

弯弧硼硅防火玻璃参数及耐火性能研究

宋丽*, 白鸥#

北京格林京丰防火玻璃有限公司, 北京

收稿日期: 2022年8月10日; 录用日期: 2022年9月13日; 发布日期: 2022年9月20日

摘要

硼硅玻璃具有许多优异特性, 如软化点大于820°C、膨胀系数低(是普通玻璃的1/3~1/2)、重量轻、硬度高、高透光率、无自爆等杰出的安全防火优异性能, 已被广泛应用于现代建筑中。本文对弯弧硼硅防火玻璃的耐火性能进行了探索, 依据硼硅玻璃特性, 改进设备工艺, 摸索出弯弧硼硅玻璃的加工要点及参数, 最终将建筑中常用的6 mm、8 mm弯弧硼硅玻璃经加工后可通过2小时耐火完整性检测, 同时满足国家安全玻璃的标准。

关键词

防火玻璃, 弯弧, 硼硅

Study on Parameter and Fire Resistance of Curved-Arc Borosilicate Glass

Li Song*, Ou Bai#

Beijing Greenjif Fireproof Glass Co., Ltd., Beijing

Received: Aug. 10th, 2022; accepted: Sep. 13th, 2022; published: Sep. 20th, 2022

Abstract

Borosilicate glass has many excellent characteristics, such as softening point greater than 820°C, low expansion coefficient (1/3 - 1/2 of clear glass), light weight, high hardness, high light transmittance, no self explosion and other excellent safety and fire protection properties. It has been widely used in modern buildings. In this paper, the fire resistance of curved-arc borosilicate fireproof glass is explored. According to the borosilicate glass properties, the equipment technology was improved, and the processing points and parameters of curved borosilicate glass were ex-

*第一作者。

#通讯作者。

ploed. Finally, 6 mm and 8 mm curved borosilicate fireproof glass passed the 120 min fire resistance integrity test, and met the national safety glass standard at the same time.

Keywords

Fireproof Glass, Curved Arc, Borosilicate

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代建筑设计追求个性、突出新颖。近年来,国内外使用玻璃的异形、弯弧型建筑造型越来越多,对玻璃的制作要求越来越高,同时也对具有防火功能的异型、弯弧型玻璃的性能提出了挑战(图 1)。

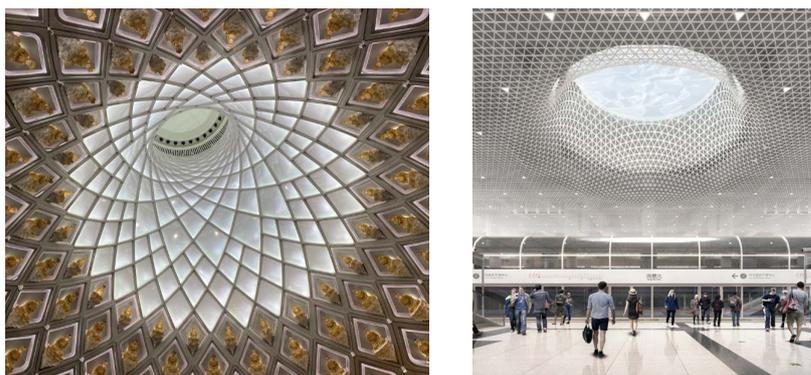


Figure 1. Buildings with fireproof curved glass

图 1. 有耐火要求的弧形玻璃的建筑

2. 硼硅玻璃国内外概况

在欧美,硼硅防火玻璃一直价格昂贵,设备大多由各厂家自行研发。由于弯弧防火玻璃需求少,一直没有专用设备。个别项目,也只是利用普通弯钢炉加工,应力、强度都不能达到高等级防火性能的要求,如竖直防火玻璃隔墙可以达到 2 小时,但弯弧后只能达到 30 分钟防火,图 2 给出的是肖特的实验结果[1]。



检测产品: 12mm弯弧硼硅防火玻璃

单块玻璃尺寸: 1370mm*1370mm

通过检测的防火时限: 30分钟

Figure 2. Experimental data by SCHOOT [1]

图 2. 肖特公司实验数据[1]

在国内, 随着《建筑设计防火规范》GB50016 [2]的落实, 防火玻璃用量激增, 2017年至今, 国产硼硅 4.0 玻璃的批量化生产, 打破了德国肖特公司多年来的技术垄断, 硼硅原片成本大大降低。我国 C 类单片防火玻璃从此有了最稳定的产品, 并解决了大量用于外墙的耐火窗、防火幕墙的即防火又耐候的问题。

在我司承接的防火玻璃项目中, 要求异形、弧形玻璃的建筑越来越多且防火时限要达到 1~1.5 小时。国内一直没有对弯弧型防火玻璃进行过测试, 也无此要求。多年来, 在使用弯弧防火玻璃的项目上都使用竖直防火玻璃的检测报告。弯弧硼硅防火性能目前没有检测仪器也无国家标准, 只能通过防火烧测验证。

3. 弯弧硼硅防火玻璃研究内容和实验情况

3.1. 研究内容

针对建筑工程急需 C 类 1~1.5 小时弯弧硼硅单片防火玻璃, 对弯弧硼硅防火玻璃的耐火性能进行实验, 从硼硅玻璃特性入手, 改进设备工艺, 摸索出弯弧硼硅玻璃的加工要点及参数, 最终将建筑中常用的 6 mm、8 mm 弯弧硼硅玻璃经加工后可通过 2 小时耐火完整性检测, 同时满足国家安全玻璃的标准。

3.2. 硼硅玻璃的特性及参数

硼硅玻璃与钠钙硅玻璃主要参数情况如表 1 所示。

Table 1. Main parameters comparison of high borosilicate glass (Fujing) and normal glass [3]

表 1. (富晶)硼硅玻璃与钠钙硅玻璃主要参数对比[3]

参数产品	软化点(°C)	膨胀系数 ($\times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$)	密度(g/m^3)	弹性模量 ($10^3 \text{ N}/\text{mm}^2$)
硼硅 4.0 玻璃	851	4	2.28	68
钠钙硅玻璃	720	9.5	2.5	68

硼硅玻璃特性:

- ◆ 耐热: 玻璃软化点高;
- ◆ 耐热冲击: 低的膨胀系数, 是普通玻璃的 1/3~1/2;
- ◆ 重量轻: 密度: 2.2~2.3 g/cm^3 ;
- ◆ 硬度高: 莫氏硬度 6;
- ◆ 化学稳定性高: 低碱玻璃。

硼硅玻璃的高熔点、低膨胀给弧形玻璃不仅是在加工工艺上增加了难度, 同时也在耐火性能以及检测方式上给我们带来了新的研究课题。我司有 15 年加工平板硼硅玻璃的经验及关键参数和设备, 与建研院防火所合作, 近 2 年来进行了多次弯硼硅玻璃系统的耐火性能测试, 利用测试数据进行设备工艺的不断改进, 最终完成了 C 类单片弯弧防火玻璃 2 小时的耐火性能检测, 弯弧夹胶 C 类 1.5 小时的耐火性能检测, 并加工后碎片颗粒度达到国家安全玻璃标准[4]要求(5~12 mm 厚玻璃, 最少碎片数 40 粒, 50 × 50 mm 区域内), 此弯弧硼硅加工技术达到世界领先水平。

3.3. 弯弧硼硅防火玻璃耐火性能影响因素

3.3.1. 加工弯弧硼硅防火玻璃的尺寸误差及边部精磨效果

单片防火玻璃在遇火时, 5 分钟之内温度迅速上升到 550°C, 弯弧玻璃与框架的吻合度相差较大时或玻璃边部有微裂纹及尺寸稍大等, 都会在瞬间引起玻璃炸裂。

3.3.2. 提升加工弯弧硼硅防火玻璃的钢化程度及应力均匀度

钢化程度不够, 耐火时限很难达到 1~1.5 小时, 加工后碎片颗粒度也难达到国家安全玻璃标准; 应力不均匀, 烧测 10 分钟之内极易炸裂。

3.4. 实验情况

3.4.1. 基片的预处理控制, 保障防火玻璃的尺寸误差及边部精磨效果

对于弯钢硼硅玻璃单片, 不仅他的尺寸精度比平面基片要高, 其曲线边的加工要求也与平面玻璃完全不同。特别是弯钢化夹层玻璃的两片基片, 其中一片为普通玻璃, 如尺寸偏差过大(对角线差 $> 2 \text{ mm}$), 同种工艺条件弯钢化后两片玻璃重叠时局部间隙很大(超过 4 mm), 根本无法进行夹层加工。基片玻璃曲线边, 如只像平面玻璃一般做粗磨并两面倒角 $1 \times 1 \text{ mm}$ 处理, 则约有 6% 以上弯钢化玻璃出现长度 2.5 mm 以上的裂纹, 其比例随玻璃基片厚度的增加而迅速上升。

我司针对曲面特别是夹胶基片的尺寸, 全部要求控制在单片及成对配套玻璃对角线小于 0.5 mm , 长度尺寸控制在 1 mm 公差以内。这样一来, 尺寸对钢化后的吻合间隙能控制在 $1.0\sim 1.2 \text{ mm}$ 之间, 基本满足夹层加工需求。对于曲线边处理, 我们使用曲线边精磨抛光及适当加大外弧的倒角尺寸的做法, 并减慢磨边速度, 这样可以大大减少经弯钢化后出现的微裂纹。且做夹胶玻璃时提高了 2 片玻璃的吻合度。

3.4.2. 优化改进钢化炉性能, 确保玻璃高温加热及高压冷吹均匀

影响弯弧硼硅玻璃耐火性能的关键因素: 是如何提高弯弧玻璃的钢化程度, 使其应力均匀。钢化程度是衡量钢化玻璃性能的重要标志之一。钢化程度越高, 内应力越大, 玻璃的抗冲击强度越大, 抗火强度越大, 破碎后的颗粒尺寸也就越小。钢化程度是玻璃冷却前加热温度的函数, 它和玻璃的加热温度成正比, 在一定范围内, 加热温度越高, 钢化程度越高; 在热学方面, 钢化程度实际上有沿玻璃厚度方向分布的温度梯度表征; 在力学方面, 钢化程度由内应力分布特征表示; 可以把钢化程度理解为“ 1 cm 光程内的光程差”; 在其他条件相同时, 钢化程度与玻璃的冷却程度成正比, 冷却程度越高, 玻璃的钢化程度越高。

硼硅 4.0 玻璃钢化程度同普通玻璃钢化类似, 但硼硅玻璃软化点大于 820°C (不同厂家软化点有差别), 膨胀系数是普通玻璃的 $1/3\sim 1/2$, 因此它的性能决定了钢化时需要更高的温度及更高的风压, 以提高它的钢化程度。

依据硼硅玻璃的性能, 我司对设备进行了优化改造:

- 1) 前加温段由长期耐温 $600^\circ\text{C}\sim 700^\circ\text{C}$ 配件调改至耐温 $700^\circ\text{C}\sim 820^\circ\text{C}$;
- 2) 对炉内各温区控制保证其玻璃在加热的过程中获得均匀受热;

由于平板玻璃加热软化至形成曲面的加工过程中, 玻璃质量特别是外观质量会受到很大的影响, 故保证玻璃受热时得到较均匀的热量, 显得十分重要。因设备的局限性, 钢化炉内加热区难以做到区域温度控制, 根据平板玻璃成弧的特性, 则要求加热区各部分温度相对稳定, 这样就需要对炉内各温区进行调整。具体做法是: 沿炉内中心线与两侧温度恒温控制, 是中心线区域的温度与两侧温度、炉内上下部位温度保持一致。我们对钢化设备的加热段进行了调整, 适当将加热炉周边易出现热量散失的部位增加热源, 确保炉内热量的均匀, 并增加了温度监控偶。通过实时调控, 玻璃在较短时间内获得均匀热量, 使玻璃软化均匀, 在迅速成形冷却时得到较佳的成形效果和良好的均匀内部应力, 使产品强度得到保证。

- 3) 冷吹风压加大到 $14,000\sim 15,000 \text{ Pa}$ 。

3.4.3. 根据不同厚度的玻璃及膨胀系数、软化点, 摸索确定钢化参数

鉴于多年加工硼硅 4.0 平钢化的经验, 摸索出其加工参数见表 2:

Table 2. Table of machining parameters for different thicknesses**表 2.** 不同厚度钢化加工参数表

项目/ 厚度	加热时 间(S)	上部温 度(°C)	下部温 度(°C)	钢化 时间 (S)	冷却时 间(S)	上炉体 平衡风 时间(S)	下炉体 平衡风 时间(S)	上通 过段 距离 (mm)	下通 过段 距离 (mm)	上冷却 段距离 (mm)	下冷却 段距离 (mm)	风压 (Pa)
6 mm	380~480	725~730	715~720	5	90~120	5~50	5	15~16	9~10	14.5~15.5	13.5~14.5	13,000
8 mm	500~620	726~730	716~720	5	130~180	5~50	5	14~15	10~11	13.5~14.5	15.5~16.5	12,000

研究的重点在以上硼硅玻璃平钢化参数的基础上, 摸索出弯弧硼硅玻璃的加工及防火性能。

不同厂家生产的硼硅 4.0 浮法玻璃, 因配方、工艺不同, 其成分含量、膨胀系数、软化点都稍有不同, 经过同炉平钢化同加工参数的实验[5]见表 3:

Table 3. Test table of different borosilicate tempered glass**表 3.** 同炉平钢化加工参数

厚度 (mm)	原片厂 家	钢化前应 力(MPa)	钢化后应 力(MPa)	加热温度 (°C)	加热时 间(S)	颗粒度 (粒)	玻璃尺寸 (mm)	室外温 度(°C)	出炉速 度(S)
6	富晶	3.1	105.6	745 740	280	42	600 × 700	28	350
6	凯盛	2.9	106.4	745 740	280	38	600 × 700	28	350
6	肖特	2.8	128	745 740	280	87	600 × 700	28	350
6	富晶	3.8	113.5	745 740	280	76	450 × 580	25	220
6	凯盛	3.1	110.5	745 740	280	60	450 × 580	25	220
6	肖特	2.7	127.6	745 740	280	140	450 × 580	25	220
8	富晶	4.2	130.9	745 740	375	96	450 × 580	25	220
8	肖特	2.7	129	745 740	375	101	450 × 580	25	220

从以上数据中得出, 要达到防火强度及安全颗粒度要求: 各厂家玻璃对设备要求的加工难度排次如下: 凯盛 > 富晶 > 肖特。

因此弯弧防火玻璃的加工参照以上数据, 对不同厂家的原片要摸索不同的加工参数, 通过多次试验, 摸索出加工弯钢化硼硅玻璃的加工参数范围: 硼硅加工需要高温加热 730°C~810°C, 高风压冷吹 12,000~16,000 Pa。不同厚度, 板面规格, 参数有差, 见表 4 硼硅弯钢化参数与碎片试验表。

Table 4. Test table of bent tempered borosilicate glass processing parameters and glass fragment [5]**表 4.** 硼硅弯钢化参数与碎片试验表[5]

玻璃厚度 (mm)	原片生产厂家	软化点 (°C)	加热时间 (S)	加热温度 (°C)	高风压冷吹 (Pa)	碎片数
8	肖特	820	600	810	14,000	>80 粒
8	肖特	820	510	780	14,000	>65 粒
6	富晶	845	260	800	14,000	>50 粒

通过先后经过 5 次弯硼硅玻璃系统的耐火性能测试, 用第 1 次与第 2 次测试实验数据为基础, 进行

设备工艺的不断改进, 最终在国家建筑工程质量检验检测中心完成了 C 类 2 小时 6 mm 硼硅、8 mm 硼硅弧形单片防火玻璃、C 类 1.5 小时 8 白 + 1.52SGP + 8 硼硅夹胶防火玻璃的耐火性能检测试验并取得相关报告。

4. 结束语

弯弧硼硅防火玻璃的加工, 不同厂家、膨胀系数、软化点不同, 钢化参数不同, 软化点越高加工难度越大。

弯弧硼硅防火玻璃要达到更长时间防火稳定及破碎后的安全颗粒要求, 热弯炉高温要达 730℃~820℃, 风压要达到 14,000~16,000 Pa, 且温度吹风均匀。

基金项目

中国建筑科学研究院有限公司建筑安全与环境国家重点实验室/国家建筑工程技术研究中心开放基金资助课题(BSBE2020-3)。

参考文献

- [1] 王安春. 肖特公司产品简介[Z]. 2003.
- [2] 《建筑设计防火规范》GB50016-2018 [S].
- [3] 河北富晶特玻新材料科技有限公司. 富晶公司硼硅 4.0 检测报告[R]. 2017.
- [4] 中国建筑玻璃与工业玻璃协会. 制定.《建筑用硼硅酸盐防火玻璃》T/ZBH009-2019[S]. 2019.
- [5] 格林京丰实验基地. 富晶、凯盛、肖特硼硅 4.0 浮法玻璃加工参数试验数据[Z]. 2021.