

引用格式:连赛赛,刘小兰,王剑,等.既有建筑隐框玻璃幕墙检测与评价技术发展现状[J].工业建筑,2025,55(7):79-86. LIAN Saisai, LIU Xiaolan, WANG Jian, et al. Development Status of Detection and Evaluation Techniques for Hidden-Frame Glass Curtain Walls in Existing Buildings [J]. Industrial Construction, 2025, 55(7): 79-86 (in Chinese). DOI: 10.3724/j. gyjzG25031704

既有建筑隐框玻璃幕墙检测与评价技术发展现状*

连赛赛¹ 刘小兰¹ 王 剑¹ 逯 鹏^{2,3} 丁代伟⁴

(1. 天津城建大学, 天津 300384; 2. 中冶检测认证有限公司, 北京 100088; 3. 中冶建筑研究总院有限公司, 北京 100088;
4. 中国市政工程华北设计研究总院有限公司, 天津 300074)

摘 要 玻璃幕墙广泛应用于现代建筑,但其长期服役易因风荷载、温度变化等引发结构胶老化、脱胶等安全隐患。为此,系统梳理了国内外隐框玻璃幕墙安全检测技术与分析方法及评价体系的代表性成果。检测技术上,振动法通过固有频率变化率识别胶黏损伤;超声波法结合非线性系数实现损伤分级;红外检测可识别胶层热异常但易受环境干扰。分析方法上,可通过试验数据对玻璃幕墙安全性能进行评估,有限元模型则能凭借模态曲率定位脱胶损伤。评价体系方面,模糊综合评价整合多维指标,神经网络基于动力参数分类安全等级。针对现有检测精度不足和模型适应性差等问题,未来或许可从以下方面改进:结合振动、超声和红外技术提高检测准确性,研究胶黏剂老化与环境的关系预测长期性能,并开发智能实时监测系统,提升隐患预警能力。

关键词 玻璃幕墙;振动检测;红外线检测;超声波检测;层次分析法;模糊评价法

Development Status of Detection and Evaluation Techniques for Hidden-Frame Glass Curtain Walls in Existing Buildings

LIAN Saisai¹ LIU Xiaolan¹ WANG Jian¹ LU Peng^{2,3} DING Daiwei⁴

(1. Tianjin Chengjian University, Tianjin 300384, China; 2. Inspection and Certification Co., Ltd., MCC, Beijing 100088, China; 3. Central Research Institute of Building and Construction Co., Ltd., MCC Group, Beijing 100088, China; 4. North China Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Tianjin 300074, China)

Abstract: Glass curtain walls are widely used in modern buildings, but they are prone to safety hazards such as structural adhesive aging and debonding due to long-term exposure to wind loads and temperature changes. To this end, the representative results of domestic and foreign hidden frame glass curtain wall safety testing technology and analysis methods and evaluation system are systematically sorted out. For detection, vibration analysis identifies adhesive damage through changes in natural frequency, ultrasonic testing evaluates damage severity using nonlinear coefficients, and infrared inspection detects thermal anomalies in adhesives despite its sensitivity to environmental interference. In analysis, test data can be used to assess the safety of glass curtain walls, while finite element models can locate debonding damage through modal curvature. For evaluation, a fuzzy comprehensive method integrates multiple indicators, and neural networks classify safety levels based on dynamic parameters. Aiming to address the existing problems of insufficient detection accuracy and poor model adaptability, future research should focus on integrating vibration, ultrasonic, and infrared technologies, investigating adhesive aging in relation to environmental factors for long-term performance prediction, and creating intelligent real-time monitoring systems to improve early-warning capabilities for potential hazards.

Keywords: glass curtain walls; vibration detection; infrared detection; ultrasonic testing; Analytic Hierarchy Process (AHP); fuzzy comprehensive evaluation

* 天津市科技计划项目(23JCQNJC00110);甘肃省科技计划资助(23YFGA0038)。

第一作者:连赛赛,硕士研究生,主要从事隐框玻璃幕墙检测与评价方面研究。

通信作者:王剑,博士,副教授, avonlea@163.com;逯鹏,博士,正高级工程师, lupeng201501@126.com。

收稿日期:2025-03-17

0 引言

玻璃幕墙因其现代化的外观、较低的自重、优越的采光性能以及良好的保温特性受到广泛应用。随着中国经济的快速发展和城镇化的加速推进,越来越多的地标性建筑、异形结构和超高层建筑采用了玻璃幕墙,中国已成为全球最大的玻璃幕墙生产国和使用国。然而,随着使用年限的增加,既有玻璃幕墙长期受到复杂环境影响,如在风荷载、温度变化、阳光照射、雨水侵蚀甚至雷击等情况下,不可避免地会出现玻璃组件老化、副框锈蚀、连接松动等问题,这些问题严重影响了玻璃幕墙的安全性能,一旦发生损伤,将对人们的安全构成巨大威胁^[1](表1)。

根据副框在建筑外表面的可见性,玻璃幕墙可分为明框、半隐框和隐框3种类型^[2]。明框玻璃幕墙作为传统的构件式幕墙,应用广泛、性能可靠,其用铝框将玻璃面板固定,形成四边铝框的幕墙元件。隐框玻璃幕墙中,硅酮结构胶和密封胶发挥着重要的结构黏结作用,其性能在长期使用后将直接影响玻璃幕墙的安全性和使用寿命。据统计,在出现问题的玻璃幕墙中,约有20%是因结构密封胶失效引起的^[3]。半隐框玻璃幕墙则为上述2种约束方式的结合形式。目前,针对玻璃幕墙的现场检测方法除外观检查法、现场加载荷载检测法和现场黏接强度试验法外,还包括吸盘法、气囊法、振动检测法、超声波检测法和红外线检测法等。在实验室中,结构胶的检测方法主要有邵氏硬度测试、红外线光谱分析、热重分析和重新制样法^[4]等。

1 隐框玻璃幕墙的检测方法

1.1 传统的玻璃幕墙组件检测方法

现行标准^[5-6]中玻璃幕墙组件的检测主要包括玻璃、支撑结构材料、五金件及其他配件和硅酮结构密封胶等方面。玻璃检测涵盖品种、外观、尺寸、厚度及应力等指标;支撑结构材料重点检测铝合金型材和钢材的壁厚、膜厚、硬度和表面质量;五金件及其他配件主要通过检查外观,并测量相关尺寸和壁厚;硅酮结构密封胶则检验其外观质量、注胶状态、相容性和黏结性等。

1.2 基于振动测试的检测方法

振动检测技术的基础在于检测结构损伤前后的参数变化(如固有频率、曲率模态和应变等),以此间接判定结构损伤的严重程度及其位置。

表1 近年来既有玻璃幕墙的典型安全事故案例

Table 1 Typical safety accident cases of existing glass curtain walls in recent years

时间/年	地点	工程名称	事故形式	损伤情况
2009	石家庄市	维多利亚大酒店	幕墙玻璃脱落	多辆车辆受损,造成经济损失
2009	武汉市	民生银行大厦	幕墙玻璃脱落	损坏过往车辆
2011	深圳市	百富大厦	幕墙玻璃自爆	社会影响恶劣
2011	杭州市	发展大厦	幕墙玻璃脱落	1名女孩截肢
2011	宁波市	华联写字楼	幕墙玻璃脱落	2人受伤
2012	武汉市	徐东凯旋门	幕墙玻璃脱落	1人死亡
2013	武汉市	华乐商务中心大楼	幕墙玻璃脱落	多辆车辆受损
2015	邢台市	天一城A座	幕墙玻璃自爆	车辆受损
2016	深圳市	平安金融中心	幕墙玻璃脱落	4名工人受伤
2017	海口市	明珠广场	幕墙玻璃自爆	损坏多辆车辆
2017	青岛市	某超市大厦	幕墙玻璃脱落	造成经济损失
2018	十堰市	达能帝景小区	幕墙玻璃脱落	1名3岁幼童死亡
2020	南京市	新百大厦	幕墙玻璃脱落	造成多名路人受伤

刘小根等^[7-8]提出了一种振动测试技术,该技术通过测定幕墙玻璃的固有频率来评估玻璃幕墙支撑结构的松动损伤和结构胶的老化程度,并将这种动态测试技术应用于隐框玻璃幕墙结构胶损伤和老化程度的识别。结果表明:随着脱胶长度的增加,频率呈现下降趋势;同时,随着老化时间的延长,硅酮结构胶的黏结强度逐渐减弱,而玻璃的固有频率变化率逐渐增大。基于这些发现,提出了一种适用于全隐框玻璃幕墙结构胶损伤的无损动态检测方法,如图1所示。

硅酮结构胶的黏结强度是评价隐框玻璃幕墙可靠性的指标,何京波等^[9]提出了基于动测法

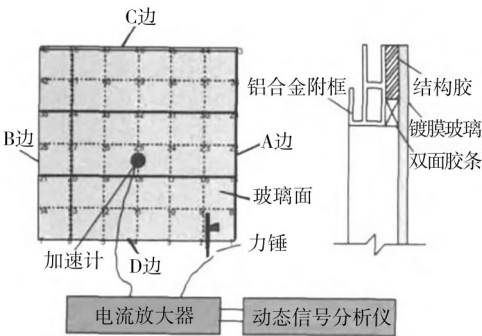


图1 隐框玻璃幕墙模态试验系统^[8]
Fig. 1 Modal test system for hidden-frame glass curtain walls

的隐框玻璃幕墙结构胶黏结强度检测方法,建立了隐框玻璃幕墙结构胶黏结强度和面板自振频率的量化关系。

赵中等^[10]通过实例研究了基于固有频率变化的玻璃幕墙安全性能现场检测技术,并探讨了玻璃幕墙失效在线检测技术。通过引入可行的检测装置(图2),实现了对中空玻璃性能的检测。此方法不仅能得出玻璃具体的挠度值,还可以明确中空层厚度的变化规律,能对玻璃幕墙的安全性能进行量化的评估。

Pan 等^[11]针对密封胶剥离问题,开发了一种基

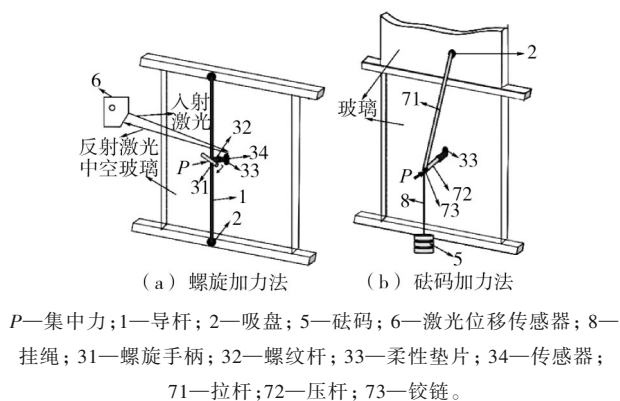


图2 中空玻璃密封性现场检测装置示意^[10]
Fig. 2 Schematic diagram of the on-site testing device for sealing of insulating glass

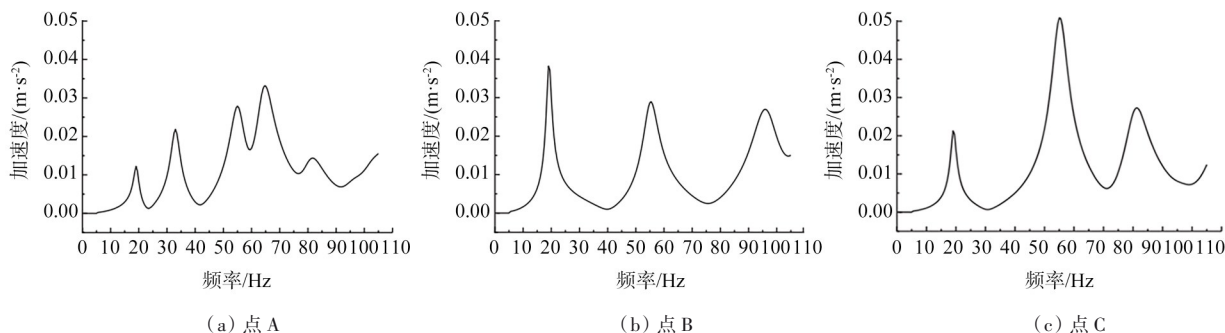


图4 各点DA值^[11]
Fig. 4 DA values at each point

金骏等^[12]提出了一种基于模态分析的幕墙玻璃结构胶黏结失效检测方法。他们发现结构胶黏结长度变化时,结构自振频率变化明显,可以通过自振频率的变化来对幕墙玻璃的结构胶黏结失效进行有效识别。阎玉芹等^[13]进一步提出了基于曲率模态差的隐框玻璃幕墙结构胶损伤识别方法。通过对4边不同脱胶损伤的玻璃幕墙面板进行模态试验和分析,发现基于一阶曲率模态差的损伤识别方法能够较为准确地判断单处损伤的存在和位置;

于振动响应分析的损伤识别方法。该方法通过比较损伤前后驱动点加速度(DA)的变化来实现。采用了加速度传感器配合橡皮锤的技术手段,对玻璃面板的振动响应进行测量,并依据监测点的加速度变化、固有频率的降低以及模态置信度的标准来识别幕墙密封剂的损伤状况。在图3所示中A、B、C(3个位置相对具有代表性)处安装传感器,对比了这些位置的DA差异,具体如图4所示,位置A在0~105 Hz频率范围内表现出6个共振峰,而位置B和C仅有3个共振峰。这一现象表明,位置A,即长边和短边1/4处的交点是安装加速度传感器的理想位置。

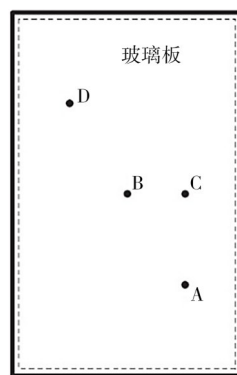


图3 传感器位置示意^[11]
Fig. 3 Schematic diagram of sensor locations

对于多处损伤时通过深入分析也可以得出准确结论,从而可以通过分析曲率模态差指标来识别隐框玻璃幕墙结构胶的脱胶失效。

当前,低阶模态参数及其变化率是玻璃幕墙黏结结构无损检测的主要检测指标,然而,基于这些指标的检测手段在鉴别局部微损伤方面存在局限,且操作过程复杂,不利于快速实施。郑恒等^[14]提出了一种基于原点频响函数的玻璃幕墙黏结结构损伤检测,该方法以原点频响函数相对累计偏差(RAE)为指标,具有

高灵敏度和快速性。这种方法能有效提升玻璃幕墙黏结结构损伤检测的速度和敏感性。陈振宇等^[15]提出了一种基于快速傅里叶变换(FFT)功率谱识别确定全隐框玻璃幕墙结构胶脱黏长度的检测方法,通过在板中心的脉冲激振和对周围测点的实际动力响应分析,对结构胶黏结性能进行了深入研究。

李志翔^[16]指出,应变值会在不同结构胶的损伤程度时产生不同的变化。基于应变测试的方法因其高精度、便捷的检测过程以及清晰的数据分析处理而受到认可。林圣忠等^[17]进一步提出了一种基于应变测量的玻璃幕墙结构胶损伤检测技术,该技术涉及在外部激励下测量幕墙玻璃板各测点的动态应变数据,并通过综合比较这些数据的变化来准确判断结构胶是否受损及其损伤位置。

顾建祖等^[18-19]将经验模态分解(EMD)应用于结构损伤识别,提出了一种新的损伤识别方法。该方法通过计算振动响应信号的固有模态函数(IMF)的振动传递率,构建结构损伤识别参数。通过对不同开胶损伤程度的玻璃幕墙试件进行动态测试,得到各损伤程度下幕墙玻璃的IMF振动传递率,并依据振动传递率的差异识别和评估玻璃幕墙的开胶损伤程度。

黄智德等^[20-23]结合远程激光测振和模态测试技术,提出以一阶固有频率作为面板安全状态的主要评价参数,并进一步研究了隐框玻璃幕墙和点支幕墙的模态特征与边界条件之间的关系,采用激光多普勒测振仪(LDV)对实际工程中的玻璃幕墙进行了远程检测,证明该方法具有良好的实践效果。此外,结合模态测试结果和激光测振试验结果,提出了一种基于频谱曲线特征的隐框玻璃幕墙结构胶脱胶损伤的识别方法。

1.3 基于超声波技术的检测方法

在介质中传播的超声波会因声阻抗的变化而产生反射和折射现象,这一特性在胶接结构的缺陷检测中发挥关键作用。当结构中存在缺陷时,这些缺陷会引起额外的反射和折射,即携带有关缺陷位置和大小的重要信息。

胡绍海等^[24-25]在超声无损检测领域做出了重要贡献,不仅提出了基于特征参数的胶接结构超声无损检测方法,还将胶接缺陷分为2类:黏附缺陷和内聚缺陷。黏附缺陷指的是胶黏剂与被黏物之间的分离,而内聚缺陷则指胶黏剂内部的断裂。该研究进一步扩展到利用超声脉冲回波法对含气孔缺陷的胶接结构检测,通过对含圆气孔和椭圆气孔缺陷

的胶接结构进行超声波反射模拟,详细分析了纵波入射圆气孔的反射求解方法,为胶接结构的缺陷检测提供了理论依据。

Hong等^[26]开发了一种先进的检测方法,该方法基于非线性超声波激励和压电陶瓷传感器,用于评估隐框玻璃幕墙中结构胶的损伤情况。具体而言,通过分析结构的响应特性来确定合适的激励信号,进而利用经验模态分解(EMD)技术提取信号中的特征分量。这些特征分量随后经过离散傅里叶变换(DFT)进行分析,最终通过计算非线性系数来对玻璃幕墙结构胶的损伤程度进行量化评估。图5为该检测方法的试验框图,为实际应用提供了直观的指导。

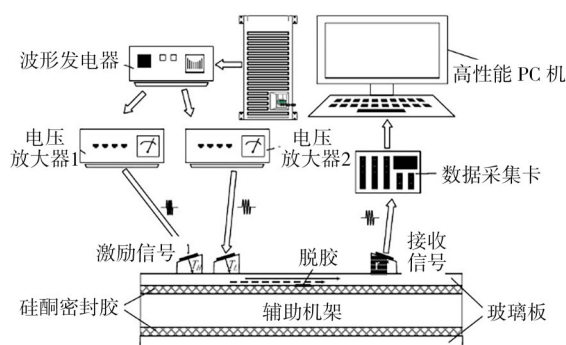


图5 非线性超声波幕墙硅酮密封胶损伤检测试验^[26]

Fig. 5 Nonlinear ultrasonic testing for damage detection in silicone structural sealants of curtain walls

1.4 基于红外技术的检测方法

红外线检测法的基本原理包括2个方面:1)在施加外部热负荷时,对带有缺陷的材料表面进行检测,缺陷处会产生明显的断热温度场;2)接收缺陷自身发热所产生的温度场,从而实现对缺陷的检测^[27]。基于第一个原理,可以将其应用于玻璃幕墙结构胶的检测。具体操作是使用红外线检测仪跟踪移动的加热源,对胶接件的表面进行扫描使其受热。由于有缺陷的部位传热性能较差,其表面温度会高于胶接良好的部位。通过测量胶接表面的温度差异,可以对胶接件进行无损检测。Hong等^[28]将主动热敏技术应用于玻璃幕墙黏结结构的损伤检测,这一研究对隐框玻璃幕墙黏结结构损伤检测具有重要意义。

红外技术能够捕捉到由结构胶内部缺陷或不一致性引起的热异常,具有高安全性、高精确性和能够覆盖大面积区域的优点,从而提高检测效率。同时,缺陷的位置和形状也可以通过视觉判断来确定^[27,29]。此外,红外技术不会破坏玻璃或结构胶的

物理或化学性质。然而,红外检测受环境温度、湿度和外部热源的影响较大,在某些情况下可能无法提供与接触式检测相当的分辨率。

振动测试法、超声波检测法和红外检测法在检测隐框玻璃幕墙方面各有特点。振动测试法通过检测结构损伤前后的参数变化来间接判断损伤程度和位置,适用于检测玻璃幕墙支撑结构的松动损伤和结构胶的老化程度,可定量评估结构胶老化,但对微小损伤敏感度不足。超声波检测法利用声阻抗变化检测胶接结构缺陷,适用于检测黏附和内聚缺陷,虽精度高但设备昂贵、操作复杂且易受环境干扰。红外检测法则通过检测缺陷处的温度场变化实现检测,适用于检测结构胶的黏结质量,具有高精确性和安全性,可覆盖大面积,但受环境因素影响较大,对微小缺陷分辨率有限。

2 隐框玻璃幕墙的评价方法

2.1 试验分析法

刘小根等^[30-32]提出了一种利用脉冲激振方法获取幕墙玻璃固有频率,进而识别玻璃幕墙松动与损伤程度的技术,并且进一步指出,对于框支撑玻璃幕墙,可以通过检测幕墙玻璃的固有频率来识别支撑结构的松动损伤程度。试验结果表明:固有频率随边界支撑松动程度的增加而不断下降。同样地,对于隐框玻璃幕墙,由于其固定作用主要依赖于硅酮结构胶,随着结构胶老化时间的增长,其黏结作用力逐渐下降,导致幕墙玻璃的固有频率变化率不断增大。因此,提出可以通过频率变化率来识别结构胶的老化程度。此外,还研究了结构胶的界面脱胶与老化对幕墙玻璃板模态参数的影响,并提出了一种基于模态参数的损伤检测方法。研究表明:结构胶脱胶位置处的玻璃模态位移振型相比未损伤时振幅明显增大,频率随脱胶长度的增大而降低。通过这项技术,能够有效预测玻璃的脱落风险,并据此建立了一套基于玻璃固有频率变化来评估玻璃幕墙安全等级的准则。

古明川^[33]通过振动测试试验研究,并结合单块幕墙面板的实际边界安全试验,利用有限元分析和薄板振动理论进行分析,提出了一种基于频率法的幕墙单元和面板的边界安全性评价方法。该方法主要用于排查幕墙面板整体掉落的风险,并推导出双层中空玻璃面板在经典边界条件下的一阶频率解析解。

郭超等^[34]提出了一种无损检测方法,用于评估幕墙玻璃的服务性能。首先获取完好和破损幕墙玻璃的加速度时程曲线,然后通过快速傅里叶变换(FFT)得到幕墙玻璃的频域特征。通过模拟对比不同服役状态下的幕墙玻璃加速度振动响应,发现:幕墙玻璃的破损和结构胶的损伤均会导致其固有频率下降;频谱曲线中波峰的相对高度可作为识别结构胶老化程度的依据。通过加速度无损检测得出幕墙玻璃的频率和振型的方法在评估幕墙玻璃的服役性能方面具有良好的实用性。

朱泽伟等^[35]通过模拟雷击试验,建立了接近真实雷击条件的安全评价模型,以此验证既有玻璃建筑是否因雷击导致的冲击和热效应而使幕墙边框变形或幕墙玻璃破裂脱落。林立等^[36]基于莫兰蒂台风的灾后普查结果,总结了台风作用下玻璃幕墙的主要破坏形式、规模及类型。通过结构试验分析,得出了风荷载下玻璃幕墙的破坏原因和规律,并最终评价了临海既有玻璃幕墙的安全性能。

2.2 有限元分析法

方治华等^[37]构建了5种不同位置脱胶损伤的有限元模型,并进行了模态分析。选择模态曲率作为损伤识别的指标,并根据模态曲率的敏感性,提出了一种新的处理模态曲率的方法,能够更方便、精确地识别全隐框玻璃幕墙的脱胶损伤位置。数值仿真研究表明:低阶频率的变化率最为敏感,通过计算幕墙玻璃板的低阶模态频率,可以准确判断脱胶损伤。并进一步提出了基于频率变化率的全隐框玻璃幕墙损伤检测方法。

Xu等^[38]将光纤传感技术引入幕墙变形监测,提出了基于光纤传感技术的建筑幕墙变形监测方法,建立了玻璃幕墙稳定性的光纤传感模型,实现了对幕墙面板安全状态的远程、快速、准确评估。李晗等^[39]采用频域法研究了单层索网结构的风振响应,探讨了不同计算方法和空间相干函数选择对结果的影响。根据不同的计算方法和空间相干函数建立了3种分析模式,研究结果对玻璃幕墙的振动监测具有重要参考价值。

胡小勇^[40]通过建立武汉火车站的三维模型,分析了玻璃幕墙体系在不同激励作用下的响应。舒畅等^[41]以实际玻璃幕墙工程为例,利用有限元软件计算了玻璃幕墙的自振特性以及在地震和风振作用下的响应,评估了既有玻璃幕墙在地震和风振作用下的可靠性。

通过建立详细的有限元模型,能够采用模态分析和损伤识别准确评估结构动力性能和损伤情况,但存在模型复杂、模型假设可能与实际有所差异以及试验验证局限性等缺点。

2.3 评价体系

在对既有玻璃幕墙的结构安全性进行等级划分和指标权重确定时,研究人员利用模糊综合评价、模糊熵等方法,对评判指标进行处理(如最大隶属度法、加权平均法、贴合度法等),最终进行综合评判,给出评定等级。通过模糊处理得到的评价指标并非单一指标,而是通过各因素的层级综合评判后得到的既有玻璃幕墙安全性评判指标。

季泽伟^[42]根据玻璃幕墙安全评价体系的建立原则,结合工程实际和相关标准,建立了4大类、13小类的安全评价体系。基于既有玻璃幕墙安全评价体系,筛选出随时间变化的评价指标,构建了基于时间变化的安全评价准则。通过层次分析法和熵值法获取指标权重,依据模糊综合评价理论构建了既有玻璃幕墙安全评价模型。随后,利用Python语言开发了一套较为完整的既有玻璃幕墙安全监测系统。通过假设部件构件失效的方式,验证了该监测系统软件的适用性、稳定性和可靠性。

赵鸣等^[43-44]结合玻璃幕墙现场检测的相关参数,从材料、构件、结构等方面进行综合量化分析,提出采用模糊综合评判方法对玻璃幕墙的安全性能进行评价。Huang等^[45]通过分析既有玻璃幕墙评价的特征,针对既有隐框玻璃幕墙提出了基于模糊理论的安全状态评价方法。黄建华等^[46]通过识别安全风险因素,建立了一套定性定量指标相结合的安全评价体系,并在此基础上引入了灰云聚类模型与模糊熵,提出了一种基于模糊熵与灰云聚类模型的既有玻璃幕墙安全评价方法,实现了既有玻璃幕墙安全状态的二维评估。张翔^[47]以“既有玻璃幕墙安全风险因素”为核心,建立了一套定性定量指标相结合的安全评价指标体系,并以基于有序加权平均算子修正的G1主观赋权法(OWA-G1)和熵权法为基础,实现了指标权重的组合。通过正态云模型和可变模糊集理论,完成了定性定量指标的赋值,然后利用虚拟云和模糊熵实现了既有玻璃幕墙的安全评价,提出了一种基于组合权重、虚拟云和模糊熵的既有玻璃幕墙安全评价方法。

吴新光^[48]提出了基于层次分析方法的既有玻璃幕墙安全性能评价模型。吴红华等^[49]将集成相

对分析方法应用于玻璃幕墙的安全评估,建立了一种集对分析评估方法,并引入区间数的概念,提升了评判结果的可信度。金巾等^[50]结合突变理论、层次分析法和模糊评价法,对既有玻璃幕墙的安全状态进行了评价。该方法从下层指标推导出上层目标,能够得出客观、准确的评价结果。李芊等^[51]从风险发生概率和风险损失程度两方面入手,运用李克特五级量表评分,对既有玻璃幕墙的安全状态进行了评价,识别出了主要风险,并提出了针对性的防范对策。

此外,神经网络也在玻璃幕墙检测和评价领域中得到了应用,徐涵等^[52]引入反向传播(BP)神经网络方法,选取玻璃面板25个关键位置的动力响应参数和动力特性参数,构建神经网络数据库和数据训练库,实现了既有玻璃幕墙安全性能的评价。Efsthadiades等^[53]提出了基于人工神经网络(ANN)的既有玻璃幕墙健康状态检测法,实现了幕墙体系缺陷的识别与诊断。

这些研究通过引入多种评价方法和技术手段,为既有玻璃幕墙的安全性能评估提供了更为全面和科学的依据,有助于提高评价的准确性和可靠性。

3 结论与展望

本文系统梳理了国内外既有隐框玻璃幕墙安全研究的代表性成果,浅析了多模态检测方法(振动测试、超声波技术、红外技术)以及多维评价体系(试验分析、有限元仿真、智能评价模型)。

在检测方法方面,详细介绍了传统的玻璃幕墙组件检测方法、基于振动测试的检测技术、超声波检测技术以及红外技术等多模态检测手段。在评价方法方面,探讨了试验分析法、有限元分析法、基于模糊综合评价、神经网络算法等多维评价体系。

研究表明:基于固有频率变化率的损伤识别方法可实现结构胶老化程度的定量评估,而模糊综合评价与神经网络算法通过多指标融合,初步建立了幕墙安全风险等级划分标准。这些成果为既有玻璃幕墙的安全性能分析提供了从局部损伤检测到系统风险评价的递进式技术路径。

尽管现有的研究取得了一定的成果,但仍有以下方面可以进一步改进和完善:

1)提升检测精度。目前振动法对微小损伤的敏感度不足,而超声与红外技术易受环境干扰。未来应致力于优化这些检测技术,提高其检测精度和

稳定性,以更准确地识别微小损伤和复杂环境下的损伤情况。

2)增强模型适应性。有限元仿真在考虑胶黏剂性能随时间变化方面存在局限,智能算法在工程实际应用中的泛化能力有待提高。今后需要进一步改进模型和算法,使其能够更好地适应实际工程中胶黏剂性能的变化以及不同的环境条件。

3)多技术融合。综合振动、超声、红外等检测技术,优化它们的组合应用方式,以充分发挥各自优势,提高检测的准确性和可靠性。

4)建立统一标准及数据库。需制定统一标准来规范这些技术的应用,确保检测结果的一致性和可比性,并建立相应的数字化损伤数据库,为后续的数据分析和模型训练提供丰富的样本支持。

5)开展长期性能预测。深入研究胶黏剂老化与湿度、盐雾等环境因素的关联规律,开发能够准确预测长期性能的风险预测模型,为玻璃幕墙的维护和管理提供科学依据。

6)实现智能监控升级。集成先进的传感器技术与轻量化的算法,部署实时监测系统,实现对玻璃幕墙安全性能的长期、连续监测,以便及时发现潜在的安全隐患并采取相应措施。

通过以上改进措施,有望提升隐患发现效率,降低超高层与沿海幕墙的安全风险,同时推动行业从“速度优先”转向“质量安全为核心”的可持续发展。

参 考 文 献

- [1] 唐浩晨. 隐框幕墙玻璃组件损伤识别方法研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2021.
- [2] 贾秀江. 大型建筑幕墙检测系统的风压控制方法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2007.
- [3] 陆津龙. 既有玻璃幕墙安全性能检测评估[J]. 上海建材, 2006(5): 19-20.
- [4] 程鹏, 崔洪. 既有玻璃幕墙结构胶检测及评估方法综述[J]. 中国建筑防水, 2018(20): 13-18.
- [5] 湖北省住房和城乡建设厅. 既有建筑幕墙可靠性鉴定技术规程: DB42/T 1709—2021[S]. 武汉, 2021.
- [6] 北京市住房和城乡建设委员会. 既有玻璃幕墙安全性检测与鉴定技术规程: DB11/T 1812—2020[S]. 北京, 2020.
- [7] 刘小根, 包亦望, 宋一乐, 等. 基于动态法对既有玻璃幕墙安全性能评估研究[J]. 土木工程学报, 2009, 42(12): 11-15.
- [8] 刘小根, 包亦望, 邱岩, 等. 隐框玻璃幕墙结构胶损伤检测[J]. 中国建筑防水, 2011(17): 26-30, 37.
- [9] 何京波, 余忠辉. 基于动测法的隐框玻璃幕墙硅酮结构胶粘结强度检测方法[J]. 合成材料老化与应用, 2022, 51(2): 15-17.
- [10] 赵中, 王刚玉, 刘一锋, 等. 玻璃幕墙安全性能评估及其面板失效检测研究[J]. 四川建材, 2019, 45(4): 21-22.
- [11] PAN D, JIANG K, ZHANG X, et al. Sealant delamination detection of structural sealant glazing systems based on driving-point accelerance[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 1-13.
- [12] 金骏, 岳增国, 许晨, 等. 基于模态分析的玻璃幕墙结构胶粘结失效检测方法[J]. 科技资讯, 2017, 15(34): 11-12.
- [13] 阎玉芹, 曲京儒, 张鑫. 基于曲率模态差的隐框玻璃幕墙结构胶损伤识别研究[J]. 建筑技术, 2023, 54(6): 725-727.
- [14] 郑恒, 张喜臣, 王洪涛, 等. 基于原点频响函数的建筑玻璃幕墙粘接结构损伤检测[J]. 振动与冲击, 2021, 40(13): 289-298.
- [15] 陈振宇, 骆英, 顾建祖. 一种基于 FFT 功率谱的全隐框玻璃幕墙结构胶脱粘长度检测方法[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(2): 104-107.
- [16] 李志翔. 基于应变的玻璃幕墙结构胶损伤检测研究[J]. 智能城市, 2020, 6(17): 133-134.
- [17] 林圣忠, 邵晓蓉, 王晨, 等. 基于应变的玻璃幕墙结构胶损伤检测研究[J]. 门窗, 2010(12): 22-23.
- [18] 顾建祖, 郝文峰, 骆英, 等. 基于固有模态函数振动传递率的结构损伤识别[J]. 建筑科学与工程学报, 2011, 28(1): 27-32.
- [19] 顾建祖, 郝文峰, 骆英, 等. 固有模态函数振动传递率损伤识别实验研究[J]. 实验力学, 2010, 25(4): 386-392.
- [20] 黄智德. 建筑幕墙安全状态评价模型与远程检测方法研究[D]. 北京:北京科技大学, 2019.
- [21] HUANG Z, XIE M, ZHAO J, et al. Rapid evaluation of safety-state in hidden-frame supported glass curtain walls using remote vibration measurement [J]. Journal of Building Engineering, 2018, 19: 91-97.
- [22] HUANG Z, XIE M, SONG H, et al. Modal analysis related safety-state evaluation of hidden frame supported glass curtain wall[J]. Journal of Building Engineering, 2018, 20: 671-678.
- [23] HUANG Z, XIE M, CHEN C, et al. Engineering application of a safety-state evaluation model for hidden frame-supported glass curtain walls based on remote vibration[J]. Journal of Building Engineering, 2019, 26, 100915.
- [24] 胡绍海, 张树京. 超声脉冲入射含气孔缺陷的胶接结构的模拟研究[J]. 铁道学报, 1992(2): 28-33.
- [25] 胡绍海, 张树京, 袁振明. 胶接结构超声无损检测特征参数分析[J]. 航空材料学报, 1990(2): 38-43.
- [26] HONG X, LIU Y, LIUFU Y H, et al. Debonding detection in hidden frame supported glass curtain walls using the nonlinear ultrasonic modulation method with piezoceramic transducers[J]. Sensors, 2018, 18(7), 2094.
- [27] 王洪涛, 郑中兴. 红外测温技术的进展及其应用[J]. 无损探伤, 2007(4): 1-5.
- [28] HONG X, LIN J, LIU Y, et al. Active thermal sensing for bonding structure damage detection of hidden frame glass curtain wall [J]. Sensors, 2018, 18(11), 3594.
- [29] 唐洁. 提高系统智能化红外线测温仪风采尽现[J]. 电子测

- 试, 2006(12): 65-67.
- [30] 刘小根, 包亦望. 基于固有频率变化的框支承玻璃幕墙安全评估[J]. 沈阳工业大学学报, 2011, 33(5): 595-600.
- [31] 刘小根. 玻璃幕墙安全性能评估及其面板失效检测技术[D]. 北京:中国建筑材料研究总院, 2010.
- [32] 刘小根, 包亦望, 万德田, 等. 基于模态参数的隐框玻璃幕墙结构胶损伤检测[J]. 门窗, 2009(10): 21-26.
- [33] 古明川. 基于频率法的幕墙面板连接状态评价方法[D]. 成都:西南交通大学, 2022.
- [34] 郭超, 张渡, 候世伟, 等. 基于无损检测的隐框玻璃幕墙服役性能评价方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2025, 57(2): 201-208.
- [35] 朱泽伟, 周歧斌, 陈华晖, 等. 高层建筑幕墙玻璃模拟雷击试验技术方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(10): 164-168.
- [36] 林立, 陈锴, 陈昌萍, 等. 超强台风“莫兰蒂”作用下玻璃幕墙灾损普查及实验分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2018, 46(6): 881-887.
- [37] 方治华, 罗文奇. 基于模态曲率的全隐框玻璃幕墙损伤检测研究[J]. 价值工程, 2017, 36(20): 89-93.
- [38] XU D, WANG Y, XIE J. Monitoring and analysis of building curtain wall deformation based on optical fiber sensing technology [J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering, 2021, 46(4): 3081-3091.
- [39] 李晗, 张其林, 罗晓群, 等. 单层索网玻璃幕墙结构的风振响应频域计算方法研究[J]. 力学与实践, 2014, 36(3): 308-312.
- [40] 胡小勇. 不同激励下玻璃幕墙体系耦合振动研究[J]. 低温建筑技术, 2013, 35(11): 41-44.
- [41] 舒畅, 王元清, 马冬霞. 合肥新桥国际机场航站楼索支点支式玻璃幕墙的动力性能分析[J]. 建筑结构, 2021, 51(1): 54-59.
- [42] 季泽伟. 既有玻璃幕墙安全评价体系及监测系统研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2022.
- [43] 赵鸣, 孙磊, 赵鸿. 既有玻璃幕墙的结构安全性模糊综合评判(Ⅱ)[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(6): 43-45.
- [44] 赵鸣, 孙磊, 赵鸿. 既有玻璃幕墙的结构安全性模糊综合评判(Ⅰ)[J]. 四川建筑科学研究, 2008, 34(5): 80-84, 98.
- [45] HUANG T T, ZHANG D W, ZHAO Y X, et al. Comprehensive appraisal of the safety of hidden frame glass curtain wall based on fuzzy theory [J]. Journal of Building Engineering, 2019, 26, 100863.
- [46] 黄建华, 张翔. 模糊熵与灰云模型在既有玻璃幕墙安全评价中的应用[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(4): 1275-1283.
- [47] 张翔. 既有玻璃幕墙安全评价研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2022.
- [48] 吴新光. 既有玻璃幕墙安全性评价方法与防治措施探讨[J]. 中国建材科技, 2018, 27(6): 11-14.
- [49] 吴红华, 文洁. 玻璃幕墙安全评估的集对分析方法[J]. 自然灾害学报, 2011, 20(4): 66-70.
- [50] 金巾, 包亦望, 万德田, 等. 基于突变理论与模糊集的玻璃幕墙安全可靠评价[J]. 建筑科学, 2010, 26(9): 54-56, 61.
- [51] 李芊, 朱璇. 玻璃幕墙的风险识别及其防范对策[J]. 城市问题, 2016(1): 42-46.
- [52] 徐涵, 杨健, 王星尔, 等. 反向传播神经网络在隐框玻璃幕墙脱胶损伤识别中的应用[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(8): 1073-1079.
- [53] EFSTATHIADES C, BANIOTOPOULOS C C, NAZARKO P, et al. Application of neural networks for the structural health monitoring in curtain-wall systems [J]. Engineering Structures, 2007, 29(12): 3475-3484.