

一次大型客机自然结冰取证试飞过程的天 气条件分析¹

倪洪波¹ 丑岩¹ 李佰平^{2*} 李静² 张莹¹ 闫文辉¹

1 中国飞行试验研究院技术中心, 西安 710089;

2 上海市气象服务中心, 上海 200030

摘要: 云中液态水含量、云滴中值直径、外部空气温度等是影响飞机结冰强度的关键气象因素, 也是飞机自然结冰取证试飞是否满足适航标准的判定条件之一。利用多源气象资料分析了2022年1月22日国产某大型客机自然结冰取证试飞气象条件。结果表明: 此次自然结冰取证试飞的天气背景为高空纬向多波动气流, 近地层配合冷空气倒灌, 迫使对流层中低层西南暖湿气流北抬, 形成大范围非降水层状云系。试验区云顶高度自3.0 km发展到4.6 km, 在1.3—3.5 km存在逆温层, 云顶温度最低为-14 °C, 云内无降水, 雷达基本反射率 <15 dBZ。2次穿云及云中待机45 min盘旋飞行期间环境温度为-10~-7 °C, 相对湿度 $>80\%$, 水汽通量散度小于 $-2.73 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{s hPa cm}^2)$, 为自然结冰取证试飞提供了理想的温度和水汽条件, 云层中上部存在 -0.2 Pa s^{-1} 的弱上升气流, 对过冷云滴的增长起到了促进作用。DMT探测数据显示云内以过冷小云滴为主, LWC平均值为 $0.23 \sim 0.27 \text{ g m}^{-3}$, MVD平均值为 $15.82 \sim 15.93 \mu\text{m}$ 。陕西地区冬季受“倒灌+倒槽”天气系统影响时存在自然结冰气象条件, 利于开展飞机自然结冰取证试验。

关键词: 大型客机; 自然结冰; 取证试飞; 气象条件; 过冷云滴

Analysis of weather conditions during a large passenger aircraft natural icing evidence test flight

Ni Hongbo¹, Chou Yan¹, Li Baiping^{2*}, Li Jing², Zhang Ying¹, Yan Wenhui¹

1. Chinese Flight Test Establishment, Xi'an 710089

2. Shanghai Meteorological Service Center, Shanghai 200030

Abstract: Liquid Water Content (LWC), Median Volume Diameter (MVD), Outside Air Temperature (OAT) and other meteorological conditions are important meteorological factors affecting the intensity of aircraft icing, and are also the basic condition for measuring and evaluating whether the aircraft natural icing test flight meets the airworthiness standard. The meteorological conditions of a domestic large passenger aircraft's natural icing test flight on

工业和信息化部民用飞机专项科研项目(课题代号: MJZ5-XXXX)、中国气象局青年创新团队(CMA2024QN02)、上海市科委揭榜挂帅项目(YDZX20223100004009)、中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J072)资助

第一作者: 倪洪波, 主要从事航空科研试飞气象技术研究及试飞气象保障工作. E-mail: nihongbo630@163.com

通信作者: 李佰平, 主要从事航空气象和数值预报应用技术研究. E-mail: lbp1986@sohu.com

31 January 22, 2022 were analyzed using multi-source meteorological data. The results show that the
32 high-altitude weather background of this natural icing forensic test flight is a latitudinal
33 fluctuating airflow, and the near-surface layer cooperates with the cold air inversion, forcing the
34 southwest warm and humid airflow in the middle and lower layers of the troposphere to lift
35 northward, and forming a wide range of non-precipitation layered cloud system. The height of the
36 cloud top in the test area developed from 3.0 km to 4.6 km, and an inversion layer existed in
37 1.3-3.5 km, with the lowest temperature at the cloud top of $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$, no precipitation in the cloud,
38 and the radar basic reflectivity $< 15\text{ dBz}$. The ambient temperature of the two times of penetrating
39 the cloud and the standby flight in the cloud for 45 min hovering flights was $-10\sim-7\text{ }^{\circ}\text{C}$, the
40 relative humidity $> 80\%$, and the scattering of water vapor flux $< -2.7\times 10^{-7}\text{ g}/(\text{s}\cdot\text{hPa}\cdot\text{cm}^2)$,
41 providing ideal temperature and water vapor conditions for the natural icing test flights, and a
42 weak updraft of -0.2 Pa s^{-1} in the middle and upper part of the cloud layer, which contributes to the
43 growth of the supercooled cloud droplets. The DMT sounding data show that the supercooled
44 cloud is inhomogeneous both vertically and horizontally, and that supercooled cloud droplets
45 predominate inside the cloud, and the average LWC value is $0.23\text{-}0.27\text{ g m}^{-3}$, and the mean value
46 of MVD is $15.82\text{-}15.93\text{ }\mu\text{m}$. There are natural aircraft ice meteorological conditions in winter
47 under the influence of the "inversion + inversion trough" weather system, which is conducive to
48 carrying out aircraft natural icing forensic tests in Shaanxi.

49 **Key words:** large passenger aircraft; natural icing; flight test; weather condition; supercooled
50 cloud droplet

51

52 引言

53 当飞机在云中或降水中飞行时,遇到过冷却云滴或雨滴,就会在机体表面某些部位聚集
54 产生结冰现象(章澄昌, 2008)。飞机结冰会造成飞机的升力损失和阻力增加,影响飞机的
55 操纵性和稳定性。飞机特定部位冰层积聚还会影响发动机性能、通信导航、大气数据系统和
56 驾驶舱视界等。飞机结冰对飞机特性造成的综合性影响,是诱发飞行失控的关键环境因素之
57 一(王秀春等, 2014; Reehorst et al, 2000, 2010; Gurbacki, 2003; 李哲等, 2016; 毛旭
58 等, 2023)。据美国相关部门统计,有大量飞行事故及不安全问题与飞机结冰有关(Gultepe
59 et al, 2019; 谢坤, 2009; Bellucci et al, 2007; 张宇飞, 2013)。因此,运输类飞机在量产
60 交付前,必须开展高风险、高难度的自然结冰取证试飞,以保证投入运营的飞机能够承受一
61 定程度的飞机结冰,并验证机载防除冰设备的适用性。

62 云中液态水含量(Liquid Water Content, LWC)、云滴中值直径(Mean Volume Diameter,
63 MVD)、外部空气温度(Outside Air Temperature, OAT)等是影响飞机结冰强度的关键气象
64 因素,也是飞机自然结冰取证试飞是否满足适航标准的判定条件之一。美国联邦航空管理局

65 (Federal Aviation Administration, FAA) 运输类飞机自然结冰适航标准 (美国《联邦法规》
66 第 14 章 25 部及 29 部附录 C), 利用过冷云层的 LWC、MVD 和 OAT 界定连续最大 (层云)
67 和间断最大 (积云) 飞机结冰取证试飞的环境标准。20 世纪 40 年代以来, 美国国家航空咨
68 询委员会 (National Advisory Committee for Aeronautics, NACA) 在北美组织开展了一系列飞
69 机结冰外场观测试验, 上述标准正是基于当时获取的大量过冷云机载探测数据所确定的
70 (Lewis et al, 1947; Jones and Lewis, 1949; Lewis and Hoecker, 1949; Hacker and Dorsch,
71 1951; Lewis and Bergrun, 1952)。

72 我国运输类飞机自然结冰适航审定规章 (CCAR25 部附录 C) (中国民用航空局, 2011),
73 对飞机自然结冰取证试飞气象条件的规定与 FAA 相同。近年来, 我国也开展了一些自然结
74 冰试飞 (李勤红等, 1999; 王小润, 2014; 王泽林等, 2020; 倪洪波等, 2022), 但试验数
75 据稀少。多年来, 我国学者基于人工影响天气作业、外场科学试验等获取的层状云、积层混
76 合云飞机探测数据, 研究了我国不同地区云系的降水机制、云微物理特征、过冷水含量及时
77 空分布特征 (王俊, 2003; 刘健等, 2004; 王磊等, 2014; 孙鸿娉等, 2014; 袁敏等, 2018;
78 孙晶等, 2019; 封秋娟等, 2014; 朱士超和郭学良, 2014; 高茜等, 2020; 杨洁帆等, 2021;
79 彭冲等, 2023; 孙艳辉等, 2023)。这些研究在一定程度上有助于我国飞机结冰气象条件理
80 论研究和预报技术发展, 但大部分飞机结冰或过冷水云探测数据的来源偶然性较大, 多为“飞
81 行时意外遭遇”, 而非“有意识地探测结冰云层”, 研究缺少系统性和典型性, 相关工作对
82 飞机结冰气象条件研究的支持仍有较大不足, 加上型号结冰试飞开展较少, 致使在自然结冰
83 型号合格取证试飞方面困难重重 (丁军亮等, 2023)。

84 2022 年 1 月 20—22 日和 2 月 16—17 日, 中国飞行试验研究院 (以下简称试飞院) 以
85 阎良机场为基地, 在陕西中部及其毗邻地区和陕南安康地区组织开展了国产某大型客机自然
86 结冰取证试飞, 共计飞行 5 架次, 累计飞行 24 h14 min, 除需在夏半年开展的间断最大 (积
87 云) 结冰的 4 个试验点外, 首次在国内按照 CCAR25 部附录 C 的要求, 完成了国产型号飞
88 机全部连续最大 (层云) 结冰试飞科目。其中, 1 月 22 日的自然结冰取证试飞, 捕捉到浓
89 密连续的结冰云层, 采集到符合取证试飞标准的气象参数, 完成了 2 次结冰云层中待机飞行
90 45 min 的试飞科目。本文利用 Micaps 常规气象资料、ERA5 大气再分析资料及 DMT 机载探
91 测数据, 对 2022 年 1 月 22 日自然结冰取证试飞过程的气象条件进行分析, 以期为后续在该
92 地区开展结冰试飞提供技术参考。

93 1 资料及机载仪器简介

94 本文所使用的资料主要包括: (1) 地面、高空天气图资料; (2) 泾河站探空资料; (3)
95 泾河站多普勒天气雷达资料; (4) 葵花 8 卫星红外云图资料; (5) 机载云粒子组合探头
96 CCP (Cloud Combination Probe), 主要用来获取 LWC、MVD 和 OAT。

97 参试飞机在背部加装了美国 DMT (Droplet Measurement Technology) 公司生产的机载
98 云粒子组合探头 (Cloud Combination Probe, CCP), 其由云粒子探头 (Cloud Droplet Probe,

99 CDP)、云粒子图像探头 (Cloud Imaging Probe, CIP)、Hotwire 热线含水量仪及 1 套飞机
 100 综合气象要素测量系统 AIMMS (Aircraft-Integrated Meteorological Measurement System) 组
 101 成, 用于测量云滴数浓度 (Number Concentration, NC)、LWC、MVD、OAT 及空速等关键
 102 参数, 航迹信息由飞机自带的 GPS 定位设备提供。其中, CDP 主要用于测量过冷小云滴,
 103 测量范围为 2~50 μm ; CIP 使用 64 通道图像测量阵, 主要用于测量过冷大水滴、冰晶等大
 104 颗粒的 MVD, 测量范围为 12.5~1550 μm 。在国产大型客机开展飞机自然结冰取证试飞之
 105 前, 对测量设备进行了相关制造符合性检验, 结果符合相关设备制造声明。设备详细功能、
 106 参数及测量误差见表 1。由于在自然结冰取证试飞过程中 Hotwire 热线含水量仪因结冰导致
 107 数据出现中断问题, 影响测量结果, 后续分析均采用 CDP 和 CIP 反演的 LWC。

108 表 1 机载云粒子组合探头 (CCP) 设备功能及参数

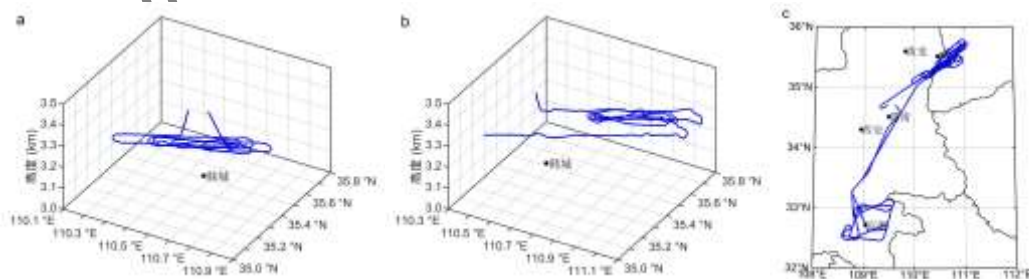
109 Table 1 Airborne Cloud Combination Probe (CCP) equipment functions and parameters

仪器名称	设备功能	测量范围	分辨率	测量精度
CDP	测量小云滴	2~50 μm	1~12 通道: 1 μm 13~30 通道: 2 μm	$\pm 20\%$
CIP	测量大云滴、冰雪晶	25~1550 μm	25 μm	$\pm 20\%$
Hot-wire	测量液态水含量	0~3 g m^{-3}	-	$\pm 15\%$
AIMMS	测量温度、湿度、气压、海拔	温度: -20~50 $^{\circ}\text{C}$	温度: 0.01 $^{\circ}\text{C}$	温度: 0.1 $^{\circ}\text{C}$
	高度、空速等	湿度: 0~100% RH	湿度: 0.1% RH	湿度: 2% RH

110 2 自然结冰取证试飞概况及天气形势

111 2.1 试飞概况

112 1 月 22 日参试飞机于 12:46 起飞, 17:50 落地, 飞行时长 5 h04 min。飞机首先前往陕南
 113 安康地区执行试飞任务, 由于云中过冷水含量不足、云顶高度偏低 (与空管批复的最低安全
 114 飞行高度相同), 未捕捉到适宜的飞机结冰气象条件。其后, 飞机返回阎良机场东北试验区
 115 (关中东部地区-山西西部地区) 执行自然结冰取证试飞任务 (图 1c)。



116
 117 图 1 2022 年 1 月 22 日自然结冰取证试飞第 1 次 (a) 和第 2 次 (b) 穿云盘旋飞行航迹及当日飞行航迹水
 118 平投影 (c)

119 Fig. 1 1st (a) and 2nd (b) through-cloud circling flight trajectories and horizontal trajectory projections (c) of
 120 the January 22, 2022, natural icing evidence test flights

121 参试飞机分别于 15:23:45—16:11:53 和 16:36:55—17:23:40 在阎良机场东北试验区进行
 122 了 2 次穿云及云中盘旋飞行，云中分别连续飞行时长为 48 min08 s 和 46 min45 s，完成 2 次
 123 结冰云层中待机 45 min 飞行科目(图 1a 和 b)。云中暴露距离分别为 186.86 nm 和 189.50 nm，
 124 云中平均水平飞行高度在 10700 ft (3261 m) 左右，DMT 探测数据表明，当天的云微物理
 125 参数波动小、结冰气象条件理想，大气静温平均为-9.20 °C和-9.52 °C，LWC 平均为 0.27 g m⁻³
 126 和 0.23 g m⁻³，MVD 平均为 15.82 μm 和 15.93 μm，最大结冰厚度分别达到 5.84 cm 和 5.08 cm
 127 (表 2)。据试飞机组反馈和监控视频显示，试飞过程中云层连续浓密无云隙，云层中上部
 128 无降水，无明显颠簸，云相态以过冷小水滴为主，间或存在过冷大水滴或冰晶，相关探测数
 129 据符合 CCAR25 部附录 C 的要求，并在 CCP 连接杆、机翼前缘产生中-重度混合冰(图 2)。

130 表 2 2022 年 1 月 22 日自然结冰取证试飞参数

131 Tab.2 Parameters for the natural icing forensic test flight on 22 January 2022

项目	第一次穿云				第二次穿云			
	最大值	平均值	最小值	标准差	最大值	平均值	最小值	标准差
经度/°	35.49	35.35	35.15	0.07	35.75	35.58	35.25	0.11
纬度/°	110.82	110.54	110.23	0.14	111.08	110.79	110.33	0.16
飞行高度/ft	11286.50	10722.45	10687.50	64.45	11140.50	10721.93	10558.50	102.54
飞行速度/kn	277.62	265.12	257.32	2.31	285.91	266.92	252.62	5.81
最大结冰厚度	2.30 in/5.84 cm				2.00 in/5.08 cm			



132 图 2 2022 年 1 月 22 日自然结冰取证试飞过程飞机结冰图像

133 (a) 为 15:31 第 1 次云中、(b) 为 16:11 第 1 次出云、(d) 为 16:46 第 2 次云中、(e) 为 17:24 第 2 次出云 CCP 热线含水量
 134 仪电路板结冰状态；(c)、(f) 为 16:12 第 1 次出云和 17:26 第 2 次出云后左侧机翼 2 号标尺结冰状态

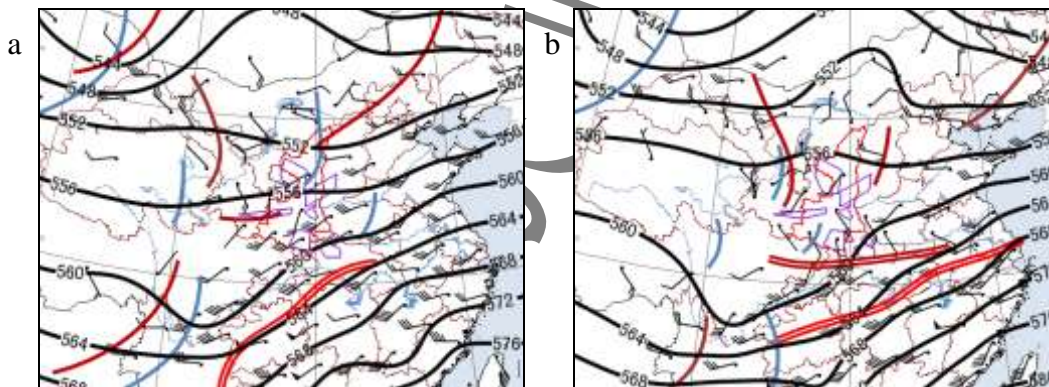
135 Fig. 2 Aircraft icing during natural icing test flight on January 22, 2022

136 (a) for the 1st cloud at 15:31, (b) for the 1st cloud out at 16:11, (d) for the 2nd cloud out at 16:46 (e) for the 2nd cloud out at 17:24 CCP
 137 Hotline Water Content Meter Circuit Board Icing Condition; (c) (f) for the Left Wing No. 2 Ruler Icing Condition after the 1st cloud out
 138 at 16:12 and the 2nd cloud out at 17:26
 139

140 2.2 高空形势及系统配置

141 2022年1月20—22日，欧亚500 hPa中高纬度建立并维持平直纬向多波动气流，西伯
142 利亚有冷空气持续侵入北疆地区并东移南下，影响我国中东部地区。700 hPa高度上，宁夏-
143 云南一带有南支槽存在，甘肃东部到陕西中南部受槽前西南低空急流影响，急流轴延伸至陕
144 北南部地区，自孟加拉湾将大量的水汽、热量和动量向北输送。850 hPa高度上，强冷空气
145 自我国华北地区沿汾渭平原东部向西倒灌，迫使暖湿空气进一步抬升，在陕西形成“冷+暖+
146 冷”的垂直配置。

147 22日08时，500 hPa高空多短波槽活动，甘肃中部、中东部、陕西北部、四川以及河
148 南中部均受短波槽影响（图3a）。我国西南地区南支槽维持，高原中部过陕西中南部至华
149 北地区，均受一致的南西气流控制。关中、陕南西南风达到8—22 m/s，且有回暖迹象。700
150 hPa高度，内蒙古西部到青海东部有槽东移，华北地区低槽位置较500 hPa低槽偏东，川西
151 的南支槽则落后于500 hPa南支槽。甘肃东南部到陕西地区受弱切变系统影响，云贵高原-
152 陕南-华北地区均处于西南气流风速辐合区。850 hPa高度，自河西走廊东部-银川以北，有
153 弱冷空气南下，贵州北部到湖北北部有西南-东北向的切变系统，陕南、关中均受倒灌偏东
154 风影响。至20时，500 hPa高度维持多波动气流，邻近自然结冰试验区的甘肃和宁夏交界、
155 陕西南部有短波槽活动（图3b）。700 hPa高度，内蒙古到青海的低槽东移至内蒙古中部
156 到宁夏地区，四川中部到安徽中部有东西向的弱切变。随着华北冷空气南下，贵州到湖北呈
157 西南-东北走向的切变系统东移至江南地区。



158 图3 2022年1月22日08时(a)和20时(b)高空500 hPa高度场、700 hPa风场综合图

159 其中蓝色、褐色、红色分别表示：500 hPa、700 hPa和850 hPa的槽线或切变线

160 Fig. 3 Composite high altitude view at 0800 (a) and 2000 (b) hours on 22 January 2022

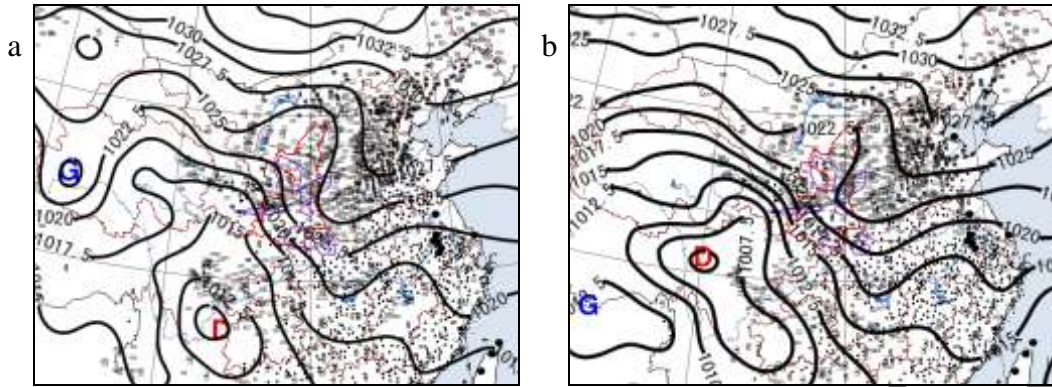
161 height field at 500 hPa, wind field at 700 hPa, blue, brown and red lines indicate troughs or shear lines at 500 hPa, 700 hPa
162 and 850 hPa, respectively

163 2.3 地面形势及降水

164 地面天气图上（图4），11时我国境内自西南至高原北部地区受倒槽控制，95 E—120 E
165 区域海平面气压场呈“Ω”型，来自柴达木和华北倒灌的这两股冷空气，迫使暖湿气流向北
166 输送，倒槽向北影响到阴山南侧。汉中至西安之间存在较强的气压梯度。降水区分别位于甘
167 肃东南部、陕南南部、华北地区和长江以南地区。至14时，汉中至西安之间的气压梯度有
168

169 所加强，陕南南部降水区略有北抬，降水由小雨转为雨夹雪或小雪，表明由华北经汾渭平原
170 倒灌的冷空气对当天降水相态的变化有直接影响。至 20 时，关中大部均转雪。

171 总体而言，1 月 22 日陕西中南部维持阴雨天气，为结冰云层的形成提供了丰富水汽条
172 件。



173
174 图 4 2022 年 1 月 22 日 11 时和 14 时地面天气图（国家站 1 小时观测和地面气压场）

175 Fig. 4 Surface weather map at 11:00 and 14:00 on 22 January 2022(1-hour observations of national stations and surface
176 pressure fields)

177 3 飞机结冰环境场条件分析

178 3.1 探空资料分析

179 参考周毓荃和欧建军（2010）提出的云层判别方法判定云层。1 月 22 日 08 时泾河站探
180 空显示（图 5a），云层从近地层发展到 700 hPa（约 3.0 km）高度，云中温度在 -8.0~ -3.0 °C，
181 其中在 1.3—3.5 km 高度层有三个逆（等）温层。在 2.0 km 以下高度层内，自低层向高层风
182 向由东北呈顺时针方向偏转为东南风。在 2.0—6.0 km 高度层，主导风向为西南。这表明当
183 天上午陕西中南部地区中高层有暖平流输送。至 20 时，云层较上午有明显的向上发展，自
184 近地层延伸至 4.6 km，云顶温度约为 -14.0 °C，在 1.5—2.3 km 高度层有逆温。同时，低层的
185 偏东风层顶也抬高到 3.0 km 高度，2.0—6.0 km 高度层维持西南风（图 5b）。近地面至 2.3 km
186 高度层风向由西北风逆时针转为东北风，表明低层有冷平流输送，印证地面图上华北地区冷
187 平流倒灌至陕西地区的结论；2.3—4.6 km 高度层风向由东南风顺时针转为西南风，表明中层
188 持续有暖平流输送，此种上暖下冷的配置利于 2.3 km 高度处逆温层维持。中高层西南暖湿
189 气流为关中及毗邻地区提供了产生飞机结冰所需的水汽，低层偏东冷空气倒灌及东风层向上
190 发展，阻滞了暖湿气流的东移扩散，使其在关中及毗邻地区堆积。这一配置有利于自然结冰
191 试验区云层逐渐增厚，在下午时段云层发展高度适中（3.0—4.6 km），温度亦处于有利于液
192 态水存在和维持的条件（王磊等，2014），云相态以过冷水为主，未产生过多的冰晶，云中
193 逆温层有利于液态水的维持，有利于发生飞机结冰。

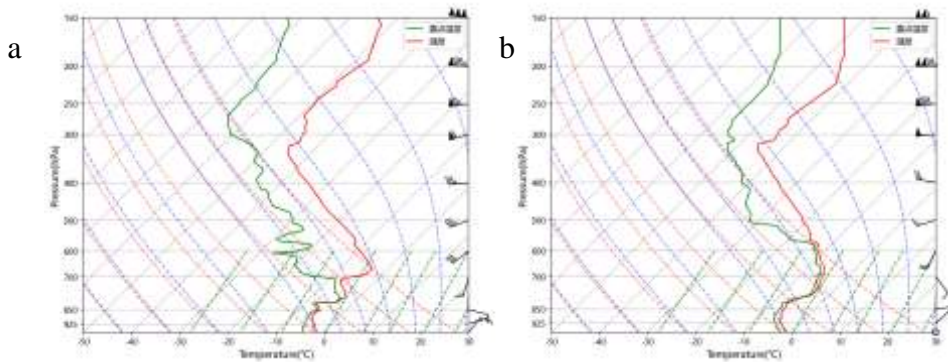


图 5 2022 年 1 月 22 日泾河站 08 时 (a) 和 20 时 (b) 探空

Fig. 5 Soundings at Jinghe station at 08:00 (a) and 20:00 (b) on 22 January 2022

3.2 卫星云图分析

在自然结冰取证试飞云中盘旋飞行阶段 (15:23:45—16:11:53 和 16:36:55—17:23:40), 葵花 8 红外云图显示 (图 6), 陕南区云层为透光云系, 云层在垂直方向上不连续, 水平方向上云顶发展不均匀, 上层云的云顶温度 14 时最低约为 -18°C , 低层云的云顶温度约为 -11°C 。阎良机场东北试验区北侧有高空短波槽东移南下, 但其强度逐渐减弱, 云系维持较为均匀的状态, 云顶温度在 $-14\sim-12^{\circ}\text{C}$ 。由红外云图及云顶温度分布可以判断, 阎良机场东北试验区云顶温度和高度处于合适的区间, 有利于开展自然结冰取证试飞。

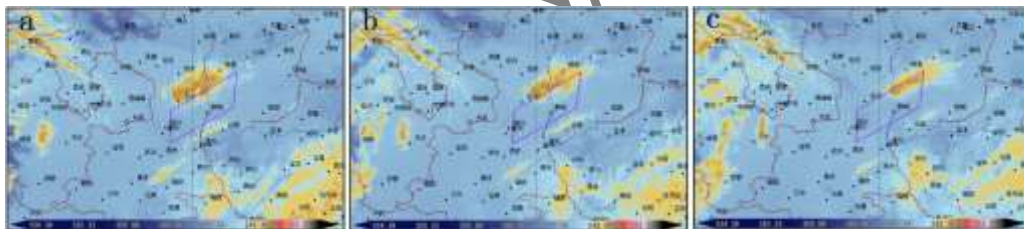
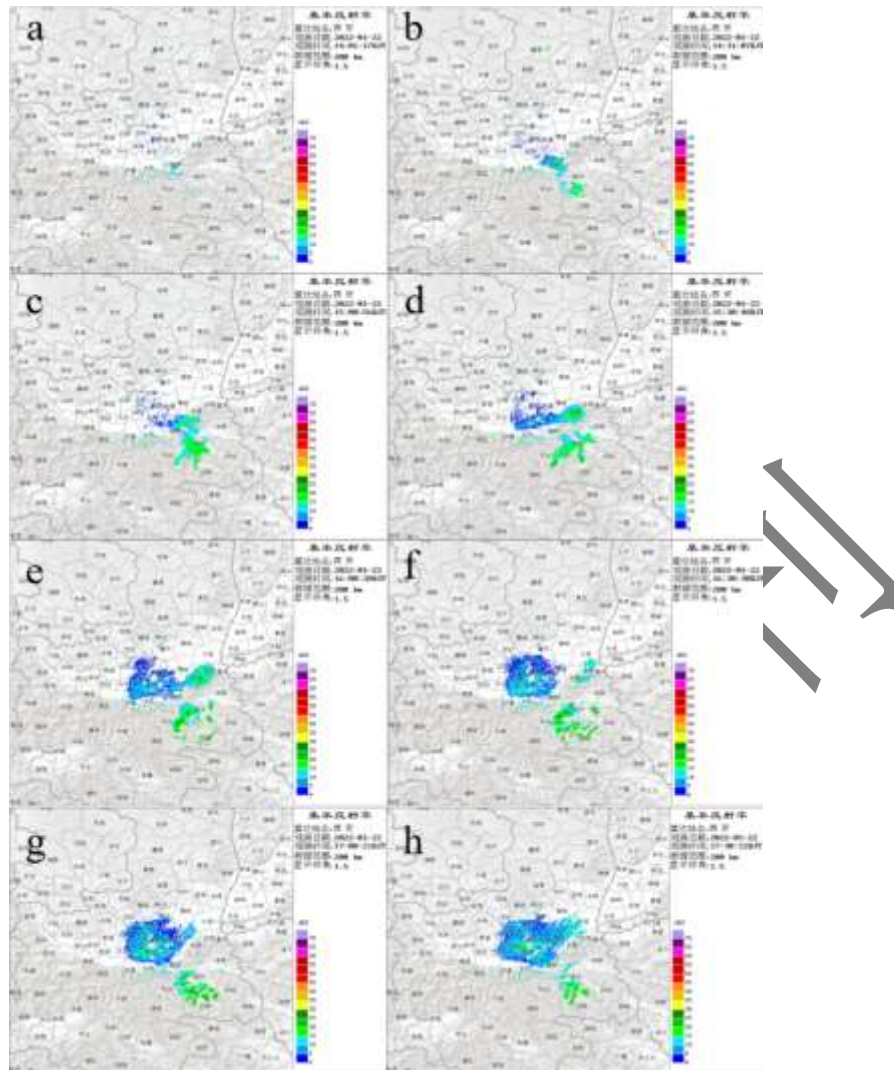


图 6 2022 年 1 月 22 日 15 时 (a)、16 时 (b) 和 17 时 (c) 葵花 8 卫星红外云图 (紫色四边形为试飞区域)

Fig. 6 Infrared cloud image of Himawari8 satellite on 22 January 2022 at 15:00(a), 16:00(b), 17:00(c), (purple quadrilateral is the test flight area)

3.3 雷达资料分析

1 月 22 日泾河站雷达回波显示 (图 7), 在 14 时之前无回波, 14 时之后其东侧和南侧出现弱回波, 回波强度为 $10\sim 20\text{ dBz}$, 15 时 30 分之后, 西安周边亦有弱回波发展, 回波强度为 $5\sim 15\text{ dBz}$ 。有研究指出, 当有较强的稳定性降水发生时, 上层云中多以冰粒子为主, 不利于飞机结冰的发生 (李佰平等, 2018)。飞机结冰区域由于缺少尺度超过毫米量级的冰晶粒子, S 波段天气雷达一般无回波或回波较弱 (姬雪帅等, 2022; 倪洪波等, 2022; 彭冲等, 2023)。在本次试飞过程中, 东北试验区始终无回波, 表明结冰云层大部分为过冷小水滴组成, 这与 15—17 时的飞机探测结果相符。



216

217

218 图 7 2022 年 1 月 22 日 14:01(a), 14:31 (b), 15:00(c), 15:30(d), 16:00(e), 16:30(f), 17:00(g), 17:30(f) (间
219 隔 30 分钟) 西安站雷达基本反射率

220

Fig. 7 Basic radar reflectance at Xi'an station on 22 January 2022 at 14:01(a), 14:31 (b), 15:00(c), 15:30(d),
221 16:00(e), 16:30(f), 17:00(g), 17:30(f)

222

223 与前述天气形势、云层分布和雷达探测资料对应，地面观测显示，以泾河站为代表的关
224 中地区 1 月 22 日 16—17 时出现雨夹雪，其后转为小雪，均为微量降水，有利于飞机结冰的
225 发生。以安康站为代表的陕南地区，自 11 时就出现降水，13 时为小雨，14—16 时逐渐转为
226 雨夹雪或雪，小时降水量在 0.1~0.6 mm，与降水发展相对应，陕南地区云顶温度偏低，结
227 冰条件偏差。上述两个区域飞机结冰条件的分析与飞机实际探测结果一致，即关中及以东地
228 区飞机结冰条件较好，陕南地区飞机结冰条件较差。

228

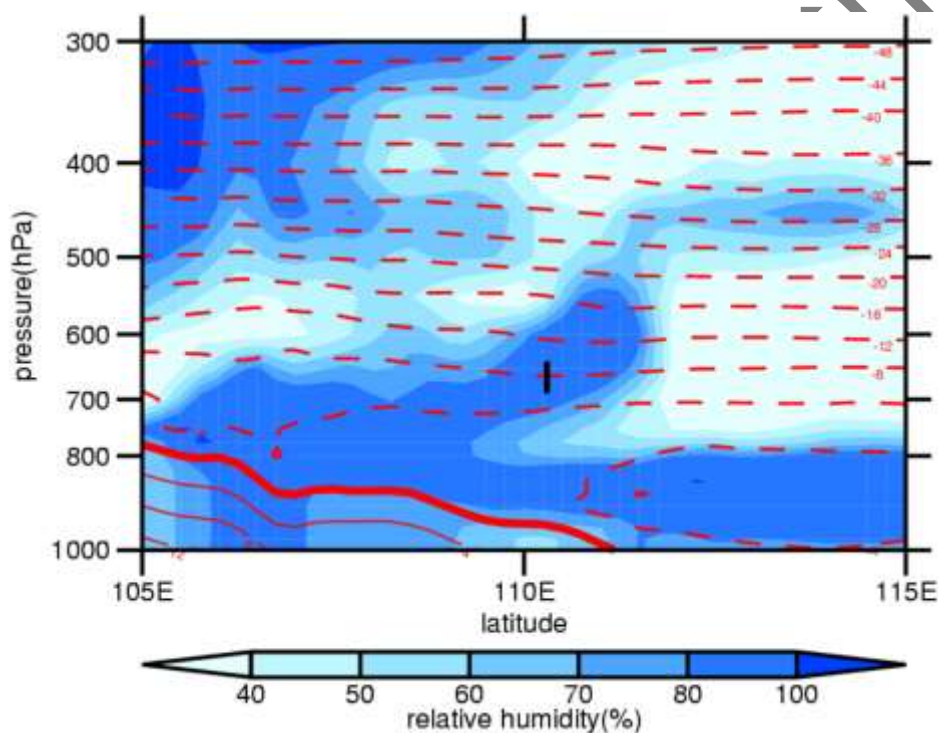
3.4 ERA5 再分析资料提供的物理量特征分析

229

230

本小节选用 2022 年 1 月 22 日 ERA5 再分析资料的温度、云中液态水含量、水汽通量、
垂直速度等要素输出对此次飞机结冰过程的物理量特征开展分析。运输类飞机自然结冰适航

231 标准给出的温度范围是 $0\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。飞机观测和基本物理学观点认为过冷水通常存在于
232 $-25\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中，随着温度的降低过冷水存在的可能性逐渐减小。除了深对流，在 $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$
233 的环境中，过冷水则很少存在（Bernstein et al, 2005）。在 $-3\sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，由于飞行时的动力增
234 温，结冰的潜势也相对较低。因此结冰主要发生在 $-15\sim -3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的环境中（Bernstein et al, 2005；
235 王磊等，2014）。从1月22日14时沿 $35.0\text{ }^{\circ}\text{N}$ 的温度和相对湿度纬向剖面图（图8）可见，
236 试飞高度范围内大气温度在 $-9\sim -5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间，飞机结冰发生在冷空气自东向西、自近地层向高
237 层大气侵入的过程中，最强冷平流位于 $36.5\text{ }^{\circ}\text{N}$ 、 $115\text{ }^{\circ}\text{E}$ 以东近地面层，中心温度低于 $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。
238 低层冷空气迫使西侧暖湿空气抬升，在 $700\sim 800\text{ hPa}$ 高度， $107.5\sim 117\text{ }^{\circ}\text{E}$ 范围内形成深厚的
239 的逆温层，与探空资料给出的逆温层基本一致。深厚的逆温层阻碍了暖湿空气的进一步抬升，
240 有利于过冷水的积聚。



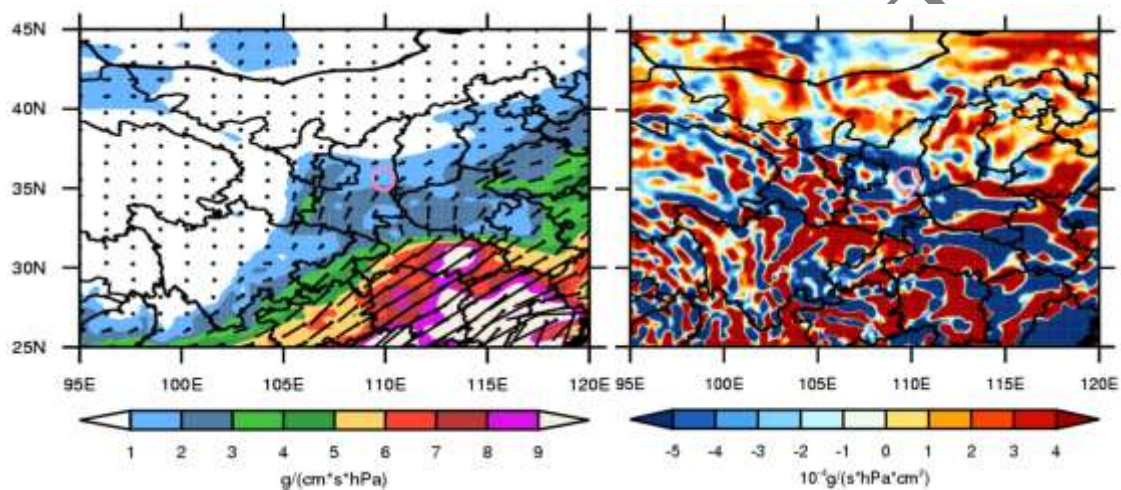
241
242 图8 2022年1月22日14时温度和相对湿度沿 $35.0\text{ }^{\circ}\text{N}$ 纬向垂直剖面图(黑色竖线表示参试飞机盘旋飞行高度及位
243 置)

244 Fig. 8 Vertical profiles of temperature and relative humidity along the latitude of $35.0\text{ }^{\circ}\text{N}$ at 14:00 on 20 January
245 2022(The black vertical line indicates the altitude and position of the hovering aircraft)

246 云中过冷水含量是指示飞机结冰的重要参数之一。当过冷水含量越大时，飞机结冰的可
247 能性越大。另外，结冰云层中过冷水所在的高度层和水平尺度，对自然结冰取证试飞也有重
248 要的影响。如果过冷水所在的高度层低于飞行安全高度层以下，或过冷水区的水平尺度小于
249 参试飞机的转弯半径，参试飞机都无法捕捉到足以产生自然结冰取证试飞所要求强度的飞机
250 结冰，或无法完成结冰云区待机 45 min 的试飞科目。美国有专家（Menzel and Frey, 2006）
251 研究指出：影响飞机结冰最重要的过冷水滴通常存于在云层顶部略微靠下一点的位置。1月
252 22日14时关中东北和山西西部地区，参试飞机盘旋飞行在 700 hPa 高度左右，如以云量 $>10\%$

253 作为云层判别指标,则该高度层基本处于当天距云顶下方三分之一的位置。从云中过冷水含量
254 量分布来看,当日 14 至 17 时,在 700 hPa 高度,陕西中部到山西西南角(34~35 N 之间)
255 均维持有超过 0.1 g/kg 的过冷水区域,峰值超过 0.2 g/kg,18 时后随着云中冰相过程的发展,
256 过冷水含量锐减。从再分析资料提供的云中过冷水维持时间和空间尺度来看,该云层能较好
257 地满足自然结冰取证试飞需求。

258 水汽通量的大小和方向能表示水汽的来源,水汽通量散度用来表示各方向输送进来的水汽
259 的积聚程度(朱乾根等,2007)。图 9a 显示,22 日 14 时 700 hPa 高度层,试飞区域上游
260 甘肃东部、南部和四川地区具有水汽通量的强中心,水汽通量为 $7.96 \text{ g}/(\text{s hPa cm})$,在西南
261 低空急流的作用下,将水汽向试飞区域输送。图 9b 显示,试飞区域附近为水汽汇,水汽通
262 量散度小于 $-2.73 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{s hPa cm}^2)$,四周有水汽向该地区汇集,有利于过冷水的积聚。甘南、
263 四川为水汽源,水汽通量散度大于 $9.2 \times 10^{-4} \text{ g}/(\text{s hPa cm}^2)$,水汽自该地区向试飞区域附近辐
264 散,给本次自然结冰取证试飞创造了理想的水汽条件。



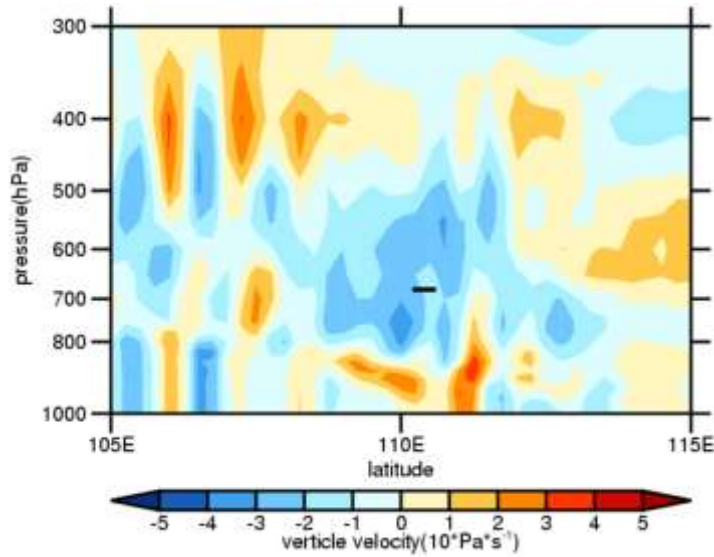
265
266

267 图 9 2022 年 1 月 22 日 14 时 700 hPa 水汽通量 (a) 和水汽通量散度 (b) (粉色圆圈表示自然结冰试飞区域)

268 Fig.9 Water vapour flux (a) and water vapour flux dispersion (b) at 14:00 700 hPa on 22 January 2022

269 (Pink circles indicate natural icing test flight areas)

270 大气垂直运动是影响飞机结冰的一个重要因素。微弱的上升气流有利于过冷云滴保持悬
271 浮状态并不断增长,但如果上升气流较快则有可能产生降水,反而不利于过冷云滴的聚集以
272 及结冰的产生(杨超,2017)。1 月 22 日 14 时自然结冰取证试飞位置附近大气垂直速度纬
273 向剖面表明(图 10),云层中上部存在约 -0.2 Pa s^{-1} 的弱上升气流,云层下部以弱下沉气流
274 为主,这种配置有利于盘旋飞行高度附近长时间维持大量的过冷液态水。



275

276 图 10 2022 年 1 月 22 日 14 时大气垂直速度沿 35.5°N 纬向垂直剖面图（黑色横线表示参试飞机盘旋飞行的位置和
277 高度）

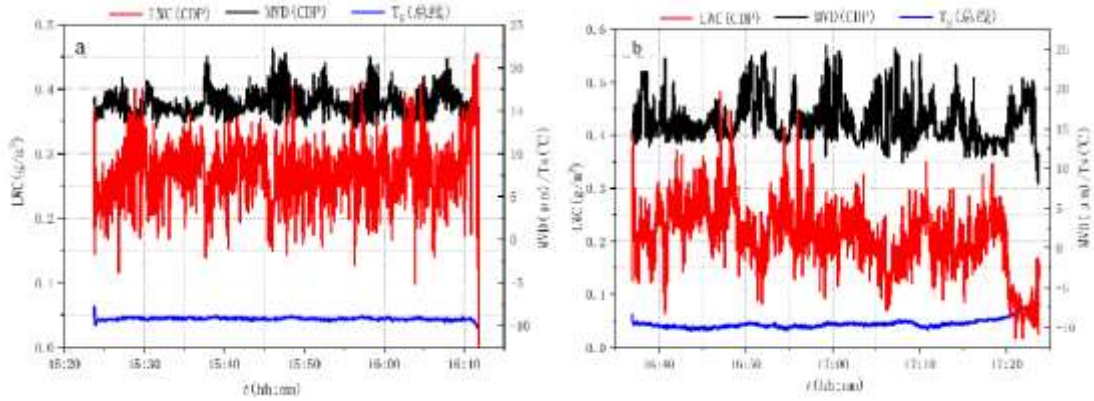
278 Fig. 10 Vertical profile of atmospheric vertical velocity along latitude 35.5°N at 14:00 on 22 January 2022

279 (Black horizontal lines indicate the position and altitude of the participating aircraft in hovering flight)

280 4 机载 DMT 探测数据分析

281 图 11 是 1 月 22 日自然结冰取证试飞 2 次穿云及云中盘旋试飞过程中，机载 DMT 探测
282 的气象参数时间历程曲线。在第一次云中盘旋试飞中，OAT 在 -7.87~ -10.22 °C 之间，平均
283 为 -9.20 °C；LWC 介于 0.05~0.45 g m⁻³ 之间，平均为 0.27 g m⁻³；MVD 为 2.5~22.2 μm，平
284 均为 15.82 μm。在第二次云中盘旋飞行中，OAT 在 -7.09~ -10.39 °C 之间，平均为 -9.52 °C；
285 LWC 介于 0.02~0.48 g m⁻³ 之间，平均为 0.23 g m⁻³；MVD 为 8.0~24.5 μm，平均为 15.93 μm。
286 需要注意的是，MVD 和 LWC 的极小值均出现在飞机爬升即将出云阶段。可见，当天的 T、LWC
287 和 MVD 总体波动较小，且均在 CCAR25 部附录 C 连续最大（层云）结冰条件包线范围内。
288 与北美和欧洲的飞机结冰观测结果（Bernstein et al, 2019）相比，本次过程中的 LWC 和
289 MVD 均偏小。特别是与同样具有较强逆温层或稳定层结的个例相比，Bernstein et al(2019)
290 给出的个例 MVD 多在 20 μm 以上，本次过程的 MVD 偏小为主，这可能与陕西地区受污染
291 影响气溶胶浓度偏高有关。气溶胶作为云凝结核，其含量增加一般使得云滴数浓度增加，云
292 滴半径减小（李占清，2020）。

293 当天自然结冰取证试飞 2 次穿云及云中待机 45 min 飞行的区域分别为（35.15~35.49°N、
294 110.23~110.82°E）和（35.25~35.75°N、110.33~111.08°E），水平尺度约在 60~80 km，
295 较山东地区过冷水区平均水平尺度更大（王俊，2003）。需要注意的是，与大气科学探测飞
296 行试验过程有所区别的是，1 月 22 日自然结冰取证试飞是在结冰云层中盘旋飞行，未对云
297 层开展垂直分层探测，也未在水平方向上对所有云区结冰状况进行广泛探测。从前文 ERA5
298 资料给出的过冷水范围分布来看，水平尺度要比 60~80 km 更大。此外，本次过冷水区平均
299 水平尺度明显大于文献给出的山东地区结果，可能与季节因素和试验目的有关。本次过程发
300 生在一月份，山东个例均发生在春秋季节；山东个例来源于人工增雨作业，以降水性层状云为
301 主，为遭遇型的飞机结冰事件。



302

303

图 11 2022 年 1 月 22 日第 1 次 (a) 第 2 次 (b) 自然结冰试飞穿云及云中盘旋飞行机载气象探测参数时间历程曲线

304

305

Fig.11 Time course curve of airborne meteorological sounding parameters for the 1st (a) and 2nd (b) natural icing test flights through clouds and hovering in clouds on 22 January 2022

306

307

1 月 22 日自然结冰取证试飞过程的结冰强度和位置, 较为符合结冰环境的过冷却液态小水滴所产生的飞机结冰的基本特征。云中的过冷液态水是发生飞机结冰最主要的条件。一般认为, 液态水滴粒子直径越大、云水密度越高或是过冷水含量越高则更有利于飞机结冰的产生(杨洁等, 2020)。虽然结冰环境过冷却液态水滴的大小, 即中值体积直径 MVD (Median Volume Diameter) (Jack, 1996) 对结冰类型和强度的影响程度, 较液态水含量和温度要小, 但大水滴形成的飞机结冰不仅发生在飞机前缘, 也可能发生在机翼的中后部, 危害更大。主要原因是水滴直径越大, 撞击机体表面的水滴收集系数越大, 极值越接近于 1。而水滴撞击的上下极值范围越大, 结冰的冰型越厚(吴佩佩等, 2014)。2 次穿云及云中待机 45 min 盘旋飞行过程中, 云中典型粒子图像显示, 云相态以过冷小水滴为主, 间或存在过冷大水滴或冰晶(图 12)。Bernstein et al (2019) 给出了北美和欧洲的多个飞机结冰个例观测结果, 并讨论了大陆性云团过冷大水滴结冰环境形成的条件, 指出较高的 LWC 和较低的 NC 有利于过冷大水滴的形成。但如前文所述, 在高气溶胶浓度背景下此次过程中间或存在的过冷大水滴并不符合上述关系。

308

309

310

311

312

313

314

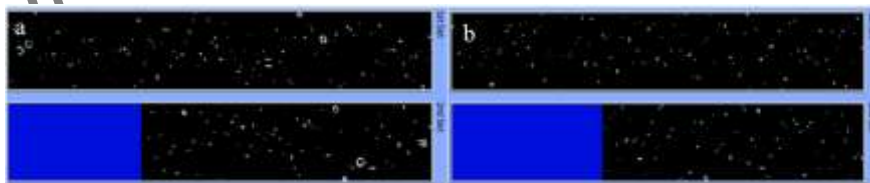
315

316

317

318

319



320

321

图 12 2022 年 1 月 22 日自然结冰试飞第 1 次 (左: 15:28:27) 和第 2 次 (右: 16:40:51) 穿云过程云中典型粒子图像 (图像宽度为 1600 μm , 白点为粒子图像)

322

323

Fig. 12 Images of typical particles in clouds during the 1st natural icing test flight (left: 15:28:27) and 2nd (right:

324

16:40:51) through clouds on 22 January 2022

325

5 结论与讨论

326 2022年1—2月期间,试飞院在国内首次按照CCAR25部附录C的要求,完成某国产
327 大型客机连续最大(层云)自然结冰取证试飞全部科目,表明我国在运输类飞机自然结冰取
328 证试飞气象资源分布状况研究、场址和试飞窗口选荐、气象条件预报技术等方面,已经取得
329 了长足的进步。以2022年1月22日的自然结冰取证试飞为例,利用多源气象资料和机载
330 DMT探测资料,对自然结冰取证试飞天气形势、云系宏微观特征和气象条件进行了分析。
331 自然结冰取证试飞的目标是寻找理想的结冰区域和高度层并做盘旋飞行以完成试飞科目,故
332 本次未进行大范围的水平飞行和垂直探测。但本文的个例来源于主动寻找并对合适的结冰云
333 层进行飞机探测,相关的分析对深入理解我国典型结冰云层的云微物理特征和气象条件具有
334 重要的意义。本文的主要结论如下:

335 (1) 此次飞机结冰发生在西南暖湿气流北抬天气背景下,影响系统主要是地面低压倒槽
336 和700 hPa南支槽前西南低空急流,地面倒灌强冷空气造成中低空出现深厚逆温层结。逆温
337 层结有利于过冷水的积聚,同时在一定程度上阻碍了动量和物质的交换,限制了降水的发展,
338 为自然结冰取证试飞提供了有利的宏观条件。

339 (2) 此次自然结冰取证试飞捕捉到理想的温度和水汽条件,试验区域内环境温度约-9~
340 -5℃,相对湿度大于80%,水汽通量散度小于 $-2.73 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{s hPa cm}^2)$,且上游地区水汽通
341 量约 $7.96 \text{ g}/(\text{s hPa cm})$ 。同时,云层中上部存在 -0.2 Pa s^{-1} 的弱上升气流,对过冷云滴的增长
342 起到一定的促进作用。

343 (3) 当天结冰云层的云顶高度平均约4.5 km,云顶温度为-14~-12℃,云内无降水,雷
344 达基本反射率 $<15 \text{ dBz}$,参试飞机飞行高度主要在10700 ft(3261 m)左右,主要位于非降
345 水层状云的中上部。

346 (4) 当天参试飞机在2次穿云及云中盘旋待机45 min飞行期间,过冷云在水平方向上
347 均匀性较好,分别产生重度和中-重度结冰,结冰效果较为理想。云内存在丰富的过冷小云
348 滴,并伴有少量的过冷大水滴,无明显冰晶粒子生成,云内贝吉隆过程不显著。LWC平均
349 值为 $0.23 \sim 0.27 \text{ g m}^{-3}$,最大值为 0.48 g m^{-3} ;MVD平均值为 $15.82 \sim 15.93 \mu\text{m}$,最大值为
350 $25.45 \mu\text{m}$ 。

351 本文仅基于陕西地区一次飞机自然结冰取证试飞个例分析讨论了飞机结冰发生时的天
352 气背景、物理量场和云系宏微观特征,相关的分析还存在一些局限性。事实上,不同天气背
353 景、不同区域的飞机结冰气象条件和云宏微物理特征均存在较大的差异。受个例和资料所限,
354 本文尚未深入讨论差异产生的原因与影响机制。此外,本文的个例虽然间或观测到了过冷大
355 水滴,但亦未对过冷大水滴产生机制及对试验试飞的影响进行深入讨论。考虑到飞机结冰适
356 航标准的发展及附录O的取证需求(陈勇等,2023),相关的研究工作还需要继续深入开
357 展。

358

359 参考文献:

360 陈勇,孔维梁,刘洪,2023.飞机过冷大水滴结冰气象条件运行设计挑战[J].航空学报,44(1):626973. Chen Y, Kong W L, Liu
361 H, 2023. Challenge of aircraft design under operational conditions of supercooled large water droplet icing[J]. Acta Aeronaut

362 Astronaut Sin, 44(1): 626973, doi: 10.7527/S1000-6893.2022.26973 (in Chinese).

363 丁军亮, 赵利利, 杨涛, 等, 2023. 自然结冰飞行试验技术综述[J]. 航空学报, 44(17): 028270. Ding J L, Zhao L L, Yang T, et al,

364 2023. Flight test technology of natural icing[J]. Acta Aeronaut Astronaut Sin, 44(17): 028270, doi: 10.7527/S1000-6893.2023.28270

365 (in Chinese).

366 封秋娟, 李培仁, 侯团结, 等, 2014. 山西春季一次层状冷云的微物理结构特征[J]. 大气科学学报, 37(4): 449-458. Feng Q J, Li P R,

367 Hou T J, et al, 2014. Microphysical characteristics of spring precipitation cold stratiform clouds in Shanxi Province[J]. Trans Atmos

368 Sci, 37(4): 449-458 (in Chinese).

369 高茜, 郭学良, 何晖, 等, 2020. 基于飞机观测的华北积层混合云降水微物理特征的数值模拟研究[J]. 大气科学, 44(5): 899-912.

370 Gao Q, Guo X L, He H, et al, 2020. Numerical simulation study on the microphysical characteristics of stratiform clouds with

371 embedded convections in Northern China based on aircraft measurements[J]. Chin J Atmos Sci, 44(5): 899-912 (in Chinese).

372 姬雪帅, 王丽婧, 郭宏, 等, 2022. 基于多源观测资料对张家口一次雨雪天气降水相态特征的分析[J]. 干旱气象, 40(3):

373 507-515. Ji X S, Wang L J, Guo H, et al, 2022. Analysis of characteristics of precipitation phase during a rain-snow weather process

374 in Zhangjiakou based on multi-source observation data[J]. J Arid Meteor, 40(3): 507-515, doi:

375 10.11755/j.issn.1006-7639(2022)-03-0507 (in Chinese).

376

377 李佰平, 戴建华, 孙敏, 等, 2018. 一种改进的飞机自然结冰潜势算法研究[J]. 气象, 44(11): 1377-1390. Li B P, Dai J H, Sun M, et

378 al, 2018. An improved aircraft natural icing potential algorithm[J]. Meteor Mon, 44(11): 1377-1390 (in Chinese).

379 李勤红, 乔建军, 陈增江, 1999. Y7-200A 飞机自然结冰飞行试验[J]. 飞行力学, 17(2): 64-69. Li Q H, Qiao J J, Chen Z J, 1999.

380 Natural icing flight test for Y7-200A aircraft[J]. Flight Dyn, 17(2): 64-69 (in Chinese).

381 李占清, 2020. 气溶胶对中国天气、气候和环境影响综述[J]. 大气科学学报, 43(1): 76-92. Li Z Q, 2020. Impact of aerosols on the

382 weather, climate and environment of China: an overview[J]. Trans Atmos Sci, 43(1): 76-92, doi:

383 10.13878/j.cnki.dqkxxb.20200115005 (in Chinese).

384 李哲, 徐浩军, 薛源, 等, 2016. 结冰对飞机飞行安全的影响机理与防护研究[J]. 飞行力学, 34(4): 10-14. Li Z, Xu H J, Xue Y,

385 et al, 2016. Research on flight safety effect mechanism and protection for aircraft icing[J]. Flight Dyn, 34(4): 10-14 (in Chinese).

386 刘健, 于勇, 蒋彤, 等, 2004. 吉林省层状云中过冷水含量分布特征及人工增雨潜力研究[J]. 辽宁气象, (4): 29-30, 36. Liu J, Yu Y,

387 Jiang T, et al, 2004. Characteristics of the distribution of supercooled water content in stratiform clouds in Jilin Province and the

388 potential of artificial rain augmentation[J]. J Meteor Environ, (4): 29-30, 36 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献英文

389 翻译, 请确认)

390 毛旭, 刘鑫华, 杨波, 2023. 一种优化的基于对流可分辨模式的飞机积冰潜势概率预报方法[J]. 大气科学, 47(5): 1525-1540. Mao

391 X, Liu X H, Yang B, 2023. An optimized probabilistic prediction method for aircraft icing potential based on a convection-allowing

392 model[J]. Chin J Atmos Sci, 47(5): 1525-1540, doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2207.21235 (in Chinese).

393 倪洪波, 李佰平, 闫文辉, 等, 2022. 飞机试飞的自然结冰潜势预测及检验评估[J]. 气象科技, 50(2): 254-266. Ni H B, Li B P, Yan

394 W H, et al, 2022. Aircraft natural icing potential forecast and its evaluation in flight test[J]. Meteor Sci Technol, 50(2): 254-266 (in

395 Chinese).

396 彭冲, 宋灿, 蔡淼, 2023. 河南一次罕见飞机积冰过程云系宏观特性的综合观测[J]. 大气科学, 47(6): 1757-1769. Peng C, Song C,

397 Cai M, 2023. Comprehensive observation of the cloud macro- and microstructures of a rare aircraft icing case in Henan Province[J].

398 Chin J Atmos Sci, 47(6): 1757-1769. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2208.21044 (in Chinese).

399 孙鸿娉, 李培仁, 闫世明, 等, 2014. 山西省 2008—2010 年 64 架次飞机云物理观测结果分析[J]. 气象科技, 42(4): 682-689. Sun H P,

400 Li P R, Yan S M, et al, 2014. Characteristics of cloud microphysical structure based on aircraft data in 2008-2010 in Shanxi

401 Province[J]. Meteor Sci Technol, 42(4): 682-689 (in Chinese).

402 孙晶, 蔡淼, 王飞, 等, 2019. 安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析[J]. 气象, 45(10): 1341-1351. Sun J, Cai M, Wang F, et al,

403 2019. A case study of aircraft icing conditions in Anqing Area[J]. Meteor Mon, 45(10): 1341-1351 (in Chinese).

404 孙艳辉, 张波, 刘伟, 等, 2023. 高空冷涡背景下飞机积冰特征和机制的探测研究[J]. 气象, 49(8): 972-984. Sun Y H, Zhang B, Liu
405 W, et al, 2023. Study on the characteristics and mechanism of aircraft ice accumulation under the background of upper-air cold
406 vortex[J]. Meteor Mon, 49(8): 972-984 (in Chinese).

407 王俊, 2003. 降水性层状云系中过冷水的分布特征[J]. 山东气象, 23(2): 9-11. Wang J, 2003. The characteristics of supercooled water
408 in precipitable stratiform clouds[J]. J Shandong Meteor, 23(2): 9-11 (in Chinese).

409 王磊, 李成才, 赵增亮, 等, 2014. 飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究[J]. 气象, 40(2): 196-205. Wang L, Li C C, Zhao Z L,
410 et al, 2014. Microphysical property analysis and detection of air icing clouds[J]. Meteor Mon, 40(2): 196-205 (in Chinese).

411 王小润, 2014-04-29(010). 国产 ARJ21-700 新支线飞机完成自然结冰试飞[N]. 光明日报. Wang X R, 2014-04-29(010). Domestic
412 ARJ21-700 new regional jet completes natural icing test flight[N]. Guangming Daily (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文
413 献英文翻译, 请确认)

414 王秀春, 顾莹, 李程, 2014. 航空气象[M]. 北京: 清华大学出版社: 100-100. Wang X C, Gu Y, Li C, 2014. Aviation Meteorology[M].
415 Beijing: Tsinghua University Press: 100-100 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译, 请确认)

416 王泽林, 倪洪波, 裴昌春, 2020. 我国干旱地区一次直升机自然结冰试飞天气个例分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 14(2): 68-74. Wang Z
417 L, Ni H B, Pei C C, 2020. A case study of helicopter natural icing flight test in arid areas of China[J]. Desert Oasis Meteor, 14(2):
418 68-74 (in Chinese).

419 吴佩佩, 朱春玲, 刘文平, 等, 2014. 过冷大水滴条件下机翼结冰数值仿真[J]. 计算机仿真, 31(9): 51-55. Wu P P, Zhu C L, Liu W P,
420 et al, 2014. Numerical simulation of aircraft icing under supercooled large droplet conditions[J]. Comput Simulat, 31(9): 51-55 (in
421 Chinese).

422 谢坤, 2009. 结冰翼型气动力特性数值模拟[D]. 南京: 南京航空航天大学. Xie K, 2009. Numerical simulations of iced airfoils[D].
423 Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (in Chinese).

424 杨超, 2017. 基于再分析数据的飞机积冰预测研究[D]. 德阳: 中国民用航空飞行学院. Yang C, 2017. The research on aircraft icing
425 forecast based on reanalysis data[D]. Deyang: Civil Aviation Flight University of China (in Chinese).

426 杨洁, 王兵, 刘峰, 2020. 一次冷锋过程的云微物理特征分析以及飞机积冰预报检验[J]. 气象科技, 48(1): 81-87, 96. Yang J, Wang
427 B, Liu F, 2020. Cloud microphysical characteristic analysis of a cold front process and aircraft icing forecast[J]. Meteorol Sci
428 Technol, 48(1): 81-87, 96 (in Chinese).

429 杨洁帆, 胡向峰, 雷恒池, 等, 2021. 太行山东麓层状云微物理特征的飞机观测研究[J]. 大气科学, 45(1): 88-106. Yang J F, Hu X F,
430 Lei H C, et al, 2021. Airborne observations of microphysical characteristics of stratiform cloud over eastern side of Taihang
431 Mountains[J]. Chin J Atmos Sci, 45(1): 88-106 (in Chinese).

432 袁敏, 黄敏松, 段炼, 2018. 一次飞机积冰环境中的云微物理特征[J]. 气象科技, 46(1): 170-177. Yuan M, Huang M S, Duan L, 2018.
433 A case study of microphysical properties in aircraft icing environment[J]. Meteorol Sci Technol, 46(1): 170-177 (in Chinese).

434 章澄昌, 2008. 飞行气象学[M]. 北京: 气象出版社: 159-173. Zhang C C, 2008. Flight Meteorology[M]. Beijing: China Meteorological
435 Press: 159-173 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译, 请确认)

436 张宇飞, 2013. 浅析飞机积冰与航空安全[J]. 科技风, (14): 194, 197. Zhang Y F, 2013. Analysis of aircraft ice accumulation and
437 aviation safety[J]. Technol Wind, (14): 194, 197 (in Chinese). (查阅网上资料, 未找到本条文献英文翻译, 请确认)

438 中国民用航空局, 2011. CCAR 25-R4 中国民用航空规章第 25 部: 运输类飞机适航标准[S]. 北京: 中国民用航空总局. CAAC,
439 2011. CCAR 25-R4 Part 25 of the civil aviation regulations of China: airworthiness standards for transport aircraft[S]. Beijing: Civil
440 Aviation Administration of China (in Chinese).

441 周毓荃, 欧建军, 2010. 利用探空数据分析云垂直结构的方法及其应用研究[J]. 气象, 36(11): 50-58. Zhou Y Q, Ou J J, 2010. The
442 method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research[J]. Meteor Mon, 36(11): 50-58 (in
443 Chinese).

444 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 2007. 天气学原理和方法: 第 4 版[M]. 北京: 气象出版社: 2007: 100-100. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W,
445 2007. Principles and Methods of Weather Science[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press: 100-100 (in Chinese). (查阅网
446 上资料, 未找到本条文献英文翻译, 请确认)

447 朱士超, 郭学良, 2014. 华北积层混合云中冰晶形状、分布与增长过程的飞机探测研究[J]. 气象学报, 72(2): 366-389. Zhu S C, Guo
448 X L, 2014. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China: aircraft
449 measurements[J]. Acta Meteor Sin, 72(2): 366-389 (in Chinese).

450 Bellucci M, Vernillo P, Auletta A, et al, 2007. SONACA icing test campaign on a 2D model at CIRA IWT[C]//2007 SAE International
451 Conference on Aircraft & Engine Icing. Warrendale: Society of Automotive Engineers: 657-663.

452 Bernstein B C, McDonough F, Politovich M K, et al, 2005. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft
453 observations[J]. J Appl Meteor Climatol, 44(7): 969-986.

454 Bernstein B C, Rasmussen R M, McDonough F, et al, 2019. Keys to differentiating between small- and large-drop icing conditions in
455 continental clouds[J]. J Appl Meteor Climatol, 58(9): 1931-1953.

456 Gulpepe I, Sharman R, Williams P D, et al, 2019. A review of high impact weather for aviation meteorology[J]. Pure Appl Geophys,
457 176(5): 1869-1921, doi: 10.1007/s00024-019-02168-6.

458 Gurbacki H M, 2003. Ice-induced unsteady flowfield effects on airfoil performance[D]. Urbana: University of Illinois at
459 Urbana-Champaign.

460 Hacker P T, Dorsch R G, 1951. A Summary of meteorological conditions associated with aircraft icing and a proposed method of
461 selecting design criteria for ice-protection equipment[R]. Washington: NACA.

462 Jack R K, 1996. Representative values of icing-related variables aloft in freezing rain and freezing drizzle[C]//34th Aerospace Sciences
463 Meeting and Exhibit. Reno: AIAA.

464 Jones A R, Lewis W, 1949. Recommended values of meteorological factors to be considered in the design of aircraft ice-prevention
465 equipment[R]. Washington: NACA.

466 Lewis W, Bergrun N R, 1952. A probability analysis of the meteorological factors conducive to aircraft icing in the United States[R].
467 Washington: NACA.

468 Lewis W, Hoecker Jr W H, 1949. Observations of icing conditions encountered in flight during 1948[R]. Washington: NACA.

469 Lewis W, Kline D B, Steinmetz C P, 1947. A further investigation of the meteorological conditions conducive to aircraft icing[R].
470 Washington: NACA.

471 Menzel, W., Frey, R., 2002. Cloud top properties and cloud phase algorithm theoretical basis document.[J]

472 Reehorst A L, Addy Jr H E, Colantonio R O, 2010. Examination of icing induced loss of control and its mitigations[C]//AIAA Guidance,
473 Navigation, and Control Conference. Toronto: AIAA.

474 Reehorst A, Chung J, Potapczuk M, et al, 2000. Study of icing effects on performance and controllability of an accident aircraft[J]. J
475 Aircraft, 37(2): 253-259.

476 Title 14 Code of Federal Regulations, Aeronautics and Space, Part 25 Airworthiness Standards: Transport Category Airplanes, Appendix
477 C[R]. Washington: National Archives and Records Administration. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认)

478 Title 14 Code of Federal Regulations, Aeronautics and Space, Part 29 Airworthiness Standards: Transport Category Rotorcraft, Appendix
479 C[R]. Washington: National Archives and Records Administration. (查阅网上资料, 未找到本条文献信息, 请确认)

480