

轻小型无人机撞击风挡玻璃试验研究^{*}

王亚锋, 白春玉, 苗娟, 刘小川, 郭亚周, 王计真

(中国飞机强度所结构冲击动力学航空重点实验室 西安, 710065)

摘要 针对无人机(unmanned aerial vehicle, 简称 UAV)撞击工况下风挡玻璃的耐撞性进行了系统的试验研究, 重点分析了不同撞击速度及贴膜对风挡玻璃损伤行为的影响。试验以大疆 Mavic 2 pro 无人机为研究对象, 设计了涵盖 15~50 m/s 的多个速度等级, 分别对未贴膜及贴膜汽车风挡玻璃以及高铁侧风挡玻璃进行了撞击试验。结果表明: 随着撞击速度的提升, 风挡玻璃的裂纹区域直径和凹陷深度显著增加, 损伤程度逐步加重; 贴膜导致了应力集中, 降低了玻璃的损伤阈值, 促进了裂纹的早期产生和扩展; 与汽车风挡玻璃相比, 高铁侧风挡玻璃表现出更优异的耐撞性。研究成果为无人机撞击安全评估及风挡玻璃防护设计提供了试验数据和理论支持。

关键词 大疆 Mavic 2 pro 无人机; 无人机撞击; 风挡玻璃; 耐撞性

中图分类号 TH113

0 引言

凭借小型化、智能化以及机动灵活等特点, 无人机在军事^[1-2]、消费娱乐^[3]及农林植保^[4-5]等多个领域得到广泛应用。其中, 空机质量低于 15 kg、最大起飞质量不超过 25 kg 的轻小型无人机作为消费市场的主要类型, 社会保有量迅速增长^[6]。受操作不当、系统故障及飞行环境复杂等因素影响, 轻小型无人机与交通工具风挡玻璃发生碰撞的事件时有发生, 不仅对结构安全造成冲击, 还可能对乘员人身安全构成潜在威胁。

为全面评估无人机的潜在撞击风险, 学者们不仅针对无人机撞击人员所造成的伤害开展了研究^[7-12], 还围绕无人机与风挡玻璃之间的碰撞响应特性进行了深入研究。Lee 等^[13]针对大疆 F450 四旋翼无人机撞击热增强玻璃开展了试验与仿真研究, 并基于改进的钝性准则评估了玻璃损伤阈值。Choi 等^[14]建立了相应的碰撞仿真模型, 并结合试验数据完成验证, 分析了不同撞击速度和角度下的响应特征。Lu 等^[15]针对 300~3 330 g 质量范围内的 5 种大疆无人机, 构建了撞击商用飞机风挡玻璃的仿真模型, 并结合全尺寸风挡试验结果进行验证, 分析了无人机材料构成、质量分布、速度和姿态等因素对风挡损伤的影响。Zhang 等^[16]针对精灵 4 Pro 无人机建立了有限元模型, 系统评估了平行撞击下不同速度对应的损伤等级, 给出了各

等级的临界速度阈值。张楚凡等^[17]基于空气炮开展了夹层结构高速冲击试验与数值模拟。郭亚周等^[18]进行了等质量鸟体与无人机撞击风挡对比试验, 发现无人机具有更强的穿透性和更严重的局部损伤效应。苏艳等^[19]通过在玻璃层及胶层界面嵌入零厚度内聚力单元, 提出了一种新型风挡有限元模型, 并结合精灵 4 Pro 撞击试验验证了模型的有效性。

现有研究多聚焦于无人机撞击飞机风挡的响应机制。相较于航空领域, 高速轨道交通及地面车辆在实际运行中同样面临潜在的无人机撞击风险, 而针对该类玻璃结构的撞击安全性研究较为薄弱。为此, 本研究以轻小型四旋翼无人机(Mavic 2 Pro)为撞击对象, 开展其在不同速度下撞击汽车与高铁风挡玻璃的对比试验, 通过分析撞击后玻璃裂纹扩展范围与凹陷深度等损伤指标, 系统评估了不同玻璃结构形式及贴膜处理对风挡玻璃耐撞性能的影响。

1 无人机撞击风挡试验

试验所选用的汽车风挡玻璃为五菱之光面包车的前风挡玻璃, 材质为夹层玻璃(2 层玻璃原片和中间 1 层聚乙烯醇缩丁醛(PVB)胶片), 厚度分别为 2.1 mm 玻璃+0.76 mm PVB 胶片+2.1 mm 玻璃, 总厚度约为 4.96 mm。玻璃尺寸为 1 296 mm×704 mm, 整体质量约为 8 940 g。风挡玻璃结构示意图如图 1 所示。为便于对比分析, 玻璃分为贴膜与

^{*} 全国重点实验室自立课题资助项目(byst-qzsys-25-019-10)

收稿日期: 2025-09-09; 修回日期: 2026-03-06

未贴膜 2 种类型,贴膜采用厚度为 0.8 mm 的纳米陶瓷防爆膜,如图 1(a)所示。高铁侧风挡玻璃选用 600 mm×600 mm 的双层夹胶钢化玻璃,2 片 5 mm 厚度玻璃,中间为 9 mm 的空气层,夹胶厚度为 0.76 mm,如图 1(b)所示。

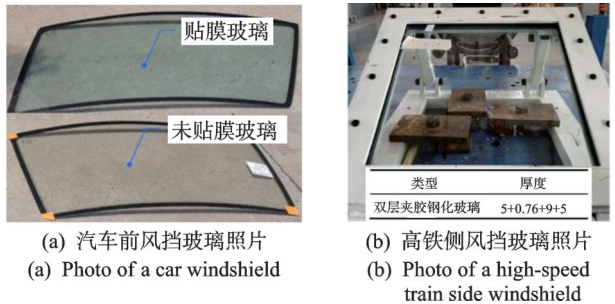


图 1 风挡玻璃结构示意图
Fig.1 Photograph of a windshield

撞击试验采用大疆四旋翼 Mavic 2 pro 无人机,其质量约为 907 g,外形尺寸约为 322 mm×242 mm×84 mm,最大飞行速度约为 20 m/s。无人机撞击方式采用气炮发射撞击,为方便发射,需要将无人机旋翼拆除。为尽可能真实地还原撞击工况,试验中保留了除旋翼外的全部结构。大疆 Mavic 2 pro 无人机如图 2 所示。



图 2 大疆 Mavic 2 pro 无人机
Fig.2 DJI Mavic 2 Pro UAV

发射装置采用无人机气炮撞击系统,其原理如图 3 所示。该装置主要由弹托分离结构、炮管、支托装置、快速上弹装置及储气罐组成。试验时将无人机置于弹托装入弹舱,系统根据预设弹射速度自动计算并充至目标气压;按下发射按钮后,高压气体推动弹托带动无人机沿炮管高速运动,炮管的异形设计保证了弹托姿态稳定;弹托行至末端与分离机构作用,无人机脱离弹托并以既定速度撞击试验件。通过图像分析软件对无人机飞行轨迹进行处理,计算得到无人机实际发射速度。

撞击试验现场照片如图 4 所示。汽车风挡玻璃撞击试验中,使用专用胶将风挡玻璃安装在试验车上并固化 24 h 以上。为确保在撞击时刻无人机飞行姿态稳定,试验车位置应尽量靠近炮口,炮口与风挡玻璃撞击中心的水平距离控制在 0.5~1.0 m

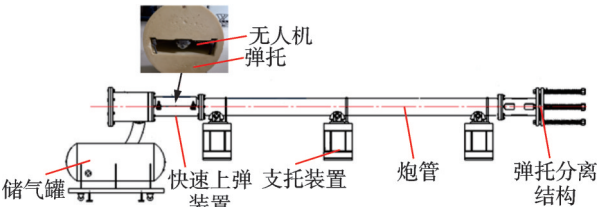


图 3 无人机气炮撞击系统原理图
Fig.3 Schematic diagram of the UAV air gun impact system

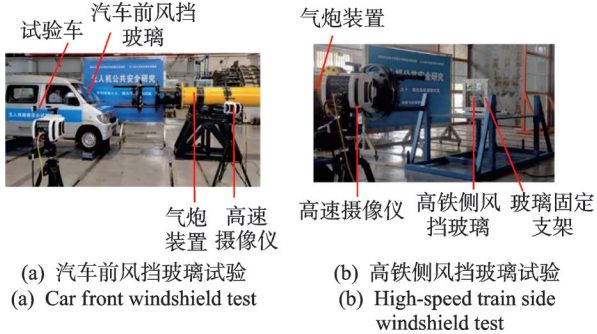


图 4 撞击试验现场照片
Fig.4 Photograph of the impact test site

范围内,同时借助激光瞄准系统调整试验车与气炮发射口之间的相对位置,保证撞击位置的精确性。

高铁侧风挡玻璃采用四周施加结构胶的方式粘接于固定支架上,并辅以螺栓加固,确保安装稳固。试验时,通过整体调整固定支架与地面的相对角度,使其与地面垂直进行撞击试验。在试验对象前方以及正侧方安装高速摄像机,前者用于观察无人机撞击过程以及风挡玻璃损伤情况,后者用于观察无人机撞击角度及撞击姿态,以计算撞击速度。高速摄像最大分辨率为 1 024×1 024,采集频率为 5 400 fps。

为系统分析不同撞击速度对不同类型的风挡玻璃损伤行为的影响,本研究设计了相应的试验矩阵,如表 1 所示。试验矩阵涵盖汽车前风挡与高铁侧风挡 2 类玻璃,其中前者还包括贴膜与未贴膜 2 类情况,并设定多个撞击速度等级(15~50 m/s),结合试验中采

表 1 试验矩阵

Tab.1 Experimental matrix

试验编号	玻璃类型	是否贴膜	撞击速度/(m·s ⁻¹)
T ₁	汽车前风挡	未贴膜	15
T ₂		未贴膜	25
T ₃		未贴膜	30
T ₄		未贴膜	40
T ₅		贴膜	15
T ₆		贴膜	25
T ₇		贴膜	30
T ₈		贴膜	40
T ₉	高铁侧风挡	—	15
T ₁₀			25
T ₁₁			30
T ₁₂			50

集到的玻璃断裂情况、裂纹区域直径和凹陷深度等指标,完成试验结果的对比评价。为了保证试验结果的准确性,每种试验类型至少进行3次重复试验。

2 试验结果分析

2.1 汽车风挡撞击试验

2.1.1 未贴膜玻璃撞击试验结果分析

Mavic 2 pro无人机以25、30及40 m/s速度撞击未贴膜汽车前挡风玻璃,其试验过程分别如图5~7所示。在25 m/s及以下撞击速度时,无人机以水平姿态撞击风挡玻璃,在风挡曲面引导下发生偏转并脱离,玻璃没有可见损伤,其结构完整,舱内无异常。在30 m/s撞击速度下,风挡玻璃在无人机机头首次撞击时产生局部裂纹。随着无人机尾部发生二次撞击,裂纹迅速蔓延,最终形成大面积蛛网状破坏。尽管外层玻璃破损严重,但机体未穿透风挡,内侧玻璃仅现轻微裂痕并伴有少量碎片侵入。在40 m/s撞击速度下,风挡玻璃瞬间被贯穿,无人机整体进入驾驶舱,碰撞破坏程度达到最大。此时玻璃表面裂纹分布相对集中,局限于撞击点周边,呈现典型的高速应力集中型破坏特征。



图5 无人机以25 m/s速度撞击未贴膜汽车前风挡玻璃试验过程

Fig.5 Test process of UAV impacting uncoated car front windshield at 25 m/s



图6 无人机以30 m/s速度撞击未贴膜汽车前风挡玻璃试验过程

Fig.6 Test process of UAV impacting uncoated car front windshield at 30 m/s

为定量分析汽车风挡玻璃在不同撞击速度下的损伤程度,本研究选取裂纹区域直径与玻璃凹陷深度2个定量指标进行评价。裂纹区域直径主要用于表征玻璃受损的横向扩展趋势,试验中裂纹形态近似呈圆形,以裂纹区域直径作为评估依据。玻璃凹

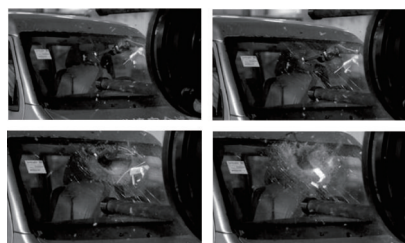
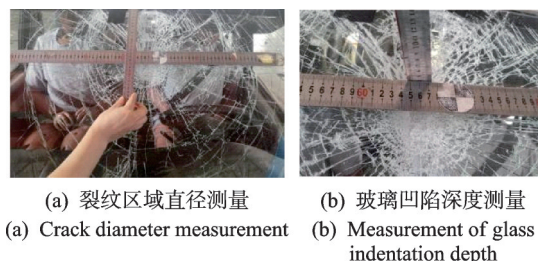


图7 无人机以40 m/s速度撞击未贴膜汽车前风挡玻璃试验过程

Fig.7 Test process of UAV impacting uncoated car front windshield at 40 m/s

陷深度主要反映结构在垂直方向上的局部变形程度,其与冲击能量传递路径密切相关。如果无人机贯穿风挡玻璃,玻璃凹陷深度取为10 cm。30 m/s速度下裂纹面积及玻璃凹陷深度测量如图8所示。



(a) 裂纹区域直径测量 (b) 玻璃凹陷深度测量
(a) Crack diameter measurement (b) Measurement of glass indentation depth

图8 30 m/s速度下裂纹面积及玻璃凹陷深度测量

Fig.8 Measurement of crack area and glass indentation depth at 30 m/s

未贴膜玻璃在不同撞击速度下裂纹区域直径及凹陷深度对比如图9所示。由图可知:在15和25 m/s撞击速度下,玻璃未出现明显损伤,裂纹区域直径和凹陷深度均为0,表明此阶段的撞击能量不足以引发结构破坏;随着速度升高至30 m/s,玻璃未被打穿,但在撞击点附近出现了明显的蛛网状裂纹,最大裂纹直径达到66 cm,同时伴随局部凹陷,深度约为4 cm,说明该速度已达到引发玻璃结构破坏的临界水平;当撞击速度增至40 m/s时,玻璃被完全打穿,但此时裂纹的扩展范围(直径为

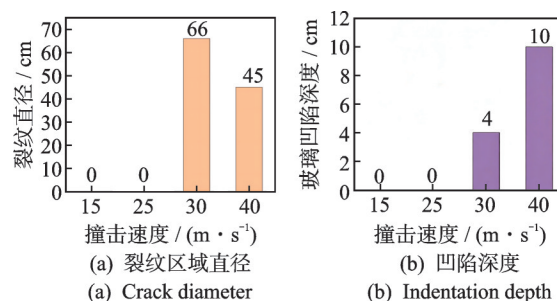


图9 未贴膜玻璃在不同撞击速度下裂纹区域直径及凹陷深度对比

Fig.9 Comparison of crack diameter and indentation depth of uncoated glass at different impact velocities

45 cm)反而较 30 m/s 工况略有减小。这表明在发生完全贯穿的工况下,撞击能量更多集中于局部破坏与穿透过程,从而减少了能量在玻璃平面内的扩散和裂纹延伸,导致整体裂纹面积有所下降。

2.1.2 贴膜玻璃撞击试验结果分析

Mavic 2 pro 无人机以 15、25、30 及 40 m/s 速度撞击贴膜汽车前挡风玻璃,其试验过程分别如图 10~13 所示。在 15 m/s 撞击速度下,无人机撞击风挡玻璃的上部形成初始裂纹,随后无人机尾部与玻璃发生二次撞击形成网状裂纹。整体来看,该撞击速度下机体未穿透风挡玻璃,驾驶室内层玻璃无损伤。在 25 m/s 撞击速度下,撞击能量进一步增加,风挡玻璃中下部在无人机机头撞击作用下出现面积较大的稀疏蛛网状裂纹,随后无人机尾部与玻璃发生二次撞击,导致中心区域的裂纹密度明显增加,损伤程度进一步加剧。在 30 m/s 撞击速度下,



图 10 无人机以 15 m/s 速度撞击贴膜汽车前风挡玻璃试验过程

Fig.10 Test process of UAV impacting coated car front windshield at 15 m/s



图 11 无人机以 25 m/s 速度撞击贴膜汽车前风挡玻璃试验过程

Fig.11 Test process of UAV impacting coated car front windshield at 25 m/s

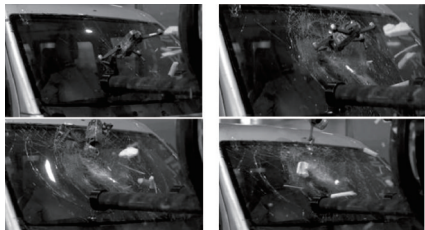


图 12 无人机以 30 m/s 速度撞击贴膜汽车前风挡玻璃试验过程

Fig.12 Test process of UAV impacting coated car front windshield at 30 m/s



图 13 无人机以 40 m/s 速度撞击贴膜汽车前风挡玻璃试验过程

Fig.13 Test process of UAV impacting coated car front windshield at 40 m/s

风挡玻璃在初始撞击阶段即形成裂纹密集的大面积蛛网状破坏,裂纹呈现明显聚集趋势,随后撞击载荷持续作用,玻璃表面出现明显凹陷,结构完整性被进一步削弱。在 40 m/s 撞击速度下,风挡玻璃在瞬时遭受强烈冲击,结构完整性完全丧失,发生贯穿破坏,蛛网状裂纹尤为密集,并形成穿透孔洞,表现出典型的高速撞击贯穿特征。随着撞击速度由 25 逐步上升至 40 m/s,风挡玻璃的损伤形态由初期稀疏裂纹演变为密集裂纹与凹陷,最终发展为完全贯穿,呈现出典型的速度敏感型破坏模式。

贴膜玻璃在不同撞击速度下裂纹区域直径及凹陷深度对比如图 14 所示。由图可知:在 15 m/s 撞击速度下,玻璃受撞击后仅产生局部轻微裂纹,裂纹区域直径约为 35 cm,表面凹陷深度仅为 0.5 cm,整体结构基本保持完整;随着速度提升至 25 m/s,裂纹范围进一步扩大,达到 48 cm,同时玻璃表面出现明显凹陷,其深度增加至 5 cm,表明结构已开始进入显著破坏阶段;在 30 m/s 撞击速度下,玻璃表面形成密集的大面积蛛网状裂纹,最大裂纹扩展直径高达 76 cm,并伴随凹陷进一步加深至 7 cm;当撞击速度升至 40 m/s 时,贴膜玻璃被完全贯穿,凹陷深度达到 10 cm,结构完整性丧失。总体来看,贴膜玻璃的裂纹区域直径与凹陷深度均随撞击速度的升高而

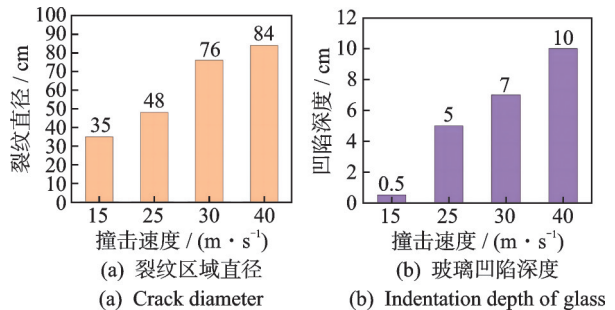


图 14 贴膜玻璃在不同撞击速度下裂纹区域直径及凹陷深度对比

Fig.14 Comparison of crack diameter and indentation depth of coated glass at different impact velocities

显著增大,尤其在 30 m/s 速度以上,破坏形态由表层裂纹发展为深层凹陷甚至贯穿,呈现出明显的速度敏感型损伤演化特征。

2.2 高铁侧风挡撞击试验

本研究进行了无人机在 15、25、30 及 50 m/s 飞行速度下对高铁侧风挡玻璃的撞击试验。其中,无人机以 30、50 m/s 速度撞击高铁侧风挡玻璃试验过程分别如图 15、16 所示。结果发现,当撞击速度小于或等于 30 m/s 时,高铁侧风挡玻璃未出现明显损伤,结构完整性保持良好,展现出优异的抗撞击性能;但无人机在撞击瞬间发生明显破坏,机头及机臂等部位严重受损,呈现出解体趋势。在 50 m/s 撞击工况下,由于撞击能量的提升,风挡玻璃损伤明显加剧,撞击中心区域形成多条放射状裂纹,并伴随大量玻璃碎片脱落,局部区域被直接贯穿,失去有效的防护功能;但无人机结构基本保持完整,除机头出现穿透性变形外,机臂等主要部件未发生大范围断裂,整体形态良好。



图 15 无人机以 30 m/s 速度撞击高铁侧风挡玻璃试验过程
Fig.15 Test process of UAV impacting high-speed train side windshield at 30 m/s

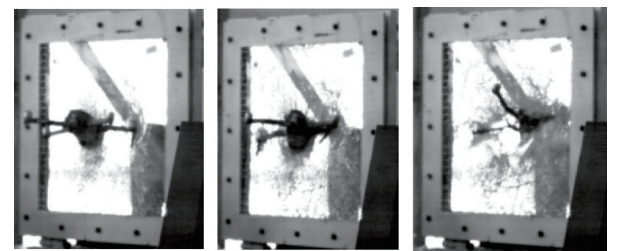


图 16 无人机以 50 m/s 速度撞击高铁侧风挡玻璃试验过程
Fig.16 Test process of UAV impacting high-speed train side windshield at 50 m/s

2.3 试验结果对比分析

2.3.1 贴膜对汽车风挡耐撞性的影响

纳米陶瓷防爆膜对风挡玻璃在无人机撞击中的破坏机制产生了很大影响。不同撞击速度下贴膜与未贴膜风挡玻璃损伤结果对比如图 17 所示。由图可知,在 15 和 25 m/s 撞击速度下,未贴膜玻璃结构

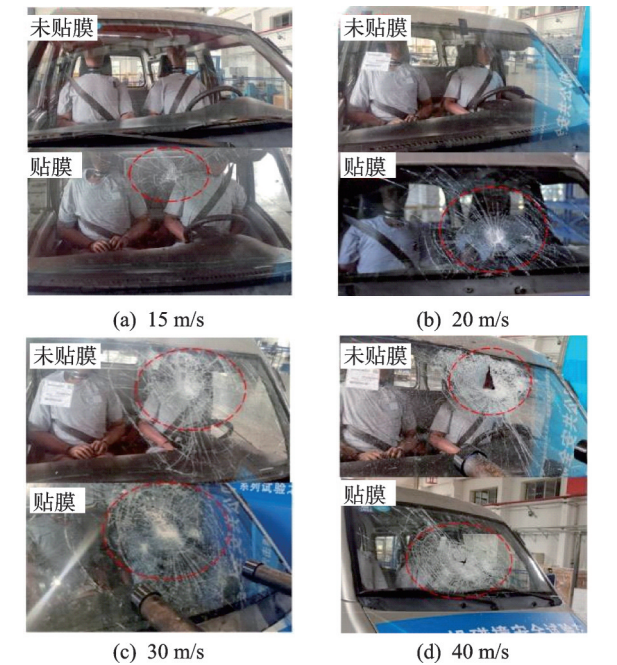


图 17 不同撞击速度下贴膜与未贴膜风挡玻璃损伤结果对比
Fig.17 Comparison of damage results between coated and uncoated windshield glass at different impact velocities

保持完整,没有可见裂纹或变形,说明此时撞击能量尚不足以诱发破坏;而相同条件下,贴膜玻璃则已出现初始裂纹及一定程度的凹陷,尤其在 25 m/s 工况中,贴膜玻璃形成了面积明显的蛛网状裂纹与中心凹陷,表现出更早的失效响应。在 30 m/s 撞击速度下,两类玻璃均表现出大范围裂纹扩展和局部凹陷,但贴膜玻璃的裂纹更为密集,直径更大,整体表现出更为明显的放射状形态,受损区域更广。在 40 m/s 工况中,两者皆发生穿透破坏,但未贴膜玻璃的裂纹扩展范围反而小于 30 m/s 工况,呈现典型的应力集中型破坏;而贴膜玻璃不仅产生贯穿,还伴随更大面积的裂纹扩展,结构完整性损失更为严重。

导致上述现象的原因如下:①尽管纳米陶瓷防爆膜具备一定的韧性和强度,但其附加在玻璃表面后对玻璃的变形过程产生了明显的约束效应,膜层弹性模量高于玻璃基材,会限制玻璃的面内延展与弯曲变形,使冲击能量无法通过整体变形有效耗散,抑制了玻璃材料的变形扩展,从而在撞击初期引发更强的应力集中,局部应力更高,更容易达到玻璃的临界断裂强度,从而降低了风挡玻璃的临界损伤阈值,导致更早期的裂纹扩展;②膜层本身的张力传导也放大了载荷作用区域,有利于裂纹向更广区域传播,裂纹尺寸更大。整体来看,贴膜使得风挡玻璃的破坏模式由原本的“延迟破坏+局部破坏”向“早期破坏+区域扩展”转变,其对裂纹起始与演化路径的

调控作用不容忽视。

不同撞击速度下裂纹区域直径及凹陷深度对比如图 18 所示。由图可以看出,随着撞击速度的升高,两类玻璃的裂纹尺寸与凹陷深度整体均呈现上升趋势,但贴膜玻璃在各速度下的损伤指标始终高于未贴膜玻璃。其中:在 15 和 25 m/s 撞击速度下,未贴膜玻璃未出现裂纹和凹陷,而贴膜玻璃分别出现 35 和 48 cm 的裂纹区域直径,以及 0.5 和 5 cm 的凹陷深度,后者相较于前者表现出更早、更严重的损伤形式;在 30 m/s 工况下,贴膜玻璃的裂纹区域直径和凹陷深度分别比未贴膜玻璃高出约 15% 和 75%,损伤区域更广,局部失效更严重;在 40 m/s 工况下,两者均发生贯穿,但贴膜玻璃的裂纹范围更广,裂纹区域直径达到 84 cm,而未贴膜玻璃仅为 45 cm。这表明在完全贯穿条件下,贴膜结构更倾向于将撞击能量扩散至更广区域,而未贴膜结构表现出局部应力集中式穿透。

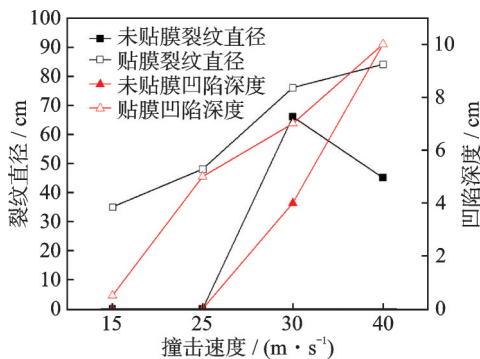


图 18 不同撞击速度下裂纹区域直径及凹陷深度对比

Fig.18 Comparison of crack diameter and indentation depth at different impact velocities

综上所述,纳米陶瓷防爆膜在一定程度上降低了玻璃的损伤阈值,扩大了高速撞击下的裂纹扩展范围,体现出更强的能量扩散特性。从乘员防护角度来看,贴膜在玻璃发生破坏后仍能发挥一定的作用,可延缓玻璃碎片的脱落过程,减少高速撞击下碎片对乘员造成的二次伤害。

2.3.2 汽车与高铁风挡玻璃撞击结果对比

基于上述试验结果可知,在相同撞击速度下,高铁侧风挡玻璃比汽车前风挡玻璃表现出更优异的抗撞击能力,主要差异在于两者材料构成、结构形式及刚度特性不同。汽车前风挡为夹层玻璃,总厚度为 4.96 mm,依赖 PVB 胶片的粘结作用吸收冲击能量,整体为柔性夹层结构;高铁侧风挡采用双层夹胶钢化玻璃,总厚度达 19.76 mm,钢化玻璃的高强度特性与空气层的缓冲作用协同防护,其结构刚性更

强。另外,高铁侧风挡的钢化玻璃基材弹性模量更高,且双层夹胶 + 空气层的复合结构大幅提升了整体刚度,撞击时能更均匀地分散冲击载荷,避免局部应力集中;汽车风挡的普通玻璃基材刚度较低,PVB 胶片的柔性虽能缓解冲击,但在高速撞击下易发生较大变形,导致裂纹快速扩展。

以 30 m/s 撞击工况为例,高铁风挡玻璃在撞击后未出现明显裂纹或穿透,完整性良好;而汽车前风挡玻璃无论是否贴膜,在相同撞击速度下已出现大范围裂纹扩展和局部凹陷,结构完整性受到影响,更早进入破坏状态。此外,两类玻璃的安装状态也对撞击能量的分布产生影响。其中,高铁风挡玻璃在试验中呈垂直安装状态,与撞击方向成 90°;汽车风挡玻璃则安装于车体上,存在一定初始倾角,在撞击过程中会造成一定程度的能量分解。因此,在名义撞击速度相同的前提下,高铁风挡玻璃实际所承受的撞击载荷更大,但其仍能维持结构完整,进一步说明其耐撞性能更佳。综合来看,高铁风挡玻璃在结构强度与耐撞性方面均优于汽车前风挡玻璃,适用于更高强度的防护需求。

为适应气炮发射条件,试验中拆除了无人机旋翼,仅保留机体主体结构。该简化处理有助于保证无人机发射姿态稳定及试验的重复性。从结构特征来看,旋翼质量和刚度相对较小,在高速正向撞击工况下,其对整体冲击载荷输入和风挡玻璃宏观破坏模式的影响有限。但是,在真实飞行工况中,旋翼可能在初始接触阶段参与局部接触过程,并在一定程度上引入额外的能量耗散与破坏形态变化。因此,本研究结论主要适用于以无人机机体主体撞击为主导的高速撞击场景。

3 结 论

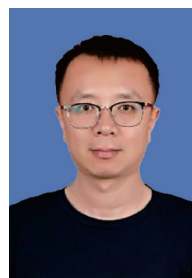
1) 随着撞击速度的提高,风挡玻璃表现出明显的速度敏感型损伤演化特征。撞击速度越高,裂纹区域直径和凹陷深度增加越显著。

2) 对于汽车前风挡玻璃,贴膜限制了玻璃的变形扩展而导致应力集中,使得风挡玻璃损伤阈值下降。相同撞击速度下,贴膜玻璃较未贴膜玻璃表现出更早期、更广泛的裂纹扩展。

3) 在相同名义撞击速度下,高铁侧风挡玻璃的耐撞性能显著优于汽车风挡玻璃,能够在 30 m/s 工况下保持结构完整,没有产生明显裂纹。

参 考 文 献

- [1] XIAONING Z. Analysis of military application of UAV swarm technology[C]//2020 3rd International Conference on Unmanned Systems (ICUS). Harbin, China: IEEE, 2020: 1200-1204.
- [2] CRIOLLO L, CARLOS M A, CLASSIFICATION S X, et al. And opportunities of unmanned aerial vehicles[J]. Aviation, 2024, 28(2): 115-127.
- [3] 贾宜霖, 岳训. 引领式空中汉字展示无人机集群的仿真研究[J]. 无人系统技术, 2021, 4(3): 32-39.
JIA Yilin, YUE Xun. Simulation study of leader following UAVs for air dot matrix Chinese character display[J]. Unmanned Systems Technology, 2021, 4(3): 32-39.(in Chinese)
- [4] REJEB A, ABDOLLAHI A, REJEB K, et al. Drones in agriculture: a review and bibliometric analysis[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 198: 107017.
- [5] RAJ M, HARSHINI N B, GUPTA S, et al. Leveraging precision agriculture techniques using UAVs and emerging disruptive technologies[J]. Energy Nexus, 2024, 14: 100300.
- [6] WANG J M, LI Z G, LAN H Q, et al. Study of the head and neck injury risk under impact conditions of the light UAV with a medium weight[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2023, 23(4): 226.
- [7] STARK D B, WILLIS A K, ESHELMAN Z, et al. Human response and injury resulting from head impacts with unmanned aircraft systems[J]. Stapp Car Crash Journal, 2019, 63: 29-64.
- [8] Alliance for System Safety of UAS through Research Excellence (ASSURE). Task A14: UAS ground collision severity evaluation 2017-2019[R]. Washington, DC: Federal Aviation Administration, 2019.
- [9] WENG Y H, BIAN K W, GUNASEKARAN K, et al. Modeling small remotely piloted aircraft system to head impact for investigating craniocerebral response[J]. Journal of Biomechanics, 2021, 128: 110748.
- [10] 郭亚周, 刘小川, 白春玉, 等. 民用轻小型无人机低空跌落撞击对地面人员安全性影响[J]. 航空科学技术, 2021, 32(12): 115-121.
GUO Yazhou, LIU Xiaochuan, BAI Chunyu, et al. Impact of low-altitude drop of civilian light and small UAVs on the safety of ground personnel[J]. Aeronautical Science and Technology, 2021, 32(12): 115-121.(in Chinese)
- [11] LI R, LI Z G, LAN H Q, et al. Study on the head and neck injury risk impacted by UAV: effect of impact velocity, angle, location, and mass[J]. International Journal of Crashworthiness, 2024, 29(3): 482-494.
- [12] SU Z Q, LI Z G, LAN H Q, et al. Head and neck injury risk resulting from impact with small unmanned aerial vehicles: effect of impact speed, angle, and location[J]. International Journal of Crashworthiness, 2024, 29(6): 1142-1158.
- [13] LEE S E, JUNG J W, CHOI Y, et al. Unmanned aerial vehicle impacts on Heat-Strengthened glass[J]. IEEE Access, 2019, 7: 104269-104278.
- [14] CHOI Y J, LEE S E, JUNG J W, et al. Collision mechanism of unmanned aerial vehicles onto glass panels[J]. International Journal of Micro Air Vehicles, 2021, 13: 1-18.
- [15] LU X H, LIU X C, ZHANG Y C, et al. Simulation of airborne collision between a drone and an aircraft nose[J]. Aerospace Science and Technology, 2021, 118: 107078.
- [16] ZHANG Z G, LU X H, ZHANG Y C, et al. Research on collision risk between light unmanned arial vehicles and aircraft windshield[J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 40(5): 534-546.
- [17] 张楚凡, 李勇, 还大军, 等. 双层K-cor夹层结构高速冲击实验和数值模拟[J]. 振动、测试与诊断, 2020, 40(2): 332-340.
ZHANG Chufan, LI Yong, HUAN Dajun, et al. High-velocity impact test and numerical simulation of double-layer K-cor sandwich structure[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2020, 40(2): 332-340.(in Chinese)
- [18] 郭亚周, 刘小川, 郭军, 等. 微型无人机和鸟体撞击飞机风挡玻璃对比实验[J]. 实验力学, 2020, 35(1): 167-173.
GUO Yazhou, LIU Xiaochuan, GUO Jun, et al. Comparative experiment of aircraft windshield glass subjected to micro-UAV and bird body impact[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(1): 167-173.(in Chinese)
- [19] 苏艳, 缪奎宗, 张柱国, 等. 基于内聚力模型的飞机风挡与无人机碰撞仿真及试验验证[J]. 南京航空航天大学学报, 2023, 55(5): 839-850.
SU Yan, MIAO Kuizong, ZHANG Zhuguo, et al. Simulation and test verification of collision between aircraft windshield and UAV based on cohesive zone model[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2023, 55(5): 839-850.(in Chinese)



第一作者简介:王亚锋,男,1975年6月生,硕士、高级工程师。主要研究方向为飞机结构冲击动力学。
E-mail:wangyafeng623@163.com