

# 太阳能玻璃压花结构设计

吕 勇, 窦如凤

(泰州供电公司, 江苏 泰州 225300)

**摘 要:** 本文在对太阳能玻璃压花结构的光路分析的基础上, 设计出一种具有特殊的花型角度以及花型尺寸的玻璃压花结构。当光线入射到压花界面时, 此压花结构可以修正反射光线的传播方向。修正后的反射光线能够穿透玻璃到达电池片的表面, 显著增加了玻璃的透光率, 从而提升了光伏组件的光电转化效率。

**关键词:** 太阳能玻璃; 压花结构; 透光率

## 0 引言

太阳能技术近几年来得到了迅速发展。许多机构投入了大量的人力和物力来提升光伏组件的光电转化效率。主要是从提升硅电池的光电转化效率以及各种封装材料的透光率两个方面着手。由于提升硅电池光电转换效率的技术瓶颈, 导致硅光电转化率的提升越来越难。且用于电池片光电转换效率提升的成本也越来越大, 即使有提升的空间, 经济效益也不大<sup>[1]</sup>; 封装材料如太阳能玻璃对透光率的限制, 浪费了一部分功率输出, 但是我们很容易通过对太阳能玻璃的开发来达到提高透光率的目的。所以, 提高太阳能玻璃的透光率成了太阳能玻璃行业的热点, 玻璃透光率的开发已经成为了太阳能开发的重点。

现在提高太阳能玻璃透光率都是通过在玻璃上镀上减反射膜层的方法来实现的<sup>[2]</sup>, 由于太阳能玻璃的面积很大, 传统的镀膜方法如蒸镀等不容易制得大面积的膜层, 且镀膜成本很高。现今用于太阳能玻璃的大面积的镀膜技术不成熟, 镀膜液、镀膜设备以及镀膜工艺等尚处于研究阶段, 且镀膜液的成本很高。另外由于自然环境的作用, 膜层的透光率会受到影响, 膜层的耐老化性能得不到保证。

本文通过设计特殊的太阳能玻璃压花结构来提高玻璃的透光率, 且此压花结构的太阳能玻璃的透光率与镀膜后的常规太阳能玻璃的透光率相当。此种结构设计不需要增加太阳能玻璃的额外的成本, 也不必担心镀膜层的老化对透光率的影响。

## 1 压花结构设计原理及模型

玻璃的反射率是由折射率决定的, 且反射率是无法降低的。本文在玻璃的压花面做了一些结构设计来减少玻璃的反射损耗, 将本该反射掉的光线在通过该玻璃结构时发生全反射、反射和折射等光学现象, 改变反射光线的传播方向, 使其最终能够全部或者部分透过玻璃, 减小反射损耗, 从而达到提高太阳能玻璃透光率的目的。

太阳能玻璃有两个表面, 一面是光滑面, 一面是压花面。压花面朝向电池片的方向放置。影响太阳能玻璃透光率的主要因素有吸收损耗和反射损耗。吸收损耗与玻璃的透明系数有关。由于太阳能玻璃采用的是超白玻璃, 超白玻璃的透明系数比较高, 几乎可以不考虑玻璃本身的吸收损耗; 反射损耗与玻璃的折射率有关。当光线垂直入射于玻璃表面时, 反射率与玻璃的折射率存在着一定的关系<sup>[3]</sup>:

$$R = \frac{(n_2 - n_1)^2}{(n_2 + n_1)^2} \times 100\% \quad (1)$$

$n_1$  为入射光线所在介质的折射率,  $n_2$  为折射光线所在介质的折射率。所以, 对于超白太阳能玻璃, 提高透光率的途径是降低玻璃的反射损耗。

玻璃的折射率为 1.5, 由式 (1) 可以得到, 玻璃的反射率为 4%。对于单层玻璃有两个表面, 光线射向玻璃的过程, 首先是由空气以一定的入射角度射向玻璃 (发生在玻璃的第一个表面即太阳能玻璃的光滑面), 接着光线由玻璃射向空气 (发生在玻璃的第二个表面即太阳能玻璃的压花面)。透过第一个表面的光线由于玻璃的反射作用, 反射损失掉 4% 的光线, 仅有 96% 的光线到达第二个表面。在玻璃的第二个表面同样也存在反射损耗, 玻璃的总的反

射率为 7.84%，所以玻璃的透光率不会超过 92.16%。如何降低玻璃的反射损耗成为我们迫切需要解决的问题。

本设计压花结构的花型为倒金字塔四角型，压花为凹形结构，呈正方形排列，花纹与花纹之间的间隔为花纹的边长，花纹结构示意图如图 1 所示。

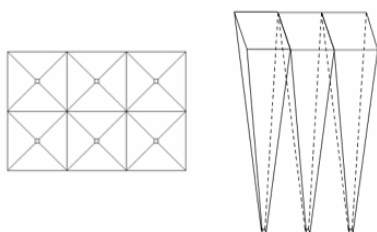


图 1 压花结构示意图

## 2 压花结构模型光学分析

光线由玻璃的光滑面入射，根据光线的折射定理，光线在光滑面的折射光线分布在 $\pm 41.8^\circ$ 的角度范围之内。所以对于玻璃压花面的光路分析，我们只需要分析  $0^\circ \sim 41.8^\circ$  的范围内的光线即可。

光线从光密介质射向光疏介质时，当光线入射角大于一定的角度，就不再有折射光线产生，光线全部被反射回去。这种现象叫全反射，此入射角为临界角  $i_c$ ，其值取决于相邻介质折射率的比值<sup>[4]</sup>：

$$i_c = \arcsin \frac{n_1}{n_2} \quad (2)$$

在太阳能玻璃的压花面，光线是由玻璃射向空气的，即由光密介质射向光疏介质。所以  $i_c$  为  $41.8^\circ$ ，当入射角大于临界入射角  $41.8^\circ$  时，会发生全反射现象。

### 2.1 压花结构对垂直入射光线的影响

当太阳光线垂直入射于玻璃表面时，一般处于辐照度最强的时候。所以研究太阳能玻璃对于垂直入射的光线的光学性能尤为重要。下面分析的是本设计的压花结构对垂直入射的光线的光学作用。

如图 2 所示是光线垂直入射于玻璃的光路图。光线垂直入射时，在玻璃的第一个表面（光滑面），由于入射角为  $0^\circ$ ，由于折射作用，折射角也为  $0^\circ$ 。所以此时光线的传播方向没有改变，仍然垂直入射于压花面，但是在光滑面有 4% 的光线反射损失掉了，仅有 96% 的光线到达压花面。

由于特殊的花型角度，使得光线会在压花结构

的花型内壁以全反射的形式传播。但是由于压花结构会对光线的入射角度进行修正，使得光线的入射角度会逐渐减小，直到满足折射光线所需的角度时，光线才会折射出去（如图 2 中的光线 1）。此时，根据式（1）计算，有 92.16% 的光线折射出去。

当然，在发生折射现象的同时，也会发生反射现象（如图 2 中的光线 2），此时会有 3.84% 的光线在表面反射。但是此反射光线在压花结构的另一侧以折射的方式透射出去（如图 2 中的光线 3），即有 3.69% 的光线重新得到利用。若仅计算光线 1 和光线 3，太阳能玻璃的透光率就达到了 95.85%。

光线会在此压花结构中不停的反射、折射。由此反复下去，太阳能玻璃的透光率可以达到 96%。这样的结构设计，使得光线在多次折射、多次反射的过程中得到充分的利用，使得原本反射损失掉的 3.84% 的光线得到利用，降低了玻璃的反射损耗。

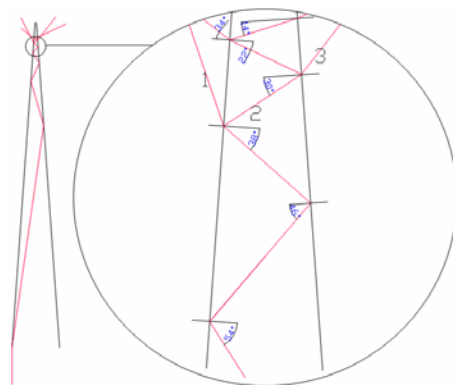


图 2 垂直光线入射玻璃的光路图

### 2.2 压花结构对有一定入射角度光线的影响

光伏组件固定式安装时，太阳光线的方位角以及仰角随着时间在发生变化，所以入射光线一定会出现较大的入射角。下面分析的是本设计的太阳能玻璃压花结构对接近水平方向的入射光线的光学作用。

当光线接近水平方向入射玻璃时，在玻璃的光滑面，由于折射的作用，光线的折射角为  $41.8^\circ$ 。光线就以与竖直方向的法线成  $41.8^\circ$  的角度入射与玻璃的压花面。光线在玻璃压花结构的花纹内的传播方向如图 3 所示。

由于太阳能玻璃压花结构的花型角度的作用，光线的入射角度大于临界角度，所以光线首先在花纹内壁发生全反射现象。当入射角度修正到小于临界角时，开始发生折射现象，使得光线从压花结构内壁透射出去。

从图 3 所示的光路中可以看出,不管是折射光线还是反射后再折射的光线,或者是折射后再反射、再折射的光线,或者是多次反射、折射后的光线,由于压花结构的花型角度的控制,使得所有的折射、反射出去的光线的方向都是朝向压花面,光线都能够透过压花面而到达电池片的表面。降低了玻璃的反射损耗,将玻璃的透光率大大提高。



图 3 光线接近水平方向入射的光路图

在  $0^\circ$  和  $41.8^\circ$  之间任意选择一个入射角度,以  $20^\circ$  的入射角为例分析光路,如图 4 所示。同样,光线首先在压花结构内壁多次全反射,然后经过多次的反射折射,最终所有的折射、反射光线能够无损耗的穿过玻璃的压花面透射出去,太阳能玻璃的透光率能够达到 95%,达到了提高透光率的目的。



图 4 间于垂直与水平方向入射角度的光线的光路图

经过上述不同的入射角度的光线对于玻璃压花结构的光路分析,可以得出:此压花结构可以将压花面本来应该反射损失掉的光线尽可能得以利用。当光线透过太阳能玻璃时,损耗仅仅由于在玻璃的光滑表面所产生的反射损失,并且此反射损失是无法避免的。

### 2.3 反射率与入射角度的关系

反射率除了与材料的折射率有关系,还与入射光线的入射角度有关系。反射率与入射角度的关系可以由 Fresnel 公式表达出来<sup>[5]</sup>。

$$R = \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{n_1 \cos r - n_2 \cos i}{n_1 \cos r + n_2 \cos i} \right)^2 + \left( \frac{n_1 \cos i - n_2 \cos r}{n_1 \cos i + n_2 \cos r} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式 (4) 中,  $R$  为反射率,  $i$ 、 $r$  分别为入射角度与折射角度,  $n_1$  为入射光线所在介质的折射率,  $n_2$  为折射光线所在介质的折射率。

从图 5 中可以看出,随着光线入射角度的增大,玻璃界面的反射率  $R$  是增大的,所以反射率是光线的入射角度的函数。通过计算可以得到,对于入射角度为  $80^\circ$  的入射光线,玻璃的透光率为 14.99%。另外,当光线的入射角度大于  $50^\circ$  时,电池片的光电转化效率随着光线入射角度的增加而逐渐下降。对于  $80^\circ$  入射光线,电池片的转化效率下降至 60%<sup>[6]</sup>。所以在考虑太阳能玻璃压花结构设计时,可以忽略  $80^\circ$  以上入射角度的光线的光路分析。

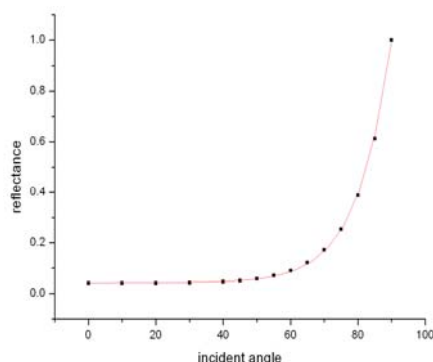


图 5 玻璃界面反射率与光线入射角度的关系

### 2.4 软件模拟压花结构以及透光率对比

玻璃压花结构花型角度的大小直接影响玻璃的透光率。花型角度的选择需满足以下条件: a) 使得太阳能光线的入射角度的范围尽可能的宽; b) 使得所有入射角度的光线的透光率大于常规太阳能玻璃的透光率。

本文利用 LightTools 软件模拟了上述特殊花型角和花型尺寸的太阳能玻璃的压花结构。在玻璃的 BottomSurface 面添加了 texture (压花), 结构图如图 6 所示。图 6 是不同方向的压花结构视图。

另外, 本文利用 LightTools 软件建立了包含光源、太阳能压花玻璃、接收器模型, 仿真模拟接受面的光线的光栅图表如图 7 所示。从软件导出的数据可以计算得出太阳能玻璃的透光率。

软件仿真模拟得到了光线的不同的入射角度时的常规太阳能玻璃透光率与本文设计的压花结构

的太阳能玻璃透光率，具体数据如表 1 所示。从表 1 中的数据对比中可以得出，本文设计的压花结构能够将玻璃的透光率显著提高。

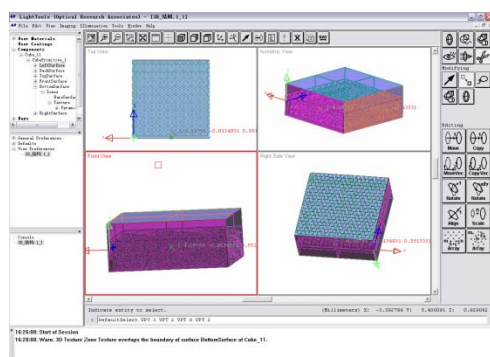


图 6 用 LightTools 软件建立的压花结构模型

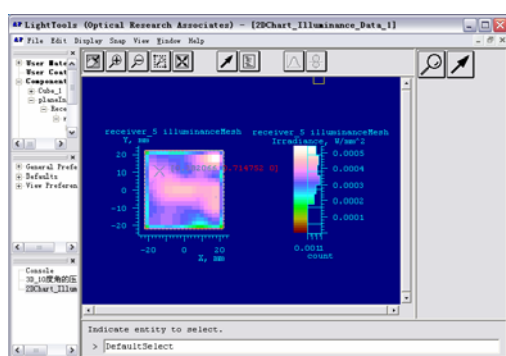


图 7 仿真模拟的光线光栅图

表 1 常规光伏玻璃与本文的光伏玻璃透光率

光线入射角	玻璃	常规太阳能玻璃	本文太阳能玻璃
$i$	反射率	透光率	透光率
0	0.04	0.9216	0.9271
10	0.04002	0.9215	0.9320
20	0.04027	0.9210	0.9384
30	0.04152	0.9186	0.9503
40	0.04573	0.9106	0.9600
45	0.05024	0.8979	0.9512
50	0.05766	0.8880	0.9391
55	0.06973	0.8654	0.9248
60	0.08919	0.8295	0.8827
65	0.12051	0.7735	0.8259
70	0.17104	0.6871	0.7681
75	0.25306	0.5579	0.6405
80	0.38770	0.3749	0.4863

此压花结构的透光率与光线入射角度的关系见图 7 所示。蓝色曲线表示的是本文所设计的特殊花型角度和花型尺寸的压花结构的太阳能玻璃的透光率与入射角度之间的关系，红色曲线表示的是常规太阳能玻璃的透光率与入射角度之间的关系。由图中的两组数据对比可以得到，本设计的压花结构对太阳能玻璃透光率有显著的提高。部分入射角度

范围内的透光率能够达到 96%。

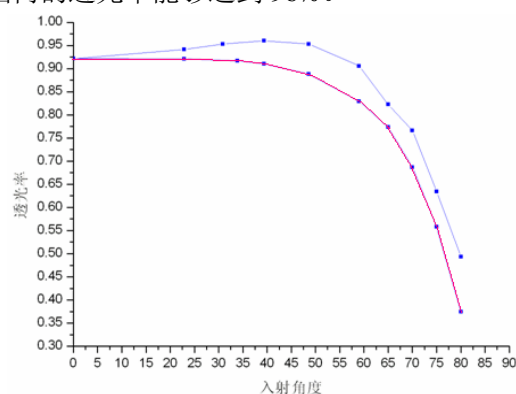


图 7 入射角度与透光率的关系

### 3 结论

本文设计了特殊角度和尺寸的太阳能玻璃压花结构，任何入射角度的光线都能够在此压花结构中全反射、反射、折射，使得原本反射损失掉的光线得以重新利用。该压花结构玻璃的透光率比常规太阳能玻璃明显提高。本文的设计只需在玻璃的压花结构上进行改变，无需另外增加成本就可以增加透光率，具有非常重要的应用意义。

### 参考文献：

- [1] 庚莉萍. 提高太阳能电池效率的主要措施[J]. 电源技术应用, 2009(11): 68-69.
- [2] 刘亚峰, 杨小武, 任军峰, 等. 镀减反射膜玻璃在光伏组件应用中的优点[A]. 十届中国太阳能光伏会议论文集[C]. 2008, 1036-1040.
- [3] 马军. 深加工玻璃的透光率及影响因素及分析[J]. 建材工业信息, 2003(10): 39-40.
- [4] 姚启钧. 光学教程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.164-165.
- [5] 姚启钧. 光学教程. 北京: 高等教育出版社, 2002.41-43.
- [6] D. L. King, W. E. Boyson, J. A. Kratochvil. Photovoltaic Array Performance Model. Sandia National Laboratories. 2004-3535:13.

### 作者简介：

吕 勇 (1967-), 男, 江苏泰州人, 工程师, 能效管理及新能源利用, E-mail: luyong158@yahoo.com.cn;

窦如凤, 男, 江苏泰州人, 工程师, 中盛光电能源股份有限公司, E-mail: rufeng@etsolar.com.cn.