

文章编号:0253-4339(2020)03-0128-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2020.03.0128

环境温度对光伏板自加热除雪性能影响的实验研究

李 钊 刘 晓 宇 陈 剑 波 丰 敏

(上海理工大学环境与建筑学院 上海 200093)

摘 要 积雪的清除已成为当今光伏板研究的重点。本研究基于光伏电池、传热学和力学的相关原理,将环境温度设为单一变量,通过实验研究不同环境温度(−3℃、−4.5℃、−6℃、−7.5℃、−9℃)对光伏板自加热除雪性能的影响。结果表明:当积雪厚度为6cm、积雪密度为420kg/m³、加热功率为230W/m²、光伏板倾角为18°时,环境温度每升高1℃,光伏板上积雪待融时间缩短约6min,融化时间缩短约11min,除雪总时间缩短约17min,除雪耗电量减少约380.9kJ,除雪总时间受环境温度的影响很大。

关键词 光伏板;除雪;自加热;环境温度

中图分类号:TK124

文献标识码:A

Experiment of Ambient Temperature on the Snow Removal Performance of Self-heating Photovoltaic Panels

Li Zhao Liu Xiaoyu Chen Jianbo Feng Min

(School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China)

Abstract The removal of snow on photovoltaic (PV) panels has become an important issue in current research on PV panels. In this study, the influence of ambient temperature on the snow removal effect of self-heating PV panels was studied using the basic principles of PV cells, heat transfer and mechanics. When the snow thickness was 6 cm, heating power was 230 W/m², snow density was 420 kg/m³, and the inclination angle was 18°, the pre-melting time was shortened by approximately 6 min, the melting time was reduced by approximately 11 min, the total snow removal time was shortened by approximately 17 min, and the power consumption of snow removal was reduced by approximately 380.9 kJ for every 1℃ increase in ambient temperature. Thus, the total snow removal time was greatly affected by ambient air temperature.

Keywords photovoltaic panel; snow removal; self-heating; ambient air temperature

近年来,太阳能电池的大规模生产以及光伏组件价格的大幅度下降使得太阳能光伏产业发展迅速^[1,2]。同时随着我国经济的快速发展、环保意识的不断增强,利用光伏发电来补充传统的煤电、核电、水电的缺口越来越重要。而在光伏发电发展中,如何提高发电效率、延长光伏电池的使用寿命受到越来越多的关注^[3]。从转换技术角度来提高光伏电池对太阳能的转换利用率已经十分困难,并且要付出昂贵的成本代价^[4]。研究发现,光伏发电效率极易受外界环境因素的影响,如冬季积雪已成为影响我国中部及北部地区光伏发电效率的最主要因素,若不能及时清除光伏板上的积雪,将会带来缩短机组寿命^[5]、降低发电效率^[6]、造成安全隐患等问题。

目前,国内外已存在一些清除光伏板积雪的手段,如人工除雪^[7]、机械除雪^[8-9]、纳米自清洁涂

层^[10]和增大光伏板角度^[11]等,但各有一定的弊端。光伏板自加热除雪技术基于光伏电池的结构及原理,利用光伏电池内p-n结的特性^[12-13],将带有加热带的光伏板作为负载,在其两端施加正向电压使其通电发热来融化板上的积雪,简便易行,具有很强的实用性。此外,冬季较低的环境温度不仅决定了雪层表面和光伏板下表面与空气之间的对流换热量,还影响了雪层表面与外界的长波辐射量。为了提高光伏板的融雪效率,本文采用实验方法,探究环境温度的变化对光伏板自加热除雪性能的影响。

1 光伏板自加热除雪过程分析

1.1 雪的热物理性质

对于光伏板融雪而言,首先要了解雪的密度、定

压比热、导热系数、吸收率、孔隙率等特性。Adlam^[14]认为雪的密度可视为环境温度的二次函数,随着环境温度的降低,雪的密度呈逐渐减小趋势。在光伏板融雪过程中,雪的状态可以简单分为干雪、湿雪和雪水,干雪的密度通常为 300~500 kg/m³,湿雪的密度通常为 500~900 kg/m³,雪水的热物理性质基本与液态水一致,然而单凭雪的密度是不能完全衡量以上三种雪的状态,因为雪的密度还与雪的新旧、雪粒粗细以及是否被碾压等因素有关。

雪对太阳能辐射热的吸收率 α 与反射率 ρ 有着密切关系。干雪在可见光与近红外范围内的反射率 ρ 分别为 0.98、0.70,湿雪在可见光与近红外范围内的反射率 ρ 分别为 0.88、0.55^[15]。根据反射率及公式 $\alpha=1-\rho$ 来计算雪对太阳能辐射热的吸收率。

雪的表面发射率 ε 与辐射波长、频率等因素有关。一般来说,新雪、湿雪和冰表面发射率可分别取 0.85、0.98 和 0.97^[16]。

1.2 积雪融化过程及影响因素

光伏板积雪从固态到液态的融化过程即为雪的相变过程。当光伏板底层积雪融化成水后,底层就会形成饱和水的湿雪层,但上层仍为干雪层。由于毛细力和重力的共同作用,湿雪层会不断增加直至达到最大高度,即平衡高度^[17],平衡高度的大小主要取决于积雪的颗粒大小和孔隙率,而只有当积雪厚度大于其本身密度下的平衡高度,也就是当积雪厚度 ≥ 3 cm 时,才能依靠光伏板通电加热的方法进行除雪^[18]。在光伏板自加热融雪过程中,融雪速率受到诸多外界条件影响,如积雪密度、积雪厚度、环境温度、加热功率、电池板倾斜角等。

1.3 光伏板融雪阶段性能参数

为了更好的研究光伏板自加热除雪性能,在光伏板融雪阶段定义以下几个性能参数:

- 1) 光伏板正面温度:积雪与光伏板交界面的温度,即积雪底部温度。
- 2) 坡峰:在自加热除雪下,当光伏板表面温度由不断上升转为骤降,由此形成的一个温度峰值。其对应的时刻为“坡峰时刻”,对应的温度为“坡峰温度”。此“坡峰”是判断光伏板上积雪是否发生相变的一个重要分界点,“坡峰”前积雪无相变发生,“坡峰”处及之后积雪开始融化,相变由此发生。
- 3) 待融阶段:是指从开始通电加热光伏板的时刻(τ_0)到光伏板表面积雪开始融化的时刻(τ_1)之间的时间范围,即开始加热到“坡峰时刻”所经历的阶段。待融阶段所经历的时间为“待融时间”。
- 4) 融化阶段:指从光伏板表面积雪开始融化的

时刻(τ_1)到积雪滑落时刻(τ_2)的时间范围,即“坡峰时刻”到积雪滑落所经历的阶段。融化阶段所经历的时间为“融化时间”。

5) 除雪总时间:由“待融时间”和“融化时间”两部分组成。

6) 融化温度:指在融化阶段中,光伏板的正面温度,此温度基本保持稳定。

7) 经济性:光伏板发电量与除雪过程中耗电量之比。

(1) 发电量计算公式:

$$E_p = H \times P \times K_l \tag{1}$$

式中: P 为系统安装容量, kW; H 为当地标准日照小时数, h; K_l 为系统综合效率。

(2) 耗电量计算公式:

$$W = P \times t \tag{2}$$

式中: P 为用电功率, W; t 为用电时间, s。

2 实验设置

2.1 实验目的

影响除雪效果主要有五个因素:雪密度、环境温度、积雪厚度、加热功率以及光伏板倾斜角度。在本研究中,主要探讨环境温度对光伏板自加热除雪性能的影响,设定环境温度为变量,其他的雪密度、积雪厚度、加热功率和光伏板倾斜角度等影响因素为定值。

2.2 实验设计

实验系统(如图 1)主要由直流稳压电源、光伏板及加热带、焓差实验室和温度采集系统四个部分组成。其中加设于光伏板四周铝合金边框背面的加热带与光伏板并联在直流稳压电源上,用于加热边框、促进积雪融化滑落。针对我国北方冬季多雪天气,当积雪厚度大于平衡高度时,也就是当积雪厚度大于 3 cm 时,可采用光伏板通电除雪。若积雪厚度小于“平衡高度”,由于湿雪的导热系数大于干雪,光伏板表面的积雪会在低温环境下迅速转化为冰,牢牢冻在光伏板表面很难去除,这种情况下不宜完全依靠光伏板通电除雪,可等到雪后天晴、气温升高,将光伏板通电加热作为辅助手段进行除雪。因此本实验积雪厚度设置为 6 cm;根据实验目的以及积雪的热物理性质,采用密度为 420 kg/m³ 的积雪;考虑到光伏板的实际应用情况以及外界环境因素的影响,将光伏板倾角设置为 18°;在有干雪覆盖的情况下,采用直流稳压电源输出功率为 230 W/m² 的热流密度持续融化并使积雪顺利从光伏板滑落下来。针对实验目的,设置了 5 个环境温度(-3.0℃、-4.5℃、-6.0℃、-7.5℃、-9.0℃)的实验工况。

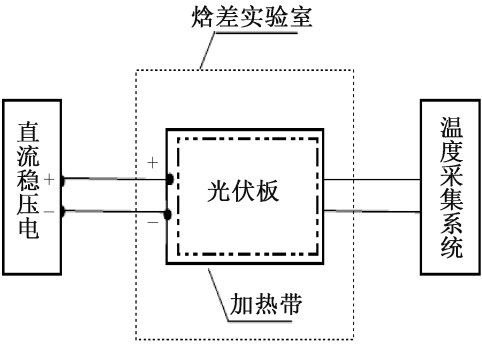


图 1 实验系统图
Fig.1 The experimental setup

在光伏板自加热除雪过程中,特征点温度(即光伏板正、背面的温度)变化和融雪时间对融雪特性的研究有着很大的影响。特征点温度的测点分布如图 1 所示,在光伏板正面均匀地布置①~⑤ 5 个温度测点,背面相对应的布置⑥~⑩ 5 个温度测点,光伏板正面温度取值为正面 5 个测点的平均值,背面温度取值为背面 5 个测点的平均值,由此来研究不同环境温度下光伏板正面及背面的温度变化,并分别记录从光伏板开始通电加热到积雪滑落的时间。

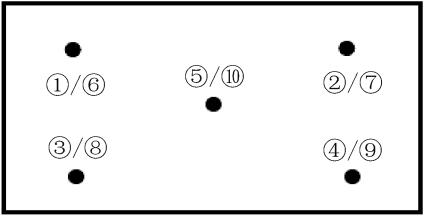


图 2 光伏板温度测点分布
Fig.2 Temperature sampling points of the PV panel

3 实验数据处理与分析

图 3 分别为-3.0℃、-4.5℃、-6.0℃、-7.5℃和-9.0℃的环境温度下光伏板正面及背面的温度变化情况。

可见当光伏板正面温度上升到 0℃ 以上的某个值时,存在一个“坡峰”。在到达“坡峰”前,该正面温

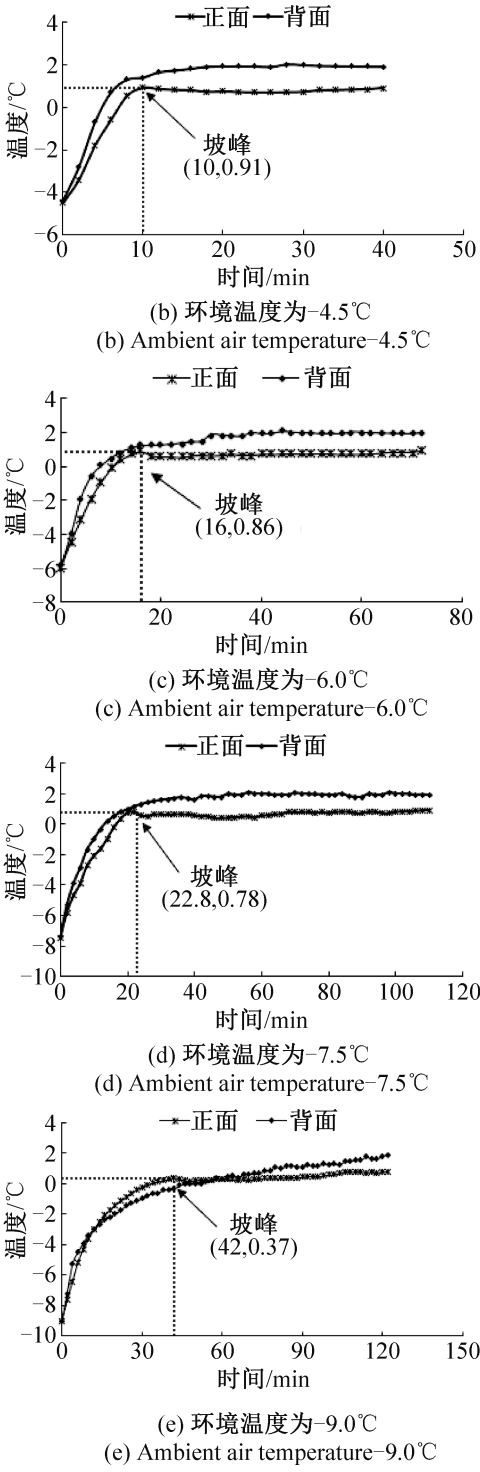
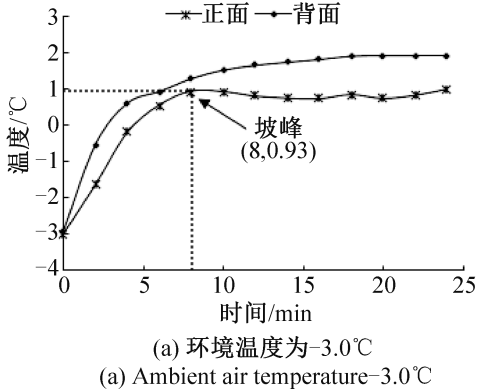


图 3 不同环境温度下光伏板正面及背面的温度变化情况
Fig.3 Temperature variations of the panel under different ambient air temperatures

升速率较大;到达“坡峰”后,温度发生小幅度地下降,曲线斜率由正变为负,之后曲线斜率接近于 0,温度基本保持稳定。同时,在光伏板通电加热前,光伏板正、背面的初始温度均等于环境温度;光伏板通电加热后,光伏板正面和背面温度均随加热时间的增加而上升;在积雪滑落时刻,光伏板背面温度均高于其

正面温度。

对比图 3(a)~(d),可以发现光伏板的背面温度曲线均在正面温度之上。这是由于光伏板正面的对流换热量和辐射换热热量大于其背面的对流换热热量,太阳能电池到光伏板正表面之间的导热热阻 R_f 大于太阳能电池到光伏板背表面之间的导热热阻 R_b 。

在图 3(c)中,光伏板的正面温度曲线与背面温度曲线存在两个交叉点:在第一个交点之前和第二个交点之后,光伏板正面温度均低于背面温度;在两个交点之间,光伏板的正面温度高于背面温度。根据传热理论,在第一个交点之前,光伏板背面主要以自然对流换热为主,此自然对流换热系数小于光伏板正面与积雪之间的导热系数,故光伏板背面温度曲线斜率大于正面温度曲线,背面温度高于正面温度。由于光伏板温度的不断上升,裸露在较低环境温度中的背面温度与环境温度之间的温差逐渐增大,对流换热和辐射换热的损失也逐渐增大,而由于光伏板正面积雪层具有保温作用,因此在第一个交点之后的一段时间内,光伏板正面温度高于背面温度。但随着光伏板正面积雪的融化,大量潜热被吸收,正面温度基本恒定;而光伏板背面无积雪覆盖,无需提供潜热量,因此背面温度仍缓慢上升,最终超越正面温度,故而产生了第二个交点,此后背面温度高于正面温度。

为了进一步明确环境温度对光伏板自加热除雪性能的影响,表 1 列出了在不同环境温度下,从光伏板开始通电加热到积雪滑落所需的除雪总时间;图 4 将实验设定的五个不同环境温度下的光伏板正面温度变化情况进行了比较;在不同环境温度条件下,图 5 对比了光伏板自加热除雪过程中“待融时间”和“融化时间”、图 6 对比了“坡峰温度”和“融化温度”。

表 1 不同环境温度下的除雪总时间

Tab.1 The total snow removal time under different ambient air temperatures

环境温度/℃	-3.0	-4.5	-6.0	-7.5	-9.0
除雪总时间/min	23.9	38.9	70.6	109.0	124.1

通过对表 1 和图 4~图 6 的分析,可以看出:在待融阶段中,环境温度越高,则温度提升速率越大、待融时间越短。实验工况下五种不同环境温度下的待融时间随着环境温度的升高而缩短,对应的温度平均提升速率分别为 0.859℃/min、0.690℃/min、0.435℃/min、0.298℃/min 和 0.144℃/min,温升速率随着环境温度的升高而增大。

在融化阶段中,环境温度越高,则融化温度越高、

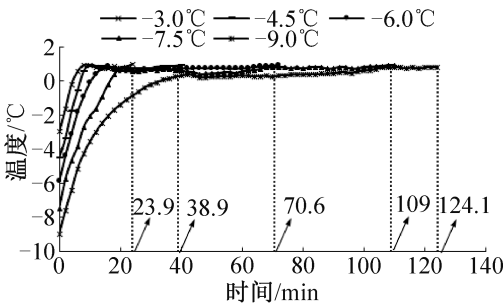


图 4 不同环境温度下的积雪光伏板正面温度曲线
Fig.4 Front surface temperature variations under different ambient air temperatures

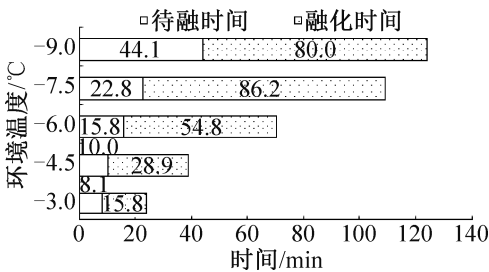


图 5 不同环境温度下的“待融时间”和“融化时间”
Fig.5 Pre-melting & melting durations under different ambient air temperatures

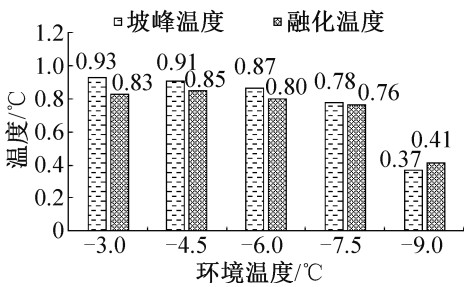


图 6 不同环境温度下的“坡峰温度”和“融化温度”
Fig.6 Peak & melting temperature under different ambient air temperatures

融化时间越短。在这五种不同环境温度下的融化温度整体上随着环境温度的升高而升高,融化时间随着环境温度的升高而缩短。

环境温度越高,“坡峰温度”越高。如图 6 所示:在-3.0℃~-9.0℃这五种不同环境温度下的坡峰温度分别为 0.926℃、0.911℃、0.866℃、0.778℃和 0.369℃,即“坡峰温度”随着环境温度的升高而升高。

环境温度越高,除雪总时间越短。如表 1 所示:五种不同环境温度下的除雪总时间分别为 23.9 min、38.9 min、70.6 min、109.0 min 和 124.1 min,环境温度每提高 1℃,待融阶段中光伏板正面温升速率提高约 39.2%,待融时间缩短约 6 min,光伏板正面温度曲

线上“坡峰温度”升高约 21.5%,融化阶段中的融化温度升高约 15.5%,融化时间缩短约 11 min,除雪总时间缩短约 17 min,因此,除雪总时间受环境温度影响很大,随着环境温度温度的升高而大幅度缩短。

此外,环境温度越高,除雪耗电量越少。由光伏板性能参数和公式 1 得出光伏板的发电量为 2871.8 kJ。由表 1 和公式 2 得出:在 $-3.0\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-9.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 这五种不同环境温度下光伏板自加热除雪耗电量分别为 535.5 kJ、871.6 kJ、1581.8 kJ、2442.2 kJ、2780.5 kJ,光伏板自身的发电量远大于其除雪所需耗电量,环境温度每提高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$,耗电量可减少约 380.9 kJ。因此,光伏板自加热除雪所需耗电量由其本身储存电量供给,不会造成额外的消耗。

4 结论

本文通过实验详细分析了当积雪厚度为 6 cm、积雪密度为 420 kg/m^3 、加热功率为 230 W/m^2 、光伏板倾角为 18° 时,环境温度的变化对光伏板自加热除雪性能的影响,得出以下结论:

1)环境温度越低,积雪初始温度就越低,积雪被加热升温过程中与周围环境的温差就越大,从而对流传热损失和辐射换热损失越大,因此加热到“坡峰温度”所需的时间越长,即待融时间越长,待融阶段温度提升速率越小。

2)环境温度越低,用于提高融雪温度的显热量越小,则“坡峰温度”和“融化温度”就越低。

3)环境温度越低,在光伏板自加热除雪过程中,光伏板从通电加热到“坡峰温度”所需要的时间就越长,除雪的总时间就越长,除雪耗电量就越多;每提高 $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境温度,除雪总时间缩短约 17 min,除雪耗电量减少约 380.9 kJ。

参考文献

- [1] 谢光亚,李晓光. 中国太阳能光伏产业的国际竞争力研究[J]. 对外经贸实务,2012(02):21-24. (XIE Guangya, LI Xiaoguang. The research on the international competitiveness of solar energy photovoltaic industry in china [J]. Practice in Foreign Economic Relations and Trade, 2012(02):21-24.)
- [2] 陈雪梅,王如竹,李勇. 太阳能光伏空调研究及进展[J]. 制冷学报,2016,37(05):1-9. (CHEN Xuemei, WANG Ruzhu, LI Yong. Study and development of photovoltaic air conditioning system [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(5):1-9.)
- [3] 黄冰. 太阳能光伏发电应用的现状及发展[J]. 低碳世界,2017(32):77-78. (HUANG Bing. State & development of photovoltaic application [J]. Low Carbon World, 2017(32):77-78.)
- [4] 雷振宇. 以 sol-gel 技术制备太阳能减反射涂层[J]. 太阳能,2009(05):22-24. (LEI Zhenyu. Preparation of solar anti-reflection coating by sol-gel technology [J]. Solar Energy, 2009(05):22-24.)
- [5] 杨浩雷. 清洁度对光伏组件发电量的影响及脏污的危害[J]. 产业与科技论坛,2017,16(03):74-75. (YANG Haolei. The influence of cleanliness on the Power Generation of Photovoltaic Module and the harm of fouling [J]. Industrial & Science Tribune, 2017, 16(03):74-75.)
- [6] 樊志勇,牛海霞,董正茂,等. 光伏组件表面积雪对其发电量影响的实验研究[J]. 内蒙古科技与经济,2016(11):100-101. (FAN Zhiyong, NIU Haixia, DONG Zhengmao, et al. Experimental study on the influence of snow cover on the electricity generation of photovoltaic modules [J]. Inner Mongolia Science Technology & Economy, 2016(11):100-101.)
- [7] 高扬. 光伏组件清洁方法浅谈[J]. 太阳能,2013(09):63-64. (GAO Yang. Discussion on cleaning method of Photovoltaic Module [J]. Solar Energy, 2013(09):63-64.)
- [8] K A Moharram, M S Abd-Elhady, H A Kandil, et al. Influence of cleaning using water and surfactants on the performance of photovoltaic panels [J]. Energy Conversion and Management, 2013, 68(4):266-272.
- [9] 龚芳馨,刘晓伟,王靓. 光伏电站太阳能板的清洁技术综述[J]. 水电与新能源,2015(5):71-73. (GONG Fangxin, LIU Xiaowei, WANG Liang. Discussion on cleaning technology of the PV module in photovoltaic power stations [J]. Hydropower and New Energy, 2015(5):71-73.)
- [10] 刘锋,孙震,姚春利,等. 光伏电池板清洁技术研究综述[J]. 清洗世界,2016,32(5):26-29. (LIU Feng, SUN Zhen, YAO Chunli, et al. Review on clean technology research of photovoltaic panels [J]. Cleaning World, 2016, 32(5):26-29.)
- [11] 王辉,牛帅,于立君,等. 太阳能光伏板角度控制实验教学系统设计[J]. 实验室科学,2017,20(2):74-77. (WANG Hui, NIU Shuai, YU Lijun, et al. Design of solar photovoltaic panels angle control experimental teaching system [J]. Laboratory Science, 2017, 20(2):74-77.)
- [12] 王东,杨冠东,刘富德. 光伏电池原理及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2014:43-45. (WANG Dong, YANG Guandong, LIU Fude. Principle and application of photovoltaic cells [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014:43-45.)
- [13] 郑璐,何凤琴,卢刚,等. 离子注入技术在 n 型电池 p-n 结制备中的应用[J]. 太阳能,2016(7):35-39. (ZHENG Lu, HE Fengqin, LU Gang, et al. Application of ion implantation technique in p-n junction preparation of n-

- type battery [J]. Solar Energy, 2016(7):35–39.)
- [14] Adlam, TN. Snow melting[M]. New York: The Industrial Press, 1950.
- [15] J A Curry, J L Schramm, D K Perovich, et al. Applications of SHEBA/FIRE data to evaluation of snow/ice albedo parameterizations [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D14): 15345–15355.
- [16] 王华军. 流体加热道路融雪传热传质特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2007. (WANG Huajun, Study on heat and mass transfer characteristics of fluid-heated snow melting on the road[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.)
- [17] Rachel E Jordan, Janet P Hardy, Frank E Perron Jr, et al. Air permeability and capillary rise as measures of the pore structure in snow: an experimental and theoretical study [J]. Hydrological Processes, 1999, 13: 1733–1753.
- [18] 崔凌阔, 李钊, 陈剑波, 等. 积雪厚度对光伏板自加热除雪性能影响的研究[J]. 节能技术, 2018, 36(5): 402–

405, 410. (CUI Lingchuang, LI Zhao, CHEN Jianbo, et al. Study on the effect of snow thickness on self-heating snow removal performance of photovoltaic panels [J]. Energy Conservation Technology, 2018, 36(5): 402–405, 410.)

通信作者简介

刘晓宇, 女, 硕士, 上海理工大学, 环境与建筑学院, 15316059216, E-mail: 1808170144@qq.com. 研究方向: 暖通空调系统; 空气洁净技术。

About the corresponding author

Liu Xiaoyu, female, master, School of Environment & Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, +8615316059216, E-mail: 1808170144@qq.com. Research fields: Heating, Ventilating and Air Conditioning system, air cleaning technology.

(上接第 121 页)

- [9] 谢金法, 段冉. 基于 Isight 和 Fluent 软件的轿车空调风向优化研究[J]. 郑州大学学报(工学版), 2014, 35(3): 124–128. (XIE Jinfa, DUAN Ran. Air conditioning optimization of car air conditioning based on Isight and Fluent [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Edition), 2014, 35(3): 124–128)
- [10] 王丹东, 张科, 俞彬彬. 适用于 -20 °C 环境的 CO₂ 汽车热泵系统的开发及性能测试[J]. 制冷学报, 2018, 39(2): 14–21. (WANG Dandong, ZHANG Ke, YU Bingbing. Development and performance evaluation of CO₂ automotive heat pump system applied to -20 °C environment [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(2): 14–21.)
- [11] 唐景春, 李晨凯, 叶斌. 采用涡旋压缩机的电动汽车空调准双级压缩热泵性能实验研究[J]. 制冷学报, 2018, 39(1): 34–39. (TANG Jing, LI Chenkai, YE Bing. Experimental study on performance of heat pump cycle of quasi two-stage compression for electric vehicle air-conditioning with scroll compressor [J]. Journal of Refrigeration, 2018, 39(1): 34–39.)
- [12] 张子琦, 李万勇, 张成全. 电动汽车冬季负荷特性研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(5): 39–44. (ZHANG Ziqi, LI Wanyong, ZHANG Chengquan. A study on heat load character of EV in cold climate [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(5): 39–44.)
- [13] 王靖宇, 薛超坦, 胡兴军, 等. 基于空调送风参数的车室内流模拟[J]. 吉林大学学报(工学版), 2016. (WANG

Jingyu, XUE Chaotan, HU Xingjun, et al. Vehicle interior flow simulation based on air conditioning air supply parameters [J]. Journal of Jilin University (Engineering Edition), 2016.)

- [14] 孟庆超. 汽车车室内流场与汽车空调品质研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2007. (MENG Qingchao, Research on air-flow field in car cabin and indoor air quality of automobile [D]. Changsha: Hunan University, 2007.)
- [15] 李珊珊, 李明, 杨帆, 等. 某机车驾驶室舒适性研究[C]//高等学校工程热物理第二十一届全国学术会议, 2015. (LI Sanshan, LI Ming, YANG Fan, et al. Analysis on a locomotive cab comfort [C]//The 21st National Academic Conference on Engineering Thermophysics in Higher Education, 2015.)
- [16] 周一鸣, 毛思荣. 车辆人机工程学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1999, 410–417. (ZHOU Yiming, MAO Sirong, Vehicle ergonomics [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1999, 410–417).

通信作者简介

李四旺, 男, E-mail: lisiwang@gacrnd.com, 18922217865. 研究方向为整车热管理, 广汽研究院热管理工程师。

About the corresponding author

Li Siwang, male, E-mail: lisiwang@gacrnd.com, tel: 18922217865. Research fields: vehicle thermal management, GAC R&D CENTER thermal management engineer.