

DOI:10.16356/j.1005-2615.2022.06.010

基于水滴收集特征的 SLD 探头外形参数化设计与 仿真研究

黄 雄^{1,2}, 黄 莺², 曲仕茹¹, 王小辉³, 张 恒⁴, 陈 勇⁵

(1. 西北工业大学自动化学院, 西安 710072; 2. 中国商飞上海飞机设计研究院, 上海 201210;
3. 中国航空工业集团公司西安飞机设计研究所, 西安 710089; 4. 西北工业大学航空学院, 西安 710072;
5. 中国商用飞机有限责任公司, 上海 200436)

摘要: 面对过冷大水滴 (Supercooled large droplet, SLD) 结冰环境, 行之有效的结冰探测手段是实施规避策略、尽快脱离 SLD 结冰环境的先决条件。针对一种面向 SLD 环境探测需求的双碰撞面探头, 考虑基于 SLD 动力学模型, 模拟分析探头水滴收集特征进行探头外形参数化设计研究, 研究影响探头区分 SLD 环境的关键几何参数, 从而为探头外形设计提供参考依据。对选定的探头外形仿真计算结果表明, 在常规水滴条件下, 结冰主要发生在探测器的第一碰撞面, 第二碰撞面上的结冰厚度很小, 与第一碰撞面之间存在明显差异; 而在 SLD 条件下, 冰层在第一及第二碰撞面上均有累积。不同直径的水滴撞击到探头不同位置, 形成累积特征迥异的结冰形态, 验证了探头外形参数化设计方法应用于 SLD 环境探测的有效性。

关键词: 结冰环境探测; 过冷大水滴; 水滴收集特征; 水滴尺寸

中图分类号: V321.229

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2022)06-1083-09

Parametric Design and Simulation of SLD Probe Based on Water Droplet Impingement Characteristics

HUANG Xiong^{1,2}, HUANG Ying², QU Shiru¹, WANG Xiaohui³, ZHANG Heng⁴, CHEN Yong⁵

(1. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. COMAC Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China; 3. Xi'an Aircraft Institute of Aviation Industry Corporation of China, Xi'an 710089, China; 4. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
5. Commercial Aircraft Corporation of China, Shanghai 200436, China)

Abstract: Facing supercooled large droplet (SLD) environment, an effective ice detection method is a prerequisite for implementing the avoidance strategy and leaving the icing environment of SLD as soon as possible. Based on the dynamics model of SLD, the water droplet collection characteristics of the double impact surface probe for SLD environment detection requirements are simulated and analyzed to study the parametric design of the probe shape. The key geometric parameters that affect the distinction of SLD environment are clarified, which provides a theoretical basis for the probe shape design. Typical detector shapes are selected for simulation calculation. The simulation calculation results show that under the normal water drop condition, the icing mainly occurs on the first windward side of the detector, and the icing thickness on the second windward side is very small, which is obviously different from that on the first windward side. Under the condition of SLD, the ice layer accumulates on the first and the second windward

收稿日期: 2022-03-30; 修订日期: 2022-06-13

通信作者: 曲仕茹, 女, 教授, E-mail: qushiru@nwpu.edu.cn.

引用格式: 黄雄, 黄莺, 曲仕茹, 等. 基于水滴收集特征的 SLD 探头外形参数化设计与仿真研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(6): 1083-1091. HUANG Xiong, HUANG Ying, QU Shiru, et al. Parametric design and simulation of SLD probe based on water droplet impingement characteristics[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(6): 1083-1091.

surfaces. The water droplets with different diameters can hit the different positions on the probe and form different ice accumulation characteristics. The results verify the effectiveness of the parametric design method of the probe shape for SLD environment detection.

Key words: icing condition detection; supercooled large droplet (SLD); water droplet collection characteristics; water droplet size

结冰探测器是飞机结冰防护系统的重要部件,而过冷大水滴(Supercooled large droplet, SLD)环境结冰探测更是世界工程实践中的难点,包括探测设备和工程工具的能力与局限性等^[1]。在EASA CS-25第18次修订中新增的25.1420条款要求下,飞机首先需要具备识别SLD环境的能力,才能从该环境中脱离^[1]。现有研究已提出多种面向SLD环境的识别技术,按探测方式的不同,可将SLD结冰探测技术分为直接探测与间接探测两大类^[2],其中间接探测中所采用的探头式技术在灵活性和可行性方面具备显著优势。美国Goodrich公司、波音公司、中国商飞在2017—2019年的专利中提出,通过在机体上连续多点布设结冰探头能够扩大对SLD环境的有效探测范围,从而通过多个探头信息融合实现对SLD结冰的探测^[3-5]。美国Rosemount公司依据谐振式传感器外形设计了特殊的导流^[6]和立柱构型^[7],通过在谐振式探测器周围制造气流旋涡或绕流,使常规水滴和SLD分别冻结在不同的探测器上,从而实现SLD结冰条件探测。张洪等^[8]提出了两种立柱式构型,并通过提高构型表面的水滴收集率,增大了探头冻结系数。肖春华等^[9]提出了一种三圆柱的立柱式构型,3个探头沿同一轴线排列,直径依次增加,兼顾了多种直径水滴结冰探测的需求。史献林等^[10]提出了一种立柱式构型的改进方法,将不同直径的立柱嵌套在一起,通过引入光电传感器实现结冰探测,探头结构更加简洁。

但是,上述多种见诸报道的SLD环境探头式探测技术在实用性方面仍然具有不同程度的局限性。例如前述多探头法受布设位置、数量的限制,对安装位置要求高,存在漏检风险;特殊流道法存在探头结构复杂、流道易结冰阻塞的问题;多立柱探头法存在探头冻结系数过小、结冰条件不易区分

的问题。实际上,SLD环境的探头式探测技术中最关键的问题是如何实现探头对SLD环境特殊性的识别,将探头直接暴露于SLD环境,其结冰特征需要与常规环境有显著差别,才能说明探头对SLD环境探测的可行性。

本文设计了一种面向SLD环境探测需求的双碰撞面探头^[11-13],考虑SLD动力学模型,基于水滴收集特征开展探头外形参数化设计,研究了影响探头区分SLD环境的关键几何参数,并通过仿真计算验证探头式探测技术对SLD环境的识别能力。

1 双碰撞面SLD探头外形设计

由于水滴在高速气流中主要受到惯性力和气动力的影响,SLD存在最大水滴直径显著大于100 μm的情况,这类直径水滴惯性更大,气动力作用条件下速度偏移量更小、轨迹更直,因而更为贴近壁面。由于边界层剪切应力作用效应存在,更小、更轻的水滴倾向于远离壁面。因此可以基于上述差异较大的水滴撞击特性设计双碰撞面SLD探头^[13]。依据边界层理论中的剪应力作用,增加常规水滴绕过探头第二碰撞面的边界层厚度,同时保证SLD能够撞击第二碰撞面,以此区分常规水滴与SLD结冰环境。

边界层厚度 $\delta(x)$ 与空气流雷诺数 Re_x 及前缘距离 x 有直接关联

$$\delta(x) \propto \frac{x}{\sqrt{Re_x}} \quad (1)$$

在此设计思路下,如图1所示,常规水滴撞击探头斜面A后将直接结冰,而SLD在撞击斜面A后将产生破碎、溢流的现象,液态水比例明显增加。常规水滴的运动轨迹则因受边界层剪切应力影响较大,其理想绕流沿探头表面法向向外推移,阻碍了绝大部分的常规水滴撞击斜面B。而SLD由于

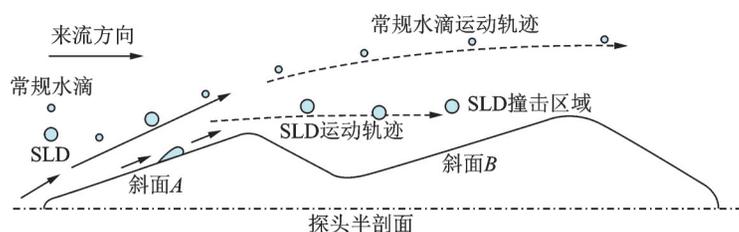


图1 双碰撞面SLD探头外形设计原理图

Fig.1 Design principle of SLD ice probe with double impact surfaces

受自身惯性力影响较大,在表面张力和空气剪切力作用下会产生变形,SLD的阻力模型不再满足刚性球体的假设,很大程度取决于受力之后的变形效应,因此其中一部分从斜面A溢流并受气流影响在涡区结冰,另一部分SLD,保持原有的运动轨迹,直接撞击到探头斜面B并结冰。

2 探头外形参数化设计

为了使常规水滴和SLD结冰条件能够在探头不同位置具有不同的水滴收集特征,并且在两个碰

撞面上的结冰量差异更明显,对探头外形进行参数化分析,归纳为图2所示的13个参数。为了研究不同外形参数对探头水滴收集特征的影响,设计了9组不同的探头外形参数,分别研究探头前端参数 θ_1 、 L_2 、 L_5 、 R_2 以及探头后端参数 θ_2 、 L_3 、 L_6 对探头水滴收集特征的影响。探头外形1~9的参数如表1所示。外形1~4主要差别是 θ_1 和 R_2 ,外形2、5~6主要差别是 θ_2 和 L_2 ,外形2和7主要差别是 θ_1 和 L_2 ,外形8和9主要差别是 L_5 和 L_6 。外形1~7与外形8~9对比主要是研究 L_3 的影响。

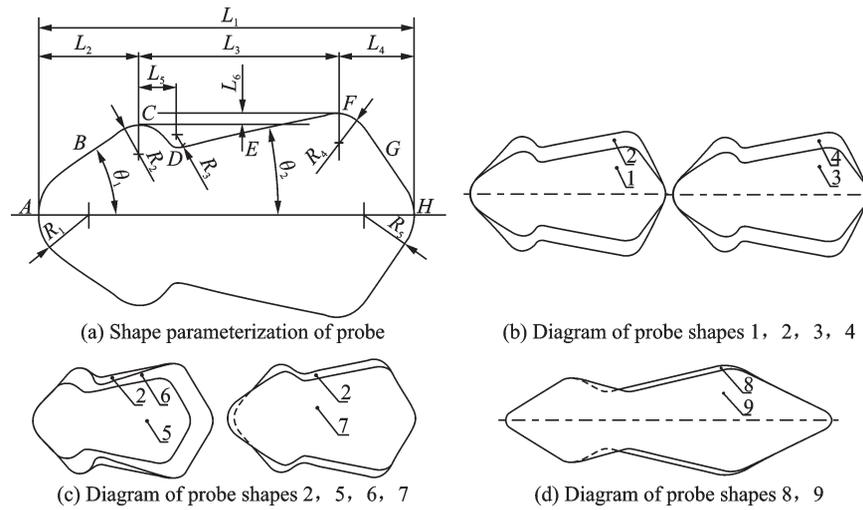


图2 双碰撞面SLD探头外形参数化设计

Fig.2 Parametric design of SLD probe with double impact surfaces

表 1 探头外形参数设置

Table 1 Parameters of probe shapes

外形	$\theta_1/(^\circ)$	$\theta_2/(^\circ)$	R_1/mm	R_2/mm	R_3/mm	R_4/mm	R_5/mm	L_1/mm	L_2/mm	L_3/mm	L_4/mm	L_5/mm	L_6/mm
1	35	12	6	3.5	1.5	3.5	6	46.00	12.00	24	10.0	4.50	1.34
2	50	12	6	3.5	1.5	3.5	6	46.00	12.00	24	10.0	4.50	1.34
3	35	12	6	5.0	1.5	3.5	6	46.00	12.00	24	10.0	5.17	1.34
4	50	12	6	5.0	1.5	3.5	6	46.00	12.00	24	10.0	5.17	1.34
5	50	12	6	3.5	1.5	3.5	6	39.60	8.50	24	7.7	5.17	1.34
6	50	18	6	3.5	1.5	3.5	6	46.00	12.00	24	10.0	5.17	1.34
7	35	12	6	3.5	1.5	3.5	6	47.57	14.60	24	8.9	5.17	1.34
8	35	15	5	7.5	5.0	12.0	5	145.00	29.35	69	42.0	15.65	6.50
9	35	15	5	7.5	5.0	12.0	5	145.00	29.35	71	40.0	25.65	4.50

3 SLD动力学模型

3.1 SLD阻力模型

对于SLD而言,在运动过程中会从球形逐渐向扁圆盘形变化,需要对阻力模型 $C_{D, \text{droplet}}$ 进行修正。提供的方法为:将球体阻力系数 $C_{D, \text{sphere}}$ 与扁圆盘阻力系数 $C_{D, \text{disk}}$ 进行加权平均^[14]

$$C_{D, \text{droplet}} = eC_{D, \text{disk}} + (1 - e)C_{D, \text{sphere}} \quad (2)$$

式中 e 为球体阻力系数权重。

3.2 SLD破碎模型

对于SLD结冰数值的模拟,通常采用泰勒类比模型^[14]。在此基础上,加载水滴破碎和水滴变形模型以实现SLD结冰模拟。当水滴振荡频率达到某一阈值时,水滴的形态就会发生变化:大水滴发生变形,同时形成一群小水滴。在水滴的形态发生变化的过程中,其也由原来的球体形态变化成其他形态^[15-16]。同时,水滴所受到的力也将发生变化。

控制水滴变形的方程为^[14]

$$F - kx - d \frac{dx}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (3)$$

式中: F 为水滴在流场中受到的压力; k 为水滴因表面张力影响的恢复系数; x 为破碎水滴赤道与其为球形时赤道间的位移量; d 为空气阻力; t 为时间; m 为水滴质量。方程的系数来源于泰勒类比

$$\frac{k}{m} = C_k \frac{\sigma}{\rho_1 r^3} \quad (4)$$

在液滴发生破碎时有

$$x > C_b r \quad (5)$$

液滴位移公式为

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{C_f \rho_g u^2}{C_b \rho_1 r^2} - \frac{C_k \sigma}{\rho_1 r^3} y - \frac{C_d \mu_1}{\rho_1 r^2} \frac{dy}{dt} \quad (6)$$

式中: $y = x / (C_b r)$; r 为未发生变形前的液滴的半径; ρ_1 、 ρ_g 分别为分散相与连续相的密度; u 为液滴的相对速度; C_b 为水滴衡量尺度; μ_1 为水滴黏性; C_f 、 C_k 、 C_d 为常数, 结合实验数据可以求得: $C_f = 1/3$, $C_k = 8$, $C_d = 5$ 。 u 为水滴相对于壁面的法向速率。

由于TAB模型的假设限制, 其仅适用于较小 We 数下的水滴破碎模拟。为了扩展水滴破碎的模拟范围, 在模拟需要用多因素判定破碎模型 (Multifactor-effected breakup, MEB)^[17]。将 Re 数和 We 数共同作为水滴破碎的判定。不同破碎形式的两条分界曲线为^[16]

$$Re_x = 0.125 We_x^2 + 5.75 \quad 3 < We_x < 15 \quad (7)$$

$$Re_x = 0.43 We_x^2 \quad 7 < We_x < 35 \quad (8)$$

式(7,8)即为拟合得到的水滴破碎形式判据。水滴破碎时间修正计算公式为

$$T = t_0 \frac{V_r}{D} \sqrt{\frac{\rho_g}{\rho_d}} \quad (9)$$

式中: t_0 表示表面张力失稳时所需要的破碎时间, 一般取 22.43 ms; D 为液滴粒径; ρ_d 为水滴密度; V_r 为水滴和空气的相对速度。

3.3 SLD 飞溅模型

水滴飞溅模型包含了飞溅质量损失和水滴展布模拟, 根据Mundo等的理论^[18], 飞溅系数 K 定义为

$$K = \left(\frac{\rho_d^3 D^3 u^5}{\sigma_d^2 \mu_d} \right)^{1/4} \quad (10)$$

式中: μ_d 为水滴动力黏度; σ_d 为表面张力系数。

当 $K > 57.7$ 时判定有飞溅存在。水滴飞溅的质量损失率可表示为^[16]

$$\frac{m_s}{m_0} = 0.7(1 - \sin \theta_0)(1 - e^{-0.0092(K_{ctr} - 200)}) \quad (11)$$

式中: m_0 为水滴总质量; m_s 为碰撞时引起水滴损失的质量; θ_0 为入射方向与壁面切向角; K_{ctr} 为引起水滴飞溅的临界值。当水滴运动方向与撞击面相垂直时, 即 $\theta_0 = \pi / 2$, 不会引起水滴质量的损失。

水滴撞击过程除了水滴飞溅引起水滴质量损失外, 还引起了壁面的水层动量改变。对水层的影响可以按照增加的能量方式进行建模分析。水层能量增加量的控制方程为

$$E = M_{\text{droplet}} v^2 \alpha \quad (12)$$

式中: M_{droplet} 为水滴质量; v 表示碰撞速度的法向分量; α 为调整系数。

4 基于水滴收集特征的探头外形参数敏感性分析

4.1 多粒径尺度的水滴收集特征验证

考虑上述SLD动力学模型^[19], 针对表1不同参数下双碰撞面SLD探头外形, 开展探头水滴收集特征仿真研究, 主要包括建立网格模型、流场计算和水滴轨迹计算3个步骤。

为了验证水滴收集特征的计算精度, 选取翼型NACA23012作为标准算例进行计算验证, 仿真计算条件如表2所示。表中MVD表示水滴中位体积直径, LWC表示液态水含量。算例中NACA23012翼型的网格划分如图3所示, 采用全六面体网格类型, 分块方式采用了C形劈分, 上游加密网格大约位于10%特征长度处, 次加密网格位于与特征长度相等的距离处, 但不超过几何体实体表面在自由流速度方向上的最后一个网格节点, 远场边界位于距离机翼表面3.5~4.5个特征长度处。另外, 通过控制壁面首层网格法向尺寸相对平均气动弦长足够小, 保证了 y^+ 不大于1。翼型表面划分了致密的边界层网格, 全场网格节点数为65 560, 网格单元数为97 816, 网格最大偏度为0.652 752。

文献[21]中经试验验证的参考仿真结果及本文的仿真计算结果如图4所示。表3和表4举例了部分距前缘线不同位置处水滴收集系数对比情况。

取距前缘线不同位置的两种水滴情况下的水

表2 翼型NACA23012标准算例计算条件

Table 2 Calculation condition for NACA 23012 standard example

序号	MVD / μm	LWC / $(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	风速 / $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	迎角 / $(^\circ)$	水滴粒径分布
常规水滴	40	0.73	77.8	2.5	Langmuir D
过冷大水滴	111	0.73	77.8	-10	10-bins ^[20]

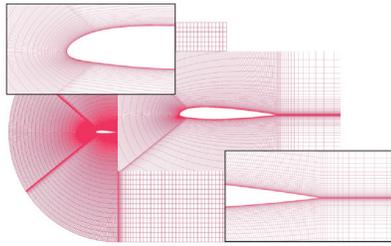


图3 NACA23012翼型的网格划分
Fig.3 Meshing of NACA23012 airfoil

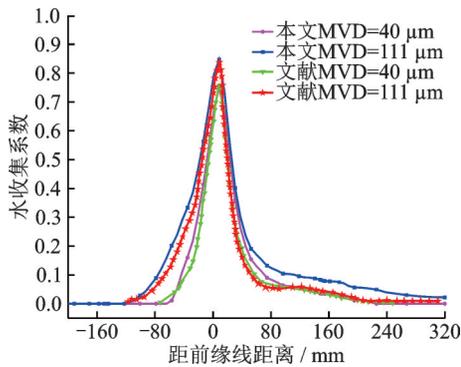


图4 算例仿真计算结果对比

Fig.4 Comparison between simulation and calculational results

表 3 常规水滴 (MVD=40 μm) 不同位置处水滴收集系数对比

Table 3 Comparison of droplet collection coefficients at different positions of conventional droplets (MVD = 40 μm)

距前缘线位置/mm	文献[21]	本文结果	差异
-13.4	0.372 5	0.414 0	0.041 5
9.00	0.837 9	0.846 5	0.008 6
15.80	0.610 3	0.668 9	0.058 6

表 4 过冷大水滴 (MVD=110 μm) 不同位置处水滴收集系数对比

Table 4 Comparison of droplet collection coefficients at different positions of SLD (MVD = 110 μm)

距前缘线位置/mm	文献[21]	本文结果	差异
-13.4	0.537 3	0.563 5	0.026 2
9.00	0.756 9	0.750 1	-0.006 8
15.8	0.614 4	0.737 6	0.123 2

滴收集系数差异数值, 本文的仿真结果与文献 [21] 之间的平均误差大约为 7.932%, 说明当前水滴收集系数仿真研究方法正确, 可采用相同方法进行不同探头外形的水滴收集特征仿真研究。

4.2 基于水滴收集特征的探头外形参数敏感性分析

探头网格划分采用 3.1 节中经过校核的网格划分方法, 网格划分如图 5 所示。采用全六面体网

格类型, 分块方式采用了 O 形劈分, 上游加密网格大约位于 20% 特征长度处, 远场边界位于距离探头表面 5 个特征长度处, 通过控制壁面首层网格法向尺寸相对平均气动弦长足够小, 保证了 y^+ 不大于 1。探头表面划分了致密的边界层网格, 全场网格节点数为 68 680, 网格单元数为 103 372。

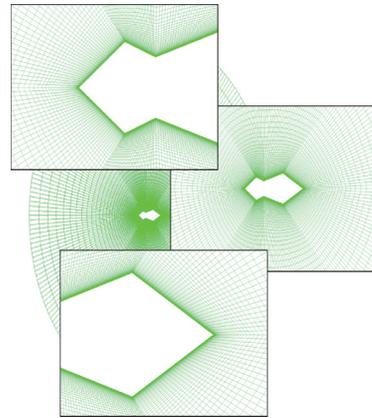


图5 探头外形的网格划分
Fig.5 Meshing of probe shape

探头流场计算、水滴轨迹仿真需要根据常规水滴及 SLD 结冰条件设置参数。考虑到飞机在起飞和着陆过程中总是以相对较低的速度遭遇结冰条件, 因此将空气速度设置为 70 m/s。常规水滴 MVD 为 40 μm, 水滴直径分布为 Langmuir D; SLD MVD 为 70 μm, 水滴直径分布采用文献 [20] 中的 10-bins, 如表 5 所示。

表 5 水滴收集特征仿真计算参数

Table 5 Parameters for water droplet impact simulation

序号	MVD/μm	LWC/(g·m ⁻³)	风速/(m·s ⁻¹)	温度/°C
1	40	0.5	100	-10
2	70	0.2	100	-10

常规水滴和 SLD 结冰下探头外形 1~4 的表面水收集系数如图 6 所示。当处于常规水滴、且 MVD 为 40 μm 时, 探头外形 1~4 斜面 E 上的收集系数均很小, 最大值分别为 0.012、0.002、0.014 和 0.003, 其中探头外形 1 和 3 的水收集系数略大于探头外形 2 和 4 的水收集系数。但当处于 SLD, 且 MVD 增加为 70 μm 时, 探头外形 1~4 斜面 E 上的水收集系数均明显大于处于常规水滴且 MVD 为 40 μm 的收集系数, 最大值分别为 0.098、0.038、0.103 和 0.047, 其中探头外形 1 和 3 的最大收集系数约为探头外形 2 和 4 的 2.5 倍。

从探头外形 1~4 处于 SLD, 且 MVD 增加为 70 μm 时, 斜面 E 上的水收集系数变化可以看出: θ_1 对斜面 E 上的水收集系数影响较大, θ_1 越大, 收集系数越小; 而 R_2 对收集系数影响较小。

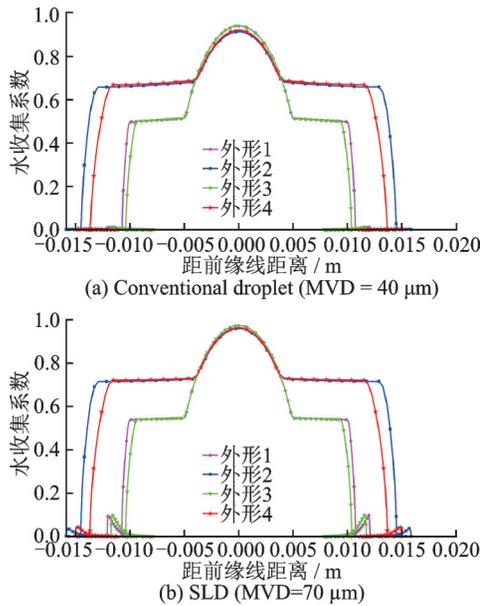


图6 探头外形1—4表面水收集系数分布

Fig.6 Distribution of water collection coefficient of probe shapes 1—4

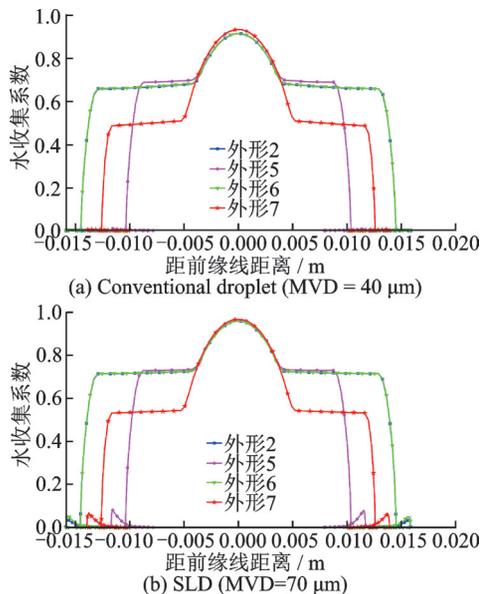


图7 探头外形2,5,6,7表面水收集系数分布

Fig.7 Distribution of water collection coefficient of probe shapes 2,5,6,7

常规水滴和SLD结冰下探头外形2、5、6、7的表面水收集系数如图7所示。当处于常规水滴且MVD为40 μm时,探头外形2、5、6、7斜面E上的收集系数均很小,最大值分别为0.002、0.009、0.004和0.006。相似地,当处于SLD且MVD增加为70 μm时,斜面E上的收集系数均明显大于处于常规水滴且MVD为40 μm的收集系数,最大值分别为0.038、0.080、0.052和0.068,其中探头外形5和7的最大收集系数约为探头外形2和6的1.5倍。

从探头外形2、5、6、7处于SLD,且MVD增加为70 μm时斜面E上的水收集系数变化可以看出: L_2 对斜面E上水收集系数影响较大, L_2 越小,斜面

E上的水收集系数越大, L_2 增加可以抵消 θ_1 减小对水收集系数的影响,而 θ_2 对水收集系数影响较小。

常规水滴和SLD结冰下探头外形8、9的表面水收集系数如图8所示。当处于常规水滴且MVD为40 μm时,探头外形8、9斜面E上的收集系数均很小,最大值分别为0.003、0.002。当处于SLD,且MVD增加为70 μm时,斜面E上的收集系数均明显处于常规水滴、且MVD为40 μm的收集系数,最大值分别为0.091、0.043,两者之间相差较大,但水收集系数曲线基本重合。

从探头外形2、5、6、7处于SLD,且MVD增加为70 μm时斜面E上的水收集系数变化可以看出: L_6 越大,水收集系数越大,且呈指数增长, L_6 的增加可以提高斜面E对SLD的捕获能力; L_5 对收集系数影响较小。

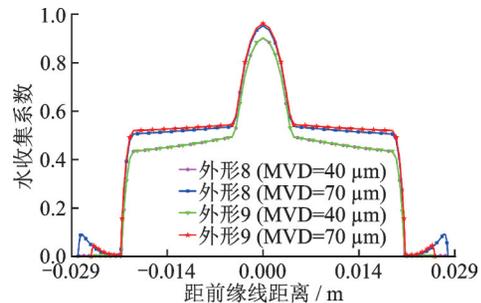


图8 探头外形8,9表面水收集系数分布

Fig.8 Distribution of water collection coefficient of the probe shapes 8,9

对比图2中探头外形9与外形2,前者 L_6 是后者 L_6 的3倍以上,但处于SLD且MVD为70 μm时,斜面E上的水收集系数相差不大,表明 L_3 尺寸的增加大大增加了探头边界层的厚度,从而减小了斜面E上的水收集系数。

综合上述9个外形在不同条件下的水滴收集特征分布可以看出,探头的关键外形参数为 L_6 、 θ_1 、 L_2 、 L_3 。 θ_1 、 L_2 、 L_3 越大,则边界层越厚,通过调节 L_6 的高度,可以使常规水滴绝大部分仅能撞击到斜面B,而SLD则能同时撞击到斜面B和斜面E,从而使不同直径水滴在探头不同位置结冰差异更明显,为实现常规水滴与SLD结冰区分性探测奠定了基础。

从以上9个探头外形中,可以看出处于常规水滴、且MVD为40 μm时斜面E上水收集系数最小的为探头外形2和探头外形9,斜面E上水收集系数最大值都是0.002;而探头外形2和探头外形9处于SLD、且MVD为70 μm时,斜面E上水收集系数最大值为0.038、0.043,后者水收集系数优于前者,选取探头外形9开展结冰仿真分析。

5 探头外形结冰仿真分析

针对探头外形 9,对如表 6 所示的 4 种工况进行水滴收集特征及结冰仿真,参数设置方法与前述相同。其中工况 1 和 2 为常规水滴结冰,结冰条件按 EASA CS-25 第 16 次修订附录 C 所规定的结冰包线进行选择,工况 3 和工况 4 为 SLD 结冰,结冰条件按附录 O 所规定进行选择^[22]。

表 6 结冰仿真条件

Table 6 Icing simulation condition

工况	MVD/ μm	LWC / ($\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	风速 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	温度/ $^{\circ}\text{C}$
1	15	0.60	70	-10
2	34	0.24	70	-10
3	70	0.15	70	-10
4	250	0.20	70	-10

4 种工况下探头外形 9 的水滴撞击特性仿真计算的液态水含量分布和水收集系数分布如图 9 所示。从液态水含量分布仿真计算结果可以看出,在 MVD 为在 15 μm 的工况 1 和 34 μm 的工况 2 的常规结冰条件下,探头周围的 LWC 分布受边界层影响大,水滴运动曲线呈抛物线形状,水滴仅撞击到探头外形 9 的斜面 B 上,而在斜面 E 处,远离探头表面,斜面 E 上并无水滴收集,仍处于水滴遮蔽区内。随着 MVD 的增加,水滴遮蔽区逐渐减小。在 MVD 为在 70 μm 的工况 3 和 250 μm 的工况 4 的 SLD 结冰条件下,探头周

围的 LWC 分布受边界层影响小,水滴运动曲线呈近似直线形状,水滴撞击范围从斜面 B 扩展到了斜面 E,特别是当 MVD 为 250 μm 、且处于 SLD 结冰条件时,在斜面 E 上有较明显的水滴收集,这是由于此时最大水滴直径本身质量大,受边界层气流作用小,几乎沿直线撞击在第二碰撞面上。

从探头外形 9 的水收集系数分布可以看出,随着 MVD 的增加,常规水滴结冰条件向 SLD 结冰条件变化,斜面 B 上的水收集系数逐渐增加,最后趋于稳定。而斜面 E 上的水收集系数,从小到大,并且随着 MVD 的增加,常规水滴结冰条件向 SLD 结冰条件变化,斜面 E 上的水滴撞击范围和水收集率明显增大。

4 种工况下探头外形 9 的 60 s 结冰量分布计算结果如图 10 所示,探头表面结冰分布与水收集系数分布一致。图 10 工况 1 和工况 2 常规水滴结冰条件下,仅在探头前缘和斜面 B 上结冰,随着 MVD 的增加,斜面 B 上的结冰量和结冰范围不断增加;工况 3 和工况 4 SLD 结冰条件下,结冰范围扩展到了探头的斜面 E,虽然工况 3 时斜面 E 的结冰量较少,但随着 MVD 增加,工况 4 在斜面 E 上有明显结冰。

为了进一步验证大液态水含量条件下,常规水滴溢流结冰对探测器表面结冰量分布的影响,在如表 7 所示的两种工况下进行 120 s 结冰仿真。工况

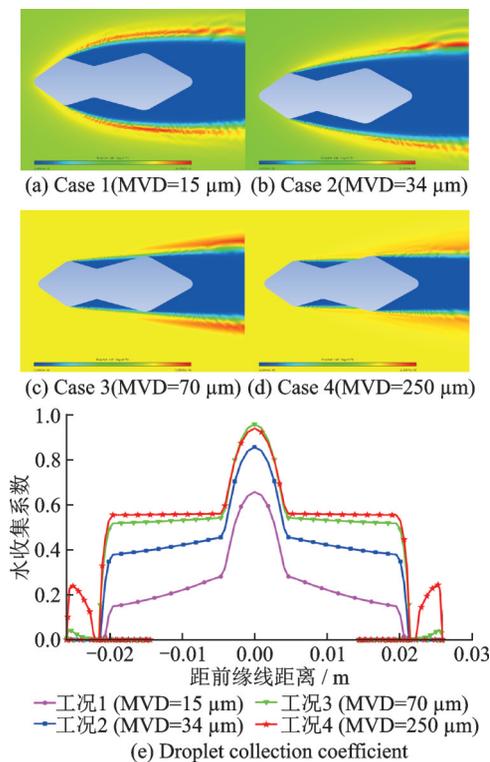
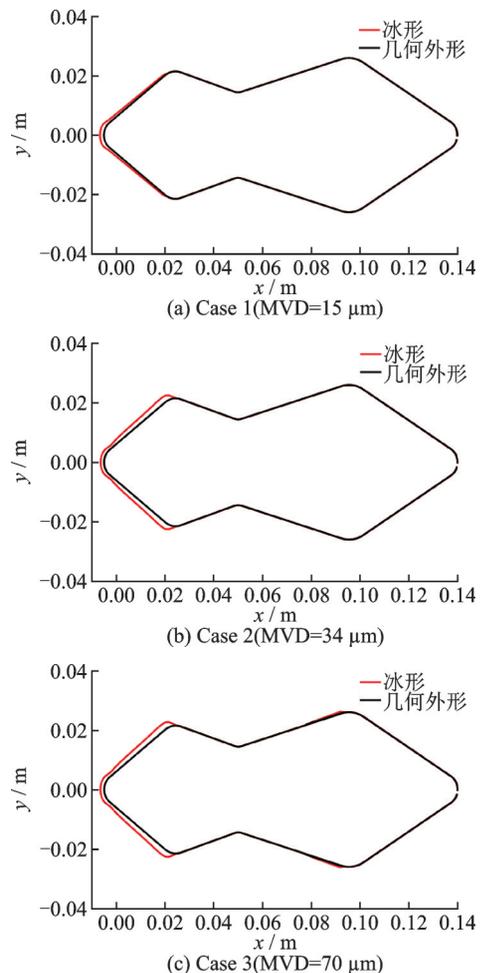


图 9 探头外形 9 的液态水含量分布和水收集系数分布
Fig.9 LWC and water collection coefficient of probe shape 9



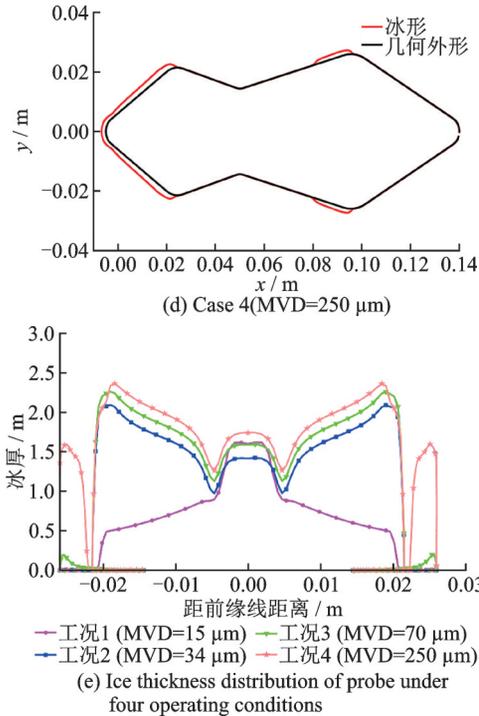


图10 探头外形9在不同工况下的结冰量分布
Fig.10 Distribution of icing amount of probe shape 9 under different working conditions

表7 大液态水含量结冰条件
Table 7 Icing conditions with large LWC

工况	MVD/ μm	LWC/ $(\text{g}\cdot\text{m}^{-3})$	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	温度/ $^{\circ}\text{C}$
5	15	2.5	120	-10
6	34	1	120	-10

5和工况6条件下仿真计算结果如图11所示,两种结冰条件下,探测器表面结冰主要在探测器前缘及斜面B上,斜面E上结冰量均小于0.05 mm。

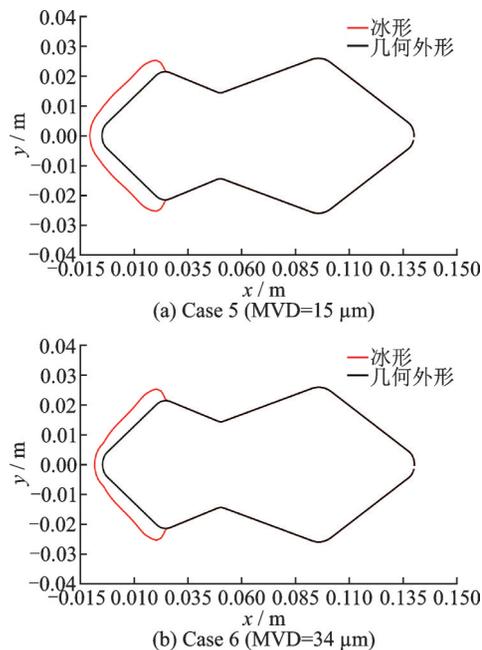


图11 探头外形9在工况5和6下的结冰量分布
Fig.11 Distribution of icing amount of probe shape 9 under working conditions 5 and 6

综上仿真计算结果表明,在不同仿真条件下,常规水滴主要在探头外形9的前缘及第一碰撞面上结冰,即使有溢流结冰,在第二碰撞面上的结冰量也很少;而SLD则能同时第一和第二碰撞面上结冰,且第二碰撞面上的结冰量较大,不同直径的水滴在探头外形9的不同位置结冰的差异性明显。

6 结 论

本文针对一种面向SLD环境探测需求的双碰撞面探头,考虑SLD动力学模型,基于水滴收集特征进行探头外形参数化设计研究,厘清影响探头区分SLD环境的关键几何参数,从而为探头外形设计提供理论依据。本文主要结论如下:

(1)考虑SLD动力学模型的仿真方法可以描述SLD在阻力分析、飞溅和破碎等方面的特殊性,获得与试验结果较一致的仿真结果,为探头外形参数化设计与验证分析提供基础支撑。

(2)能够有效区分常规水滴及SLD结冰的探头外形需要至少两个碰撞面,增加探头前缘夹角、第一碰撞面和第二碰撞面的长度可以使水滴远离第二碰撞面,而增加探头第二碰撞面与第一碰撞面的相对高度差,可以提高第二碰撞面对水滴的捕获能力。通过调整探头关键外形参数,可以使常规水滴大部分撞击到探头的第一碰撞面,而使SLD同时撞击到探头的第一和第二碰撞面。

(3)探头表面结冰分布与水收集系数分布一致。在常规水滴环境下,主要在探头前缘和第一碰撞面上结冰,第二碰撞面上的结冰很少;而在SLD环境下,结冰同时发生在探头的第一和第二碰撞面上,并且随着水滴直径的增加,在第二碰撞面上的结冰越明显。

通过对双碰撞面探头进行参数化设计,调整影响探头关键几何参数,可以使不同直径的水滴撞击到探头不同位置,并在探头上形成差异明显的结冰,为SLD环境区分性探测提供了可行方案。下一步将在此基础上,针对冻毛毛雨和冻雨状态不同水滴分布情况(MVD大于和小于 $40\ \mu\text{m}$)、不同飞行速度/空气密度/探头表面材料等条件深入分析,并结合优化算法提炼出探头外形参数设计函数。

参考文献:

[1] FAA. Compliance of transport category airplanes with certification requirements for flight in icing conditions: AC 25-28[S]. U S: FAA, 2014.
[2] 张洪,张文情,郑英. 过冷大水滴结冰探测技术研究进展[J]. 实验流体力学, 2016, 30(3): 33-39.
ZHANG Hong, ZHANG Wenqian, ZHENG Ying.

- Research progress on supercooled large droplet icing detection technology[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2016, 30(3): 33-39.
- [3] PUTT J C. Pneumatic de-icer with sensor for supercooled large droplet icing detection: EP3235732A1 [S]. U S: [s.n.], 2019.
- [4] BOSETTI C K, EIGABALAWY H E. Aircraft icing conditions detection systems and methods: US10071808B1[S]. U S: the Boeing Company, 2017.
- [5] 沙昭君, 曾飞雄, 张强. 一种结冰探测器: CN201910854751.2[P]. 2019-12-24.
- [6] OTTO J T. Supercooled large droplet ice detector: EP1401707A1[P]. 2004-03-31.
- [7] SEVERSON J A, CHENOWETH B B, RUTKIEWICZ R D. Inflight ice detector to distinguish supercooled large droplet (SLD) icing: EP1254833B1 [P]. 2004-12-15.
- [8] 祁相莹, 张洪, 郑英. 基于后流特性的SLD结冰探测数值研究[J]. *电子测量技术*, 2017, 40(7): 173-178. QI Xiangying, ZHANG Hong, ZHENG Ying. Numerical study of SLD icing detection based on back-flow characteristics[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2017, 40(7): 173-178.
- [9] 肖春华, 乔宝英. 一种过冷水滴结冰探测装置: CN206876374U[P]. 2018-01-12.
- [10] 史献林, 徐佳佳, 沙昭君, 等. 过冷水滴结冰探测器和混合态结冰探测器: CN110077601A [P]. 2019-05-16.
- [11] CHEN Y, YE L, ZHANG M, et al. Icing detector probe and icing detector with the same: U.S. Patent 9079669[P]. 2015-07-14.
- [12] 陈迎春, 叶林, 张森, 等. 结冰探测器探头及包括该探头的结冰探测器: CN102336272A[P]. 2012-02-01.
- [13] 章儒宸, 葛俊锋, 桂康, 等. 双梭型SLD探测器结冰特性研究[J]. *民用飞机设计与研究*, 2021, 141(2): 6-17. ZHANG Ruchen, GE Junfeng, GUI Kang, et al. Study on icing characteristics of double shuttle type SLD detector[J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2021, 141(2): 6-17.
- [14] TAN S C. Effects of large droplet dynamics on airfoil impingement characteristics[C]//Proceedings of the 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. Reno, Nevada: AIAA, 2005.
- [15] 李维浩, 李伟斌, 易贤, 等. 考虑动力学效应的结冰试验相似准则修正方法[J]. *实验流体力学*, 2020, 34(3): 97-103. LI Weihao, LI Weibin, YI Xian, et al. A correction method of icing testing scaling law with dynamic effects[J]. *Journal of Experiments in Fluid Mechanics*, 2020, 34(3): 97-103.
- [16] 郭向东, 柳庆林, 刘森云, 等. 结冰风洞中过冷大水滴云雾演化特性数值研究[J]. *航空学报*, 2020, 41(8): 123655. GUO Xiangdong, LIU Qinglin, LIU Senyun, et al. Numerical study of supercooled large droplet cloud evolution characteristics in icing wind tunnel[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2020, 41(8): 123655.
- [17] 张辰, 孔维梁, 刘洪. 大粒径过冷水滴结冰模拟破碎模型研究[J]. *空气动力学学报*, 2013, 31(2): 144-150. ZHANG Chen, KONG Weiliang, LIU Hong. An investigation on the breakup model for icing simulation of supercooled large droplets[J]. *Acta Aerodynamica Sinica*, 2013, 31(2): 144-150.
- [18] MUNDO C, SOMMERFELD M, TROPEA C. Droplet-wall collisions: Experimental studies of the deformation and breakup process[J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 1995, 21(2): 151-173.
- [19] XIE L, LI P, CHEN H, et al. Robust and efficient prediction of the collection efficiency in icing accretion simulation for 3D complex geometries using the Lagrangian approach I: An adaptive interpolation method based on the restricted radial basis functions[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2020, 150: 119290.
- [20] PAPADAKIS M, RACHMAN A, WONG S C, et al. An experimental investigation of SLD impingement on airfoils and simulated ice shapes[J]. *International Journal of Asian Social Science*, 2003, 3(1): 682-702.
- [21] BILODEAU D R, HABASHI W G, FOSSATI M, et al. Eulerian modeling of supercooled large droplet splashing and bouncing[J]. *Journal of Aircraft*, 2015, 52(5): 1611-1624.
- [22] European Aviation Safety Agency. Certification specifications and acceptable means of compliance for large aeroplanes C5-25[S]. [S.l.]: European Aviation safety Agency, 2015.

(编辑:孙静)