

废弃晶体硅太阳能电池回收处理现状

宋二晓, 张承龙, 马 恩, 王景伟, 白建峰

(上海第二工业大学上海电子废弃物资源化协同创新中心, 上海 200120)

摘 要: 论述了晶硅太阳能电池的市场发展趋势, 对其物理组成结构及成分进行了分析, 并根据国内外晶体硅太阳能电池的发展现状讨论了当前国内外已有的废弃晶硅太阳能电池回收处理技术, 包括手工拆解法、无机酸溶解法、热处理与化学方法相结合、有机溶剂溶解法等方法。探讨了以上处理方法存在的不足之处, 提出了对废弃晶硅太阳能电池回收情况的一些看法。

关键词: 晶体硅; 太阳能电池板; 结构; 回收处理

中图分类号: X 705

文献标志码: A

0 引 言

自 20 世纪 80 年代以来, 矿物燃料的燃烧、工业化发展以及人口的快速增长, 导致了能源短缺、生态破坏和环境污染 3 个全球性问题^[1]。面对日益严峻的能源、生态、环境问题, 具有普遍性、安全性、资源丰富以及无污染性等优点的太阳能作为一种清洁能源, 越来越受到人们的关注, 如何对太阳能进行有效的利用逐渐成为科研人员的研究热点。

太阳能电池的发明与制造, 在一定程度上缓解了我国乃至世界能源紧缺的现状, 但是随着社会的发展, 未来几十年里将会出现大量太阳能电池报废的趋势。2012 年 1 月, 欧盟会议将光伏组件正式列为电子废弃物, 太阳能电池作为光伏组件必须进行有效的回收利用^[2]。据有关报道, 到 2030 年, 我国废弃的光伏组件能够产生 110 万 t 玻璃、145 万 t 碳钢、54 万 t 塑料、17 万 t 铜、26 万 t 铝、5 万 t 硅及 550 t 银^[3]。从这些数据中可以看出, 未来报废的晶体硅太阳能电池中蕴藏着不可小觑的资源价值。同时, 有研究者对晶体硅太阳能电池板中的电池片做了浸出毒性试验, 发现有重金属铅浸出。铅是危险物, 如果将含有铅的电池板随意丢弃将会对环境造成一定的危害^[4]。从环保和经济效益方面考虑, 必须对废弃的晶体硅太阳能电池板进行回收处理以及

再利用研究。

1 太阳能电池发展现状

太阳能电池是通过光伏效应产生电能, 故又被称作“光伏电池”, 它在发电过程中不会产生有毒有害物质。生产太阳能电池的材料主要有硅、非晶硅、硫化镉、铜铟硒、碲化镉、砷化镓等。其中, 用量最多的材料是硅, 硅相比于其他材料具有更容易在地壳中获得的优点。

据欧洲光伏工业协会 (EPIA) 预测, 在可再生能源的利用中, 到 2030 年, 太阳能光伏发电将占到 10% 以上, 到 2040 年, 占到 20% 以上^[5]。同时, 据世界观察研究所预测, 光伏产业将成为未来全球发展最快的产业之一, 到了 21 世纪中期, 太阳能将成为用于光伏发电的主要能源之一^[6]。

太阳能电池的发展主要经历了晶硅、薄膜、超高效率太阳能电池 3 个阶段^[7], 其中, 晶体硅太阳能电池在国内外全球市场中占据主导地位。表 1 反映了 2004~2012 年间全球晶体硅太阳能电池的市场波动趋势, 从表 1 可以看出, 虽然晶体硅太阳能电池的市场份额在 2009 年有所下降, 但是在全球太阳能电池市场中依然居于主要地位, 市场份额维持在 80% 以上。在表 1 中, 晶体硅太阳能电池的市场份

收稿日期: 2017-01-24

通信作者: 张承龙 (1975-), 男, 江苏昆山人, 博士, 教授, 主要研究方向为电子废弃物资源化。E-mail: clzhang@sspu.edu.cn。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51474146), 上海市自然基金项目 (14ZR1416900), 上海第二工业大学校重点学科建设项目 (XXKZD1602), 上海第二工业大学研究生教育、科研项目 (A01GY17F022) 资助

表 1 2000~2012 年全球晶硅太阳能电池产量变化情况

Tab. 1 The production of crystalline silicon solar cells in global from 2000 to 2012

年份	全球的太阳能电池产能/GW	增长速率/%	全球晶硅太阳能电池的产量/GW	增长速率/%	晶硅太阳能电池的市场份额/%
2000	0.303	—	—	—	—
2001	0.355	17.16	—	—	—
2002	0.471	32.68	—	—	—
2003	0.584	24.00	—	—	—
2004	1.200	1.050	1.100	—	91.67
2005	1.650	37.50	1.500	36.36	90.91
2006	2.380	44.24	2.100	40.00	88.24
2007	3.500	47.06	2.800	33.33	80.00
2008	5.400	54.29	4.800	53.57	88.89
2009	7.700	42.59	6.200	44.19	80.52
2010	10.70	38.96	8.800	41.94	82.24
2011	14.20	32.71	11.70	32.95	82.39
2012	18.90	33.10	15.70	34.19	83.07

额表现出较好的增长态势,随着未来技术的不断成熟、转换效率的提高、生产成本的降低,在未来几十年里,晶硅太阳能电池在国内外市场中仍将占主要份额^[8]。

2 晶硅太阳能电池结构组成

一般市场上的晶硅太阳能电池有单晶硅和多晶硅太阳能电池 2 种形式。它们的主要结构组成包括 5 个部分,分别为:金属外框、盖板玻璃、晶体硅片、背板、封装胶膜。金属外框主要是铝合金外框,在使用时需做表面氧化处理,其组成成分的含量分别为^[9]:铁 0.35%,硅 0.4%,锰 0.1%,铜 0.1%,钛 0.1%,锌 0.1%,铬 0.1%,镁 0.6%,钙 0.05%,钒 0.15%,铝 97.95%。

盖板玻璃一般是具有高强度、高透光率及较好机械性能的低铁钢化玻璃,具有较强的耐紫外线辐射能^[10]。晶体硅片有单晶硅片和多晶硅片 2 种形式,在晶体硅片的制备过程中,N-P 结通过磷在电池片前表面自动扩散形成,之后在电池片表面镀上减反射层,然后在镀了减反射层的电池片上下表面分别镀上银电极和铝电极,其中,减反射层镀层物质有 Ta₂O₅、TiO₂、SiO₂、Si₃N₄、Al₂O₃、ITO (Indium-Tin-Oxide) 等^[11],目前研究的晶硅太阳能

电池中的减反射层物质一般是氮化硅。背板用于支撑和保护太阳能电池板,TPT (双面含氟背板) 在市场上占据较大的比例,它主要由 1 层聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 夹在两层聚氟乙烯薄膜间形成^[12]。封装胶膜主要是乙烯-醋酸乙烯共聚物 (EVA),当熔融指数为 20~40/(10 min/190 °C)、醋酸乙烯酯 (VA) 含量为 28%~33% 时,EVA 可以用来做太阳能电池的封装材料^[13]。盖板玻璃、晶体硅片以及背板 (聚氟乙烯薄膜 TPT) 通过封装胶膜 EVA 粘结在一起,然后再使用硅胶与铝合金外框进行密封粘结。图 1 所示为除去铝合金外框的晶体硅太阳能电池板的结构示意图。

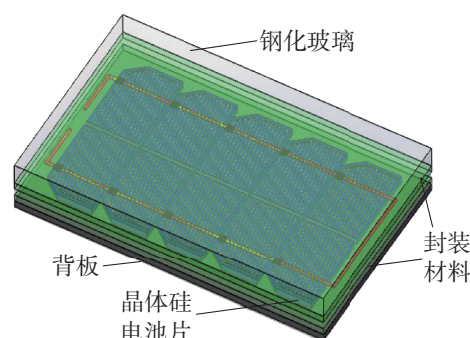


图 1 不含铝合金外框的太阳能电池板主要结构图

Fig. 1 The main structure of solar panel without aluminium alloy frame

3 废晶硅太阳能电池国内外回收处理现状

有资料显示, 组成太阳能电池板各组分的含量大约为: 玻璃 70%、铝 10%、粘合封胶 10%、硅 5%、其他 5%^[14]。由此可见, 对废弃的晶体硅太阳能电池进行回收再利用研究具有一定的实际意义。

对于多晶硅太阳能电池而言, 其中的多晶硅是通过将冶金硅转化为 SiHCl_3 , 再用 H_2 一次性还原得到的太阳能级多晶硅; 而单晶硅是将提炼出来的多晶硅放入单晶炉中溶解拉直得到。多晶硅相比于单晶硅, 其价格较低, 避免了多晶硅制备单晶硅的生产过程, 所以成本相对较低, 这样的多晶硅具有较低的纯度要求, 但转换效率较低^[15], 单晶硅的转换效率较高, 同时成本也高^[16]。再者, 多晶硅在生产过程中, 会产生 SiHCl_3 和 SiCl_4 、 HCl 等有害组分, 可能带来较大的环境污染和安全问题^[17]。

无论是从资源价值方面还是环保效益方面考虑, 对废弃晶体硅太阳能电池进行回收处理都具有意义。目前国内外对废弃晶体硅太阳能电池的回收处理技术已有的研究方法主要有: 物理处理方法、化学处理方法、物理处理方法与化学处理方法相结合。

3.1 物理处理方法

物理处理方法主要包括机械处理法和热处理法。目前国内对废弃晶体硅太阳能电池的研究主要侧重点在检修和维护, 以及进行一些简单的物理分离操作上。国外研究起步要比国内早, 主要侧重于太阳能电池的拆解研究上。

3.1.1 机械处理法

中国英利新能源有限公司经过初步探究, 通过人工将接线盒与铝边框分别拆解下来, 然后粉碎电池板, 分离出玻璃颗粒, 将剩余组分进行深冷破碎成更细小颗粒, 再采用静电分选技术将金属、硅粉、背板颗粒及 EVA 颗粒分离开。这种方法得到了不同成分的混合物, 但是并没有对各组分进行完整充分的分离, 还处于实验室研究阶段^[18]。接线盒是太阳能电池中连接电力与电池外部线路的组件, 其在自然环境中会发生腐蚀, 受到损坏, 电池板的导电性和密封性就会降低, 有研究者对其进行了拆解分析^[19]。Granata 等^[20] 对废旧光伏板的机械处理方法进行了研究, 光伏板采用双叶转子破碎机 - 锤式

破碎机 2 级破碎后, 对粒径 $>1\text{ mm}$ 的颗粒再经过 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 热处理后筛分, 有利于直接回收玻璃。

3.1.2 热处理法

晶体硅太阳能电池各层组件主要通过 EVA 粘结在一起, 如果要想实现太阳能电池各组件的有效分离, 将 EVA 溶解或发生融胀成为研究的关键点。Zhang 等^[21] 采用氮气热解与真空分解相结合的方法分离回收废弃太阳能电池组件, 通过氮气热解能够有效分解塑料, 在氮气流速为 0.5 L/min 、 773 K 温度下通气 30 min , 有机转换率可以达到 100%; 同时对真空分解组件的分离原则、产物分析以及优化进行了研究。董莉等^[22] 对废弃光伏组件中 EVA 的热处理产物进行了分析, 在氮气和空气气氛中的热处理气体产物主要为二氧化碳和 5 个碳键以下的烷烃及烯烃, 热处理液体产物以长直链的烷烃和烯烃为主, 并带有少量的芳香类化合物和醇类物质, 通过蒸馏等方式处理后可作为二次资源使用。

3.2 化学处理方法

化学处理方法主要侧重于对 EVA 的溶解, 主要包括有机溶剂溶解法和无机酸碱溶解法。

3.2.1 有机溶剂溶解法

Doi 等^[23] 在研究中发现, 在 $80\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下将 1 块电池板于三氯乙烯中浸泡 10 天能够得到未受损的晶硅电池片; Kim 等^[24] 通过探针型超声波辐照, 对邻二氯苯、甲苯、三氯乙烯、苯 4 种有机溶剂于不同温度、不同超声波功率、不同温度以及不同辐射条件下对 EVA 的溶解情况进行了研究, 研究结果得到邻二氯苯在同样的条件下相比于其他几种有机溶剂的溶解效率更好, 但是这种方法会产生大量的有机废液对环境造成污染。还有研究者对晶硅太阳能电池中的硅和玻璃的回收方法进行了研究, Kang 等^[25] 在同一条件下, 尝试用 4-甲基-2-戊酮、石油苯、四氢呋喃、三氯乙烯、甲苯、邻二氯苯、丙酮以及乙醇、甘油溶解或溶胀 EVA, 实验结果得到将光伏组件浸没于 $90\text{ }^\circ\text{C}$ 的甲苯液中大约 2 天, 可以实现钢化玻璃和光伏电池与溶胀或已溶解的 EVA 分离, 钢化玻璃得到回收。电池片表面由于黏有残留的 EVA 需进一步处理, 将其在一定条件下加热去除表面的 EVA, 然后浸在含有氢氟酸、硫酸、硝酸、乙酸、蒸馏水的化学蚀刻液中搅拌去除电池片表面的金属电极、减反射层等物质以回收硅, 并尝试向蚀刻液中添加表面活性剂探索其对回收硅的纯度

的影响,实验结果得到回收到的硅的纯度可以达到99.999%。董莉^[18]将自制的EVA样品浸于分别装有150 mL的三氯乙烯、邻二氯苯、甲苯和苯有机溶液的烧杯中常温下静止3天,实验结果发现邻二氯苯的溶解效果最好。

3.2.2 无机酸碱溶解法

有研究者将废弃晶体硅太阳能电池板在一定的条件下用硝酸和过氧化氢混合酸,实现了EVA、玻璃、电池片的有效分离,得到了完整的硅晶片^[26]。但是这种方法耗酸量大,对环境存在较大的危害风险。刘强等^[27]采用晶硅太阳能电池生产过程中产生的废弃碱和氢氟酸溶液,对太阳能电池进行回收处理,回收的银粉可直接用于太阳能电池生产线,回收的硅片通过方阻测试表明与原生硅片参数一致,可回炉铸锭生产多晶硅片。刘景洋^[28]在密闭条件下通过高温加热将废晶体硅太阳能电池板中的EVA、背板等塑料燃烧化为灰烬,使铝合金框架、钢化玻璃以及电池片等实现完全分离,将热处理后得到的电池片浸于碱液中以得到去除铝的电池片,随后浸于酸溶液中去掉电池片表面的银并得到含银溶液,使用氢氟酸去除银电池片表面的减反射层物质——氮化硅,最终得到了纯净的硅晶片。

Shin等^[29]使用硝酸和氢氧化钾分别浸出正面电极Ag和背面电极Al,然后采用含有磷酸的蚀刻膏去除电池片表面的 SiN_x ,之后将得到的电池片浸在0.05%的氢氧化钾水溶液中以除去电池片的顶层物质,最终利用回收的硅电池片制造出了无铅太阳能电池板。

Jung和Park等^[30-31]将硅基电池片浸没于60%的硝酸中,室温下浸5 min溶解电池正面电极Ag,然后浸没于45%的氢氧化钾溶液中,于80℃条件下浸8 min浸取铝电极金属。

LEE等^[32]研究了利用硝酸与氢氟酸水溶液溶解电池片上正负极电极金属Ag、Al以及减反射层 SiN_x 物质的最佳混合比,将得到的硅片进行再制造,再制造得到的电池片与未处理的电池片相比,其反射率降低了0.6%,但是依然具有应用到光伏产业中的重要意义。

Kei等^[33]探究了氢氟酸和硝酸的浓度对废弃晶体硅太阳能电池板中各组分浸出率的影响。

3.3 物理方法与化学方法相结合

Ewa等^[34]探讨了将热处理与化学方法相结合从废弃晶硅太阳能电池板组件中回收硅的方法。首先通过热处理,实现了电池片与背板、盖板玻璃、铝框等的分离,之后采用化学方法去除电池片表面的减反射层、P-N结及前后面的电极镀层。在实验过程中,Ewa等将废弃的太阳能电池板放于一个 SiO_2 床体上加热,使EVA变软,易于盖板玻璃、硅电池片、背板的分离,然后从环保、效率、经济方面考虑,首先使用Microsoft Excel或者MathCAD等进行一些数据仿真模拟,对电池片表面的金属镀层进行了一系列的浸出实验,实验得到在40℃、40%的 HNO_3 溶液中电池片表面的银具有相对较好的溶解效率,然后用电解法将银电解出来。在80℃、30%的KOH溶液中,电池片背面的铝电极镀层具有最优的溶解效率;在一定量一定浓度的 HNO_3 、HF、 Br_2 、 CH_3COOH 的混合溶液中,减反射层和N-P半导体结可以得到去除,然后用去离子水彻底冲洗去掉各镀层的电池片,用X-ray(SEM/EDX)对电池片进行定性以及半导体性能的检测,同时对电池板的再利用性能进行研究,研究表明,这种方法是可行的,但是该方法会产生大量的酸废液,如果得不到妥善处理会对环境造成不良影响。

Pagnanelli等^[35]采用物理处理与化学处理相结合的方法,首先对废弃的太阳能电池进行预处理——破碎和热处理,破碎后分别得到粒度为0.4~1 mm、大于1 mm、小于0.4 mm的碎片。其中对0.4~1 mm范围的碎片玻璃直接回收;对大于1 mm的碎片进一步热处理,分离EVA与玻璃碎片;对小于0.08 mm及0.08~0.4 mm的碎片进行酸浸,以1:3的固液比,将碎片置于具有一定浓度的硫酸溶液和体积含量为5%的双氧水溶液中,在60℃条件下浸泡3 h,根据化学分析,在0.08~0.4 mm和小于0.08 mm的碎片中主要含有金属,对0.08~0.4 mm的碎片酸浸,其中1/3的玻璃得到回收。

4 结 论

目前,太阳能电池的回收处理研究主要面临2方面的问题:

(1) 太阳能电池的拆解,确保拆解过程的环保效

益, 实现电池组件各部分的有效分离以及无害化处理。拆解处理晶硅太阳能电池的技术还很不成熟, 物理方法只是将电池板进行粗略的分离, 对于其中的精细组分没有进行处理, 还是会造成资源的浪费, 不能充分实现资源的二次利用; 热处理的方法在某种程度上可以实现盖板玻璃、背板与电池片的完全分离, 但是其中的 EVA 和背板完全化为灰烬, 并且伴有气体的产生, 如果处理不好会造成大气污染, 背板可以考虑再利用, 直接烧掉某种意义上是种资源的浪费; 有机溶剂溶解法可以实现电池板的完整分离, 但是产生的有机废液如何有效处理是一个关键问题。

(2) 太阳能电池光伏组件的再利用性能研究, 实现盖板玻璃、晶体硅片等资源的二次利用以及环境经济效益的统一。随着社会的发展, 晶体硅太阳能电池在未来几十年里将面临较大的报废量, 从实现废弃物的“无害化、资源化、减量化”原则出发, 废弃晶体硅太阳能电池的回收处理是亟待解决的问题。

参考文献:

- [1] CUDZINOVIC M, SOPORI B. Control of back surface reflectance from aluminum alloyed contacts on silicon solar cells [C]// IEEE Photovoltaic Specialists Conference. USA: IEEE, 1996: 501-503.
- [2] MCDONALD N C, PEARCE J M. Producer responsibility and recycling solar photovoltaic modules [J]. *Energy Policy*, 2010, 38(11): 7041-7047.
- [3] 汪韬, 李蕊. 光伏组件回收将有 150 亿美元产值, 中国政府仍空白 [EB/OL]. (2016-09-01). <http://solar.ofweek.com/2016-09/ART-260009-8120-30033078.html>.
- [4] 罗付香. 废旧晶体硅太阳能电池板特性及 LCA 研究 [D]. 广东: 广东工业大学, 2015.
- [5] 周涛, 陆晓东, 张明, 等. 晶硅太阳能电池发展状况及趋势 [J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(3): 1-11.
- [6] KATA I, SAARATANI F, ISHIYAMA K, et al. PV roadmap toward 2030 in Japan [C]//Proceeding of 15th International Photovoltaic Science & Engineering Conference (PVSEC-15), Japan: PVSEC, 2005.
- [7] 种法力, 滕道祥. 硅太阳能电池光伏材料 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2015.
- [8] 罗付香, 彭晓春, 吴彦瑜, 等. 废旧晶硅太阳能电池的回收拆解及进展研究 [J]. *环境科学与管理*, 2014, 39(12): 160-163.
- [9] 任军海, 李美丽. 关于太阳能组件铝边框对组件成本的影响研究 [J]. *产业与科技论坛*, 2012, 11(14): 60-61.
- [10] 张辉. 晶体硅柔性电池封装材料以及应用 [J]. *资源节约与环保*, 2012(4): 34-35.
- [11] RADZIESKA E, OSTROWSKI P, SERAMAK T. Chemical treatment of crystalline silicon solar cells as a main stage of PV modules recycling [J]. *Ecological Chemistry and Engineering S*, 2009, 16(3): 379-387.
- [12] 李光明, 刘祖明, 廖华, 等. 金属背板型单晶硅光伏组件的电性能研究 [J]. *太阳能学报*, 2013, 34(7): 1141-1148.
- [13] 姚大宏. 乙烯-醋酸乙烯酯共聚物 (EVA) 紫外光交联及其应用研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2007.
- [14] 马春紫. 陕西太阳能发电循环经济发展探讨——借鉴日本太阳能电池回收再利用经验 [J]. *财会月刊*, 2011(30): 95-96.
- [15] 黄庆举, 林继平, 魏长河, 等. 硅太阳能电池的应用研究与进展 [J]. *材料开发与应用*, 2009, 24(6): 93-96.
- [16] 张红梅, 尹云华. 太阳能电池的研究现状与发展趋势 [J]. *水电能源科学*, 2008, 26(6): 193-197.
- [17] 何钟, 何枫, 孙丽雅. 循环经济视角下我国太阳能光伏产业发展问题对策研究 [J]. *西北工业大学学报 (社会科学版)*, 2011, 31(4): 24-26.
- [18] 董莉. 废晶体硅太阳能电池板资源化技术研究 [D]. 四川: 西南交通大学, 2014.
- [19] 林伟, 陈萼, 孙韵琳, 等. 旧光伏组件接线盒拆装方式分析 [J]. *太阳能技术与产品* 2011(7): 26-29.
- [20] GRANATA G, PAGNANELLI F, MOSCARDINI E, et al. Recycling of photovoltaic panels by physical operations [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 123(2): 239-248.
- [21] ZHANG L G, XU Z M. Separating and recycling plastic, glass and gallium from waste solar cell modules by nitrogen pyrolysis and vacuum [J]. *Environmental Science and Technology*, 2016, 50(17): 9242-9250.
- [22] 董莉, 刘景洋, 周潇云, 等. 废晶体硅光伏组件中乙烯-醋酸乙烯共聚物热处理及产物分析 [J]. *环境污染与防治*, 2016, 10(38): 61-66.
- [23] DOI T, IZUMI T, HIROAKI U, et al. Experimental study on PV module recycling with organic solvent method [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2001, 67(14): 397-403.
- [24] KIM Y, LEE J. Dissolution of ethylene vinyl acetate in crystalline silicon PV modules using ultrasonic irradiation and organic solvent [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2012, 98(98): 317-322.
- [25] KANG S, YOO S, LEE J, et al. Experimental investigations for recycling of silicon and glass from waste photovoltaic modules [J]. *Renewable Energy*, 2012, 47(6): 152-159.

- [26] TAO J, YU S R. Review on feasible recycling pathways and technologies of solar photo-voltaic modules [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2015, 141: 108-124.
- [27] 刘强, 冯加保, 黄振华, 等. 晶硅太阳能电池环保回收再生利用的研究 [J]. *科技经济导刊*, 2016 (2): 120-121.
- [28] 刘景洋. 一种废晶体硅太阳能电池板拆解回收处理方法: 103978021 [P]. 2014-08-13.
- [29] SHIN J, PARK J, PARK N. A method to recycle silicon wafer from end-of-life photovoltaic module and solar panels by using recycled silicon wafers [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2017, 162: 1-6.
- [30] JUNG B, PARK J, SEO D, et al. Sustainable system for raw-metal recovery from crystalline silicon solar panels: From noble-metal extraction to lead removal [J]. *Acs Sustainable Chemistry and Engineering*, 2016, 4(8): 4079-4083.
- [31] PARK J, PARK N. Wet etching processes for recycling crystalline silicon solar cells from end-of-life photovoltaic modules [J]. *RSC Adv*, 2014, 4(66): 34823-34829.
- [32] LEE J K, LEE J S, AHN Y S, et al. Photovoltaic performance of c-Si wafer reclaimed from end-of-life solar cell using various mixing ratios of HF and HNO₃ [J]. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 2017, 160: 301-306.
- [33] KEI T, MASATOSHI K, YUKI S, et al. Effect of HF and HNO₃ concentration on etching rate of each component in waste crystalline silicon solar cells [J]. *Materials Transactions*, 2015, 56(12): 2047-2052.
- [34] EWA K R, PIOTR O, KAZIMIERZ D, et al. Experimental validation of crystalline silicon solar cells recycling by thermal and chemical methods [J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2010, 94(12): 2275-2282.
- [35] PAGNANELLI F, MOSCARDINI E, GRANATA G, et al. Physical and chemical treatment of end of life panels: An integrated automatic approach viable for different photovoltaic technologies [J]. *Waste Management*, 2017, 59: 422-431.

Recovery Processing Status of Waste Crystalline Silicon Solar Cell

SONG Erxiao, ZHANG Chenglong, MA En, WANG Jingwei, BAI Jianfeng
(Shanghai Collaborative Innovation Centre for WEEE Recycling, Shanghai Polytechnic University,
Shanghai 200120, China)

Abstract: The development trend of market situation of crystalline silicon solar cell was discussed, and the component and structure of its physical composition were analyzed. The existing recycling technologies of waste crystalline silicon solar cell at home and abroad were discussed according to the development status of crystalline silicon solar cell both at home and abroad, which contained manual dismantling method, inorganic acid dissolution method, heat treatment combined with chemical method, organic solvent method and so on. The deficiencies of the above treatment methods were also discussed and some opinions on the recycling of waste crystalline silicon solar cell were put forward.

Keywords: crystalline silicon; solar cell; structure; recovery process