

文章编号:1000-8055(2012)07-1555-07

基于粒子轨迹的结冰风洞收缩段 优化设计数值模拟

丛成华^{1,2}, 彭 强^{1,2}, 汪伏波², 符 澄²

- (1. 中国空气动力研究与发展中心 空气动力学国家重点实验室, 四川 绵阳 621000;
2. 中国空气动力研究与发展中心 设备设计及测试技术研究所, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 为了研究收缩段型面和液滴轨迹特性对结冰风洞流场品质与结冰试验效果的重要影响, 获得收缩段的优化设计参数, 采用数值模拟方法, 使用二维简化模型对 $3\text{ m} \times 2\text{ m}$ 结冰风洞收缩段的流场特性进行了研究. 对几种典型收缩曲线的流场进行了计算, 对比了收缩曲线对沿轴向压力分布、出口截面速度分布、不同粒径云雾粒子的极限释放距离及试验段入口云雾粒子分布的影响, 结果表明: 三次曲线与 x_m 为 0.4 的五次曲线不能满足流场合格指标, 其他曲线流场特性差别不大, 维氏曲线具有最小极限释放距离, 在收缩段出口, 三次曲线和五次曲线粒子包络面积最大, 综合比较, x_m 为 0.5 的五次曲线能有效兼顾流场均匀性、极限释放距离和收缩段出口粒子包络面积比.

关 键 词: 结冰风洞; 收缩段; 收缩曲线; 数值模拟; 粒子轨迹; 优化设计

中图分类号: V211.3

文献标志码: A

Numerical simulation on optimization design of contraction section in icing wind tunnel based on droplet trajectory

CONG Cheng-hua^{1,2}, PENG Qiang^{1,2}, WANG Fu-bo², FU Cheng²

- (1. State Key Laboratory of Aerodynamics,
China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China;
2. Facility Design and Instrumentation Institute,
China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang Sichuan 621000, China)

Abstract: Performance of icing wind tunnel's contraction section was investigated by numerical simulation. For several typical wall contours were provided by former researchers, the flow field calculation using simplified 2-D (two-dimensional) model was performed, and the pressures along the centerline and the velocity distribution at the test section entrance were obtained. The numerical simulation results show that all contraction curves can prevent the separation of boundary layers, and the difference of fluid dynamics parameters is negligible except for cubic curve and fifth power curve ($x_m = 0.4$) which can't provide a specified degree of uniformity. Then droplet trajectory was studied by numerical simulation when different diameter water-liquid that the droplets were released. The numerical results state droplet accretion using Witozinsky curve is less compared with that designed by other curves. By comparing of several contraction curves' effect on flow field and droplet trajectory.

收稿日期: 2011-08-24

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20120801.1438.201207.1555_017.html

基金项目: 空气动力学国家重点实验室基金(JBKY09040205)

作者简介: 丛成华(1979—), 男, 山东泰安人, 助理研究员, 硕士, 主要从事计算流体力学、风洞气动设计及流动控制研究.

E-mail: ech_sd@163.com

ry, it can be concluded that convergent section designed by fifth power curve ($x_m=0.5$) has higher efficiency.

Key words: icing wind tunnel; contraction section; contraction curve; numerical simulation; droplet trajectory; optimized design

为了满足飞行器结冰试验的需要,我国正在设计建设结冰风洞。结冰风洞运转时,收缩段对气流进行加速,从稳定段喷雾装置内射出的云雾粒子随气流加速在经过收缩段时,与收缩段壁面相互作用,部分云雾粒子会在壁面上沉积,从而改变收缩段型面,影响试验段流场。由此可见,在结冰风洞中收缩段不仅影响试验段流场品质,对试验段入口的云雾粒子特性也有非常重要的影响。在结冰风洞收缩段设计中,除保证气流品质外,还需要考虑其对喷雾粒子轨迹的影响,最大限度地降低粒子在收缩段壁面区域沉降的数量,提高粒子到达试验段的包络面积。

在美国航空航天局(NASA)结冰风洞调试使用中,也对收缩段云雾粒子特性进行过详细的研究,Reehorst 等采用数值模拟研究了收缩段壁面对粒子轨迹的影响,他们发现收缩段型面对试验段入口的粒子尺寸分布和液态水含量分布有很大影响^[1]。Hancir 等采用数值模拟研究了粒子经过收缩段后在试验段入口处液态水的含量分布情况^[2]。国内目前还没有开展收缩段对云雾粒子特性影响的相关工作。

收缩段的主要参数包括收缩比、收缩段长度、收缩段曲线形式等。考虑到云雾粒子的沉降特性和跟随特性以及试验段云雾粒子的分布特性,确定了收缩段的收缩比和长度,为此必须合理选择收缩段壁面型线。为设计能够满足流场品质和云雾粒子特性的收缩段,本文以结冰风洞收缩段为研究对象,通过数值模拟,对使用不同收缩段曲线的流场基本特性和云雾粒子沉降与分布特性进行研究,对收缩段优化参数进行初选,为结冰风洞收缩段型面的确定和喷雾系统设计提供技术支持。

1 收缩段型面设计

收缩段对提高试验段流场品质、降低试验段湍流度、提高速度均匀性、稳定性具有举足轻重的作用,因此要求气流在收缩段内不能发生分离,尤其是在进口和出口附近;在出口处,要求流场具有较好的速度均匀性、较低的湍流度^[3]。钱学森于 1943 年提出轴对称收缩管道设计的理论分析结果^[4],以后很多研究人员围绕着缩短管道长度、减

少边界层厚度、增大收缩比、改善出口气流品质等要求,提出了各种具体设计方法^[6-13]。目前,收缩段工程设计方法已经较为成熟,型面曲线可采用维托辛斯基曲线(Witozinsky curve,简称为维氏曲线)、巴切勒曲线(Batchelor curve,简称为巴氏曲线)、双三次曲线、三次曲线、五次曲线,风洞收缩曲线的选择要根据根据风洞性能的不同而确定。

1.1 尺寸确定

在确定收缩段尺寸时,以 $3\text{ m}\times 2\text{ m}$ 结冰风洞垂直截面为基准设定,该风洞收缩段长度为 13.5 m ,为进口当量直径的 1.46 倍,试验段长度为 6.5 m ,喷雾装置位于收缩段入口前 1 m 处的稳定段内。由于颗粒轨迹计算需要耗费大量时间,本文在计算中没有考虑三元收缩,仅考虑了垂直面上的二元收缩段,其入口高度为 8 m ,试验段入口高度为 2 m ,收缩段型面曲线如图 1 所示,维氏曲线和巴切勒曲线前段较陡,后段则很平缓,在接近喉道处收缩较慢,出口较长;其他几种曲线进口附近收缩要平缓得多,三次曲线和五次曲线在出口附近收缩较大,出口较短。双三次方曲线的入口和出口处收缩较慢,中间部位收缩较快。

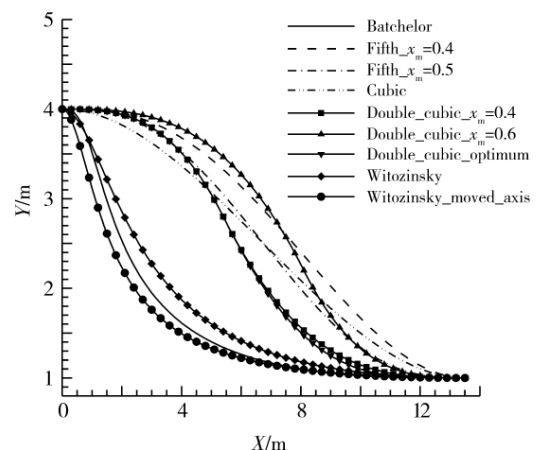


图 1 收缩段曲线

Fig. 1 Several kinds of contraction curve

1.2 收缩段性能评价指标

在进行模型选优时,使用了下面几个参数

速度不均匀度为
$$\frac{U_{\max} - U_{\min}}{U} \times 100\%$$

速度方差为 $\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (U_i - U)^2}$

动压场系数为 $\left[\left(\frac{U_i}{U} \right)^2 - 1 \right] \times 100\%$

压力损失系数为 $\frac{2(p_{in} - p_{out})}{\rho U^2}$

在比较速度不均匀度、速度方差、最大局部气流偏角时,选择收缩段出口 75% 中心区域。 U 为收缩段出口截面中心区域的平均速度, U_{max} 与 U_{min} 分别为中心区域的最大和最小速度, U_i 为中心区域每一点对应的速度, p_{in} 为所计算区域的入口总压, p_{out} 为收缩段出口总压, ρ 为流域内气流密度。按国军标要求,动压场系数合格指标为 $\leq 0.5\%$,先进指标为 $\leq 0.2\%$,局部气流偏角合格指标为 $\leq 0.5^\circ$,先进指标为 $\leq 0.1^\circ$ 。

极限释放距离指的是粒子靠近风洞稳定段壁面的某一距离,当粒子释放位置小于该距离时,粒子将与风洞壁面碰撞而无法到达收缩段出口。

粒子包络面积比指的是粒子到达收缩段出口时所包围的面积与收缩段出口面积的比值。

2 数值方法

采用结构网格,一般外形如图 2 所示。沿流向的横断面网格为 406(流向) $\times$ 201(法向)(下同)。在进行流场特性研究前,使用 811 $\times$ 201, 406 $\times$ 401, 811 $\times$ 401, 1 138 $\times$ 501 的网格进行了网格无关性研究,最终选择了本文所使用的网格,限于篇幅,这里不再赘述。

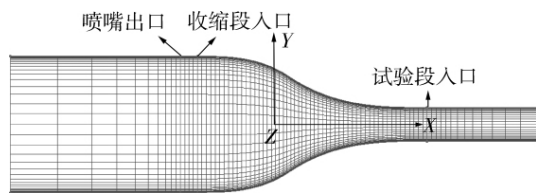


图 2 收缩段和试验段网格示意图

Fig. 2 Schematic for grid of contraction and test section

2.1 控制方程

控制方程为 N-S(Navier-Stokes) 方程。在二维坐标系中其守恒形式为

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial (F - F_v)}{\partial x} + \frac{\partial (G - G_v)}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

其中 t 为时间, Q 为守恒变量矢量, F 和 G 为无黏通矢量, F_v 和 G_v 为黏性通矢量。在流场求解中使用有限体积法,压力与速度的耦合方程采用 SIM-

PLE(semi-implicit method for pressure linked equations) 算法求解。湍流模型使用 $k-\epsilon$ 模型。

水滴运动方程为

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{18\mu}{\rho_d d_{eq}^2} \frac{C_d Re}{24} (u - u_d) + \frac{\rho_d - \rho}{\rho_d} g \quad (2)$$

其中 u_d 为水滴速度, ρ_d 为水滴密度, d_{eq} 为水滴当量球直径, C_d 为水滴阻力系数, Re 为绕水滴的相对雷诺数, 按照 $Re = \rho |u - u_d| d_{eq} / \mu$ 计算, u 为气流速度, ρ 为气流密度, μ 为气流的分子黏度, g 为重力加速度。在本文计算时,仅考虑了相间耦合对粒子轨迹的影响,未考虑粒子与气流的相对运动效应、粒子的湍流脉动扩散效应、喷雾粒子与气流的传热传质。

2.2 边界条件

给定压力入口边界和压力出口边界,壁面为无滑移绝热固壁。模拟粒子尺寸: $M_{vd} = 10, 30, 50, 100, 200, 300 \mu m$; 收缩段入口截面气流温度为 $-15^\circ C$; 试验段风速为 50 m/s; 收缩段入口相对湿度为 70%; 收缩段入口总压为 0.534×10^5 Pa; 喷雾粒子进入计算域的初始温度简化为收缩段入口截面温度; 粒子喷射速度为 0, 即完全跟随气流运动。

3 计算结果及分析

3.1 收缩段流场特性

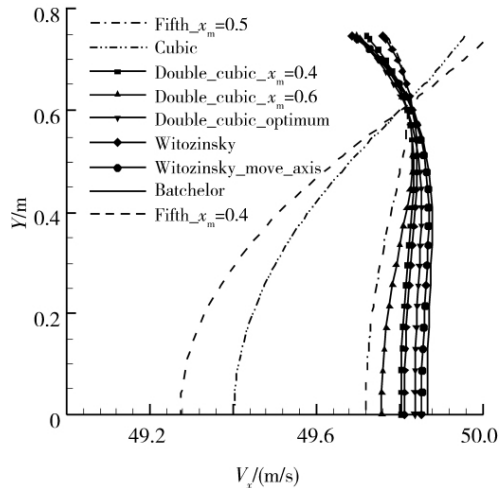
图 3 给出的收缩段出口处速度分布反映了流动的均匀性,在靠近壁面处速度出现过冲,而在中心部位速度反而较低,这与试验观测结果^[14]是一致的,其中尤以三次曲线和五次曲线为甚,其他曲线也存在这一现象,但不明显。

从中心线上给出的速度分布看,速度变化与收缩曲线的形状变化基本保持一致,在收缩段内,沿流向的速度都是单调增加的,巴氏曲线与维氏(含移轴)曲线在入口前气流已发生加速,在收缩段前部气流急剧加速,后部则较为平缓;三次曲线与五次曲线则刚好与之相反,前部加速缓慢,后部则急剧加速;双三次曲线介于它们之间,拐点前移能有效减缓后部的速度梯度,这也是优化双三次曲线的出发点^[10]。由此可以得出结论,为增加出口速度均匀性,收缩曲线后段的曲率应尽量减小。

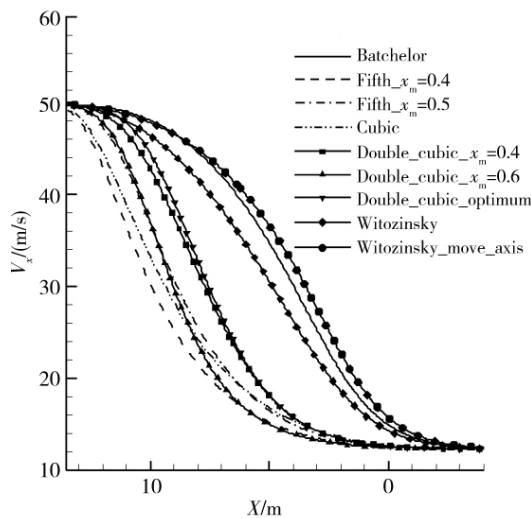
从图 4 可以看出,所有曲线在收缩段壁面入口和出口处都存在逆压梯度,这说明收缩段对流动的上下游都会产生影响。维氏(含移轴)曲线与巴氏曲线在进入收缩段前流动受到扰动导致静压上升,形成较大逆压梯度,其幅度较其他曲线大,

这是由于这 3 种曲线在前部急剧收缩的结果;之后气流加速,静压快速下降,在收缩段出口,五次曲线与三次曲线受到较大扰动,静压下降较大,这是由于这 3 种曲线在出口前收缩过快所导致的,其他曲线受到扰动较小.

分离校核,目前国内设计收缩段时大多采用 Stratford 分离准则^[12],本文使用壁面摩擦阻力系数查看分离情况,如图 5 所示,可以看到,巴氏曲线和维氏(含移轴)曲线在收缩段入口处摩擦接近于 0,面临较大的分离风险,这是由于快速收缩而



(a) 出口速度分析



(b) 中心线速度分析

图 3 使用不同曲线时收缩段出口和中心线速度分布

Fig. 3 Velocity distribution of contraction outlet and centerline with different contraction curves

由于结冰风洞的特殊性,在进行结冰试验时,稳定段内除蜂窝器外无法使用其他整流装置,收缩段来流条件较本文给定的均匀入口流恶劣,为此,收缩段必须具备一定的防分离能力.本文所采用模型的收缩角全角为 25° ,收缩比为 4,按照收缩管道设计准则,可能存在分离,特别是进口和出口处存在逆压梯度的区域,因此一般还需要进行

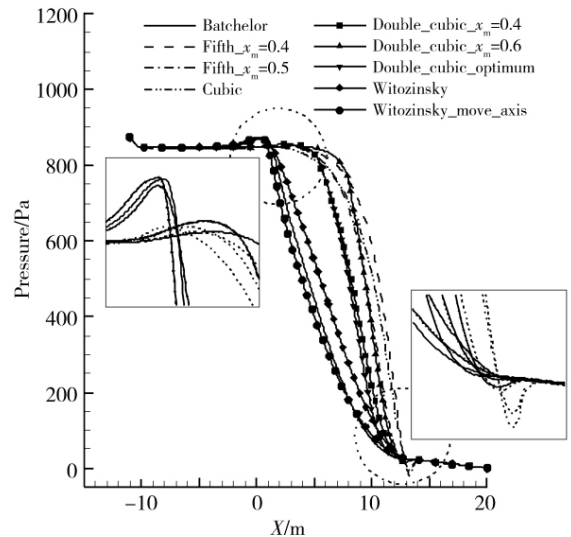


图 4 收缩段壁面沿程静压分布

Fig. 4 Static pressure distribution of contraction wall

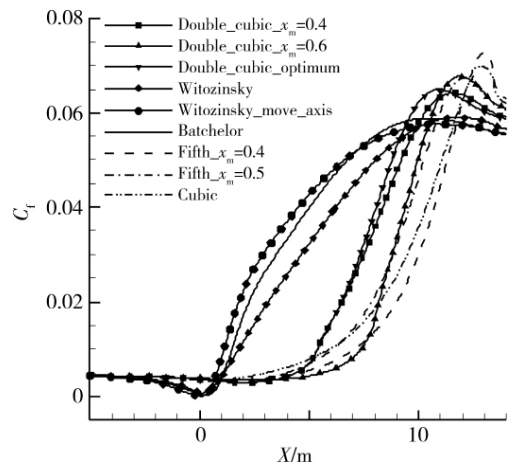


图 5 收缩段壁面沿程摩擦系数

Fig. 5 Skin friction coefficient of contraction wall

导致的,其他曲线在入口处过渡较为平缓,基本不存在分离的可能性.随后摩擦单调上升,壁面不会发生分离,在靠近出口处,所有曲线摩擦都有下降,三次曲线与五次曲线下落梯度更大,壁面切变层可能会诱导旋涡,但壁面上不会出现回流.为避免收缩段壁面发生分离,收缩段入口处的外形变

化应尽量平缓,为避免在出口处产生切变涡,出口处曲率应保持较大,从分离特性看,拐点靠近入口的双三次曲线是较好的.

边界层的厚度会影响试验段流动的均匀性与稳定性,为保证试验段流场品质,要求收缩段出口的边界层厚度应尽可能薄,从图 6 给出的边界层内速度分布可以看到,收缩段边界层的特性受壁型影响十分显著,巴氏曲线与维氏移轴曲线边界层最厚,三次曲线与五次曲线最薄,其他曲线介于两组曲线之间,可见进口处壁面曲线的曲率越小越有利于减少边界层厚度.

不同收缩曲线的出口截面的流场特性如表 1 所示,其中三次曲线与 $x_m=0.4$ 的五次曲线流场指标(动压场系数和局部气流偏角)未能达到合格指标. 维氏曲线的流场均匀性最好,平均湍流度最低,这是由于在靠近出口处,维氏曲线收缩最为平缓. 巴氏曲线的局部气流偏角是最小的,其它流场指标与维氏移轴曲线基本保持相同. 对双三

次曲线,拐点前移能有效提高流场均匀性,降低湍流强度,而五次曲线则相反,拐点前移大大降低了出口速度的均匀性.

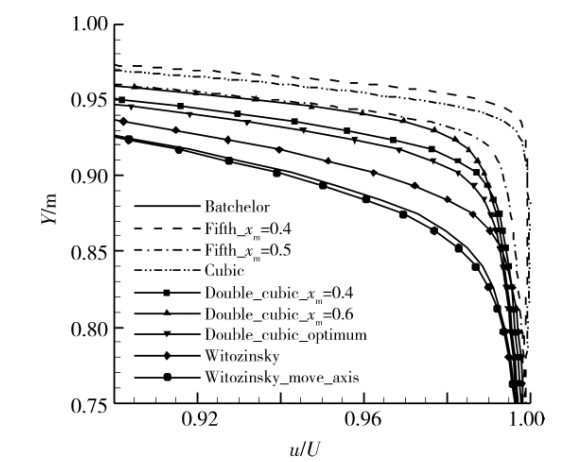


图 6 收缩段出口边界层速度分布
Fig. 6 Velocity distribution of contraction outlet in boundary layer

表 1 不同收缩段型面曲线的流场特性

Table 1 Flow characteristics of exit sections using different contraction curves

收缩段曲线类型	维氏	维氏 移轴	巴氏	三次	双三次 ($x_m=0.4$)	双三次 ($x_m=0.6$)	优化的双三次 ($n=5$)	五次 ($x_m=0.4$)	五次 ($x_m=0.5$)
速度不均匀度/%	0.163	0.370	0.364	1.118	0.228	0.272	0.322	1.493	0.203
速度方差	0.045	0.113	0.114	0.393	0.065	0.077	0.101	0.525	0.070
最大动压场系数/%	0.116	0.282	0.277	0.592	0.165	0.176	0.243	0.791	0.115
出口平均湍流度/%	2.050	2.300	2.280	2.000	2.330	2.660	2.470	2.240	2.230
压力损失系数	0.033	0.039	0.038	0.018	0.026	0.022	0.027	0.017	0.021
最大局部气流偏角/(°)	0.157	0.124	0.104	0.675	0.142	0.183	0.119	0.862	0.218

从流场损失看,由于巴氏曲线和维氏曲线(含移轴)前部收缩过快,导致损失偏大,双三次曲线的损失较它们稍好,五次曲线和三次曲线损失最小. 从湍流强度看,双三次曲线出口湍流强度最大,三次曲线与维氏曲线最低.

从流场特性分析,综合比较,双三次曲线、维氏曲线、 $x_m=0.5$ 的五次曲线各项性能指标较佳.

3.2 云雾粒子极限释放距离

这一部分研究了收缩段壁面对云雾粒子轨迹特性的影响,总结了云雾粒子特性对收缩段壁面的要求. 表 2 给出了数值模拟结果,对于粒径小于

$30\mu\text{m}$ 的水滴,所有曲线的极限释放距离基本保持相同,也就是说小粒径水滴的跟随性较好;当粒径大于 $50\mu\text{m}$ 时,不同粒径水滴的极限释放距离差别较大,维氏曲线的极限释放距离最小,其次是巴氏曲线和维氏移轴曲线,拐点位于 $x_m=0.6$ 的双三次曲线和拐点位于 $x_m=0.4$ 的五次曲线极限释放距离最大,这有两个原因,一是气流在前部未能尽快加速,二是其靠近出口段曲率变化过大. 可见,为减小粒子的极限释放距离,在收缩段入口应尽快加速粒子;在收缩段出口曲率变化应尽可能减小.

表 2 收缩段内不同粒径液滴的极限释放距离(单位:cm)

Table 2 Limited released-distance for different diameter droplets in contraction(unit:cm)

颗粒尺寸/ μm	维氏	维氏 移轴	巴氏	三次	双三次 ($x_m=0.4$)	双三次 ($x_m=0.6$)	优化的双三次 ($n=5$)	五次 ($x_m=0.4$)	五次 ($x_m=0.5$)
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	3	3	3	6	5	6	5	6	5
50	6	5	5	12	10	14	11	13	12
100	18	16	17	34	31	41	31	37	34
200	53	59	65	89	83	106	84	99	90
300	82	102	112	149	134	168	137	164	149

极限释放距离的给出对喷嘴布置位置给予了一定指导,例如,对于粒径为 $300\mu\text{m}$ 的水滴,如果选择流场特性较好的双三次曲线($x_m=0.4$),其极限释放距离为 1340mm ,也就是说在这个位置以下的粒子都将在收缩段壁面沉降并可能结冰,从而影响收缩段壁面型线,导致试验段流场受到影响.

3.3 试验段入口云雾粒子分布

粒子在试验段的分布对结冰试验精度有关键影响.图 7 给出了粒子在收缩段出口的包络面积比,可以看到,极限释放距离与收缩段出口的粒子分布并没有直接关系,当粒子直径小于 $100\mu\text{m}$ 时,所有收缩段壁面曲线在试验段入口基本都能有效覆盖模型区,对于大粒径水滴,不同曲线的包络面积比差别很大,三次曲线与五次曲线的粒子包络面积比最大,对于 $300\mu\text{m}$ 的水滴,拐点位于 $x_m=0.4$ 的五次曲线其包络面积比达到了 69% ,移轴维氏曲线和巴氏曲线的包络面积比最小,对

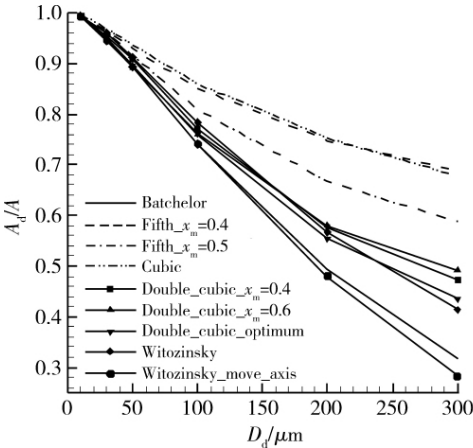


图 7 收缩段出口粒子包络面积比

Fig. 7 Covered area of droplets at contraction outlet

于 $300\mu\text{m}$ 的水滴,维氏移轴曲线仅占模型区的 28% .由此可见,收缩段出口的快速收缩能有效增加粒子的包络面积比.

从前面的结果可以看到,为满足流场特性要求,收缩段入口应保证不分离,出口应尽量平缓过渡,为减小极限释放距离,入口应快速收缩,为提高收缩段出口粒子分布面积比,出口应快速收缩,由此可见,在满足流场特性和粒子特性方面存在相互矛盾的要求,因此很难进行曲线优化.综合以上数值模拟结果和分析,在收缩比和收缩段长度固定前提下,选择拐点位于 $x_m=0.5$ 的五次曲线为结冰风洞收缩段的收缩曲线能够兼顾流场与粒子分布特性.

4 结 论

收缩段型面设计是影响收缩段流场特性和粒子沉降与分布特性的关键因素,本文对常用的 9 种收缩段型面曲线进行了模拟,根据前面的论述,可以得到下面的结论:

- 1) 三次曲线与 $x_m=0.4$ 的五次曲线不能满足流场合格指标,其他曲线流场特性差别不大.维氏(含移轴)曲线和巴氏曲线在入口存在较大逆压梯度,存在较大的分离风险.
- 2) 维氏曲线具有最小极限释放距离,维氏移轴曲线和巴氏曲线次之,但这三种曲线在收缩段出口的粒子包络面积比最小.
- 3) 使用三次曲线与五次曲线时,收缩段出口粒子包络面积最大,最大可达 69% ,其中拐点位于 0.5 的五次曲线收缩段出口 $300\mu\text{m}$ 粒子的包络面积比为 59% .
- 4) 选择拐点位于 0.5 的五次曲线能有效兼顾流场均匀性、极限释放距离和收缩段出口的粒

子包络面积比。

由于真实风洞来流参数并不理想,收缩段曲线存在加工误差等,都会使得实际情况更为恶劣,因此计算值总是偏好^[14-15],另外,本文对二元收缩段曲线进行了模拟,结冰风洞收缩段实际为三元收缩段,下一步将开展速度、温度、湿度等对云雾粒子特性的影响,研究云雾粒子粒径、温度(包括空气温度和粒子温度)沿程变化规律,将计算拓展到三元收缩段。

参考文献:

- [1] Reehorst A L, Ibrahim M. Investigation of water droplet trajectories within the NASA icing research tunnel[R]. NASA-TM-107023, 1995.
- [2] Hancir P, Anderson A, Loth E. Computations of droplet distributions in the NASA icing research tunnel [R]. AIAA-2000-0101, 2000.
- [3] 刘政崇, 廖达雄. 高低速风洞气动与结构设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2003.
- [4] Tsien H S. On the design of the contraction cone for a wind tunnel[J]. Journal of the Aeronautical Sciences, 1943, 10(2): 68-70.
- [5] Bossel H H. Computation of axisymmetric contractions [J]. AIAA Journal, 1969, 7(10): 2017-2020.
- [6] Chmielewski G E. Boundary layer considerations in the design of aerodynamic contractions[J]. Journal of Aircraft, 1974, 11(8): 435-438.
- [7] Mikhail M N. Optimum design of wind tunnel contractions [J]. AIAA Journal, 1979, 17(5): 471-477.
- [8] Batill S M. Aerodynamic design of high contraction ratio, subsonic wind tunnel inlets[R]. AIAA-84-0416, 1984.
- [9] Bell J, Mehta R. Contraction design for small low speed wind tunnels[R]. NASA-CR-177488, 1989.
- [10] SU Yaoxi. Flow analysis and design of three-dimensional wind tunnel contractions[J]. AIAA Journal, 1991, 29(11): 1912-1920.
- [11] Wolf T. Design of a variable contraction for a full-scale automotive wind tunnel[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1995, 56(1): 1-21.
- [12] 刘卫红. 轴对称收缩段设计研究[J]. 空气动力学学报, 1998, 16(2): 250-254.
- LIU Weihong. The design and study of the axisymmetric convergent section[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 1998, 16(2): 250-254. (in Chinese)
- [13] Fang F M, Chen J C, Hong Y T. Experimental and analytical evaluation of flow in a square-to-square wind tunnel contraction[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(3/4): 247-262.
- [14] 李国文. 风洞收缩段曲线气动性能研究[J]. 实验流体力学, 2009, 23(4): 73-77.
- LI Guowen. Study of the performance of contractive curve for the wind tunnel[J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2009, 23(4): 73-77. (in Chinese)
- [15] 李素循. 一个设计收缩管道的方法[J]. 力学学报, 1979(4): 367-373.
- LI Suxun. A method on the design of contraction ducts [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 1979(4): 367-373. (in Chinese)