

鸟撞飞机风挡非线性数值分析

朱书华¹ 王跃全¹ 郭亮¹ 张立圣² 童明波¹

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016;

2. 江西洪都航空工业集团有限责任公司, 南昌, 330024)

摘要:采用非线性有限元法, 基于ABAQUS/Explicit 软件平台及内嵌的材料用户定义子程序(VUMAT), 建立了鸟撞飞机风挡的力学分析模型。比较了有限元模型中玻璃骨架、弧框和橡胶垫片对风挡动响应分析结果的影响, 并与全尺寸风挡鸟撞试验数据进行了对比。对比结果表明, 考虑了玻璃骨架、弧框和橡胶垫片的有限元模型所计算得到的位移、应变曲线与试验实测曲线的一致性有了改善。最后, 探讨了玻璃骨架、橡胶垫片的厚度和弹性模量对风挡抗鸟撞能力的影响规律, 为风挡的抗鸟撞设计及改型提供参考。

关键词:鸟撞; 风挡; 抗鸟撞设计; 有限元模型

中图分类号: V215.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-2615(2011)06-0738-06

Non-linear Numerical Simulation of Bird Impact on Aircraft Windshield

Zhu Shuhua¹, Wang Yuequan¹, Guo Liang¹, Zhang Lisheng², Tong Mingbo¹

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Jiangxi Hongdu Aviation Industry Group, Nanchang, 330024, China)

Abstract: A finite element model (FEM) of bird impact on the windshield is established via the nonlinear finite element method, combined with the user-defined materials subroutine (VUMAT) of the ABAQUS/Explicit software. The dynamic response of bird strike on aircraft windshield is analyzed in two different configurations, with and without the surrounding structure frame, skin and rubber layer. By comparing the simulation results and the full-scale experiment data, the results of FEM with the surrounding structure have a better agreement with the experiments in the instantaneous deformation of bird and windshield, the damage modes of the windshield, the displacement curves and the strain curves of the measured points on the windshield. In addition, the sensitivities of the design parameters of aircraft windshield, including skin thickness, skin elastic modulus, rubber thickness, and rubber elastic modulus are discussed on the windshield capability against bird-strike comprehensively.

Key words: bird strike; windshield; anti-bird impact design; finite element model (FEM)

鸟撞飞机会带来灾难性事故, 已备受国内外航空结构强度和安全领域专家们的高度关注。当前我国正在大力发展大飞机, 飞机风挡的抗鸟撞设计是飞机设计中的重要课题, 对达到飞机设计要求、实现飞机整体性能、保障飞机安全飞行具有现实而深远的意义。

目前, 国内鸟撞风挡的研究主要依赖于鸟撞试

验^[1-4], 并结合数值方法进行仿真分析^[2-3, 5-8]。为了简化分析模型, 杨嘉陵^[2]、姚小虎^[4]、朱书华^[5]、白金泽^[6]、王富生^[7]等分析时均以风挡玻璃为研究对象, 玻璃骨架、弧框和橡胶垫片的作用通过边界条件(四周固支或铰支)来模拟。而有限元模型中建立玻璃骨架、弧框和橡胶垫片等风挡支撑结构对风挡动响应分析结果的影响研究还较少。另外, 玻璃骨

架、弧框、橡胶垫片等支撑件的设计对风挡抗鸟撞性能的影响尚未见相关文献报道,而这对提高风挡的抗鸟撞能力有重要意义,有必要对此开展研究。

本文首先建立鸟撞风挡的有限元模型。然后分析有限元模型中考虑玻璃骨架、弧框和橡胶垫片与风挡动响应分析结果的影响,并与全尺寸风挡鸟撞试验结果进行对比。最后,文中探讨玻璃骨架、橡胶垫片的厚度和弹性模量对风挡抗鸟撞能力的影响规律,为风挡的抗鸟撞设计及改型提供参考。

1 有限元模型

1.1 风挡模型

1.1.1 几何模型及边界条件

为了分析有限元模型中考虑玻璃骨架、弧框和橡胶垫片与否对动响应分析结果的影响,本文分析比较了两种模型,如表1所示。模型1:仅建立风挡玻璃有限元模型,风挡玻璃四周固支,如图1(a)所示。模型2:建立风挡玻璃、玻璃骨架、弧框和橡胶垫片有限元模型,骨架四周固支,如图1(b)所示。模型1的接触形式为:鸟体与风挡玻璃之间采用一般接触。模型2的接触形式为:鸟体与风挡玻璃、后弧框骨架之间采用一般接触;风挡玻璃与橡胶垫片、橡胶垫片与骨架采用面-面接触。风挡玻璃网格采用三层8节点的C3D8R实体单元,共8160个节点和5850单元。弧框网格、骨架网格及橡胶垫片网格也采用C3D8R实体单元。

表1 计算模型

模型	有限元模型	边界条件
1	风挡玻璃	玻璃四周固支
2	风挡玻璃、骨架和橡胶垫片	骨架四周固支

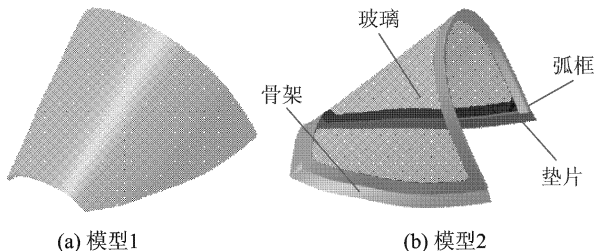


图1 风挡几何模型

1.1.2 风挡材料模型

本文研究的风挡材料为YB-3 PMMA材料。王礼立等^[9]提出的朱-王-唐(ZWT)非线性粘弹性本构方程能很好地描述冲击载荷作用下该材料的动态特性。故本文采用式(1)的ZWT方程来描述该材

料

$$\sigma = E_0 \varepsilon + \alpha \varepsilon^2 + \beta \varepsilon^3 + E_1 \int_0^T \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{t_1}\right) d\tau + E_2 \int_0^T \dot{\varepsilon} \exp\left(-\frac{t-\tau}{t_2}\right) d\tau \quad (1)$$

常温下该材料的非线性粘弹性本构方程参数为: $E_0 = 2.95 \text{ GPa}$; $\alpha = -10.9 \text{ GPa}$; $\beta = -96.4 \text{ GPa}$; $E_1 = 0.832 \text{ GPa}$; $t_1 = 7.33 \text{ s}$; $E_2 = 5.24 \text{ GPa}$; $t_2 = 40.5 \mu\text{s}$; 泊松比 $\nu = 0.4$ 。风挡材料失效准则采用拉伸失效准则,失效力为 87.3 MPa 。本文通过ABAQUS的用户子程序VUMAT将该材料本构关系和失效准则嵌入风挡有限元模型中进行计算。

1.2 鸟体模型

1.2.1 鸟体几何模型

为了与试验鸟体质量保持一致,数值模拟时鸟体质量取为 1.8 kg 。鸟体模型为两端半球形、中间圆柱形的实体^[10],尺寸如图2所示。鸟体网格包含5916个实体单元(C3D4),平均单元长度为 $12 \sim 13 \text{ mm}$ 。

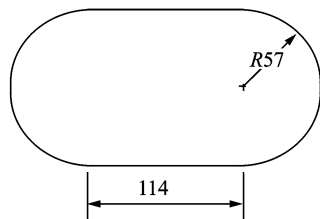


图2 鸟体几何模型

1.2.2 鸟体材料模型

鸟体材料特性是鸟撞数值模拟的主要焦点和难点^[11-12],本构方程很难描述。在已有文献中往往采用弹性体、弹塑性体、无旋位流等简化模型模拟鸟体。本文采用带失效的弹塑性材料建立鸟体模型。失效准则采用剪切失效,剪切失效模型是基于单元积分点处的等效塑性应变值。引入材料损伤变量 ω

$$\omega = \frac{\bar{\varepsilon}_0^{pl} + \sum \Delta \bar{\varepsilon}^{pl}}{\bar{\varepsilon}_f^{pl}} \quad (2)$$

式中: $\bar{\varepsilon}_0^{pl}$ 为等效塑性应变初始值; $\Delta \bar{\varepsilon}^{pl}$ 为等效塑性应变增量; $\bar{\varepsilon}_f^{pl}$ 为失效应变,本文模型取为 1.25 。当损伤变量 ω 超过 1 时,积分点处材料失效,此时积分点处所有应力分量设为 0 。当单元中所有积分点失效后,单元失效^[13],失效单元将从计算中自动删除。鸟体的材料参数如表2所示。

表2 鸟体材料参数

弹性模量/ Pa	泊松比	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	屈服应力/MPa	失效 应变
6.89E7	0.49	938	6 894	1.25

1.3 玻璃骨架、弧框和垫片材料模型

玻璃骨架和弧框的材料为锻铝合金材料LD5,材料模型选为弹塑性材料,失效准则采用拉伸失效准则,材料参数如表3所示。

表3 锻铝合金LD5的材料参数

密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ GPa	泊松比	屈服应 力/MPa	失效应 力/MPa	切线模量/ MPa
2 750	71	0.3	313	365	2 000

垫片为橡胶材料,橡胶材料的应力-应变关系呈现出高度非线性,这种材料特性称作超弹性。本文采用常用的Hyperelastic中的Mooney-Rivlin材料模型模拟橡胶。该材料模型中,应变势能^[13]为

$$U = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J_{el} - 1)^2 \quad (3)$$

式中: J_{el} 为弹性体积比; \bar{I}_1 和 \bar{I}_2 为应变张量的第1,第2不变量; C_{10} 、 C_{01} 和 D_1 为材料参数,文中分别取值为0.378,0.977和0.341 MPa。

2 算例验证

2.1 鸟体和风挡变形

图3给出了鸟撞速度为340 km/h时鸟撞风挡过程中 t 为0,1,2和3 ms时刻的鸟体与风挡的变形仿真图和高速摄像照片。图3(a)为鸟体和风挡撞击之前的初始形状及初始位置。图3(b)表明当鸟撞击到风挡时,鸟体开始压缩,风挡发生局部变形,撞击点处有明显凹痕。随着鸟体向后滑动,风挡的变形区向后移动,鸟体和风挡的变形逐渐变大, $t=2$ ms时刻鸟和风挡的变形如图3(c)所示。最后鸟体形状完全改变,在压力和速度作用下鸟体撕成碎片,四处飞溅,如图3(d)所示。从图3可以看出仿真分析中两种模型的鸟体和风挡的变形过程与试验的变形过程都吻合较好,这说明带剪切失效的弹塑性鸟体模型和风挡有限元模型能较好地反映鸟体和风挡相撞后的变形过程。

2.2 风挡的破坏模式

由试验可知,当鸟体速度超过360 km/h时,风挡被损坏。图4给出了鸟体速度为360 km/h时两种模型数值模拟及试验中风挡遭鸟撞击后的失效模式比较图。试验和仿真都表明风挡玻璃发生破坏

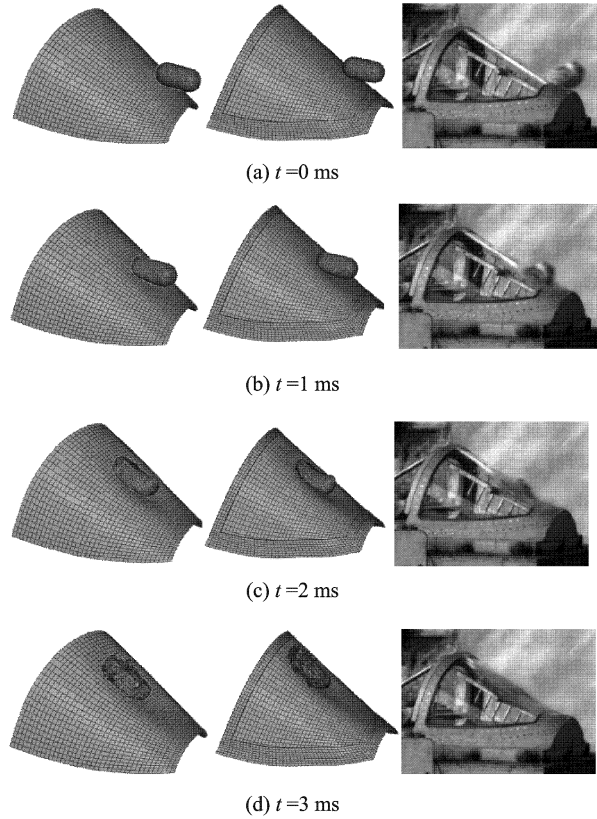


图3 鸟和风挡变形比较

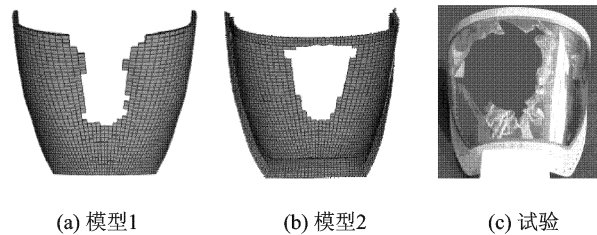


图4 风挡失效模式比较

的位置主要在撞击点和后弧框。试验中破坏孔呈现不规则形状。有一条主裂缝与风挡中线呈 30° 角,沿圆弧面一直贯穿到风挡和蒙皮的连接处。数值模拟中破坏孔呈现理想化的对称状态,与试验中的破坏孔有所不同。造成失效模式存在差异的原因很多,其中之一就是由于试验设备的精度,以及风等原因导致试验中真正的弹着点与试验设定的弹着点(即数值模拟中的弹着点)不吻合。另外,风挡表面可能存在的微缺陷也是造成该现象的主要原因。

2.3 位移和应变分析

对鸟撞速度为340 km/h时的位移、应变进行了分析。图5给出了试验中应变、位移传感器布局图, $B_1 \sim B_9$ 点为应变传感器; $C_1 \sim C_5$ 点为位移传感器; C_2 点为鸟弹弹着点。图6(a~c)分别给出了位移传感器 C_1 、 C_2 和 C_3 点的两种模型的法向位移曲

线与试验结果。图中可知,在位移20 mm和60 mm处试验曲线成直线,这是因为试验中采用的非接触式位移传感器量程只有0~40 mm。为了要测到大于40 mm的位移量,试验中采取预置位移量为20 mm的方法来测量。因此当位移超过60 mm和低于20 mm时,位移测不到,但可以从位移曲线的变化趋势估计出位移极值点处的数值。图6(d)给出了 B_1 点处两种模型的应变数值结果与试验结果。从这些图中可以看出,两种模型的位移峰值、应变峰值与试验结果都能较好吻合;考虑玻璃骨架和弧框时,撞击时间变长,风挡振动频率变小,位移峰值变小,应变峰值变大,但变化的幅度都不大。模型2的动响应结果与试验实测曲线的一致性有了改善。因此,本文采用模型2进行金属骨架和橡胶垫片的参数分析。

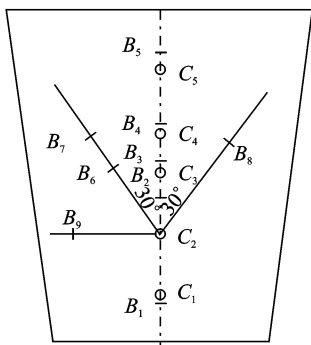


图5 应变、位移传感器布局图
(-为应变传感器;○为位移传感器)

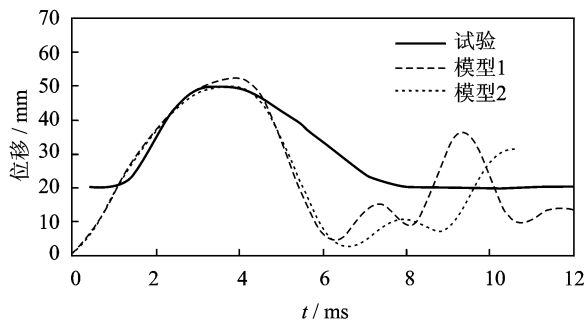
3 参数分析及讨论

3.1 橡胶垫片弹性模量的影响

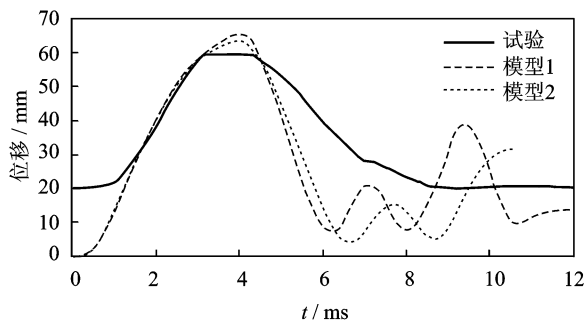
为了研究橡胶垫片弹性模量对风挡抗鸟撞击能力的影响,分别计算了橡胶垫片弹性模量为0.3, 3和30 GPa时风挡的鸟撞动响应情况。

图7给出了橡胶垫片弹性模量变化时,风挡撞击中心处(即 C_2 点)的位移随时间变化曲线。另外研究鸟撞过程中风挡的应力变化可知,风挡的最大Von-Mises应力发生在中心处玻璃内表面(A点)和风挡玻璃与金属骨架的结合处(B点),这两处风挡玻璃最先发生破坏。故表4给出了橡胶垫片弹性模量变化时,风挡玻璃动响应极值的比较,包括 C_2 点最大位移和A点,B点的最大Von-Mises应力。

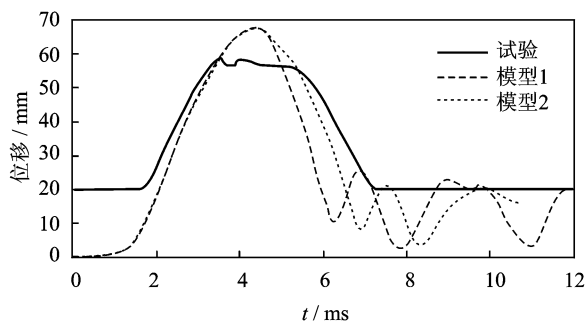
由图7和表4可知, C_2 点的位移随橡胶垫片弹性模量增大而减小,减小的幅度很小。但随着橡胶弹性模量的增加,风挡玻璃振动频率明显增加,且



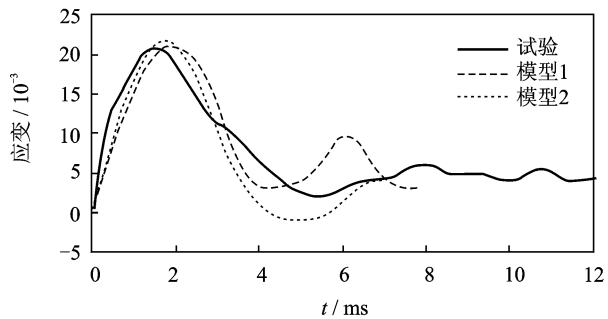
(a) C_1 传感器法向位移比较



(b) C_2 传感器法向位移比较



(c) C_3 传感器法向位移比较



(d) B_1 传感器应变比较

图6 位移、应变分析结果与试验数据比较

振动的幅度也变大。这对风挡玻璃是很不利的。

由表4可知,A点的Von-Mises应力峰值随橡胶垫片弹性模量的增大而减小,减小的幅度也很小。而B点的Von-Mises应力却随橡胶垫片弹性模量的增加显著增加。橡胶弹性模量增加10倍,B点的Von-Mises应力增加13.8%左右。这说明橡胶层

对缓冲玻璃层周边应力集中起到了相当大的作用。当弹性模量为 30 GPa 时, Von-Mises 应力峰值达到了 93.69 MPa。通常玻璃边缘的缺陷较多, 应力这么大, 即便是压应力, 也难以保证玻璃不破坏。这说明, 随着橡胶在使用过程中逐渐硬化, 风挡的抗鸟撞能力会降低, 在日常维护中要及时更换橡胶垫片。

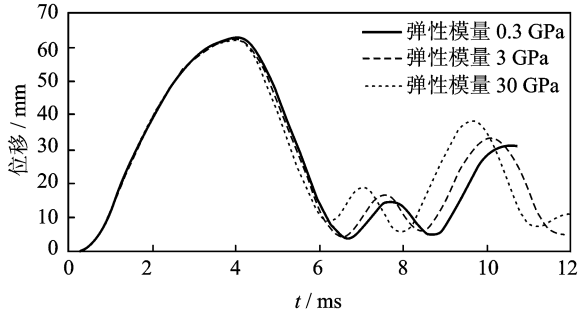


图7 不同橡胶垫片弹性模量 C_2 点法向位移

表4 橡胶垫片弹性模量变化时动响应极值比较

弹性模量/GPa	C_2 点最大位移/mm	A点最大应力/MPa	B点最大应力/MPa
0.3	62.85	77.35	72.80
3	62.13	76.44	82.83
30	61.84	76.42	93.69

3.2 橡胶垫片厚度的影响

为了研究橡胶垫片厚度对风挡抗鸟撞能力的影响, 分别计算了橡胶垫片厚度为 2 mm 和 3 mm 时风挡的鸟撞动响应情况。

图8和表5分别给出了橡胶垫片厚度变化时, C_2 点的法向位移随时间变化曲线以及风挡玻璃动响应极值的比较。由图8和表5可知, 橡胶垫片厚度增加 1 mm 后, C_2 点最大位移和 A 点的最大 Von-Mises 应力基本上没什么变化, 但 B 点的应力却降低了 4.7%, 并且撞击时间变长了。因此, 增加橡胶垫片厚度, 能改善风挡周边的应力集中, 提高风挡的抗鸟撞能力。

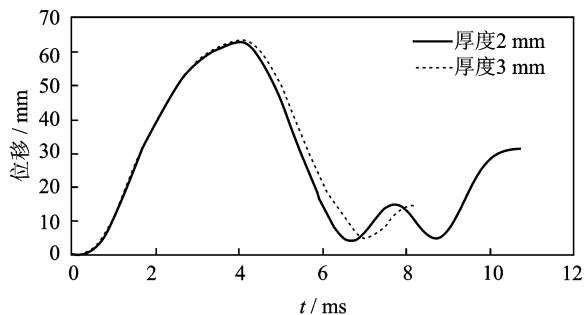


图8 不同橡胶垫片厚度 C_2 点法向位移

表5 橡胶垫片厚度变化时动响应极值比较

厚度/mm	C_2 点最大位移/mm	A点最大应力/MPa	B点最大应力/MPa
2	62.85	77.35	72.80
3	63.34	77.76	69.39

3.3 金属骨架弹性模量的影响

为了研究金属骨架弹性模量对风挡抗鸟撞能力的影响, 分别计算了金属骨架弹性模量为 41, 71, 100 和 150 GPa 时风挡的鸟撞动响应情况。图9和表6分别给出了金属骨架弹性模量变化时, C_2 点的位移随时间变化曲线以及风挡玻璃动响应极值的比较。

由图9和表6可知, 随着金属骨架弹性模量的增加, A点的最大 Von-Mises 应力减小, B点的最大 Von-Mises 应力增大, 而 C_2 点的位移基本没变化。金属骨架弹性模量由 41 GPa 增大到 150 GPa 时, A点的最大 Von-Mises 应力减小 4.1%, B点的最大 Von-Mises 应力增大 4%, 并且金属骨架弹性模量越大, 风挡玻璃振动的幅度越大。因此, 要综合考虑这两方面因素, 合理选择金属骨架材料, 使其对风挡抗鸟撞最为有利。

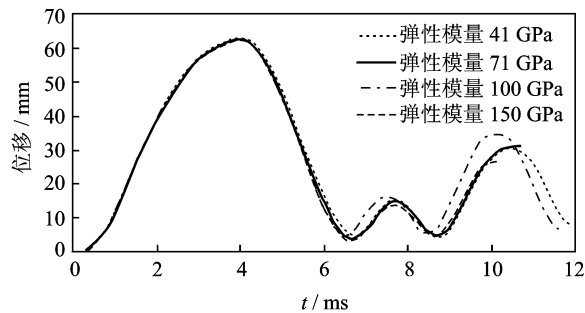


图9 不同金属骨架弹性模量 C_2 点法向位移

表6 金属骨架弹性模量变化时动响应极值比较

弹性模量/GPa	C_2 点最大位移/mm	A点最大应力/MPa	B点最大应力/MPa
41	62.13	77.90	70.65
71	62.85	77.35	72.80
100	62.62	75.25	72.65
150	62.43	74.72	73.44

3.4 金属骨架厚度的影响

为了研究金属骨架厚度对风挡抗鸟撞能力的影响, 分别计算了金属骨架厚度为 1.6, 3, 4.5, 6 mm 时风挡的鸟撞动响应情况。

图10和表7分别给出了金属骨架厚度变化时, C_2 点的位移随时间变化曲线以及风挡玻璃动响应

极值的比较。由图10和表7可知,当金属骨架厚度增加时, A 点和 B 点的最大Von-Mises应力均减小, C_2 点的位移峰值也略有减少,并且撞击时间变短。金属骨架厚度由1.6 mm增加至3 mm时, A 点最大Von-Mises应力减少2.4%, B 点最大Von-Mises应力减少1.4%。因此,为了提高风挡的抗鸟撞性能,金属骨架越厚越好,但这同时也增加了结构质量。

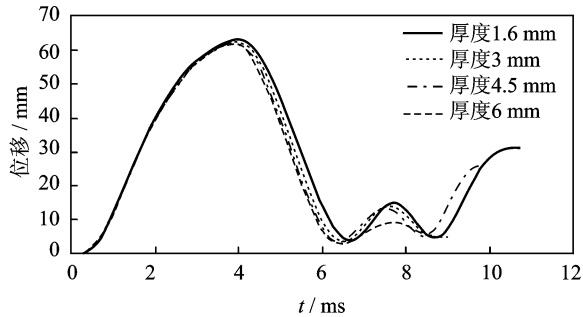


图10 不同金属骨架厚度 C_2 点法向位移

表7 金属骨架厚度变化时动响应极值比较

厚度/mm	C_2 点最大位移/mm	A 点最大应力/MPa	B 点最大应力/MPa
1.6	62.85	77.35	72.80
3	62.35	75.51	71.87
4.5	61.77	75.06	71.27
6	61.50	74.38	68.89

4 结 论

本文采用非线性有限元方法,基于ABAQUS/Explicit软件平台及内嵌的材料用户定义子程序(VUMAT),建立了鸟撞飞机风挡的力学分析模型。分析比较了有限元模型中是否考虑玻璃骨架、弧框和橡胶垫片的作用对风挡动响应结果的影响,并探讨了玻璃骨架、橡胶垫片的厚度和弹性模量对风挡抗鸟撞能力的影响规律。主要结论如下:

(1)有限元模型中考虑玻璃骨架、弧框和橡胶垫片时,撞击时间变长,风挡振动频率变小,位移峰值变小,应变峰值变大,但两者区别不大。考虑了玻璃骨架、弧框和橡胶垫片的有限元模型所计算的位移、应变曲线与试验实测曲线的一致性有了改善。

(2)增加橡胶垫片厚度和降低其弹性模量能改善风挡周边的应力集中,因此包边工艺非常重要,在生产过程中要予以足够的重视。

(3)增加金属骨架厚度能降低风挡中心处的应力峰值,改善风挡周边应力集中,提高风挡的抗鸟撞性能,但增加了结构质量,因此要权衡风挡的抗鸟撞性能和结构质量。提高其弹性模量也能降低风挡中心处的应力峰值,但使风挡周边应力集中现象加重。

参考文献:

- [1] 朱书华,童明波,彭刚,等.飞机全尺寸风挡抗鸟撞试验研究[J].实验力学,2009,24(1):61-66.
- [2] Yang J L, Jie C X, Hao W C. Experiment and FEM study of windshield subjected to high speed bird impact [J]. ACTA Mechanica Sinica, 2003, 19(6): 543-550.
- [3] Zhu Shuhua, Tong Mingbo, Wang Yuequan. Experiment and humerical simulation of bird impact on aircraft windshield Dynamical[R]. AIAA 2009-2575, 2009.
- [4] 姚小虎,韩强,张晓晴,等.飞机圆弧风挡抗鸟撞试验研究[J].爆炸与冲击,2005,25(5):417-412.
- [5] 朱书华,童明波,王跃全.某型飞机风挡鸟撞试验与数值模拟[J].应用力学学报,2009,26(3):444-449.
- [6] 白金泽,孙秦.飞机风挡结构抗鸟撞一体化设计技术研究[J].力学与实践,2005,27(1):14-18.
- [7] 王富生.鸟撞飞机风挡的一体化数值模拟技术[J].振动与冲击,2007,26(5):107-111.
- [8] 刘军,李玉龙,徐绯.基于PAM-CRASH的鸟撞飞机风挡动响应分析[J].爆炸与冲击,2009,29(1):80-84.
- [9] 王礼立,朱锡雄,施绍裘,等.鸟撞高速飞机风挡若干问题的冲击动力学研究[J].航空学报,1991,12(2):B27-B33.
- [10] 朱书华,童明波.鸟体形状对飞机风挡鸟撞动响应的的影响[J].南京航空航天大学学报,2008,40(4):551-555.
- [11] Airoidi A, Cacchione B. Modelling of impact forces and pressures in Lagrangian bird strike analyses [J]. International Journal of Impact Engineering, 2006, 32(10): 1651-1677.
- [12] Johnson A, Holzapfel M. Modelling soft body impact on composite structures [J]. Composite Structures, 2003, 61(1/2): 103-113.
- [13] Karlsson H, Sorenson. Abaqus analysis user's manual Version [M]. Pawtucket: Hibbt, Karlsson & Sorenson, 2007.