

尖劈障碍物对射流扩散流场影响

王芸芸 吴建华 谢军龙

(武汉职业技术学院, 武汉, 430074)

(华中科技大学, 武汉, 430074)

(Tel:13929199814, Email:wangyyhyn@163.com)

摘要: 为了研究障碍物形状对射流流场影响, 本文对尖劈障碍物受限射流流场进行了数值模拟, 通过改变轴对称尖劈障碍物冲击角度和冲击长度来分析流场速度和压力分布情况。结果表明冲击尖劈障碍物的受限射流流场可以分为自由射流段、冲击射流段和壁面射流段; 随着冲击角度增加, 被分流两股流体不再汇合, 壁面射流段变得明显; 随着冲击长度增加, 障碍物后端等于大气压段冲击长度增加, 使得后端平行与冲击面射流流体长度增长, 射流变得稳定。

关键词: 冲击角度 冲击长度 壁面射流 尖劈障碍物

THE INFLUENCE OF SHAPE OBSTACLES AT THE JET FLOW OUTLET UPON THE PROPERTY AND STABILITY OF ITS FLOW FIELD

Wang Yunyun Wu Jianhua Xie Junlong

(Wuhan Polytechnic, Wuhan, 430074)

Abstract: In order to study the influence of different shape obstacles on jet flow field, the property and stability of its flow field is studied by simulation in this paper. The distributing of velocity and pressure in the flow field is analyzed by changing the angle and the length of the axisymmetric obstacles. The results have shown that the flow field of the confined jet in this paper can be broken down into three pieces: free jet, impact jet, and wall jet. The split-flow divided by the obstacle can not converge together along with the obstacle angle increasing and the appearance of the wall jet become obvious. the length of the force on the obstacle equal to the barometric pressure is increasing by the obstacle length and the property of the jet become more stable.

Key words: the angel of the obstacle, the length of the obstacle, wall jet, wedge obstacle

0 前言

射流按照出流空间范围分为自由射流和受限射流两类。所谓的受限射流是相对于自由射流而言的, 是指流体自喷嘴流出后受到外界壁面、障碍物等的影响与限制而使得流动形式被迫改变的射流^[1]。本文研究的对象即为有障碍物存在受限射流。

流动空间受到障碍物限制而迫使流动形式发生改变与扩散的射流现象是非常普遍的, 包括短距起飞和垂直降落型飞机产生的射流、发动机尾气排气射流等。目前对于受限射流冲击障碍物的研究, 主要集中在障碍物为平面、球形和柱形的研究: 葛其明等指出平面冲击射流由三部分(自由射流段、壁射流段和射流冲击区)组成^[2]; 陈庆光等对半封闭空间内射流倾斜冲击平板的流场进行了数值分析, 得到最大湍动能和最大压力随着滞止点的移动而移动^[3]; 冯喜平等对某固体火箭发动机存在球形障碍物的射流流场进行了数值模拟^[4]。

由于射流冲击尖劈障碍物时具有很高的局部传热率, 因而目前对于射流冲击尖劈障碍物的研究主要集中在换热性能方面, 包括 Rahimi 等通过实验研究换热率与尖劈的角度和射流出流的雷诺数之间的关系^[5]。而目前对于射流冲击尖劈障碍物流动性能的研究比较少, 但流场流动性能对声场、换热场的性能都有影响。本文通过改变尖劈障碍物的冲击角角度和冲击边长度, 以二维 N-S 方程和标准两方程模型为基础对受限射流流场速度分布和压力特性进行了数值模拟研究^[6]。

1 数值模拟控制方程与模型

射流冲击尖劈障碍物模型属于湍流模型，湍流是一种高度复杂的非稳态、带旋转的不规则流动。

考虑到障碍物尺寸对射流流动区域的影响，本文选取了如图 1 所示的区域计算模型。图 1 和图 2 为射流冲击尖劈障碍物流动区域（大小为 500mm*600mm）和障碍物（对称放置于喷嘴轴线处）与喷嘴的位置关系图。其中射流介质为空气，射流喷嘴直径 d 为固定值 5mm，射流出口速度为 v_{in} 为 30m/s，尖劈障碍物的冲击角度 α 和冲击长度 L 是改变的，此外，由于在自由射流流场中距喷嘴 $5d$ 处为射流混合区与过渡区的分界处^[7]，此处流场流动性能变化很大，因此将障碍物尖端 A 与喷嘴出口轴向方向的距离设置为 $5d$ 。

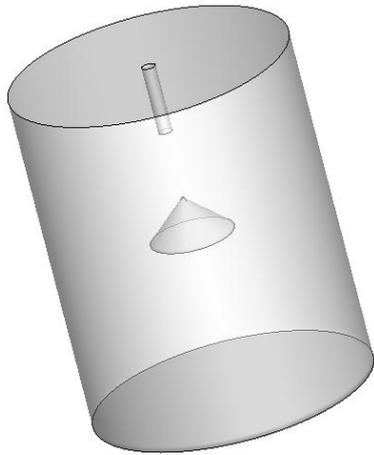


图 1 受限射流计算区域模型图

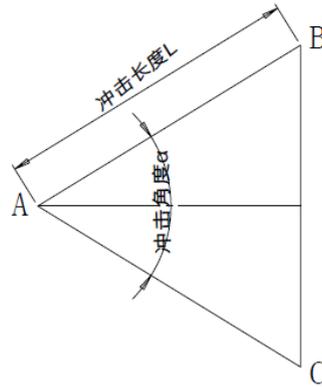


图 2 尖劈障碍物形状图

当自由射流的流场中存在障碍物时，其不同形状和尺寸的障碍物对流场的影响作用是不同的。本文选取了轴对称的尖劈障碍物（图 2 为尖劈障碍物尺寸图，其中角 A 冲击角度，AB、AC 为冲击长度），分别从障碍物的冲击角度和冲击长度两个角度，对受限射流流场中存在障碍物的情况进行了数值模拟计算。

2 尖劈障碍物冲击角度 α 对射流扩散流场影响

2.1 变冲击角度尖劈障碍物模型建立

如图 2 所示，三角形 abc 为尖劈障碍物模型的截面图，其形状为等腰三角形。由图 2 可知，冲击角度 α 大小与冲击长度 AB、AC 值都是变化的。若 AB、AC 的长不变，边 BC 将随着角 A 发生变化。通过改变角 A 使得冲击角度值发生改变，从而使得 BC 的长度发生改变。其中在不同的冲击角度下所对应的 BC 的长度如表 1 所示（冲击长度 AB 大小为 20mm）。

表 1 各冲击角 A 所对应的边 BC 长度分布表

角 A 度数 (度)	20	40	60	80	90	100	120	140	160
边 BC 的长 (mm)	6.9	13.7	20	25.7	28.3	30.6	34.6	37.6	39.4

由表 1 可以看出，随着冲击角 A 的增加，边 BC 的长度是缓慢增加的。本文选取具有代表性四个冲击角度（20 度、60 度、90 度、140 度）作为模拟研究对象。各模拟对象的形状如图 3 所示。

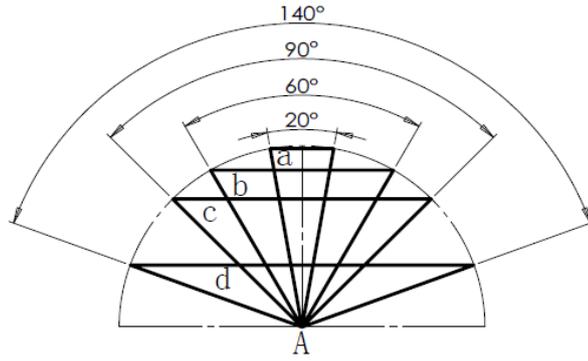


图3 变冲击角度下的障碍物形状比较图

2.2 模拟结果与分析

图4为受限射流（尖劈障碍物冲击角度为90度，冲击长度为20mm）喷嘴出口与尖劈障碍物之间的区域轴向无量纲压力与速度分布图，图中 $X=x/d$ ， $V=v/v_{in}$ ， $P=p/p_a$ ， d 为喷嘴出口直径， v_{in} （30m/s）为喷嘴出口流体流速， p_a 为尖劈障碍物尖端A处的压力。

分析图4速度分布曲线可知，射流核心区（无量纲速度 $V=1$ 区域）受到障碍物的影响减为 $4d$ ，在 $4d\sim 5d$ 区域流体流动速度迅速降为零；分析图4压力曲线图可知，压力大小的变化趋势与速度变化趋势是相反的，随着与喷嘴的距离增加，射流中心线轴向上的压力也逐渐增加，在尖劈障碍物尖端A达到了最大值。由于受到障碍物的影响在喷嘴出口与射流障碍物之间的区域压力与速度都发生了突变。

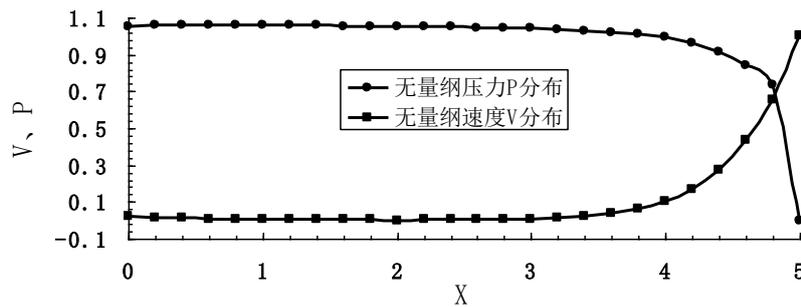


图4 喷嘴出口与尖劈（ $\alpha =90$ 度， $L=20\text{mm}$ ）之间区域轴向无量纲压力与速度分布

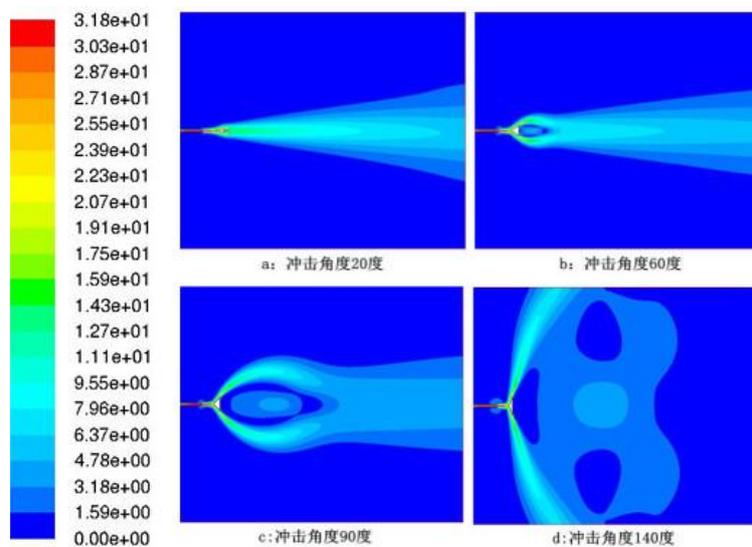


图5 尖劈障碍物冲击角度对射流流场流速影响比较图

图5为当尖劈障碍物的冲击角度不同时，受限射流流场速度分布图。由图5可知当自由射流流体冲击尖劈障碍物时，射流流体在障碍物尖端A处被分为两股，且都沿着障碍物壁面AB、AC向下游区域运动。但

尖劈障碍物冲击角度不同时射流流体分布不同。当冲击角度为 20 度（如图 5-A 所示）时，被分流的流体的速度方向偏向于 x 轴，因而当流体流过障碍物后，流体将继续向 x 轴下游移动，流体区域接近与自由射流区域；由图 5-B 可知，当冲击角度变为 60 度时，随着垂直拦截边 BC 的增长，当流体流过障碍物后在 BC 边的背部将形成流速接近于零的区域，由于障碍物背面的阻挡作用，射流流体对此处的空气流没有吸卷作用，因而速度接近与零；由图 5-C 知，随着冲击角度增大变为 90 度，射流流体流过障碍物后，射流流体将继续沿着冲击面 AB、AC 所在方向运动并席卷此方向周围的流体，射流的流动区域发生了很大的改变，同时在拦截边 BC 背部所形成的零速度流体区域的范围也扩大；由图 5-D 可知，当冲击角度为 140 度，射流流体在经过尖劈障碍物后与自由射流流体运动形式不同没有沿着 x 轴向下运动，而是被分为两股射流流体沿着冲击面所在方向向前运动，没有发生两股流体的再次汇合。

3 尖劈障碍物冲击长度 AB、AC 对射流扩散流场影响

3.1 模型选择与建立

此外，本文在冲击角度 α 不变的情况下，改变冲击长度 L，从而模拟不同冲击长度下障碍物对射流流场特性影响的研究。

结合图 2，选择冲击长度 AB、AC 的长度为 10mm、20mm、40mm 的情况进行模拟，其尺寸图如图 6 所示。

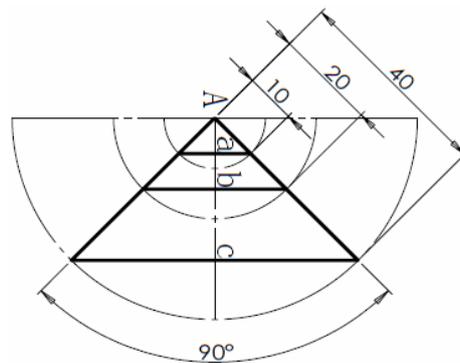


图 6 变冲击长度下的障碍物形状比较图

3.2 流场计算结果与分析

通过改变尖劈障碍物的冲击长度 AB 和 AC，所得受限射流流场的分布图如图 7 所示。其中 A、B、C 表示冲击长度分别为 10mm、20mm 和 40mm 时，冲击角度为定值 90 度时的受限射流流场分布情况。

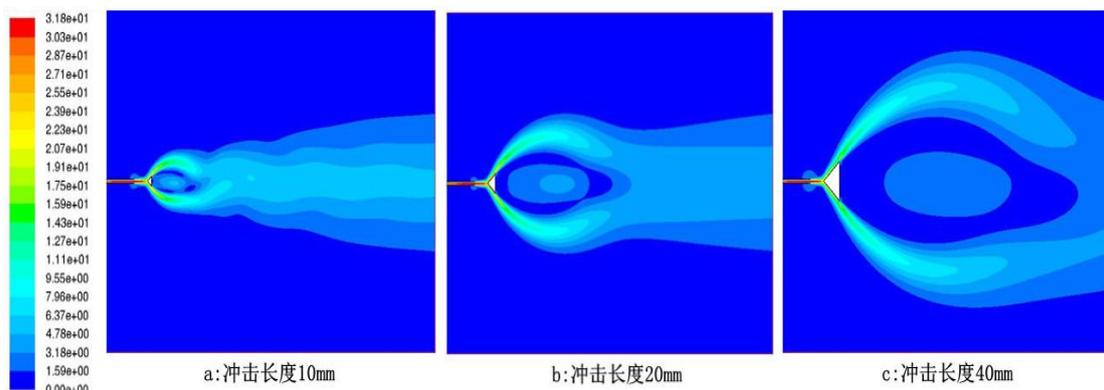


图 7 尖劈障碍物冲击长度对射流流场流速影响比较图

分析图 7 可知射流冲击轴对称的尖劈障碍物时，在尖劈障碍物的冲击角度不变（90 度）的情况下，射流流场被破坏的程度随着冲击角度的增加而加强。当冲击长度为 40mm 时，原有的射流被分为两股子射流，方向为沿着各自的冲击面所在的方向，此时的受限射流流场区域被分为初始自由射流段、冲击射流段及沿着冲击面的壁面射流段。

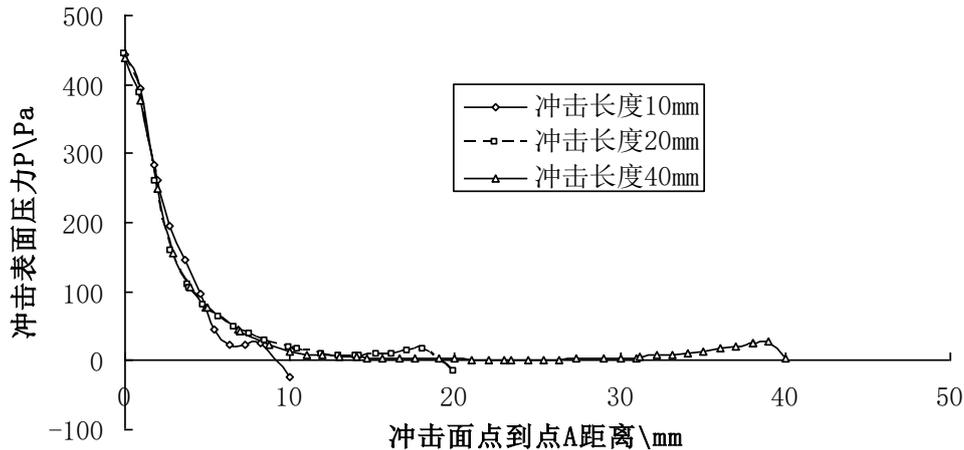


图 8 不同冲击长度下的障碍物冲击面上的压力分布图

由图 8 可知三种不同冲击长度的冲击面上的压力都随着冲击点到障碍物尖端的距离的增加而减小，这是由于流体在流过障碍物的过程中流速是逐渐变大的。在冲击面初始段表面压力是大于大气压力，因而冲击面表面的射流流体将沿着冲击面向外流动，并吸卷周围的流体；随着冲击点到障碍物尖端的距离增加，冲击点处的压力将减下为大气压力，此处冲击点处的射流流体将沿着平行冲击面方向流动；同时，在冲击面末端的冲击点压力存在突变的情况，这是由于障碍物的尺寸突变引起的。

同时由图 8 可知，三种不同长度的冲击面的初始压力分布大小与趋势基本相同，并且都最终降为大气压并保持不变；冲击长度长的障碍物其冲击面后端等于大气压段的长度增长，这样在空间上可以使得速度平行其表面的射流流体长度增长，在时间上可以使得被分流的流动形式更稳定。

4 小结

1. 由模拟所得射流冲击尖劈障碍物的受限射流速度分布图，可以将此射流分自由射流段、冲击射流段及壁面射流段。

2. 当射流冲击长度为定值（20mm），射流冲击角度较小时，被分离两股射流流体将在射流流场下游（障碍物后面的位置）再次汇合，此时自由射流流场结构被破坏的程度较小；当冲击角度为 140 度时，被障碍物分离的两股射流流体将沿着各自冲击面的方向流动，形成壁面射流。

3. 当障碍物冲击角度（90 度）不变时，冲击面初始段压力大小与趋势基本不变，都达到大气压力；但随着冲击长度增长，冲击面末端等于大气压力的长度增长，各个冲击面上的射流流体在空间上保持与冲击面平行长度增强，在时间上使得被分流流体壁面射流形式变得稳定。

参考文献

- [1] Philip J, Dennis K. Beamformed Flow-Acoustic Correlations in a Supersonic Jet [J]. AIAA Journal, 2010, 48(10): 2445-2453
- [2] 葛其明, 姚朝晖, 何枫. 超声速欠膨胀冲击射流流场振荡的数值模拟[J]. 推进技术, 2004, 25(1): 7-10
- [3] 陈庆光, 徐忠, 吴玉林, 张永建. 平面倾斜冲击射流场的数值分析[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(2): 237-239
- [4] 冯喜平, 赵胜海, 李进贤, 唐金兰. 固体火箭发动机射流中存在障碍物时的流场分析[J]. 推进技术, 2009, 30(4): 396-399
- [5] Rahimi M, Irani M. Experimental study of slot jet impingement heat transfer on a wedge-shaped surface [J]. Heat and Mass Transfer, December, 2012, 48(12): 2095-2101
- [6] 朱昊明, 赵平辉, 陈义良. 声激励下自由射流的涡量场[J]. 工程热物理学报, 2012, 33(10), 1811-1814
- [7] Chen Y, Skokova K. Computational Analysis of Arc-Jet Wedge Tests Including Ablation and Shape Change [C]. 10th AIAA/ASME Joint Thermo physics and Heat Transfer Conference, Chicago, 2010