

基于分形理论的钢化玻璃风沙冲蚀 损伤形貌演化机理

郝负洪^{1a,1b,2}, 张飞龙^{1a}, 刘艳晨^{1c}, 宣姣羽^{1c}

(1. 内蒙古工业大学 a. 土木工程学院 b. 内蒙古自治区土木工程结构与力学
重点实验室 c. 理学院, 呼和浩特 010051; 2. 内蒙古自治区建筑检测
鉴定与安全评估工程技术研究中心, 呼和浩特 010051)

摘要: **目的** 为准确评价风沙冲蚀环境下钢化玻璃表面形貌, 描述形貌演化过程, 分析形貌损伤机理。**方法** 进行了钢化玻璃风沙冲蚀损伤试验, 利用激光共聚焦显微镜 (LSCM) 提取损伤表面形貌, 利用透光率仪测试钢化玻璃透光率, 综合使用分形维数、多重分形谱、透光率表征不同演化条件 (冲蚀时间、冲蚀角度) 下钢化玻璃表面形貌演化过程, 识别冲蚀损伤特征及损伤阶段。**结果** 不同冲蚀时间下, 存在 3 个损伤阶段——快速增长期、中速增长期和稳定期, 前 2 个阶段分形维数增速和透光率减速较快, 稳定期透光率减速较慢, 且分形维数将逐渐稳定在最大值 (1.875) 左右; 不同冲蚀角度下, 存在 2 个损伤阶段, 中低冲蚀角 ($\leq 60^\circ$) 下分形维数增速和透光率减速较快, 高冲蚀角 ($> 60^\circ$) 下分形维数增速和透光率减速较慢。**结论** 钢化玻璃表面冲蚀损伤机制为初生损伤和次生损伤, 前者由风沙粒子单次冲击造成, 后者是在后续沙粒持续冲击下由初生损伤诱发演化产生, 前者复杂程度及对可见光的削弱能力大于后者; 快速增长期、中速增长期和中低冲蚀角 ($\leq 60^\circ$) 下以初生损伤为主, 稳定期和高冲蚀角 ($> 60^\circ$) 下次生损伤大量增加。

关键词: 钢化玻璃; 冲蚀; 损伤评价; 分形维数; 多重分形谱; 透光率

中图分类号: TH117.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)06-0221-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.06.019

Evolution Mechanism of Wind-sand Erosion Damage Morphology of Tempered Glass Based on Fractal Theory

HAO Yun-hong^{1a,1b,2}, ZHANG Fei-long^{1a}, LIU Yan-chen^{1c}, XUAN Jiao-yu^{1c}

(1. a. School of Civil Engineering, b. The Inner Mongolia Key Laboratory of Civil Engineering Structure and Mechanics,
c. School of Science, Inner Mongolia University of Technology, Hohhot 010051, China; 2. The Inner Mongolia
Research Center for Building Inspection, Identification and Safety Assessment, Hohhot 010051, China)

收稿日期: 2021-06-15; 修订日期: 2021-09-07

Received: 2021-06-15; Revised: 2021-09-07

基金项目: 国家自然科学基金 (11862022, 51468049, 11662012); 内蒙古自治区自然科学基金项目 (2018MS0547); 内蒙古自治区青年科技英才支持计划 (NJYT-17-A09); 内蒙古自治区草原英才资助项目

Fund: National Natural Science Foundation of China (11862022, 51468049, 11662012); Natural Science Foundation of Inner Mongolia Autonomous Region (2018MS0547); Mongolia Autonomous Region Youth Science and Technology Excellence Project (NJYT-17-A09); Inner Mongolia Autonomous Region Grassland Talent Project

作者简介: 郝负洪 (1977—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为区域特殊环境下工程结构和材料耐久性损伤及评价。

Biography: HAO Yun-hong (1977-), Male, Doctor, Professor, Research focus: engineering structure and material durability damage and evaluation under special regional environment.

引文格式: 郝负洪, 张飞龙, 刘艳晨, 等. 基于分形理论的钢化玻璃风沙冲蚀损伤形貌演化机理[J]. 表面技术, 2022, 51(6): 221-228.

HAO Yun-hong, ZHANG Fei-long, LIU Yan-chen, et al. Evolution Mechanism of Wind-sand Erosion Damage Morphology of Tempered Glass Based on Fractal Theory[J]. Surface Technology, 2022, 51(6): 221-228.

ABSTRACT: In order to accurately evaluate the morphology of tempered glass surface under wind-sand erosion environment, describe the evolution process of morphology, and analyze the mechanism of morphology damage. In this paper, the wind-sand erosion damage test of tempered glass was carried out. The morphology of the damaged surface was extracted by laser confocal microscope (LSCM). The transmittance of tempered glass was tested by transmittance meter. The fractal dimension, multifractal spectrum and transmittance were used to characterize the evolution process of the surface morphology of tempered glass under different evolution conditions (erosion time and erosion angle). The characteristics of erosion damage and the stage of damage were identified. It was found that under different erosion time, there were three damage stages, rapid growth period, medium growth period and stable period. The first two stages of fractal dimension growth and transmittance slow down faster. And in the latter stage, transmittance slows down and the fractal dimension will gradually stabilize at the maximum (1.875). Under different erosion angles, there were two damage stages. Under low erosion angle ($\leq 60^\circ$), the growth rate of fractal dimension and transmittance decrease rapidly, while under high erosion angle ($>60^\circ$), the growth rate of fractal dimension and transmittance decrease slowly. The erosion damage mechanism of tempered glass surface was primary damage and secondary damage. The former was caused by the single impact of aeolian sand particles, and the latter was produced by primary damage induced evolution under the continuous impact of subsequent sand grains. The complexity and weakening ability of the former to visible light were greater than those of the latter. The primary damage was dominant in the rapid growth period, medium growth period and low erosion angle ($\leq 60^\circ$), while the secondary damage increased significantly in the stable period and high erosion angle ($>60^\circ$).

KEY WORDS: tempered glass; erosion; damage evaluation; fractal dimension; multi-fractal spectrum; transmittance

钢化玻璃以其优异的力学性能和安全性能被广泛地应用于高铁车窗和建筑围护等工业结构^[1-2]。但自然界中存在大量的冲蚀现象^[3-4],如沙尘暴^[5],会对钢化玻璃造成不容忽视的损害,极大地影响其使用寿命和安全性。准确评价钢化玻璃的冲蚀损伤,有助于科研人员更好地描述冲蚀现象,揭示其损伤机理,为其使用和防护提供理论依据。

冲蚀过程中风沙粒子与靶材表面间的相互作用十分复杂,难以通过追踪单个风沙粒子的状态将表面所有变化还原,利用磨屑和损伤表面等系统输出量对冲蚀损伤进行全局性、统计性的评价将更为可行。目前,主流的冲蚀损伤评价方法如失重法^[6]、形貌评价^[7]、物相分析^[8]、力学性能分析^[9]、粗糙度评价^[10]等,均是对系统输出量的表征,综合使用可以较好地评价冲蚀现象。但仍有缺陷,如失重法在损失量较少时难以获得准确的数据;形貌法受主观判断影响较大,可能会导致较大的偏差。需要引入一种新的冲蚀评价方法来表征冲蚀现象的全过程,提升对冲蚀现象的分析能力。

自 Mandelbrot^[11]创立分形理论以来,就被大量应用于损伤表面的研究,它可以有效地描述自然界中不规则复杂的行为,定量表征精细零碎的结构^[12-13]。研究证明^[14-15],冲蚀损伤表面具备自相似性和无标度性的特征,具有迭代的损伤过程,利用分形理论可以定量表征冲蚀损伤表面形貌^[16-17],为冲蚀现象的研究提供新的视角。而透光率作为玻璃重要的定量表征指标和服役性能之一^[18],同样具有研究价值。

基于现有冲蚀损伤评价方法和分形理论,本文提出了一种结合分形维数和多重分形谱表征风沙冲蚀损伤表面形貌的分析方法,利用这一方法分析了冲蚀损伤形态,研究了钢化玻璃表面形貌及透光率随冲蚀

时间、冲蚀角度演化的过程,揭示了冲蚀损伤机理,补充了现有风沙冲蚀损伤评价体系。

1 试验

1.1 材料及设备

试验选用的钢化玻璃由普通硅酸盐平板玻璃淬火制成,尺寸为 80 mm×80 mm×5 mm,各项指标均符合 GB 15763.2—2016《建筑用安全玻璃 第 2 部分:钢化玻璃》,材料性能见表 1。试验用风沙沙粒取自于内蒙古中西部库布齐沙漠,粒径级配见表 2。使用奥林巴斯 OLS4100 激光共聚焦显微镜(LSCM)提取损伤表面形貌,该设备可对损伤表面进行无损检测^[19]。使用林上 LS116 透光率仪测试钢化玻璃在可见光波段的透光率。采用气流挟沙喷射法,使用风沙环境侵蚀试验系统模拟沙尘暴环境下钢化玻璃的风沙冲蚀,如图 1 所示。

表 1 钢化玻璃的性能参数
Tab.1 Property parameters of tempered glass

Density/ (kg·m ⁻³)	Elastic modulus/ GPa	Rockwell hardness/ GPa	Compressive strength/GPa	Toughness/ (MPa·m ^{1/2})
2 500	74.0	6.40	0.80	0.75

表 2 库布齐沙漠粒径分布
Tab.2 Particle size distribution in kubuqi desert

Particle size/mm	<0.05	<0.1	<0.25	<0.5	>0.5
Contents/%	8.96	37.53	50.82	1.74	0.66

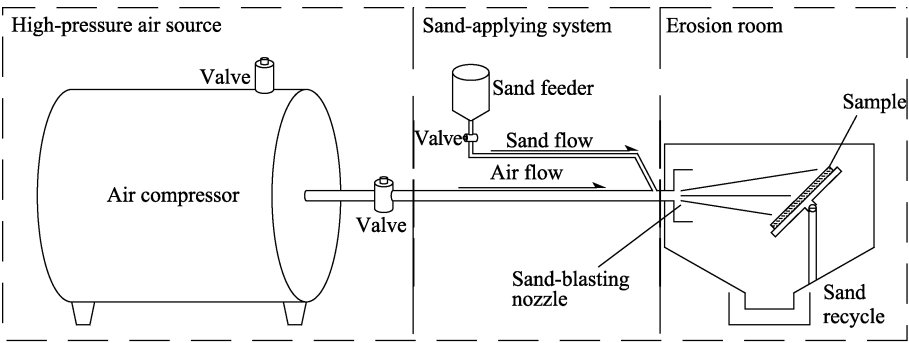


图 1 模拟风沙环境侵蚀试验系统示意图

Fig.1 Sketch map of simulated wind-sand environment erosion experiment system

1.2 试验参数

使用风沙环境侵蚀试验系统模拟实际风沙冲蚀现象, 需要设置风沙流参数。风沙流参数为: 冲蚀速度 12 m/s, 模拟实际沙尘天气风速; 下沙率 28 g/min, 模拟实际沙尘天气中沙尘质量。上述风沙流参数利用相似理论^[20]转换为实际沙尘天气工况, 计算过程如下。

当冲蚀角为 90°时, 测得距出风口 10 cm 处风沙过流面积 A_m 为一个直径为 15 cm 的圆形区域, 则实际沙尘过流面积 $A=A_m=0.070\ 7\ \text{m}^2$ 。

沙尘质量浓度 Q 与下沙率 M_s 、冲蚀面积 A 、风沙流的冲蚀速度 V 的关系为:

$$Q = \frac{M_s}{VA} \tag{1}$$

查表 3 可知, 扬沙等级沙尘质量浓度为 2 000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 换算成下沙率为:

$$M_s = QVA = 0.101\ 784\ 6\ \text{g}/\text{min} \tag{2}$$

表 3 沙尘天气分类对应沙尘浓度及风力等级

Tab.3 Relationship between sandstorm weather classification and dust mass concentration

Sandstorm weather classification	Dust mass concentration/ ($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	Wind velocity/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
Floating dust	200-500	<9
Yangsha	500-2 000	9-12
Sandstorm	2 000-5 000	12-19
Strong sandstorm	5 000-20 000	19-23
Extra strong sandstorm	>20 000	>23

速度相似比: $C_v = \frac{V_m}{V_p} = 1$ (3)

质量相似比: $C_m = \frac{M_m}{M_p} = 275$ (4)

冲蚀面积相似比: $C_a = \frac{A_m}{A_p} = 1$ (5)

结合式 (1) 和式 (3) — (5) 可得沙尘质量浓度相似比为:

$$C_q = \frac{Q_m}{Q_p} = \frac{\frac{M_m}{V_m A_m}}{\frac{M_p}{V_p A_p}} = 275 \tag{6}$$

由式 (6) 可知, 模拟试验中冲蚀 1 min 可以模拟实际冲蚀 275 min 所造成的损伤, 相当于 1 a 内发生约 4.6 次扬沙等级沙尘暴, 每次持续 60 min。查阅相关资料后^[21], 认为 1 a 发生 5 次以内、风力为 12 m/s 的扬沙天气, 符合内蒙古地区实际沙尘天气情况。

2 数据提取与表征

钢化玻璃损伤表面图像获取位置为损伤区域椭圆焦点处, 如图 2 所示。因为并非所有冲蚀损伤区域都具有同等水平的损害, 选取中心位置将更具有代表性, 数据也更稳定。钢化玻璃冲蚀损伤尺寸一般在 20 μm 以内, 为将损伤表面复杂精细的形貌特征全面包含, 体现出不同损伤形态的统计特征, 将不同损伤演化阶段的损伤表面放在同一水平下比较, 设置损伤图像取样尺寸为 2 560 $\mu\text{m}\times 2\ 560\ \mu\text{m}$, 放大倍数为 5 倍, 图像像素为 1 024 \times 1 024。

将损伤表面图像转换为灰度图像, 再转为二值图像, 最后黑白反转, 处理后的图像中白色部分可以代表冲蚀损伤, 如图 3 所示。因为未受损伤的玻璃表面非

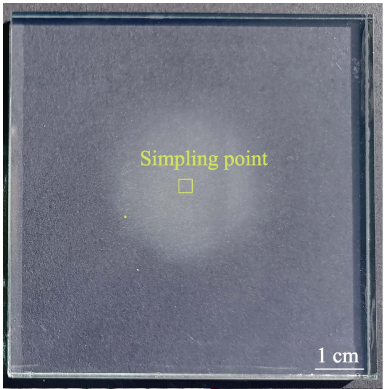
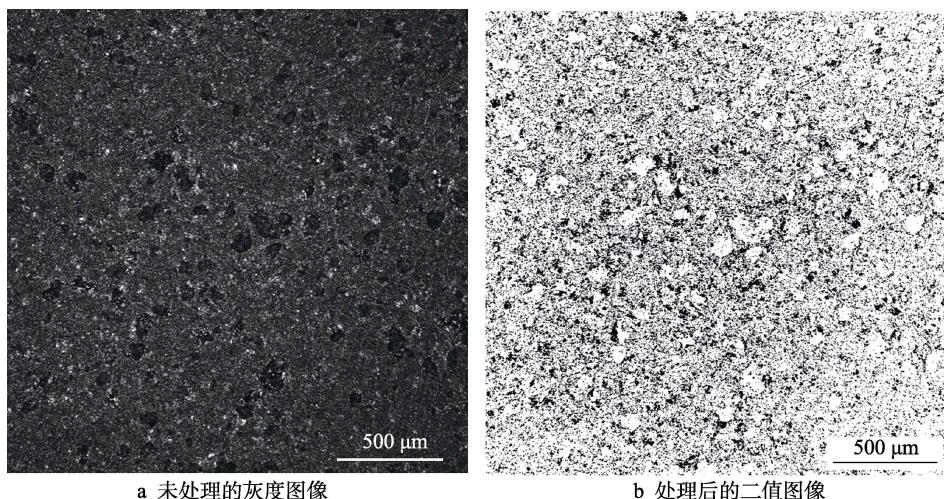


图 2 取样点位置

Fig.2 Sampling point location



a 未处理的灰度图像

b 处理后的二值图像

图3 损伤表面图像

Fig.3 Images of damage surface: a) unprocessed grayscale image; b) processed binary image

常平整,可以认为所有损伤都是由风沙冲蚀造成的。

利用分形维数和多重分形谱对包含损伤特征的二值图像进行不同层次、不同角度的表征。分形维数是表征损伤表面最常用的手段,它能够度量损伤表面的不规则性既混乱程度,分形维数越大说明表面结构越精细复杂,所具有的能量也就越大。本文使用像素盒计数法^[22]计算损伤图像的分形维数。处理后的损伤图像为二值图,图像边长为1,数据仅包含1、0,即有无像素。首先将二值图用间距 r 的网格划分成大小相同的格子,记有像素的格子数为 $N(A)$,然后不断缩小网格的尺寸并记录 $N(A)$,最后在双对数直角坐标系中绘制数据点 $[1/r, N(A)]$ 并作线性回归,则所得直线的斜率为所测图像的分形维数,其表达式为:

$$D \sim -\lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log N(A)}{\log r} \quad (7)$$

式中: D 为分形维数; A 为处理后的二值图; $N(A)$ 为有像素的格子数; r 为相似比。

多重分形谱^[23]能够度量损伤表面的复杂程度、不规则程度以及不均匀程度,从而给出比分形维数更丰富的结构信息,本文同样使用盒计数法计算损伤图像的多重分形谱。先将二值图用边长为 r ($r \leq 1$,若 $r=1$ 时,方格尺度即为分形图像的大小)的网格划分成大小相同的格子;再将每个边长为 r 的格子继续用边长为 a 的网格划分成小方格,如果小方格内有像素,则定义该格为黑,否则为白。记每个边长为 r 的方格内黑小方格的格子数 N_{ij} ,二值图中总的黑色小方格子数 $\sum_{ij} N_{ij}$,则概率测度(每个边长为 r 的方格中分形图像的占据率)见式(8),在无标度的自相似区域内,概率测度 $P_{ij}(r)$ 将有如式(9)所示的指数关系。

$$P_{ij}(r) = \frac{N_{ij}}{\sum_{ij} N_{ij}} \quad (8)$$

$$P_{ij}(r) \sim r^{\alpha_{ij}} \quad (9)$$

式(9)中 α_{ij} 为奇异性标度指数。将损伤图像上所有具有相同奇异指数的 α_{ij} 的格子数记为 $N_{\alpha_{ij}}(r)$,则在无标度的自相似区域内也存在如式(10)所示的标度关系。

$$N_{\alpha_{ij}}(r) \sim r^{-f(\alpha_{ij})} \quad (10)$$

此处 $f(\alpha_{ij})$ 是奇异性标度指数为 α_{ij} 的格子组成的分形子集的维数,将所有 $[\alpha_{ij}, f(\alpha_{ij})]$ 绘制在直角坐标系中便构成了多重分形谱。图中 $f(\alpha_{ij})$ 越大说明对应分形子集数量越少,谱宽 $\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min}$ 则反映了整个损伤表面的不均匀性程度, $\Delta\alpha$ 越大说明损伤表面越粗糙;最大、最小概率子集分形维数的差 $\Delta f = f(\alpha_{\max}) - f(\alpha_{\min})$ 反映损伤表面的形态特征, Δf 越小说明表面越光滑;小概率子集体现在谱面右端,大概率子集在左端。

3 结果与讨论

3.1 冲蚀表面的损伤形态分析

通过分析钢化玻璃表面损伤图像,发现存在3种损伤形态:原生损伤、初生损伤和次生损伤。原生损伤是材料表面在使用前就存在的损伤,主要是加工缺陷或运输中磨损造成的,包括划痕和脆性断裂凹坑等,数量极少,如图4a所示。初生损伤是由风沙粒子单次冲击直接造成的损伤,质量损失较小,失重法几乎无法测量。低冲蚀角下损伤机理为微切削机理^[24],损伤形态为犁沟、划痕等,如图4b所示。高冲蚀角下损伤机理为压痕破裂机理^[25],损伤形态为塑性压痕破裂,如图4c所示。中冲蚀角下,原生损伤和初生损伤机理均存在。次生损伤主要是由原生损伤在风沙粒子的持续冲击锻打下诱发演化而来,是表面质量流失的主要原因,损伤形态符合弹塑性压痕破裂机理的

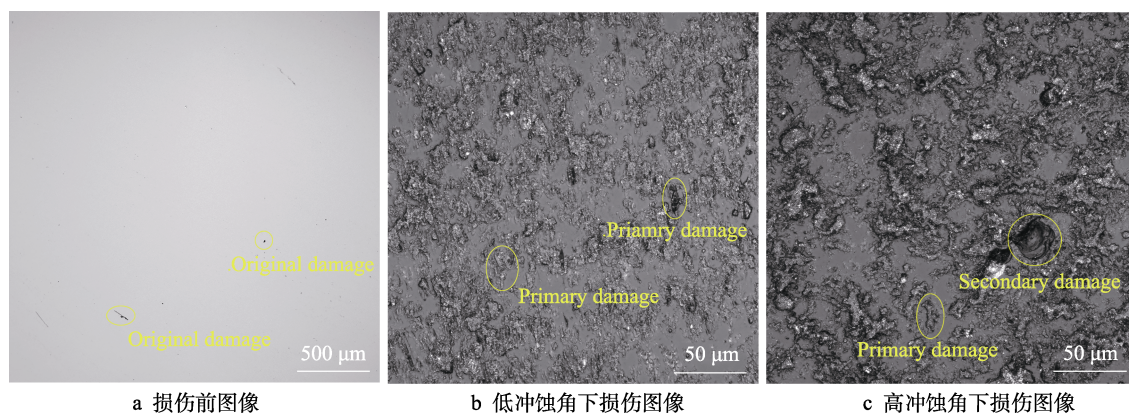


图 4 钢化玻璃表面的灰度图像

Fig.4 Grayscale images of tempered glass surface: a) image before damage; b) damage image at low erosion angle; c) damage image at high erosion angle

裂纹发育过程,是典型的脆性断裂,可以产生环状赫兹裂纹,损伤形态为近似圆形的断裂凹坑,如图 4c 所示。

在相同的损伤条件下,初生损伤的损伤形态复杂度和精细程度普遍高于次生损伤,损伤面积则相反。因为初生损伤由犁沟、划痕和纵向、横向裂纹连通而成,具备更丰富的细节,但损伤尺度较小;而次生损伤成片状剥落,形成的断裂凹坑较为光滑,不会体现出除断裂坑轮廓之外的更多细节,损伤尺度却更大。所以,在多重分形谱中,初生损伤将体现在谱面右端,次生损伤将体现在谱面左端。

3.2 不同冲蚀时间下表面损伤分析

对于风沙冲蚀损伤,当冲蚀速度和下沙率一定

时,冲蚀时间和冲蚀角度将是影响冲蚀损伤最重要的 2 个参数。图 5 是冲蚀角为 90° 、冲蚀时间为 10 min 的钢化玻璃表面形貌。图 6 是冲蚀角为 90° 、冲蚀时间为 10 min 时钢化玻璃表面分形维数及透光率的变化曲线。发现分形维数存在 3 个阶段:前 30 s (I 阶段) 为快速发展期,钢化玻璃表面在短时间内由无损伤到被大量相互独立、分布均匀的初生损伤充斥,表面发生剧烈变化,故分形维数呈线性快速增长,如图 5a—b 所示;第 30 s 至第 90 s 为中速发展期(II 阶段),未受损伤的区域不再占据主导,大量初生损伤连通或叠加成条带状,故分形维数增长放缓,如图 5c—d 所示;90 s 后进入稳定期(III 阶段),分形维数缓慢达到最大值 1.875 (变异系数为 0.001 8) 左右便不再增长,此阶段玻璃表面几乎没有未损伤区域,当表面布满损

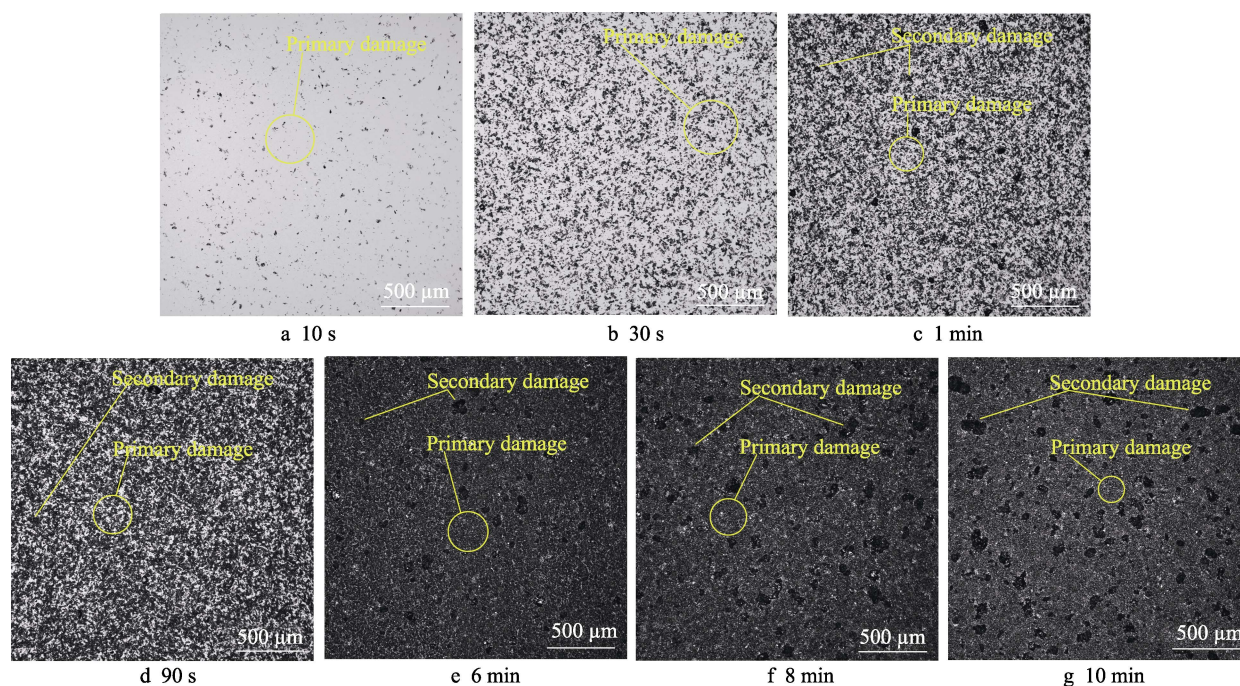


图 5 不同冲蚀时间下钢化玻璃表面的灰度图像

Fig.5 Grayscale images of tempered glass surface under different erosion times

伤时,表面能增加的损伤面积就达到了上限,所能吸收的能量也就达到了上限,而多余的能量将造成次生损伤大量增加,并以材料剥落的方式释放,因表面能吸收的能量上限与材料表面能^[26]有关,故表面最大分形维数与材料有关,如图5e—g所示。透光率则存在2个阶段:Ⅰ、Ⅱ阶段时表面损伤由初生损伤主导,透光率呈线性减小的趋势;当透光率低于73%时进入Ⅲ阶段,次生损伤大量增加,透光率降低速度逐渐减慢,透光率低至52%时,分形维数将达到最大值。这表明初生损伤对透光率的削弱程度高于次生损伤,因为初生损伤的复杂度和精细程度高于次生损伤,利用折射和反射可以消耗更多的可见光。

进入稳定期后,分形维数几乎不再变化,将无法识别冲蚀损伤、解释损伤机理。引入多重分形谱,可以进一步识别具有相同分形维数的不同冲蚀损伤表

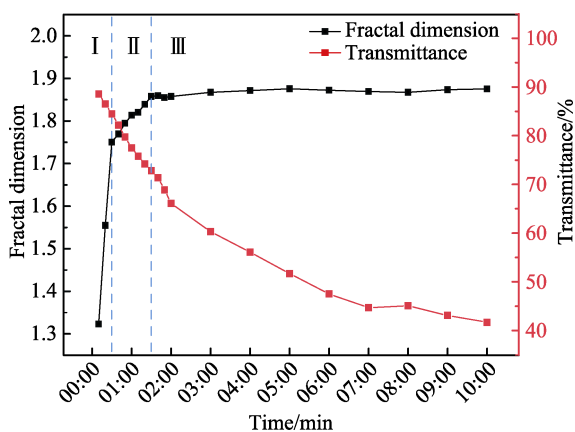


图6 钢化玻璃冲蚀时间与表面分形维数及透光率的关系

Fig.6 Relationship between erosion time and surface fractal dimension and transmittance of tempered glass

面,提供进一步研究冲蚀损伤机理的方法。

图7是冲蚀角为90°、冲蚀时间为~10 min时钢化玻璃冲蚀损伤表面的多重分形谱变化曲线。发现随着冲蚀时间的增加,谱面右端点 $f(\alpha)$ 呈现增长的趋势;谱面左端点 $f(\alpha)$ 则先减后增,2 min后进入相对稳定区域。因为随着冲蚀时间的增加,初生损伤达到峰值后会演化为次生损伤,6 min左右时次生损伤数量达到峰值后开始合并为更大的次生损伤,如图5c—g所示,所以初生损伤数量持续减少,次生损伤数量先增后减。

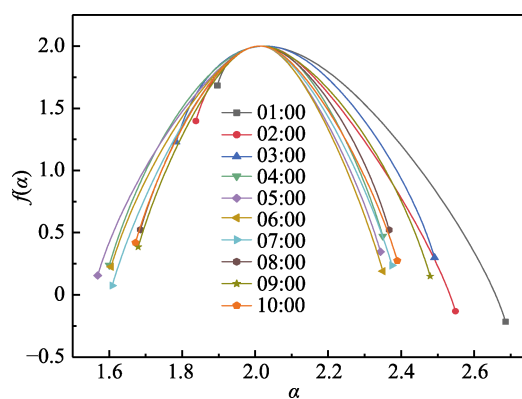


图7 10 min内钢化玻璃表面多重分形谱变化过程
Fig.7 Evolution of multifractal spectrum on the surface of tempered glass in 10 minutes

上述研究表明,当冲蚀损伤进入稳定期后,利用多重分形仍可以对冲蚀损伤表面继续进行识别,区分出具有不同损伤特征却具有相同分形维数的损伤表面,表征损伤变化,解释损伤机理。

3.3 不同冲蚀角度下表面损伤分析

图8是冲蚀时间为10 min、不同冲蚀角下钢化玻

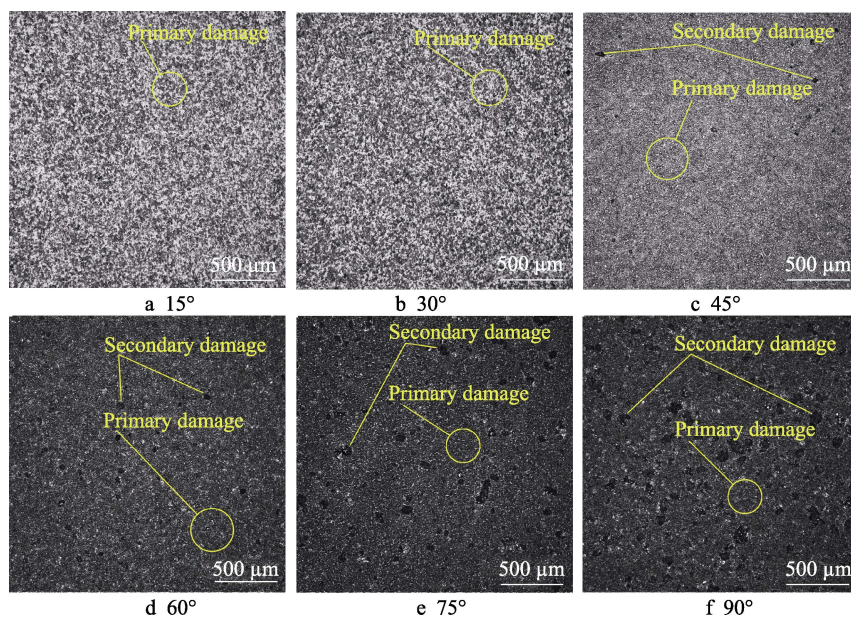


图8 不同冲蚀角度下钢化玻璃表面的灰度图像

Fig.8 Grayscale images of tempered glass surface morphology under different erosion angles

璃的表面形貌。图 9 是冲蚀时间为 10 min、不同冲蚀角下钢化玻璃表面分形维数及透光率的变化曲线。发现分形维数存在 2 个阶段: 对于脆性材料, 竖向冲击力越大则损伤程度越大, 所以随冲蚀角的增大, 冲击力的竖向分量也会增大, 表面吸收的能量也就越大, 故分形维数整体呈增加趋势。中低冲蚀角 ($\leq 60^\circ$) 下初生损伤占据主导, 高冲蚀角 ($>60^\circ$) 下次生损伤显著增加, 如图 8a—f 所示; 而初生损伤的复杂度高于次生损伤, 损伤形态发生的变化也更显著, 故中低冲蚀角下分形维数增长较快, 高冲蚀角下增长放缓。透光率的变化趋势与分形维数的变化趋势相同, 这验证了初生损伤对透光率的削弱程度高于次生损伤。

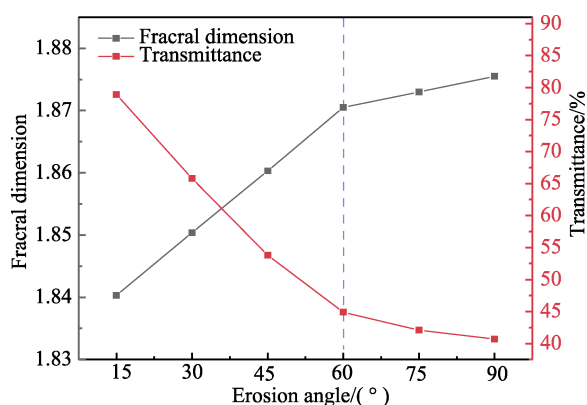


图 9 钢化玻璃冲蚀角与表面分形维数及透光率的关系
Fig.9 Relationship between erosion angles and surface fractal dimension and transmittance of tempered glass

图 10 是冲蚀时间为 10 min、不同冲蚀角下钢化玻璃表面多重分形谱的变化曲线。发现随着冲蚀角的增大, 多重分形谱谱面左端点 $f(\alpha)$ 一直呈现减小趋势, 多重分形谱谱面右端点 $f(\alpha)$ 先减小后增加, 然后进入稳定区域。因为低冲蚀角下部分沙粒会以滚动的方式通过材料表面, 损伤有限, 故 15°时初生损伤和次生损伤均处于较小值; 随着冲蚀角的增大, 初生损伤数量增加, 在 30°时达到峰值后开始演化为次生损伤, 如图 8b 所示; 进入 60°后次生损伤大量增加,

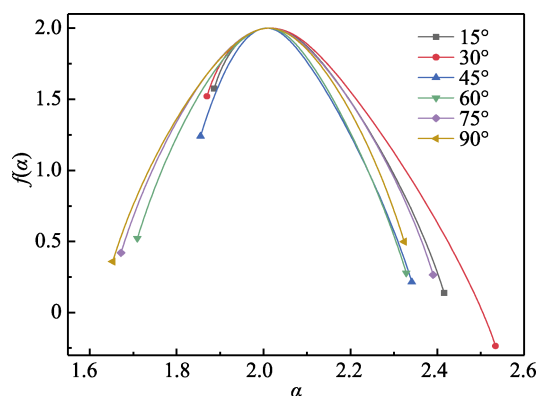


图 10 不同冲蚀角下钢化玻璃表面多重分形谱演化过程
Fig.10 Evolution of multifractal spectrum on the surface of tempered glass at different erosion angles

初生损伤趋于稳定, 如图 8d—f 所示, 所以初生损伤先增后减, 次生损伤持续增加。这与不同冲蚀角下分形维数的演化规律相同。

4 结论

1) 钢化玻璃表面冲蚀损伤机制为初生损伤和次生损伤。初生损伤由单次沙粒冲击造成, 次生损伤由初生损伤在后续沙粒不断的冲击下诱发演化而成, 前者的复杂度和精细程度及对可见光的削弱能力高于后者。

2) 不同冲蚀时间下, 存在 3 个损伤阶段: 快速增长期、中速增长期和稳定期。快速增长期和中速增长期以初生损伤为主, 分形维数增速和透光率减速较快; 稳定期次生损伤大量增加, 表面材料大量剥落, 分形维数增速和透光率减速较慢, 分形维数将逐渐稳定在最大值 1.875 左右。冲蚀损伤进入稳定期后, 利用分形维数无法继续识别损伤变化, 多重分形谱可识别损伤表面的初生损伤和次生损伤, 描述两者的演化过程, 持续表征冲蚀损伤。

3) 不同冲蚀角度下, 存在 2 个损伤阶段: 中低冲蚀角 ($\leq 60^\circ$) 下初生损伤占据主导, 并在 30°时达到峰值, 分形维数增速和透光率减速较快; 高冲蚀角 ($>60^\circ$) 下次生损伤显著增加, 分形维数增速和透光率减速较慢。

参考文献:

- [1] 许良中, 梁习锋, 刘堂红, 等. 风沙流对列车车窗玻璃破坏能力的试验测试[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(7): 2489-2495.
XU Liang-zhong, LIANG Xi-feng, LIU Tang-hong, et al. Experiment Test of Wind-Sand Flow Destruction to Train Tempered Glass[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2014, 45(7): 2489-2495.
- [2] SHAO Guang-zheng, WANG Qing-song, ZHAO Han, et al. Maximum Temperature to Withstand Water Film for Tempered Glass Exposed to Fire[J]. Construction and Building Materials, 2014, 57: 15-23.
- [3] 陈海龙, 杨学锋, 鹿重阳, 等. 固体粒子冲蚀磨损理论及影响因素的研究概述[J]. 材料导报, 2017, 31(S2): 403-406.
CHEN Hai-long, YANG Xue-feng, LU Chong-yang, et al. Review on the Theory and Influencing Factors of Solid Particle Erosion Wear[J]. Materials Review, 2017, 31(S2): 403-406.
- [4] 李力, 魏天酬, 刘明维, 等. 冲蚀磨损机理及抗冲蚀涂层研究进展[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2019, 38(8): 70-74, 91.
LI Li, WEI Tian-chou, LIU Ming-wei, et al. Research Progress on Erosion Wear Mechanism and Anti-Erosion Coatings[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2019, 38(8): 70-74, 91.
- [5] 孔锋. 中国灾害性沙尘天气日数的时空演变特征(1961—

- 2017)[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(8): 116-123.
- KONG Feng. Spatial and Temporal Evolution Characteristics of Days of Disastrous Dust Weather in China from 1961 to 2017[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(8): 116-123.
- [6] 万伟, 曹小明, 张劲松. SiC 泡沫陶瓷/球墨铸铁双连续相复合材料的气固两相流冲蚀性能[J]. 材料研究学报, 2020, 34(5): 361-367.
- WAN Wei, CAO Xiao-ming, ZHANG Jin-song. Erosion Performance for Co-Continuous Phase Composite of SiC Foam Ceramic/Ductile Iron[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2020, 34(5): 361-367.
- [7] 舒康, 周亮, 王文健, 等. 不同钢轨材料的风沙冲蚀磨损与损伤行为研究[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(1): 74-84.
- SHU Kang, ZHOU Liang, WANG Wen-jian, et al. Windblown Sand Erosion Wear and Damage Behaviors of Different Rail Steels[J]. Tribology, 2022, 42(1): 74-84.
- [8] 李巾杰, 吴凤芳, 吴冰. 钛合金基体上 AlCrN 涂层的冲蚀磨损行为研究[J]. 表面技术, 2019, 48(2): 152-158.
- LI Jin-jie, WU Feng-fang, WU Bing. Erosion Wear Performance of AlCrN Coating on Titanium Alloy Substrate[J]. Surface Technology, 2019, 48(2): 152-158.
- [9] 黄达, 何卫锋, 吕长乐, 等. 离子注入对 TC4 钛合金 TiN/Ti 涂层结合力和抗砂尘冲蚀性能的影响[J]. 表面技术, 2020, 49(7): 184-191, 198.
- HUANG Da, HE Wei-feng, LYU Chang-le, et al. Effects of Ions Implantation on Adhesion Strength and Sand Erosion Resistance of TiN/Ti Coatings on TC4 Titanium Alloy[J]. Surface Technology, 2020, 49(7): 184-191, 198.
- [10] 刘子武, 李剑峰. 叶片材料 FV520B 再制造熔覆层冲蚀损伤行为及评价[J]. 吉林大学学报(工学版), 2018, 48(3): 835-844.
- LIU Zi-wu, LI Jian-feng. Erosion Damage and Evaluation of Remanufacturing Cladding Layer for Impeller Metals FV520B[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2018, 48(3): 835-844.
- [11] MANDELBROT B. How Long is the Coast of Britain? Statistical Self-Similarity and Fractional Dimension[J]. Science, 1967, 156(3775): 636-638.
- [12] NIU Li, MIAO Xu-hong, LI Yu-tian, et al. Surface Morphology Analysis of Knit Structure-Based Triboelectric Nanogenerator for Enhancing the Transfer Charge[J]. Nanoscale Research Letters, 2020, 15(1): 181.
- [13] KAVYASHREE, YADAV R P, PARVEEN S, et al. Fractal Characterization of Flakes Covered Tuberoses Structured Cu: Sr(OH)₂ Thin Film as Supercapacitive Electrode[J]. Materials Research Bulletin, 2019, 120: 110574.
- [14] CARPINTERI A, PUGNO N. Evolutionary Fractal Theory of Erosion and Experimental Assessment on MIR Space Station[J]. Wear, 2004, 257(3-4): 408-413.
- [15] PERSSON B N J. On the Fractal Dimension of Rough Surfaces[J]. Tribology Letters, 2014, 54(1): 99-106.
- [16] 胡汉儒, 李国清, 邹鸿承, 等. 冲蚀磨损表面及磨屑的分形集合[J]. 机械强度, 1995(1): 1-5, 12.
- HU Han-ru, LI Guo-qing, ZOU Hong-cheng, et al. The Fractal Sets for Erosion Wear Surface and Wear Fragments[J]. Journal of Mechanical Strength, 1995(1): 1-5, 12.
- [17] 邹鸿承, 戴蜀娟, 李国清, 等. 激光熔覆表面的冲蚀磨损及分形特征[J]. 兵器材料科学与工程, 1996, 19(4): 45-51.
- ZOU Hong-cheng, DAI Shu-juan, LI Guo-qing, et al. Erosion Wear and Fractal Character of Surface by Laser Cladding[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 1996, 19(4): 45-51.
- [18] 徐阳, 齐振一, 王志浩, 等. 纳米晶复合涂层应用于火星玻璃盖片防尘的探索[J]. 表面技术, 2019, 48(5): 167-171, 224.
- XU Yang, QI Zhen-yi, WANG Zhi-hao, et al. Exploration for Nano-Crystalline Composite Coatings in Dust-Proof of Cover Glasses on Mars[J]. Surface Technology, 2019, 48(5): 167-171, 224.
- [19] 王华东, 蒋伟峰, 彭光健, 等. 基于化学蚀刻检测光学玻璃亚表面损伤深度[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 326-333.
- WANG Hua-dong, JIANG Wei-feng, PENG Guang-jian, et al. Detection of Subsurface Damage Depth of Optical Glass via Chemical Etching Technology[J]. Surface Technology, 2020, 49(11): 326-333.
- [20] 郝负洪, 刘艳晨, 郭健, 等. 风沙环境变量相似理论及其应用研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2018, 26(3): 640-649.
- HAO Yun-hong, LIU Yan-chen, GUO Jian, et al. Sand Environment Multivariate Similarity Theory and Its Application[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2018, 26(3): 640-649.
- [21] 马潇潇, 王海兵, 左合君. 近 54 年内蒙古自治区西部沙尘暴的变化趋势[J]. 水土保持通报, 2019, 39(4): 17-21, 101.
- MA Xiao-xiao, WANG Hai-bing, ZUO He-jun. Variation Trend of Sandstorm in Western Inner Mongolia Autonomous Region in Recent 54 Years[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(4): 17-21, 101.
- [22] MANDELBROT B B, WHEELER J A. The Fractal Geometry of Nature[J]. American Journal of Physics, 1983, 51(3): 286-287.
- [23] HALSEY T C, JENSEN M H, KADANOFF L P, et al. Fractal Measures and Their Singularities: The Characterization of Strange Sets[J]. Nuclear Physics B-Proceedings Supplements, 1987, 2: 501-511.
- [24] FINNIE I. The Mechanism of Erosion of Ductile Metals[J]. Wear, 1960, 90: 193.
- [25] EVANS A G, BISWAS D R, FULRATH R M. Some Effects of Cavities on the Fracture of Ceramics: II, Spherical Cavities[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1979, 62(1-2): 101-106.
- [26] THOMSON R, HSIEH C, RANA V. Lattice Trapping of Fracture Cracks[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42(8): 3154-3160.

责任编辑: 万长清