

# 军用飞机实验室气候环境试验项目分析

张昭, 唐虎, 成竹

(中航工业飞机强度研究所, 西安 710065)

**摘要:** 为了对军用飞机实验室气候环境试验进行项目规划, 分析了国内外军用装备环境试验标准对军用飞机气候试验的适用性, 得到了针对军用飞机的标准要求试验项目。通过对国内外相关文献的分析挖掘, 分析了美国麦金利气候实验室可以开展的全机试验项目, 并探讨了美军第四代战机进行的气候试验项目。根据以上结果, 结合相关设计原则, 给出了军用飞机实验室气候环境试验的具体规划, 以及试验顺序, 规划结果可以为将来国内军用飞机气候试验项目规划提供参考。

**关键词:** 军用飞机; 气候实验室; 气候环境试验; 美军四代机; 试验项目

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2017.10.017

**中图分类号:** TJ85; V216      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2017)10-0087-05

## Laboratory Climatic Test Items of Military Aircraft

ZHANG Zhao, TANG Hu, CHENG Zhu

(AVIC Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

**ABSTRACT:** To plan items for military aircraft laboratory climatic test, several military material standards of environmental test were analyzed for applicability and test items meeting standard requirement of military aircraft were obtained. Relevant document at home and abroad were analyzed and explored to analyze full-aircraft test items of McKinley climatic laboratory and discuss climatic test items carried for USAF's fourth airplanes. Specific planning and test sequence on climatic test of military aircraft was given based on the above result and in combination with relevant design. The planning effect can provide references for planning climatic test of military aircraft in the future.

**KEY WORDS:** military aircraft; laboratory climatic; climatic test; USAF's fourth generation aircraft; test items

军用飞机结构强度设计规范和军用飞机结构完整性大纲等相关规范中明确提出军用飞机在设计生产的过程中必须进行气候环境试验<sup>[1-2]</sup>。其中实验室气候环境试验是气候环境试验的重要组成部分。飞机实验室气候环境试验是一项庞大的综合性项目, 根据国外经验一般需要提前两年时间进行试验计划, 其中试验项目规划是试验计划的重要内容之一, 它包括飞机需要经受哪些试验项目的考核以及这些试验项目的顺序。

美国自 1947 年麦金利气候实验室成立以来, 已进行了 400 余架飞机的气候环境试验<sup>[3]</sup>。在试验管理

规划方面, 1988 年美国空军制定飞机环境试验手册 TIH-88-004《FLIGHT TESTING UNDER EXTREME CLIMATIC CONDITIONS》, 总结了飞机气候试验过程与方法, 包括试验项目规划等内容。1997 年, 美军标 MIL-STD-810F《环境工程考虑和实验室试验》草案发布, 810F 的内容和格式与以往版本大不相同, 它将标准分为环境工程管理和实验室试验两大部分, 首次将包括试验项目规划等试验管理内容纳入该系列标准。国内飞机只进行自然环境下的气候试验以及设备级的实验室气候环境试验, 尚未进行过实验室内的全机气候环境试验, 对实验室全机气候环境试

验,还在研究阶段。2001年, GJB 4239《装备环境工程通用要求》颁布,该标准以国内环境工程工作经验为基础,重点参考 810F 的第一部分编制,由于该标准是针对军用装备,对于飞机环境试验的项目规划,国内还缺乏相关研究。文中结合国内外相关标准要求,现阶段试验能力以及国际现行试验规划案例,进行军用飞机气候试验项目规划,为将来国内军用飞机气候试验项目规划提供参考。

## 1 国内外军用装备环境试验标准分析

### 1.1 试验项目分析与对比

这里重点分析讨论 GJB 150A—2009《军用装备

实验室环境试验方法》、美军标 MIL-STD-810G《环境工程考虑和实验室试验》、英军标 DEF STAN 00-35《防务装备环境手册第三部分环境测试方法》、北约标准 AECPT 300《气候环境试验》等国内外四部与飞机气候环境试验相关的标准规范。其中前三部为装备环境试验,不仅包含气候环境试验,还包括机械环境与生物化学环境等试验。这几部标准对于试验项目的分类与项目的细分程度不一致,文中将其关于气候环境试验的项目进行了总结概括,见表 1。

美军标 MIL-STD810G 中规定的环境试验一共有 29 项,其中包括机械环境试验,气候环境试验,生物化学环境试验等,见表 1(标准未对环境试验分类)。其中气候环境试验项目有 11 项,分别为:低气压试

表 1 国内外部分标准与气候试验相关的试验项目汇总

序号	GJB 150A—2009	MIL-STD-810G	DEF STAN 00-35	AECPT 300
1	低气压试验	低气压试验	低气压试验	低气压试验
2	高温试验	高温试验	高温试验	高温试验
3	低温试验	低温试验	低温试验	低温试验
4	温度冲击试验	温度冲击试验	温度冲击试验	温度冲击试验
5	太阳辐照试验	太阳辐照试验	太阳辐照试验	太阳辐照试验
6	淋雨试验	淋雨试验	淋雨试验	淋雨试验
7	相对湿度试验	相对湿度试验	相对湿度试验	相对湿度试验
8	砂尘试验	砂尘试验	砂尘试验	砂尘试验
9	结冰/冻雨试验	结冰/冻雨试验	结冰/冻雨试验	结冰/冻雨试验
10	无	冻融试验	冻融试验	冻融试验
11	液浸试验	液浸试验	液浸试验	液浸试验
12	风压试验	无	吹风试验	流体污染试验
13	无	无	无	爆炸性大气试验
14	无	无	无	酸性大气试验
15	无	无	无	霉菌试验
16	无	无	无	盐雾试验

验、低温试验、高温试验、温度冲击试验、太阳辐照试验、淋雨试验、相对湿度试验、结冰冻雨试验、液浸试验以及冻融试验等<sup>[4]</sup>。GJB 150A 是国内现行的军用设备环境试验标准,规定了 27 个试验项目<sup>[5]</sup>,可以归纳为 4 类,包括气候环境试验、机械环境试验、生物环境试验、化学环境试验。其试验项目与美军标 MIL-STD-810G 基本相同,存在的差异是,前者比后者多了两项试验,少了四项试验。多出的两项为:风压试验、倾斜摇摆试验;缺少的四项试验为:声振试验、铁路冲击试验、时域波形再现试验与冻融试验,与气候环境试验相关的项目见表 1。英军标规定了 59 项试验项目,标准对这些试验进行分类,其中包括机械环境、气候环境、化学生物环境等,其中气候环境试验共 30 项<sup>[6]</sup>。其项目划分更加细化,概括起来,可以归纳为 12 项:低气压试验、高温试验、低温试

验、温度冲击试验、相对湿度试验、太阳辐照试验、降雪试验、降雾试验、淋雨试验、结冰冻雨试验、砂尘试验、吹风试验以及冻融试验等。北约标准 AECPT-300 是一部气候环境试验标准,规定了 18 项试验项目,其中包含综合 2 项综合试验,16 项气候环境试验<sup>[7]</sup>。

### 1.2 适用性分析

首先,几部标准存在气候环境试验分类不一致的问题。英军标 DEF 00-35 和北约标准 STAN-300 都对环境试验进行了分类,但存在异同。其中前者将“酸性大气试验、流体污染试验、霉菌试验以及盐雾试验”规定为气候环境试验,而后者将这四个试验规定为化学生物试验,从常规划分方法以及国外飞机环境试验的经验来看,后者的划分更加合理。

其次，部分试验项目对飞机存在适用性问题。上文提到的标准里有三个标准为军用装备通用的环境试验规范，部分试验项目对于飞机并不适用，需要对飞机进行适当剪裁。例如：爆炸性大气试验，该项目针对于工作在爆炸性大气附近的装备，因此并不适用于飞机；液浸试验，GJB 150A—2009 中规定“本试验适用于在工作或不工作的情况下可能被部分地或完全地浸渍的装备”以及“本试验不适用于有浮力的装备”，可见，该项目不适用于普通军用飞机以及水上飞机；GJB 150A 中试验项目风压试验，标准中提出“本试验不适用于飞行器”。

另外，标准要求的部分试验项目可以进行合并与整合。部分标准中提到的某些试验项目在具体操作时可以进行合并。英军标 DEF 00-35 规定的高速吹风试验，可以和淋雨试验合并，淋雨试验的风吹雨试验包含了吹风的因素。

最后，标准间试验项目可以互相补充。存在某一试验项目对飞机有重要意义，而一些标准没有提到，另外一些标准提到了，可以互相补充。例如：冻融试验考察装备在冰点温度附近时，水汽的解冻与融化对设备的影响，由于 GJB 150A—2009 借鉴了老版美军标 MIL-STD-810F 的内容，而冻融试验在新版的 MIL-STD-810G 中才被添加进来，故 GJB 150A—2009

缺该试验项目，而在美军标、英军标以及北约标准中均有规定，因此该项目可以作为我国军标的补充，并且，该项目可以合并相对湿度试验中进行；英军标 DEF 00-35 中规定了降雪试验以及降雾试验，这是其他三个标准都没有规定的项目，而这两个项目对于考察飞机在大雾环境下光学器件的性能以及飞机结构的雪承载能力具有重要意义。

综上所述，通过剔除化学生物试验、不适用于飞机的项目、互相借鉴以及合并部分项目，从标准中得到的飞机气候环境试验项目为：高温试验、低温试验、太阳辐照试验、相对湿度试验（包含冻融试验）、淋雨试验、冻雨/结冰试验、降雪试验、降雾试验、低气压试验、温度冲击试验、砂尘试验等，共 11 项。

## 2 美国空军的全机气候环境试验能力与试验规划方法分析

### 2.1 麦金利实验室开展的试验项目分析

从目前掌握的资料来看，麦金利气候实验室可以进行的气候环境试验项目有：高温、低温、湿热、淋雨、降雪、太阳辐照、旋风结冰、砂尘、冻云、海洋气候、沙漠气候、雷电等 30 多个项目的试验<sup>[8-11]</sup>。麦金利气候实验室的试验设施及试验能力见表 2。

表 2 麦金利气候实验室试验项目

环境室	主环境室	设备环境室	全天候环境室	砂尘环境室	盐雾环境室	温度高度环境室
尺寸/m	76×61×21	40×9×8	13×5×7	15×15×9	15×5×5	4×3×2
	低温	低温	低温	高温	高温	低温
	高温	高温	高温	降雨	相对湿度	高温
	相对湿度	相对湿度	相对湿度	太阳辐照	盐雾	低气压
	太阳辐照	太阳辐照	太阳辐照	砂尘	无	无
	结冰冻雨	结冰冻雨	结冰冻雨	吹风	无	无
可进行的 试验项目	冻云	冻云	旋风结冰	无	无	无
	旋风结冰	旋风结冰	冻云	无	无	无
	淋雨	淋雨	淋雨	无	无	无
	吹风	吹风	吹风	无	无	无
	降雪	降雪	无	无	无	无
	降雾	无	无	无	无	无

从环境室尺寸来看，只有主环境室可以容纳正常尺寸的军用飞机。因此，麦金利实验室可以进行的军用飞机全机气候试验项目共 11 项，分别为：低温、高温、相对湿度、太阳辐照、结冰冻雨、冻云、旋风结冰、淋雨、吹风、降雪、降雾等。另外，主环境室还具备发动机补气能力，飞机在主环境室进行试验时可以发动机开车。

### 2.2 美军的试验规划方法

美国空军环境试验手册指出，飞机实验室气候试

验共 7 项试验，包括：21℃ 基线试验、低温试验、太阳辐照条件下的高温试验、相对湿度试验、热带降雨试验、冻雨试验、发动机吸水试验<sup>[12]</sup>。其中基线试验一共进行 3 次，其具体的试验次序为：21℃ 基线试验→低温试验→第二次 21℃ 基线试验→太阳辐照条件下的高温试验→相对湿度试验→热带降雨试验→冻雨试验→发动机吸水试验→第三次 21℃ 基线试验。

基线试验的作用是获取飞机各系统基线数据，以便和后面的基线试验数据进行对比，获取飞机功能退化的依据。其中第一次基线试验除此作用外，还具备

考察系留系统,让试验人员熟悉试验操作的作用。根据相关资料及美军飞机气候试验来看,对于试验项目的顺序,有两个原则,一是将条件最严酷的试验优先进行,一般来说,高温和低温试验是首先要进行的试验项目;另外一个原则是尽量减少试验设备的拆装,提高试验效率。比如将冻雨试验安排在淋雨试验之后,是为了减少淋雨架的拆装。

### 3 美军部分第四代战机的气候环境试验项目

从成立至今,麦金利实验室进行了大量的飞机气候环境试验,在此简要介绍美军第四代战机 F-22 和 F-35 所进行过的气候试验项目。图 1 为它们在麦金利试验室进行试验的照片<sup>[3,13]</sup>。

F/A-22 猛禽 04 号机于 2002 年 5 月底飞抵麦金利



a F-22 在麦金利实验室

气候实验室,飞机到达后立即准备试验,开始了为期 3 个多月的气候试验。在这期间 F/A-22 经历了冷冻、高温、大雨冲洗、雪封、风吹、雾罩和湿化等严酷考验,具体试验项目见表 3。

F-35B“闪电 II”BF-05 架机于 2014 年 9 月底抵达麦金利气候实验室,开始长达 6 个月的气候试验。在这 6 个月的试验期间,飞机经受了高达 48.8 °C 的高温、低至 -40 °C 的低温、结冰、暴风雨和高湿度等环境,具体试验项目见表 3。在 F-35B 所有试验项目中,最受关注的是结冰试验,F-35 和大多数战术飞机一样,只具备有限的除冰能力。不像民航客机或者运输机那样在机翼前缘有可充气的通道或者有加热层,战术飞机没有这些。它的主要除冰方式是在发动机进气口引入热气来阻止结冰,而翼面结冰会极大影响飞机气动特性和升力的产生。



b F-35 在麦金利实验室

图 1 F-22 和 F-35 在麦金利试验室的照片

表 3 F/A-22 和 F-35B 进行的实验室气候试验项目

飞机型号	试验项目									
F/A-22	低温	高温	无	湿热	淋雨	冻雨结冰	冻云	旋风结冰	降雪	降雾
F-35B	低温	高温	太阳辐照	湿热	淋雨	冻雨结冰	冻云	旋风结冰	降雪	降雾

### 4 军用飞机实验室气候环境试验项目综合分析

上文在国内环境标准要求基础上,根据飞机气候试验特殊需求,得到的飞机环境试验项目。根据麦金利实验室环境室功能及尺寸,介绍该实验室可以进行的全机气候环境试验,分析了美军气候试验项目的规划方法,以及介绍了美国第四代战机 F/A-22 和 F-35B 进行的气候试验项目。将得到的几种项目规划,整合后列出,见表 4。

综合上文内容以及表 4 可以得到以下结论。

1) 标准中有低气压试验要求,麦金利实验室不具备全机低气压试验的能力,美国第四代战机也没有进行该试验。麦金利实验室的温度/高度实验室具备对设备级装备进行低气压试验的能力,可以对飞机机

载设备进行低气压试验。

2) 同样,标准中有温度冲击试验的要求,没有资料表明美军四代机进行过该试验。从设备能力上来看,麦金利实验室应该具备该试验能力。GJB 150A—2009 对于温度冲击的界定是:温度变化率大于 10 °C/min,这一气候环境在飞机的日常运行中几乎是不会出现的,飞机遭遇到得温度变化情况将在低温和高温试验中进行考核。

3) 砂尘试验在麦金利试验室也无法对飞机进行,美军四代机也没有进行该试验的记录,麦金利实验室对设备级装备具有该试验能力。

4) 美军四代战机在麦金利实验室进行了冻云结冰试验和旋风结冰试验,这在标准中没有体现,这两项试验是针对飞机的项目,对飞机性能考核具有重要意义。

根据以上分析结果,结合现阶段试验设备水平,

表 4 与飞机实验室气候环境试验相关的项目列表

项目序号	标准要求的试验项目	麦金利实验室可以开展的 全机试验项目	国外飞机开展的试验项目	
			F22	F35
1	低气压	无	无	无
2	低温	低温	低温	低温
3	高温	高温	高温	高温
4	温度冲击	无	无	无
5	太阳辐照	太阳辐照	无	太阳辐照
6	相对湿度(包含冻融)	相对湿度	湿热	湿热
7	淋雨	淋雨	淋雨	淋雨
8	冻雨/结冰	冻雨/结冰	冻雨/结冰	冻雨/结冰
9	无	冻云	冻云	冻云
10	无	旋风结冰	旋风结冰	旋风结冰
11	降雪	降雪	降雪	降雪
12	降雾	降雾	降雾	降雾
13	沙尘	吹风	无	无

军用飞机应进行的实验室气候环境试验项目包括: 基线温度试验、低温试验、高温试验、太阳辐照试验、相对湿度试验、淋雨试验、结冰试验、降雪试验等共 9 个大项, 其中相对湿度试验包括湿热试验和冻融试验两个子项目, 结冰试验包括冻雨、旋风结冰、冻云三个子项目。

根据优先进行最严酷试验以及试验过程中尽量减少设备拆卸的原则, 试验顺序为: 21 °C 基线试验 → 低温试验 → 21 °C 基线试验 → 高温试验 → 太阳辐照试验 → 湿热试验 → 冷凝试验 → 热带降雨试验 → 冻雨试验 → 降雾试验 → 风吹雨试验 → 冻云试验 → 旋风结冰试验 → 降雪试验 → 21 °C 基线试验。

## 5 结论

1) 现行军用装备实验室环境试验标准中给出的试验项目, 适用于军用飞机的项目共 11 项。分别为高温试验、低温试验、太阳辐照试验、相对湿度试验(包含冻融试验)、淋雨试验、冻雨/结冰试验、降雪试验、降雾试验、低气压试验、温度冲击试验、沙尘试验等。

2) 现阶段的试验技术及设施无法对整机进行标准要求的所有实验室气候试验项目, 包括低气压试验、沙尘试验等。

3) 在现行国军标要求之外, 一些试验项目对于飞机气候环境适应性考察具有重要作用, 包括冻融试验、冻云结冰试验以及旋风结冰试验等。

4) 现阶段, 军用飞机应进行的试验项目包括 9

大项, 包括基线温度试验、低温试验、高温试验、太阳辐照试验、相对湿度试验、淋雨试验、结冰试验、降雪试验、降雾试验、降雪试验等, 并按照一定的顺序进行试验。

## 参考文献:

- [1] GJB 67.9A—2008, 军用飞机结构强度规范第九部分: 地面试验[S].
- [2] GJB 775A—2012, 军用飞机结构完整性大纲[S].
- [3] 唐虎, 李喜明. 飞机气候试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 60-65.
- [4] MIL-STD-810F, Environmental Engineering Consideration Sand Laboratory Tests[S].
- [5] GJB 150A—2009, 军用装备实验室环境试验方法[S].
- [6] DEF STAN 00-35, Environment Handbook for Defence Materiel[S].
- [7] AECTP-300, Climatic Environmental Test[S].
- [8] 孙立华, 何飞. 美军气候实验室研究解决高技术武器战场“中暑”问题[J]. 国防科技, 2007(11): 87-89.
- [9] Drake C W. Environmental Test Capabilities of the Air Force Mckinley Climatic Laboratory: AIAA-85-0089[R]. Reno: AIAA, 1985.
- [10] BELL J D. Icing at the McKinley Climatic Laboratory : AIAA-2004-735[R]. Reno:AIAA, 2004.
- [11] RUSSELL A A. The Air Force Flight Test Center Artificial Icing and Rain Testing Capability Upgrade Program: AIAA-93-0295[R]. Reno: AIAA, 1993.
- [12] Hendrickson. Flight Test under Extreme Climatic Condition[R]. AD/A201710, 1988.
- [13] MARK A. F-35B Forty Below Hot-cold Tests[J]. Air International, 2015(3): 7-9.