

气候环境实验室降雪环境模拟技术研究

任战鹏, 吴敬涛, 吴学敏, 成竹

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 建立实验室降雪环境模拟技术, 为飞机等武器装备降雪环境适应性试验验证提供技术支持。**方法** 基于对自然降雪和实验室模拟降雪机理的对比与分析, 提出影响实验室内模拟降雪的关键因素, 并结合理论分析和试验研究, 得出实验室内模拟降雪环境的冷负荷计算方法和最优成雪的水粒直径。**结果** 建立了实验室降雪环境模拟技术, 采用该降雪环境模拟技术, 降雪强度及降雪品质均满足飞机等武器装备降雪环境适应性试验验证需求。**结论** 建立的降雪环境模拟技术切实有效, 可用于实验室飞机等武器装备降雪环境适应性试验研究。

关键词: 气候环境实验室; 降雪环境模拟; 冷负荷; 水粒直径

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.01.019

中图分类号: V553.11

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)01-0119-05

Technology on Snow Simulation in Climatic Environment Test Facility

REN Zhan-peng, WU Jing-tao, WU Xue-min, CHENG Zhu
(Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: The paper aims to build a snow simulating technique and provide technical supports for aircraft snow test in climatic environment test facility. Based on the comparative analysis and tests on mechanisms of natural snow and its laboratory simulation, key factors of simulating snow were proposed. In combination with theoretical analysis and experimental study, the optimal water particle diameter and the cooling loads of simulating snow in facility were elucidated. The paper built the simulating snow technique for the climatic environment test facility. Both intensity and quality of the snow met the requirement on snow environment compatibility test of aircraft and other weaponry. The environmental simulating snow technique is practical and effective, and could be used to study the snow environment adaptability of aircraft and other weaponry in facility.

KEY WORDS: climatic environment test facility; snow environment simulation; cooling loads; diameter of water particle

降雪环境对于飞机等武器装备是一种极端气候环境, 飞机在起飞、降落或停放期间均有可能受到降雪环境的影响, 引起风挡、机翼、桨叶、雷达罩、发动机进气道以及外挂武器元件等部位结冰, 导致起落架、襟翼等活动部件卡滞, 武器系统故障等, 影响飞机系统的正常工作。当降雪强度较大时, 可能导致APU不能正常启动或者性能下降^[1-4]。

目前我国在飞机研制过程中, 通过外场试验对飞机系统降雪环境适应性进行试验考核, 但外场试验的环境条件不可控, 温度、降雪强度、风速都会出现较大的变化。同时, 外场降雪试验给试验保障设备、试验监测与测量设备以及试验人员的操作带来很多问题和挑战, 不但增加了试验成本和试验周期, 而且很难保证试验达到飞机设计的考核要求^[5-6]。为避免外

收稿日期: 2019-06-21; 修订日期: 2019-07-18

Received: 2019-06-21; Revised: 2019-07-18

作者简介: 任战鹏 (1985—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为飞机气候环境适应性试验技术。

Biography: REN Zhan-peng (1985—), Male, Master, Engineer, Research focus plane climate adaptability test technology.

场试验出现的各种困难,且保证降雪环境条件满足飞机各系统降雪试验的考核要求,文中从成雪的机理出发,结合室内模拟降雪的特点,通过对实验室内模拟降雪环境关键技术的分析与研究,设计了一种实验室内降雪环境模拟方法,可满足飞机等武器装备降雪环境适应性的考核要求,为我国飞机等武器装备的降雪环境适应性试验研究提供技术支持。

1 降雪环境形成机理

自然界的降雪主要是云中的过冷水滴和冰晶相互碰撞,部分冰晶迅速增大,当冰晶能够克服空气阻力和浮力时,便从空中落下,在空气温湿度、气流、降落高度等因素的影响下,最终形成了各种形状的雪花^[7-10]。最常见的雪花为六角形,如图1所示。实验室是一个有限的空间,实验室内模拟降雪受温度、湿度、水温、雾化水滴直径、气流组织形式以及实验室空间大小等因素的影响,很难形成自然界中真实雪花形状的降雪环境。实验室内模拟降雪是通过过冷水雾化,在有限的空间和距离内冷凝结晶,形成“雪花”,最终在指定区域内形成降雪环境,通过这样方式形成的雪花为不规则的椭球状,如图2所示。



图1 自然界最常见的六角形雪花
Fig.1 Common hexagonal snowflake in nature

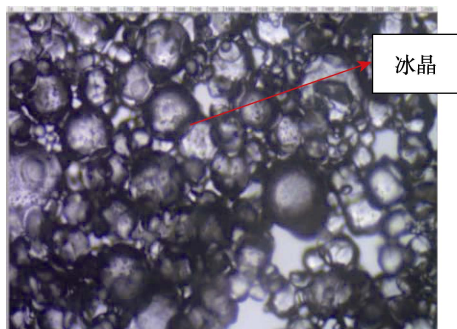


图2 实验室内人工造雪
Fig.2 False snowflake in laboratory

实验室内模拟降雪,温度是保证成雪的前提。水经过雾化,在实验室内形成降雪需要大量冷量,实验室内温度随着试验的进行会升高,所以实验室内降雪过程中,须保证实验室内温度的稳定,满足降雪的冷负荷需求^[11-12]。湿度直接影响着降雪的品质,如果实验室内湿度太大,则模拟的降雪为“湿

雪”,雪的密度和黏性较大,雪品质较差。在湿度较低环境下,模拟的造雪为“干雪”,雪的密度和黏性较小,雪的品质较好。

对飞机等武器装备来说,雪的微观形状对系统功能或性能没有任何影响,但“湿雪”的密度较大,雪的黏性较高,易引起设备或部件的冻结或卡滞等故障。因此相对“干雪”,“湿雪”环境对于飞机等武器装备更为严酷。

2 实验室降雪环境模拟

根据飞机等武器装备的降雪试验需求,在气候环境实验室中设计了飞机降雪试验系统,可在实验室内 $-25\sim-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内模拟一定强度的降雪环境,满足飞机等武器装备的降雪环境试验需求。实验室降雪试验系统降雪环境指标见表1。

表1 降雪试验系统指标
Tab.1 Indicators of snow test system

系统指标项	指标参数
降雪环境温度	$-25\sim-25\text{ }^{\circ}\text{C}$
最大有效降雪面积	700 m^2
降雪强度	$10\sim75\text{ mm/h}$
雪密度	$\leq 500\text{ kg/m}^3$
降雪时间	最大降雪强度时持续 3 h

2.1 实验室降雪模拟冷负荷

温度是实验室内模拟降雪环境的关键,降雪过程中必须保证降雪所需的冷量需求,持续对实验室内进行相应的冷量补偿,保证实验室内温度满足降雪试验要求。实验室进行降雪试验时,需要消耗大量的冷量,其中降雪试验系统模拟降雪所需冷负荷是实验室降雪试验时最大冷负荷,主要由降雪用水成雪的过程产生。为提高降雪效率,并降低实验室温度控制的冷负荷,降雪采用 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水。降雪试验系统在实验室中的成雪过程如下: $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水(T_1)到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水(放热,显热); $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水(T_0)到 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的“雪花”(放热,潜热); $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的雪花到 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的“雪花”(放热,显热);环境温度下水雾蒸发(吸热,潜热)。

降雪过程中,一部分的雾化水在成雪过程中蒸发,使得实验室湿度增加。为得出不同水滴直径与蒸发率之间的变化关系,采用不同雾化型号喷嘴,在一定温度和湿度条件下进行了试验测试,得出雾化水滴直径和蒸发率之间的关系,如图3所示。可以看出,在一定的温度和湿度下,随着雾化液滴直径的增大,蒸发率基本保持不变;在一定温度条件下,实验室内相对湿度越小,降雪雾化水的蒸发率越高。在 $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降雪工况时,降雪雾化水的蒸发率在 $6\%\sim 8.5\%$ 之间变化, $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 降雪试验时,水的蒸发量约为 3.8% 。

为保证实验室降雪试验的持续进行,需对实验室

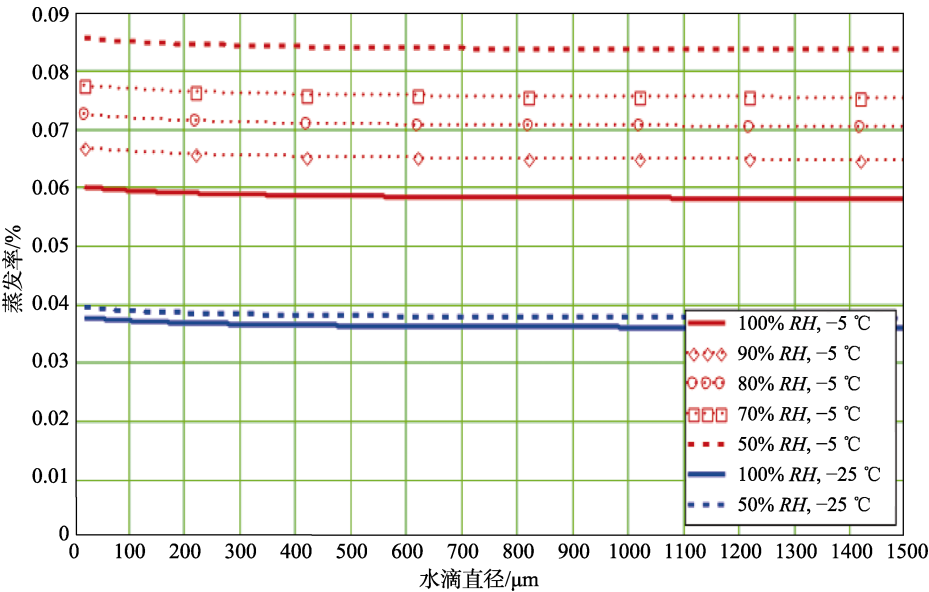


图 3 水滴直径与蒸发率关系
Fig.3 Relationship between water drop diameter and evaporation rate

进行冷量补偿，保证实验室内环境温度控制在试验要求温度。其中实验室内-25℃条件下，降雪强度75 mm/h、有效降雪面积700 m²是实验室降雪试验冷量需求最大的降雪工况。根据实验室模拟降雪时雾化水的成雪过程，可得出实验室降雪试验时，降雪模拟所需的冷负荷计算为：

$$Q=m_{\text{水}}\cdot[C_{\text{水}}\cdot(t_1-t_0)+h+C_{\text{冰}}\cdot(t_0-t_2)]-m_{\text{蒸}}h_{\text{蒸}}+W \quad (1)$$

式中： $m_{\text{水}}$ 为降雪试验用水量； t_1 为水温； t_0 为冰点温度； t_2 为目标降雪试验温度； $C_{\text{水}}$ 为水的比热容； $C_{\text{冰}}$ 为冰的比热容； h 为融化潜热； $h_{\text{蒸}}$ 为蒸发潜热； $m_{\text{蒸}}$ 为蒸发水量； W 为降雪试验系统设备运行功率。

根据式（1）可得出：实验室-25℃温度条件下，降雪强度75 mm/h、有效降雪面积700 m²降雪工况的冷负荷为3079 kW，即降雪试验的最大冷负荷为3079 kW。

2.2 水滴直径与成雪距离关系

实验室内模拟降雪环境，在满足降雪冷量需求的前提下，合理的雾化水粒直径是影响降雪质量和成雪距离的关键因素。雾化水滴直径过大，使得成雪距离较长，并且水滴在空中碰撞凝结，雪粒直径变大，导致雾化水在空中不能完全形成冰晶，最终成雪的密度和黏性较大，雪的品质较差。雾化水滴直径较小时，模拟雾化水成雪距离短，并且雪粒直径较小，雾化水结晶成雪充分，降雪的密度和黏性较小，雪品质较好。

为选择适用于实验室降雪试验要求的雾化水粒直径，通过适当的喷嘴选型和调节供水压力控制雾化水滴直径。在-5℃和-25℃环境下，对不同水滴直径雾化水的成雪距离进行了测试，测试结果如图4所示。可以看出，在-5℃和-25℃温度环境下，随着雾

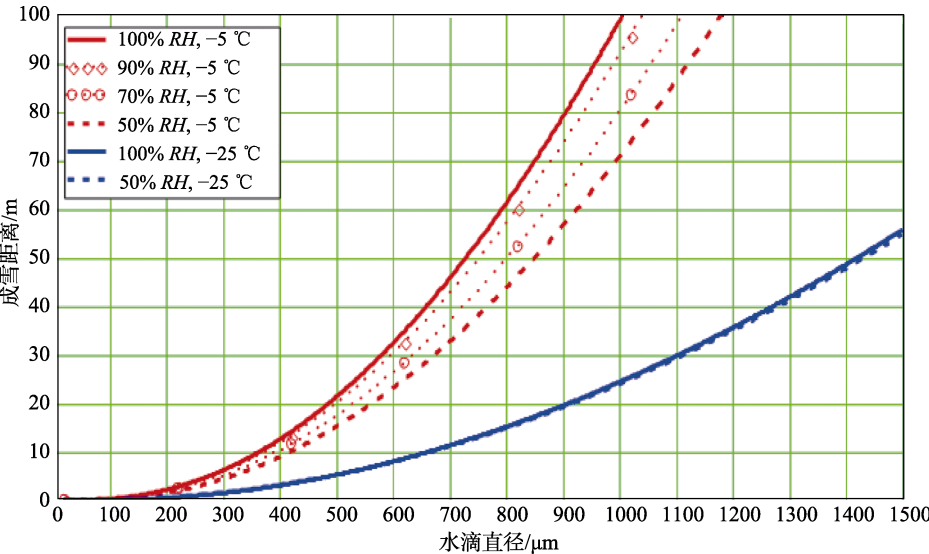


图 4 成雪距离随水滴直径大小的变化关系
Fig.4 Relationship between water drop diameter to freeze

化水滴直径的增加,成雪距离也随之增加。根据实验室实际空间大小以及飞机等武器装备的降雪试验需求,并且保证模拟降雪的品质,选择 100~150 μm 的雾化水滴直径进行降雪模拟,最短成雪距离约 4 m,且雪粒直径在 200~400 μm 之间。

3 实验室降雪品质

自然界中降雪会受到很多因素影响,如风速、地形等,使得地面积雪厚度有较大的变化,而在实验室中降雪模拟主要受模拟造雪方式、实验室空间以及实验室气流组织形式的影响。

3.1 降雪均匀性

在实验室内气流组织形式下,采用单台造雪设备在 -25 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度下沿固定方向降雪 20 min,沿出雪方向的降雪厚度分布如图 5 所示。可以看出,沿整个降雪方向,雪厚度分布类似正太分布状的形式,但在 10~35 m 有效降雪距离内,平均每米之间的降雪厚度相差不超过 5 mm。

为保证降雪试验具有更好的降雪均匀性,在进行飞机等武器装备降雪试验时,可根据试验件的大小,采用多台造雪设备,通过合理布置,共同进行模拟造雪,这样可大大提高降雪的均匀性分布。采用两台造雪设备对某飞机机翼段的降雪试验时,沿整个翼展方向,雪厚度相差 5 mm,翼宽方向雪厚度仅相差 2 mm。飞机等武器装备的覆雪试验,一般针对试验件表面曲率小于 60 $^{\circ}$ 的区域^[13],而飞机等武器装备表面曲率小

于 60 $^{\circ}$ 的试验件的表面区域面积有限,并且对均匀性也没有非常严格的要求,该均匀性完全可以满足飞机降雪环境适应性试验的要求。

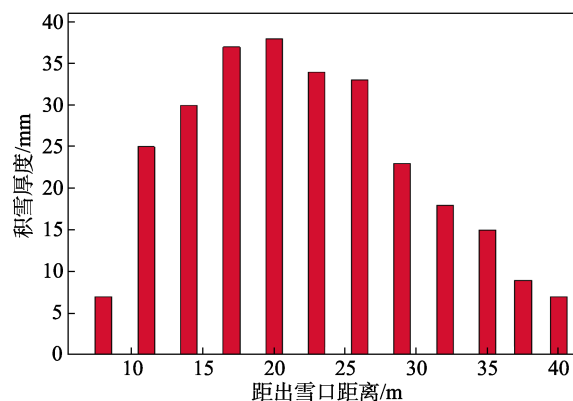


图 5 雪厚度沿射程分布

Fig.5 Snow thickness and range distribution

3.2 降雪密度

在气候环境实验室中 -25 $^{\circ}\text{C}$ 、RH 为 70% 的环境下,采用降雪试验系统进行降雪环境模拟,对模拟降雪区域内的不同位置的雪密度进行取样测量,通过雪密度计算公式(2)计算得出各测点雪密度值(见表 2)。

$$\rho = \frac{4 \cdot (m - m_1)}{\pi \cdot D^2 \cdot h} \quad (2)$$

式中: ρ 为雪密度; m 为测量总质量; m_1 为量桶质量; D 为量桶直径; h 为雪厚度。

表 2 -25 $^{\circ}\text{C}$ 造雪密度检测

Tab.2 The density of simulating snow at -25 $^{\circ}\text{C}$

测量值	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组	第 8 组
总质量/g	108	228	176	203	187	179	153	157
雪质量/g	5	125	73	100	84	76	50	54
雪厚度/mm	5	62	35	54	44	45	28	30
雪密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	212.1	427.6	442.4	392.8	404.9	358.2	378.7	381.8
平均密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	374.8							

注:量桶直径为 77.5 mm,量桶质量为 103 g

从表 2 可以看出,测点中最大雪密度为 442.4 kg/m^3 。由于雪密度受模拟降雪时实验室内气流组织的因素,各测点雪密度值呈现一定的离散性。从测量结果来看,平均雪密度为 374.8 kg/m^3 ,模拟的降雪的密度和黏性较小,雪的品质较好。

4 结论

通过对自然环境降雪和实验室模拟降雪机理的对比分析,提出了影响实验室内模拟降雪及降雪品质

的关键因素,并结合理论分析与试验研究,得出了实验室内降雪模拟时的冷负荷计算方法,以及雾化水粒直径与成雪距离之间的变化关系。最终选择 100~150 μm 的水粒直径作为实验室模拟降雪的最优水粒直径,保证了实验室模拟降雪的成雪距离和降雪品质。建立了气候环境实验室降雪环境模拟技术,可在气候实验室内模拟一定强度的降雪环境,满足飞机等武器装备降雪环境适应性试验需求,为飞机等武器装备的降雪环境适应性试验研究提供技术支持。

参考文献:

- [1] 胥泽奇, 张世艳, 宣卫芳. 装备环境适应性评价[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 54-59.
XU Ze-qi, ZHANG Shi-yan, XUAN Wei-fang. Environmental Worthiness Evaluation of Equipment[J]. Equipment Environment Engineering, 2012, 9(1): 54-59.
- [2] 钟培道. 环境因素对航空装备失效的影响与对策[J]. 装备环境工程, 2005, 2(6): 82-85.
ZHONG Pei-dao. Influence and Countermeasure of Environmental Factors to the Failure of Aeronautical Equipment[J]. Equipment Environment Engineering, 2005, 12(6): 82-85.
- [3] 杨森, 张凯, 乔英峰, 等. 严寒环境对军用飞机的影响及预防措施[J]. 装备制造技术, 2012(10): 267-268.
YANG Sen, ZHANG Kai, QIAO Ying-feng, et al. The Influence and Precautionary Measures of Frosty Natural Environment on Military Aircraft[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2012, 10(10): 267-268.
- [4] 周川, 张序, 谭力, 等. 强降雪天气对飞行的影响分析[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2015, 6(3): 78-91.
ZHOU Chuan, ZHANG Xu, TAN Li, et al. The Influence of Heavy-snow Weather on Flight[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2015, 6(2): 78-91.
- [5] 唐虎, 刘海燕. 气候环境实验室总体技术要求[M]. 西安: 中国飞机强度研究所, 2013.
TANG Hu, LIU Hai-yan. Engineering Proposal for the Design of an Environmental Test Facility[M]. Xi'an: Aircraft Strength Institute, 2013.
- [6] 唐虎, 李喜明. 飞机气候试验[J]. 装备环境工程, 2012, 9(1): 60-65.
TANG Hu, LI Xi-ming. Climatic Test of Aircraft[J]. Equipment Environment Engineering, 2012, 9(1): 60-65.
- [7] 盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
SHENG Pei-xuan, MAO Jie-tai, LI Jian-guo, et al. Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003.
- [8] HEYMSFIELD A J, KAJIKAWA M. An Improved Approach to Calculating Terminal Velocities of Plate-like Crystals and Graupel [J]. Journal of Atmospheric Science, 1987, 44(7): 1088-1099.
- [9] MITCHELL D L, ZHANG R, PITTER R L. Mass Dimensional Relationships for Ice Particles and the Influence of Riming on Snowfall Rates [J]. Journal of Applied Meteorology, 1990, 2(1): 153-163.
- [10] MAGONO C, NAKAMURA T. Aerodynamic Studies of Falling Snowflakes [J]. Journal of Meteorology Society of Japan, 1965, 43(3): 13-147.
- [11] 刘海燕, 马建军, 张惠. 大型气候环境实验室空气处理系统方案讨论[J]. 装备环境工程, 2014, 11(5): 107-113.
LIU Hai-yan, MA Jian-jun, ZHANG Hui. Discussion on Design of the Air Handling System in Large Climatic Environmental Test Laboratory[J]. Equipment Environment Engineering, 2014, 11(5): 107-113.
- [12] 张惠, 刘海燕, 李喜明, 等. 大型气候环境实验室冷媒的分析选择[J]. 装备环境工程, 2015, 12(2): 104-109.
ZHANG Hui, LIU Hai-yan, LI Xi-ming, et al. Analysis and Selection of Refrigerants Used in the Large Climatic Environment Test Facility[J]. Equipment Environment Engineering, 2015, 12(2): 104-109.
- [13] MODUK-DEF STAN 00-035, Environmental Handbook for Defence Materiel Part 3 Environmental Test Methods[S].