

沙尘环境试验设备中颗粒浓度场的实验研究

马志宏 李运泽 张华 王浚

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 利用中科院寒旱所沙漠研究所室内风沙环境风洞, 采用激光粒子成像技术对沙尘环境试验设备中含砂气固两相射流在距喷嘴不同截面中心位置的颗粒浓度场进行了测量和分析研究, 并与拍摄的颗粒空间分布数码照片进行对比. 实验结果表明在距气固喷嘴约 1 m 处的截面上, 砂粒颗粒还没有扩散到整个空间内, 轴线附近的粒子较多, 而且大粒子多数处于下部区域, 只有在距喷嘴下游约 3 m 处粒子才基本扩散均匀, 从而可确定沙尘环境试验中试件的安放位置. 结论认为沙尘试验设备的加砂段应保持在 3 m 左右, 这样才能满足国军标要求, 从而为我国自行研制大型沙尘环境试验设备, 确定加砂/尘方法、参数、加料和试验段尺寸等提供了依据.

关 键 词: 沙尘; 环境试验; 粒子成像; 浓度场

中图分类号: TB 24

文献标识码: A **文章编号:** 1001-5965(2005)08-0884-04

Experimental study on particle concentration in sand and dust equipment

Ma Zhihong Li Yunze Zhang Hua Wang Jun

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Using the desert wind tunnel Laboratory of Institute of Desert Research in CAREERI of CAS, and applying laser particle imaging technology, the sand particle concentration in the different section from solid-gas nozzle on solid-gas two phase flow was measured and researched and contrasted with the photograph in the equipment. The experimental results indicate that the sand particles can not diffuse the whole section that is about one meter horizontally from the sand orifice and there are all most particles in the tunnel axes, at the same time those greater particles occur below the axes, but they can just diffuse equably the whole space in the section about three meters horizontally from the orifice. The conclusion was reached that the size of supplying was about three meters to accord with our nation military standard and it provided the gist to develop ourselves sand and dust experimental equipment, to confirm the way and the parameter of supplying sand and dust and to design the size of the supplying and the test segment.

Key words: sand and dust; environmental experiment; particle imaging; concentration

沙尘环境是引起许多军用武器装备, 包括直升机失效的一个重要环境因素. 广泛分布的沙尘环境, 对军用设备及直升机的部件、系统和机载设备的性能及可靠性具有严重影响. 对军用武器装备进行沙尘环境模拟试验是国家军用标准 GB150.12-86 中规定的实验项目. 我国还没有能满足包括直升机等大型试件的大型沙尘试验设

备, 因此建立满足国军标技术指标要求的沙尘模拟环境试验设备是当务之急. 其中颗粒浓度、粒径分布和撞击落尘是沙尘试验中需要研究确定的重要参数.

分析上述参数实际上就是研究气固两相流中颗粒速度场以及浓度场的变化规律. 国军标沙尘环境试验中规定, 含砂气固两相流在撞击试件时,

收稿日期: 2004-03-31

作者简介: 马志宏(1975-), 男, 山西朔州人, 博士生, mzh_bj@163.com.

砂粒的速度和气流流速基本相等,同时砂粒近似均匀地悬浮在气流中^[1]。这些参数反映了气固两相流复杂的空间特性,难以通过理论模型来描述,只有采用理论分析与实验研究相结合的方法,才能确定砂尘设备中的一些设计参数,如加砂方式和加砂段距离等。

1 实验装置及实验方法

本实验是在中国科学院寒区旱区环境与工程研究所沙漠研究所室内风沙环境风洞进行的。它是一座直流闭口吹气式低速风洞,实验段长 16.23 m,实验段矩形断面为宽 × 高 = 1.0 m × 0.6 m,进口轴线指示风速 $u = 1.5 \sim 35.0$ m/s,连续可调,风洞为木质框架结构,实验段两侧壁和顶部由装有钢化玻璃的活动窗户所构成,而风洞底部则由多层胶合板所组成。本实验系统如图 1 所示,风洞主风机是一台离心风机,砂尘颗粒气力输送的气源是一台空压机,通过带有球阀的料斗将砂料加入到输送管道内。其余包括料斗及输送管路都是塑料制品,而气固喷嘴为钢材制成,收扩型,收扩比 26/36,扩张角 30°。由空压机出来的压缩空气将料斗的砂料通过输送管路经气固喷嘴沿轴向喷入实验段主流内。

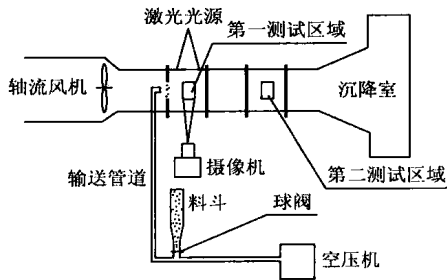


图 1 实验装置示意图

2 测量原理

激光粒子成像技术是在流场显示的基础上,利用近期高速发展的计算机图像处理技术而发展起来的一种新的流动测量技术^[2]。它突破了空间单点测量技术的局限性,从而实现了对整个流场的瞬态测量^[3]。在流场测量技术中信号的处理主要有粒子成像测速技术 PIV (Particle Image Velocimetry) 与粒子跟踪测速技术 PTV (Particle Tracing Velocimetry) 2 种算法^[4]。PIV 技术是基于图像相关,而 PTV 技术是基于颗粒相关,它由 2 幅图像的时间间隔计算出该颗粒的速度矢量,从而得到整个流场的速度分布。因此,在流场测试过程中,

在确定图像中各粒子的位置时,同时还可以得到粒子尺寸及分布的信息,比较而言基于颗粒相关的 PTV 技术更容易获得整个流场中颗粒的运动情况及颗粒的形状信息,因而 PTV 技术更适合于研究砂尘环境试验中稀相含砂气固两相流,其原理如图 2 所示。

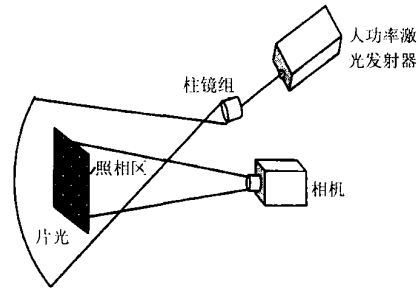


图 2 激光粒子成像系统原理图

其测定原理为:将颗粒浓度场置于激光片光源的照射下,用照相系统把所要研究区域的颗粒浓度场完全地记录在底片上,然后用基于颗粒相关的 PTV 技术处理该底片^[5],由图像的灰度梯度来进行粒子边界的识别,即从粒子图像的灰度中心点出发,计算与灰度中心相邻各点间的梯度值,然后又由这些点出发计算与其各自相邻点的灰度梯度值。按此方法,直到粒子的边缘为止,即粒子边缘点与背景的梯度值小于我们预先设定好的阈值,而且这个点与其相邻点的灰度值接近于背景的灰度。这样,找到各粒子的边界后,就可以计算出该粒子在图像中所占的面积的大小,也就是说包含有多少个像素点,根据单位像素点所代表的实际长度大小,可以换算出粒子的实际面积大小,然后将这个面积折算成相应的标准直径,即将不规则的粒子折算成标准的球形粒子的直径

$$D = \sqrt{\frac{4S_T}{\pi}}$$

其中, S_T 是不规则光斑的实际面积,单位为 m^2 ; D 是折算后球形粒子的标准直径,单位为 m 。

经过这样的计算转换,得到各粒子的标准直径,就可以将图像中的粒子按搜索的位置和尺寸大小分类,于是就得到了相应流场中颗粒大小及空间分布情况。

3 实验过程

本实验条件是按国军标进行的,所用的砂料全部是石英砂,密度为 2600 kg/m^3 ,直径为 $150 \sim 850 \mu\text{m}$,平均粒径为 $377 \mu\text{m}$ 。实验中风洞风速为 20 m/s ,气固喷嘴喷速为 25 m/s ,风洞中砂粒质量

浓度为 2.2 g/m^3 , 属稀相气固两相流。

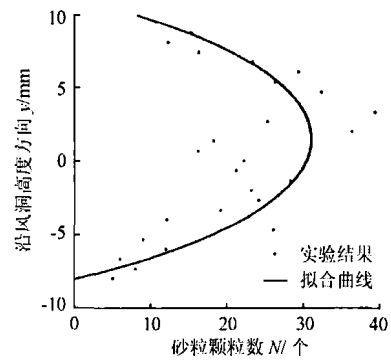
实验中对经气固喷嘴喷出的含砂粒的气固两相流和风洞来流混合后的气固两相流进行测试研究。实验开始前,将标有刻度的校准板置于观察区域,用 CCD 相机拍摄下来,用于标定 CCD 的像素与实际测量范围的换算关系。在测试时,用激光片光源照亮气固喷嘴中心处与流动方向平行的竖直截面,用 CCD 摄像机进行拍摄,拍摄区域大小为 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 。由于气固喷嘴直径仅为 36 mm ,为使该区域的流场观察区完全充满 CCD 相机的画面,将 CCD 相机放置在靠近风洞侧壁 0.83 m 距离的地面上,CCD 相机离地面高度为 1.4 m 。取距气固喷嘴 0.75 m 和 2.7 m 处 2 个处于风洞中心轴线处竖直截面进行 PTV 测试。由于 PTV 测试区域为距中心轴线上、下 10 cm 的方形区域,未能测试到整个风洞截面。为此,同时对激光照亮的整个竖直截面用数码相机进行拍照,通过照片来对结果进行补充说明,并且对这 2 处的 PTV 结果进行了处理。

4 实验结果及分析

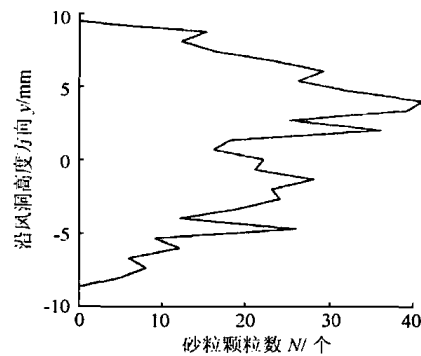
图 3a、图 4a 和图 3b、图 4b 分别给出距气固喷嘴 0.75 m 和 2.7 m 处 2 个 PTV 竖直测试截面上中心轴线处 $20 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ 区域内砂尘颗粒浓度沿风洞高度方向上的分布规律的拟合曲线及颗粒分布曲线,图 3c 和图 4c 是在 2 位置处对整个竖直截面上颗粒空间分布进行拍摄的数码照片。图 5 和图 6 上给出这 2 区域内颗粒粒径沿风洞高度方向的空间分布规律拟合曲线。

1) 从图 3a 浓度曲线中可看出颗粒浓度在轴线附近有一个峰值,且颗粒分布不均,呈现出上下部分少中间多的态势,说明在距气固喷嘴 0.75 m 处砂尘颗粒多数聚集在轴线中心位置附近,这是由于颗粒刚由喷嘴喷出,还没有来得及进行湍流扩散。由图 3b 可知,峰值位于轴线上部约 5 cm 处,沿风洞高度颗粒呈抛物线分布,即中间多上下两边少。而由图 3c 中也可以得出在轴线偏上位置砂粒较多的结论,而在风洞靠近顶部和底部区域几乎没有砂粒存在。由于本实验所用气固喷嘴的上游,有一排插入的加沙管,使得风洞内气流偏上,造成峰值偏于轴线上部;

2) 图 4a 表明,当含砂气固两相流运动到第二截面,即距气固喷嘴 2.7 m 处时,其峰值已基本消失,浓度曲线变得平坦。由图 4b 可知,颗粒沿风洞高度在拟合曲线附近波动,同时峰值已消失,颗



a 浓度变化拟合曲线



b 颗粒分布曲线



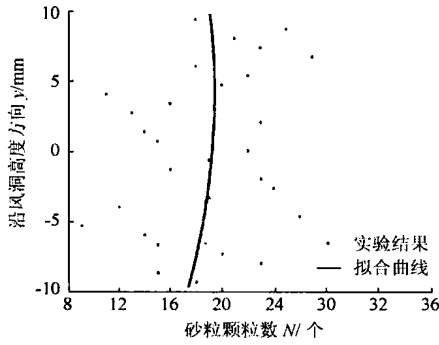
c 整个竖直截面上的砂粒数码照片

图 3 距喷嘴 0.75 m 处颗粒空间分布变化曲线与截面照片对比

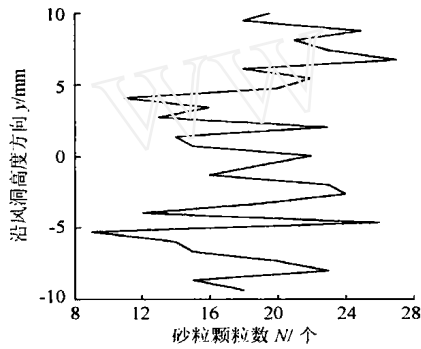
粒在各高度之间分布颗粒数相当,说明轴线上、下部分颗粒已扩散均匀。从图 4c 中也可以看出,颗粒几乎布满整个区域,说明颗粒的质量弥散是很强烈的,颗粒在距气固喷嘴 2.7 m 处已基本扩散开。这也证明了气固湍流流动中确实存在着固体颗粒的扩散现象;

3) 从图 5 砂粒粒径变化曲线中得出,在距气固喷嘴 0.75 m 处的截面上,中间粒径的砂粒集中在轴线部分,而粒径偏大的颗粒处于区域的下部,大小粒径的砂粒分布不均。而在图 6 中可以看出,当含砂气固流场运动到距喷嘴 2.7 m 处时,颗粒的粒径大小分布相对比较均匀。同时图 5 和图 6 这 2 幅图也显示出流场中小粒子占据多数,而大颗粒较少的特点。

以上充分说明,砂粒在距喷嘴 0.75 m 处轴线中



a 浓度变化拟合曲线



b 颗粒分布曲线



c 整个竖直截面上的砂粒数码照片

图 4 距喷嘴 2.7m 处颗粒空间分布变化曲线与截面照片对比

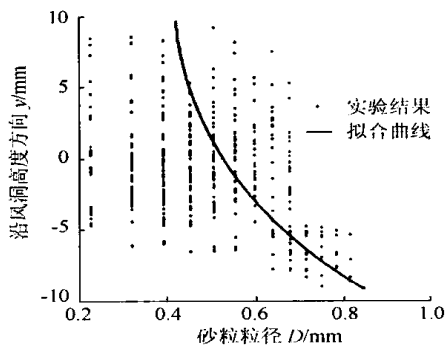


图 5 距喷嘴下游 0.75m 处颗粒粒径随风洞高度浓度变化曲线

心附近浓度最大,且大粒径颗粒区域下部最多,而在距喷嘴 2.7m 处这 2 个现象已基本消失,颗粒在整个区域分布相对比较均匀,而且大粒径的颗粒也散布于整个空间区域内,符合砂尘试验的要求。

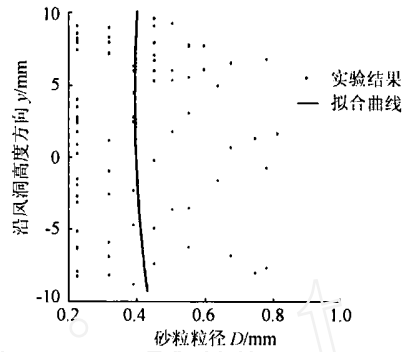


图 6 距喷嘴下游 2.7m 处颗粒粒径随风洞高度浓度变化曲线

5 结 论

1) 采用激光粒子成像技术能在环境风洞中对含砂气固两相射流流场中颗粒浓度场进行测定,结果理想,这是环境风洞中传统实验手段无法实现的;

2) 对于含砂气固两相射流,在距气固喷嘴约 1m 处的截面上,砂粒颗粒还没有扩散到整个空间内,轴线附近的粒子较多,而且大粒子多数处于下部区域,在距喷嘴约 3m 左右的截面上粒子基本均匀扩散,从而可确定砂尘环境试验中试件的安放位置;

3) 为我国自行研制大型砂尘环境试验设备奠定了基础,也为气固两相流理论的发展提供了补充。

参考文献 (References)

[1] GB 150.12-86, 军用设备环境试验方法——砂尘试验[S]
GB 150.12-86, Environmental test of military equipment sand——dust test[S] (in Chinese)

[2] 杨廷相,王天友,赵 慧. 内燃机缸内流场的全场测试实验研究[J]. 内燃机学报, 1998, 16(1): 42~49
Yang Yanxiang, Wang Tianyou, Zhao Hui. Studies on instantaneous full-field measurement of air flow in internal combustion engine[J]. Transactions of CSICE, 1998, 16(1): 42~49 (in Chinese)

[3] Yang Y X, Liu C W, Liu J, et al. Study on spatial characteristics of the irr-Cylinder flow field in an I. C[R]. Engine Using PIVSAE Paper NO. 982632, 1998

[4] Adrain R J, Hason R K, Prased A K. Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics [J]. Ann Rev of Fluid Mech, 1991, 23: 261~304

[5] 吴飞雪,董守平,时铭显. 激光粒子成像技术测定旋风分离器内颗粒浓度场的实验研究[J]. 石油大学学报(自然科学版), 2000, 24(6): 72~76
Wu Feixue, Dong Shouping, Shi Mingxian. Experimental study on particle concentration distribution in a cyclone by particle image technology[J]. Journal of the University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2000, 24(6): 72~76 (in Chinese)