

研
究
开
发屏蔽门体钢化玻璃结构
响应的有限元分析

李 成, 应寅琼, 苏会强, 熊煜宇

(宁波南车时代传感技术有限公司, 宁波 浙江 315021)



作者简介：李 成 (1977-), 男, 工程师, 主要从事地铁屏蔽门系统研发。

摘 要：基于ANSYS的程序语言APDL,建立了某屏蔽门系统中的钢化玻璃结构的参数化模型,考虑各种载荷形式,对钢化玻璃的承载特性进行了相关分析,并针对钢化玻璃的相关参数进行优化,得到了玻璃厚度、开槽尺寸和圆角等参数的最优解,为屏蔽门系统的设计及防护提供相关依据。

关键词：钢化玻璃;屏蔽门;结构有限元分析

中图分类号：TQ171.1⁺14;U231.4 **文献标识码：**A **文章编号：**1000-128X(2012)03-0026-04

Structural Analysis of Tempered Glass in PSD System Based on FEA

LI Cheng, YING Yin-qiong, SU Hui-qiang, XIONG Yu-yu

(Ningbo CSR Times Transducer Technique Co., Ltd., Ningbo, Zhejiang 315021, China)

Abstract: In this paper, the parametric model of a special tempered glass in a PSD system was built based on ANSYS APDL programs. Loading performances of tempered glass was analyzed according to different load styles, and relevant parameters were optimized such as the glass thickness, the size of the rectangle groove and the radius of the fillet, which provided advices for the protection and design of the PSD system.

Key words: tempered glass; PSD; structural FEA

0 引言

钢化玻璃因其高透明度、良好的隔声隔热性能及外观美观等性能被应用于屏蔽门门体中。门体钢化玻璃与门框通过结构胶粘结组成门体。钢化玻璃能承受风压载荷与挤压载荷,但城市轨道交通线路中应用的地铁站台屏蔽门系统在实际工作中还会受到其他各种载荷的作用,这些都会对屏蔽门门体钢化玻璃的结构及其使用特性产生影响^[1]。2011年7月,上海轨道交通10号线及11号线相继发生屏蔽门钢化玻璃突然爆裂事件,除了供应商提供的钢化玻璃存在质量问题的可能性外,门体钢化玻璃结构设计及开孔造成的局部应力集中等也可能影响屏蔽门的正常使用。因此对钢化玻璃的结构响应特性进行分析,如载荷对钢化玻璃工作性能的影响分析,玻璃相关参数的优化分析,对屏蔽

门门体钢化玻璃的结构设计改进及预防类似事故的发生具有重要意义。

本文以在建的宁波轨道交通1号线一期工程屏蔽门系统样机所采用的门体钢化玻璃为基础,基于ANSYS的程序语言APDL,建立钢化玻璃结构的参数化模型,通过参数化方式分析门体钢化玻璃在工况载荷作用下的力学性能,并对玻璃的相关参数(如玻璃厚度、开槽尺寸和圆角)进行优化分析,为屏蔽门钢化玻璃的强度校核提供依据。

1 钢化玻璃的力学特性分析

1.1 钢化玻璃的参数化模型

图1为屏蔽门样机单元,主要包括两扇标准滑动门(ASD)、两扇应急门(EED)、一个标准固定门(FIX)、门机梁单元、承重结构以及上部防沉降伸缩装置等。其中,门体主要由不锈钢门框及钢化玻璃组成,用于隔离站台与轨道。

收稿日期:2011-11-16

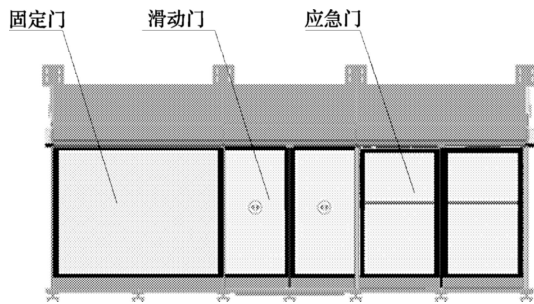


图1 屏蔽门系统机械结构图

以应急门钢化玻璃为基础模型, 对其进行结构响应分析。此钢化玻璃与门体之间通过结构胶相连, 在有限元分析中需设置合适位置的位移约束。图2为应急门钢化玻璃的实体模型和参数化模型。如图2(a)所示, 钢化玻璃在右侧边缘处有一小圆孔和一矩形开口槽, 会对钢化玻璃的应力分布产生一定的影响。图2(b)为玻璃的参数化模型, 其中的主要参数包括玻璃的尺寸参数和矩形开槽的尺寸参数等, 此外还包括其他的参数, 如玻璃和结构胶的材料属性参数及结构胶的位置参数等。通过APDL可以将这些参数设为可变量, 以便于实现变参数优化分析。

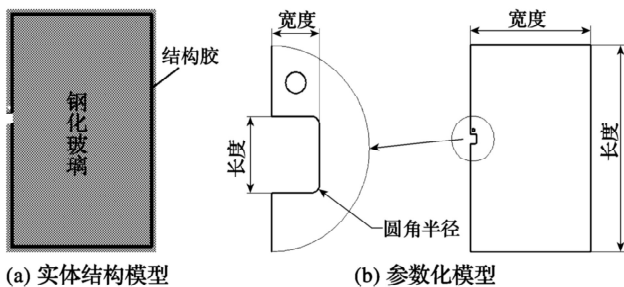


图2 应急门钢化玻璃模型

应急门钢化玻璃的主要尺寸及材料属性参数如表1所示^[3], 其中每个参数在程序中都设为可变量。

表1 钢化玻璃的尺寸及材料属性参数

尺寸参数	整体玻璃	长度/mm	宽度/mm	厚度/mm
		1929.5	1193.5	8
矩形开口		长度/mm	宽度/mm	圆角半径/mm
		89	59.5	5
材料属性	部件	弹性模量/MPa	泊松比	密度/kg·m ⁻³
	钢化玻璃	7.2×10 ⁴	0.21	2 560
	硅酮结构胶	5×10 ⁴	0.30	2 000

如图3所示, 门体钢化玻璃有限元模型中, 采用20节点六面体实体单元solid95, 利用扫略法将模型划分为六面体网格, 模型中的圆角和孔位置的网格需要细化, 如图3(b)所示。

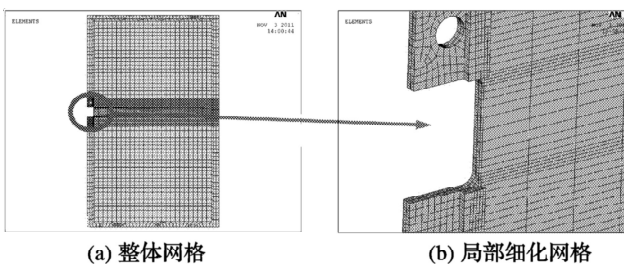


图3 应急门钢化玻璃有限元模型

1.2 钢化玻璃的边界条件及载荷设置

钢化玻璃与门体之间通过结构胶相连, 因此该分析模型中, 对结构胶与钢化玻璃两者进行粘结处理, 并在结构胶的表面施加全位移约束。屏蔽门门体钢化玻璃承受外载荷主要有风压、人群挤压载荷、冲击载荷和地震载荷等。在该分析中这4种载荷类型同时被考虑:

- ① 人群挤压载荷和冲击载荷以节点力的方式作用在1.125 m高处;
- ② 风压以面压力的方式作用于玻璃板表面;
- ③ 地震载荷以加速度方式作用于整个坐标系。

2 钢化玻璃的结构特性分析

2.1 钢化玻璃的结构变形及应力分布

图4为钢化玻璃的结构变形及应力分布情况, 载荷工况为: 风压1 000 N/m²; 挤压载荷1 500 N/m; 冲击载荷2 800 N, 时间0.08 s; 水平加速度0.2g; 垂直加速度0.1g。由图4(a)可知, 该工况下钢化玻璃最大变形量为4.3 mm, 发生在玻璃中心。由图4(b)可知, 钢化玻璃的剪切拉应力与剪切压应力数值大小相等, 呈对称分布。矩形开槽角点位置的剪切应力最大(25 MPa)。由图4(c)可知, 等效应力最大值为75 MPa, 发生在矩形开槽角点位置。由此可知, 在矩形开槽的位置会出现应力集中, 在设计及制造的过程中应注意开槽的相关尺寸。

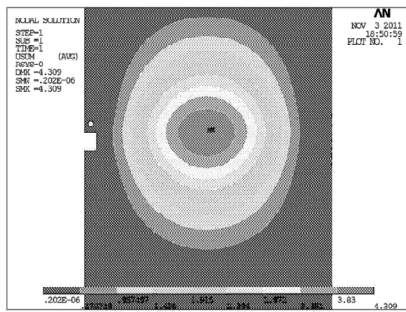
2.2 载荷对钢化玻璃结构响应的影响

载荷变化对钢化玻璃结构的影响是屏蔽门系统对钢化玻璃的一个重要要求。以表2中各载荷的值为参考, 分别改变风压载荷和挤压载荷的大小, 分析得到载荷对钢化玻璃结构特性的影响。

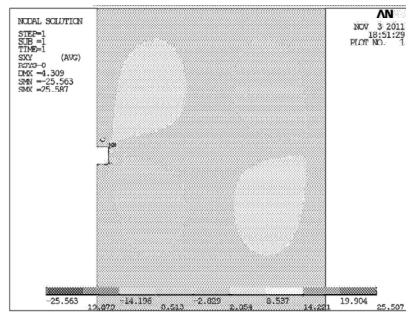
表2 屏蔽门门体钢化玻璃参考载荷

风压载荷	挤压载荷	冲击载荷	地震水平
1 000 N/m ²	1 500 N/m	2 800 N	水平加速度0.2g, 垂直加速度0.1g

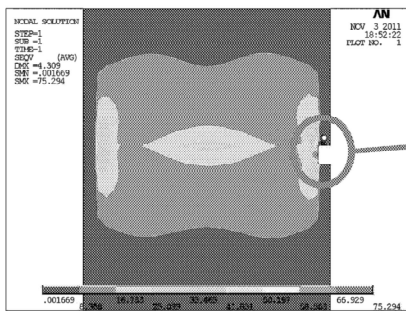
图5为不同载荷下钢化玻璃最大应力的变化曲线, 其他不变化的载荷取表2中的参考值。由图5(a)可知, 玻璃的最大应力与风压载荷之间为线性关系, 当风压载荷由-1 000 Pa增加到1 000 Pa时, 最大等效应力值由75 MPa增加到100 MPa, 最大剪切应力由26 MPa增加到34 MPa。由图5(b)可知, 玻璃的最大应力与挤压载荷之间为线性关系, 当挤压载荷由0增加到2 000 N/m时, 最大等效应力值由43 MPa增加到86 MPa, 最大剪切应力由15 MPa增加到29 MPa。因为冲击载荷与挤压载荷的位置及施加方式相同, 所以冲击载荷与玻璃应力之间的关系也是线性关系。由此可知, 在该工况条件下钢化玻璃处于弹性变形阶段, 玻璃的最大应力与载荷之间为线性关系。



(a) 钢化玻璃的结构变形



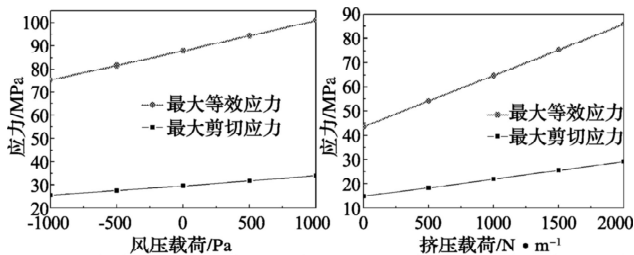
(b) 钢化玻璃的剪切应力分布



(c) 钢化玻璃的等效应力分布

图 4 钢化玻璃的结构变形及应力分布情况

(风压 $1\,000\text{ N/m}^2$, 挤压载荷 $1\,500\text{ N/m}$, 冲击载荷 $2\,800\text{ N}$, 水平、垂直加速度分别为 $0.2g$ 、 $0.1g$)



(a) 风压载荷对玻璃应力的影响 (b) 挤压载荷对玻璃应力的影响

图 5 不同载荷下钢化玻璃最大应力的变化曲线

2.3 钢化玻璃结构参数的优化分析

由于钢化玻璃在矩形开槽处存在应力集中现象, 所以需要对极限载荷下开槽的尺寸等参数进行优化分析。由以上分析可知各载荷与应力之间为线性关系, 所以采用的工作极限载荷为: 风压 $1\,000\text{ N/m}^2$, 挤压载荷 $1\,500\text{ N/m}$, 冲击载荷 $2\,800\text{ N}$, 水平加速度 $0.2g$, 垂直加速度 $0.1g$ 。需要进行优化分析的参数选取玻璃的厚度、矩形开槽的宽度、矩形开槽的圆角半径等, 其他的尺寸参数如表 1 所示。

2.3.1 玻璃厚度的优化分析

图 6 为上述工况下钢化玻璃的最大应力随玻璃厚度的变化曲线。如图所示, 当厚度由 4 mm 增加到 14 mm 时, 钢化玻璃的最大应力开始时急剧下降, 然后缓慢变化。这说明薄的钢化玻璃的承载能力较差, 但是当玻璃的厚度达到一定程度后, 随厚度的增加, 玻璃的承载能力提高很小。所以在选择或者设计玻璃时应注意: 玻璃的厚度不能太薄, 而且也不需要太厚, 在该工况条件下, 玻璃的最佳厚度应在 $8\sim 10\text{ mm}$ 之间, 因为该厚度的钢化玻璃既可以有效地降低应力, 又可以防止

超重等, 还能避免不必要的材料消耗。

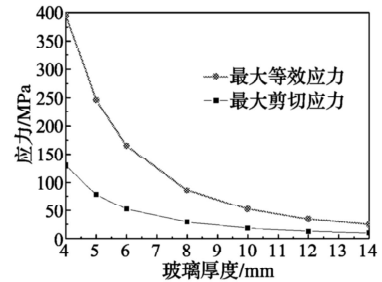


图 6 钢化玻璃的最大应力随厚度的变化曲线

2.3.2 矩形开槽圆角半径的优化分析

图 7 为上述工况下钢化玻璃的最大应力随矩形开槽圆角半径的变化曲线。如图所示, 当厚度由 2 mm 增加到 15 mm 时, 钢化玻璃的最大应力首先急剧下降, 然后缓慢变化。这说明半径较小的圆角不能很好地解决应力集中的问题, 当圆角半径增大到一定程度时, 应力集中得到消除, 但当圆角半径进一步增加时, 应力的变化不再明显。设计中要同时考虑到实用和美观, 所采用的圆角既要有效地减小应力, 同时又不影响外观, 由此可知该工况下 $7\sim 10\text{ mm}$ 为最佳圆角半径范围。

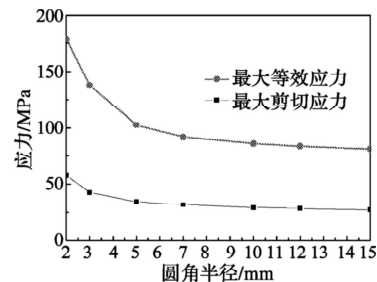


图 7 钢化玻璃的最大应力随矩形开槽圆角半径的变化曲线

2.3.3 矩形开槽宽度的优化分析

图 8 为上述工况下钢化玻璃的最大应力随矩形开槽宽度的变化曲线。如图所示, 当开槽宽度由 30 mm 增加到 90 mm 时, 钢化玻璃的最大应力先逐渐上升, 到 70 mm 处达到最大, 然后开始下降。其主要原因是开槽的宽度影响了矩形开槽与结构胶之间的相对位置, 如图 9 (a) 所示。

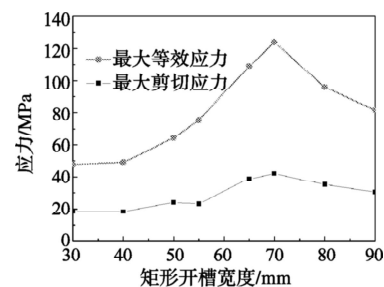


图 8 钢化玻璃的最大应力随矩形开槽宽度的变化曲线

图 9 为不同开槽宽度时矩形开槽和结构胶的相对位置。由图 9 (a) 可知, 当开槽的宽度在 $30\sim 40\text{ mm}$ 时, 开槽的夹角距离结构胶的位置较远, 所以应力变化较小。

随着开槽的宽度逐渐增大, 夹角逐渐靠近结构胶, 因为结构胶的一面被固定, 所以当夹角处于结构胶附近时, 应力会明显上升。当宽度到达70 mm时, 应力达到最大124 MPa。图9(b)为此时开槽夹角处的等效应力分布情况。由此可知, 结构胶对玻璃的应力分布影响较大, 设计中需要注意尽量使结构胶远离矩形开槽的夹角位置, 以免引起较大的应力, 致使钢化玻璃破坏。

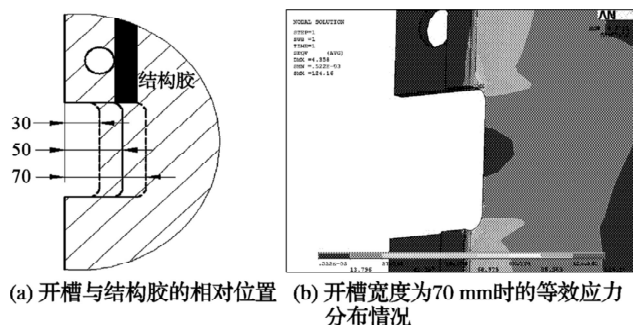


图9 不同开槽宽度时矩形开槽和结构胶的相对位置

3 结语

本文利用APDL语言程序建立了屏蔽门钢化玻璃的参数化有限元分析模型, 考虑了各种载荷形式, 对钢化玻璃结构特性进行了分析, 并针对钢化玻璃的相关参数进行优化分析, 得到了以下结论:

①钢化玻璃的最大应力与各载荷之间为线性关系, 说明钢化玻璃在其工况载荷下的承载特性处于弹性范围内。

②钢化玻璃的应力随玻璃厚度的变化比较明显。薄的钢化玻璃的承载能力较差, 但是当玻璃的厚度达到一定程度后, 玻璃的承载能力提高很小。在选择或者设计玻璃时应注意: 玻璃的厚度不能太薄, 以有效地降低应力, 且也不需要太厚, 以防止超重等, 避免不必要的材料消耗。在该工况条件下, 玻璃的最佳厚度应在8~10 mm。

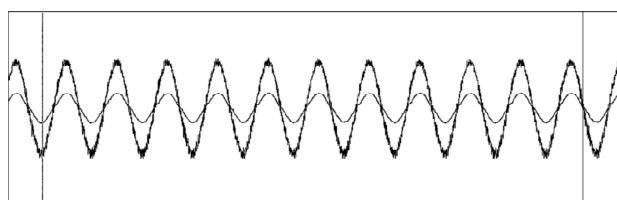
③适当的矩形开槽圆角可以解决钢化玻璃的应力集中问题。半径较小的圆角对解决应力集中的帮助较小, 圆角半径增大到一定程度时, 应力集中得到消除。设计中要采用适当半径的圆角, 既要有效地减小应力, 又不影响其外观。该工况下7~10 mm为最佳圆角半径范围。

④起固定作用的结构胶对钢化玻璃的应力影响较大, 设计中应尽量避免结构胶靠近矩形开槽的夹角位置, 以免引起较大的应力, 导致钢化玻璃破坏。

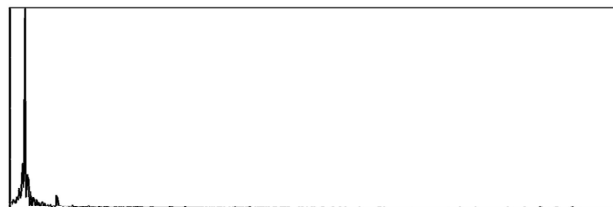
参考文献:

- [1] 陈韶章. 地下铁道站台屏蔽门系统 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 36-39.
- [2] 龚曙光, 谢桂兰, 黄云清. ANSYS 参数化编程与命令手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 1-2.
- [3] 夏国华, 朱锦杰, 童树庭. 平板玻璃钢化有限元数值分析 [J]. 玻璃与搪瓷, 2008, 36(5): 2-10.

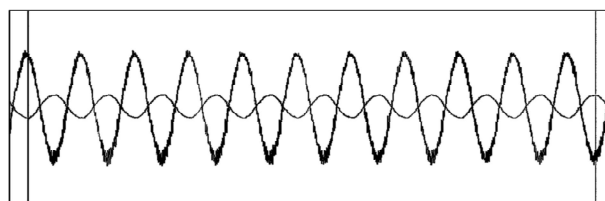
(上接第16页)



(a) 牵引时输入电压 u_s 和输入电流 i_s 波形



(b) 牵引时输入电流 i_s 的谐波分析



(d) 制动时输入电流 i_s 的谐波分析

图5 牵引制动时变流器数据图

4 结语

①单相四象限变流器输入电流 i_s 的谐波分布情况和PWM波电压 u_{AB} 的谐波分布情况完全一致, 只是其幅值将随着谐波次数的增加而更迅速地减少。

②变流器在牵引和制动工况下, 输入电流 i_s 的谐波

分布情况并无差异。

参考文献:

- [1] 张志学. 单相电压源PWM变流器的谐波分析 [J]. 变流技术与电力牵引, 2006(5).
- [2] 刘凤君. 正弦波逆变器 [M]. 北京: 科学出版社, 2002.