

框架式幕墙玻璃自爆原因分析及预防建议

李斐¹ 肖有²

1. 湖南省西湖建筑集团有限公司; 2. 中国邮政集团有限公司湖南省分公司

摘要: 某外立面为框架式(竖明横隐)玻璃幕墙的超高层写字楼建成并投入使用后发现玻璃自爆现象较多,自爆后高空散落的玻璃渣存在较大的安全隐患。为研究玻璃自爆的原因,本文以该写字楼作为研究主体,从外立面玻璃幕墙施工起,直至投入运营后两年。通过查阅设计文件,原材料分析,对比同类型工程、问询现场管理人员施工过程,统计现场数据,结合周边环境等方式,逐个对比分析,剖析玻璃自爆产生的原因,同时提出相应解决措施。总结、归纳后对后续类似项目给出参考依据,避免同类型的问题再次出现。

关键词: 框架式幕墙; 玻璃自爆; 安全隐患; 原因分析; 解决措施

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2022.16.029

一、研究背景与意义

(一) 工程概况

某地市中心位置一新建超高层写字楼项目,结构形式为框架一核心筒,建筑高度约180m,总建筑面积22万m²,主楼3-40层(10.85~179.50m)采用竖明横隐式框架幕墙,面积约4万m²。层间玻璃采用6mm单片热反射镀膜钢化玻璃,标准层玻璃采用Low-E镀膜中空钢化玻璃(8TP+12A+6TP)mm,主楼幕墙面积约3.8万m²。

(二) 问题阐述

该商业综合体建筑外立面于2020年12月30日正式完工交付,使用期内多块钢化玻璃自爆。经统计,主楼幕墙约10326块玻璃(中空与单片的占比约1:1),截至2022年10月30日,交付使用后22个月内,共有96块玻璃发生自爆,自爆率约9.26%。项目紧邻市中心形象路,且南广场上有地铁出入口,加之项目已正常运营,出入写字楼与商场人流量非常大,自爆后散落的玻璃碎片严重危及行人及车辆安全。运营期内已发生数次划伤行人及车辆事件,一层楼板外檐处设置的防坠玻璃雨棚因玻璃自爆后散落玻璃渣砸碎近五成。

玻璃自爆表现为如下特征:

- 1) 交付初期自爆率偏多,后期有逐渐减少的趋势
- 2) 主楼四个立面均有自爆现象,其中北、西两个立面较南、东两个立面自爆的数量多
- 3) 季节交替时自爆现象频繁
- 4) 自爆玻璃在各个立面的位置无明显规律可循
- 5) 单片玻璃与中空玻璃自爆数量比例大于4:1

(三) 研究内容及意义

主流搜索引擎输入“玻璃幕墙自爆”发现,类似安全事故层出不穷,但新闻所报道的最终处理结果均为玻璃厂商与施工单位推诿、扯皮,未明确事故责任方,且

未分析问题出现原因,均由建设(运营)单位买单。结合本案出现的类似情况,初步结论为玻璃自爆并非偶然现象。

本文将通过实体工程从设计、原材、施工、周边环境等各个因素分析探讨幕墙玻璃自爆产生的原因,旨在最小成本范围内消除玻璃自爆导致的安全隐患,并为后续类似施工项目实施提供参考依据。

二、玻璃自爆成因分析

(一) 玻璃自爆的表现形式

部分玻璃现场勘察发现有明显的自爆特征,在自爆点有明显的蝴蝶斑,即自爆点处两块对称的玻璃碎片,形式“蝴蝶状”,位于放射中心。且蝴蝶斑位于玻璃的中心位置附近,不在边缘或角落处。

剩余部分因楼层较高,或经历大风天气,部分玻璃渣被风吹散后玻璃碎渣掉落地面,已看不到自爆最初的状态。仅能通过望远镜或像素较高相机拍照留取研究素材。

(二) 玻璃原材

玻璃是无规则结构的非晶体固体,是一种脆性材料,物理性质是各项同性的。故起抗压强度较大,但抗弯曲、抗折、抗扭曲的能力很弱,所以玻璃的大部分破碎是张应力引发的。当玻璃承受的张应力超过其强度值,玻璃将破裂损坏。

玻璃行业普遍存在钢化玻璃自身存在自爆率的说法,自爆玻璃块数在玻璃总数的比率在3%内均属正常范围,但经查询目前无任何国家规范、行业规范等的条文对此进行明确说明。经查阅资料:钢化玻璃自爆最主要的原因是玻璃制造过程中混入硫与镍的杂质,在高温中生成硫化镍(NiS)。硫化镍有二种结晶,高温时($t > 380^{\circ}\text{C}$)是 α 相,低温是 β 相。在钢化时由于急速冷却, α 相来不及转变成 β 相。在使用过程中,常温亚稳的 α 相慢慢转变成稳定的 β 相,伴随约4%的体积膨胀才引起钢化玻璃自爆。玻璃在加工过程中,无法完全避免杂质残留,属不可抗力因素。

(三) 玻璃加工

玻璃厂商通常采用浮法玻璃大板或成品玻璃两种销售方式,前者会在另外的玻璃加工厂进行深加工(切割、磨边、钢化、夹胶、彩釉、镀膜等)。经考察玻璃厂商及深加工发现,如在加工过程有如下情况时,均可能引发玻璃自爆:

- 1) 玻璃内的气泡、夹渣
- 2) 玻璃厚度不均
- 3) 玻璃切割后未磨边或磨边效果不好(切割后玻璃边缘产生细小伤痕或裂纹)

玻璃生产完成后，质检疏忽未及时发现上述问题，且玻璃在钢化时未自爆，则后期施工时自爆的可能非常大。另玻璃成品后还需用结构胶与铝合金框黏结，再运至现场施工。以本案为例，设计要求在玻璃边缘处安装弹性的固定软垫块，垫块为橡胶、树脂类材料制作，具有一定弹性。每个接触面至少4个，以保障玻璃与铝附框不直接接触。玻璃周边的防渗密封胶，也应选择弹性较好的耐候胶。

（四）设计因素

查阅设计图纸及前期交底资料，室外标准片为中空，层间玻璃在设计成本优化时，由中空玻璃变更为单片钢化玻璃（未夹胶）+保温棉的形式。立面上中空和单片玻璃安装完成后为平面，但两种材料厚度偏差18mm，采用单片玻璃的下方附框调节进出位。幕墙整体安装完成后，抗风压时单片玻璃处属薄弱位置。采用此设计方案，是层间玻璃自爆的原因之一，同时，该处也是渗漏水频发位置。

（五）施工因素

幕墙工程绝大多数的施工均在高空、室外进行，且采用吊篮施工。吊篮在空中受风力影响左右摆动，操作难度大。本案超高层建筑工期紧、且操作面限制，现场采用竖向搭设悬挑平台，分段施工。

施工中可能导致玻璃自爆的施工环境主要有预埋件施工、龙骨制作及安装、玻璃下单、玻璃安装、打胶及扣盖等因素。根据玻璃自爆后现场复尺龙骨间距发现，部分自爆后的玻璃龙骨外框有不同程度的变形，变形的多数在阳角或者边缘处。当龙骨挤压玻璃，或玻璃表面受风力影响产生位移但龙骨对其有限制时，玻璃表面所受张力超过其强度时，玻璃阳角或边缘位置开始爆破，从而引起钢化玻璃自爆。

龙骨在施工过程中，人为加工材料及施工，将不可避免的会有误差产生，且采用分段施工，误差甚至可不断累积。本案在施工中参数的问题主要如下：

1. 预埋件漏埋、混凝土振捣导致偏位

该种情况现场采用化学锚栓或机械锚栓的后置埋件进行处理，两种埋件在共同受力作用下，可能产生不平衡变形，导致龙骨偏位

2. 主体结构的误差

预埋件与竖向龙骨靠转接件（钢制角码）连接，如主体结构有偏位，尽管在合理的误差范围内，现场施工时角码也需按实际情况进行调整，可能导致受力变化，导致龙骨偏位。龙骨通角码与预埋件焊接，龙骨与预埋件焊接，横梁弹簧孔的设置等各个因素均可产生误差。各种因素累积直接导致龙骨偏位，影响竖向龙骨的垂直度、横梁的水平度，从而导致玻璃洞口与玻璃不符。

3. 玻璃下单

施工图纸中仅在立面图标注了部分玻璃尺寸，另外在设计总说明处注明根据现场龙骨施工情况复尺下单。但实际操作中，龙骨安装完成后（即满焊完成），现场复尺下单需调节尺寸以满足玻璃、型材的热胀冷缩及施

工误差引起的变形，一般情况下玻璃和龙骨间的缝隙设置为4-7mm，且保证周边缝隙的均匀，避免紧贴一侧。

上述因预埋件、主体结构、玻璃下单等因素导致的龙骨偏位，在施工中最明显的表现是玻璃安装不顺畅，需要用力挤压才可安装成功。

4. 玻璃安装

设计中玻璃四周与型材直接接触的位置均采用垫块作为缓冲措施，且四周均布置胶条。垫块和胶条为弹性材料，其作用分别是密封和柔性接触。室外玻璃片受到风压、雨水等的侵蚀，采用柔性材料可有效避免漏气和渗漏水困扰，且玻璃在沉降、风压等共同作用下，轻微的变形可通过柔性材料的弹性变形消化。但实际施工中，工人的实际操作水平直接影响垫块等辅材的施工质量。垫块及胶条是现场加工制造，且该工序经常被管理人员所忽略。如有遗漏，玻璃侧边或阳角位置直接与型材接触，在“硬碰硬”的状态下，一旦型材有热胀冷缩的变化或收到沉降、风压影响导致的位移，极可能引起玻璃自爆。

（六）温度影响

经统计，在两种情况下玻璃自爆的现场明显增多。一是高低温转换的季节，研究对象地处南方某地，天气由高温转低温经常是一夜骤变，伴随着阵风7级甚至以上，温度直降15-20℃。强度较大的阵风可能引起幕墙结构的轻微位移，是原材或施工环节中未完全达到要求时引起玻璃自爆的导火线。另一种情况是持续的高温天气。阳光的直射下玻璃表面的温度可达65℃以上，玻璃温度升高形成热膨胀。玻璃镶嵌在铝型材附框中，被镶嵌的部分无法接受到框外的同样的照射，导致玻璃整体出现受热不均的情况，形成内部热应力。如热应力超过了玻璃所能承受的抗张强度，则可能引起玻璃自爆。该情况下玻璃边缘裂口较为整齐，且裂口数量相对较少，变现为复线或者单折曲线，破裂线为直角；对于玻璃中部位置，破裂线大部分为弧线形，因铝框在加工时无法保证几何精度，附框扭扭不平发生弯曲变形引起玻璃弯曲受力，可能引起玻璃弯曲受力引起自爆。

（七）周边环境及其他

1. 沉降影响

研究主体位于市中心繁华地段，同侧两项目均在施工状态。东侧在建超300m双塔楼结构，地下室共墙，并连通；西侧正在土方支护、开挖施工，基坑深度约30m。南侧地铁建成并使用。项目在半年一次的常规沉降观测中，各沉降点均由不同程度的沉降变化，可能引起结构自身在稳定调整中的变化，从而导致玻璃自爆。

2. 其他因素

写字楼租户未增加通风效果，私自将固定玻璃改为活动百叶；悬挂粘贴广告或发光字；空调改造时出风口对着外墙玻璃等原因，均有可能导致玻璃自爆情况的产生，上述因素较为随机，不存在普遍性，在此不展开论述。

三、预防建议

（一）设计方面

幕墙深化设计时,在能通过四性试验相关指标(气密性检测、水密性检测、抗风压性能检测、平面内变形能力检测)的情况下,通常会在满足要求的情况选择其中成本最小的方案。本案中层间玻璃采用6mm单片玻璃是设计优化中最大的败笔。看似在成本中有优化,实则在后期维护成本大大增加,且增加了较大的安全隐患。如本案中单片玻璃采用夹胶玻璃,在玻璃自爆时也有效避免了“玻璃雨”的发生。

总体上来说,单元式幕墙较框架式幕墙整体性更好,且在工厂整体一次性加工,较框架式幕墙的加工路径短,材料加工质量可得到有效保证,应作为幕墙结构的首选。但单元式较框架式造价每平米幕墙的造价高出40%—60%。

另外,采用幕墙设计的建筑均在美观度上花大功夫,但在后期实用性上通常考虑较少。本案在运营过程中,对于小业主的譬如开窗改造等的个性化需求通常未充分考虑。后期如有类似项目应综合后期运营意见。

(二) 材料方面

玻璃在深加工时应增加均质化工序,简单的说是需经过再次通过“升温—保温—冷却”三个过程,使玻璃中硫化镍 α 相彻底转变为低温稳定的 β 相,可有效的降低玻璃本身的自爆率。本案中设计图纸虽在设计说明中注明所有玻璃均需要均质化处理,但非本专业人员极可能忽略。

铝制附框加工及安装可在玻璃加工厂、单独加工厂或现场制作三种方式,其中在品牌玻璃加工厂制作时,因有完善的质量管理流程,铝型材切割、磨边等工序验收方面最易得到保障,应作为首选。另外后期类似项目中,应将幕墙玻璃加工、铝型材加工视为关键工序,应按照隐蔽工程的处理方式,全程安排监理人员驻场监督,全过程监督制作过程,可强化质量管理流程。

(三) 施工方面

主体施工阶段应对预埋件的数量、位置严格验收,在浇筑混凝土时旁站人员应加强管理,如有偏位现场立即整改,确保预埋可用。如迫不得已进行后置施工,需尽早安排,而不是在龙骨安装时“边后置,边施工”。

龙骨安装质量将直接影响洞口尺寸,框架式幕墙在安装龙骨时,应加强过程验收,不符合要求的及时安排整改。其中竖向龙骨应重点留意龙骨间距、垂直度及侧边弹簧插销孔位;横向龙骨关注轴线距离、定位和水平度。

外玻璃下单时应在现场严格复尺后,统一缩减部分尺寸再下单;安装前对安装工人充分交底,可采用复查材料消耗法及旁站督促安装工人将垫块、胶条按要求布置到位。施工中如发现有个别玻璃因尺寸问题安装异常困难,不可用力按压,需查明原因后安装。

(四) 其他

工程在运营阶段,应安排专人如物业保安等重点关注玻璃自爆的情况。尤其是在大风、持续高温或天气骤变的时间段内。建议采用望远镜观察,定期巡查幕墙立

面,频率不超过一天,由巡查人员填写巡查记录。在项目周边有其他施工影响的应增加巡视频率。发现玻璃自爆后,立即在地面设置围挡防止行人进入危险区域,并立即联系施工单位安排拆除施工。拆除自爆玻璃的碎片时应先用胶布全部覆盖黏住,再用吊篮取下来,不应直接在高空敲碎任其散落。本案中已开始考虑玻璃贴膜的补救方案,一来减少阳光直射时温度的强烈变化,二是避免中空外片或单片玻璃自爆后的直接散落,起到类似夹胶的效果,减少安全隐患。

四、结论与展望

(一) 结论

玻璃自爆的原因多样,预防玻璃自爆是系统性工程,不可能仅改变单一条件就可完全杜绝。从最初设计开始,到材料加工,安装施工及后期运营各个环节均可能导致玻璃产生自爆。设计初期不应单纯的考虑节约成本,需综合考虑后期维护费用;玻璃材料本身属性导致其存在自爆的可能性,但通过深加工,可有效降低自爆频率;龙骨、附框等金属材料因人工制作加工可能产生各种误差,需加强交底、过程监督和质量验收,确保按图按规范完成成品;如发生自爆时,应立即启动应急预案,将可能发生的损失降至最低,同时本文也给出了增加夹胶工序及贴膜的补救方法。

(二) 展望

本文已实体工程作为研究对象,以时间为轴,在建设全周期的各个角度研究产生自爆的原因,并寻求解决方案。但是对幕墙的玻璃自爆的主要原因未作出排序、判断,整改的重点分析仍有不足,主要原因:

1. 本文的研究对象单一,提供的数据可能存在片面性。后续可针对类似项目经验对比,更深入探究玻璃自爆的原因,亦可针对其中某项原因深层次的研究探讨;
2. 玻璃自爆的因素较多,如分析某一因素的特定影响时最常用是控制变量法。但实体工程建设时受到工期、资金影响很难做到仅变化某单一因素来观察变化情况,故很难提供各因素的影响程度。

参考文献

- [1] 赵西安. 建筑幕墙工程手册(上册)[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.
- [2] 葛杰, 李国强, 陈素文. 建筑玻璃板在爆炸荷载作用下的破碎性能(II)——试验验证[J]. 土木工程学报, 2014, 47(3).
- [3] 王洪涛, 江勇. 建筑幕墙构造与设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社.
- [4] 轩青林. 高层玻璃幕墙的特点及应用[J]. 居业: 2015年9月.
- [5] 王钰濠. 建筑工程幕墙自爆原因及预防措施[J]. 建筑技术: 2022年9月.
- [6] 杜树壮. 建筑幕墙全生命周期主要安全问题及其解决方案研究[D]. 山东建筑大学: 2020: 6-20.
- [7] 蒋伟建, 王文博. 既有建筑幕墙结构安全现状评价模型与远程监测方法研究[D]: 北京科技大学, 2019.