

既有玻璃幕墙安全性能现场检测 新技术与评估标准

Safety detection new techniques and evaluation standards for
existing glass curtain walls

刘小根 吴洁 吴辉廷 包亦望

中国建筑材料检验认证中心有限公司 北京 100024

摘要 针对目前没有一种对服役中玻璃幕墙安全性能现场检测的有效方法,提出了基于光弹检测技术来检测钢化玻璃内部杂质及缺陷和振动测试技术来检测幕墙玻璃边界支承松动损伤状况,为解决幕墙玻璃突发性自爆或松动脱落并导致城市灾难事故的突出问题提出了一种新思路。阐述了该两种方法的检测原理、方法及实施步骤,建立起了相关的检测手段及评估标准,从而实现现场方便、快速地评价玻璃幕墙的安全性能。

Abstract Developing efficient detection and safety evaluation methods for glass curtain walls is still a challenging task. In view of the actual situation that spontaneous breakage or falling down of existing glass curtain wall, and resulted in a lot chaos, causing economic loss or human body laceration, the present paper proposes a polariscope scan method for detecting the impurities and defects of tempered glass, and giving a vibration method in order to identify possible imperfections in a typical curtain wall system. The detection principle, detection method and implementation step were elaborated in detail, and the detection evaluation was given also. Since frequency measurements can be cheaply acquired, the approach could provide an inexpensive glass curtain wall assessment technique.

关键词 玻璃幕墙 安全评估 光弹扫描法 动态法

Key words glass curtain wall safety evaluation polariscope scan method dynamic method

1 前言

玻璃幕墙作为一种新型的现代建筑装饰技术,自20世纪50年代从西方国家兴起,因其具有丰富多变的外装饰效果,在全球发展很快。我国幕墙建筑从1983年起步,上世纪90年代中期形成高潮,目前在北京、上海、广州等大城市相继建造了大量的幕墙建筑。调研报告显示,到2008年底,我国已建成了约1.5亿平方米的各式建筑幕墙(包括采光屋面),占世界总量的50%以上^[1]。然而,随着使用年限的增加及使用量的增多,玻璃幕墙的质量问题越来越突出,玻璃坠落事故时有发生,比如,2004年夏天,北京海淀剧院大厅外立玻璃墙的一大块玻璃砰然而落,成为真正的“爆炸新闻”。这些玻璃幕墙大多在繁华的市区,给人们生命及财产安全带来巨大威胁。因此,相关法规和政府均明令对玻璃幕墙安全状况进行定期“体检”。

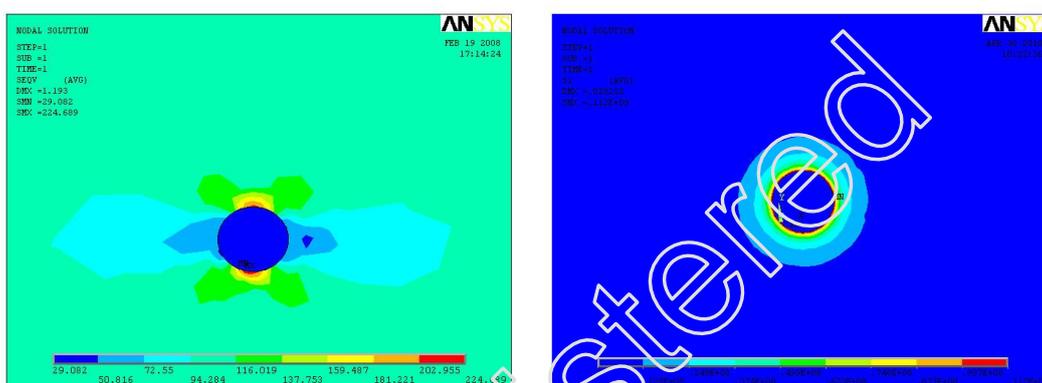
目前,既有幕墙现场安全性能检测方法与评估标准研究受到很多科研单位的重视并已经着手开展了这方面的研究工作^[2-8],但大部分研究成果还处于初级阶段,仍缺乏明确、具体的操作措施,没有形成统一的操作与评估标准。因此,研究既有幕墙现场检测方法,制定出一系列检测标准与技术规程,评定幕墙使用安全性能及其安全等级划分,对保证幕墙的使用安全与可靠性,保障人民生命财产安全都是非常紧迫和必须开展的工作内容。

影响玻璃幕墙安全性能主要有以下两个方面,一是幕墙钢化玻璃自爆造成玻璃破裂脱落,二是

因幕墙支承结构体系或粘接体系松动或粘接失效造成玻璃面板整体脱落。为此，本文针对这两个影响因素，提出了光弹扫描法检测钢化玻璃内部杂质或缺陷及动态法识别幕墙玻璃支承体系松动损伤，并从检测原理、方法、实施步骤及标准建立几方面进行了详细阐述。

2 检测钢化玻璃幕墙的杂质和缺陷-光弹扫描法

目前幕墙上使用的玻璃面板必须为钢化玻璃，但钢化玻璃自爆（一般概率为1/1000~1/3000）不可避免，因钢化玻璃突发破裂造成幕墙面板坠落伤人事故时有发生。引起钢化玻璃自爆一个最为关键的因数就是钢化玻璃内部存在缺陷，包含各种夹杂，微裂纹，空洞、表面缺陷、爆边等，其中因夹杂物（主要为硫化镍或单质硅）力学参数与玻璃本身参数不匹配，在温度和外力影响下往往会在夹杂物附近产生应力集中（见图1）。缺陷引起玻璃局部张应力是导致钢化玻璃突发破裂的主要原因。因此，现场检测出既有幕墙钢化玻璃面板内部杂质和缺陷并确定其危害程度，从而指导玻璃面板进行处理或更换是减小幕墙钢化玻璃自爆脱落伤人的唯一手段。



(a) 玻璃受拉力下夹杂物附近应力场

(b) 夹杂物附近玻璃热残余应力

图1 玻璃内部夹杂物附近应力场分布(第一主应力)

2.1 检测原理

钢化玻璃内部杂质和缺陷按其危险程度可分为2类，一类是在玻璃制造过程中杂质附近存在残余应力，另一类是没有残余应力，显然，有残余应力的杂质是导致钢化玻璃自爆最危险的缺陷。根据光弹性原理，杂质附近含有残余应力是可以通过光弹仪观测得到的^[9]，图2为通过光弹仪观测得到的玻璃内部杂质附近的残余应力光斑。因此，可根据光弹斑形貌及条纹值确定残余应力的分布及大小，从而评定杂质的危害程度。

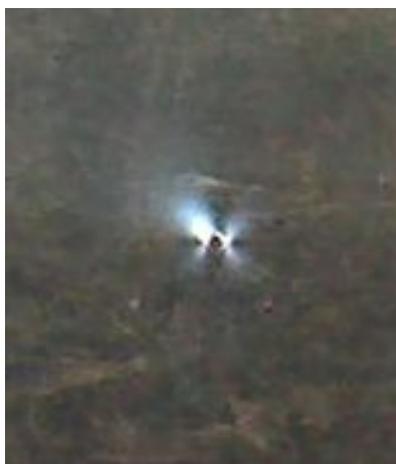


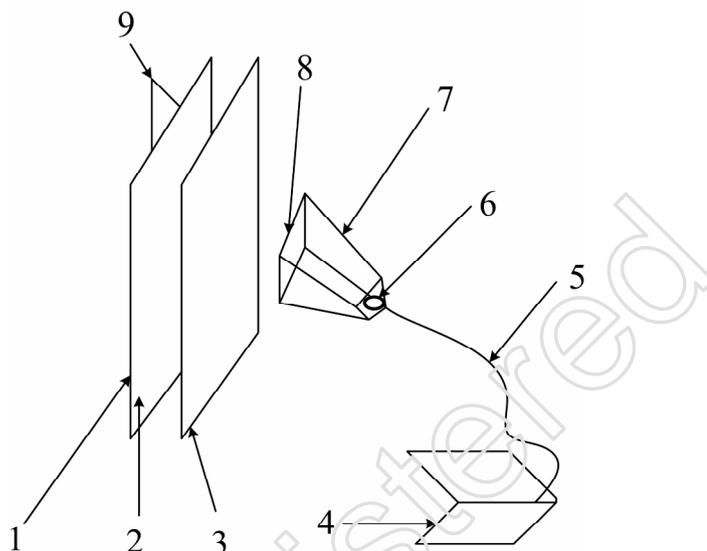
图2 偏振光弹仪观测到玻璃内部夹杂物附近残余应力光斑

2.2 检测装置

为达到方便快捷地检测幕墙钢化玻璃内部杂质与缺陷的残余应力，检测装置需包括透射式光弹仪系统、图像记录与传输系统以及应力分析系统。

1) 透射式光弹仪系统

透射式光弹仪系统包括一有机玻璃平板，其外表面经磨砂处理，另一面贴附一张或几张同方向的偏振片作为起偏片；透射式光弹仪系统还包括另一偏振片作为检偏片，该检偏片固定在一铝合金暗箱的前端面，位置和前述起偏片相平行并分置于待检测玻璃幕墙的两面，且起偏片和检偏片的偏振方向相互垂直。检测装置示意图见图3。



1—有机玻璃平板，2—起偏片，3—幕墙玻璃，4—计算机，5—数据传输线，
6—数码摄像机或照相机，7—暗箱盒，8—检偏片，9—挂钩

图3 检测钢化玻璃幕墙的杂质和缺陷的装置示意图。

2) 图像记录与传输系统

由高分辨率的数码摄像设备和数据传输导线组成，数码摄像设备固定在暗箱的后端底部。

3) 应力分析系统

应力分析系统计算机以及装载于计算机中的图像数据库，数码摄像设备通过数据传输导线与计算机连接。

2.3 检测步骤

1) 将带有偏振片的有机玻璃平板悬挂放置在某一单元幕墙玻璃外侧，将经磨砂处理后的有机玻璃面朝外，而将贴有偏振片的一面朝向幕墙玻璃一侧；

2) 将暗箱检偏器放置正对幕墙玻璃的待检区域，通过移动对玻璃幕墙进行分块扫描；

3) 利用暗箱中的数码摄像设备记录下扫描图像数据，并传输到与之相连接的计算机；

4) 计算机对获取的图像进行分析，确定应力分布状态，找出在应力分布图出现突变的奇异点；

5) 计算机对奇异点进一步分析，确定玻璃幕墙中的杂质和缺陷的类型、尺寸及准确位置。

2.4 杂质及缺陷危害风险评估

根据扫描图像中提供的杂质或缺陷的图片，与计算机中的标准图谱相比较，可以确定杂质或缺陷的类型及其杂质附近残余应力大小，从而有针对性地对杂质或缺陷进行风险评估，预测钢化玻璃自爆风险概率。

3 检测幕墙玻璃松动脱落风险-动态法

玻璃幕墙在使用过程中，其支承体系及粘接体系会随着幕墙使用年限的增加不断松动、老化并

最终失效导致玻璃面板整体脱落。因此，玻璃幕墙支承体系和粘结体系的松动和损伤识别是评价玻璃幕墙安全性能关键环节之一。

3.1 检测原理

玻璃幕墙在使用过程中，由于支承体系及粘结体系发生松动、损伤或老化，其实际表现为幕墙玻璃的支承边界条件发生松动损伤，并导致幕墙玻璃的刚度衰减，从而使玻璃的固有频率下降。因此，只要建立起幕墙玻璃固有频率与其边界支承松动损伤关系，就可通过幕墙玻璃固有频率来间接描述玻璃幕墙支承体系和粘结体系的损伤与老化程度，预测玻璃幕墙的脱落风险程度及抵抗外力剩余能力，进而评价玻璃幕墙的安全可靠性能。

3.2 幕墙玻璃松动程度与其固有频率变化之间的关系

采用自己初步研制的玻璃幕墙动态性能测试系统，测量幕墙玻璃的固有频率，图4为所测得的玻璃试样（300mm×300mm×4mm）在四边支承松动和紧固作用下的振动频谱图，由图可以看出，相对于紧固状态下，松动情况下的频谱图峰值曲线明显向左偏移，说明玻璃四边支承松动后其固有频率下降了。

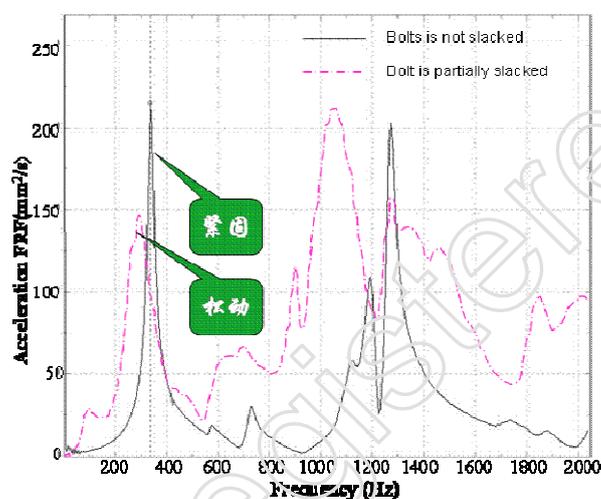


图4 四边支承紧固和松动状况下玻璃的振动频谱图

针对该块玻璃试样，研究了其四边支承紧固程度与玻璃振动固有频率之间的关系。图5是针对该试验特制的玻璃边界支承松紧可调节装置，是由一个钢底空腔及边部夹紧装置构成，试验时，将玻璃板试样放置于钢底框架上，用螺栓夹紧，玻璃与金属框架之间用弹性橡皮为支撑垫，玻璃四边支承松紧可以通过调节螺栓紧固力进行描述，紧固力大小可通过扭力扳手进行量化。

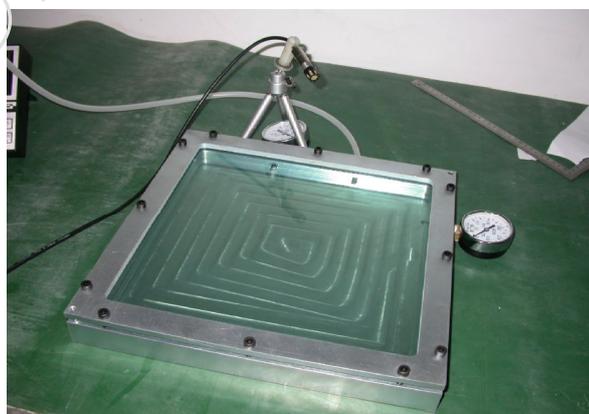


图5 玻璃四边支承可调节松紧装置

图6为试验获得的玻璃边界支承松紧与其固有频率之间的关系，由图可以看出，随着螺栓的松动圈数（紧固力衰减程度）增大，玻璃的固有频率不断降低，而且几乎呈线性关系。

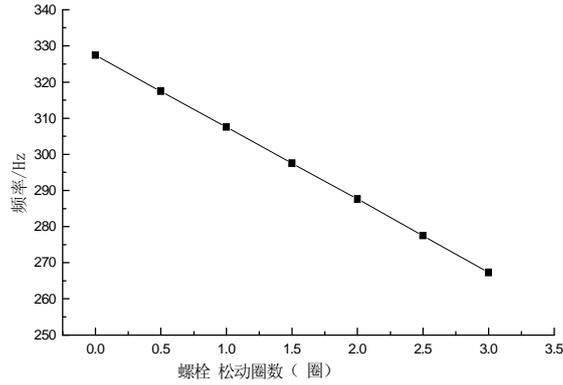


图6 不同螺栓紧固力下玻璃固有频率变化关系

进一步对该块玻璃四边不同边界支承条件（简支和固支，玻璃板可视为弹性矩形薄板）及不同螺栓紧固力对应的固有频率值（见表1）进行分析，可以看出所测得的玻璃板的固有频率处在低于玻璃板四边固支和高于四边简支对应的频率约20%的区间（由于实际中玻璃的边界固定是不可能完全四边固支或四边简支的，所以这大约离四边固支或四边简支理论频率20%左右的频率区间是无法测得到的）。随着玻璃四边紧固力的均匀增大，幕墙玻璃的固有频率也在这一区间均匀的递增。

表1 不同螺栓紧固力下玻璃板的固有频率

支撑条件	四边简支	螺栓紧固圈数 (圈)							四边固支
		0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	
固有频率(Hz)	219.0	267.3	277.5	287.6	297.5	307.5	317.5	327.4	398.0

上面试验结果表明可以通过测量玻璃的固有频率来识别该块玻璃的四边支承松紧状况。显然，相同条件下，当玻璃边界支承越松，则其固有频率越低。往往新建的玻璃幕墙由于其支承结构没有出现松动或老化，幕墙玻璃板支承紧固，对应的固有频率较大，而此时幕墙玻璃抵抗外力作用能力也较大，脱落风险也低。随着玻璃幕墙使用年限的增加，幕墙玻璃板边界因支承结构的老化，变形或破损而不断松动，幕墙玻璃对应的固有频率也不断衰降，此时幕墙玻璃抵抗外力作用能力也衰退，其脱落风险概率也大。

3.3 基于固有频率变化的玻璃幕墙安全等级划分方法与评估标准

对现有建筑构件的安全评估主要通过综合考虑其剩余寿命及价值从而决定构件是否应该被更换，以及在安全、经济上是否合理等，因此合理的评估方法很重要。由上面试验分析可知，来源于因支承体系，锚固体系和胶黏剂（结构胶）的松动，老化，开裂和变形等而引起的玻璃面板脱落的综合影响作用可表现为幕墙玻璃频率改变的单因素线性函数。因此，我们可以只简单地根据幕墙玻璃固有频率变化大小来识别幕墙因支承结构的老化和损伤程度，评价玻璃幕墙的健康状态及剩余寿命。

(1) 相对比较法

幕墙玻璃相互之间是一个单独的单元体，不同玻璃之间的安全性态会存在一定的差别，某块玻璃的破损或脱落基本上不会影响其他幕墙玻璃的使用。相对比较法是通过相互之间的比较，快速找出可能出现问题的幕墙玻璃，从而有针对性地对其采取安全加固或更换措施。

相对比较法是建立在同条件下的基础之上的，也就是说相互比较的幕墙玻璃应该是玻璃品种、形状尺寸、支承方式及材料、施工工艺等均应一样。对于同一工程的幕墙玻璃来说，基本上能满足上述几个条件（至少能分几个批次地满足），因此就给相对比较法提供了条件。

在完成现场测量所有需要检测的幕墙玻璃的频率后，将具有相同条件的幕墙玻璃分批比较，显然，频率越高的幕墙玻璃，其安全性越高，而对于那些频率明显偏低的玻璃，就应该引起注意，此

时，可对那些频率偏低的玻璃进行更加细致的观察和检测，找出可能出现问题的原因。

(2) 划分安全频率区间法

相对比较法能快速发现可能出现安全问题的幕墙玻璃，但该方法缺乏整体评估性，比如，我们获得了某栋大楼所有幕墙玻璃的固有频率，我们要如何知道该大楼的幕墙玻璃是否存在安全隐患，其安全等级如何，剩余寿命还有多少，是否需要采取维修加固甚至更换措施等。为此，我们提出了安全频率区间法，其基本思路就是针对某已知玻璃品种、结构、形状尺寸、边界支承条件的幕墙玻璃，对其安全等级事先按频率值的大小区间进行划分，当实测同条件下幕墙玻璃的频率处于哪个频率区间范围时，我们就认为该块玻璃处于这个频率区间对应的安全等级范围内。

欧洲学者提出了 EPIQR 和 MEDIC 两种方法评价建筑构件的可靠性，评估时把建筑物单元按 A_u 、 B_u 、 C_u 、 D_u 4个等级划分，其中： A_u 为可靠； B_u 为基本上可靠，能正常使用； C_u 为需要维修； D_u 为不能继续使用，必须立即采取措施^[10]。显然，用幕墙玻璃固有频率变化来识别玻璃幕墙的损伤程度，也可按4个级别进行划分，但准确确定分级标准（频率区间）是非常重要的。图7显示了按频率区间将玻璃幕墙划分成四个安全等级，此时需要确定幕墙玻璃的频率上限、A、B、C 和频率下限5个频率值。试验表明（经过大量试验证明），四边支承幕墙玻璃板固有频率处于四边简支和四边固支对应的固有频率之间，也就是说，支承越紧固，幕墙玻璃板的极限频率越接近于其在四边固支对应下的固有频率，相反，支承越松动，其对应的固有频率越接近于简支状态下对应的固有频率。因此，可以把幕墙玻璃在四边固支和简支对应下的固有频率作为评价玻璃幕墙安全等级的频率上下限值。

根据薄板理论，四边固支和简支板固有频率计算方法如下^[11]：

四边简支（频率下限值，rad/s）：

$$\omega = \pi^2 \left(\frac{1}{a^2} + \frac{1}{b^2} \right) \sqrt{\frac{D}{m}} \quad (1)$$

四边固支（频率上限值，rad/s）：

$$\omega^2 = \frac{504D}{a^4 b^4 m} (a^4 + b^4 + \frac{4}{7} a^2 b^2) \quad (2)$$

其中： ω —玻璃的固有频率（rad/s）， D —被测试样弯曲刚度， \bar{m} —每单位面积的玻璃质量， a —玻璃长度， b —玻璃宽度；其中 a 和 b 为测量值，弯曲刚度 D 的表达式为：

$$D = Eh^3 / 12(1-\nu^2) \quad (3)$$

其中： E —玻璃的杨氏模量； h —玻璃的厚度； ν —玻璃的泊松比。

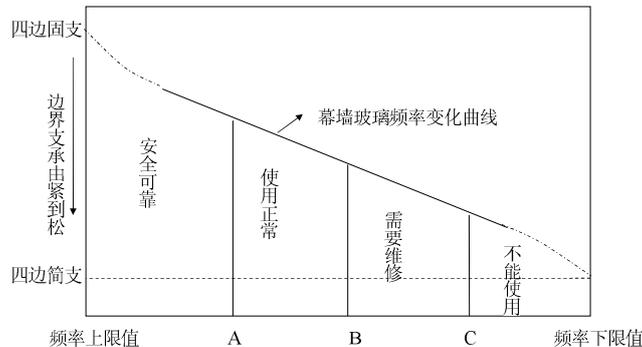


图7 玻璃幕墙可靠性评价安全等级划分

只要幕墙玻璃板的形状尺寸结构确定下来了，则玻璃幕墙分级标准的上下限值就确定下来了，下面最为关键的是确定 A、B、C 的频率区间值，这需要大量试验和工程检测及实践经验，科学地获得幕墙玻璃固有频率的衰降量及对应的玻璃幕墙失效概率或损伤程度，根据失效概率定级。当然，最为简便的方法是直接在试验室里建立起幕墙玻璃固有频率衰降与其承载外力能力下降量关系（或隐框幕墙玻璃固有频率与结构胶剥离强度关系），根据其承载力下降量确定幕墙的安全等级，直接获得安全频率划分区间。作者对不同建设年代的四边有框和隐框玻璃幕墙进行了大量的现场测量及试验室验证，给出表2的玻璃幕墙安全等级分级标准及对应的幕墙玻璃频率区间划分建议值。由于隐框玻璃幕墙的玻璃是完全只靠结构胶的粘结力附在附框上，因此其对应的安全频率划分区间与有框玻璃幕墙低。

表2 四边支承玻璃幕墙安全等级分级标准及玻璃频率区间

安全等级	分级标准	频率区间（有框玻璃幕墙）	频率区间（隐框玻璃幕墙）	安全状态
A_u	安全性能符合要求，不影响玻璃幕墙继续使用	\geq 下限频率150% \leq 上限频率	\geq 下限频率130% \leq 上限频率	安全 可靠
B_u	安全性能略低，尚不显著影响玻璃幕墙的继续使用	\geq 下限频率130% \leq 下限频率150%	\geq 下限频率120% \leq 下限频率130%	使用 正常
C_u	安全性能不足，已显著影响玻璃幕墙的继续使用	\geq 下限频率120% \leq 下限频率130%	\geq 下限频率 \leq 下限频率120%	需要维 修加固
D_u	安全性能严重不符合要求，已严重影响玻璃幕墙的继续使用	\leq 下限频率120%	\leq 下限频率	不能 使用

3.4 基于动态法的玻璃幕墙现场检测步骤

按如下流程完成：

1) 资料审查：包括玻璃幕墙的结构设计图纸，施工记录、进场材料检验合格证等审查等，查看幕墙是否设计合理，施工是否得当，建筑材料是否合格等。

2) 外观检测：针对玻璃幕墙结构体系的特点，外观检测应包括：a 玻璃的品种，玻璃面板是否有明显的缺陷，裂纹或破损；b 玻璃幕墙的结构胶或密封胶是否有出现明显的老化退色、龟裂、剥落等现象；c 幕墙锚固件和支撑体系是否有锈蚀。外观上有明显缺陷的，如面板有少数裂缝或多处破损、胶黏剂明显老化、五金件或支撑体系大面积锈蚀等，可以不进行下一步检验而直接采取相应的补救措施。当外观无明显缺陷时，可进行下一步检测；

3) 结构承载验算：利用现行的国家或行业规范和标准对建筑幕墙体系的各个构件进行计算校核看其是否满足设计要求，若不满足则要采取加固补强措施，如增加幕墙的分格、加厚玻璃、将横梁或立柱加粗等等。

4) 测量玻璃尺寸，确定玻璃支撑边界条件，计算玻璃固有频率分布范围，得到玻璃安全频率区间；

5) 给幕墙玻璃编号，测量玻璃振动固有频率（每块玻璃必须测量三次以上，每次测量值差不应超过5%），得到各编号玻璃的固有频率数据值；

6) 将得到的频率与标准安全频率进行比较，确定可能存在问题的幕墙玻璃编号；

7) 对有可能存在问题的幕墙玻璃进行加深，细致测量，找出存在的问题；

8) 根据幕墙存在问题的多少及严重程度，提出具体的补修或更换措施。对仍健康良好的幕墙玻璃，根据其频率的相对大小，结合综合评估结果，预测其剩余使用寿命，给出评估报告。

4 总结

既有玻璃幕墙的安全问题备受行业和政府重视，影响玻璃幕墙的安全性能各方面因素很多，本

文提出了光弹扫描法检测既有玻璃幕墙钢化玻璃内部杂质及缺陷和动态法检测玻璃幕墙支承体系或粘接体系松动老化程度,从而预测幕墙钢化玻璃自爆及因支承粘接体系失效造成玻璃面板整体脱落的风险概率,综合了影响玻璃幕墙安全问题各因素的检测手段。目前,该方法已逐步趋于成熟,但及需对其进行现场检测标准化,并形成相应的国家及行业标准,从而服务于我国的玻璃幕墙安全评估事业。

参考文献

- [1] 宋秋芝, 刘志海. 我国玻璃幕墙发展现状及趋势[J]. 玻璃, 2009, 209 (2) :29-31.
- [2] 张元发, 陆津龙. 玻璃幕墙安全性能现场检测评估技术探讨[J]. 新型建筑材料, 2002, 05:49-52.
- [3] 方东平, 李铭恩, 毕庶涛. 建筑幕墙的安全问题及评估方法[J]. 新型建筑材料, 2001, 04:12-15.
- [4] 辛达帆, 陆津龙. 使用中的幕墙玻璃评估方法的研究[J]. 建筑施工, 2004, 26(1) :64-67.
- [5] 陆津龙. DG/TJ08-803-2005 玻璃幕墙安全性能检测评估技术规程(试行)[s]. 上海: 上海市新闻出版.
- [6] WEGGLE DAVID, ZAPATA BRIAN, KIEFER MICHAEL J. Properties and Dynamic Behavior of Glass Curtain Walls with Split Screw Spline Mullions[J]. Journal of Structural Engineering. 2007, 133 (10) :1415-1425.
- [7] WILLIAM J, NUGENT M, MARK K, SCHMIDT. Preventing Failures in Metal and Glass Facades [J]. Forensic Engineering, 2008 (25) :540-549.
- [8] EFSTATHIADES Ch, BANIOPOULOS C. C , NAZARKO P , ZIEMIANSKI L. Application of Neural Networks for the Structural Health Monitoring in Curtain-Wall Systems[J]. Engineering Structures, 2007 (29) :3475 - 3484.
- [9] P. K. Rastogi. Photomechanics[M]. Springer, 1996.
- [10] 刘西拉, 左勇志. 基于Bayes方法的结构可靠性评估和预测[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(12) :2137-2141.
- [11] Eduard Ventsel, Theodor Krauthammer. Thin plates and shells-theory analysis and applications [M]. New York: Marcel Dekker. 2001. 57~58.

作者简介

刘小根 (liu xiao gen): 男 (1976.05—), 江西永丰, 博士, 研究方向: 无机材料的性能表征与评价。单位: 中国建筑材料检验认证中心有限公司 (China Building Materials Test and Certification Center Co. Ltd.)。通讯地址: 北京朝阳区管庄东里1号中国建筑材料科学研究总院检验验证中心研发中心 (西楼103)。邮编: 100024。

E-mail: xtlxg88@163.com。

吴洁 (Wu Jie): 高级工程师, 玻璃检测认证部副部长, 长期从事玻璃及特种玻璃检测、认证、标准制修订工作, 负责玻璃检测实验室及门窗节能性能测评实验室的管理。单位: 中国建筑材料检验认证中心有限公司 (China Building Materials Test and Certification Center Co. Ltd.)。

E-mail: wj@etc.ac。