

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

包珍强¹, 胡绪腾¹, 宋迎东^{1,2}

(1. 南京航空航天大学 能源与动力学院

江苏省航空动力系统重点实验室, 南京 210016)

(2. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016)

摘 要: 基于空气炮冲击试验装置在不同冲击角度下进行了 TC4 钛合金平板试件的外物损伤模拟试验, 采用逐级加载试验方法测试获得了光滑和冲击损伤试件的高循环疲劳 (high cycle fatigue, HCF) 强度, 研究了冲击角度、冲击位置以及冲击损伤宏观几何尺寸与 HCF 强度的关系. 结果表明: 不同冲击角度下的损伤对 HCF 强度的影响程度不同. 冲击损伤在试件边缘时, 30° 冲击使试件 HCF 强度的下降幅度最大; 冲击损伤在试件表面时, 60° 冲击使试件 HCF 强度的下降幅度最大. 试件边缘产生的缺口使 HCF 强度的下降幅度一般大于试件表面产生弹坑的影响. 但在 60° 冲击时, 冲击缺口损伤的影响要小于冲击弹坑损伤的影响. 冲击损伤宏观几何尺寸一定程度上可以表征损伤试件 HCF 强度下降的严重程度.

关键词: TC4 钛合金; 高循环疲劳; 高速弹道冲击; 外物损伤; 冲击角度

中图分类号: V231.9

文献标志码: A

Effect of foreign object damage at different impact angles on high cycle fatigue strength of TC4 titanium alloys

BAO Zhen-qiang¹, HU Xu-teng¹, SONG Ying-dong^{1,2}

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Aerospace Power System,

College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Based on the air-gun impact test device, the foreign object damage (FOD) simulation test of TC4 titanium alloy plate specimens was conducted at different impact angles. The high cycle fatigue (HCF) strength of smooth and impact damage samples was obtained with the step-test method. The relationship among the impact angles, impact positions, macroscopic geometry of impact damage and HCF strength of the damaged samples was studied. Results show that, the effect of impact damages on the HCF strength at different impact angles is not the same. When the impact damage appears at the edge of sample, the maximum decrease of HCF strength occurs in the impaction of 30°; while the impact damages appear at the middle of sample, the maximum decrease of HCF strength occurs in the impaction of 60°. In most cases, impact notches at the samples' edge compared to impact pits at the sample's intermediate surface have a more seriously effect on the HCF strength.

收稿日期: 2014-03-21

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(51105198)

作者简介: 包珍强(1989-), 男, 安徽芜湖人, 硕士生, 主要从事材料与结构的疲劳研究.

However, at the impaction of 60° , the impact pit damage has a more serious effect. The geometry of the impact damage to a certain extent can characterize the changes of the HCF strength severity of damaged sample.

Key words: TC4 titanium alloy; high cycle fatigue; high-speed ballistic impact; foreign object damage; impact angle

航空发动机(下文简称发动机)在使用中常常有飞石、砂粒等外来物伴随高速气流进入发动机气流通道,进而损伤发动机前端的风扇/压气机叶片.这种由硬物造成的冲击损伤在国内外航空发动机规范^[1]中均被称为外物损伤(foreign object damage, FOD). FOD 多出现在叶片的前后缘^[2],宏观上多表现为叶片的局部机械损伤,如缺口、撕裂、弹坑或鼓包等形式^[3],微观上还伴随产生微结构变形、残余应力、绝热剪切带、初始裂纹等损伤特征^[4].发动机转子在高速转动时,叶片受到离心力和振动载荷的共同作用,容易发生高循环疲劳(high cycle fatigue, HCF)失效, FOD 极易成为疲劳源,从而大大降低叶片的疲劳寿命.因此,研究 FOD 对叶片材料 HCF 强度的影响具有重要意义.

20 世纪 70~80 年代, Storace 等^[5]对 FOD 问题进行了较为系统的研究,并在大量的工作基础上提出了叶片的抗外物损伤设计准则. Nicholas 等^[6]在 20 世纪 80 年代初,基于高速弹道冲击试验方法对具有叶片前缘特征的平板试件进行了 FOD 试验研究,研究分析了外物冲击条件、冲击损伤形式及严重程度之间的关系,提出以临界损伤速度和几何标度来对外物损伤进行定量描述. 90 年代之后,美国军方研究发现 HCF 成为发动机叶片失效的主要因素,发起了美国国家 HCF 科学与技术研究计划^[7].该计划对 FOD 问题进行了更加深入的研究. Peters 等^[8-9]研究了 FOD 对 HCF 强度的影响,结果表明: FOD 会诱使冲击区边缘出现裂纹,冲击区附近材料发生一定的微结构损伤,对叶片的 HCF 强度有很大影响.在冲击角度的影响方面, Ruschau 等^[10]使用直径为 1.0 mm 的玻璃球在不同冲击角度下对钛合金叶片前缘模拟试件进行弹道冲击试验来模拟实际 FOD,对损伤后的试件 HCF 强度进行了测试,结果表明有角度冲击比 0° 冲击的危害性更大. Weeks 等^[11]采用数值模拟方法,基于 MSC/DYTRAN 软件对钢珠冲击菱形截面试件的动态过程进行了数值模拟,分析了不同冲击参数对冲击损伤数值

模拟结果的影响,对冲击导致的残余应力分布进行了研究和分析,结果表明: 0° 冲击下,在弹坑后存在较大的残余压应力场.在 40° 冲击下,硬物冲击的入口边会产生较大的残余拉应力场,这种残余应力场的存在可能会在 HCF 载荷作用下,使缺口表面容易形成裂纹.

目前,国外虽然在 FOD 本身及其对叶片材料 HCF 性能的影响方面进行了较为广泛的研究,但由于影响 FOD 的因素较多,对不同 FOD 的特征及其对叶片材料 HCF 强度的影响仍未认识清楚.国内对 FOD 问题的研究和认识则更少.为此,本文采用空气炮冲击装置,开展了 TC4 钛合金叶片的 FOD 试验模拟研究,研究和分析了不同冲击角度下的外物损伤对 TC4 钛合金平板试件(文中简称试件)HCF 强度的影响特点和规律.

1 试验

1.1 材料基本性能

本文试验采用的 TC4 钛合金,为发动机风扇/压气机叶片常用材料.原材料直径为 50 mm 的 TC4 钛合金圆棒,热处理工艺按照 GB/T 13810-2007^[12]进行,热处理状态为退火态,其室温基本力学性能试验结果见表 1.

表 1 TC4 钛合金室温基本力学性能参数

Table 1 Basic mechanical performance parameters of TC4 titanium alloys

参数	拉伸应变率/ s^{-1}	
	0.01	0.001
屈服应力/MPa	881	868
极限应力/MPa	1025	970
弹性模量/GPa	112	114

1.2 冲击试验装置与试验方案

实验室内模拟 FOD 的方法一般有 3 种^[13-14]: ①对叶片或试件前缘使用准静态挤压方法模拟 FOD; ②用摆锤等低速冲击方法撞击试件前缘模拟 FOD; ③利用高速弹道冲击试验方法即用空气

炮向试件发射一定形状的弹体来模拟 FOD. 目前国外广泛采用上述第 3 种方法进行 FOD 试验模拟研究, 虽然试验成本相对较高, 但却能更真实地

模拟实际 FOD 特征. 本文 FOD 模拟试验也采用了这种方法, 所采用空气炮冲击试验装置示意图如图 1 所示.

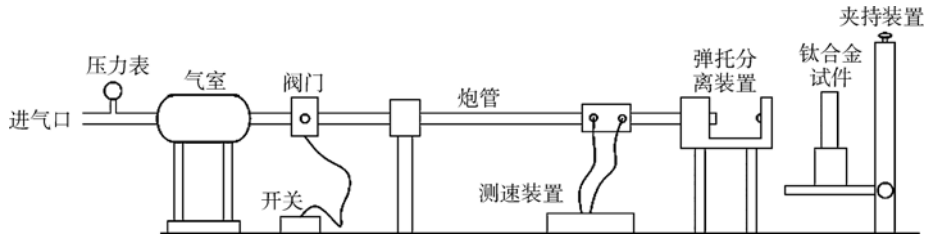


图 1 空气炮冲击试验装置示意图
Fig. 1 Diagram of air-gun impact test device

该装置的试验原理是: 在气室内充入压缩空气, 打开阀门后气体膨胀加速弹体, 通过调节气室空气压力可以来控制弹体的发射速度. 该方法在发射弹体时采用弹托来支撑所模拟的外物(本文采用直径为 2 mm 的钢珠来模拟发动机的外来硬物), 发射外物的形状、尺寸等可不受炮管直径的限制. 测速装置在炮管末端, 为光电测速, 即在很小的一段距离内设置两束光幕, 记录钢珠通过两束光幕的时间, 从而得到其飞行速度. 调整试件的安装位置和相对于炮管轴线的角度可让钢珠撞在特定的冲击部位.

为较系统地研究不同冲击角度外物损伤对 TC4 钛合金 HCF 强度的影响, 本文采用 TC4 钛合金平板试件来模拟叶片, 试验件几何尺寸如图 2 所示. 由于钛合金的 HCF 强度对试件的表面粗糙度等因素较为敏感, 因此试验件均采用慢走丝工艺加工, 并对光滑试件的表面和缺口试件的边缘进行了精磨, 从而保证试件表面具有较小的表面粗糙度. 冲击损伤形式主要有两类: 一类是冲击试件边缘产生的冲击缺口, 另一类为冲击试件表面产生的冲击弹坑. 两类冲击损伤的冲击角度 θ 和方位示意图如图 3 所示. 试验方案见表 2 和表 3.

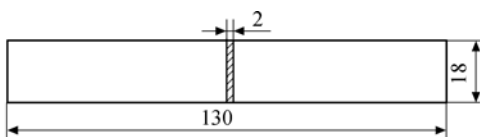


图 2 FOD 模拟试验采用的 TC4 钛合金平板试件 (单位:mm)
Fig. 2 TC4 titanium alloys plane sample of FOD simulation test (unit:mm)

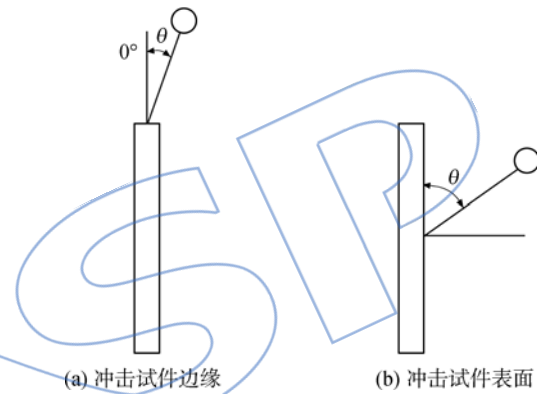


图 3 两类冲击损伤的冲击角度和冲击位置示意图
Fig. 3 Diagram of impact angle and impact position for two kinds of damage

表 2 冲击缺口损伤试验方案
Table 2 Test plan of impact notches

冲击角度/(°)	试验件数	冲击角度/(°)	试验件数
0	5	60	5
30	5	75	3
45	5		

表 3 冲击弹坑损伤试验方案
Table 3 Test plan of impact pits

冲击角度/(°)	试验件数	冲击角度/(°)	试验件数
30	4	75	3
45	3	90	3
60	3		

对两类冲击损伤, 除了冲击角度不同外, 其他所有试验条件均相同: 模拟外物均采用直径为 2 mm 的钢珠, 冲击速度为 315 m/s. 获得冲击损伤后使用数字显微镜对冲击损伤进行了观察, 并测

量了每处损伤的宏观几何参数.

1.3 高循环疲劳(HCF)试验

HCF 试验采用 QBG-100 高频疲劳试验机进行. 疲劳试验循环数设为 10^6 循环, 应力比 $r=0.1$, 采用轴向加载的试验方式, 试验在室温下进行, 并以试件发生疲劳断裂作为疲劳失效准则. 为研究冲击损伤对 TC4 钛合金材料 HCF 强度的影响程度, 本文也开展了光滑试件的 HCF 试验, 测试获得了其 HCF 强度. 光滑疲劳试件按 GB 3075-82^[15] 进行设计, 如图 4, 其中 R 为图示圆弧半径.

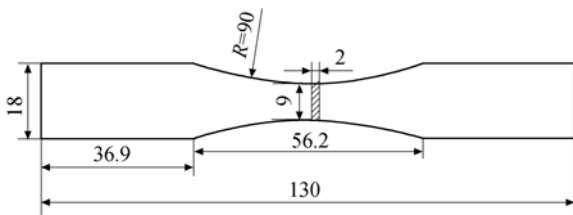


图 4 光滑试件尺寸图(单位:mm)

Fig. 4 Dimensional diagram of smooth sample (unit:mm)

传统 HCF 强度试验方法(如升降法)需要对多组相同的试件进行疲劳试验, 才能获得某一应力比下的 HCF 强度^[16], 这种方法要求所有试件基本上没有差别. 由于冲击损伤的分散性较大, 因而本文采用逐级加载试验方法(step-test method)^[17] 进行 HCF 试验, 如图 5 所示, σ_{max} 为试件 HCF 强度最大值. 该方法可通过单根试件测试获得其 HCF 强度. 光滑试件的 HCF 强度测试也采用该方法. 该方法首先在试件上施加低于该试件疲劳强度估计值的循环应力, 加载 10^6 循环. 如果试件在第 1 个 10^6 循环内疲劳失效, 该试件数据无效. 如果试件在第 1 个 10^6 循环内没有失效, 则在之前的应力水平上增加一个小的载荷增量(一般为初始加载载荷的 5%), 继续对该试件加载 10^6 循环, 重复上述操作, 直至试件在某一个 10^6 循环内失效. 试件的 HCF 强度 σ_{es} 由最后两级载荷的插值计算得到, 计算公式如下:

$$\sigma_{es} = \sigma_{pr} + \frac{N_i}{10^6} (\sigma_i - \sigma_{pr})$$

其中 σ_i 为试件发生失效的最后载荷块的最大循环应力, $N_i (< 10^6$ 循环) 为循环次数, σ_{pr} 为发生失效的前一个载荷块的最大循环应力.

上述逐级加载试验过程的示意图如图 5 所示.

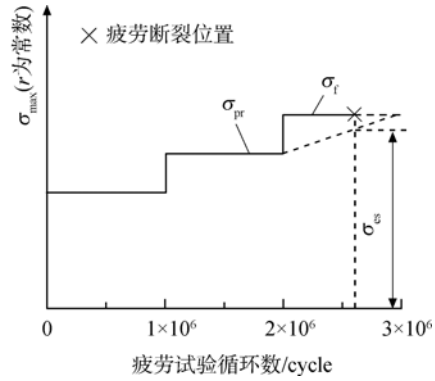


图 5 逐级加载试验方法示意图

Fig. 5 Diagram of step-test method

2 试验结果与分析

2.1 不同冲击角度下冲击缺口损伤对 HCF 强度的影响

本文采用空气炮冲击试验装置在 TC4 钛合金平板试件边缘进行了冲击损伤试验, 得到了表 2 给出的 5 种冲击角度下的冲击缺口损伤, 然后采用上述逐级加载试验方法测试获得了不同冲击角度冲击损伤试件的 HCF 强度, 60° 冲击时, 损伤试件在 HCF 试验时有一根试件断于试件夹持装置, 经过分析和观察发现该试件夹持部分本身存在加工缺陷, 而 HCF 试验对于缺陷的存在是极为敏感的, 最终试验件没有断于损伤处, 因而试验结果是无效的. 此外, 另一根试件由于初始载荷加载过大, 在第 1 级加载就发生断裂失效, 按照逐步加载试验方法, 该结果无效. $45^\circ, 60^\circ$ 和 75° 三种冲击条件下均有一根试样由于高速弹道冲击试验装置的可重复性不高, 导致冲击结果误差较大, 因而并没有进行 HCF 试验. 试验结果如图 6 所示. 图中横坐标表示冲击角度, 纵坐标为试件 HCF 强度最大值 σ_{max} 与光滑试件 HCF 强度 σ_{smooth} 的比值, 比值越小则说明损伤越严重, 疲劳强度的下降越厉害. 其中光滑试件的平均 HCF 强度为 560MPa. 从图 6 可以看出: 0° 冲击时, 损伤试件的 HCF 强度试验结果分散性较小, 而 $30^\circ, 45^\circ, 75^\circ$ 三种角度冲击损伤试件的 HCF 强度试验结果具有相对较大的分散性. 其原因主要是由于高速弹道冲击试验装置可重复性不高, 以 45° 冲击下测量的损伤长度和宽度数据为例, 见表 4. 从表中可以发现即使在相同的冲击角度、冲击速度下, 冲击位置仍有很大的分散性, 损伤的形状和几何参数也有一定的差异性. 冲击缺口宏观几何尺寸的测量示意图如图 7 所示.

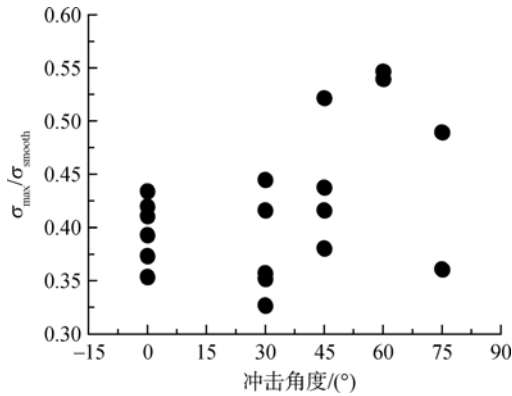


图6 不同冲击角度下冲击缺口损伤试件的 HCF 试验结果

Fig. 6 HCF test results of impact notch damaged sample in different impact angles

表4 45°冲击时的损伤长度和宽度数据

Table 4 Data of 45° impact damage length and width

试验件编号	损伤长度/m	损伤宽度/m
bian-45-2-1	1179.10	1448.29
bian-45-2-3	1349.10	1381.16
bian-45-2-4	1825.17	1287.67
bian-45-2-5	1319.36	1598.39

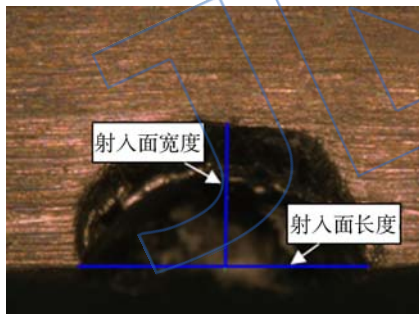


图7 冲击缺口宏观几何尺寸测量示意图

Fig. 7 Measure diagram of impact notch's macrograph geometric dimension

图8给出了冲击缺口损伤试件平均 HCF 强度与冲击角度的关系. 从图8结果可以看出, 30°冲击使 TC4 钛合金平板试件平均 HCF 强度的下降幅度最大. 这一点与 Ruschau 等^[10]的试验研究结果一致.

图9和图10给出了冲击缺口损伤试件的 HCF 强度与冲击缺口宏观几何尺寸之间的关系. 从图中可以看出损伤试件的 HCF 强度整体表现出随冲击损伤射入面长度的增大而逐渐减小、随冲击损伤射入面宽度的增大而逐渐增大的趋势. 上述试验结果表明: 冲击缺口损伤宏观几何尺寸

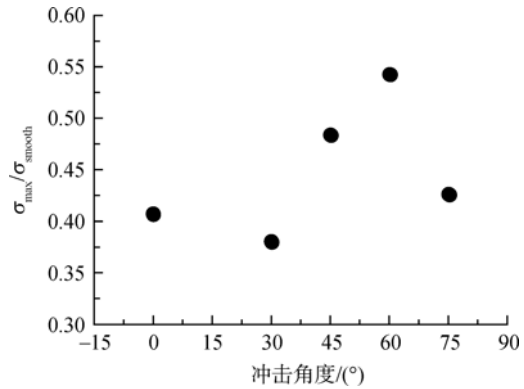


图8 冲击缺口损伤试件平均 HCF 强度随冲击角度的变化关系

Fig. 8 Relationship between average HCF strength and impact angles of impact notch damaged sample

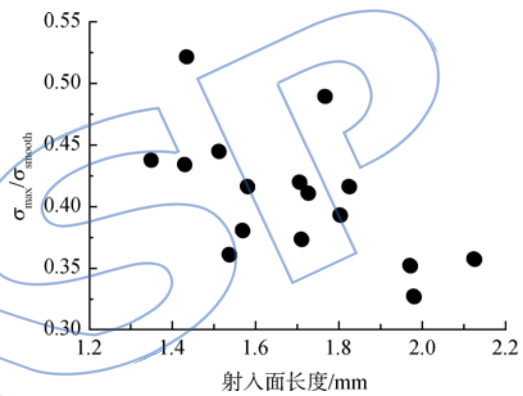


图9 HCF 强度与冲击损伤射入面长度的关系

Fig. 9 Relationship between HCF strength and length of incidence plane

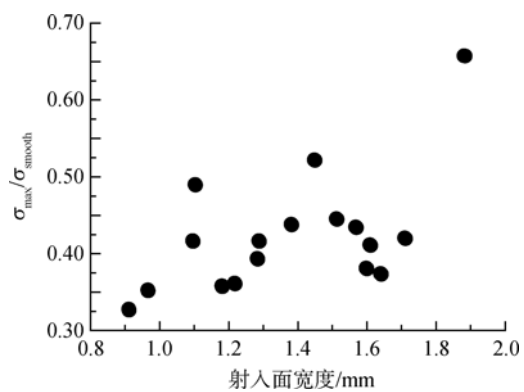


图10 HCF 强度与冲击损伤射入面宽度的关系

Fig. 10 Relationship between HCF strength and width of incidence plane

一定程度上可以作为损伤严重程度的表征参量.

2.2 不同冲击角度下冲击弹坑损伤对 HCF 强度的影响

采用空气炮冲击试验装置在表3给出的5种

角度下进行冲击损伤模拟试验,获得了相关条件下的冲击弹坑损伤.进而采用逐级加载试验方法试验测试获得了冲击弹坑损伤试件的 HCF 强度,试验结果如图 11 所示.从图中可以看出,冲击弹坑损伤试件的 HCF 强度试验结果分散性比冲击缺口损伤时要小.这主要是由于冲击损伤在平板表面时,宏观损伤形貌为椭圆形弹坑(90°冲击时基本为圆形),冲击位置和损伤形貌的分散性较小.

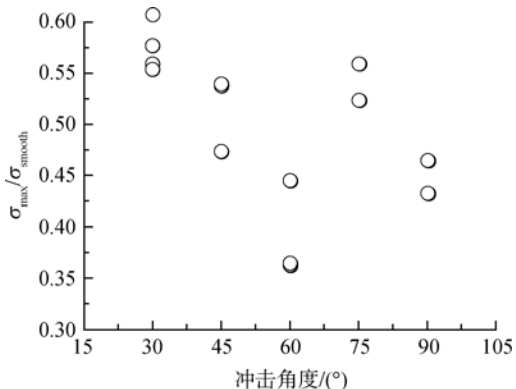


图 11 冲击角度对冲击弹坑损伤试件 HCF 强度的影响
Fig. 11 Effect of impact angles on HCF strength of impact pit damage sample

图 12 给出了冲击弹坑损伤试件的平均 HCF 强度与冲击角度的关系.从图 12 结果可以看出,60°冲击使 TC4 钛合金平板试件平均 HCF 强度的下降幅度最大,其次为 90°冲击损伤.

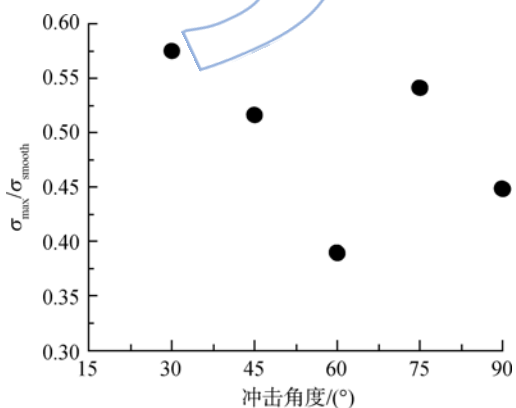


图 12 冲击角度对冲击弹坑损伤试件平均 HCF 强度的影响
Fig. 12 Effect of impact angles on average HCF strength of impact pit damage sample

图 13 和图 14 给出了冲击弹坑损伤试件的 HCF 强度与冲击弹坑宏观几何尺寸之间的关系.冲击弹坑宏观几何尺寸的测量方法如图 15 所示.

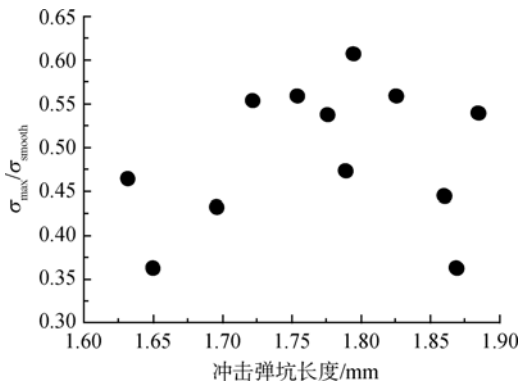


图 13 冲击弹坑长度与 HCF 强度的关系
Fig. 13 Relationship between HCF strength and length of impact pit

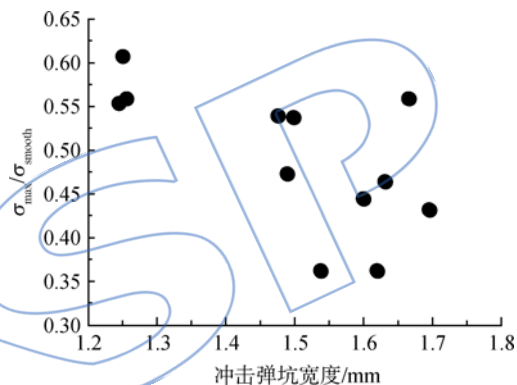


图 14 冲击弹坑宽度与 HCF 强度的关系
Fig. 14 Relationship between HCF strength and width of impact pit

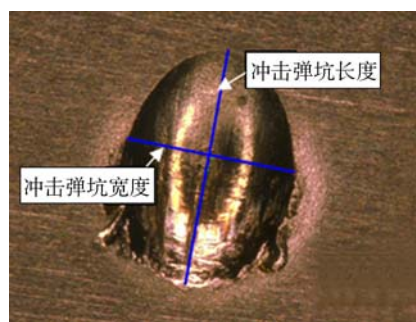


图 15 冲击弹坑测量示意图
Fig. 15 Measure diagram of impact pit

从图中可以看出随着冲击弹坑长度的增加,整体上看 HCF 强度的下降幅度越小,损伤越轻;而随着冲击弹坑宽度的增大,HCF 强度下降则越为严重.可见,冲击弹坑损伤宏观几何参量一定程度上可以表征其损伤的严重程度.但在某些情况下却与上面的趋势不同,图 13、图 14 中 HCF 强度下降最严重的两根试件均为 60°冲击下的损伤,该

结果进一步说明影响 FOD 后 HCF 强度下降程度的因素是极为复杂的,尺寸不能作为损伤严重程度表征的唯一参量.此外,冲击试验本身的分散性也较大.

2.3 不同类型冲击损伤对 HCF 强度影响程度的对比分析

图 16 对两类冲击损伤试件的平均 HCF 强度试验结果随冲击角度的变化趋势进行了对比.从图中可以看出:以相同条件在试件边缘产生的冲击缺口损伤对 TC4 钛合金平板试件平均 HCF 强度的影响程度整体上比在试件表面产生的冲击弹坑损伤的影响程度要大,但是在 60° 冲击下,冲击弹坑损伤对 TC4 钛合金平板试件平均 HCF 强度的影响程度要大于冲击缺口损伤的影响.

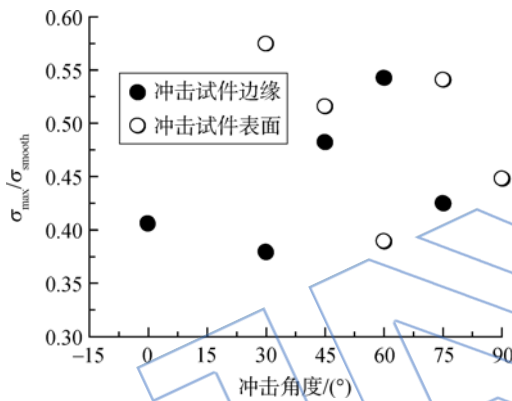


图 16 不同冲击位置下的平均 HCF 强度对比
Fig. 16 Comparison of average HCF strength at different impact positions

3 结论

本文采用空气炮冲击试验装置对 TC4 钛合金平板试件进行了 FOD 试验模拟,采用逐级加载试验方法测试获得了 TC4 钛合金平板光滑和冲击损伤试件的 HCF 强度,研究了冲击部位、冲击角度以及冲击损伤宏观几何尺寸与损伤试件 HCF 强度的相关关系,虽然试验结果有一定的分散性,但是仍能从中发现相关参数条件之间具有一定的规律和关系,得到的主要结论如下:

1) 不同冲击角度冲击损伤对 TC4 钛合金平板试件 HCF 强度的影响程度不同.对于冲击试件边缘产生的冲击缺口损伤, 30° 冲击使试件 HCF 强度的下降最为严重.对于试件表面产生的冲击弹坑损伤, 60° 冲击使试件 HCF 强度的下降最为严重.

2) 以相同条件在平板不同部位产生的冲击损伤对 TC4 钛合金平板试件 HCF 强度的影响程度不同.多数情况下,在试件边缘产生的冲击缺口损伤使 HCF 强度的下降幅度要大于试件表面产生的冲击弹坑损伤的影响.但在 60° 冲击时,冲击缺口损伤使 HCF 强度的下降幅度要小于冲击弹坑损伤的影响.

3) 冲击损伤对 TC4 钛合金平板试件 HCF 强度的影响程度与冲击损伤宏观几何尺寸整体上表现出一定的相关性.对在试件边缘产生的冲击缺口损伤, HCF 强度的下降幅度随着冲击损伤射入面长度的增大有加大的趋势,随冲击损伤射入面宽度的增大有减小的趋势.对在试件表面产生的冲击弹坑损伤, HCF 强度的下降幅度随冲击弹坑长度的增大由下降的趋势,随冲击弹坑宽度的增大有加大的趋势.分析试验结果可以发现影响 FOD 后 HCF 强度下降程度的因素有很多,损伤的宏观几何尺寸不能作为评估损伤严重程度的唯一参量,这也进一步说明了 FOD 问题的复杂性,需要作更进一步地研究和分析.

参考文献:

- [1] 国防科学技术工业委员会. GJB241-87 航空涡轮喷气和涡轮风扇发动机通用规范[S]. 北京:国防科学技术工业委员会军标出版发行部,1987.
- [2] Cowles B A. High cycle fatigue in aircraft gas turbines: an industry perspective[J]. International Journal of Fracture, 1996, 80(2/3):147-163.
- [3] North Atlantic Treaty Organization. Best practices for the mitigation and control of foreign[R]. Research and Technology Organization, RTO TR-AVT-094, 2005.
- [4] Martinez C M. Effects of ballistic impact damage on fatigue crack initiation in Ti-6Al-4V simulated engine blades[D]. Dayton, Ohio: University of Dayton, 2000.
- [5] Storace A F. Foreign object impact design criteria[R]. Air Force Aerospace Propulsion Laboratory, AFAPL-TR-78-81.
- [6] Nicholas T, Barber J P, Bertke R S. Impact damage on titanium leading edges from small hard objects[J]. Experimental Mechanics, 1980, 20(3):357-364.
- [7] Huber N. Plan to control high cycle fatigue in engines[R]. San Antonio, Texas: USAF Structural Integrity Program Conference, 1995.
- [8] Peters J O, Ritchie R O. Foreign object damage and high cycle fatigue: role of microstructure in Ti-6Al-4V[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(suppl. 1): 413-421.
- [9] Peters J O, Ritchie R O. Foreign object damage and high cycle fatigue of Ti-6Al-4V[J]. Material Science and Engineering: A, 2001, 319/320/321:597-601.

- [10] Ruschau J, Nicholas T, Thompson S. Influence of foreign object damage (FOD) on the fatigue life of simulated Ti-6Al-4V airfoils[J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2001, 25(3): 233-250.
- [11] Weeks C, Bastnagel P, Cook T, et al. FOD analytical modeling: FOD event modeling[R]. Air Force Research Laboratory, AFRL-ML-WP-TR-2001-4159, 2001.
- [12] 国家标准化委员会. GB/T 13810-2007 外科植入物用钛及钛合金加工材[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [13] Nowell D, Duo, P, Stewart I F. Prediction of fatigue performance in gas turbine blades after foreign object damage [J]. *International Journal Fatigue*, 2003, 25 (9/10/11): 963-969.
- [14] Dunham J M A, Mech G I E, Grad R. Damage to axial compressors[J]. *Journal of the Royal Aeronautical Society*, 1959, 63: 576-580.
- [15] 国家标准化委员会. GB 3075-82 金属轴向疲劳试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1982.
- [16] 高镇同. 疲劳性能测试[M]. 北京: 国防工业出版社, 1980.
- [17] Maxwell D C, Nicholas T. A rapid method for generation of a haigh diagram for high cycle fatigue[R]. ASME Paper STP 1332-EB, 1999.

(编辑: 王碧琚)

JALSP