

气候环境实验室降/扬雪环境表征方法分析

唐扬刚, 马兰, 任战鹏

(中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: 针对国内目前尚未开展过民机整机级实验室降/扬雪试验、对适航关注的降/扬雪环境参数不明确等问题, 分析了气候环境实验室降/扬雪环境表征方法。首先从与降/扬雪相关的气象标准、环境试验标准、适航符合性验证方法和国外民机相关试验资料这四个方面着手收集了与降/扬雪环境相关的文献, 分析提炼出了10个可对降/扬雪环境进行表征的方法。然后以民机降/扬雪环境下的适航符合性验证要求为基础, 结合上述提炼出的10个表征方法, 分析确定采用温度、能见度、总含水量、风速和雪密度对气候环境实验室降/扬雪环境进行表征, 研究得到的降/扬雪环境表征方法可为将来在气候环境实验室内开展民机降/扬雪试验提供参考。

关键词: 气候环境实验室; 降/扬雪环境; 表征方法; 适航符合性

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.07.010

中图分类号: V216.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)07-0052-05

Characterization Method of Snowfall Environment in Climatic Environmental Laboratory

TANG Yang-gang, MA Lan, REN Zhan-peng

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

ABSTRACT: Currently, no snowfall test about a real civil aircraft in climatic environment laboratory has been conducted yet, and no completely-clear parameter which is critical to airworthiness of snowfall has been found. This paper analyzed the characterization methods of snowfall in climatic environmental laboratory. First of all, the literature related to the snowfall was collected from four aspects-meteorological standards, environmental test standards, airworthiness compliance verification methods and foreign civil aircraft test data. Ten characterization methods of snowfall environment were analyzed and extracted. Secondly, with airworthiness compliance verification requirements in the snowfall environment of civil aircraft, temperature, visibility, the total water content, wind speed and the density of snow were used to characterize the snowfall environment in climatic environmental laboratory. The characterization methods obtained in the research can provide references for carrying out snowfall test in climatic environmental laboratory in the future.

KEY WORDS: climatic environmental laboratory; snowfall environment; characterization methods; airworthiness compliance

民用飞机在使用的过程中会遭遇降/扬雪天气, 给飞机的使用带来不利影响。首先, 降/扬雪会导致

机体、翼面、发动机唇口、辅助动力装置 (APU) 等部位积雪/冰, 可能引起结构变形或活动机构卡滞、

收稿日期: 2020-03-21; 修订日期: 2020-04-15

Received: 2020-03-21; **Revised:** 2020-04-15

作者简介: 唐扬刚 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为飞机气候环境适应性分析与验证技术。

Biography: TANG Yang-gang (1991—), Male, Master's degree, Research focus: aircraft climate environment adaptability analysis and verification technology.

发动机效率下降、APU 启动故障等问题，从而影响民机使用安全。其次，降/扬雪会降低能见度，影响飞行员视线，可能导致飞行员误判，造成飞行事故。因此在对民机进行适航取证时，必须证明民机在降/扬雪环境下的适用性。比如 CCAR25.1093(b)(1)中要求民机 APU 要在为飞机作该类营运所制定的使用限制内的降雪和扬雪环境下，没有不利于运转或引起功率严重损伤的冰积聚。然而寻找满足要求的自然降/扬雪条件较困难，因此利用气候环境实验室模拟的降/扬雪环境进行适用性验证得到了越来越多的应用。如空客 A380^[1]、A350XWB^[2]和庞巴迪 C 系列飞机在麦金利气候环境实验室进行了降/扬雪试验，并得到了适航当局的认可。

不管是在自然环境还是在气候环境实验室中，对民机在降/扬雪环境下的适用性进行验证时，都要先明确降/扬雪环境定义、表征方法等。目前关于民机在降/扬雪环境下的适用性验证的文献和标准很少，麦金利气候实验室虽然进行了民机的降/扬雪试验，但是公开的资料较少，主要是对试验结果的概述，无法对其模拟的降/扬雪环境进行全面的认识 and 了解。DEF STAN 00-35 提供了军用装备大风雪和雪载的实验室试验方法^[3]，但也没有对降/扬雪环境本身给出明确的定义。我国的国军标、航标等也都未提供实验室降/扬雪环境试验方法，因此明确降/扬雪环境定义和表征方法对于支持民机气候环境实验室降/扬雪试验的开展具有重要意义。

1 降/扬雪环境定义

1.1 雪形成机理

在自然环境中，雪是大气中以晶态存在的水。大气中聚集的细小水滴，经过冷空气冷却形成过冷水滴，空气中的水汽呈现过饱和状态，在低温环境作用下，过冷的微小水滴可以形成细小的冰晶核，且大气中存在的气溶胶颗粒也会形成晶核。随后水蒸气在晶核上的继续成长，从而形成了各种各样的雪晶。雪晶通过冰晶融合积聚作用，逐渐长大成为雪晶的聚集体。当这种聚合体的重量超过空气的浮力后，就会形成自然的降雪。在自然界中，空气中的水汽想要结晶，从而形成降雪，必须具备三个条件：空气中的水汽处于饱和状态、空气中必须有凝结核以及必要的环境温度和水蒸气过饱和度条件^[4-5]。

从自然界雪晶形成的机理可以看出，雪晶形成的关键因素是温度和空气中的水分。另外，在自然降雪过程中，云中雪晶的形成、成长的过程时间较长。要在气候环境实验室中模拟降雪，由于空间和条件的限制，需要在短时间内完成晶核的发育、雪晶的形成和成长，这与自然界降雪的形成机制略有不同。气候环境实验室中通过制冷设备使实验室中的环境温度达

到雪晶形成温度，然后利用造雪机来形成降雪。

1.2 环境定义

GB/T 35224—2017《地面气象观测规范 天气现象》^[6]以及文献^[7]对雪的描述为：固态降水，大多是白色不透明的六出分枝的星状、六角形片状结晶，常缓缓飘落，强度变化较缓慢，温度较高时多成团降落。《大气科学名词》中对雪的定义为由冰晶聚合而形成的固态降水^[8]。

在 CCAR25 部 25.1093(b)(1)条中提到的“降雪”和“扬雪”在 FAR25 部 25.1093(b)(1)中分别对应“falling snow”和“blowing snow”。目前，相关文献中并没有对“降雪”或“falling snow”的明确定义。一般而言，降雪是指雪花不受阵风影响，自然下落的天气现象。在《大气科学名词》中将高吹雪译为“blowing snow”，是指阵风将雪片（雪花、雪粒）吹扬到高于水平视线以上的天气现象^[8]。在 GJB 1172.6《军用设备气候极值 雪》中，也将高吹雪译为“blowing snow”，指雪粒子随风移动，使距离地面 1.5 m 以上水平能见度小于 10 km 的现象^[9]。可以看出，GJB 1172.6 对高吹雪（blowing snow）的定义更加明确，给出了能见度要求，因此本文采用 GJB 1172.6 中对高吹雪（blowing snow）的定义来表示“扬雪”。从上述分析可以看出，降雪与扬雪的区别主要在于是否有风将雪粒子吹扬起来。

空客 A380 在进行 APU 降/扬雪环境下的结冰试验时，对雪的种类也进行了记录，选取的自然环境中的雪为干雪（dry snow），实验室模拟的雪为湿雪（wet snow）^[1]。《大气科学名词》中对干雪的定义为雪中的空隙被空气充满，液态水含量很少的雪^[8]。干雪中含水量很少，用手捏不成团，容易形成厚厚的积雪，易被风吹起来，干雪形成气温一般低于 0℃。

湿雪是指包含大量液态水的雪，如果水完全充满雪中的空隙，则归类于极湿雪^[8]。湿雪中含水量较多，用手可捏成团，在雪层中可以明显看出有液态水的存在，容易附着在物体表面，从而冻结成冰，湿雪形成温度一般接近 0℃。

2 标准中的降/扬雪环境表征方法分析

降/扬雪环境表征是利用某些物理量对降/扬雪过程、结果、相关环境参数等进行描述，从而对降/扬雪形成全面、立体的认识。可以从四个方面着手来分析降/扬雪环境的表征方法：首先降/扬雪是一种自然气候现象，可以收集整理相关气象标准中对降/扬雪环境的表征方法；相关的环境试验标准给出的表征方法；与降/扬雪有关的适航符合性验证方法中的表征方法；国外关于民机降/扬雪试验的文献中对降/扬雪环境的表征方法。

2.1 气象标准中的表征方法

GB/T 35229—2017《地面气象观测规范 雪深与雪压》通过雪深和雪压来对降雪进行观测记录^[10]。雪深是指从积雪表面到地面的垂直高度，雪压是指单位面积上的积雪质量。

降/扬雪会影响能见度，因此能见度也能对降/扬雪环境进行表征，在美国自动地面观测系统(ASOS)中，降雪强度就是根据透射表或人工观测的能见度来判断的^[11]。GB/T 35223—2017《地面气象观测规范 气象能见度》中对能见度的定义为：视力正常的人在当时天气条件下，能够从天空背景中看到和辨认出的目标物(黑色、大小适度)的最大距离^[12]。

GB/T 21978.6—2008《融雪型雨雪量计》中规定的融雪型雨雪量计通过测量每小时的雪水当量(mm/h)来表示降雪强度^[13]，雪水当量表示雪融化后得到的水量^[8]。

气象标准中对降/扬雪环境的表征方法见表1。

表1 气象标准中对降/扬雪环境的表征方法
Tab.1 Characterization method of snowfall environment in meteorological standards

序号	表征方法	定义
1	雪深	积雪表面到地面的垂直高度
2	雪压	单位面积上的积雪质量
3	雪水当量	单位时间内一定体积的降雪融化后的水量

2.2 环境试验标准中的表征方法

DEF STAN 00-35 在大风雪试验标准中提出采用雪通量来表示大风雪强度，GJB 1172.6 中也通过雪通量表示高吹雪(扬雪)强度。雪通量是指单位时间内水平方向上通过单位铅直(竖直)截面的雪质量。DEF STAN 00-35 中除了利用雪通量对高吹雪(扬雪)进行描述，还对试验时的温度和风速进行了规定。

DEF STAN 00-35 在雪载试验方法中采用雪载来表示积雪强度，雪载是指单位面积上的积雪质量。不难发现，该标准中的雪载与 GB/T 35229—2017 标准中雪压的定义一致。DEF STAN 00-35 同时还提出要考虑到由于风导致的积雪不均匀的问题，但并未给出明确的风速要求，另外还推荐了进行雪载试验时的温度。

GJB 1172.6—91 提出了雪粒子有效直径的概念：测量到的雪粒子长度与宽度乘积的平方根^[9]。同时还提出了雪粒子谱的概念：一定的雪粒子有效直径间隔内的雪粒子百分数随雪粒子有效直径的变化。GJB 1172.6—91 还定义了雪密度：单位水平表面积上积雪的质量与雪深的比。

综上所述，环境试验标准中对降/扬雪环境的表征方法见表2。

表2 环境试验标准中对降/扬雪环境的表征方法

Tab.2 Characterization method of snowfall environment in environmental test standard

序号	表征方法	定义
1	温度	降雪时的环境的冷热程度
2	雪通量	单位时间内水平方向上通过单位铅直截面的雪质量
3	风速	降雪时空气流动速度
4	雪载/雪压	单位面积上的积雪质量
5	雪粒子有效直径	测量到的雪粒子长度与宽度乘积的平方根
6	雪密度	单位水平表面积上积雪的质量与雪深的比

3 适航关注的降/扬雪环境表征方法分析

3.1 适航符合性验证方法中的表征方法

CS-25 部的符合性验证方法 AMC25.1093(b)中给出了飞机进气系统在进行降雪和扬雪环境下的符合性验证时对降/扬雪环境的要求，包括能见度、温度、总含水量、风速和干湿雪类型，见表3。

表3 AMC25.1093(b)对降/扬雪环境的要求
Tab.3 Requirements of AMC25.1093 (b) for snowfall environment

环境类型	能见度/km	温度/°C	总含水量/(g·m ⁻³)	风速/(m·s ⁻¹)
降雪	<0.4	-3~+2(湿雪)、	1	—
扬雪		-9~-2(干雪)	3	7.5~15

3.2 国外民航降/扬雪试验中的表征方法

A380 在加拿大圣休伯特机场附近进行 APU 降/扬雪环境下的适航符合性验证试验的环境参数见表4。从表4可知，该试验利用风速、风向、能见度、阵风、温度以及降/扬雪强度来描述降/扬雪环境，另外还记录了此次试验中雪的类型为干雪。

表4 外场降/扬雪环境表征方法
Tab.4 Characterization methods of outfield snowfall environment

时间 UTC	风向@风速	能见度 Stat. Mile	阵风/(m·s ⁻¹)	温度/°C	降雪量
20:00	30°@6 m/s	1/2	—	-13	中雪
20:36	30°@6.5 m/s	3/8	—	-13	中雪
21:00	40°@6.5 m/s	1/4	9	-13	大雪
22:00	40°@6 m/s	3/8	—	-13	中雪
23:00	30°@5.5 m/s	1/4	—	-13	中雪

由于外场的环境温度一直比要求的-9 °C低，试验人员在麦金利气候实验室重新进行了 A380 的 APU

的降/扬雪试验。利用造雪机和轴流风扇来产生需要的雪和风速条件。试验前对造雪机进行标定，使得垂直于垂尾的风速为 10.29 m/s 时，空气中的总含水量（包括液态水和雪晶）为 3 g/m³，同时根据要求的雪晶降落末速度（1.5 m/s）计算得到了需要的降雪强度（0.172 kg/min）^[1]，但未说明该降雪强度是造雪机的造雪量还是在一定区域内形成的积雪的质量。另外，在实验室中模拟形成的雪为湿雪，且试验结果表明，湿雪条件下进气道和尾翼表面出现了明显的积雪，而在干雪条件下则只有很少的积雪。从上述分析可知，国外民航在实验室进行降/扬雪试验时采用温度、总含水量、风速、降/扬雪强度和干湿雪类型来对降/扬雪环境进行表征。

综合国外民航在自然和实验室降/扬雪环境下的适航符合性验证试验，归纳出对应的降/扬雪环境的表征方法，见表 5。

表 5 实验室降/扬雪环境表征方法
Tab.5 Characterization method of laboratory snowfall environment

环境类别	降雪环境	扬雪环境
表征方法	温度、总含水量、能见度、雪的类型	温度、风速、总含水量、能见度、雪的类型

表 5 中未将降雪强度纳入表征方法中，这是因为能见度与降雪强度是相互制约的关系。文献[14]给出了能见度与降/扬雪强度的理论计算结果，并与实测数据进行了对比。结果表明，能见度随着降/扬雪强度的增大呈指数降低的趋势。因此对于能见度和降雪强度，选取其中一个表征方法即可。

将上述各标准、适航符合性验证试验方法和试验资料中的表征方法综合在一起，得到 10 项表征方法，见表 6。

表 6 降/扬雪环境表征方法汇总
Tab.6 Summary of environmental characterization methods for snowfall

序号	表征方法	定义
1	雪深	积雪表面到地面的垂直高度
2	雪压	单位面积上的积雪质量
3	雪水当量	单位时间内一定体积的降雪融化后的水量
4	雪通量	单位时间内水平方向上通过单位铅直截面的雪质量
5	雪粒有效直径	测量到的雪粒子长度与宽度乘积的平方根
6	雪密度	单位体积的雪的质量
7	温度	降雪时的环境温度
8	能见度	降雪时能看清的最大距离
9	总含水量	单位体积内包含的液态和固态水的质量
10	风速	降雪时空气流动速度

4 气候环境实验室降/扬环境表征方法分析

表 6 中有 10 种降/扬雪环境的表征方法，如此多的表征方法都用来对气候环境实验室降/雪环境进行描述显然是不切实际的。考虑到民航气候环境实验室降/扬雪试验的目的是利用实验室模拟的降/扬雪环境验证其适航符合性，因此需要重点关注适航方面要求的降/扬雪环境参数。比如 A380 在进行 APU 降/扬雪试验时，控制的环境参数与 AMC25.1093(b)中要求的环境参数一致。下面以适航关注的降/扬雪环境表征方法为基础，再结合各标准中的表征方法以及已有的气候环境实验室降/扬雪试验资料，分析给出气候环境实验室降/扬雪环境表征方法。

上文分析给出了适航关注的降/扬雪环境表征方法有温度、雪类型（干雪或湿雪）、能见度、总含水量和风速。其中对于温度、能见度、总含水量和风速在气候环境实验室中都较容易实现和控制，而雪类型是对雪特性的定性描述，如何去定量地界定和控制则较困难。虽然 AMC25.1093(b)指出湿雪形成的温度是 -3~2 °C，干雪形成的温度是 -9~-2 °C，但是 A380 在麦金利气候实验室进行 APU 的降/扬雪试验时，记录了在 -9 °C 时雪的类型是湿雪^[1]。由此可见，对于干湿雪的界定不能仅凭温度。文献[8]对干湿雪进行了定性描述，二者最显著的区别是含水量的不同，这种区别可以采用一种量化的参数来描述——雪密度。文献[15]统计了新降雪的雪密度与当时气温的关系，见表 7。

表 7 雪密度与温度的关系
Tab.7 Relationship between snow density and temperature

降雪气温/°C	雪密度/(kg·m ⁻³)		
	最小值	最大值	平均值
-10 以下	12	233	75
-10~-5.1	11	295	87
-5.1~-2.1	35	258	104
-2.1~-0.1	43	455	128
0~2.0	69	529	183
2.0 以上	158	588	196

由表 7 可知，随着环境温度的升高，新降雪的雪密度的平均值也随之增大。考虑到干雪一般在较低的温度下形成，湿雪在相对较高的温度下形成，因此采用雪密度来对干湿雪进行定量的表征是可行的方法。但是还需要进一步研究确定干湿雪对应的密度范围，从而将干湿雪明确地区分开来。

综上所述，民用飞机在气候环境实验室中进行降/扬雪试验时，采用温度、雪密度、能见度、总含水量

和风速对降/扬雪环境进行表征, 该表征方法能满足适航符合性验证的要求。

5 结论

1) 降/扬雪的气象标准表征方法包括雪深、雪压和雪水当量。

2) 降/扬雪的环境试验标准表征方法包括温度、雪通量、风速、雪载/雪压、雪粒子有效直径和雪密度。

3) 适航关注的降/扬雪环境表征方法有温度、风速、总含水量、能见度、雪的类型。

4) 综合上述各类表征方法, 并针对干雪和湿雪的区别, 提出利用雪密度对干湿雪进行区分, 采用温度、雪密度、风速、总含水量和能见度对气候环境实验室降/扬雪环境进行表征, 该表征方法可支持民用飞机气候环境实验室降/扬雪试验的开展。

参考文献:

- [1] A380 Certification: Auxiliary Power Unit Icing Test Report[R]. 2006.
- [2] TOULOUSE M, LEWIS R. A350XWB Icing Certification Overview[R]. SAE Technical Paper 2015-01-2111, 2015.
- [3] DEF STAN 00-35, Environment Handbook for Defence Materiel[S].
- [4] 刘道平, 邬志敏, 华泽钊. 雪晶形成过程与人工造雪机技术[J]. 制冷与空调, 2003, 3(2): 1-5.
LIU Dao-ping, WU Zhi-min, HUA Ze-zhao. Snow Crystal Formation Process and Artificial Snow Making Technologies[J]. Refrigeration and Air-Conditioning, 2003, 3(2): 1-5.
- [5] 宋玫峰, 刘道平, 邬志敏, 等. 雪晶成核和生长机理研究[J]. 制冷学报, 2004, 25(3): 46-50.
SONG Mei-feng, LIU Dao-ping, WU Zhi-min, et al. Study on Nucleation and Growth Mechanism of Snow Crystal[J]. Journal of Refrigeration, 2004, 25(3): 46-50.
- [6] GB/T 35224—2017. 地面气象观测规范 天气现象[S].
- [7] 中国气象局. 地面气象观测规范[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
China Meteorological Administration. Specifications for surface Meteorological Observation[M]. Beijing: Meteorological Press, 2003.
- [8] 全国科学技术名词审定委员会. 大气科学名词(第三版)[M]. 中国科技术语, 2009, 11(1): 16-20.
CNCTST. Chinese Scientific Terms of Atmospheric Science (the Third Edition)[J]. China Terminology, 2009, 11(1): 16-20.
- [9] GJB 1172.6—91, 军用设备气候极值 雪[S].
GJB 1172.6—91, Climatic Extremes for Military Equipment Snow[S].
- [10] GB/T 35229—2017. 地面气象观测规范 雪深与雪压[S].
GB/T 35229—2017. Specifications for Surface Meteorological Observation—Snow Depth and Snow Pressure[S].
- [11] U. S. Department of Commerce, National Weather Service Observing Handbook No. 7, Surface Observations[S].
- [12] GB/T 35223—2017, 地面气象观测规范 气象能见度[S].
GB/T 35223—2017, Specifications for Surface Meteorological Observation—Meteorological Visibility [S].
- [13] GB/T 21978.6—2008, 融雪型雨雪量计[S].
GB/T 21978.6—2008, Melted Snow Type Rain and Snow Recorder[S].
- [14] 高太长, 刘西川, 张云涛, 等. 降雪现象与能见度关系的探讨[J]. 解放军理工大学大雪学报(自然科学版), 2011, 12(4): 403-408.
GAO Tai-chang, LIU Xi-chuan, ZHANG Yun-tao, et al. Relationship Research between Snowfall and Visibility[J]. Journal of PLA University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2011, 12(4): 403-408.
- [15] 崔宪江. 除雪机械[M]. 北京: 人民交通出版社, 1988.
CUI Xian-jiang. Snow Removal Machinery[M]. Beijing: People's Communications Press, 1988.