

文章编号: 1000-8055(2008)12-2208-06

鸟撞作用下的叶片丢失及包容数值模拟

蒋向华, 王延荣, 桂幸民

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院 航空发动机数值仿真研究中心, 北京 100191)

摘 要: 利用 MSC 软件, 建立了鸟撞航空发动机叶片转子级的有限元模型, 采用流固耦合及接触算法, 分析了鸟撞导致叶片破裂丢失以及机匣包容的过程, 模拟了机匣结构特性差异及其影响. 计算结果表明, 质量(动能)较大的整片叶片丢失容易击穿机匣, 并可能引起新的叶片丢失及包容性问题(二次损伤); 而部分叶片断裂丢失的影响较小, 一般不会击穿机匣, 也难以引发二次损伤. 整个过程复杂多变, 运动、变形、破坏及能量交换等多因素并存.

关 键 词: 鸟撞; 包容; 流固耦合

中图分类号: V231.9

文献标识码: A

Numerical simulation on blade loss caused by bird impact and casing containment

JIANG Xiang-hua, WANG Yan-rong, GUI Xing-min

(Aeroengine Numerical Simulation Research Center, School of Jet Propulsion, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: Bird impact on an aeroengine rotating stage may cause the blades split and hit the engine casing subsequently. This phenomenon was studied here by using MSC software. The result shows the entire blade loss involving large mass provides a high possibility of punching through the casing. This rushing blade may collide with other blades and trigger new blade loss and containment problems (secondary damage). Partially broken blade loss could also exist, but this kind of accident is less critical at most of time, which usually can not break the casing nor trigger any secondary damage. The wide coexistence of swift movements, large deformations, unrecoverable breakages and energy exchange processes will make this process much more complicated.

Key words: bird impact; casing containment; fluid-solid coupling

飞鸟对航空发动机的撞击, 由于相对速度较高、作用时间很短、撞击能量在时间和空间上都非常集中, 尽管撞击的总能量不是很大, 对发动机产生的破坏力却较大. 一些鸟撞过程会造成发动机风扇或压气机叶片局部掉块, 也有可能使叶片从根部发生断裂. 这种从高速旋转发动机中断裂的叶片, 具有较高的动能, 很容易击穿发动机机匣, 并进一步破坏飞机的油管、密封舱等要害部位, 其破坏力远比鸟撞本身要高.

在国内, 利用高压空气炮打击固定靶体及高速摄影等方式常被用来研究鸟撞^[1,2], 这种方式用在发动机上时, 需要提高对靶体转动行为的模拟. 国外有对叶片模型件的投鸟试验^[3], 一些大型航空发动机公司还采用了全尺寸发动机的投鸟试验^[4], 但这类试验的成本很高, 对经验的依赖性较强.

机匣包容性的研究也有多种方法, 其中发射类子弹物体击靶^[5]最为常采用. 该方法简便, 但子

收稿日期: 2007-12-03; 修订日期: 2008-05-06

作者简介: 蒋向华(1976-), 男, 湖南蓝山人, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机结构、强度、可靠性方面研究工作.

弹运动规律及靶体破坏过程与实际存在一定的差别; 利用单片旋转叶片丢失击靶^[6]的试验提高了试验的准确性, 但对于叶片稠度较高的转子, 这种方式仍然不能考虑叶片间的相互作用及其影响; 转子级的叶片丢失和机匣包容试验^[7]改进了上述试验的不足, 但试验成本和难度较高。

人们对鸟撞或机匣包容的研究取得了一些的成果, 但两者往往是相对独立的, 缺乏关联性。事实上, 鸟撞造成发动机叶片丢失并进而引起机匣不包容可以是一个连续发生的过程, 而且由于鸟撞程度的不同, 对叶片产生的破坏也不同, 这也给鸟撞引发的机匣包容性问题带来了区别于普通机匣包容问题的一些特点。

为了深化对鸟撞引发的叶片丢失和机匣包容问题的认识, 本文利用 MSC 系列软件及仿真中心强大的硬件支持, 建立了鸟撞航空发动机的瞬态动力学有限元模型, 并分析了鸟撞引发的整片和部分叶片丢失造成的机匣包容问题, 以及叶片的二次损伤与包容问题。

1 鸟撞模拟有限元建模

鸟撞发动机模型主要采用 MSC. PATRAN 进行建模。模型中的转子级由 13 片叶片组成, 采用拉格朗日壳元模拟, 共有 8757 个单元、8621 个节点; 鸟体及空气采用欧拉单元模拟, 共有约 76 万个单元, 约 82 万个节点。拉格朗日单元与欧拉单元之间采用流固耦合方式相互作用。整个模型如图 1 所示, 图中欧拉域 2 包含了叶片转动区域内有可能发生鸟撞的空间, 由 8 个物理分开的独立空间构成, 每个空间包含了一对相邻叶片之间的区域; 欧拉域 1 则包含了叶片转动区域之外的空间及部分不发生鸟撞的转动区域。欧拉域 1 与欧拉域 2 之间通过哑元加以分隔。整个鸟撞模型可以通过图 2 的解析结构图得到进一步说明。单独的鸟撞部分(不包含机匣包容部分)的计算细节, 请参考本文之前的另一篇文献[8]。

鸟撞模型中的叶片几何尺寸为某真实叶片数据, 其叶片厚度分布如图 3 所示。叶片受离心载荷和气动载荷共同作用, 其中转速为 12000 r/min, 叶片气动压力分布如图 4 所示。

鸟撞计算模型中的空气采用理想气体模型模拟, 密度取为 1.29 kg/m³, 气体常数 R = 1.4J/(Mol · K)。鸟体采用线性流体模型, 密度取为 930 kg/m³, 体积模量取为 2 200 MPa。

叶片材料的静态应变强化效应采用双线性应

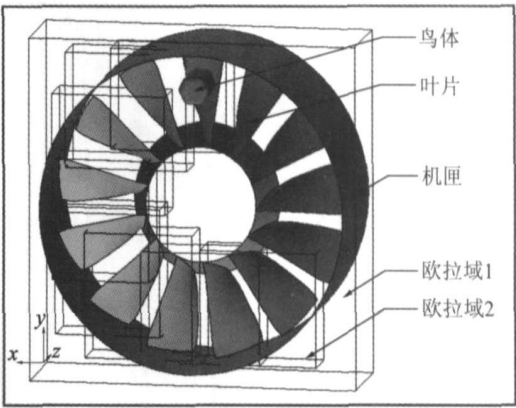


图 1 鸟撞有限元模型

Fig. 1 Finite element model of bird impact

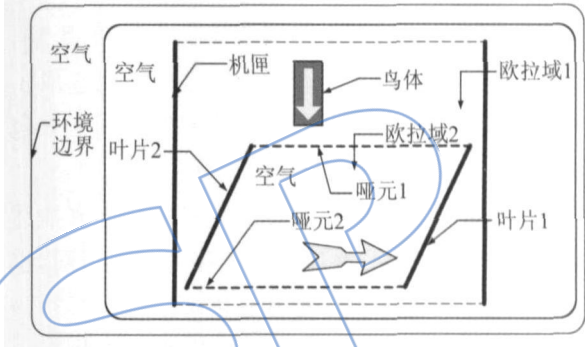


图 2 鸟撞有限元模型的解析结构

Fig. 2 Illumination of bird impact FEM model

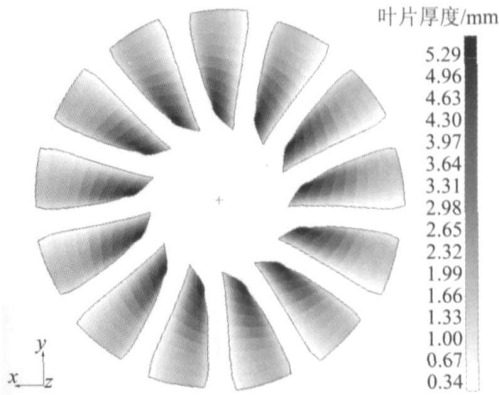


图 3 叶片的厚度分布

Fig. 3 Blade thickness distribution

力-应变模型进行模拟, 应力循环效应采用等向强化模型模拟, 动态应变率效应采用 Cowper-Symonds 模型模拟, 其硬化方程为

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_s} = 1 + \left(\frac{\dot{\epsilon}}{D} \right)^{1/P} \tag{1}$$

式中 σ_d 为动态应力, σ_s 为静态屈服强度, $\dot{\epsilon}$ 为应变率, D 和 P 为表征动态硬化的材料系数, 计算中取 $D = 100$, $P = 10$ 。另外取叶片静态屈服强度 $\sigma_s = 900 \text{ MPa}$, 塑性应变极限 $\epsilon_p = 0.025$, 密度 $\rho = 4440 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 112\,500 \text{ MPa}$, 泊松比

$\nu=0.34$, 静态硬化模量 $E_H=14\,286\text{ MPa}$.

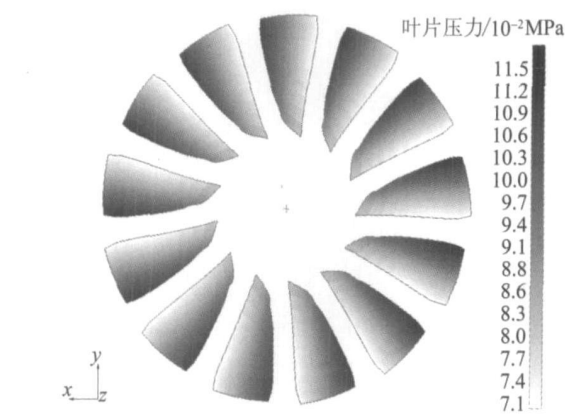


图 4 叶片的压力分布

Fig. 4 Pressure loading on the blades

为方便考察机匣包容性差别对结果的影响, 分别选取了不同材料及厚度的机匣, 特别选取了几组计算参数, 如表 1 所示. 其中机匣 1 用于非包容性计算, 机匣 2 用于包容性计算.

叶片和机匣均采用塑性应变极限准则来描述材料破坏的产生, 根据计算对象和需求的不同, 也可以采用应力描述等多种其它破坏准则.

空气初始状态设为静止; 叶片的初始状态为稳定旋转状态, 该状态由 MSC.NASTRAN 的预应力分析来提供. 鸟体初始速度取为 40 m/s , 用以模拟飞机在跑道起降过程中遭鸟撞的过程.

鸟撞及包容的瞬态过程采用 MSC. DYTRAN 进行计算.

表 1 机匣数据
Table 1 Properties for the Casing

	t/mm	σ_s/MPa	ε_p
机匣 1	1	600	0.001
机匣 2	4	900	0.050

表中 t 为厚度.

2 鸟撞引发整片叶片丢失的数值模拟

2.1 整片叶片丢失的数值模拟

当鸟体撞击叶片时, 巨大的冲击力会在叶片根部产生很大的弯矩, 容易引起整片叶片折断. 当叶根或榫头、榫槽应力水平较高或存在裂纹时, 这种情况更容易发生.

2.1.1 非包容性叶片丢失

采用包容性较差的机匣 1 模拟鸟撞引起整片叶片丢失及非包容的过程, 计算结果如图 5 所示. 整个过程可分为 4 个阶段: ①图 5 (a), 示出了叶片遭鸟撞后从根部断裂飞出, 进而撞击机匣, 并将机匣撞破; ②图 5 (b), 示出了叶片发生变形和旋转, 在惯性作用下, 在机匣内产生滑动; 开始时叶片移动方向几乎平行于机匣表面, 但随着滑

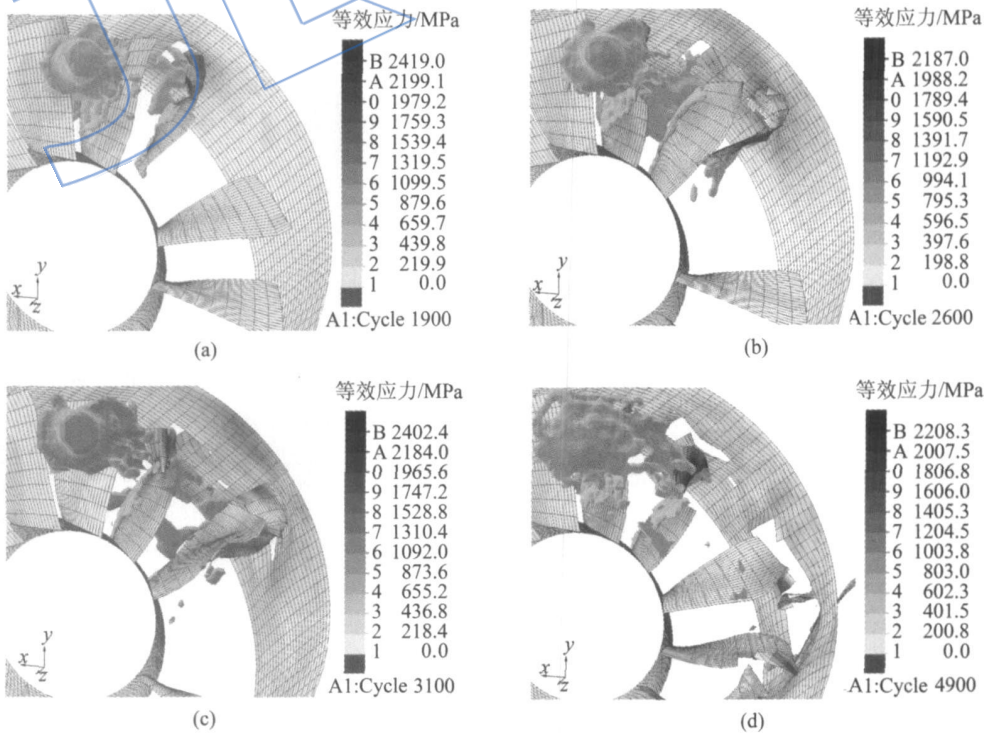


图 5 鸟撞引发非包容性的叶片丢失过程

Fig. 5 Blade loss caused by bird impact and unsuccessful casing containment

移的进行, 机匣法向方向与叶片速度方向的夹角逐渐减小, 叶片与机匣的作用力逐步增大, 并最终第二次划破机匣; ③图 5 (c), 示出了由于前面过程中能量耗损过多, 叶片凭剩余的动能难以对机匣产生更大的破坏, 正在此时, 断裂叶片(为方便说明, 以下简称为一号叶片)的紧邻叶片(以下简称为二号叶片)与一号叶片发生了碰撞, 并为之输入了新的动能; ④图 5 (d), 示出了获得新动能的一号叶片最终撞破机匣, 并从撕破的巨大裂口飞出。

单个旋转叶片的包容性试验结果^[6,9]表明, 叶片与包容环的碰撞将分为两次, 第一次是叶尖的撞击, 撞击范围小, 第二次是叶身的撞击, 撞击范围较大, 图 5 (a) 和(b)的结果与试验结果相一致; 而图 5 (c) 与(d)所描述的过程也与转子级的叶片包容性试验结果^[7]相符。

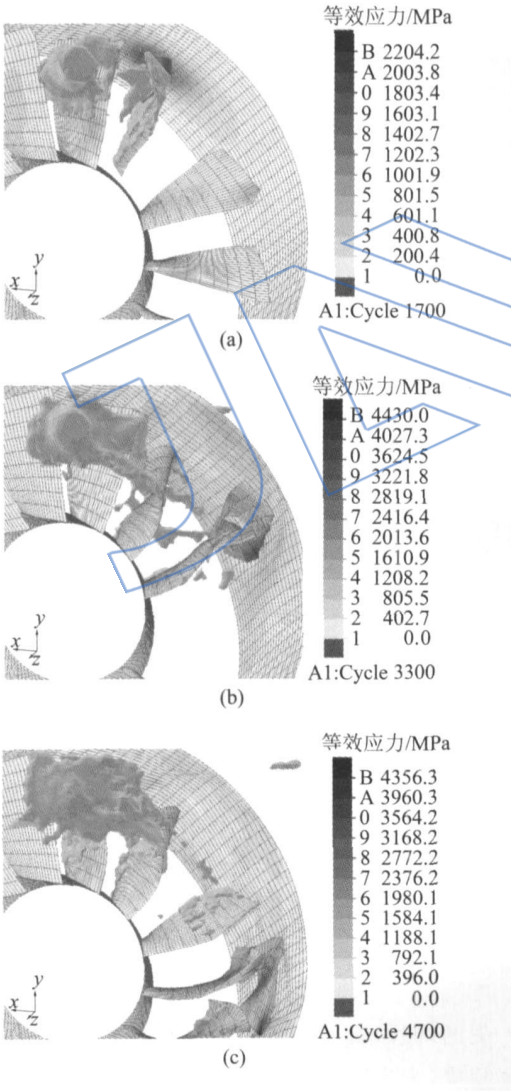


图 6 鸟撞引发包容性的叶片丢失过程

Fig.6 Blade loss caused by bird impact and successful casing containment

2.1.2 包容性的叶片丢失

当包容环的强度较好时(选用机匣 2), 飞出的叶片会被成功包容, 阻止叶片飞出机匣对外部结构造成破坏. 图 6 给出了鸟撞发动机转子级引起被撞叶片从根部断裂飞出后被机匣包容的过程。

2.2 整片叶片丢失及二次损伤数值模拟

在叶片丢失飞出的过程中, 由于转子转速较高, 叶片稠度大, 飞出的叶片容易与仍在旋转的其它叶片发生碰撞, 造成新叶片破坏和丢失, 进而引发新的包容问题, 这个过程可称为二次损伤. 随着转子的旋转, 这种损伤容易一片一片地传递并持续下去, 使得整圈叶片在极短的时间内全部遭到破坏。

2.2.1 非包容性的叶片丢失及二次损伤

图 7 给出了一号叶片与二号叶片相撞, 造成

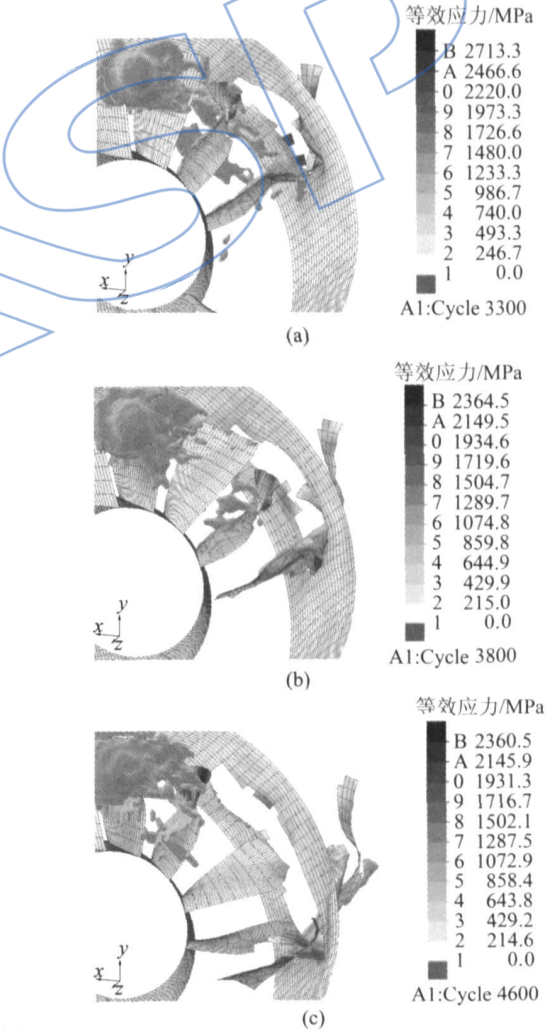


图 7 鸟撞引发的非包容性叶片丢失及二次损伤过程

Fig.7 Blade loss caused by bird impact, unsuccessful casing containment with secondary damage

二号叶片丢失和非包容的过程, 机匣因此遭到更严重的破坏.

2.2.2 包容性的叶片丢失及二次损伤

当机匣成功包容时, 整个机匣内会持续发生一场极其复杂的碰撞过程, 二次损伤的情况也会更为严重, 如图 8 所示.

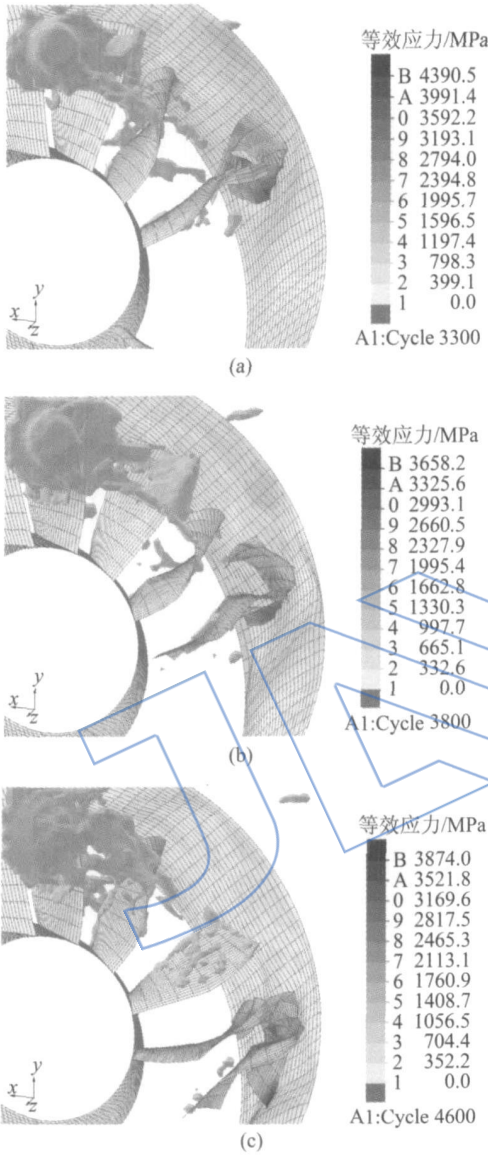


图 8 鸟撞引发的包容性叶片丢失及二次损伤过程
Fig. 8 Blade loss caused by bird impact, successful casing containment with secondary damage

3 鸟撞引起部分叶片丢失及包容的数值模拟

鸟撞叶片首先发生在叶片的前缘, 由于能量较大而且相对集中, 叶片前缘被撞局部容易发生破裂.

当鸟体撞击力度稍大时, 叶片被撞破的裂口

沿叶片弦向的深度较大. 由于转子处于高速旋转状态, 破裂的叶片受到离心力的撕扯作用迅速屈服和断裂, 裂口不断扩展并最终形成弦向(或类弦向)穿裂, 造成叶片的局部丢失, 如图 9 所示.

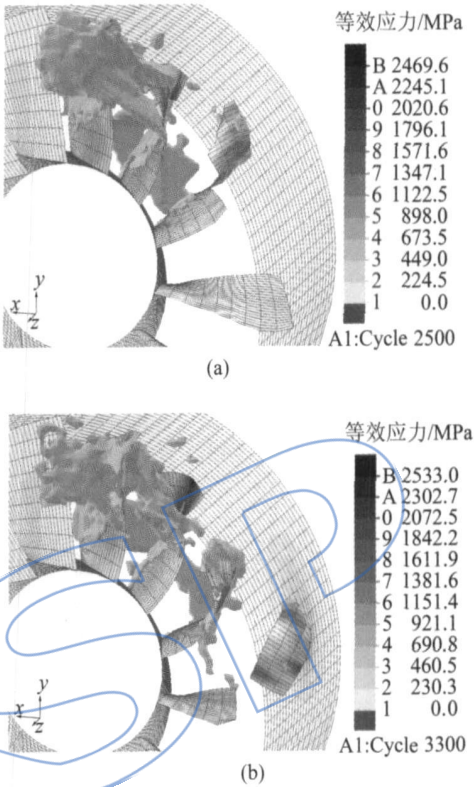


图 9 鸟撞引发的叶片局部丢失及包容

Fig. 9 Partial blade loss caused by bird impact and casing containment

当鸟体的撞击稍弱时, 如鸟体的相对速度较低、质量较小时, 撞破的叶片会产生较浅的弦向破裂, 然后在离心力作用下产生径向的撕裂, 如图 10 (a) 所示, 被撕裂的叶片部分沿叶片径向变形, 在变形量超过叶尖尖隙的范围后, 就会与机匣发生刮蹭. 另一方面, 机匣受叶片的撞击等作用, 也会产生一定的变形, 从而改变原有叶尖尖隙, 使得未发生鸟撞的正常叶片也可能与机匣发生刮蹭, 如图 10(b) 所示. 与猛烈的撞击相比, 这种刮蹭也具有一定的破坏性, 尤其是钛-钛材料的叶片和机匣产生的刮蹭, 将是非常危险的, 极易产生高温并燃烧起火, 造成难以估量的损失.

由于局部丢失的叶片质量低, 相对于整片丢失的叶片, 具有较低的动能; 而且在叶片撕裂的过程中, 也损耗了相当的动能, 所以这类叶片丢失对机匣的破坏能力相对较弱, 一般不会击穿机匣造成非包容, 出于同样的原因, 局部丢失的叶片造成的叶片二次损伤也不大.

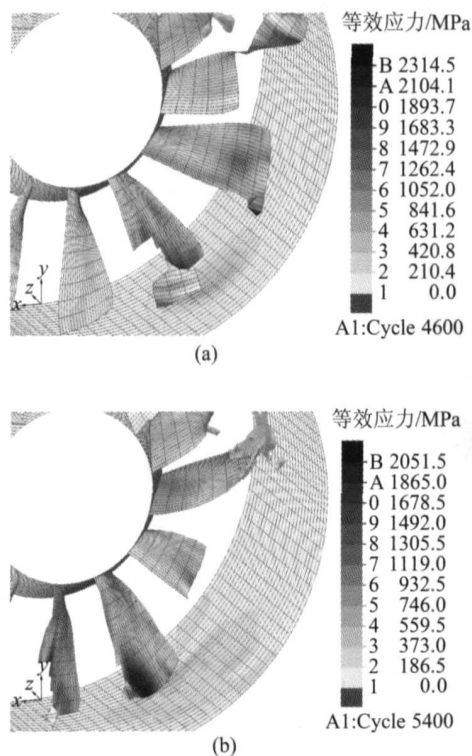


图 10 叶片与机匣的刮蹭

Fig. 10 Scratching of blade on the casing

4 结 论

经过上述分析,可以得到以下结论:

1) 鸟撞航空发动机转子级,将与转子中相邻的多片叶片发生碰撞,造成叶片破裂、丢失,进而产生机匣非包容。

2) 鸟撞引发的整片叶片丢失,由于叶片质量大、动能高,破坏性也大,这种破坏力不仅作用于机匣,造成机匣非包容;另一方面,还容易对其他叶片造成破坏,从而引发二次损伤;叶片间的碰撞会进一步增加丢失叶片的破坏力,使得凭单片叶片丢失难以击穿机匣也可能发生非包容。

3) 鸟撞引发的部分叶片丢失,通常具有叶片被撞裂及被离心力撕断的两个阶段,在此过程中,丢失叶片部分的动能耗损较大,同时本身质量也较低,因此破坏性偏低,一般不会对机匣及其余叶片构成大的威胁,但发生刮蹭机匣的概率较大。

4) 刚性较弱的机匣在发生包容过程中,往往容易变形,从而造成更多的叶片刮蹭问题。

5) 鸟体与叶片的高速撞击可以看成是一个流固耦合的过程,而此后叶片与机匣及其它叶片

的撞击,则是一个复杂的运动、变形、接触和材料失效过程。整个过程复杂多变。充分利用资源,发展数值技术、开展数值模拟,可以极大地节约试验及研制成本和缩短周期。

参考文献:

- [1] 张志林,姚卫星. 飞机风挡鸟撞响应分析方法研究[J]. 航空学报, 2004, 25(6): 577-580.
ZHANG Zhilin, YAO Weixing. Research on dynamic analysis of bird impact on aircraft windshield[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 25(6): 577-580. (in Chinese)
- [2] 武存浩,杨嘉陵,臧曙光,等. 鸟撞高速摄影试验与过程研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2001, 27(3): 332-335.
WU Cunhao, YANG Jialing, ZANG Shuguang, et al. Study of bird impact loading model[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001, 27(3): 332-335. (in Chinese)
- [3] 刘大响,陈光. 航空发动机——飞机的心脏[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003: 159-160.
- [4] Horsley J. The Rolls Royce way of validating fan integrity[R]. AIAA-93-2602, 1993.
- [5] Carney K, Pereira M, Devilock D, et al. Jet engine fan blade containment using two alternate geometries[C]//4th European LS-DYNA Users Conference. Ulm, Germany: [s. n.], 2003.
- [6] 吴荣仁. 汽轮机、航空发动机断裂叶片撞击机壳的模拟试验研究[J]. 动力工程, 2000, 20(4): 775-777.
WU Rongren. The simulant test research of broken vanes striking the enclosure for turbines and aeroengines[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2000, 20(4): 775-777. (in Chinese)
- [7] 范志强,高德平,覃志贤,等. 航空发动机真实机匣的包容性试验[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 18-22.
FAN Zhiqiang, GAO Deping, QIN Zhixian, et al. Experimental study of real casing containment[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 18-22. (in Chinese)
- [8] 蒋向华,王延荣. 采用流固耦合方法的整级叶片鸟撞击数值模拟[J]. 航空动力学报, 2008, 23(2): 299-304.
JIANG Xianghua, WANG Yanrong. Numerical simulation of bird impact on bladed rotor stage by fluid-solid coupling method[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(2): 299-304. (in Chinese)
- [9] 于亚彬,陈伟. 模型机匣/叶片的包容性数值分析[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 429-433.
YU Yabin, CHEN Wei. Numerical analysis of the modeled blade/casing containment[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 429-433. (in Chinese)