

双玻 BIPV 组件玻璃破裂分析研究

刁云超

(北京建工新型建材有限责任公司, 10015, 北京)

摘 要: 研究采用玻璃衬底的铜铟镓硒双玻 BIPV 组件出现基板玻璃破裂的问题。测试太阳能电池基板玻璃及双玻组件的表面弯曲度、表面应力、弯曲强度, 对组件进行边框束缚加热试验和热力学仿真温差试验。通过对数据进行分析对比, 研究造成双玻组件破裂的原因及破碎的可能性, 提出避免破裂的建议。

关键词: 光伏建筑一体化; 铜铟镓硒太阳能电池; 玻璃破裂

中图分类号: TU 74 **文献标志码:** B **文章编号:** 1000-4726(2021)09-1112-04

STUDY ON GLASS RUPTURE OF DOUBLE GLASS BIPV ASSEMBLY

DIAO Yun-chao

(BCEG Advanced Construction Materials Co., Ltd., 100015, Beijing, China)

Abstract: The problem of substrate glass rupture in GIGS double glass BIPV assembly with glass substrate was studied. The surface bending degree, surface stress and bending strength of solar cell substrate glass and double glass assembly were tested, and the boundary binding heating test and thermodynamic simulation temperature difference test were carried out on the assembly. Through the analysis and comparison of the data, the causes of the rupture of double glass components and the possibility of breaking were studied, and the suggestions to avoid the rupture were put forward.

Keywords: building integrated with photovoltaic; GIGS solar cells; glass rupture

光伏建筑一体化 (BIPV) 是将光伏发电集成到建筑上, 不仅可满足建筑的基本需求, 同时还可发电, 是未来光伏应用的重要领域之一。目前光伏市场上的主流是晶体硅太阳能电池片和薄膜太阳能电池片, 由于薄膜太阳能电池弱光效应好, 在普通灯光下也能发电, 故应用广泛, 被称为“下一时代非常有前途的薄膜太阳能电池”, 其黑色的外观也是大型建筑物玻璃幕墙最理想的选择, 因此在高层建筑领域市场前景广阔, 然而在实际应用中也出现了越来越多玻璃破碎等安全问题, 亟需引起重视^[1-3]。

玻璃是一种脆性材料, 应力直接影响玻璃的强度,

玻璃的耐压强度和硬度很高, 但抗折强度和抗张强度不高^[4,5], 存在较大的破裂风险。为分析双玻 BIPV 组件玻璃破裂的原因及风险, 本文对太阳能电池基板玻璃及双玻组件进行表面弯曲度、表面应力和弯曲强度测试, 对组件进行边框束缚加热试验和热力学仿真温差试验。

1 试验样品及设备

试验样品为铜铟镓硒太阳能电池片 (CIGS) 玻璃基板, 尺寸为 1200 mm × 800 mm × 3 mm, 超白钢化玻璃, 尺寸为 1200 mm × 800 mm × 6 mm, 玻璃基板与超白钢化玻璃合片的双玻光伏组件厚度为 3 mm+1.14 mm (PVB) +6 mm。

试验仪器设备包括 JF-3E 表面应力测试仪、

收稿日期: 2021-06-14

作者简介: 刁云超 (1984—), 男, 辽宁鞍山人, 高级工程师, 硕士,

e-mail: 277918080@qq.com.

XL211A 静态电阻应变仪、HT9815 热电偶测温仪、镁铝合金刀口尺、不锈钢塞尺、四点弯曲测试仪和 Ansys14.0 工程设计仿真软件等。

2 试验过程

2.1 基板玻璃及双玻组件弯曲度测试

考虑到玻璃表面平整度不良会在加工过程中破碎,为研究太阳能电池基板玻璃的平面度情况,需了解玻璃弯曲度对组件玻璃破裂的影响,按图 1 测量了 20 片基板玻璃、100 片超白钢化玻璃及 20 片双玻组件的 4 条边及 2 条对角线的弯曲度。

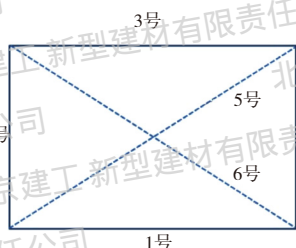


图 1 玻璃弯曲度测试示意

2.2 基板玻璃及双玻组件表面应力测试

太阳能电池基板玻璃的表面应力大小可反映其易碎程度,为研究太阳能电池片基板玻璃表面的应力情况,了解基板玻璃表面应力对组件玻璃破裂的影响,按图 2 对 20 片基板玻璃及其组件表面测取 9 个点测试玻璃的表面应力。

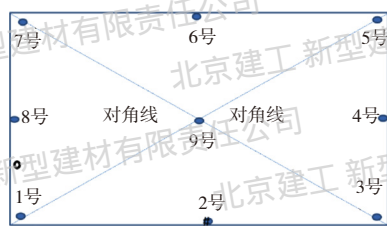


图 2 玻璃表面应力测试示意

2.3 基板玻璃弯曲强度测试

玻璃的强度直接决定了玻璃的破裂程度,为研究太阳能电池基板玻璃的弯曲强度情况,了解基板玻璃弯曲强度对组件玻璃破裂的影响,取 20 片太阳能电池基板玻璃进行弯曲强度测试。试验采用四点弯曲测试仪,样品尺寸为 $1100\text{ mm} \times 360\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。

2.4 玻璃受热表面应力测试

玻璃是温度的不良导体,在玻璃面、内和厚度方向上的温差均会引发玻璃破裂。为研究玻璃面、内温差和厚度温差对组件破裂的影响,通过硅胶加热片在无边框约束的浮法玻璃(与基板玻璃材质规格均相同)

面、内施加不均匀温度载荷,观察玻璃在加热降温过程中的应力变化情况。通过仿真硅胶加热片使玻璃受热得出的玻璃面、内温度及应力分布情况(图 3)确定应变片的分布位置(图 4)。



图 3 玻璃加热温度与应力分布仿真(计算机截图)
(a) 温度分布; (b) 应力分布

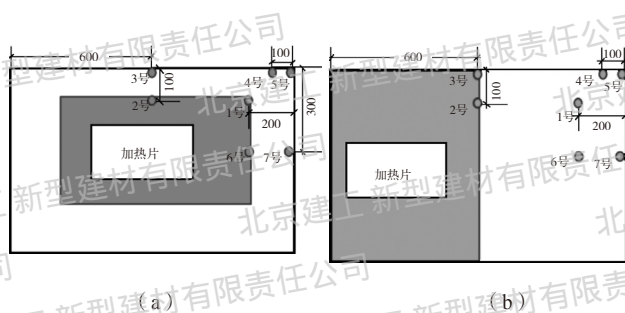


图 4 热应力试验硅胶加热片及应变片分布(计算机截图)
(a) 加热片居中分布; (b) 加热片居左分布;
(c) 加热片居右分布

2.5 边框束缚玻璃受热应力测试

考虑到玻璃在使用过程中多处于有边框束缚的条件下,为研究在边框束缚条件下玻璃加热对表面应力的影响,选用与基板玻璃材质及规格均相同的浮法玻璃,在无约束条件下通过硅胶片将玻璃中心温度加热至 80°C ,测量其应力和拱起变形;另使用铝合金框和 C 形夹对玻璃进行约束,测量应力和拱起变形;在约束后将玻璃边缘压平测量应力和拱起变况;并测量拆卸框架和 C 形夹后的应力和拱起变形情况,如图 5 所示。

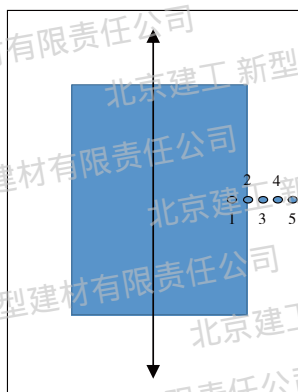


图5 玻璃边缘束缚条件下温度应力测试示意

2.6 双玻 BIPV 组件温差仿真试验

双玻 BIPV 组件使用过程中会遇到室内外温差较大的情况,当玻璃存在面、内温差或厚度温差时组件会产生温度梯度而引起热应力。为研究在室内外温差下双玻组件的温度变化,了解玻璃厚度方向及面、内温差对玻璃破碎的影响,本试验模拟在室内温度 30℃,室外温度 -30℃,室外 8 级风,室内空调 2 级风条件下双玻组件结构的温度变化情况。

3 结果与分析

3.1 弯曲度对双玻 BIPV 组件玻璃破碎的影响

按图 1 对玻璃基板、超白钢化玻璃及组件的弓形偏差进行测量,计算平均弯曲度(表 1)。

表 1 基板玻璃、超白钢化玻璃及组件弯曲度测试结果

试件编号	基板玻璃		钢化玻璃		双玻组件	
	弓形偏差 / mm	弯曲度 / ‰	弓形偏差 / mm	弯曲度 / ‰	弓形偏差 / mm	弯曲度 / ‰
1	4.18	3.48	0.15	0.13	0.420	0.35
2	1.81	2.26	0.15	0.19	0.392	0.49
3	4.62	3.85	0.3	0.25	0.348	0.29
4	2.07	2.59	0.19	0.24	0.096	0.12
5	5.33	3.70	0.30	0.21	0.260	0.18
6	5.94	4.11	0.25	0.17	0.375	0.26

从表 1 可知,太阳能基板玻璃长边(1 号、3 号)弯曲度平均值分别为 3.48‰和 3.85‰,短边(2 号、4 号)弯曲度平均值分别为 2.26‰和 2.59‰,对角线弯曲度(5 号、6 号)平均值分别为 4.11‰和 3.91‰,弯曲度数值较大,且长边弯曲度略大于短边,高于 GB 11614—2009《平板玻璃》中对平板玻璃弯曲度不大于 2‰的要求;超白钢化玻璃的弯曲度平均值为 0.22‰远低于 GB 15763.2—2016《建筑用安全玻璃》中对钢化玻璃弯曲度不大于 3‰的要求;合片后的组

件弯曲度平均值为 0.28‰,平整度较好。

3.2 表面应力及弯曲强度对双玻 BIPV 组件玻璃破碎的影响

按图 2 对太阳能基板玻璃及双玻组件进行表面应力测试,对基板玻璃进行四点弯曲测试并计算平均值,结果见表 2、表 3。从表 2 可知,太阳能电池基板玻璃及双玻组件表面存在较大的拉应力,应力分布不均匀,且长边中心应力平均值(2 号、6 号)稍大于短边中心应力平均值(4 号、8 号)。从表 3 可知玻璃基板弯曲强度平均值为 40.86 MPa,明显低于相同组分相同尺寸的浮法玻璃弯曲强度(52.90 MPa)。

表 2 基板玻璃及组件表面应力测试结果 MPa

试件编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
玻璃基板	-7.12	-6.17	-5.74	-5.17	-3.61	-5.49	-3.98	-4.09	-5.20
双玻组件	-15.9	-13.4	-9.8	-12.2	-11	-18.3	-15.9	-14.6	-8.5

注:表中数值+表示压应力,-表示拉应力。

表 3 基板玻璃弯曲强度测试结果 MPa

测点编号	弯曲强度	测点编号	弯曲强度
1	42.45	11	37.25
2	41.91	12	39.82
3	45.23	13	42.36
4	39.30	14	35.72
5	47.20	15	36.84
6	41.28	16	39.75
7	40.15	17	43.86
8	39.80	18	40.52
9	42.15	19	46.34
10	36.46	20	38.96

3.3 局部受热对双玻 BIPV 组件玻璃破碎的影响

按图 4 所示,采用加热片以 5℃/min 速度对浮法玻璃进行局部加热到 90℃,记录应变片的温度及应力情况(表 4)。表 4 数据表明造成玻璃内应力的主要因素是硅胶加热片引起的温差;在远离硅胶加热片覆盖的区域温差较小,最大应力值均在 3 MPa 以下;在硅胶加热片完全覆盖的区域,最大应力值为 23~25 MPa;而硅胶加热片边缘温度梯度最大,测的应力也最大。

3.4 边框束缚对双玻 BIPV 组件玻璃破碎的影响

按图 5 所示束缚浮法玻璃边缘,玻璃中心用硅胶

表4 应变片温度及应力测试数据

测点编号	1	2	3	4	5	6	7
a区	硅胶片温度/℃	76.9	87.3	68.3	73.6	84.7	82.2
	最大应力/MPa	21.11	24.77	1.65	1.75	0.60	20.34
b区	硅胶片温度/℃	93.7	91.0	87.8	84.5	56.1	93.2
	最大应力/MPa	1.37	27.12	32.08	0.71	0.58	2.18
c区	硅胶片温度/℃	80.5	82.1	76.3	84.5	84.7	73.6
	最大应力/MPa	25.19	19.7	16.95	26.42	30.34	23.37

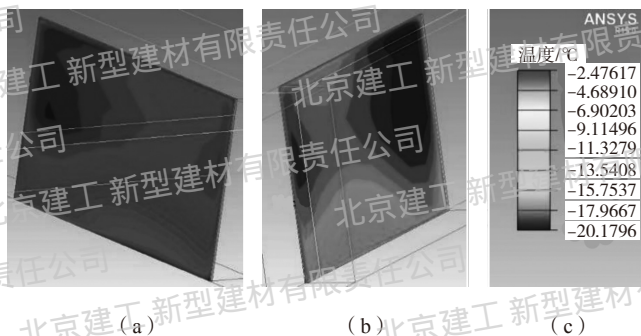


图6 双玻组件室内外温差下的仿真分析(计算机截图)

(a) 内侧; (b) 外侧; (c) 温差分析

片加热。测试数据见表5。从表5可知,玻璃在边缘约束的情况下受热时,其表面应力比未束缚时有所增加,随约束加大5个点的应力值均有上升,且越靠近边缘应力增加越明显。其中1,2两点受影响较小,而3,4,5尤其是最边缘的5点应力值上升明显,高达25.43 MPa,加大了玻璃破裂的风险。

表5 边缘束缚玻璃温度及应力测试

项目	测点应力值/MPa					变形量/mm		温度/℃		
测点编号	1	2	3	4	5	边缘	中心	中心	边缘	室温
无约束	-13.38	-31.80	-3.33	-3.90	-2.69	5	7	83.6	28.6	27.3
约束状态	-19.80	-36.71	-19.92	-19.90	-22.09	0.3	4.9	84.3	28.8	27.9
加大约束	-20.07	-38.24	-22.28	-22.73	-25.43	0.2	4	83.3	29.4	28.6
去除约束	-14.00	-39.42	-9.21	-5.91	-5.50	5	7	83.0	29.8	28.7

3.5 面内温差对双玻 BIPV 组件玻璃破碎的影响

试验仿真在室内温度30℃,室外温度-30℃,室外8级风,室内空调2级风条件下,3 mm浮法玻璃(室内)+1.14 mmPVB胶片+6 mm钢化玻璃(室外)组件结构的温度变化情况(图6)。从仿真图中可看出内层浮法玻璃与钢化玻璃的温差约为5℃,面、内温差可达约10℃,存在温度梯度。

4 建议

由于太阳能电池薄膜制备过程中需经历高温及不均匀冷却,往往会导致玻璃基板存在较大的热应力,导致玻璃弯曲度增大,表面应力增加且应力分布不均匀,降低了表面弯曲强度,增加了玻璃的破碎风险。玻璃在安装及使用过程中边框的束缚及不均匀受热都会导致玻璃表面应力增加,加大玻璃破碎的风险。为此提出如下建议。

(1) 优化太阳能电池基板玻璃性能,提高玻璃的热稳定性和强度。目前使用的基板玻璃为普通浮法玻璃,其膨胀系数大,玻璃热稳定性较差,强度低,可选用热稳定性好或强度高的基板玻璃,如硼硅酸盐玻璃或铝硅酸盐玻璃,从源头上避免玻璃破裂的可能性。

(2) 采用三玻夹层玻璃结构,提高组件的结构强度。目前BIPV多采用双玻结构,太阳能电池基板玻璃无法钢化,导致其与钢化玻璃合片后由于应力不均匀增加了玻璃的破碎风险。可采用钢化玻璃+太阳能电池基板玻璃+钢化玻璃的夹层玻璃结构形式增加BIPV的结构强度,提高组件的安全性。

(3) 选用导热系数低的弹性材料进行安装。玻璃是热的不良导体,由于吸热及散热不均匀造成的温差很难靠自身达到平衡,安装时应尽可能采用导热系数低的弹性材料做衬垫,隔绝玻璃与铝框、墙体等,减少玻璃的不均匀温差。

(4) 合理选择组件玻璃的尺寸。组件玻璃的厚度越大对太阳辐射能的吸收也越强,玻璃的热应力越大玻璃越易破裂,玻璃面积越大也越易破裂;玻璃的长、短边比值越大越易形成应力,也会增大玻璃破裂的几率,合理选择组件玻璃的尺寸对降低玻璃破碎风险也很重要。

参考文献

- [1] 王桂英,郑浩东.玻璃应力对玻璃强度的影响[J].玻璃,2011(9): 11-14.
- [2] 孙巍.建筑节能玻璃幕墙温度应力研究[D].北京:清华大学,2008.
- [3] 马春荣,陈永定,陈汝谐.建筑玻璃热炸裂机理探讨[J].中国建筑科学研究院学报,1991(3): 76-82.
- [4] DING W T, HASEMI Y J, YAMADA T. Natural ventilation performance of a double-skin facade with a solar chimney[J].Energy and Buildings, 2004, 37(4): 411-418.
- [5] 王封顺,王西奇,张浩.温差对含相变材料玻璃幕墙温度和应力的影响及分析[J].山西青年,2017(15): 277.