

# 外物撞击航空发动机转子叶片速度估算

杨百愚<sup>1</sup>, 柴桥<sup>1</sup>, 李春旺<sup>1</sup>, 李静<sup>1</sup>, 武晓亮<sup>1</sup>, 朱志雪<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学理学院, 西安 710051;

2. 中国人民解放军 93175 部队, 长春 130051)

**摘 要:** 以飞机进气道为参照系, 利用动量定理推导了外物在飞机进气道内运动的速度方程; 以叶片为参照系, 建立了外物撞击速度及撞击角度的表达式。为直观显示不同因素对速度变化的影响, 以某型飞机及其发动机为例, 研究了飞机离地时, 发动机 100% 设计转速下, 外物在飞机进气道内运动速度的变化规律。结果表明: 影响运动速度的因素不仅包括外物的材质、形状、大小及姿态, 而且涉及飞机进气道长度、发动机工作状态等; 外物撞击方向与叶片表面不垂直。

**关键词:** 航空发动机; 转子叶片; 参照系; 撞击速度; 外物损伤

中图分类号: V232.4

文献标志码: A

## Estimation of velocity for foreign object that impacting rotor blade of aero-engine

YANG Baiyu<sup>1</sup>, CHAI Qiao<sup>1</sup>, LI Chunwang<sup>1</sup>,

LI Jing<sup>1</sup>, WU Xiaoliang<sup>1</sup>, ZHU Zhixue<sup>2</sup>

(1. Science College,

Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China;

2. Unit 93175, the Chinese People's Liberation Army, Changchun 130051, China)

**Abstract:** Taking the inlet port for a reference system, the velocity equation was developed using the momentum theorem to describe the motion of the foreign object from the inlet port to the rotor blade of aero-engine. Correlations between impacting velocity and impacting direction were founded by taking the rotor blade as a reference system. A kind of airplane and its aero-engine were taken as example, the change rule of the motion velocity in inlet channel was studied at aero-engine 100% design speed when airplane took off the ground. It was found that the foreign object motion velocity related not only with the foreign object shape, dimension, location and material, but also with the aero-engine working state and the length of the inlet port. The impacting direction was non-vertical to the blade surface.

**Key words:** aero-engine; rotor blade; reference system; impact velocity; foreign object damage

收稿日期: 2016-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(51575524); 陕西省自然科学基金(2015JM5240)

作者简介: 杨百愚(1973—), 男, 副教授, 硕士, 主要从事航空金属材料及其结构的振动、强度与寿命预测研究。

通讯作者: 李春旺(1977—), 男, 副教授, 博士, 主要从事航空金属材料及其结构的振动、强度与疲劳寿命研究。

E-mail: Li\_chw@163.com

引用格式: 杨百愚, 柴桥, 李春旺, 等. 外物撞击航空发动机转子叶片速度估算[J]. 航空动力学报, 2017, 32(12): 2842-2847. YANG Baiyu, CHAI Qiao, LI Chunwang, et al. Estimation of velocity for foreign object that impacting rotor blade of aero-engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(12): 2842-2847.

在飞机起飞滑跑和降落过程中,外物损伤航空发动机叶片事件时有发生,损伤事件不但使叶片表面形成应力集中,而且可能导致发动机转子失去平衡,影响发动机性能甚至危及飞行安全。

目前,研究外物撞击叶片的文献很多,Hamrich 等<sup>[1]</sup>从试验与数值模拟两方面研究了钢珠及玻璃珠对平板叶片的撞击损伤;尹冬梅等<sup>[2]</sup>数值模拟了砂石对平板叶片的撞击损伤;Nowell 等<sup>[3]</sup>研究了立方钢块冲击模拟叶片后其疲劳性能的变化;Chen 等<sup>[4]</sup>采用理论分析和数值模拟相结合的方法,研究了外物损伤引起的残余应力、应力集中,并指出了可能发生疲劳裂纹的区域;Duó 等<sup>[5]</sup>采用立方钢块撞击模拟叶片,并用 LS-DYNA 软件模拟了试验过程,分析了数值模拟和试验结果之间存在差异的原因;Marandi 等<sup>[6]</sup>研究了不同直径的钢珠以不同速度冲击涡轮叶片的结构损伤特征,建立了损伤缺口的应力集中系数计算公式;刘超等<sup>[7]</sup>利用钢珠冲击模拟叶片,研究了典型外物损伤对模拟叶片疲劳强度的影响;Christine 等<sup>[8]</sup>研究了玻璃珠撞击不同厚度叶片后其疲劳强度的变化;Oakley 等<sup>[9]</sup>利用立方钢块斜撞钛合金模拟叶片,研究了复合加载下损伤叶片的剩余疲劳寿命;包珍强等<sup>[10]</sup>利用钢珠冲击平板试件,研究了损伤缺口对 TC4 钛合金高周疲劳强度的影响;李均盛,柴桥等<sup>[11-12]</sup>研究了钢珠及不同形状的外物对实际叶片的撞击损伤。在所有这些研究中,文献[1-10]的研究对象是模拟静止叶片,文献[11-12]的研究对象是实际叶片,但它们的研究状态都是外物以确定速度、确定方向撞击叶片表面。仅见文献[13-14]研究了撞击速度的来源及撞击速度的大小,考虑了影响撞击速度的因素,给出了撞击速度的表达式,其中,文献[13]建立了撞击速度与外物直径、气流速度及飞机进气道长度的关系,但漏掉了外物质量密度的影响,也没有考虑叶片随飞机的平动。文献[14]建立了撞击速度与外物大小、形状、质量及飞机进气道长度、发动机工作状态的关系,但不恰当地选取了地面为参照系,同时不恰当地假设了外物进入进气道的初速度。

本文为弥补文献[14]的不足,先后以飞机进气道及叶片为参照系,推导外物在飞机进气道内运动的速度方程,建立撞击速度的表达式,目的在于尽可能准确估算外物的撞击速度,并利用该撞击速度进一步研究叶片的外物撞击损伤规律,为外场叶片事故或事故症候的判断、为叶片的抗外物损伤疲劳设计提供依据。

## 1 外物运动速度

以飞机进气道为参照系,图 1 显示了气体绕过外物的流动,图 2 显示了气流与外物的相互作用过程,假设外物的特征迎风面积是  $S$ ,在进气道内任意位置取一密度是  $\rho$ 、质量为  $dm$ 、横截面积为  $S$  的气流微元,如果该气流微元刚接触到外物时的速度为  $V$ ,绕过外物的瞬间,其速度等于外物运动速度  $v$ ,绕流过程的持续时间是  $\Delta t$ ,气流微元受力为  $F$ ,则由动量定理可得

$$F\Delta t = (v - V)dm = \rho SV\Delta t(v - V) \quad (1)$$

根据牛顿第三定律,气流受力  $F$  等于气流对外物的作用力,只是方向相反。如果假设外物质量是  $m$ ,同时,考虑到牛顿第二定律,则外物运动的加速度  $a$  是

$$a = \frac{\rho SV}{m}(V - v) \quad (2)$$

对式(2)变形可得

$$a = \frac{\rho SV}{m}(V - v) = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dl} \cdot \frac{dl}{dt} = v \frac{dv}{dl}$$

或者写成

$$dl = \frac{m}{\rho SV} \cdot \frac{v}{V - v} dv \quad (3)$$

式(3)反映了外物速度增量  $dv$  与运动距离增量  $dl$  的关系。由于式(3)中的气流速度  $V$  随着飞

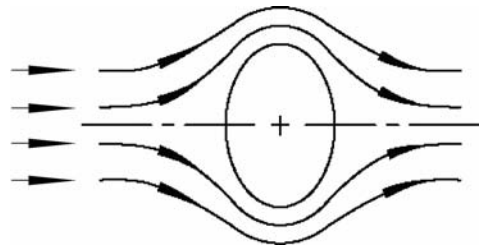


图 1 气体绕过外物的流动

Fig.1 Airflow around foreign object

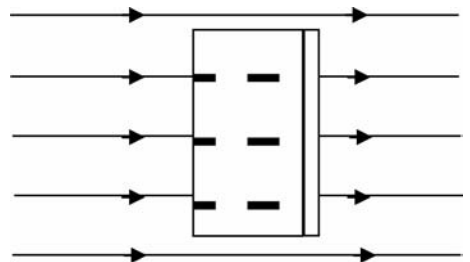


图 2 气流微元与外物的作用过程

Fig.2 Action between airflow infinitesimal and foreign object

机进气道直径的变化而变化,式(3)无法直接得到外物速度的解析表达式,但鉴于本文的目的仅在于撞击速度的估算,同时,后面将看到,气流速度在进气道内的变化对外物运动速度的影响不大,因此,为简单起见,假设  $V$  就是进气道内气流速度的平均值, $L$  是飞机进气道口到发动机转子叶片的距离,则对式(3)积分,并考虑到外物运动距离增量  $dl$  的积分区间是  $[0, L]$ ,可得

$$L = \frac{m}{\rho S V} \left( v_0 - v + V \ln \frac{V - v_0}{V - v} \right) \tag{4}$$

式(4)就是以飞机进气道为参照系,外物运动速度的表达式,其中  $v_0$  是外物在进气道口的初速度,该初速度约等于飞机的滑行速度; $\rho$  是气流密度,决定于发动机工作状态,其估算公式是<sup>[15]</sup>

$$\rho^* = \rho \left( 1 + \frac{\kappa - 1}{2} Ma^2 \right)^{\frac{1}{\kappa - 1}} \tag{5}$$

式中  $\rho^*$  是包含速度影响的气流总密度, $\kappa=1.4$  是等熵指数, $Ma$  是气流马赫数。显然,决定外物运动速度的因素不仅包括外物的大小和质量,而且涉及飞机进气道长度及发动机工作状态。

文献[14]也有与式(4)相同的表达式,但在文献[14]中,参照系是地面, $v_0$  是外物从地面竖直运动至飞机进气道口的速度。显然,当以地面为参照系且飞机滑行时,式(4)中的  $L$  应是外物相对地面的位移而不是进气道长度,并且,式中的  $v_0$  应约等于零。

在获得外物运动速度之后,进一步以叶片为参照系,建立图 3 所示坐标系,即  $x$  轴与发动机轴重合, $x$  轴正向指向气流方向,撞击前,外物沿  $x$



图 3 叶片参照系及坐标系

Fig. 3 Reference system and coordinate system of rotor blade

轴正向运动,叶片既与发动机一起沿  $x$  轴负向平动又绕  $x$  轴以角速度  $\omega$  转动,如果撞击点位置是  $y$ ,则撞击速度  $V_x$ 、 $V_z$  及撞击方向与  $x$  轴的夹角  $\theta$  分别是

$$V_x = v, \quad V_z = \omega y, \quad \theta = \arctan \frac{V_z}{V_x} \tag{6}$$

2 影响外物运动速度的因素

式(4)描述了外物相对飞机进气道的运动速度,式(6)反映了外物相对叶片的撞击速度,显然,得到撞击速度的关键是获得运动速度,但式(4)所描述的运动速度的直观性欠佳,为弥补这一不足,同文献[14]一样,以某型飞机及其发动机为例,研究影响外物运动速度的因素。对于某型飞机及其发动机来说<sup>[14]</sup>,从进气道口到发动机进气口的过程中,相对进气道而言,气流速度从 200 m/s 逐步下降到 160 m/s,之后,从发动机进气口到达一级转子叶片,速度从 160 m/s 又逐渐增大至 180 m/s。这些数据表明,气流速度在进气道内是一变量,但在式(4)中,却将  $V$  当常数对待,这就导致了一个问题——进气道内气流速度变化对外物运动速度的影响程度。为回答该问题,暂且以钢珠为例,计算  $L=4.3$  m,气流速度  $V$  分别等于 160、180、200 m/s(马赫数  $Ma$  分别为 0.47、0.53、0.59)等恒定值时对应的钢珠速度。

首先,将气流总密度  $\rho^*$  值代入式(5)可得不同马赫数  $Ma$  对应的气流密度  $\rho$  分别为 1.1、1.07 kg/m<sup>3</sup> 和 1.04 kg/m<sup>3</sup>,之后,利用式(4)计算得到不同半径的钢珠速度  $v_g$  如图 4 所示,式中  $r_g$  表示钢珠半径。

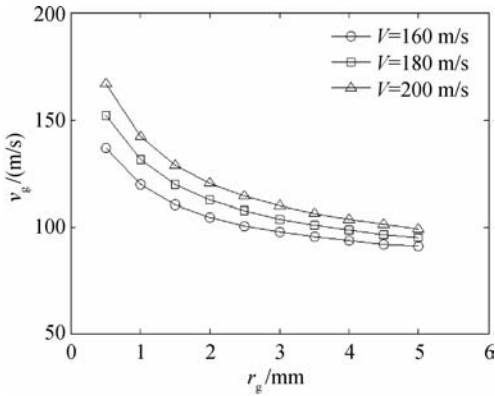


图 4 钢珠速度随半径的变化

Fig. 4 Velocity changes with the radial for steel ball

由图 4 可见,相对于 160 m/s 和 200 m/s 两种极端情况而言,气流速度为 180 m/s 对应的钢珠

速度近似为两种情况下钢珠速度的平均值;钢珠半径为 0.5 mm 时,平均值偏离两种情况对应速度的程度最大,达 9.9%;而钢珠半径为 5 mm 时偏离程度最小,为 4.3%,这表明,气流速度在进气道内的变化对钢珠运动速度的影响不大。基于该结论,估算外物运动速度时,气流速度取为整个路径上的平均值  $V=180\text{ m/s}$ ,此时,式(4)变为

$$4.3 = \frac{m}{193S} \left( 78 - v + 180 \ln \frac{102}{180 - v} \right) \quad (7)$$

式(7)是某型飞机离地时、发动机 100%设计转速下,外物运动速度  $v$  的表达式,可见,在所讨论的情况下,影响速度大小的唯一因素是外物质量  $m$  与迎风特征面积  $S$  的比值  $m/S$ 。

1) 砂粒(石子)

如果将砂粒(石子)的形状简化成球形,并考

虑到其质量密度  $\rho_s^{[16]}$  为  $2800\text{ kg/m}^3$ ,由于

$$m_s = \frac{4}{3} \pi r_s^3 \rho_s = \frac{11\,200}{3} \pi r_s^3, \quad S = \pi r_s^2,$$
$$\frac{m_s}{S} = \frac{11\,200}{3} r_s$$

则,式(7)成为

$$4.3 = \frac{11\,200 r_s}{579} \left( 78 - v_s + 180 \ln \frac{102}{180 - v_s} \right) \quad (8)$$

式中的下标  $s$  表示砂粒(石子),求解式(8)得到不同砂粒(石子)半径对应的速度如表 1 所示,通过函数拟合得到速度  $v_s$  随半径的变化规律是

$$v_s = -467.4 r_s^{0.164} + 310.2 \quad (9)$$

式(9)对应的曲线见图 5,图中  $v$  表示外物运动速度, $r$  表示外物半径。

表 1 外物运动速度  
Table 1 Velocity of foreign object

| 速度/(m/s) | $r/10^{-3}\text{ m}$ |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|----------|----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 0.5                  | 1.0   | 1.5   | 2.0   | 2.5   | 3.0   | 3.5   | 4.0   | 4.5   | 5.0   |
| $v_s$    | 175.0                | 161.3 | 150.0 | 141.3 | 134.5 | 129.1 | 124.7 | 121.0 | 117.9 | 115.2 |
| $v_g$    | 152.2                | 131.3 | 119.8 | 112.6 | 107.5 | 103.7 | 100.8 | 98.6  | 96.7  | 95.1  |
| $v_l$    | 147.3                | 126.5 | 115.6 | 108.8 | 104.1 | 100.7 | 98.1  | 96.0  | 94.3  | 92.9  |

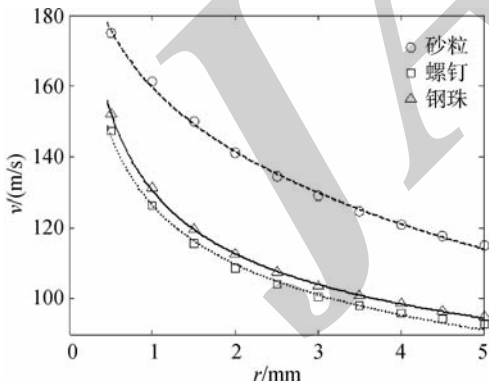


图 5 外物运动速度随半径的变化

Fig. 5 Variation of velocity with the radius of the foreign object

2) 钢珠

考虑到钢珠的质量密度为<sup>[17-18]</sup>  $7\,800\text{ kg/m}^3$ ,由于

$$m_g = \frac{4}{3} \pi r_g^3 \rho_g = 10\,400 \pi r_g^3, \quad S = \pi r_g^2,$$
$$\frac{m_g}{S} = 10\,400 r_g$$

则式(7)成为

$$4.3 = \frac{10\,400 r_g}{193} \left( 78 - v_g + 180 \ln \frac{102}{180 - v_g} \right) \quad (10)$$

式中的下标  $g$  表示钢珠,求解式(10)得到不同半径对应的速度如表 1 所示,借助函数拟合得到

$$v_g = 10.43 r^{-0.313} + 39.85 \quad (11)$$

式(11)对应的曲线见图 5。

3) 螺钉(螺帽)

将螺钉(螺帽)的形状简化成半径为  $r_l$ 、长度为  $l_l$  的圆柱,当螺钉在进气道内运动时其轴线与气流方向垂直时,考虑到其材料是合金钢,质量密度为<sup>[17-18]</sup>  $7\,800\text{ kg/m}^3$ ,由于

$$m_l = \rho_l l_l \pi r_l^2 = 7\,800 l_l \pi r_l^2, \quad S = 2 r_l l_l$$
$$\frac{m_l}{S} = 3\,900 \pi r_l$$

式(7)变为

$$4.3 = \frac{7\,800 \pi r_l}{386} \left( 78 - v_l + 180 \ln \frac{102}{180 - v_l} \right) \quad (12)$$

式中的下标  $l$  表示螺钉(螺帽),求解式(12),得到不同半径对应的速度如表 1 所示,函数拟合表 1

的  $v_1$  数据,得到

$$v_1 = 26.92r_1^{-0.216} + 6.79 \tag{13}$$

式(13)对应的曲线也见图 5。

如果螺钉在进气道内运动时轴线与气流方向一致,由于

$$m_1 = l_1 S \rho = 7800 l_1 S, \frac{m_1}{S} = 7800 l_1$$

则,式(7)成为

$$4.3 = \frac{7800 l_1}{193} \left( 78 - v_1 + 180 \ln \frac{102}{180 - v_1} \right) \tag{14}$$

求解式(14),得到不同长度对应的速度如表 2 所示,采取函数拟合得到

$$v_1 = 0.926 l_1^{-0.63} + 73.39 \tag{15}$$

式(15)对应的曲线见图 6。

表 1、表 2 和图 5、图 6 表明,某型飞机离地时、发动机 100%设计转速下,外物运动速度的变化规律是

1) 随着外物半径或长度的增大,其运动速度指数减小。这反映了外物大小对其运动速度的影响,外物尺寸的增大意味着其惯性增大,而惯性大导致加速性差;

表 2 螺钉(螺帽)的运动速度

Table 2 Velocity of the screw (nut)

| 速度/(m/s) | $l_1/10^{-3} \text{ m}$ |       |      |      |      |      |      |      |      |      |
|----------|-------------------------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
|          | 2                       | 4     | 6    | 8    | 10   | 12   | 14   | 16   | 18   | 20   |
| $v_1$    | 119.8                   | 103.7 | 96.7 | 92.7 | 90.1 | 88.3 | 87.0 | 85.9 | 85.1 | 84.5 |

3 结 论

本文基于动量定理,研究了外物撞击发动机叶片的速度,找到了估算撞击速度的表达式,总的结论是:外物相对飞机进气道的运动速度及外物相对叶片的撞击速度不仅与外物大小、形状、材质和姿态有关,而且与飞机进气道长度、发动机工作状态有关。就本文所研究的飞机及发动机工作状态而言,在发动机 100%设计转速下,外物相对飞机进气道的运动速度随外物形状、大小、材质和姿态的变化规律如下:

- 1) 随着半径或长度的增大,外物运动速度指数减小;
- 2) 相同半径下,始终存在  $v_s > v_g > v_1$ ;
- 3) 如果螺钉(螺帽)在进气道内运动时轴线与气流方向一致,则其速度仅与长度有关而与半径无关;反之,如果螺钉(螺帽)在进气道内运动时轴线与气流方向垂直,则其速度仅与半径有关而与长度无关。

参考文献:

[ 1 ] Hamrich J L I. Effects of foreign object damage from small hard particles on the high cycle fatigue life of Ti-6Al-4V [R]. Air Force Institute of Technology, AFIT/DS/ENY/99-02, 1999.

[ 2 ] 尹冬梅,钱林芳,徐亚栋,等. 叶片砂石撞击损伤的数值模拟与分析[J]. 南京理工大学学报(自然科学版), 2008, 32 (5): 536-539.

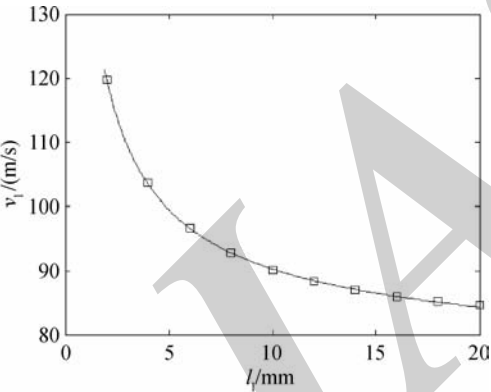


图 6 螺钉(螺帽)运动速度随其长度的变化

Fig. 6 Variation of velocity with the length of the screw(nut)

2) 相同半径下,始终存在  $v_s > v_g > v_1$ 。这反映了外物材质、形状对其运动速度的影响,砂粒(石子)速度大,是由于其质量密度小、惯性小所致;与螺钉(螺帽)相比,钢珠速度大的原因是钢珠的  $m/S$  值小于螺钉(螺帽)的  $m/S$  值;

3) 如果螺钉(螺帽)在进气道内运动时轴线与气流方向一致,则其速度仅与长度有关而与半径无关;反之,如果螺钉(螺帽)在进气道内运动时轴线与气流方向垂直,则其速度仅与半径有关而与长度无关。这表明了外物姿态对运动速度的影响,原因仍然在于  $m/S$  值的差异。

- YIN Dongme, QIAN Linfang, XU Yadong, et al. Simulation and analysis of blades damaged by sandston[J]. Journal of Nanjing University of Science and Technology (Natural Science), 2008, 32(5): 536-539. (in Chinese)
- [3] NOWELL D, DUÓ P, STEWART I F. Prediction of fatigue performance in gas turbine blades after foreign object damage[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(9/10/11): 963-969.
- [4] CHEN Xi. Foreign object damage on the leading edge of a thin blade[J]. Mechanics of Materials, 2005, 37(4): 447-457.
- [5] DUÓ P, LIU J, DINI D. Evaluation and analysis of residual stresses due to foreign object damage[J]. Mechanics of Materials, 2007, 39(3): 199-211.
- [6] MARANDI S M, RAHMANI K, TAJDARI M. Foreign object damage on the leading edge of gas turbine blades[J]. Aerospace Science and Technology, 2014, 33(1): 65-75.
- [7] 刘超, 赵振华, 陈伟. 叶片外物损伤的实验模拟及其疲劳强度的研究[J]. 推进技术, 2014, 35(3): 403-407.  
LIU Chao, ZHAO Zhenhua, CHEN Wei. Investigations into simulation test and fatigue strength of foreign object damage of blades[J]. Journal of Propulsion Technology, 2014, 35(3): 403-407. (in Chinese)
- [8] MARTINEZ C M, EYLLON D, NICHOLAS T. Effects of ballistic impact damage on fatigue crack initiation in Ti-6Al-4V simulated engine blades[J]. Materials Science and Engineering, 2002, 325(1/2): 465-477.
- [9] OAKLEY S Y, NOWELL D. Prediction of the combined high- and low-cycle fatigue performance of gas turbine blades after foreign object damage[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(1): 69-80.
- [10] 包珍强, 胡绪腾, 宋迎东. 不同冲击角度外物损伤对 TC4 钛合金高循环疲劳强度的影响[J]. 航空动力学报, 2015, 30(9): 2226-2233.  
BAO Zhenqiang, HU Xuteng, SONG Yingdong. Effect of foreign object damage at different impact angles on high cycle fatigue strength of TC4 titanium alloys[J]. Journal of Aerospace Power, 2015, 30(9): 2226-2233. (in Chinese)
- [11] 李均盛, 柴桥, 杨百愚, 等. 钢珠对某型发动机压气机一级转子叶片撞击损伤研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2013, 14(6): 5-8.  
LI Junsheng, CHAI Qiao, YANG Baiyu, et al. Impact damage on one kind of aero-engine compressor blade from steel sphere[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2013, 14(6): 5-8. (in Chinese)
- [12] 柴桥, 李均盛, 杨百愚, 等. 外来物形状对航空发动机压气机转子叶片撞击损伤的影响[J]. 应用力学学报, 2014, 31(6): 5-8.  
CHAI Qiao, LI Junsheng, YANG Baiyu, et al. Effects of foreign object shape to the aero-engine compressor blade impacted damage[J]. Journal of Applied Mechanics, 2014, 31(6): 5-8. (in Chinese)
- [13] 康继东, 陈士焯, 徐志怀. 压气机叶片外物损伤模拟的撞击能量当量法[J]. 南京航空航天大学学报, 1998, 30(6): 611-615.  
KANG Jidong, CHEN Shixuan, XU Zhihuai. Impact energy equivalent method for simulation of foreign object damage to compressor blades[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 1998, 30(6): 611-615. (in Chinese)
- [14] 张忠平, 张晶, 柴桥, 等. 机场道面外来物撞击航空发动机转子叶片速度估算[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2015, 16(6): 7-10.  
ZHANG Zhongping, ZHANG Jing, CHAI Qiao, et al. Velocity estimation for the foreign object that impact aero-engine blade[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2015, 16(6): 7-10. (in Chinese)
- [15] 李军, 华建国. 飞机推进系统原理[M]. 西安: 空军工程大学出版社, 1999.
- [16] 徐志英. 岩石力学[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.
- [17] 《中国航空材料手册》编辑委员会. 中国航空材料手册: 第 1 卷 结构钢不锈钢[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [18] 于慧臣, 吴学仁. 航空发动机设计用材料数据手册: 第 4 册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.

(编辑: 王碧琚)