

文章编号:0254-0096(2018)02-0520-09

冶金法多晶硅光伏系统能量回收期与碳足迹分析

于志强^{1~3}, 马文会^{1~3}, 魏奎先^{1~3}, 吕国强^{1~3}, 陈正杰^{1~3}

1. 昆明理工大学复杂有色金属资源清洁利用国家重点实验室/真空冶金国家工程实验室, 昆明 650093;
2. 昆明理工大学冶金与能源工程学院, 昆明 650093;
3. 昆明理工大学云南省有色金属真空冶金重点实验室/云南省高校硅冶金与硅材料工程研究中心, 昆明 650093)

摘 要: 运用生命周期评价(LCA)方法对我国 1 MW_p 冶金法多晶硅光伏系统全生命周期的总能量需求、能量回收期 and 碳足迹进行计算分析。结果表明: 1 MW_p 冶金法多晶硅光伏系统发电的总能量需求为 1.84×10^7 MJ、碳足迹 1.43×10^6 kg、能量回收期为 3.98 a; 总能量需求和碳足迹主要来源于生产阶段, 拆解回收处置阶段影响巨大; 生产阶段中, 平衡系统及辅件生产影响最大, 太阳能级多晶硅生产其次; 铝材、电力、工业硅的用量和硅片回收率是影响总能量需求和碳足迹的关键性因素。

关键词: 冶金法多晶硅; 光伏系统; 生命周期评价; 能量回收期; 碳足迹

中图分类号: X828

文献标识码: A

0 引 言

近年来,随着人口增长和经济发展,能源安全和气候变化等问题日益严重。当今,世界范围内应用的 68% 的能源都来自于化石燃料,发电是全球温室气体排放的主要原因,其产生的温室气体排放约占全球排放量的 40%^[1]。燃烧传统的化石燃料会带来气候变化、全球变暖、大气污染、酸雨等一系列的环境问题。为了应对能源短缺和环境污染的挑战,减缓气候变化,迫切需要发展可再生能源技术,特别是光伏技术^[2,3]。随着技术发展和生产成本降低,太阳能发电已成为一种可大规模发展和应用的可再生能源技术,受到了全世界的广泛关注^[4,5]。

光伏技术直接用太阳能发电似乎非常清洁也没有环境影响,但从整个生命周期来看,其生产、运输、运行及拆解回收处置等阶段实际上都消耗了大量的能源并排放了温室气体^[6]。“绿色太阳能”背后的环境问题备受关注。国内外学者对多晶硅光伏系统进行了生命周期评价或碳足迹分析^[7-15],但研究对象多为改良西门子法或硅烷法多晶硅光伏系统,且未完全涵盖全生命周期所有阶段。本文用我

国生命周期背景数据,计算冶金法多晶硅光伏系统的能量回收期、全生命周期总能量需求和碳足迹,以准确辨识各生命周期阶段的环境影响,为我国光伏发电产业提供决策支持,并完善生命周期评价(life cycle assessment, LCA)基础数据库。

1 研究方法和数据获取

生命周期评价(LCA)作为一种重要的环境管理工具,用于评估产品或服务生命周期全过程中相关环境因素及其潜在影响。能量回收期和碳足迹是两个应用最广泛的环境指标,可用于评估光伏系统的可持续性和环保性能^[6]。

能量回收期指一个光伏发电系统全生命周期内所消耗的能量除以该系统的年平均能量输出,单位为年。本文总能量需求的评估采用 TKE eBalance 软件中的一次能源消耗(PED)评价指标。

碳足迹是产品系统整个生命周期产生的直接和间接的温室气体排放之和,主要以 CO_{2-eq} 为单位。本文碳足迹的评估采用 IPCC 2007 评估方法中的 GWP 评价指标。

本文数据主要来源于云南、宁夏和江苏相关企业调研数据及参考文献。

收稿日期: 2015-12-29

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1137601)

通信作者: 马文会(1973—), 男, 博士、教授, 主要从事硅冶金与硅材料方面的研究。mwhsilicon@126.com

2 研究目标和范围的确定

2.1 研究目标

本文以冶金法生产的 1 MW_p 多晶硅光伏系统为研究对象,计算能量回收期及其生命周期各阶段的能量需求和碳足迹,量化分析冶金法多晶硅的生产方法对环境的影响,为政府相关部门和企业的决策提供理论依据。

2.2 系统边界

本研究从我国多晶硅光伏系统的实际情况出发,以 1 MW_p 冶金法多晶硅光伏系统服役运行 30 a 为功能单位。研究范围包括光伏系统的生产制造阶段(包括矿石开采、工业硅冶炼、太阳能级多晶硅生产、铸锭、切片、电池片制造、组件生产、平衡系统及辅件生产),产品运输阶段(从电池组件、平衡系统及辅件的生产地到光伏系统的组装地点),运行阶段和拆解回收废弃处理阶段 4 个主要的生命周期阶段。系统边界如图 1 所示。

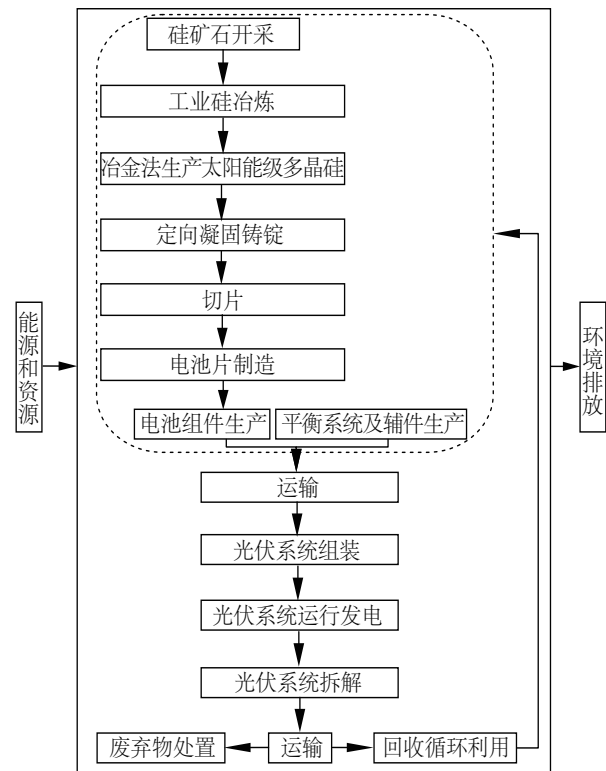


图1 冶金法多晶硅光伏系生命周期评价系统边界示意图
Fig. 1 Life cycle assessment system boundary diagram of metallurgical routepolysiliconphotovoltaic system

3 生命周期数据清单分析

3.1 生产阶段

多晶硅光伏系统的生产阶段主要包括硅石开采、工业硅冶炼、太阳能级多晶硅生产、定向凝固铸锭、切片、电池片制造、电池组件生产、平衡系统及辅件生产。本文太阳能级多晶硅生产采用冶金法,包含造渣精炼、酸洗、定向凝固和电子束精炼四道主要工序。依据企业调研和查阅参考文献,研究对象光伏组件的规格、特征等主要参数列于表 1,冶金法多晶硅光伏系统各生产阶段能耗和物耗汇总列于表 2。

表1 研究对象的组件规格特征	
Table 1 Characteristics of the module in this study	
参数	数值
硅片厚度/ μm	180~200
硅片尺寸/mm	156×156
硅片重量/kg	0.013
铝合金边框质量(组件)/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$	2.13
前玻璃(钢化玻璃)尺寸/mm	1620.0×986.0×3.2
前玻璃(钢化玻璃)密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	2500
封装材料(EVA)厚度/mm	0.45
封装材料(EVA)密度/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	955
光伏背板(TPT)厚度/mm	0.3
组件尺寸/mm	1650×990×50
组件质量/kg	20
每个组件的电池数量/片	60(6×10)
组件效率/%	14.08
工作寿命/a	30
年均太阳能辐射量/ $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-2}$	1700
最大功率点电压 V_{mp}/V	30.7
最大功率点电流 I_{mp}/A	7.49
开路电压 V_{oc}/V	37.0
短路电流 I_{sc}/A	8.06
最大功率 $P_{\text{max}}/\text{W}_\text{p}$	230
工作温度/ $^{\circ}\text{C}$	- 40 ~ 85
最大系统电压/ V_{DC}	600(UL), 1000(IEC)
最大串联电流/A	15
输出功率偏差/%	±3

表 2 各生产阶段能耗和物耗汇总

Table 2 Summary of energy consumption and material consumption in each stage of production

生产步骤	投入的能源和物质	消耗量	数据来源	生产步骤	投入的能源和物质	消耗量	数据来源	
硅矿石 (开采 1 t 硅石)	电/kWh	6.00×10 ⁰	文献[16]	电池片 制造 (1 片 电池片)	SiH ₄ /kg	5.32×10 ⁻⁴	文献 [17, 18, 20~22]中 5 组数据 均值	
	炸药/kg	5.56×10 ¹	文献[17]		POCl ₃ /kg	3.63×10 ⁻⁵		
	汽油、柴油/kg	4.00×10 ⁻¹			KOH/kg	1.37×10 ⁻³		
	水/kg	1.13×10 ²			HCl/kg	1.41×10 ⁻³		
工业硅 冶炼 (1 kg 工业硅)	电/kWh	1.27×10 ¹	文献[18]		HF/kg	1.91×10 ⁻³		文献 [17, 18, 20~22]中 5 组数据 均值
	硅矿石/kg	3.37×10 ⁰	文献[19]		HNO ₃ /kg	4.95×10 ⁻³		
	水/kg	1.20×10 ²	文献[16]		O ₂ /kg	6.19×10 ⁻⁴		
	碳质还原剂 (折合标煤)/kg	1.95×10 ⁰	文献[20]		N ₂ /kg	4.33×10 ⁻²		
太阳能级 多晶硅 生产 (1.01 kg 多晶硅)	电耗/kWh	4.15×10 ¹	云南、 宁夏 相关 企业 生产 数据		松油醇/kg	2.45×10 ⁻⁷		
	工业硅消耗/kg	1.24×10 ⁰			无水乙醇/kg	9.52×10 ⁻⁵		
	石英砂/kg	4.16×10 ⁻²			磷酸/kg	3.95×10 ⁻⁶		
	萤石粉/kg	8.30×10 ⁻³			CF ₄ /kg	1.57×10 ⁻⁴		
	31%盐酸/kg	3.60×10 ⁻¹			NaOH/kg	9.89×10 ⁻⁴		
	55%氢氟酸/kg	1.53×10 ⁻¹			硫酸/kg	1.25×10 ⁻⁵		
	新鲜水/kg	1.25×10 ¹						
	石灰/kg	3.83×10 ⁻¹						
	石英坩埚/kg	2.10×10 ⁻¹						
定向 凝固 铸锭 (1 kg 硅锭)	氮化硅/kg	9.78×10 ⁻⁴		电耗/kWh	1.20×10 ¹	文献 [17, 18, 20~22]中 5 组数据 均值		
	循环水/kg	4.20×10 ⁰		电池片/片	6.00×10 ¹			
	石英坩埚/kg	1.80×10 ⁻¹		新鲜水/kg	2.07×10 ¹			
	氮化硅/kg	1.00×10 ⁻³		玻璃/kg	1.45×10 ¹			
	太阳能级 多晶硅料/kg	1.01×10 ⁰		TPT 背板/kg	5.66×10 ⁻¹			
多晶 硅锭 切片 (1 片 硅片)	电/kWh	6.37×10 ⁻¹	宁夏相关 企业生产数据	EVA 膜/kg	1.29×10 ⁰	文献 [17, 18, 20~22]中 5 组数据 均值		
	多晶硅锭/kg	2.04×10 ⁻²	江苏、宁夏 相关企业 生产数据 均值	有机硅胶/kg	5.17×10 ⁻²			
	纯水/kg	4.26×10 ⁰		组件铝边框/kg	2.42×10 ⁰			
	钢线/km	1.48×10 ⁻¹		无水乙醇/kg	2.53×10 ⁻³			
	电池片 制造 (1 片 电池片)	聚乙烯醇/kg		4.35×10 ⁻²			助焊剂 (异丙醇)/kg	8.06×10 ⁻⁴
碳化硅/kg		4.06×10 ⁻²	涂锡铜带/kg	3.11×10 ⁻³				
电耗/kWh		5.06×10 ⁻¹	丁基胶/kg	2.93×10 ⁻²				
多晶硅片/片		1.00×10 ⁰	铜线/kg	6.00×10 ⁻³				
新鲜水/kg		1.10×10 ⁰	纸板/kg	3.50×10 ⁻¹				
银浆/kg		4.30×10 ⁻⁴	电线(铜)/kg	1.00×10 ⁰				
铝浆/kg		1.39×10 ⁻³	接线盒(铜)/kg	3.80×10 ⁻¹				
平衡 系统及 辅件 生产 (1 个 组件)	银铝浆/kg	1.39×10 ⁻⁵	文献[20]	接线盒(钢材)/kg	8.86×10 ⁻¹			
	NH ₃ /kg	1.37×10 ⁻³		接线盒(塑料)/kg	1.54×10 ⁰			
				电线(绝缘保护层 HDPE)/kg	6.90×10 ⁻¹			
				支架(铝)/kg	4.48×10 ⁰			
				支架(钢)/kg	2.40×10 ⁰			
			500 kW 逆变器/个	4.60×10 ⁻⁴	Ecoinvent 数据库			

3.2 运输阶段

在光伏系统生命周期各环节的中间产品中,光伏系统的重量远远超出其他中间过程的产品,同时考虑到光伏产业链向垂直一体化整合的趋势^[23],本文仅计算光伏系统运送到安装地点的运输能耗和产生的碳足迹。光伏系统运输采用的方式多为公路运输,假设运输工具为中型柴油货车(8 t),运输距离为 1000 km,1 MW_p并网光伏系统的重量约为 136.43 t。相关生命周期背景数据来自 CLCD 数据库。

3.3 运行阶段

假设光伏组件清洁的平均周期为每周一次,并仅需使用柔软洁净的布料擦拭光伏组件表面。根据文献[24]的数据,每次每平方米消耗水 0.5 kg,折合每年 1 MW_p的光伏组件消耗水 185163.82 kg,即在光伏系统 1 个生命周期 30 a 内共需耗水 5554914.6 kg。

3.4 拆解回收处置阶段

目前光伏发电兴起不久,尚未达到光伏系统 25~30a 的使用寿命,我国光伏系统的报废和回收处理产业尚未形成规模。本文拆解回收处置阶段包括设备拆解和材料回收及最终处置两个过程。英利公司利用剪切、挤压剪切、低温磨削和振动筛分等方法,从被拆除了边框与接线盒的光伏组件中回收玻璃面板颗粒、EVA 颗粒、背板颗粒和硅颗粒^[25]。垃圾破碎分选的电耗为 0.002 kWh/kg 垃圾^[26]。根据现有工业化回收技术,按照重量计算,晶体硅光伏组件中 80%可回收再利用,其中玻璃、铜、铝边框的回收率分别约为 100%、85%、100%^[27],假设钢铁的回收率为 100%。其他物质如塑料、电路板等视为危险废弃物,其综合利用率为 45.4%^[28]。剩余的危险废弃物最终处置采用土地安全填埋技术,垃圾处理能耗取 0.008 kWh/kg 垃圾^[29]。

废玻璃回收再造,可减少约 32%的能量消耗。回收 1 t 废玻璃,可节约煤炭 10 t、电 400 kWh^[30]。再生铜能源消耗为精矿铜的 29.8%,温室效应为精矿铜的 25.7%^[31]。再生铝的总能耗仅为原铝生产能耗的 4.86%,CO₂排放量是原铝生产的 4.6%,GWP 只有原生铝的 1/24^[32]。若电炉炼钢全部用

废钢作原料与长流程炼钢相比可以节省 60%的能源^[33]。

当电池厚度小于 200 μm 时,热处理已经无法获得完好的硅片。随着光伏产业生产技术的进步,电池的厚度逐代变薄,目前普遍在 200 μm 以下。因此,通过热处理工艺得到完整的硅晶片已经不适用于现阶段的光伏组件,只能够用于回收硅原料^[34],这样可省去高纯硅的生产能耗。假设硅的回收率为 62%^[27]。

拆解后要运回相应的工厂进行回收,假设该阶段的运输能耗和碳足迹与前面计算的光伏系统运送到安装地点的情况相同。

4 研究结果与分析

基于收集到的清单数据和 eBalance 软件的辅助计算,得到 1 MW_p冶金法多晶硅光伏系统各生产阶段和各生命周期阶段的一次能源消耗和碳足迹,见表 3、表 4。

表 3 各生产阶段的一次能源消耗和碳足迹

Table 3 Primary energy consumption and carbon footprint in various stages of production

生产阶段	一次能源消耗 (PED)/MJ	碳足迹 (GWP)/kg CO _{2-eq}
太阳能级多晶硅锭生产	5.44×10 ⁶	4.18×10 ⁵
多晶硅锭切片	2.42×10 ⁶	1.80×10 ⁵
电池片制造	1.99×10 ⁶	1.51×10 ⁵
组件生产	4.41×10 ⁶	3.55×10 ⁵
平衡系统及辅件生产	6.85×10 ⁶	5.35×10 ⁵
生产整个光伏系统合计	2.11×10 ⁷	1.64×10 ⁶

表 4 生命周期各阶段的一次能源消耗和碳足迹

Table 4 Primary energy consumption and carbon footprint at various stages of the life cycle

生命周期各阶段	一次能源消耗 (PED)/MJ	碳足迹 (GWP)/kg CO _{2-eq}
生产阶段	2.11×10 ⁷	1.64×10 ⁶
运输阶段	2.61×10 ⁵	2.27×10 ⁴
运行阶段	3.97×10 ⁴	1.76×10 ³
拆解回收处置阶段	-3.02×10 ⁶	-2.32×10 ⁵
全生命周期合计	1.84×10 ⁷	1.43×10 ⁶

4.1 生产阶段的一次能源消耗与碳足迹分析

1 MW_p冶金法多晶硅光伏系统生产阶段的一次能源总消耗为 2.11×10^7 MJ, 碳足迹为 1.64×10^6 kg。通过分析得到了各生产阶段对光伏系统的一次能源消耗和碳足迹贡献, 具体如图 2 所示。

由图 2、图 3 可见, 平衡系统及辅件生产过程贡献最大, 占整个生产阶段的 33%, 其次为冶金法生产多晶硅锭过程, 能量消耗和碳足迹分别占 26% 和 25%, 然后是组件生产, 能量消耗和碳足迹分别占 21% 和 22%。由此可看出, 钢铁、铜、铝、玻璃、多晶硅等材料生产过程对光伏系统生命周期能量消耗和碳足迹的贡献较大。因此, 减少它们制造过程中的能耗和材料的消耗, 可以有效降低生产阶段的环境影响, 进而降低整个生命周期的环境影响。

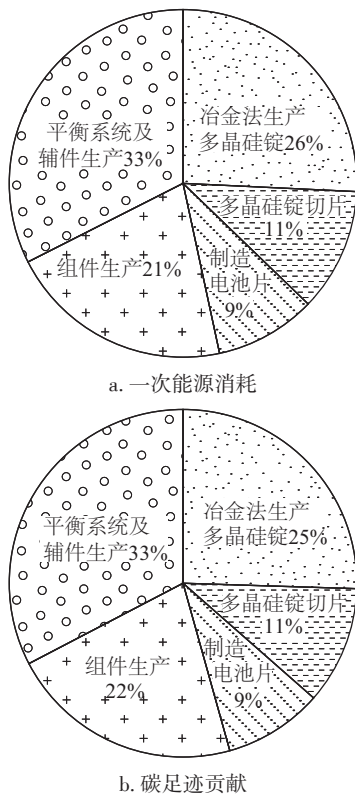


图 2 各生产阶段一次能源消耗及碳足迹贡献

Fig. 2 Carbon footprint contribution of each stage of production

4.2 生命周期各阶段的总能量需求与碳足迹分析

通过生命周期总能量需求分析(图 4)可知, 1 MW_p冶金法多晶硅光伏系统生命周期的总能量需求为 1.84×10^7 MJ, 其中生产阶段为 2.11×10^7 MJ, 约

占总量的 114.7%; 其次是运输阶段, 为 2.61×10^5 MJ, 约占 1.4%; 运行阶段为 3.97×10^4 MJ, 约占 0.2%; 拆解回收处置阶段为 -3.02×10^6 MJ, 约占 -16.4%。可见, 多晶硅光伏系统整个生命周期的总能量需求主要集中在光伏系统的生产阶段, 拆解回收处置阶段产生了较大的环境收益, 减少了能量消耗。生产阶段和废弃处理处置阶段是影响研究结果的 2 个关键阶段, 之前很多研究只考虑生产阶段, 忽视了其他生命周期阶段, 不能真正反映多晶硅光伏系统生命周期的环境影响。

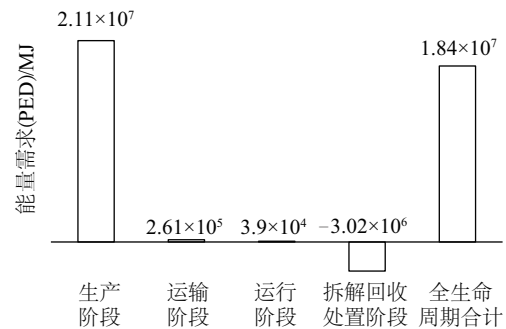


图 4 生命周期各阶段能量需求

Fig. 4 Energy demand at each stage of the life cycle

1 MW_p冶金法多晶硅光伏系统的碳足迹总量为 1.43×10^6 kg, 生命周期各阶段的碳足迹如图 5 所示。结果表明, 生产阶段的碳足迹最大, 为 1.64×10^6 kg, 贡献了总量的 114.7%; 其次为光伏系统的运输阶段 2.27×10^4 kg, 贡献了 1.6% 的碳足迹; 运行阶段的碳足迹相对较小, 仅为 1.76×10^3 kg, 贡献了总量的 0.1%; 拆解回收处置阶段由于材料的回收再利用, 避免了部分被代替材料生产造成的环境影响, 所以此阶段的碳足迹总和为负值 -2.32×10^5 kg, 减少了 16.2% 的碳足迹。

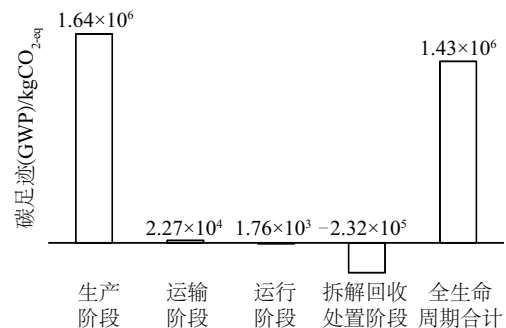


图 5 生命周期各阶段碳足迹

Fig. 5 Carbon footprint of each stage of the life cycle

拆解回收处置阶段主要包括了拆解破碎分选填埋、主要材料的回收利用和拆解后的运输,其能量消耗和碳足迹见表 5、图 6。拆解破碎分选填埋和拆解后运输所产生的能量消耗和碳足迹远小于材料回收利用、替代原材料所避免产生的量。主要材料的回收对拆解回收处置阶段的能量消耗和碳足迹影响巨大。

表 5 拆解回收处置阶段的一次能源消耗和碳足迹
Table 5 Primary energy consumption and carbon footprint at dismantling, recycle and disposal stage

拆解回收处置 阶段各环节	一次能源消耗 (PED)/MJ	碳足迹 (GWP)/kg CO _{2-eq}
破碎分选填埋	5.24×10 ³	3.93×10 ²
材料回收利用	-3.29×10 ⁶	-2.55×10 ⁵
拆解后运输	2.61×10 ⁵	2.27×10 ⁴
合计	-3.02×10 ⁶	-2.32×10 ⁵

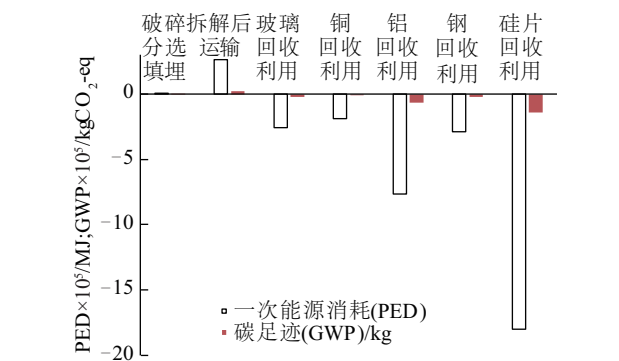


图 6 材料回收利用对拆解回收处置阶段能耗和碳足迹的贡献
Fig. 6 The contribution of material recycling to primary energy consumption and carbon footprint at the dismantling, recycle and disposal stage

4.3 能量回收期

三类地区在中国面积最广、太阳能资源处于中等水平^[35],假设多晶硅光伏系统的安装地点在三类地区的云南昆明,以最佳倾角南向安装,没有朝向和倾角损失,能量回收期可用式(1)和式(2)计算^[36]。

EPBT = E_{in}/E_{out} (1)

E_{out} = H_i × P₀ × PR (2)

式中,EPBT——能量回收期,a;E_{in}——光伏发电系统全生命周期内所消耗的能量,kWh;E_{out}——单

位功率并网光伏系统每年输出的能量,kWh;H_i——倾斜方阵面上全年接收到的太阳总辐照量即每年的峰值日照时数,h,本文为1615h^[36];P₀——光伏系统额定功率,MW_p,本文为1MW_p;PR——光伏系统综合效率,本文取其为79.6%^[37]。

所以,在云南昆明以朝南最佳倾角安装的1MW_p并网光伏系统的年发电量为1285540kWh,1MW_p冶金法多晶硅光伏系统的能量回收期为3.98a。

4.4 敏感性分析

从图2和图3可看出,生产平衡系统及辅件、太阳能级多晶硅锭和组件是多晶硅光伏系统生产阶段能量消耗和碳足迹最高的3个生产过程,它们对一次能源消耗和碳足迹指标敏感度最高的清单物质是铝、电力和工业硅,见表6。

表 6 对能量消耗和碳足迹影响最大的清单物质及其敏感度
Table 6 List of substances and their sensitivity to energy consumption and carbon footprint

主要生产过程	清单物质	对 PED 指标敏感度	对 GWP 指标敏感度
平衡系统及辅件生产	铝	76.1%	82.5%
太阳能级多晶硅锭生产	电力	64.2%	62.4%
组件生产	工业硅	34.9%	36.3%
	铝	63.8%	67.1%

由表6可以看出,平衡系统铝支架、组件铝边框和太阳能级多晶硅锭生产过程中的电力及工业硅消耗是影响多晶硅光伏系统总能量需求和碳足迹的关键性因素。由图6可看出,硅片回收也是拆解回收处置阶段影响多晶硅光伏系统总能量需求和碳足迹的关键性因素。因此,多晶硅光伏系统应采用更加合理、生态的设计,选择更节能环保的材料替代铝支架和铝边框;在太阳能级多晶硅生产阶段尽量降低电力和工业硅的消耗,同时降低工业硅生产的电耗;在拆解回收处置阶段,用更合理的回收利用方式,尽量增加硅片的回收率,从而显著降低多晶硅光伏系统生命周期的总能量需求和碳足迹。

5 结 论

1) 1 MW_p 冶金法多晶硅光伏系统发电的总能量需求为 $1.84 \times 10^7\text{ MJ}$ 、碳足迹 $1.43 \times 10^6\text{ kg}$ 、以朝南最佳倾角安装在云南昆明的能量回收期为 3.98 a。光伏系统发电全生命周期的总能量需求和碳足迹主要来源于生产阶段,都贡献了 114.7%;运输阶段贡献了 1.4%的总能量需求和 1.6%的碳足迹;运行阶段贡献了 0.2%的总能量需求和 0.1%的碳足迹;拆解回收处置阶段因为材料回收产生环境效益对研究结果影响巨大,减少了 16.4%的总能量需求和 16.2%的碳足迹。

2) 1 MW_p 冶金法多晶硅光伏系统生产阶段的一次能源总消耗为 $2.11 \times 10^7\text{ MJ}$ 、碳足迹为 $1.64 \times 10^6\text{ kg}$ 。其中,平衡系统及辅件生产过程贡献最大,均占 33%;其次为冶金法生产太阳能级多晶硅锭过程,能量消耗和碳足迹分别占 26%和 25%;组件生产的能量消耗和碳足迹分别占 21%和 22%;多晶硅锭切片和制造电池片贡献较小,分别占 11%和 9%。

3) 主要材料的生产过程及其回收利用情况对光伏发电全生命周期能量消耗和碳足迹的贡献较大。敏感性分析结果表明,对一次能源消耗和碳足迹指标敏感度最高的清单物质是铝、电力和工业硅。硅片回收也是拆解回收处置阶段影响多晶硅光伏系统总能量需求和碳足迹的关键性因素。

4) 为了有效降低多晶硅光伏系统全生命周期的环境影响,可采取以下措施:减少主要材料生产能耗和原材料消耗;采用更合理、生态的设计,选择更节能环保的材料替代铝支架和铝边框;在太阳能级多晶硅生产阶段尽量降低电力和工业硅的消耗,同时降低工业硅生产电耗;在拆解回收处置阶段,研究更合理的回收利用方式,尽量增加硅片的回收率。

[参考文献]

- [1] Turconi R, Boldrin A, Astrup T. Life cycle assessment (LCA) of electricity generation technologies: Overview, comparability and limitations[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 28(8): 555—565.
- [2] Nishimura A, Hayashi Y, Tanaka K, et al. Life cycle assessment and evaluation of energy payback time on high-concentration photovoltaic power generation system[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(9): 2797—2807.
- [3] Desideri U, Proietti S, Zepparelli F, et al. Life cycle assessment of ground-mounted 1778 kW_p photovoltaic plant and comparison with traditional energy production systems[J]. *Applied Energy*, 2012, 97(3): 930—943.
- [4] Li D H W, Lam T N T, Chan W W H, et al. Energy and cost analysis of semi-transparent photovoltaic in office buildings[J]. *Applied Energy*, 2009, 86(5): 722—729.
- [5] Hondo H, Baba K. Socio-psychological impacts of the introduction of energy technologies: Change in environmental behavior of households with photovoltaic systems[J]. *Applied Energy*, 2010, 87(1), 229—235.
- [6] Peng Jinjing, Lu Lin, Yang Hongxing. Review on life cycle assessment of energy payback and greenhouse gas emission of solar photovoltaic systems[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 19: 255—274.
- [7] Fu Yinyin, Liu Xin, Yuan Zengwei. Life-cycle assessment of multi-crystalline photovoltaic(PV) systems in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 86: 180—190.
- [8] Stoppato A. Life cycle assessment of photovoltaic electricity generation[J]. *Energy*, 2008, 33(2): 224—232.
- [9] Andreas S, Mercedes R G, Roberto V R, et al. Life-cycle assessment of a photovoltaic system in Catalonia (Spain)[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2011, 15(8): 3888—3896.
- [10] Dones R, Frischknecht R. Life-cycle assessment of photovoltaic systems: Results of Swiss studies on energy chains[J]. *Progress in Photovoltaics*, 1998, 6(2): 117—125.
- [11] Hou Guofu, Sun Honghang, Jiang Ziying, et al. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China[J]. *Applied Energy*, 2016, 164: 882—890.
- [12] Stylos N, Koroneos C. Carbon footprint of polycrystalline photovoltaic systems[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 64: 639—645.
- [13] de Wild-Scholten M J (Mariska). Energy payback time and carbon footprint of commercial photovoltaic systems[J]. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2013, 119: 296—305.
- [14] Yang Dong, Liu Jingru, Yang Jianxin, et al. Life-cycle

- assessment of China's multi-crystalline silicon photovoltaic modules considering international trade[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 94: 35—45.
- [15] 刘臣辉, 詹晓燕, 范海燕, 等. 多晶硅-光伏系统碳排放环节分析[J]. *太阳能学报*, 2012, 33(7): 1158—1163.
- [15] Liu Chenhui, Zhan Xiaoyan, Fan Haiyan, et al. Analysis of carbon emission links on polycrystalline-silicon PV system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2012, 33(7): 1158—1163.
- [16] 班 辉, 邹智勇, 张万福. 工业硅生产能耗及节能分析[J]. *轻金属*, 2005, (1): 42—48.
- [16] Ban Hui, Zou Zhiyong, Zhang Wanfu. Analysis of energy consumption and energy saving in metallurgical silicon production[J]. *Light Metals*, 2005, (1): 42—48.
- [17] 何 洋. 太阳能级多晶硅的生命周期评价[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [17] He Yang. Life-cycle assessment of solar grade multi-crystalline silicon[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [18] 刁周玮, 石 磊. 中国光伏电池组件的生命周期评价[J]. *环境科学研究*, 2011, 24(5): 571—579.
- [18] Diao Zhouwei, Shi Lei. Life cycle assessment of photovoltaic panels in China[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2011, 24(5): 571—579.
- [19] 叶宏亮. 工业硅生产过程生命周期评价研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2008.
- [19] Ye Hongliang. LCA study of metallurgical silicon process [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2008.
- [20] 梁 佳. 建筑并网光伏系统生命周期环境影响研究[D]. 天津: 天津大学, 2012.
- [20] Liang Jia. Environmental effects investigating for the grid-connected BAPV [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012.
- [21] 傅银银. 中国多晶硅光伏系统生命周期评价[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [21] Fu Yinyin. Lifecycle assessment of multi-crystalline photovoltaic system in China[D]. Nanjing: Nanjing University, 2013.
- [22] 李 鹄, 于随然. 中国光伏系统的生命周期评价[J]. *环境工程*, 2014, 32(10): 119—124.
- [22] Li Yao, Yu Suiran. Life cycle assessment of photovoltaic system in China[J]. *Environmental Engineering*, 2014, 32(10): 119—124.
- [23] 陈晓燕. 光伏产业国际竞争力研究[D]. 天津: 南开大学, 2010.
- [23] Chen Xiaoyan. Researching on the international competitiveness of the solar industry[D]. Tianjin: Nankai University, 2010.
- [24] 杨倩苗. 建筑产品的全生命周期环境影响定量评价[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [24] Yang Qianmiao. Quantitative evaluation of the whole life cycle of building products[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009.
- [25] 英利集团有限公司. 一种光伏组件分解回收的方法及其装置[P]. 中国: CN102544239A, 2012-03-07.
- [25] Yingli Group Co., Ltd. Method and device for decomposition and recovery of photovoltaic module [P]. China: CN102544239A, 2012-03-07.
- [26] 龚佰勋. 环保设备设计手册·固体废物处理设备[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004, 108.
- [26] Gong Baixun. Environmental protection equipment design manual solid waste treatment facility [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004, 108.
- [27] 梁 哲, 朱景兵. 光伏组件的回收再利用[A]. 第13届中国光伏大会论文集[C], 无锡, 2013.
- [27] Liang Zhe, Zhu Jingbing. Recovery and reuse of PV modules [A]. Proceedings of the Thirteenth China Photovoltaic Assembly [C], Wuxi, 2013.
- [28] 赵由才. 危险废物处理技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003, 284.
- [28] Zhao Youcai. Hazardous waste treatment technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003, 284.
- [29] 中国科学技术协会学会工作部. 废弃物处理与管理[A]. 全国废弃物处理与管理学术讨论会论文集[C], 北京, 1990.
- [29] China Association of Science and Technology of the Department of Work. Waste disposal and management [A]. Proceedings of the National Symposium on Waste Disposal and Management [C], Beijing, 1990.
- [30] 闫鸿炳. 生活垃圾节能减排的最佳途经是——垃圾的源头分类[A]. 第2届全国垃圾处理技术与资源利用研讨会论文集[C], 杭州, 2010.
- [30] Yan Hongbing. The best way to energy saving and emission reduction is the source classification of garbage [A]. Proceedings of the Second National Symposium on Waste Disposal Technology and Resource Utilization [C], Hangzhou, 2010.
- [31] 姜金龙, 徐金城, 吴玉萍. 再生铜的生命周期评价[J]. *兰州理工大学学报*, 2006, 32(3): 4—6.

- [31] Jiang Jinlong, Xu Jincheng, Wu Yuping. LCA study of secondary copper[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2006, 32(3): 4—6.
- [32] 丁 宁, 高 峰, 王志宏, 等. 原铝与再生铝生产的能耗和温室气体排放对比[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(10): 2908—2915.
- [32] Ding Ning, Gao Feng, Wang Zhihong, et al. Comparative analysis of primary aluminum and recycled aluminum on energy consumption and greenhouse gas emission[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(10): 2908—2915.
- [33] 张存星. 废钢资源对钢铁生产能耗影响的研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2012.
- [33] Zhang Cunxing. Study of the impact scrap resources of the iron and steel production and energy consumption [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2012.
- [34] 董 莉, 刘景洋, 张建强, 等. 废晶体硅光伏组件资源化处理技术研究现状[J]. 现代化工, 2014, 34(2): 20—23.
- [34] Dong Li, Liu Jingyang, Zhang Jianqiang, et al. Research situation of waste crystalline silicon PV modules resource processing technology[J]. Modern Chemical Industry, 2014, 34(2): 20—23.
- [35] Lu Yimin, Yue Tianxiang, Chen Chuanfa, et al. Solar radiation modeling based on stepwise regression analysis in China[J]. Journal of Remote Sensing, 2010, 14(5): 852—864.
- [36] 杨金焕. 光伏系统能量偿还时间的分析[J]. 上海节能, 2010, (1): 11—14.
- [36] Yang Jinhuan. Analysis of the energy- back time of photovoltaic system [J]. Shanghai Energy Conservation, 2010, (1): 11—14.
- [37] 胡润青. 我国多晶硅并网光伏系统能量回收期的研究[J]. 太阳能, 2009, (1): 9—14.
- [37] Hu Runqing. Study on energy payback time of polysilicon grid connected photovoltaic system in China [J]. Solar Energy, 2009, (1): 9—14.

ANALYSIS OF ENERGY PAYBACK TIME AND CARBON FOOTPRINT OF METALLURGICAL ROUTE POLYSILICON PV POWER SYSTEM

Yu Zhiqiang¹⁻³, Ma Wenhui¹⁻³, Wei Kuixian¹⁻³, Lyu Guoqiang¹⁻³, Chen Zhengjie¹⁻³

(1. State Key Laboratory of Complex Nonferrous Metal Resources Cleaning Utilization / The National Engineering Laboratory for Vacuum Metallurgy, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

2. Faculty of Metallurgical and Energy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China;

3. Key Laboratory of Nonferrous Metals Vacuum Metallurgy of Yunnan Province / Engineering Research Center for Silicon Metallurgy and Silicon Materials of Yunnan Provincial Universities, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

Abstract: The total energy demand and carbon footprint of whole life cycle, energy payback period of the 1 MW_p metallurgical polycrystalline silicon PV systems in China were calculated and analyzed using the life cycle assessment (LCA) method. The results showed that for 1 MW_p metallurgical route polysilicon PV system, the total energy demand is 1.84×10^7 MJ, the carbon footprint 1.43×10^6 kg, the energy payback time is 3.98 years. The total energy demand and carbon footprint come mainly from the production stage, and the influence of the dismantling, recycle and disposal stage is quite great. During the production stage, the influence of the balance system and accessories production is the greatest, and the production of solar grade polysilicon takes up the second place. The amount of aluminum, power consumption, metallurgical silicon and silicon wafer recovery rate are the key factors affecting the total energy demand and carbon footprint.

Keywords: metallurgical route polysilicon; photovolatic system; life cycle assessment (LCA); energy payback period; carbon footprint