

惯性器件加速试验环境谱编制与数据处理方法研究

陈源¹, 朱蕾¹, 朱启举², 张世艳¹, 杨朝明², 黄波¹

(1. 西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2. 西安现代控制技术研究, 西安 710065)

摘要: **目的** 研究模拟惯性器件贮存环境温度变化的加速环境谱与加速试验方法。**方法** 监测样品贮存环境温度应力变化的同时,检测样品性能的变化,通过雨流计数法将温度变化曲线转化为温度环境谱后再转换为加速环境谱,依照加速环境谱开展试验,通过试验结果与自然贮存样品性能比对,开展试验样品性能评价。**结果** 以2012年某试验库房的温度数据为例,通过转换得到了模拟惯性器件贮存环境的环境谱和加速环境谱,并得到了用于指导惯性器件加速试验的方法。**结论** 将雨流计数法用于处理惯性器件经历的温度曲线,转化得到的加速试验方法,可以较好地模拟惯性器件贮存实际经历的温度变化过程,指导对惯性器件的性能变化趋势进行预测和评价。

关键词: 加速试验; 加速环境谱; 雨流计数法

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.01.016

中图分类号: TJ07; TG174 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)01-0086-05

Accelerated Test Environmental Spectra and Data Processing Method of Inertial Components

CHEN Yuan¹, ZHU Lei¹, ZHU Qi-ju², ZHANG Shi-yan¹, YANG Chao-ming², HUANG Bo¹

(1. South West Institute of Technical Engineering, Chongqing 400039, China;

2. Xi'an Advanced Control Technologies Research Institute, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: **Objective** To study accelerated environment spectra and accelerated test method that could simulate temperature change in the storage environment of inertial navigation components. **Methods** The characteristic parameter change of products was simultaneously tested when monitoring the temperature stress change of the storage environment, and the temperature change curve was converted into temperature environment spectra and then accelerated environment spectra by rainflow cycle counting algorithm. Accelerated test was performed according to the accelerated environment spectra, and the performance assessment of the product was conducted by comparing the results of accelerated test and natural storage test. **Results** Using the temperature data monitored in a test storage room in 2012

收稿日期: 2015-09-17; 修订日期: 2015-10-08

Received: 2015-09-17; Revised: 2015-10-08

作者简介: 陈源(1986—),男,重庆人,工程师,主要研究方向为环境试验与可靠性。

Biography: CHEN Yuan(1986—), Male, from Chongqing, Engineer, Research focus: environment test and reliability.

通讯作者: 朱蕾(1969—),女,研究员,主要研究方向为材料环境试验与环境适应性评价。

Corresponding author: ZHU Lei(1969—), Female, Professor, Research focus: material environment adaptation test and evaluation.

as an example, the environment spectra and accelerated environment spectra of the simulated storage environment of inertial components were obtained by conversion, and the method to guide accelerated test of inertial components was also obtained. **Conclusion** The accelerated test method obtained by conversion using rainflow cycle counting algorithm to deal with temperature stress of inertial components could well simulate the actual temperature change during the storage of inertial navigation components, and would be able to evaluate the life and capability change of inertial navigation components.

KEY WORDS: accelerated test; accelerated environment spectra; rain flow cycle counting algorithm

国外从20世纪50年代初采用单应力模拟的研制试验与鉴定试验,到20世纪70年代开始采用综合应力模拟试验,模拟试验一直都是保障可靠性的主要试验手段。模拟试验通过模拟真实环境来确保可靠性,但其效率问题一直是关注的焦点^[1]。针对这一问题,1967年美国罗姆航展中心提出了加速寿命试验方法^[2],1988年美国HOBBS^[3]提出了高加速寿命试验和高加速应力筛选。这三项试验形成了完整的加速试验的技术体系,然而,加速试验同样存在对样品实际贮存环境模拟性较差的问题。样品的实际贮存都是在一定环境下进行的,每个贮存环境都有它的特殊性。库房的贮存环境往往以年为单位循环变化,将样品贮存经历1年(或几年)的环境数据记录下来并进行统计分析,通过相关技术转换得到环境谱,在此基础上再转换为加速环境谱,就可以形成模拟惯性器件实际贮存并可用于指导惯性器件开展加速试验的方法。

1 贮存试验库房温度统计分析

在贮存环境下的惯性器件,惯性器件振动应力的影响可以忽略不计^[4-5],由于其密封在包装箱内且具有湿度指示,可认为湿度较低,即只考虑温度应力对惯性器件的影响^[6]。与电子产品类似,在试验中运用温度、电压操作常常是对产品失效最有效的加速因子。由于温度是影响惯性器件输出特性的主要因素,惯性器件的一些核心部件对温度都较为敏感,因而选用温度作为加速应力并作为统计分析的主要因素。

以某试验库房在2012年度温度监测数据为例,绘制该过程温度应力的变化曲线如图1所示。在对贮存库房的温度应力统计分析前,对监测的温度数据进行预处理,检查温度数据是否有异常。对温度监测数据进行统计分析,获取温度监测数据的均值、幅值二元随机变量的分布信息,并以分布信息为基础编制温度环境谱^[7]。结合温度特性确认试验的结果,将环境谱转换为用于指导惯性器件加速试验的加速环境谱。

对温度监测数据采用雨流计数法^[8-9]进行计数统计,温度应力采用幅值、均值的二维表述,截取循环的

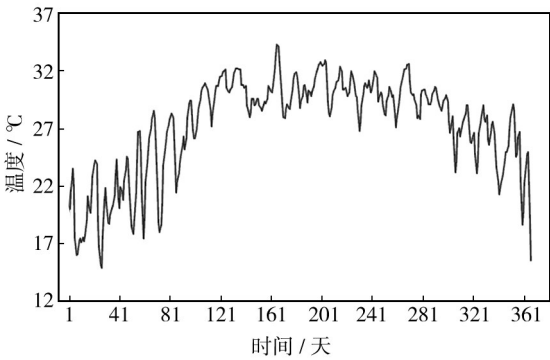


图1 2012年试验库房温度监测曲线
Fig.1 Temperature monitoring curve of the test storage room in 2012

均值、幅值、起止时间等相关信息,以一月份前10天为例的循环截取方法如图2所示,截取所得数据见表1。对截取的幅值和均值的两个边缘分布进行估计,考虑两者之间的相关性,获取幅值和均值的二维概率密度函数。

表1 一月份前10天循环截取数据
Table 1 The first 10 days' cycle data cut from January

循环序号	幅值/℃	均值/℃	循环个数	循环起始时间/天	循环周期/天
1	0.85	20.85	0.5	0	2
2	0.75	22.75	1	2	2
3	0.05	16.05	1	5	2
4	0.05	17.35	1	4	6
5	2.15	19.55	0.5	1	14
6	0.15	17.25	0.5	8	2

通过参数估计与检验,温度应力均值服从正态分布,记为 $g(x)$;幅值服从威布尔分布,记为 $w(y)$ 。

$$g(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right]$$
 (1)

$$w(y)=\frac{m}{\eta}\left(\frac{y}{\eta}\right)^{m-1}\exp\left[-\left(\frac{y}{\eta}\right)^m\right]$$
 (2)

式中: μ 为服从正态分布的截取循环的温度应力均值的均值; σ 为标准方差; m 为服从威布尔分布的截

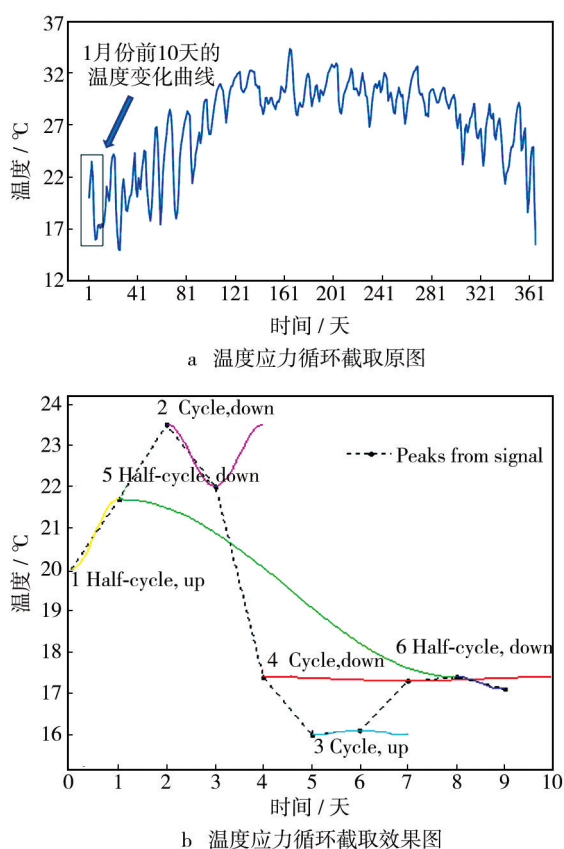


图2 一月份前10天的温度应力循环截取

Fig.2 The first 10 days' temperature stress cycle cut from January

取循环的温度应力幅值的形状系数; η 为尺度系数。

对截取的2012年温度截取循环的均值、幅值进行参数估计可得,温度均值服从 $N(26.8, 4.4)$ 的正态分布,幅值服从 $W(1.1, 0.3)$ 的威布尔分布。温度均值、幅值的分布直方图及温度均值-幅值三维柱状图如图3所示。

当温度的均值、幅值两变量基本不相关或弱相关时,试验库房温度应力联合概率密度函数为:

$$f(x, y) = g(x)w(y) \quad (3)$$

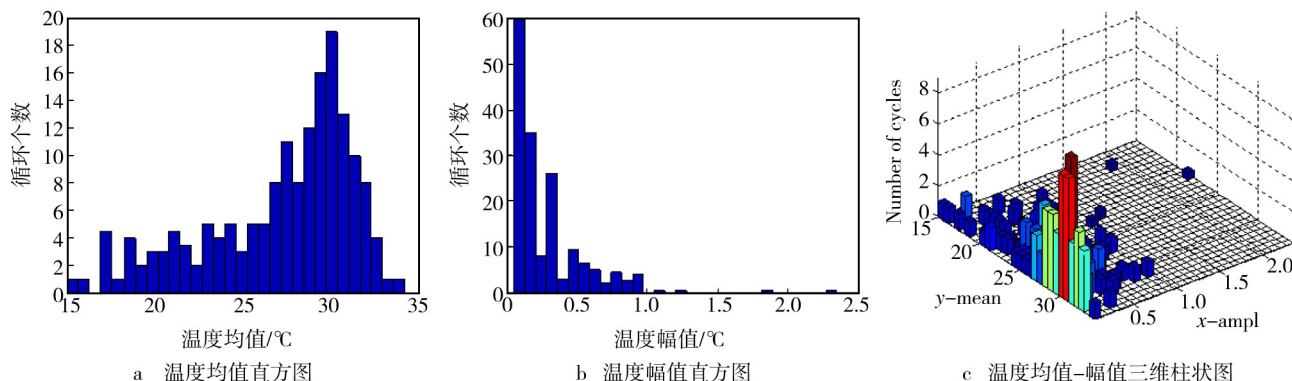


图3 温度均值、幅值直方图及温度均值-幅值三维柱状图

Fig.3 Histogram of temperature mean value and amplitude and 3D column of temperature mean value vs. amplitude

式中: $g(x)$ 为温度均值的分布函数; $w(y)$ 为温度幅值的分布函数; $f(x, y)$ 为温度均值与幅值的联合分布函数。

2 基于温度变化曲线的环境谱的编制

根据最大值出现的概率为 10^{-6} 的原则,采用概率密度法计算温度应力幅值和均值的最大值:

$$\int_{x_{\max}}^{\infty} \int_{y_{\max}}^{\infty} f(x, y) dx dy - 1.0 \times 10^{-6} = 0 \quad (4)$$

式(4)是超越方程,在均值和幅值相互独立时,可以分别转化为求均值最大值和幅值最大值。温度幅值和均值分别服从威布尔分布和正态分布,由式(5)^[10]可得幅值最大值为3.37,均值最大值为47.58。

$$\begin{cases} x_{\max} = \beta^{\alpha} \sqrt{-\ln P} \\ y_{\max} = U_p \delta + \mu \end{cases} \quad (5)$$

式中: P 已知时可由标准正态分布得到,最大值出现时概率 $P = 1 \times 10^{-6}$ 。

对温度应力进行分级,温度均值采用等间距法分级,级间距为:

$$\Delta S = 2(S_m^1 - \bar{S})/7 \quad (6)$$

式中: $\bar{S}$ 为应力均值的波动中心,由统计计数处理得到; S_m^1 为应力均值最大值。

温度幅值采用不等间距法分级,各级应力幅值水平 S 为:

$$S_i = \varphi_i S_m^2, (i, 1, 2, \dots, 8) \quad (7)$$

式中: φ_i 为 Conover 比值系数,取 1.000, 0.950, 0.850, 0.725, 0.575, 0.425, 0.275, 0.125; S_m^2 为温度幅值最大值,分级得到的均值、幅值各级水平见表2。

将温度应力分成标准八级,各级应力水平的循环次数 N 可以通过二维联合概率密度函数的积分并乘

表2 温度均值、幅值分级表
Table 2 Classification of temperature mean value and amplitude

等级	均值/℃	幅值/℃	等级	均值/℃	幅值/℃
1	5.95	0.42	5	29.74	2.44
2	11.90	0.93	6	35.68	2.86
3	17.84	1.43	7	41.63	3.20
4	23.79	1.93	8	47.58	3.37

以总频数得到,即:

$$n_{ij} = n \int_{S_{i-1}^2}^{S_i^2} \int_{S_{j-1}^1}^{S_j^1} f(x,y) dx dy \tag{8}$$

式中: S_{i-1}^2, S_i^2 为第*i*组幅值的下限、上限; S_{j-1}^1, S_j^1 为第*j*组均值的下限、上限。

对各级应力水平分别积分计算,可以得到温度环境谱,将环境谱转换为产品贮存1年的贮存环境剖面如图4所示。

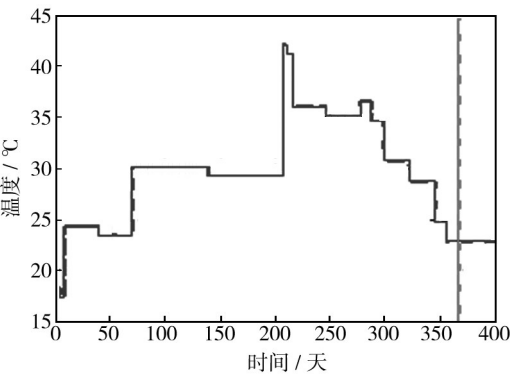


图4 模拟惯性器件贮存1年的环境剖面
Fig.4 Environment section simulating 1-year storage of inertial navigation components

3 惯性器件加速环境谱的编制

加速试验要求在加速应力下产品的失效机理保持不变^[11]。失效机理的一致性通过试验设计保证,即要求加速寿命试验中的最高应力等级不能高于产品的破坏极限^[12]。惯性制导元器件是由电子器件、光学器件、非金属粘接件等多种材料和结构组成^[13]。试验前,通过产品材料特性及组成结构分析,弄清材料的温度影响特性。通过产品温度特性确认试验确定产品的工作应力极限和温度特性,以保证试验剖面所经历的最高温度不超过温度特性试验所确定的最高温度为原则^[14]。编制过程中,根据转换得到的贮存试验库房的温度环境谱,将试验基准线在模拟贮存环境试

验温度基础上增加 60 ℃的加速应力,转化得到的模拟贮存环境的加速环境谱见表3。

表3 模拟自然贮存环境的加速环境谱
Table 3 Accelerated environment spectra of simulated natural storage environment

起始时间/h	停止时间/h	温度/℃	起始时间/h	停止时间/h	温度/℃
0	1.95	78.32	105.75	121	96.12
1.95	3.95	77.36	121	136.25	95.28
3.95	19.2	84.32	136.25	141.4	96.68
19.2	34.45	83.48	141.4	146.55	94.72
34.45	68.1	90.16	146.55	158.1	90.76
68.1	101.8	89.32	158.1	169.65	88.76
101.8	103.75	102.12	169.65	174.85	84.76
103.75	105.75	101.16	174.85	180	82.8

试验过程中,以完成 180 h 的加速试验为 1 个周期,湿度控制在 30% 以下。初始循环数设置为 16 个,试验总时间 2880 h。

4 试验数据处理

数据处理使用加速转换因子法^[15]进行分析。加速因子法(AF)只表明某一点的加速倍率,不能反应整个寿命内的加速性,自然贮存和模拟加速试验之间,其加速性不是传统所讲的那样,即“一周期加速试验相当于自然试验多少年”,实际加速倍率通常随时间呈动态变化。加速转换因子法(ASF)能够较好地反应加速倍率随时间动态变化的过程。

以时间为横坐标,参数性能为纵坐标作时间响应曲线,并对两条曲线进行拟合,取不同性能值,得到相对应的室内模拟加速试验时间(*t*)和自然环境试验时间(*T*)。如果所拟合的两种曲线置信度高,时间*t*(或*T*)可通过拟合的两个方程计算;如果置信度不高,可直接从图上取各*T*(或*t*)值,再以*t*为横坐标,以*T/t*为纵坐标作图,或通过回归分析,得到ASF随时间*t*的变化规律,即ASF=*f*(*t*)。

分别对惯性器件自然贮存的关键指标(通常取零偏或标度因素)随试验时间的变化数据及加速寿命试验的相应指标随试验时间的变化数据,以时间为横坐标,性能指标为纵坐标进行拟合,结果如式(9),(10)所示。

$$y_{\text{自然}} = A t_{\text{自然}}^{-B} \tag{9}$$

$$y_{\text{加速}} = a t_{\text{加速}}^{-b} \tag{10}$$

式中: $y_{\text{自然}}$ 为自然贮存指标的保留率; $y_{\text{加速}}$ 为加速寿

命试验指标的保留率; $t_{\text{自然}}$ 为自然贮存试验时间,h; $t_{\text{加速}}$ 为加速寿命试验时间,h; A, B, a, b 为可以计算的系数。

根据式(9),(10),计算不同试验中达到相同的指标的时间,90%,80%,75%,70%,65%,60%,55%,50%对应的自然贮存试验时间和加速寿命试验时间分别表示为 $t_{\text{自然}1} \sim t_{\text{自然}8}$ 和 $t_{\text{加速}1} \sim t_{\text{加速}8}$ 。

以加速寿命试验时间 $t_{\text{加速}}$ 为横坐标,以达到相同指标的自然贮存试验时间与加速寿命试验时间的比值 $t_{\text{自然}}/t_{\text{加速}}$ 为纵坐标,进行回归分析,得到ASF随加速试验时间 t 的变化规律,如图5所示。

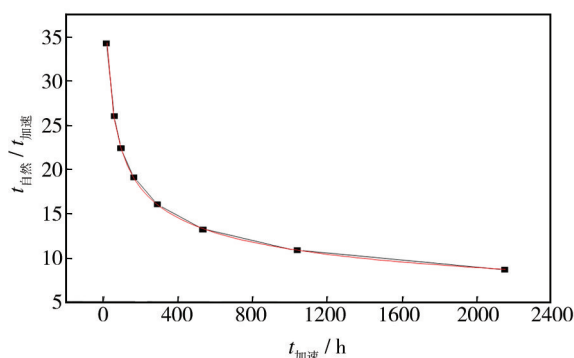


图5 ASF随时间变化曲线

Fig.5 ASF line

由图5进行回归分析,得式(11):

$$ASF_{\text{自然-加速}} = \alpha t_{\text{加速}}^{-\beta} \quad (11)$$

式中: $ASF_{\text{自然-加速}}$ 为以惯导器件的性能指标为评定依据的加速寿命试验对应于自然贮存试验的加速倍率; $t_{\text{加速}}$ 为加速寿命试验时间,h; α, β 为可以计算的系数。

5 结语

根据加速转换因子法分析得到的结果,可以分析惯性器件的性能退化规律;通过对技术指标要求和失效阈值的比较,可以对贮存环境应力影响和惯性器件寿命进行评价,为贮存环境条件的改善、惯性器件性能评价提供支撑。基于温度应力变化的贮存环境加速试验方法,可以有效模拟产品贮存经历的实际温度变化过程,使得到的试验结果有更好的参照性。由于温度变化应力数据处理的复杂性,基于温度变化应力的数据处理方法尚需进一步的优化和完善。

参考文献:

[1] 陈循,张春华.加速试验技术的研究、应用与发展[J].机械工程学报,2009,45(8):130—136.

CHEN Xun, ZHANG Chun-hua. Research, Application and Development of Accelerated Testing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(8): 130—136.

[2] YURKOWSKY W, SCHAFFER R E, FINKELSTEIN J M. Accelerated testing technology[R]. Technical Report NO.RADC-TR-67-420 Rome Air Development Center, 1967.

[3] HOBBS G K. Accelerated Reliability Engineering: HALT and HASS[M]. New York: Wiley, 2001.

[4] 张春华,温熙森,陈循.加速寿命试验综述[J].兵工学报,2004,25(4):485—490.

ZHANG Chun-hua, WEN Xi-sen, CHEN Xun. A Comprehensive Review of Accelerated Life Testing[J]. Acta Armamentarii, 2004, 25(4): 485—490.

[5] 李迪凡,封先河,刘聪.某型导弹尾翼弹簧贮存寿命评估[J].装备环境工程,2012,9(2):1—3.

LI Di-fan, FENG Xian-he, LIU Cong. Storage Life Evaluation of Empennage Springs[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(2): 1—3.

[6] 陈海建,徐廷学,李波,等.导弹加速寿命试验方法研究[J].装备环境工程,2010,7(5):115—118.

CHEN Hai-jian, XU Ting-xue, LI Bo, et al. Research on Method of Missile Accelerated Life Test[J]. Equipment Environment Engineering, 2010, 7(5): 115—118.

[7] 易当祥,李祥臣,田春祥,等.导弹产品湿热载荷统计分析与载荷谱设计[J].强度与环境,2013,40(1):50—53.

YI Dang-xiang, LI Xiang-chen, TIAN Chun-xiang, et al. Storage Environment Load Statistical Analysis and Load Spectrum Design for the Missile Production[J]. Structure and Environment Engineering, 2013, 40(1): 50—53.

[8] NIESŁONY A. Determination of Fragments of Multiaxial Service Loading Strongly Influencing the Fatigue of Machine Components[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2009, 23(8): 2712—2721.

[9] 高云凯,徐成民,方剑光.车身台架疲劳试验程序载荷谱研究[J].机械工程学报,2014,50(4):92—98.

GAO Yun-kai, XU Cheng-min, FANG Jian-guang. Study on the Programmed Load Spectrum of the Body Fatigue Bench Test[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(4): 92—98.

[10] 王亚辉,李晓刚.基于步进应力的火工品加速贮存试验研究[J].装备环境工程,2013,10(1):38—40.

WANG Ya-hui, LI Xiao-gang. Study on Accelerated Storage Life Test of Initiating Explosive Device Based on Step Stress Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2013, 10(1): 38—40.

[11] 上官芝,付桂翠,万博.基于加速性能退化的元器件贮存寿命预测[J].电子产品可靠性与环境试验,2009,27(5):32—36.

(下转第107页)

2) 得出了真空铝钎焊微通道冷板的一维等效热阻范围。

3) 在一般情况下,增材制造冷板内部结构的规整性以及工艺的可控性要好于真空钎焊的冷板。

4) 增材制造微通道冷板具有各方面的良好特性,具有更好的应用前景,将是以后进一步研究的重点方向。

参考文献:

- [1] MASOUD A, XIE G, BENGT S. A Review of Heat Transfer and Pressure Drop Characteristics of Single and Two-phase Microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 79: 34—53.
- [2] YANG Z, PEGA S H. Single-phase and Two-phase Flow Pressure Drop Inthe Vertical Header of Microchannel Heat Exchanger[J]. International Journal of Refrigeration, 2014, 44: 12—22.
- [3] DAI Z, DAVID F F, BRIAN S H. Impact of Tortuous Geometry on Laminar Flow Heat Transfer in Microchannels [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 83: 382—398.
- [4] YANG Shan-shan, ZOU Ming-qing, LIANG Ming-chao. A Fractal Analysis of Laminar Flow Resistance in Roughened Microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2014, 77: 208—217.
- [5] LEELA V V, RAJAN K S. Computational Analysis of New Microchannel Heat Sink Configurations[J]. Energy Conversion and Management, 2014, 86: 595—604.
- [6] CHANG Y P, YONGHEE J, BOSUNG K, et al. Flow Boiling Heat Transfer Coefficients and Pressure Drop of FC-72 in Microchannels[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2012, 39: 45—54.
- [7] LIU Yang-peng, XU Guo-qiang, SUN Ji-ning, et al. Investigation of the Roughness Effect on Flow Behavior and Heat Transfer Characteristics in Microchannels[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 83: 11—20.
- [8] EWA R, ZIBIGNIEW L, WLODZIMIERZ F. Influence of the Manufacturing Technology on Microchannel Structure Efficiency[J]. Materials Science and Engineering B, 2011, 176: 311—315.
- [9] 王昂,公茂琼,吴剑峰. 基于3D打印的微微型混合工质J-T制冷器实验研究[J]. 工程热物理学报, 2015, 36(3): 600—604.
WANG Ang, GONG Mao-qiong, WU Jian-feng. Experimental Investigation on a 3D Print Made Microminiature Mixed Refrigerant J-T Cooler[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2015, 36(3): 600—604.
- [10] RAVI E, BRIAN K P. Silver Nanoparticle-assisted Diffusion Brazing of 3003 Al Alloy for Microchannel Applications[J]. Materials and Design, 2012, 36: 13—23.
- [11] DAEKEON A, JIN-HWE K, JINHO C, et al. Quantification of Surface Roughness of Parts Processed by Laminated Object Manufacturing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212: 339—346.
- [12] GIOVANNI S, LIANG H, RICHARD M E, et al. Surface Roughness Analysis, Modelling and Prediction in Selective Laser Melting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213: 589—597.
- [13] 卢秉恒,李涤尘. 增材制造(3D打印)技术发展[J]. 机械制造与自动化, 2013, 42(4): 1—4.
LU Bing-heng, LI Di-chen. Development of the Additive Manufacturing (3D Printing) Technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42(4): 1—4.
- [14] 余冬梅,方奥,张建斌. 3D打印:技术和应用[J]. 金属世界, 2013(6): 6—11.
YU Dong-mei, FANG Ao, ZHANG Jian-bin. 3D Printing: Technology and Application[J]. Material World, 2013(6): 6—11.
- [15] 余前帆. 增材制造——3D打印的正称[J]. 中国科技术语, 2013, 46(4): 46—52.
YU Qian-fan. Additive Manufacturing——the Formal Designation of 3D Printing[J]. China Terminology, 2013, 45 (4): 46—52.

(上接第90页)

- SHANG GUAN Zhi, FU Gui-cui, WAN Bo. Component Storage Life Prediction Based on Accelerated Performance Degradation[J]. Electronic Product Reliability and Environment Testing, 2009, 27(5): 32—36.
- [12] 袁宏杰,李楼德,段刚,等. 加速度计贮存寿命与可靠性的步进应力加速退化试验评估方法[J]. 中国惯性技术学报, 2012, 20(1): 113—116.
YUAN Hong-jie, LI Lou-de, DUAN Gang, et al. Storage Life and Reliability Evaluation of Accelerometer by Step Stress Accelerated Degradation Testing[J]. Journal of Chinese Iner-

tial Technology, 2012, 20(1): 113—116.

- [13] 李海波,张正平,黄波,等. 导弹贮存试验技术与贮存可靠性评估方法研究[J]. 质量与可靠性, 2006, 6: 21—23.
LI Hai-bo, ZHANG Zheng-ping, HUANG Bo, et al. Research on the Storage Life Testing and the Assessing Method of Storage Reliability for Missile[J]. Quality and Reliability, 2006 (6): 21—23.
- [14] 宣卫芳. 装备与自然环境试验(提高篇)[M]. 北京:航空工业出版社, 2011.
XUAN Wei-fang, et al. Equipment and Natural Environment Test[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2011.