

文章编号: 0258-1825(2024)03-0047-08

基于飞机探测的陕西及周边地区结冰云层 微物理特征分析

闫文辉*, 王泽林, 赵钰锦, 张莹, 倪洪波

(中国飞行试验研究院, 西安 710089)

摘要: 2021 年, 在陕西及周边地区利用国王 350 飞机开展了 21 次自然结冰资源探测试验, 通过对 CCP 机载探测数据的研究, 分析了结冰云层的微物理特征, 并对运输类飞机适航标准 CCAR-25 部附录 C 包线的符合性进行了评估。结果表明: 2021 年自然结冰资源探测试验期间, 在结冰云层内部, 90% 的液态水含量 (liquid water content, LWC) 小于 0.15 g/m^3 , 约一半的结冰遭遇样本 LWC 低于 0.07 g/m^3 ; 中值体积直径 (median volume diameter, MVD) 约 85% 的样本落在 $10 \sim 25 \mu\text{m}$ 范围内, LWC 大于 0.2 g/m^3 的样本主要出现在 MVD 为 $18 \sim 22 \mu\text{m}$ 之间; 环境温度 (outside air temperature, OAT) 最常出现在 $-6 \sim -4 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内, 占结冰总暴露距离的 47%。同时, 在 $-10 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的结冰遭遇样本中, 97.3% 的样本附录 C 包线符合性低于 40%, 在 $-20 \sim -10 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的结冰遭遇样本中, 91.7% 的样本附录 C 包线符合性低于 40%。虽然陕西及周边地区具备一定条件的结冰气象环境, 可满足试验机在结冰云层内进行盘旋飞行, 以保证获得足够的结冰飞行时间或结冰厚度, 但与 CCAR-25 部附录 C 规定的连续最大结冰包线还有差距。如果要覆盖全年的结冰气象条件, 则 CCAR-25 部附录 C 温度与海拔高度的包线还需要考虑夏季、秋季的数据做进一步优化。

关键词: 自然结冰; 过冷水; CCAR-25 部附录 C; 飞机探测; 云微物理特征

中图分类号: V217+.39 文献标识码: A doi: 10.7638/kqdlxxb-2023.0102

Analysis of microphysical characteristics of icing clouds in Shaanxi and surrounding areas based on aircraft probing

YAN Wenhui*, WANG Zelin, ZHAO Yujin, ZHANG Ying, NI Hongbo

(Chinese Flight Test Establishment, Xian 710089, China)

Abstract: In 2021, a series of 21 natural icing resource probing tests were conducted in the Shaanxi region and its adjacent areas using the King 350 aircraft. Through meticulous analysis of onboard Cloud Combination Probe (CCP) detection data, the intricate microphysical characteristics of icing cloud layers were meticulously investigated. Moreover, an in-depth evaluation of compliance with the airworthiness standard, CCAR-25 Appendix C envelope for transport aircraft, was undertaken. The findings reveal that throughout the course of the 2021 natural icing resource exploration tests, within the confines of the icing cloud layers, the liquid water content (LWC) remained below 0.15 g/m^3 for 90% of instances. Notably, nearly half of the observed icing encounters exhibited an LWC below 0.07 g/m^3 . Median volume diameter (MVD) data illustrated that approximately 85% of samples fell within the 10 to $25 \mu\text{m}$ range, whereas instances of LWC surpassing 0.2 g/m^3 were predominantly noted within the MVD values of 18 to $22 \mu\text{m}$. Furthermore, the outside air temperature (OAT) typically ranged between -6 to $-4 \text{ }^\circ\text{C}$, accounting for nearly half (47%) of the total icing exposure duration. Furthermore, the comprehensive analysis of icing encounters in the temperature range of -10

收稿日期: 2023-06-19; 修订日期: 2023-08-13; 录用日期: 2023-09-02; 网络出版时间: 2023-10-08

基金项目: 民用飞机专项科研项目

作者简介: 闫文辉* (1992—), 男, 宁夏固原人, 工程师, 研究方向: 航空高影响天气预报监测技术研究. E-mail: ywenhui0@163.com

引用格式: 闫文辉, 王泽林, 赵钰锦, 等. 基于飞机探测的陕西及周边地区结冰云层微物理特征分析[J]. 空气动力学学报, 2024, 42(3): 47–54.

YAN W H, WANG Z L, ZHAO Y J, et al. Analysis of microphysical characteristics of icing clouds in Shaanxi and surrounding areas based on aircraft probing[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2024, 42(3): 47–54(in Chinese). doi: 10.7638/kqdlxxb-2023.0102

to 0 °C demonstrated a notable compliance rate below 40% for 97.3% of the samples, based on the criteria outlined in Appendix C. Similarly, within the -20 to -10 °C range, 91.7% of the samples illustrated a compliance rate below 40% for Appendix C envelope. While the Shaanxi region and its neighboring environs offer conducive icing meteorological conditions suitable for executing hovering flight within icing cloud layers to satisfy stipulated icing flight duration or thickness requirements, a discernible discrepancy remains when compared to the continuous maximum icing envelope mandated by CCAR-25 Appendix C. To comprehensively encompass year-round icing meteorological conditions, including those during summer and autumn, a further refinement of CCAR-25 Appendix C's envelope with respect to temperature and altitude parameters is strongly advocated. This study not only provides intricate insights into the microphysical nuances of icing cloud layers but also emphasizes the imperative for augmenting the representation of these complexities within airworthiness regulations and aviation safety protocols.

Keywords: natural icing; supercooled water; CCAR-25 appendix C; aircraft probing; cloud microphysical characteristics

0 引言

飞机自然结冰是指机身表面某些部位聚积冰层的现象,主要是由过冷云滴或冻雨碰到机体后形成,该现象会增加机体的重量,降低机翼的空气动力学效率,影响飞机的操纵性和稳定性,从而威胁飞行安全^[1]。飞机自然结冰的强度取决于曝露物体的大小、形状、速度和攻角,以及云中的变量,如过冷液态水含量、云滴大小、飞行路径上的外界环境温度和曝露时间等。为了保证新型飞机能够承受一定程度的结冰,同时验证机载防除冰装置的适用性及各类仪表、传感器在结冰状态下的灵敏度,固定翼及旋翼运输类飞机自然结冰试飞是适航审定试飞中必须执行的高风险、高难度科目。

20 世纪 40 年代末,美国空军和国家航空咨询委员会(national advisory committee for aeronautics, NACA)在北美组织开展了飞机自然结冰外场观测试验,获取了大量过冷云机载探测数据^[2-6]。这些数据奠定了后来美国联邦航空管理局(federal aviation administration, FAA)运输类飞机自然结冰适航标准的基础,即美国《联邦法规》第 14 章 25 部及 29 部附录 C 包线^[7-8]。该包线利用过冷云层液态水含量(liquid water content, LWC)、平均有效直径(mean effective diameter, MED)和外界空气温度(outside air temperature, OAT)提供了连续最大(层状云)和间断最大(积状云)飞机结冰环境的基本描述。随着现代电子光学云层探测仪器的引入, MED 后来被云滴中值体积直径(median volume diameter, MVD)所取代^[9]。2008 年, Jeck^[10]利用北美、欧洲和北大西洋地区大约 28 000 nmi(51 856 km)的过冷云机载探测数据对附录 C 包线进行了改进和优化。

1994 年,一架美鹰航空 ATR-72 飞机因遭遇直径

远超附录 C 包线规定的过冷水滴而发生重度积冰,飞机失控并最终坠机^[11]。1995~2000 年,加拿大环境部(environment Canada, EC)和美国航空航天局(national aeronautics and space administration, NASA)针对过冷大水滴(supercooled large droplet, SLD)开展了多次飞机探测试验^[12],这些数据是后来 FAA^[13]建立过冷大水滴数据库、制定附录 O 包线的基础。除过冷水滴造成飞机积冰外,冰晶粒子也会引起发动机积冰,通常发生于热带对流系统云顶附近,近几年国外科学家对此也开展了联合观测研究^[14]。以上研究奠定了欧美发达国家在飞机自然结冰条件研究方面的领先地位。

由于我国针对飞机自然结冰条件开展的探测试验非常少,极度缺乏境内结冰云层数据,中国民用航空总局发布的运输类飞机自然结冰适航标准(China civil aviation regulations, CCAR)25 部附录 C 只能复制欧美适航规章^[15]。1997 年 Y7-200A 飞机就开始按照 CCAR-25 部附录 C 结冰气象条件进行自然结冰适航审定试飞^[16],但直到 2014 年 ARJ21-700 飞机适航取证试飞阶段也未取得显著性技术突破,不得不在 2014 年远赴北美五大湖地区完成该型号自然结冰试飞。近年,随着自然结冰天气预报技术和监测能力提升,国内自然结冰飞行试验能力逐渐提升。2018 年 12 月,中国飞行试验研究院(以下简称试飞院)在新疆地区组织实施了某型直升机自然结冰试飞,取得 3 次有效数据^[17]。2020 年 3 月,试飞院在陕西地区 12 天内飞行 3 个架次,成功完成国产某大型运输机自然结冰试飞^[18]。2022 年 1 月至 2 月,试飞院在陕西地区完成国产某大型客机自然结冰适航审定试飞。此外,我国人工影响天气部门也对飞机积冰进行了相关探测试验。王俊^[19]、刘健等^[20]、孙鸿娉等^[21]、袁敏

等^[22]、王磊等^[23]、孙晶等^[24]对我国不同地区降水性层状云系和非降水云系中过冷水滴的机载探测数据进行了分析,结果表明不同地区不同云层的过冷水滴含量和云滴尺寸在水平和垂直分布上差异较大。

为深入了解飞机自然结冰气象环境的微物理特征,筛选国内适宜开展 C919 大型客机自然结冰适航审定试飞的场址和时间窗口期,2021 年试飞院在陕西及周边地区开展了 21 架次自然结冰资源探测飞行试验,获取了丰富的结冰云层机载探测数据,成为研究飞机自然结冰气象环境的重要支撑。本文利用国王 350 飞机采集的 21 架次 CCP 云粒子综合探测数据,对陕西及周边地区的结冰气象环境微物理特征进行了分析,将数据样本与运输类飞机适航标准附录 C(CCAR-25 部附录 C)进行了比较,并对样本的符合性进行了评估。

1 飞行探测概况

2021 年 2 月至 12 月,试飞院在陕西及周边地区共组织开展 15 个飞行日、21 架次自然结冰资源探测飞行试验,累积获得 53 小时 6 分的机载探测数据,大致飞行试验区域如图 1 所示。15 个飞行日内,试验区

域的云系基本上以大范围的弱降水及非降水层状云为主,影响试验区的天气系统主要是高空短波槽、中低层切变线、地面西南倒槽及冷锋。试验期间部分时段遭遇了连续、稳定的结冰气象条件,结冰探测器、机翼前缘及机载设备前缘结冰实况如图 2 所示。

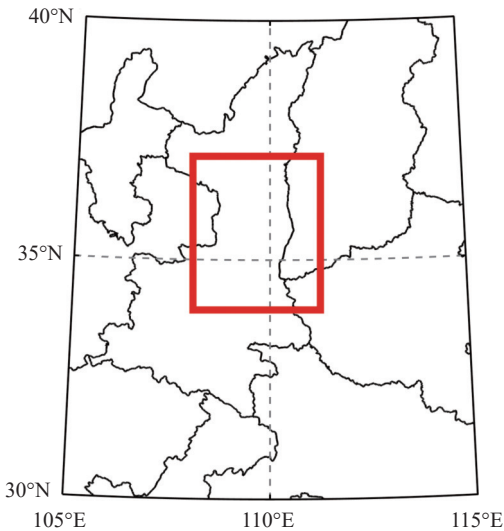


图 1 2021 年自然结冰资源探测飞行试验区域
Fig. 1 Experimental area for the 2021 natural icing resources probing flight

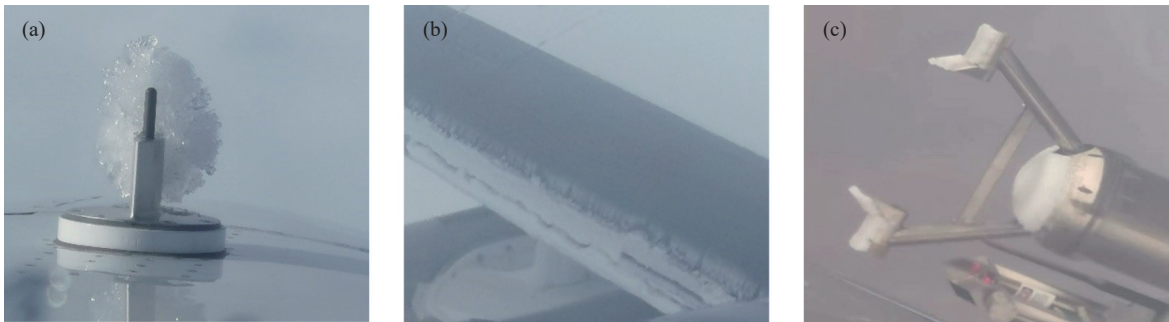


图 2 2021 年自然结冰资源探测试飞结冰实况
Fig. 2 Actual icing encounters during the 2021 natural icing resources probing flight

2 仪器及数据处理方法简介

2.1 仪器简介

参试飞机为国王 350,搭载了美国 DMT 公司生产的机载云粒子组合探头 (cloud combination probe, CCP),该探头由云粒子探头 (cloud droplet probe, CDP)、云粒子图像探头 (cloud imaging probe, CIP)、Hotwire 热线含水量仪及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 (number concentration, NC)、LWC、MVD、OAT 及空速等关键参数,航迹信息由飞机自带 GPS 定位设备记录。其中,CDP 主要用于测量过冷小云滴,测量范围为

2~50 μm; CIP 主要用于测量过冷大水滴、冰晶等大颗粒,测量范围为 25~1550 μm。设备详细功能和参数见表 1。为保证采集数据可靠,在飞行试验之前,对测量设备均进行了地面标定。

Lance 等^[25]研究表明,在混合相云和纯冰云中,冰晶粒子在接触到探测器时容易破碎造成计数和尺寸的测量误差,而 CDP 探头的激光采样区位于有防破碎尖端的机械臂之间,冰晶粒子破碎情况不显著。因此,本研究忽略了混合相云中由于冰晶粒子破碎造成的 CDP 观测误差。

2.2 数据预处理

本文使用的测量数据有:CDP 计算的液态水含量 LWC、中值体积直径 MVD、云粒子数浓度 NC,

表 1 机载云粒子组合探头 (CCP) 设备功能及参数
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	±20%
CIP	测量大云滴、冰雪晶	25~1 550 μm	25 μm	±20%
Hot-wire	测量液态水含量	0~3 g/m ³	—	±15%
AIMMS	测量温度、湿度、气压、海拔高度、空速等	温度: -20~50 ℃ 湿度: 0~100% RH	温度: 0.01 ℃ 湿度: 0.1% RH	温度: 0.1 ℃ 湿度: 2% RH

AIMMS 系统测量的外界空气温度 OAT。参考蔡兆鑫等^[26]及 Politovich 和 Bernstein^[27]判断飞机入云的方法,当 $NC > 10 \text{ cm}^{-3}$ 、 $LWC > 0.01 \text{ g/m}^3$ 且 $OAT < 0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,认为进入过冷云。同时,根据 CCAR-25 部附录 C 定义可知,所使用的 LWC、MVD、OAT 及海拔高度均是基于不同距离的平均值,为将机载 CCP 设备测量的秒分辨率数据与之相匹配,需要基于距离进行平均处理。参考 Jeck^[10]的方法,飞机在结冰条件下飞行直到离开结冰区域称为一个结冰遭遇 (icing encounter),其所经历的距离称为暴露距离 (exposure distance, ED)。将每个结冰遭遇期间与 CCAR-25 部附录 C 包线相关的参量均在暴露距离 ED 下进行平均处理,从而实现与附录 C 的直接对比分析。同时,当云间隙小于 30 s 时,掐掉间隙区间的数据,将其视为一次结冰遭遇。所有数据的采样时间分辨率均为 1 s,为降低数据波动,将原始数据进行 5 点平均处理。

按此方法将飞行探测数据处理后,共筛选出 137 段结冰遭遇样本,累积暴露距离为 1311.98 nmi (2429.6 km)。LWC 随 ED 的变化如图 3 所示,可见,

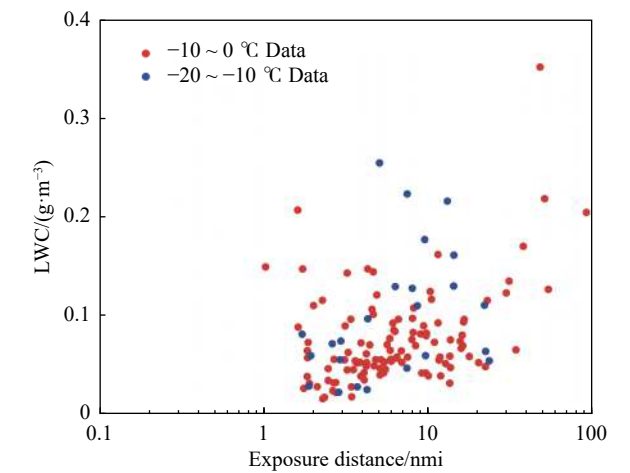


图 3 2021 年自然结冰资源探测试飞结冰遭遇期间的 LWC 随 ED 变化

Fig. 3 Evolution of supercooled Liquid Water Content (LWC) with respect to Exposure Distance (ED) during the encounter of natural icing resources in the 2021 flight test

最大 ED 为 93.26 nmi (172.70 km), 最大 LWC 为 0.35 g/m^3 , 89.1% 的 ED 集中在 $0 \sim 17.4 \text{ nmi}$ (37.04 km) 之间。这意味着,大量的 ED 低于 CCAR-25 部附录 C 规定的标准距离 (17.4 nmi), 需要经调整系数 F 进行修正才能与 CCAR-25 部附录 C 图 1 包线进行符合性分析。

3 自然结冰气象环境微物理特征分析

分析过冷云数据库、研究与飞机自然结冰相关的基本云参数 (LWC、MVD、OAT 和 ED) 不同数值出现的频率对于自然结冰适航审定试飞的方案设计、结冰气象条件预报与监测识别技术的提升具有非常大的意义。

3.1 液态水含量 LWC

图 4 给出了 2021 年自然结冰资源探测试飞期间过冷云内 LWC 分布情况,红色直方图表示 LWC 每隔 0.05 g/m^3 区间内的累积暴露距离,蓝色曲线为累积发生频率 (对应图中右侧纵坐标)。可见,在结冰云层中, LWC 出现的峰值区间分布在 $0.05 \sim 0.1 \text{ g/m}^3$,

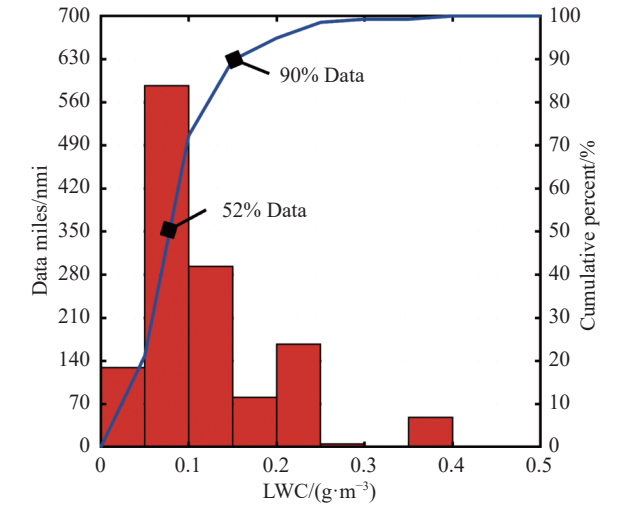


图 4 2021 年自然结冰资源探测试飞过冷云中 LWC 频率

Fig. 4 Frequency distribution of Liquid Water Content (LWC) in the supercooled cloud from 2021 natural icing resources probing flight

占总暴露距离的 67.1%，90% 的时段内 LWC 小于 0.15 g/m^3 ，52% 的时段内 LWC 低于 0.07 g/m^3 ，这意味着在飞行过程中有接近一半的时段 LWC 低于 0.07 g/m^3 。暴露距离 ED 被选为 LWC 发生频率的衡量标准的主要原因是这样能强调 LWC 极端值长期遭遇的统计重要性，并且能表示给定数量的结冰遭遇是代表 5 km 还是 500 km 的飞行。

3.2 中值体积直径 MVD

Jeck^[10] 统计表明，大多数云滴分布在 $5\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ 左右，很少有直径超过 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的云滴，除非有足够强大的上升气流来保持这些大液滴悬浮。在飞机结冰应用中，习惯使用 MVD 来表示云滴谱分布，MVD 是当时恰好存在的云滴直径大小范围内 LWC 分布的中点。对于直径小于 $100\text{ }\mu\text{m}$ 的云滴来说，可以获得与使用完整云滴谱相同的结冰效果。图 5 给出了在 $0\sim 40\text{ }\mu\text{m}$ 范围内观察到的 MVD 发生频率，频率以 MVD 中每个增量区间的累积暴露海里数表示，蓝色实线为累积发生频率(对应图中右侧纵坐标)。可见，过冷云中大约 85% 的 MVD 落在 $10\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 区间内，只有约 14% 的 MVD 小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。这意味着，如果在过冷云中开展自然结冰试飞期间未测量液滴大小，则可以有把握地假设 MVD 在 $10\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 范围内，其置信度为 85%。另外，大约 51% 的 MVD 小于 $15\text{ }\mu\text{m}$ ，如果在自然结冰飞行试验中需要 $15\text{ }\mu\text{m}$ 或更大直径的过冷云滴，使其满足 CCAR-25 部附录 C 所涵盖的范围，则大约 50% 的结冰条件下的飞行时间将被浪费。

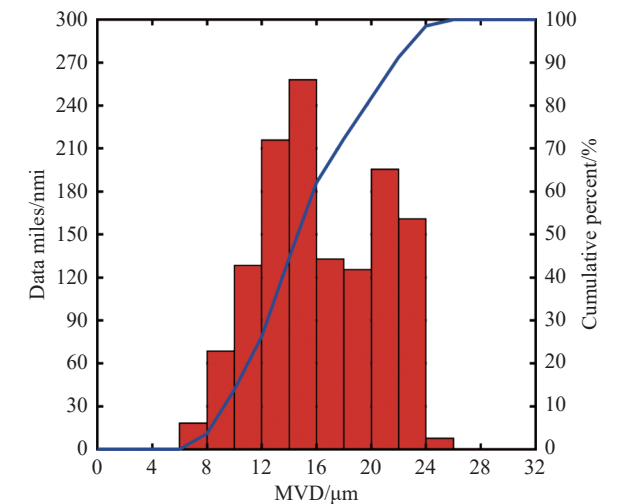


图 5 2021 年自然结冰资源探测试飞过冷云中 MVD 频率
Fig. 5 Frequency distribution of Median Volume Diameter (MVD) in the supercooled cloud from 2021 natural icing resources probing flight

图 6 给出了过冷云中 LWC 随 MVD 变化的情况。可见，大于 0.2 g/m^3 的 LWC 出现在 MVD 处于

$18\sim 22\text{ }\mu\text{m}$ 之间时，并且 LWC 在 MVD 的任一侧都急剧下降。这意味着，如果在飞行过程中不测量液滴大小，可以确信最大的 LWC 只会出现在 $18\sim 22\text{ }\mu\text{m}$ 之间的 MVD 中，LWC 大于 0.1 g/m^3 的情况不会出现在 MVD 小于 $9\text{ }\mu\text{m}$ 时。LWC 及 MVD 与 OAT 的相关性不太明显，这可能是由于结冰探测试验人为采用 $-5\text{ }^\circ\text{C}$ 附近的海拔高度飞行，未能真实反映自然界中过冷水滴存在的 OAT 分布特征。

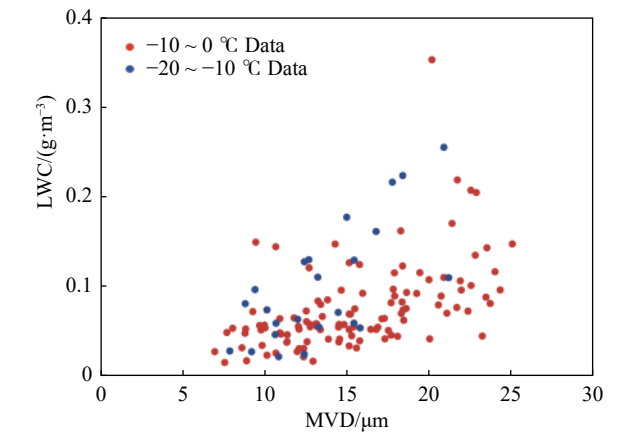


图 6 2021 年自然结冰资源探测试飞过冷云中 LWC 随 MVD 变化
Fig. 6 Variation of Liquid Water Content (LWC) with respect to Median Volume Diameter (MVD) in the supercooled cloud from 2021 natural icing resources probing flight

3.3 外界空气温度 OAT

图 7 给出了 2021 年自然结冰资源探测试飞期间遭遇结冰的 OAT 发生频率，这些样本是真实的空气温度，称为静态或外界空气温度，而不是考虑飞机动力增温之后的大气总温。可见，数据库中记录的

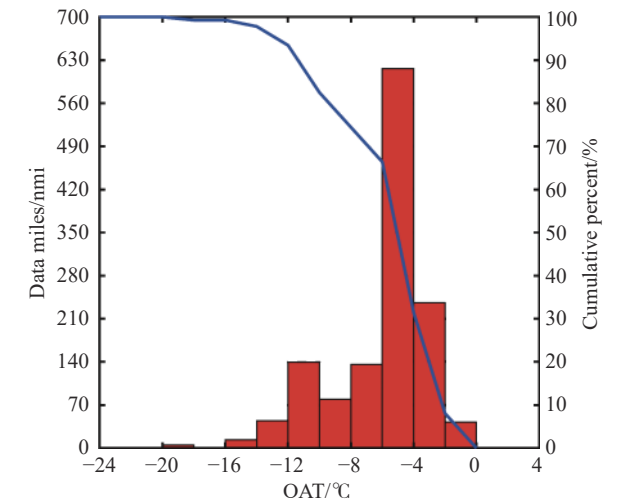


图 7 2021 年自然结冰资源探测试飞过冷云中 OAT 频率
Fig. 7 Frequency Distribution of Outside Air Temperature (OAT) in the supercooled cloud from 2021 natural icing resources probing flight

OAT 最常出现在 $-6 \sim -4$ $^{\circ}\text{C}$ 的范围内, 约占总暴露距离的 47%, 最低温度为 $-20 \sim -18$ $^{\circ}\text{C}$ 。这一结果的部分原因是, 在自然结冰资源探测试飞期间, 普遍采用 -5 $^{\circ}\text{C}$ 的海拔高度飞行。同时, 只有大约 10% 的结冰遭遇出现在 OAT 高于 -3 $^{\circ}\text{C}$ 环境中, 和 17.5% 的结冰遭遇出现在 OAT 低于 -10 $^{\circ}\text{C}$ 环境中。

4 CCAR-25 部附录 C 包线符合性分析

运输类飞机适航标准 CCAR-25 部附录 C^[15] 规定了连续最大(层云)结冰条件及间断最大(积云)结冰条件由 LWC、MED 和 OAT 共同决定, 代表了自然界中飞行可能遭遇到的最严酷结冰条件。对结冰状态下飞机性能和操纵品质的符合性验证试飞应尽可能在接近最大结冰条件下进行。2021 年在陕西及周边地区开展的自然结冰资源探测试飞侧重于层状云探测, 即将筛选的结冰遭遇样本与连续最大(层云)结冰条件进行对比分析较为合理。

CCAR-25 部附录 C 图 1 曲线规定的连续最大结冰条件是指定标准距离 (17.4 nmi) 水平范围内、环境温度间隔 10 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, LWC、MED 和 OAT 三个变量的相互关系, 对应本文中图 8(a) 彩色曲线所示, MVD 范围为 15~40 μm , LWC 范围为 0.04~0.8 g/m^3 。用气压高度和环境温度表示的结冰限制包线如图 8(b) 红色曲线所示, 对应 CCAR-25 部附录 C 图 2 包线, 海拔高度最高达 6.7 km, 环境温度最低达 -30 $^{\circ}\text{C}$ 。水平范围 17.4 nmi 以外的连续最大结冰条件下 LWC 用图 8(a) 彩色曲线的 LWC 乘以 CCAR-25 部附录 C 图 3 的调整系数 F 来确定。连续最大结冰条件所遭遇的最小水平距离为 5 nmi (9.26 km), 对应 LWC 调整系数为 1.34; 最大水平距离为 310 nmi (574.12 km), 对应 LWC 调整系数为 0.2。

2021 年在陕西及周边地区遭遇到的 137 段结冰样本分布在 1~100 nmi 范围内, 不能同时与 17.4 nmi 下的图 8(a) 包线进行比较。因此, 在图 8(a) 曲线保持不变的情况下, 利用 CCAR-25 附录 C 提供的调整系数 F 对不同暴露距离下的 LWC 平均值进行反向修正, 即用结冰遭遇时段内 LWC 平均值除以对应暴露距离下的调整系数 F 即可完成转化。

试验期间获取的结冰遭遇样本与 CCAR-25 部附录 C 图 1 的对比分析如图 8(a) 所示。定性分析可见, 陕西及周边地区具备一定的自然结冰试飞气象资源, 但远低于 CCAR-25 部附录 C 连续最大结冰包线给出的极限值。不过, LWC、MVD 及 OAT 条件能够满足试验机在结冰云层内进行盘旋飞行, 以保证获得足够

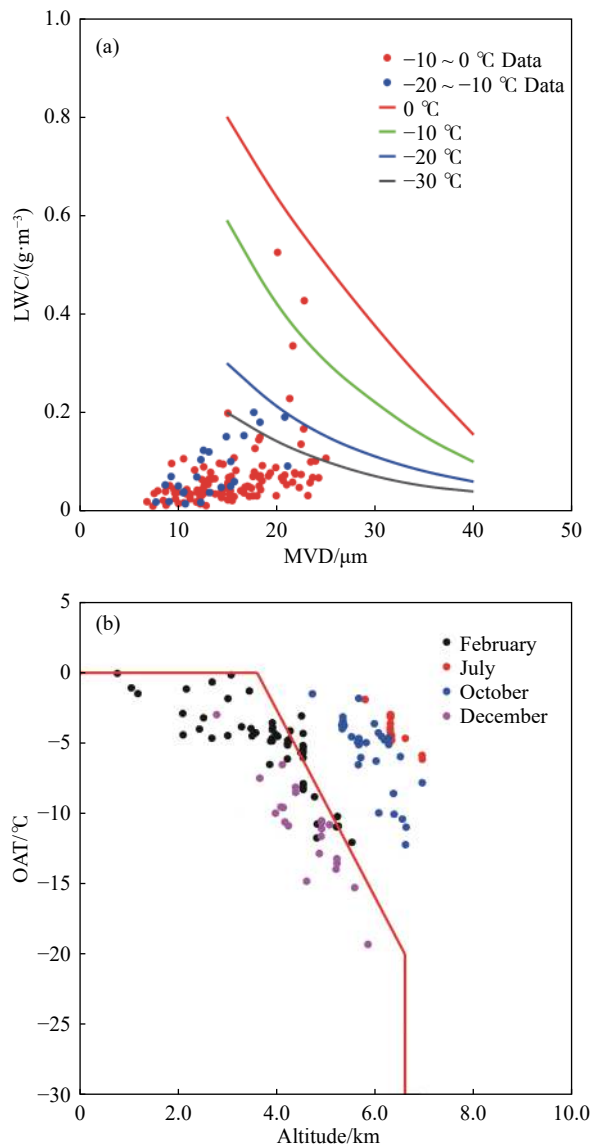


图 8 2021 年自然结冰资源探测试飞结冰遭遇数据与 CCAR-25 部附录 C 符合性分析

Fig. 8 Compliance analysis of encountered icing data from 2021 natural icing resources probing flight with CCAR-25 Appendix C

的结冰飞行时间或结冰厚度。定量分析可见: $-10 \sim 0$ $^{\circ}\text{C}$ 范围内获取的结冰遭遇样本, 97.3% 的 LWC 低于 0 $^{\circ}\text{C}$ 附录 C 包线值的 40%; $-20 \sim -10$ $^{\circ}\text{C}$ 范围内获取的结冰遭遇样本, 91.7% 的 LWC 低于 -10 $^{\circ}\text{C}$ 附录 C 包线值的 40%。换言之, 试验期间获取的结冰遭遇样本的附录 C 符合性基本上低于 40%。从图 8(b) 中可以看出, 有大量的结冰遭遇发生在 5~7 km 的高度范围内, 且 OAT 分布在 $-10 \sim 0$ $^{\circ}\text{C}$ 之间, 原因主要是结冰资源探测试飞收集了夏季、秋季 (7 月、10 月) 的数据集。同时, 在 4 km 以下的海拔高度上从未观察到低于 -10 $^{\circ}\text{C}$ 的 OAT 样本。所以, 如果层状云的温度与高度包线要代表全年的结冰气象条件, 那么 CCAR-25 部附录 C 温度与海拔高度包线需要进一步

优化。

5 结论

利用机载 CCP 探测资料,研究了 2021 年自然结冰资源探测试飞期间获取的 21 架次结冰云系微观特征,并分析了试飞过程的 CCAR-25 部附录 C 包线符合性。主要结论如下:

1) 基于暴露距离 ED 对云层探测设备获取的秒数据进行平均处理,能很好地呈现结冰云层气象条件基本特征,并能用于 CCAR-25 部附录 C 包线符合性分析。

2) 2021 年自然结冰资源探测试飞期间,90% 的 LWC 小于 0.15 g/m^3 ,近一半的 LWC 低于 0.07 g/m^3 ;大约 85% 的 MVD 落在 $10 \sim 25 \mu\text{m}$ 区间内;OAT 最常出现在 $-6 \sim -4 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,约占总暴露距离的 47%。

3) 2021 年自然结冰遭遇期间, $-10 \sim 0 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,97.3% 的 LWC 附录 C 符合性低于 40%; $-20 \sim -10 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内,91.7% 的附录 C 符合性低于 40%。同时,如果要考虑夏季、秋季结冰气象条件,附录 C 温度与海拔高度包线需要进一步优化。

本文介绍的研究成果可用于指导自然结冰飞行试验及冰风洞试验,也可用于云降水数值模式的改进。需要注意的是,采用暴露距离 ED 对结冰探测数据进行平均处理,并不是严格按照附录 C 规定的用水平距离(horizontal extent, HE)处理,不可能合理地将所有样本转换为等效的 17.4 nmi 平均值。同时,CCAR-25 部附录 C 结冰气象条件是基于国外结冰云层探测数据形成的,并不能代表我国境内结冰条件特征,后续需要开展更多的结冰探测研究,以获取大量的有效结冰数据对附录 C 包线进行修订。

参 考 文 献:

- [1] 王秀春,顾莹,李程.航空气象[M].北京:清华大学出版社,2014:164-170.
WANG X C, GU Y, LI C. Aviation meteorology[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2014: 164-170(in Chinese).
- [2] LEWIS W, KLINE D B, STEINMETZ C P. A further investigation of the meteorological conditions conducive to aircraft icing, NACA-TN-1424[R]. NACA Technical Reports, 1947.
- [3] JONES A R, LEWIS W. Recommended values of meteorological factors to be considered in the design of aircraft ice-prevention equipment, NACA-TN-1855[R]. NACA Technical Reports, 1949.
- [4] LEWIS W, HOECKER W H. Observations of icing conditions encountered in flight during 1948, NACA-TN-1904[R]. NACA Technical Reports, 1949.
- [5] HACKER P, DORSCH R. A summary of meteorological conditions associated with aircraft icing and a proposed method of selecting design criteria for ice-protection equipment, NACA-TN-2569[R]. NACA Technical Reports, 1951.
- [6] LEWIS W, BERGRUN N R. A probability analysis of the meteorological factors conducive to aircraft icing in the United States, NACA-TN-2738[R]. NACA Technical Reports, 1952.
- [7] FAA. Title 14 code of federal regulations, aeronautics and space, part 25 airworthiness standards: Transport category airplanes, appendix C[S]. Washington D. C.: National Archives and Records Administration, 2021.
- [8] FAA. Title 14 code of federal regulations, aeronautics and space, part 29 airworthiness standards: Transport category rotorcraft, appendix C[S]. Washington D. C.: National Archives and Records Administration, 2021.
- [9] JECK R. Icing design envelopes (14 CFR parts 25 and 29, appendix C) converted to a distance-based format[R]. FAA Technical Reports, 2002.
- [10] JECK R. Advances in the characterization of supercooled clouds for aircraft icing applications[R]. FAA Technical Reports, 2008.
- [11] THOMPSON G, POLITOVICH M K, RASMUSSEN R M. A numerical weather model's ability to predict characteristics of aircraft icing environments[J]. Weather and Forecasting, 2017, 32(1): 207-221.
doi: 10.1175/waf-d-16-0125.1
- [12] COBER S G, ISAAC G A. Characterization of aircraft icing environments with supercooled large drops for application to commercial aircraft certification[J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2012, 51(2): 265-284.
doi: 10.1175/jamc-d-11-022.1
- [13] FAA. Airplane and engine certification requirements in supercooled large drop, mixed phase, and ice crystal icing conditions, 2014-25789[S]. Federal Register, 2014.
- [14] HAGGERTY J, DEFER E, DE LAAT A, et al. Detecting clouds associated with jet engine ice crystal icing[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2019, 100(1): 31-40.
doi: 10.1175/bams-d-17-0252.1
- [15] 中华人民共和国交通运输部. 中国民用航空规章第 25 部: 运输类飞机适航标准附录 C(CCAR-25 部附录 C)[S]. 北京: 中国民用航空总局, 2011.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Civil aviation regulations of China part 25: Appendix C to the standard for testing transport aircraft (appendix C to CCAR part 25) [S]. BeiJing: China Civil Aviation Administration, 2011 (in Chinese).
- [16] 李勤红, 乔建军, 陈增江. Y7-200A 飞机自然结冰飞行试验[J]. 飞行力学, 1999, 17(2): 64-69.
LI Q H, QIAO J J, CHEN Z J. Natural icing flight test for Y7-200A aircraft[J]. Flight Dynamics, 1999, 17(2): 64-69(in Chinese).
doi: 10.3969/j.issn.1002-0853.1999.02.012
- [17] 王泽林, 倪洪波, 裴昌春. 我国干旱地区一次直升机自然结冰试飞天气个案分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2020, 14(2): 68-74
WANG Z L, NI H B, PEI C C. A case study of helicopter natural icing flight test in arid areas of China[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2020, 14(2): 68-74(in Chinese).
doi: 10.11898/1001-7313.20220504
- [18] 倪洪波, 李佰平, 闫文辉, 等. 飞机试飞的自然结冰潜势预测及检验评估[J]. 气象科技, 2022, 50(2): 254-266
NI H B, LI B P, YAN W H, et al. Aircraft natural icing potential forecast and its evaluation in flight test[J]. Meteorological Science and Technology, 2022, 50(2): 254-266(in Chinese).
doi: 10.19517/j.1671-6345.2021024
- [19] 王俊. 降水性层状云系中过冷水的分布特征[J]. 山东气象, 2003, 23(2): 9-11
WANG J. The characteristics of supercooled water in precipitable

- stratiform clouds[J]. Journal of Shandong Meteorology, 2003, 23(2): 9–11(in Chinese).
doi: [10.3969/j.issn.1005-0582.2003.02.005](https://doi.org/10.3969/j.issn.1005-0582.2003.02.005)
- [20] 刘健, 于勇, 蒋彤, 等. 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, 2004, 20(4): 29–30, 36.
LIU J, YU Y, JIANG T, et al. Study on distribution characteristics of supercooled water content in stratified clouds and potential of artificial precipitation enhancement in Jilin Province[J]. Liaoning Meteorological Quarterly, 2004, 20(4): 29–30, 36(in Chinese).
doi: [10.3969/j.issn.1673-503X.2004.04.014](https://doi.org/10.3969/j.issn.1673-503X.2004.04.014)
- [21] 孙鸿娉, 李培仁, 闫世明, 等. 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, 2014, 42(4): 682–689.
SUN H P, LI P R, YAN S M, et al. Characteristics of cloud microphysical structure based on aircraft data in 2008–2010 in Shanxi Province[J]. Meteorological Science and Technology, 2014, 42(4): 682–689(in Chinese).
doi: [10.3969/j.issn.1671-6345.2014.04.027](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-6345.2014.04.027)
- [22] 袁敏, 黄敏松, 段炼. 一次飞机积冰环境中的云微物理特征[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 170–177.
YUAN M, HUANG M S, DUAN L. A case study of microphysical properties in aircraft icing environment[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(1): 170–177(in Chinese).
doi: [10.19517/j.1671-6345.20170069](https://doi.org/10.19517/j.1671-6345.20170069)
- [23] 王磊, 李成才, 赵增亮, 等. 飞机积冰云微物理特征分析及监测技术研究[J]. 气象, 2014, 40(2): 196–205.
WANG L, LI C C, ZHAO Z L, et al. Microphysical property analysis and detection of air icing clouds[J]. Meteorological Monthly, 2014, 40(2): 196–205(in Chinese).
doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2014.02.007](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2014.02.007)
- [24] 孙晶, 蔡淼, 王飞, 等. 安庆地区一次飞机积冰的气象条件分析[J]. 气象, 2019, 45(10): 1341–1351.
SUN J, CAI M, WANG F, et al. A case study of aircraft icing conditions in Anqing area[J]. Meteorological Monthly, 2019, 45(10): 1341–1351(in Chinese).
doi: [10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.001](https://doi.org/10.7519/j.issn.1000-0526.2019.10.001)
- [25] LANCE S, BROCK C A, ROGERS D, et al. Water droplet calibration of the Cloud Droplet Probe (CDP) and in-flight performance in liquid, ice and mixed-phase clouds during ARCPAC[J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2010, 3(6): 1683–1706.
doi: [10.5194/amt-3-1683-2010](https://doi.org/10.5194/amt-3-1683-2010)
- [26] 蔡兆鑫, 蔡淼, 李培仁, 等. 大陆性积云不同发展阶段宏观和微观物理特性的飞机观测研究[J]. 大气科学, 2019, 43(6): 1191–1203.
CAI Z X, CAI M, LI P R, et al. Aircraft observation research on macro and microphysics characteristics of continental cumulus cloud at different development stages[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(6): 1191–1203(in Chinese).
doi: [10.3878/j.issn.1006-9895.1903.1911](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9895.1903.1911)
- [27] POLITOVICH M K, BERNSTEIN T A O. Aircraft icing conditions in northeast Colorado[J]. Journal of Applied Meteorology, 2002, 41(2): 118–132.
doi: [10.1175/1520-0450\(2002\)041<0118:aicinc>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2002)041<0118:aicinc>2.0.co;2)

(本文责编: 周奇杰)