

不同环境下包装容器内温湿度变化试验研究

王竟成^{1,2}, 李军念¹, 张伦武¹, 张丁非³

(1.西南技术工程研究所, 重庆 400039; 2.甘肃敦煌大气环境材料腐蚀国家野外科学观测研究站, 甘肃 敦煌 736202; 3.重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要: **目的** 探究不同环境下密闭容器内微环境的变化规律。**方法** 通过连续采集室内存放、户外遮盖、户外暴露3个包装容器内外11个监测点的温湿度数据, 对比分析不同容器内温度、湿度的分布与变化规律。**结果** 户外容器日间温度梯度大, 昼夜温差高达30℃, 温度波动远大于室内容器的1.1℃, 篷布遮盖能降低20%的温度波动。容器内相对湿度不受环境湿度影响, 但与温度强烈负相关。**结论** 太阳辐射的热效应对包装容器内温湿度的变化与分布有决定性影响, 应加强防护措施。

关键词: 包装容器; 温度; 湿度; 环境试验; 变化规律

中图分类号: TB484.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2021)07-0125-05

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2021.07.019

Experimental Study on Variation of Temperature and Humidity in Packaging Container under Different Environments

WANG Jing-cheng^{1,2}, LI Jun-nian¹, ZHANG Lun-wu¹, ZHANG Ding-fei³

(1. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400039, China;

2. Dunhuang, Materials Corrosion, National Observation and Research Station, Dunhuang 736202, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, 400044, China)

ABSTRACT: In order to investigate the variation of micro-environment in airtight packaging container under different conditions, a container is placed in warehouse and two containers are placed outdoors, of which one is shielded while another is exposed. Eleven observation points are set to monitor their temperature and humidity. These data are compared and analyzed to reveal the variation rules. Results show that the outdoor container has large temperature gradient in daytime, and its temperature difference goes up to 30℃ between day and night, which is far higher than the one in warehouse by 1.1℃. The temperature fluctuation can be reduced by 20% by covering with tarpaulin. The relative humidity inside the container is free from outer humidity, but it has intensive negative correlation with temperature. The thermal effect of solar radiation has determinative influence on temperature and humidity variation in outdoor containers, so protection measures should be strengthened.

KEY WORDS: packaging container; temperature; humidity; environmental test; variation

收稿日期: 2021-03-28; 修订日期: 2021-05-06

Received: 2021-03-28; Revised: 2021-05-06

基金项目: 重庆市博士后日常经费资助

Fund: Supported by the Chongqing Postdoctoral Fund

作者简介: 王竟成(1991—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为装备环境工程。

Biography: WANG Jing-cheng (1991—), Male, Doctor, Senior engineer, Research focus: equipment environmental engineering.

引文格式: 王竟成, 李军念, 张伦武, 等. 不同环境下包装容器内温湿度变化试验研究[J]. 装备环境工程, 2021, 18(7): 125-129.

WANG Jing-cheng, LI Jun-nian, ZHANG Lun-wu, et al. Experimental study on variation of temperature and humidity in packaging container under different environments[J]. Equipment environmental engineering, 2021, 18(7): 125-129.

自然环境试验是支撑装备及产品自主创新发展的必要手段,是服务国防和国民经济建设的国家重大基础技术^[1]。这项工程技术不仅是评价装备和材料性能的重要手段,也是保障产品质量的重要环节。自然环境试验和研究获得的数据与规律,准确可靠,符合使用实际,对于产品合理选材、正确选择防护措施、延长使用寿命、减少经济损失都具有十分重要的意义。通过自然环境试验技术掌握各种环境的性质、特征和变化规律,分析各种环境对产品的影响,以调节和控制它们与环境的相互关系,能有效提高产品的环境适应性^[2]。行业内众多专家学者对自然环境试验的试验特点^[3-4]、试验实施^[5-6]及其在产品研制生产过程中的应用^[7]进行了探讨。

影响产品性能的自然环境因素很多,其中温度、湿度^[8-9]和太阳辐射是最主要、普遍的三大因素。重要产品在使用和贮存过程中,采用密闭包装容器对产品提供防护是常见的技术手段。自然环境下,包装容器内部的微环境信息对于产品的定寿、延寿、维护等至关重要。温度能改变产品的物理化学特性:高温引发材料软化、干裂,气体膨胀,金属氧化等;低温引发橡胶硬化、材料脆裂、油脂变黏发稠等;温度交变会诱发裂纹萌生、界面开裂、凝水结霜等现象。湿度是表征大气潮湿程度的参量。高湿会加速金属腐蚀,电气绝缘性能降低;低湿使产品产生干裂、脆化、粉化和静电;干湿交替会加速材料返潮与电化学腐蚀。太阳辐射对产品的影响主要包括热效应和光化学效应,文中仅研究太阳照射引起容器的辐射升温。

本研究针对密闭包装容器在户外暴露、户外遮蔽和室内存放3种工况,采用传感器采集、记录环境与容器内部的温湿度数据。通过数据处理与对比分析,掌握容器在不同条件下的温湿度分布、变化规律,从

而为产品的使用和维护提供数据支撑,同时也为下一步的数值模拟、分析预测工作提供宝贵的试验验证。

1 试验

1.1 试验器件

包装容器由外筒体、端盖、底座、内筒、木托、传感器支架、热负载(橡胶)、密封条等组成。底座用 Q235 钢材焊接成形,表面采用热浸锌工艺防腐蚀。三棱柱式传感器支架用钢条焊接,用于固定温湿度传感器。外筒体采用 6 系列铝合金板材卷焊成圆筒,外径为 850 mm,长度为 1000 mm,两端焊接 16 mm 厚的法兰盘,配备 10 mm 厚的铝合金端盖,整体刷涂绿色聚氨酯涂料漆。端盖与外筒体之间采用螺栓螺杆连接,并使用橡胶圈密封,保证容器的气密性。用 100 kg 橡胶作为模拟产品的热负载卷入内筒,置于容器内木托上。试验实施前,利用除湿机对橡胶、木托进行 48 h 除湿处理,尽可能除去内部水分。

传感器采用 HOBO U23-002,并通过专业机构校核检定,可靠性、稳定性有保障,具体性能参数见表 1。其记录模块内存为 64 kB,能存储 21 000 组数据。将预先编号的标签贴于记录舱,使用专用软件将传感器激活,采集频率设置为每 10 min 一次,可存储 145 d 的数据。

1.2 试验实施

容器内各传感器位置如图 1 所示。1 号传感器位于橡胶上部外侧(监测点 1);2 号传感器位于容器内空气域上 1/4 处(监测点 2);3 号传感器位于下 1/4 处(监测点 3);4 号传感器位于容器外背阴处(监测点 4),用于监测环境温度。本次试验共使用 11

表 1 传感器参数

Tab.1 Performance parameters of sensor

名称	规格	厂商	温度范围	相对湿度范围	内存	电池寿命
温湿度传感器	HOBO U23-002	美国 Onset 公司	-40~70 °C, ±0.18 °C	0~100%, ±2.5%	64 kB	2 a

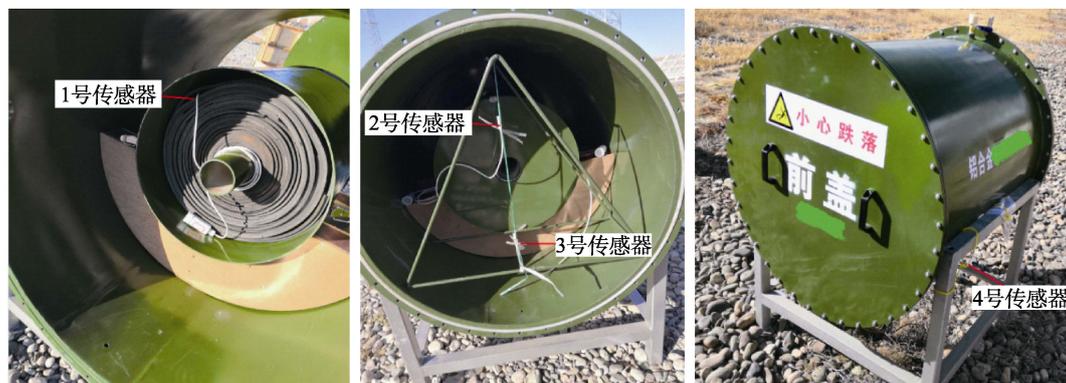


图 1 试验传感器布置
Fig.1 the position of sensors

个传感器,监测点 1 仅采集橡胶内部的温度数据。在某大气试验站投放 3 套包装容器,1 号置于室内,表面不作任何遮挡;2、3 号放于大气试验场,暴露在开阔、阳光不受遮挡的位置,并保证容器轴线为东西朝向。2 号容器使用篷布覆盖,3 号容器不作遮挡。1、2、3 号容器环境严酷性依次增加。

2 试验结果及分析

传感器每 10 min 采集一组数据,单个每天记录 144 组数据。本次试验周期为 30 d。为更好地展现数据曲线的细节特征,仅绘制最具有代表性的 6 个日循环(11 月 10 日 7:30 至 15 日 21:00,约 800 组数据)的温湿度变化,分别从温度、湿度、温湿度关联性进行对比分析。

2.1 温度变化

室内 1 号容器监测点的温度变化情况如图 2 所示。4 条曲线走势大致相同,温差小于 1.3 °C。观察期内处于一个降温过程,6 d 后,室内平均温度下降 3.5 °C。室内昼夜温差约为 1.1 °C,白天温度上升,夜间温度下降,形成一个正弦峰。由于热量的传递,容器内温度呈现类似正弦的变化。筒体内部气体温度的极大值相比环境温度极大值,滞后约 2 个采集点(约 20 min)。因为橡胶热容量较大,空气的导热能力又较弱,降温过程中呈现出橡胶(0101)温度>容器内空气(0102/0103)温度>室内(0104)温度的分布规律。容器内两处空气监测点的温度曲线基本契合,差异小于 0.1 °C。温度曲线第 3 天没有出现正弦型温升峰,室内温度一路走低,推断当天为阴雨天,后面的分析中将多次印证这一结论。

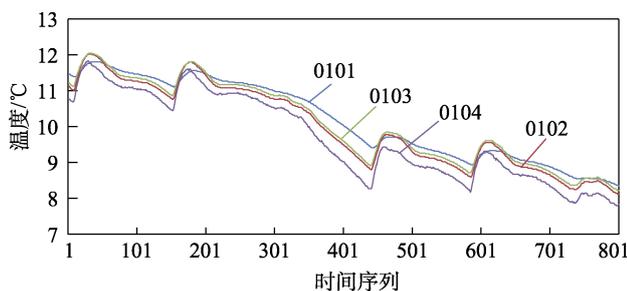


图 2 1 号容器监测点温度变化

Fig.2 The monitoring temperature of container No.1

暴露场中 2、3 号容器的温度变化趋势几乎一致,仅数值上有差别,如图 3 所示。户外昼夜温差约 15 °C,监测点 2 温度振幅高达 30 °C,篷布覆盖后,监测点 2 振幅减为 25 °C。完全暴露的 3 号容器,内部温度对外界因素更敏感,日间次级波动较多。2 号容器内温度变化较平滑,滤去了日间很多细小波动。容器上半部在日照下产生辐射温升,容器内温度明显高于环境温度,在热传导与对流传热的综合作用下,容器内

部形成有规律的温度梯度,日间呈现出监测点 2>监测点 3>监测点 1>监测点 4 的分布特征。与单纯依靠热传导引起温变的 1 号容器相比,太阳辐射的热效应致使 2、3 号容器内产生较大温升。温度梯度最大时,3 号容器监测点 2 (0302) 高于环境温度 (0304) 约 14 °C,高于监测点 3 (0303) 约 5 °C,高于监测点 1 (0301) 约 10 °C。同等情况下,2 号容器内 0202 高于环境温度约 10 °C,高于 0203 约 4 °C,高于 0201 约 9 °C。因此,篷布覆盖在太阳照射下能起到一定的降温作用。桶内 2、3 号监测点温度几乎同时达到极大值,1 号监测点极大值滞后 7~18 个采集点不等,与具体升温过程有关。户外环境下,桶内温度受太阳辐射影响最大,环境温度降为次要因素,极大值超前滞后皆有出现。第 3 天没有出现大幅正弦型温升,可再次推断第 3 天为阴雨天,查阅当天气象记录,印证了此推断。在没有太阳辐射的夜间或阴雨天,监测点 2、3 的温度曲线迅速重合,表征着容器内空气温度趋于平衡。橡胶较高的比热加上空气较差的导热能力,致使夜间橡胶温度反而高于空气温度,最大时约高出 6 °C。

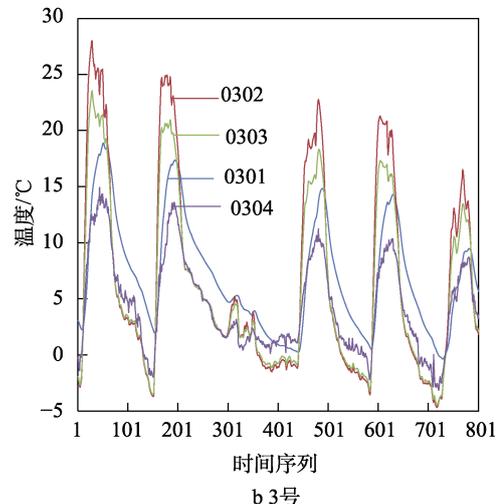
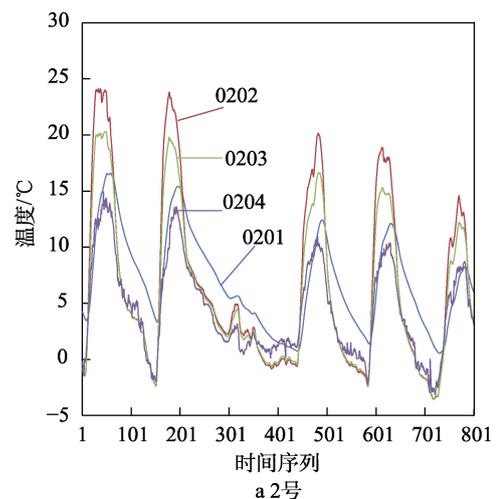


图 3 2、3 号容器监测点温度变化

Fig.3 The monitoring temperature of container No.2 and No.3

图 4a 对比了室内与户外的环境温度，户外温度次生波动较多，受日照变化、实时空气对流条件等多种因素影响。户外环境的瞬时变化对室内环境几乎没有影响，室内环境温度曲线十分平滑，没有细小波动；室内滤去了户外昼夜 90% 以上的温度波动，提供了较温和的贮存环境，有良好的防护作用。受外部降温影响，室内温度亦逐日降低。图 4b 为不同环境下监测点 1 的温度变化，表征了橡胶内部的温度变化。2、3 号容器中，橡胶监测点的温度变化趋势基本一致。2 号容器中，橡胶昼夜温度波动约为 3 号容器的 80%。3 号容器中，橡胶监测点温度极大值高于同等情况下 2 号监测点约 2.5℃，极小值低约 1℃。同环境温度一样，1 号容器内橡胶温度的昼夜波动（约 0.5℃）远小于户外 2、3 号容器。

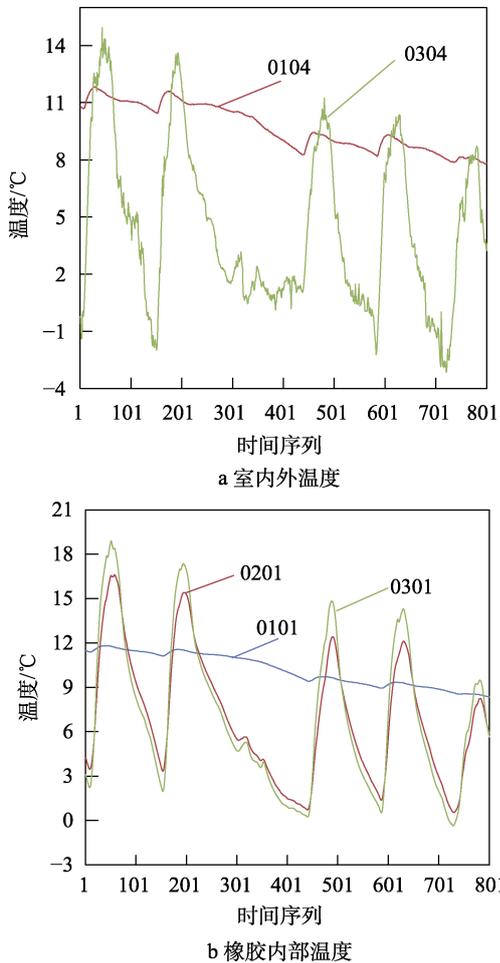


图 4 室内外温度与橡胶内部温度对比
Fig.4 Comparison of (a) indoor and outdoor temperature and (b) rubber internal temperature

2.2 湿度变化

1 号容器的湿度时程曲线（实线）如图 5 所示，同时用虚线绘制了户外（0304）湿度的变化作对比分析。户外湿度曲线显示，第 3 天（数据节点 250~400）大气相对湿度陡增，由 20%~30% 的水平上升到 90%

以上，进一步证实了当天出现降雨。降雨后的 2 天，大气相对湿度比降雨前有较大提升，平均在 55% 左右。室内环境相对湿度（0104）波动相对于户外小很多，第 3 天由于户外降雨引起库室内相对湿度上升，最高接近 40%，说明户外的相对湿度对室内湿度有明显影响。降雨后，室内环境相对湿度由 26% 提升至 36%。容器内空气相对湿度变化较小，保持在 62.5% 左右，监测点 2 和监测点 3 的数据几乎重合，差异小于 0.6%。结合上文温度分析，室内的 2、3 号监测点仅使用一个传感器即可满足温湿度监测需求。容器内空气相对湿度受外界湿度变化影响较小，表明容器的气密性良好。容器内相对湿度明显高于库内相对湿度，可能是由于封盖后橡胶内部水汽散发，集聚在容器内所致。

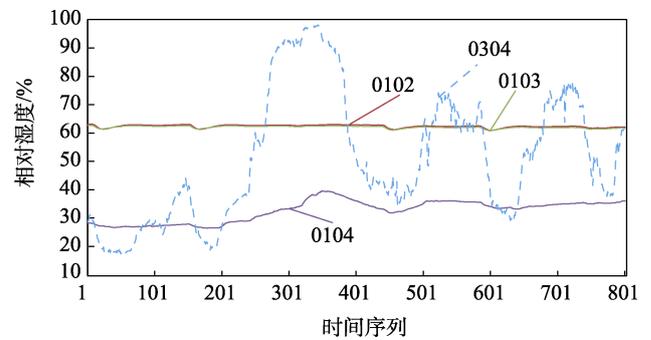


图 5 1 号容器相对湿度变化
Fig.5 The variation of relative humidity in container No.1

暴露场中 2、3 号容器内空气相对湿度的变化曲线如图 6 所示，两者相对湿度变化趋势高度相似，仅数值上有差别。日间总体呈现出 $RH_{0302} < RH_{0202} < RH_{0303} < RH_{0203}$ 的规律，夜间相对湿度曲线几乎重合。对比上文不难发现，相对湿度与温度的分布规律反向相关，温度越高，相对湿度越低。日间 3 号容器内监测点 2 温度最高，其相对湿度最低，最低值约为 32%；夜间 4 个监测点温度趋于相同，其相对湿度曲线也几乎重合。容器内部的湿度虽有较大波动，但与环境的相对湿度没有明显相关性，进一步验证了试验容器具

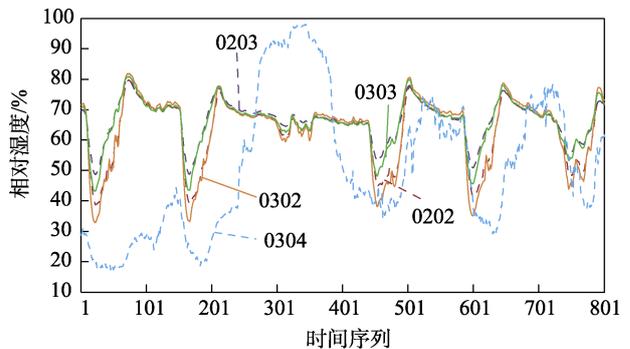


图 6 2、3 号容器相对湿度变化
Fig.6 The variation of relative humidity in container No.2 and No.3

有良好的气密性。

2.3 温湿度关联

相对湿度直接反映了空气中水汽含量距离饱和的程度,指空气中水汽压 P 与相同温度下饱和水汽压 P_s 的百分比,即: $RH=P/P_s \times 100\%$ ^[10]。饱和水汽压是水汽达到饱和时的水汽压强,它是温度的函数,随温度升高显著增大^[11]。因此,相对湿度不仅与空气中的水汽含量有关,也与温度紧密相关。当水汽压不变时,气温升高,饱和水汽压增大,相对湿度会减小。图 7 采用双轴图较好地展现了密闭容器内温度(实线)与相对湿度(虚线)的关联性。选取试验中最具代表性的 1 号容器与 3 号容器中监测点 2 (0102 和 0302) 的温湿度数据制图。与上述分析一致,密闭容器内温度高时,相对湿度低;温度低时,相对湿度高,表现出较强的负相关性。上午筒内温度迅速升高,相对湿度一路走低。午后温度达到极大值,相对湿度也下降到极小值。随后筒内温度开始下降,相对湿度则开始上升。但温度降至 5℃ 附近时,相对湿度不再与温度负相关,转而随温度下降而下降。推测这一原因是筒内局部水汽压饱和,水汽冷凝析出,水汽总量减小,导致相对湿度下降。

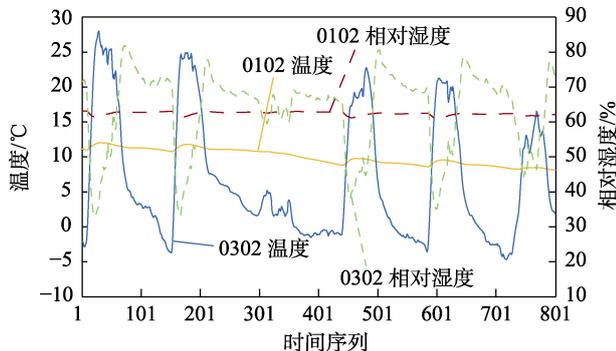


图 7 温湿度的关联性

Fig.7 The correlation between temperature and relative humidity

4 结论

1) 太阳辐射会显著引起试验容器内部升温,加之热传导与热对流的综合作用,日间试验容器内部会形成较大的温度梯度。

2) 户外条件下,容器内局部空气温度可高于环境温度 14℃ 以上,橡胶局部温度可高于环境 4℃,而室内容器内外温差小于 1.3℃。

3) 户外昼夜温差高达 15℃ 时,使用篷布覆盖能使试验容器内温度波动下降约 20%,室内昼夜温差仅为 1.1℃。

4) 户外湿度对库内湿度有较大影响。试验容器气密性良好,容器内相对湿度不受外界湿度变化的影响,但与容器内温度有较强负相关性。

参考文献:

- [1] 吴护林, 钱一欣. 军工材料自然环境试验体系建设与应用[J]. 工程研究, 2018, 10(2): 124-132.
WU Hu-lin, QIAN Yi-xin. Construction and application of military material natural environment test system[J]. Journal of engineering studies, 2018, 10(2): 124-132.
- [2] 汪学华. 自然环境试验技术[M]. 北京: 航空工业出版社, 2003.
WANG Xue-hua. Natural environment testing technology [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2003.
- [3] 张伦武, 许明. 军用自然环境试验与民用自然环境试验的关系[J]. 包装工程, 2003, 24(4): 48-52.
ZHANG Lun-wu, XU Ming. The relationship between military natural environmental test and civilian natural environmental test[J]. Packaging engineering, 2003, 24(4): 48-52.
- [4] 祝耀昌, 王建刚. 各种环境试验的特点及其应用分析[J]. 环境与可靠性, 2005(1): 38-42.
ZHU Yao-cang, WANG Jian-gang. The feature of different environmental tests and their applications[J]. Environment and reliability, 2005(1): 38-42.
- [5] 赵朋飞, 张生鹏. 航天导弹装备自然环境试验方法探讨[J]. 装备环境工程, 2017, 14(11): 37-43.
ZHAO Peng-fei, ZHANG Sheng-peng. Testing methods for space missile materiel in natural-environment[J]. Equipment environmental engineering, 2017, 14(11): 37-43.
- [6] 肖敏, 周漪, 杨万均. 典型环境中三种自然环境加速试验环境强化效果分析[J]. 装备环境工程, 2014, 11(2): 26-31.
XIAO Min, ZHOU Yi, YANG Wan-jun. Analysis on enhanced environmental effect of three different natural environmental accelerated test methods in typical environment[J]. Equipment environmental engineering, 2014, 11(2): 26-31.
- [7] 刘志辉, 李长虹. 自然环境试验在装备研制生产过程中的应用[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2012, 30(5): 38-40.
LIU Zhi-hui, LI Chang-hong. Application of natural environmental test during the development and production of equipment[J]. Electronic product reliability and environmental testing, 2012, 30(5): 38-40.
- [8] 张晖, 阳建红. 湿热老化环境对环氧树脂性能影响研究[J]. 兵器材料科学与工程, 2010, 33(3): 41-43.
ZHANG Hui, YANG Jian-hong. Effects of hydrothermal aging on properties of epoxy resin[J]. Ordnance material science and engineering, 2010, 33(3): 41-43.
- [9] 常新龙, 姜帆. 高温、湿热环境下氟橡胶密封圈失效研究[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 23-25.
CHANG Xin-long, JIANG Fan. Analysis of fluorine rubber o-ring under high temperature and hydrothermal environment[J]. Equipment environmental engineering, 2012, 9(1): 23-25.
- [10] 刘以林. 天气与气候[M]. 北京: 北京燕山出版社, 1996.
LI Yi-lin. Weather and climate[M]. Beijing: Yanshan Publishing House, 1996.
- [11] 周淑贞. 气象学与气候学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1997.
ZHOU Shu-zhen. Meteorology and climatology[M]. Beijing: Higher Education Press, 1997.