

文章编号:1671-6833(2009)01-0101-05

真空玻璃真空度在线检测技术与应用

刘小根¹, 包亦望¹, 宋一乐², 庞世红¹, 邱 岩¹

(1. 中国建筑材料科学研究总院 国家绿色建材重点实验室, 北京 100086; 2. 武汉大学 土木建筑学院, 湖北 武汉 430072)

摘 要: 采用光弹法和动态法在线检测真空玻璃的真空度。试验测试表明, 通过光弹仪可以观测到真空玻璃支撑物与玻璃支撑点处因应力集中而产生的应力光斑, 而且随着真空度的提高, 应力光斑直径也增大。同时, 采用动态法测得的真空玻璃的固有频率也随着其真空度的增大而增大。对该两种方法的原理、检测过程及工程应用进行了分析, 该两种方法特点是操作简单, 结果直观可靠, 易于实现真空玻璃实际工程在线检测。

关键词: 真空玻璃; 真空度; 光弹法; 动态法

中图分类号: TU 502 **文献标识码:** A

0 引言

作为一种新一代节能环保玻璃, 真空玻璃板由于其具有优良的透光、隔热、隔声和保温性能, 近几年来得到了快速发展与广泛应用, 其应用范围涉及到凡需要透光、隔热、隔声和保温及新能源开发、利用和节能的环境、领域、行业等方面。真空玻璃是将两块玻璃四边用玻璃材料或树脂材料密封而成的, 两层玻璃之间设置“支撑物”保持为 0.02~0.03 mm 的真空间隙。由于真空玻璃优良性能完全取决于两片玻璃之间的真空层, 要保证真空玻璃性能完全发挥, 其真空度至少应保证在 10 Pa 以下^[1], 一旦真空层真空度衰变或损失, 那么真空玻璃的性能将大大受到影响甚至完全失去其功能, 因此真空玻璃在服役期间的性能持久性与稳定性是特别重要的。由于真空玻璃在使用过程中容易受到外界环境的腐蚀与外力冲击作用, 加速真空玻璃的老化甚至破损, 从而失去其使用功能。因此, 切实周期性地加强对既有真空玻璃真空度的检测与监测, 是评价真空玻璃的使用健康状况及其使用寿命, 保证节能建筑节能功效所必须的工作内容。

由于真空玻璃真空度损失用肉眼是完全觉察不到的, 其相应的质量评价目前国内尚无相应的标准, 更无相应的测试方法。对成品真空玻璃的

质量检测, 特别是服役期间如何在线评价真空玻璃的真空度保有量是保证真空玻璃的扩大应用与继续发展所必须做的一项研究课题。已有的采用热辐射或声传递方法检测真空玻璃的真空度操作复杂, 且无法实现在线检测。笔者分别提出了采用光弹法和动态法, 用于现场在线检测真空玻璃的真空度, 评价服役中真空玻璃的真空度保有状况, 对指导真空玻璃工程的实际应用有一定的意义。

1 光弹法检测

光弹法是实验应力分析中的一种基本方法, 是基于力学基础之上的, 在介绍该方法前, 首先对真空玻璃内部应力分布状态作简单的分析。

1.1 真空玻璃支撑应力分析

双层真空玻璃在外部大气压作用下, 将产生很大的应力和变形。为保证玻璃不因大气压而产生过大的应力, 在真空玻璃内部放置许多金属支撑物如图 1 所示, 玻璃与支撑物相互作用抵消了玻璃内外大气压差带来的附加外力。显然, 当大气压差越大时, 支撑物与玻璃的相互作用力越大, 而且支撑力的大小与气压差成线性比例关系。为分析真空玻璃支撑点处的应力分布特征, 根据真空玻璃结构特点, 可以将真空玻璃每点支撑区域划分为一个单元进行受力分析, 其一个单元的受力力学理论计算模型可简化为图 2 所示^[2-4]。

收稿日期: 2008-09-15; 修订日期: 2008-10-30

基金项目: 国际重大合作计划资助项目 (No. 2005DFA51010); 国家自然科学基金资助项目 (50672093; 50772103)

作者简介: 刘小根 (1976-), 男, 博士研究生, 研究方向: 无机材料的性能表征与评价。

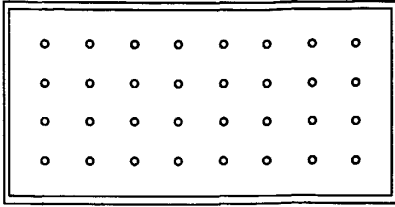


图 1 真空玻璃结构示意图

Fig.1 The structure scheme of vacuum glass

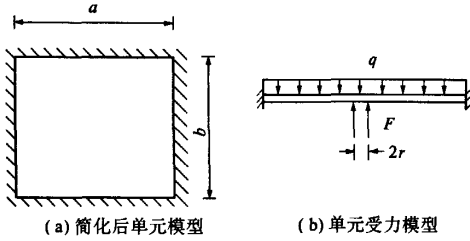


图 2 支撑应力模型图

Fig.2 The model of the brace stress

单元模型可认为是四边固支,在均布压力 q 及支撑力 F 的作用下,最大应力将出现在玻璃与支撑物支撑点处,计算公式计算如下:

$$\sigma_{\max} = \frac{3F}{2\pi t^2} \left[(1+\nu) \ln \frac{2\alpha}{\sqrt{1.6r+t^2} - 0.675t} + \beta \right] - \beta_1 \frac{qb^2}{t^2} \quad (1)$$

式中: a, b 分别为真空玻璃支撑点的横向和纵向距离; $F = qab$; t 为单片玻璃厚度; r 为支撑物半径; α, β, β_1 分别为系数,当 $a/b = 1$ 时, $\alpha = 0.0138$, $\beta = 0.1386$, $\beta_1 = 0.1386$.

根据上述计算公式,支撑点位置处产生的最大应力与真空玻璃支撑物排列距离、方式、支撑物大小,真空玻璃单片玻璃厚度及真空度有关.显然,当真空玻璃结构确定时,支撑处的最大应力应与玻璃的内外压差成正比.

根据上面的理论计算方法,笔者对一真空玻璃样品进行了计算,并同时对其进行了有限元分析,真空玻璃为钠钙普通玻璃, $E = 72 \text{ GPa}$, $\nu = 0.22$,玻璃单片厚度为 4 mm ,支撑物为不锈钢,直径为 0.4 mm ,支撑物长宽间距分别为 3 cm . 根据上面的理论公式进行了计算,计算结果为 $\sigma_{\max} = 11.057 \text{ MPa}$,有限元分析结果得到 $\sigma_{\max} = 11.9 \text{ MPa}$,两者误差相差 7.62% ,有限元得到的等效应力分布图见图 3. 由上面的计算及分析结果表明,支点处会产生应力集中,该处应力最大,由玻璃内外压差而带来的附加力基本上呈均匀状

态分布于真空玻璃内部的各个支点上,各支点处的最大应力均在玻璃设计强度允许范围内.

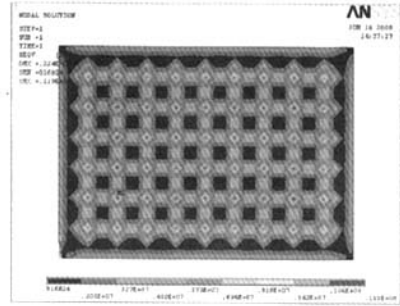


图 3 ANSYS 模拟真空玻璃支撑等效应力云图

Fig.3 Equivalent brace stresses in the vacuum glass simulated by ANSYS

1.2 光弹法检测基本原理

根据上面对真空玻璃应力分析,我们知道在真空玻璃支撑物与玻璃支撑位置处会产生应力集中,该位置玻璃应力最大.而且最大应力与玻璃的真空度有关,当玻璃真空度完全损失时,它们之间的作用力也完全消失.根据光弹性原理,材料在外力作用下会产生临时双折射现象,而这种现象是可以通过光弹仪观测得到的.图 4 为通过光弹仪观测到一片玻璃厚为 4 mm ,支撑点间距为 3 cm 的双层真空玻璃的应力光斑,光斑为梅花形状,应力光斑的形状与大小与该处的主应力值有关.

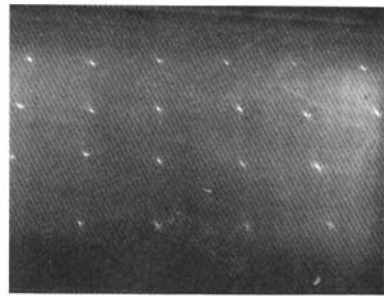


图 4 通过光弹仪观测到真空玻璃应力光斑图

Fig.4 Optical spots in the vacuum glass were observed by photoelastic device

我们知道,在支撑物与玻璃相互接触位置点处为三向应力状态,在该接触点取一微小单元体,在支撑物与玻璃的接触面上,有接触应力 σ_3 ,由于 σ_3 的作用,单元体将向周围膨胀,于是引起周围玻璃对它的约束应力 σ_1 和 σ_2 . 由于实际支撑物结构尺寸很小,因此,支撑点处可以把支撑力看作集中荷载,玻璃看作半无限大平面体.根据接触理论,垂直作用在表面原点上的集中力 P 在接触点附近平面内产生的应力按如下公式计算^[5]:

$$\sigma_x = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{(1-2\nu)}{r^2} \left[\left(1 - \frac{z}{\rho}\right) \frac{x^2 - y^2}{r^2} + \frac{zy^2}{\rho^3} \right] - \frac{3zx^2}{\rho^5} \right\} \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{(1-2\nu)}{r^2} \left[\left(1 - \frac{z}{\rho}\right) \frac{y^2 - x^2}{r^2} + \frac{zx^2}{\rho^3} \right] - \frac{3zy^2}{\rho^5} \right\} \quad (3)$$

$$\sigma_z = \frac{3P}{2\pi} \frac{z^3}{\rho^5} \quad (4)$$

其中, $\rho = (x^2 + y^2 + z^2)^{\frac{1}{2}}$, $r^2 = x^2 + y^2$.

显然,接触点附近处的应力状态中: $\sigma_1 = \sigma_x$,
 $\sigma_2 = \sigma_y$, $\sigma_3 = \sigma_z$.

根据光弹性原理,在等差线上,条纹存在如下关系^[6]

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{\lambda}{C} \frac{N}{d} \quad (5)$$

式中: C 为应力光学常数; λ 为光波波长; d 为玻璃厚度; N 为条纹值.

由公式(2)及(3)可知

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \frac{P}{2\pi} \left\{ \frac{(1-2\nu)}{r^2} \left[\left(1 - \frac{z}{\rho}\right) \frac{2}{r^2} + \frac{z}{\rho^3} \right] - \frac{3z}{\rho^5} \right\} \cdot (x^2 - y^2) \quad (6)$$

由公式(6)可以看出,在 x, y 平面内,当 $x = y$ 时, $\sigma_1 - \sigma_2 = 0$,没有应力条纹, $\sigma_1 - \sigma_2$ 分布形状为梅花型分布,因而应力光斑也应是梅花形状的,这与图5见到的应力光斑图类似.光斑是因光程差产生的,其大小和形状和该点的主应力差值有关,也和玻璃厚度有关,当用相同光源照射同样品种的真空玻璃,只要真空玻璃真空度发生衰变,那么就会导致接触点主应力差值发生改变,从而导

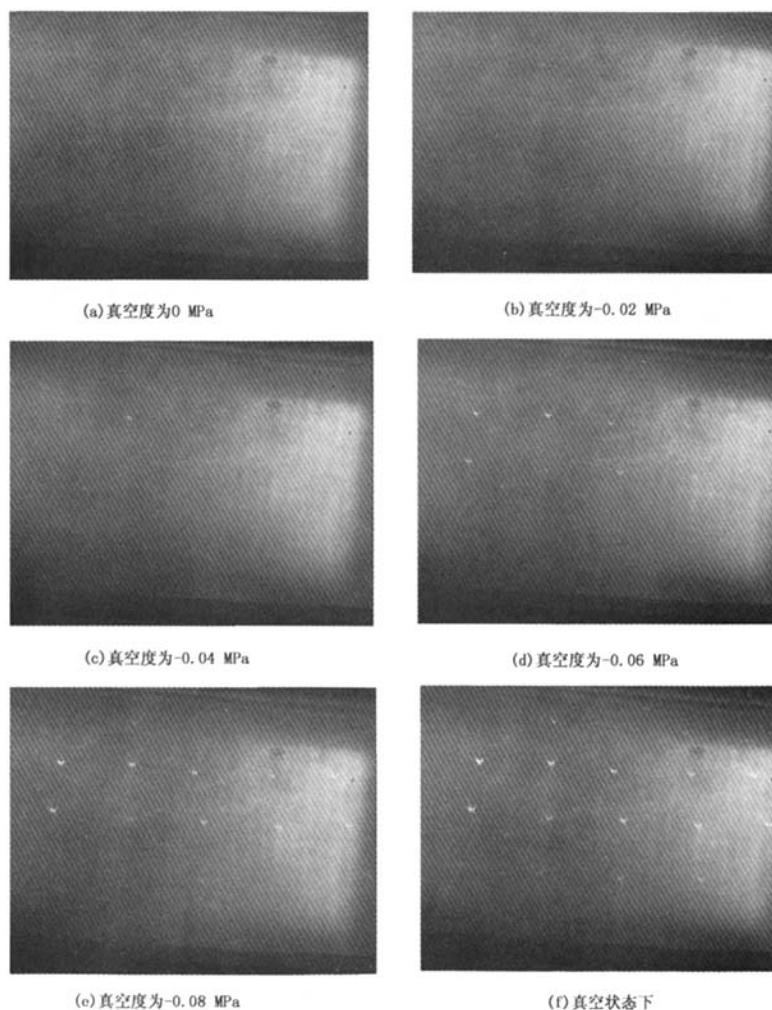


图5 不同真空度下的真空玻璃应力光斑图

Fig.5 Optical spots in the vacuum under difference vacuum degree

致光斑形貌大小改变。

1.3 光弹法在线检测真空玻璃真空度操作方法及应用

为实现在线对真空玻璃真空度检测,本方法需要一台便携式光弹仪,将光弹仪置于真空玻璃表面上,用肉眼可以观察到支撑应力光斑的大小和分布形状。通过横向比较法和纵向比较法可以对真空玻璃的真空度进行定性或半定量测量。

一般情况下,同一真空玻璃工程各真空玻璃的尺寸、规格及实际应用状态基本上是相同的,但当某块真空玻璃真空度衰变甚至完全损失时,则其应力光斑大小将相对于其它真空玻璃会变小,图5是通过试验观测到不同真空度下同一真空玻璃对应的应力光斑图,由图可以看出,不同真空度下,观测到的应力光斑从分布状态、尺寸大小和光斑亮度都不同。真空度损失越大,则应力光斑越小,越暗,有的支撑点处还看不到光斑。真空度完全失去时,应力光斑完全消失。

因此,通过光斑的分布及形貌,并与相同条件下完好无损的真空玻璃的光斑进行比较,就可以知道哪块真空玻璃的真空度是否出现衰变及衰变程度,特别是对那些真空度衰变严重甚至完全损失的真空玻璃,更能一眼识别出来,从而对其进行维修或更换。该方法最大的特点是操作简单,结果直观,检测价格低廉,易于对工程在线适时观测。

2 动态法检测

当真空玻璃真空度衰减或损失时,会导致真空玻璃的支撑物与玻璃相互支撑作用力发生变化,改变玻璃的支撑条件,从而使玻璃的固有频率发生改变。因此,根据此原理,我们可以采用动态法获得真空玻璃的固有频率,建立起真空玻璃固有频率与其真空度的关系,从而根据在线测得的固有频率来检测真空玻璃的真空度。

2.1 试验

为了探讨真空玻璃与其固有频率之间的关系,本文选择了一具有代表性的真空玻璃进行了试验。真空玻璃试样尺寸为 300 mm × 210 mm,玻璃单片厚度为 4 mm。为获得真空玻璃在自由状态下的振动固有频率,可将真空玻璃悬空吊起,通过敲击激振玻璃,振动信号由声音传感器采集并通过 INV306S-SP2 声压测试分析仪进行分析,然后将分析信号通过电荷电压滤波积分放大器处理,最后将处理好的信号直接输送到电脑,用专门软件进行分析与处理,得到玻璃的振动固有频率。

为改变真空玻璃的真空度,首先向真空玻璃的真空腔体充满气体,然后用真空泵抽取空腔中的气体,使空腔内真空度改变,空腔里的真空度可直接由与真空泵相连接的真空表读出。试验测量了不同真空度下对应的真空玻璃的固有频率。试验结果见图 6。

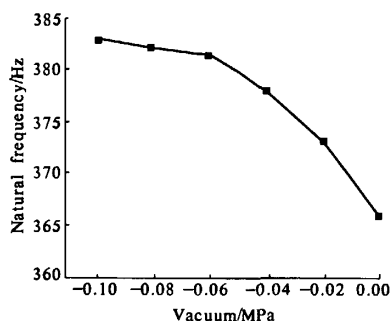


图6 真空玻璃真空度与其固有频率关系曲线
(300 mm × 210 mm)

Fig.6 Relationship between the vacuum degree and the natural frequency of the vacuum glass
(300 mm × 210 mm)

由上图的关系曲线可以看出,在自由振动下,真空玻璃的固有频率随着其真空度的降低而降低,且降低速率随真空度的减小而加快。真空玻璃的固有频率能够反应其实际的工作状态,且是一个较容易在线获得的动态参数。很显然,只要获得了某一状态下某块真空玻璃的固有频率,根据关系曲线,对应的真空玻璃真空度就出来了。

2.2 动态法在线检测真空玻璃真空度操作方法及应用

通过上面的试验分析得知,真空玻璃的固有频率随着真空度的降低而降低。为达到在线检测真空玻璃的真空度,我们首先需要建立起实际工程应用状态下真空玻璃固有频率与其真空度的关系曲线,获得评价标准。评价标准的确定必须要选择与待检测工程相同的且具有代表性的样品。现场检测时,就可以通过在线测量真空玻璃的固有频率,找到对应的真空度,从而得到真空玻璃的真空度保有量。评估标准的建立可以在现场进行,通过人为改变某块具有代表性的真空玻璃的真空度并测量相对应下的固有频率,也可以在试验室里建立起与实际工程工作状态相似的样本测量得到。该方法的应用特点是能够达到定量地检测玻璃的真空度,操作上也简单,易于实现在线适时检测和监测。不足的地方就是真空度与固有频率关系曲线确定不太容易,影响因素多,评价标准的准

确性直接影响到检测结果的精度。

3 结论

(1) 在外界环境腐蚀及外力冲击下, 真空玻璃真空度极易衰变或损失, 真空玻璃的真空度要达到一定的标准才能保证其功效及性能的完好发挥。

(2) 真空玻璃由于玻璃内外存在大气压差, 会导致玻璃与支撑结构支撑点处产生应力集中, 当玻璃真空度衰变或损失时, 将改变真空玻璃内部支撑物与玻璃的相互作用力的大小。

(3) 真空玻璃支撑物与玻璃相互作用产生的应力集中现象能够通过光弹仪检测到, 试验结果观测到真空玻璃的真空度与光弹应力斑的大小成正比关系, 当真空玻璃真空度完全消失时, 应力光斑也完全消失, 用该方法可以定性或半定量地在线检测到真空玻璃真空度的保有量或损失情况。

(4) 真空玻璃的固有频率能够反应真空玻璃的实际工作状态, 且是一个较容易在现场获得的参数。试验表明, 当真空玻璃真空度衰变时, 真空玻璃的固有频率也会降低。因此只要通过试验, 建

立起真空玻璃真空度与其固有频率变化之间的关系, 就能够达到在线测量真空玻璃的固有频率来检测真空玻璃真空度。

参考文献:

- [1] LLINS R E C, ISCHER - CRIPPS A C F, TANG J Z. Transparent evacuated insulation [J]. Solar Energy, 1992, 49(5): 386 - 388.
- [2] 张瑞宏, 顾 乡, 张 华. 真空玻璃应力支撑实验研究[J]. 真空科学与技术学报. 2006, 26(2): 455 - 458.
- [3] MARSH L S. Economics of greenhouses heating with a mine air assisted heat pump [J]. Trans. of ASAE, 1994, 37(6), 1959 - 1968.
- [4] 马承伟, 黄之栋. 连栋温室地中热交换系统贮热加温的试验[J]. 农业工程学报, 1996, 5(2): 160 - 164.
- [5] JOHNSON K L. Contact Mechanics [M]. Cambridge University Press, 1985: 56 - 57.
- [6] RASTOGI P K. Photomechanics [M]. Springer, 1996.
- [7] CHOPRA A K. Dynamics of Structures [M]. Prentice Hall, 2000.

Research on Online Measuring Technique and Application for Vacuum Degree of the Vacuum Glass

LIU Xiao - gen¹, BAO Yi - wang¹, SONG Yi - le², PANG Shi - hong¹, QIU Yan¹

(1. Key State Laboratory of Green Building Materials, China Building Material Academy, Beijing 100024, China; 2. Civil Engineering College, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In this paper, the photoelasticity method and dynamic method were put forward to detect the vacuum degree of the vacuum glass online. The experiments show that there is stress concentration at the contact point position which is caused by the interaction between the sustainer and the glass, and the optical spot which is caused by the stress concentration can be seen by the photoelasticity device, and the diameter of the optical spot increases with the increase of the vacuum degree. The experiments also show that its natural frequency increases with the increase of the vacuum degree to the vacuum glass. In this paper, the principle, detection process and engineering application to these two ways were also analyzed. The characteristics of the two methods are simple operation, result visual, reliability, so it easy to realize online test to the vacuum glass project.

Key words: vacuum glass; vacuum degree; photoelasticity method; dynamic method