

文章编号:1674-8190(2019)02-277-06

# 铝合金振动疲劳同步测量技术研究

彭艳涛<sup>1</sup>, 吕胜利<sup>2</sup>, 马君峰<sup>3</sup>, 李斌<sup>2</sup>

(1. 中航飞机起落架有限责任公司 规划发展部, 长沙 410200)

(2. 西北工业大学 无人机特种技术重点实验室, 西安 710072)

(3. 中国飞机强度研究所 五室, 西安 710065)

**摘要:** 随着振动试验技术的不断进步, 振动疲劳试验拥有了良好的试验基础, 能够进行各种环境下的振动疲劳模拟试验, 但目前振动疲劳的测量方法还无法满足振动疲劳试验深入研究的需求。提出铝合金振动疲劳同步测量的方法, 同时采用红外监测技术、声发射技术、显微测试技术、应变测试技术等对不同加速度下的铝合金振动疲劳试样进行测量, 研究各种测量参数随损伤的变化情况。结果表明: 铝合金振动疲劳不同阶段应主要考虑不同的测量参数作为判断损伤的依据, 声发射信号可以很好检测到铝合金振动疲劳的裂纹萌生和扩展寿命, 红外测得的温升值随着加速度增大是非线性的, 铝合金振动疲劳寿命依赖于结构振动频率、阻尼等参数。

**关键词:** 振动疲劳; 监测技术; 同步测量; 声发射; 红外热成像

中图分类号: V215.5

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2019.02.019

## Study on Synchronous Measurement of Vibration Fatigue of Aluminum Alloy

Peng Yantao<sup>1</sup>, Lü Shengli<sup>2</sup>, Ma Junfeng<sup>3</sup>, Li Bin<sup>2</sup>

(1. Department of Planning and Development, AVIC Aircraft Landing Gear Co., Ltd., Changsha 410200, China)

(2. National Key Laboratory of Science and Technology on UAV, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

(3. The Fifth Department, Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** With the continuous progress of the vibration test technology, the vibration fatigue test has a good test basis and can carry out the vibration fatigue simulation test under various environment. However, the current measurement methods of vibration fatigue can not meet the needs of in-depth study of vibration fatigue test. The method of synchronous measurement of vibration fatigue of aluminum alloy is put forward. At the same time, the vibration fatigue specimens of aluminum alloy under different accelerations are measured by infrared monitoring technology, acoustic emission technology, micro-test technique and strain testing technology. The changes of various measurement parameters with the damage are studied. It is concluded that different measurement parameters should be taken into account in different stages of vibration fatigue of aluminum alloys as the basis for judging damage. Acoustic emission signals can detect crack initiation and propagation life of vibration fatigue of aluminium alloy very well. The temperature rise measured by infrared is non-linear with the increase of acceleration. And a new phenomenon is found that the vibration fatigue life of aluminum alloys also depends on structural vibration frequency, damping and other parameters.

**Key words:** vibration fatigue; monitoring technology; synchronous measurement; acoustic emission; infrared thermography

收稿日期: 2019-01-06; 修回日期: 2019-03-17

通信作者: 吕胜利, lslv2003@nwpu.edu.cn

引用格式: 彭艳涛, 吕胜利, 马君峰, 等. 铝合金振动疲劳同步测量技术研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(2): 277-282.

Peng Yantao, Lü Shengli, Ma Junfeng, et al. Study on synchronous measurement of vibration fatigue of aluminum alloy[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(2): 277-282. (in Chinese)

## 0 引言

金属疲劳是损伤、累积和裂纹形成的过程,这一过程中消耗了能量,在宏观上表现为热耗散。热耗散反映了材料的塑性变形过程,而疲劳不同阶段的温度变化则体现了热耗散的规律。国内外学者对不同材料所开展的实验和数值模拟研究表明,热耗散与材料和加载状态存在密切关系,并与材料的微观组织演变有关,利用红外热像技术发展了预测材料疲劳极限的方法。骆志高等<sup>[1]</sup>讨论了声发射技术应用于疲劳裂纹的检测的可能性,根据疲劳裂纹的信号特征及测试场合,选用合适的疲劳裂纹检测方法,结合板簧疲劳裂纹试验机上的实验分析,得出声发射技术应用于疲劳裂纹检测的优势;黄学斌<sup>[2]</sup>对红外监测技术在氨制冷压力管道不停机全面检验、承压设备壁厚测量、泄漏检测或监控、液位检测、保温层检测、热弹性红外检测等方面的研究情况进行了总结,并对影响测量精度的因素进行了分析,展望了红外热像无损检测技术的应用前景;乔社娟等<sup>[3]</sup>提出了一种结合分流校准电路和长导线电阻补偿算法的策略,根据应变片配桥方式和粘贴形态的不同,计算出实际的长导线电阻阻值与应变片静态阻值,采用计算值进行应变补偿取代了传统各种试验前必须使用高精密校准仪器对整个系统进行校准;赵士龙等<sup>[4]</sup>采用红外成像技术,获取铝箔封口部位的红外图像,对所获的红外图像进行预处理,并以环形对称 Gabor 小波对其进行特征提取,用最近邻分类器对所获图像进行识别与分类处理,以此提出一种检测精度和检测效率高的铝箔封口密封完整性检测方法。

随着振动试验技术的不断进步,振动疲劳试验拥有了良好的试验基础,能够进行各种环境下的振动疲劳模拟试验。振动疲劳试验主要以通过对环

境激励的模拟,在实验室里得到试件的使用寿命,重点在于如何准确判断何时试件已经发生了破坏。但是,判断试验中试件发生振动疲劳破坏的方法和标准尚未达成统一认识。目前,在工程实践中,大多数研究都以出现可观测裂纹时的时间作为试件的疲劳寿命,但裂纹的观测长度具有不确定性。在试验中停机观测的裂纹长度随机性也比较大,这些都会给实验人员带来很大困难。从现有的资料来看,大多数研究是针对疲劳试验测试方法<sup>[5-11]</sup>,由于振动疲劳类型的多样性和复杂性,目前对振动疲劳试验方法的研究很少,常用振动疲劳寿命判断方法例如直接观测法、动态应变法和固有频率法,还无法满足振动疲劳试验研究的需求,迫切需要发展新方法和新技术。各种光学显微镜、扫描电子显微镜、激光表面仪、扫描探针显微镜以及红外设备等广泛应用于材料表面的分析测试,许多学者籍此进行了材料断口分析、裂纹扩展,热耗散分析等方面的研究。另外,为了研究损伤演化过程中表面形貌的变化,有些学者将力学加载试验机和显微观测设备整合起来。

本文同时采用红外监测技术、声发射技术、显微测试技术、应变测试技术等对不同加速度下的铝合金振动疲劳试样进行测量,综合分析各种测试方法的测试结果,研究振动疲劳损伤的变化情况,以期发现铝合金振动疲劳的新现象。

## 1 铝合金振动疲劳同步测量方案

### 1.1 振动疲劳试验同步测量系统的搭建

试验中所用铝合金材料为 2024T0,振动疲劳试件的标距长度  $L=20\text{ mm}$ ,宽度  $B=10\text{ mm}$ ,厚度  $T=3\text{ mm}$ 。试件尺寸如图 1 所示。

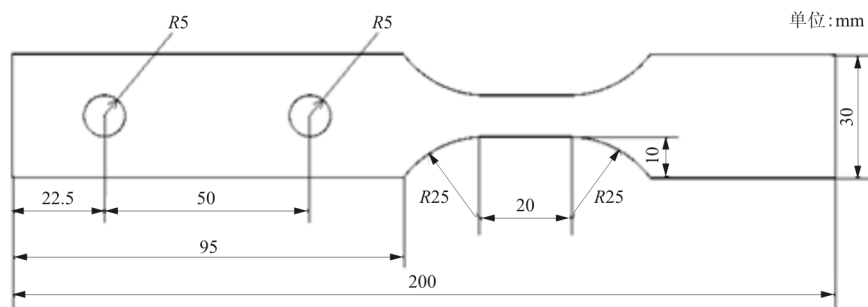


图 1 铝合金振动疲劳试件尺寸示意图

Fig. 2 Aluminum alloy specimen of vibration fatigue

铝合金振动疲劳实验装置如图 2 所示,将试验件置于振动台上,同时使用声发射检测系统、红外热像仪、测试显微镜、应变检测系统对试验件进行实时监测,其中红外热像仪和测试显微镜从正反两面监测特征部位的试验件表面,得到实时数据,并同时记录下所得数据,以便对试验件的性能进行多方位多角度的分析。通过多重手段可以更全面、更客观地了解试验件在加载时的性能指标变化情况。

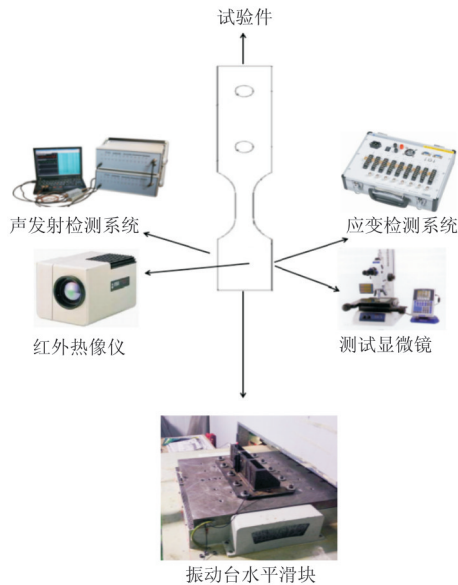


图 2 振动疲劳同步监测实验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of vibration fatigue synchronous testing system

## 1.2 同步测量试验参数设定

振动疲劳试验环境为室温大气环境,试验驻波频率为 145 Hz,通过加速度控制试件的应变范围。在试验前对所有试验设备进行标定,并通过少量的预先试验验证测试结果的正确性。另外,同一加速度的试件数量为 5 根,通过数据处理尽可能减小试样的寿命数据分散性。

在铝合金悬臂梁试件的振动疲劳过程中通过声发射仪采集声发射信号,采用美国 PAC 公司的 PCI-8 全数字声发射仪和 AEWin for PCI2 E3.10 软件对该材料进行损伤在线监测。传感器布置在试件根部 10 ~ 15 mm 处,传感器型号为 MICRO30S 型。声发射系统参数设置:固定阈值 60 dB,浮动门宽 6 dB;前置放大 40 dB;模拟滤波 1 ~ 3 MHz;波形采样率 1 MSPS,预触发 256  $\mu$ s,长度 1 k $\mu$ s;波形峰值定义时间(PDT)300  $\mu$ s,事件定

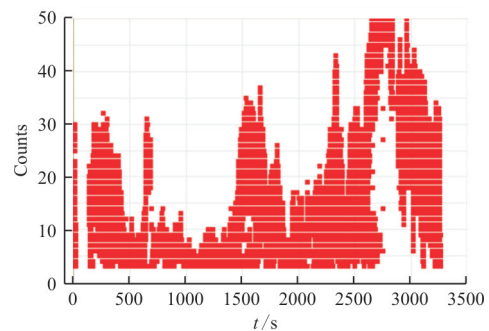
义时间(HDT)600  $\mu$ s,闭锁时间(HLT)1 000  $\mu$ s。采用如上参数进行背景噪音滤波,开展声发射的信号的同时监测试验,用于后期的振动疲劳裂纹萌生及扩展分析。

考虑到试验加载振动频率过高,在红外热成像监测中,试件采用表面做单面抛光、单面喷漆涂黑工艺处理方案和试样夹持端贴橡胶的隔热处理的策略,并确定红外热像仪监测参数及温度试验数据处理分析方案。试验中采用的是 FLIR 公司 Silver 420M 红外热像仪,该热像仪的波长范围 3 ~ 5  $\mu$ m,温度精度 25 mk,图像分辨率 320  $\times$  240 pix,选用镜头焦距 54 mm。

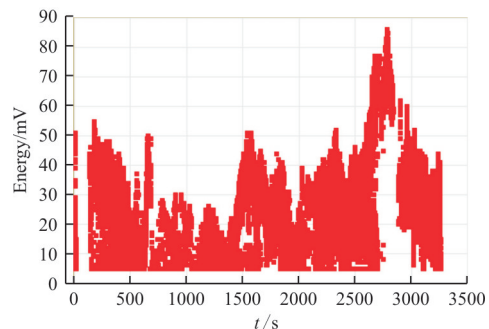
## 2 铝合金振动疲劳同步测量结果分析

### 2.1 声发射信号分析

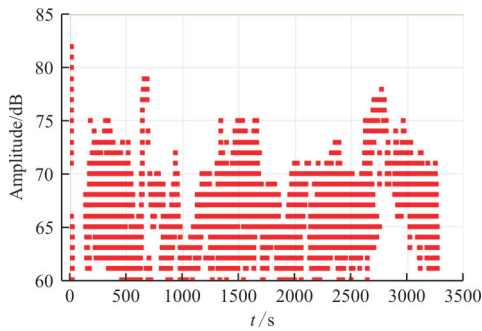
在铝合金振动疲劳过程中,声发射信号频率 350 kHz 以上的信号基本为噪音信号,铝合金疲劳损伤大多在 350 kHz 以下,机械噪音大多低于 100 kHz。本文采用波形滤波和多参数滤波对铝合金振动疲劳过程中的声发射信号进行降噪处理。声发射幅值、能量和振铃计数可以很好地表征振动疲劳的损伤过程,因此本文主要分析经过滤波后的幅值、能量、振铃计数参数特征值。声发射信号分析结果如图 3 所示。



(a) 声发射计数随时间的变化关系



(b) 声发射能量随时间的变化关系



(c) 声发射幅值随时间的变化关系

图 3 铝合金振动疲劳过程中典型声发射信号历程图

Fig. 3 AE signals history map during aluminum alloy vibration fatigue

声发射信号参数随时间的变化在整个振动疲劳过程中大概分为两个阶段:第一阶段,参数特征值变化呈现先上升后下降趋势,先达到最高,随着时间的增加,幅值、振铃计数和能量逐渐变密,随着时间增加,振铃计数大幅度减小,其幅值和能量密度也减小;第二阶段,幅值存在两个峰值,试验时间超过一定时间后,幅值变化趋于平缓;能量和振铃计数均为“单峰”,随后能量和振铃计数缓慢增加,直至试验结束。

声发射参数在整个振动疲劳过程中的变化与该铝合金悬臂梁的损伤形式有很大关系。在第一阶段结束,声发射计数、能量密度大幅度减小,幅值也随之减小。这是因为在微裂纹萌生末期至小裂纹稳定扩展初期,大量的微裂纹合并为主裂纹,裂纹数量减少,其声发射振铃计数也随之减少。在第二阶段,随着试验时间增大,裂纹稳定扩展,主裂纹产生的能量比微裂纹要大,因此,声发射能量和幅值、计数也随之增多,在某个时间点附近,声发射能量和计数都达到最大,初步判定此阶段为裂纹快速扩展初期,裂纹快速扩展导致大量的声发射信号产生。由此分析可知,该铝合金悬臂梁振动疲劳损伤过程中,在第一阶段结束时,为裂纹萌生期;在第二阶段至试验结束,为宏观裂纹扩展期。

## 2.2 试件表面温度场分析

在振动疲劳试验中,红外热像仪实时监测试件表面摄氏温度变化,通过监测试件周边环境(蓝色框 1)、试件标距段(绿色框 2)、试件过渡段(橙色框 3)及试件根部(灰色框 4)的温度变化,分析试件表面温度场的变化,如图 4 所示。

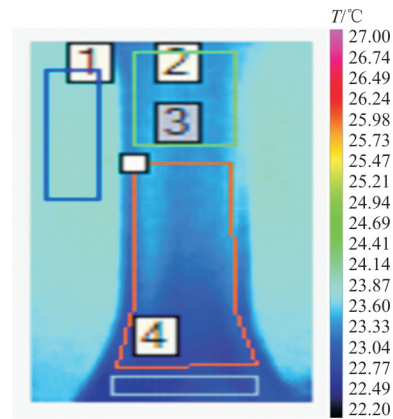


图 4 铝合金振动疲劳试件表面温度场

Fig. 4 Surface temperature field of aluminum alloy vibration fatigue specimen

在试件表面温度场中,试件过渡段表面温度最高,其次是标距段,试件根部温度最低。在整个振动疲劳过程中,温度变化分为三个阶段:第一阶段,试件表面温度迅速攀升至稳定段,在这个阶段中,由于大量的微裂纹成核及萌生,产生热耗散,导致试件表面温度急剧升高;第二阶段,试件表面温度先缓慢升高然后降低,这个过程中,微裂纹稳定扩展,并且微裂纹逐渐合并为主裂纹,裂纹数量减少,并且随着时间稳定扩展;第三阶段,试件表面温度缓慢升高维持稳定直至试样断裂,温度急剧降低,这是由于材料形成宏观裂纹并且快速扩展,最终导致试件表面温度场发生变化。由此分析可以判定:裂纹萌生主要在第一阶段,第二阶段为微裂纹扩展合并形成主裂纹,第三阶段为宏观主裂纹快速扩展至试件断裂失效。试验过程中典型红外信号试验结果如图 5 所示。

## 2.3 振动疲劳过程损伤分析

在铝合金悬臂梁试件的振动疲劳试验中,测试共振驻留试验与非共振试验的疲劳寿命,二者相差较大。在共振驻留试验中,最大应变随着循环次数快速增大,直至宏观裂纹快速扩展,应变急剧降低,试件失效破坏。而在非共振试验中,最大应变随着循环次数缓慢增长,随着循环次数增大,最大应变减小,宏观裂纹扩展,最后试件失效破坏,整个试验过程中,应变没有明显急剧变化。二者应变变化历程曲线如图 6 所示。

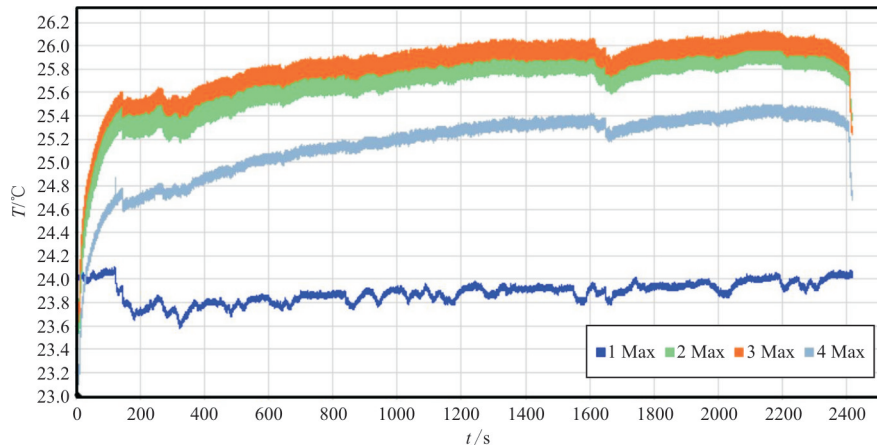


图 5 共振驻留试验的典型红外信号历程曲线

Fig. 5 Typical infrared signal history curves during resonance resident test

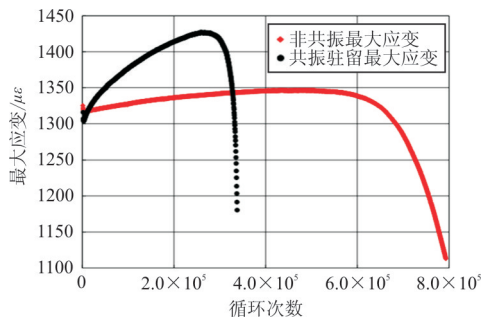


图 6 最大应变变化历程曲线对比(共振驻留与非共振试验)

Fig. 6 Max strain variation history curves

(resonance resident test vs. non-resonance test)

在振动疲劳过程中,综合红外信号、声发射信号及测试应变试验结果,结合材料表面显微形貌图像进行分析。振动疲劳历程中各物理量变化趋势如图 7 所示,可以看出:损伤形成、扩展及失效的变化历程。整个疲劳过程可以分成两个阶段:损伤形成阶段和裂纹萌生扩展阶段。

(1) 在损伤开始形成阶段,温度升速快,阻尼降速快,此阶段占整个疲劳寿命的 20%,在疲劳寿命的 1/3 阶段,由材料表面微观形貌可以观察到材料表面滑移带变深、加粗,并且声发射信号出现峰值,此时的温度升速减缓。

(2) 在微裂纹萌生、扩展,形成宏观裂纹阶段,此阶段占整个疲劳寿命的 60%,由显微形貌图可以看到,微裂纹生成,并且穿过晶壁,此时声发射出现另一组峰值,并且温度不再上升,共振频率开始缓慢的下降;在整个疲劳寿命的 90%时,可以观察到微裂纹在晶粒内部扩展,并且部分微裂纹穿过整

个晶粒,此时试验的阻尼降至最小,温度开始下降;试验结束,观察到材料表面有宏观裂纹产生,此时的共振频率下降 1%。

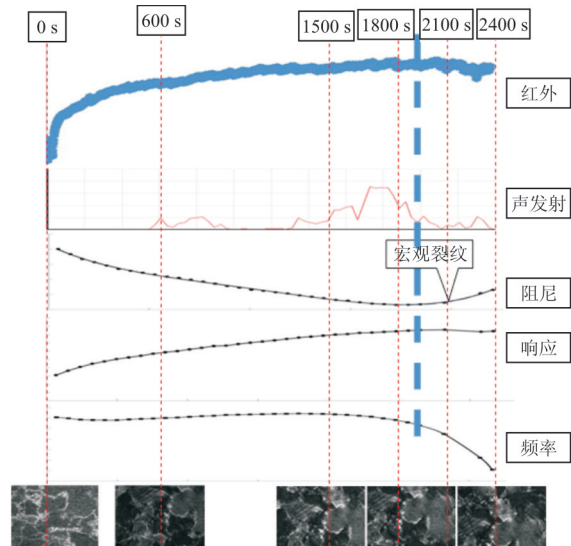


图 7 振动疲劳历程中各物理量变化趋势

Fig. 7 Trends of various physical parameters during the vibration fatigue process

### 3 结 论

(1) 铝合金振动疲劳过程中,不同阶段应主要考虑采用不同的参数作为判断依据,疲劳寿命可以看作依赖于应力、频率、阻尼等参数的函数。

(2) 铝合金振动疲劳过程中,温升值随着加速度增大是非线性的,并且加速度对温度场的影响较小。

(3) 噪音信号较为复杂,需要通过多种滤波手段处理信号,处理后的声发射信号可以很好检测到铝合金振动疲劳的裂纹萌生和扩展寿命。

### 参考文献

- [1] 骆志高, 李举, 王祥. 声发射技术在疲劳裂纹检测中的应用[J]. 制造技术与机床, 2008, 10(10): 34-38.  
Luo Zhigao, Li Ju, Wang Xiang. Application of AE on fatigue crack propagation[J]. Technology and Test, 2008, 10(10): 34-38. (in Chinese)
- [2] 黄学斌. 红外热像检测技术在承压设备检验中的应用[J]. 石油化工设备, 2014, 10(4): 76-82.  
Huang Xuebin. Application of infrared thermography detection technique in pressure equipment inspection[J]. Petro-Chemical Equipment, 2014, 10(4): 76-82. (in Chinese)
- [3] 乔社娟, 邓利红, 王成, 等. 应变测试系统分流校准方法设计[J]. 测控技术, 2016, 11(7): 17-20.  
Qiao Shejuan, Deng Lihong, Wang Cheng, et al. Design on shunt calibration method for strain measurement system[J]. Measurement & Control Technology, 2016, 11(7): 17-20. (in Chinese)
- [4] 赵士龙, 李维军, 石成江. 基于红外成像技术的铝箔封口密封完整性检测研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2018, 38(2): 80-84.  
Zhao Shilong, Li Weijun, Shi Chengjiang. Research on the integrity detection of aluminum foil sealing based on infrared imaging technology[J]. Journal of Liaoning Shihua University, 2018, 38(2): 80-84. (in Chinese)
- [5] Annual Book of ASTM Standard: Part 10[M]. Easton, Md., ASTM, 1982.
- [6] Luong M P. Fatigue limit evaluation of metals using an infrared thermographic technique[J]. Mechanics of Materials, 1998, 28(1): 155-163.
- [7] Krapez J C, Pacou D, Gardette G. Lock-in thermography and fatigue limit of metals[C]// Quantitative infrared thermography. Balageas D, Beaudoin J L, Busse G, Carlomagno G M, 2000: 277-282.
- [8] Yang B, Liaw P K, Wang H, et al. Thermographic investigation of the fatigue behavior reactor pressure vessel steels[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 314(1): 131-139.
- [9] De Guang Shang. Measurement of fatigue damage based on the natural frequency for spot-welded joints[J]. Materials and Design, 2009, 30(6): 1008-1013.
- [10] 姚磊江, 童小燕, 吕胜利. 金属低周疲劳的能量耗散与热发射[J]. 机械科学与技术, 2003, 22(5): 799-801.  
Yao Leijiang, Tong Xiaoyan, Lü Shengli. On energy dissipation and thermal emission of metals under low cycle fatigue[J]. Mechanical Science and Technology, 2003, 22(5): 799-801. (in Chinese)
- [11] 姚磊江, 陈胜红, 童小燕. 纯铜疲劳热耗散的同步测量研究[J]. 固体力学学报, 2008, 29(4): 361-364.  
Yao Leijiang, Chen Shenghong, Tong Xiaoyan. Synchronized inspection on the thermal dissipation of pure copper subjected to fatigue[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29(4): 361-364. (in Chinese)

### 作者简介:

**彭艳涛**(1973—),男,硕士,工程师。主要研究方向:飞机起落架强度、项目管理等。

**吕胜利**(1966—),男,博士,教授。主要研究方向:飞行器结构强度、振动疲劳、腐蚀疲劳等。

**马君峰**(1965—),男,博士,研究员。主要研究方向:飞行器结构强度、振动疲劳等。

**李斌**(1983—),男,博士,工程师。主要研究方向:飞行器结构强度、振动疲劳等。

(编辑:赵毓梅)