

横流环境中两孔热水浮射流数值模拟研究

陈军, 王颖, 孙佳乐

(西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 为了达到热废水排放过程中热水快速稀释的目的, 采用 Fluent 中 Realizable $k-\varepsilon$ 模型基于 SIMPLEC 算法, 研究了热射流过程中, 射流孔间距、初始流速对射流流场、温度场的影响规律。研究表明: 随着射流孔间距的增大, 第 1 孔射流对第 2 孔射流影响程度逐渐减弱且第 2 孔射流的弯曲程度随之增加; 射流与横流作用促使反向涡对的产生, 加快了热水与环境水体的掺混度, 横断面温度场出现“肾形”分布; 当相对孔间距相同时, 随着射流初始流速的增加, 第 1、2 孔射流温度衰减速率随之增大; 射流初始流速相同时, 射流孔间距的增加对第 1 孔射流轴线温度稀释度影响较小, 对第 2 孔射流的轴线温度稀释度影响相对复杂; $S/D = 2$ 时, 增大热射流的初始流速, 为本研究中热水快速稀释的最优方案。

关键词: 热水浮射流; 稀释度; 流场; 温度场; 射流孔间距; 横向有效流速; 横流环境; 热废水排放

中图分类号: TV131

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)05-0168-06

Study on numerical simulation of two-nozzle thermal buoyant jet in cross-flow environment

CHEN Jun, WANG Ying, SUN Jiale

(State Key Laboratory of Eco-hydraulic Engineering in Shaanxi, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: In order to quick dilute the thermal waste water, the Realizable $k-\varepsilon$ turbulence model of Fluent and SIMPLE Consistent method are utilized to investigate the effect of spacing of nozzles and initial velocity of thermal buoyant jet on flow and temperature fields. The research indicates that as the spacing of nozzles increases, the effect of the first jet on the second one gradually decreases, and blending degree of second one increases. The reverse vortex pair generated by the jet and cross flows enlarges the mixing degree of thermal waste water and environmental fluid and the distribution of temperature field of cross section is the same as the shape of kidney. As the initial velocity increases, the decay rate of axis temperature of the first and second jet increases on the condition of same spacing of nozzles. Additionally, the variations of spacing of nozzles has little impact on the dilution degree of axis temperature for the first jet but has sophisticated influence on the second one on the condition of same initial velocity. The conclusion can be drawn that when $S/D = 2$ and the initial velocity increased, we get the optimal solution for quick dilution of thermal waste water in this research.

Key words: thermal buoyant jet; dilution degree; flow field; temperature field; spacing of nozzles; effective cross-flow velocity; cross-flow environment; thermal wastewater discharge

1 研究背景

热废水排放, 会影响接纳水体的水域生态环境质量^[1-2]。有关热废水排放对水域生态环境影响, 国内已有学者做了相关的研究: 蒋朝鹏等^[3]以秦山核电站及其周围水域环境为研究对象, 阐述了温排

水对鱼类分布的影响。陈梦齐等^[4]研究了象山港电厂温排水对浮游细菌空间分布的影响。水域水温是水体环境质量的重要指标, 而热废水通常都以固定在河流或者海底的单孔或者多孔扩散器以射流的形式进入接纳水体, 如何达到热水快速稀释的目的, 减小水体热污染是热射流研究的重点。射流中射流

收稿日期: 2017-03-27; 修回日期: 2017-06-20

基金项目: 陕西省水利科技计划项目(2015slkj-03)

作者简介: 陈军(1992-), 男, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 研究方向为环境与生态水力学。

孔口数、初始流速以及孔间距是射流流场和温度场的主要影响因素^[5-6]。从射流孔口与环境流体的相对位置可将射流分为同流射流与横流射流。关于同流热射流的研究主要集中在射流孔口数、孔间距、射流初始流速以及热废水水温对射流流场、温度场分布特性的影响。孙玉贤^[6]与薛晨亮^[7]通过数值模拟与水槽实验对同流热射流特性做了相应的研究。横流射流的研究主要集中在射流流场与废水浓度场分布特性方面,对温度场的研究相对较少。张健等^[8]采用 Realizable $k - \varepsilon$ 模型运用 SIMPLEC 算法对横流环境中单孔热射流进行了三维数值模拟。肖洋等^[9-10]运用 Fluent 软件中的 Realizable $k - \varepsilon$ 模型结合物理试验研究了横流环境中两孔射流的相对孔间距、射流流速对射流浓度场稀释特性的影响;利用 PIV 研究了单孔、两孔、4 孔,孔间距为 5 倍孔径时,射流流场、横向有效流速的分布特性。从射流孔口的断面形状又可以将射流分为矩形孔射流与圆形孔射流,上述同流与横流射流均属于圆孔射流。马梓然等^[11]通过实验研究了不同矩形长宽比下射流轴线上的平均速度与湍流尺度等的变化规律。何熙等^[12]应用 RNG $k - \varepsilon$ 模型,研究了矩形断面粗糙度对水平热水浮射流特性的影响。目前射流的研究向着多方面发展,陈永平等^[13]利用 PIV 和 LIF 技术研究了波浪流环境下的多孔射流水动力特性。El - Amin 等^[14]研究了射流流体温度随时间线性变化的浮射流中温度场、速度场以及紊动强度的特性。尽管射流研究朝着多元化方面发展,但横流两孔热射流温度场稀释特性的研究相对较少,因此笔者采用 Fluent 软件中 Realizable $k - \varepsilon$ ^[15]模型同时考虑浮力作用求解三维 N - S 方程,研究了横流环境中射流孔间距、射流初始流速对流场、温度场稀释特性的影响。

2 模型建立

2.1 控制方程

连续性方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

动量方程:

$$\frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (-\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (2)$$

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} - \rho \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S \varepsilon - \rho C_2 \cdot \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial T}{\partial x_i} \quad (4)$$

能量方程:

$$\rho c_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_j} = u_i \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

状态方程:

$$\rho = \rho(T) \quad (6)$$

式中:动量方程中,通过 Boussinesq 假设将雷诺应力与平均速度梯级联系起来,雷诺应力的表达式

$$\text{为: } -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) - \frac{2}{3} (\rho k + \mu_t \frac{\partial u_k}{\partial x_k}) \delta_{ij};$$

ρ 为流体的密度, kg/m^3 ; $u_i (i = 1, 2, 3)$ 为 x, y, z 方向的速度分量, m/s ; p 为静压, Pa ; μ 为黏性系数, $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$; T 为流体的温度, K ; g_i 为重力加速度分量, m/s^2 ; c_p 为定压比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; k 方程中 k 为紊动能; ε 为紊动能耗散率; S 为平均应变率, $S =$

$$\sqrt{S_{ij} S_{ij}}, S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right); \mu_t \text{ 为紊流黏性系数, } \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, C_\mu = \frac{1}{4.04 + \sqrt{6} \cos \phi} \frac{k U'}{\varepsilon}, U' =$$

$$\sqrt{S_{ij} S_{ij} + \overline{\Omega_{ij} \Omega_{ij}}}, \overline{\Omega_{ij}} = \Omega_{ij} - 2 \varepsilon_{ijk} \omega_k, \Omega_{ij} = \overline{\Omega_{ij}} - \varepsilon_{ijk} \omega_k,$$

$$\phi = \frac{1}{3} \cos^{-1}(\sqrt{6} W), W = \frac{S_{ij} S_{jk} S_{ki}}{S^3}; \sigma_k = 1.0; \sigma_\varepsilon =$$

$$1.2; C_2 = 1.9; C_{1\varepsilon} = 1.44; C_1 = \max(0.43,$$

$$\frac{\eta}{\eta + 5}), \eta = S \frac{k}{\varepsilon}; Pr_t \text{ 为能量的紊动普朗特数, } Pr_t =$$

$$0.85; C_{3\varepsilon} \text{ 是一个与局部流动相关的系数, 当主流方向与重力方向平行时, } C_{3\varepsilon} = 1, \text{ 当主流方向与重力方向垂直时, } C_{3\varepsilon} = 0; \beta \text{ 为热膨胀系数, } \beta = -$$

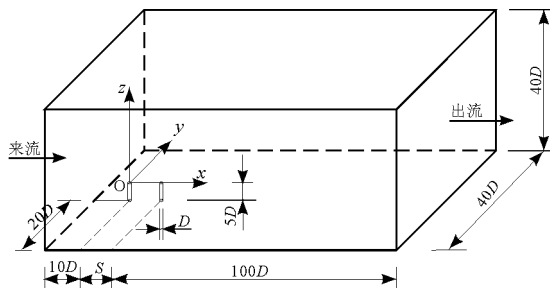
$$\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_p, \text{K}^{-1}; \text{能量方程中的 } k \text{ 为热传导系数。}$$

2.2 计算模型和网格划分

图 1 为横流环境中两孔射流的模型示意图,射流沿 z 方向与来流方向(x 方向)垂直,流速比 $R = u_j/u_a$,射流孔径 $D = 10 \text{ mm}$,长度 $L = 5 D$,射流管数目为 2 个,相对孔间距 S 分别为 $2D, 5D, 7D, 9D$ 。主槽沿流向(x 方向)、展向(y 方向)和法向(z 方向)

的尺寸分别为: $10D + S + 100D$ 、 $40D$ 、 $40D$ 。坐标原点设置在第1个射流管出口的圆心处。

运用ICEM CFD进行网格划分,计算域采用六面体网格,对射流出口以及射流发展区域的网格进行加密,每个模型的网格数量大约为200万。



注: D 为射流孔径; S 为相对孔间距。

图1 模型示意图

2.3 边界条件

环境入流边界: x 方向流速 $u = u_a$, y, z 方向流速 $w = 0$; 温度 $T = T_a$; 紊动强度 $I = 0.16 Re_{DH}^{-1/8}$, Re_{DH} 表示水流进口处的雷诺数; 水力直径 $D_H = 0.533$ m; 紊动能 $k = 1.5(u_a I)^2$, (m^2/s^2); 紊动能耗散 $\varepsilon = 0.09^{3/4} k^{3/2} / l$, (m^2/s^2); 紊动长度比尺 $l = 0.07 D_H$ 。

射流入流边界: x, y 方向流速 $u = v = 0$, z 方向流速 $w = u_j$; 温度 $T = T_j$; 紊动强度 $I = 0.16 Re_{DH}^{-1/8}$, Re_{DH} 表示水流进口处的雷诺数; 水力直径 $D_H = 0.01$ m; 紊动能 $k = 1.5(u_a I)^2$; 紊动能耗散 $\varepsilon = 0.09^{3/4} k^{3/2} / l$; 紊动长度比尺 $l = 0.07 D_H$ 。

出流边界: 自由出流边界条件。

自由液面: 采用刚盖假定。

壁面边界: 无滑移边界条件, 近壁网格节点采用标准壁面函数。

2.4 计算方法

本文采用有限体积法离散求解控制方程。压力-速度耦合基于SIMPLEC算法, 压力的插值采用二

阶格式, 空间离散采用二阶迎风格式, 除能量方程精度为 10^{-6} , 其余各方程的精度达到 10^{-4} , 认为计算收敛。

2.5 计算工况

表1为本研究的计算工况表。

表1 计算工况表

| 编号 | $u_j / (m \cdot s^{-1})$ | $u_a / (m \cdot s^{-1})$ | T_a / K | T_j / K | S/D | R |
|------|--------------------------|--------------------------|-----------|-----------|-------|-----|
| M1-1 | 0.6 | 0.1 | 288.15 | 303.15 | 2 | 6 |
| M1-2 | 0.6 | 0.1 | 288.15 | 303.15 | 5 | 6 |
| M1-3 | 0.6 | 0.1 | 288.15 | 303.15 | 7 | 6 |
| M1-4 | 0.6 | 0.1 | 288.15 | 303.15 | 9 | 6 |
| M2-2 | 0.8 | 0.1 | 288.15 | 303.15 | 5 | 8 |

3 计算结果分析

3.1 横向有效流速

横向有效流速表征了环境流体对射流作用的强弱, 以及第1个射流对第2个射流的屏蔽作用。射流横向有效流速表达式为: $U_e = \frac{l}{l_m} \int_0^{l_m} U dz^{[6]}$, l_m 为射流动量长度尺度, $l_m = (u_j^2 \pi D^2)^{1/2} u_a$ 。

为了表述方便, 后序图中出现的变量均对其进行无量纲化, 各个变量无量纲化的具体表达形式为: 横向有效流速为 U_e / U_a , 而横向有效流速无量纲化的变量后序继续以横向有效流表述; X, Y, Z 坐标轴的无量纲化为 $X/D, Y/D, Z/D$ 。此处约定无量纲化横向有效流速仍称为横向有效流速。

图2为不同工况下, $X-Z$ 断面的射流横向有效流速的总体变化趋势, 图2中横、纵坐标分别为 X 方向与横向有效流速的无量纲化变量。

如图2所示, 射流横向有效流速总体变化趋势为: 当 $X/D < -3$ 时横向有效流速 U_e / U_a 约为1。有效流速在第1个孔口射流后达到最小值 U_{e0} ($-0.429, -0.361, -0.362, -0.360$), 两孔间

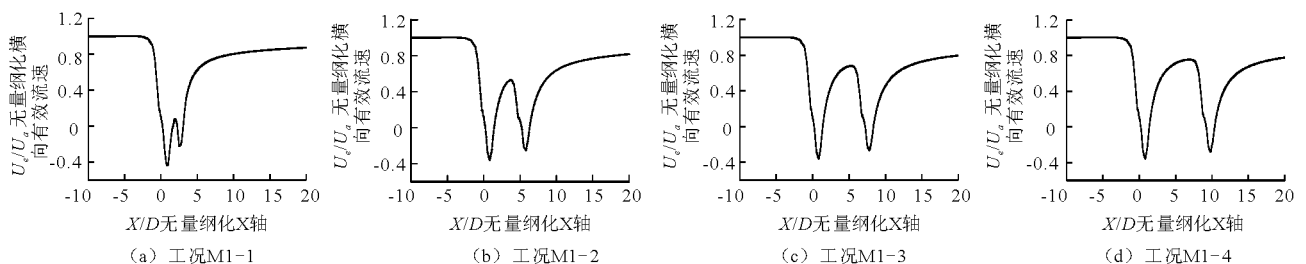


图2 射流横向有效流速图

的环境流体可以分为两个区,前区的环境流体被第1个射流卷吸,后区的流体被第2个射流卷吸^[16],前区的 U_e/U_a 上升到最大值 U_{e1} (0.08、0.528、0.680、0.755) 后,后区 U_e/U_a 逐渐减小达到二次最小值 U_{e2} (-0.218、-0.253、-0.268、-0.280)。经过第2个射流后,横向有效流速开始增大,最终趋于平缓。横向有效流速图中的“最大值” U_{e1} 随着射流孔间距的增大而增大,这表明随着孔间距的增大,第1孔射流对第2孔射流屏蔽作用趋于减缓。

从图2中可以观察到,横向有效流速沿着 X 轴正方向,在 $X/D = 0$ 后,有效流速值小于0并且逐渐减小,之后又随之增大至大于0又逐渐减小到小于0接着又逐渐增大,最终趋于平缓。出现这一现象的主要原因为:热射流两孔之间的环境流体被分为前后两区,由于射流卷吸作用,前区环境流体被卷吸进入第1孔射流时,速度方向具有沿着 X 轴负方向的分量,因此在第一孔射流之后,横向有效流速值小于0;后区环境流体被卷吸进入第2孔射流时速度方向具有沿着 X 轴正向的分量,因此之后有效流速出现了短暂上升,并且增加至大于0,之后由于第2孔射流对其右侧环境流体的卷吸作用,横向有效流速又出现了减小;随着射流沿流向发展,射流卷吸作用逐渐减弱,横向有

效流速沿 X 轴正方向最终趋于平缓。

3.2 流场分析

图3分别为工况 M1-1、M1-2、M1-3、M1-4 下 $X-Z$ 断面的流速等值线图。

如图3所示,当 $S/D = 2$ 时,热水从两孔射出后,在横向流速与射流卷吸的作用下,第1孔射流向偏转与第2孔射流合并成一股水流,以类似单孔射流的特征继续向环境流体运动;随着射流孔间距的增大($S = 5D, 7D, 9D$),两孔水流之间相互作用逐渐减小,第2个射流的弯曲程度逐渐增大;当 $S/D = 2$ 时,两孔流体射出合并以后,由于初始动量较大,在流向涡作用下,射流中心平面速度等值线图出现分叉。

当 $S/D \geq 5$ 时,随着孔间距的增大,第1孔射流在射流初始动量的作用下,与第2孔射流流体合并前速度等值线图出现分叉,随着射流的发展,两孔流体合并后由于动量的减小,流向涡作用也随之减小,因此两孔流体合并后,速度等值线图将不再出现分叉现象。

图4分别为工况 M1-2 下, $X/D = 2.5, 7.5, 12.5, 20$ 时 $Y-Z$ 断面流速场矢量图与温度场云图,其中云图的边界温度为 289 K。

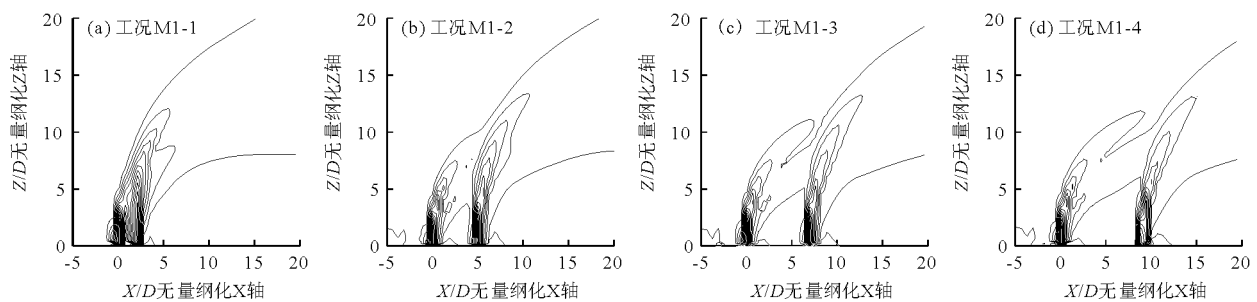


图3 不同工况 $X-Z$ 断面流速等值线图

如图4所示,速度矢量图显示,射流下游存在反向涡对,当 $Y/D < 0$ 时,涡为逆时针方向,当 $Y/D > 0$ 时,涡为顺时针方向。反向涡对促使射流流体与环境流体发生强烈的脉动混掺,加强了射流流体在环境流体中的稀释度。温度云图显示,随着射流向下游的发展,温度场由最初的“椭圆状”逐渐向“肾形”过渡,随着射流沿流向发展,射流轨迹线出现向上抬升的趋势。

3.3 轴线温度稀释度

本研究中的轴线是指射流过程中温度最高点的连线。轴线温度稀释度为 T/T_j , 表征热废水与环境流体发生脉动掺混后热水在冷水中的稀释程度的大

小, T/T_j 值越小表示热射流温度稀释度越大,热水在环境流体中的脉动掺混越强烈。以垂向上温度最大值表征射流轴线温度。

由于第1、2孔之前存在 S 距离,为了方便进行第1、2孔轴线温度稀释度的对比分析,在第2孔的 X 方向进行无量纲化时采用 $(X-S)/D$ 将第2孔的中心点移至0点。

图5为工况 M1-2, M2-2 下热射流第1、2孔的轴线温度稀释度图。

如图5所示,对不同初始射流流速的轴线温度稀释度进行分析,从图5(a)可以看出, $X/D < 3$ 时,随着射流初始流速的增加,射流初始动量随之增大,

加大了对环境流体的卷吸量,因此轴线温度稀释度随之增大。当 $3 < X/D < 4$, 轴线温度稀释度曲线分布趋于一致 ($T/T_j = 0.96$); 从图 5(b) 可以看出: 随着射流初始流速的增加, 第 2 孔射流的轴线温度稀释度也随之增大, 当 $(X - S)/D > 10.4$ 时, 两条曲

线趋于平缓, 热水稀释度基本趋于一致 ($T/T_j = 0.955$)。

图 6 为工况 M1-1、M1-2、M1-3、M1-4 下热射流过程中第 1、2 孔射流的轴线温度稀释度图。

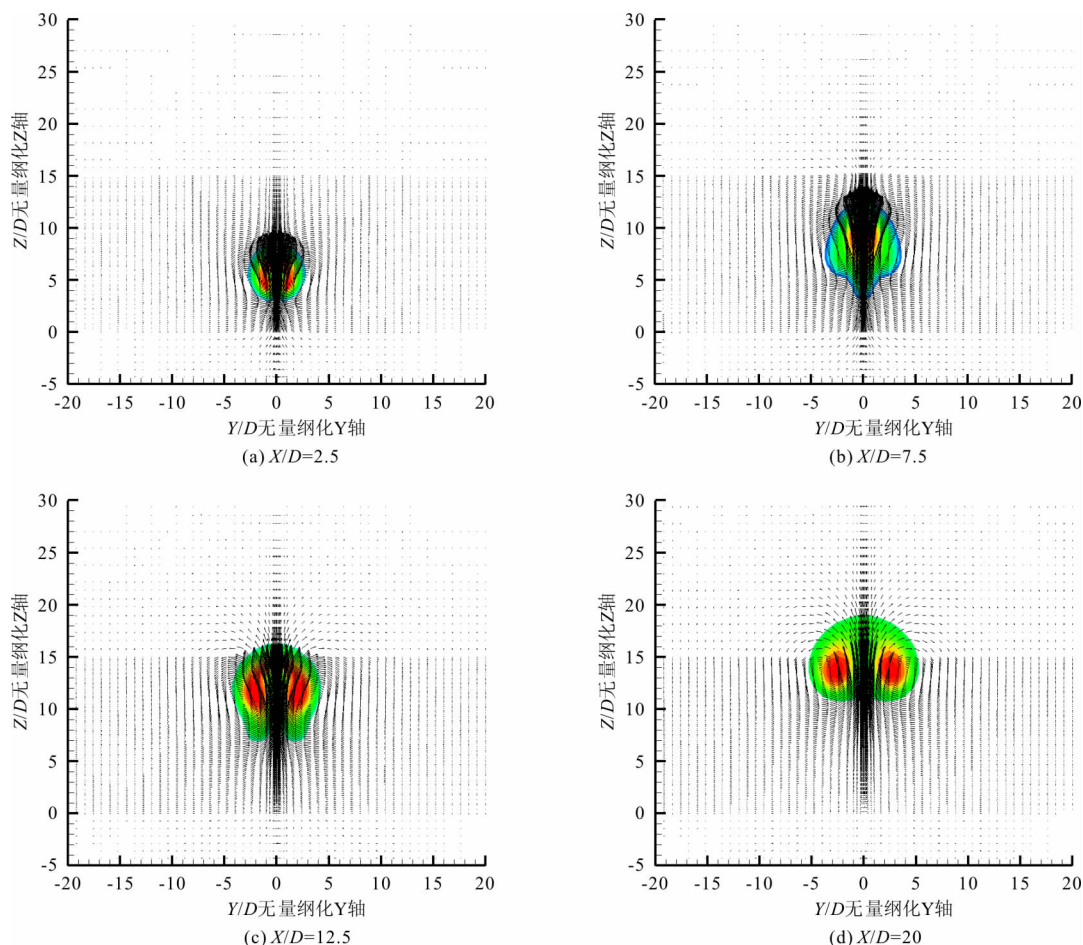


图 4 Y-Z 断面速度矢量图与温度云图

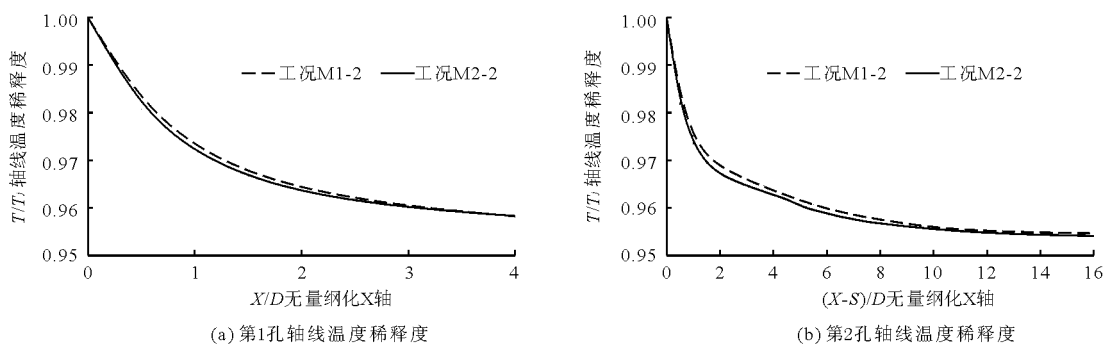


图 5 不同流速比下的轴线温度稀释度

为了研究射流孔间距对射流轴线温度稀释度的影响, 对图 6 进行分析。从图 6 (a) 可以得出, 在不同射流孔间距下, 第 1 孔射流轴线温度稀释度曲线分布相近, 这表明相对孔间距对第 1 孔射流温度影响

较小。从图 6(b) 中可以得出, 当 $S = 2D, 5D, (X - S)/D < 10$ 时, 随着射流孔间距的增大, 第 2 孔轴线温度衰减速率变缓, 当 $(X - S)/D > 10$ 时, 温度衰减速率趋于一致 ($T/T_j = 0.955$)。当 $S = 7D, 9D$, 第 2

孔的轴线温度衰减速率与 $S = 2D, 5D$ 产生了明显差异,轴线温度衰减速率并没有随射流孔间距的增大而减小,当 $(X - S)/D < 6$ 时,随着孔间距增大轴线温度衰减速率也随之增大,当 $6 < (X - S)/D < 14$ 时,随着孔间距增大,轴线温度衰减速率减小,当 $(X$

$- S)/D > 14$ 时,各个工况的轴线温度稀释度分布曲线趋于平缓最终达到一致($T/T_j = 0.955$)。 $S = 2D$ 的轴线温度稀释度在 $(X - S)/D < 10$ 时始终大于 $S = 5D, 7D, 9D$ 轴线温度稀释度。

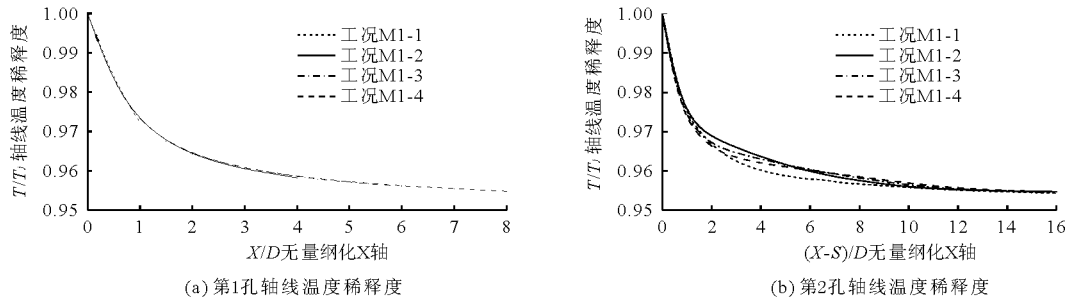


图6 不同孔间距下的轴线温度稀释度

4 结论

(1)随着射流孔间距的增加,第1孔射流对第2孔射流的遮挡作用趋于减弱。

(2)射流孔间距相同时,随着射流初始流速的增加,第1、2孔射流的轴线温度稀释度也随之增大。在已建成的排水设施中,可以考虑增大排污口的射流流速来达到热废水快速稀释的目的。

(3) $S/D = 2$ 时,增加射流的初始流速,为本研究中热水快速稀释的最优方案。

(4)射流过程中孔间距对第2孔射流的轴线温度稀释度的影响并没有随着孔间距的增加或减小出现规律性的变化,因此横流环境中的孔间距对第2孔射流轴线温度稀释度的影响仍需进一步的探究。

参考文献:

[1] 孙艳涛,王惠民,吴修锋. 温排水对水体生态环境影响的分析及处理[J]. 水资源保护,2008,24(2):70-72.
 [2] 李斌,张才学,孙省利. 湛江电厂温排水对滨海水体生态环境的影响[J]. 环境科学与技术,2012,35(61):78-84.
 [3] 蒋朝鹏,徐兆礼,陈佳杰,等. 秦山核电温排水对鱼类分布的影响[J]. 中国水产科学,2016,23(2):478-488.
 [4] 陈梦齐,刘紫丹,戴文芳,等. 象山港电厂温排水增温对浮游细菌群落空间分布的影响[J]. 生态学报,2016,36(20):6574-6582.
 [5] 邵磊,王颖. 同流环境多圆孔热废水排放数值模拟[J]. 环

境工程,2009,27(S1):1-4+19.

[6] 孙玉贤. 同流中热水浮射流的数值模拟及试验研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.
 [7] 薛晨亮. 同流中热浮射流特性研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.
 [8] 张健,杨立,张士成,等. 流动环境中圆孔水平热射流三维数值模拟[J]. 水科学进展,2011,22(5):668-673.
 [9] 肖洋,梁嘉斌,李志伟. 射流孔间距对横流中两孔射流稀释特性的影响[J]. 水利水电科技进展,2016,36(3):20-25.
 [10] 肖洋,雷鸣,李开杰,等. 横流中多孔射流流动特性实验研究[J]. 水科学进展,2012,23(3):390-395.
 [11] 马梓然,徐敏义,栾剑,等. 矩形长宽比对射流中心线湍流特性的影响[J]. 实验流体力学,2017,31(1):54-61.
 [12] 何熙,诸裕良,童中山. 粗糙度对水平热水浮射流影响特性研究[J]. 科学技术与工程,2014,14(31):149-154.
 [13] 陈永平,田万青,方家裕,等. 波浪环境下多孔射流水动力特性试验[J]. 水科学进展,2016,27(4):569-578.
 [14] El-Amin M F, Abdulmajeed A G, Amgad S. Numerical simulation and analysis of confined turbulent buoyant jet with variable source[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2015, 27(6):955-968.
 [15] 王福军. 计算流体力学分析:CFD软件原理与应用[M]. 北京:清华大学出版社有限公司,2004.
 [16] 李志伟,槐文信,钱忠东. 横流中单排多孔射流的流场与浓度特性数值模拟[J]. 中国科学(技术科学),2012,42(12):1395-1406.