

航空发动机涡轮机匣轮盘包容性研究

唐 金¹, 唐 广¹, 宣海军², 江有为²

(1. 中国航空工业集团公司 中国航空动力机械研究所

航空发动机振动技术航空科技重点实验室, 湖南 株洲 412002;

2. 浙江大学 化工机械研究所 高速旋转机械实验室, 杭州 310027)

摘 要: 为研究某航空发动机辅助动力装置涡轮盘在预定转速范围内破裂后涡轮机匣的包容能力, 在高速旋转试验器上进行了涡轮机匣的包容性试验. 试验采用轮盘周向 3 个对称位置预制裂纹的方式, 使轮盘在预定转速范围内破裂成均匀 3 块, 得到了轮盘碎块撞击涡轮机匣的高速摄影照片. 试验结果表明轮盘碎块击穿机匣撞击包容环, 包容环发生大塑性变形, 包住轮盘碎块. 采用 LS-DYNA 软件对涡轮机匣包容性进行数值仿真, 仿真结果与试验结果吻合良好, 研究结果对航空发动机轮盘包容性设计有一定的参考价值.

关 键 词: 航空发动机; 轮盘碎块; 涡轮机匣; 包容性试验; 叶片; 包容性

中图分类号: V231.91

文献标志码: A

Investigation on disk containment of aero-engine turbine casing

TANG Jin¹, TANG Guang¹, XUAN Hai-jun², JIANG You-wei²

(1. Aviation Key Laboratory of Aero-engine Vibration Technology,

China Aviation Powerplant Research Institute,

Aviation Industry Corporation of China, Zhuzhou Hunan 412002, China;

2. High-Speed Rotating Machinery Laboratory, Institute of Chemical Machinery,

Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: To investigate an aero-engine auxiliary power unit turbine disk burst at the predict speed impact on the turbine casing containment, the casing containment test was conducted on a high speed spin tester. The prefabricating cracks were cut at three positions separated on the disk circumferential to make the disk burst at the predicted speed, the impacting process was recorded on the film by a hi-speed camera. The test results show that, the casing was penetrated and the disk fragments were successfully contained within the containment ring and sever plastic deformation was found in the containment ring. The numerical simulations were carried out using LS-DYNA to study the turbine casing containment, the simulation results show a good agreement with the test results. The results can be used as a reference for the engine disk containment design.

Key words: aero-engine; disk fragment; turbine casing; containment test; blade; containment

在航空发动机非包容失效中, 最早引起注意的是轮盘失效而引起的非包容事故, 由于转子质量、动能大, 一旦发生失效, 会造成严重后果. De-

lucia 等统计了 1971 年至 1988 年美国民用航空发生的转子故障^[1-5], 统计结论表明: 转子故障主要发生在飞机起飞和爬升阶段, 80% 左右叶片碎

收稿日期: 2014-09-02

基金项目: 双合金盘综合验证考核(JPPT-F2008-25-2)

作者简介: 唐金(1986—), 男, 湖南株洲人, 工程师, 硕士, 主要从事航空发动机强度、寿命研究.

片被包容,100%轮盘碎片未包容.最早展开对轮盘碎片包容性研究的是 NASA, Manganò 等开展了地坑式轮盘超转试验器进行机匣包容性试验方法研究^[6];麻省理工大学的 Mccallum 通过地坑式包容性试验与有限元计算分析 4130 钢制轮盘破裂为均匀 3 块的情形^[7];除试验和理论分析方法外,数值仿真方法也被用于轮盘碎片包容性研究中, Stamper 等采用 ANSYS-LS-DYNA 软件对轮盘破裂后撞击包容结构进行了计算^[8].国内在航空发动机机匣包容性研究近几年刚刚起步^[9],宣海军等^[10]、范志强等^[11-12]进行了叶片断裂机匣包容性研究,轮盘碎块包容性试验方面的研究非常有限,浙江大学的李娟娟、宣海军等进行了模拟等厚轮盘破裂成均匀 3 块撞击圆环的包容性试验,并基于 LS-DYNA 对轮盘包容性机理进行了研究^[13-15],刘璐璐、宣海军等对某涡轮冷却器压气机轮盘进行了包容性试验^[16],由于真实航空发动机轮盘结构复杂,试验成本高等原因,国内目前在发动机真实轮盘破裂机匣包容方面的试验资料还很少.

某型航空发动机辅助动力装置为确保飞行安全,要求涡轮机匣能够包容轮盘在不低于工作温度及单点失效可能引起的最高转速下破裂后的碎片.为此,本文在高速旋转试验台上进行了该型辅助动力装置涡轮盘破裂涡轮机匣的包容性试验,试验件包含一级涡轮转子、涡轮机匣,一级涡轮转

子由一级涡轮盘和 32 个涡轮工作叶片组合而成,叶片用锁片锁紧,叶片采用榫头结构与轮盘连接;涡轮机匣由外环、箍圈、导向器机匣、包容环等组成.为使轮盘以最大平动动能形式失效,试验采用对涡轮盘周向均布预制 3 条等长裂纹的方式,使轮盘在预定转速下破裂成均匀 3 块.基于 LS-DYNA 软件对试验过程进行数值仿真,结果表明数值仿真与试验结果吻合良好,计算结果较为真实地反映了试验过程.本文进行的涡轮盘包容性试验,对该型发动机的飞行安全提供了有效的试验依据,同时对该型发动机涡轮机匣的包容性设计具有一定的参考价值.

1 试验

1.1 试验设备

包容性试验在浙江大学化工机械研究所的高速旋转试验器上进行,试验台采用 45 kW 直流电动机驱动,最高转速可达到 60 000 r/min,试验过程中使用高速摄像系统,试验前在导向器机匣内壁粘贴触发线圈,用于高速摄像触发.涡轮转子通过柔性轴与试验器驱动部分相连,涡轮机匣通过转接段与试验器仓盖相连,试验件连接及试验装置示意图见图 1.

1.2 试验结果及分析

试验前,在涡轮盘周向预制 3 条裂纹,示意图

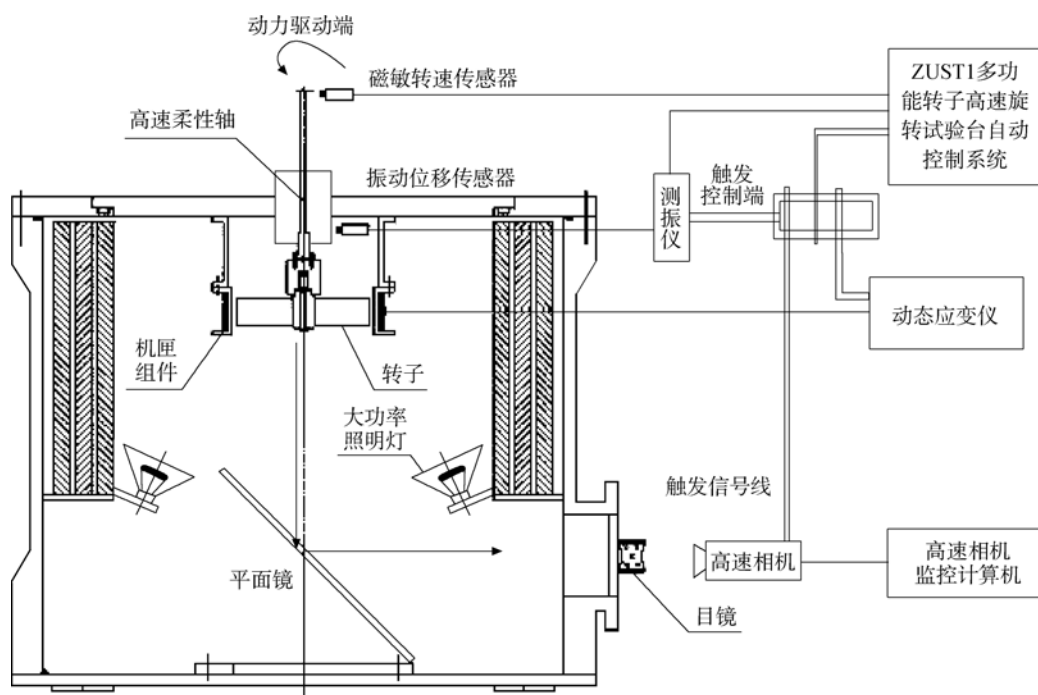


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Sketch of the test device

见图2,其中 $R_1=1\text{mm}$, $L=26\text{mm}$. 若涡轮转子未在预定转速范围内破裂,则延长裂纹长度(图中 L)继续试验. 最后当预制裂纹长度为 $L=28.5\text{mm}$ 时,涡轮转子在 $52\,461\text{r/min}$ 时破裂成3块. 轮盘破裂后碎块穿透导向器机匣并撞击在包容环上. 图3为轮盘破裂后照片,图4为试验后涡轮机

匣照片,图5为试验后包容环照片,高速摄影照片见图6.

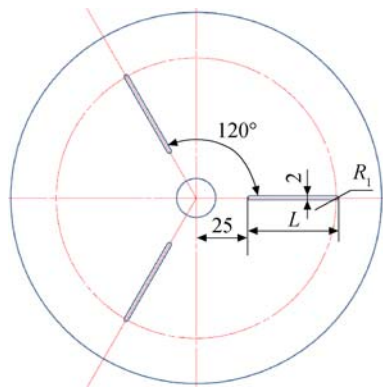


图2 预置裂纹示意图(单位:mm)

Fig. 2 Sketch of prefabricated cracks (unit:mm)



图3 试验后的涡轮盘照片

Fig. 3 Disk after test



图4 试验后涡轮机匣照片

Fig. 4 Turbine casing after test



图5 试验后的包容环照片

Fig. 5 Containment ring after test

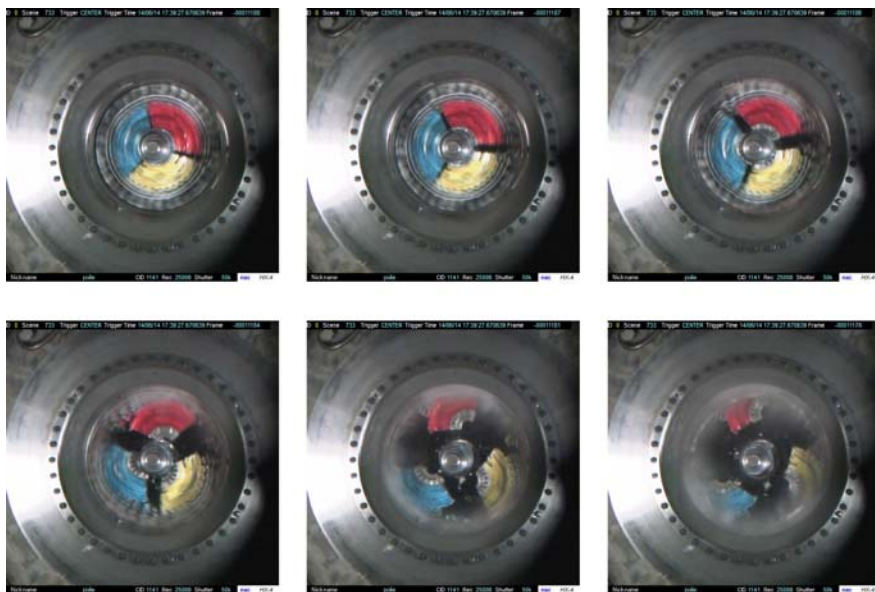


图6 轮盘破裂撞击机匣高速摄影照片

Fig. 6 Photo of disk burst impact casing

由图6可知,碎块1和2碎块中间的预制裂纹最先扩展并穿透整个轮盘,接着另外两条裂纹穿透整个轮盘,轮盘破裂成3块,从高速摄像图片可看出碎块2最先撞击涡轮机匣,紧接着碎块1、碎块3几乎同时撞击涡轮机匣,碎块击穿导向器机匣后撞击到包容环,此时撞击能量最大,碎块将包容环撞击成近似三角形(见图5),包容环产生巨大变形,并与机匣连接段断开,此时碎块大部分能量已被吸收,碎块在包容环内壁上继续刮擦包容环,(图5中A部位给出了一块碎块撞击后刮擦痕迹)碎块能量进一步减小,最后落在试验仓内。

由试验结果可以分析:涡轮盘从3条预制裂纹处破裂成3块,破裂的轮盘碎块穿透外环、箍圈及导向器机匣,失效模式为剪切,轮盘碎块撞击包容环,包容环发生大塑性变形,轮盘碎块被包容环包住。

2 数值仿真

2.1 轮盘破裂转速计算

机匣包容碎块的能力主要反映在破坏时的变形能,这种变形能的大小可以通过机匣的包容系数来衡量。机匣的包容能力按下式计算

$$C_a = b \times h^2 \times \sigma_b \times \delta \quad (1)$$

式中 C_a 为机匣包容系数; b 为碎块长度; h 为机匣

平均厚度; σ_b 为材料工作温度下的强度极限; δ 为材料工作温度下的延伸率。

可见,在机匣厚度已经确定的情况下,机匣的包容能力与材料的延伸率及强度极限成正比。对于多层机匣,包容能力可视为各部分机匣包容能力的和,简化为

$$C'_a = b \times \sum h^2 \times \sigma_b \times \delta \quad (2)$$

表1给出了导向器机匣及包容环的厚度、材料及工作温度。

表1 机匣材料及工作温度

Table 1 Material and temperature of casing

名称	厚度/mm	材料	工作温度/K
导向器机匣	1.8	K4169	590
包容环	16	GH625	590

根据表1可查航空材料手册得到机匣各部件材料在不同温度下的材料性能数据,通过线性插值拟合可得到机匣各部件在工作温度下的材料性能数据 σ_b, δ , 根据式(1)可计算得出工作状态和试验状态导向器机匣和包容环的包容系数,根据式(2)即可计算得到工作状态和试验状态下机匣的总包容系数。表2给出了两种状态下机匣包容系数的计算结果。

表2 机匣包容系数计算结果

Table 2 Results of casing containment coefficient

状态	名称	温度/K	σ_b /MPa	δ /%	C_a	C'_a
工作状态	导向器机匣	590	913.2	17.6	521 <i>b</i>	125313 <i>b</i>
	包容环	590	706.6	70.3	124792 <i>b</i>	
试验状态	导向器机匣	293	1100	16	570 <i>b</i>	125754 <i>b</i>
	包容环	293	906	55	125184 <i>b</i>	

机匣材料在室温包容能力提高。提高的比值为

$$C_a(\text{试验状态})/C_a(\text{工作状态}) = 1.003523$$

由于试验设备只能在室温下进行包容性试验,因此本文通过提高轮盘转速(增加碎块动能),补偿在室温试验时机匣包容能力的提高。因此涡轮盘的破裂转速为 $N = \sqrt{1.003523} \times N_{\max}$ 。(注: $N_{\max}$ 为该辅助动力装置轮盘失效可能达到的最高转速)最终计算得轮盘破裂转速为 52310 r/min。

2.2 机匣包容性计算

采用 LS-DYNA 对一级涡轮转子包容性试验

进行数值仿真,引入 Johnson-Cook 本构方程^[17],该方程能较好地模拟材料的硬化、应变率和温度软化效应。其本构方程为

$$\sigma_e = [A + B(\epsilon_e^p)^n][1 + C \ln \dot{\epsilon}^*][1 - T^{*m}] \quad (3)$$

式中 σ_e 为流动应力; ϵ_e^p 为等效塑性应变; $\dot{\epsilon}^*$ 为等效应变率; T^{*m} 为无量纲温度; A, B, C, n, m 为材料常数。对本构方程中的各参数进行敏感性分析,并结合航空材料手册中材料参数,最终应变率参数 C 取 0.02,应变强化指数 n 取 0.6,温度软化参数 m 取 1.0。材料失效采用基于连续损伤力学的

Johnson-Cook 累积损伤准则^[18], 定义损伤参数 D 为

$$D = \int (1/\epsilon_f) d\epsilon_p^p \quad (4)$$

式中, 破坏应变定义为

$$\epsilon_f = (D_1 + D_2 e^{D_3 \sigma^*})(1 + D_4 \ln \dot{\epsilon}^*)(1 + D_5 T^*) \quad (5)$$

式中 $\sigma^* = p/\sigma_{\text{eff}} = -R_\sigma$, p 为静水压力, σ_{eff} 为 Von-Mises 等效应力, R_σ 为应力三轴度, $D_1, \dots, D_5$ 是通过材料性能试验测得的参数. 初始时 $D=0$, 当 $D=1$ 时材料失效.

图 7 给出了涡轮盘与导向器机匣、包容环等包容系统的撞击过程. 由图可知, 在预定转速破裂后, 涡轮盘破裂成 3 块, 轮盘叶片首先撞击最内层的外环与箍圈, 在撞击发生的 0.1 ms 时, 外环在叶片的撞击下, 产生凹陷变形, 随后开始发生单元失效, 外环、箍圈被轮盘击穿, 在涡轮盘碎块撞击外环时, 作用力传递到导向器机匣, 导向器机匣上产生较大膨胀变形, 随着外环、箍圈被击穿, 此时导向器机匣也出现裂口, 裂口随着轮盘穿透导向器机匣逐渐变大, 在 0.3 ms 时, 涡轮碎块完全穿透导向器机匣, 随后高能的涡轮盘碎块穿透机匣, 撞击最外层的包容环, 包容环此时产生较大变形 (图 7(c)), 随着撞击的继续, 包容环出现大应力区和塑性变形, 包容环内壁单元在碎块刮擦作用下被删除, 同时两级包容环中间较薄弱过渡区域

沿周向发生撕裂 (图 7(d)), 涡轮碎块继续刮擦包容环, 包容环塑性变形更加严重, (图 7(e)), 最终此级包容环在碎块的拉伸下几乎变成三角形, 涡轮碎块与叶片包容在包容环内, 次级包容环保持原状 (图 7(f)).

对比分析数值仿真结果与试验结果可以发现数值仿真的轮盘破裂模式、包容环包容模式与试验结果是一致的; 对比数值仿真与高速摄影拍摄的涡轮碎块撞击过程, 可以发现撞击过程一致, 数值仿真结果与试验结果吻合, 数值仿真结果能准确的反映整个撞击过程涡轮碎块运动轨迹及机匣、包容环的应力、应变变化.

2.3 撞击能量分析

图 8 为涡轮机匣各部件的内能在撞击过程中的时间历程, 可以看到整个撞击过程包容环承担了涡轮碎块绝大部分能量的吸收, 约占机匣系统内能的 81.7%, 远高于其他部件, 导向器机匣和外环次之, 内能吸收分别为 8.6% 和 5.8%. 其余部件如箍圈, 外环固定环和挡圈吸收内能很小, 总计约 3.9%. 在整个撞击过程中, 初始时刻, 最内层的外环内能急剧增加, 然后是导向器机匣部件, 在被轮盘与叶片击穿后, 内能较为平稳, 没有显著增加. 包容环部件内能约从 0.2 ms 时开始增加, 此时包容环在局部发生较大的塑性变形, 直至约 1.0 ms 时, 包容环内能保持稳定.

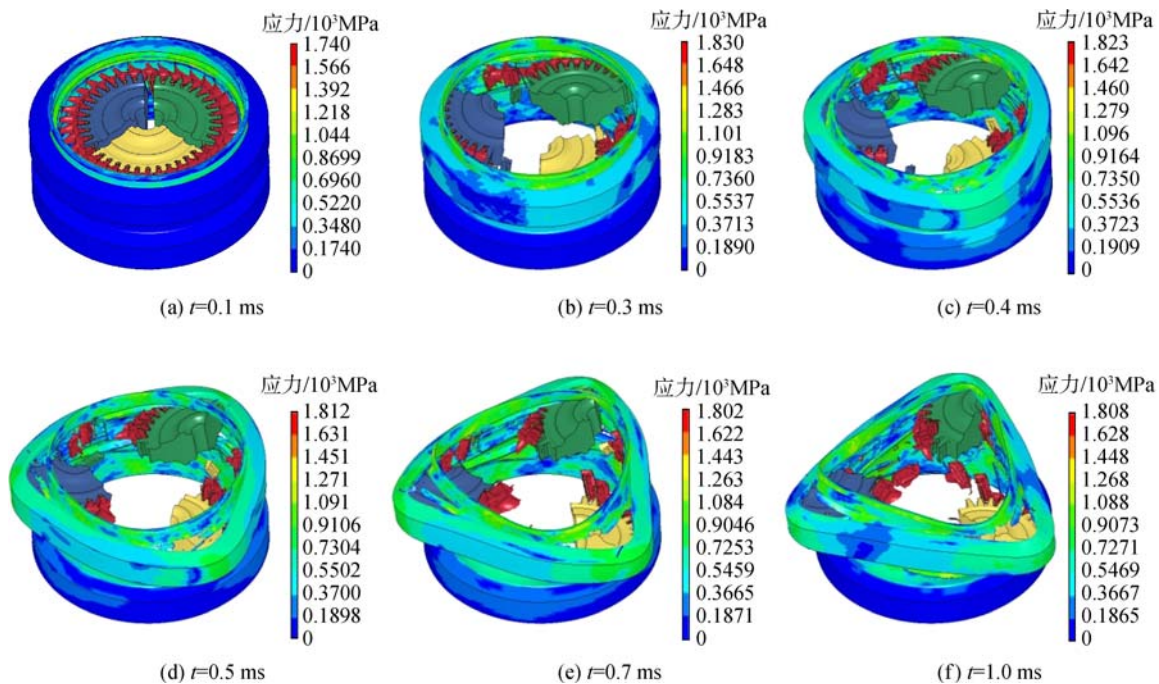


图 7 数值仿真模拟撞击过程

Fig. 7 Process of impacting by simulation

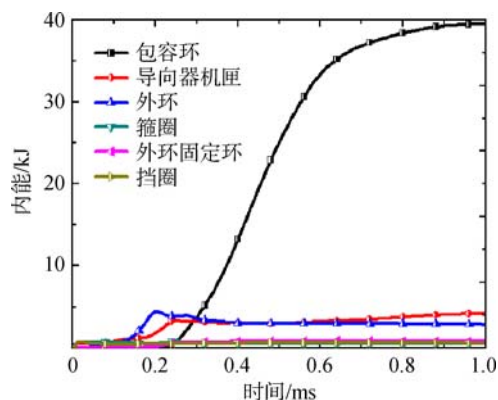


图8 机匣系统撞击过程能量变化

Fig. 8 Casing system energy variation during impacting

2.4 撞击力分析

图9为撞击过程中轮盘、叶片与机匣系统相互作用力的时间历程,可以看到,0~0.2 ms内,有3次明显的撞击,持续时间较短,撞击力较小,主要为轮盘与外环、箍圈和机匣的撞击,随后0.2~1.2 ms时,有一次主要撞击,为轮盘与包容环的撞击,此次撞击持续时间较长,且撞击力较大,最大值为559.5 kN,至1.2 ms以后,撞击过程基本结束.叶片的撞击力较小,最大值为91.1 kN,且持续时间较短,主要是由于叶片在撞击中很快被磨损,主要是轮盘与包容环的撞击.

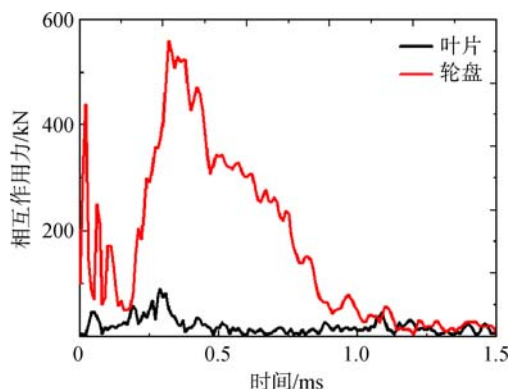


图9 撞击过程轮盘、叶片与机匣相互作用力

Fig. 9 Impacting force between the disk, blade and casing

3 结论

通过涡轮转子破裂撞击涡轮机匣的包容性试验,获得该涡轮机匣的包容能力,为该型发动机涡轮机匣的设计、发动机飞行的安全性提供有效试验依据.主要结论如下:

1) 轮盘在预定转速以1/3方式破裂,碎块击

穿外环、箍圈与导向器机匣,最终被包容环包住,包容环局部变形严重,在3块涡轮盘碎块撞击下呈三角形;

2) 采用数值仿真分析涡轮机匣的包容性,引入Johnson-Cook本构方程较好地模拟了试验过程;

3) 包容环对轮盘动能的吸收最大;导向器机匣和外环的能量吸收次之;其他部件如外环固定环等能量吸收最少;

4) 轮盘碎块与涡轮机匣有4次撞击过程,前3次撞击发生0~0.2 ms,主要为轮盘与外环、箍圈和导向器机匣的撞击;第4次撞击为轮盘与包容环的撞击,持续时间较长(0.2~1.2 ms),撞击力最大.

参考文献:

- [1] Delucia R A, Mangano G J. Rotor buster protection program: statistics on aircraft gas turbine engine failures that occurred in U. S. commercial aviation during 1971 [R]. NASA-CA-131525, 1973.
- [2] Mangano G J, Delucia R A. Rotor buster protection program: statistics on aircraft gas turbine engine failures that occurred in U. S. commercial aviation during 1972 [R]. NASA-CA-136900, 1974.
- [3] Delucia R A, Mangano G J. Rotor buster protection program: statistics on aircraft gas turbine engine failures that occurred in U. S. commercial aviation during 1975 [R]. NASA-CA-135304, 1977.
- [4] Delucia R A, Salvino J T. Rotor buster protection program: statistics on aircraft gas turbine engine failures that occurred in U. S. commercial aviation during 1978 [R]. NASA-CA-136900, 1981.
- [5] Delucia R A, Fenton B C, Chapdelaine E R. Statistics on aircraft gas turbine engine rotor failures that occurred in U. S. commercial aviation during 1988 [R]. Trenton, New Jersey: Naval Air Propulsion Test Center, ADA255741, 1992.
- [6] Mangano G J, Martino A A. Rotor burst protection program initial test: Phase IV final report [R]. NASA CR-95967, 1968.
- [7] McCallum R B. Simplified analysis of a tri-fragment rotor disk interaction with a containment ring [J]. Journal of Aircraft, 1970, 7(3): 283-285.
- [8] Stamper E, Hals S. The use of LS-DYNA model to predict containment of disk burst fragments [R]. Dearborn, Michigan, USA: Proceedings of 10th International LS-DYNA Users Conference, 2008.
- [9] 宣海军, 陆晓, 洪伟荣, 等. 航空发动机机匣包容性研究综述 [J]. 航空动力学报, 2005, 25(8): 1860-1870.

XUAN Haijun, LU Xiao, HONG Weirong, et al. Review of

- aero-engine case containment research[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 25(8): 1860-1870. (in Chinese)
- [10] 宣海军, 洪伟荣, 吴荣仁. 航空发动机涡轮叶片包容试验及数值模拟[J]. 航空动力学报, 2005, 20(5): 762-767.
XUAN Haijun, HONG Weirong, WU Rongren. Aero-engine turbine blade containment tests and numerical simulation[J]. Journal of Aerospace Power, 2010, 20(5): 762-767. (in Chinese)
- [11] 范志强, 高德平, 姜涛, 等. 模型机匣的包容性试验和数值模拟[J]. 南京航空航天大学学报, 2006, 38(5): 551-556.
FAN Zhiqiang, GAO Deping, JIANG Tao, et al. Experiment study and numerical simulation of model casing containment[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 38(5): 551-556. (in Chinese)
- [12] 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. Experiment study of real casing containment[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 18-22. (in Chinese)
- [13] 李娟娟, 宣海军, 廖连芳. 轮盘碎片撞击圆筒体的试验研究[J]. 兵工学报, 2009, 30(增刊2): 218-222.
LI Juanjuan, XUAN Haijun, LIAO Lianfang. Experiment study of cylindrical case impact by disk fragments[J]. Acta Armamentarii, 2009, 30(Suppl. 2): 218-222. (in Chinese)
- [14] LI Juanjuan, XUAN Haijun, LIAO Lianfang, et al. Penetration of disk fragments following impact on thin plate[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2009, 10(5): 677-684.
- [15] XUAN Haijun, LI Julu, FENG Yiming, et al. Containment of high-speed rotating disk fragments[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2012, 13(9): 665-673.
- [16] 刘璐璐, 宣海军, 张娜, 等. 某涡轮冷却器压气机轮盘包容性研究[C]//第22届全国结构工程学术会议论文集. 乌鲁木齐: 工程力学杂志出版社, 2013: 190-195.
- [17] Johnson G R, Cook W H. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[C]//Proceedings of the Seventh International Symposium on Ballistics. Hague, Netherlands: [s. n.], 1983: 541-547.
- [18] Johnson G R, Cook W H. Fracture characteristics of three metals subjects to various strains, strain rates, temperatures and pressures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1985, 21(1): 31-48.

(编辑: 秦理曼)