

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20110911. 1132. 012

# 流动环境中圆孔水平热射流三维数值模拟

张 健, 杨 立, 张士成, 吕事桂

(海军工程大学动力工程系, 湖北 武汉 430033)

**摘要:** 根据计算流体动力学理论, 采用 Realizable  $k-\varepsilon$  紊流模型和 SIMPLEC 算法, 考虑浮力作用, 利用有限体积法来离散求解流动环境中圆孔水平热射流的流动与传热控制方程, 对流动环境中圆孔水平热射流进行了三维数值模拟, 比较了不同流速比和不同射流出口温度条件下的流动特性和温度分布特性, 得到了热射流轨迹的速度和温度衰减规律, 分析了流速比和射流出口温度对热射流轨迹温度分布的影响。

**关键词:** 圆孔射流; 数值模拟; 湍流模型; 温差; 流速比

**中图分类号:** O358      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-6791(2011)05-0668-06

随着紊流理论、数值计算以及计算机技术的飞速发展, 经过众多学者的不断努力, 浮力射流特性的研究取得了很大进展。张晓元、李炜和姜国强等<sup>[1-3]</sup>采用三维湍流模型及其混合有限分析解法对横流环境中湍流射流特性进行了数值模拟, 在射流初始阶段, 横流在射流背流面形成绕流分离旋涡, 射流主轴沿流向布置的窄缝射流产生的旋涡最为特殊和复杂, 在射流远区, 流动主要由反向旋涡对所控制, 并诱导出二次涡对; Larsen 等<sup>[4]</sup>研究了横流中的浮射流特性并比较了  $k-\varepsilon$  模型和积分模型; 槐文信等<sup>[5]</sup>采用  $k-\varepsilon$  紊流模型, 结合混合有限元分析及交错网格技术, 对横流中不同流速比的单圆孔紊动射流进行了计算与分析, 计算结果与试验值符合较好; 杨中华<sup>[6]</sup>、曾玉红<sup>[7]</sup>采用基于 RNG 方法的  $k-\varepsilon$  模型, 分别对静止环境中圆形负浮力射流以及水平圆形浮力射流进行了数值研究, 验证了该数学模型的有效性; 王玲玲和岳青华<sup>[8]</sup>应用大涡模拟模型对静止和规则波环境下二维窄缝热浮力射流进行数值模拟, 分析了流场和温度场的掺混以及紊动特性, 研究了环境因素对热浮力射流的热扩散的影响, 表明正浮力有强化射流动量的作用; 张健等<sup>[9-10]</sup>对温度分层环境中水下飞行器排放冷却水形成热尾流进行了数值模拟和试验研究, 得到了线性温度分层海水中热尾流的浮升规律和温度分布特性, 验证了采用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型对浮力射流进行计算得到的数值结果与实验结果吻合较好。到目前为止, 国内外对横流中的铅垂圆孔射流、同轴浮力射流和静止环境中的水平圆孔浮力射流进行了深入的研究, 但还未见对流动环境中水平圆孔热射流进行研究的报道。

本文采用 Realizable  $k-\varepsilon$  紊流模型和 SIMPLEC 算法, 对流动环境中圆孔热射流水平排放及其浮升规律进行了三维数值模拟, 分析了其流动特性和温度分布特性, 以期对污水排放扩散器的设计提供理论依据。

## 1 三维圆形热水射流的数学模型及计算方法

流动环境中的射流是一种复杂的湍流运动, 存在复杂的随机脉动流动现象。假设圆孔热浮力射流排放到无限水域, 射流为定常充分发展的湍流, 环境流体为不可压缩流体, 流体密度随温度变化, 根据流体运动的基本控制方程, 采用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型, 得到流动环境中圆孔热射流的三维数学模型如下:

$$\text{连续性方程} \quad \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

收稿日期: 2010-11-04; 网络出版时间: 2011-09-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110911.1132.012.html>

基金项目: 国防科研项目 (101050202)

作者简介: 张 健(1979-), 男, 河北枣强人, 博士研究生, 主要从事传热传质及热流体力学应用研究。

E-mail: zhj406@yahoo.com.cn

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial u_j}{\partial x_j} \right) + \rho g_i \quad (2)$$

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c_p u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = u_j \frac{\partial p}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( k \frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

$$\rho = \rho(T) \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (5)$$

湍动能耗散率  $\varepsilon$  输运方程:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b \quad (6)$$

式中  $\rho$  为流体密度,  $u_i (i=1, 2, 3)$  分别是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度分量;  $p$  为静压;  $\mu$  为粘性系数;  $k$  为热传导系数;  $c_p$  为定压比热;  $T$  为流体温度;  $g_i$  为重力加速度分量;  $C_1 = \max[0.43, \eta/(\eta+5)]$ ,  $\eta = Sk/\varepsilon$ ,  $S$  为平均应变率; 湍动能产生项:  $G_k$  是由平均速度梯度引起的,  $G_b$  是由浮力影响引起的;  $G_k = -\rho \overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ ,  $G_b = \beta g_i$

$\frac{\mu_t}{\rho Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$ ,  $u'_i$ 、 $u'_j$ , 为湍流速度脉动值;  $\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$  为热膨胀系数;  $Pr_t$  为能量的湍流普朗特数;  $\mu_t = \rho C_\mu k^2 / \varepsilon$  为湍流粘性系数;  $C_{1\varepsilon}$  和  $C_2$  为常数;  $\sigma_k$  和  $\sigma_\varepsilon$  分别为湍动能及其耗散率的湍流普朗特数;  $C_{3\varepsilon}$  为浮力对耗散率的影响,  $C_{3\varepsilon} = \tanh|v/u|$ ,  $v$  是平行于重力方向的速度分量,  $u$  是垂直于重力方向的速度分量。

采用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型来计算流动环境中圆孔热浮力射流这一流动与传热问题。基于有限体积法的 FLUENT 软件是用于计算流体流动和传热问题的程序, 运用 FLUENT 软件采用 SIMPLEC 算法求解 Navier-Stokes 控制方程, 采用二阶迎风格式, 考虑重力影响, 其中能量方程收敛到  $10^{-6}$ , 其余各方程的精度均达到  $10^{-4}$ , 在 FLUENT 中, 对于 Realizable  $k-\varepsilon$  模型,  $Pr_t$  默认设置值为 0.85, 作为默认值常数,  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_2 = 1.9$ ,  $\sigma_k = 1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.2$ 。

## 2 模型网格划分与边界条件

研究对象如图 1 所示, 热射流的温度高于环境水体的温度。图 1 中,  $x$  为环境水体的流动方向,  $y$  为水域深度方向,  $z$  为水域宽度方向。热射流出口直径为  $D$ , 水深为  $H$ , 环境水体温度为  $T_0$ , 环境流速为  $u_0$ , 热射流出口流速为  $w_j$ , 方向为  $z$  轴正方向, 出口温度为  $T_j$ 。以射流出口流速  $w_j$  为特征流速, 射流出口直径  $D$  为特征长度, 环境温度  $T_0$  为特征温度, 坐标原点位于射流出口圆心位置。

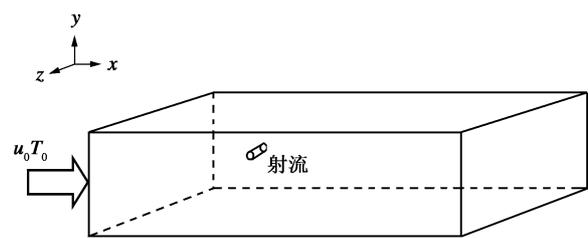


图 1 流动环境中三维热射流示意图  
Fig. 1 Sketch of 3D thermal jets in flow

计算区域为一个长方体区域, 其中宽度为 500 mm, 定义为  $z$  方向; 深度为 400 mm, 定义为  $y$  方向; 长度为 3200 mm, 定义为  $x$  方向。射流出口形状为圆形, 其直径  $D$  为 10 mm, 射流出口圆形中心坐标为  $(0, 0, 0)$ , 射流口中心距水面深度为 200 mm, 距来入口 200 mm, 距一侧面 100 mm、另一侧面 400 mm。热射流出流方向沿  $z$  轴正方向、环境来流方向沿  $x$  轴正方向。

运用 Gambit 划分网格, 采用 tetrahedron 网格结构, 对热射流出口周围的网格进行细化。对计算网格的独立性进行了检验, 当计算网格的数量达到 170 万个时, 再继续增加网格密度, 计算结果变化不再明显。计算区域划分约 171 万个四面体计算网格单元。计算区域边界条件如下:

$u_0$ 、 $v_0$ 、 $w_0$  为计算区域入口边界的来流速度分量,  $T_0$  为计算区域入口边界的来流温度;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  为计算区域流场内某一点的流速分量,  $T$  为计算区域内流体的温度。

定义流速比  $R$  为环境流速与射流出口流速的比值,  $R = w_j / u_0$  为射流的一个重要物理量。

(1) 进口边界 射流出口边界  $\sqrt{x^2 + y^2} \leq 5 \text{ mm}$  时,  $u = v = 0, w = w_j, T = T_j$ ;

来流入口边界  $u = u_0, v = w = 0, T = T_0$ 。

(2) 壁面边界 假定在壁面处无滑移, 在近壁区采用标准的壁面函数法。

(3) 出口边界 在  $x = 3 \text{ m}$  处,  $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = 0$ 。

### 3 计算结果分析

取计算区域来流速度  $u_0 = 0.1 \text{ m/s}$ , 来流温度  $T_0 = 285 \text{ K}$ ; 热射流出口速度分别为  $w_j = 0.4 \text{ m/s}, 0.6 \text{ m/s}, 0.8 \text{ m/s}, 1.0 \text{ m/s}$ , 热射流出口温度分别为  $T_j = 300 \text{ K}, 305 \text{ K}, 310 \text{ K}$ ; 流速比分别为  $R = 4, 6, 8, 10$ ; 定义量纲一温差  $\theta = (T - T_0) / (T_j - T_0)$ 。对以上工况进行数值模拟, 并对模拟结果进行分析。

#### 3.1 流场分析

热射流出口中心水平面上, 不同流速比时、沿  $x$  轴正方向不同距离处、不同射流出口温度时, 沿  $z$  轴的量纲一速度分布曲线如图 2 ~ 图 4 所示。由图 2 可知, 随着流速比的增大, 在  $X/D = 20$  处量纲一速度的波峰

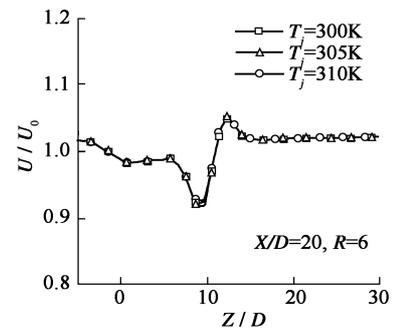
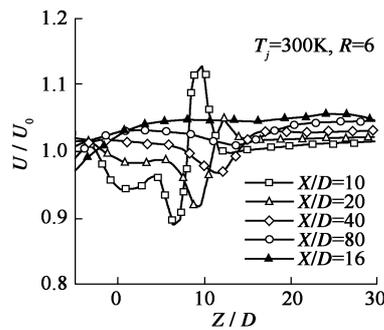
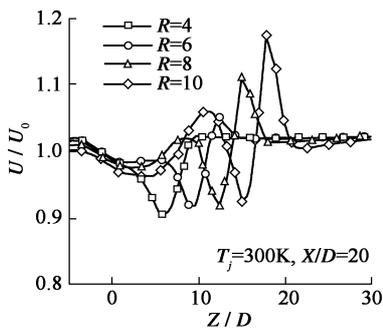


图 2 不同流速比时  $U/U_0$  沿  $z$  轴分布

图 3 不同距离处  $U/U_0$  沿  $z$  轴分布

图 4 不同出口温度时  $U/U_0$  沿  $z$  轴分布

Fig. 2  $U/U_0$  along  $z$ -axis at different  $R$  Fig. 3  $U/U_0$  along  $z$ -axis at different distance Fig. 4  $U/U_0$  along  $z$ -axis at different  $T_j$

与波谷沿  $z$  轴正方向推移, 波谷的幅值变化不大, 而波峰的幅值逐渐增高, 这是由于流速比增大, 射流对来流速度的冲击增强, 射流流速在射流初始阶段占主导地位。由图 3 可知, 沿  $x$  轴正方向距离射流出口位置越近, 垂面上射流轨迹量纲一速度变化越剧烈, 存在明显的射流主流区, 随着向下游流动, 量纲一速度波动逐渐减弱; 射流轨迹量纲一速度波谷随着来流的发展, 逐渐向  $z$  轴正方向推移, 并逐渐减小; 热射流轨迹宽度约为 10 倍射流出口直径。由图 4 可知, 射流出口温度的变化对射流轨迹量纲一速度分布的影响不大, 可忽略不计, 表明热射流的浮力作用和热扩散对来流速度的影响很小。比较图 2 和图 4 相可知, 流速比对流体的速度场影响较明显, 而射流出口温度对计算区域速度场的影响很小。

图 5 为热射流出口温度  $T_j = 305 \text{ K}$  时, 不同流速比条件下热射流轨迹中心量纲一速度分布曲线。沿流向距离  $X/D < 90$  处, 流速比对射流轨迹的影响很明显, 随着来流向下游发展, 射流轨迹中心速度逐渐与来流速度趋于一致; 越靠近射流出口的区域, 流速比越大, 射流对来流的冲击越强烈, 速度场变化越剧烈, 在远离射流出口的区域, 流速比的影响明显减弱, 这是因为流速比增大, 射流对来流的冲击越强烈, 紊动强度和剪切应力越大; 流速比越大, 射流中心速度的衰减越快。

#### 3.2 温度场分析

图 6 为热射流出口中心水平面上, 射流出口温度  $T_j = 300 \text{ K}$ 、

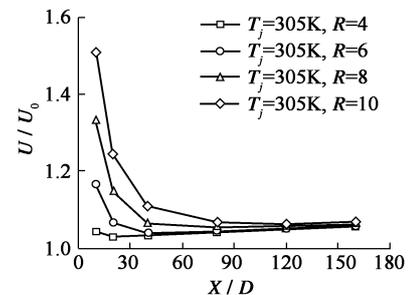


图 5 射流轨迹中心速度分布

Fig. 5  $U/U_0$  along the axis of jet path

不同流速比条件下,  $X/D = 20$  处热射流与环境量纲一温差  $\theta$  沿  $z$  轴分布曲线。由图 6 可知, 流速比较小时, 射流轨迹最大量纲一温差较大, 且位于  $z$  轴正方向较靠近射流出口位置; 随着流速比增大, 射流轨迹最大量纲一温差逐渐减小, 且最大温差出现位置沿  $z$  轴正方向逐渐远离射流出口位置, 但热射流轨迹宽度逐渐加大。这是由于随着流速比增大, 射流对环境来流冲击越强, 紊动强度越大, 扰动加剧, 热射流与周围流体的换热能力增强, 热扩散加快, 射流轨迹最大量纲一温差减小; 流速比越大, 射流沿  $z$  轴正方向速度越大, 射流轨迹量纲一温差分布曲线沿  $z$  轴正方向逐渐推移。

图 7 为热射流出口中心水平面上, 流速比  $R = 6$ 、不同热射流出口温度条件下,  $X/D = 20$  处热射流轨迹量纲一温差  $\theta$  沿  $z$  轴分布。可以看出, 随着热射流出口温度增大, 射流轨迹最大量纲一温差增大, 热射流轨迹的较高温差区域沿  $z$  轴分布宽度增大, 但热射流在  $z$  轴方向上的影响范围变化不大,  $T_j = 310$  K 时的射流温差影响区域比  $T_j = 300$  K 时的区域稍微大些; 而不同热射流出口温度时, 射流轨迹最大量纲一温差出现的位置沿  $z$  轴方向上的距离基本相同, 这是由于射流比不变时, 热射流出口温度的变化对射流轨迹  $z$  轴方向速度分量影响很小。

图 8 为热射流出口中心水平面上, 流速比  $R = 6$ 、热射流出口温度  $T_j = 300$  K,  $x$  轴正方向不同距离处量纲一温差  $\theta$  沿  $z$  轴分布。由图 8 可知,  $X/D = 10$  时, 最大量纲一温差为 0.13,  $X/D = 160$  时, 最大量纲一温差为 0.01, 沿  $x$  轴方向发展, 热射流轨迹最大量纲一温差逐渐减小, 热射流轨迹温度与来流温度逐渐趋于一致; 而且随着  $X/D$  的增大, 热射流轨迹中心位置沿  $z$  轴正方向逐渐远离射流出口, 热射流轨迹量纲一温差沿  $z$  轴分布的宽度逐渐增大,  $X/D = 10$  时, 热射流轨迹量纲一温差  $\theta > 0.005$  的宽度约为 10 倍射流出口直径,  $X/D = 160$  时, 热射流轨迹量纲一温差  $\theta > 0.005$  的宽度约为 20 倍射流出口直径。

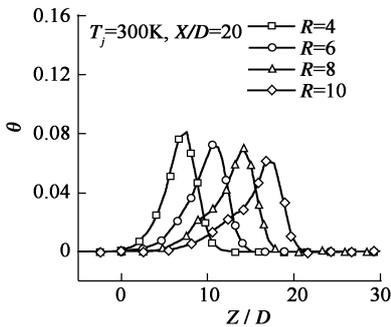


图 6 不同流速比时  $\theta$  沿  $z$  轴分布  
Fig. 6  $\theta$  along  $z$ -axis at different  $R$

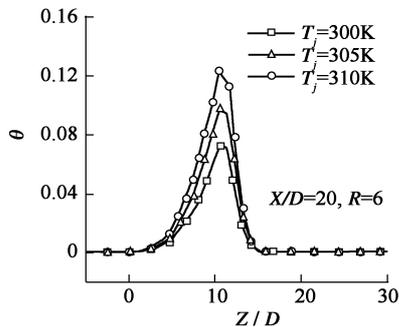


图 7 不同出口温度时  $\theta$  沿  $z$  轴分布  
Fig. 7  $\theta$  along  $z$ -axis at different  $T_j$

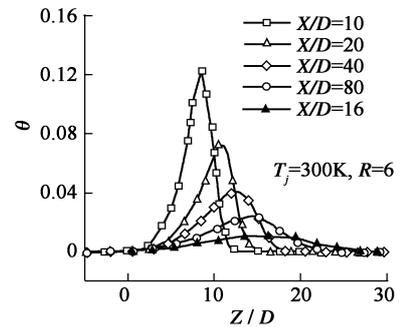


图 8 不同距离处  $\theta$  沿  $z$  轴分布  
Fig. 8  $\theta$  along  $z$ -axis at different distance

图 9 为热射流出口温度  $T_j = 305$  K, 不同流速比情况下, 热射流轨迹的最大量纲一温差沿  $x$  轴分布曲线。由图 9 可知, 流速比对热射流轨迹的最大量纲一温差影响较小, 在  $X/D = 10$  处, 流速比  $R = 4$  时, 最大量纲一温差为 0.186,  $R = 6$  时, 最大量纲一温差为 0.172,  $R = 8$  时, 最大量纲一温差为 0.17,  $R = 10$  时, 最大量纲一温差为 0.165; 在  $X/D = 160$  处, 流速比  $R = 4$  时, 最大量纲一温差为 0.014,  $R = 6$  时, 最大量纲一温差为 0.018,  $R = 8$  时, 最大量纲一温差为 0.021,  $R = 10$  时, 最大量纲一温差为 0.021; 沿着  $x$  轴正方向发展, 热射流轨迹最大量纲一温差明显降低, 在  $X/D = 120$  之前, 温差下降速度较快, 随后温差下降速度逐渐趋于平缓, 这是由于沿  $x$  轴方向发展, 射流流速对流体区域的冲击逐渐减弱, 扰动减弱, 热扩散逐渐减慢。

图 10 为流速比  $R = 6$  时, 不同的热射流出口温度条件下, 热射流轨迹最大量纲一温差沿  $x$  轴分布曲线。由图 10 可知, 热射流出口温度越大, 热射流轨迹最大量纲一温差越大; 在  $X/D < 80$  范围内, 沿  $x$  轴正方向发展, 热射流轨迹最大量纲一温差下降速度较快, 之后最大量纲一温差下降速度逐渐减慢, 且最大量纲一温差逐渐趋于一致。

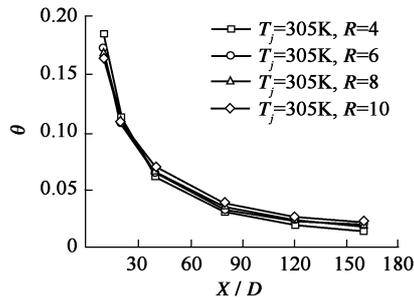


图9 不同流速比时  $\theta$  沿流向分布  
Fig. 9  $\theta$  along  $x$ -axis at different  $R$

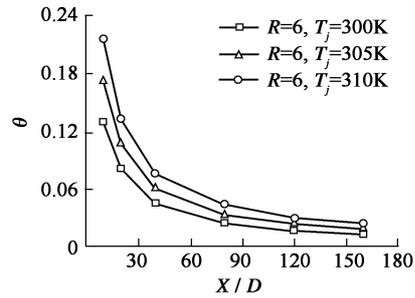


图10 不同出口温度时  $\theta$  沿流向分布  
Fig. 10  $\theta$  along  $x$ -axis at different  $T_j$

图11为热射流出口温度  $T_j = 310\text{K}$ ，流速比  $R = 6$  时，不同  $y$ - $z$  截面上的温度分布图。热射流温度分布形状呈月牙状； $X/D = 10$  时，热射流中心温度为  $287.4\text{K}$ ， $X/D = 120$  时，射流中心温度降为  $285.3\text{K}$  左右；沿着  $x$  轴正方向发展，由于热射流与环境流体之间的扰动和热扩散，射流轨迹中心温度逐渐下降；由于热射流浮力的作用，射流轨迹中心温度位置逐渐向水面上移。

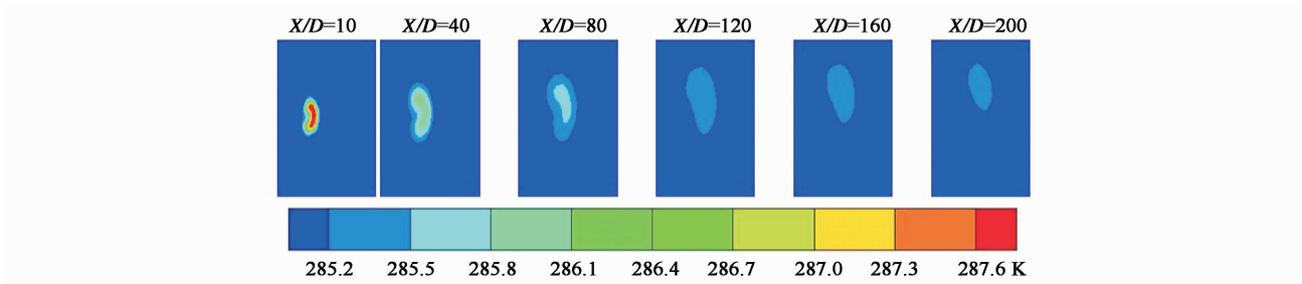


图11 不同  $y$ - $z$  截面上的温度分布  
Fig. 11 Temperature profile at different  $y$ - $z$  sections

## 4 结 论

通过对圆孔水平热射流的计算与分析，得到三维热射流的扩散规律和温度分布规律如下：

(1) 流速比越大，在靠近射流出口区域扰动越强烈，热射流轨迹量纲一速度变化越明显，而远离射流出口的区域受流速比的影响逐渐减弱；热射流出口温度对速度场的影响很弱，表明热射流的浮力作用和热扩散对来流速度的影响很小。

(2) 流速比越小，热射流轨迹最大量纲一温差越大，且位于  $z$  轴正方向越靠近射流出口位置。这是由于随着流速比增大，射流对环境来流冲击增大，扰动增强，热扩散加快，热射流轨迹量纲一温差下降越快；流速比越大，射流沿  $z$  轴正方向速度越大，最大量纲一温差沿  $z$  轴正方向越远离热射流出口的位置。

(3) 热射流出口温度越大，热射流轨迹的最大量纲一温差越大，热射流轨迹的较高温差区域沿  $z$  轴分布越宽，但热射流最大温差在  $z$  轴上的位置基本相同。

(4) 在相同流速比、热射流出口温度条件下，沿  $x$  轴方向发展，热射流轨迹最大量纲一温差逐渐减小；随着  $X/D$  的增大，热射流轨迹中心位置沿  $z$  轴正方向逐渐远离射流出口，热射流轨迹量纲一温差沿  $z$  轴分布的宽度逐渐增大。

(5) 热射流温度分布形状呈月牙状； $X/D = 10$  时，热射流中心温度为  $287.4\text{K}$ ， $X/D = 120$  时，热射流中心温度降为  $285.3\text{K}$  左右；沿着  $x$  方向，由于热射流与环境流体之间的扰动和热扩散，热射流中心温度逐渐下降；由于热射流浮力的作用，热射流轨迹中心温度位置逐渐向水面上移。

## 参考文献:

- [1] 张晓元,李炜,李长城. 横流环境中射流的数值研究[J]. 水利学报, 2002, 33(3): 32-38. (ZHANG Xiao-yuan, LI Wei, LI Chang-cheng. Numerical simulation for the flow field of vertical round turbulent jet entering the cross current [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 33(3): 32-38. (in Chinese))
- [2] 李炜,姜国强,张晓元. 横流中圆孔湍射流的旋涡结构[J]. 水科学进展, 2003, 14(5): 576-582. (LI Wei, JIANG Guo-qiang, ZHANG Xiao-yuan. Vortex structures of round turbulent jets in cross-flow [J]. Advances in Water Science, 2003, 14(5): 576-582. (in Chinese))
- [3] 姜国强,任秀文,李炜. 横流环境湍射流涡动力学特性数值模拟[J]. 水科学进展, 2010, 21(3): 307-314. (JIANG Guo-qiang, REN Xiu-wen, LI Wei. Numerical simulation of vorticity dynamics for turbulent jet in crossflow [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(3): 307-314. (in Chinese))
- [4] LARSEN T, PETERSEN O, CHEN H B. Numerical experiment on computation on turbulent buoyant jets in flowing ambients[C]// Proceedings of the 8th International Conference on Computational Methods in Water Resources. Venice: Springer, 1990, 339-344.
- [5] 槐文信,李炜,彭东启. 横流中单圆孔紊动射流计算与特性分析[J]. 水利学报, 1998, 29(4): 7-14. (HUAI Wen-xin, LI Wei, PENG Dong-qi. Calculation and behavior analysis on turbulent jets in cross flow [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, 29(4): 7-14. (in Chinese))
- [6] 杨中华,槐文信. 采用 RNG 紊流模型计算静止环境中圆形负浮力射流[J]. 水科学进展, 2004, 15(6): 760-764. (YANG Zhong-hua, HUAI Wen-xin. Simulation on the negatively buoyant jet in static ambient by RNG turbulence model [J]. Advances in Water Science, 2004, 15(6): 760-764. (in Chinese))
- [7] 曾玉红,槐文信. 静止环境中水平圆形浮力射流流动特性研究[J]. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2005, 33(11): 90-92. (ZENG Yu-hong, HUAI Wen-xin. Characters of horizontal round buoyant jets in quiescent shallow water [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science Edition, 2005, 33(11): 90-92. (in Chinese))
- [8] 王玲玲,岳青华. 窄缝热浮力射流影响因素的数值模拟[J]. 水科学进展, 2009, 20(5): 632-638. (WANG Ling-ling, YUE Qing-hua. Numerical simulation of influence factors of slot-generated thermal buoyant jets [J]. Advances in Water Science, 2009, 20(5): 632-638. (in Chinese))
- [9] 张健,陈翊,杨立,等. 水下航行器排放冷却水温度分布特性研究[J]. 船舶力学, 2009, 13(4): 533-539. (ZHANG Jian, CHEN Xuan, YANG Li, et al. Study of temperature characteristic of cooling water discharged by underwater vehicle [J]. Journal of Ship Mechanics, 2009, 13(4): 533-539. (in Chinese))
- [10] 张健,杨立,袁江涛,等. 水下航行器热尾流试验研究[J]. 实验流体力学, 2008, 22(3): 7-13. (ZHANG Jian, YANG Li, YUAN Jiang-tao, et al. Experimental research of underwater vehicle thermal wakes [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2008, 22(3): 7-13. (in Chinese))

### 3D numerical simulation of round horizontal thermal jets in flow

ZHANG Jian, YANG Li, ZHANG Shi-cheng, LÜ Shi-gui

(Department of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** According to the computational fluid dynamics theory and the finite volume method, the governing equations of flow and heat transfer are solved for round horizontal thermal jets in flow. Using the Realizable  $k-\varepsilon$  turbulence model and the semi-implicit method for pressure linked equations-consistent algorithm and considering the buoyancy effect, a 3D numerical simulation of round horizontal thermal jets is achieved in this study. Both flow characteristics and temperature distributions in thermal jets are studied through the numerical experiments conducted under different conductions of velocity ratios and outlet temperatures, and the impact of these conductions on temperature distributions is analyzed. As a result, both velocity and temperature attenuation regularities of thermal jets are found. The study illustrates the practical value of numerical models for the examination of the discharge of thermal wastewater.

**Key words:** round jet; numerical simulation; turbulence model; temperature difference; velocity ratio