

# 太阳能光伏玻璃及其薄膜的开发与应用

## Solar Photovoltaic Glass Membrane Exploitation and Application

郝向国<sup>1</sup> 徐美君<sup>2</sup>

1 中国建筑玻璃与工业玻璃协会 北京 100831

2 蚌埠玻璃工业设计研究院 安徽蚌埠 233018

**摘要** 太阳能光伏玻璃是指应用于太阳能电池组件上对太阳光具有较普通玻璃更高透过率或能选择性透过的玻璃。太阳能光伏玻璃是太阳能电池组件专用玻璃，也是重要组件之一。在太阳能电池玻璃中，高透光率特性的应用更为广泛。通常它们被用做具有保护作用的盖板玻璃。本文对生产超白太阳能光伏玻璃的国内主要企业状况作了粗略调查和统计，并且对目前国内市场需求和发展作了介绍。

**Abstract** Solar photovoltaic glass is direct to the kind of glass, which is apply to the solar module and has a higher transmission or selectively transmission than normal glass. Solar photovoltaic glass is the dedicated glass of solar module and one of the important modules. In solar energy cell, the characteristic of high transmission has a wider application. In usual, they are used for covering plate glass that has a protective function. This article makes a rough survey and statistics on the condition of some main domestic enterprises that manufacture solar ultra-white glass, and introduces the demand and development of domestic market at the present time.

**关键词** 太阳能光伏玻璃 光伏玻璃的分类 薄膜太阳能电池 市场需求发展

**Key Words** Solar photovoltaic glass the classification of photovoltaic thin film solar cell market demand development

### 1 序言

太阳能是各种可再生能源中最重要的基本能源，而太阳能的利用装置和材料，包括透光材料、吸收涂层和各种发射薄膜等都离不开玻璃。

透明的平板玻璃，作为一种基板材料，无论用于太阳能的热转化装置，还是用于电能的转换装置，它都具有诸多优点：透明玻璃的表面经加工处理后，对太阳光具有高的透过率或低反射率；玻璃中通过掺入特定的着色剂后，对太阳光谱的不同波长可进行选择性吸收为人类所利用；玻璃具有耐高温而不变形的特点；易于拉制成适用于太阳能利用所需的超薄、极超薄、普通薄玻璃等各种不同厚度的透明板材；玻璃有光滑平整的表面，便于清洗镀膜加工，抗风化、抗腐蚀能力高；玻璃可通过钢化等手段达到增强效果。鉴于此，玻璃已成为太阳能开发与利用中不可或缺的重要材料。

太阳能利用正成为新能源的主力，而所有的太阳能装置都需要用光伏玻璃封装，光伏玻璃作为太阳能光热、光电转换系统的基片材料，其产业化从根本上推动了世界光伏产业生产规模的不断放大。

据统计，我国2007年太阳能光伏玻璃市场实际产量仅占总需求量的60%，国内市场缺口较大，并且随着光伏产业的快速增长，光伏玻璃的缺口会进一步扩大。每1兆瓦太阳能电池装置需用1.5万平方米光伏玻璃，全球每年3000兆瓦太阳能电池装置需用4500万平方米光伏玻璃，且年增长率在40%，而光伏玻璃更大的需求来自新发展的薄膜太阳能电池，通过将透明导电膜镀于超白光伏玻璃上，再

通过后续镀上纳米级光伏薄膜成为光伏薄膜电池组件，由于无需硅材，生产成本较多晶硅太阳能电池大幅降低，而且可与建筑一体化设计，用作建筑物的外墙玻璃，达到既采光又发电目的，年增长率不少于80%，其配套的光伏玻璃全球年需求达1亿平方米。多晶硅太阳能电池和薄膜太阳能电池对光伏薄膜的需求强劲，市场供应非常紧张。光伏玻璃目前的主流产品为钢化绒面玻璃，厚度为3.2mm，在太阳能电池光谱响应的波长范围内（320~1100nm），透光率可达91%以上，对于大于1200nm的红外光有较高的反射率，其市场利润与现在的普通玻璃产品简直不可同日而语，毛利率可达50%。目前国内光伏玻璃的龙头是深南玻，年产600万平方米左右，而后起之秀是ST安彩（600207），决定投资27780万元，建设年产560万平方米光伏玻璃项目，采用一窑两线，两条线池炉出料量250t/d，利用公司现有玻璃生产配套动力设备，开发3.5代到5代的液晶玻璃项目，技术要求比太阳能光伏玻璃还高，但太阳能光伏玻璃利润更高，年平均销售收入30058万元，年平均利润5627万元，年平均总投资利润率25.39%，内部收益率31.56%。由于太阳能电池的用途广泛，且又是国家极力推行的节能型产品，其市场需求增长速度是非常之快的，而由此所带来的对于超白钢化绒面玻璃的需求量也是呈快速增长之势的，并且这种需求的增长将是一种较长时间的持续性增长。

## 2 太阳能电池玻璃行业现状与市场

### 2.1 国际太阳能电池玻璃市场状况

随着传统资源日渐短缺，开发利用太阳能等新能源成为世界各国的共识。全球太阳能光伏电池产量从1980年的3MW发展到2006年的2158MW。与此对应，作为太阳能电池封装的必须材料，太阳能电池用玻璃的需求也与日俱增，2006年全球总需求量约2800万平方米至3500万平方米。国际上主要有法国圣格戈班、日本旭硝子、英国皮尔金顿、美国PPG、比利时的Glaverbel等企业从事太阳能电池玻璃的生产，总的窑数约10条左右，总熔化量大约1000t/d~1500t/d。

据太阳能杂志Photon一项市场调查表明，目前中国太阳能电池产量已超过日本和德国，其产品在全球太阳能市场居主导地位，2007年，中国太阳能电池产量为1200兆瓦，日本932兆瓦，德国875兆瓦。前十大太阳能电池生产公司中也多为亚洲企业，而德国仅有Solarworld和Solon两家入榜，分别排在第七位和第十位。由于德对可再生能源提供补贴，德国成为中国太阳能公司的主要销售市场，但就产品质量而言，很多中国太阳能产品进入国际市场后，还无法与Solarworld等公司的产品相提并论。

### 2.2 国内太阳能电池玻璃行业现状

太阳能光伏玻璃是太阳能电池产业中一个重要的新兴配套产品，它是随着光伏行业的发展而逐渐壮大的。以往国内玻璃生产企业约有10多家，大部分为几十吨/日到100吨/日熔化量的中、小型窑，总量约990-1000万重量箱，其原片市场在5亿元左右。

目前，我国国内一些大企业开始介入太阳能电池玻璃生产领域，单条生产线的生产能力在250吨到400吨。我国光伏领域玻璃的需求量以每年50%的速度递增，2010年将达到2500万平方米，太阳能电池玻璃市场前景非常广阔。从发展趋势看，我国将成为未来太阳能电池玻璃重要的生产基地。

中国太阳能玻璃的生产起步较晚，目前国内能够生产低铁（超白）玻璃（含压延超白玻璃）的生产线已经有10多家（山东、江苏、上海、浙江、广东、河南），20多条生产线；实际产能约3000 t/d左右。其中大、中型有（120t/d，500 t/d，250t/d），山东、江苏、上海、浙江、广东等地的产品大部分出口荷兰、日本、韩国、泰国和我国台湾，在国内基本直接出售原片给其他加工玻璃商的市场正逐步上升，首先在广东、浙江、江苏等，并正在逐步扩大。

就目前国际市场而言，世界上只有美国PPG、法国圣戈班、英国的皮尔金顿、日本的旭硝子（AFG）、比利时的Glaverbel等少数企业能够生产质量优异的低铁超白玻璃太阳能玻璃，但产量无法满足全球日益增长的市场需求。

太阳能玻璃主要应用于太阳能热利用技术，如太阳能热水器、太阳能灶海水淡化等；另一个是把太阳光电转换技术，即太阳能光伏产业，如太阳能电池、太阳能发电、光电玻璃幕墙等。

太阳能作为一种再生能源，能有效缓解全球目前能源供应紧张状况。在中国太阳能产业正以每年20%~30%的速度增长；国际上随着美国、欧盟、日本等国家光伏发展计划、百万太阳能屋顶计划、光伏先锋计划等政策的制定和出台，太阳能产业年增长率超过了20%。

另外，中国是一个水资源严重短缺的国家。2004年中国淡水资源总量为2.75万亿立方米左右，水资源总量位居世界第6位，但人均水资源量只有2125立方米，仅为世界人均占有量的1/4。全国因缺水造成每年城市工业产值损失1200亿元以上，相当于一个中等省份全年的GDP总值，且呈增长之势。海水和苦咸水的淡化是解决水荒问题的一条有效的重要战略途径。随着中国《海水利用专项规划》的出台，作为21世纪“朝阳工业”的太阳能海水淡化产业对太阳能玻璃的需求将与日俱增。另外还有就2010年举办的上海世界博览会5.7平方公里的场馆建设全部采用光电玻璃幕墙太阳能发电，配套太阳能玻璃用量不菲。

### 2.3 国内部分太阳能玻璃企业发展动态

太阳能低铁(超白)压延玻璃是近几年国际上新开发的新玻璃之一，法国圣戈班玻璃公司在太阳能超白压延玻璃的生产技术及应用领域居同行之首。日本夏普公司是当今国际市场上最大的太阳能超白压延玻璃用户之一。用浮法工艺生产在中国大陆已经有上海、河南、江苏、广东等地建成太阳能超白压延玻璃生产线20多条，横火焰燃重油池窑14座，生产3.2毫米厚度的太阳能超白压延玻璃产能总量将达到3000吨/日，约超过40万平方米。

目前正在建设的生产线和即将筹建线预计还有4条。到2009年，届时中国大陆太阳能超白压延玻璃产能总量将突破4000吨/日，约1000万重量箱。

在市场销售价格方面，由于新、老生产线的激烈竞争日趋上升的态势下，由2005年的10000元/吨，下降至2006年12月的市场价9500元/吨-7000元/吨。其中经过切割、磨边、钢化加工处理的产品每平方米出口(日本夏普，3mm厚度)价格约120元；

而中国(无锡尚德公司光电电池板每瓦销售价格高达48\$，30cm×30cm)目前压延超白太阳能光伏玻璃市场价格为1万元/吨，约为500元/重量箱，按照4mm厚度计为100元/m<sup>2</sup>。其压延超白太阳能光伏玻璃是普通浮法平板玻璃的2-3倍价格；

关于超白浮法玻璃山东玻璃集团(引进美国PPG技术)生产的超白浮法玻璃出口欧洲20万重量箱，销售合同金额为450万美圆，约合22.5\$/重量箱，约为180元/重量箱，按照4mm厚度计为36元/m<sup>2</sup>。

超白浮法平板玻璃可见光透过率极高，高达93%以上。其太阳能获得率、紫外线透过率等指标均达到了同类产品的先进水平。目前超白浮法平板玻璃最主要用途之一就是太阳能光电幕墙领域。以超白浮法平板玻璃作为太阳能光热、光电转换系统的基片，是目前国际上太阳能利用技术的突破，大大提高了光电转换效率。

中国目前采用压延(压花)工艺和浮法成型工艺生产低铁太阳能玻璃原片的企业正在日益增多，据粗略调查，目前仅有山东、河北、河南、江苏、浙江、上海广东等地区生产。其中山东玻璃集团金晶科技公司南方玻璃集团公司、和江苏南京圣韩浮法玻璃公司三家生产的低铁太阳能玻璃原片质量上乘，市场占有率居同行首位。

中国山东首条超白浮法玻璃生产线于2004年11月10日在点火投产。总投资10亿元(含8000多万美圆)的山东玻璃集团金晶科技公司兴建的600t/d级超白浮法玻璃生产线，引进了美国PPG的先进工艺技术装备；产品规格为：厚度：3mm~25mm；板宽可生产3050mm~3660mm；板长1520mm~3660mm；当生产12mm以上厚度的超白浮法玻璃时可生产8000mm~3660mm的板面。产品除了供应国内市场外，还大量出口欧洲市场，其中荷兰为最大的进口国之一。

河南裕华高白玻璃有限公司2005年投资建成批量生产的太阳能组件用低铁玻璃，经国家检测部门检测，产品太阳能透光率达到91.8%以上，多项目技术指标优于国外产品。

2007年4月12日我国首条自主研发的压延超白玻璃生产线在河北晶牛集团批量投产。这是国家级高新技术企业晶牛集团在研发出压延微晶玻璃、晶牛玉等高科技产品之后，又一丰硕成果。目前，产品已畅销国内市场并且在海外批量上市。

另外，中国广东、河南、浙江、上海等地均先后宣布新建超白压延玻璃生产线建成投产。

据悉，超白压延玻璃由于规格尺寸小，品种少，大多应用于太阳能电池盖板。在中国市场上，以往，用于玻璃幕墙系统、全玻璃橱窗、高档玻璃家具、玻璃天棚、太阳能建筑物玻璃组件的超白浮法玻璃原片大多进口于的法国、日本，再进行加工。目前，中国超白玻璃原片（用于高铁太阳能玻璃）已经拥有9家企业（12条生产线）。

中国南京圣韩浮法玻璃公司新开发生产的超白压延玻璃现已批量上市。法国圣戈班集团在全球有4座压花玻璃厂，1座在中国，其它3座在欧洲。在中国的压花玻璃生产线，其生产能力为240t/d的熔窑，目前南京圣韩玻璃公司开发生产出压延超白玻璃年加工能力300万平方米。

据悉，目前深圳南玻集团和另外一家在中国大陆投资玻璃建厂的合资公司均在研制、开发生产压延超白玻璃，不久产品将会推向国内外太阳能玻璃和高档建筑装饰玻璃市场。

日前，具有完全自主知识产权的我国第一条13 t/d的（熔窑）、硼硅浮法玻璃生产线在中国耀华玻璃集团公司实现工业化生产。耀华成为继德国肖特、美国康宁之后，世界上第三家能够生产此类产品的企业，从而结束了我国硼硅浮法玻璃全部依赖进口的历史。目前，产品已通过德国、英国等专业机构的质量认证。研发人员历经多次攻关，（熔化难、澄清难、成型难、均化难、易挥发等技术难题）终于被全面破解。稳定生产出了2~10毫米3.3硼硅浮法玻璃，且产品质量达到国际先进水平。硼硅浮法玻璃具有耐高温、高热稳定性、高硬度、低密度、高透光率等优点，是普通浮法玻璃无法比拟的。产品广泛应用于家电、照明、太阳能发电、精密器械、环境工程、化学工程、半导体技术、医学技术、安全防护等领域，市场前景十分广阔。产品外销率将达到60%以上。据悉，耀华集团公司下一步将着力研制防火玻璃和4.0硼硅玻璃。

在中国太阳能电池封装玻璃方面，信义玻璃已有日熔量达300吨的光伏玻璃生产线，并兴建第2条日熔量为500吨光伏玻璃生产线，加工能力将达到1000万平方米。深圳南玻目前拥有日熔量为250吨的太阳能超白玻璃原板生产线4条，加工能力超过1200万平方米。上海福莱特公司拥有4条超白压花玻璃生产线，年产量会超过1000万平方米。河南裕华公司加工能力是400万平方米。常熟耀皮特种玻璃有限公司的加工能力为200万平方米。太仓中玻皮尔金顿特种玻璃有限公司首条太阳能玻璃生产线总投资4.5亿元，该生产线使用了融化和成型的最新技术，同时也建设了世界上最大的钢化线，太仓中玻皮尔金顿特种玻璃有限公司加工能力560万平方米；

另外，青岛金晶玻璃集团目前形成年产防眩高透高强度光伏玻璃600万平方米的能力。山玻集团的超薄玻璃也部分供应光伏玻璃市场。信义准备引进光伏薄膜导电玻璃生产线，计划年产能达68万平方米，预期将于2009年投产。

中航三鑫已经在安徽蚌埠建厂，产能达到超白太阳能玻璃年产量112.69万重量箱，其中超白玻璃原片为59.31万重量箱，钢化超白玻璃为53.38万重量箱。

目前我们的生产能力还远不能满足市场的需要，还存在相当大的缺口。随着全球太阳能产业的快速发展，在很长一段时间内光伏玻璃的市场都将处于供应紧张的状态。

#### 2.4 中国部分太阳能光伏玻璃企业生产线概况

目前，中国超白玻璃原片（用于高铁太阳能玻璃）的生产线大致生产营运情况如表1所示：

### 3 太阳能光伏玻璃分类与应用

目前国际上对用于太阳能电池的光伏玻璃的研制一般包括三种主要类型，主要是：超薄玻璃、表面镀膜玻璃、高铁含量的（超白）玻璃。

光伏玻璃根据使用的性质和制造方法不同，又可以分为3种产品，一种是平板型太阳能电池的盖板，一般为压延玻璃；第二种是在平板玻璃上镀附上通常厚度只有几微米的半导体材料制成的薄膜电池导电基片；第三种是集热式光伏系统使用的透镜或反光镜类的玻璃。这3种产品的特性和作用完全不同，其附加值也有很大的差别。

表1 中国太阳能光伏玻璃（含浮法、压延高铁太阳能玻璃）的生产企业

序号	企业名称	设计规模	产品品种	应用领域	市场占有率(%)
1	山东玻璃集团金晶科技公司	600吨/日	低铁超白浮法玻璃	建筑、装饰、太阳能电池玻璃组件	销售国内外市场
2	南京圣韩浮法玻璃公司	250吨/日	低铁超白压延玻璃	太阳能建筑物玻璃组件、太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场
3	河南裕华玻璃有限公司	90吨/日	低铁超白浮法玻璃	太阳能电池盖板	销售国内外市场
4	东莞南玻太阳能玻璃有限公司(一线)	250吨/日	低铁超白压延玻璃	太阳能建筑物组件、太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场
5	东莞南玻太阳能玻璃有限公司(二线) (2008年8月投产)	300吨/日	低铁超白压延玻璃	太阳能建筑物组件、太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场
6	上海福来特玻璃有限公司(超白压延玻璃一线)	80~90吨/日	低铁超白压延玻璃	太阳能建筑物玻璃组件、太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场
7	上海福来特玻璃有限公司(超白压延玻璃二线)(2007年投产上市)	80~90吨/日	低铁超白压延玻璃	太阳能建筑物玻璃组件、太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场
8	杭州和合玻璃公司(超白压延玻璃一线)	80~90吨/日	低铁超白压延玻璃	太阳能建筑物玻璃组件、太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场
9	杭州和合玻璃公司(超白压延玻璃二线)(2007年投产上市)	80~90吨/日	低铁超白压延玻璃	太阳能建筑物玻璃组件、太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场
10	江苏常熟玻璃公司	150吨/日	低铁超白压延玻璃	太阳能建筑物玻璃组件、太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场
11	河南斯拜特玻璃有限公司	90吨/日	低铁超白压延玻璃	太阳能建筑物玻璃组件、太阳能电池盖板玻璃	新投产生产线
12	河北晶牛集团	300吨/日	低铁超白浮法玻璃	太阳能建筑物玻璃组件、太阳能电池盖板玻璃	国内外市场
13	信义集团(东莞太阳能)玻璃有限公司	300吨/日(2007年8月投产)	低铁超白压延玻璃	太阳能建筑物组件、太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场
14	中国耀华玻璃集团公司	100~130吨/日	硼硅酸盐超白浮法玻璃	2~10毫米3.3硼硅浮法玻璃	产品外销率将达到60%以上
15	江苏中玻太仓皮尔金顿特种玻璃公司	7万吨/年	低铁超白压延玻璃	太阳能建筑物玻璃组件、太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场
16	南玻集团太阳能玻璃有限公司	250吨/日	低铁超白浮法玻璃	太阳能建筑物组件、太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场
17	中航三鑫太阳能光电玻璃有限公司	250吨/日	超白太阳能玻璃	太阳能电池盖板玻璃	销售国内外市场

现今应用最广的太阳能光伏玻璃是高透光率玻璃，它是低铁含量的玻璃，也就是我们俗称的“超白”玻璃。铁在普通玻璃中属于杂质（吸热玻璃除外）。铁杂质的存在，一方面使玻璃着色，另一方面增大玻璃的吸热率。也就降低了玻璃的透光率。

玻璃中的铁是由原料本身、耐火材料或金属材质的生产设备等引入的，不可能完全避免。人们只能通过生产控制尽可能减少铁在玻璃中的含量。目前，太阳能电池玻璃的铁含量在0.008%~0.02%之间，而普通浮法玻璃的铁含量特别在0.7%以上。

低的杂质铁含量带来高的太阳光透过率。就国内应用最多的3.2mm和4mm玻璃而言，太阳光可见

光透射比一般达到90%~92%。

太阳能光伏玻璃作为太阳能装置的最重要的组件之一，要求玻璃板必须高度透明，因此对用于生产太阳能玻璃的硅质原料中含铁量要求十分严格， $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量一般在140~150ppm。

表2 太阳能光伏玻璃基本组成(%)

$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$
72.8	1.04	0.014~0.015	10.9	14.7

据报道，世界上最早采用透明平板玻璃作基板研制应用于太阳能电池的国家是德国。德国科技人员将这种板状的太阳能电池作为窗玻璃安装在建筑物上，它可将摄取的电直接供住户使用，多余的电能还可输入电网，这种最初的太阳能电池用玻璃的开发利用，不久被一些欧洲、美国工业发达国家及亚洲日本等国所重视，由此加快了用于太阳能的低铁、超薄玻璃的研制开发与应用的步伐。

### 3.1 硅太阳能电池盖玻璃

从20世纪70年代中期开始了地面用太阳能电池商品化以来，晶体硅就作为基本的电池材料占据着统治地位，而且可以确信这种状况在今后几十年中都不会发生根本的转变。

硅太阳能电池盖玻璃是硅太阳能电池装置中的重要组件之一。盖玻璃顾名思义就是覆盖在太阳能电池硅片上的玻璃。它的主要作用是保护硅片部件不受尘土、机械磨损和冲击以及环境条件的损伤，同时也不能影响太阳能电池的性能。这就要求硅太阳能电池盖玻璃对入射的太阳能没有强吸收，航天等特殊领域配套使用的太阳能电池上的盖板玻璃要求超薄（一般不超过0.152mm）类型的玻璃，这样不会增加太多的重量，但是热膨胀系数必须与单晶硅尽可能一致。此外，盖玻璃片通常由透明的聚合物黏合剂粘在太阳能电池上，因此要求玻璃在350nm波长以下的紫外吸收必须很强，以避免有机聚合物的降解。另外，从玻璃的制造工艺角度，则还要求玻璃必须具有适当的液相温度（析晶上限温度），以保证平板玻璃在成形过程中不出现析晶现象。

据有关资料介绍，盖板玻璃是平板型太阳能电池的重要组成部分，多为经加工的强化玻璃（钢化玻璃），具有耐风压、耐积雪、高性能以及防污染和防日照引起热裂损等作用。通常使用的平板玻璃盖板厚度为3.2毫米；面积一般为90厘米 $\times$ 180厘米，平均光透过率为85%，另外，15%为反射和吸收损失。为增大光透过率，已经开发了使用铁含量低的玻璃（ $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 为0.01%~0.05%）和经表面减发射处理的玻璃，使其平均透过率由85%提高到91%。

目前欧美国家用于太阳能的玻璃其含铁量为0.01%，当玻璃厚度为3毫米时，光透过率可高达90%以上。在美国的皮尔金顿LOF公司已向北美市场投放其生产的低铁浮法玻璃。产品已广泛用于显示器面板、光电模板、仪表蒙面玻璃、太阳能玻璃及影视快窗玻璃等，其玻璃厚度为2~12毫米。该低铁浮法玻璃在欧洲市场上十分走俏，尤其是用于太阳能装置的配套材料，更为抢手。

#### 3.1.1 硅太阳能电池盖玻璃基本组成

根据上述性能要求，硅太阳能电池盖玻璃通常采用含钛、铈等氧化物的硼硅酸盐微平板（Microsheet）玻璃（厚度范围为50~300 $\mu\text{m}$ ）。在组成设计方面，主要考虑以下氧化物所起的作用。

(1)  $\text{CeO}_2$ ：使玻璃具有所需的抗辐射性能，增加辐照稳定性（即在辐照下保持玻璃不变色），又称之为稳定剂。不过，如果在硼硅酸盐玻璃中加入过多的 $\text{CeO}_2$ ，则会引起玻璃的分相和着色，后者会严重降低可见光的透过。研究表明，在硼硅酸盐玻璃中引入0.25%~8.0%（质量分数）的 $\text{Sb}_2\text{O}_3$ 和 / 或 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，可以明显影响含铈硼硅酸盐玻璃的颜色，使可见光透过率提高，紫外透过率降低，抗辐射性能提高。在上述情况下， $\text{CeO}_2$ 的引入量可以增加至2%（质量分数）以上。

(2)  $\text{TiO}_2$ ： $\text{TiO}_2$ - $\text{CeO}_2$ 联合使用会降低紫外线透过率，增加辐照稳定性。同时 $\text{TiO}_2$ 的引入可以减少 $\text{CeO}_2$ 的引入量。 $\text{TiO}_2$ 的引入还有助于降低玻璃的黏度，从而有利于玻璃的熔化和澄清。但 $\text{TiO}_2$ 含量过高会降低玻璃的可见透过率。 $\text{TiO}_2$ 含量一般保持在0.25%~2%（质量分数）的范围， $\text{TiO}_2$ - $\text{CeO}_2$ 总量控制在3.5%~7%（质量分数）的范围。

(3)  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ：提高玻璃的化学稳定性和抑制分相，但同时也提高玻璃的液相温度，引起辐射着

色。

(4)  $ZnO$ : 改善玻璃的化学稳定性, 辐射不着色, 但提高玻璃的液相温度。

(5)  $B_2O_3$ : 有利于玻璃的熔化和澄清 [ $>10\%$  (质量分数)]。

(6)  $Sb_2O_3$ : 有利于含铈硼硅酸盐玻璃的脱色。

(7)  $R_2O$ : 有利于玻璃的熔化和澄清, 但须控制引入量 (质量分数):  $Li_2O < 1.5\%$ ;  $Na_2O < 5.5\%$ ;  $K_2O < 5.5\%$ ; 总量  $< 6.0\%$ 。

UnRegistered