

# 多晶硅还原生产系统节能提质探讨

石何武, 张升学, 杨永亮

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

**[摘要]** 多晶硅作为光伏行业和半导体行业的基础材料,近年来发展迅速。还原生产系统作为多晶硅生产的关键环节,其装备技术水平、工艺流程先进性、系统热能利用合理性是关系多晶硅稳定生产的重要因素。本文介绍了多晶硅还原装备的发展历程,分析了还原系统液相供料方式和气相供料方式的选择,并重点研究了还原生产过程还原炉钟罩水、还原尾气、底盘水的余热回收利用技术,为多晶硅生产建设以及运行提供参考,以期实现高效、节能、绿色环保的多晶硅还原生产目标。

**[关键词]** 多晶硅; 还原炉; 汽化器; 余热回收; 供料方式; 节能

**[中图分类号]** TQ127.2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2025)01-0055-05

**DOI:** 10.19610/j.cnki.cn10-1873/tf.2025.01.009

## 0 引言

能源和环境问题日益成为世界关注的焦点,尤其气候变化是当前人类生存和发展所面临的共同挑战,受到世界各国人民和政府的高度关注。2030年实现“碳达峰”、2060年实现“碳中和”是我国对国际社会的庄严承诺,并已纳入我国生态文明建设的总体布局<sup>[1]</sup>。在此背景下,国际太阳能电池市场迅速扩大,而作为太阳能光伏产业的基础原材料多晶硅产业也随之驶入快车道。多晶硅是制造抛光片、太阳能电池及高纯硅制品的主要原料,是半导体工业、电子信息产业、太阳能光伏产业的最主要、最基础的功能性材料<sup>[2]</sup>。

还原生产系统作为多晶硅生产的关键环节,其装备技术水平、工艺流程先进性、系统热能利用合理性等是一个多晶硅项目的关键衡量因素。各多晶硅生产企业在实际生产过程中,因建设规模、装备选

型、工艺流程、传热媒介的差异,易出现系统热能利用不全、生产能耗高、物料消耗高、投资成本高的“三高”问题,直接提高了多晶硅的生产成本。在多晶硅市场竞争日益激烈的形势下,生产成本的高低决定着多晶硅生产企业未来的命运。当生产规模以及装备水平相当时,如何更加有效地降低多晶硅生产物料消耗和能量消耗,是降低多晶硅生产成本的有效途径,也是企业能够在市场竞争中胜出的关键。

## 1 多晶硅还原装备发展历程

早在20世纪末期,多晶硅作为半导体性能优异的材料得到广泛应用,但当时国内的多晶硅生产技术水平低,其核心设备还原炉都依赖进口,而且还是3对棒、9对棒等小炉型。在以中国有色工程有限公司为首的专家技术人员坚持不懈的努力下,历经多年的攻关研发,我国在21世纪初期成功攻克多晶硅生产全流程工艺技术,打破了国外技术封锁,同时核心装备的研究也取得了较大成果,12对棒还原炉炉型和24对棒还原炉炉型先后取得突破,并在千吨级多晶硅项目中得到广泛应用。

核心设备还原炉的不断升级换代得益于数值仿真的介入。三维模拟计算软件 ANSYS 可建立还原炉模型,采用专业的 Gambit 进行网格划分,其模型选择合适的边界条件,并嵌入气相沉积化学反应,其求解器采用分离格式,对还原炉内的温度场、动量场以及质量场进行仿真模拟<sup>[3]</sup>。在理论研究以及仿真软件的支持下,加上实际生产经验数据的积累,国

**[收稿日期]** 2024-08-18

**[作者简介]** 石何武(1982—),男,安徽安庆人,硕士,高级工程师,主要从事稀有金属材料、多晶硅及化学化工相关领域的研究、设计和开发工作。

**[引用格式]** 石何武,张升学,杨永亮.多晶硅还原生产系统节能提质探讨[J].绿色矿冶,2025,41(1):55-59,70.

SHI Hewu, ZHANG Shengxue, YANG Yongliang. Discussion on energy saving and quality improvement of polysilicon reduction production system[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2025, 41(1): 55-59, 70.

内还原炉装备的研究蓬勃发展,同时国内多晶硅生产从千吨级多晶硅生产线发展到万吨级多晶硅生产线,规模化生产趋势越来越明显,生产成本降低的需求促使还原炉的大型化和国产化。

21 世纪初期,还原炉采用常压运行工艺技术,12 对棒还原炉的生产直接电耗高达  $300 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$  以上;随着生产技术水平的提升、控制能力的加强,电耗逐渐下降至  $180 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$  左右;后来提高还原炉的运行压力继续降低还原直接电耗,在  $0.5 \text{ MPa}$  运行压力下 12 对棒还原炉直接电耗降至  $60 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{kg}$  左右,仅从电耗这个角度,多晶硅的生产成本降低了近 80%;随后 24 对棒、30 对棒、36 对棒、48 对棒、40 对棒、60 对棒以及 72 对棒等大型还原炉型出现在不同多晶硅生产企业的生产线上。根据计算机仿真模拟计算结果以及不同对棒数的还原炉实际运行结果,不同还原炉大型化后的直接生产电耗基本接近(图 1)。

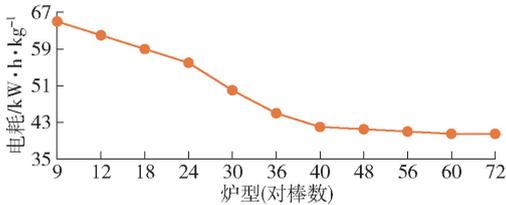


图 1 加压运行条件下不同炉型还原电耗变化趋势

随着还原炉的大型化和国产化,还原炉的售价也趋于稳定,目前太阳能光伏多晶硅还原炉的材料主要采用碳钢和不锈钢两种,与物料接触部分采用不锈钢,其他部件均采用碳钢材料,这样既能够满足产品品质需求,又无需采用特殊材料,进而可降低还原炉的加工成本和缩短还原炉的制造周期。根据近年来年产 5 万 t 多晶硅生产企业的还原炉配置情况,各企业的还原炉炉型都在 36 对棒以上,最多设置两栋还原厂房。根据单台还原炉的理论产能计算,不同炉型满足年产 5 万 t 多晶硅的配置还原炉台数见表 1。

表 1 年产 5 万 t 多晶硅不同炉型配置

序号	炉型 (对棒数)	单炉年产能/ $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$	配置数量/ 台	备注
1	36	590	96	两栋还原厂房
2	40	690	84	两栋还原厂房
3	48	810	72	两栋还原厂房
4	56	840	68	两栋还原厂房
5	60	900	64	两栋还原厂房
6	72	1 100	51	单栋还原厂房

## 2 还原供料系统

还原生产工艺的核心之一是供料系统,从原料车间提纯后的高纯三氯氢硅和吸附净化后的高纯氢气通过管网输送至还原车间供出气撬块为还原炉供料,目前还原炉的供料方式主要有液相供料和气相供料两种。

### 2.1 液相供料

液相供料是指高纯三氯氢硅从原料车间通过管道输送以液相的形式供入每台还原炉配套的进出气撬块内,进出气撬块内设置有汽化器。该方法的优点在于液相计量准确,流量调节按照供料曲线与氢气混合调整,更加精准,但进出气撬块内的流程相对复杂,设备数量多,控制点多。在还原车间一般设置液相高纯三氯氢硅缓冲罐,也可以直接将此供料罐设置在原料车间,通过管道实现物料的输送。液相供料能够按照预定供料曲线为还原炉供料,调节计量精准,是一种理想的供料方式。

为了充分利用还原尾气所携带的热量,早期还采用李比希管的汽化方式,即液相高纯三氯氢硅和高纯氢气在管道混合器内混合后进入李比希管,利用还原尾气的热量进行汽化,同时设置高温水热源作为初期还原尾气温度低时的汽化热源,这种供料方式的设备结构形式复杂,李比希管汽化器的质量是运行稳定的关键,尤其是随着规模化生产后单台还原炉的供料量大幅提升,受限于李比希管的制作难度,该汽化方式已无法满足大供料量的要求,目前基本停用。

### 2.2 气相供料

气相供料一般是设置集中汽化器,汽化器内物料汽化形式分为鼓泡式和直接加热蒸发式,两种方法在物料供应上也有一定的差异。

第一种汽化方式是鼓泡式,即将高纯氢气通入高纯三氯氢硅中,利用高纯氢气产生的气泡将高纯三氯氢硅带入还原炉内,此方法利用了气相分压定律,即拉乌尔定律<sup>[4]</sup>。该方法的优点是氢气的比热容大,在输送高纯三氯氢硅和氢气的混合气时不容易液化;缺点是产生的混合蒸汽包含氢气和高纯三氯氢硅两种成分,需要根据鼓泡汽化器的温度和压力来确定二者的比例,鼓泡汽化器的形状也会影响二者的比例,而且随着高纯三氯氢硅的消耗,鼓泡容器内的空间变大,三氯氢硅的蒸发速率加快,导致三氯氢硅与氢气的比例变大,供料的物料浓度变大,因此在实际运行过程中很难精确控制氢气和三氯氢硅

的比例。

第二种汽化方式是加热蒸发高纯三氯氢硅,通过吸收热量克服分子之间的吸引力而汽化,然后将三氯氢硅气体送到管道混合器内与高纯氢气混合供入还原炉内,通过质量流量控制器(MFC)控制流量。该方法优点是可以在单位时间产生大量的高纯三氯氢硅气体,也便于调节三氯氢硅与氢气的比例;缺点是汽化后的高纯三氯氢硅气体在输送过程中容易液化堵塞管道。为了更好地匹配供料曲线进行还原炉供料,直接蒸发三氯氢硅的方式被应用更多,而且考虑到输送过程中可能出现液化现象,增设过热

器,以过热三氯氢硅气体确保输送过程中的稳定性。

在太阳能级多晶硅生产过程中,还原炉的供料量比较大,单台还原炉的高纯三氯氢硅供料量多达10 t/h以上,一般建议采用液相供料的方式,但液相供料的李比希管模式并不适合,套管式换热器的效率相对较低,难以满足如此大的供料汽化需求,因此液相供料基本采用单独设置汽化器的方式。而对于气相供料,为了相对准确地计量高纯三氯氢硅,确保进入还原炉内的高纯氢气和三氯氢硅的配比按照供料曲线供应,建议采用直接加热汽化的方式,避免鼓泡汽化过程中的配比波动。不同供料方式异同点见表2。

表2 不同供料方式优缺点对比表

供料方式	优点	缺点	备注
液相	李比希管	计量准确,供料配比可以稳定控制,回收还原尾气余热	难以满足大供料量的需求,对李比希管的质量要求较高,维修难度大,换热效率低
	汽化器	计量准确,供料配比可以稳定控制	需要外加热源对汽化器进行加热汽化,汽化设备相对分散
气相	鼓泡式	氢气鼓泡汽化后的三氯氢硅在混合气中维持稳定输送,因为分压热源品位相对较低	随着鼓泡汽化的进行,三氯氢硅的汽化速率发生变化,氢气与三氯氢硅的配比产生波动
	直接汽化式	汽化设备集中,进出气撬块内的设备以及流程相对简洁,氢气与三氯氢硅的配比调节灵活	汽化后的三氯氢硅在输送过程中容易液化,堵塞管道

### 3 余热回收利用

在多晶硅还原生产过程中,还原沉积载体通过电能维持1 050 ℃的高温条件,满足多晶硅的气相沉积要求,高纯三氯氢硅和高纯氢气在沉积载体上发生气相沉积反应获得高纯产品多晶硅。在这个过程中,电能转换的热量将通过以下几种方式带出系统:一是热辐射和热传导,即通过钟罩夹套冷却水、底盘夹套冷却水、电极冷却水带走;二是还原尾气携带,即高温尾气携带热量出还原炉;三是还原炉的表面散热损失等。

绝对零度以上的物体表面都能产生热辐射,热辐射是指物体通过电磁波传递热量的过程,温度愈高,热辐射现象越明显。还原生产过程中,还原炉内的沉积载体温度高达1 000 ℃以上,炉内的气相氛围温度也在800 ℃左右,因此,炉内热量将以热辐射形式传递至还原炉内壁以及底盘上表面,再通过热传导的形式被夹套内的高温水以及底盘冷却腔内的降温水带走,通过余热回收技术实现热能的回收利用<sup>[5]</sup>。

热辐射和热传导以及还原尾气携带的热量可以

通过合理的工艺技术实现回收,而表面散热损失则主要通过采用优质保温材料和合理的结构形式来降低。本文主要研究热量回收的实现途径和方法。根据实际生产经验数据和计算机仿真模拟计算得知,绝大部分热量是通过还原炉的钟罩和底盘的冷却介质带走,还有部分热量随高温还原尾气带出还原炉。早期的多晶硅生产不注重余热的回收利用,导致多晶硅生产外补蒸汽量大,生产成本居高不下。随着余热回收技术的逐渐成熟和稳定,各个多晶硅生产企业开始注重还原副产热量的回收利用,大幅降低外供蒸汽量,降低生产成本,提升企业的竞争力。根据某多晶硅生产企业的实际生产数据,并结合ANSYS软件对还原炉内的温度场和流场进行模拟分析,大型还原炉的电能去向分布情况如图2所示。

本文剖析了几种不同情况下的余热回收方式,根据生产实际运行情况提出一种合理的还原余热回收方案,为多晶硅生产降本增效提供一种有效途径。

#### 3.1 还原炉钟罩冷却水热量回收

多晶硅还原生产过程中,还原炉内的温度较高,高温硅棒热辐射将热量传递到还原炉钟罩内壁,使

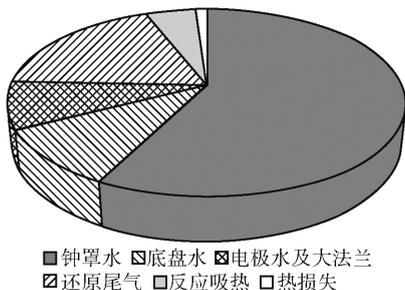


图2 还原炉电能不同去向分布图

得内壁温度升高。由于耐高温的材料造价昂贵,对规模化生产投资不利,因此通过增设外夹套的方式,在夹套内通入冷却介质,持续带出辐射到炉壁的热量,确保还原炉的安全稳定运行。常用的冷却介质有导热油、高温水等。导热油为碳氢化合物,作为还原炉钟罩的冷却介质,会给最终的多晶硅产品质量带来一定的风险,即容易出现碳渗现象,导致最终产品中碳含量超标,因此当前还原炉的夹套冷却介质均采用高温水。

在还原炉钟罩夹套冷却介质高温水的温度选择上需要综合考虑。如果高温水温度不够高,导致最终下游用热端效果不佳,回收的热量不能得到很好的应用;如果高温水温度过高,需要较高的运行压力才确保运行过程中高温水不会汽化,从而对钟罩的夹套形成较大的外压作用。目前大规模的太阳能生产还原炉基本采用加压生产的模式,还原炉内的运行压力维持在 0.5 ~ 0.6 MPa,高温水维持过高的压力会导致还原炉钟罩内壁形成较大的压差,钟罩的壁厚需加大,设备的造价成本大增。因此,结合下游工序的用热特点以及还原炉自身的运行特点,高温

水基本按照 150 ~ 155 ℃ 供应,按照 170 ~ 175 ℃ 进行回水温度控制。高温水经过还原钟罩夹套后,吸收还原炉在生产过程中副产的热量,进入热能转换站,然后进入蒸汽闪蒸设备,经过降温减压产生蒸汽,从闪蒸罐顶部进入蒸汽系统供后续用热点使用;降温后的低温水经过提压泵增压后返回还原系统高温水供水系统,达到水循环使用的目的。具体的流程示意图如图 3 所示。

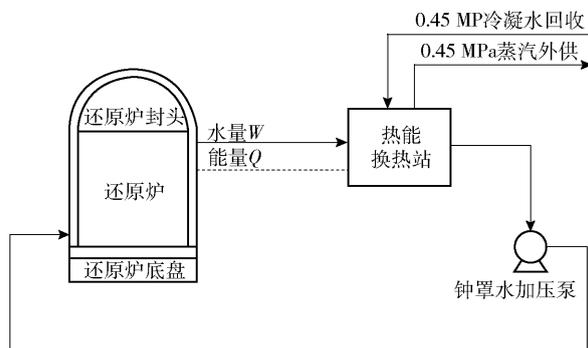


图3 钟罩水余热回收流程示意图

该方法是目前大部分多晶硅生产企业采用的热能回收利用技术,主要回收利用了通过钟罩传递出来的热量,所产 0.45 MPa 的蒸汽也能满足下游精馏提纯工序的用热需求。

### 3.2 还原尾气携带热量的回收

还原尾气主要成分是氯硅烷、氢气和氯化氢气体,出炉时温度一般在 600 ~ 700 ℃,这部分还原尾气携带的热量如果回收利用得当,将会大幅减少外补热源的使用。为此,充分利用还原尾气的温度梯度变化,采用分段递级回收工艺技术(图 4),将还原尾气携带的热量进行回收,同时副产不同品位的蒸

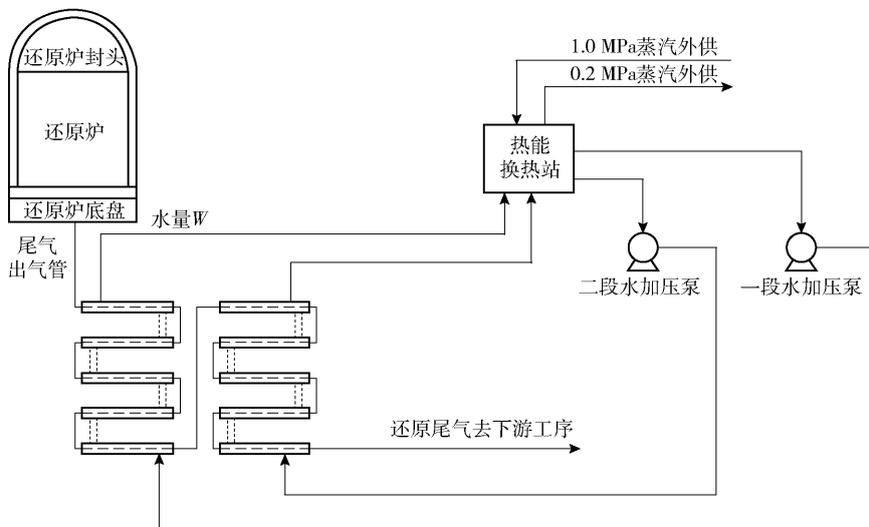


图4 还原尾气余热回收流程示意图

汽满足下游工序用热生产需求。利用该技术,不仅大大减少循环水的使用量,还可以充分回收还原尾气携带的热量,有较好的经济效益。

### 3.3 还原底盘冷却水热量的回收

早期的还原炉装备主要依靠国外进口,设备的构造以及运行参数一直未被公开,国外对这些装备技术信息进行封锁,国内企业只能按照给定的运行参数操作,其中底盘使用的冷却介质是60~90℃的中温水,这部分水基本都是通过空冷器或者循环水的方式降温满足循环使用的要求,这不仅导致底盘辐射热量的损耗,还增加该部分冷却介质的处理费用。随着国内多晶硅生产工艺及装备技术的进步,国外封锁被打破,根据还原炉的底盘结构特点,冷却介质改用130~150℃的高温水进行冷却,还原底盘所吸收的辐射热量也通过高温水携带进入热能转换站实现热量的转换,该热量回收方法示意图如图5所示。

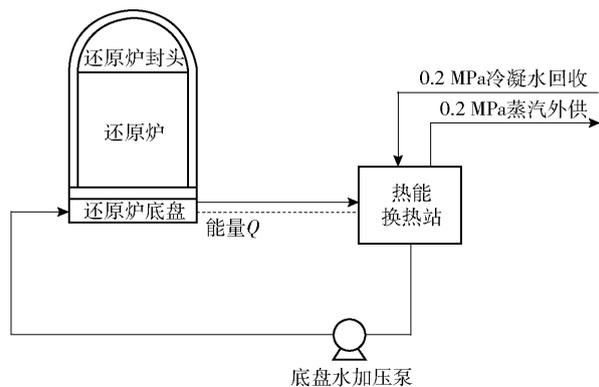


图5 底盘水余热回收流程示意图

通过以上对还原炉钟罩、底盘以及夹套管热量回收利用的分析研究可知,还原生产过程中副产的热量大部分通过还原炉钟罩冷却水带走,还原炉底盘冷却水以及还原尾气夹套管冷却器的热量通过逐级回收的方式带走小部分,其他热损失以及电极冷却水的热量无法实现彻底回收,这部分热量总体占比较小。根据实际生产运行数据和计算机仿真模拟计算结果得知,还原炉钟罩、底盘以及夹套管冷却的热量的回收效率在85%以上。以生产1 t多晶硅为例,目前还原炉装备的领先水平是还原直接电耗为42 kW·h/kg;根据还原直接电耗和回收率计算,高温

水所携带的副产热量通过闪蒸可以产生约60 t蒸汽,这些蒸汽可以充分应用到原料用热工序。随着精馏工艺技术的提升,热能回收效率的提高,多晶硅生产系统目前基本实现蒸汽零外补,从而大幅降低了多晶硅的生产成本。

## 4 结论

本文通过对多晶硅还原生产技术以及装备水平的探索分析,针对现有的大规模多晶硅生产系统应该如何配置还原炉装备,选择何种还原供料工艺技术路线进行了分析,同时重点研究了还原生产过程中副产热量的回收利用技术,结合上下游工序用热情况以及装备造价的成本等选择合适的余热回收技术。年产5万 t的多晶硅工厂在核心设备上建议优先选择40对棒和48对棒还原炉作为生产炉型,同时可以适当的配备更大炉型作为实验论证,为新技术的积累奠定基础。为了确保多晶硅产品品质的稳定性,可以优选集中汽化的模式,确保生产过程中能够按照供料曲线进行供料,满足生产稳定性的要求。高温还原尾气、钟罩和底盘的冷却水可以副产1 MPa、0.45 MPa、0.2 MPa的蒸汽作为原料用热工序的热源,较好地匹配系统热量利用。本文研究内容对于新建工厂前期方案论证和投资预算计算有着一定的指导意义。

### [参考文献]

- [1] 张浩楠,申融容,张兴平,等. 中国碳中和目标内涵与实现路径综述[J]. 气候变化研究进展,2022,18(2): 240-247.
- [2] 严大洲,杨永亮,张升学,等. 多晶硅耗能分析与节能实践[J]. 电子科学技术,2014,1(2):224-230.
- [3] 张攀,王伟文,范军领,等. 三维还原炉内多晶硅化学气相沉积的数值模拟[J]. 太阳能学报,2012,33(3): 511-515.
- [4] 傅献彩,沈文霞,等. 物理化学.上册[M].第五版.北京.高等教育出版社,2005.07.
- [5] 石何武,杨永亮,姜利霞,等. 多晶硅生产系统高温水的利用优化实践[J]. 有色冶金节能,2019,39(5):9-13.

(下转第70页)

## Study on the Spatial-temporal Evolution of Surface Deformation under Different Mining Schemes of a Mine

ZHAI Jianbo, ZHANG Shaojie, HONG Wei

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** In order to study the impact of underground mining process on surface artifacts of a mine, combined with the engineering geological conditions of the mine, three mining schemes were proposed considering different mining ranges, mining sequences and pillar retention, and a three-dimensional numerical model of the mine back-mining process has been established by using Flac<sup>3D</sup> numerical simulation software, which analyzed the surface tilt, curvature and horizontal deformation of the mine under the different mining schemes, revealed the spatial and temporal evolution characteristics of surface deformation of the mine under the different mining schemes, and determines the optimal mining scheme for the mine. The study shows that: compared with mining scheme 1 and 2, mining scheme 3 can effectively reduce the surface deformation caused by underground mining; mining scheme 3, after all the ore bodies are mined, the deformation value of the surface is less than the permissible value of “Code for Design of Nonferrous Metal Mining”, when the protection level of the buildings and structures is class I. The results of this study can be used for the safety of mines and for the development of the mining industry. The results of this study can provide technical guidance and decision-making basis for the safe and efficient production of mines, and are of great significance for the protection of surface cultural relics.

**Key words:** underground mining; numerical simulation; cultural relics protection; surface deformation

(上接第 59 页)

## Discussion on Energy Saving and Quality Improvement of Polysilicon Reduction Production System

SHI Hewu, ZHANG Shengxue, YANG Yongliang

(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** As the basic material of photovoltaic industry and semiconductor industry, polycrystalline silicon has developed rapidly in recent years. As the key link of polysilicon production, the equipment and technology level, the advanced process flow and the rationality of system heat energy utilization are the important factors related to the stable production of polysilicon. This paper introduced the development process of polysilicon reduction equipment, analyzed the selection of liquid phase feeding mode and gas phase feeding mode of reduction system, and focused on the waste heat recovery and utilization technology of reduction furnace bell water, reduction tail gas and chassis water in the reduction production process, so as to provide reference for the construction and operation of polysilicon production, in order to achieve the goal of high efficiency, energy saving and green environmental protection of polysilicon reduction production.

**Key words:** polycrystalline silicon; reduction furnace; vaporizer; waste heat recovery; feeding mode; energy-saving