



# 光伏组件耐极端气候环境性能的研究综述

黄 慧<sup>1\*</sup>, 冯相赛<sup>1</sup>, 钱峰伟<sup>1</sup>, 杨瑰婷<sup>2</sup>, 韩婷婷<sup>2</sup>

(1. 上海太阳能工程技术研究中心有限公司, 上海 200241; 2. 上海空间电源研究所, 上海 200240)

**摘 要:** 综述了极低温、高辐射及强风力等气候环境因素对光伏组件不同构成部分的性能的影响, 通过采用改善光伏组件结构、材料等方法, 降低因复杂气候环境因素造成的光伏组件失效概率, 提升了光伏组件适应极端气候环境的能力, 可为后续光伏组件在极端气候环境的应用及更深入的研究提供借鉴。

**关键词:** 极端气候环境; 光伏组件; 光伏玻璃; EVA; 背板

**中图分类号:** TK514

**文献标志码:** A

## 0 引言

当今时代, 人类活动遍布全球, 若要在极端、复杂的气候环境下开展活动, 能源供给是必须克服的困难之一。而随着传统能源的日益枯竭, 新能源已成为新的发展趋势, 其中, 利用风能、太阳能发电获取能源亦成为首选。对于大部分地区光伏发电项目的建设来说, 不需要多加考虑极端气候对光伏组件的影响。但随着全球新能源的迅速发展, 以及普通环境区域光伏发电项目的日益饱和, 再加上极端环境自身丰富的新能源资源与其对新能源发展的需求, 必然使光伏发电应用场合具有广泛性。例如, 随着南极科考活动的日渐深入, 各国科考团开始关注南极新能源应用问题, 并积极探索高效利用新能源的方法。南极蕴含着大量新能源, 新能源技术的迅猛发展使南极新能源开发成为现实, 一些科考站已充分利用南极的风能与太阳能, 在南极建立了以太阳能或风能为主要的新能源发电站。

但南极有着极具代表性的恶劣气候: 沿海地区的风速可达 45 m/s, 陆地上高达 95% 的面积覆盖着厚度约为 2 km 的积雪, 年均温度为 -25 °C,

最低气温可达到 -89.6 °C<sup>[1]</sup>, 远低于一般地区 -40 °C 的极低温度<sup>[2]</sup>。数据显示, 1994 年中山站的年总太阳辐射量为 3788 MJ/m<sup>2</sup>, 年紫外辐射量为 214 MJ/m<sup>2</sup><sup>[3]</sup>。如此极低温、强风力、高辐射的极端环境, 对光伏电站的建设能力, 以及其光伏发电系统中核心部件光伏组件的性能都提出了极高的要求。

工作环境的复杂性要求光伏组件具有极高的适应恶劣环境的能力, 针对组件的耐极端气候环境性能的研究不仅能提高特定地区光伏组件的发电性能和使用寿命, 还能为光伏发电的应用场合提供更多的可能性。本文综述了极端气候环境下引起光伏组件各组成部分失效的因素及改善措施, 以期对极端恶劣气候地区的光伏应用研究提供参考。由于目前环境的高温在光伏组件可承受的工作温度范围内, 所以本文仅针对极端低温、强辐射的极端气候环境进行分析。

## 1 我国气候及太阳能资源现状

新能源的利用对极地科考尤为重要, 特别是 2019 年 7 月 11 日“雪龙 2 号”极地考察船正式

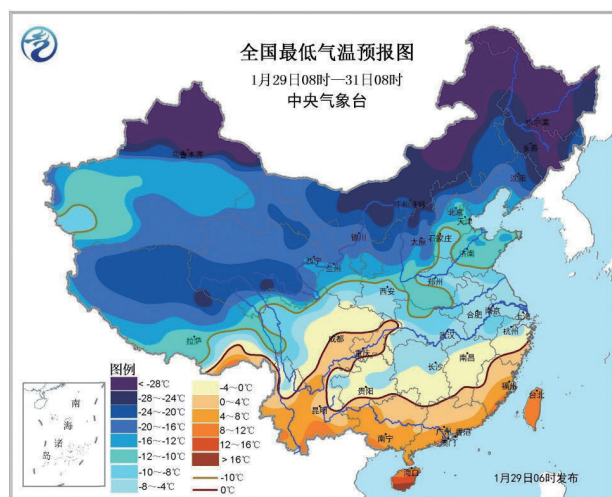
收稿日期: 2019-09-03

基金项目: 上海市 2019 年度“科技创新行动计划”社会发展领域项目: 适用于南极极端气候环境下的光伏、储能系统关键技术研究 (19DZ1207603)

通信作者: 黄慧 (1988—), 女, 本科, 主要从事光伏发电系统应用方面的研究。huanghui@solarcell.net.cn

交付使用,进一步提升了我国的极地科考能力,表明极地地区对新能源的需求将进一步加大。因此,研究光伏组件在极端气候环境的适应性是非常有必要的。

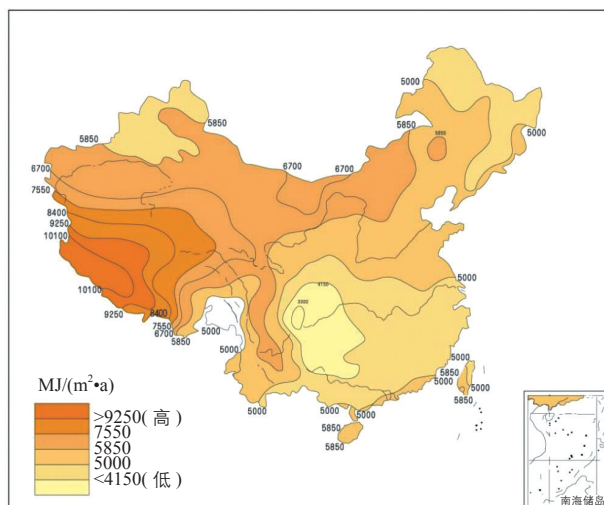
我国地域辽阔,不同区域的气候及太阳能资源存在较大差异。图 1 为 2018 年 1 月 29 日 08:00~1 月 31 日 08:00 的我国最低气温分布图,图 2 为我国太阳能资源分布图。



图片来源:中央气象台网站

图 1 2018 年 1 月 29 日 08:00~1 月 31 日 08:00  
我国最低气温分布图

Fig. 1 National minimum temperature distribution map from  
08:00 Jan. 29 to 08:00 Jan.31 in 2018 in China



图片来源:《2009 年中国光伏电站投资机会分析》

图 2 我国太阳能资源分布图

Fig. 2 National solar energy resources distribution  
map in China

从图中可以看出,漠河位于我国最北端,是我国气温最低的县,其年均气温为  $-4.4^{\circ}\text{C}$ ,每年极端最低气温都在  $-38^{\circ}\text{C}$  以下,并创下了我国气象史上的极端最低气温  $-52.3^{\circ}\text{C}$ ;该地区的年均太阳辐照量为  $4200\sim 5400\text{ MJ}/\text{m}^2$ <sup>[4]</sup>,日照时长为  $2377\sim 2625\text{ h}$ <sup>[5]</sup>。我国高原地区冬季的极端最低气温很低,如青海南部、藏北平原的极端最低气温都平均在  $-17.5^{\circ}\text{C}$  以下,沱沱河、清水河的极端最低气温更是低于  $-22.5^{\circ}\text{C}$ <sup>[6]</sup>,并且高原地区的紫外辐射量约为漠河地区的 1.3 倍。就冬季最冷时间段来说,其环境的恶劣程度与极地气候环境相近。因此,如何解决光伏组件的耐低温性能是在这些高寒缺电地区建设光伏电站及应用光伏发电亟需解决的关键问题。

## 2 光伏组件的结构分析

光伏组件的基本使用寿命要求是“在户外工作 25 年后,其还能保持初始值 80% 的最大输出功率,并且还要求其可有效抵抗外力的冲击”<sup>[7]</sup>。光伏组件主要由太阳电池、背板、光伏玻璃、封装材料、接线盒、边框等组成,其结构如图 3 所示。

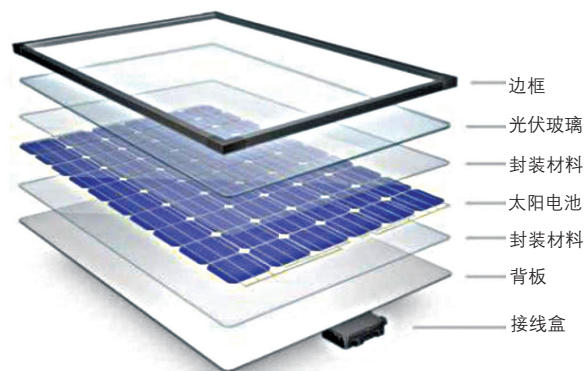
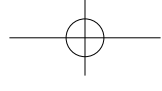


图 3 光伏组件的结构图

Fig. 3 Structure diagram of PV module

光伏组件的使用寿命和发电性能在很大程度上受环境因素,如氧气、温度、光照、相对湿度,以及外力冲击等的影响。这些均是导致组件失效的主要原因,其中,背板、光伏玻璃、封装材料等是保障光伏组件使用寿命的短板。而背板、封装材料等对环境的依赖性较大,易受温度和



光氧老化现象的影响造成性能下降。因此,下文对光伏玻璃、封装材料、背板分别进行分析研究。

## 2.1 光伏玻璃

光伏玻璃的主要作用是保护太阳电池免遭各种恶劣因素的破坏,利用玻璃自身的高透光性尽可能使太阳电池吸收光能不受影响。

光伏玻璃为钢化玻璃,属于无机材料,受环境影响较小,但受外力撞击的影响较大,容易因风压、冰雹等的撞击而破裂。若光伏组件应用在南极地区,常年的强风与暴雪的冲击很容易造成光伏玻璃破裂,从而导致其保护性能失效,影响光伏组件的安全性和使用寿命。玻璃密度与其抗冲击破碎的概率成正比,可通过增加玻璃自身密度来提高其抗冲击性能。因此,适当增加玻璃原料配方中二氧化硅的占比,减少氧化钠和氧化钙的含量,可有效提升钢化玻璃的抗冲击性,从而可有效降低极端环境下强风、暴雪等外力冲击造成的光伏玻璃破碎的风险<sup>[8]</sup>。

有研究表明,太阳电池的转换效率每增加 1%,发电成本就会降低 7%,而光伏玻璃的透光率会影响太阳电池的转换效率,从而其也是影响光伏组件转换效率的重要因素<sup>[9]</sup>。光伏玻璃是一种钠钙玻璃,若长时间处于极端潮湿环境下其会产生水解,生成氢氧化钠和硅酸凝胶;而氢氧化钠会腐蚀、损坏镀膜层,硅酸凝胶则会粘附在玻璃上,二者均会导致光伏玻璃的透光率大幅下降<sup>[10]</sup>。同时,极端气候环境中强烈的紫外辐射会促使光伏玻璃膜层表面有机物的氧化和分解,使膜层起皱、开裂、脱落,并使玻璃表面产生彩虹斑,使光伏玻璃的透光率出现衰减。另外,透过膜层进入玻璃基底的水分子,在极端低温时更容易结冰,这会对膜层造成损坏;极端气候环境中的雪籽、冰雹的冲击也会导致玻璃膜层损伤,最终导致透光率下降<sup>[11]</sup>。这些环境因素对光伏玻璃造成的失效影响,会严重影响光伏组件的转换效率和使用寿命。

资料显示,铁元素可使玻璃着色,降低玻璃的透光率<sup>[12]</sup>,而稀土金属氧化铈( $\text{CeO}_2$ )却具备澄清剂、脱色剂和抗紫外线吸收的功能。因此在光伏玻璃的制造过程中,调整玻璃中铁的含量,添加适量的  $\text{CeO}_2$ ,既能提高光伏玻璃的透光率,减少其对阳光的反射和吸收,又能降低紫外线的透过率,保护电池不受强紫外线的破坏,在有效提高光伏组件的耐紫外辐射能力的同时,还能够提高光伏组件的使用寿命和转换效率<sup>[13]</sup>。

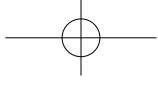
## 2.2 封装材料

封装材料的作用是将太阳电池、铜锡焊带、背板及光伏玻璃等粘结在一起,是光伏组件的关键组成部分<sup>[12]</sup>。封装材料主要有双组分硅胶、聚乙烯醇缩丁醛树脂(PVB)、乙烯-醋酸乙烯酯聚合物(EVA)胶膜等<sup>[14]</sup>。目前光伏行业应用最广泛的是已在行业使用超过 20 年的含 33% 醋酸乙烯酯的 EVA 胶膜<sup>[15]</sup>。

EVA 作为高分子材料,在强紫外线照射下极易发生脱乙烯反应,并产生乙酸与烯烃。不仅 EVA 的分解速度与紫外线强度成正比,而且乙酸量的增加还会加快 EVA 的老化速度<sup>[12]</sup>。光伏组件的焊带、背板和电极也会受到乙酸的腐蚀,脱乙烯反应引起 EVA 胶膜发生色变,使光伏组件由无色透明逐渐变化成黄色甚至深褐色,从而影响了组件的透光率和输出功率,导致组件的转换效率和使用寿命明显下降<sup>[12,15]</sup>。

玻璃化温度  $T_g$  和脆性温度  $T_b$  是当聚合物在低温下力学性能发生形态突变时所对应的温度<sup>[16]</sup>。其中,玻璃化温度直接关系到 EVA 胶膜的低温性能,在玻璃化温度以下,EVA 胶膜呈玻璃态,表现出一定的脆性<sup>[17]</sup>。有实验数据表明,EVA 胶膜的玻璃化温度为  $0 \sim 10\text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[18]</sup>,在  $0\text{ }^\circ\text{C}$  以下时,EVA 胶膜开始逐渐丧失弹性,进入刚性状态。EVA 胶膜的脆性温度为  $-30 \sim -50\text{ }^\circ\text{C}$ ,当温度降到脆性温度以下时,EVA 胶膜表现出脆性,少许的外力、较小的形变就会使其受到破坏<sup>[19]</sup>。此时的 EVA 胶膜仅存在抗机械冲击性能,一旦





受到强劲风压、冰雹或运输等外力的冲击,很容易发生断裂,而封装在其内部的太阳能电池会随之产生隐裂甚至断裂。同时,低温环境还会使 EVA 胶膜的粘结性能严重下降,使光伏组件发生脱层。

光伏用 EVA 胶膜的极性结构较弱,在强紫外线辐射下易产生降解与老化现象,在极端气候环境下易产生低温冷脆、隐裂、脱层现象<sup>[12]</sup>。而 EVA 胶膜的稳定性能受其组成,以及耐老化剂、稳定剂、偶联剂、交联剂等添加剂的影响。耐老化剂可降低紫外线对 EVA 胶膜的降解与变色,稳定剂可增加 EVA 胶膜的化学稳定性和环境适应性,偶联剂可增加 EVA 胶膜的粘结强度,交联剂能有效提高 EVA 胶膜的体积电阻率和机械强度等<sup>[12]</sup>。因此,可通过在 EVA 胶膜生产过程中添加适当比例的添加剂来提高其耐低温性能。

### 2.3 背板

光伏背板位于光伏组件的背面,主要起到保护和支撑太阳能电池的作用<sup>[20]</sup>。作为用于光伏组件最外层大面积封装的高分子材料,光伏背板是影响光伏组件使用寿命的最关键材料。

目前光伏行业较常用的背板为 TPT 背板,该背板为 3 层结构,即 PVF(聚氟乙烯薄膜)-PET(聚脂薄膜)-PVF 结构。外层 PVF 具有良好的抗环境侵蚀能力,中间层 PET 具有良好的绝缘性能,内层 PVF 经表面处理后与 EVA 胶膜具有良好的粘接性能<sup>[21]</sup>。资料显示,PVF 与 PET 的脆性温度都在 -70℃,由于含氟材料 PVF 较薄,因此其低温性能一般可满足极端气候环境,而 PET 在背板结构中较厚,在极端低温下其弹性会大幅降低,导致其承受外力冲击的能力下降,从而会产生隐裂或磨损,保护性能也会受到影响。同时,TPT 背板作为高分子材料,在强紫外辐射下,其外层保护层产生裂纹会使其中间层直接与户外环境接触,造成 PET 产生水解及光氧老化现象,最终导致其保护性能下降<sup>[22]</sup>。

因此,在极端气候环境下使用的 TPT 背板,

除了需具备耐候性、绝缘性、水汽阻隔、耐腐蚀和耐风沙磨损等各种平衡的性能之外<sup>[23]</sup>,还需加强低温机械强度、韧性及抗老化性能,如此才可使光伏组件更长期有效的耐受极端气候环境,保证组件的使用寿命和发电性能不受影响。

### 2.4 光伏组件的整体性能

综上所述,通过对光伏组件的光伏玻璃、封装材料及背板的性能综述,对极端气候环境下会导致光伏组件失效的各种因素进行探究,结果表明:

1) 通过调整光伏玻璃配方中二氧化硅、氧化钠和钢化钙的比例,可提高光伏玻璃的耐冲击性能,从而减少外力对光伏组件造成损伤的概率;同时,控制玻璃中铁和  $\text{CeO}_2$  的含量,可增强光伏玻璃的透光性能,最终提高光伏组件的转换效率。

2) 通过对封装材料 EVA 胶膜采用改性技术,可降低 EVA 紫外老化、低温冷脆等失效现象的发生。

3) 加强 TPT 背板的低温机械强度与韧性,可提高背板对光伏组件的保护性能。

通过对光伏组件各组成部分失效的原因进行研究分析,并提出技术改进措施,可大幅提升各组成部分的耐候性,从而使光伏组件整体的耐极端气候环境的性能得到进一步提升,有效降低了光伏组件在经历极低温、大风、暴雪、强紫外辐射等恶劣环境后老化、损坏、失效的概率,并使其可以保持高效的转换效率。

## 3 结语

本文通过对光伏组件各组成部分的性能进行综合分析,分别介绍了光伏玻璃、封装材料、背板的材料特性,以及从各组成部分入手如何提高光伏组件的耐极端气候性能,为高寒地区特别是极区域光伏发电系统的进一步应用推广提供了一定的指导和借鉴。



## [参考文献]

- [1] 郑琦凡. 浅析南极气候对各国科考站建筑形态特征的影响[J]. 大众文艺, 2015(9): 114.
- [2] 于彬, 祁文军. 极端环境载荷对复合材料风机叶片特性影响分析[J]. 机械科学与技术, 2016, 35(7): 1133 - 1138.
- [3] 卞林根, 陆龙骅, 贾朋群. 南极中山站紫外辐射的初步研究[J]. 科学通报, 1996(9): 805 - 807.
- [4] 陆忠涛, 侯士波, 贺丽娟. 漠河太阳辐射特征及影响太阳能利用的气候因素分析[J]. 黑龙江气象, 2009, 26(2): 8 - 9.
- [5] 袁秀芝, 周海龙, 桂翰林. 漠河农业气候特点及对农业生产的影响[J]. 黑龙江气象, 2008(3): 37 - 38.
- [6] 刘青春, 张吉农, 索有光. 青藏高原冬季极端低温异常气候变化特征分析[J]. 青海气象, 2005(3): 14 - 18.
- [7] 封忠江. 太阳能电池组件基本力学性能试验及数值模拟研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [8] 田蜜, 王波. 光伏玻璃抗冲击性能的影响因素[J]. 玻璃, 2017, 44(1): 42 - 46.
- [9] 耿铁, 胡金中, 蔚川乐, 等. 提高光伏玻璃透光率的研究概述[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1594 - 1598.
- [10] 张增明, 吕瑞瑞, 彭丽霞, 等. 减反射镀膜光伏玻璃的可靠性及失效研究[J]. 太阳能, 2012(13): 25 - 29.
- [11] 吴国祥, 陶虹强, 王志伟, 等. 太阳能光伏用玻璃耐久性能检测技术的研究[J]. 新型建筑材料, 2015, 42(12): 27 - 32.
- [12] 陈玉伟. 光伏组件失效研究进展[J]. 科技资讯, 2015, 13(23): 45 - 46.
- [13] 黄昀. 一种抗紫外太阳能超白光伏玻璃及其熔化技术探讨[J]. 福建建材, 2015(10): 5 - 7.
- [14] 周树东, 金正东. 光伏组件封装材料综述[J]. 太阳能, 2013(23): 23 - 27.
- [15] 陈小青, 申明霞. 光伏组件用 EVA 封装胶膜的老化研究进展[J]. 粘接, 2010, 31(12): 65 - 69.
- [16] 君轩. 玻璃化温度和脆性温度[J]. 世界橡胶工业, 2005(12): 52.
- [17] 朱万章. EVA 热熔胶的主要成分及其对性能的影响[J]. 粘接, 1999(1): 28 - 32.
- [18] 冯艳, 陈纪文, 钟国铭, 等. 差示扫描量热法对乙烯-醋酸乙烯酯热性能的研究[J]. 广东化工, 2011, 38(7): 266 - 268.
- [19] 韩玉麟. 热熔胶的低温粉碎技术[J]. 粘接, 1988(3): 27 - 30.
- [20] 苗鲁滨, 周良, 王荣霞, 等. 光伏背板的耐候性研究[J]. 合成材料老化与应用, 2012, 41(5): 32 - 34.
- [21] 曾湘安, 冯江涛, 揭敢新, 等. 不同背板晶硅光伏组件在湿热环境下的性能研究[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2016, 55(4): 63 - 67.
- [22] 单演炎, 刘毅, 吴晓丽, 等. 光伏背板老化性能的快速试验方法[J]. 理化检验(物理分册), 2016, 52(11): 774 - 777.
- [23] 王莉, 杨辉, 李亚钊, 等. 光伏背板用 PET 老化性能研究[J]. 信息记录材料, 2014, 15(6): 16 - 20.

## REVIEW OF PERFORMANCE RESEARCH OF PV MODULES IN EXTREME CLIMATE

Huang Hui<sup>1</sup>, Feng Xiangsai<sup>1</sup>, Qian Fengwei<sup>1</sup>, Yang Guiting<sup>2</sup>, Han Tingting<sup>2</sup>

(1. Shanghai Solar Energy Research Center Co., Ltd., Shanghai 200241, China;

2. Shanghai Institute of Space Power-Sources, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** By summarizing the influence of climatic factors such as extreme low temperature, high radiation and strong wind on the performance of different components of PV modules, by improving the structure and materials of PV modules, the failure probability of PV modules caused by complex climatic factors can be reduced, and the ability of PV modules to adapt to the extreme climatic can be improved. Which can be a reference for the subsequent application of PV modules in extreme climatic and further research for reference.

**Keywords:** extreme climate; PV modules; PV glass; EVA; back-sheet