

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.11.010

## 光伏玻璃压延成型过程中温度场的影响规律研究

耿铁<sup>1</sup>, 刘玉豪<sup>1</sup>, 胡金中<sup>1</sup>, 盛洁<sup>1</sup>, 闫丽群<sup>1</sup>, 任清海<sup>1,2\*</sup>

(1. 河南工业大学机电工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 安阳职业技术学院机电工程系, 河南 安阳 455000)

**摘要:** 光伏玻璃作为太阳能电池的重要组件, 其品质对太阳能电池组件的性能有重要影响。研究光伏玻璃压延成型过程中温度场的影响规律对于获得优质的光伏玻璃制品具有十分重要的意义。本文采用数值模拟的方法研究了压延辊速度、压下率、压延辊直径和压延辊表面温度等参数对光伏玻璃压延成型过程中温度场的影响规律。结果表明, 在其他条件相同的情况下, 压延辊转速越高, 压延辊直径越大, 压延辊表面温度越高时, 玻璃在压延结束离开压延辊后的温度越高; 而压下率越大, 玻璃在压延结束离开压延辊后的温度越低。模拟结果表明与传统理论基本一致, 表明所建模型具有较高的可信度, 为玻璃压延时温度场的设定提供了一定的依据。

**关键词:** 光伏玻璃; 压延成型; 温度场; 数值模拟

**中图分类号:** TP391.9      **文献标识码:** A

## Research on the Influence of Forming Parameters on the Temperature Field During the Calendering Process of Photovoltaic Glass

GENG Tie<sup>1\*</sup>, LIU Yuhao<sup>1</sup>, HU Jinzhong<sup>1</sup>, SHENG Jie<sup>1</sup>, YAN Liqun<sup>1</sup>, REN Qinghai<sup>1,2\*</sup>

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China; 2. Anyang Vocational and Technical College, Anyang 455000, China)

**Abstract:** Photovoltaic glass is an important component of solar cells, and its quality has an important impact on the performance of solar cell modules. Studying the influence law of the temperature field in the rolling process of photovoltaic glass is of great significance for obtaining high-quality photovoltaic glass products. In this paper, numerical simulation method is used to study the influence law of the speed, reduction ratio, diameter and surface temperature of calender roll on the temperature field during the calendaring of photovoltaic glass. The results show that, under the same conditions, the higher the rotation speed of the calender roll, the larger the diameter of the calender roll, and the higher the surface temperature of the calender roll, the higher the temperature of the glass after it leaves the calender roll at the end of calendaring and the greater the reduction rate, the lower the temperature of the glass after it leaves the calender roll at the end of calendaring. The simulation results show that it is basically consistent with the traditional theory, indicating that the built model has a high degree of credibility, and provides a certain basis for the setting of the temperature field of the glass calendaring.

收稿日期: 2022-02-17

修回日期: 2022-03-07

作者简介: 耿铁(1968—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事材料成型过程的数值模拟和工艺优化研究, email: tiegeng2000@163.com

通讯作者: 任清海, email: renqinghai2010@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51375143); 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(212102210345); 河南省自然科学基金(222300420428); 河南省高等学校重点科研项目(23B460021)

**Keywords:** photovoltaic glass; calendering; temperature field; numerical simulation

随着天然气、煤炭、石油等不可再生能源频频告急,能源问题日益成为制约国际社会经济增长发展的瓶颈<sup>[1-3]</sup>。各国家争相涌入太阳能电池制造业,根据国际能源署预测,2050年太阳能光伏在全球能源的比重将达到25%,在能源结构中起主导作用<sup>[4-7]</sup>。

光伏玻璃是太阳能电池的重要组件,压延成型时,光伏玻璃的温度分析和控制对成型有重要作用<sup>[8]</sup>。光伏玻璃温度过低,不能使玻璃表面的压花图案清晰地成型,而且易造成玻璃表面微裂纹及裂纹的出现;光伏玻璃温度过高,会使玻璃面板表面粗糙产生疵点,甚至使玻璃粘附压延辊面造成停机<sup>[9]</sup>。温度控制不合理,还会造成析晶和分相,对玻璃的透过率产生影响<sup>[10-13]</sup>。

压延辊速度、直径、压下率、压延辊表面温度都会对玻璃温度产生影响,在实际生产中,许多企业靠技术人员的直觉、经验和操作工的技术水平来判断调整相关设计和工艺参数,导致产品开发周期长、成本高、产品质量难以保证<sup>[14]</sup>。随着计算机的发展,光伏玻璃压延成型过程的理论建模和数值模拟技术已经成为研究和解决其质量的有效途径。目前,对光伏玻璃压延成型过程中温度场的研究有一些成果,一些学者利用ANSYS/LS-DYNA和MSCMarc模拟了玻璃压延成型过程<sup>[15-16]</sup>,但是利用DEFORM-3D系统地研究各种因素对光伏玻璃压延成型过程中温度场的影响规律的研究还较少。本文利用DEFORM-3D有限元软件系统研究了压延成型过程光伏玻璃的温度变化以及辊速、辊直径、辊表面温度和辊子压下率等因素的影响规律,为评价、优化玻璃压延成型模具结构和工艺条件提供了科学方法和依据。

## 1 数学模型

光伏玻璃成型冷却过程中的传热现象比较复杂<sup>[17]</sup>,主要包括四个方面的热交换:光伏玻璃内部的热交换;光伏玻璃与压延辊之间的热交换;压延辊与冷却水的热交换;光伏玻璃外表面与外界环境的热交换,这是一个具有周期性的瞬态传热过程<sup>[18-19]</sup>。在建立数学模型时,需要做如下的简化:

考虑到玻璃的热传导系数远远低于金属压延辊

的热传导系数,假设光伏玻璃只沿法线(即厚度)方向传热,将光伏玻璃的传热过程看作一维瞬态传热过程;

只考虑光伏玻璃与压延辊之间的热传导,不考虑光伏玻璃和空气之间的热传导和热对流,以及光伏玻璃外表面的辐射散热;

光伏玻璃与压延辊表面完全接触,忽略模腔与玻璃熔体之间的接触热阻;

光伏玻璃和压延辊材料的热物性参数(包括比热容、导热系数、密度等)不随温度发生变化。

基于上述基本假设,光伏玻璃成型冷却问题可简化为一无内热源的定常热传导问题,其温度场控制方程为

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (x, y, z) \in \Omega \quad (1)$$

式中 $x, y, z$ 为三维坐标, $T$ 为温度, $\Omega$ 表示光伏玻璃区域。

## 2 光伏玻璃压延成型温度场及其影响因素的模拟

### 2.1 模型的建立

使用DEFORM-3D软件对玻璃压延成型过程进行模拟,本文通过UG软件建立了光伏玻璃压延成型的三维模型,其中,压延辊直径为300 mm,玻璃带尺寸为240 mm×120 mm×20 mm。模型初始划分网格数量为80000个,如图1。因模型较简单,划分网格时采用自动划分功能,重点区域再进行手动调整,这样做的目的是为了保证模拟结果可靠的前提下尽量减少计算资源浪费。在模拟分析过程中辊子材质选AISI-H-13,玻璃带材质选GLASS材料。

### 2.2 模拟边界条件的界定

玻璃在压延过程中,从熔融态转变成固态,这其中玻璃的弹性变形远远小于塑性变形,因此其忽略弹性变形,将材料模型设定为刚粘塑性模型。玻璃溶液进入压延辊前温度设定为1050℃,上、下压延辊温度均设定为400℃。一般来说,玻璃溶液与压延辊之间所产生的摩擦有两种形式,分别是库仑摩擦和剪切摩擦选不同的摩擦类型,得到的结果也不同<sup>[20-21]</sup>。适合本文模型的是剪切摩擦,其大小用公式表示为:

$$f_s = m \cdot k \quad (2)$$

式中:  $f_s$ —摩擦力;  $m$ —摩擦因子, 取值范围在 0~1;  $k$ —材料的剪切屈服应力。

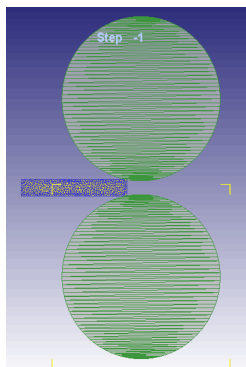


图 1 模拟网格三维结构

Fig.1 Simulated three-dimensional structure of the grid

光伏玻璃的热物理参数和机械参数如表 1 所示。

表 1 光伏玻璃参数数值

Tab. 1 Parameter values of PV glass

| 参数   | 数值                   |
|--|----------------------|
| 热膨胀系数/( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )                        | $9.0 \times 10^{-6}$ |
| 比热/[ $\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$ ]  | $1.9 \times 10^9$    |
| 导热系数/[ $\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ ] | 1.028                |
| 弹性模量/GPa   | 15.8                 |
| 密度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )                   | 3.05                 |
| 泊松比  | 0.247                |

### 2.3 模拟结果及分析

图 2 所示分别为压延过程中不同时间步时(10 步、50 步、100 步和 200 步)光伏玻璃温度的分布情况。可以看到光伏玻璃压延过程中, 玻璃的温度时刻发生变化, 当玻璃溶液上下表面接触到水冷压延辊时, 压延辊从玻璃溶液带走大量热量, 玻璃的状态迅速由熔融态转变为具有一定机械强度的高黏度软化态, 此时玻璃表面温度较低, 而内部还保持着较高温度; 当玻璃上下表面与压延辊脱离后, 由于玻璃板带内部温度的影响, 玻璃表面温度逐渐升高, 内部温度逐渐降低, 最后二者趋于一致。

为进一步探索玻璃压延成型过程中, 玻璃板带不同部位温度的变化规律, 分别取玻璃板带上三个点进行分析, 其中点 1 位于上表面、点 2 位于板厚中间, 点 3 位于下表面, 如图 3 所示。

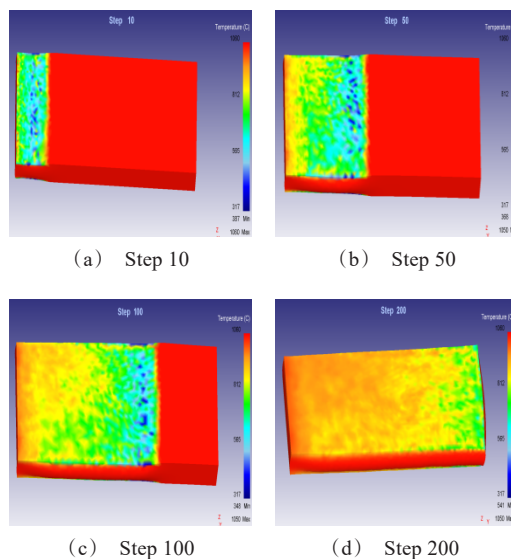


图 2 不同时间步时玻璃温度场变化

Fig.2 Change of glass temperature field at different time steps

经分析计算, 压延成型过程中光伏玻璃上下表面和内部点温度的变化情况如图 4 所示。从图中能够看出, 在成型开始前( $t=0$ 时), 三个点温度相同, 当压延开始, 压延辊接触玻璃表面时, 上下表面温度迅速降低, 这是由于高温玻璃接触到水冷压延辊后, 玻璃上下表面的热量被迅速带走; 随着压延进行, 当两表面脱离压延辊后, 玻璃上下表面温度逐渐升高, 而内部温度逐渐降低, 这是因为在热传导作用下, 内部热量逐渐向表面扩散所致, 最终玻璃板带里温度趋于一致。下面将针对图 3 中点 2 位置的温度场影响因素进行进一步研究。

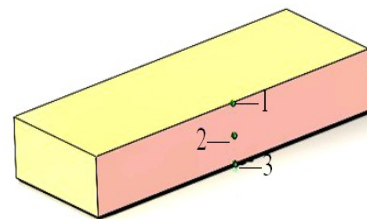


图 3 玻璃带上不同位置的三点

Fig.3 Three points at different positions on the glass ribbon

#### 2.3.1 压延辊转速对光伏玻璃温度场的作用

图 5 是不同辊速下玻璃温度场的变化曲线。曲线 1、曲线 2 和曲线 3 分别是压延辊转速为 0.75 rad/s、0.50 rad/s 和 0.25 rad/s 时的温度变化曲线。从图

中可以看出,在其他因素完全相同的情况下,压延辊的转速对玻璃温度场的影响十分明显。当玻璃脱离压延辊后,曲线1的温度最高,曲线3的温度最低,这是由于压延辊的转速越高,相对应压延时间就会缩短,玻璃与压延辊之间的热传递作用就越短,压延辊从玻璃上带走的总热量就越少,留在玻璃带上的热量也就越多,温度自然也就越高。

进而,压延辊转速也会影响到玻璃成型后的薄厚程度。当辊速过快时,玻璃板带脱离压延辊后的温度过高,在引导辊牵引力的作用下导致其更易变薄;当辊速过慢时,玻璃板带脱离压延辊后的温度过低,此时玻璃板带偏向固化且不易拉伸。

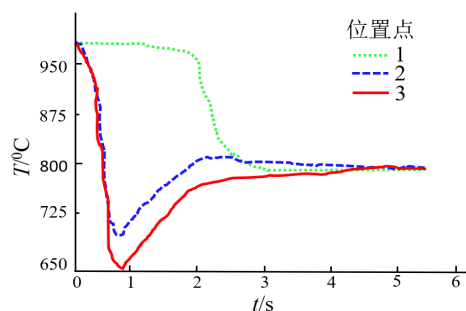


图4 玻璃板带不同位置温度变化曲线

Fig. 4 Variation of temperature at different positions of the glass ribbon

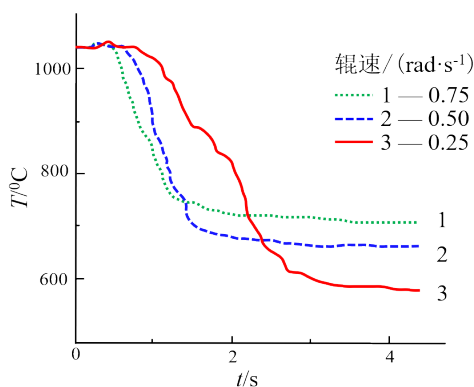


图5 不同辊速下玻璃温度场变化曲线

Fig. 5 Variation curves of glass temperature field under different rolling speeds

### 2.3.2 压下率对光伏玻璃温度场的作用

图6是不同压下率条件下玻璃温度场的变化曲线。曲线1、曲线2和曲线3分别是压下率为20%、40%和60%时玻璃的温度变化曲线。从图中能够

看出,在其他因素完全相同的情况下,压下率也会影响光伏玻璃的温度场,从而影响玻璃的成型质量。压下率越大,玻璃与压延辊的接触面积越大,压延辊带走的热量越多,致使玻璃最终温度也越低。

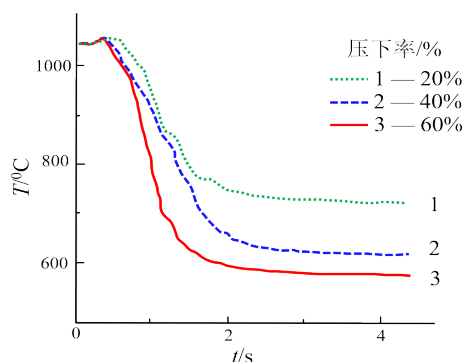


图6 不同压下率条件下玻璃温度场的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of glass temperature field under different reduction ratios

### 2.3.3 压延辊直径对玻璃温度场的作用

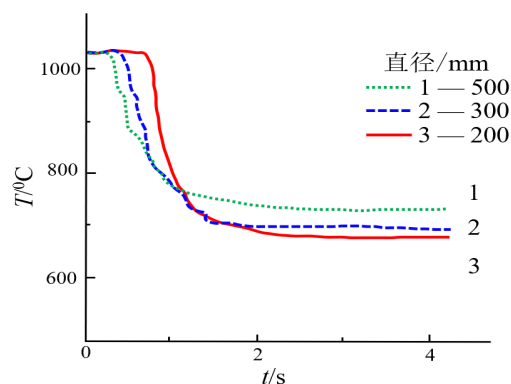


图7 不同压延辊直径下玻璃温度场的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of glass temperature field under different calender roll diameters

图7是不同压延辊直径下玻璃温度场的变化曲线。曲线1、曲线2和曲线3分别是压延辊直径为500 mm、300 mm和200 mm时玻璃的温度变化曲线。从图中我们可以看出,在其他因素相同的情况下,辊径越大,玻璃脱离压延辊后的温度越高。这是因为在压延辊转速一定的情况下,压延辊直径越大,玻璃液从入辊到出辊所需时间就越短,玻璃与压延辊进行热交换的时间也就越短,玻璃带的最终温度就越高。

### 2.3.4 压延辊表面温度对光伏玻璃温度场的作用

光伏玻璃压延成型过程中,压延辊表面温度是



决定玻璃板带质量好坏的关键因素。压延辊是由水芯、内辊、外辊、隔板组成,压延辊工作时冷却水从辊子腔体的一端流到另一端,本文默认压延辊表面各部分温度相同,旨在分析不同压延辊表面温度对玻璃温度场的影响。

图 8 是不同压延辊表面温度下玻璃温度场的变化曲线。曲线 1、曲线 2 和曲线 3 分别是压延辊表面温度为 600 °C、400 °C 和 200 °C 时玻璃的温度变化曲线。从图中可以看出,在其他因素完全相同的情况下,压延辊表面温度对玻璃温度场的影响十分明显。辊温越低,辊子从玻璃液上带走的热量就越多,玻璃脱离压延辊后的温度就越低。当辊温过低时,玻璃液冷却过度会导致玻璃表面出现裂纹等残缺,如图 9 所示;辊温过高时,玻璃液冷却不足,易使玻璃粘附在压延辊上,如图 10 所示。因此,在压延辊子腔体形状、辊子材质、冷却水温度以及流速控制调节时要慎重选择,以保持适当的压延辊表面温度。

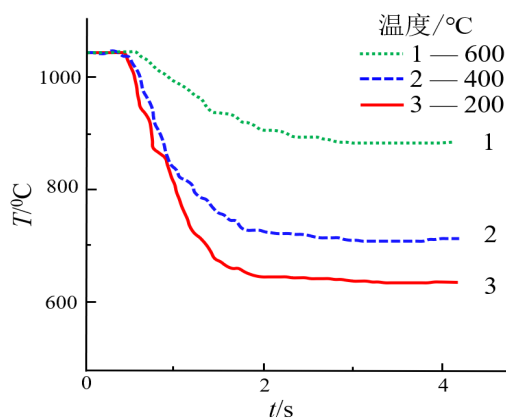


图 8 不同辊温下温度场的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of temperature field under different roll temperatures

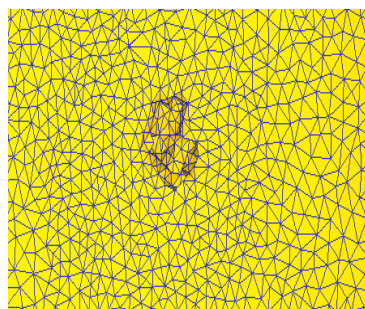


图 9 玻璃表面出现的裂纹

Fig.9 Cracks on the glass surface

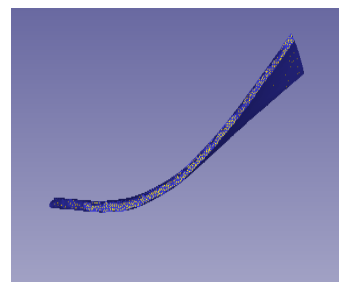


图 10 玻璃粘附在压延辊上

Fig.10 Adherence of glass to the roll

### 3 实验验证

光伏玻璃压延成型时温度很高,试验条件很受限,本文以某企业生产线上红外测温装置采集的温度数据为基础,与模拟计算结果进行比对,以验证模拟结果的有效性。从玻璃液与压延辊开始接触到玻璃熔融体出压延辊结束,对玻璃表面不同位置的两个点的温度每隔一段时间记录一次,与模拟计算结果进行对比。图 11 是不同压延时间测试温度和模拟温度的比较。其中,  $a_1$ 、 $a_2$  分别表示玻璃上表面两个点不同时刻的温度模拟曲线,  $b_1$ 、 $b_2$  分别表示玻璃带离开辊子后玻璃上表面对应的两个点不同时刻的温度测试曲线。由实验验证可知,测试温度和模拟计算温度随时间的变化趋势是一致的,二者的最大误差在 15% 以内。

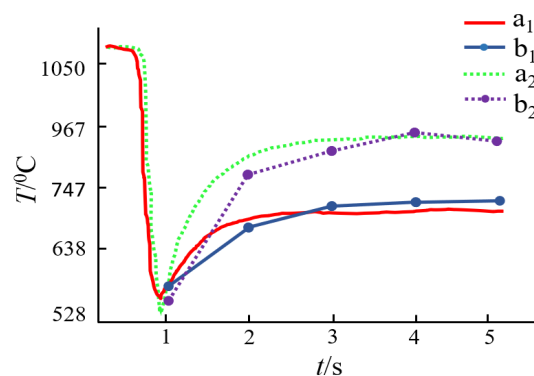


图 11 不同压延时间测试温度和模拟温度的比较

Fig.11 Comparison of test temperature and simulated temperature at different calendaring time

### 4 结论

(1) 根据光伏玻璃成型的特点,从传热学基本

方程出发,通过合理简化,建立了光伏玻璃成型冷却问题的温度场控制方程,基于DEFORM-3D软件建立模型,对不同时间步时玻璃带温度分布情况进行分析。

(2) 通过辊速、压下率、辊径和辊子表面温度对玻璃带温度场的影响进行分析,在其它条件相同的情况下,压延辊转速越高,玻璃压延结束离开压延辊后的温度越高;压下率越大,玻璃离开压延辊后的温度越低;而压延辊直径越大,玻璃离开压延辊后的温度越高;压延辊表面温度越高,玻璃离开压延辊后的温度越高。通过实验验证发现,模拟计算温度与实际测试温度的变化趋势一致,且二者误差在15%以内,表明模拟结果的准确性与可行性。

(3) 温度场对玻璃压延成型有很大影响,当压延辊表面温度过高时,易使玻璃黏附在压延辊上;辊子表面温度过低时,导致玻璃带表面出现裂纹等残缺,因此在选择压延辊时,要慎重选择冷却水温度、流速大小、辊子材质和压延辊腔体形状。

## 参考文献

- [1] Xu Q T. Sharing economy: a new economic revolution to step into an era of ecological civilization[J]. *Contemporary Social Sciences*, 2018, (2): 11-46.
- [2] Azeem M, Bachirou G L, Yong S, et al. Current technology development for CO<sub>2</sub> utilization into solar fuels and chemicals: a review[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2020, 49(10): 96-123.
- [3] Lu H F, Ma X, Ma M D. The impact of the novel coronavirus pandemic on the energy sector[J]. *Journal of Zhejiang University-Science*, 2021, 22 (12): 941-957.
- [4] 王灿, 孙若水, 张九天. 中国实现碳中和的支撑技术与路径[J]. *中国经济学家*, 2021, 16(5): 32-70.
- [5] 贺灿飞, 朱晟君. 中国产业发展与布局的关联法则[J]. *地理学报*, 2020, 75(12): 2684-2698.
- [6] 邹才能, 赵群, 张国生, 等. 能源革命:从化石能源到新能源[J]. *天然气工业*, 2016, 36(1): 1-10.
- [7] 邹才能, 熊波, 薛华庆, 等. 新能源在碳中和中的地位与作用[J]. *石油勘探与开发*, 2021, 48(2): 411-420.
- [8] 彭寿, 杨京安. 太阳能压延玻璃工艺学[M]. 北京:化学工业出版社, 2019: 462-467.
- [9] 吴珍珍, 乔书杰. 光伏玻璃压延成型仿真分析[J]. *河南科技*, 2018, 14: 63-65.
- [10] 王琦, 万法琦, 赵会峰, 等. 玻璃表面处理综述[J]. *材料科学与工程学报*, 2021, 39(6): 1047-1060.
- [11] 郝霞, 李军葛, 潘国治, 等. 碱性盐溶液蚀刻法制备新型多孔纳米减反增透玻璃[J]. *硅酸盐通报*, 2020, 39(4): 1296-1301.
- [12] 蒲华俊. 高炉渣微晶玻璃的制备与性能研究[D]. 海口:海南大学, 2019.
- [13] 李秀英, 肖卓豪, 陶歆月, 等. 高水平放射性废物固化用磷酸盐玻璃的研究进展[J]. *材料导报*, 2021, 35(5): 5032-5039.
- [14] 耿亚新, 周新生. 太阳能光伏产业的理论及发展路径[J]. *中国软科学*, 2010, 4: 19-29.
- [15] 盛洁. 光伏玻璃压延成型关键技术问题的研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2019.
- [16] 蔚川乐. 基于MSC. Marc的光伏玻璃压延成型数值模拟及实验研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2017.
- [17] 刘正权. 光伏玻璃结构安全及热性能评价与表征[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究总院, 2016.
- [18] 庞继伟, 王超, 蔡玉奎. 玻璃材料激光加工技术的研究进展[J]. *激光技术*, 2021, 45(4): 417-428.
- [19] 刘昌宇, 吴洋洋, 李栋, 等. 含相变材料层玻璃屋顶光热传输特性分析[J]. *太阳能学报*, 2018, 39(12): 3451-3457.
- [20] 唐荣江, 朱守彪. 不同摩擦本构关系对断层自发破裂动力学过程的影响[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(10): 3712-3726.
- [21] 曾文浩, 魏刚, 邓小亮, 等. CAE软件在铝型材挤压模拟分析中的应用比较[J]. *模具工业*, 2017, 43(4): 13-18.