

# 中国多晶硅产业链现状及发展方向

丁国江 袁永春

峨嵋半导体材料研究所, 四川 峨眉山 614200

**摘要:** 多晶硅是全球电子工业及光伏产业的基石, 95%以上的半导体器件和 99%以上的集成电路(IC)以及 90%的太阳能电池芯片都是由硅材料(含单晶硅及多晶硅)制造的。本文对多晶硅产业链进行了详细的分析和叙述, 对中国多晶硅产业现状和产业链存在的问题提出了自己的建议和看法。

**关键词:** 多晶硅; 单晶硅; 多晶硅产业链; 太阳能; 太阳能电池

中图分类号: TM615; F4

文献标识码: A

文章编号: 1001-9006(2009)04-0001-05

## Contemporary Development and Trend of Polysilicon Industries in China

*DING Guo-jiang, YUAN Yong-chun*

(Emei Semiconductor Research Institute, 614200, Emeishan, Sichuan, China)

**Abstract:** Polysilicon is the cornerstone of the world's electronics industry and the photovoltaic industry. More than 95% of semiconductor devices, more than 99% of integrated circuits and more than 90% of the solar cell chips are manufactured by the silicon material (Monocrystalline silicon and polysilicon). In this paper, polysilicon industry chain and the status quo of China's polysilicon industry are described and analyzed in detail, providing proposed views on solutions to the existing problems there in.

**Key words:** polysilicon; monocrystalline silicon; polysilicon industrial chain; solar energy; solar cell

多晶硅是全球电子工业及光伏产业的基石, 95%以上的半导体器件和 99%以上的集成电路(IC)以及 90%的太阳能电池芯片都是由硅材料(含单晶硅及多晶硅)制造的。多晶硅按照硅的用途分为太阳能级硅(SG), 主要用于太阳能电池芯片的生产制造; 电子级硅(EG), 主要用于半导体芯片制造。多晶硅市场需求经历了由“半导体产业主导”向“光伏产业主导”的转变, 后者造就了多晶硅行业景气在 2004 年的向上拐点。

2006 年, 在全球范围内多晶硅产量中, 电子级占近 55%, 太阳能级占 45%多。随着太阳能光伏产业的迅猛发展, 太阳能电池芯片对多晶硅需求量的增长速度远高于半导体多晶硅的发展(太阳能递增速度 2 位数以上, 半导体芯片 5%左右), 太阳能多晶硅的需求量已经大幅度超过电子级多晶硅用量。当前, 晶体硅材料(包括多晶硅和单晶

硅)是最主要的光伏材料, 其市场占有率在 90%以上, 而且在今后相当长的一段时期也依然是太阳能电池的主流材料。我国多晶硅市场需求旺盛, 生产原料石英石储量丰富。2000 年以来, 我国每年的工业硅产量都达到 40 万 t 以上, 约占世界工业硅总产量的 1/3, 年出口量超过了 30 万 t。目前我国的工业硅产能、产量和出口量均居世界首位。

由于传统能源(煤、石油、天然气等)的日渐短缺, 传统能源的不可再生性和对环境日益加重的负面影响, 以及各个国家的能源安全考虑, 使得资源无穷尽、可再生、清洁的绿色能源——太阳能发电的光伏产业(PV)在上世纪末本世纪初受到世界各国的重视。各国政府纷纷立法, 制定鼓励政策, 提出发展规划, 大力扶持, 推广应用, 使其成为近 10 年来增速最快的能源产业之一。

根据市场需求预测, 到 2010 年, 全世界 PV

收稿日期: 2009-06-12

作者简介: 丁国江(1964-), 男, 高级工程师, 现任峨嵋半导体材料厂副厂长、研究所副所长。在各级刊物发表论文多篇。长期从事半导体以及硅材料的研究和项目建设管理工作。

市场年安装量将在 3.2~3.9 GW 之间，而光伏工业年收入将达到 186~231 亿美元。最近 3 年全球太阳能电池总产量平均年增长率高达 49.8% 以上。在国际市场的强力带动下，我国太阳能电池产业也增长迅猛，2006 年我国太阳能光伏组件的出口额超过了 12 亿美元。2007 年我国一跃成为世界太阳能电池的第一大生产国，2007 年世界太阳能电池产量为 4 000.5 MWp，其中中国太阳能电池产量 1 088 MWp，超过日本(920 MWp)和欧洲(1 062.8 MWp)。

全球多晶硅生产长期被七大集团垄断：美国的 MEMC 和 Hemlock，挪威的 REC(厂址在美国，系收购日本小松电子的 Asimi 和 SGS 两厂)，日本的三菱、住友钛和德山以及德国瓦克。七大集团拥有 10 个多晶硅工厂，其中美国有 5 家、日本有 3 家、欧洲有 2 家。七大集团的多晶硅生产历史较长，经验丰富，技术成熟，生产条件相对优越，原材料成本低。如 Hemlock、Wacker 和德山等硅厂本身都在化工集团内部，化工材料丰富廉价，另外，电价低廉。由于日本国内电价高昂，日本三菱和早期小松电子都选择了在美国建厂。

高纯多晶硅是电子工业和太阳能光伏产业的基础原料，在未来相当长的时间里，还不可能有其他材料能够替代硅材料而成为电子和光伏产业主要原材料。

随着多晶硅市场的蓬勃发展，世界各国都竭尽全力降低多晶硅成本，提高多晶硅上、下游产品和多晶硅副产物的综合利用率，随之而来的就是非常重视多晶硅产业链的形成与建设。

## 1 多晶硅产业链概述

多晶硅产业链就是指以多晶硅为中心的上、下游各类产品的辐射和有机组合。

目前，多晶硅产业链主要有 3 条：一是以“电子级多晶硅”为中心的半导体硅系列产品和设备产业链；二是以“太阳能级多晶硅”为中心的太阳能光伏系列产品和设备产业链；三是多晶硅副产物系列产品和设备产业链。

### 1.1 半导体硅系列产品和设备产业链

以“电子级多晶硅”为中心的半导体硅系列产品和设备产业链(见图 1)包括：

(1) 以电子级多晶硅为中心的产业链上游关联的产业主要包括电力工业(多晶硅是高载能产品，电的价格和单耗是影响多晶硅生产成本的主要因素)、氯碱工业(主要供应多晶硅生产中所需的氯气和氢气等)、工业硅产业(多晶硅生产的主要原料)；

(2) 以电子级多晶硅为中心的产业链下游关联的产业主要包括两条：一条是直拉单晶硅、抛光片、外延片、IC 电子器件、相关整机产品连接的产业链，另一条是区熔单晶硅、抛光片、磨片、功率电子器件、相关整机产品连接的产业链；

(3) 以电子级多晶硅为中心的产业链侧向关联的产业主要包括多晶硅生产配套设备产业、拉晶及配套设备产业、切磨抛配套设备产业、封装及配套设备产业等。

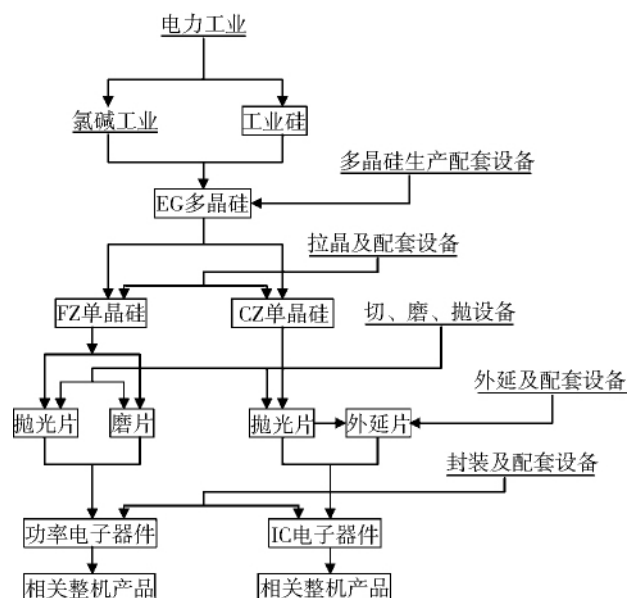


图1 半导体硅系列产品和设备产业链

### 1.2 太阳能光伏系列产品和设备产业链

以“太阳能级多晶硅”为中心的太阳能光伏系列产品和设备产业链(见图 2)包括：

(1) 以太阳光级多晶硅为中心的产业链上游关联的产业与半导体硅系列相同；

(2) 以太阳光级多晶硅为中心的产业链下游关联的产业主要包括：以铸造多晶硅或太阳能级单晶硅生产制备电池片及组件产业；由电池片及组件生产制备的太阳能光伏产品(主要包括：太阳能电池及组件、光伏电源/蓄电池、充电器、

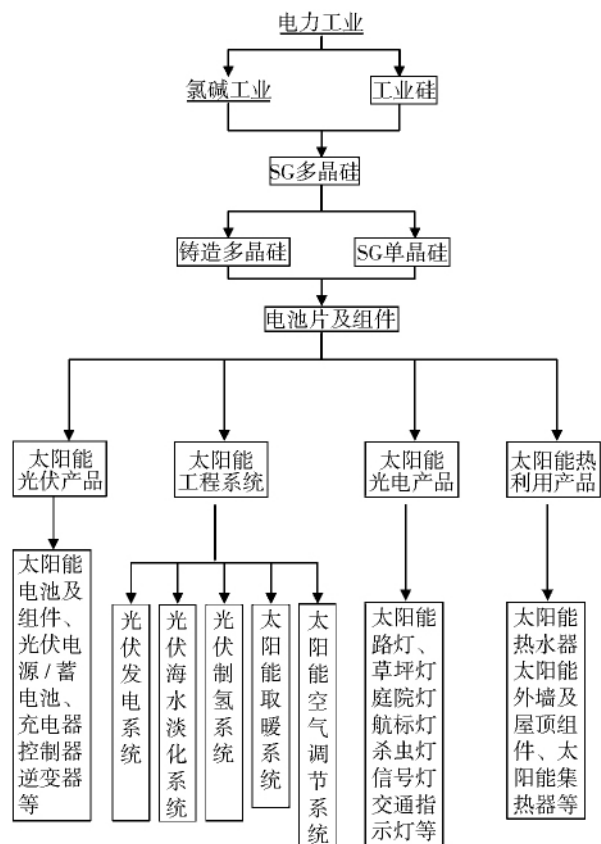


图2 太阳能光伏系列产品和设备产业链

控制器、逆变器等)产业、太阳能工程系统(主要包括:光伏发电系统、光伏海水淡化系统、光伏制氢系统、太阳能取暖系统、太阳能空气调节系统等)产业、太阳能光电产品(主要包括:太阳能路灯、太阳能草坪灯、太阳能庭院灯、太阳能航标灯、太阳能杀虫灯、太阳能信号灯、太阳能交通指示灯等)产业、太阳能热利用产品(主要包括:太阳能热水器、太阳能外墙及屋顶组件、太阳能集热器等)等产业;

(3) 以太阳能级多晶硅为中心的产业链侧向关联的产业主要包括电池片及组件生产配套设备产业、太阳能光伏产品生产配套设备产业、太阳能工程系统生产配套设备产业、太阳能光电产品生产配套设备产业、太阳能热利用产品生产配套设备产业等。

### 1.3 多晶硅副产物系列产品和设备产业链

多晶硅副产物系列产品和设备产业链(见图3)包括:

(1) 副产三氯氢硅生产硅烷偶联剂等有机硅烷产业;

(2) 副产四氯化硅生产硅酸乙酯(主要用于制作高档防腐涂料以及作为精密熔模铸造和成型铸造的脱模剂)产业;

(3) 副产四氯化硅生产气相白炭黑(主要用于硅橡胶、橡胶、塑料等的增强剂、油墨、医药、造纸、食品、化妆品等的添加剂、化学机械抛光等行业的抛光剂)产业;

(4) 副产四氯化硅生产光纤预制棒(主要用于生产光纤和光缆)产业;

(5) 副产四氯化硅生产高纯石英(主要用于生产光学器件和半导体器件);

(6) 其它工艺方法生产多晶硅(如:四氯化硅锌还原工艺、四氯化硅与三氯氢硅混和气体氢还原工艺等)产业。

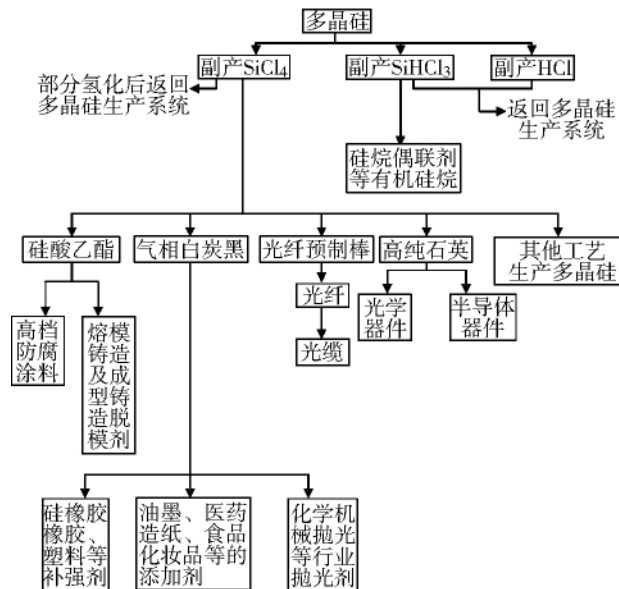


图3 多晶硅副产物系列产品和设备产业链

## 2 中国多晶硅产业现状和产业链存在的问题

### 2.1 中国多晶硅产业现状

我国多晶硅工业起步于上个世纪五六十年代,生产厂多达20余家,由于生产技术难度大、生产规模小、环境污染严重、耗能大、成本高,绝大部分企业亏损而相继停产和转产,到2000年仅剩下峨嵋半导体材料厂(所)一家,产能与生产技术都与国外有较大的差距。

这一状况在近些年有了很大变化。截止2008年3月,全国已有5家公司能生产多晶硅产品,共有16个省市自治区布局投资32个多晶硅建设

项目，其中只有极少项目已投产，其他的项目有的正在建设之中，有的拟建或已奠基。按这 32 个项目的计划产能统计，如果全部建成投产，几年后中国的多晶硅年产能将达到 10 万 t，当然实际产量大打折扣。

## 2.2 中国多晶硅产业链存在的问题

我国多晶硅产业链存在的问题主要有：

(1) 项目选址不合理：高载能决定选择低价地域；

(2) 区域产业配置不合理：综合利用、废物处理等，精细化工决定了选择化工区域；

(3) 产业链的理解的局限性：仅限于多晶硅产品主业；

(4) 中国没有形成相对完整的产业集群，有待企业家和政府关注。

## 3 中国多晶硅产业链的发展方向

传统的多晶硅供应商包括美国的 Hemlock、MEMC、SGS、ASimi(REC)、德国的 Wacker 和日本的 Tokuyama、Mitsubishi。这些厂商多为联合化工企业，长期从事半导体多晶硅生产，拥有成熟的化工产品和多晶硅提炼技术，既便于为多晶硅厂提供化工原料如氯气、氢气等，也可以利用多晶硅生产排除的四氯化硅及次级三氯氢硅等生产有机硅、气相白炭黑等硅化工产品，实现物料循环，减少消耗和环境污染，实现可持续发展。

根据我国的国情和多晶硅的发展现状，在借鉴国外的先进经验基础上来确定中国多晶硅产业链的布局和发展方向是非常重要的。产业链可以是相对完整的、可以是局部的、也可以是交叉的。这些都要因地制宜，根据各地区、各公司的实际情况来确定。

### 3.1 建立发电-工业硅-多晶硅产业链，以降低多晶硅生产成本

工业硅是多晶硅生产的主要原料，工业硅、多晶硅生产电耗都比较高。工业硅生产所需电耗的费用占总成本的 30% 左右，多晶硅综合电耗在 200~300 kW/kg，电费在多晶硅生产成本中占有较高的比例，以电费为主的动力费用约占多晶硅生产总成本的 30%。因此，从长远看，借鉴国内类似产业发展的经验和教训，为提高多晶硅产品

竞争力，降低成本，建立发电 - 工业硅 - 多晶硅产业链是我国多晶硅发展的方向之一。

### 3.2 建立发电-多晶硅-有机化工产业链，提高资源利用率

在多晶硅生产过程中，一般单耗为氯气 0.9~3.4 kg/ 千克多晶硅，硅粉 1.3~1.9 kg/ 千克多晶硅，这些消耗随着多晶硅规模的扩大，排出的废弃物如四氯化硅、次级三氯氢硅数量不断增加。为了处理这些含氯硅的废弃物，在氢化正常时，目前国内主要就是靠碱性中和，产生固体废弃物和氯化钙等含盐废水。显然，这种处理方式既浪费了资源，又对环境产生二次污染隐患。因此，应借鉴国外多晶硅厂商经验，在积极开发完善氢化工艺技术、降低消耗的同时，利用含氯硅废弃物积极生产有机硅、白炭黑等硅化工产品，既提高资源利用率，又减少了对环境污染隐患。为彻底实现多晶硅生产过程中物料的大循环，建立发电 - 多晶硅 - 有机化工产业链对我国多晶硅产业的布局及发展有着重要的意义。

### 3.3 建立多晶硅-单晶硅-硅片-IC(功率)器件产业链，提高我国企业的国际竞争能力

众所周知，中国有全球最大的 IC 市场。从产业链转移角度分析，欧洲及美国只有很少的可能再建新厂，半导体制造向亚洲尤其是中国大陆转移是大势所趋。

对亚洲地区逐一做分析可以看出，日本半导体业面临成本太高、模式陈旧等困境；中国台湾半导体业虽然增长，但是受市场、人力成本、电力及地震等客观条件限制，其建厂的比较优势不如从前；韩国的三星及海力士公司在存储器领域的气势非凡，仍处于上升态势；其他如印度、越南等地的大产业环境尚欠火候。因此，全球每年有约 500 亿美元的半导体投资，对于中国大陆是个极好的机遇。韩国海力士在无锡建存储器厂以及英特尔公司能选择在大连投资 25 亿美元兴建 12 英寸芯片厂就是最好的证明，IC 产业链向中国大陆转移仍将继续。功率半导体器件是能承受较高电压和较大电流的半导体产品，现代功率半导体器件与大规模集成电路是半导体技术中相互独立平行发展而又时有交叉的两个不同专业技术领域，分别解决不同的专业技术问题，制造不同性能的



产品，满足不同用途的需要。功率半导体器件从功能上讲是进行电能处理的半导体产品，主要用于电源和功率执行(控制)电路。随着电子产品体积越来越小，功率半导体器件将向着复合型、模块化方向发展。从性能上看，大电流、高速、高反压功率半导体器件拥有非常稳定的市场需求，由于其不易集成或集成成本太高，具有较强的不可替代性，今后仍是市场需求的主要品种。特别是随着 MOSFET、IGBT、JFET 等新型功率器件制造技术的日趋成熟和应用技术的不断升级，功率半导体器件的产品格局发生着重大的转变，大电流、高速、高反压功率半导体器件将得到越来越广泛的应用。所以建立多晶硅 - 单晶硅 - 硅片 - IC (功率)器件产业链，是提高我国企业国际竞争能力的有效途径。

### 3.5 建立多晶硅-单晶硅-电池片及组件-太阳能光伏电站系统产业链，实现光伏产业质的突破

太阳能光伏技术作为太阳能利用中最具意义的技术，成为世界各国竞相研究应用的热点。最近 10 年以每年平均 30% 以上的速度递增，最近 3 年更是以每年 50% 以上的速度高速增长。太阳能光伏发电已经成为可再生能源领域中继风力发电之后产业化发展最快、最大的产业。目前，光伏发电中的太阳能电池仍然是以晶体硅太阳电池为主，一枝独秀，市场份额近 90%，大面积商品化太阳电池效率可达到 18%~19%。其次是非晶硅薄膜太阳电池发展迅速，市场份额占到 6%~7%。其他的如 CIGS、砷化镓等处于产业化的初期，市场份额较小。目前的光伏产业主要是指晶体硅太阳电池产业。太阳能光伏发电的整个生产及应用产业链分为五个层次，即从硅材料到硅片，再到太阳电池片，然后到太阳电池组件，最后到光伏电站系统应用。所以建立多晶硅 - 单晶硅 - 电池片及组件 - 太阳能光伏发电产业链，实现光伏产业质的突破，将会对中国未来能源的利用产生革命性影响。

## 4 结语

我国地大物博，各地区的发展和工业基础差异很大。在布局和发展多晶硅产业链时，不但要注意现实状况，更要注意今后的发展前景和空间。

### 4.1 我国多晶硅产业链的布局和发展方向

我国多晶硅产业链的布局和发展应该重点围绕以下几个方向：

(1) 产品前后延伸(如：冶金硅、氯氢、多晶硅、单晶硅、硅片、太阳能光伏、有机硅单体以及有机硅、其它综合利用领域等)；

(2) 专业跨度延伸(如：冶金 - 冶金硅、化工 - 有机硅、高纯 - 试剂、电器自控 - 节能电器、非标设备制造、安全环保技术装备等)；

(3) 区域相对集中(能形成产业集群，这样可以综合利用、节约成本)；

(4) 选择优势地域(特别是电价优势区域)。

### 4.2 加强管理，加大投入，重视技术，是未来提升竞争力的有效手段

要有行之有效的激励机制，要实行精细化管理，既要有一流的战略，又要有一流的实施能力；更重要的是要有足够的资金保证，特别是保障科技投入，提升技术水平；同时，一定要改变只重视扩大规模而忽视技术进步、只强调节省投资而忽视装备水平、只重视主工艺和主装置而忽视工艺完整性的不良倾向。必须应对未来的成本、质量、安全环保竞争。

### 4.3 以资本、技术、市场为纽带，探索企业间整合的路子，是壮大中国多晶硅产业链的有效途径

在我国，多晶硅厂家可以和研究单位联合，也可以和一些有技术、有产品、有市场、有人才的后加工产品以及其它副产物利用有条件的民营企业联合，这样可以优势互补、延伸企业的产业链、占领市场、广集人才，从而壮大自己的实力，同时形成集约化产业集群。

### 4.4 慎重决策，科学决策，是规避未来风险的前提条件

受国内市场快速增长的需求带来的丰厚利润刺激，加上国家鼓励政策，不但现有国内外多晶硅厂家纷纷进行扩产，同时，有好多上市公司以及民营企业都纷纷上马。发展势头如此过猛，将带来市场供需平衡的逆转，多晶硅产品的利润空间会越来越小，而且会引起人才资源的无序竞争。特别是近期世界金融危机的来临，价格大幅度下降。所以，企业一定要冷静分析自身企业的优势和劣势，慎重决策，政府也要加强引导，防范投资风险。

(下转第28页)

制造, 燃烧器主要由一次风管、二次风管、分级风管、一次风导筒及其调节装置, 二次风旋流器及其调节装置, 分级风风门及其调节装置等组成。

## 5 锅炉试运行

湛江中粤能源有限公司的奥里油锅炉 1# 锅炉于 2004 年 6 月 28 日开始锅炉安装, 2005 年 7 月 26 日完成锅炉水压试验。2006 年 4 月 21 日开始机组整套启动, 2006 年 11 月 16 日 1# 炉开始了试运, 2006 年 12 月 2 日首次升负荷到 602.2 MW, 2006 年 12 月 5 日机组负荷达到 600 MW 稳定运行, 2006 年 12 月 13 日完成 168 h 试运行考核, 2# 锅炉于 2007 年 1 月 8 日完成 168 h 试运行考核。

(上接第5页)

目前, 全球多晶硅已经初步形成了规模效应和产业链效应, 从纵向来说, 电力工业、工业硅、多晶硅、单晶硅、硅片加工、IC(功率)器件、电池片及组件、各种电子产品、各种太阳能光伏光电产品, 犹如一条奔腾向前的大河, 其所产生的社会价值会以数十倍计的逐级增加。从横向来看, 与之相关的机械、电器、仪表、设备、材料以及作为其依托的科学、技术、工艺等各方面领域将跟随着获得巨大投入和发展。约 20 亿美元的多晶硅材料可以支撑支撑约 300 亿美元的半导体材料产业, 而这些半导体材料产业又可支撑约 8 000 亿

(上接第24页)

避免受热面管壁超温。

(4) 对省煤器出口和空预器出口表盘氧量计定期进行检查和标定, 确保显示值的准确。

(5) 建议在今后设计中, 对各受热面进行优化设计, 尽量消除同屏管间热偏差。

(6) 为了摸清炉内温度场的分布, 建议增加炉膛出口的看火孔, 或将屏过进口处的看火孔上移至炉膛出口, 以便测量炉膛出口温度。

## 4 结语

金竹山电厂 600 MW “W” 火焰锅炉系东方锅炉公司在总结前期 “W” 火焰锅炉运行经验基础

锅炉运行期间, 锅炉燃烧稳定, 锅炉主要参数达到设计值, 锅炉效率高, 各级受热面烟温及气温均与设计值接近, 高温受热面温度分布均匀, 偏差较小, 各级受热面壁温均在设计壁温以下。

## 6 结语

在借鉴和总结原东锅设计技术的基础上, 采用自主技术开发设计的两台 600 MW 奥里油锅炉的成功投运, 验证了东方锅炉自主开发设计制造、具有自主知识产权的世界上最大容量 2 × 600 MW 专燃奥里油锅炉的整体性能良好, 综合水平达到了国际先进水平。

美元的微电子产业和 4 000 亿美元的电力电子产业以及超过 1 000 亿美元的光伏产业。由此可见, 多晶硅材料产业链的倍增作用十分明显。所以, 加快我国多晶硅产业链的布局和建设是非常必要的。

### 参考文献:

- [1] 北京欧立信经济信息咨询中心. 2008 年中国多晶硅市场研究预测报告[R].
- [2] 北京华经视点信息咨询有限公司. 2007-2010 年中国单晶硅市场调研与项目投资前景分析报告[R].
- [3] 陈学森. 构建电 - 多晶硅 - 化工合理产业链, 实现我国多晶硅产业可持续发展[J]. 新材料产业, 2008, (7): 43
- [4] 王晓宁. 中国太阳能光伏产业链剖析及其对产业的影响 [J]. 电器工业, 2008, (7): 45

上设计制造的首台国产 600 MW “W” 型火焰锅炉, 实际运行结果表明, 锅炉主要性能指标超过设计值, 锅炉稳燃及燃尽特点明显, 在燃用劣质无烟煤方面, 该型锅炉具有较强优势。

详细的试验研究, 一方面为锅炉提供了安全稳定经济的运行方式; 另一方面摸清了锅炉的性能特点, 为以后同类型锅炉的调试和优化设计提供了非常有价值的参考。

### 参考文献:

- [1] 湖南金竹山电厂 600 MW “W” 火焰锅炉试验研究课题总结报告[R]. 东方锅炉锅炉技术中心研究所 2007.11
- [2] 湖南大唐华银金竹山电厂 B 区 1 号锅炉性能试验报告[R]. 湖南省电力公司试验研究院 2007.11