

# 基于 CFD 的系留气球表面结冰研究

蒋鹏程<sup>1,2</sup>, 余莉<sup>1</sup>

(1.南京航空航天大学, 南京 211106; 2.中国特种飞行器研究所, 湖北 荆门 448035)

**摘要:** **目的** 预测不同环境条件下系留气球的结冰部位与结冰量, 为系留气球的安全运行提供参考依据。**方法** 利用气候试验室对柔性材料制成的试验件进行结冰研究, 并与金属表面结冰进行对比分析, 明确柔性材料的结冰机理。采用数值模拟的方法, 对某型系留气球进行多参数多状态结冰研究, 同时开展系留气球结冰后的稳定性分析。**结果** 保持一定刚度的柔性材料和金属材料结冰情况基本一致, 结冰机理相同。计算得出了通常结冰、冻雾和冻雨条件下, 各俯仰角下系留气球表面的结冰分布情况。通常结冰条件下, 结冰主要发生在尾翼前缘, 结冰量随风速和俯仰角增大而增大; 在冻雾和冻雨条件下, 结冰部位则出现在囊体和尾翼, 结冰量随风速和俯仰角呈 V 形变化。**结论** 依据计算结果开展稳定性分析得出, 系留气球在剩余浮力正常的情况下具备一定的“结冰容限”, 但长时间处于恶劣天气时仍需开展冰雪应对措施。

**关键词:** 系留气球; 结冰; 气候室试验; 数值模拟; 稳定性分析; 结冰容限

中图分类号: V273

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)07-0096-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.07.013

## Research on Surface Icing of Tethered Balloon Based on CFD

JIANG Pengcheng<sup>1,2</sup>, YU Li<sup>1</sup>

(1. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;

2. China Special Vehicle Research Institute, Hubei Jingmen, 448035, China)

**ABSTRACT:** The work aims to predict the icing parts and icing amount of tethered balloons under different environmental conditions, so as to provide a reference basis for safe operation of tethered balloons. The icing research was carried out on the test pieces made of flexible materials in the climate laboratory. The icing was compared and analyzed with that on metal surfaces, so as to clarify the icing mechanism of flexible materials. Numerical simulation was used to study the multi-parameter and multi-state icing of a certain type of tethered balloons. At the same time, the stability analysis of the tethered balloon after icing was carried out. The results showed that the icing situations of flexible and metallic materials with a certain degree of rigidity were basically the same, and the icing mechanisms were the same. The distribution of icing on the surface of the tethered balloon at each pitch angle under normal icing, freezing fog and freezing rain conditions was calculated. Under normal icing conditions, icing mainly occurred at the leading edge of the tail, and the amount of icing increased with the wind speed and pitch angle; while under freezing fog and freezing rain conditions, icing occurred at the capsule and the tail, and the amount of icing varied in a V-shape with the wind speed and pitch angle. According to the stability analysis based on the calculation results, the

收稿日期: 2024-03-02; 修订日期: 2024-04-11

Received: 2024-03-02; Revised: 2024-04-11

基金项目: 航空联合基金 (6141B05040203)

Fund: Aviation Joint Foundation (6141B05040203)

引文格式: 蒋鹏程, 余莉. 基于 CFD 的系留气球表面结冰研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(7): 96-102.

JIANG Pengcheng, YU Li. Research on Surface Icing of Tethered Balloon Based on CFD[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(7): 96-102.

tethered balloon has a certain "icing tolerance" under normal remaining buoyancy, but it still needs to carry out ice and snow countermeasures when it is under severe weather for a long time.

**KEY WORDS:** tethered balloon; icing; climate laboratory test; numerical simulation; stability analysis; icing tolerance

系留气球是一种利用轻于空气 (LTA) 气体的浮力获得升力, 并可长时间留空的飞行器<sup>[1-2]</sup>。其主要由 4 个部分组成: 球体、系留缆绳、锚泊站和有效载荷, 如图 1 所示。其中球体一般采用柔性织物材料, 由内、外压差保持气动外形<sup>[3]</sup>。同时, 其体积尺寸通常较大, 长时间、全天候的特点使其易受结冰的影响。结冰不仅增加了囊体质量, 且破坏了系留气球的气动外形, 导致其升力下降, 飞行阻力升高, 稳定性能下降, 若此时遭遇强风, 极易造成系留气球失稳, 发生灾难事故<sup>[4-6]</sup>。目前, 绝大部分结冰研究主要是基于飞机、风电桨叶等硬结构表面开展的, 鲜有织物材料的结冰研究, 因此有必要对系留气球开展系统性结冰研究。

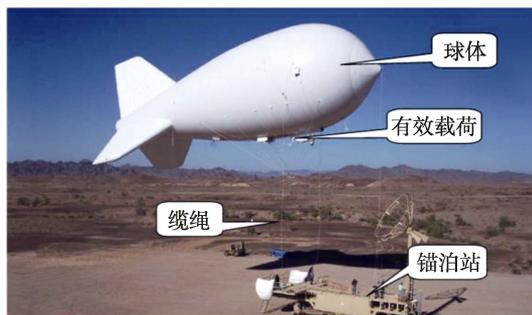


图 1 系留气球示意图

Fig.1 Schematic diagram of tethered balloon

文中针对系留气球的结冰问题, 采用数值模拟的方法, 首次对系留气球进行多参数多状态结冰研究, 确定了结冰部位和结冰量。同时, 开展了系留气球结冰后的稳定性分析, 结果表明, 系留气球在剩余浮力正常的情况下具备一定的“结冰容限”, 对于中型系留气球防冰设计具有参考价值, 对于保障系留气球安全运行具有重要意义。

## 1 国内外现状

TCOM 公司于 1982 年基于部署在韩国的系留气球进行了低温环境下系留气球的运行研究, 并通过一系列的的系统性试验取得了重要成果<sup>[7-8]</sup>。美国陆军 Cold Regions Research & Engineering Laboratory 开展了系留气球冰雪问题的研究, 着重评估了憎水涂层用于对抗冰雪的效能<sup>[9]</sup>, 如图 2 所示。Pacific-Sierra Research Corporation 于 1989 年也开展了系留气球低温环境研究, 为美国空军和海岸警卫队系留气球的安全运行提供了技术支持。NACA 在 1958 年使用 ZPG-2

飞艇开展了飞行测试, 对其在结冰条件下的飞行影响进行了评估分析。飞行测试表明, 仅在冻雨或冻雾中飞行时飞艇的囊体等大型表面才结冰。因为在飞行中出现冻雨或冻雾的概率较小, 囊体结冰导致的严重后果未能进行评估。在冻雨或冻雾中飞行时, 飞艇由于囊体结冰而质量增加是显而易见的, 但飞艇依然处于可操控的范围内<sup>[10]</sup>。

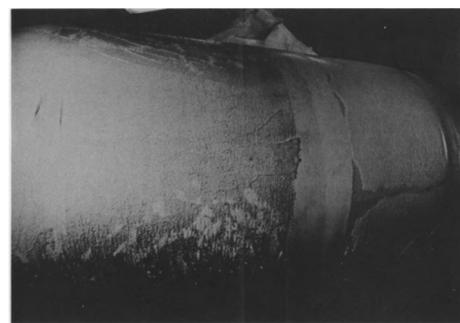


图 2 美国实验室积雪试验

Fig.2 Snow test of US Laboratory

由于系留气球在国内起步较晚, 实际部署应用较少, 尤其缺乏冰雪环境下安全运行的经验<sup>[11-13]</sup>。航空工业特飞所在系留气球型号研制试验中, 对冰雪天气和应对措施开展大量研究, 积累了丰富的经验。中国电子科技集团公司第 38 研究所于 2008 年和 2011 年分别发表了《系留气球系统除冰雪装置的研制》和《系留气球内囊气体加热除冰雪的模拟研究》<sup>[14-15]</sup>, 主要是介绍热空气吹除冰雪和内囊气体循环加热的地面除冰雪方法, 仅开展了简单的理论模拟分析, 其除冰雪效果不明, 技术成熟度较低。北京航空航天大学对浮空器防覆冰涂料和电热膜组合除冰雪方法进行了简述和评估, 认为该方法适用于无人值守和长航时工作环境, 为系留浮空器除冰雪系统设计提供一种新思路<sup>[16]</sup>。综上所述, 国外已进行全面的试验研究, 而国内仅开展概念性研究, 缺乏系统深入的研究, 技术差距较大。

## 2 柔性材料结冰机理研究

### 2.1 柔性材料特性

系留气球柔性材料主要由耐候层、承力层、阻隔层和封热层共同组成, 如图 3 所示。柔性材料中承受自身强力的主要材料是承力层, 而使用纤维织物作为系留气球柔性材料具有抗紫外性能较差的缺点, 紫外

线的长期照射会使纤维力学性能和材料本身力学性能下降,最后影响其使用寿命<sup>[17-19]</sup>。因此,在柔性材料最外层加置一层具有良好的抗老化性并且能抵抗使用环境的耐候层薄膜,可以延长内层承力层材料的使用寿命。

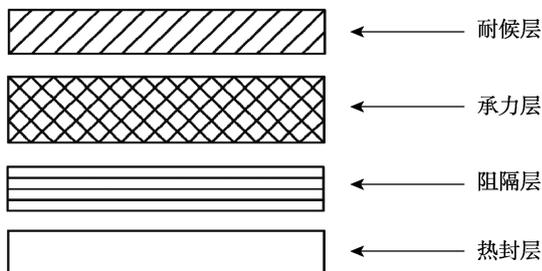


图3 系留气球材料构成  
Fig.3 Material composition of tethered balloon

高分子氟化物被认为是目前耐候性能中极好的材料之一,其中聚氟乙烯(PVF)薄膜在耐磨损、耐弯折、自清洁等方面都有很好的表现,且具有高强度、轻质、尺寸稳定、伸长变形小、气密性好等特点。此外,聚氨酯(PU)薄膜和热塑性聚氨酯(TPU)薄膜拥有较好的强度、良好的柔韧性、耐磨、耐低温及热封强度等特性。系留气球柔性材料耐候层主要是PVF和TPU(见图4),结冰现象就发生在耐候层外表面。



图4 系留气球材料  
Fig.4 Material of tethered balloon

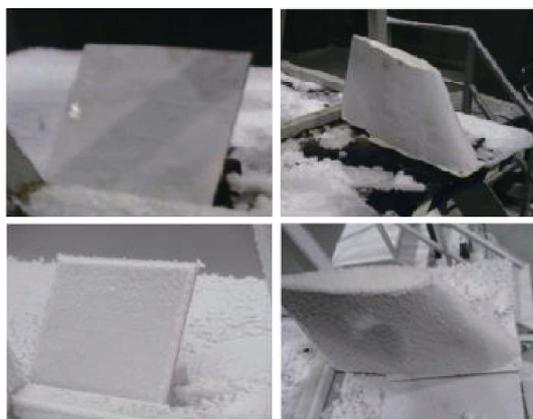
### 2.2 实验室结冰试验

在结冰气候试验室中观察柔性材料制成试验件的结冰情况,与金属表面结冰进行对比分析<sup>[20-22]</sup>,为确定柔性材料的结冰机理提供依据,试验情况如图5所示。通过试验观察可知,虽然系留气球使用了柔性材料,但在囊体内、外压差之下也保持了一定的刚度。通过结冰气候试验室中模拟结冰试验表明,保持一定刚度的柔性材料和金属材料结冰情况基本一致。柔性材料外表面的结冰机理为系留气球在大气中飞行时,其外表面与悬浮在大气中的液态过冷水滴撞击后,曲率瞬间变小,其冰点随即升高,同时水滴变成了贴附在表面很薄的水膜,增大了换热面积,其相变产生的

热量瞬间被散走,使得撞击到球体外表面的水滴很快冻结。



a 试验平台



b 试验情况

图5 柔性材料结冰试验  
Fig.5 Flexible material icing test: a) test platform;  
b) test situation

## 3 系留气球结冰数值研究

目前对飞行器结冰进行研究方法主要有3类,分别是工程估算、试验研究以及数值模拟。工程估算采用经验公式和图表进行估算,适用范围小,一般应用于飞行器防除冰系统设计前期阶段。试验研究包括飞行试验、冰风洞试验、常规风洞试验,试验研究虽然可以直接观测到结冰过程,但飞行试验难度大,成本高,危险系数高,而且周期长。另外,冰风洞建设维护费用高,建设难度大,且对试验模型有一定限制。数值模拟方法是对飞行器结冰的物理过程进行合理的简化,并建立数学模型,通过计算机进行数值求解,对结冰过程进行模拟,进而计算结冰冰形,以及结冰后飞行器的气动特性。数值模拟方法不但研究范围广,且研究成本相对低廉。

本研究采用数值模拟方法进行结冰研究就是通过计算流体力学和计算传热学等多学科结合的方法,建立结冰计算模型,研究结冰过程和结冰特性。目前,结冰数值模拟技术已得到了快速发展,并经过了大量试验数据的对比,尽管其结果还需要在精度上逐步提高,但大部分情况下可以满足工程

实践的要求, 已广泛应用于结冰冰形预测和结冰防护系统优化设计中<sup>[8-9]</sup>。

### 3.1 计算模型

利用成熟的结冰分析专用软件 FENSAP-ICE 开展系留气球结冰分析<sup>[23-25]</sup>, FENSAP-ICE 采用 N-S 方程求解空气流场, 用 Euler 法计算水滴撞击特性, 通过精细的结冰模型来计算结冰冰形。该软件是全三维飞行结冰仿真分析软件, 专门计算飞行器飞行时的结

冰状况, 从而验证飞行器结冰时的飞行安全性, 为完善飞行器的防冰系统提供技术依据, 广泛应用于全球多个国家的飞机、发动研究所。

某系留气球外形如图 6 所示, 长约 65 m, 最大截面直径约为 30 m, 总氦气容积为 7 000 m<sup>3</sup>。计算域尺寸为 200 m×200 m×400 m, 为全六面体网格, 网格总量为 350 万。系留气球在空中飞行时始终保持正迎角, 计算环境条件以及飞行速度与俯仰角的关系见表 1 和表 2。

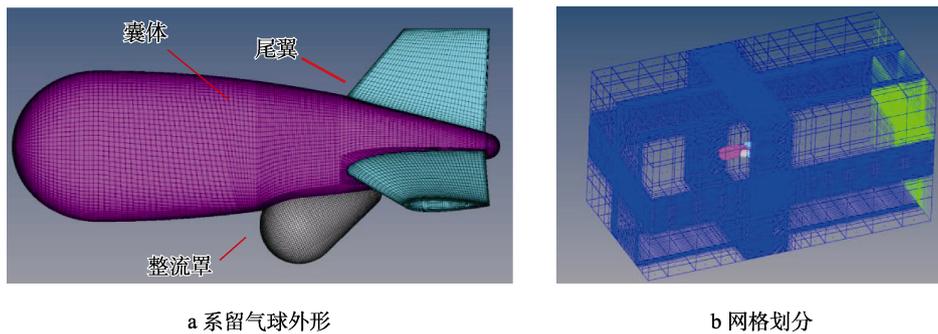


图 6 某系留气球囊体外形与网格划分

Fig.6 Appearance of a tethered balloon capsule: a) shape of tethered balloon; b) grid division

表 1 计算环境条件

Tab.1 Calculation of environmental conditions

计算条件	液态水含量/(g·m <sup>-3</sup> )	水滴直径/μm	环境温度/℃	飞行高度/m	结冰时长/min
GBJ 2195-95 条件	0.5	20	-10	1 800	—
FAR25 附录 O 冻雾条件	0.3	250	-10	1 800	20
FAR25 附录 O 冻雨条件	0.3	1 000	-10	1 800	—

表 2 飞行速度与俯仰角关系

Tab.2 Relationship between flight speed and pitch angle

飞行速度/(m·s <sup>-1</sup> )	俯仰角/(°)
5	2.8
10	4.3
15	5.7
20	6.7
25	7.4
30	7.9

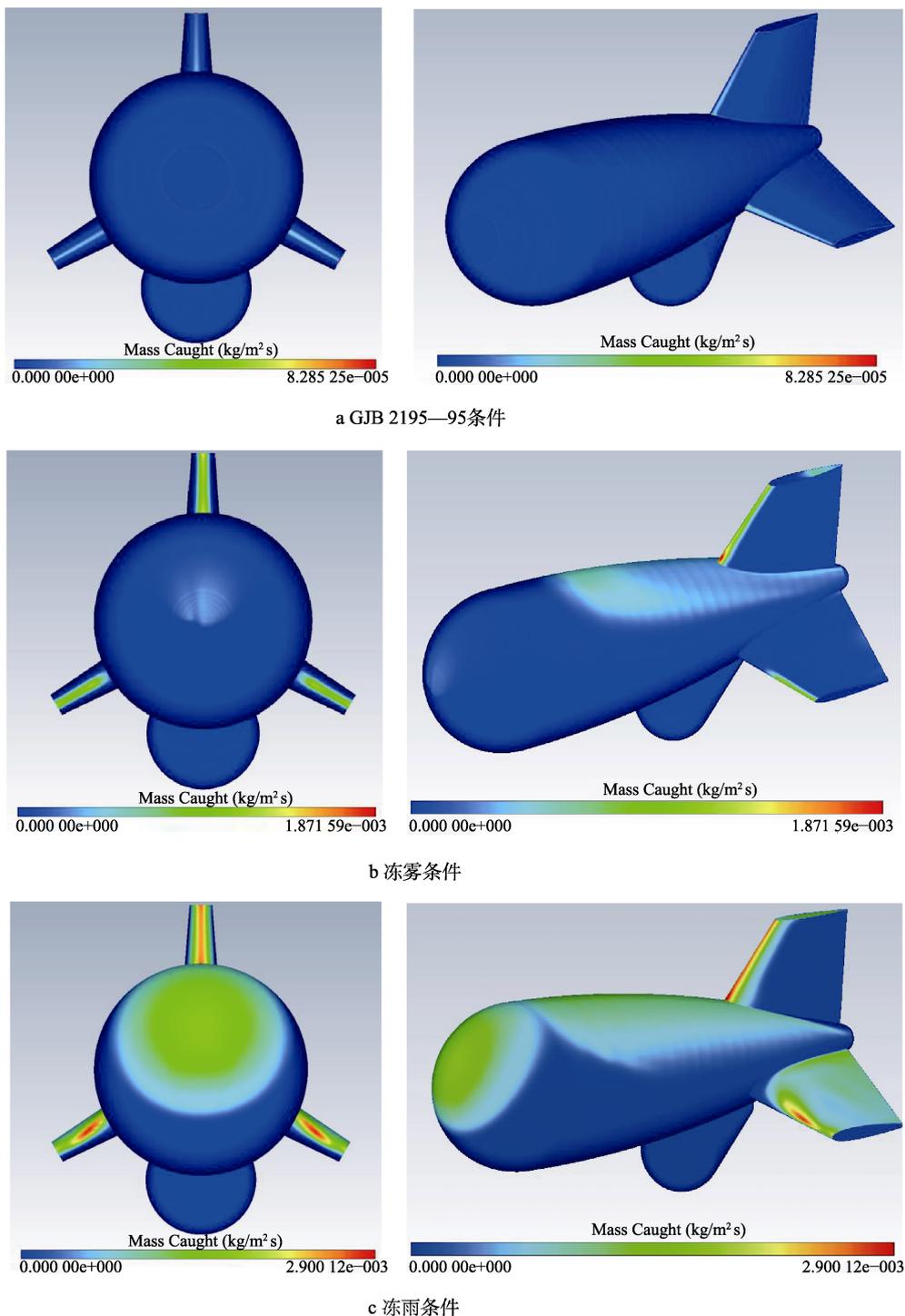
### 3.2 计算结果及分析

预设通常结冰条件(国军标条件)、冻雾条件和冻雨条件, 对各俯仰角下的系留气球进行数值仿真计算(结冰时长 1 200 s), 典型结冰分布如图 7 所示, 各状态下的结冰总量和部件结冰量如图 8 所示。各俯仰角姿态中, 系留气球表面结冰量依次是冻雨时最大, 其次为冻雾, 最小是国军标条件。国军标条件下, 尾翼前缘是主要发生结冰部位, 囊体和整流罩无结

冰, 结冰量随风速和俯仰角增大而增大。在冻雾和冻雨条件下, 囊体和尾翼是主要结冰部位。结冰量随风速和俯仰角呈 V 形变化, 分析原因主要是在小风速和俯仰角姿态过冷水滴受重力影响大, 在大风速和俯仰角姿态时主要受风速影响。随着风速和俯仰角的增大, 整流罩前部逐步开始结冰。与飞机相比, 系留气球囊体前部外形对尾翼水滴运动轨迹影响较大, 在冻雾和冻雨条件下, 囊体前部可以遮挡水滴撞击部分尾翼。

## 4 系留气球稳定性分析

系留气球在飞行时, 其通过缆绳与地面锚泊站连接, 系留气球本身具有很强的横向稳定性和航向稳定性, 在风场的气动力下其迎风自转, 一般主要关注其纵向静平衡特性及动稳定性。系留气球的稳定性分为静稳定和动稳定特性 2 个部分。静稳定即纵向静平衡特性, 主要反映其在纵向力和力矩配平后的平衡俯仰角、缆绳上端张力及其偏角、水平漂移量、高



a GJB 2195—95条件

b 冻雾条件

c 冻雨条件

图7 俯仰角4.3°结冰分布

Fig.7 Ice distribution at an elevation angle of 4.3°: a) GJB 2195—95 condition; b) poganip condition; c) ice rain condition

度损失等参数。动稳定性主要反映系留气球在特定扰动风场影响下的各状态参数关于时间的变化情况，通常方向向下且速率较大的扰动突风对系留气球的影响较严重。

系留气球结冰后的重心变化，主要受系留气球结冰部位的影响。根据结冰量、结冰部位计算结果，分析得出  $x$  向重心变化范围为 $-0.046\sim 0.005$  m， $y$  向重

心变化范围为 $-0.002\sim 0.116$  m，其变化较小，均在系留气球正常留空重心变化范围内。在结冰后，影响系留气球姿态的参数（如俯仰角、缆绳上端张力偏角、下端张力偏角等）变化较小，约在3%以内，缆绳张力受结冰量的影响较为直观，减少1.1~73.2 kg，但系留气球静稳定性仍在安全范围内，系留气球在剩余浮力正常的情况下具备一定的“结冰容限”。

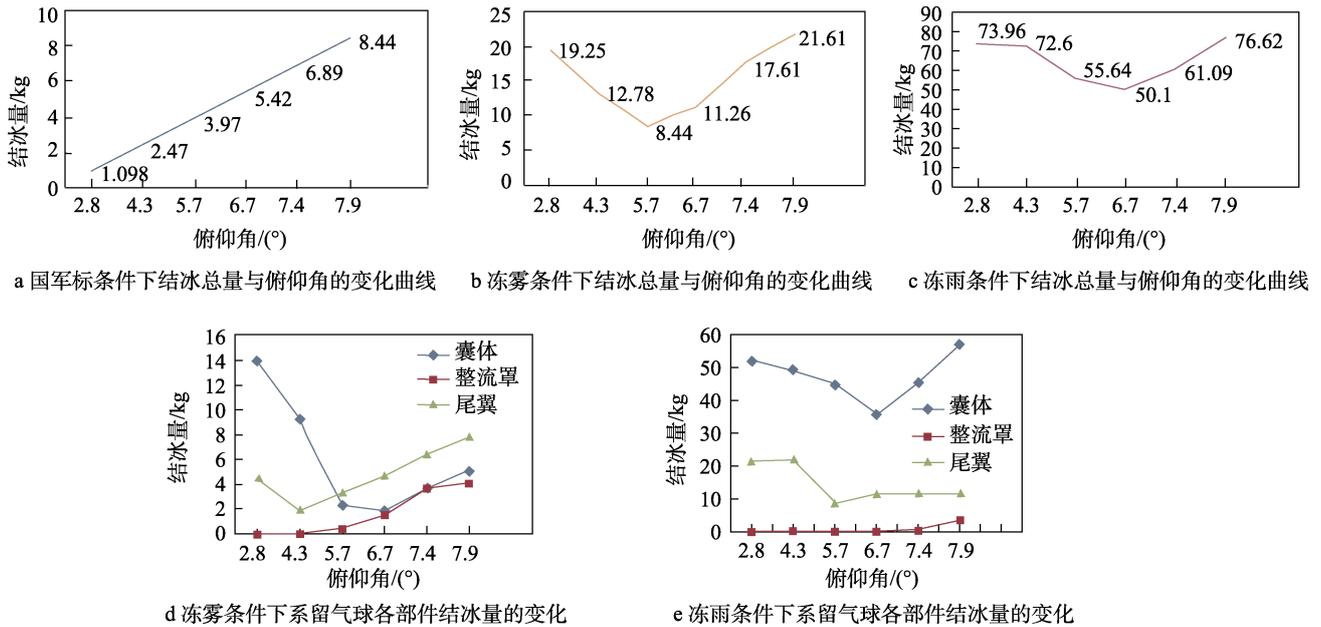


图 8 各状态下的结冰总量和部件结冰量

Fig.8 Total icing amount and component icing amount in each state: a) variation curve of total icing amount and pitch angle under GJB condition; b) variation curve of total icing amount and pitch angle under pogonip condition; c) variation curve of total icing amount and pitch angle under ice rain condition; d) variation of icing amount of each tethered balloon component under pogonip condition; e) variation of icing amount of each tethered balloon component under ice rain condition

## 5 结论

本文参考飞机结冰研究并结合系留气球自身特点, 通过开展试验研究和 CFD 数值计算研究, 研究成果对于中型系留气球防冰设计具有一定的参考价值, 研究结论如下:

1) 保持一定刚度的柔性材料表面和金属材料表面结冰情况基本一致, 结冰机理相同。

2) 国军标条件下, 尾翼前缘是主要发生结冰部位, 囊体和整流罩无结冰, 结冰量随风速和俯仰角增大而增大。

3) 在冻雾和冻雨条件下, 囊体和尾翼是主要结冰部位。结冰量随风速和俯仰角呈 V 形变化, 分析原因主要是在小风速和俯仰角姿态过冷水滴受重力影响大, 在大风速和俯仰角姿态时主要受风速影响。随着风速和俯仰角的增大, 整流罩前部逐步开始结冰。

4) 系留气球囊体前部外形对尾翼水滴运动轨迹影响较大, 在冻雾和冻雨条件下, 囊体前部可以遮挡水滴撞击部分尾翼。

5) 针对结冰后的系留气球开展稳定性分析, 表明系留气球在剩余浮力正常的情况下具备一定的“结冰容限”, 但长时间的无预警结冰且遭遇强对流天气时会造成灾难性后果。

### 参考文献:

[1] 曹洁. 国外系留气球的发展与应用[J]. 科技资讯, 2010,

8(25): 6-7.

CAO J. Development and Application of Tethered Balloons Abroad[J]. Science & Technology Information, 2010, 8(25): 6-7.

[2] 王维相, 翁亚栋. 国外系留气球和飞艇的应用与发展[J]. 橡胶科技市场, 2007, 5(3): 10-14.

WANG W X, WENG Y D. Application and Development of Oversea Mooring Balloon and Airship[J]. Rubber Science and Technology, 2007, 5(3): 10-14.

[3] 单亚玲, 刘耀宗. 基于低空探测系留气球系统总体技术概述[J]. 长沙航空职业技术学院学报, 2007, 7(3): 51-54.

SHAN Y L, LIU Y Z. Overall Technology Summary of Tethered Aerostat System Based on Low Altitude Exploration[J]. Journal of Changsha Aeronautical Vocational and Technical College, 2007, 7(3): 51-54.

[4] 杨雯, 高秉亚, 刘兴兵. 高海拔地区环境特性对系留气球系统的影响[J]. 现代雷达, 2010, 32(1): 7-9.

YANG W, GAO B Y, LIU X B. Effect of Environment of High Altitude Region on Tethered Aerostat System[J]. Modern Radar, 2010, 32(1): 7-9.

[5] 胡小金, 何巍. 冰雹对系留气球的影响分析[C]// 第六届中国航空学会青年科技论坛文集. 沈阳: 中国航空学会, 2014.

HU Xiao-jin, HE Wei. Effect of Hailstone Impact on Captive Balloon[C]// The 6th Aviation Society of China Youth Science and Technology Forum. Shenyang: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2014.

[6] 齐艳华. 浅谈系留气球推行综合保障[C]// 2016 年中国浮空器大会. 东莞: 中国航空学会, 2016.

QI Y H. Introduction to tethered balloon implementation

- of comprehensive security[C]// 2016 China Floating Vehicle Conference. Dongguan: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [7] ROBERT L A. Cold Weather Aerostat Study: AFGL-TR-82-0278[S]. USA: Tcom Corporation, 1982.
- [8] CARTEN A, MCPHETRES G, ASHFORD R. Tethered Aerostat Operation in Arctic Weather[C]// 5th Lighter-Than Air Conference. Anaheim: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1983.
- [9] HANAMOTO B. Special Report 83-23: Aerostat Icing Problems[R]. USA: USA ARMY Cold Regions Research & Engineering Laboratory, 1983.
- [10] WILLIAM L, PORTER J P. A Flight Evaluation and Analysis of the Effect of Icing Condition on the ZPG-2 Airship[R]. USA Ohio: National Advisory Committee for Aeronautics, 1958.
- [11] 盛万兴, 段青, 沙广林, 等. 系留气球平台在应急通信保障中的应用[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(8): 22-28.  
SHENG W X, DUAN Q, SHA G L, et al. Application of Tethered Balloon Platform in Emergency Communication[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(8): 22-28.
- [12] 黄宛宁. 极目一号极目远眺[J]. 知识就是力量, 2022(8): 36-37.  
HUANG W N. Extremely Eye-One, Extremely Eye-Catching[J]. Knowledge Is Power, 2022(8): 36-37.
- [13] 卢芳春, 卢玉林, 吴金国, 等. 系留气球球体结构独立监测系统研究[J]. 工程与试验, 2021, 61(1): 59-60.  
LU F C, LU Y L, WU J G, et al. Research on Independent Monitoring System for Tethered Balloon Spherical Structure[J]. Engineering & Test, 2021, 61(1): 59-60.
- [14] 彭桂林, 陈利. 系留气球系统除冰雪装置的研制[J]. 机械与电子, 2009, 27(1): 17-20.  
PENG G L, CHEN L. Development of Snow and Ice Removing Device for Tethered Aerostat[J]. Machinery & Electronics, 2009, 27(1): 17-20.
- [15] 鞠金彪, 赵林华. 系留气球内囊气体加热除冰雪的模拟研究[J]. 低温与超导, 2011, 39(6): 76-79.  
JU J B, ZHAO L H. Study on Snow-Melting of the Tethered-Balloon by Heating the Gas[J]. Cryogenics & Superconductivity, 2011, 39(6): 76-79.
- [16] 解广华, 王华. 浮空器防覆冰涂料和电热膜组合除冰雪方法[C]//2012年中国浮空器大会. 西安: 中国航空学会, 2012.  
XIE Guang-hua, WANG Hua. Combined method of ice and snow removal by anti-icing coating and electric heating film for floatplane[C]// 2012 China Floatplane Conference. Xi'an: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [17] 吕永超, 方坦. 浮空器囊体材料中纤维层检测方法[J]. 西安航空学院学报, 2016, 34(3): 33-37.  
LYU Y C, FANG T. On the Detection Method of Fiber Layer of Aerostat Envelope Material[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2016, 34(3): 33-37.
- [18] 杨永强, 马云鹏, 武哲. 高空浮空器蒙皮材料特性分析与组合优化[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(3): 333-337.  
YANG Y Q, MA Y P, WU Z. Analysis and Optimization of Envelope Material of High-Altitude Airships[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(3): 333-337.
- [19] 李同兵. 浮空器囊体材料的研究进展[C]// 2016年中国浮空器大会. 北京: 中国航空学会, 2016.  
LI Tong-bing. Research Progress of Floating Vehicle Bladder Materials[C]// 2016 China Floating Vehicle Conference. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2016.
- [20] 张欢欢, 金哲岩, 杨志刚. 水滴在冰层表面上撞击及结冰过程的实验研究[C]// 2016 海峡两岸流体力学研讨会. 西宁: 青海大学, 2016.  
ZHANG Huan-huan, JIN Zhe-yan, YANG Zhi-gang. Experimental study of water droplet impact and icing process on ice surface[C]// 2016 Cross-Strait Symposium on Fluid Mechanics. Xining: Qinghai University 2016.
- [21] 肖春华, 于昆龙, 陈辅政, 等. 结冰环境下结冰/除冰过程的气动参数测量实验技术[J]. 航空动力学报, 2018, 33(12): 2817-2826.  
XIAO C H, YU K L, CHEN F Z, et al. Test Technique of Aerodynamic Parameters Measurement during Icing/de-Icing Process under Icing Environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12): 2817-2826.
- [22] 焦明顺, 陈苗苗, 金哲岩, 等. 低温环境下水滴在冷表面结冰过程的实验研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(1): 74-80.  
JIAO M S, CHEN M M, JIN Z Y, et al. Experimental Study on Freezing Process of Water Droplet on Cold Surface at Low Ambient Temperatures[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(1): 74-80.
- [23] 鲁天, 桑为民, 刘晓宇, 等. 三维翼面结冰过程及其影响数值研究[J]. 航空动力学报, 2014, 29(6): 1339-1345.  
LU T, SANG W M, LIU X Y, et al. Numerical Simulation of Icing Accretion and Influence on Three-Dimensional Wing Configuration[J]. Journal of Aerospace Power, 2014, 29(6): 1339-1345.
- [24] 付斌. 机翼结冰数值计算与结冰模型研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.  
FU B. Numerical Calculation of Wing Icing and Research on Icing Model[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [25] Ansys Corporation. ANSYS FENSAP-ICE User Manual[K]. Pittsburgh: Ansys Corporation, 2018.