

典型装备温度响应测量及平衡时间研究

杨国辉

(中国人民解放军 63853 部队, 吉林 白城 137001)

摘要: **目的** 研究武器装备在温度环境试验过程中温度的测量方法和温度平衡稳定的时间。**方法** 利用直接测量方法对 3 种典型装备进行温度响应时间测量和分析, 找出不同类型装备的传热规律, 明确其温度环境试验的作用机理, 确定装备的温度平衡时间。**结果** 通过多项试验测试的数据分析了武器装备温度试验应力的选取, 在低温和高温工作试验时, 整体温度平衡所需时间应适当延长 8~10 h, 高温贮存时间偏短, 应适当延长 4~6 h。**结论** 在武器装备温度环境试验中, 应根据自身性能特点获得装备的真实温度相应特性, 在条件允许的情况下, 尽可能地敞开武器装备的密闭空间, 加快热交换, 以缩短达到温度平衡的时间。对于关键及敏感部件, 应实时进行温度响应测量, 保证试验量级选取的科学合理, 为装备环境分析及试验方案的制定提供参考依据。

关键词: 典型装备; 温度; 响应测量; 平衡时间; 传热; 稳态

中图分类号: TJ01 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9242(2023)04-0128-08

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2023.04.017

Temperature Response Measurement and Balance Time of Typical Equipment

YANG Guo-hui

(Unit 63853 of Chinese People's Liberation Army, Jilin Baicheng 137001, China)

ABSTRACT: The work aims to study the method of temperature measurement and the time of temperature balance stabilization in temperature environment tests of weapons. The direct measurement method was used to measure and analyze the temperature response time of three kinds of typical equipment, to find out the heat transfer law of different types of equipment, clarify the mechanism of its temperature environment test, and determine the temperature balance time of equipment. Based on data of many experiment, the selection of temperature test forces for weapons was analyzed. In low temperature and high temperature working test, the times required for overall temperature balance should be appropriately extended by 8-10 hours. The high temperature storage was too short, and should be appropriately extended by 4-6 hours. In the temperature environment test of weapons, the real temperature response characteristics of equipment should be obtained according to its own performance characteristics. When conditions permit, the closed space of weapons should be opened as far as possible and the heat exchange should be accelerated to shorten the time for temperature balance. The temperature response of key and sensitive components should be measured in real time to ensure the scientific and reasonable selection of test magnitude, and provide reference for formulation of equipment environment analysis and test schemes.

收稿日期: 2022-06-27; 修订日期: 2022-08-22

Received: 2022-06-27; **Revised:** 2022-08-22

作者简介: 杨国辉 (1979—), 男, 硕士。

Biography: YANG Guo-Hui (1979-), Male, Master.

引文格式: 杨国辉. 典型装备温度响应测量及平衡时间研究[J]. 装备环境工程, 2023, 20(4): 128-135.

YANG Guo-hui. Temperature Response Measurement and Balance Time of Typical Equipment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2023, 20(4): 128-135.

KEY WORDS: typical equipment; temperature; response measurement; balance time; heat transfer; steady state

在装备环境工程中,主要包括环境工程管理、环境分析、环境适应性设计、环境试验与评价 4 个方面^[1]。武器装备在环境试验适应性考核中,需要进行高、低温等多项环境试验,温度应力强度如何选择至关重要,对于温度稳定时间的判定与被试品材质、尺寸、结构和实验室空间等因素都有很大关系。GJB 150.1A—2009《军用装备实验室环境试验方法 通用要求》规定,试件工作时,除另有规定外,当试件中具有最大温度滞后效应的功能部件的温度变化率不大于 2.0 °C/h 时,则认为试件达到了工作时的温度稳定;试件不工作时,除另有规定外,当试件中具有最大温度滞后效应的功能部件温度达到试验温度时,则认为试件达到了不工作时的温度稳定。这就需要对装备的各部位温度进行测量,并对稳定时间进行判断,来确定试验装备是否达到了温度的稳定。

温度环境试验的持续时间应从样品在规定的试验温度下稳定的瞬间开始计算,而温度稳定时间则是试验持续时间的判定标准,这个时间通常指试验样品在预定试验温度下达到温度稳定所需要的时间。由于进入到环境试验阶段的被试品已经生产完毕,不能加装温度传感器破坏其内部零部件的整体结构,所以无法测得其内部真实温度,而一般实验室室温都已达到预定温度开始计时,这样会导致装备温度平衡后的保温时间不足。因此,选定了多种装备进行了数据测试,并对 3 种典型武器装备进行了详细的温度响应测试。在高、低温试验过程中,对热容量最大及敏感、薄弱部件进行实时温度测量,进而确定温度平衡时间,并为相同量级的武器装备试验量级的选取提供数据支持。本文在高低温试验的温度量级选取中,以具体试验数据为基础,对军标的相关规定给出了具体合理化建议,这样会使武器装备环境试验鉴定数据更加科学准确可靠。

1 温度响应过程分析

1.1 温度试验的传热机理

温度总是从高温介质传向低温介质。物体与周围环境大气之间的传热形式主要是对流换热和辐射换热,其内部的主要传热过程则是不稳态导热过程^[2-6]。从环境空气温度开始变化,直至被试品的温度达到稳定之前,其内部各点的温度始终处于变化之中。被试品的表面首先被加热(或冷却),被试品中热容量最大部位的温度变化最慢,比被试品的表面及其内部的其他部位均有较大滞后,只有当被试品中热容量最大部位的温度与被试品周围环境的温度达到一致时,才可认为被试品的温度达到了稳定^[8-15]。实验室空气温

度、被试品表面温度及被试品中热容量最大部件的温度随时间的变化曲线如图 1 所示。

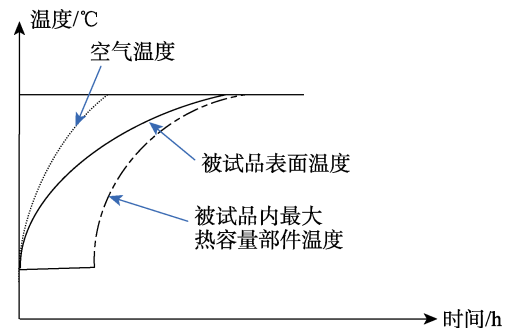


图 1 被试品各部温度随时间的变化曲线
Fig.1 Temperature curve of each part of the tested product with time

被试品与周围空气之间的对流换热,遵循牛顿冷却公式:

$$Q_1 = Fa_c \Delta t \quad (1)$$

被试品与周围空气之间的辐射换热,遵循斯蒂芬-玻尔兹曼定律:

$$Q_2 = \varepsilon fa_c T^4 \quad (2)$$

用换热系数表示的公式为:

$$Q_3 = Fa_t \Delta t \quad (3)$$

被试品内部的不稳态导热,遵循傅立叶定律和能量守恒定律,满足导热微分方程^[13-15]:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{\lambda}{\rho c} \left(\frac{d^2 t}{dx^2} + \frac{d^2 t}{dy^2} + \frac{d^2 t}{dz^2} + \frac{p}{\rho c} \right) \quad (4)$$

式(1) — (3)中: Q_1 、 Q_2 、 Q_3 为物体与空气之间的对流换热量、辐射换热量及物体内部的导热热量; F 为物体的表面面积; a_c 为对流换热系数; Δt 为物体表面与环境空气之间的温差; ε 、 ρ 、 λ 、 c 为物体的黑度、密度、导热系数、比热; t 为温度变化的时间; q 为被试品内部发热流量。

1.2 温度响应过程

温度环境试验过程中,被试品与周围环境大气之间的传热形式主要是对流换热和辐射换热,被试品内部的传热过程是不稳态的导热过程^[3-19]。从环境空气温度开始,直至被试品的温度达到稳定之前,其内部各点的温度始终是变化的,不是稳态的。被试品的表面最先被加热(或冷却),而热容量最大部位的温度变化是最慢的,比被试品的表面温度变化有较大滞后。典型的高温试验过程主要包括升温、保温、降温、高温工作(检测)、恢复等 5 个阶段。典型的低温试验过程主要包括降温、保温、升温、低温工作(检测)、恢复等 5 个阶段^[20-21]。各试验项目中的控制温度、空气温度、被试品温度随时间的变化关系如图 2 所示。

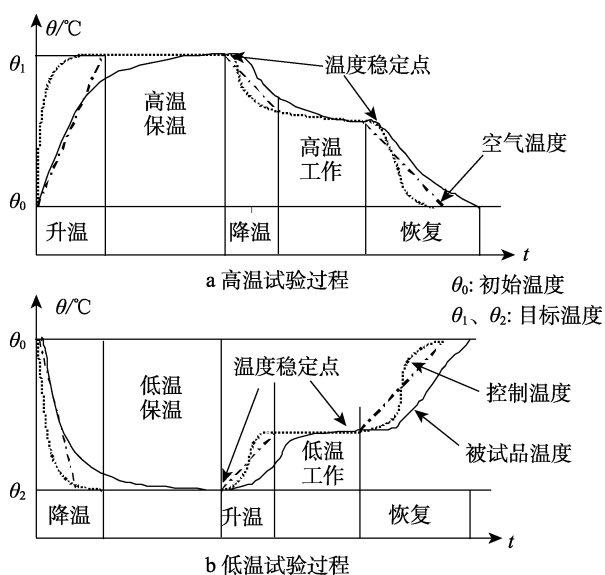


图2 温度随时间的变化关系
Fig.2 Diagram of temperature over time

2 测量设备及方法

装备高低温试验中,温度响应特性主要包括装备温度分布、热点分布、装备在规定的环境温度下达到温度稳定的时间、装备热容量最大的部位、装备对冷热敏感的部位和薄弱环节等。温度响应特性的测量尽可能地在确定的同一装备上进行,以确保测得数据的准确性。目前,确定装备温度环境试验温度平衡时间主要采取以下几种方法^[7-16]。

2.1 重量法

重量法是按照被试品的重量来确定试验温度的保持时间。该方法的主要优势是简单、方便,主要的环境试验的发展早期使用较多。目前除了MTL-STD-202F《电子及电气元器件试验方法》、HB67176《飞机电机电器环境试验方法》等极少数标准采用该方法外,国内外大部分标准已不采用^[16-19]。

2.2 热时间常数法

在试验中直接用传感器测量被试品中关键部位的温度,将此温度上升(或下降)到试验温度的0.632倍时所需要的时间作为热时间常数,并把该常数的4倍作为温度稳定时间。

该方法在目前使用最普遍,仍被国际电工协会(IEC)的IEC68号出版物和GB 2423《电工电子产品基本环境试验规程试验方法》等标准文件使用,作为温度的判定方法^[4-18]。

2.3 直接测量法

在试验全过程中,直接用传感器测量被试品中热容量最大部件的温度,以此温度变化到与试验温度的偏差在允许范围内时的这段时间作为温度稳定时间。

目前,国内外主要标准均采用直接测量法作为温度稳定的判定方法。

由于对被试品中热容量最大部件的温度进行直接测量,并且考虑到关键部位的温度变化,直接测量法要准确可靠得多。目前测温的设备有很多,常采用铂电阻温度计、热电偶温度计和红外测温仪来进行装备温度响应测量^[11-20]。红外测温仪的优势在于非接触式测温,用于极端温度及不能直接测量的环境;电阻温度计是根据电阻值随温度的变化这一特性制成的,测量范围为-260~600℃;热电偶温度计是由2条不同金属连接着1个灵敏的电压计所组成,金属接点在不同的温度下,会在金属的两端产生不同的电位差^[19-22]。

采用直接测量法确定被试品的温度稳定时间,至少要测量2处温度,一处是最大热容量部件的温度,另一处是关键部件(或部位)的温度。经试验测量,物体的表面温度与其内部温度之差一般不超过与环境空气温度之差的5%。因此,对部件温度的测量,一般只需要测量其表面温度即可^[21-27]。

关键部位温度的测量除采用直接测量法外,如果条件允许,可采用内部测量法进行更为直接的测量。大型装备在进行温度环境试验时,重要考核部位主要包括底盘(发动机、变速箱等)、控制等系统,考核其在特定的温度条件下的工作性能。内部测量法更为直接,可在发动机、变速箱、液压部件及控制部件布置测温设备,直接测量内部温度的变化过程,可以获得较为真实的数据,但在传感器选用及布设方面存在一定难度,可在条件允许的情况下使用,要视具体情况而定。

根据装备实际要求来确定测量数据的采样时间,建议敏感部位要缩短时间间隔,这样更能及时反映部件的工作性能,捕捉到性能下降及失效时间点,为后续故障分析处理提供依据。

3 典型装备温度响应测量

依据上述测量方法,进行了3种典型武器装备温度响应的测量。此次温度响应的测量主要结合某型系统A、某型系统B和某型系统C等3套系统的6项高低温试验完成的。

A温度试验,主要考核高低温条件下的A的工作性能,其温度敏感及薄弱部件为计算机、动力柜体、后部、中部、运动转轴、执行器等。

B温度试验,主要考核车辆发动及启动、火控、随动等系统在特定的高低温条件下的工作性能,其温度敏感及薄弱部件为雷达、发动机、计算机、液压系统等。

C温度试验,考核整体的工作性能,其温度敏感及薄弱部件为天线、计算机、发动机、底盘和控制系统等。

3.1 测量策略

在试验过程中，实验室的室内温度由 3 支传感器进行测量后实时传至控制系统，而被试品的温度测量在试验程序中没有要求，故而未配置相关温度巡检设备，所以只能采用直接测量法进行测量。此次典型装备温度响应测量所采用的是便携式红外测温仪和点温计。

3.2 测量设备

1) 红外测温仪。技术指标：温度范围为-40~900 ℃；显示分辨率为 0.1 ℃；精度为目标值的±0.75%或±0.75 K，取大值，目标温度低于-5 ℃时，为±2 K；发射率为 0.1~1.00 可调；响应时间为 250 ms。发射率校准：利用黑胶布进行发射率校准，黑胶布的发射率为 0.95，将长 15 cm 的黑胶布贴在被测部位表面，待黑胶布与被测部位表面温度平衡后，将红外测温仪发射率设置为 0.95，进行测温记录。

2) FLUKE 点温计。技术指标：温度范围为-200~760 ℃；显示分辨率为 0.1 ℃；精度为±1 ℃。测量要求：由于受工作环境温度限制，点温计需要保温措施，防止在高低温环境中损坏或产生数据漂移。由于热电偶测温时需要一定的稳定时间，所以在进行高温测温时，可用胶布将热电偶探头固定在待测表

面，这样能保证测量数据的准确性。低温测量时，需手持测量，温度稳定后才能记录。

3.3 结果及讨论

此次温度响应的测量主要结合 A、B 和 C 等 3 套武器装备的 6 项高低温试验完成的。由于实验室为大型装备的环境试验提供鉴定，容积为 1 300 m³，空间较大，降温速率较慢，所以对装备进行温度响应测量的时间间隔设定为 1 h。

1) A 试验指标：-10 ℃保温 12 h，-40 ℃保温 8 h。试验数据详见表 1 和图 3。从表 1 的数据中可以看出，开始阶段随着室温的下降，A 暴露在空气中的后部温度下降较快，不完全暴露的计算机和转轴温度下降较慢，而内部热容量最大核心部件的中部和执行器的温度下降最慢。当室温达到预定温度后，随着时间的推移，A 的后部、中部和转轴的温度开始趋于平衡，而关键部件执行器的温度下降仍然很慢，所以 A 整体的温度稳定时间应从核心部件执行器达到预定温度后开始起算，这对于装备的环境适应性考核是至关重要的。装备 A 关键部件及执行器温度距低温-40 ℃相差较多，最大可达 7 ℃，没能达到温度平衡。从图 5 可以看出，执行器在室温达到-40 ℃后 5 h 才达到预定温度。

表 1 A 低温试验温度响应测量
Tab.1 Temperature response measurement for A low temperature test

测量设备	北京时间	室温	计算机	柜体	后部	中部	转轴	执行器	
红外测温仪 (测量发射率： 带油漆金属 $\zeta=0.93$ ， 钢铁 $\zeta=0.8$)	20:10	1.0	11.0	7.0	1.1	10.5	8.3	14.8	
	21:10	-8.7	3.8	-0.6	-6.0	7.3	2.0	11.3	
	22:10	-10.1	-2.2	-5.3	-9.1	3.4	-3.9	9.2	
	23:09	-10.9	-7.5	-8.1	-10.3	-0.7	-1.0	4.8	
	0:10	-10.9	-7.4	-8.3	-10.2	-2.8	-3.1	2.7	
	1:09	-10.3	-8.6	-8.9	-10.2	-7.8	-10.3	0.5	
	2:10	-10.4	-9.1	-9.2	-10.3	-7.2	-10.5	-1.5	
	3:11	-10.5	-9.2	-9.2	-10.3	-8.4	-10.1	-3.5	
	4:10	-10.6	-9.0	-9.1	-10.1	-8.2	-10.5	-6.0	
	5:10	-10.1	-9.5	-10.4	-10.2	-8.8	-10.2	-5.9	
	6:10	-10.3	-9.9	-10.3	-10.3	-10.7	-9.2	-10.5	-8.3
	7:10	-10.3	-9.9	-10.3	-10.3	-10.7	-11.6	-10.3	-9.2
	8:11	-10.2	-9.7	-10.2	-10.2	-10.2	-9.7	-10.2	-9.4
	9:10	-10.0	-9.1	-9.9	-9.9	-10.3	-9.5	-10.1	-10.0
	点温计	21:44	-24.9	—	—	-23.6	-19.8	-22.8	-14.1
22:44		-26.0	—	—	-25.3	-23.6	-24.4	-16.5	
23:43		-29.9	—	—	-27.1	-25.2	-25.8	-18.7	
0:44		-31.8	—	—	-28.8	-26.9	-26.4	-20.3	
1:44		-33.1	—	—	-31.5	-29.2	-30.1	-23.1	
2:44		-35.5	—	—	-33.2	-31.7	-32.7	-25.8	
3:44		-37.3	—	—	-35.8	-33.3	-34.9	-28.1	
4:44		-38.3	—	—	-37.1	-35.5	-37.9	-30.5	
5:44		-40.0	—	—	-38.9	-36.9	-38.7	-32.9	
6:44		-39.9	—	—	-39.3	-38.2	-39.5	-34.6	
7:44		-39.8	—	—	-39.5	-39.3	-39.6	-36.3	
8:44		-40.2	—	—	-39.6	-39.5	-39.7	-37.3	
9:44		-40.0	—	—	-39.6	-39.5	-39.7	-38.2	
10:44		-40.0	—	—	-39.6	-39.5	-39.7	-39.1	

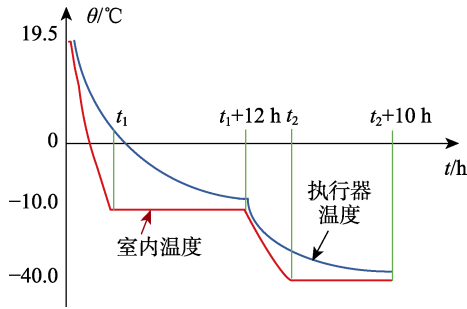


图3 A 低温试验温度响应测量曲线

Fig.3 Temperature response measurement curve for A low temperature test

2)B 试验指标: 70 °C 高温贮存, 恒温 48 h; 50 °C 高温工作, 恒温 8 h; -40 °C 低温工作, 恒温 8 h, -43 °C 低温贮存, 恒温 24 h。试验数据详见表 2—4 和图 4—7。从表 2 中的数据可以看出, 随着室内温度的升高, 武器系统 B 各个部件的温度响应是不同的, 暴露在外的雷达升温最快, 发动机和计算机的温度响应较慢, 舱内温度和液压温度响应是最慢的, 并且在 22 h 后才达到预定温度 70 °C。武器装备 B 温度响应最慢的舱内温度、液压温度与室内温度随时间的响应测量曲线如图 4 所示。

表 2 B 高温贮存温度响应测量

Tab.2 Temperature response measurement for B high temperature storage

北京时间	室内	雷达	发动机	计算机	液压系统	舱内
16:10	15.0	15.1	15.1	15.0	15.1	15.0
17:10	42.5	41.5	35.5	34.4	31.6	30.5
18:10	70.0	68.3	55.9	57.3	48.2	47.2
19:10	70.1	69.5	60.2	63.3	52.8	50.2
20:10	70.0	69.8	65.6	67.2	56.2	53.8
21:10	69.9	69.9	67.9	69.1	60.6	57.3
22:10	70.0	70.0	69.2	69.8	65.3	61.9
23:10	70.0	69.9	69.7	69.9	68.3	65.9
0:10	70.0	70.0	69.8	69.9	69.9	69.9
1:10	69.9	69.8	69.9	70.0	69.9	69.8
...

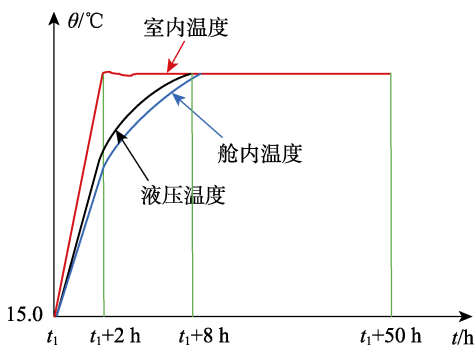


图4 B 高温贮存试验温度响应测量曲线

Fig.4 Temperature response measurement curve for B high temperature storage

武器装备 B 高温工作试验温度响应测量数据见表 3。温度响应与高温贮存相似, 但是随着车辆发动工作, 舱内温度和液压温度响应在 10 h 后才达到预定温度 50 °C。武器装备 B 温度响应最慢的舱内温度、液压温度与室内温度随时间的响应测量曲线如图 5 所示。

表 3 B 高温工作温度响应测量

Tab.3 Temperature response measurement for B high temperature working

北京时间	室内	雷达	发动机	计算机	液压系统	舱内
13:58	15.1	15.1	15.1	15.0	15.1	15.0
14:58	32.5	31.5	28.5	30.0	23.6	22.5
15:58	50.0	46.5	43.6	45.3	27.2	26.3
16:58	49.9	49.2	47.9	49.2	29.3	28.6
17:58	50.1	49.9	49.2	49.9	32.3	31.3
18:58	50.0	49.8	49.8	49.8	34.2	33.6
19:58	49.9	50.0	50.0	49.9	36.5	35.7
20:58	50.0	49.9	49.9	50.0	38.2	37.1
21:58	50.1	50.1	50.0	50.0	41.3	39.2
22:58	50.1	49.9	49.9	49.9	44.5	42.6
23:58	50.0	50.0	50.0	50.0	46.9	45.8
0:58	50.1	50.0	50.0	50.0	49.2	48.2
1:58	50.0	50.0	50.0	49.9	50.0	49.9
...

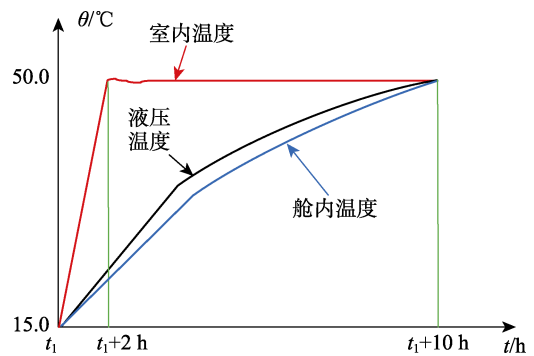


图5 B 高温工作试验温度响应测量曲线

Fig.5 Temperature response measurement curve for B high temperature working test

武器装备 B 低温工作试验温度响应测量数据见表 4。车辆工作会产生很多热量, 对于密封较严的舱内系统, 温度响应很慢, 低温工作舱内温度 (-29.5 °C) 距目标温度 (-40 °C) 相差较大, 温差达 10.5 °C, 没有达到温度平衡。武器装备 B 温度响应最慢的舱内温度与室内温度随时间的响应测量曲线如图 6 所示。由于 B 的低温贮存试验温度响应数据与低温工作数据类似, 故只给了低温贮存的温度响应测量曲线 (如图 7 所示)。图 7 表明, 在武器装备 B 的低温贮存中, 密封的舱内温度在 24 h 后达到了温度平衡。

表 4 B 低温工作温度响应测量

Tab.4 Temperature response measurement for B low temperature working

北京时间	室内	雷达	发动机	计算机	液压系统	舱内
10:00	16.1	16.1	16.2	16.0	16.1	16.0
12:00	-3.5	-3.0	3.2	1.0	4.2	7.3
14:00	-19.6	-18.6	-13.5	-12.1	-2.3	4.2
16:00	-32.5	-31.6	-25.1	-23.2	-7.3	1.2
18:00	-40.1	-39.2	-28.3	-30.2	-10.6	-3.2
20:00	-40.0	-39.8	-30.6	-33.2	-19.6	-9.2
21:00	-40.0	-39.9	-32.3	-34.2	-24.5	-14.3
22:00	-39.9	-40.0	-33.8	-35.3	-29.6	-18.7
23:00	-40.1	-39.9	-34.0	-35.6	-33.6	-22.3
0:00	-40.0	-39.8	-34.6	-36.7	-33.5	-25.6
1:00	-40.0	-40.1	-33.9	-36.9	-33.8	-27.3
2:00	-40.1	-39.9	-32.8	-37.8	-34.3	-29.5
...

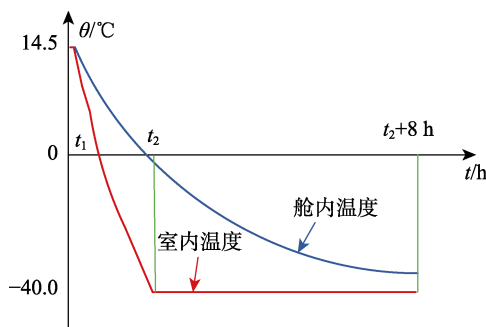


图 6 B 低温工作试验温度响应测量曲线

Fig.6 Temperature response measurement curve for B low temperature working test

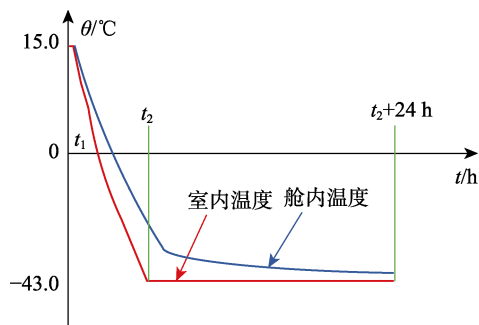


图 7 B 低温贮存试验温度响应测量曲线

Fig.7 Temperature response measurement curve for B low temperature storage test.

3) C 试验指标。50 °C 高温工作。试验数据详见表 5 和图 8。从表 5 可以看出，武器系统 C 各个部件的温度响应是不同的，暴露在外天线升温最快，关键部件发动机和计算机的温度响应较慢，舱内温度响应是最慢的，并且在 10 h 后才达到预定温度 50 °C。C 高温 50 °C 工作试验阶段保温时间偏短，整体温度都没有达到平衡，发动机表面温度距 50 °C 相差较多，

最大可达 7 °C，没能达到温度平衡。武器装备 C 关键部件发动机表面温度与室内温度随时间的响应测量曲线如图 8 所示，发动机表面温度滞后于室内温度，大约 10 h 后达到目标温度 (40 °C)。

表 5 C 高温工作温度响应测量

Tab.5 Temperature response measurement for C high temperature working

北京时间	室内	天线	发动机	计算机	底盘	液压系统	舱内
8:30	17.2	17.2	17.1	17.1	17.0	17.1	17.0
9:30	33.6	33.5	22.3	30.2	30.5	23.6	22.5
10:30	50.0	49.8	30.6	45.3	34.6	27.2	26.4
11:30	49.9	49.9	36.3	49.2	36.2	29.3	28.5
12:30	50.0	50.0	40.8	49.9	38.1	32.3	30.6
13:30	49.9	49.8	42.6	49.8	40.5	34.2	33.7
14:30	50.1	50.0	44.2	49.9	42.3	36.5	36.7
15:30	50.0	50.0	46.7	50.0	44.1	38.2	37.8
16:30	50.0	49.9	47.5	50.0	46.2	41.3	39.1
17:30	50.1	50.1	48.8	49.9	47.9	44.5	42.5
18:30	49.9	49.9	49.2	50.0	48.1	46.9	45.5
19:30	50.0	50.1	49.3	50.0	49.2	49.2	47.2
20:30	50.1	50.0	49.7	49.9	49.5	50.0	49.5
...

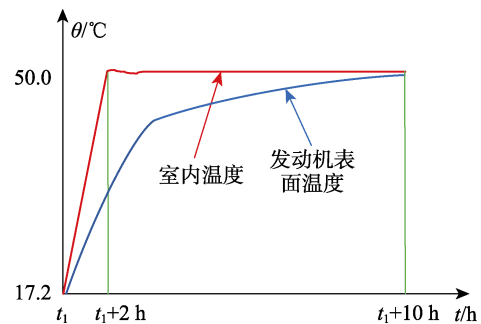


图 8 C 高温工作试验温度响应测量曲线

Fig.8 Temperature response measurement curve for C high temperature working test

分析以上测量数据，可以得出以下结论。

- 1) 3 种典型装备的应力大小选取准确，符合标准要求。
- 2) 被试品舱门状态对温度平衡影响较大，热容量较大部件温度响应较慢，在条件允许的情况下，应尽可能地敞开武器装备的密闭空间，加快热交换，以缩短达到温度平衡的时间。

3) 根据 GJB 150A—2009 进行武器装备高低温试验时，被试品温度稳定后，高温要求继续贮存 2 h，低温继续贮存 4 h^[1]。

对于被试品达到温度稳定的判断，其实是很模糊的，也是很难判断的。本文经过对 3 种典型装备的温度响应数据分析后提出如下建议：高温工作的整体保

温时间在原有的基础上再延长大约 10 h; 高温贮存时间 (48 h) 偏短, 应延长大约 4 h; 低温贮存时间偏短, 不能够达到温度平衡的要求, 应适当延长 4~6 h; 低温工作时间的保温时间应当延长大约 10 h。

4 结论

本文通过对 3 种典型装备环境试验温度响应进行分析和研究, 得出以下结论。

1) 对装备温度响应测量及平衡时间进行分析研究是十分重要的, 在实际试验中, 要根据装备自身性能特点, 获得装备的真实温度响应特性, 对关键及敏感部件应实时进行温度响应测量, 保证试验量级选取的科学合理。

2) 以军标为基础, 给出温度试验的量级选取的建议, 为装备环境分析及试验方案的制定提供参考依据。

3) 需要结合后续进场试验的大量武器装备的温度环境试验响应数据进行综合分析, 建立一套数据库, 形成定性定量的判断方法, 这样才更能使武器装备环境试验鉴定数据更加科学准确可靠。

参考文献:

- [1] GJB 150A—2009, 军用设备实验室环境试验方法[S]. GJB 150A—2009, Laboratory Environmental Test Methods for Military Materiel[S].
- [2] 谭羽非. 高等工程热力学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2018: 23-36.
TAN Yu-fei. Advanced Engineering Thermodynamics[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2018: 23-36.
- [3] 杨天志, 吴飒, 李维宝, 等. 一种基于时间常数的温度稳定时间简易估计方法[J]. 环境技术, 2019, 37(6): 129-135.
YANG Tian-zhi, WU Sa, LI Wei-bao, et al. A Simple Estimation Method of Temperature Stabilization Time Based on Time Constant[J]. Environmental Technology, 2019, 37(6): 129-135.
- [4] 王魁汉. 温度测量实用技术[M]. 第2版. 北京: 机械工业出版社, 2020: 50-85.
WANG Kui-han. Temperature Measurement Practical Technology[M]. 2nd Edition. Beijing: China Machine Press, 2020: 50-85.
- [5] 王来志, 王小平, 杨定慧. 基于 Protues 的温度数据采集系统设计[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2017: 10-50.
WANG Lai-zhi, WANG Xiao-ping, YANG Ding-hui. Design of Temperature Data Acquisition System Based on Protues[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2017: 10-50.
- [6] 祝晶, 刘星岚, 谢成康. 圆柱体温度稳定的一种新方法[J]. 西南师范大学学报, 2020, 45(5): 45-50.
ZHU Jing, LIU Xing-lan, XIE Cheng-kang. A Newstrategy to Stabilize the Temperature in A Cylinder[J]. Journal of Southwest China Normal University, 2020, 45(5): 45-50.
- [7] 陶文铨. 传热学[M]. 第5版. 北京: 高等教育出版社, 2019: 20-35.
TAO Wen-quan. Heat Transfer[M]. 5th Edition. Beijing: Higher Education Press, 2019: 20-35.
- [8] 岳丹婷. 工程热力学和传热学[M]. 大连: 大连海事大学出版社, 2002.
YUE Dan-ting. Engineering Thermodynamics and Heat Transfer[M]. Dalian: Dalian Maritime University Press, 2002.
- [9] 崔馨元. 标准铂电阻温度计的正确使用与维护[J]. 计量与测试技术, 2018, 45(2): 84-85.
CUI Xin-yuan. Correct Usage and Maintenance of Standard Platinum Resistance Thermometer[J]. Metrology & Measurement Technique, 2018, 45(2): 84-85.
- [10] FRADEN J. 现代传感器手册: 原理、设计及应用[M]. 宋萍, 隋丽, 潘志强, 译. 北京: 机械工业出版社, 2019: 20-45.
FRADEN J. Handbook of Modern Sensors[M]. SONG Ping, SUI Li, PAN Zhi-qiang, Translated. Beijing: China Machine Press, 2019: 20-45.
- [11] 闫再友, 陆志良, 王江峰. 空气动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 10-69.
YAN Zai-you, LU Zhi-liang, WANG Jiang-feng. Aerodynamics[M]. Beijing: Science Press, 2018: 10-69.
- [12] 朱玉华, 庄殿铮. 现代控制理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
ZHU Yu-hua, ZHUANG Dian-zheng. Modern Control Theory[M]. Beijing: China Machine Press, 2018.
- [13] WILLIAM C W, WILLIAM M J, JOHN A T. 制冷与空气调节技术[M]. 寿明道译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 11-87.
WILLIAM C W, WILLIAM M J, JOHN A T. Refrigeration & Air Conditioning Technology[M]. SHOU Ming-dao, Translated. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 11-87.
- [14] 金听祥. 制冷技术原理与应用基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020: 21-39.
JIN Ting-xiang. Principle and Application Basis of Refrigeration Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2020: 21-39.
- [15] 戴翊轩, 谷山林, 马周, 等. 一种用于热电阻传感器校准的新型温场的研究[J]. 计量与测试技术, 2019, 46(9): 32-34.
DAI Yi-xuan, GU Shan-lin, MA Zhou, et al. Research on a New Temperature Field for Calibration of Thermal Resistance Sensors[J]. Metrology & Measurement Technique, 2019, 46(9): 32-34.
- [16] 江铭. 真空干燥箱温场校准及调整方法探讨[J]. 中国计量, 2022(2): 118-119.
JIANG Ming. Discussion on Temperature Field Calibration and Adjustment Method of Vacuum Drying Oven[J].

- China Metrology, 2022(2): 118-119.
- [17] 林宗涵. 热力学与统计物理学[M]. 第2版. 北京: 北京大学出版社, 2018: 29-78.
LIN Zong-han. Thermodynamics and statistical physics[M]. 2nd Edition. Beijing: Peking University Press, 2018: 29-78.
- [18] MIL-STD-810G, Department of Defense Test Method Standard[S].
- [19] 张靖周. 高等传热学[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2015: 76-128.
ZHANG Jing-zhou. Advanced Heat Transfer[M]. 2nd Edition. Beijing: Science Press, 2015: 76-128.
- [20] 方赵嵩, 杨晚生, 江燕涛. 制冷技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021: 125-162.
FANG Zhao-song, YANG Wan-sheng, JIANG Yan-tao. Refrigeration Technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2021: 125-162.
- [21] 余建祖, 谢永奇, 高红霞. 换热器原理与设计[M]. 第2版. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2019: 15-65.
YU Jian-zu, XIE Yong-qi, GAO Hong-xia. Principle and Design of Heat Exchanger[M]. 2nd Edition. Beijing: Beijing University of Aeronautics & Astronautics Press, 2019: 15-65.
- [22] 张扬军, 彭杰, 诸葛伟林. 流体力学[M]. 北京: 科学出版社, 2019: 21-45.
ZHANG Yang-jun, PENG Jie, ZHUGE Wei-lin. Hydro-mechanics[M]. Beijing: Science Press, 2019: 21-45.
- [23] 韩雪涛. 制冷设备原理与维修[M]. 北京: 电子工业出版社, 2017: 19-23.
HAN Xue-tao. Principle and Maintenance of Refrigeration Equipment[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2017: 19-23.
- [24] 卢玫. 工程热力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2019: 16-45.
LU Mei. Engineering Thermodynamics[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2019: 16-45.
- [25] 张子健, 龚喜盈, 杨会涛. 流体力学与空气热力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2016: 35-46.
ZHANG Zi-jian, GONG Xi-ying, YANG Hui-tao. Fluid Dynamics and Aerothermodynamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2016: 35-46.
- [26] 赵利军, 杜焯旭, 张广山. 环境试验箱温度偏差分析及修正[J]. 环境技术, 2018, 36(6): 11-15,
ZHAO Li-jun, DU Chi-xu, ZHANG Guang-shan. Analysis and Correction of Temperature Holding Error for Temperature Testing Boxes[J]. Environmental Technology, 2018, 36(6): 11-15,
- [27] 孙立明, 张宁宁, 刘兆旭. 高低温能力验证结果影响因素分析[J]. 环境技术, 2019, 37(1): 40-44.
SUN Li-ming, ZHANG Ning-ning, LIU Zhao-xu. Analysis of Influencing Factors of High and Low Temperature Capability Verification Results[J]. Environmental Technology, 2019, 37(1): 40-44.

责任编辑: 刘世忠