

# 错流紊动射流速度分布的数值模拟

付伟华, 严宏志

(中南大学机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘要:** 采用 RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  湍流模型, 应用流体有限元方法, 对错流紊动射流的流动速度场进行了数值模拟研究。结果表明, 错流射流内部有分叉现象, 射流喷口背风侧的流动出现了分离并形成尾迹区。分析了分叉及尾迹区产生的机理。给出了射流与主流速度比等于 3 和 5 的速度场。研究结果表明: 射流与主流速度比直接影响流场特性, 其值越大射流对主流的影响越大。

**关键词:** 错流射流; 湍流模型; 数值模拟; 尾迹

**中图分类号:** O357.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-6254(2005)06-0038-04

## 0 前言

错流紊动射流是流体从窄长的缝隙或孔口以一定角度喷出, 并与环境中水平方向的流体相互作用, 形成错流紊动射流<sup>[1]</sup>。

错流射流在工程实际中有着相当广泛的应用<sup>[1-3]</sup>, 例如在炉膛火焰的燃烧、燃烧室壁的冷却、叶轮机械叶片的气膜冷却、扩压器边界层分离的控制、V/STOL(军用飞机垂直或短距离起落)、废水废热排入河流中等, 都会涉及到横向紊动射流问题。因此可以认为, 对错流射流流动的研究具有相当高的理论意义和应用价值。

虽然目前国内外研究人员对错流紊动射流的数值研究逐渐增多, 但因问题自身的复杂性, 以及数值计算方法上所存在的局限性, 使得多数研究都局限于错流射流的宏观特性的认识上<sup>[4]</sup>。对错流射流内部结构, 横流与射流相互作用产生的外部结构, 横流于射流的掺混过程并没有完全揭示出来。并且, 目前研究工作的重点是放在垂直入射的错流紊动射流上。本文拟通过数值模拟研究当射流的入射方向角  $\alpha$ 、射流入射速度与横流速度比  $R$ 、射流喷口直径  $D$  不同的情况下, 错流紊动射流流动的速度分布。期望为错流射流在实际工程中的应用, 提供设计、分析的参考依据。

## 1 错流紊动射流流动的数值模拟

### 1.1 数值模拟模型

由于 RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型考虑了应变率及流线曲率  $\varepsilon$  方程耗散项的影响, 当应变较小, 也就是在距离壁面较远的区域, RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型与标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型的结果差别较小; 而在大应变区, 也就是在射流喷口壁面以及近壁附近, RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型中  $\varepsilon$  方程的耗散项比标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型的更小, 结果更接近紊流理论分析, 故本文对错流射流数值模拟采用 RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  湍流模型, 模拟的主要结构参数为: 射流速度  $U_j$  与主流速度  $U_{cf}$  的比值  $R$ , 射流出射方向角  $\alpha$ , 射流孔径  $D$ 。

为了使得分析的问题尽量清晰明了, 本文假定射流出射方向与主流体之间的夹角有  $\alpha=90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $-60^\circ$ , 也即射流垂直入射与倾斜入射。 $R$  的取值为 3、5, 射流孔径  $D=20$ 、30 mm, 建立的有限元网格模型如图 1 所示。

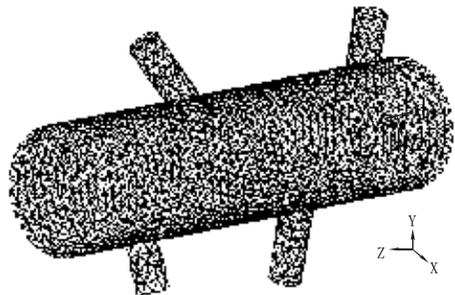


图1 错流射流分析模型

### 1.2 流场速度分析结果与讨论

图 2 至图 5 示出了  $R$  取值分别为 3、5, 射流

作者简介: 付伟华(1981-): 男, 江西临川人, 中南大学机电工程学院在读硕士研究生, 研究方向为流体机械。

喷孔直径为 20 mm, 30 mm, 射流角分别为  $-60^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $90^\circ$  时, 主流道入口直径为 80 mm 的流场的速度等值分布图。其中横流方向为从左至右, 为了便于比较分析, 横流的入口速度统一设定为 1 m/s。

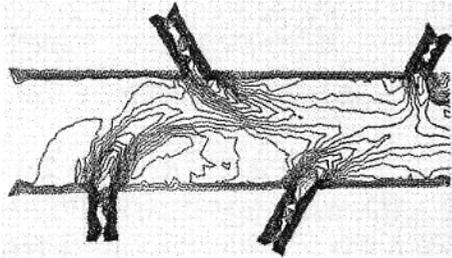


图2  $R=3, D=20 \text{ mm}, \alpha=-60^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  时速度等值分布线

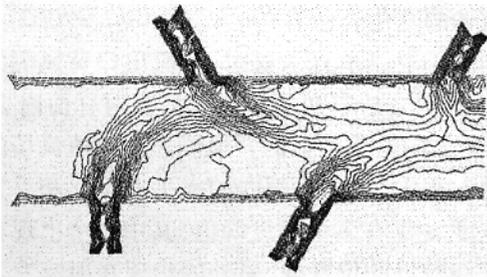


图3  $R=5, D=20 \text{ mm}, \alpha=-60^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  时速度等值分布线

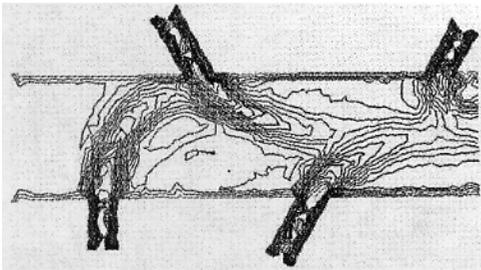


图4  $R=3, D=30 \text{ mm}, \alpha=-60^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  时速度等值分布线

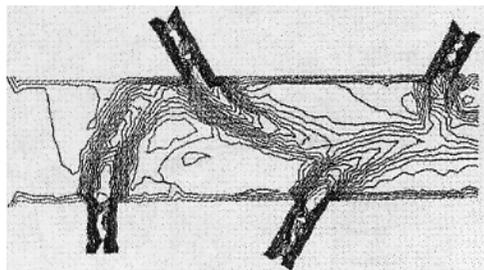


图5  $R=5, D=30 \text{ mm}, \alpha=-60^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$  时速度等值分布线

### 1.2.1 水平速度 $u$

从图4至图5可看出: 与  $\alpha=90^\circ$  相比, 射流水平方向速度在垂直方向影响的区域减小, 并且随

着射流角的减小, 射流出口背风侧的负速度区消失。射流正向倾斜入射时, 随着射流角的减小, 射流起始段长度增加。由于射流倾斜入射时, 射流与水平方向的主液流之间的剪切作用增加, 从而使得射流能够保持较长的起始段, 射流最终在横流的推力作用下, 沿着主液流的方向向下游发展。当射流正向倾斜入射时, 射流对横向主气流的阻碍作用降低, 并且增加了射流的水平速度分量, 例如  $R=3, \alpha=30^\circ$  时, 射流出口附近的水平速度峰值为 4.2 m/s, 对应的  $\alpha=60^\circ$  时的速度值为 3.6 m/s, 而  $\alpha=90^\circ$  时, 射流出口附近的水平速度为 3.2 m/s, 并且, 射流角越大, 水平速度分量衰减越快。

速度比  $R$  值增加, 射流起始段也增加, 弯曲段向下游推移, 这与射流垂直入射的结论是一致的。

### 1.2.2 垂直速度 $w$

从图2至图5中可以发现: 与射流垂直入射时的垂直速度分布相比, 射流正向倾斜入射时, 在射流出口上游迎风侧速度为负值。这是因为射流倾斜入射时, 在此区域内出现了明显的“孔吸流动”, 即横流遇到射流的阻碍, 方向发生了变化, 有向喷孔内流动的趋势, 所以产生了垂直方向的负速度。射流角减小, 负速度区域的范围增加, 从而说明射流角越小, “孔吸流动”越明显。从射流出口向下游发展, 速度  $w$  逐渐衰减, 并在主液流的作用下, 沿着射流轨迹的方向偏转, 当射流完全融入到主液流流体中时, 速度  $w$  基本等于零。

射流垂直入射对横向主气流的阻力要比射流倾斜入射时大。垂直入射, 射流起始段在垂直方向较长, 横流与主液流的相互作用力分布较为均匀, 不会造成局部压力增大的区域特别集中, 所以“孔吸流动”不十分明显。但当射流倾斜入射时, 与射流垂直入射时不同的是, 横流的绕流作用减小, 射流对横向主液流的阻力沿着射流方向是变化的, 射流出口上游的局部压力最大, 而且倾斜角度越大, 最大压力区域越集中。并且随着速度比  $R$  值的增加, 负速度区域范围增加, 这也说明, 射流速度越大, 局部压力越大, 产生的“孔吸流动”越明显。

### 1.2.3 对称面内的速度

图2至图5给出了不同速度比  $R$ 、不同射流角等工况下对称面内的流场分布, 图中的流线是水平速度  $u$  和垂直速度  $w$  的合成速度。与射流垂

直入射时的相应工况相比,射流正向倾斜入射时的射流在垂直方向对主流流影响的区域减小,并且射流角减小,影响范围越小。射流垂直入射时,初始动量在垂直方向的分量大;而倾斜入射时,射流在垂直方向的动量分量减小,在主流流推力作用下,射流在距离壁面较低的位置处弯曲,并沿着主流流方向向下游移动。

与射流垂直入射的流场相比,射流倾斜时的流场有两点变化:第一,射流喷口上游位置处的“孔吸流动”更为明显,这是由于:当射流倾斜入射时,横流的绕流作用减小,射流对横向主流流的阻力沿着射流方向是变化的,射流出口上游的局部压力梯度大,所以射流正向倾斜角度越大,“孔吸流动”越明显。第二,射流出口下游背风侧的分离现象逐渐减弱, $\alpha=30^\circ$ 时分离基本消失,即此时没有形成尾迹区。

### 1.3 沿程速度分布分析

为了获得错流射流流场中速度的沿程分布规律,本文在数值模拟模型中分别建立了以下4个速度绘制平面(这些测量面都是对于射流出口的相对位置建立的),应用流体动力学软件可以得到沿该测量面上X,Z方向的速度分布。速度绘制面如图6所示。

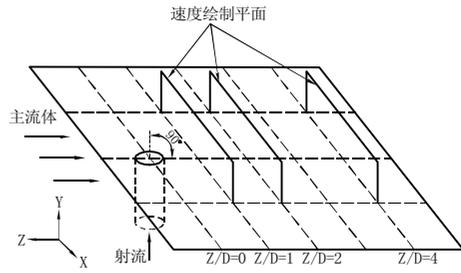
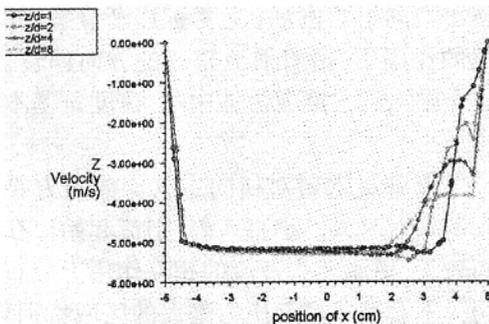


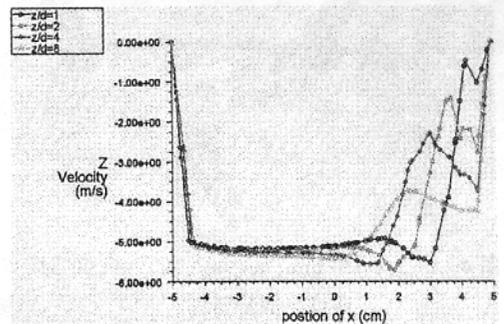
图6 速度曲线绘制平面

图7,图8为在速度比  $R=3,5, D=20\text{ mm}$ ,射流垂直入射的情况下( $\alpha=90^\circ$ ),对称面内沿程水平速度  $u$  和垂直速度  $w$  的等值线。由于对称面内沿水平方向的平均流动速度  $u$  在流动过程中占主导地位,它的沿程变化过程直接反映错流紊动射流流场的变化。

由于射流垂直入射时,射流出口背风侧的流动变化大<sup>[5]</sup>,故本文测量位置都在对称面内  $Z/D=1,2,4,8$  的射流出口的背风侧。在射流流场的速度分布当中,每一截面内的水平速度  $u$  和垂直方向速度  $w$  都有多个速度峰值,其中一个出现在距离壁面较近的位置处,另外的出现在射流发生歪曲的区域。出现这种现象的原因主要是在圆孔横向紊动射流当中,存在纵向的主流绕流作

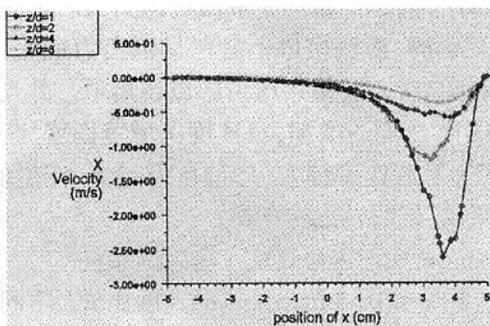


R=3

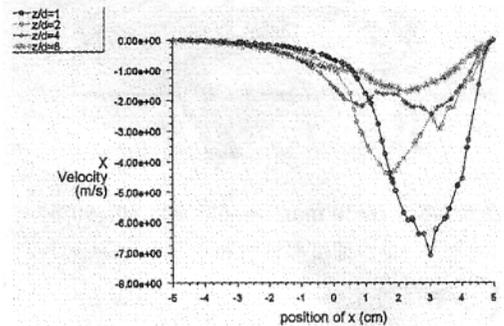


R=5

图7 水平速度  $u$  (Z向,  $D=20\text{ mm}, \alpha=90^\circ$ )



R=3



R=5

图8 垂直速度  $w$  (X向,  $D=20\text{ mm}, \alpha=90^\circ$ )

用,这也增加了射流对主流的卷吸量,使得在该处出现速度峰值。在垂直方向上,近壁处由于边界层的约束,速度从0先增加到一定值,而后在横向主流的绕流作用下,射流背风侧存在尾迹区,从而速度迅速降低。速度的第二个峰值出现在射流的内部,实际上是射流的最大速度点,它的值与射流的初始动量密切相关,而且应该注意到,正是沿程方向上这些最大速度点的连线,形成了射流轨迹。 $u$ 速度的最大值连线基本与射流轴线轨迹重合,这也说明,加速运动的横向主气流从射流前侧被卷吸进入射流,并与射流主体掺混,此后,沿流动方向, $u$ 速度峰值连线位于射流轴线轨迹之上,这说明是CVP(Counter-Rotating-Vortices,反向旋涡对)将主流向上推移了。在紧邻射流出口的背风侧,主流进入低压尾迹区,并有逆流现象产生。逆流在射流的背面产生一定的应力,正是这个应力降低了射流的轴向速度并引发了CVP的产生。在紧邻壁面流动的下流方向,等值线开始平行于 $X$ 轴,这说明流动已离开了尾迹区。

从图7,图8可以看出,沿着流动方向,两个方向的最大速度点逐渐向上移动,这与射流的初始动量密切关联。在水平方向的速度 $u$ ,速度经过波动后渐趋于稳定,即与主流的速度基本一致;垂直方向上的速度 $w$ 经过速度最大值后趋于0。这说明了射流对横向主流的影响主要集中在射流弯曲直至与主流平行的区域内。分析各种工况下的水平速度 $u$ ,可以发现,近壁区域流动变化剧烈:在近壁处速度先增加,然后逐渐减小至速度最低点,再增加到速度最大点,最后稳定在主流速度附近,尤其在 $R$ 较大的情况下这种现象更为明显。这充分说明了该区域内存在尾迹。由于射流对主流的阻碍作用,当主流流过射流时,两股

不同方向的流体之间存在强烈的相互作用,射流在主流的压力作用下发生弯曲,主流在射流的阻力作用下,形成绕流。这种现象与流体力学当中的圆柱绕流在背风侧会形成尾迹是相似的。

## 2 结论

通过以上分析,可以得到以下结论。

1. 射流对主流的影响主要集中在射流弯曲直至与主流平行的区域内,在对称面内,沿着流动方向,水平方向和垂直方向的最大速度点逐渐向上移动,并且,在垂直方向上最大速度点之后的速度值趋于稳定,速度 $u$ 与主流速度接近,速度 $w$ 趋于0。

2. 射流垂直入射时,射流喷口背风侧存在二次流;反向倾斜入射时,尾迹区增加,射流对流场的影响增加;正向倾斜入射时,随着射流角的减小,二次流逐渐消失。

3. 速度比 $R$ 和射流喷口直径 $D$ 对流场同时具有明显的影响,但是 $R$ 对流场的影响更为显著。增加 $R$ 和 $D$ ,一方面射流对主流的阻碍作用增加,另一方面射流对主流的卷吸作用增强,所以速度场有明显的变化。

### 参考文献:

- [1] 戴干策,陈敏恒. 化工流体力学[M]. 北京:化学工业出版社, 1988:505-518.
- [2] 王松涛,冯国泰. 叶栅内冷气射流场结构的数值模拟[J]. 航空动力学报, 2000, 15(3):274-278.
- [3] 徐高田,韦鹤平. 恒定横流底部多孔排放区污水稀释扩散效果因素研究[J]. 环境科学学报, 1999, 279:1-47.
- [4] 徐旭,张振鹏. 喷管内横流流场的数值模拟[J]. 固体火箭技术, 1997, 20(4):12-17.
- [5] 杨淘, Adler W, Specht. 射流与有约束横流的湍流混合的数值模拟[J]. 弹道学报, 2001, 13(1):1-4.

## Numerical Simulation for Cross-flow Turbulent Jet

FU Wei-hua, YAN Hong-zhi

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South Uni., Changsha 410083, China)

**Abstract:** By using RNG  $\kappa$ - $\varepsilon$  turbulent model and fluid finite element methods, this paper performed the numerical simulation for the cross-flow turbulent jet. There is a bifurcation in the jet, and the separation events and the wake in the lee of the jet exit are found, and the forming mechanism is also analyzed. The paper has given the velocity field which the jet flow and main flow's velocity ratios is 3 and 5. The larger jet cross-flow velocity ratio can change the flow characteristics more obviously.

**Key words:** cross-flow jet; turbulent model; numerical simulation, wake