

环境试验与观测

不同海拔高温日循环试验条件与寿命当量确定

李贺^{1,2}, 张建军^{1,2}, 蔡良续^{1,2}, 李敏伟^{1,2}, 傅耘^{1,2}, 赵柯晨, 钟勇³(1.中国航空综合技术研究所, 北京 100028; 2.航空综合环境航空科技重点实验室, 北京 100028;
3.西南技术工程研究所, 重庆 400050)

摘要: 目的 推导不同海拔地区服役装备气候和贮存温度环境的严酷度, 确定日循环条件, 计算试验周期和贮存寿命的当量关系。方法 将 DEF STAN 00-035 标准的温度严酷度修正方法和工程经验相结合, 提出基于标准推荐值修正的和实测数据统计归纳的日循环条件确定方法, 并基于 Arrhenius 模型, 计算日循环等效温度和年等效温度, 建立日循环周期同实际贮存寿命等效损伤的当量关系, 并通过案例对方法进行应用分析。结果 针对高原某地装备, 标准推荐值修正方法确定的高温日循环相较于实测数据统计归纳的结果低 2~8 °C。标准修正法、实测数据法和 GJB 150.3A 推荐日循环条件下的日等效温度分别为 37.3、42.4、55.4 °C, 贮存年等效温度分别为 22.0、26.2、40.8 °C, 对应外场贮存 1 a 的寿命损伤当量关系分别为试验循环 89、86、30 次。结论 可根据装备服役需求和获取数据的现状选择恰当的日循环和寿命当量计算方法, 研究工作为不同地区服役装备温度环境试验严酷度的确定提供了可行的工程方法, 避免造成过试验或欠试验等问题, 并为装备贮存的定寿验收工作提供支撑。

关键词: 高原; 日循环; 等效温度; 寿命; 损伤模型

中图分类号: V216.5

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2025)02-0142-09

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2025.02.016

Determination of High-temperature Diurnal Cycle Test Conditions
and Life Equivalents at Different AltitudesLI He^{1,2}, ZHANG Jianjun^{1,2}, CAI Liangxu^{1,2}, LI Minwei^{1,2}, FU Yun^{1,2}, ZHAO Kechen, ZHONG Yong³

(1. China Aero Poly-technology Establishment, Beijing 100028, China; 2. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aero Combined Environment, Beijing 100028, China; 3. Southwest Institute of Technology and Engineering, Chongqing 400050, China)

ABSTRACT: The work aims to derive the severity of climate and storage temperature for service equipment at different elevations, determine diurnal cycle conditions, and calculate the equivalent relationship between test period and storage life. By combining the temperature severity correction method from DEF STAN 00-035 standard with the engineering experience, a method for determining diurnal cycle conditions based on the correction of standard recommended values and statistics induction of measured data was proposed. Based on Arrhenius model, the diurnal cycle and annual equivalent temperature were calculated,

收稿日期: 2024-10-10; 修订日期: 2024-12-05

Received: 2024-10-10; Revised: 2024-12-05

基金项目: 科工局技术基础项目 (JSHS2020205B001)

Fund: (JSHS2020205B001)

引文格式: 李贺, 张建军, 蔡良续, 等. 不同海拔高温日循环试验条件与寿命当量确定[J]. 装备环境工程, 2025, 22(2): 142-150.

LI He, ZHANG Jianjun, CAI Liangxu, et al. Determination of High-temperature Diurnal Cycle Test Conditions and Life Equivalents at Different Altitudes[J]. Equipment Environmental Engineering, 2025, 22(2): 142-150.

*通信作者 (Corresponding author)

the equivalent relationship between diurnal cycle period and actual storage life equivalent damage was established, and the application of the method was analyzed by practical cases. For the equipment in a place on the plateau, the diurnal cycle of high temperature determined by the standard recommended value correction method was 2-8 °C lower than that of the statistical induction of the measured data. The diurnal equivalent temperatures under the standard correction method, the measured data method and the GJB 150.3A recommended diurnal cycle conditions were 37.3 °C, 42.4 °C and 55.4 °C, respectively. The annual equivalent temperature of storage was 22.0 °C, 26.2 °C and 40.8 °C, respectively. The damage equivalent relationships of the life of 1 year of storage in the field were 89, 86 and 30 test cycles, respectively. The appropriate diurnal cycle and life equivalent calculation method can be selected according to the service requirements of equipment and the type of data acquired. The research work provides a feasible engineering method for determining the severity of temperature environment test of service equipment in different areas, avoiding problems such as over-testing and under-testing, and providing support for the equipment storage life acceptance work.

KEY WORDS: plateau; diurnal cycle; equivalent temperature; life; damage model

温度是装备寿命期内遭遇频率极高的环境因素之一, 其可能改变机载产品的材料特性、结构形状和电气性能等。故障统计结果表明, 由环境引起的故障占全部故障的 52%, 其中温度环境占比高达 40%, 以高温环境最为严重^[1]。高温导致的典型效应包括元器件老化失效、材料褪色龟裂、结构变形翘曲或咬死、密封失效、电阻阻值变化等^[2]。实验室高温环境试验是考核机载产品高温环境适应性的主要手段^[3]。

GJB 150、HB 6167 和 GB/T 2423 系列标准是我国军、民领域环境试验的主要参考文件, 其中 GJB 150A 标准应用最为广泛。当前, 对于实验室高温环境试验的研究, 多是围绕 GJB 150.3A 开展^[4-12]。GJB 150.3A 中给出了世界范围内基本热和热 2 种气候类型的高温日循环数据, 包括环境空气温湿度和贮存条件下的诱发温湿度^[13]。不过, 标准中仅是提供了推荐的日循环条件, 并推荐应用实测数据确定试验严酷度。对于不同应用场景下, 其严酷度的修正方法与依据实测数据确定新的高温日循环方法并未给出明确方法。同时, 装备在贮存过程中, 面临热老化的风险^[14-17], 老化是长期损伤累积的结果, 通常基于 Arrhenius 方程实现损伤与寿命的关联预测, 如吴迪等结合 Arrhenius 老化规律, 建立了硅橡胶老化模型, 通过计算贮存周期下多个温度环境剖面的等效温度获得了橡胶密封圈老化寿命^[18]。王增凯等^[19]基于 Arrhenius 方程设计了导弹长期复杂环境适应性加速试验剖面。李高春等^[20]基于 Arrhenius 方程和实测环境载荷设计了热电池等效加速试验。当前研究已不再局限于恒定高温的损伤等效, 而是越发侧重贴近真实环境的变化温度, 因此需要建立实验室高温日循环同真实暴露场景下等效寿命损伤之间的当量关系, 这也是 GJB 150.3A 未涉及的。

DEFSTAN 00-035《国防装备环境手册》是英国国防部颁布的军用装备环境试验标准, 其是在英国国防部标准和北约标准协议基础上发展而来的^[21]。在标准第五版第四部分《气候环境》中提到了高温日循环

的修正方法和温度老化的寿命当量确定方法, 为解决上述不足提供了基本思路。

本文基于 DEF STAN 00-035 标准中相关方法, 结合工程经验, 提出了基于标准推荐/修正及实测数据的军用装备高温日循环的确定方法, 以及基于 Arrhenius 方程的寿命当量的确定方法, 并基于实测数据, 对上述方法进行应用验证。通过对比分析不同方法的结果, 给出了方法的适用性, 支撑机载设备的试验考核与定寿延寿工作。

1 高温日循环确定方法研究

1.1 基于标准推荐值修正的方法

DEF STAN 00-035 标准将全球分为 14 种气候类型, 分别为 A1(极干热)、A2(干热)、A3(中等热)、B1(温湿)、B2(湿热)、B3(湿热海岸沙漠)、C0(微寒)、C1(中寒)、C2(寒)、C3(严寒)、C4(极寒)、M1(海上高温)、M2(海上中温)和 M3(海上寒冷)^[22]。标准针对上述不同气候类型给出了气候温度、相对湿度、太阳辐射强度以及贮存条件下的诱发温度、相对湿度的日循环标准推荐值。

一方面, 装备可根据实际服役地域, 结合环境特征, 选择合适的气候区域日循环条件。另一方面, 由于上述推荐的日循环条件是基于每种气候类型地面或海平面的气候得到的, 对于不同海拔的山地或高原, 需要对其进行修正。

1.1.1 大气温度修正

对于不同海拔高度的温度变化, 采用标准大气模型进行修正, 如式(1)所示。

$$t_h = t - \frac{h - 500}{300} \times 2 \quad (1)$$

式中: t_h 为高地温度, °C; t 为温度标准推荐值, °C, h 为海拔高度, m。高于海平面 500 m 以上时, 高度每增加 300 m, 温度下降 2 °C。

1.1.2 太阳辐射修正

高地太阳辐射最大值 I_h 可由海平面太阳辐射最大值 I_{max} 和高地空气密度 ρ 计算得来:

$$I_h = 1375 - \frac{\rho}{1.078}(1375 - I_{max}) \quad (2)$$

空气密度与海拔高度之间关系见表 1。任一时刻的高地太阳辐射 I_{ht} 与海平面太阳辐射 I_t 之比等同于 I_h 与 I_{max} 之比, 即:

$$I_{ht} = I_t \frac{I_h}{I_{max}} \quad (3)$$

表 1 空气密度与海拔高度关系
Tab.1 Relationship between air density and altitude

海拔高度 h/m	空气密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$ (最低的 1%风险极值)
0	1.078
400	1.037
800	0.997
1200	0.959
1600	0.923
2000	0.889
2400	0.856
2800	0.829
3200	0.799
3600	0.773
4000	0.745

1.1.3 贮存温度修正

由于贮存温度与太阳辐射强度有关, 可通过太阳辐射的变化对贮存温度进行修正。

$$t_{hs} = t_h + \frac{I_h}{I_{max}} \times (t_{0s} - t_0) \quad (4)$$

式中: t_{0s} 为海平面贮存温度, $^{\circ}C$; t_0 为海平面气候温度, $^{\circ}C$; t_{hs} 为当前海拔贮存温度, $^{\circ}C$ 。

1.2 基于实测数据的方法

标准推荐值是源于对区域数据的统计而确定的, 针对某一特定地点, 应用实测数据确定日循环条件更为准确, 能够避免过试验或欠试验的现象发生。根据数据的详实程度, 可以采用排序法和极值拟合法。

排序法是对逐时数据进行统计, 假设已知某 1 个或某几个严酷月份(每年 1 个)的逐时温度记录数据, 分别对 01:00—24:00 各个时间段数据进行排列, 排列顺序为由大到小, 取每个时间段的第 i 个值为高温极值, 生成新的高温日循环数据。序号 i 的计算方法见式(5)。

$$i = INT(N_1 \cdot t) \quad (5)$$

式中: t 为时间风险率, 一般取 1%; N_1 为该时段的温度样本数; INT 为向下取整。

极值拟合法是应用日高温极值和低温极值, 通过 Fourier 函数拟合新的高温日循环。具体方法如下:

1) 筛选严酷月份, 确定该月全月高温极值 b 及

每天的日高温极值矩阵 $T_A=[T_1, T_2, \dots, T_N]$, N 为当月天数, T_A 呈正态分布。

2) 计算 T_A 分布的均值 μ 与标准差 σ 。

3) 根据 μ 、 σ 量值, 将原正态分布标准化, 如式(6)所示。

$$z = (T - \mu) / \sigma \quad (6)$$

4) 根据标准正态分布表, 取风险极值 1%, 确定该概率下的温度值, 并向下取整, 得到日循环中温度极大值 A 。

5) 重复上述步骤, 计算风险极值为 1%的日低温极值, 得到日循环温度极小值 B 。

6) 根据表 2 的日循环模型, 确定不同时段的日循环温度值。

表 2 日循环模型^[23]
Tab.2 Diurnal cycle model^[23]

当地时间	温度
00:00	$B+0.20(A-B)$
03:00	$B+0.10(A-B)$
06:00	B
09:00	$B+0.25(A-B)$
12:00	$B+0.65(A-B)$
15:00	$B+0.95(A-B)$
18:00	$B+0.70(A-B)$
21:00	$B+0.40(A-B)$
24:00	$B+0.20(A-B)$

7) 对上述 8 个时间点温度值进行 Fourier 函数拟合, 最终可获得新的连续 24 h 的高温日循环条件。

在应用上述方法时, 可根据数据来源来确定日循环的类型。当无法获取贮存平台温度数据时, 可采用预计建模的方法, 通过传热分析、数据驱动、数值仿真等方式, 建立贮存平台温度同外界气候环境的关联模型, 如文献[24-26]等, 根据气候环境数据以预测平台环境数据。

2 温度老化寿命损伤当量确定方法研究

温度环境产生的热老化, 可用 Arrhenius 方程进行表征, 其是由瑞典科学家 Svants Arrhenius 提出的化学反应速率常数随温度变化关系的经验公式, 具体如式(7)所示。

$$k = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (7)$$

式中: k 为反应速率, g/h ; A 为频率因子, g/h ; E_a 为活化能, kJ/mol , 其量值受材料及其状态等多种因素的影响^[27-32], 可根据实际情况进行确定。参考文献[22], 对于多数含能材料, 活化能取值 70 kJ/mol 可以较好地满足试验需求; R 为通用气体常数, $R=$

0.008 314 kJ/(mol·K); T 为热力学温度, K。

2.1 单一日循环等效温度计算

将 1 个循环周期 P (即 1 d) 分为 I 个时间间隔 Δt_i , 满足 $\sum_{i=1}^I \Delta t_i = P$ 。由 Arrhenius 方程得到每个时间间隔内的反应速率:

$$k_i = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT_i}\right) \quad (8)$$

式中: k_i 为 1 个时间间隔内的反应速率; T_i 为 1 个时间间隔内的温度, K。因此 1 d 内反应总量 p 可由反应速率 k_i 与时间 Δt_i 相乘后求和得到:

$$p = \sum_{i=1}^I k_i \Delta t_i = \sum_{i=1}^I A \exp\left(\frac{-E_a}{RT_i}\right) \Delta t_i \quad (9)$$

式中: p 为日反应总量, g。日等效温度 T_{day} 是 1 d 反应总量相等情况下的单一温度, 该温度下对应的反应速率 K_{day} 为:

$$K_{\text{day}} = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT_{\text{day}}}\right) \quad (10)$$

对应 1 d 的反应总量 p 为:

$$p = K_{\text{day}} \sum_{i=1}^I \Delta t_i = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT_{\text{day}}}\right) P \quad (11)$$

由 1 d 内反应总量相等可得:

$$A \exp\left(\frac{-E_a}{RT_{\text{day}}}\right) P = \sum_{i=1}^I A \exp\left(\frac{-E_a}{RT_i}\right) \Delta t_i \quad (12)$$

求得日等效温度 T_{day} 为:

$$T_{\text{day}} = -\frac{E_a}{R} \left\{ \ln \left[\frac{1}{P} \cdot \sum_{i=1}^I \exp\left(\frac{-E_a}{RT_i}\right) \Delta t_i \right] \right\}^{-1} \quad (13)$$

通常取 $\Delta t_i = 1$ h, 即可根据 24 h 的温度数据求出基于寿命损伤模型的日等效温度。

2.2 年循环等效温度计算方法

年等效温度可根据已知数据的类型分为 2 种计算方法, 分别是基于日循环峰值的方法和基于逐时统计的方法。

2.2.1 基于日循环峰值的年等效温度计算方法

假设已知某区域 1% 时间风险概率的高温日循环极值, 以及该区域 1 a 中每一天的最高极值, 可统计绘制日高温极值及持续时间的分布概率曲线, 如图 1 所示。若全年日高温极大值为 T_1 , 日高温极小值为 T_{365} , 则可认为 1 年中超过 T_1 的天数为 1 d, 超过 T_{365} 的天数为 365 d。取任一天日高温极值为 T_n , 其对应的天数 p_n 应为超过 (含) T_{n+1} 温度的天数 n_{n+1} 与超过 (含) T_n 温度的天数 n_n 之间的差值, 即:

$$p_n(T_n) = n_{n+1} - n_n \quad (14)$$

如图 1 所示, 给定概率曲线上的一系列坐标点(n_n ,

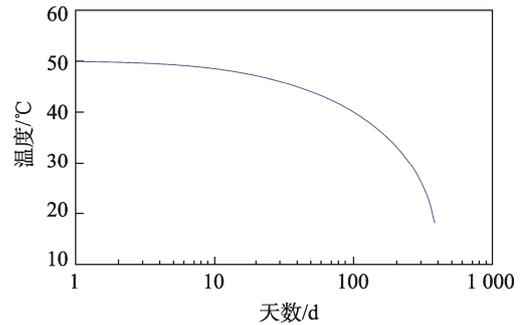


图 1 昼夜峰值温度和天数概率曲线
Fig.1 Probability curve of day and night peak temperature and days

T_n), 可确定全年温度变化, 见表 3。由表 3 可知, 第 N 个昼夜循环峰值温度 T_N 对应的天数为 0, 因为 1 a 中每天峰值温度都超过 T_N 。

表 3 昼夜峰值温度与天数关系
Tab.3 Relationship between day and night peak temperature and days

日循环	峰值温度 T_n	T_n 被超过的天数 n_n	第 n 个循环对应天数 p_n
最高循环	T_1	n_1	$p_1 = n_2$
第 2 个循环	$T_2 = T_1 - \Delta T$	n_2	$p_2 = n_3 - n_2$
第 3 个循环	$T_3 = T_1 - 2\Delta T$	n_3	$p_3 = n_4 - n_3$
第 n 个循环	$T_n = T_1 - (n-1)\Delta T$	n_n	$p_n = n_{n+1} - n_n$
第 N 个循环	$T_N = T_1 - (N-1)\Delta T$	365	$p_N = 365 - n_N = 0$

设 q_n 为第 n 个循环对应的峰值温度下每日反应量, 则全年总反应量 Q 为:

$$Q = \sum_{n=1}^N p_n q_n \quad (15)$$

类似于日等效温度的计算方法, 年总反应量 Q 也可以通过年等效温度 T_{year} 和时长 D (以小时为单位, 1 a 取 8 760 h) 确定, 如式 (16)、(17) 所示。

$$K_{\text{year}} = A \exp\left(\frac{-E_a}{RT_{\text{year}}}\right) \quad (16)$$

$$Q = K_{\text{year}} D = \sum_{n=1}^N p_n q_n \quad (17)$$

式中: K_{year} 为年等效温度下的反应速率, g/h。结合式 (16) ~ (17), 可得到年等效温度为:

$$T_{\text{year}} = -\frac{E_a}{R} \left[\ln \left(\frac{1}{AD} \sum_{n=1}^N p_n q_n \right) \right]^{-1} \quad (18)$$

假设日循环峰值温度 T_n 对应的昼夜温度数据是最高循环昼夜温度数据分别减去 $(T_1 - T_n)$ 得到的, 由此可以得到由第 n 个循环引起的日反应量:

$$q_n = \sum_{i=1}^I A \exp\left(\frac{-E_a}{R(T_i - (n-1)\Delta T)}\right) \Delta t_i \quad (19)$$

代入前面的方程得到年等效温度的计算公式:

$$T_{\text{year}} = -\frac{E_a}{R} \left\{ \ln \left[\frac{1}{D} \sum_{i=1}^N p_n \sum_{i=1}^I \exp \left\{ \frac{-E_a}{R [T_i - (n-1)\Delta T]} \right\} \right] \right\}^{-1} \quad (20)$$

通常，取 1 °C 作为昼夜峰值温度的间隔区间，即 $\Delta T = 1 \text{ °C}$ ，同时 $\Delta t_i = 1 \text{ h}$ ， $I = 24$ ， $D = 8\ 760 \text{ h}$ ，则年等效温度如式 (21) 所示。

$$T_{\text{year}} = -\frac{E_a}{R} \left\{ \ln \left[\frac{1}{8\ 760} \sum_{i=1}^N p_n \sum_{i=1}^{24} \exp \left[\frac{-E_a}{R(T_i - n + 1)} \right] \right] \right\}^{-1} \quad (21)$$

不过，由式 (14) 可知，本方法用一个温度段内的最高温度来衡量该温度段内的反应量，对于损伤的估计是偏高的，因此应用该方法预测的寿命值偏低，更为保守。

2.2.2 基于逐时统计的年等效温度计算方法

假设已知某区域全年每个小时的温度数据，即 8 760 h 的温度数据。类似于日等效温度计算方法，取循环周期 $P = 8\ 760 \text{ h}$ ， $\Delta t_i = 1 \text{ h}$ ，对式 (13) 进行变形，可得年等效温度 T_{year} 计算公式，如式 (22) 所示。

$$T_{\text{year}} = -\frac{E_a}{R} \left\{ \ln \left[\frac{1}{P} \cdot \sum_{i=1}^I \exp \left(\frac{-E_a}{RT_i} \right) \Delta t_i \right] \right\}^{-1} \quad (22)$$

相较于 2.2.1 中计算方法，这种计算方法得到的年等效温度更加准确，但对数据的要求较高，需要更为详实的全年逐时数据。

2.3 寿命损伤当量确定

通过上述方法，可计算目标地域的日等效温度和年等效温度，根据损伤等效原则，可确定相同损伤下，试验循环数和外场服役时间的当量关系，如式 (23) 所示。

$$n = 365 \cdot \exp \left(\frac{-E_a}{RT_{\text{year}}} \right) / \exp \left(\frac{-E_a}{RT_{\text{day}}} \right) \quad (23)$$

3 基于实测数据的算法应用

以在高原某地（以下简称 A 地）服役的装备为例，分别利用上述的标准推荐值修正值方法和实测数据法确定其高温日循环和以及寿命损伤当量。

3.1 日循环确定

3.1.1 基于标准修正的日循环

以 GJB 150.3A 中热气候类型作为标准，对其进行高度修正。A 地海拔为 3 500 m。由式 (1) 可知，A 地气候温度相较于海平面温度低 20 °C，由式 (2)、(4) 可计算出该地区贮存温度，得到的日循环见表 4。

3.1.2 基于实测数据的日循环

将装备的贮存环境分为驾驶舱平台和设备舱平台 2 部分，通过监测其服役时自然环境温度和平台内

表 4 基于热气候类型修正后的 A 地日循环温度
Tab.4 Diurnal temperature cycle of A after modification based on thermal climate type

时刻	海平面气候温度/°C	海平面贮存温度/°C	A 地气候温度/°C	A 地贮存温度/°C
01:00	35	35	15	15
02:00	34	34	14	14
03:00	34	34	14	14
04:00	33	33	13	13
05:00	33	33	13	13
06:00	32	33	12	13
07:00	33	36	13	16
08:00	35	40	15	20
09:00	38	44	18	24
10:00	41	51	21	32
11:00	43	56	23	37
12:00	44	63	24	44
13:00	47	69	27	50
14:00	48	70	28	51
15:00	48	71	28	53
16:00	49	70	29	51
17:00	48	67	28	48
18:00	48	63	28	44
19:00	46	55	26	36
20:00	42	48	22	28
21:00	41	41	21	21
22:00	39	39	19	19
23:00	38	37	18	17
24:00	37	35	17	15

部环境温度，建立温度环境预测模型^[33]，结合获取的逐时自然温度环境数据，确定了驾驶舱和设备舱平台内部温度环境全年的逐时温度数据。应用 1.2 中所示方法，制定新的高温日循环，结果见表 5。数据显示，驾驶舱平台温度略高于设备舱平台温度，这是由于太阳辐射加热所导致的。

对比表 4 和表 5 中的高温日循环数据，如图 2 所示。对于外界气候温度，二者在日间高温时差距较小，夜间差距较大，温差在 2~6 °C。对于平台诱发温度，驾驶舱平台温度实测数据和基于标准修正的贮存温度日循环相近，但整体偏高，高温最大值差值为 2 °C，高温最小值差值为 8 °C。

在实际的高温日循环试验中，上述 2 种方法均能够较好地模拟温度的昼夜变化，二者趋势一致。但是实测数据方法是基于装备真实服役数据制定的日循环剖面，其更能反映装备经历的环境变化，量值贴近实际，考核更为充分。标准修正方法是基于通用的标准数据制定的日循环剖面，尽管在试验精度上有所欠缺，但是差距不大，可作为实测数据缺失的一个备用选择。

表 5 基于实测数据的 A 地气候温度和装备驾驶舱、设备舱平台温度日循环

Tab.5 Climate temperature of A based on measured data and diurnal temperature cycle of platform for equipment cockpit and equipment cabin

时刻	气候温度/°C	驾驶舱平台温度/°C	设备舱平台温度/°C
01:00	21	22	21
02:00	19	22	21
03:00	19	21	21
04:00	18	21	21
05:00	18	21	21
06:00	18	21	21
07:00	18	22	21
08:00	19	26	22
09:00	20	31	25
10:00	21	37	29
11:00	23	42	33
12:00	24	47	36
13:00	26	52	39
14:00	27	54	40
15:00	27	55	40
16:00	27	55	40
17:00	26	55	39
18:00	25	53	37
19:00	24	49	35
20:00	22	44	31
21:00	21	31	28
22:00	21	26	26
23:00	20	22	24
24:00	20	22	21

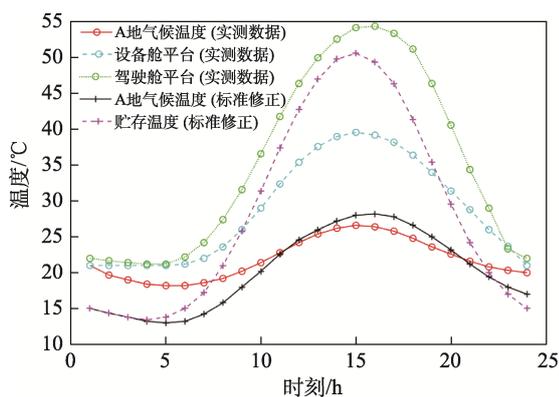


图 2 日循环结果比较

Fig.2 Comparison of diurnal cycle results

3.2 寿命损伤当量确定

3.2.1 日等效温度确定

表 5 给出了在 A 地服役的装备气候、设备舱和驾驶舱以及 GJB 150.3A 中热气候类型气温和贮存温

度的日循环温度,由式(13)可计算出它们的日等效温度,见表 6。

表 6 日等效温度
Tab.6 Diurnal equivalent temperature

环境	日等效温度/°C
A 地气温(标准修正)	21.7
A 地气温(实测数据)	22.2
贮存温度(标准修正)	37.3
贮存温度(驾驶舱平台)	42.4
贮存温度(设备舱平台)	31.2
标准气温(气候类型——热)	41.6
标准贮存温度(气候类型——热)	55.4

3.2.2 年等效温度确定

应用日循环峰值方法,分别基于表 4 和表 5 获取的日循环数据,绘制 A 地气候和服役的装备驾驶舱平台和设备舱平台的日循环峰值温度概率曲线,如图 3 所示。

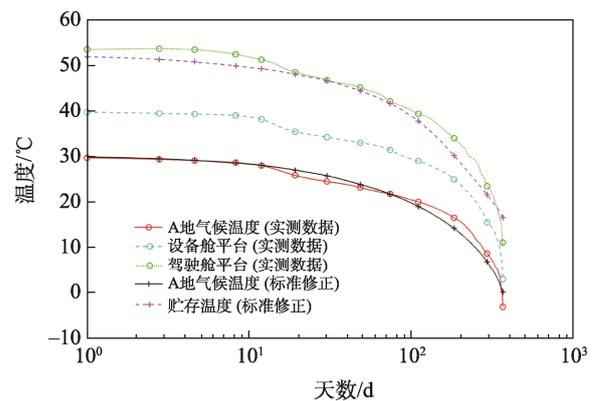


图 3 气候、驾驶舱平台和设备舱平台昼夜峰值温度概率曲线

Fig.3 Day and night peak temperature probability curve of climate, cockpit and equipment cabin platform

通过概率曲线得到气候、驾驶舱平台和设备舱平台的昼夜峰值温度以 1°C 为温度间隔对应的天数,代入式(21)即可计算年等效温度,见表 7。

表 7 基于昼夜峰值温度的年等效温度
Tab.7 Annual equivalent temperature based on day and night peak temperatures

环境	年等效温度/°C
A 地气候(标准修正)	9.6
A 地气候(实测数据)	10.7
贮存温度(标准修正)	22.0
贮存温度(驾驶舱平台)	26.2
贮存温度(设备舱平台)	18.6
标准贮存温度(气候类型——热)	40.8

3.2.3 寿命损伤当量确定

根据式(23),可分别计算不同场景下的试验循环同外界暴露在同寿命损伤下的等效当量。假设装备仅服役于A地,依据标准修正法确定的试验严酷度(见表4),若装备处于包装良好的长期贮存状态,则试验108个循环等效于A地长期贮存1a;若装备处于无包装的部署状态,则试验89个循环等效于A地户外部署1a。

假设装备仅服役于A地,依据实测数据法确定的试验严酷度(见表5),若装备处于包装良好的长期贮存状态,则针对驾驶舱内机载设备,试验115个循环等效于A地长期贮存1a;若装备处于无包装的部署状态,则试验86个循环等效于A地户外部署1a。

假设装备全球服役,依据GJB 150.3A推荐气候类型推荐的试验严酷度,若装备处于包装良好的长期贮存状态,则试验20个循环等效于A地长期贮存1a;若装备处于无包装的部署状态,则试验30个循环等效于A地户外部署1a。

4 结论

本文基于DEF STAN 00-035标准中温度环境严酷度确定相关内容,结合工程经验,对其方法进行分析与转化,重点面向不同海拔的服役场景,提出了基于标准修正和实测数据的高温日循环确定方法、温度老化寿命损伤的当量确定方法,并基于装备真实服役环境数据,对方法进行了应用与分析验证。研究结果表明:

1)可根据装备的服役场景和获取数据的详实程度,合理选择日循环的确定方法。当目标地区环境数据未知时,可应用标准推荐值修正方法生成新的高温日循环条件;当目标地区逐时环境数据已知时,可应用实测数据排序法生成新的高温日循环条件;当目标地区逐时环境数据未知,但日高温、日低温极值已知时,可采用实测数据极值拟合法生成新的高温日循环条件。

2)根据寿命损伤等效原则,可基于Arrhenius方程,通过计算高温老化的日等效温度、年等效温度,进一步确定试验循环周期同贮存或部署的寿命当量关系。在计算年等效温度时,若逐时数据已知,则可应用逐时统计的方法,否则可用日循环峰值方法。

3)针对A地,应用实测数据生成的高温日循环严酷度略高于应用标准推荐值修正方法得到的结果,温差在2~8℃。

4)对于仅服役于A地装备,可采用新的高温日循环进行试验,避免出现过试验,依据标准修正和实测数据确定的新的日循环,分别试验89和86个循环相当于装备外场无包装部署1a;对于全球服役装备,则可应用GJB 150.3A推荐日循环试验条件,试验30

个循环可相当于装备外界无包装部署1a。

参考文献:

- [1] 蔡良续,龙德中,宋小燕,等. 温度环境试验及其标准综述(一)温度对装备的影响及温度试验的重要性[J]. 环境技术, 2014, 32(4): 93-96.
CAI L X, LONG D Z, SONG X Y, et al. Review of Temperature Tests and Relevant Standards(Part One) Influence of Temperature on Equipment and Importance of Temperature Tests[J]. Environmental Technology, 2014, 32(4): 93-96.
- [2] 彭望舒, 张晓娟. 直升机机载产品高温环境试验方法研究及应用分析[J]. 直升机技术, 2016(4): 58-63.
PENG W S, ZHANG X J. Investigation and Application on High Temperature Test of Assemblies On-Board Helicopter[J]. Helicopter Technique, 2016(4): 58-63.
- [3] 张亚娟, 弓云昭, 王红斌. 某型飞机实验室高温试验条件剪裁方法研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(5): 71-76.
ZHANG Y J, GONG Y Z, WANG H B. Tailoring Method of High Temperature Test Conditions of a Certain Type of Aircraft Laboratory[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(5): 71-76.
- [4] 彭雄伟, 祝耀昌, 李明, 等. GJB 150.3A 中高温试验程序剖析(一): GJB 150A/150 高温试验程序及其相互关系[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(5): 504-508.
PENG X W, ZHU Y C, LI M, et al. Analysis of High Temperature Test Procedures in GJB 150.3A: (Part I) High Temperature Test Procedures and Their Relationship in GJB 150A/150[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(5): 504-508.
- [5] 李明, 彭雄伟, 祝耀昌. GJB 150.3A 中高温试验程序剖析(二): 高温日循环数据的选用和标准应用分析[J]. 航天器环境工程, 2015, 32(6): 607-611.
LI M, PENG X W, ZHU Y C. Analysis of High Temperature Test Procedures in GJB 150.3A: (Part II) Selection of High Temperature Diurnal Cycle Data and Application of GJB 150.3A[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2015, 32(6): 607-611.
- [6] 梁钰, 殷寔, 张双俊. 恒定高温试验与日循环高温试验分析与验证[J]. 环境技术, 2018, 36(S1): 136-139.
LIANG Y, YIN S, ZHANG S J. Analysis and Verification of Constant High Temperature Test and Daily Cycle High Temperature Test[J]. Environmental Technology, 2018, 36(S1): 136-139.
- [7] 刘新佳, 郭强岭. 空空导弹高温试验实施研究[J]. 河南科技, 2015, 34(9): 138-140.
LIU X J, GUO Q L. Study on the Implementation of High Temperature Test of Air-to-Air Missile[J]. Journal of Henan Science and Technology, 2015, 34(9): 138-140.
- [8] 翟波, 蔡良续, 李宝哈, 等. 温度环境试验及其标准综述(二)典型温度试验程序[J]. 环境技术, 2014, 32(5): 89-91.
ZHAI B, CAI L X, LI B H, et al. Review of Temperature

- Tests and Relevant Standards(Part Two)Typical Temperature Test Program[J]. Environmental Technology, 2014, 32(5): 89-91.
- [9] 蔡良续, 祝耀昌, 于江波, 等. 温度环境试验及其标准综述(三)温度试验的试验条件和剪裁方法[J]. 环境技术, 2015, 33(1): 82-87.
CAI L X, ZHU Y C, YU J B, et al. Review of Temperature Tests and Relevant Standards(Part Three)the Conditions and Tailoring Methods of Temperature Tests[J]. Environmental Technology, 2015, 33(1): 82-87.
- [10] 蔡良续, 张露, 徐良, 等. 温度环境试验及其标准综述(四)温度试验技术[J]. 环境技术, 2015, 33(2): 77-82.
CAI L X, ZHANG L, XU L, et al. Review of Temperature Tests and Their Standards(Part Four) Temperature Test Technique[J]. Environmental Technology, 2015, 33(2): 77-82.
- [11] 祝耀昌, 王建刚, 张建军. GJB 150A 与 GJB 150 内容对比和分析(一)[J]. 航天器环境工程, 2011, 28(1): 5-10.
ZHU Y C, WANG J G, ZHANG J J. A Comparative Study of GJB 150A and GJB 150(Part I)[J]. Spacecraft Environment Engineering, 2011, 28(1): 5-10.
- [12] 程丛高. GJB 150.3A 高温试验方法的应用及分析[J]. 装备环境工程, 2012, 9(6): 91-96.
CHENG C G. Application and Analysis of GJB 150.3A High Temperature Test Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(6): 91-96.
- [13] 中国人民解放军总装备部. 军用装备实验室环境试验方法: GJB 150A—2009[S]. 北京: 中国航空综合技术研究所, 2009.
General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army. Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel: GJB 150A—2009[S]. Beijing: China Aero Polytechnology Establishment, 2009.
- [14] 胡恩来, 陈津虎, 胡绍华, 等. 某型胶粘剂加速贮存试验及寿命评估[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 147-150.
HU E L, CHEN J H, HU S H, et al. Storage Accelerated Aging Test and Life Assessment of an Adhesive[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 147-150.
- [15] 蒲亚博, 王艳艳, 刘伟, 等. 某型装备用硅橡胶密封圈热氧老化试验与寿命评估[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 52-58.
PU Y B, WANG Y Y, LIU W, et al. Thermal Oxygen Aging Test and Life Evaluation of Silicone Rubber Seal Ring for a Certain Type of Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 52-58.
- [16] 许尔威. 材料老化寿命预测与软件开发[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 1-5.
XU E W. Material Aging Life Prediction and Software Development[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014: 1-5.
- [17] 高维松. 高分子材料老化分析与防老化措施分析[J]. 通讯世界, 2015, 22(2): 243-244.
GAO W S. Aging Analysis and Anti-Aging Measures of Polymer Materials[J]. Telecom World, 2015, 22(2): 243-244.
- [18] 吴迪, 王预然, 胡雨蒙. 考虑贮存剖面的固体火箭发动机橡胶密封圈贮存寿命研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(10): 77-83.
WU D, WANG Y R, HU Y M. Storage Life of Silicone-Rubber Sealing Ring for Solid Rocket Motor Based on Storage Condition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(10): 77-83.
- [19] 王增凯, 刘艳, 陈江攀, 等. 导弹长期复杂环境适应性加速试验设计方法[J]. 装备环境工程, 2024, 21(7): 28-35.
WANG Z K, LIU Y, CHEN J P, et al. Accelerated Test Design Method for Long-Term and Complex Environmental Worthiness of Missile[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(7): 28-35.
- [20] 李高春, 周刚, 庄振民, 等. 热电池失效分析及等效加速贮存试验技术[J]. 装备环境工程, 2022, 19(8): 21-26.
LI G C, ZHOU G, ZHUANG Z M, et al. Failure Mode and Accelerated Storage Test of Thermally Activated Battery[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(8): 21-26.
- [21] 傅耘. DEF STAN 00-35 中的温度试验分析[J]. 航空标准化与质量, 2004(3): 41-44.
FU Y. Analysis of Temperature Testin DEF STAN 00-35[J]. Aeronautic Standardization & Quality, 2004(3): 41-44.
- [22] Ministry of Defence. Environmental Handbook for Defence Materiel: DEF STAN 00-035-2018[S]. London: Defence Equipment and SupportUK Defence Standardization, 2018.
- [23] North Atlantic Treaty Organization. Climate Conditions: AECTP-230[S]. Brussels: Allied Environment Conditions and Test Publication, 2009.
- [24] 张腾, 何宇廷, 李昌范, 等. 地面停放飞机局部温度环境研究[J]. 航空学报, 2015, 36(2): 538-547.
ZHANG T, HE Y T, LI C F, et al. Research on Local Temperature Environment of Ground Parking Aircraft[J]. ActaAeronauticaetAstronauticaSinica, 2015, 36(2): 538-547.
- [25] 李贺, 张建军, 傅耘, 等. 严寒地区飞机温度环境分析与预测方法研究[J]. 环境技术, 2022, 40(2): 174-182.
LI H, ZHANG J J, FU Y, et al. Research on the Analysis and Prediction Method of Aircraft Temperature Environment in Severe Cold Areas[J]. Environmental Technology, 2022, 40(2): 174-182.
- [26] 罗成, 万军, 丁晨, 等. 基于热网络模型的导弹贮存温度预计方法[J]. 装备环境工程, 2017, 14(6): 89-92.
LUO C, WAN J, DING C, et al. Predicting Method of Missile Storage Temperature Based on Thermal Network Model[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(6): 89-92.
- [27] 李庆民, 任鹏, 彭鹏, 等. 基于活化能的绝缘老化评估方法研究进展[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(1): 59-68.

- LI Q M, REN P, PENG P, et al. Research Advances of Activation Energy-Based Insulation Aging Assessment[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2020, 39(1): 59-68.
- [28] 韩永进, 洪宁宁, 潘国梁. 热重法评估橡胶绝缘材料的热老化寿命[J]. *电线电缆*, 2017(6): 21-23.
HAN Y J, HONG N N, PAN G L. Thermal Aging Lives Evaluation of Rubber Insulation Materials by TGA[J]. *Wire & Cable*, 2017(6): 21-23.
- [29] 郭宸玮. 耐热聚乙烯热老化性能研究及寿命预测[D]. 焦作: 河南理工大学, 2021.
GUO C W. Study on Thermal Aging Properties and Life Prediction of Heat-Resistant Polyethylene[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2021.
- [30] 刘飞, 黄兴溢, 江平开. 聚苯醚绝缘材料热氧老化动力学参数计算方法[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(9): 3399-3408.
LIU F, HUANG X Y, JIANG P K. Calculation Method of Thermo-Oxidative Aging Kinetic Parameters of Polyphenylene Oxide Insulating Materials[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(9): 3399-3408.
- [31] 雷欢, 赵爽, 李启富. 桥梁拉索 HDPE 护套老化机理及服役寿命研究[J]. *广西科技大学学报*, 2024, 35(3): 32-40.
LEI H, ZHAO S, LI Q F. Study on Aging Mechanism and Service Life of Bridge HDPE Sheath[J]. *Journal of Guangxi University of Science and Technology*, 2024, 35(3): 32-40.
- [32] 王威力, 魏程, 田晶. 碳纤维复合材料的湿热老化模型研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2023(11): 44-48.
WANG W L, WEI C, TIAN J. Research on Hygrothermal Ageing Models of Carbon Fiber Composites[J]. *Composites Science and Engineering*, 2023(11): 44-48.
- [33] LI H, ZHANG J J, FU Y, et al. Research on Data-Driven Integrated Environment Prediction Method for the Typical Cabin of Helicopter[C]// 2023 Global Reliability and Prognostics and Health Management Conference (PHM-Hangzhou). Hangzhou: IEEE, 2023: 1-6.