

文章编号: 1672-9897(2008)03-0031-05

高压水射流结构的红外热像特征

宫伟力, 赵海燕, 安里千

(中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院, 北京 100083)

摘要: 对高压水射流进行了红外探测, 提取了射流红外辐射温度的二维与三维特征, 研究了湍射流的涡旋结构、射流分段结构及其时间演化特征。结果表明: 射流大尺度涡结构呈现不规则的椭圆形, 随着射流雷诺数增大, 涡的尺度也不断增大; 拟序结构中配对的大涡并非严格对称, 其强度不同、涡的精细结构也不同; 大涡可由尺度、强度、旋向不同的子涡组成; 射流初始段的红外辐射温度呈线性分布、主体段呈随机分布、过渡段呈出突变的特点。

关键词: 水射流; 红外热像; 图像处理; 湍流; 拟序结构

中图分类号: TD921.5; O358 文献标识码: A

Structural characterization of thermal infrared images from high pressure water jet

GONG Wei-li, ZHAO Hai-yan, AN Li-qian

(School of Mechanics, Architecture & Civil Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: High pressure water jet was detected by infrared thermographs. Infrared radiation features of water jet were extracted in two and three dimensional configuration. Structures of vortex, scale of the jet segment zones and their temporal evolution process were investigated. The results demonstrate that the large vortex configuration takes a shape of irregular ellipse and its scale is increasing along with increasing of the Reynolds number; the pairing vortices in coherent structure are not strictly symmetrical in shape, their intensity and inner structure are also different. At the same time, the large eddy may consist of sub-eddies with different scale, intensity and vortex vector. Investigations also show that the infrared thermal temperature distribution in zones of establishment flow of the jet is linear, in zones of established flow random, in zones of transition flow mutation-al.

Key words: water jet; infrared imaging; image processing; turbulent flow; coherent structure

0 引言

高压水射流是指在较高的压力下, 由尺度较小的喷嘴所产生的高速射流。现代高压水射流技术的喷嘴直径一般在 2mm 以下, 最小可达到 0.2mm 左右, 流速为高亚声速至高超声速。因此, 细孔口高速水射流的流场结构必然与大孔口射流存在特殊性。红外探测技术, 是利用红外辐射原理, 通过测取物体表面的红外辐射能, 将被测物体表面温度分布转换为红外热图(灰度图或伪彩色图)^[1], 被动式测量(不需要示踪粒子), 因而可以反映流场的真实信息。文献[2]利用红外探测观测了流动混合层界面失稳后出现的复

杂旋涡现象; 文献[3]利用红外热成像技术对流体边界层的分离、边界层转换进行研究; 文献[4]利用红外热像仪显示大截面的空气流动。这些实验研究对认识湍流的结构及其机理具有重大意义。

笔者利用红外热成像仪对不同压力下的细孔口射流流场进行红外探测, 利用图像处理技术提取射流红外温度场的特征来研究细射流涡结构的产生及演化规律, 分析高压细射流红外温度场的结构及动力学特征。将红外热成像技术应用于高压水射流研究, 对深入认识高压、细孔射流的流场结构与流动规律具有重要意义, 为复杂流动问题的实验研究提供了一种新方法。

收稿日期: 2007-05-31; 修定日期: 2008-04-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2002CB412700)

作者简介: 宫伟力(1955-), 男, 辽宁本溪市人, 博士, 副教授。研究方向: 流体力学、试验力学、图像处理与识别。

E-mail: gwl@cumt.edu.cn

1 自由射流流场红外探测实验

高压水射流红外探测系统如图1所示。射流介质为纯水,经高压水泵加压后通过喷嘴直接射入大气中,水射流喷嘴直径为1mm。射流的压力由调压阀调节,在0~40MPa的范围内连续增加射流压力,加压的同时利用红外热成像仪进行实时探测。射流出口速度 v (m/s)与压力 p (MPa)关系可以近似表达为^[5]: $v = 44\sqrt{p}$ 。

实验的红外探测装置为TVS-8100MKⅡ型红外热像仪,温度灵敏度为0.025℃,图像分辨率120×160,图像采集速度可60帧/s。探测实验时红外摄像仪镜头到射流的距离为:1225mm,视角为13.6°×18.2°,实际视图大小为292.1mm×392.4mm的矩形范围,单个像素占有的实际物理尺寸为2.45mm。为减小周围环境对水射流红外辐射的影响,射流喷嘴放置在一个封闭的暗箱内,纸箱表面涂成黑色,在正对热像仪镜头处开一个正方形孔进行拍摄。红外热像仪的拍摄频率设置为1帧/s。

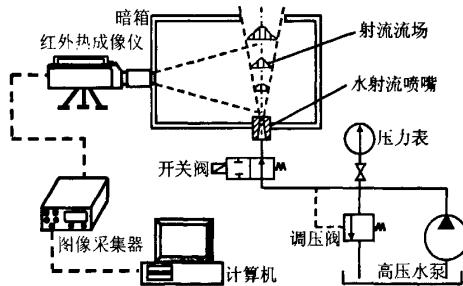


Fig.1 Experimental setup of water jetting infrared detection system

红外辐射容易被物质所吸收,对于薄雾来说,长波红外辐射更容易通过。因此,红外探测可以透过射流表面的水雾,探测射流的内部流场。红外辐射通量与温度之间的转换关系^[6]为

$$M = \epsilon\sigma T^4$$

式中: M 为光谱辐射出射度(W/m^2); σ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$); ϵ 是灰体的光谱发射率,灰体的发射率均为小于1的常数; T 是绝对温度(K)。由此可以实现对射流温度场,也就是能量场的测量。由速度场与能量场的耦合关系,利用图像处理技术,可以根据红外热图对流场结构特征及动力学特征进行分析。

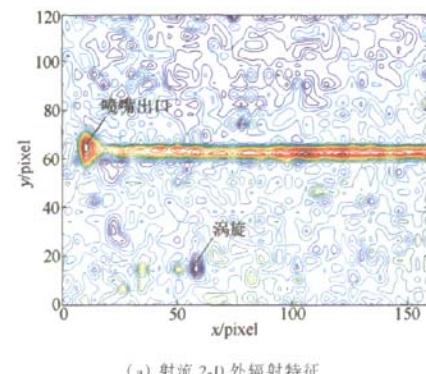
红外热成像系统是一种二维平面成像系统,测取水射流的红外辐射温度场。在固定时刻 t_0 拍摄的红

外热像 $f(x, y) = f(x, y, t_0)$ 为一个的矩阵,表达了此时刻射流红外温度的空间分布,矩阵的元素为像素(Pixel),表达了流场在该点的红外辐射温度的大小;红外热成像仪进行连续拍摄的结果是红外热像的时间序列 $f(x, y, t)$ 则表达了射流温度场随时间的演化过程。

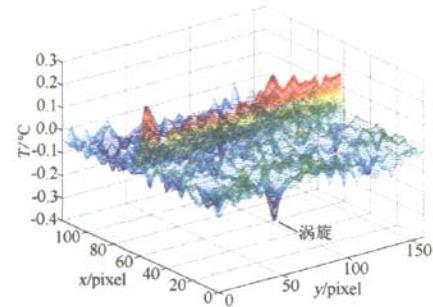
2 射流红外热辐射规律

2.1 射流红外温度场的时间演化规律

红外热像数据经去噪、滤波处理后,利用二维与三维绘图技术,得到射流红外辐射温度场的平面与三维空间涡旋分布特征如图2所示。



(a) 射流 2-D 外辐射特征



(b) 射流 3-D 外辐射特征

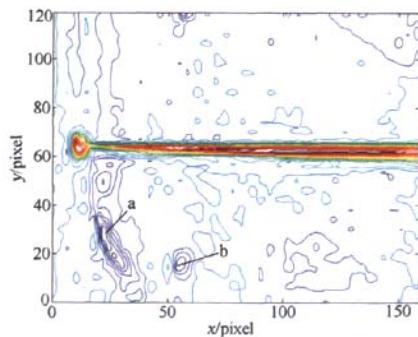
Fig.2 IR features of water jet ($p = 2\text{MPa}$)

图2(a)为水射流在第100s(压力 $p = 2\text{MPa}$,速度 $v = 63.2\text{m/s}$,雷诺数 $Re = 4.82 \times 10^4$)时的二维红外等温线图。图中左下角的(0,0)点为射流的像素原点,横纵坐标分别表达了射流场的像素位置,喷嘴的像素坐标为(12, 62)。图中清晰地给出了射流的空间发展过程及其边界,由于流速较低,射流边界呈平行线层流状态,在射流轴心线上能量出现了间断,此时射流能量整体较低,射流与介质(空气)温差较小,射流处于层流状态。左下方的单个涡旋,其等温线呈闭合轨

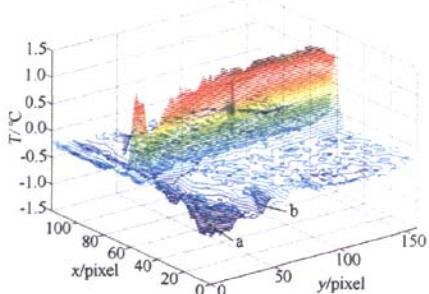
线,中心为红外温度的极小点。图2(b)为该时刻流场的三维等温线图,温度分布呈随机波动状,射流对周围环境空气的影响较小。在图2(b)中可以看到与图2(a)相对应的单个涡旋的三维结构。高压细射流的流场尺度较小,由点涡模型可知^[7],距点涡中心越近,流速越高,因而红外温度也越低,图中涡中心处的色调最深,为红外温度的局部极小点,也就是能量的最低点。

图3(a)为第128s的射流二维红外等温线图($p = 6\text{ MPa}$, $v = 109.5\text{ m/s}$, $Re = 8.36 \times 10^4$)。此时射流转变为湍流, $Re = 8.36 \times 10^4$ 可以认为是转换雷诺数。图中射流边界沿轴线发展成为散射形状,射流外边界上的卷吸作用在图中表现为大小尺度不同的等温线区,射流出口外边界下方出现了大尺度涡旋a,漩涡呈不规则椭圆形,其下游有一个稍小的涡b,这是大尺度涡沿空间运动发展的结果。图3(b)反映了射流场中涡的空间发展情况,从三维角度验证了喷嘴附近剪切层外侧大尺度涡的存在及发展。图3(b)的三维等温线图中可以清楚地看到大尺度涡a以及较小涡b的空间结构。

图4给出了射流第641s的二维红外等温线图及



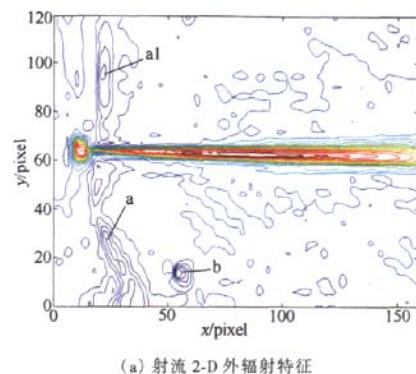
(a) 射流 2-D 外辐射特征



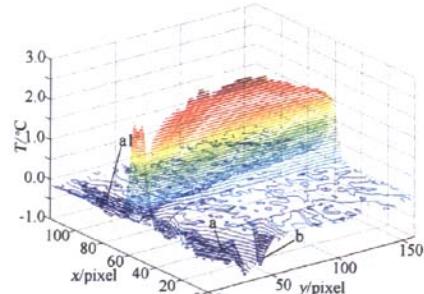
(b) 射流 3-D 外辐射特征

图3 射流红外辐射特征($p = 6\text{ MPa}$)
Fig.3 IR features of water jet ($p = 6\text{ MPa}$)

三维空间等温线图($p = 30\text{ MPa}$, $v = 244.95\text{ m/s}$, $Re = 1.87 \times 10^5$)。图中射流存在所谓“拟序结构”,即在射流出口处上下两侧剪切层外出现相互配对的大尺度涡旋结构。与图4(a)相比,图4(a)中左下方的大涡a的尺度增大了。由于大涡a与a1的旋转方向不同,因此,其成像尺度也存在差别。在大涡a下游有较小尺度涡b仍然存在,其尺度也有所增大。随着射流速度的增加,拟序结构中配对的大涡在向下游运动的过程中逐步破裂成较小尺度的涡,使流场的湍流度增大,从图2(b)~4(b)的三维等温线图中可清楚地看到这一现象。



(a) 射流 2-D 外辐射特征



(b) 射流 3-D 外辐射特征

图4 射流红外辐射特征($p = 26\text{ MPa}$)
Fig.4 IR features of water jet ($p = 26\text{ MPa}$)

图5(a)、(b)、(c)分别给出了图4中涡a、a1以及涡b的红外温度局部放大梯度图。由图(a)可见,大涡a实际上是由两个椭圆形子涡组合而成,其中一个子涡紧靠射流喷嘴出口下方,中心的坐标为(21, 51),涡心梯度向量为 $\nabla T = (U, V) = (0.027, 0.0013)$,模 $\|\nabla T\| = 0.02763$ 。另一个子涡位于射流出口下方稍远处,呈现更加不规则的椭圆形,其中心位于(33, 12),涡心梯度向量为 $\nabla T = (-0.0277, 0.00591)$,模 $\|\nabla T\| = 0.0283$ 。由此可见,大尺度涡a实际上有着细致的子涡结构,而且子涡的旋向及强度不相同。

图(b)为射流出口处上方的大尺度涡 a1, 形状呈较为规则的椭圆形, 涡心位于(24, 101)处, 涡心的梯度向量为 $\nabla T = (0.0805, 0.0105)$, 模 $\|\nabla T\| = 0.081$, 其强度要大于下方的大涡 a。由此可知, 射流出口处上下两侧出现的大尺度涡结构并非是严格对称的, 并且有着精细结构, 其涡的强度也不相同。图(c)给出了

涡 b 的梯度矢量图, 涡 b 自射流开始就稳定地出现, 除去其尺度略有增大外, 形状始终呈较为规则的圆形, 涡 b 的中心位于(56, 15)处, 其中心处红外辐射温度梯度矢量为 $\nabla T = (0.145, -0.0198)$, 模 $\|\nabla T\| = 0.1463$, 其强度大于喷嘴出口处的两个大涡 a 及 a1。

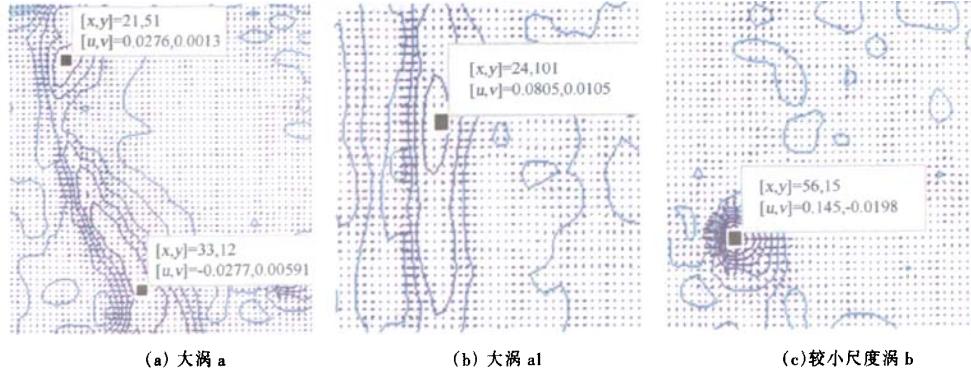


图 5 涡结构红外辐射温度的梯度矢量图 ($p = 26 \text{ MPa}$)
Fig. 5 Gradient vector of IR temperature for vortices ($p = 26 \text{ MPa}$)

2.2 射流分段结构的红外辐射规律

根据自由湍射流理论, 射流的速度场自射流出口分为初始段、主体段、以及两者之间的过渡段。初始段定义为由喷嘴出口至等速核端断面之间的射流区; 主体段是完全发展的湍流区; 过渡段是一个不太长的混合段。

等速核内的温度分布可作如下分析: 不可压缩粘性流体的能量方程为^[8]:

$$\rho c \frac{DT}{Dt} = \operatorname{div}(k \operatorname{grad} T) + \varphi + \rho q \quad (1)$$

式中, T 为温度; k 为热传导系数; ρ 为水的密度; c 为流体比热; q 为辐射热强度, q 为常数。在等速核内流速为常数, 因此有 $u = v = \text{const}$; 另外由于等高压细射流的宽度尺度很小, 故可认为 $T = T(x)$, $\partial T / \partial y = 0, \partial T / \partial x = \text{const}$; 等速核内为无粘性流体的热流运动, 耗散函数 $\varphi = 0$, 于是等速核内的能量方程可写为:

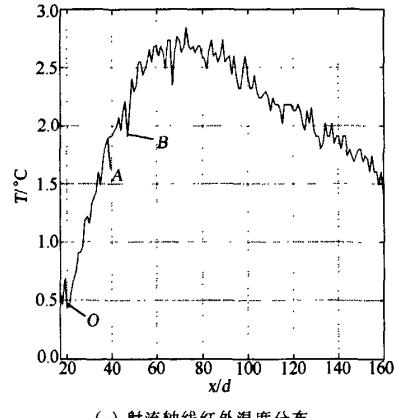
$$\rho c u \frac{dT}{dx} = \rho q \quad (2)$$

积分上式可得在等速核内的温度分布为:

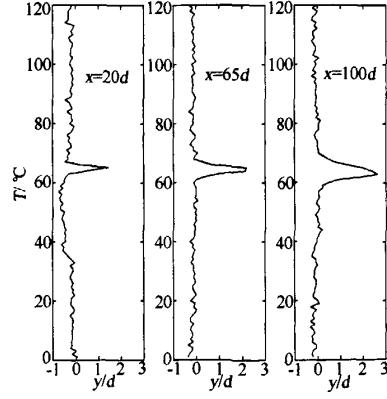
$$T = \frac{q}{cu} x + \text{const} \quad (3)$$

其中 const 为积分常数, 可取为流场的初始温度分布。

由上式可知, 在等速核内势流区红外热像仪测得的只是辐射传热部分, 沿流向辐射温度为距喷嘴出口距离 x 的线性函数。因此根据等速核内温度为线性



(a) 射流轴线红外温度分布



(b) 射流不同断面温度分布

图 6 射流流场红外辐射温度分布 ($p = 20 \text{ MPa}$)

Fig.6 IR temperature distribution of water jetting field ($p = 20\text{MPa}$)
分布特点,轴心线红外辐射温度的线性区间就可以计算射流等速核的长度。同时,根据力热耦合原理,红外温度表达的射流能量场与射流的速度场具有相互耦合的对应关系,因此,根据射流轴线与断面的红外辐射温度的分布特征与红外热图像素点的尺寸,可以计算出射流各个段的空间尺度。

图6(a)为第400s、压力20MPa下沿射流轴线的红外辐射温度分布,图中O点为射流喷嘴所在位置。由图6(a)可见,喷嘴出口后的OA段的红外辐射温度分布呈线性,证实了由式(3)得到的结论,由OA段所占有的横坐标的像素点数可得出等速核的长度为 $L = 59d$ (d 为喷嘴直径)。在从B点至射流结束的一段区间,红外辐射温度呈现出随机波动,具有完全发展的湍流的特点,因而为射流的主体段,由其间点有横坐标的像素点的数目算出主体段长度为 $D = 274d$ 。在AB两点之间的红外辐射温度即非随机波动、也非线性变化,呈现出过渡段的特点,过渡段的长度由AB间像素点的数目算出为 $l = 12d$ 。图6(b)为垂直射流轴线方向 $x = 20d$, $x = 65d$, $x = 100d$ 断面上的红外温度分布,其中3个断面分别位于射流的初始段、过渡段及完全发展段。由图可以看出断面红外温度分布并未出现类似速度分布的抛物线形状,而是呈现三角形脉冲的形状。脉冲高度沿射流流向逐步增大,在完全发展段达到最大值后逐步降低;三角形脉冲的宽度也随射流流向逐渐变宽。

3 结 论

(1)射流的转捩雷诺数为 $Re = 8.36 \times 10^4$ 。射流转捩后,首先在射流喷嘴下方剪切层之外,出现了单个大尺度涡旋,随着射流速度的增大,单个大尺度涡演化为喷嘴两侧剪切层外的配对大尺度涡旋,涡旋尺度随射流速度的增大而增大。高压细射流的大尺度涡呈不规则椭圆形,配对的两个大尺度涡旋向相反,因而成像尺度不同;

(2)拟序结构中出现的大尺度涡有着精细结构,在喷嘴出口处上下两侧配对的大涡并非严格对称,其强度不同,涡的精细结构也不相同;大涡可由两个尺度、强度、旋向均不相同的子涡构成;

(3)射流剪切层外存在着稳定的较小尺度的涡,虽然其尺度较小,但其涡旋强度要大于大尺度的涡,同时也较大涡稳定;

(4)射流轴线上初始段的红外辐射温度呈线性分布,主体段的红外辐射温度呈现随机波动分布,过渡段的红外辐射温度即非线性、也非随机分布,而是呈现突变的特点;初始段、过渡段、主体段垂直断面上的红外辐射温度分布呈三角形脉冲状,区别于射流速度场的抛物线形状。脉冲高度沿射流流向逐步增大,在完全发展段达到最大值后逐步降低;三角形脉冲的宽度也随射流流向逐渐变宽。

参考文献:

- [1] 李国华,吴立新,吴森,等.红外热像技术及其应用的研究进展[J].红外与激光工程,2004,33(3):227-230.
- [2] TURNER J S. Turbulent entrainment: The development of the entrainment assumption and its application to geophysical flows [J]. Fluid Mechanics, 1986, 373:431-436.
- [3] BOUCHARDY A M. Processing of infrared thermal image for aerodynamic research [J]. Applications of Digital Image Processing, 1983, 397: 304-309.
- [4] CEHLIN M, MOSHFEGH B, SANDBERG M. Measurements of air temperatures close to a low-velocity diffuser in displacement ventilation using an infrared camera [J]. Energy and Buildings, 2002, 34: 687-693.
- [5] 孙家骏.水射流切割技术[M].江苏:中国矿业大学出版社,1992:7-10.
- [6] 张东胜,王霞,安里千.一种红外热像文件及其图像处理方法[J].光学技术,2003,29(3):334-340.
- [7] 崔桂香.流体力学[M].北京:清华大学出版社,1999:35-36.
- [8] 董志勇.射流力学[M].北京:科学出版社,2005:16-19.