1—6月,我国光伏新增装机达30.88 GW,同比增长137.4%,多晶硅价格回落至220元/kg后再次上涨并维持高位。同时,2022年2月俄乌冲突开始推高欧洲地区的能源价格,加剧了全球能源危机,进一步促进海外光伏的市场需求。在国内与海外需求共振的作用下,硅料价格持续上涨至10月的308元/kg(含税),创下近两年新高。多晶硅价格的持续高位和产业投资的高回报率,引得资本市场的密切关注,随之迎来国内众多多晶硅企业的纷纷扩建和其他企业的进入。由此可见,在不久的将来,国内多晶硅企业的发展格局将进一步出现调整。

## 1 国内外光伏多晶硅产业现状

### 1.1 全球多晶硅产业发展概况

据统计,2020年全球多晶硅退出产能约10万t,高于新增产能。因资源价格、成本、技术等因素而失去竞争力,韩国的OCI、韩华以及国内部分企业退出市场,最终全球多晶硅有效产能为60.8万t,与上年度67.5万t相比降低了9.9%;2020年全球多晶硅实

**[收稿日期]** 2023-01-02

**[作者简介]** 陈敏(1981—),女,本科,湖南湘乡人,高级合规师,中级会计师,主要负责研发项目财务管理工作。

**[通信作者]** 万焯,男,博士,正高级工程师,主要从事电子信息材料和有色金属冶金研究。

**[引用格式]** 陈敏,陈辉,常欣,等.基于成本和区域优势视角的光伏多晶硅产业发展格局[J].绿色矿冶,2023,39(1):53-64.

际产量 52.1 万 t, 与上年度 50.8 万 t 相比增加 2.6%。其中, 电子级多晶硅产量约为 3.46 万 t, 太阳能级块状多晶硅产量约为 47.7 万 t, 颗粒硅产量约为 9 900 t, 在多晶硅总产量中的占比分别为 6.6%、91.5% 和 1.9%。

图 1 是全球多晶硅产量发展趋势图。从图 1 可以看出, 在全球主要多晶硅生产国家中, 2021 年中



图 1 全球多晶硅产量发展趋势

美国方面, 2021 年 Hemlock 多晶硅产量维持在 1.8 万 t; REC 多晶硅产量约 900 t, 全部为电子级多晶硅, 较 2019 年度的 3 109 t 减少了约 71%。REC 将其颗粒硅生产重心移到在中国陕西省榆林合资建立的天宏瑞科公司, 其美国工厂维持电子级多晶硅、硅烷气体生产; 2019 年 Wacker 的美国多晶硅工厂产量约 0.6 万 t, 2020 年因安全事故停产, 当年产量受到影响。

韩国仅有的两家多晶硅企业 OCI 和韩华在 2020 年纷纷宣布退出本土太阳能级多晶硅业务。2020 年 OCI(含其马来西亚工厂)的多晶硅总产能由 2019 年的 7.9 万 t 缩减为 3.4 万 t, 产量约 2.76 万 t。由于 2019—2020 年多晶硅价格一直处于低位, 多晶硅售价已无法覆盖 OCI 的多晶硅料生产成本, 因此 OCI 与中国优势企业的差距逐渐拉大, 其基础化学部门在过去多个季度持续亏损。2021 年, 韩国 OCI 宣布削减太阳能多晶硅产能, 将其本土生产线改为生产电子级多晶硅, 产能 5 000 t, 其他产能陆续退出, 仅保留马来西亚工厂生产太阳能级多晶硅, 2020 年产能由 2.7 万 t 扩展为 3 万 t, 并于 2022 年扩产到 3.5 万 t。

欧洲多晶硅生产主要集中于 Wacker, 其 2021 年多晶硅总产能达 8 万 t, 总产量约 6.8 万 t, 其中德国工厂产量约 5.9 万 t, 美国工厂产量约 0.9 万 t。欧洲其他多晶硅企业, 包括 PVCrystalox、SunEdison (MEMC) 在欧洲的工厂 JSS、SolarWorld 等, 一直处

国以 50.2 万 t 的产量位居全球首位, 占比 74.6%, 2022 年底中国多晶硅产量将达到 81.1 万 t, 占全球多晶硅产量的 82.7%。德国则以 6.8 万 t 产量(含 Wacker 美国工厂 0.9 万 t) 居全球第二位, 韩国以 2.76 万 t 产量(韩国国内 1 000 t 和 OCI 马来西亚工厂 2.66 万 t) 位居第三位; 美国和日本产量分别为 1.69 万 t 和 1.17 万 t, 分列第四位、第五位。

在停产状态。

日本多晶硅企业以生产电子级多晶硅为主, 日本国内最大的多晶硅工厂为德山曹达(Tokuyama)。2016 年 Tokuyama 将其马来西亚多晶硅工厂出售给韩国 OCI 公司后, 便专注于日本国内的多晶硅工厂生产, 2021 年其日本德山工厂多晶硅产量约 6 200 t。三菱和住友的多晶硅料主要定向供应给它们的硅片合资公司 Sumco 使用。这几家企业的多晶硅总产量约 1.17 万 t。而一些老多晶硅工厂(如 JFSteel、NSsolar 和 JapanSolarSilicon 等) 仍处在关停状态。

## 1.2 全球主要多晶硅企业发展情况

表 1 为全球产量前十的光伏多晶硅企业。从表 1 可以看出, 有 6 家企业的年产量规模超过 5 万 t。2020 年, 全球产量前十的多晶硅企业总产量为 48.7 万 t, 约占全球总产量的 88.3%; 2021 年, 全球产量前十企业的总产量达到 60.82 万 t, 占全球总产量的 90.3%。

从 2021 年开始, 多晶硅价格迎来了持续高涨, 为了追求资本回报, 国内多晶硅企业纷纷开始扩建产能, 同时还有大量新建企业开始投资多晶硅厂建设。根据中国有色金属工业协会硅业分会的统计, 2022—2025 年, 预计国内多晶硅产能规模将从 100 万 t/a 增加至 400 多万 t/a, 具体见表 2。在技术上, 国内新增产能仍以三氯氢硅氢还原法为主, 单线多晶硅产能首次达到 5 万 t/a。

表1 全球产量前十的光伏多晶硅企业

序号	企业名称	国别	技术路线	2018 产量/万 t	2019 产量/万 t	2020 产量/万 t	2021 产量/万 t
1	四川永祥	中国	三氯氢硅法	1.9	6.5	8.62	10.77
2	协鑫集团	中国	硅烷法	0.3	0.3	0.40	1.00
			三氯氢硅法	6.4	7.4	7.10	9.40
3	东方希望	中国	三氯氢硅法	1.6	2.8	4.00	8.00
4	新特能源	中国	三氯氢硅法	3.4	5.0	6.50	7.82
5	新疆大全	中国	三氯氢硅法	2.3	4.2	7.73	7.54
6	Wacker	德国	三氯氢硅法	5.4	5.1	5.90	6.00
		美国	三氯氢硅法	1.2	0.6	0.90	2.00
		韩国	三氯氢硅法	4.9	3.9	0.10	0.39
7	OCI	马来西亚	三氯氢硅法	1.3	2.2	2.66	3.00
8	亚洲硅业	中国	三氯氢硅法	1.4	2.0	2.10	1.90
9	Hemlock	美国	三氯氢硅法	1.6	1.6	1.60	1.80
10	内蒙古东立	中国	三氯氢硅法	0.7	0.8	1.14	1.20
全球产量前十合计/万 t				32.4	42.4	48.70	60.82
全球总产量/万 t				44.6	50.8	55.20	67.30
全球产量前十企业的占比/%				72.6	83.5	88.30	90.30

表2 国内主要多晶硅企业新建和扩产情况

万 t/a

厂家	2022 年	2023 年	2024 年	2025 年	备注
保利协鑫	22	36	57	57	颗粒硅 50 万 t, 棒状 6 万 t, 电子级 1 万 t
永祥股份	23	33	33	47	四川 30 万 t, 云南 8~9 万 t, 包头 8~9 万 t
新特能源	20	30	40	50	新疆 30 万 t, 包头 20 万 t
新疆大全	12	22	22	32	新疆石河子 12 万 t, 包头 20 万 t
东方希望	10	13	25	25	新疆 13 万 t, 宁夏 12.5 万 t
亚洲硅业	5	9	9	9	青海 2+3+4 万 t
聚光硅业	3	8	15	18	巴彦淖尔 3 万 t, 乌海 15 万 t
其他	5	4	4	4	-
新进企业	16 家, 产能 190+ (具体投产时间不确定)				青海丽豪 20 万 t, 其亚铝业 10 万 t, 新疆晶诺 10 万 t, 宝丰能源 15 万 t, 合盛 20 万 t, 信义 20 万 t, 上机数控 10 万 t, 阿特斯 10 万 t, 天合光能 10 万 t, 润阳 10 万 t, 江苏阳光 10 万 t 等
产能总计	100	205	296	400+	可满足 1 200 GW 装机需求量

## 2 国内外光伏多晶硅关键技术路线

### 2.1 光伏多晶硅主要制备技术

光伏多晶硅作为硅基电池的原材料,其纯度为 99.999%~99.9999%。光伏多晶硅材料的生产方法有三氯氢硅法、硅烷法、冶金法、物理法等<sup>[2-5]</sup>。其中,冶金法和物理法受产品质量稳定性和实际成本竞争力所限,未见大批量商业化市场采用。随着光伏市场竞争对产品质量要求的日益严苛以及三氯

氢硅法成本的大幅降低,有关冶金法或物理法的技术研究和产业化探索日渐减少,这两种方法已基本不具备竞争能力。因此,目前多晶硅生产方法主要为两种:三氯氢硅法<sup>[3-4]</sup>和硅烷法<sup>[5]</sup>。这两种方法均可用化学气相沉积炉(CVD)和流化床反应器(FBR)分别生产棒状多晶硅和粒状多晶硅。

#### 2.1.1 三氯氢硅法(改良西门子法)

1955年,西门子公司开发了利用氢气和三氯氢硅在硅芯发热体上沉积硅的生长工艺(即西门子

法),并于1957年实现工业化生产,后来工艺进行改良,增加尾气回收利用装置,并采用冷氢化技术替代热氢化技术,该方法即为改良西门子法,也称三氯氢硅法。改良西门子法生产多晶硅的工艺流程如图2所示,主要包括3个部分:一是三氯氢硅制备,即采用工业硅粉与氯化氢或四氯化硅( $\text{SiCl}_4$ )以及氢气

反应制备三氯氢硅( $\text{SiHCl}_3$ )<sup>[6]</sup>;二是反应尾气回收与三氯氢硅的分离提纯<sup>[7]</sup>;三是多晶硅气相沉积,即三氯氢硅和氢气在钟罩式的多晶硅还原炉内,于通电加热至1050~1150℃的硅芯表面进行沉积反应,从而生长成多晶硅棒。

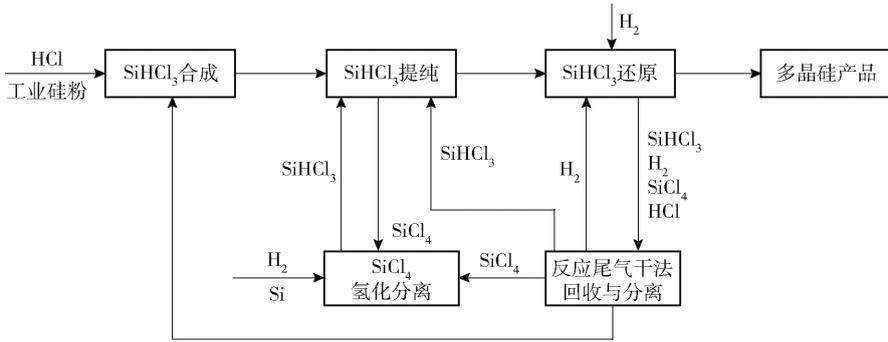


图2 改良西门子法工艺流程图

### 2.1.2 硅烷法

硅烷法是目前生产多晶硅的另一技术方向,其工艺流程如图3所示。硅烷和三氯氢硅的分子化学结构存在差异,为硅烷法应用创造了较好的前提条件。硅烷含硅量可达到87.5%,而三氯氢硅含硅量仅有20.7%,硅烷含硅量是三氯氢硅的4.2倍之多,且硅烷分解后产生的尾气主要是氢气,成分简单,所以硅烷法分解和尾气回收环节物料周转量少,较三氯氢硅法的尾气回收和利用更简单;此外,硅烷分解温度低,在温度700℃下即可反应,因此还原电耗相对较低。

目前,硅烷法生产多晶硅技术的重要环节主要包括两部分:即硅烷来源和多晶硅沉积反应器形式。硅烷可以由四氯化硅和四氯化硅得到;而多晶硅反应器包括流化床反应器(FBR)<sup>[8]</sup>和化学气相沉积炉式(CVD)<sup>[9]</sup>两种,前者产品为颗粒状多晶硅,后

者产品为棒状多晶硅。目前国内采用硅烷法技术生产多晶硅的企业仅有陕西天宏瑞科和保利协鑫两家,海外采用硅烷法生产颗粒硅的主要企业为美国REC,但部分产线已于2019年第二季度停产。由于利用硅烷法生产棒状多晶硅具有沉积速度慢、能耗高等问题,故硅烷法主要用于生产高纯度的区熔用高纯多晶硅,而采用流化床反应器生产颗粒多晶硅具有连续生产的优势,目前主要用于生产光伏级多晶硅。

当前硅烷的制备技术主要有以下两种路线:一是SunEdison的美国工厂以磷肥厂副产物四氯化硅为原料,与四氢化铝钠( $\text{NaAlH}_4$ )反应生成硅烷,将铝和钠以氟化铝、氟化钠的盐类形式回收,该方法随着SunEdison的美国工厂和中国六九硅业停产被宣告停用;二是REC、江苏中能、陕西天宏瑞科、河南硅烷科技及其他在研究企业以四氯化硅为原料,采

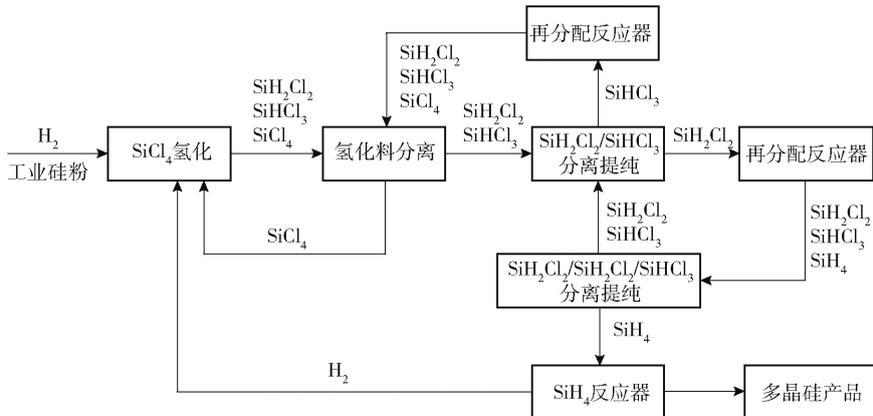


图3 硅烷法工艺流程图

用现有三氯氢硅法的冷氢化技术,将三氯化硅转化为二氯二氢硅,再将二氯二氢硅继续进行歧化反应制备出硅烷<sup>[10]</sup>,此方法已成为硅烷生产的主流技术。

## 2.2 两种技术路线的优劣势对比

与硅烷流化床 FBR 法相比(表 3),改良西门子法生产工艺流程简单,易于控制,安全系数大,产品纯度高、质量好,同时成本低,而且可将尾气中的各

种组分全部回收利用<sup>[11-12]</sup>,从而大大降低原料消耗,容易实现闭环生产工艺流程,对环境污染小,可实现绿色生产,已成为目前生产、扩建和新建高纯度太阳能级多晶硅的主流技术路线。目前该技术的发展目标主要是提高生产效率,提升产品质量,降低物耗、能耗等多晶硅生产成本,为光伏发电的高转化率、低成本、长寿命及商业化应用创造前提条件。

表 3 三氯氢硅法和硅烷法的对比情况

生产方法	三氯氢硅法(改良西门子法)	硅烷流化床(FBR)法
规模化情况	工艺成熟,适合大规模生产	少数厂家使用
反应温度/℃	1 050 ~ 1 150	550 ~ 700
综合电耗/(kW·h·kg <sup>-1</sup> )	<60	<40
沉积载体	硅芯	颗粒籽晶
转化率/%	10 ~ 13	>95
生产连续性	批次生产,需要进行装炉和拆炉作业	可连续不间断生产
副产物	还原主要副产物 SiCl <sub>4</sub> 需要冷氢化处理	反应副产物主要为 H <sub>2</sub> ,可以回收循环利用
产品质量	纯度 11 N 以上,产品纯度高,可生产优质太阳能级和电子级多晶硅	6 ~ 8 N 产品纯度不高,基本能达到太阳能级的要求
单晶优势	可以应用至 N 型电池	由于包覆氢气及金属杂质含量高,无法单独使用
安全性	工艺成熟,操作安全	SiH <sub>4</sub> 易燃易爆

根据表 3 中相关生产条件、能耗、产品质量方面的对比分析,硅烷流化床(FBR)法在综合能耗方面比三氯氢硅法低 33%,产品转化率方面优势更加明显,但是产品存在金属杂质含量高和氢气夹带的问题,难以满足 N 型单晶电池的应用要求,这也是该技术路线在未来进步和突破的方向。

## 3 三氯氢硅法生产成本分析与控制

如上所述,由于三氯氢硅法在生产工艺及产品质量稳定性方面较为成熟,截至 2022 年,我国采用此方法生产的棒状硅约占全国总产量的 97.1%。随着 N 型单晶电池转化效率的逐步提升,未来对高质量硅料的需求趋势亦逐渐突显,三氯氢硅法仍将是主流工艺。

### 3.1 光伏多晶硅生产成本构成要素

通过近十年来对设备、生产工艺及自动化水平的不断完善提升,三氯氢硅法制造成本逐渐下降。多晶硅生产成本主要构成要素包括硅粉和三氯氢硅消耗、电耗、折旧及其他费用<sup>[13]</sup>。其中,电力和原材料成本占总生产成本的 60% 以上<sup>[14-16]</sup>,多晶硅生产中还原、冷氢化、精馏、尾气处理、氢气制备等工序为重点耗电环节,其中还原工序电耗量占总耗电量

的 72% 左右,按照目前国内低电价区域电价 0.26 元/kW·h(不含税)测算,电力成本在硅料生产成本中的比例超过 25%;在高电价区域,这一占比将显著上升。

2021—2022 年,随着多晶硅市场持续暴增,原辅材料也呈现供不应求的局面,金属硅粉作为多晶硅制备环节的大宗关键原材料,价格也呈高位增长趋势。按照现阶段市场价格走势,仅硅粉这一原料在硅料生产中成本中的占比就超过 31%,而三氯氢硅、氢气、蒸汽、天然气、水等辅料和能源价格相对稳定,其他辅助生产耗材如硅芯、石墨件、包装袋整体占比偏低。具体硅料成本构成分配如图 4 所示。2022 年,根据相关数据统计分析,主流多晶硅企业的生产成本约为 6.5 万元/t,其中电费成本为 1.56 万元/t,硅粉成本为 2.015 万元/t,折旧成本为 0.91 万元/t,其他摊销成本约为 2.015 万元/t。

我国多晶硅产业快速蓬勃发展,成功实现了“设备大型化、工艺简单化、物料循环利用化、生产智能化”的“四化”建设,多晶硅投资额从 2010 年 100 亿元/万 t 下降至 2022 年的 9 亿元/万 t<sup>[13]</sup>。由于技术不断成熟、全流程设备完全实现国产化,未来在投资方面继续下降空间不大,而设备折旧成本也

大幅缩减。按照 5 万 t 产能投资折算,单位折旧费用占比约 14%。

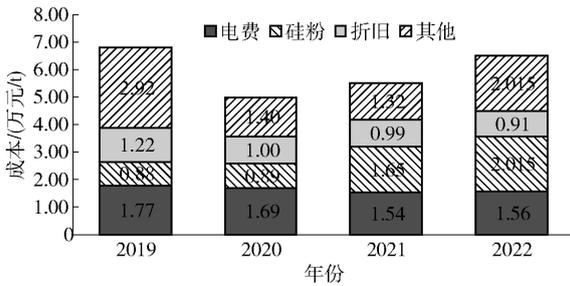


图4 硅料成本构成分配

### 3.2 三氯氢硅法能耗与成本解析

#### 3.2.1 三氯氢硅法制备多晶硅能耗构成

在“双碳”目标的驱动下,大部分下游企业为了攫取更多利润空间,主要通过入股硅料企业或者自建硅料厂方式来降低生产运行风险,确保供应链安全。到2023年底,大部分产能的陆续释放,必将形成能耗的激烈竞争。三氯氢硅法制备多晶硅的能耗指标分析见表4。截至2022年11月,根据数据统计分析,新建的多晶硅项目在设备、工艺等方面进行了优化改造提升,各项能耗指标达到国际领先水平,其中综合电单耗可以达到 $58 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ,还原电单耗 $38 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ,综合能耗下降至 $7 \text{ kgce}/\text{kg}$ 。

表4 三氯氢硅法制备多晶硅的最优能耗指标 (2022年度)

序号	名称	参数
1	综合电单耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$	58
2	还原电单耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$	38
3	干法电单耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$	4.5
4	提纯电单耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$	1.5
5	冷氢化电单耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$	5
6	公用工程电单耗/ $\text{kW}\cdot\text{h}\cdot\text{kg}^{-1}$	3
7	综合能耗/ $\text{kgce}\cdot\text{kg}^{-1}$	7

注:表4中数据由于各企业工序划分有差异,单项指标存在偏差。

#### 3.2.2 三氯氢硅法制备多晶硅能耗趋势分析

1)综合电单耗是指生产单位多晶硅产品所耗用的全部电力,包括三氯氢硅合成、电解制氢、冷氢化系统、精馏提纯、还原系统、干法回收、公用辅助等环节的电力消耗<sup>[15]</sup>。2019年全国多晶硅平均综合电单耗已降至 $70 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ,2022年电单耗逐渐降至 $58 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 。现阶段多晶硅单线规模将达到5万t,随着产能规模的大型化、系统的高度集成化及工艺参数的不断优化,2025年综合电单耗将逐渐稳定在

$53 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ (图5)。

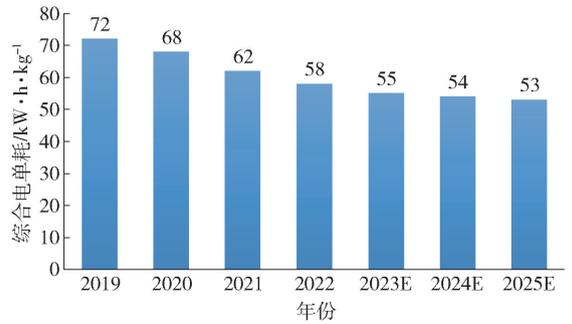


图5 2019—2025年综合电单耗变化趋势

2)多晶硅还原电耗是指三氯氢硅与氢气在CVD反应器中制备高纯多晶硅料所耗用的电力,包含从还原炉通电至断电结束的电力消耗,它是电耗的主要构成部分。还原炉电耗的高低主要取决于产品的外观形态和致密料比例。2019年下游市场低迷,客户对产品致密比例要求较为严苛,优秀企业的还原电单耗可达到 $47 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ,对应的致密料占比为65%~70%,若将致密料比例提升至80%以上,则还原电耗约为 $50 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 。2022年由于下游市场需求旺盛,硅料异常紧俏,硅料企业为了实现高产低成本,赚取更多利润空间,不断地压缩还原炉运行时间、提高通料量、降低氢气比例,大幅提高还原炉生长速率,还原炉电耗最优指标可达到 $38 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ,而致密料比例仅为30%左右。未来,随着下游客户对产品质量要求的不断提升,为了提高致密料比例,还原电耗会出现小幅回升现象。到2025年,致密料比例可稳定至80%以上,电耗稳定至 $42 \text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ,达到质优价廉的平衡点。多晶硅还原电耗趋势如图6所示。

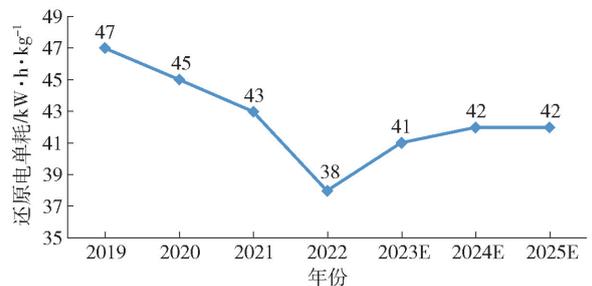


图6 2019—2025年还原电单耗变化趋势

3)冷氢化是将副产物四氯化硅( $\text{SiCl}_4$ )转化为三氯氢硅( $\text{SiHCl}_3$ )的技术,其电耗包括物料电加热、冷冻柜降温、冷凝分离系统和精馏系统的电力消耗。由于各企业采取的热源方式不一样,如辐射炉电加热、蒸汽加热、高温水加热等,冷氢化电单耗亦存在

差异。2019年行业冷氢化平均电耗为 $6\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 左右,2022年降至约 $4.8\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ ;随着冷氢化反应器装置的大型化、新型催化剂的开发、工艺过程中热量的有效综合利用以及转化效率的不断提升等因素的影响,冷氢化电单耗逐步降低,到2025年有望下降至 $4.2\text{ kW}\cdot\text{h}/\text{kg}$ 以下。具体趋势如图7所示。

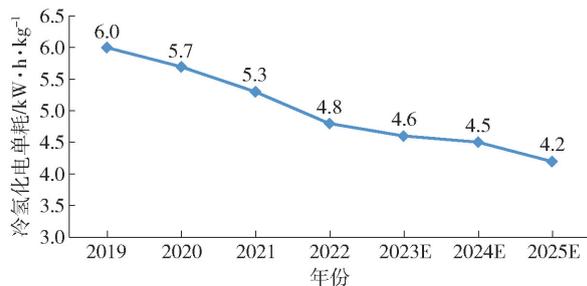


图7 2019—2025年冷氢化电单耗变化趋势

通过详细分析多晶硅生产过程中重要耗电节点可知,各企业在不断地优化完善系统体系,争取各项指标做到最优化。各项电力消耗占比分布如图8所示。在多晶硅制备过程中,还原电耗占比达到69%,干法系统和流化床系统用电占比分别为9%,公用工程用电占比6%,提纯系统用电占比3%,其他系统用电占比4%。

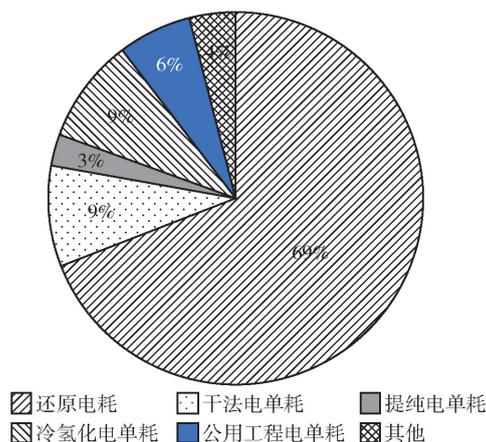


图8 多晶硅制备中各系统电单耗占比

### 3.2.3 三氯氢硅法制备多晶硅物料消耗分析

1) 硅粉主要用于三氯氢硅合成和冷氢化系统。用硅粉、氯气、四氯化硅及氢气进行不同的反应制备三氯氢硅产品,因此多晶硅生产中金属硅粉成本占比较大,其单位消耗成为重要的考量指标,主要包括反应气体带出的硅粉、高沸残液排放的硅元素、外售四氯化硅硅元素、系统检修排放的硅粉等环节消耗。2019年,行业硅耗在 $1.15\text{ kg}/\text{kg}$ 水平;2022年,各企业通过不断提高氢化转化率效率、提升系统开车时间、设置高效旋风分离器、高沸浓缩利用等措施,使

得硅粉单耗进一步降低,现阶段最优指标可以达到 $1.07\text{ kg}/\text{kg}$ ,预计到2025年指标可控制在 $1.05\text{ kg}/\text{kg}$ 左右,具体趋势如图9所示。

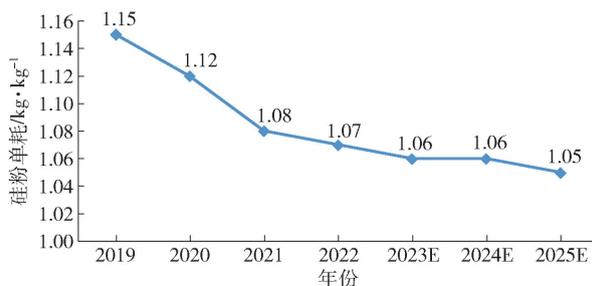


图9 2019—2025年硅粉单耗变化趋势

2) 水耗是指生产单位多晶硅产品所需要补充的水量,主要包括高温蒸发、硅料清洗、尾气淋洗塔、消防用水、末端排放等环节消耗的水量。2019年,多晶硅企业平均水耗在 $0.11\text{ t}/\text{kg}$ 的水平,而西北部地区(如新疆、内蒙等区域)由于水资源匮乏、水价高、环保等原因,水冷系统多采用空冷形式,使得水耗下降,多在 $0.07\text{ t}/\text{kg}$ 左右。预计到2025年,通过各环节的余热梯级综合利用,提纯塔高沸物质的进一步浓缩,减少残液的排放量,三废用水量将大幅降低,可使耗水量控制在 $0.04\text{ t}/\text{kg}$ 的水平,具体趋势如图10所示。

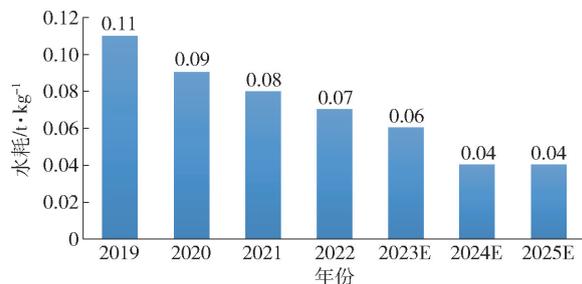


图10 2019—2025年水耗变化趋势

3) 蒸汽消耗量是指生产单位多晶硅产品所补充的蒸汽量(不考虑还原炉自产蒸汽利用)。蒸汽的补充主要用于精馏塔、冷氢化等环节。受不同的地域气候条件、能源价格及使用能源类别等因素影响,各企业的蒸汽消耗数据差别较大。2019年,企业蒸汽耗量在 $25\text{ kg}/\text{kg}$ 以下,主要原因是老产能受制于原有装置能力。而新上多晶硅项目通过提高还原炉炉筒回水温度、回收还原尾气与底盘热量等方式自产蒸汽,再通过降压闪蒸的方法制备不同压力级别的低压蒸汽,同时精馏系统采用热耦合梯级利用技术,使热量得以充分利用。按照规划,2023年新上多晶硅项目逐步投产运行,蒸汽消耗基本上可

以降至 5 kg/kg 以下,甚至零消耗,具体趋势如图 11 所示。

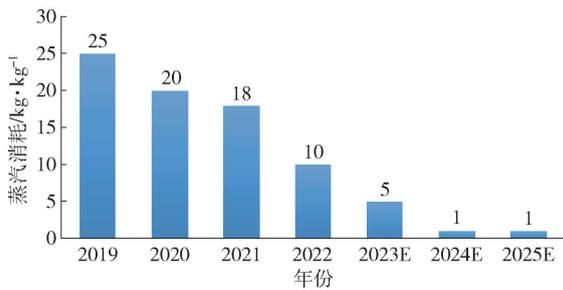


图 11 2019—2025 年蒸汽消耗变化趋势

4) 综合能耗数据主要反映单位多晶硅生产过程中所消耗的电力、蒸汽、水等(多晶硅生产各环节工序划分、能源消耗种类、计量和计算方法按《多晶硅企业单位产品能源消耗限额》(GB 29447—2012)执行)。2019 年,多晶硅企业综合能耗平均值为 11.3 kgce/kg;随着系统电耗的不断优化和热量的综合利用,综合能耗指标大幅降低<sup>[10]</sup>,预计到 2025 年可降至 6.6 kgce/kg 以下,具体趋势如图 12 所示。

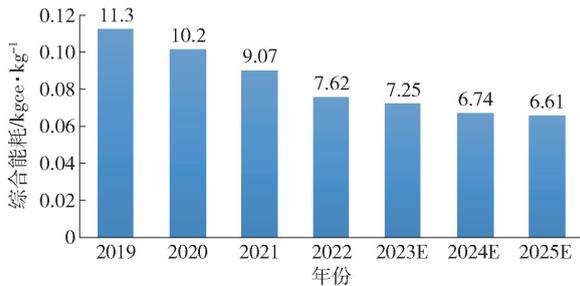


图 12 2019—2025 年综合能耗变化趋势

### 3.3 三氯氢硅法装置演变与成本控制

高品质、低成本的多晶硅产品是企业追求的永恒主题,成本控制势必将成为核心关注点及长期发展方向。随着技术的不断进步和装置水平的提升,多晶硅生产成本仍有下降空间。

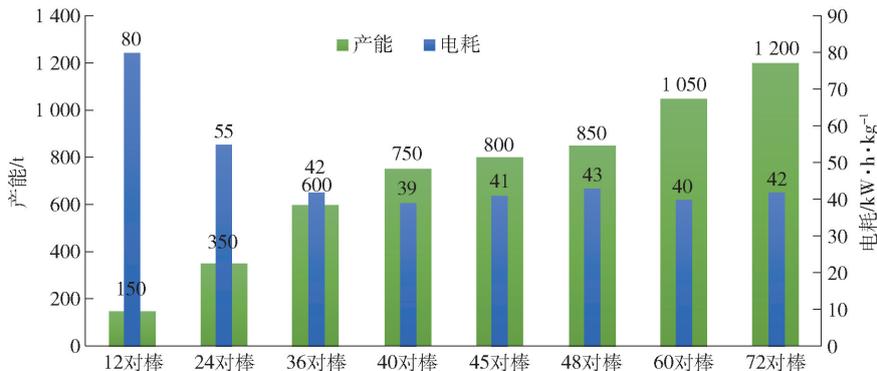


图 13 不同炉型装置单炉产能与电耗指标变化

1) 多晶硅制备中的关键核心装置为还原炉,近十年还原炉逐步朝向大型化发展,经历了 12 对棒、18 对棒、24 对棒、30 对棒、36 对棒、40 对棒、45 对棒、48 对棒、56 对棒、60 对棒、72 对棒的发展,单炉年产能从 150 t 逐步提升至 1 200 t(图 13)。据统计,国内 40 对棒产能占据 70% 以上,主要原因在于还原炉大型化后运行过程中的热场控制、气场控制变得较为复杂,致密料及电耗指标呈现逆向的变化,不同企业验证 40 对棒的单炉年产量可达到 750 t 以上,看似达到了最优化水平。根据三维仿真模拟计算,随着还原炉自动化水平的逐步提升,还原炉大型化仍然是未来发展的主旋律,企业可逐步尝试 60 对棒的运行,以实现降低能耗与提高致密料比例的目标。与 40 对棒相比,60 对棒的单炉年产量可提升 20% 左右。此外,在还原系统的配置中,随着硅棒对数的增加,自动化程度提升,单相硅棒串联对数适当增加,硅棒相数减少,可以减少电器功率柜、母线槽的一次性配置,使还原炉设备固定资产投资大幅降低。

2) 冷氢化装置是多晶硅企业扩产提量的关键卡脖子设备。由于冷氢化工艺运行的特点,系统管道堵塞、磨损及转化效率低等问题较为突出,成为关键制约因素。从 2010 年的热氢化炉逐渐演变为冷氢化装置,接着冷氢化装置从固定床又升级为流化床,经过三代技术迭代提升,目前流化床成为主流生产工艺,单线处理量从 5 万 t 逐步提升至 35 万 t,其中单线处理量 25 万 t 的流化床线居多。现有 35 万 t 流化床装置由于反应直径的扩大、流化速度控制以及设备内部旋风分离器的配置成熟性问题,整体上运行效果尚未达到预期,但从技术发展角度考虑,这些问题都会逐步得到攻关解决。单台设备的处理能力提升后,占地面积、人员配置、投入成本都会相对降低,未

来 35 万 t 流化床装置仍是主流的发展趋势。

3) 多晶硅制备过程中的全厂余热回收可进一步得到优化。通过探索提高还原炉的出水温度至 190 ~ 200 °C, 闪蒸出更高质量的蒸汽供给精馏系统使用, 同时优化精馏系统、干法系统、反歧化系统、粗馏系统的热量利用效率, 减少电加热装置或冷却系统的电耗, 可以更好地优化全厂热量利用, 进一步降低成本。

综上所述, 制备多晶硅的关键成本受生产电耗和金属硅粉价格影响较大, 未来为了追求更大的利润空间, 产业发展势必向能源禀赋且硅矿资源丰富的地域转移。

## 4 光伏多晶硅产业的发展布局

### 4.1 光伏多晶硅产业区域转移的演变

在全球“碳排放”与“能源转移”调整的推动和促使下, 多晶硅产业呈现井喷式增长。2019 年国内产量为 39 万 t, 到 2022 年 11 月, 国内产能陆续释放, 但主力军仍是老牌多晶硅企业的横向扩张, 其中通威股份、大全集团、协鑫集团、特变电工、东方希望五大头部企业产能合计约 100 万 t, 其他跨界进入的企业(如新疆其亚铝业、信仪光伏、合盛硅业、天合光能、丽豪半导体等)都处于建设期, 产能合计约 60 万 t。根据公开数据, 到 2025 年规划产能将达到 400 万 t。

2018—2022 年, 多晶硅生产技术发展呈现突飞猛进的阶段, 综合电耗从 2010 年的 95 kW·h/kg 逐步降至 58 ~ 65 kW·h/kg, 装备水平、技术迭代、自动化程度、单线规模及高度集成化方面整体都得到了全面提升。由于新老产能装备能力方面的差异, 能耗方面会有所不同。目前从理论上说装备和技术潜力方面已到达了极限, 若要大幅压缩成本, 难度较大。根据多晶硅生产中成本要素构成(图 14), 2022 年度行业优秀指标中电耗成本约占 26.00%, 硅粉成本占据 36.67%, 两者合计占比达到 62.67%, 这充分说明决定企业生产成本的关键因素在于电价与硅粉资源价格, 因此多晶硅企业势必要向优势资源地区聚集发展。

2015 年我国多晶硅年产能 19 万 t, 其中中东部地区产能为 11.9 万 t, 占比高达 62.6%。2015—2018 年, 多晶硅价格维持在 115 元/kg 左右, 在此售价条件下中东部地区硅料企业略有营收。从 2019 年第二季度至 2020 年末, 由于国家政策调整和欧美

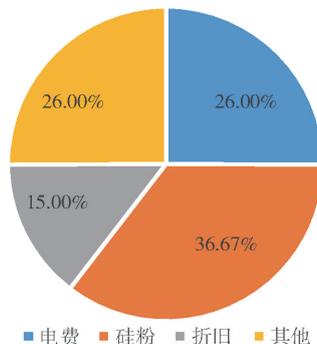


图 14 2022 年度多晶硅成本构成比例分配

装机容量的影响, 市场需求疲软, 多晶硅价格也直转急下, 致密料比例最低价格探底到 60 元/kg, 中东部地区的企业因电价成本高昂出现严重亏损的局面, 其中康博新能源、赛维 LDK、恒星科技、宜昌南玻等多晶硅企业陆续关停, 只剩下徐州中能、洛阳中硅维持低负荷运行, 且徐州中能产能逐步转移至新疆地区, 中东地区仅有洛阳中硅维持运转。而在此售价下西部区域凭借低廉的用电成本, 仍有利润可取, 因此西部区域的多晶硅企业顺势不断扩张规模。2021 年, 随着中国“碳达峰”“碳中和”战略布局, 大量资本运作投身多晶硅行业。在中国多晶硅行业跌宕起伏的 15 年中, 多晶硅价格从当初最高 3 500 元/kg 逐步下降至 60 元/kg, 经过多轮的洗牌和技术沉淀, 多晶硅企业向低能源地区布局发展才是长久之计。因此, 2021—2022 年西部多晶硅企业顺势崛起, 到 2022 年底, 西部地区多晶硅产能达到 91.3 万 t(图 15)。与此同时, 2021 年下游单晶硅企业基于能源优势和产业链聚集等方面的考虑, 也在西部地区积极扩充产能至 345 GW 左右; 2022 年, 在下游市场的推动下, 国内的单晶龙头如隆基股份、中环股份、天合光能、晶科能源、京运通、晶澳等企业迅速向内蒙、云南、四川、新疆、青海五个省份扩张布局, 2022 年底西部地区单晶产能将达到 700 GW 左右。

通过分析多晶硅企业与单晶硅企业的产能布局, 未来西部区域将逐步形成聚集多晶硅、单晶硅、光伏电站的区域产业链和发展格局, 成为我国绿色能源发展的重要战略基地。

### 4.2 光伏多晶硅产业布局现状和影响

国内厂商迅速崛起, 国内外行业集中度持续提升。早期多晶硅技术掌握在国外企业手中, 自 2005 年开始光伏市场一硅难求, 国内资本开始大举进军多晶硅领域, 多晶硅产业规模迅速扩大, 在全国各地遍地开花, 高峰时期多晶硅项目达到 50 多项。由于



图 15 2015—2022 年度中国多晶硅产能分布统计

国内市场需求迅速增长,凭借人工等方面的成本优势,我国多晶硅产量占全球的比重已经从 2015 年的 48% 提升至 2022 年的 80% 以上,进口硅料占比持续下降。目前,国外形成以 Wacker、OCI 为主的格局,国内则形成了以通威永祥、新特能源、新疆大全、东方希望、保利协鑫五家厂商为主的重要格局。我国多晶硅产能分布情况(含在建项目)如图 16 所示。由图 16 可知,多晶硅产能新疆地区将达到 76 万 t,内蒙 60.2 万 t,四川 40 万 t,云南 16 万 t,甘肃 22.5 万 t,青海 22.5 万 t,其他地区约 5 万 t。

从区域资源视角来看,纵观全国各区域电价优势,低电价主要集中在新疆、内蒙、青海、四川、云南、甘肃几个区域,其中新疆电价大约 0.26 元/kW·h,内蒙为 0.28 元/kW·h;四川、青海、云南依靠丰富的水电资源优势,电价约 0.3 元/kW·h;而中东部地区电价基本在 0.6 元/kW·h 以上,即单位多晶硅电价成本要高出 1 倍之多。从金属硅产业发展方面布局分析,2022 年度中国金属硅开炉数 360 台,其中新疆开炉 93 台,四川开炉 66 台,云南 80 台,即我国大部分工业硅产地集中在新疆、四川和云南几个区域。由于多晶硅企业在技术成本方面基本一致,为了追

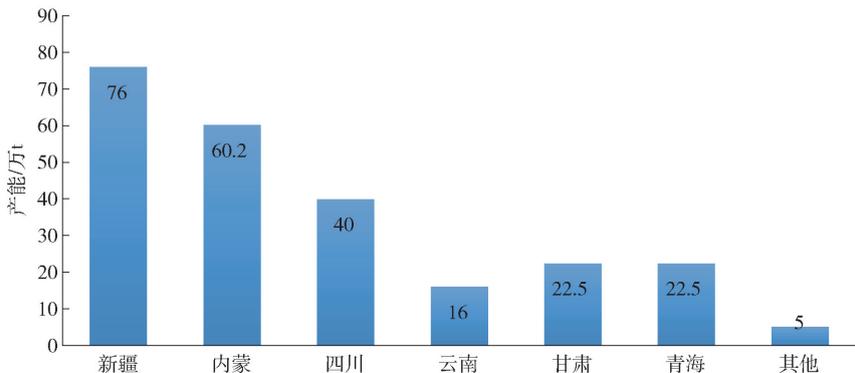


图 16 2022 年我国多晶硅产业发展区域产能统计(含在建项目)

求成本最优化和保持核心竞争力,加上两项重要资源的高度叠加效应,未来我国光伏多晶硅产业发展格局主要以西北、西南地区为重点。

### 4.3 光伏多晶硅产业未来发展趋势

#### 4.3.1 未来光伏市场容配比率

根据有关数据统计,预计 2025 年底,中国多晶硅产能将达到 400 万 t/a,可以满足 1 000 GW 左右的装机量需求。从需求角度来看,2025 年全球的装机需求为 400 GW,折算成多晶硅需求量为 132 万 t。2030 年全球的装机需求量达到 1 000 GW。由此看出,光伏装机市场容量还很大,多晶硅市场未来需求将继续攀升,但 2025 年多晶硅产能规划已远远超过同年的装机需求,甚至可以满足 2030 年全球的装机需求。同时,考虑到 2025 年前过度投资规划的 260 万 t/a 产能,未来多晶硅市场可能会出现供大于求的局面。

#### 4.3.2 N 型单晶用多晶硅将成为主流

随着电池技术的不断迭代更新,N 型电池转换效率具有明显优势。2022 年,TOPCon 电池、HJT 电池实验室转换效率分别达到 25.47%、25.82%,突破了 P 型 PERC 电池效率极限, TOPCon、HJT 技术

的优势会在成本下降后逐步显现,从而市场份额得到逐步扩大,成为市场主流技术。而高质量的N型电池需要基于更高纯度的N型硅片,因而对N型硅料的杂质要求更为苛刻。N型硅料有望成为未来高端市场的主体硅料,未来拥有高品质N型电池用多晶硅制备核心技术的生产企业将获得更好的发展机遇。

#### 4.3.3 电网消纳能力与储能技术发力

我国西北地区有充足的光照时间和广阔的地域资源,特别适宜发展光伏产业,但由于远离全国电力负荷区域,空间上的不匹配使得弃风、弃光等现象一度较为严重。在国家政策的加持下,随着多条特高压线路的建设和储能技术的不断发展,新能源消纳问题正在持续改善,全国累计建成投运“十四交十六直”30项特高压工程,形成了“西电东送、北电南供、水火风光互济”的电力供给新格局,为水电、风电、光电大范围消纳提供了重要支撑。我国弃风率已经从2017年的12%降至2021年的2.8%,弃光率从2017年的6%降至2021年的2%(图17)。未来,我国将继续构建相适应的电力产供储销体系,提升电力系统灵活调节能力,推动“源网荷储”互动融合,提升系统运行效率;加大新型电力储能系统关键技术的研发和推广,推进电力市场建设和体制机制创新,完善清洁能源消纳长效机制,建设坚强智能电网,保障新能源及时并网和消纳。

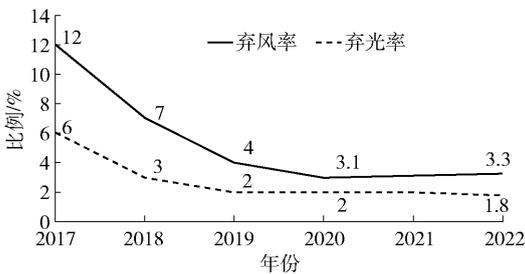


图17 国内风电与光伏弃电率

通过深度剖析多晶硅制备成本,以及对比我国区域能源及地域资源条件,结合国家产业政策、市场容配率、未来技术发展方向等方面的分析可知,随着国家电网纵横网格化的发展,西部地区有着得天独厚的自然条件,未来10年仍将是我国光伏产业发展的乐土。

## 5 光伏多晶硅产业发展对策和建议

1)随着国家能源战略的布局与调控,西部区域电价呈小幅上涨趋势,但先天的资源优势条件,决定了未来多晶硅产业发展格局重点仍集中在西部区

域,未来光伏产业发展重点将趋于上下游产业链的深度融合,形成“煤-电-硅-光-储”生态产业发展布局。

2)大力在西部光照资源条件较好的地区推进光储一体化项目的发展,积极采用“光伏+储能”协同发展,通过增加储能规模来保障电网安全稳定地运行,缓解“弃光”问题,带动光伏发电规模化发展,持续提升光伏发电对电力保障供应的贡献力度。

3)区域差异化电价会进一步造成发展的不平衡性,促使部分资本在不具备技术积淀或者技术优势的情况下,利用差异化电价产生的优势跨界进入行业。这虽然一定程度上能够增强行业活力,但是在更多层面导致行业的无序竞争,甚至出现资源的不合理分配。因此,建议有关部门强化监管和引导,使行业健康发展。

4)中国“双碳”战略目标,涉及到2060年中国多晶硅及光伏产业的发展规划,包括产能、技术、成本与实施路径方面,政府及行业要划定标准和规范产业规模,避免出现“一哄而上,一哄而下”的盲目发展局面,减少能源与资本浪费。

5)多晶硅行业的快速扩张与高端技术人才储备不相符,尤其是部分企业在人才跟不上产能扩张需求时,会缺乏自律甚至恶意去相关企业挖团队,这是最近两年的陋习,对行业发展非常不利,也是一个行业发展不成熟的表现。随着下游电池产线对多晶硅质量要求的不断提升,未来高品质多晶硅仍是重中之重,企业要评估自身情况,强化科技创新引领,掌握核心关键技术,突破难点问题,多路径展开技术研发,培育自身人才,从而为行业高质量发展提供重要保障。

### [参考文献]

- [1] 胡鞍钢. 中国实现2030年前碳达峰目标及主要途径[J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(3): 1-15.
- [2] 关宗. 国内硅料生产龙头有谁[J]. 中国石油和化工产业观察, 2022(11): 19-21.
- [3] 冯瑞华, 马廷灿, 等. 太阳能级多晶硅制备技术与工艺[J]. 新材料产业, 2007(5): 59-62.
- [4] 梁骏吾. 电子级多晶硅的生产工艺[J]. 中国工程科学, 2000(12): 34-39.
- [5] 肖全松, 张纯. 谈硅烷法制备太阳能级多晶硅的工艺[J]. 江西化工, 2011(3): 21-25.
- [6] 万焯, 汤传斌, 肖荣辉, 等. 四氯化硅氢化生产三氯氢

- 硅技术研究[J]. 有色冶金节能, 2010, 26(6): 30-32.
- [7] 包延艳. 多晶硅生产中尾气回收技术的发展[J]. 化工管理, 2016(23): 281.
- [8] 田博, 黄国强. 硅烷流化床制备粒状多晶硅的研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(11): 3392-3399.
- [9] 刘建中. 区熔用多晶硅产业化的关键技术及装备一体化. 陕西: 陕西有色天宏瑞科硅材料有限责任公司, 2021-04-22.
- [10] 蔡前进. 2 000 吨/年高纯硅烷工业化生产关键技术及成套装备研发与应用. 河南省, 河南硅烷科技发展股份有限公司, 2020-01-15.
- [11] 杨涛. 改良西门子法生产多晶硅工艺设计探讨[J]. 贵州化工, 2009, 34(3): 7-11.
- [12] 张晓辉, 周齐领. 太阳能级多晶硅装置工艺路线比较[J]. 化工设计, 2021, 31(4): 3-6, 22, 1.
- [13] 李俊杰, 秦琴, 曾晓国. 浅谈多晶硅生产成本控制[J]. 有色冶金节能, 2020, 36(6): 59-62.
- [14] 王青, 孙颀, 张海霞, 等. 中国光伏行业 2021 年回顾与 2022 年展望[J]. 电气时代, 2022(5): 20-28.
- [15] 谢岩, 张然, 王永亮. 多晶硅生产节能技术研究[J]. 化工设计通讯, 2020, 46(12): 45-46.
- [16] 严大洲, 杨永亮, 张升学, 等. 多晶硅能耗分析与节能实践[J]. 电子科学技术, 2014, 1(2): 224-230.

## The Development Pattern of Photovoltaic Polysilicon Industry Based on the Perspective of Cost and Regional Advantages

CHEN Min, CHEN Hui, CHANG Xin, YAN Dazhou, WAN Ye

**Abstract:** Photovoltaic power generation is gradually occupying an important seat in the world energy landscape due to its advantages of cleanliness, safety and abundant resources, and will become one of the ‘main forces’ of world energy supply in the future. With the rapid development of the upstream and downstream of the photovoltaic industry chain, the price of polycrystalline silicon as the basic raw material continues to rise, resulting in a rising investment heat in the polycrystalline silicon industry. This paper introduced the current development status and future trend of photovoltaic polysilicon industry, analyzed the main technical route adopted by polysilicon production at home and abroad, trichlorosilane method and silane method, and analyzed the energy consumption and cost composition of trichlorosilane method. Based on the perspective of cost and regional advantages, this paper put forward reasonable judgments and suggestions for the development pattern of photovoltaic polysilicon industry. The production cost of polycrystalline silicon is mainly affected by power consumption and the price of metal silicon powder. In the future, the polycrystalline silicon industry will be transferred to the western region with energy endowment and rich silicon mineral resources.

**Key words:** polysilicon; modified Siemens process; silane method; cost control; energy consumption; regional advantages; industrial transfer