

太阳能光伏发电之未来

崔容强, 汪建强, 孟凡英, 徐林, 沈文忠

(上海交通大学 物理系太阳能研究所, 上海 200240)

摘要: 2007年中国和世界太阳能光伏发电在技术、产业、市场和资源等方面都取得了新的进展;展望太阳能光伏发电的未来,应当重新审视光伏发电在我国能源结构中的战略地位;建议把支持光伏发电的快速发展和实施大规模应用作为应对当前和今后国际能源涨价的国策。

关键词: 硅材料; 光伏电池; 光伏能源; 光伏应用; 光伏产业

中图分类号: TK5; TM615 文献标志码: C 文章编号: 1671-5292(2008)03-0096-06

The future of PV power generation

CUI Rong-qiang, WANG Jian-qiang, Meng Fan-ying, XU Lin, SHEN Wen-zhong

(Solar Energy Institute, Physics Department of Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

1 前景展望

2008年初,世界光伏业著名杂志《光子国际》(Photon International)给我们描绘了一幅太阳能光伏发电的美好前景(表1)^[1]。

表1 全球光伏发电产业展望

Table 1 Forecast of PV industry in the world

年份	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
光伏电池年产量/GW	1.7	2.6	4.0	6.1	10.2	15.1	20.5
年增幅/%	44	58	53	54	66	48	36
组件平均出厂价/美元·W ⁻¹	3.5	4.1	3.9	3.6	3.5	3.3	3.2
组件平均销售价/美元·W ⁻¹	3.7	4.3	4.1	3.8	3.7	3.5	3.3
组件价格年增幅/%	14	16	-5	-7	-4	-4	-6
光伏系统装机平均价格/ 美元·W ⁻¹	7.1	7.8	7.5	7.0	6.6	6.2	5.9
系统装机价格年增幅/%	-2	9	-3	-8	-6	-5	-6
全球光伏产业总产值/ 10亿美元	12	20	30	43	67	94	121

数据来源: Photon International January 2008

以2005年和2006年为基数,2007年全球光伏电池的产量已达4.0GW,预计2008年全球生产光伏组件将达到6.1GW,2011年将达20.5GW。即在4年后,全球光伏年产量将是2007年的5倍多。光伏组件的市场销售价格将由2007年的4.1美元/W降到2011年的3.3美元/W,即未来4年间将降价0.8美元/W,降幅达20%,平均每

年降价5%,基本符合2004年德国可再生能源法要求光伏组件降价的速度。

在2008年1月,《光子国际》(Photon International)杂志发表的名为“精细分析及展望(Refining benchmarks and forecasts)”文章^[1]仔细分析了2007年光伏组件的成本构成及光伏发电的电价构成。基于2007年全球晶体硅光伏组件各工序最低生产成本(包括长晶、切片、光伏电池、封装等工序)及最低的硅材料平均成本,光伏组件的成本已可以降到1.3~1.98美元/W,见图1和图2。

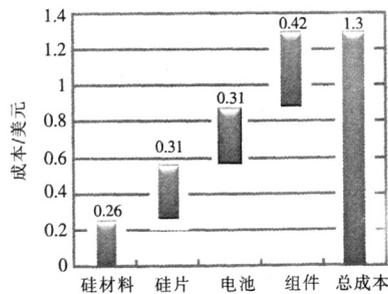


图1 晶体硅光伏组件最优制造成本(A)

Fig.1 The optimal manufacturing cost of c-Si Module

(数据来源: Photon International January 2008)

收稿日期: 2008-01-30。

作者简介: 崔容强(1941-)男,教授,博士生导师,国务院特殊津贴专家,中国可再生能源学会常务理事,光电专委会副主任,上海市太阳能学会理事长,PVSEC国际理事会理事。从事太阳能光伏发电的教学、科研与应用开发工作。E-mail:rqcui@sju.edu.cn

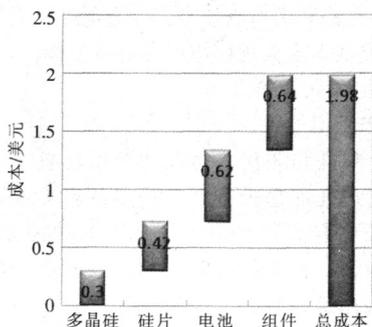


图2 晶体硅光伏组件平均制造成本(B)

Fig.2 The average cost of c-Si Module

(数据来源:Photon International January 2008)

预计到2010年晶体硅光伏组件的成本可以降到1.0~1.59美元/W。如果这样,那么在2010年,安装在阳光资源丰富的地方(每年每千瓦并网型光伏发电系统可发电1500 kWh)的晶体硅光伏发电的成本可以达到0.16~0.22美分/kWh*,进行最优化配置后,可以降到0.13美分/kWh。而安装在阳光资源不太好的地方(每年每千瓦并网型光伏发电系统可发电1000 kWh)的晶体硅光伏发电的成本可以降到0.22~0.30美分/kWh,进行最优化配置后可以降到0.18美分/kWh,也就是说并网型光伏发电的电价已快速接近商业用电的电价水平。

2 能源结构预测

国际能源机构预测,全球煤炭只能使用220年,油气开采峰值位于2012年,并将在30~60年内耗尽,本世纪全世界能源结构将发生根本的改变。图3是一张比较经典的世界未来能源结构预

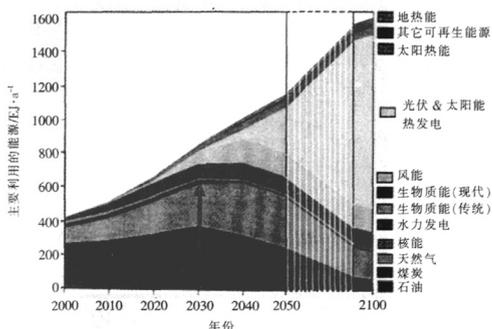


图3 世界未来能源结构预测图

Fig.3 Forecast of the future energy structure

(数据来源:2004年欧洲JRC预测本世纪内全球常规能源及新能源发展趋势)

*注:计算中设定的并网型晶体硅光伏电池发电系统工作寿命设定为25年,BOS配套系统价及安装费均已包含其中。

测图,由图中可见:全球太阳能等可再生能源与常规能源的比例,在2010年约为1:9,2020年约为2:8,2030年约为3:7,2040年约为4:6,2050年约为5:5,而到2100年将达到8:2。因此及早研究我国未来能源的供应,准确把握方向,调整能源供应结构已经是非常紧迫的任务^[9]。

随着太阳能级硅材料能耗下降以及光伏电池效率的逐步提高,晶体硅太阳能光伏发电系统的投资回收期有可能由现在的3年降到2年甚至1年,薄膜非晶硅/微晶硅电池光伏发电系统的投资回收期目前已经降到1年以内。因此,有人说“做光伏发电消耗的能量永远收不回来”的论点是没有任何依据的。按其工作寿命为25年计算,光伏发电系统能量的增值效应可达12.5倍之多,是一种不需要核燃料的“太阳能增值堆”,从某种意义上来说太阳能光伏发电是迄今为止最为理想的发电方式。2007年全球装机容量已达11 GW,太阳能光伏系统装机容量占0.06%,按照目前的发展趋势来看,预计2020年将达到1.1%,2050年以后将达到50%,详细数据见图4^[1]。

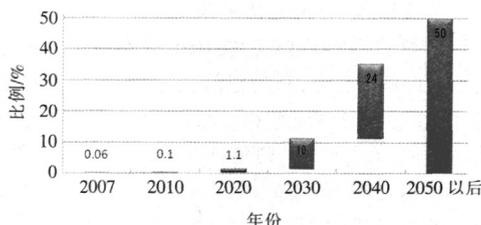


图4 展望光伏发电系统安装量占全球电力消耗比例

Fig.4 The Percentage of PV system installation in Global Power consumption

3 战略地位

光伏发电是利用半导体的光生伏打效应,由进入光伏电池的太阳辐射光子($E \geq E_g$)直接激发出电子,输出光电流。光伏发电的广泛性、永久性、无限性、清洁性、安全性和灵便性的特点是没有一种现行的发电方式可以与之比拟的。太阳能光伏发电有周期性、随机性、间歇性等特点,但如果配上可靠的蓄能装置(如抽水蓄能、蓄电池、超级电容、超导蓄能、制氢蓄能等)以后,它就是一个稳定可靠的能源。由SoE+StE组成的分布式供电网可以满足任何地区的能源需求。这就是人类未来理想的太阳能供电模式,表2是对太阳能光伏发电系统的战

略地位的简要表述^[9]。

表 2 太阳能光伏发电的战略地位
Table 2 The strategic position of PV Power

NO	类型	功用	NO	类型	功用
1	扶贫能源	☆	10	战略储备能源	☆※△
2	军用能源	☆※	11	景观能源	☆※
3	便携式能源	☆	12	沙漠能源	※△
4	削峰能源	※	13	滨海能源	※△
5	应急能源	☆※	14	道路能源	※△
6	建材能源	☆※△	15	太空能源	☆△
7	屋顶能源	☆※△	16	清洁能源	☆※△
8	百姓能源	☆※△	17	安全能源	☆※△
9	分布式能源	☆※△	18	和平能源	☆※△

注:☆独立能源/补充能源 ※并网发电/替代能源
△支柱能源

中国光伏发电规模化应用的历程与其价格及政府推动的力度紧密相关,要实现大规模光伏发电,大体上分为5个实施阶段。

第1阶段:独立光伏系统

容量:0.1~100 kW,可满足边远无电地区用电,无需远距离输电。

价格:3~5 美元/W。

第2阶段:并网光伏屋顶

容量:1~1 000 kW,在城市或乡村中并网运行,提供削峰电力,利用建筑物屋顶、外墙和已有的供电线路,节省土地和线路投资,实现家庭电气化,国外正在推广,中国亟待开始。

价格:2~3 美元/W。

第3阶段:沙漠光伏电站

容量:1 000~100 万 kW,在阳光富集的沙漠、戈壁建造并网光伏电站,充分利用阳光,改造沙漠。目前国外正在利用推广该技术实现工业电气化,中国也有初步计划。

价格:1.5~2 美元/W。

第4阶段:滨海光伏电站

容量:1 万~1 000 万 kW,靠近沿海经济发达城市供电,节省输电成本,发展电解制氢、贮氢规模化生产、启动氢能经济和海洋经济,蓄能技术进步,实现工业电气化,目前国外均未开始此项研究。

价格:1~1.5 美元/W。

第5阶段:道路光伏电站

容量:10~1 000 GW,建设道路光伏顶棚电站,下面行驶电动车辆,发展电动交通,实现交通

电气化。充分利用蓄能技术,以充电站取代加油站,将是光伏发电大规模应用的终极目标。

价格:<1 美元/W。

4 新兴产业

油价飙升和环保压力像两个发动机牵引着全球光伏产业的蓬勃发展。更多的世界五百强公司以及许多高科技中小企业开始关注光伏,密集的资金,密集的高端技术以及众多的优秀人才进入光伏领域,使得全球光伏产业在激烈竞争中快速成长,世界著名的德国 Q-Cells 公司,日本夏普公司,美国 Sunpower 公司都拟定了在 2011 年前后年产量要扩产到 1 GW。单条电池生产线已从 25~50 MW 扩展到 200~500 MW,德国 GP 公司已推出规模为 1 GW 的晶体硅光伏电池生产线,光伏产业总收入从 2005 年 120 亿美元增长到 2007 年的 300 亿美元,预计 2011 年达 1 210 亿美元。光伏业作为一个新兴产业已初见端倪。

5 技术进步

2007 年光伏电池技术进步集中在高效率、大面积、薄片化、大规模自动化生产,以及薄膜光伏电池的产业化等方面。

美国 Sunpower 公司制成了效率达 $\eta=22\%$ 的全背电极高效单晶硅光伏电池;日本三洋公司的异质结非晶硅/单晶硅光伏电池的效率高达 22.3%(面积为 100.5 cm²);日本京瓷公司的大面积(150 mm×155 mm,厚度 180 μm)高效多晶硅光伏电池效率为 18.3%(正、负电极均由背面引出);美国的聚光多结砷化镓光伏电池效率达 42.8%(20 倍聚光);德国弗朗和费实验室研制出厚度 d=50 μm 的超薄型单晶硅电池,光电转换效率 $\eta=16.7\%$,实现了做 1 W 光伏电池只需要 1 g 硅的目标。多种在线流片式的晶体硅光伏电池自动化生产设备及检测监控设备日臻完善。红外技术、激光加工技术已经用于光伏电池生产,新型浆料,新型封装材料也正在为提高光伏电池的光电转换效率和可靠性做出贡献,450 kg 的大型多晶硅铸锭技术,切割厚度为 160 μm 薄片硅加工技术正在实用化。日本 Sumco 公司电磁铸锭炉生产长达 7 m,重达 3 t 的铸锭炉,其准备扩产到年产量 1GW。效率高达 95% 以上的 DC/AC 并网逆变器已经投放市场,容量大于 100 MW 的

光伏电站正在建设中。

值得注意的是:新一轮薄膜光伏电池的研究及产业化热潮正在兴起。日本夏普公司正拟建1 GW 的硅薄膜电池生产线;美国 First Solar 拟建1GW 碲化镉薄膜电池生产厂;美国 AM 公司已签订总容量远远超过1 GW 的硅基薄膜电池线供应合同。德国 Elecom 公司、莱宝公司,日本钟渊公司、富士太阳能公司,美国 UniSolar 公司等均有制造薄膜电池设备或扩产计划。

国际光伏电池效率的实验室水平在不断提高,见表 3^[2]。

表 3 国际光伏电池实验室水平效率表

Table 3 The world record of PV cell efficiency in the laboratory

电池类型	效率/%	研制单位	备注
单晶硅太阳电池	24.7±0.5	澳大利亚新南威尔士大学	4 cm ²
背接触单晶硅太阳电池	26.8±0.8	美国 SunPower 公司	96 倍聚光
GaAs 多结太阳电池	33.8	美国国家可再生能源实验室	标准光强
	42.8	美国光谱实验室 (SpectroLab)	20 倍聚光
	40.7	美国光谱实验室 (SpectroLab)	240 倍聚光
	40.0	日本 Sharp	1 100 倍聚光
多晶硅光伏电池	20.3±0.5	德国弗朗霍夫研究所	1.002 cm ²
	18.3	日本京瓷	233.3 cm ²
InGaP/As	30.28±1.2	日本能源公司	4 cm ²
非晶硅太阳电池	14.5(Initial)±0.7	美国 USSC 公司	0.27 cm ²
	12.8(Steady)±0.7		
CIGS	19.9	美国国家可再生能源实验室	0.410 cm ²
CdTe	16.5±0.5	美国国家可再生能源实验室	1.032 cm ²
多晶硅薄膜电池	16.6±0.4	德国斯图加特大学	4.017 cm ²
纳米硅光伏电池	10.1±0.2	日本钟渊公司	2 μm 薄膜
染料敏化电池	11.0±0.5	瑞士洛桑高工(EPFL)	0.25 cm ²
	>11%	日本 Sharp 公司	
HIT	22.3	日本三洋	100.5 cm ²

(资料来源:国家发改委《2007 年中国光伏发展报告》)

PVSEC-17)

预计晶体硅以外的各种薄膜电池总产量将由 2007 年的 0.7 GW 增长到 2008 年的 1.1 GW, 2009 年 1.5 GW, 2010 年 2 GW, 2011 年达到 2.6 GW, 见图 5。

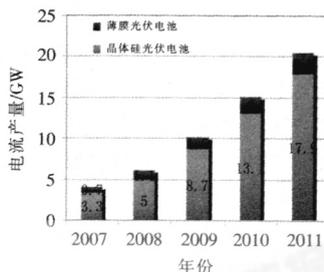


图 5 2007~2011 年薄膜光伏电池和晶体硅光伏电池产量表
Fig.5 The forecast of thin film & C-Si PV Cell Production between year 2007~2011

(数据来源:Photon International January 2008)

6 硅材料

2007 年全球多晶硅材料继续紧缺, 售价进一步提升, 预计这一趋势将延伸到 2009 年。在 2010 年中国生产的多晶硅上市以后, 多晶硅原料供应状况才有可能缓解, 价格也可能回落。据德国《光子国际》杂志 2008 年 1 月刊数据, 按照年增幅大于 30% 预测, 全球多晶硅原料 2007 年产量为 5 万 t, 2008 年为 7.4 万 t, 2009 年为 11.7 万 t, 2010 年为 17.4 万 t, 2011 年可达到 21.3 万 t (图 6)。按照年均增长率接近 50% 预计, 2010 年全球多晶硅产量将达 33.5 万 t, 2011 年将达 43.8 万 t。届时更为先进的改良西门子法制造太阳级多晶硅技术、粒状多晶硅生产技术及物理提纯冶金硅技术等将使制造多晶硅的能耗由现在的 250 kWh/kg 降到 80 kWh/kg, 甚至更低。新的年产万吨级多晶硅的公司将不断出现, 使太阳级多晶硅的售价逐步回落。届时, 硅材料产业只需少部分高纯多晶硅供应 IC 产业, 而大部分多晶硅将专门供应光伏生产。硅材料产业革命即将实现^[6,7]。

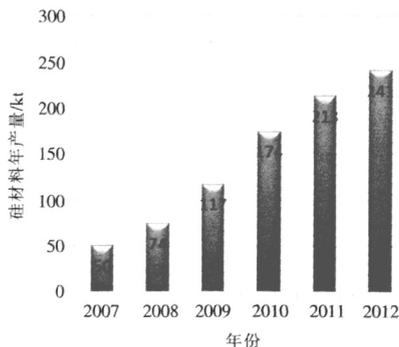


图 6 硅材料产量预测^[6]

Fig.6 The forecast of Silicon production
(数据来源:Photon International January 2008)

7 市场需求

市场永远是光伏产业发展的基础。2007 年全球光伏市场仍然是政府政策引导的市场。因为光伏发电虽好,但价格很贵,所以欧、美、日等发达国家政府才出台“购电法”或“初装补贴法”等,从而创造出了一个空前巨大的光伏市场。从市场规模来看,2007 年德国新增光伏发电装机容量 1.5 GW 居世界第一,西班牙位列第二。意大利及欧洲国家普遍采用“购电法”,即以 0.4~0.5 欧元/kWh 的高价收购光伏电量,收购价格 20 年不变。在银行贷款和多项财税政策的支持下调动了民间资本,民众用自己的向阳屋顶或闲置空地安装光伏发电系统,作为一种投资环保和能源节约行动。日本政府利用新阳光计划,在 10 年内采用“初装补贴法”摸索同网同价的经验,即民众安装的光伏屋顶系统上网电价与自己用电电价相同,多发电少用电则可从电网获得回报。这在电价昂贵的日本,已经取得了初步成功。2006~2007 年中,在日本政府零补贴的情况下,日本民众自己安装的 3~5 kW 光伏屋顶每年约有 6~7 万个。随着光伏组件成本下降,日本的光伏市场一定会随之扩大。美国和韩国是全球普遍看好的、继欧洲之后的又一个巨大的光伏市场。美国加州政府首创“加州百万太阳能屋顶计划”,加州州长施瓦辛格说,这项计划实施后,其效果相当于加州地面上减少了一百万辆汽车的 CO₂ 排放量。虽然 2007 年美国国会尚未通过推动美国光伏市场的法案,但像加州这样积极扩充光伏市场的州已多达 10 多个。总的来说,纵观欧洲、日本、美国和韩国等光伏发展情况,2008 年全球光伏市场前途依然是一片光明^{[5],[6],[9]}。

据世界银行统计:至 2007 年世界上还有 15 亿人口无电。若按人均需 10 W 光伏电池作为最基本照明用电计算,至少需要有 150 亿 W 电量,并且成为消除贫困所必须的市场。

8 中国光伏元素

2007 年中国光伏电池年产量约为 1 GW,占世界的 1/4,仅次于日本和欧洲,位居全球第三。多晶硅产量正以 400% 的速度倍增,所以中国光伏元素被认为是世界上最活跃、最具潜力、而又不易琢磨的光伏元素。自 2005 年无锡尚德施正荣博士率先在美国纽交所成功上市以后,2006~2007 年,陆续共有 10 家中国光伏企业在海外上市(8

家在美国上市,浙江煜辉和江苏峻鑫在英国上市,浙江昱辉在英国上市后又成功在美国上市)。截至 2008 年 1 月 25 日,8 家在美国上市公司的市值已达到 200 多亿美元(图 7)。

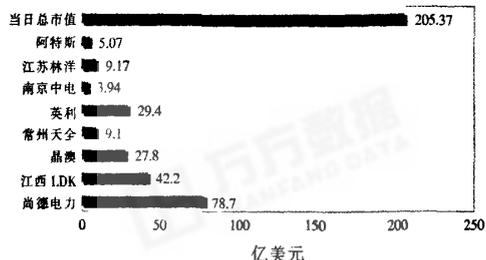


图 7 中国在美国上市光伏企业市值一览表
Fig.7 The total market capitalization of China PV companies in USA Stock Market

至 2007 年中国已经拥有 600 多家光伏企业和研发单位。其中光伏电池厂约为 70 家;光伏组件厂近 300 家;光伏应用产品公司 50 多家;多晶硅材料厂近 30 家;拉晶铸锭及硅片加工近 50 家;超白玻璃、EVA、接线盒、焊带及配套材料厂 50 多家;光伏设备(清洗机、层压机、测试台、扩散炉、印刷机、网板加工等)制造公司约 50 家;参与光伏技术、产品研发的大专院校和研究单位约 50 个,就业人员已超过 10 万人。

(1)2007 年中国光伏元素的主要贡献^{[4],[10]}

①生产光伏电池约 1 GW, 年增幅达 200%, 产能达 2 GW (含薄膜电池); 光伏组件产量约 2 GW, 产能 3 GW。

②生产多晶硅原料 1 200 t, 年增幅 400%, 物理提纯冶金硅 2 000 t。

③生产冶金硅约 100 万 t (自用 65 万 t, 出口 45 万 t)。

④已有单晶炉 2 000 台, 铸锭多晶硅 300 多台, 切片机 600 多台。已建成数万座光伏路灯以及多座 MW 级光伏电站, 太阳能交通信号灯已经普及。中国光伏产业的发展速度明显高于世界平均发展速度。

(2)预计 2010 年中国光伏发电的巨大发展

①生产光伏电池 9 GW, 其中薄膜太阳电池 1 GW。

②生产多晶硅原料 8 万 t。

③生产单晶硅及多晶硅硅片 8 GW。

2007 年中国单晶硅电池和多晶硅电池的平均效率比 2006 年提高约 1%, 先进的单晶硅电池

平均效率达 17.2%,多晶硅电池 15.6%。显然与国际先进水平尚有一定差距,其中也有原材料硅片质量参差不齐等原因。

2007 年国家发改委、科技部财政司等许多部委在贯彻《中华人民共和国可再生能源法》中组织了一些有利于光伏发电研发和示范应用的项目,也出台了一些有利于光伏发电上网的改革法。但依然缺乏光伏“上网电价”或“初装补贴”等更为明确的配套政策。以至于我国国内光伏应用市场始终跟不上产业发展的需要^[9]。

9 结语

(1)光伏发电系统是一种不需要核燃料的太阳能“增值堆”,从某种意义上来说太阳能光伏发电是迄今为止最为理想的发电方式。若与储能技术与电力平衡技术相结合,光伏能源就是一种理想的战略能源。

(2)中国有丰富的太阳能资源、硅矿石资源和劳动力资源以及未来巨大的光伏市场,已初具光伏发电的产业基础,这些因素必将助推国内光伏发电业的大规模发展,使选择光伏能源作为中国和平发展的基本能源战略,完全成为可能。

(3)能源问题是国计民生的大事,一定要反映“国家意志”和“政府行为”。《中华人民共和国可再生能源法》确立了中国的“国家意志”是依靠可再生能源复兴中华民族。政府行为可以加快可再生能源市场化,尤其是将加快光伏发电产业的规模化和大规模应用。中国已经具备实施百万个光伏屋顶、百万千瓦光伏电站等重大示范项目的基

(4)近 6 年来国际光伏发电产业一直保持 40%~60% 的年增幅,不仅表明政府主导的光伏市场有效,也表明民众对光伏发电的青睐。常规能源涨价曲线以及人均收入上升曲线总会和光伏电价下降曲线相遇。每瓦光伏发电 1 美元,每 kWh 光伏电力 6 美分的目标并不遥远。

(5)可以预期,中国光伏的前景,一定非常光明。中国的光伏产品一定会像古代中国的丝绸、茶叶和瓷器一样独具特色,也会像现代中国的服装和鞋帽一样既富足自己,又惠及世界。

参考文献:

[1] MICHAEL ROGOL. Refining benchmarks and forecasts [J]. Photon International, 2008(1): 84-94.

- [2] 李俊峰,王斯成. 2007 年中国光伏产业报告[M]. 北京: 中国环境出版社, 2007. 10-13
- [3] 国家发改委/世界银行/GEF, 上海交通大学太阳能研究所, 中山大学太阳能研究所. 2005 年第一届中国太阳能级硅材料研讨会会议论文集[C]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- [4] 国家发改委/世界银行/GEF, 上海交通大学太阳能研究所, 中山大学太阳能研究所. 2006 年第二届中国太阳能级硅材料研讨会会议论文集[Z]. 新余: 江西新余赛维 LDK, 2006.
- [5] 国家发改委/世界银行/GEF, 上海交通大学太阳能研究所, 中山大学太阳能研究所. 2007 年第三届中国太阳能级硅材料研讨会会议论文集[Z]. 峨眉: 四川峨眉半导体材料所(厂), 2007.
- [6] 上海市科学技术委员会. 万吨级太阳能硅发展规划调研报告-上海市科委项目专项[R]. 上海: 上海交通大学太阳能研究所, 2007.
- [7] 上海交通大学太阳能研究所. 上海市十万个太阳能屋顶(工程)计划预可行性研究报告(WWF)[R]. 上海: 上海交通大学太阳能研究所, 2005.
- [8] 王长贵, 崔容强, 周堇. 新能源发电技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
- [9] 喜文华. 实用太阳能工程技术[M]. 兰州: 兰州大学出版社, 2000.
- [10] 崔容强, 赵春江, 吴达成. 并网型光伏发电系统[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007.

“自吸式液浆抽运罐车” 解决沼气池出料难

一种结构简单、成本低廉,抽运方便,免于较大维护的新普“自吸式液浆抽运罐车”(见广告彩页)解决了河北省及周边地区沼气池抽运料液难的问题,用户反映良好。该罐车是衡水新普沼气工程科技开发有限公司与有关院校经近 10 年研究的专利成果,达到了国家(QC/T652-2000 吸污车)标准要求,系统真空度-0.050 MPa,进行 1 000 次作业循环,可靠度不小于 95%。最大特点是罐车与拖拉机、三轮车可用时结合,不用时分离,填补了国内真空器具与动力机械分解使用的空白。非常适合农村拖拉机、三轮车配套使用。

2006 年“新普自吸式液浆抽运罐(车)”经河北省农业机械产品质量监督检验站检测鉴定; 2007 年被评为“中国第 2 届可再生能源及节能产品技术博览会”优秀产品奖。2006 年、2007 年连续在河北省政府采购的“沼液吸运设备”中中标。