

doi: 10.7690/bgzd.2023.03.012

开缝帽罩水滴撞击特性研究

李峰梅, 蔡金良, 曾 稼, 刘苗苗, 亢 慧
(重庆红宇精密工业集团有限公司, 重庆 402760)

摘要: 针对吹风比对帽罩缝后区域水滴撞击特性的影响, 通过计算提出水滴受气膜影响效应的相关判据。通过实验发现气膜对水滴具有吹袭作用, 随着吹风比的增大, 水滴撞击系数逐渐减小, 吹风比为 0.24、0.53 和 1 时的最大水滴撞击系数与吹风比为 0 时的结果相比分别下降了 6.73%、10.95% 和 17.11%; 针对帽罩外形, 计算发现在吹风比、来流速度和水滴直径 3 个变量任意组合下 ($v < 70$ m/s), 水滴受气膜影响存在有限吹除、吹向后部和完全吹除 3 种效应, 拟合出左右临界水滴直径判据和 St 判据。实验结果表明: 该研究有助于加深对帽罩热气防冰的理解, 对开缝帽罩防冰结构设计具有一定的参考价值。

关键词: 实验; 防冰; 气膜; 水滴撞击; 数值模拟

中图分类号: TJ06 **文献标志码:** A

Study on Water Droplet Impingement Characteristics of Slit Cap

Li Fengmei, Cai Jinliang, Zeng Jia, Liu Miaomiao, Kang Hui
(Chongqing Hongyu Precision Industrial Group Co., Ltd., Chongqing 402760, China)

Abstract: In view of the influence of blowing ratio on the impingement characteristics of water droplets in the region behind the hood gap, the relevant criteria for the influence of air film on water droplets are proposed through calculation. It is found that the air film has a blowing effect on water droplets. The water droplet impingement coefficient decreases with the increase of the blowing ratio. The maximum water droplet impingement coefficients at the blowing ratios of 0.24, 0.53 and 1 decrease by 6.73%, 10.95% and 17.11%, respectively, compared with the results at the blowing ratio of 0. According to the shape of the cap, it is found that there are 3 kinds of effects on the water droplet under the influence of the air film, namely, limited blowing, backward blowing and complete blowing, under the arbitrary combination of the 3 variables of blowing ratio, incoming flow velocity and water droplet diameter ($V < 70$ m/s), and the left and right critical water droplet diameter criteria and St criterion are fitted. The experimental results show that the study is helpful to deepen the understanding of the hot air anti-icing of the hood, and has a certain reference value for the anti-icing structure design of the slotted hood.

Keywords: experiment; anti-icing; gas film; water droplet impingement; numerical simulation

0 引言

水滴撞击特性研究是进行飞机及发动机防冰技术研究的基础工作, 能够为飞机及发动机结/防冰提供理论依据^[1]。水滴撞击特性研究方法有实验和数值模拟 2 种, 水滴撞击特性的实验方法主要为染色法。刘丹阳等^[2]通过大量实验和研究将实验过程分为欠饱和区、平衡区和过饱和区, 得到平衡区比色值分布就得出局部水收集系数归一化结果。Papadakis 等^[3]提出一种适用于过冷大水滴的研究水滴撞击特性的实验方法, 获得了过冷大水滴和过冷小水滴的撞击特性参数。水滴撞击特性^[4-5]数值模拟常用算法为拉格朗日法^[6-8]和欧拉法^[9-11]。赵勇等^[12]发现飞机 3 维水平尾翼从翼根到翼尖局部水收集系数逐渐增加; 杨胜华等^[13]发现在多段翼后方存在水

滴无法撞击的遮蔽区。

鉴于冲击换热具有高对流传热系数, 常规热气防冰系统中通常利用热气射流冲击防冰部件内表面来提升加热效率^[14]。罗振兵等^[15-16]开展了合成热射流机翼除冰试验, 发现合成热射流方案能有效提高除冰效果, 利用外部射流直接加热待防护表面能影响近壁区的外部流场, 改变水滴运动轨迹和局部撞击特性。柯鹏等^[17-18]针对开缝支板的 2 维计算发现, 气膜缝位置和热气吹风比等都影响表面水滴收集规律, 但射流对物面水滴撞击特性的影响规律及形成原因还有待系统研究。

考虑到帽罩是飞机/航空发动机的典型防冰部件之一^[19], 为深入研究开缝结构水滴撞击特性的影响规律, 笔者以开缝帽罩作为基本构型, 进行水滴撞击实验与计算, 揭示吹风比对开缝帽罩表面不同

收稿日期: 2022-11-27; 修回日期: 2022-12-25

作者简介: 李峰梅(1991—), 女, 河南人, 硕士, 工程师, 从事弹药安全性、安定性仿真, 流体力学仿真研究。E-mail: 15696152183@163.com。

位置水滴撞击系数分布、最大水滴收集系数的影响规律，得到相关判据，为最终应用于结冰预测与防冰设计提供参考。

1 水滴撞击特性实验

1.1 实验原理及参数测量方法

水滴撞击特性实验主要由喷雾系统和视频采集系统组成。喷雾系统产生的雾化水滴随风机产生的气流均匀喷出，气动喷嘴有气路、液体管路 2 个入口，水路上连接了一个盛放有 0.5 g/kg 中性红溶液的水罐。

实验台设计如图 1 所示，喷雾系统将中性红溶液均匀喷洒到开缝帽罩结构上，开缝帽罩由于连接有气体管路，在喷雾系统作用的同时，开缝帽罩通过气膜缝对喷雾液滴具有吹袭作用，通过视频采集系统获取开缝帽罩表面不同位置染色情况，将色度值经过数据处理获得无量纲水滴撞击系数。

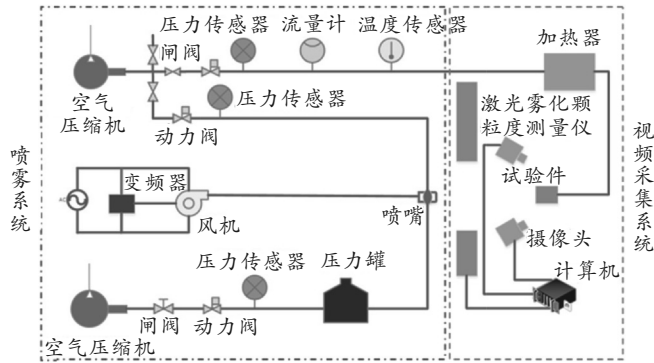


图 1 实验台设计

实验中主要测量参数为液态水含量、激光雾化水滴直径和风速，笔者给出了具体的参数测量和标定方法。

1) 液态含水量。

单位体积内管口喷出的实际水量即液体水含量，该值大小与实验件色度值直接相关，液态含水量越大，色度值越大。由于同一工况的实验需要进行 3 次重复性实验，不可能保证每次色度值完全相同，所以需要记录每次实验的液态含水量大小，作为实验件色度值参考依据。其测量原理如图 2 所示，风管气-液两相流从喷嘴喷出到撞击在实验件上的过程。

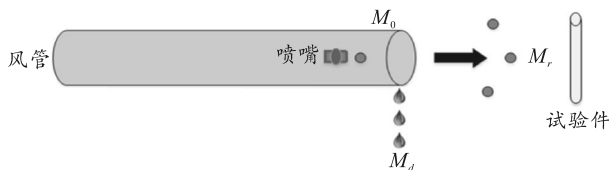


图 2 LWC 测量原理

其中：气动喷嘴喷出水量为 M_0 ；管口处由于管道内壁因积水而滴下的水量为 M_d ；管口喷出的实际水量为 M_r 。

液态水含量：

$$LWC = M_r / Q; \tag{1}$$

管口喷出的实际水量：

$$M_r = M_0 - M_d; \tag{2}$$

气动嘴喷出水量：

$$M_0 = (m_{w0} - m_{w1}); \tag{3}$$

管口处管道内壁因积水而滴下的水量：

$$M_d = (m_{c1} - m_{c0}); \tag{4}$$

t 时间内管口处气体的流量：

$$Q = (\pi d^2 / 4) vt. \tag{5}$$

式中：实验时间为 t ；管口直径为 d ；风速为 v ；实验开始时有压水罐的重量为 m_{w0} ；实验开始时盛放管壁滴下水的容器的重量为 m_{c0} ；实验结束时管壁滴下水的容器的重量为 m_{c1} ；实验结束时有压水罐的重量为 m_{w1} 。

2) 激光雾化水滴直径。

激光雾化水滴粒径测试仪主要是用来测量实验段液滴颗粒的粒径大小。如图 3 所示，LS-2000 分体式激光雾化水滴粒径测量仪的基本原理是颗粒对激光的散射。当一激光束打到被测颗粒上时，虽然激光在颗粒的作用下会向四周散射，但是其中散射光的能量中大部分是位于向前方向的。散射光能的分布情况与被测颗粒的粒径密切相关，该装置对于向前散射光能分布的测量是通过扇形多元光电探测器，对散射光能分布数据的处理是根据光的散射原理及反演算法得以实现的。采用通用的计算方法就可算出索太尔直径、体积平均直径和质量平均直径。

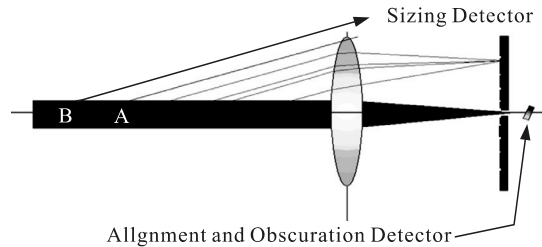


图 3 激光颗粒测量原理

水滴粒径的大小通过改变在气动喷嘴气路和水路的压力比来控制 and 调节，气路和水路压力比增大则水滴粒径减小，反之增大，使用 LS-2000 激光雾化水滴粒径测量仪标定。

3) 风速及流场均匀性。

通过变频器调节电机的频率来控制风速，用皮

托管智能数字风速仪进行标定。流场均匀性则通过测量圆形格栅网上多个测点的风速值进行标定。智能风速仪如图 4 所示。



图 4 智能风速仪实物

由于开缝帽罩结构较为复杂，且考虑需要收集染色情况，故需单独设计模具才能进行贴膜处理。开缝帽罩模具如图 5 所示。

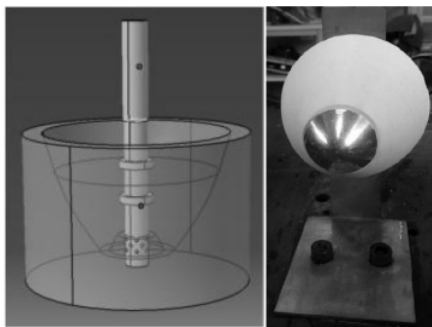


图 5 帽罩模型及实物

1.2 实验数据处理方法

通过水滴撞击实验能够获得实验件表面动态染色过程的视频，通过软件处理可得到实验件表面色度值时序信号的变化情况，即直接得到每一帧图片上实验件不同位置处的色度值，鉴于色度值本身与水滴撞击特性参数不具备关联性，需要进一步将原始数据进行归一化处理^[2]。实验数据处理共有 7 个步骤，如图 6 所示。

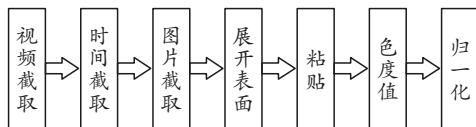


图 6 实验数据处理步骤

实验选择最常见的色度空间即 RGB 色度空间，用 R、G、B 3 个 8 位二进制(范围 0~255)分量的大小组合描述颜色。当 R、G、B 三分量俱为 0 时，为纯黑色；都为 255 时，为纯白色；RGB 色度空间没有表示亮度的值，而是由 R、G、B 三分量共同决定，偏向 255 时图像偏亮，靠近 0 时则图像偏暗。

气动喷嘴和 2 台摄像机位置如图 7 所示，在实验过程中 2 台摄像机距离远大于实验件本身尺寸；

因此，可以把摄像机光线近似为平行光线。

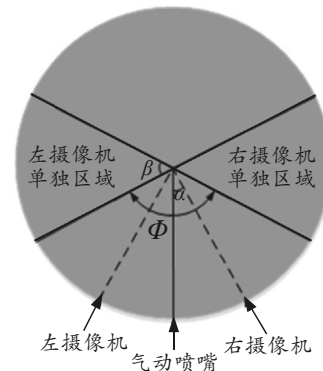


图 7 实验数据获取光线

通过分析视频数据的空间几何关系，把左右摄像机拍摄的视频中同一位置的像素点进行加权处理。图 7 中角度 ϕ 所对应的区域为 2 台摄像头都能拍摄到的区域，该区域的视频数据需要通过几何关系进一步加权处理，而该区域两侧为左、右 2 台摄像头单独拍摄的区域，可直接使用无需处理。实验采用了角度加权和线性加权相结合的方法，具体做法是根据对应的 2 个加权系数基数的大小确定各自的加权系数。

对实验件表面位置的归一化处理是根据几何外形确定。帽罩实验件在顶端处为 0，其他位置坐标均除以帽罩最大直径值，即最大直径处上表面处对应坐标值 1，下表面为 -1；开缝帽罩取缝后处为坐标零点，其他位置坐标均除以帽罩最大直径值，即最大直径处上表面对应坐标值 1。色度值归一化处理是以射流速度为 0 时的结果为基准，基准值定为 1，其他工况下结果均除以基准工况结果进行无量纲化。

1.3 实验结果及分析

开缝帽罩采用冲击换热形式进行防冰，热空气(射流)进入集气腔后通过环形缝与帽罩外部冷空气(来流)接触，直接对其进行加热，并且在远场来流压迫下向帽罩缝后表面偏转和冲刷。为研究不同吹风比下射流对水滴收集系数影响规律，开展相关实验。其中，实验温度为 20 °C，实验压力 101 325 Pa，每个工况均进行 3 次重复性实验，具体工况如表 1 所示。

表 1 实验工况汇总

实验工况	实验来流速度 / (m·s ⁻¹)	实验射流速度 / (m·s ⁻¹)	实验水滴直径 / μm	吹风比
1	21.74	0	22.03	0
2	21.74	21.87	21.52	1.00
3	21.74	11.65	21.20	0.53
4	21.74	5.23	22.78	0.24

吹风比是气膜冷却的常用术语，常用 M 表示，其意义是射流与来流的密流比：

$$M = \rho_f v_f / \rho_\infty v_\infty \quad (6)$$

式中： ρ_f 为射流密度； ρ_∞ 为来流密度； v_f 为射流速度； v_∞ 为来流速度。

开缝帽罩即采用冲击换热形式进行防冰，热空气(射流)进入集气腔后通过环形缝与帽罩外部冷空气(来流)接触，直接对其进行加热，并且在远场来流压迫下向帽罩缝后表面偏转和冲刷，对缝后表面结冰具有较好的抑制作用。工况的设置完全参考经典冲击换热结构环境参数，吹风比大小是 0~1 之间平均取值，研究不同吹风比下射流对水滴收集系数影响规律性。图 8 为工况 4 条件下开缝帽罩缝后区域的色度值分布，其他工况结果不再赘述。

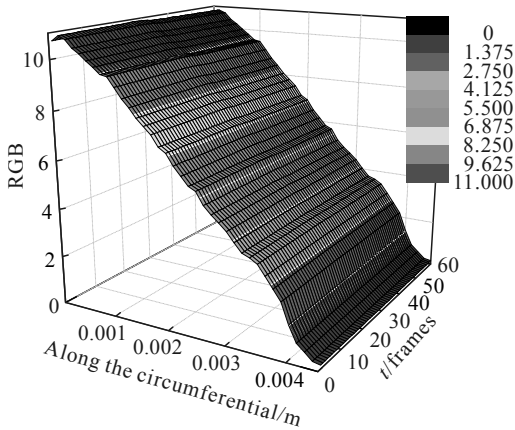


图 8 开缝帽罩工况 4 色度值

可看出色度值在靠近缝后有段不太明显的小范围增加，这主要是因为吹风比较小，染色溶液受到气膜影响较小。图中色度值分布并不是很平滑，这主要与石膏实验件的质量和视频处理过程有关。由于拍摄视频时光线波动和石膏实验件表面不够光滑平整，就会造成色度值呈现出小范围波动分布。

图 9 为开缝帽罩在 4 个工况下实验平均值(3 次重复性实验)的归一化结果。

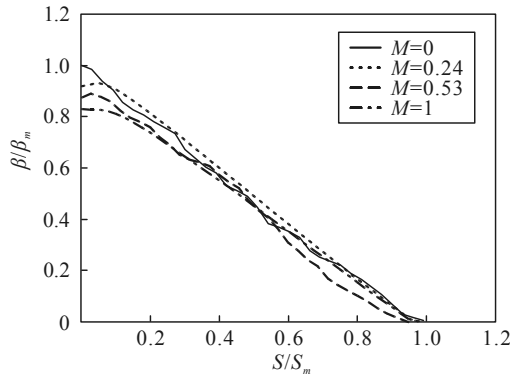


图 9 开缝帽罩实验结果统计

上图中以工况 1 的结果为基准值定为 1，对其他工况下结果进行无量纲化。明显看出气膜缝主要对缝附近水滴具有吹袭作用，由于气膜缝影响水滴向近壁侧运动，造成最大水滴撞击系数往后移而并非在缝处，且不同吹风比下气膜缝对水滴撞击系数的影响规律类似，均是对气膜缝附近的水滴影响较大。随着吹风比的增大，水滴撞击系数逐渐减小。

图 9 中观察到除吹风比为 0 外气膜缝附近最大，开缝处水滴收集系数随吹风比增大而变小，这主要是由于随着吹风比增大，气膜缝出口速度增大，造成动量较大，作用范围大；因此，水滴受到气膜缝影响增大，水滴受到气膜缝吹袭后更早的被吹向开缝帽罩后方，造成最大水滴撞击系数往前移，即靠近气膜缝位置移动。以吹风比为 0 工况下结果作为基准统计结果见表 2。

表 2 吹风比影响参数统计

吹风比	峰值位置(S/S _m)	气膜缝处下降/%	峰值下降/%
0.24	0.05	8.08	6.73
0.53	0.03	12.37	10.95
1.00	0.02	16.91	17.11

2 水滴撞击特性数值模拟

开缝帽罩水滴撞击特性使用 FLUNT 软件，几何结构和计算工况均与试验相同。采用 3 维结构化网格，使用 Standard k-ε 模型和标准型壁面函数计算。远场来流采用速度入口，出口采用压力出口。

一般防冰工况下可认为空气和水滴之间单向耦合，即只考虑空气流场对水滴运动的影响。基本假设为：1) 水滴运动过程保持常物性、无变形和破碎、无碰撞；2) 水滴撞击壁面后无飞溅；3) 忽略水滴与空气之间的传热传质；4) 只考虑作用在水滴上的空气阻力和重力。

笔者采用了考虑数值扩散的欧拉法水滴相控制方程：

$$\nabla \cdot (\rho_w \alpha V) = b \nabla^2 \alpha \rho_w; \quad (7)$$

$$\nabla \cdot (\rho_w \alpha V V) = \rho_w \alpha K (V_a - V) + \rho_w \alpha G. \quad (8)$$

式中： b 为数值扩散系数； ρ_w 为水滴密度； α 为局部水滴体积分数； V 为水滴速度矢量； V_a 为气流运动速度矢量； G 为作用在水滴上的重力加速度矢量； K 为空气-水滴作用因子，表达式为：

$$K = \frac{18 \mu_a f}{\rho_w D_w^2}. \quad (9)$$

式中： μ_a 为空气动力粘度； D_w 为水滴直径； f 为水滴阻力系数。

局部水滴撞击系数 β 是指微元表面上的实际水

收集量与该微元表面上最大可能的收集量之比，计算式为：

$$\beta = \frac{\alpha(V \cdot n)}{\alpha_{\infty} |V_{\infty}|} \quad (10)$$

式中 α_{∞} 为来流体积分数。

开缝帽罩的 3 维几何模型和网格如图 10 所示。

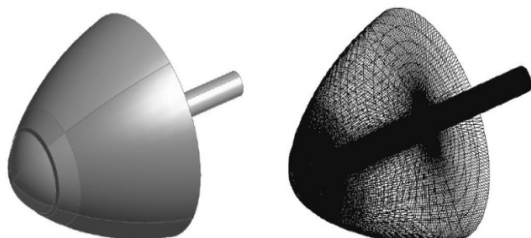


图 10 开缝帽罩 3 维计算模型及网格

2.1 喷管模型及简化

开缝帽罩环形孔喷管由 3 圈 6 个圆形孔组成，如图 11 所示为交叉错列分布，环形圆孔喷管的存在导致 3 维网格存在部分非结构网格，网格质量相对较差。为提高计算精度并减小计算量，故采用 2 维简化模型，简化为 2 维开缝结构。

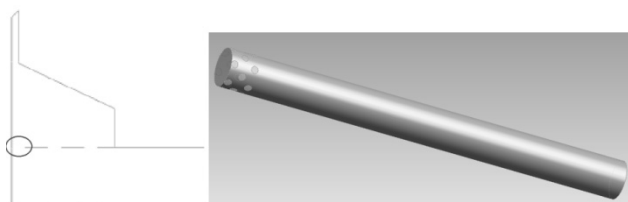
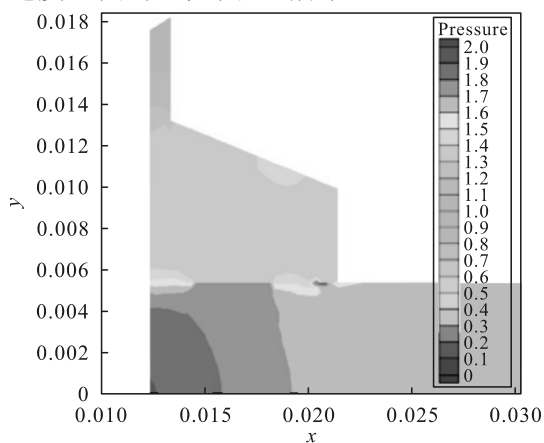
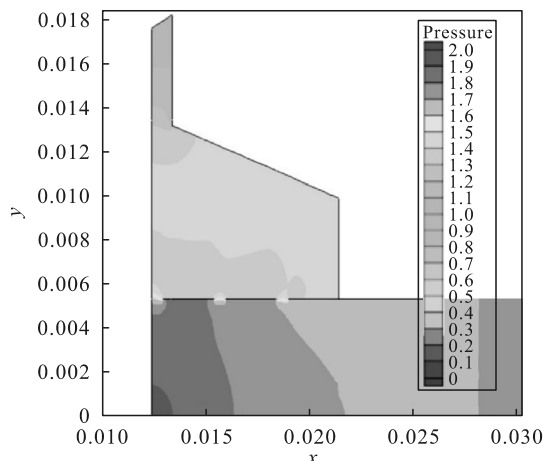


图 11 模型简化原理

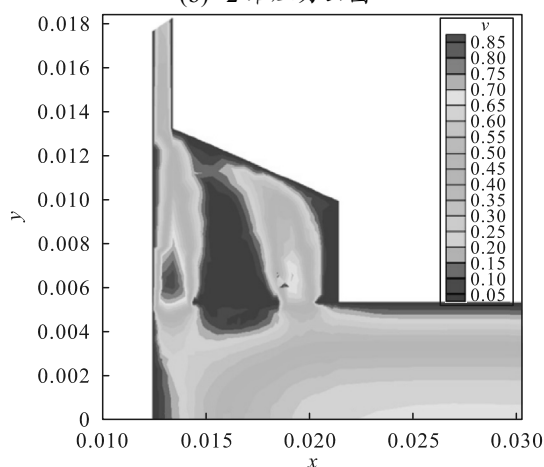
开缝帽罩旨在研究气膜缝对水滴撞击特性的影响，因此只要能够保证 2 维计算模型和 3 维计算模型在气膜缝出口处流场基本相同，就认为可用 2 维计算模型代替 3 维计算模型。具体的简化思路是保证 2 维开缝面积和 3 维开孔面积相同。喷管模型压力和速度云图对比如图 12 所示。



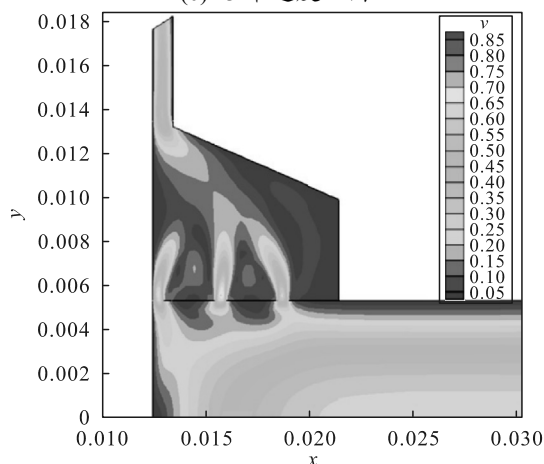
(a) 3 维压力云图



(b) 2 维压力云图



(c) 3 维速度云图



(d) 2 维速度云图

图 12 喷管模型压力和速度云图对比

经验证，2 维环形缝计算模型和 3 维环形孔计算模型在气膜缝出口处流场基本相同，故认为可用 2 维计算模型代替 3 维模型。

2.2 计算结果及对比分析

计算结果中以最大值作为基准，进行了归一化处理，与实验结果进行对比，如图 13 所示。

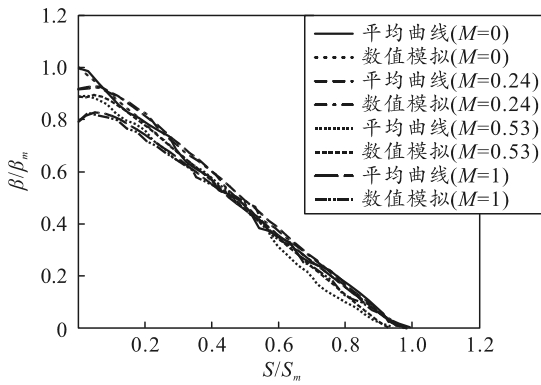


图 13 开缝帽罩实验结果与计算结果对比

上图观察到实验结果与计算结果吻合较好，但由于实验结果受到实验件本身光滑性的限制，所以局部部位吻合情况略差，但整体情况吻合较好，尤其是气膜缝附近，能够清晰观察到不同吹风比下气膜缝对水滴撞击特性的影响规律。经统计发现，当吹风比为 0 时，实验结果与计算结果的最大相对误差为 6.28%，当吹风比为 0.24 和 0.53 时，实验结果与计算结果相比最大相对误差分别为 5.51% 和 5.08%，当吹风比为 1 时，实验结果与计算结果的最大相对误差为 8.68%。综上，各个工况下，实验结果与计算结果吻合情况较好。

3 水滴受气膜影响效应及相关判据

针对笔者选取的帽罩外形，除吹风比外，来流速度和水滴直径均会对水滴撞击系数产生影响。通过计算发现水滴受到的影响共有 3 种，分别是水滴被吹向后方、完全吹除和有限吹除。为进一步探究这三者对水滴撞击系数的影响规律，选取相关工况进行计算，经过计算发现，在吹风比、来流速度和水滴直径这 3 个变量任意组合下，水滴受到气膜影响撞击到帽罩壁面共有 3 种情况，分别为有限吹除、吹向后方和完全吹除。补充计算点后，结果如图 14 所示。

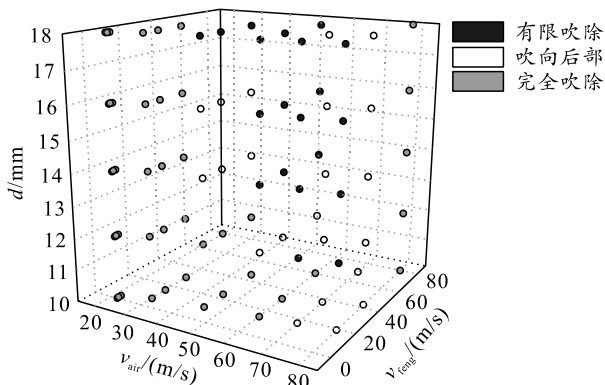


图 14 各个工况下水滴受到的影响效应

上图中： X 坐标为远场来流速度； Y 坐标为喷管入口速度； Z 坐标为水滴直径。从图中结果可看出，当水滴直径一定的情况下，随着来流速度增大，水滴从完全吹除状态过渡到吹向后方，随着水滴直径的增加，水滴惯性增大，水滴由完全吹除效应过渡到吹向后方效应，且最终为有限吹除效应。在来流速度小于 70 m/s 时，同一来流速度下，随着气膜缝出口速度增大，水滴受到的影响效应均相同，即水滴受气膜影响较小；但当来流速度大于等于 70 m/s 后，同一来流速度下吹风比不同，水滴受到气膜的影响效应就不同，此时主要由于来流速度较大，吹风比稍有改变，气膜缝出口速度就差别很大，从图中大来流速度工况的结果可以看出，水滴直径对水滴撞击的影响较小，即一旦来流速度和气膜缝速度给定，不同水滴直径下的水滴受到的影响效应均相同。

鉴于小来流速度 ($v < 70\text{m/s}$) 下，吹风比的影响可忽略，故给出来流速度与水滴直径的关系图，考虑无量纲参数，使用 Re 代替来流速度。图 15 在水滴直径与雷诺数关系曲线中给出气膜缝影响效应分区，从而得出左右临界水滴直径曲线。

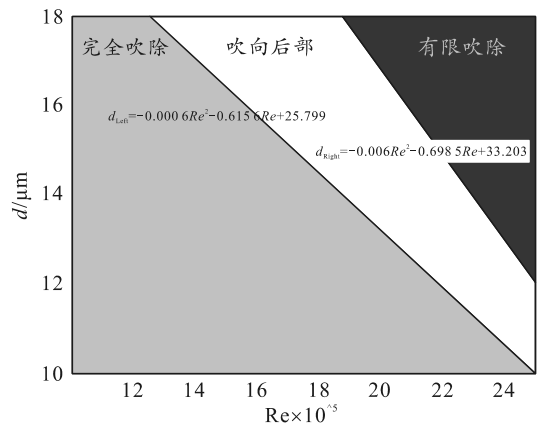


图 15 影响效应分区及水滴直径与雷诺数关系

图中：靠左区域为水滴被完全吹除；中间区域为水滴被吹向后方；靠右区域为水滴被有限吹除。当水滴直径小于左临界水滴直径即为完全吹除，水滴直径大于右临界直径即为有限吹除，介于两者之间即为吹向后方。

斯托克斯数 St 是水滴响应时间与空气响应时间之比，表征着水滴惯性作用和扩散作用的比值，它的值越小，水滴惯性越小，越容易跟随空气运动即撞击到壁面的水滴量越少；反之，水滴惯性越大，水滴运动的跟随性越不明显即撞击到壁面的水滴量越多，定义式如下：

$$St = \rho_w d_w^2 V_a / (18 \mu_a L) \quad (11)$$

给出了3种影响效应下对应工况的St数：当St数小于6时，即水滴惯性较小，容易跟随空气运动，所以水滴受到完全吹除效应；St大于8时，水滴惯性较大，更易撞击上壁面，所以水滴受到有限吹除效应；当St数介于二者之间时，水滴受到吹向后部效应。影响效应判据如表3所示。

表3 影响效应判据

效应	收集系数	St数判据	水滴直径d判据
完全吹除	$\beta=0$	$St < 6$	$d_w < d_{Left}$
吹向后部	$\beta=0$ 后增大最终减小为0	$6 < St < 8$	$d_{Left} < d_w < d_{Right}$
有限吹除	β 一定程度减小	$St > 8$	$d_w > d_{Right}$

由于笔者研究内容针对特定的帽罩外形展开，不适用于所有帽罩外形，其他帽罩外形的水滴撞击特性研究可参考本文中研究方法。

4 结论

开缝帽罩实验与计算结果的最大误差在8%以内，实验发现气膜缝对水滴具有吹袭作用，造成最大水滴撞击系数往后移，随着吹风比增大，最大水滴撞击系数减小。

开缝帽罩实验中当吹风比为0.24、0.53和1时，最大水滴撞击系数与吹风比为0情况下结果相比分别下降了6.73%、10.95%和17.11%。

针对笔者帽罩外形，吹风比、来流速度和水滴直径是影响水滴撞击特性的重要参数，计算发现在三者任意组合下($v < 70$ m/s)，水滴受气膜影响存在有限吹除、吹向后部和完全吹除3种效应，通过雷诺数与水滴直径的关系提出了左右临界水滴直径，且通过相关计算得到St判据。

参考文献：

[1] 李云单, 陆海鹰, 朱惠人. 航空发动机热气防冰结构的冲击换热特性研究[J]. 航空发动机, 2011, 37(5): 16-20.
 [2] 刘丹阳, 韩雅慧, 丁立, 等. 水滴撞击特性参数的动态图像测量方法[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 986-992.
 [3] PAPADAKIS M, RACHMAN A, WONG S C, et al. Experimental Study of Supercooled Large Droplet Impingement Effects[R]. NTRS-NASA, 2003.
 [4] WANG C, CHANG S, WU H. Lagrangian Approach for Simulating Supercooled Large Droplets' Impingement

Effect[J]. Journal of Aircraft, 2015, 52(2): 1-14.
 [5] 桑为民, 胡少华, 鲁天. 过冷大水滴动力学特性对结冰影响数值研究[J]. 空气动力学学报, 2016, 34(5): 549-555.
 [6] YANG H, KE P, YANG C. Analysis of Droplet Impingement Characteristics of Aero-Engine Nose Cone With Hot Air Film[C]//ASME Turbo Expo 2016: Turbomachinery Technical Conference and Exposition. IEEE, 2016: V001T01A023.
 [7] 申晓斌, 张志强, 林贵平, 等. 旋转部件复杂表面水滴撞击计算[J]. 空气动力学学报, 2016, 34(6): 709-713.
 [8] 郭宇翔, 刘荫泽, 董威, 等. 大水滴撞击壁面的动态特性数值模拟[J]. 空气动力学学报, 2016, 34(5): 573-580.
 [9] JUNG S, MYONG R. Numerical Modeling for Eulerian Droplet Impingement in Supercooled Large Droplet Conditions[C]//AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. AIAA, 2006.
 [10] KIM J W, DENNIS P G, SANKAR L N, et al. Ice Accretion Modeling using an Eulerian Approach for Droplet Impingement[C]//51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. AIAA, 2013.
 [11] 杜雁霞, 李明, 桂业伟, 等. 飞机结冰热力学行为研究综述[J]. 航空学报, 2017, 38(2): 25-36.
 [12] 赵勇, 杨新亮. 飞机水平尾翼水滴撞击特性及防冰热载荷计算[J]. 航空动力学报, 2012, 27(11): 2402-2407.
 [13] 杨胜华, 林贵平, 申晓斌. 三维复杂表面水滴撞击特性计算[J]. 航空动力学报, 2010, 25(2): 285-290.
 [14] 易贤, 王开春, 桂业伟, 等. 结冰面水滴收集率欧拉计算方法研究及应用[J]. 空气动力学学报, 2010, 28(5): 596-601, 608.
 [15] 罗振兵, 夏智勋. 合成射流技术——一种全新高效的流动控制技术[C]//第十届全国分离流、旋涡和流动控制会议论文集. 北京: 中国空气动力学学会, 2004.
 [16] 李玉杰, 罗振兵. 水滴结冰结霜及合成双射流除霜除冰实验研究[J]. 实验流体力学, 2016, 30(3): 27-32.
 [17] 柯鹏, 杨慧赞, 王俊凯. 航空发动机帽罩热气膜防冰的加热特性研究[J]. 航空动力学报, 2018, 33(3): 530-539.
 [18] 柯鹏, 张韵, 于广锋, 等. 航空发动机进口支板外部热气膜对水滴撞击特性的影响[J]. 航空动力学报, 2017, 32(3): 621-629.
 [19] 马辉, 陈维建, 孟繁鑫, 等. 发动机导向叶片热气防冰腔结构改进[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(1): 70-74.