

# Analysis of Temperature Characteristic for Multi-Hole Heated Water Discharge in Flow

Jin Wu, Tingtao Ming, Feng Zhao

Repairing and Supervising Room of Naval Equipment in the Shanghai Area, Shanghai  
Email: mtt1021@yahoo.com.cn

Received: Nov. 15th, 2011; revised: Dec. 19th, 2011; accepted: Dec. 22nd, 2011.

**Abstract:** According to the theory of computational fluid dynamics and numerical heat transfer, the mathematics model of multi-hole horizontal heated water discharge is established and solved with numerical analysis by finite volume method. The temperature distribution of multi-hole heated water path is calculated and obtained with numerical methods. The effect of number of holes and relative hole spacing on the temperature distribution of heated water path are analyzed. Results indicate that under the same heated water discharge, the same discharge temperature, and the same hole velocity, one-hole discharge or reducing hole spacing will enhance the thermal diffusion of heated water path, and can decrease thermal pollution on the environment effectively.

**Keywords:** Multi-Hole; Numerical Simulation; Turbulence; Temperature Difference

## 横流中多孔热水排放温度特性分析

吴进, 明廷涛, 赵峰

海军上海地区装备修理监修室, 上海  
Email: mtt1021@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011年11月15日; 修回日期: 2011年12月19日; 录用日期: 2011年12月22日

**摘要:** 根据计算流体力学和数值传热学理论建立了考虑浮力作用的多孔热水水平排放的数学模型, 采用有限体积法来离散求解多孔热水排放的三维数学模型, 对多孔热水流动轨迹的温度分布特性进行了数值计算与分析, 得到了多孔热水轨迹的温度分布, 分析了热水孔个数和相对孔间距对热水轨迹温度分布的影响。对计算结果的分析表明, 热水排放总量和排放温度保持不变、相同出口流速条件下, 热水单孔排放和减小相对孔间距有利于加快热水轨迹的热扩散, 能够更好地减弱热排放对环境的热污染。

**关键词:** 多孔; 数值模拟; 湍流; 温差

### 1. 引言

来自工业、农业和生活中的废弃流体, 不论是排入水域还是排入大气, 通常是以射流的形式排放到环境当中。热污染问题是环境污染研究的重要内容之一, 如热、核电厂冷却水和城市废水的近海排放, 烟囱、冷却塔等排入大气中的烟尘、废热, 船舶废水排入水域等, 都有大量的射流问题。

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。Larsen 等<sup>[1]</sup>研究了横流中的浮射流特性并比较了  $k-\epsilon$  模型和积分模型; Leschzine<sup>[2]</sup>和 Rodi<sup>[3]</sup>利用三种不同的差分格式来求解修正的  $k-\epsilon$  模型, 并计算了环形和双孔射流的吸附区内回流流场; 槐文信等<sup>[4,5]</sup>用  $k-\epsilon$  紊流模型封闭横流中单圆孔紊动射流的数学模型, 对不同流速比的流动结合混合有限元分析及交错网格进行计算, 建立了同轴单孔热浮力

射流流动的三维湍流模型,运用多重网格系统下的混合有限分析法进行了数值计算,计算结果与试验值符合较好;曾玉红、槐文信<sup>[6]</sup>采用基于重整化群方法的  $k-\varepsilon$  模型结合混合有限分析法对静止环境中有限水深水平圆形热浮力射流进行了数值模拟,验证了该数学模型的有效性。

综上所述,到目前为止国内外对横流中的圆形射流、同轴浮力射流和静止环境中的水平圆形浮力射流等进行了深入的研究,但还没有对横流中多孔热扩散器排放热污水的热扩散特性进行数值模拟研究的报道。为了具体分析多孔热扩散器排放热污水的热扩散特性,本文在总结前人对浮力射流研究的基础上,采用 SIMPLEC 算法对横流中多孔热水排放的温度分布进行了数值模拟,分析了热水多孔排放形成的热轨迹温度分布特性,为减弱热污水排放对环境的热污染提供了一定的理论依据,对环境保护与环境质量评估也具有一定的参考价值。

## 2. 数学模型与计算方法

横流环境中的浮力射流存在复杂的随机脉动流动现象。假设三维热水排放到无限水域,热水排放为定常充分发展的湍流,环境流体为不可压缩流体,流体密度仅随温度变化,根据流体运动的基本控制方程和数值传热学理论,采用 Realizable  $k-\varepsilon$  湍流模型如下:

湍流动能  $k$ :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (1)$$

湍动能耗散率  $\varepsilon$  输运方程:

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

式中:  $\rho$  是流体密度,  $u_i (i=1,2,3)$  分别是  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度分量,  $p$  是静压,  $\mu$  是粘性系数,  $k$  是热传导系数;  $c_p$  是定压比热;  $T$  是流体温度,  $g_i$  是重力加速度分量。  $C_1 = \max \left[ 0.43, \frac{\eta}{\eta+5} \right]$ ,  $\eta = \frac{Sk}{\varepsilon}$ ,  $S$  为平均应

变率; 湍动能产生项:  $G_k = -\rho \bar{u}_i' \bar{u}_j' \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$ ,

$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i}$ ;  $u_i'$ 、 $u_j'$  为湍流速度脉动值,

$\mu_t = \nu C_\mu k^2 / \varepsilon$  为湍流粘性系数,  $G_k$  表示平均速度梯度引起的湍动能产生,  $G_b$  是用于浮力影响引起的湍动能产生。  $Pr_t$  是能量的湍流普朗特数,  $\beta = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p$  为

热膨胀系数。  $C_{1\varepsilon}$  和  $C_{2\varepsilon}$  是常数;  $\sigma_k$ 、 $\sigma_\varepsilon$  分别是湍动能及其耗散率的湍流普朗特数。浮力对耗散率影响是用  $C_{3\varepsilon}$  来体现,  $C_{3\varepsilon} = \tanh \left| \frac{v}{u} \right|$ ,  $v$  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。

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,  $C_{1\varepsilon}=1.44$ ,  $C_{2\varepsilon}=1.9$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.2$ 。

## 3. 计算模型与边界条件

计算模型如图 1 所示,  $x$  为横流流动方向,  $y$  为水域深度方向,  $z$  为水域宽度方向。排放孔水深为  $H$ ,横流流体温度为  $T_0$ ,横流流速为  $u_0$ ,排放孔流速为  $w_j$ ,方向为  $z$  轴正方向,温度为  $T_j$ 。以横流流速  $u_0$  为特征流速,横流流体温度  $T_0$  为特征温度,坐标原点位于排放孔中心位置。计算区域为一个长方体区域,其中横向宽度为 800 mm,定义为  $z$  方向;深度为 400 mm,定义为  $y$  方向;长度为 4000 mm,定义为  $x$  方向。圆孔排放孔直径  $D = 10$  mm,左侧孔中心坐标  $(0,0,0)$ ,距水面深度为 200 mm,距来入口 400 mm,排放孔出口位于计算区域的中心垂直截面上。排放方向沿  $z$  轴正方向,横流方向沿  $x$  轴正方向。

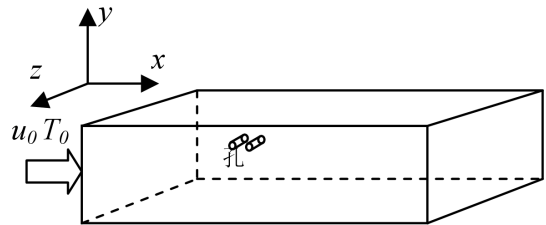


Figure 1. Schetch of 3-D heated water discharge in flow  
图 1. 横流中三维热水排放示意图

热水排放总量保持不变, 排放温度保持不变, 选取热水排放孔个数分别为 1 个、2 个和 3 个, 孔截面形状为圆形, 排放孔直径为  $D$ , 两相邻孔中心之间的距离为  $s$ , 相对孔间距为  $s/D$ 。热水排放孔布置示意图如图 2 所示。

热水孔截面网格采用 triangular 单元, 圆形截面生成 50 个网格单元; 计算区域网格划分采用 tetrahedron 网格结构, 共生成约 255 万个 tetrahedral cells 计算网格单元。这样几种热水排放孔方案生成的计算区域体网格单元数量基本相同, 且计算区域内网格密度分布比较接近。对计算网格的独立性进行了检验, 但计算网格的数量超过 250 万个时, 再继续增加网格密度, 计算结果基本不再变化。

边界条件:

$u_0, v_0, w_0$  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。

- 进口边界: 热水孔边界,  $u = v = 0, w = w_j, T = T_j$ ; 来流边界  $u = u_0, v = w = 0, T = T_0$ ;
- 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;
- 出口边界: 在  $x = 3 \text{ m}$  处,  $\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\partial k}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial x} = 0$ 。

#### 4. 计算工况及温度特性分析

取计算区域横流速度  $u_0 = 0.1 \text{ m/s}$ , 横流温度  $T_0 = 285 \text{ K}$ , 热水排放孔温度  $T_j = 305 \text{ K}$ , 热水排放总流量相同, 热水排放孔流速相同,  $w_j = 1 \text{ m/s}$ ; 1 个排放孔时, 孔直径  $D = 10 \text{ mm}$ ; 2 个排放孔时, 孔直径  $D_2 = D/\sqrt{2}$ ; 3 个排放孔时, 孔直径  $D_3 = D/\sqrt{3}$ 。定义无量纲温差  $\theta = (T - T_0)/(T_j - T_0)$ 。采用数值计算方法对以上工况进行模拟计算, 并对多孔热水排放形成的热轨迹的温度分布特性进行分析。

相同孔流速条件下, 热水多孔排放形成的热轨迹中心最大无量纲温差沿  $x$  轴分布曲线如图 3 所示,  $x/D = 20$  时, 单孔排放形成的热轨迹中心无量纲温差  $\theta = 0.084$ , 2 个孔, 孔间距分别为  $s/D = 5, 10, 15$ , 对应的无量纲温差分别为  $\theta = 0.097, 0.123, 0.167$ , 3 个孔, 孔间距为  $s/D = 5$  对应的无量纲温差为  $\theta = 0.111$ ; 相对孔间距较大时, 近排放孔区域热轨迹温度

较大; 在  $x/D < 120$  区域, 即近热水排放出口区域, 单孔排放形成的热轨迹中心最大无量纲温差较小, 排放孔个数越多, 热水轨迹中心无量纲温差越大, 相对孔间距越大, 热轨迹中心无量纲温差越大; 在  $x/D > 120$  区域, 即在远离排放孔区域, 排放孔个数和相对孔间距的大小对热轨迹中心最大无量纲温差的影响很小。因此, 在  $x/D < 120$  区域, 即近热水排放出口区域, 单孔排放热水或减小相对空间距, 排放热水形成的热轨迹中心温度较低, 对流动环境的热污染较弱。

图 4 为相同孔流速条件下, 热水多孔排放形成的热轨迹沿  $x$  轴方向、不同  $y-z$  截面上的温度分布, 在近排放孔区域, 多孔排放形成的热轨迹的高温区域较大, 且温度较高。由图 4(a)、(c)可知, 在  $x/D < 120$  区域, 热水单孔和 2 个孔( $s/D = 10$ )排放形成的热轨迹的热影响区域偏上, 浮升速度较快; 由图 4(b)、(d)、(e)可知, 2 个孔( $s/D = 15$  或  $s/D = 15$ )或 3 个孔排放热水形成的热轨迹的热影响区域偏下, 浮升速度较慢。虽然在靠近排放孔区域, 多孔排放热水形成的热轨迹中心温度较高, 但沿  $x$  轴方向温度下降速度较快, 热轨迹浮升较慢。多孔排放初期热水出口比较分散, 但沿横流流动方向发展, 多孔排放的热水又逐渐聚集在一

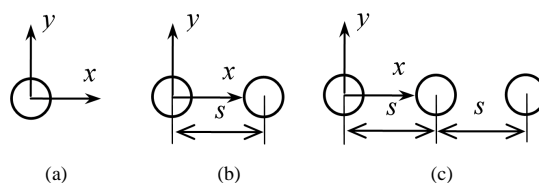


Figure 2. Schematic of outlet's arrangement: (a) one outlet; (b) two outlets; (c) three outlets

图 2. 热水排放孔布置示意图: (a) 1 个孔; (b) 2 个孔; (c) 3 个孔

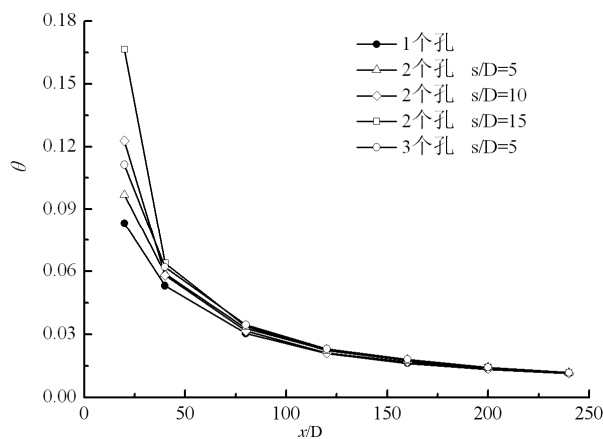


Figure 3. Maximum dimensionless temperature difference  
图 3. 热轨迹最大无量纲温差沿  $x$  轴的变化

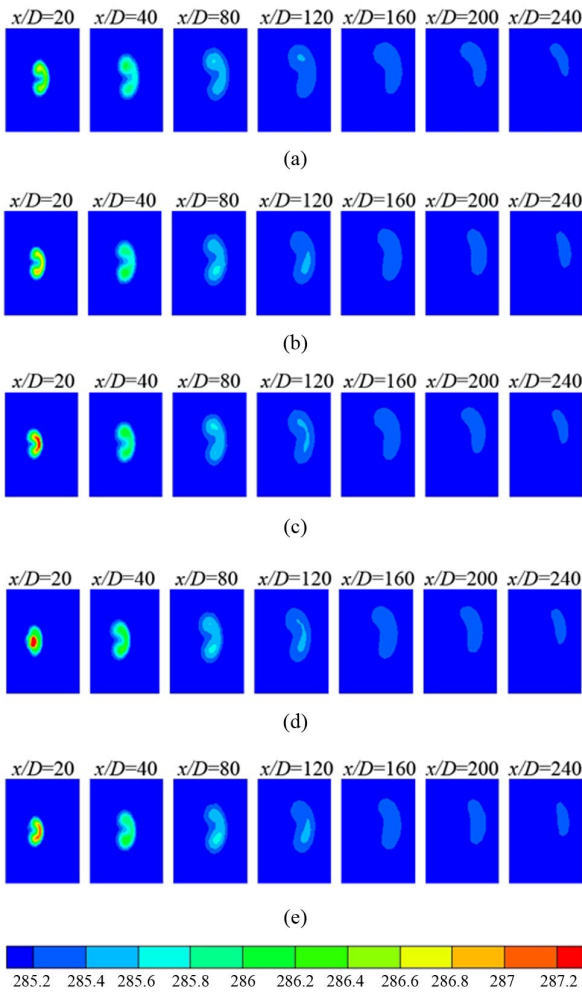


Figure 4. Temperature profile at different y-z sections: (a) one outlet; (b) two outlets,  $S/D = 5$ ; (c) two outlets,  $S/D = 10$ ; (d) two outlets,  $S/D = 15$ ; (e) three outlets,  $S/D = 5$   
 图 4. 不同 y-z 截面上的温度分布: (a) 1 个孔; (b) 2 个孔,  $S/D = 5$ ; (c) 2 个孔,  $S/D = 10$ ; (d) 2 个孔,  $S/D = 15$ ; (e) 3 个孔,  $S/D = 5$

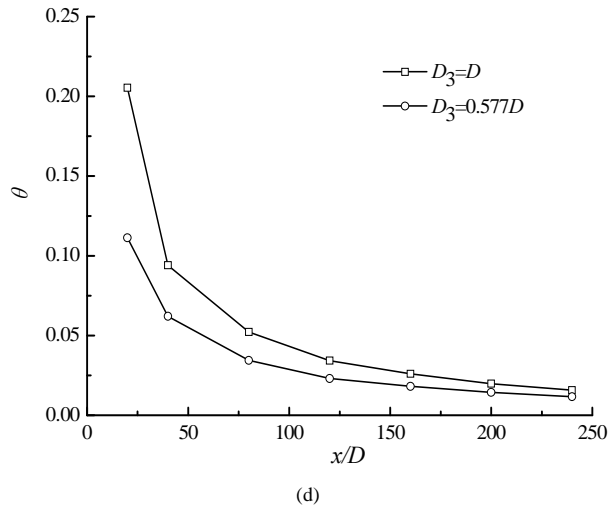
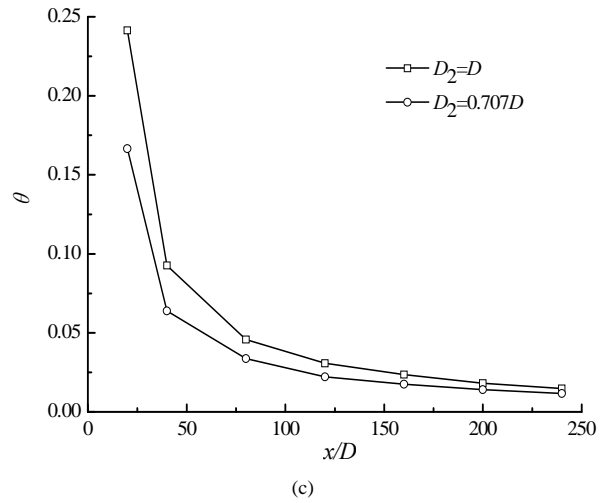
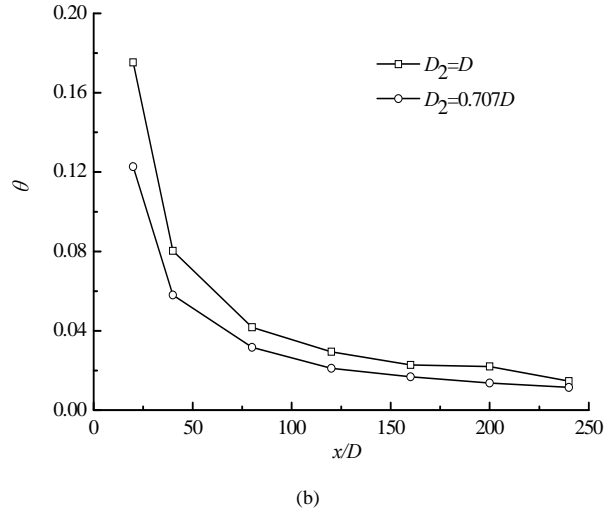
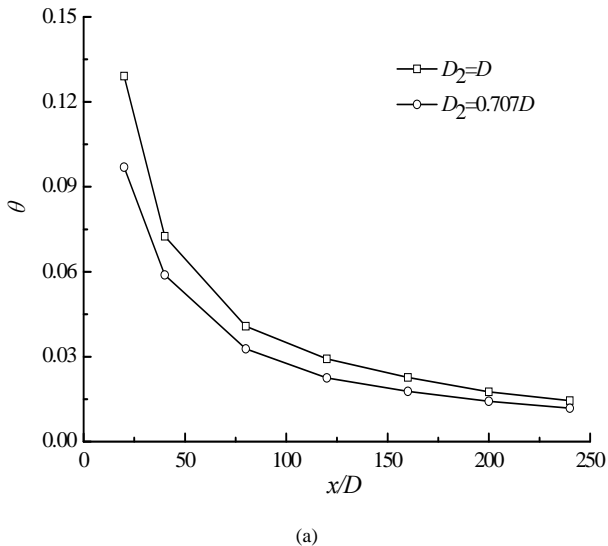


Figure 5. Maximum dimensionless temperature difference at different outlet's diameter: (a) two outlets,  $S/D = 5$ ; (b) two outlets,  $S/D = 10$ ; (c) two outlets,  $S/D = 15$ ; (d) three outlets,  $S/D = 5$   
 图 5. 不同孔直径条件下, 热尾流最大无量纲温差沿 x 轴的变化: (a) 2 个孔,  $s/D = 5$ ; (b) 2 个孔,  $s/D = 10$ ; (c) 2 个孔,  $s/D = 15$ ; (d) 3 个孔,  $s/D = 5$

起,热水轨迹在宽度和深度方向上的热扩散速度比单孔排放要慢,多孔排放热轨迹温度较高,这是由于孔流速相同,多孔排放时,每个孔的直径较小,每个孔的排放流量较小,每个孔排放的热水对横流环境宽度和深度方向上的扰动较小,热扩散较弱。因此,单孔排放形成的热轨迹热扩散较快,热轨迹高温区域较小,能够减弱热排放对环境的热污染。

图5为总排量相同和不同孔间距条件下,不同孔直径热水排放形成的热轨迹最大无量纲温差沿 $x$ 轴的变化。由图5可知,总排量相同,多孔排放热水,孔直径减小,孔流速增大,热轨迹中心温度减小;这是由于孔直径减小,流速增大,对横流环境的扰动增强,加快了热水轨迹的热扩散。因此,保持热水排放总量不变,减小孔直径,能够加快排放到横流中的热水轨迹的扩散,有利于减弱热排放对环境的热污染。

## 5. 结论

在 $x/D < 120$ 区域,即近热水排放出口区域,单孔排放热水或减小相对空间距,排放热水形成的热轨迹中心温度较低,能够减弱对环境的热污染;在 $x/D > 120$ 区域,即在远离排放孔区域,排放孔个数和相对孔间距的大小对热轨迹中心最大无量纲温差的影响很小。

靠近排放孔区域,多孔排放热水形成的热轨迹中

心温度较高,沿 $x$ 轴方向发展温度下降较快;多孔排放初期热水出口比较分散,沿横流流动方向发展,多孔排放的热水又逐渐聚集在一起,热水轨迹在宽度和深度方向上的热扩散比单孔排放慢,多孔排放热轨迹温度较高。

保持热水排放总量不变,减小孔直径,能够加快排放到横流中的热水轨迹的热扩散,有利于减弱热排放对环境的热污染。

今后还可以研究在孔直径保持不变的条件下,热水多孔排放,不同孔直径和不同孔间距对环境热污染的影响。

## 参考文献 (References)

- [1] T. Larsen, O. Petersen and H. B. Chen. Numerical experiment on computation on turbulent buoyant jets in flowing ambients. Venice: Proceedings of the 8th International Conference on Computational Methods in Water Resources, 1990: 339-344.
- [2] M. A. Leschziner, W. Rodi. Calculation of annular and twin parallel jets using various discretization schemes and turbulence-model variation. Fluids Engineering, 1981, 103: 352-360.
- [3] W. Rodi. Turbulent buoyant jet and plumes. New York: Pergamon, Oxford, 1982: 203-216.
- [4] 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]. 水力学报, 1998, 29(4): 7-14.
- [5] 槐文信. 同流热污水排放的三维数学模型及计算方法[J]. 武汉水利电力大学学报, 1997, 30(4): 1-5.
- [6] 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.