

MH

中华人民共和国民用航空行业标准

MH/T XXXX—XXXX

飞机除冰防冰液空气动力学性能试验方法

Test method for aerodynamic acceptance of aircraft de-icing/anti-icing fluids

(征求意见稿)

在提交反馈意见时，请将您知道的相关专利连同支持性文件一并附上。

XXXX - XX - XX 发布

XXXX - XX - XX 实施

中国民用航空局 发布

目 次

前言	III
1 范围	1
2 规范性引用文件	1
3 术语和定义	1
4 仪器设备	1
4.1 低温风洞	1
4.2 折射仪	1
4.3 黏度计	1
4.4 pH 计	1
4.5 温度传感器	2
4.6 差压传感器	2
4.7 湿膜测厚规	2
5 试验条件	2
5.1 加速条件选择	2
5.2 参考液	3
6 试验设施要求	3
6.1 仪器校准	3
6.2 内嵌试验段	3
6.3 试验段流场特性	4
6.4 T_f 测量	5
6.5 试验段排水	5
7 飞机除冰防冰液要求	5
7.1 总体要求	5
7.2 飞机除冰防冰液性能检测项目	5
8 试验流程	6
8.1 一般要求	6
8.2 试验步骤	6
9 数据处理	7
9.1 BLDT 计算方法	7
9.2 最大可接受值计算	8

9.3 LAAT.....	8
10 试验报告.....	8
参考文献.....	9

前 言

本文件按照GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第1部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件由中国民用航空局航空器适航审定司提出。

本文件由中国民航科学技术研究院归口。

本文件起草单位：中国民用航空总局第二研究所、成都民航六维航化有限责任公司。

本文件主要起草人：李志、靳俊升、王强、苏正良、梅拥军、彭华乔、李林、张亚博、刘曦非、魏亚、李文艳、周洪。

飞机除冰防冰液空气动力学性能试验方法

1 范围

本文件描述了飞机除冰防冰液空气动力学性能的试验方法，包括仪器设备、试验条件、试验设施要求、飞机除冰防冰液要求、试验流程、数据处理和试验报告。

本文件适用于飞机除冰防冰液空气动力学性能的试验。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中，注日期的引用文件，仅该日期对应的版本适用于本文件；不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 6488—2022 液体化工产品 折射率的测定

GB/T 6682—2008 分析实验室用水规格和试验方法

GB/T 9724—2007 化学试剂 pH值测定通则

GB/T 20856—2012 航空器 牛顿型除冰防冰液 I型

GB/T 20857—2012 航空器 非牛顿型除冰防冰液 II、III和IV型

ASTM D2196 用旋转黏度计测定非牛顿流体流变特性的标准试验方法 (Standard test methods for rheological properties of non-newtonian materials by rotational viscometer)

SAE AS 5901 符合SAE AMS 1424和SAE AMS 1428的飞机除冰防冰液水喷射和高湿耐久时间测试方法 (Water spray and high humidity endurance test methods for SAE AMS 1424 and SAE AMS 1428 aircraft deicing/anti-icing fluids)

3 术语和定义

下列术语和定义适用于本文件。

3.1

边界层位移厚度 boundary layer displacement thickness; BLDT

气流在边界层内受到阻碍而向外偏移的高度。

3.2

可接受空气动力学性能的最低温度 the lowest acceptable aerodynamic temperature; LAAT

能满足飞机空气动力学性能的除冰防冰液最低使用温度。

4 仪器设备

4.1 低温风洞

风洞应为闭口回流式风洞，试验段尺寸应至少为1.5 m×0.5 m×0.5 m（长×宽×高），最大风速应至少达到85 m/s。应配备制冷系统和海拔高度模拟系统，最低制冷温度应至少达到-50 °C，最大可模拟海拔高度应至少为4500 m。

4.2 折射仪

应配备1台阿贝折射仪，或其他至少能读到小数点后四位的折射仪，量程应至少为1.3000~1.7000。

4.3 黏度计

应配备1台 Brookfield LV系列旋转黏度计或其他等效仪器。

4.4 pH计

应配备1台pH计，精度宜为0.01单位。

4.5 温度传感器

应配备至少2个温度传感器，量程应至少为-180 °C至400 °C，精度宜为±0.5 °C。

4.6 差压传感器

测量稳定段与试验段压差的差压传感器的量程应至少为0 Pa~3000 Pa，精度宜为±1%。测量内嵌试验段前后压差的差压传感器的量程应至少为-300 Pa~300 Pa，精度宜为±0.5%。两个差压传感器宜在1 Hz和5 Hz之间进行低通滤波，且数据采样频率至少为滤波器截止频率的2倍。

4.7 湿膜测厚规

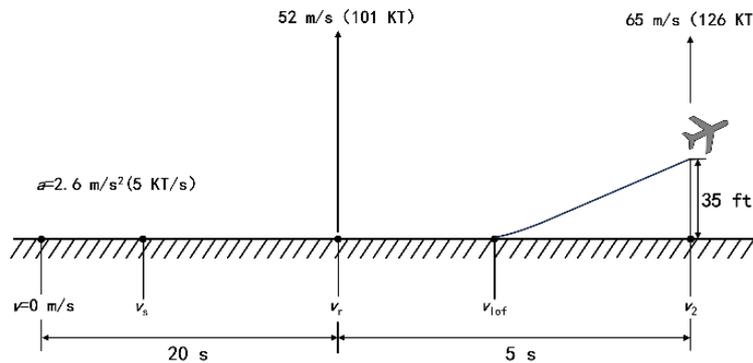
量程应至少为25 μm~3000 μm，精度宜为25 μm。

5 试验条件

5.1 加速条件选择

5.1.1 高速起飞条件

用于起飞抬头速度超过52 m/s，且从制动释放达到抬头速度的时间超过20 s的大型喷气式飞机的飞机除冰防冰液空气动力学性能测试条件：从 $t=0$ s到 $t=2 \pm 2$ s，风速应达到启动速度（ $v_s \leq 5$ m/s），从 $t=2 \pm 2$ s到 $t=25 \pm 2$ s，风速应从 v_s 增加至离地35 ft的速度 v_2 （不同海拔高度的 v_2 见表1），从 $t=25 \pm 2$ s到 $t=60$ s，风速应保持恒定。示意图见图1。



标引序号说明：

- a —— 起飞加速度；
- v —— 静止速度；
- v_s —— 启动速度；
- v_r —— 抬头速度；
- v_{lof} —— 起飞离地速度；
- v_2 —— 离地35 ft的速度。

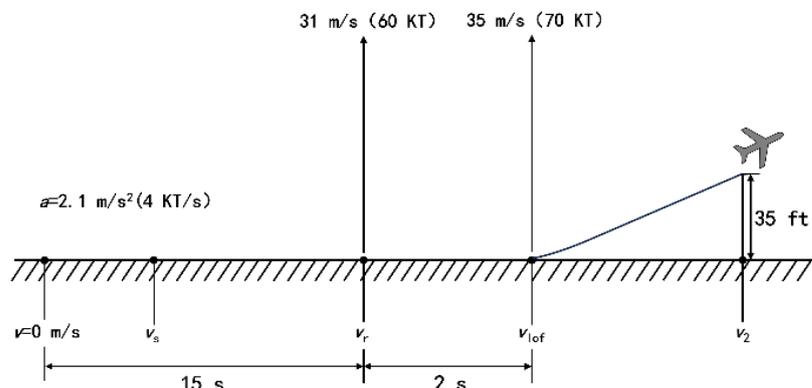
图1 高速起飞示意图

表1 不同海拔高度的 v_2

海拔高度 m	v_2 (m/s)
海拔高度 ≤ 500	65
500 < 海拔高度 ≤ 1500	70
1500 < 海拔高度 ≤ 2500	73
2500 < 海拔高度 ≤ 3500	77
3500 < 海拔高度 ≤ 4500	82

5.1.2 低速起飞条件

用于起飞速度在31 m/s~52 m/s之间，且从制动释放后达到抬头速度时间在15 s~20 s之间的通勤涡轮螺旋桨飞机的飞机除冰防冰液空气动力学性能测试条件：从 $t=0$ s到 $t=2$ s ± 2 s，风速应达到 v_s (≤ 5 m/s)，从 $t=2$ s ± 2 s到 $t=17$ s ± 2 s，风速应从 v_s 增加至 v_2 ($v_2=35$ m/s)，从 $t=18$ s ± 2 s到 $t=60$ s，风速应保持恒定。示意图见图2。



标引序号说明：

- a —— 起飞加速度；
- v —— 静止速度；
- v_s —— 启动速度；
- v_r —— 抬头速度；
- v_{lof} —— 起飞离地速度；
- v_2 —— 离地35 ft的速度。

图2 低速起飞示意图

5.2 参考液

5.2.1 高速起飞参考液的成分见表2。参考液的性能应满足如下要求：

- a) 按 GB/T 6488—2022 中 7.1 或 7.2 的要求，20 °C 时的折射率为 1.4276 ± 0.0005 ；
- b) 按 ASTM D2196 方法 B（转速：6 rpm，转子：LV1）的要求，0 °C 时的黏度为 $150 \text{ mPa}\cdot\text{s} \pm 25 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ 。

表2 参考液成分

化学试剂	重量百分比
丙二醇（分析纯）	$68\% \pm 0.1\%$
三丙二醇（分析纯）	$20\% \pm 0.1\%$
蒸馏水（GB/T 6682—2008 三级水）	$12\% \pm 0.1\%$

5.2.2 低速起飞参考液以上述参考液（见表2）为原液，以体积比 3:1（原液:蒸馏水）的比例稀释。按照 GB/T 6488—2022 中 7.1 或 7.2 的要求，20 °C 时的折射率应为 1.4081 ± 0.0005 。

6 试验设施要求

6.1 仪器校准

本文件涉及的温度传感器、压力传感器、黏度计、折射仪、pH计在使用前都应确认设备在校准有效期内。

6.2 内嵌试验段

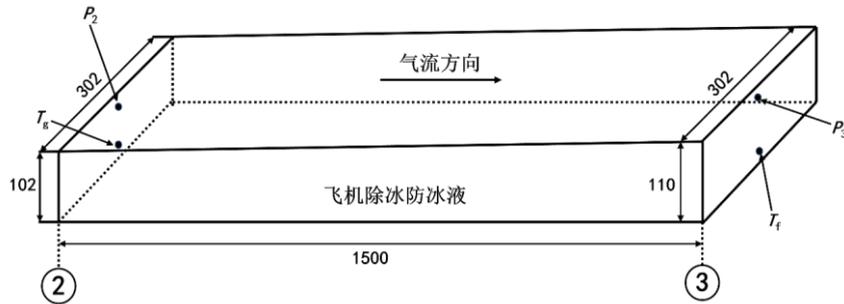
6.2.1 材料

内嵌试验段的材料宜为有机玻璃，内表面应光滑，确保干态BLDT符合要求。

6.2.2 尺寸

内嵌试验段的尺寸见图3，其中线性尺寸公差应为±2%，2号截面的面积（ S_2 ）与3号截面的面积（ S_3 ）的比值应为 0.927 ± 0.010 。内嵌试验段在风洞管道中的放置见图4。

单位为毫米

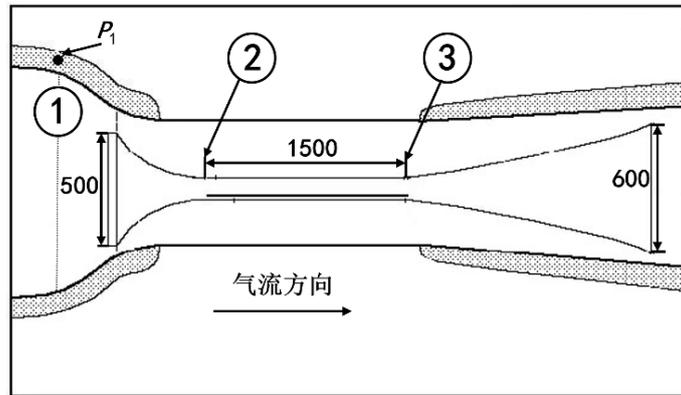


标引序号说明：

- P_2 ——内嵌试验段入口静压；
- P_3 ——内嵌试验段出口静压；
- T_g ——内嵌试验段气流温度；
- T_f ——内嵌试验段液体温度；
- ② ——内嵌试验段前端截面；
- ③ ——内嵌试验段后端截面。

图3 内嵌试验段尺寸图

单位为毫米



标引序号说明：

- P_1 ——稳定段静压；
- ① ——稳定段截面；
- ② ——内嵌试验段前端截面；
- ③ ——内嵌试验段后端截面。

图4 内嵌试验段放置图

6.2.3 其他要求

内嵌试验段底部应安装在水平位置，不同起飞条件下的干态BLDT应满足以下要求：

- a) 对于高速起飞条件，3号截面的干态 BLDT ≤ 2.9 mm；
- b) 对于低速起飞条件，3号截面的干态 BLDT ≤ 3.2 mm。

6.3 试验段流场特性

6.3.1 试验用气体

试验时所使用的流体应为空气或其他经证明对试验结果无影响的流体。

6.3.2 温度要求

6.3.2.1 温度测量

试验期间应在位于内嵌试验段2号截面顶部中点下方约5 mm处测量 T_g ，见图3。试验气流温度范围应为-50℃~0℃。

6.3.2.2 温度稳定性

内嵌试验段在试验过程中的温度应在目标温度的±2℃范围内，在高速起飞试验的第27 s到第33 s、低速起飞试验的第17 s到第23 s之间，试验段的温度应在目标温度的±1℃范围内。

6.3.2.3 温度空间均匀性

温度空间均匀性应为±1℃。

6.3.3 压力测量要求

6.3.3.1 P_1

在风洞管道稳定段1号截面通过直径为2 mm~3 mm的静压孔测量 P_1 ，见图4。若试验段风速小于100 m/s， P_1 则为总压值。

6.3.3.2 P_2

在内嵌试验段2号截面顶部中点通过直径为2 mm~3 mm的静压孔测量 P_2 ，见图3。

6.3.3.3 P_3

在内嵌试验段3号截面顶部中点通过直径为2 mm~3 mm的静压孔测量 P_3 ，见图3。

6.3.4 气流速度

试验段的气流速度应为2号截面的气流速度（ v ），按公式（1）计算。

$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 - P_2)/[1 - (\frac{S_2}{S_1})^2]} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

- v —— 试验段气流速度，单位为米每秒（m/s）；
- ρ —— 气体密度，单位为千克每立方米（kg/m³）；
- P_1 —— 稳定段静压，单位为帕（Pa）；
- P_2 —— 内嵌试验段入口静压，单位为帕（Pa）；
- S_1 —— 稳定段的横截面积，单位为平方米（m²）；
- S_2 —— 内嵌试验段2号截面的面积，单位为平方米（m²）。

6.4 T_f 测量

应在内嵌试验段3号截面底部中点上方1 mm处测量 T_f ，见图3。

6.5 试验段排水

应在内嵌试验段下游设置排水系统，确保没有液体回流到试验段。

7 飞机除冰防冰液要求

7.1 总体要求

试验用除冰防冰液包括I/II/III/IV型，I型除冰防冰液应符合GB/T 20856—2012的要求，II/III/IV型除冰防冰液应符合GB/T 20857—2012的要求，测试样品应在有效期内。对于I型除冰防冰液，应与用于SAE AS 5901防冰性能试验的样品为同一批产品；对于II/III/IV型除冰防冰液，应提供最高黏度样品。配制稀释液应使用符合GB/T 6682—2008要求的三级水。

7.2 飞机除冰防冰液性能检测项目

7.2.1 黏度

按ASTM D2196方法B的要求，分别在0.3 rpm、6 rpm和30 rpm的转速下，选用适当的转子在不同的温度下（20 °C、0 °C、-10 °C等，以10 °C的减小量直至飞机除冰防冰液的最低使用温度）测量黏度。

7.2.2 折射率

按GB/T 6488—2022中7.1或7.2的要求，测量飞机除冰防冰液在20 °C ± 3 °C温度下的折射率。

7.2.3 pH

按GB/T 9724—2007的要求，测量飞机除冰防冰液在20 °C ± 3 °C温度下的pH。

8 试验流程

8.1 一般要求

8.1.1 对于 I 型除冰防冰液，稀释液应在选定温度下（包括 0 °C、-10 °C和-20 °C，以-10 °C的增量）进行试验，最终达到除冰防冰液可接受空气动力学性能的 LAAT。如果 LAAT 未知，可采用生产商提供的 LAAT 估计值。

8.1.2 对于 II、III、IV型除冰防冰液，原液和稀释液应在选定的温度下（包括 0 °C、-10 °C和-20 °C，以-10 °C的增量）进行试验，并达到相应的 LAAT。

8.1.3 在每个目标温度下，应在 ± 3 °C 范围内进行 3 次 BLDT 测试平行试验。干态 BLDT 应在飞机除冰防冰液 BLDT 试验前和试验后均进行试验。

8.2 试验步骤

8.2.1 预冷

试验前应对飞机除冰防冰液进行预冷，但应确保样品不发生冻结，以避免飞机除冰防冰液出现不可逆的性能变化。在预冷过程中，飞机除冰防冰液的温度应始终保持在冰点以上至少5 °C，至少在目标测试温度冷储存12 h。

8.2.2 含水量测试

在每次试验开始之前和结束之后均应测量飞机除冰防冰液的折射率，并报告每次试验后稀释液含水量的变化。

8.2.3 温度设置

设置目标温度，待温度稳定在目标温度 ± 2 °C 范围内，开始向内嵌试验段加入飞机除冰防冰液。

8.2.4 加液

将1 L预冷后的飞机除冰防冰液倾倒在內嵌试验段的底部，用刮刀将液膜刮至2 mm厚，确保待测液均匀分布在底板上，多余的液体可从2号截面刮向3号截面下游的排水口，避免液体在测试段出口处聚集。

8.2.5 海拔高度设置

当测试不同海拔高度下的飞机除冰防冰液空气动力学性能时，应在加入飞机除冰防冰液后设置相应的海拔高度。

待模拟高度稳定在目标高度 ± 50 m 范围内，在不大于5 m/s的风速下保持至少5 min，确保飞机除冰防冰液达到目标温度，静置后气流温度和飞机除冰防冰液温度均应在目标温度 ± 2 °C 范围内。

8.2.6 试验运行

选择起飞速度，设置运行参数，测试期间记录时间 t 、湿度 RH 、 T_f 、 T_g 、 $(P_1 - P_2)$ 以及 $(P_2 - P_3)$ 。在 $t = 60$ s 时，关闭风机。

8.2.7 残留液分析

8.2.7.1 试验结束后，测量残留液的折射率，并与测试前的折射率进行比较，分析含水量变化。

8.2.7.2 在试验结束后的5 min内，用湿膜测厚规在以下3个位置测量剩余液体厚度：

- 中心线上2号截面下游1400 mm±10 mm处；
- 中心线上2号截面下游750 mm±10 mm处；
- 2号截面下游750 mm±10 mm且靠近测试段内壁2.5 mm±0.5 mm处。

3个位置的厚度取平均值，与初始液体厚度的比值为待测液残留率。最终飞机除冰液防冰液残留率应满足表3的要求。

表3 飞机除冰防冰液残留率要求

测试条件	I型除冰防冰液	II/III/IV型除冰防冰液
高速起飞条件	≤20%	≤26%
低速起飞条件	≤30%	≤43%

8.2.8 干态BLDT测试

干态BLDT测试见8.2.6。

8.2.9 参考液BLDT测试

参考液BLDT测试见8.2.1~8.2.5。

9 数据处理

9.1 BLDT计算方法

9.1.1 干态BLDT

干态BLDT通过公式(2)进行计算。

$$\delta_d = \frac{1}{c} [S_3 - S_2 \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)}{(P_1 - P_2) + (P_2 - P_3)}}] \dots\dots\dots (2)$$

式中：

- δ_d ——干态BLDT，单位为毫米（mm）；
- c ——内嵌试验段3号点的截面周长，单位为毫米（mm）；
- S_2 ——内嵌试验段2号点的横截面积，单位为平方毫米（mm²）；
- S_3 ——内嵌试验段3号点的横截面积，单位为平方毫米（mm²）；
- P_1 ——干态时稳定段静压，单位为帕（Pa）；
- P_2 ——干态时内嵌试验段入口静压，单位为帕（Pa）；
- P_3 ——干态时内嵌试验段出口静压，单位为帕（Pa）。

9.1.2 参考液和除冰防冰液的BLDT

当测试管道底板覆盖了一层参考液或除冰防冰液时，试验段截面平均BLDT通过公式(3)进行计算，液体的BLDT用公式(4)进行计算。

$$\delta_d = \frac{1}{c} [S_3 - S_2 \sqrt{\frac{(P_1 - P_2)}{(P_1 - P_2) + (P_2 - P_3)}}] \dots\dots\dots (3)$$

式中：

- δ_{ave} ——内嵌试验段的平均BLDT，单位为毫米（mm）；
- c ——内嵌试验段3号点的截面周长，单位为毫米（mm）；
- S_2 ——内嵌试验段2号点的横截面积，单位为平方毫米（mm²）；
- S_3 ——内嵌试验段3号点的横截面积，单位为平方毫米（mm²）；
- P_1 ——湿态时稳定段静压，单位为帕（Pa）；
- P_2 ——湿态时内嵌试验段入口静压，单位为帕（Pa）；
- P_3 ——湿态时内嵌试验段出口静压，单位为帕（Pa）。

$$\delta_f = \frac{c}{b} [\delta_{ave} - \left(\frac{c-b}{c}\right) \delta_d] \dots\dots\dots (4)$$

式中:

- δ_f ——液体的BLDT, 单位为毫米 (mm);
- b ——内嵌试验段底部的宽度, 单位为毫米 (mm);
- c ——内嵌试验段3号截面的周长, 单位为毫米 (mm);
- δ_{ave} ——内嵌试验段的平均BLDT, 单位为毫米 (mm);
- δ_d ——干态BLDT, 单位为毫米 (mm)。

9.2 最大可接受值计算

9.2.1 高速起飞条件

干态BLDT和参考液BLDT用于计算飞机除冰防冰液BLDT最大可接受值, BLDT最大可接受值的包线是一条常数直线。高速起飞条件下飞机除冰防冰液BLDT最大可接受值的计算方法见公式 (5):

$$\delta_{aa} = \delta_r^* - 0.18(\delta_r^* - \delta_d^*) \dots\dots\dots (5)$$

式中:

- δ_{aa} ——飞机除冰防冰液BLDT最大可接受值, 单位为毫米 (mm);
- δ_r^* ——在-20 °C时的参考液BLDT拟合值, 通过在0 °C、-10 °C、-20 °C和-25 °C下测量的参考液BLDT值的拟合直线获得, 单位为毫米 (mm);
- δ_d^* ——所有测得的干态BLDT平均值, 单位为毫米 (mm)。

9.2.2 低速起飞条件

低速起飞条件下飞机除冰防冰液的最大可接受值计算方法见公式 (6):

$$\delta_{aa} = 1.12\delta_r^* - 0.19(\delta_r^* - \delta_d^*) \dots\dots\dots (6)$$

式中:

- δ_{aa} ——飞机除冰防冰液BLDT最大可接受值, 单位为毫米 (mm);
- δ_r^* ——在-20 °C时的参考液BLDT值, 通过在0 °C、-10 °C、-20 °C和-25 °C下测量的参考液BLDT的拟合直线获得, 单位为毫米 (mm);
- δ_d^* ——所有测得的干态BLDT平均值, 单位为毫米 (mm)。

9.3 LAAT

9.3.1 初始测试

如果飞机除冰防冰液的BLDT没有大于9.2中所定义的最大可接受值, 并且满足表3残留率的要求, 则飞机除冰防冰液在该温度下的空气动力学性能是可接受的。每个温度点均应进行3次BLDT平行测试, 可接受的3个最低温度的平均值即是飞机除冰防冰液的LAAT。

9.3.2 数据复核

如果最终测试的任一数据不满足可接受要求, 则应对每个不合格的数据再进行额外的3次测试。如果额外测试的任一数据仍然不满足可接受要求, 则判定待测飞机除冰防冰液在该测试温度下不满足要求。最终的报告中应展示所有的数据。

10 试验报告

试验报告的内容应包括但不限于以下内容:

- a) 样品的生产厂家、名称、类型、浓度及其他信息;
- b) 7.2 中所列举的飞机除冰防冰液性能参数;
- c) 干态 BLDT、参考液 BLDT、样品 BLDT、BLDT 最大可接受值和残留率;
- d) 样品的 LAAT;
- e) 试验前后样品含水量变化。

参 考 文 献

- [1] ISO 2533 Standard atmosphere
 - [2] ISO 11078:1994 Aerospace-aircraft de-icing/anti-icing non-Newtonian fluids, ISO type II
 - [3] SAE ARP 5905 Calibration and acceptance of icing wind tunnels
 - [4] SAE ARP 6852 Methods and processes for evaluation of aerodynamic effects of SAE-qualified aircraft ground deicing/anti-icing fluids
-