

倪洪波,丑岩,李佰平,等,2025.一次大型客机自然结冰取证试飞过程的天气条件分析[J].气象,51(7):852-864. Ni H B,Chou Y,Li B P,et al,2025. Analysis of weather conditions during a large passenger aircraft natural icing certification flight test[J]. Meteor Mon,51(7):852-864(in Chinese).

一次大型客机自然结冰取证试飞 过程的天气条件分析*

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

提 要:云中液态水含量(LWC)、云滴中值直径(MVD)、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。试验区域云顶高度自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℃,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一10~-7℃,相对湿度>80%,水汽通量散度<-2.73×10⁻⁷ g·s⁻¹·hPa⁻¹·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0.23~0.27 g·m⁻³,MVD平均值为15.82~15.93 μm。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

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2025.010801

Analysis of Weather Conditions During a Large Passenger Aircraft Natural Icing Certification Flight Test

NI Hongbo¹ CHOU Yan¹ LI Baiping² LI Jing² ZHANG Ying¹ YAN Wenhui¹

¹ The Technology of China 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 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 certification flight test meets the natural icing certification flight test standard. The meteorological conditions of a domestic large passenger aircraft natural icing test flight on 22 January 2022 are analyzed based on multi-source meteorological data. The results show that the high-altitude weather background of this natural icing certification flight test was a latitudinal fluctuating airflow, cooperated with the cold air inversion near the surface, forcing the southwest warm and humid airflow in the middle and lower layers of the troposphere

* 工业和信息化部民用飞机专项科研项目(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)和中国气象局创新发展专项(CXFZ2022J072)共同资助

2024年2月10日收稿; 2025年1月14日收修定稿

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

通讯作者: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

to lift northward, and forming a wide range of non-precipitation layered cloud system. The height of the cloud top in the test area developed from 3.0 km to 4.6 km, and an inversion layer existed in 1.3–3.5 km, with the lowest temperature at the cloud top being -14°C , no precipitation in the cloud, and the radar basic reflectivity $<15\text{ dBz}$. The ambient temperature of the two times of flights penetrating the cloud and the standby flight in the cloud for 45 min hovering flights was from -10 to -7°C , with the relative humidity $>80\%$, and the scattering of water vapor flux $<-2.73\times 10^{-7}\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$. This provided ideal temperature and water vapor conditions for the natural icing test flights, and a weak updraft of $-0.2\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ in the middle and upper part of the cloud layer contributed to the growth of the supercooled cloud droplets. The DMT sounding data show that the supercooled cloud is inhomogeneous both vertically and horizontally, and that the supercooled cloud droplets were dominant inside the cloud, where the mean value of LWC was $0.23\text{--}0.27\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$, and the mean value of MVD was $15.82\text{--}15.93\text{ }\mu\text{m}$. So there are aircraft natural icing meteorological conditions in winter under the influence of the “inversion + inversion trough” weather system, which is conducive to carrying out aircraft natural icing certification tests in Shaanxi.

Key words: large passenger aircraft, natural icing, flight test, weather condition, supercooled cloud droplet

引言

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,影响飞机的操纵性和稳定性。飞机特定部位冰层积聚还会影响其发动机性能、通信导航、大气数据系统和驾驶舱视界等。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一(王秀春等,2014;Reehorst et al, 2000;2010;Gurbacki,2003;李哲等,2016;毛旭等,2023)。据美国相关部门统计,有大量飞行事故及不安全事件与飞机结冰有关(Gultepe et al,2019;谢坤,2009;Bellucci et al,2007;张宇飞,2013)。因此,运输类飞机在量产交付前,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定程度的飞机结冰,并验证机载防除冰设备的适用性。

云中液态水含量(LWC)、云滴中值直径(MVD)、外部空气温度(OAT)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。美国联邦航空管理局(FAA)运输类飞机自然结冰适航标准(美国《联邦法规》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)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,美国国家航空咨询委员会(NACA)在北美组织开展了一系列飞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(Lewis et al,1947;Jones and Lewis,1949;Lewis and Hoecker,1949;Hacker and Dorsch,1951;Lewis and Bergrun,1952)。

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),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、过冷水含量及时空分布特征(王俊,2003;刘健等,2004;王磊等,2014;孙鸿博等,2014;袁敏等,2018;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;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

使在自然结冰型号合格取证试飞方面困难重重(丁军亮等,2023)。

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结冰取证试飞,共计飞行 5 架次,累计飞行 24 h 14 min,除需在夏半年开展的间断最大(积云)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 45 min 的试飞科目。本文利用 MICAPS 常规气象资料、ERA5 大气再分析资料及美国 DMT(Droplet Measurement Technology)机载探测数据,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,以期为后续在该地区开展结冰试飞提供技术参考。

1 资料及机载仪器

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)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(CCP)。

参试飞机在背部加装了美国 DMT 公司生产的机载云粒子组合探头(CCP),其由云粒子探头(CDP)、云粒子图像探头(CIP)、Hotwire 热线含水量仪及 1 套飞机综合气象要素测量系统 AIMMS(Aircraft-Integrated Meteorological Measurement System)组成,用于测量云滴数浓度(NC)、LWC、MVD、OAT 及空速等关键参数,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,测量范围为 $2\sim 50\text{ }\mu\text{m}$;CIP 使用 64 通道图像测量阵,主要用于测量过冷大水滴、冰晶等大颗粒的 MVD,测量范围为 $25\sim 1550\text{ }\mu\text{m}$ 。在国产大型客机开展飞机自然结冰取证试飞之前,对测量设备进行了相关制造符合性检验,其结果符合相关设备制造声明。设备详细功能、参数及测量误差见表 1。由于在自然结冰取证试飞过程中热线含水量仪(Hotwire)因结冰导致数据出现中断问题,影响测量结果,后续分析均采用 CDP 和 CIP 反演的 LWC。

表 1 机载云粒子组合探头(CCP)设备功能及参数

Table 1 Functions and parameters of airborne CCP equipment

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	$2\sim 50\text{ }\mu\text{m}$	1~12 通道: $1\text{ }\mu\text{m}$ 13~30 通道: $2\text{ }\mu\text{m}$	$\pm 20\%$
CIP	测量大云滴、冰雪晶	$25\sim 1550\text{ }\mu\text{m}$	$25\text{ }\mu\text{m}$	$\pm 20\%$
Hotwire	测量液态水含量	$0\sim 3\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$	—	$\pm 15\%$
AIMMS	测量温度、湿度、气压、海拔高度、空速等	温度: $-20\sim 50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 湿度: $0\sim 100\%\text{ RH}$	温度: $0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ 湿度: $0.1\%\text{ RH}$	温度: $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 湿度: $2\%\text{ RH}$

2 自然结冰取证试飞概况及天气形势

2.1 试飞概况

1 月 22 日,参试飞机于 12:46(北京时,下同)起飞,17:50 落地,飞行时长为 5 h 4 min。飞机首先前往陕南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飞行高度相同),因而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(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)。

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了 2 次穿云及云中盘旋飞行,云中连续飞行时长分别为 48 min 8 s 和 46 min 45 s,完成 2 次结冰云层中待机 45 min 飞行科目(图 1a 和 1b)。云中暴露距离分别为 186.86 nm 和 189.50 nm,云中平均水平飞行高度在 10700 ft(3261 m)左右,DMT 探测数据表明,当天的云微物理参数波动小、结冰气象条件理想,平均大气静温分别为 $-9.20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-9.52\text{ }^{\circ}\text{C}$,LWC 分别

平均为 $0.27\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$ 和 $0.23\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,MVD 分别平均为 $15.82\text{ }\mu\text{m}$ 和 $15.93\text{ }\mu\text{m}$,最大结冰厚度分别达到 5.84 cm 和 5.08 cm (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)。

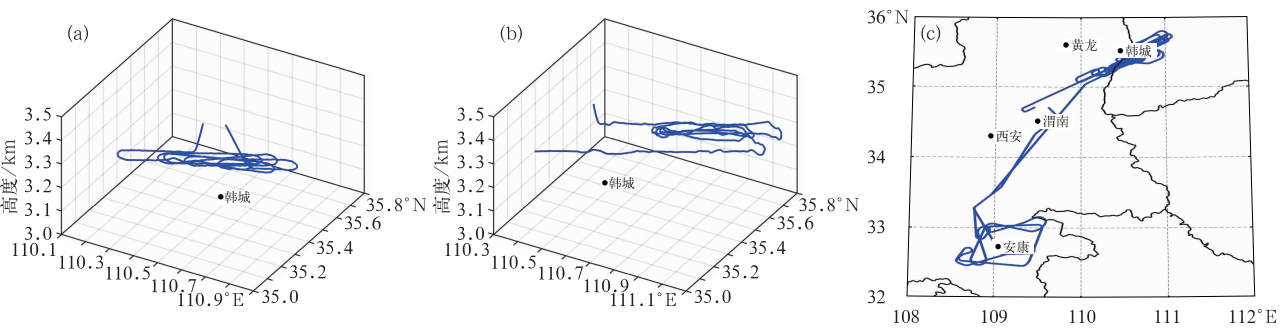


图 1 2022 年 1 月 22 日自然结冰取证试飞(a)第 1 次和(b)第 2 次穿云盘旋飞行航迹及(c)当日飞行航迹水平投影
Fig. 1 (a) The 1st and (b) the 2nd through-cloud hovering flight trajectories and (c) horizontal trajectory projections in the natural icing certification flight test on 22 January 2022

表 2 2022 年 1 月 22 日自然结冰取证试飞参数
Table 2 Parameters for the natural icing certification flight test 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
纬度/ $^{\circ}\text{N}$	35.49	35.35	35.15	0.07	35.75	35.58	35.25	0.11
经度/ $^{\circ}\text{E}$	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/ in^*	2.30				2.00			

注:1 ft=0.3048 m,1 in=25.4 mm。



图 2 2022 年 1 月 22 日自然结冰取证试飞过程飞机结冰图像
(a)15:31 第 1 次云中,(b)16:11 第 1 次出云,(d)16:46 第 2 次云中,(e)17:24 第 2 次出云 CCP 热线含水量电路板结冰状态;(c)16:12 第 1 次出云和(f)17:26 第 2 次出云后左侧机翼 2 号标尺结冰状态
Fig. 2 Aircraft icing during the natural icing certification flight test on 22 January 2022
(a, b, d, e) the circuit board icing condition of CCP Hotwire of (a) the 1st time in cloud at 15:31 BT, (b) the 1st time out of cloud at 16:11 BT, (d) the 2nd time in cloud at 16:46 BT, (e) the 2nd time out of cloud at 17:24 BT; (c, f) the No. 2 ruler icing condition of left wing after (c) the 1st time out of cloud at 16:12 BT and (f) the 2nd time out of cloud at 17:26 BT

2.2 高空形势及系统配置

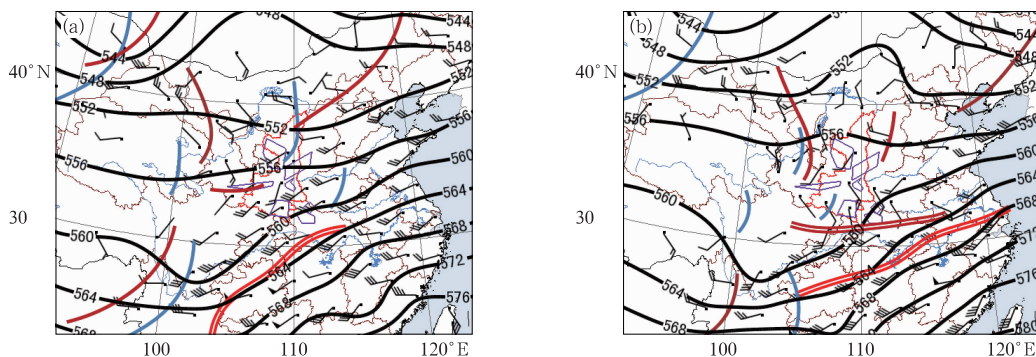
2022 年 1 月 20—22 日,欧亚 500 hPa 中高纬度建立并维持平直纬向多波动气流,西伯利亚有冷空气持续侵入北疆地区并东移南下,影响我国中东部地区。700 hPa 高度上,宁夏—云南一带有南支槽存在,甘肃东部到陕西中南部受槽前西南低空急流影响,急流轴延伸至陕北南部地区,自孟加拉湾将大量的水汽、热量和动量向北输送。850 hPa 高度上,强冷空气自华北地区沿汾渭平原东部向西倒灌,迫使暖湿空气进一步抬升,在陕西形成“冷+暖+冷”的垂直配置。

22 日 08:00,500 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北地区,均受一致的南西气流控制。关中、陕南西南风达到 $8 \sim 22 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,且有回暖迹象。700 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—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、关中均受倒灌偏东风影响。至 20:00,500 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、陕西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,贵州到湖北呈西南—东北走向的切变系统东移至江南地区。

2.3 地面形势及降水

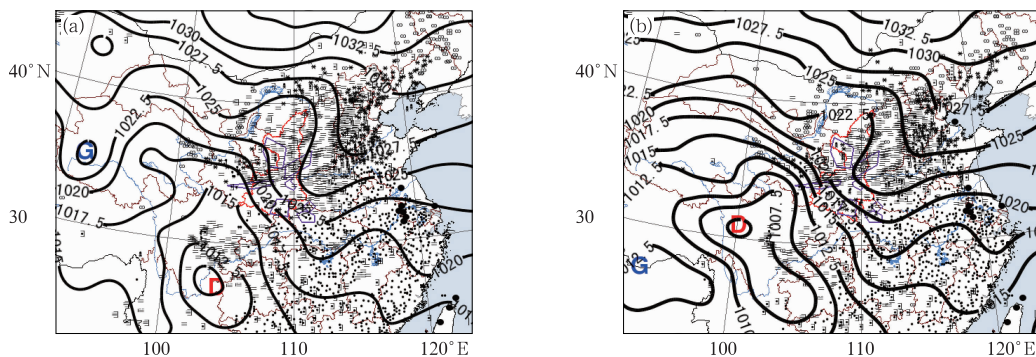
地面天气图上(图 4),11:00 我国境内自西南至高原北部地区受倒槽控制,95°~120°E 区域海平面



注:蓝色、褐色、红色粗线分别表示 500、700、850 hPa 的槽线或切变线,蓝色细线所示区域为飞行区域,下同。

图 3 2022 年 1 月 22 日(a)08:00 和(b)20:00 的 500 hPa 高度场(黑线,单位:dagpm)、700 hPa 风场(风羽)综合图

Fig. 3 Composite chart of 500 hPa geopotential height (black line, unit: dagpm) and 700 hPa wind field (barb) at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 22 January 2022



注:黑点表示国家站 1 h 观测;等值线表示地面气压场,单位:hPa;D 和 G 分别表示低压和高压中心。

图 4 2022 年 1 月 22 日(a)11:00 和(b)14:00 地面天气图

Fig. 4 Surface synoptic chart at (a) 11:00 BT and (b) 14:00 BT 22 January 2022

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。降水区分别位于甘肃东南部、陕南南部、华北地区和长江以南地区。至14:00,汉中至西安之间的气压梯度有所加强,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倒灌的冷空气对当天降水相态的变化有直接影响。至20:00,关中大部均转雪。

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件。

3 飞机结冰环境场条件分析

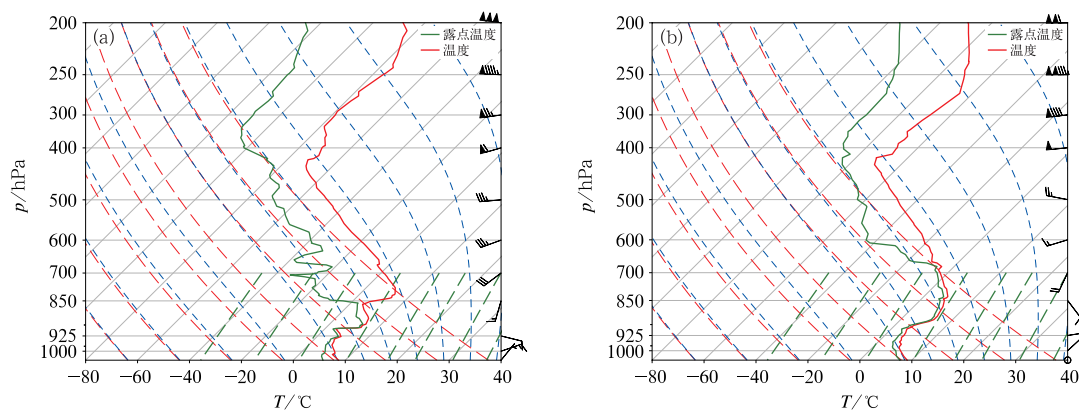
3.1 探空资料分析

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08:00 泾河站探空曲线显示(图5a),云层从近地层发展到700 hPa(约3.0 km)高度,云中温度在 $-8.0\sim-3.0^{\circ}\text{C}$,其中在1.3~3.5 km高度层有3个逆(等)温层。在2.0 km以下高度层内,风向自低层向高层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。这表明当天上午陕西中南部地区中高层有暖平流输送。至20:00,云层较上午有明显的向上发展,自近地层延伸至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,低层偏东风层顶也抬升到3.0 km,2.0~6.0 km高

度层维持西南风(图5b)。近地面至2.3 km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试验区云层逐渐增厚,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,云中逆温层有利于液态水的维持,有利于发生飞机结冰。

3.2 卫星云图分析

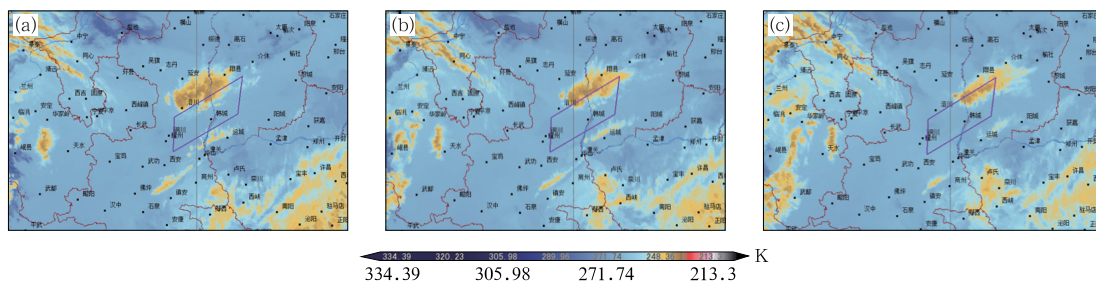
在自然结冰取证试飞云中盘旋飞行阶段(15:23:45—16:11:53和16:36:55—17:23:40),葵花8卫星红外云图显示(图6),陕南区云层为透光云系,云层在垂直方向上不连续,水平方向上云顶发展不均匀,14:00上层云的云顶温度最低约为 -18°C ,低层云的云顶温度约为 -11°C 。阎良机场东北试验区北侧有高空短波槽东移南下,但其强度逐渐减弱,云系维持较为均匀的状态,云顶温度在 $-14\sim-12^{\circ}\text{C}$ 。由红外云图及云顶温度分布可以判断,阎良机场东北试验区云顶温度和高度处于合适的区间,有利于开展自然结冰取证试飞。



注:蓝色、红色、绿色虚线分别为湿绝热线、干绝热线、等比湿线。

图5 2022年1月22日(a)08:00和(b)20:00 泾河站探空曲线

Fig. 5 Sounding at Jinghe Station at (a) 08:00 BT and (b) 20:00 BT 22 January 2022



注:紫色四边形为试飞区域。

图 6 2022 年 1 月 22 日(a)15:00,(b)16:00 和(c)17:00 葵花 8 卫星红外云图

Fig. 6 Infrared cloud image of Himawari 8 satellite at (a) 15:00 BT,

(b) 16:00 BT and (c) 17:00 BT 22 January 2022

3.3 雷达资料分析

1 月 22 日泾河站雷达回波显示(图 7),在 14:00 之前无回波,14:00 之后其东侧和南侧出现弱回波,回波强度为 10~20 dBz,15:30 之后,西安周

边亦有弱回波发展,回波强度为 5~15 dBz。李佰平等(2018)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。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

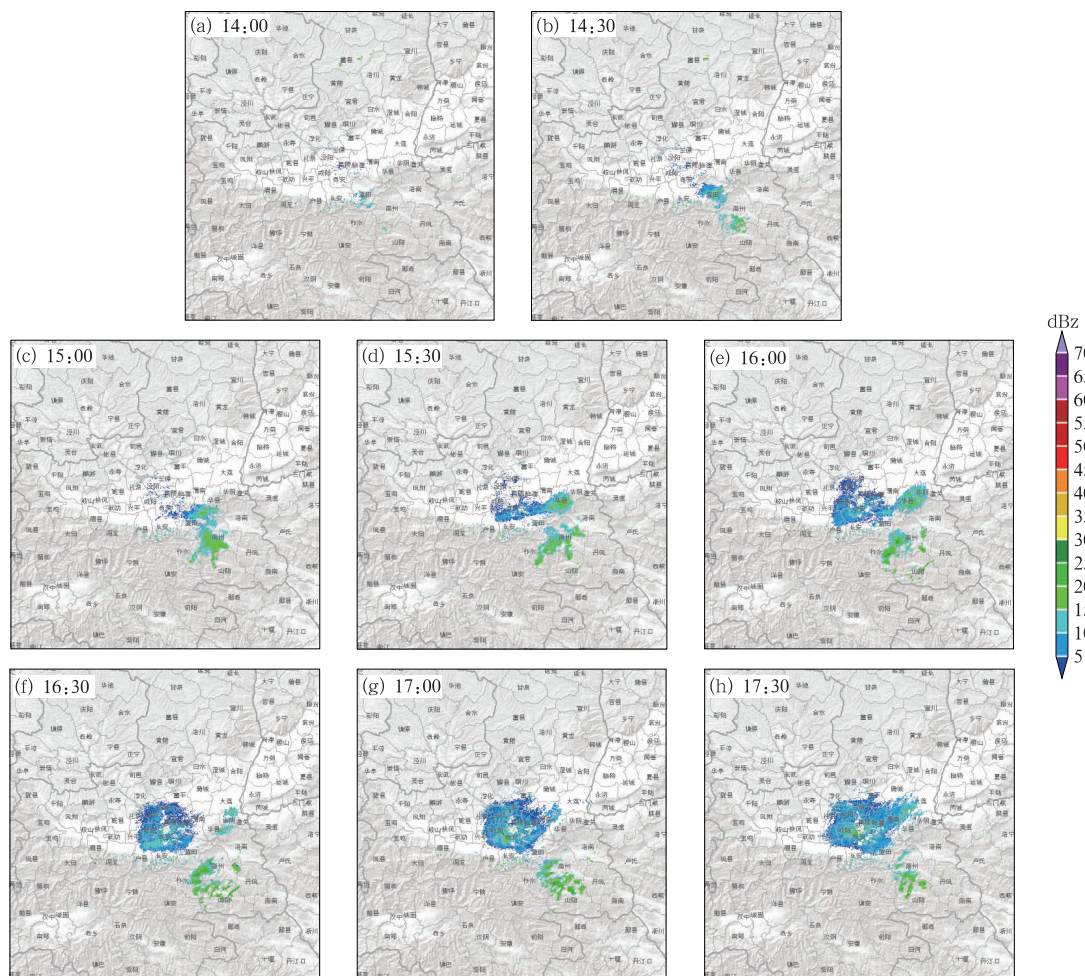


图 7 2022 年 1 月 22 日西安站雷达 1.5° 仰角基本反射率

Fig. 7 Basic reflectivity of 1.5° elevation at Xi'an Station on 22 January 2022

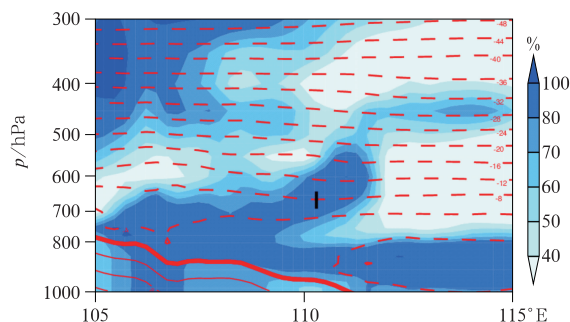
(姬雪帅等, 2022; 倪洪波等, 2022; 彭冲等, 2023)。在本次试飞过程中, 东北试验区始终无回波, 表明结冰云层大部分为过冷小水滴组成, 这与 15:00—17:00 的飞机探测结果相符。

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中地区 1 月 22 日 16:00—17:00 出现雨夹雪, 其后转为小雪, 均为微量降水, 有利于飞机结冰的发生。以安康站为代表的陕南地区, 自 11:00 就出现降水, 13:00 为小雨, 14:00—16:00 逐渐转为雨夹雪或雪, 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, 即关中及以东地区飞机结冰条件较好, 陕南地区飞机结冰条件较差。

3.4 ERA5 再分析资料提供的物理量特征分析

本节选用 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标准给出的温度范围是 $-30\sim 0^{\circ}\text{C}$ 。飞机观测和基本物理学观点认为过冷水通常存在于 $-25\sim 0^{\circ}\text{C}$ 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°C 的环境中, 过冷水则很少存在 (Bernstein et al, 2005); 在 $-3\sim 0^{\circ}\text{C}$, 由于飞行时的动力增温, 结冰的潜势也相对较低; 因此结冰主要发生在 $-15\sim -3^{\circ}\text{C}$ 的环境中 (Bernstein et al, 2005; 王磊等, 2014)。从 1 月 22 日 14:00 沿 35.0°N 的温度和相对湿度的剖面 (图 8) 可见, 试飞高度范围内大气温度在 $-9\sim -5^{\circ}\text{C}$, 飞机结冰发生在冷空气自东向西、自近地层向高层大气侵入的过程中, 最强冷平流位于 36.5°N 、 115°E 以东近地面层, 中心温度低于 -8°C 。低层冷空气迫使西侧暖湿空气抬升, 在 800~700 hPa 高度, $107.5^{\circ}\sim 117.0^{\circ}\text{E}$ 范围内形成深厚的逆温层, 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, 有利于过冷水的积聚。

云中过冷水含量是指示飞机结冰的重要参数之一。过冷水含量越大, 飞机结冰的可能性越大。另外, 结冰云层中过冷水所在的高度层和水平尺度, 对

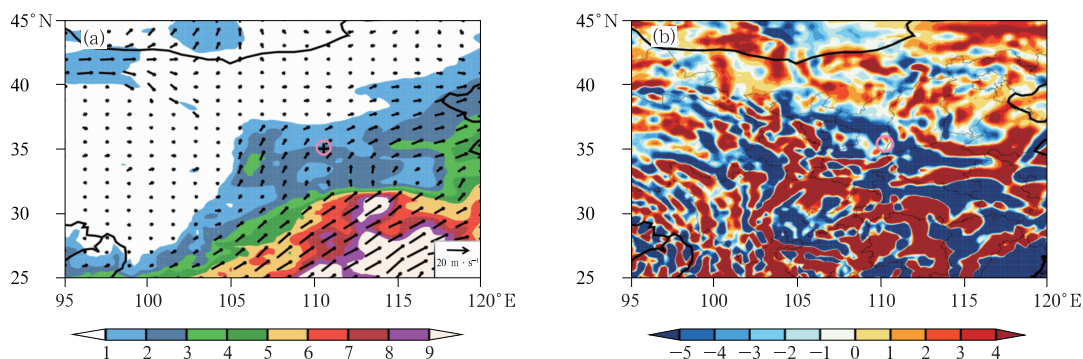


注: 黑色竖线表示参试飞机盘旋飞行高度及位置。

图 8 2022 年 1 月 22 日 14:00 温度 (红线, 单位: $^{\circ}\text{C}$) 和相对湿度 (填色) 沿 35.0°N 的垂直剖面
Fig. 8 Vertical profile of temperature (red line, unit: $^{\circ}\text{C}$) and relative humidity (colored) along 35.0°N at 14:00 BT 22 January 2022

自然结冰取证试飞也有重要的影响。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结冰, 或无法完成结冰云区待机 45 min 的试飞科目。此次自然结冰取证试飞表明: 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 22 日 14:00 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 $>10\%$ 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。从云中过冷水含量分布来看, 当日 14:00—17:00, 在 700 hPa 高度, 陕西中部到山西西南角 ($34^{\circ}\sim 35^{\circ}\text{N}$) 均有超过 $0.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的过冷水区域, 峰值超过 $0.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$; 18:00 后随着云中冰相过程的发展, 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, 该云层能较好地满足自然结冰取证试飞需求。

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的积聚程度 (朱乾根等, 2007)。图 9a 显示, 22 日 14:00 700 hPa 高度层, 试飞区域上游甘肃东部、南部和四川地区具有水汽通量的强中心, 水汽通量为 $7.96\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$, 在西南低空急流的作用下, 将水汽向试飞区域输送。图 9b 显示, 试飞区域附近为水汽汇, 水汽通量散度小于 $-2.73\times 10^{-7}\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$, 四周有水汽向该地区汇集, 有利于过



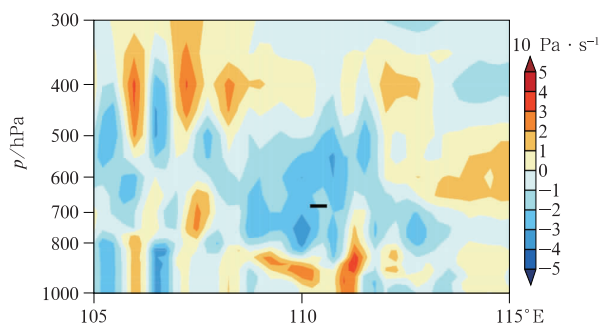
注:粉色圆圈表示自然结冰试飞区域。

图 9 2022 年 1 月 22 日 14:00 的 700 hPa(a)水汽通量(填色,单位: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$)和风场(风矢),
(b)水汽通量散度(单位: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$)

Fig. 9 (a) Water vapour flux (colored, unit: $\text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$) and wind field (wind vector), (b) water vapour flux divergence (colored, unit: $10^{-7} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) at 700 hPa at 14:00 BT 22 January 2022

冷水的积聚。甘南、四川为水汽源,水汽通量散度大于 $9.2 \times 10^{-7} \text{g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$,水汽自该地区向试飞区域附近辐散,给本次自然结冰取证试飞创造了理想的水汽条件。

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及结冰的产生(杨超,2017)。1月22日14:00自然结冰取证试飞位置附近大气垂直速度剖面表明(图10),云层中上部存在约 $-0.2 \text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$ 的弱上升气流,云层下部以弱下沉气流为主,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。



注:黑色横线表示参试飞机盘旋飞行的位置和高度。

图 10 2022 年 1 月 22 日 14:00 大气垂直速度沿 35.5°N 的垂直剖面

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

4 机载 DMT 探测数据分析

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 探测的气象参数时间历程曲线。在第 1 次云中盘旋试飞中,OAT 在 $-10.22 \sim -7.87^\circ\text{C}$,平均为 -9.20°C ;LWC 介于 $0.05 \sim 0.45 \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,平均为 $0.27 \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;MVD 为 $2.50 \sim 22.20 \mu\text{m}$,平均为 $15.82 \mu\text{m}$ 。在第 2 次云中盘旋飞行中,OAT 在 $-10.39 \sim -7.09^\circ\text{C}$,平均为 -9.52°C ;LWC 介于 $0.02 \sim 0.48 \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$,平均为 $0.23 \text{g} \cdot \text{m}^{-3}$;MVD 为 $8.0 \sim 24.5 \mu\text{m}$,平均为 $15.93 \mu\text{m}$ 。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 OAT、LWC 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。与北美和欧洲的飞机结冰观测结果相比(Bernstein et al, 2019),本次过程中的 LWC 和 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)给出的个例 MVD 多在 $20 \mu\text{m}$ 以上,本次过程的 MVD 以偏小为主,这可能与陕西地区受污染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,云滴半径减小(李占清, 2020)。

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,较山东地区过冷水区平均水平

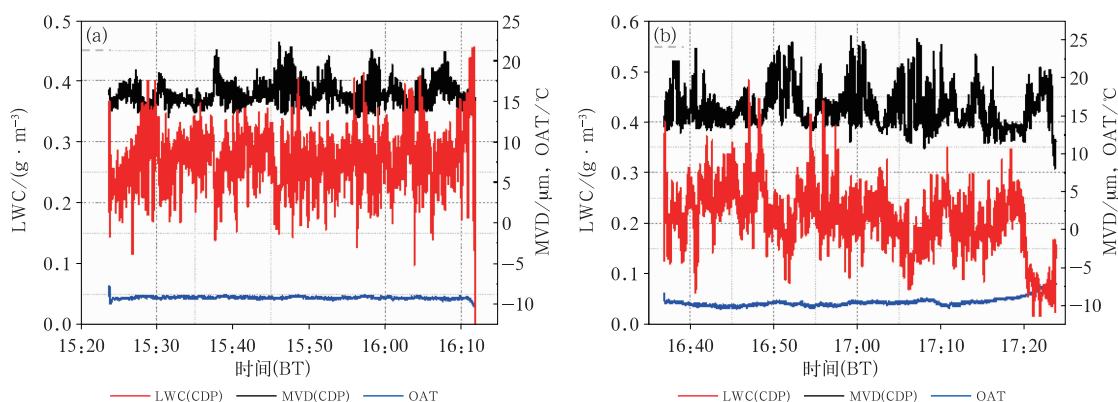


图 11 2022 年 1 月 22 日自然结冰取证试飞(a)第 1 次,(b)第 2 次
云中盘旋飞行机载气象探测参数时间演变

Fig. 11 Temporal curve of airborne meteorological sounding parameters for (a) the 1st and
(b) the 2nd cloud circling of the natural icing certification flight test on 22 January 2022

尺度更大(王俊,2003)。需要注意的是,与大气科学探测飞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 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。本次过程发生在 1 月,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,以降水性层状云为主,为遭遇型的飞机结冰事件。

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。云中的过冷却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 MVD 对结冰类型和强度的影响程度(Jack,1996)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,其危害更大。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。

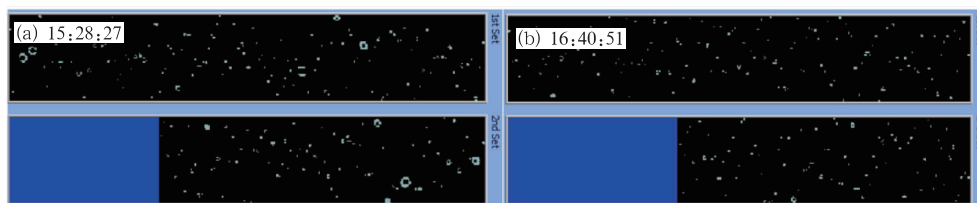


图 12 2022 年 1 月 22 日自然结冰取证试飞(a)第 1 次和
(b)第 2 次盘旋飞行云中典型粒子图像

Fig. 12 Images of typical particles in cloud for (a) the 1st and (b) the 2nd cloud circling
of the natural icing certification flight test on 22 January 2022

5 结论与讨论

2022 年 1—2 月期间,中国飞行试验研究院在国内首次按照 CCAR25 部附录 C 的要求,完成某国产大型客机连续最大(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 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。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重要的意义。本文的主要结论如下:

(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和 700 hPa 南支槽前西南低空急流,地面倒灌强冷空气造成中空出现深厚逆温层结。逆温层结有利于过冷水的积聚,同时一定程度上阻碍了动量和物质的交换,限制了降水的发展,为自然结冰取证试飞提供了有利的宏观条件。

(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 $-9\sim-5^{\circ}\text{C}$,相对湿度大于 80%,水汽通量散度小于 $-2.73\times 10^{-7}\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$,且上游地区水汽通量约 $7.96\text{ g}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{hPa}^{-1}\cdot\text{cm}^{-1}$ 。同时,云层中上部存在 $-0.2\text{ Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ 的弱上升气流,对过冷云滴的增长起到一定的促进作用。

(3)当天结冰云层的云顶高度平均约 4.5 km,云顶温度为 $-14\sim-12^{\circ}\text{C}$,云内无降水,雷达基本反射率 $<15\text{ dBz}$,参试飞机飞行高度主要在 10 700 ft (3261 m) 左右,主要位于非降水层状云的中上部。

(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 平均值为 $0.23\sim 0.27\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$,最大值

为 $0.48\text{ g}\cdot\text{m}^{-3}$;MVD 平均值为 $15.82\sim 15.93\text{ }\mu\text{m}$,最大值为 $25.45\text{ }\mu\text{m}$ 。

本文仅基于陕西地区 1 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,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展。

参考文献

- 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 H, 2023. Challenge of aircraft design under operational conditions of supercooled large water droplet icing [J]. Acta Aeronaut Astronaut Sin, 44(1):626973. (in Chinese).
- 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, 2023. Flight test technology of natural icing [J]. Acta Aeronaut Astronaut Sin, 44(17):028270. (in Chinese).
- 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, Hou T J, et al, 2014. Microphysical characteristics of spring precipitation cold stratiform clouds in Shanxi Province [J]. Trans Atmos Sci, 37(4):449-458 (in Chinese).
- 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. Gao Q, Guo X L, He H, et al, 2020. Numerical simulation study on the microphysical characteristics of stratiform clouds with embedded convections in Northern China based on aircraft measurements [J]. Chin J Atmos Sci, 44(5):899-912 (in Chinese).
- 姬雪帅,王丽娟,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):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 in Zhangjiakou based on multi-source observation data [J]. J Arid Meteor, 40(3):507-515 (in Chinese).
- 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 al, 2018. An improved aircraft natural icing potential algorithm [J]. Meteor Mon, 44(11):1377-1390 (in Chinese).
- 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. Natural icing flight test for Y7-200A aircraft [J]. Flight Dyn, 17(2):

- 64-69(in Chinese).
- 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 weather, climate and environment of China: an overview[J]. Trans Atmos Sci,43(1):76-92(in Chinese).
- 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, et al, 2016. Research on flight safety effect mechanism and protection for aircraft icing[J]. Flight Dyn,34(4):10-14(in Chinese).
- 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, Jiang T, et al,2004. Characteristics of the distribution of supercooled water content in stratiform clouds in Jilin Province and the potential of artificial rain augmentation[J]. J Meteor Environ,(4):29-30,36(in Chinese).
- 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 X, Liu X H, Yang B,2023. An optimized probabilistic prediction method for aircraft icing potential based on a convection-allowing model[J]. Chin J Atmos Sci,47(5):1525-1540(in Chinese).
- 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 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 Chinese).
- 彭冲,宋灿,蔡森,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, Cai M,2023. Comprehensive observation of the cloud macro- and microstructures of a rare aircraft icing case in Henan Province [J]. Chin J Atmos Sci,47(6):1757-1769(in Chinese).
- 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, Li P R, Yan S M, et al,2014. Characteristics of cloud microphysical structure based on aircraft data in 2008—2010 in Shanxi Province[J]. Meteor Sci Technol,42(4):682-689(in Chinese).
- 孙晶,蔡森,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, 2019. A case study of aircraft icing conditions in Anqing Area [J]. Meteor Mon,45(10):1341-1351(in Chinese).
- 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 W, et al,2023. Study on the characteristics and mechanism of aircraft ice accumulation under the background of upper-air cold vortex[J]. Meteor Mon,49(8):972-984(in Chinese).
- 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 in precipitable stratiform clouds[J]. J Shandong Meteor, 23(2):9-11(in Chinese).
- 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, et al,2014. Microphysical property analysis and detection of air icing clouds[J]. Meteor Mon,40(2):196-205(in Chinese).
- 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 ARJ21-700 new regional jet completes natural icing test flight [N]. Guangming Daily(in Chinese).
- 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]. Beijing:Tsinghua University Press:100-100(in Chinese).
- 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 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):68-74(in Chinese).
- 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, et al,2014. Numerical simulation of aircraft icing under supercooled large droplet conditions[J]. Comput Simulat,31(9):51-55(in Chinese).
- 谢坤,2009. 结冰翼型气动特性数值模拟[D]. 南京:南京航空航天大学. Xie K,2009. Numerical simulations of iced airfoils[D]. Nanjing:Nanjing University of Aeronautics and Astronautics(in Chinese).
- 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 forecast based on reanalysis data [D]. Deyang: Civil Aviation Flight University of China(in Chinese).
- 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 B, Liu F,2020. Cloud microphysical characteristic analysis of a cold front process and aircraft icing forecast[J]. Meteorol Sci Technol,48(1):81-87,96(in Chinese).
- 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, Lei H C, et al,2021. Airborne observations of microphysical characteristics of stratiform cloud over eastern side of Taihang Mountains[J]. Chin J Atmos Sci,45(1):88-106(in Chinese).
- 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. A case study of microphysical properties in aircraft icing environment[J]. Meteorol Sci Technol,46(1):170-177(in Chinese).
- 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 Press:159-173(in Chinese).
- 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 aviation safety[J]. Technol Wind,(14):194,197(in Chinese).
- 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,2011. CCAR 25-R4 Part 25 of the civil aviation regulations of China:

- airworthiness standards for transport aircraft[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China(in Chinese).
- 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 method of cloud vertical structure analysis using rawinsonde observation and its applied research[J]. Meteor Mon, 36(11): 50-58(in Chinese).
- 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: 100. Zhu Q G, Lin J R, Shou S W, 2007. Principles and Methods of Weather Science[M]. 4th ed. Beijing: China Meteorological Press: 100(in Chinese).
- 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 X L, 2014. Ice crystal habits, distribution and growth process in stratiform clouds with embedded convection in North China: aircraft measurements[J]. Acta Meteor Sin, 72(2): 366-389 (in Chinese).
- Bellucci M, Vernillo P, Auletta A, et al, 2007. SONACA icing test campaign on a 2D model at CIRA IWT[C]//2007 SAE International Conference on Aircraft & Engine Icing. Warrendale: Society of Automotive Engineers: 657-663.
- Bernstein B C, McDonough F, Politovich M K, et al, 2005. Current icing potential: algorithm description and comparison with aircraft observations[J]. J Appl Meteor Climatol, 44(7): 969-986.
- Bernstein B C, Rasmussen R M, McDonough F, et al, 2019. Keys to differentiating between small- and large-drop icing conditions in continental clouds[J]. J Appl Meteor Climatol, 58(9): 1931-1953.
- Gultepe I, Sharman R, Williams P D, et al, 2019. A review of high impact weather for aviation meteorology[J]. Pure Appl Geophys, 176(5): 1869-1921.
- Gurbachi H M, 2003. Ice-induced unsteady flowfield effects on airfoil performance[D]. Urbana: University of Illinois at Urbana-Champaign.
- Hacker P T, Dorsch R G, 1951. A summary of meteorological conditions associated with aircraft icing and a proposed method of selecting design criterions for ice-protection equipment[R]. Washington: NACA.
- Jack R K, 1996. Representative values of icing-related variables aloft in freezing rain and freezing drizzle[C]//34th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno: AIAA.
- Jones A R, Lewis W, 1949. Recommended values of meteorological factors to be considered in the design of aircraft ice-prevention equipment[R]. Washington: NACA.
- Lewis W, Bergun N R, 1952. A probability analysis of the meteorological factors conducive to aircraft icing in the United States [R]. Washington: NACA.
- Lewis W, Hoecker Jr W H, 1949. Observations of icing conditions encountered in flight during 1948[R]. Washington: NACA.
- Lewis W, Kline D B, Steinmetz C P, 1947. A further investigation of the meteorological conditions conducive to aircraft icing [R]. Washington: NACA.
- Reehorst A L, Addy Jr H E, Colantonio R O, 2010. Examination of icing induced loss of control and its mitigations[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Toronto: AIAA.
- Reehorst A L, Chung J, Potapczuk M, et al, 2000. Study of icing effects on performance and controllability of an accident aircraft [J]. J Aircraft, 37(2): 253-259.

(本文责编: 俞卫平)