

多晶硅生产还原系统用电优化研究

芮国保 郑高旺 陈晓玉

(洛阳中硅高科技有限公司, 河南 洛阳 471000)

[摘要] 多晶硅生产是连续性生产,用电负荷相对稳定,在峰谷平时电价模式下,用电费用较高。本文以河南某多晶硅生产企业为例,结合河南省全年三个时期的分时电价政策,分析多晶硅生产重点用电工序还原炉的特性,并建立多晶硅还原炉用电优化模型,探索削峰填谷的用电方式。根据用电优化模型,通过生产组织优化,调整还原炉的投运时间点,多晶硅企业若在每日19时投运还原炉,每个运行周期电费支出可以减少12000元左右,还原炉用电成本降低约4%,降成本效果明显。

[关键词] 多晶硅; 还原炉; 峰谷平; 电价; 优化

[中图分类号] TQ127.2

[文献标志码] A

[文章编号] 2097-2423(2024)06-0078-05

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2024.06.012

0 前言

多晶硅企业用电量巨大且为连续性稳定生产型企业,在峰谷平时电价模式下,平均用电价格较高^[1-2]。企业可以通过深入分析系统构成和运行特点,在生产组织方面合理排产,提升谷段用电比例,降低综合用电成本^[3]。

根据河南省发改委2022年11月7日发布的《关于进一步完善分时电价机制有关事项的通知》要求,增加了尖峰时段(表1)。

表1 不同月份的峰谷平时段划分

月份	尖峰段 小时数/h	高峰段 小时数/h	平段 小时数/h	谷段 小时数/h
2-6,9-11	0	8	8	8
7-8	3	5	8	8
12-1	1	7	8	8

根据文件要求,不同月份的电价系数有了新的明确(表2)。

[收稿日期] 2024-07-17

[作者简介] 芮国保(1983—),男,江苏溧阳人,工程硕士,工程师,主要从事多晶硅生产管理。

[引用格式] 芮国保,郑高旺,陈晓玉.多晶硅生产还原系统用电优化研究[J].绿色矿冶,2024,40(6):78-82.

RUI Guobao, ZHENG Gaowang, CHEN Xiaoyu. Research on electricity optimization of reduction furnace in polysilicon production[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(6): 78-82.

表2 不同月份的峰谷平时段的电价系数

月份	尖峰系数	高峰系数	平段系数	谷段系数
12-1,7-8	1.968	1.71	1	0.47
2-6,9-11	0	1.64	1	0.41

基准电价按照0.45348元/kW·h核算,在电价中增加了绿电部分损益,根据实际执行的损益情况,其他部分包括输配电价、政府性基金和基本电费,损益电价和输配电价均执行峰谷平系数。经过测算,全年各月电价预计为表3中的结果。由表3可知,尖峰、高峰段的电价和谷段电价差距较大,如果增加谷段用电比例,可以有效降低综合用电成本,因此,挖掘谷段用电潜力非常重要。

表3 不同月份峰谷平电价预测

月份	尖峰电价/ (元/kW·h)	高峰电价/ (元/kW·h)	平段电价/ (元/kW·h)	谷段电价/ (元/kW·h)
1	1.35471	1.18090	0.70258	0.34552
2	0.00000	1.13374	0.70258	0.30510
3	0.00000	1.13374	0.70258	0.30510
4	0.00000	1.13374	0.70258	0.30510
5	0.00000	1.13374	0.70258	0.30510
6	0.00000	1.13374	0.70258	0.30510
7	1.35471	1.18090	0.70258	0.34552
8	1.35471	1.18090	0.70258	0.34552
9	0.00000	1.13374	0.70258	0.30510
10	0.00000	1.13374	0.70258	0.30510
11	0.00000	1.13374	0.70258	0.30510
12	1.35471	1.18090	0.70258	0.34552

1 多晶硅生产系统用电特性分析

多晶硅生产系统主要包括五大部分:提纯系统、干法回收系统、氢化系统、还原系统、公辅系统。在以上5个系统中,除了还原系统是整体连续性生产、单台还原炉间歇性周期生产外^[4-5],其他系统均为连续稳定生产,用电负荷相对平稳,峰谷平段的用电量分布比较均衡,降低用电成本可挖掘的空间有限(表4)。

表4 多晶硅各系统平均用电占比

系统	干法用电/%	提纯用电/%	氢化用电/%	还原用电/%	辅助用电/%
占比	5.43	3.40	8.95	71.23	9.56

由表4可以看出,还原系统用电量基本占到总用电量的70%左右,如果依据峰谷平时间段,优化还原系统的用电区间分布,可以有效降低用电成本。

2 多晶硅生产还原系统的用电优化

还原系统是多晶硅沉积生产的关键环节,单台还原炉的周期性运行主要包括安装硅芯、装炉置换、击穿运行、通入三氯氢硅和氢气混合气体、气相沉积高纯多晶硅、停炉断电、硅棒出炉等流程。在还原炉运行过程中,随着时间增长,瞬时有电功率同步变化,最高和最低的功率相差较大,这为削峰填谷的用电调整方式提供了基础条件^[3]。

2.1 多晶硅还原系统用电特点

多晶硅还原炉启动初始,硅芯较细,硅棒电阻大、供电电压高、电流低,用电功率较小;随着混合气体通入量增加,硅芯直径增加,电阻下降、供电电压下降,电流升高,用电功率增加,达到峰值;之后,根据硅棒沉积速率缓慢回调混合气量,还原炉的用电呈现缓慢下降的趋势,直到停炉(图1)。

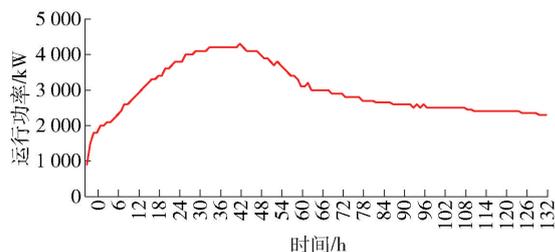


图1 还原炉用电功率变化曲线

2.2 多晶硅还原炉用电优化模型建立

2.2.1 还原炉用电优化模型组成要素

在用电优化模型建立的目标中,最核心的是降

低用电成本。结合峰谷平电价时间段的划定和还原炉用电功率的特点,将用电功率高的时间段尽可能集中在谷段,将用电功率低的时间段尽可能集中在平段和峰段,这样用电总量虽然没有变化,但是用电总成本会有所下降,效益会增加^[6]。

用电成本构成的三要素:峰谷平时段长、还原炉功率、峰谷平时段电价(式1)。

$$\begin{cases} T - \text{峰谷平时段的时长} \\ Q - \text{用电功率变化} \\ P - \text{峰谷平时段的电价} \end{cases} \quad (1)$$

2.2.2 还原炉用电优化模型的建立

用电成本以字母 C 表示,用电总成本见式(2)。

$$C = T \times Q \times P \quad (2)$$

在式(2)中,重点是分时段求解用电量,并结合分时段的电价,计算用电成本。为了更清晰地表示用电总成本,通过数组方式表示(式3)。

$$C = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中, $T_1 \sim T_4$ 分别表示尖峰段时长、峰段时长、平段时长、谷段时长; $Q_1 \sim Q_4$ 分别表示尖峰段功率、峰段功率、平段功率、谷段功率; $P_1 \sim P_4$ 分别表示尖峰段电价、峰段电价、平段电价、谷段电价。

式(3)求解有两种方法:一是采用数组求解,即求出所有结果,进行大小比较,选择总成本最低的方式;二是采用规划求解,直接求解总成本最低的价格。考虑到需要寻找对应的时间点,为了更清晰地表示结果,采用第一种数组求解方法。

2.3 多晶硅还原炉用电总成本求解

根据表1,全年用电一共可分为三种情况,采用2.2小节中列举的求解方法,找出用电总成本最低的方式。

2.3.1 2—6月和9—11月用电分析

在2—6月、9—11月,没有尖峰段用电。根据图1,还原炉运行功率随时间变化而变化。按照一天24h,设定还原炉投运时间,即从1时开始到24时结束,以小时为周期,假设还原炉在不同的时点投运,计算还原炉用电量的分布情况(表5)。

单台还原炉由于投运时间点不同,峰谷平时段用电量呈现一定差异,占比也出现变化(图2)。

2—6月和9—11月,谷段用电量最高比例达到

表5 2—6月和9—11月还原炉不同时点投运的峰谷平用电量分布情况

投运时间点	谷段/ kW·h	高峰段/ kW·h	平段/ kW·h	总计用电量/ kW·h
1	136 900	132 900	135 000	404 800
2	134 900	132 700	137 200	404 800
3	133 000	134 850	136 950	404 800
4	131 100	136 950	136 750	404 800
5	129 100	139 050	136 650	404 800
6	127 000	141 350	136 450	404 800
7	125 400	141 100	138 300	404 800
8	124 400	141 000	139 400	404 800
9	126 350	140 800	137 650	404 800
10	128 500	140 400	135 900	404 800
11	130 550	139 150	135 100	404 800
12	132 800	137 300	134 700	404 800
13	135 050	135 350	134 400	404 800
14	137 300	133 500	134 000	404 800
15	139 350	132 600	132 850	404 800
16	141 700	132 300	130 800	404 800
17	141 550	131 700	131 550	404 800
18	141 400	130 600	132 800	404 800
19	141 250	128 700	134 850	404 800
20	140 900	128 950	134 950	404 800
21	140 650	129 800	134 350	404 800
22	140 500	131 050	133 250	404 800
23	140 050	133 200	131 550	404 800
24	138 700	133 100	133 000	404 800

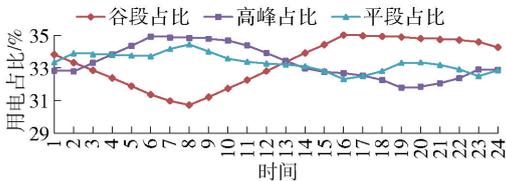


图2 2—6月和9—11月峰谷平时段不同时间点还原炉用电量占比

35%，最低比例为30.73%；峰段用电量最高比例达到34.92%，最低比例为32.07%；平段用电量最高比例34.44%，最低比例为32.31%。

结合表3中不同月份电价预测，计算峰谷平不同时间段的用电费用，结果如图3所示。由图3可知，在2—6月、9—11月，单台还原炉8时投用的电费最高，总费用为295 752元，19时投用的电费最低，总费用为283 751元，两者差值为12 001元。按照

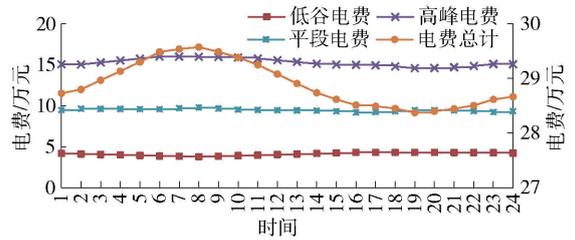


图3 2—6月和9—11月峰谷平时段不同时间点还原炉用电费用

核算结果，单台还原炉在19时投运，其用电成本可以较8时投运下降4.06%左右（按最高和最低电费的平均值算，下同）。

2.3.2 7—8月用电分析

7—8月每天面临3h的尖峰用电，假如全年基准电价平稳，则这两个月的平均电价为全年最高。假设还原炉在不同的时点投运，计算还原炉用电量的分布情况，结果见表6、图4、图5。

表6 7—8月还原炉不同时点投运的峰谷平用电量分布情况

投运时间点	谷段/ kW·h	尖峰段/ kW·h	高峰段/ kW·h	平段/ kW·h	总计用电量/ kW·h
1	136 900	51 000	81 900	135 000	404 800
2	134 900	51 000	81 700	137 200	404 800
3	133 000	50 800	84 050	136 950	404 800
4	131 100	50 900	86 050	136 750	404 800
5	129 100	50 800	88 250	136 650	404 800
6	127 000	52 900	88 450	136 450	404 800
7	125 400	52 850	88 250	138 300	404 800
8	124 400	52 950	88 050	139 400	404 800
9	126 350	52 750	88 050	137 650	404 800
10	128 500	52 650	87 750	135 900	404 800
11	130 550	52 650	86 500	135 100	404 800
12	132 800	52 350	84 950	134 700	404 800
13	135 050	51 350	84 000	134 400	404 800
14	137 300	49 600	83 900	134 000	404 800
15	139 350	48 900	83 700	132 850	404 800
16	141 700	48 900	83 400	130 800	404 800
17	141 550	48 600	83 100	131 550	404 800
18	141 400	48 500	82 100	132 800	404 800
19	141 250	48 400	80 300	134 850	404 800
20	140 900	48 200	80 750	134 950	404 800
21	140 650	47 400	82 400	134 350	404 800
22	140 500	48 750	82 300	133 250	404 800
23	140 050	51 000	82 200	131 550	404 800
24	138 700	51 200	81 900	133 000	404 800

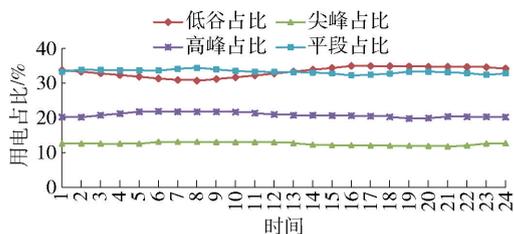


图4 7—8月峰谷平时段不同时间点还原炉用电量占比

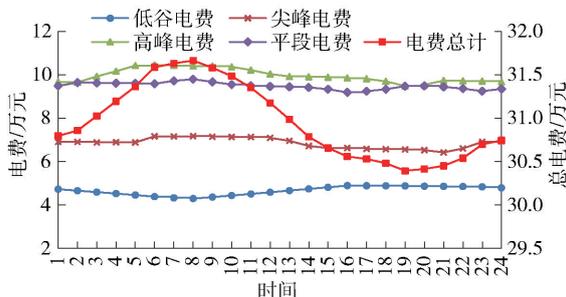


图5 7—8月峰谷平时段不同时间点还原炉用电费用

由图5可知,在7—8月,8时投用的还原炉电费最高,总费用316 633元;19时投用的还原炉电费最低,总费用为303 942元,差值12 691元,如果单台还原炉投运时间在每日的19时左右,其用电成本可以较8时投运下降4.01%左右。

2.3.3 12—1月用电分析

12—1月每天有1h的尖峰用电,假如全年基准电价平稳,则该两个月的平均电价较正常月份要高一些。假设还原炉在不同的时点投运,12—1月还原炉用电量的分布情况如表7、图6、图7所示。

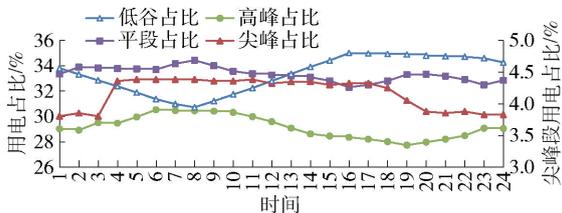


图6 12—1月峰谷平时段不同时间点还原炉用电量占比

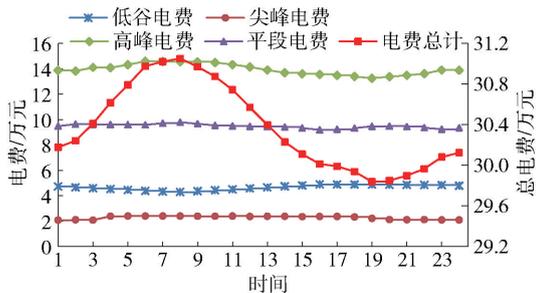


图7 12—1月峰谷平时段不同时间点还原炉用电费用

由图7可知,12—1月中8时投用的还原炉电费最高,总费用310 515元;19时投用的还原炉电费

表7 12—1月还原炉不同时点投运的峰谷平用电量分布情况

投运时间点	谷段/ kW·h	尖峰段/ kW·h	高峰段/ kW·h	平段/ kW·h	总计用电量/ kW·h
1	136 900	15 400	117 500	135 000	404 800
2	134 900	15 600	117 100	137 200	404 800
3	133 000	15 400	119 450	136 950	404 800
4	131 100	17 650	119 300	136 750	404 800
5	129 100	17 750	121 300	136 650	404 800
6	127 000	17 750	123 600	136 450	404 800
7	125 400	17 750	123 350	138 300	404 800
8	124 400	17 750	123 250	139 400	404 800
9	126 350	17 650	123 150	137 650	404 800
10	128 500	17 650	122 750	135 900	404 800
11	130 550	17 750	121 400	135 100	404 800
12	132 800	17 500	119 800	134 700	404 800
13	135 050	17 600	117 750	134 400	404 800
14	137 300	17 600	115 900	134 000	404 800
15	139 350	17 400	115 200	132 850	404 800
16	141 700	17 500	114 800	130 800	404 800
17	141 550	17 500	114 200	131 550	404 800
18	141 400	17 200	113 400	132 800	404 800
19	141 250	16 400	112 300	134 850	404 800
20	140 900	15 700	113 250	134 950	404 800
21	140 650	15 600	114 200	134 350	404 800
22	140 500	15 700	115 350	133 250	404 800
23	140 050	15 500	117 700	131 550	404 800
24	138 700	15 500	117 600	133 000	404 800

最低,总费用为298 380元,两者差值为12 135元。如果单台还原炉投运时间在每日的19时左右,其用电成本可以下降3.91%左右。

3 结论

通过分析河南省全年三个时期的分时电价政策,建立多晶硅还原炉用电优化模型,可知多晶硅企业选择在每日19时投运还原炉,每个运行周期可以降低12 000元左右的电费支出,能够降低约4%还原炉用电成本。对于大规模多晶硅生产型企业,生产的炉次越多,节约的电费越多,有显著的经济效益。

在实际生产中,多晶硅企业习惯稳定排产,很难

控制在某一时间点集中投运和停运还原炉,因为这样不仅造成总用电负荷的波动较大,对生产衔接的环节也产生一定的挑战,但是传统的排产方式是基于一定历史条件下建立的,随着电力行业不断改革,现在绝大部分火电企业都以常态化的方式参与调峰生产,因为调峰生产的方式获益更大。多晶硅企业应打破习惯性思维,充分利用设备能力,以最经济的方式组织生产。

随着竞争日益激烈,多晶硅生产型企业应该全面分析能源政策条件,结合自身的生产特点,挖掘能源降成本的空间。随着绿电市场的发展,分时电价政策将在新的环境下持续作出调整,所以必须掌握生产系统特性,储备应对措施,关注政策变化,同步优化生产方式,持续降低用电成本,改善企业经营效益。

[参考文献]

- [1] 李俊杰,秦琴,曾晓国. 浅谈多晶硅生产过程成本控制[J]. 有色冶金节能,2020,36(6):59-62.
- [2] 严大洲,刘艳敏,万焯,等. 晶硅太阳能在“双碳”经济中的作用与影响[J]. 中国有色冶金,2021,50(5):
- [3] 刘晓军. 峰谷平生产组织模式优化[J]. 山东冶金,2016,38(5):67-68.
- [4] 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.
- [5] 石何武,汪绍芬,郑红梅,等. 多晶硅还原炉装备发展展望[J]. 有色设备,2020(1):1-3,29.
- [6] 孔强,付强,林亭君,等. 基于成本效益分析的峰谷分时电价优化模型[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(15):60-67.

Research on Electricity Optimization of Reduction Furnace in Polysilicon Production

RUI Guobao, ZHENG Gaowang, CHEN Xiaoyu
(China Silicon Corporation Ltd., Luoyang 471000, China)

Abstract: The production of polycrystalline silicon is a continuous production, and the electricity load is relatively stable. Under the peak-valley-flat electricity price mode, the electricity cost is higher. Taking a polysilicon production enterprise in Henan Province as an example, this paper combined the time-of-use electricity price policy of Henan Province in three periods of the year, analyzed the characteristics of the reduction furnace of the key power consumption process of polysilicon production, and established the power consumption optimization model of polysilicon reduction furnace to explore the power consumption mode of peak shaving and valley filling. According to the electricity optimization model, through the optimization of production organization, the operation time of the reduction furnace is adjusted. If the the reduction furnace runs at 19:00 every day, the electricity cost of each operation cycle can be reduced by about 12 000 yuan, which can reduce the electricity cost of the reduction furnace by about 4%, and the cost reduction effect is obvious.

Key words: polysilicon; reduction furnace, peak-valley-flat; electricity price; optimization