# 客舱玻璃抗螺旋桨甩冰冲击分析

李挺<sup>1</sup>,梁元<sup>1</sup>,杨凯<sup>2</sup>,冯斯栋<sup>2</sup>

(1.航空工业第一飞机设计研究院, 西安 710089; 2.中航飞机股份有限公司 研发中心, 西安 710089)

摘要:目的研究涡桨飞机客舱玻璃抗螺旋桨甩冰分析方法。方法 根据某型涡桨飞机螺旋桨结冰特性计算 分析得到的冰块质量以及冰块轨迹,筛选出严重载荷工况。建立客舱玻璃有限元模型,采用有限元软件 PAM-CRASH 进行数值计算,获得结构破坏形态和动态响应。开展客舱玻璃甩冰冲击研发试验,将试验后 结构损伤与数值分析结果进行对比分析。结果 两种确定冰块质量和冰块速度方法,可适用于结构防甩冰设 计的不同阶段;根据结冰特性计算分析得到的冰块质量 10.27g、垂向速度 141.1 m/s 更为准确合理。不同冰 型撞击各个结构部位,会对结构造成不同程度的损伤。同一长方体冰型下,入射截面积越小,玻璃损伤越 严重;撞击玻璃不同部位时,角部比中心点更为严重。结论 试验结果与仿真结果基本一致,可以验证所给 出的客舱玻璃分析模型及分析方法的准确性,可供螺旋桨甩冰区域的客舱玻璃设计参考。 关键词:客舱玻璃;螺旋桨甩冰; PAM-CRASH; 仿真分析;试验验证 DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.09.023

中图分类号: V223 文献标识码: A 文章编号: 1672-9242(2020)09-0129-05

## Ice Shedding Impact Analysis for Cabin Window of Civil Aircraft

*LI Ting*<sup>1</sup>, *LIANG Yuan*<sup>1</sup>, *YANG Kai*<sup>2</sup>, *FENG Si-dong*<sup>2</sup> (1.The First Aircraft Institute of AVIC, Xi'an 710089, China; 2.Research and Development Center, AVIC Aircraft CO., LTD, Xi'an 710089, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the analysis method for cabin window of turboprop aircraft against propeller ice shedding. According to the propeller icing characteristics of a turboprop aircraft, the mass and trajectory of shedding ice were calculated and analyzed to screen out the serious loading condition. A finite element model of cabin window was established and finite element software PAM-CRASH was applied to numerical calculation to obtain structural failure morphology and dynamic response. Ice shedding impact experiment of cabin window was carried out and the results of structural failure and numerical analysis after experiment were analyzed comparatively. The two methods of determining ice mass and ice speed could be applied to different stages of structural ice shedding design. According to the calculation and analysis of icing characteristics, the ice mass of 10.27 g and the vertical speed of 141.1 m/s were more accurate and reasonable. Different ice types caused different degrees of damage to the structure when impacting various parts of the structure. Under the same cuboid ice pattern, the smaller the incident cross-sectional area was, the more serious the window damage was. When different parts of window were hit, the corner was more serious than the center point in view of damage. The experimental results are basically consistent with the simulation results, which can verify the accuracy of the cabin window analysis model and analysis method, and provide refer-

Received: 2020-07-18; Revised: 2020-08-10

作者简介:李挺(1984—),男,高级工程师,主要研究方向为飞机结构动力学。

Biography: LI Ting(1984-), Male, Senior engineer, Research focus: aircraft structure dynamic.

收稿日期: 2020-07-18; 修订日期: 2020-08-10

ence for cabin window design in propeller ice shedding area.

KEY WORDS: cabin window; propeller ice shedding; PAM-CRASH; simulation; test validation

飞机结冰是指飞机在结冰环境中飞行时,机翼、 尾翼、螺旋桨等部位聚集冰层的现象。这些关键部位 结冰会使气动外形改变,导致气流分离,造成升力下 降、阻力增加等严重后果<sup>[1-4]</sup>。由于结冰原因造成机 毁人亡的事故<sup>[5-6]</sup>,在国内外均有发生。对于涡桨飞 机,螺旋桨结冰会改变桨叶的翼型,使流过桨叶的气 流紊乱,致使螺旋桨叶片在大倾角时失速,同时严重 降低螺旋桨的拉力<sup>[7-8]</sup>。

为了避免桨叶结冰,螺旋桨系统一般由螺旋桨本 体、螺旋桨除冰系统和螺旋桨控制系统3个分系统组 成,在结冰气象条件下,通过循环加热实现螺旋桨防 除冰设计<sup>[9]</sup>。但在螺旋桨防除冰系统失效故障模式 下,冰块会在桨叶上聚集,由于受气动力等影响,桨 叶上聚集的冰块会部分脱落。伴随着桨叶旋转,这些 脱落的冰块会以一定速度飞散,有可能会撞击到飞机 蒙皮、客舱玻璃及其他部件,造成结构变形乃至破坏, 严重影响飞机飞行安全。

因此,对在螺旋桨甩冰区域设有客舱玻璃的飞机 来说,按照运输类飞机适航标准 CCAR25.875<sup>[10]</sup>条款 要求,必须采用分析、试验或者两者结合的方法,用 以表明在螺旋桨甩冰区域的客舱玻璃能够承受飞行 过程中可能发生的最严重的冰块冲击。

本文以某型民机螺旋桨甩冰区域的客舱玻璃为研究对象,根据螺旋桨结冰特性计算分析得到的冰块 质量以及冰块轨迹,筛选出甩冰冲击的严重载荷工况。建立客舱玻璃有限元模型,采用有限元软件 PAM-CRASH进行数值计算,获得结构破坏形态和动态响应。基于分析结果,开展客舱玻璃甩冰冲击研发 试验,得到玻璃不同部位的结构损伤,并与数值模拟 结果进行对比分析。

## 1 计算模型

## 1.1 客舱玻璃有限元模型

某型民机螺旋桨甩冰区域的客舱玻璃由 18 mm 的外层玻璃、3.2 mm 的内层玻璃以及密封带组合而 成。内外层玻璃均采用亚克力玻璃材料,其性能符合 M1L-PL-25690B《单层抗裂纹扩展改性丙烯酸酯塑料 板和成型组件》<sup>[11]</sup>的要求。其材料参数中,密度为 1180 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量为 3.1 GPa, 泊松比为 0.4, 拉 伸强度最小为 75.8 MPa,剪切强度最小为 20.7 MPa。 按照客舱玻璃组成建立了有限元模型,整个模型均采 用三维体单元,共计 26 386 个单元,如图 1 所示, 并在密封带四周进行固支边界约束。



图 1 客舱玻璃有限元模型 Fig.1 Finite element model of cabin window

## 1.2 冰块质量及冰块速度

在螺旋桨甩冰冲击分析中,对于冰块的质量和速 度要求,目前国内外缺少相关标准供参考。而通过螺 旋桨冰风洞试验,很难模拟螺旋桨甩冰来获得冰块, 并且也耗费大量时间、经费。因此,在某型民机客舱 玻璃抗冰块冲击设计过程中,采用以下两种方法开展 分析。

1)方法一:在飞机初步设计阶段,按照螺旋桨 翼尖切向速度208 m/s以及供应商在类似涡桨飞机飞行 试验中观察到的最大冰块尺寸(50.8 mm×76.2 mm× 12.7 mm)垂直撞击客窗玻璃;

2)方法二:选取飞机典型任务剖面,开展螺旋 桨结冰特性计算分析,获取桨叶不同站位下的冰型, 根据体积相等原则,将不同冰型等效为球体,从而获 得各站位下的冰块质量。同时,根据桨叶不同站位处 的冰块飞行轨迹,得到冰块在飞机机身上的落点位置 (如图 2 所示),以及垂直机身表面的速度分量。按 照撞击能量最大原则,对客舱玻璃上所有工况进行筛 选,最终确定以质量为10.27g、垂向速度为141.1 m/s 的冰块作为最严重载荷工况进行分析。



图 2 桨叶不同站位处的冰块在飞机机身上的落点 Fig.2 Dropping points of ice at different positions of blades on aircraft

### 1.3 冰块模型

在甩冰冲击分析中,冰块模型至关重要。国内外 许多学者对冰块的本构模型、材料参数、数值模拟方 法等进行了大量研究<sup>[12-16]</sup>。相对于金属冲击,高速冲 击下的冰块更类似于水滴,会在大变形下完全破裂。 本文采用 SPH(光滑粒子流体动力学)方法<sup>[17-18]</sup>模拟 冰块,以避免数值模拟中冰块产生大变形和散开而使 计算中止。考虑到 SPH方法不能采用金属弹塑性材料 模型,因此冰块采用了弹-塑性水动力学材料模型<sup>[19]</sup>。 这种材料模型采用与拉伸应力相关的失效判据表征, 达到拉伸失效应力时偏应力分量置 0,且材料只能保 持压缩应力。冰块的材料力学性能参数见表 1。

# 2 仿真分析

采用显示有限元分析方法,应用 PAM-CRASH 有限元软件,对客舱玻璃遭受冰块冲击时的典型工况 进行仿真分析。按照 1.2 小节的内容,分别建立了长

方体和球体两种冰块 SPH 模型。同时,冰块撞击位 置分别取玻璃中心点和上部角点。表 2 所列为四种典 型分析工况及分析结果汇总。以工况 1 为例,图 3 显 示了玻璃受冰块冲击后的损伤情况。通过对比分析计 算结果,可以得到以下 2 条结论:

表 1 冰块力学性能参数

Tab.1 mechanical	parameters of ice
材料属性	数值
密度	846.00 kg/m <sup>3</sup>
拉伸剪切模量	3.46 GPa
屈服强度	10.30 MPa
硬化模量	6.89 GPa
体积模量	8.99 GPa

1)长方体不同入射截面会对结构造成不同损伤, 截面积越小,玻璃损伤越严重;

2)撞击客窗玻璃不同部位时,损伤情况不同, 角部比中心点更为严重。

Tab.2 Analysis cases and simulation results									
工况	入射冰形(入射面)	撞击点位置	质量/g	速度/(m·s <sup>-1</sup> )	分析模型	结构损伤			
						外层玻璃	内层玻璃		
1	长方体 (最小横截面)	玻璃中心点	44.2	208		破损	破损		
2	长方体 (最大横截面)	玻璃中心点	44.2	208		破损	完好		
3	球体	玻璃中心点	10.27	141.1	$\mathbf{\cdot}$	完好	完好		
4	球体	玻璃角点	10.27	141.1		局部破损	完好		

表 2 分析工况及结果说明 Fab 2 Analysis cases and simulation result



图 3 客舱玻璃损伤情况(工况 1) Fig 3 Damaga of ashin window (assa 1

#### Fig.3 Damage of cabin window (case 1)

# 3 甩冰冲击试验

## 3.1 试验对象与支持方式

客舱玻璃甩冰冲击试验在中国飞机强度研究所 结构冲击动力学航空科技重点实验室进行。试验采用 空气炮试验方法<sup>[20]</sup>,试验时将规定质量的冰块放入衬 壳,装入空气炮管中。启动空气压缩机,当压力容器 中的压力达到所需值时,打开空气释放机构,让划刀 迅速划破堵气的涤纶薄膜,在压缩空气的作用下,使 冰块以某一速度射出炮口,通过测速靶,撞击试验件。

选取带有客舱玻璃的机身蒙皮试验件,将试验件 机身蒙皮通过工装固定在承力墙上;客舱玻璃则通过 四周压条由螺钉固定在夹具前端口框上,夹具背部与 承力墙相连(图4)。选取表2中的工况1、工况3和 工况4进行试验,试验设计速度分别为208、141.1 m/s,速度误差控制在±2 m/s内;弦窗玻璃平面尺寸 约为350 mm×300 mm,撞击点误差控制在±3 mm内, 误差不超过1%。

## 3.2 试验结果

图 5 给出三种试验工况下结构破损情况。工况 1 内外层玻璃均被穿透,工况 3 内外层玻璃完好,工况 4 只有外层玻璃局部破损。对比各工况下甩冰冲击试 验结果与分析结果,可以看到,客舱玻璃结构损伤情 况基本一致。这说明文中所采用的冲击分析模型及分析方法能够用来准确模拟甩冰冲击过程。









图 5 试验结果与分析结果对比示意 Fig.5 Diagram for comparison between experimental results and analysis results

# 4 结论

1)两种确定冰块质量和冰块速度方法,可适用 于结构防甩冰设计不同阶段,方法二确定的冰块质量 及速度更为准确合理。

2)不同冰型撞击各个结构部位,会对结构造成不同程度的损伤。同一长方体冰型下,入射截面积越小,玻璃损伤越严重;撞击玻璃不同部位时,角部比中心点更为严重。

3)试验结果与仿真结果基本一致,验证了分析 模型及分析方法的准确性,分析模型和分析方法可以 为客舱玻璃设计提供参考。

#### 参考文献:

[1] WESTPHAL P W, WAGNERL O. Flight Accident

Prevention with Hazard Priprity Based Real Time Risk Reduction[C]//AIAA Non-Deterministic Approaches Forum 42nd SDM Conference. Seattle: WA, 2001: 16-19.

- [2] 钟长生,洪冠新.飞机翼面结冰对飞行特性影响的研究[J]. 航空科学技术, 2004(3): 32-34.
   ZHONG Chang-sheng, HONG Guan-xin. Review about Effects of Lifting Surface Icing on Aircraft Flight Characteristics[J]. Aeronautical Science and Technology, 2004(3): 32-34.
- [3] PARASCHIVOIU I, SAEED F. Aircraft icing[R]. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- [4] BRAGG M, HUTCHISON T, MERRET J, et al. Effect of Ice Accretion on Aircraft Flight Dynamics[C]//38th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: [s. n.], 2000.
- [5] 谢毅.飞机结冰事故的统计分析[J].国外试飞, 1996(3):23-28.

XIE Yi. Statistical Analysis of Flight Accident due to Icing[J]. Foreign Flight Test, 1996(3): 23-28.

- [6] COLE J, STAND W. Statistical Study of Aircraft Icing Accidents[C]. 29th Aerospace Sciences Meeting. Nevada: Reno, 1991.
- [7] 孔维梁, 钱锟. 涡桨飞机结冰失速问题研究[J]. 国际航空, 2009(4): 53-56.
   KONG Wei-liang, QIAN Kun. Ice-induced Stall in Turblprop Aircraft[J]. International Aviation, 2009(4): 53-56.
- [8] 胡立芃. 桨叶结冰对旋翼气动特性影响计算[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.

HU Li-peng. Numerical Simulation of the Aerodynamic Charateristics of the Rotor Blade at Icing Condition[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics.

- [9] 蒋鹏. MA60 涡桨飞机螺旋桨加温系统改进研究[J]. 无 线互联科技, 2017(12): 147-148.
  JIANG Peng. Discussion on Improvement of Heating System of MA60 Turboprop Aircraft Propeller[J]. Wireless Internet Technology, 2017(12): 147-148.
- [10] CCAR-25-R4,运输类飞机适航标准[S]. CCAR-25-R4, China Civil Aviation Regulations: part 25-Airworthiness Standard of Transport Aircraft[S].
- [11] MIL-P-25690B, 单层抗裂纹扩展改性丙烯酸酯塑料板 和成型组件[S].
   MIL-P-25690B, Military Specification: Plastic, Sheets and Formed Parts, Modified Acrylic Base, Monolithic, Crack Propagation Resistant[S].
- [12] 乐莉,闫军,钟秋海. 超高速撞击仿真算法分析[J]. 系 统仿真学报, 2004, 16(9): 1940-1943.
  LE Li, YAN Jun, ZHONG Qiu-hai. Simulations of Debris Impacts Using Three Different Algorithms[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(9): 1940-1943.

- [13] COMBESCURE A ,CHUZEL-MARMOT Y, FABIS J. Experimental Study of High-velocity Impact and Fracture of Ice[J]. International Journal of Solids and Structures, 2011, 48(20): 2779-2790.
- [14] KEUNE J N. Development of a Hail Ice Impact Model and the Dynamics Compressive Strength Properties of Ice[D]. West Lafayette: Purdue University, 2004.
- [15] DCOGE A, SINGH S, MASIULANIEC K C, et al. Experimental Assessment of Airframe Damage Due to Impacting Ice[C]//AIAA 31th Aerospaces Sciences Meeting. Nevada: Reno, 1993.
- [16] ANGHILERI M, CASTELLETTI L L, INVERNIZZI F, et al. A Survey of Numerical Models for Hail Impact Analysis Using Explicit Finite Element Codes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31(8): 929-944.
- [17] LACOME J L. Smoothed Particle Hydrodynamics: Part I, FEA Information 10[C]//Catifornia: Livermore Software Technology Corporation, 2001: 3-6.
- [18] HOSSEIN A K, ARASH K, COSMIN A, et al. High Velocity Impact of Metal Sphere on Thin Metallic Plate Using Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) method [J]. Frontiers of Architecure and Civil Engineering in China, 2012, 6(2): 101-110.
- [19] 汪洋,李玉龙.冰雹冲击复合材料层合板仿真研究[J]. 振动与冲击,2015,34(2):187-190.
  WANG Yang, LI Yu-long. Modeling of High Velocity Hailstone Impact onto Composite Material Panel[J]. Journal of Vibration and Shock, 2015, 34(2):187-190.
- [20] 尤志芳. 冰雹撞击试验系统的开发与研究[D]. 南京: 东南大学, 2007.
   YOU Zhi-fang. Research and Development on Test System of Hailstone Impact [D]. Nanjing: Southeast University, 2007.