

物理钢化玻璃裂纹形态试验及 Voronoi 形态表征

朱禹翰^{1,2}, 杨 健^{1,2}, 王星尔^{1,2}, 张 凯^{1,2}, 王义戈^{1,2}

(1. 上海交通大学海洋工程国家重点实验室, 上海 200240; 2. 上海市公共建筑和基础设施数字化运维重点实验室, 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240)

摘 要: 开裂玻璃层残余作用是评估夹层玻璃开裂后性能的重要指标, 玻璃裂纹形态对其有显著影响。对于夹层玻璃广泛使用的物理钢化玻璃, 其裂纹形态受玻璃表面应力、厚度、开裂位置等因素影响, 目前缺乏其形态表征相关研究。首先对 81 组物理钢化玻璃进行碎裂试验, 围绕碎片面积、周长、圆度、分布密度等形态及空间分布指标进行统计分析, 明确在表面应力 60~105 MPa、厚度 6~12 mm 和 3 种开裂位置条件下的裂纹形态和碎片空间分布变化规律。随后, 基于控制碎片全局密度和最近邻距离原则, 提出了一种新的碎片形心布设方法, 并结合 Voronoi 形态方法对物理钢化玻璃的裂纹形态进行表征。通过与试验结果比较验证, 所提出的裂纹形态表征方法具有较高的重构精度。

关键词: 钢化玻璃; 半钢化玻璃; 裂纹形态; Voronoi 形态; 表面应力

中图分类号: TU382 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2022)02-0482-10

网络出版时间: 2022-01-20



Fracture Morphology of Tempered Glass and Voronoi Tessellation-Based Regeneration

ZHU Yuhan^{1,2}, YANG Jian^{1,2}, WANG Xing-er^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, WANG Yige^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Ocean Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Shanghai Key Laboratory for Digital Maintenance of Buildings and Infrastructure, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: The residual effect of fractured glass, which is greatly affected by its fracture morphology, is correlated to the post-fracture performance of laminated glass. For tempered glass in laminated glass, its fracture morphology is affected by some major variables such as surface compressive stress, thickness, and fracture point. However, a few previous work concerning the fracture morphology characterization are reported. In this paper, fragmentation tests were firstly conducted on 81 tempered glass specimens. The fracture morphology and spatial distribution, including fragment area, perimeter, circularity and distribution intensity, were analyzed. The fracture morphology and spatial distribution obtained at the given variables (*i.e.*, surface compressive stress of 60–105 MPa, thickness of 6–12 mm, three fracture points) were discussed. Also, a new seeds generation approach for the centroid of fragments to control nearest neighbor distance and global distribution intensity of fragments was proposed, which was combined with the Voronoi tessellation to characterize the fracture morphology of tempered glass. The proposed method has a satisfactory accuracy in generating the fracture morphology.

Keywords: fully tempered glass; heat strengthened glass; fracture morphology; Voronoi tessellation; surface compressive stress

近年来广泛用于玻璃结构承重构件中的夹层玻璃, 被称为“结构玻璃”^[1-2]。由于玻璃的脆性特点^[3], 外界碰撞^[4]和内部缺陷^[5-7]等因素均易导致玻璃层开裂, 削弱结构玻璃承载性能。受损结构玻璃通常

无法立即更换, 面临后续破坏性荷载威胁, 如恶劣气象条件下的多轮风致射物撞击^[8]等。对此, 传统设计方法广泛采用牺牲层的思路^[9-10]以满足安全要求, 但欠精确且有悖经济性。碎片层在中间膜的

收稿日期: 2021-07-09。 修订日期: 2021-07-20。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51908352, 52078293)。

第一作者: 朱禹翰(1997—), 男, 硕士研究生。

通信作者: 王星尔(1989—), 男, 博士, 助理研究员。

Received date: 2021-07-09. Revised date: 2021-07-20.

First author: ZHU Yuhan (1997—), male, Master candidate.

E-mail: zhuyuhan@sjtu.edu.cn

Correspondent author: WANG Xing-er (1989—), male, Ph.D., Assistant Researcher.

E-mail: matseyo@sjtu.edu.cn

约束下可相互嵌合来维持整体性,其对中间膜应力传递的拉伸硬化作用对开裂后刚度有显著影响^[11],此外特定裂纹形态易诱发中间膜的局部撕裂而导致夹层玻璃提前失效^[12]。因此不应轻易忽略碎片层的作用。

开裂后夹层玻璃可提供残余承载能力,且受裂纹形态影响。Seshadri^[13]和 Overend 等^[14]的试验显示碎片层可为开裂后夹层玻璃贡献刚度。Biolzi 等^[15-17]基于逐层破坏夹层玻璃梁的静载试验提出了碎片层在中间膜粘结作用下对构件刚度增强的影响规律,并指出增强效果与裂纹形态密切相关。Zhao 等^[18]对夹层玻璃板的开裂后性能试验显示,包含不同裂纹形态碎片层的夹层玻璃,开裂后承载能力有明显差异。对此, Galuppi 等^[11]指出裂纹形态会影响碎片与中间膜耦合作用,从而影响碎片层的刚度。因此,明确玻璃裂纹形态的形成规律,实现对裂纹形态的表征和重构,对确定结构玻璃的安全承载冗余有着重要意义。

围绕玻璃裂纹的形成规律, Nielsen 等关注了热钢化过程对玻璃表面应力与碎片密度的影响,尝试采用碎片密度揭示表面应力情况^[19],探讨了表面应力与碎片形态的关系^[20]。Lee 等^[21]对薄热钢化玻璃的研究指出玻璃厚度和表面应力水平对碎片密度及裂纹形态影响显著。Dugnani 等^[22]基于断裂力学提出了一种描述裂纹演化的模型,可据此估计给定厚度和表面应力钢化或半钢化玻璃产生碎片的尺寸。Wang 等基于 Voronoi 形态和组合有限离散元法建立数值模型,研究裂纹形态对开裂夹层玻璃抗拉性能的影响^[12],并推广到夹层玻璃梁受面内外荷载的分析^[23],然而裂纹重构基于假设的随机参数,暂未引入基于实际裂纹形态的统计结果。如能引入基于实际情况的裂纹形态重构,可提高开裂后夹层玻璃性能分析的可靠性。但目前关于玻璃裂纹形态规律的统计并没有成熟的指标,对重构方法的研究较为匮乏。

为表征关键影响因素作用下的物理钢化玻璃裂纹形态,给夹层玻璃开裂后性能的评价提供依据,首先对 81 组物理钢化玻璃试样进行裂纹形态试验,获取厚度为 6~12 mm、表面应力为 60~105 MPa 的物理钢化玻璃于角点、长边中点及中心点开裂时的裂纹形态,结合计算机图像处理技术提取碎片分布和几何形态特征信息。通过分析碎片几何形态的概率密度分布,研究其几何形态受玻璃厚度、表面应力和起裂点位置的影响规律。随后,在碎片形心分

布特征及最近邻距离等空间分布参数的研究基础上,结合 Voronoi 形态和本文提出的碎片形心布设方法,提出物理钢化玻璃裂纹形态表征方法。

1 实验

首先开展物理钢化玻璃裂纹形态试验,对不同厚度和不同表面应力水平的玻璃试样从不同位置以相同方式起裂后,收集裂纹形态统计特征,获取可重构物理钢化玻璃裂纹形态的参数。

1.1 试样制备

为减小边缘效应,玻璃试样平面尺寸选择 600 mm×300 mm。选取 6、8 mm 和 12 mm 3 种常见厚度,并设置低、中、高 3 级钢化水平,相邻钢化等级的表面应力值差距不小于 10 MPa,以确保差异性。

在试验前对每块试样的表面应力 σ_s 进行测试,测量点位布置^[24]如图 1a 所示。表面应力采用 JF-1E 型表面应力仪测得,平均表面应力分布情况见图 1b。试样概况如表 1 所示,规定试样编号中前两位数字代表试样厚度, a 、 b 、 c 分别对应低、中、高钢化水平,末位数字为起裂点位置序号。同时采用游标卡尺测量了试样在长边和短边中点处的厚

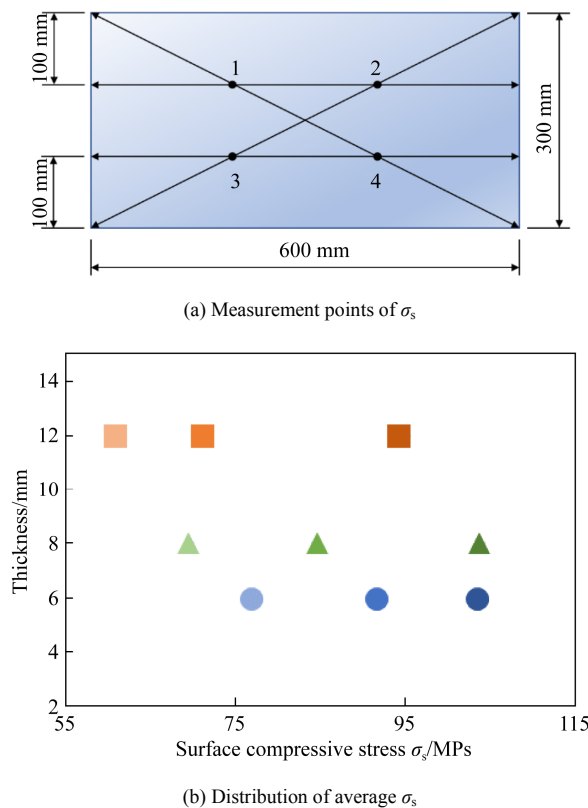


图 1 试样的表面应力 σ_s

Fig. 1 Surface compressive stress σ_s of specimens

表 1 单片物理钢化玻璃试样设置

Table 1 Information of tested monolithic tempered glass specimens

Sample No.	Thickness/mm	Dimension/(mm×mm)	Tempering level	Average σ_s /MPa	Quantity
M06a(1/2/3)	6	600×300	Low	76.82	9
M06b(1/2/3)	6	600×300	Mid	91.50	9
M06c(1/2/3)	6	600×300	High	103.41	9
M08a(1/2/3)	8	600×300	Low	69.53	9
M08b(1/2/3)	8	600×300	Mid	84.56	9
M08c(1/2/3)	8	600×300	High	103.70	9
M12a(1/2/3)	12	600×300	Low	60.80	9
M12b(1/2/3)	12	600×300	Mid	71.09	9
M12c(1/2/3)	12	600×300	High	94.20	9

度(如表 2 所示), 显示试样厚度均匀性良好。表 1 和表 2 中的平均值均为对应分组中全部试样测量数据的算术平均值。

表 2 物理钢化玻璃试样厚度

Table 2 Thickness of tempered glass specimens

Nominal thickness/mm	Avg. of true thickness/mm	Std. of specimens' thickness	Deviation rate/%
6	5.88	0.037	2.03
8	7.92	0.045	0.99
12	11.93	0.033	0.60

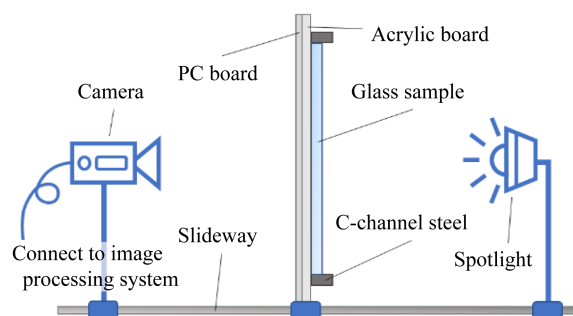
1.2 玻璃起裂及裂纹形态采集

为了固定物理钢化玻璃的裂纹形态, 以及防止试验过程中玻璃碎片飞溅, 采用胶带对物理钢化玻璃进行覆膜处理。胶带粘结强度和弹性模量较低, 对裂纹形态的影响可忽略不计。将玻璃试样安放在固定支架上(如图 2a 所示), 采用锥形金刚钻头垂直玻璃表面冲击的方式对试样施加起裂荷载。为了解起裂点位置对玻璃开裂情况的潜在影响, 设置了角点、长边中点及中心点 3 处起裂点(图 2b), 其中角点和长边中点处起裂点距离边缘 10 mm。

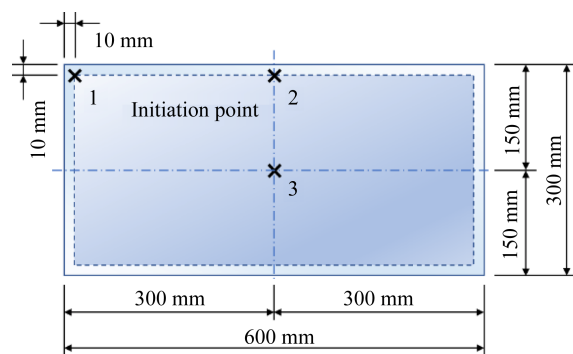
采用高分辨率工业相机采集物理钢化玻璃的裂纹图像, 结合图像处理手段提取裂纹骨架信息。图 3 为起裂点位于中心对应的裂纹骨架图像, 可以看出起裂点出现蝶形碎片, 碎片面积呈现从起裂点向外递减趋势, 而远离起裂点的碎片尺寸趋于均匀。对于相同厚度的物理钢化玻璃, 随着表面应力水平增加, 裂纹密度增大。

2 结果与讨论

为重构物理钢化玻璃的裂纹形态, 需要对试验得到的裂纹形态特征进行定量分析, 提取合适的统计参数。本节分别从碎片密度、碎片几何形态和空间位置的角度描述裂纹形态特征。



(a) Schematic of the experimental setup



(b) Locations of crack initiation points

图 2 物理钢化玻璃裂纹形态试验

Fig. 2 Fragmentation test of tempered glass

2.1 碎片密度

以表面应力测量点位为中心取 50 mm×50 mm 的采样区, 计算各试样 4 个采样区内碎片数量的平均值来衡量碎片密度情况(图 4a), 称为采样碎片数(N_{50})。统计碎片数量时以碎片形心是否落入采样区作为计数标准, 其中对采样区边界上的形心只计入位于左侧边和下侧边的点。根据统计结果得到图 4b 的趋势曲线, 可见对于给定厚度, 采样碎片数与表面应力间呈线性关系。Nielsen^[19]和 Zaccaria^[25]等亦指出碎片密度与玻璃储存的弹性应变能有关。根据物理钢化玻璃在厚度方向上的应力分布

特征可以计算玻璃内弹性应变能, 而玻璃断裂过程中的裂纹面形成与弹性应变能释放相关^[26], 因

此碎片数量与表面应力的关联是以能量为桥梁建立的。

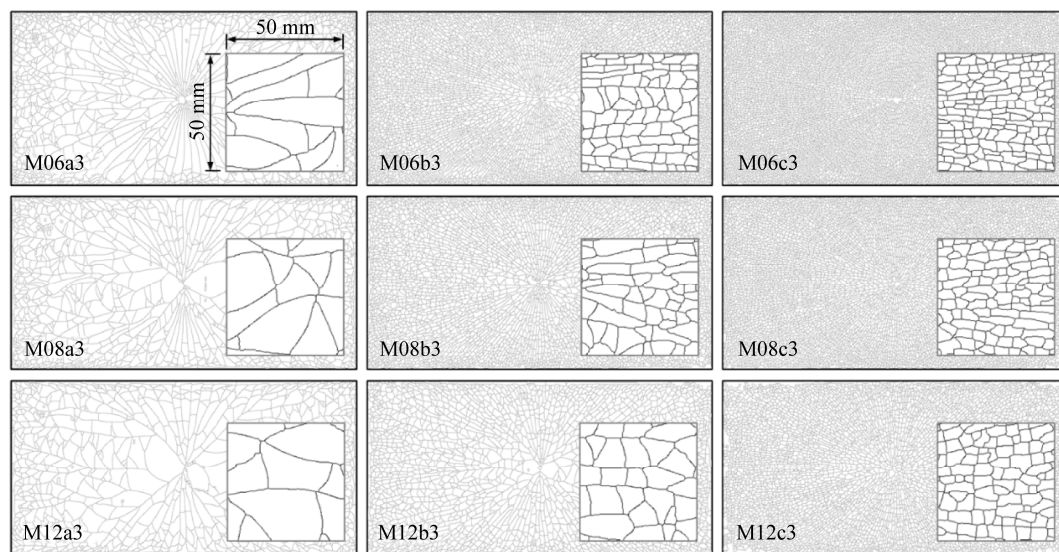
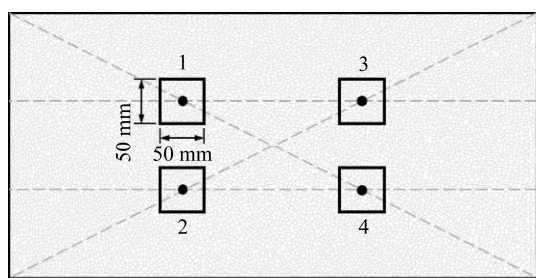
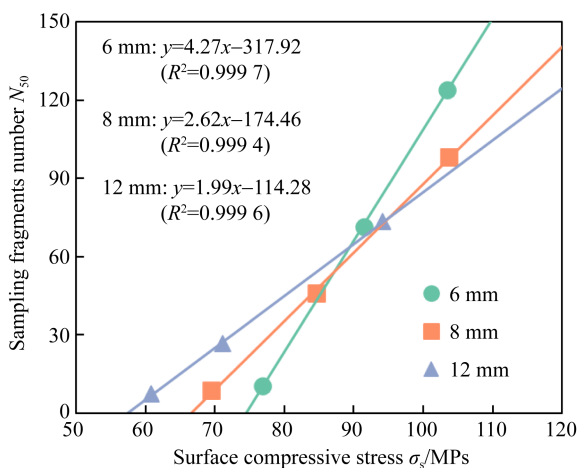


图 3 物理钢化玻璃裂纹形态(起裂点位于中心)

Fig. 3 Fracture morphology of tempered glass (crack initiation at the centre)



(a) Selected 50 mm×50 mm sampling areas



(b) Correlation between N_{50} and σ_s

图 4 碎片密度统计

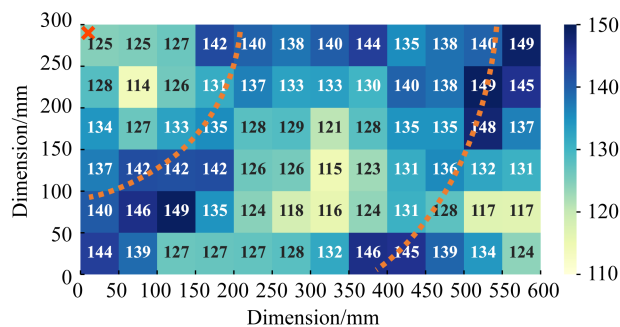
Fig. 4 Statistics of fragments intensity

图 4b 中, 不同厚度玻璃的趋势曲线在 $\sigma_s=90$ MPa 附近存在交叉, 并出现 N_{50} 大小关系的转变。比较

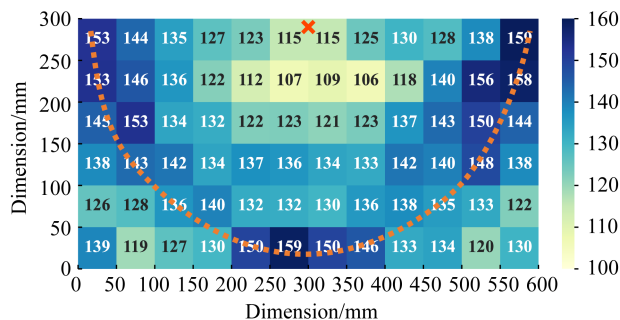
M08a 和 M12b 试样, 当表面应力为 70 MPa 时, 12 mm 厚物理钢化玻璃所形成的碎片密度约为 8 mm 厚的 3 倍。这是由于较厚的玻璃储存有更高的弹性应变能, 开裂时若能量释放比例相似则可以释放更多能量, 从而形成更多的裂纹界面及更高的碎片密度。然而, 对于 M06c 与 M08c 两组试样, 在表面应力为 103 MPa 的情况下, 较厚的物理钢化玻璃所对应的碎片密度反而降低。结果表明, 玻璃开裂时的能量释放比例与表面应力、厚度有关。表面应力较高时, 玻璃内储能水平极高, 开裂过程中弹性应变能无法得到充分释放, 能量释放比例随厚度增大而降低, 这与 Vocialta 等^[27]提出的观点相吻合。同时, 较厚玻璃的裂纹界面面积更大, 需要更多的能量来催生开裂^[28], 在能量释放比例下降的情况下, 开裂受到抑制。

受边缘效应和起裂点荷载等因素影响, 物理钢化玻璃在不同区域的局部碎片密度存在差异。将试样均等划分为 72 个 50 mm×50 mm 区块, 对每个区块内的碎片数量分别进行统计。图 5 为 M06c 试样组在不同起裂点条件下碎片密度的局部情况, “x”标记处为起裂点位置, 颜色越深代表区块内碎片数量越多。可见对于起裂点位于长边中点和中心点的试样, 碎片的局部密度分布关于通过起裂点的轴线体现出良好的对称性。起裂点周围区块的碎片密度较小, 表明起裂荷载对碎片的形成产生了抑制。同时, 碎片局部密度随着与起裂点距离的增大呈规律

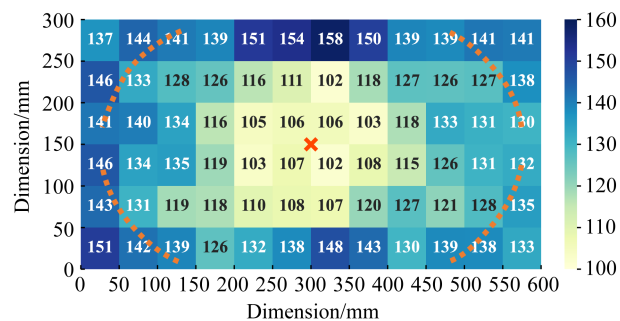
性起伏, 形成围绕起裂点的波状条带(图 5 虚线所示)。尽管 N_{50} 较好地表现了物理钢化玻璃生成碎片数量受厚度和表面应力水平影响的变化趋势, 但不能很好地代表样本的整体密度情况, 这是由于当起裂点位于中心时, 4 个采样区均落入局部密度较低区域, 导致采样结果偏低。



(a) M06c1 (6 mm-high-cor)



(b) M06c2 (6 mm-high-side)



(c) M06c3 (6 mm-high-cen)

图 5 碎片密度局部分布图

Fig. 5 Local distribution of fragments intensity

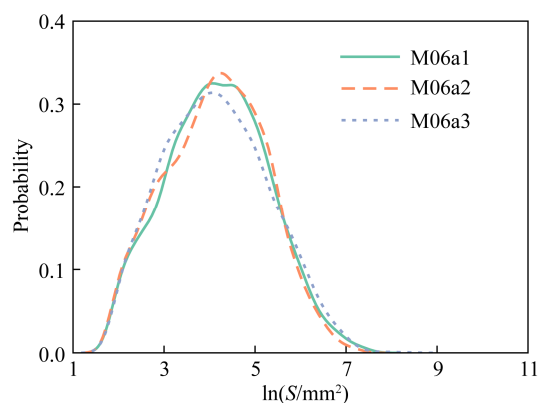
2.2 碎片几何形态

针对起裂点位置、试样表面应力和厚度等因素对碎片几何形态的影响规律进行分析。以碎片面积、周长和圆度等几何形态参数为指标, 引入概率密度函数(PDF)描述物理钢化玻璃碎片分布的整体特征。为消除少量极值导致的偏态分布影响, 对面积和周长参数取对数处理后进行统计。圆度 ϕ 按下式计算:

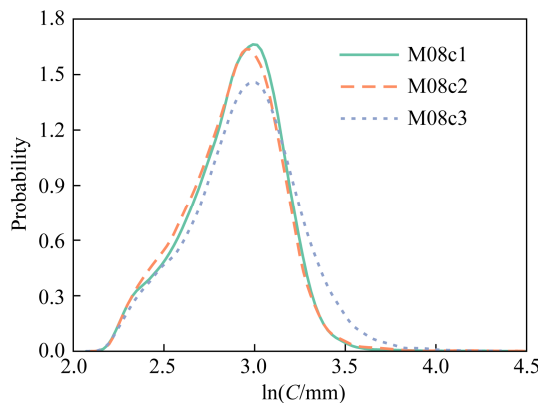
$$\phi = (4\pi S)/C^2 \quad (1)$$

式中: S 为面积; C 为周长。

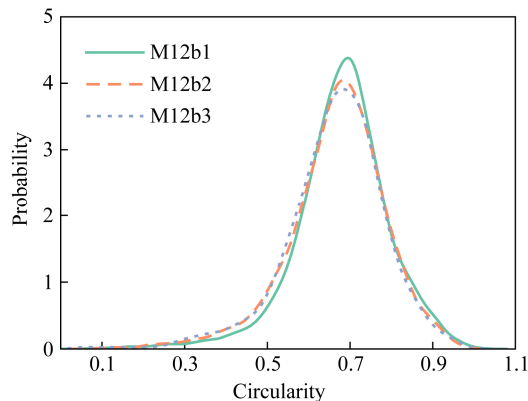
2.2.1 起裂点位置 分别以 M06a、M08c 和 M12b 组试样为例, 对面积、周长和圆度的概率密度分布进行统计, 如图 6 所示。结果显示, 起裂点位置改变对 3 个几何形态参数的统计分布影响很小。因此, 在后续分析表面应力和厚度对碎片几何形态参数分布规律影响时, 不必考虑起裂点位置的影响。



(a) Area, M06a



(b) Perimeter, M08c



(c) Circularity, M12b

图 6 起裂点对碎片几何形态参数分布的影响

Fig. 6 Effect of crack initiation location on the distribution of fragments geometrical parameters

2.2.2 表面应力水平 基于概率密度的统计结果(图 7)显示,在厚度相同时,随着表面应力水平增加,碎片面积的 PDF 峰值位置逐渐左移。以 12 mm 厚的试样为例,面积 PDF 峰值从 4.85 mm² 减小到 3.52 mm²(见表 3)。周长的 PDF 分布亦有相似趋势。

且峰值上升,取值区间变窄,说明碎片尺寸的离散性趋于减小。圆度的 PDF 峰值则右移且上升,对于 3 种厚度的玻璃,均从 0.65 上升至 0.75 左右,显示碎片形状趋近圆形。同时,注意到更小的碎片尺寸对应了更高的圆度。

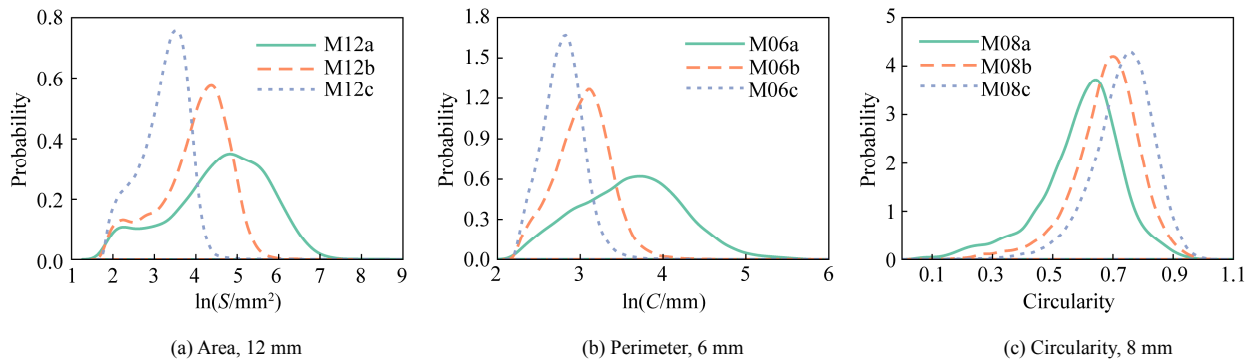


图 7 表面应力水平对碎片几何形态分布的影响

Fig. 7 Effect of tempering level on the distribution of fragments geometry

表 3 碎片几何形态参数的概率密度函数峰值

Table 3 Peak PDFs of the geometrical parameters of fragments

Thickness	Area/mm ²			Perimeter/mm			Circularity		
	Low	Mid	High	Low	Mid	High	Low	Mid	High
6 mm	4.14	3.35	2.81	3.72	3.10	2.82	0.644	0.720	0.764
8 mm	4.79	3.77	3.09	3.98	3.37	2.98	0.645	0.702	0.758
12 mm	4.85	4.39	3.52	4.02	3.65	3.20	0.661	0.691	0.751

2.2.3 物理钢化玻璃厚度 围绕物理钢化玻璃厚度对碎片几何形态的影响,选取 M08a 和 M12b ($\sigma_s=70$ MPa),以及 M06c 和 M08c ($\sigma_s=103$ MPa),分别对所产生的碎片几何形态参数进行了统计比较。发现同为表面应力水平相近的物理钢化玻璃,两对试样的碎片几何形态分布结果趋势完全相反。由于碎片的几何尺寸与碎片密度直接相关,故这一现象的原因与 2.2 节所述相同,即不同厚度物理钢化玻璃在 $\sigma_s=90$ MPa 附近存在开裂时能量释放比例的转变。

2.3 碎片形心空间分布

重构物理钢化玻璃的裂纹形态,核心之一是归纳碎片形心的空间分布规律。本节引入基于距离的空间统计来评估物理钢化玻璃碎片形心的分布及位置关系,同时为后续的裂纹形态重构提供参数依据。

每一点到最近相邻点的距离,可以反映点的分布情况。当点的全局密度 λ_G 一定时,对于偏聚集分布,最小最近邻点距离 $\eta_{\min}$ 趋于减小以至接近于零;对于偏分散分布, $\eta_{\min}$ 随着分散程度增大而趋近于极值 r_{HCP} , 此时点分布完全均匀,

$$r_{HCP} = \sqrt{\frac{2}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1}{\lambda_G}} \quad (2)$$

基于这一特点,引入均匀系数 α 描述点分布的分散程度, α 根据下式计算:

$$\alpha = \eta_{\min} / r_{HCP} \quad (3)$$

不难注意到 α 应在 [0, 1] 间取值,且 α 接近 0 代表点偏向聚集,接近 1 时点偏向均匀分布。

对试样碎片形心的全局密度和近邻点距离进行统计,并计算均匀系数。以 M08b 组为例,最近邻距离的最大值 $\eta_{\max}$ 和平均值 η_{avg} 等结果如表 4 所示。由标准差可见,起裂点对物理钢化玻璃碎片形心的整体分布影响并不显著。

表 4 不同起裂点试样的碎片形心分布参数(M08b)

Table 4 Centroids distribution parameters with different crack initiation points (M08b)

Group	λ_G/mm^{-2}	$\eta_{\min}/\text{mm}$	$\eta_{\max}/\text{mm}$	$\eta_{\text{avg}}/\text{mm}$	α
M08b1	2.19×10^{-2}	2.42	9.20	5.20	0.33
M08b2	2.34×10^{-2}	2.58	8.93	5.00	0.37
M08b3	2.14×10^{-2}	2.59	9.41	5.13	0.35
Avg.	2.22×10^{-2}	2.53	9.18	5.11	0.35
Std.	8.421×10^{-4}	0.078	0.199	0.081	0.014

由于对碎片几何形态分布的统计也显示起裂点位置影响较小,且起裂荷载的影响主要集中在围绕起裂点的小范围。因此,面向大区域进行物理钢化玻璃开裂情况模拟时,可忽略起裂点位置因素,而不至于

对重构精度产生明显影响。基于这一考虑,表5聚焦厚度和钢化水平的影响,对试验得到的碎片形心分布参数进行了统计。结果显示,随表面应力增大, α 由0.2上升至0.4左右,说明碎片形心分布的均匀性增加。

表5 碎片形心分布参数统计汇总

Table 5 Aggregation of parameters statistics of fragments centroids distribution

Group	λ_G/mm^{-2}	$\eta_{\min}/\text{mm}$	$\eta_{\max}/\text{mm}$	$\eta_{\text{avg}}/\text{mm}$	r_{HCP}/mm	α
M06a	8.05×10^{-3}	2.51	19.86	7.34	12.01	0.21
M06b	3.34×10^{-2}	2.23	7.64	4.23	5.89	0.38
M06c	5.28×10^{-2}	2.04	5.75	3.46	4.68	0.44
M08a	6.40×10^{-3}	2.91	19.20	8.45	13.46	0.22
M08b	2.22×10^{-2}	2.53	9.18	5.11	7.22	0.35
M08c	4.19×10^{-2}	2.21	6.36	3.84	5.25	0.42
M12a	5.57×10^{-3}	3.06	20.29	9.07	14.49	0.21
M12b	1.34×10^{-2}	2.61	11.89	6.40	9.31	0.28
M12c	3.03×10^{-2}	2.37	7.34	4.41	6.18	0.38

3 基于 Voronoi 分布的裂纹形态重构

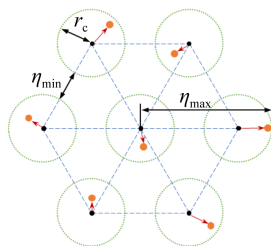
3.1 碎片形心分布的模拟

根据物理钢化玻璃碎片分布的特点,考虑以碎片密度及形心间的最近邻距离作为主要控制参数。既有的点分布模拟方法有 Matérn 法(MHCP)^[29]、泊松圆盘采样^[30]等,但实现效果不甚理想。本文提出如下改进布设方法:首先根据点的目标全局分布密度 λ_G ,按照完全均匀分布进行布点,随后对点进行随机移动(图8),可移动范围根据统计得到的碎片形心最小最近邻距离 $\eta_{\min}$ 确定,即半径为

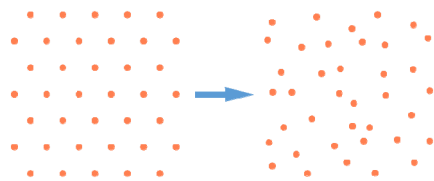
$$r_c = (r_{\text{HCP}} - \eta_{\min})/2 \quad (4)$$

的圆。所得点分布的理论最大最近邻距离 $\eta_{\max}$ 为

$$\eta_{\max} = r_{\text{HCP}} + r_c \quad (5)$$



(a) Uniform points placement and random movement



(b) Point distribution before and after random movement

图8 形心分布模拟过程

Fig. 8 Simulation process of centroids distribution

该方法可有效控制点分布的 λ_G 及 $\eta_{\min}$ 。比较 $\eta_{\max}$ 试验值与理论值(表6),偏差在合理范围内。

表6 最大最近邻距离试验值与理论值的比较

Table 6 Comparison of the experimental and theoretical

$\eta_{\max}$ values			
Group	Experimental $\eta_{\max}/\text{mm}$	Theoretical $\eta_{\max}/\text{mm}$	Deviation value/mm
6-low	19.86	16.75	3.11
6-mid	7.64	7.72	0.08
6-high	5.75	6.00	0.25
8-low	19.20	18.74	0.46
8-mid	9.18	9.56	0.38
8-high	6.36	6.77	0.41
12-low	20.29	20.20	0.09
12-mid	11.89	12.66	0.77
12-high	7.34	8.08	0.74

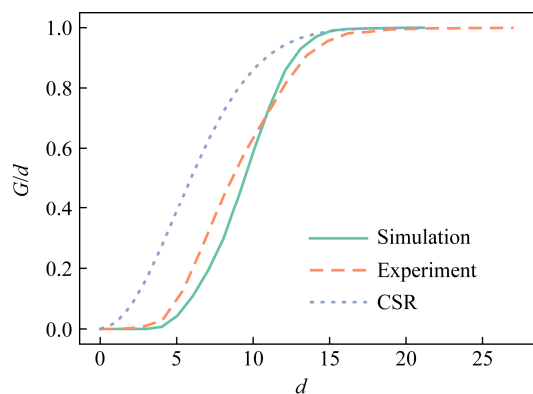
以 M06b 组的参数为例,控制 $\eta_{\min}$ 为核心参数,对几种点分布方法进行了比较,结果如表7所示,MHCP 和泊松圆盘采样得到点分布结果的其它参数与试验数据偏差较大,本文所提出的方法综合表现更优。

表7 M06b 组点分布方法的比较

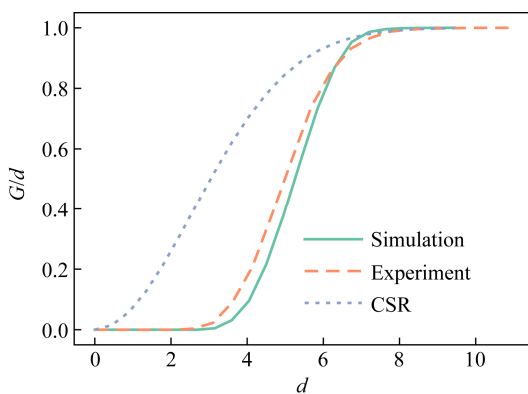
Table 7 Comparison of selected points distribution methods using data from M06b

Item	λ_G/mm^{-2}	$\eta_{\min}/\text{mm}$	$\eta_{\max}/\text{mm}$	α
Experimental data	3.34×10^{-2}	2.23	7.64	0.38
MHCP	2.42×10^{-2}	2.23	12.69	0.32
Poisson disk	11.75×10^{-2}	2.23	3.91	0.71
Proposed method	3.52×10^{-2}	2.29	7.62	0.40

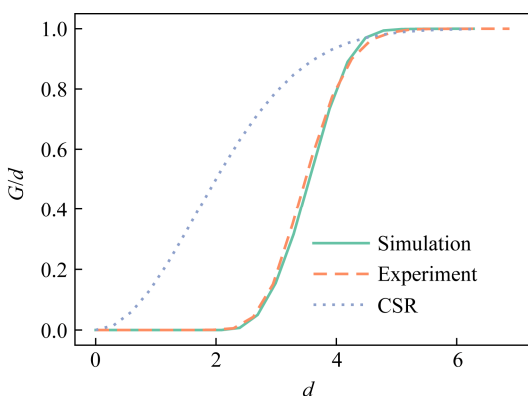
采用所提出的方法对碎片形心分布进行布置, 根据试验得到的碎片形心分布参数(表 5), 通过对 λ_G 和 $\eta_{\min}$ 的控制, 生成模拟点分布。随后, 对最近邻距离以 G 函数为指标进行统计。 G 函数是关于全体最近邻距离的数值中小于给定距离 d 的比例的函数, 可用于评价点分布情况。与试验结果及点的完全随机分布(CSR)比较(图 9), 可见重构结果与试验结果吻合度较高, 重构效果较好。同时, 所得到的



(a) M12a (12 mm-low)



(b) M08b (8 mm-mid)



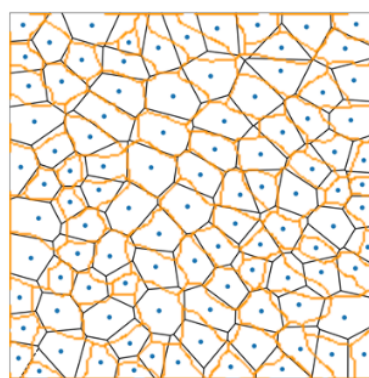
(c) M06c (6 mm-high)

图 9 重构形心分布与试验结果的 G 函数比较Fig. 9 Comparison of G functions between regenerated centroids and experimental data

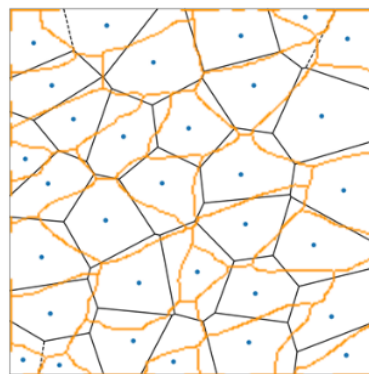
G 函数图像均在 CSR 期望图像下方, 说明碎片形心的分布偏分散。

3.2 基于 Voronoi 形态的裂纹形态重构及评估

3.2.1 Voronoi 形态重构的适用性评价 Voronoi 形态和物理钢化玻璃碎片的真实形态有较高相似性, 本节基于试验的形心分布结果和 Voronoi 形态, 对裂纹形态进行重构并对适用性进行了评价。首先, 截取试样局部区域进行基于试验碎片形心分布的局部重构, 如图 10 所示, 其中橙色和黑色线条分别为真实和重构碎片轮廓, 蓝色实心点为形心。可看到重构效果良好, 真实裂纹与重构碎片轮廓重合度较高。



(a) Case 1



(b) Case 2

图 10 基于试验得到的形心分布进行 Voronoi 碎片重构与真实碎片分布的比较

Fig. 10 Regenerated morphology and experimental results with identical centroids

其次, 对重构碎片的几何形态分布特征进行基于概率密度函数的分析。以 M12c3 的一组试验数据为例(图 11), 比较重构与真实裂纹形态分布, 发现重构中出现极小或极大尺寸碎片的概率相对较低, 碎片几何尺寸更为集中, 但覆盖了真实碎片尺寸的

主要区间,且两者的概率密度函数峰值接近,说明重构得到的碎片尺寸能够较好还原实际情况。然而,重构碎片的圆度取值区间相比真实碎片偏高,这是由于 Voronoi 形态的重构方式降低了极端碎片形状出现的概率,导致碎片形状偏于圆形。

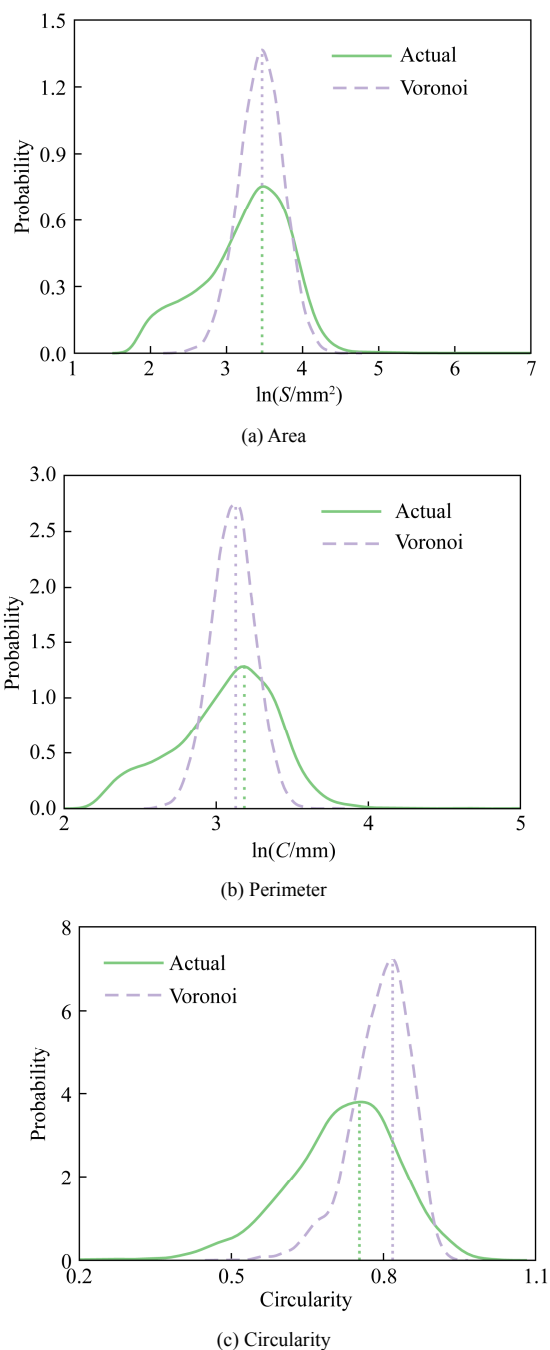


图 11 Voronoi 形态重构与试验碎片几何形态参数的概率密度函数比较

Fig. 11 PDFs of geometrical parameters of regenerated morphology and experimental results

3.2.2 基于模拟形心布设和 Voronoi 形态方法的裂纹形态重构

结合本文提出的形心布设方法和

Voronoi 形态重构方法,在 600 mm×300 mm 区域内对形心的分布进行模拟,并采用 Voronoi 形态重构物理钢化玻璃的裂纹形态。图 12 为基于 M12b 组 ($\sigma_s=71.09$ MPa)试样的空间统计数据为参数生成的裂纹形态重构结果,符合对物理钢化玻璃裂纹的预期。

在满足全局密度的要求下,碎片的尺寸和形态变化体现出一定的随机性。表 8 通过多轮重复模拟取均值,得到重构碎片几何形态分布概率峰值数据,并计算了与试验结果(表 3)的偏差。可见碎片面积和周长的概率密度峰值均较为接近,说明重构得到的碎片几何尺寸可较好涵盖真实碎片分布中的主要形态特征。

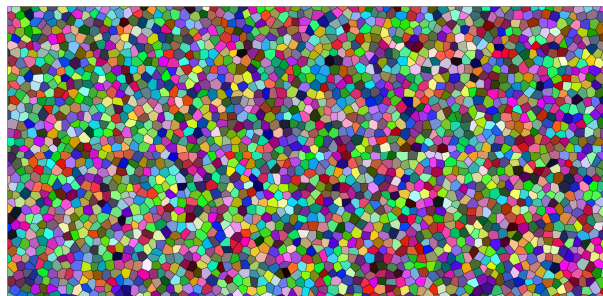


图 12 基于所提形心布设方法的物理钢化玻璃裂纹形态重构
Fig. 12 Regenerated morphology based on proposed centroid distribution method

表 8 重构碎片几何形态参数概率密度函数峰值与试验数据的比较

Table 8 Peak PDFs of the regenerated fracture morphology and its comparison with testing data

Group	Area/mm ²		Perimeter/mm		Circularity	
	Peak	Deviation value	Peak	Deviation value	Peak	Deviation value
M06a	4.83	0.70	3.78	0.06	0.841	0.197
M06b	3.40	0.05	3.05	0.05	0.868	0.148
M06c	2.94	0.13	2.81	0.01	0.875	0.111
M08a	5.06	0.27	3.89	0.09	0.841	0.196
M08b	3.82	0.05	3.26	0.11	0.864	0.163
M08c	3.18	0.09	2.93	0.05	0.873	0.115
M12a	5.20	0.36	3.97	0.06	0.842	0.181
M12b	4.32	0.07	3.52	0.13	0.853	0.162
M12c	3.51	0.02	3.10	0.10	0.867	0.116

因此,提出的重构方法可较好地匹配物理钢化玻璃裂纹形态的关键分布特征。同时,由于所提重构方法的核心控制参数为点分布密度和最近邻距离,故可不受特定尺寸的限制,实现任意大小物理

钢化玻璃裂纹形态的模拟。

4 结论

1) 物理钢化玻璃裂纹形态主要取决于表面应力及厚度, 而较少受起裂位置等因素的影响;

2) 物理钢化玻璃开裂过程中的能量释放比例随厚度增大而降低, 使得不同厚度玻璃的碎片密度-表面应力趋势曲线在 90 MPa 附近交叉;

3) 随着碎片密度的增大, 碎片尺寸分布更加集中, 同时整体圆度增大, 表面应力由 60 MPa 增大至 105 MPa 时, 碎片圆度概率密度峰值由 0.65 上升至 0.75;

4) 碎片形心分布偏分散, 表征均匀性的均匀系数 α 随表面应力增大由 0.2 上升至 0.4。

5) 提出了一种基于 Voronoi 分布的裂纹形态重构方法。该方法通过控制全局碎片密度和最近邻距离参数, 采用均匀布点后随机移动的方式实现形心布设, 并根据 Voronoi 形态方法生成碎片单元, 取得了良好的表征效果。

参考文献:

- [1] 黄小坤, 段树坤, 刘强, 等. 玻璃结构研究进展与工程实践[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(6): 1–20.
HUANG Xiaokun, DUAN Shukun, LIU Qiang, et al. J Build Struct (in Chinese), 2020, 41(6): 1–20.
- [2] O'REGAN C. Structural Use of Glass in Buildings. 2nd Edition[M]. London: Institution of Structural Engineers, 2014.
- [3] WANG X E, YANG J, LIU Q F, et al. A comparative study of numerical modelling techniques for the fracture of brittle materials with specific reference to glass[J]. Eng Struct, 2017, 152: 493–505.
- [4] SUN X, KHALEEL M A, DAVIES R W. Modeling of stone-impact resistance of monolithic glass ply using continuum damage mechanics[J]. Int J Damage Mech, 2005, 14(2): 165–178.
- [5] 包亦望, 刘立忠, 韩松, 等. 钢化玻璃自爆机理的新发现——单质硅微粒引裂[J]. 硅酸盐学报, 2007, 35(9): 1273–1276.
BAO Yiwang, LIU Lizhong, HAN Song, et al. J Chin Ceram Soc, 2007, 35(9): 1273–1276.
- [6] KASPER A. Spontaneous cracking of thermally toughened safety glass. Part one: Properties of nickel sulphide inclusions[J]. Glass Struct Eng, 2019, 4(3): 279–313.
- [7] 刘小根, 包亦望, 万德田, 等. 硫化镍引发钢化玻璃自爆的临界尺寸及影响[J]. 无机材料学报, 2020, 35(2): 211–216.
LIU Xiaogen, BAO Yiwang, WAN Detian, et al. J Inorg Mater (in Chinese), 2020, 35(2): 211–216.
- [8] ZHANG X, HAO H, MA G. Laboratory test and numerical simulation of laminated glass window vulnerability to debris impact[J]. Intl J Impact Eng, 2013, 55: 49–62.
- [9] CNR-DT 210/2013. Guide for the Design, Construction, and Control of Buildings with Glass Structural Elements[S]. Roma, 2013.
- [10] FORABOSCHI P. Hybrid laminated-glass plate: Design and assessment[J]. Compos Struct, 2013, 106: 250–263.
- [11] GALUPPI L, ROYER-CARFAGNI G. The post-breakage response of laminated heat-treated glass under in plane and out of plane loading[J]. Composites Part B: Engineering, 2018, 147: 227–239.
- [12] 王星尔, 杨健, 王翰坤. 夹层热钢化玻璃裂纹形态表征及开裂后力学行为[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(8): 1039–1046.
WANG Xinger, YANG Jian, WANG Hankun. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(8): 1039–1046.
- [13] SESHADRI M, BENNISON S, JAGOTA A, et al. Mechanical response of cracked laminated plates[J]. Acta Mater, 2002, 50(18): 4477–4490.
- [14] OVEREND M, BUTCHART C, LAMBERT H, et al. The mechanical performance of laminated hybrid-glass units[J]. Compos Struct, 2014, 110: 163–173.
- [15] BIOLZI L, CATTANEO S, ROSATI G. Progressive damage and fracture of laminated glass beams[J]. Constr Build Mater, 2010, 24(4): 577–584.
- [16] BIOLZI L, ORLANDO M, PISCITELLI L R, et al. Static and dynamic response of progressively damaged ionoplast laminated glass beams[J]. Compos Struct, 2016, 157: 337–347.
- [17] BIOLZI L, CATTANEO S, ORLANDO M, et al. Post-failure behavior of laminated glass beams using different interlayers[J]. Compos Struct, 2018, 202: 578–589.
- [18] ZHAO C, YANG J, WANG X, et al. Experimental investigation into the post-breakage performance of pre-cracked laminated glass plates[J]. Constr Build Mater, 2019, 224: 996–1006.
- [19] NIELSEN J H, OLESEN J F, STANG H. Characterization of the residual stress state in commercially fully toughened glass[J]. J Mater Civ Eng, 2010, 22(2): 179–185.
- [20] NIELSEN J H, BJARRUM M. Deformations and strain energy in fragments of tempered glass: Experimental and numerical investigation[J]. Glass Struct Eng, 2017, 2(2): 133–146.
- [21] LEE H, CHO S, YOON K, et al. Glass thickness and fragmentation behavior in stressed glasses[J]. New J Glass Ceram, 2012, 2(4): 116–121.
- [22] DUGNANI R, ZEDNIK R J, VERGHESE P. Analytical model of dynamic crack evolution in tempered and strengthened glass plates[J]. Int J Fract, 2014, 190(1/2): 75–86.
- [23] WANG X-E, YANG J, HUANG X, et al. Voronoi-FDEM concept for modelling post-fracture response of progressively damaged structural glass[J]. Eng Comput, 2021: 1–14.
- [24] GB 15763.2-2005. 建筑用安全玻璃 第2部分: 钢化玻璃[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
GB 15763.2-2005. Safety glazing material in building – Part 2: Tempered glass. Beijing: China Standards Press, 2005.
- [25] ZACCARIA M, OVEREND M. Nondestructive safety evaluation of thermally tempered glass[J]. J Mater Civ Eng, 2020, 32(4): 04020043.
- [26] NIELSEN J H. Remaining stress-state and strain-energy in tempered glass fragments[J]. Glass Struct Eng, 2017, 2(1): 45–56.
- [27] VOCIALTA M, CORRADO M, MOLINARI J F. Numerical analysis of fragmentation in tempered glass with parallel dynamic insertion of cohesive elements[J]. Eng Fract Mech, 2018, 188: 448–469.
- [28] MOLNÁR G, FERENTZI M, WELTSCH Z, et al. Fragmentation of wedge loaded tempered structural glass[J]. Glass Struct Eng, 2016, 1(2): 385–394.
- [29] BADDELEY A, RUBAK E, TURNER R. Spatial Point Patterns: Methodology and Applications with R[M]. CRC Press, 2015.
- [30] COOK R L. Stochastic sampling in computer graphics[J]. ACM Trans Graph, 1986, 5(1): 51–72.