

浮冰块底面水压力分布的数值模拟研究

罗昉昕, 赵新

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 冰块运动过程中遇到冰盖等阻碍时, 将有可能停滞或下潜。冰块的运动形式与作用在冰块上的力有密切关系。本文采用 VOF 法追踪自由水面, 结合 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型, 对浮冰块底面水压力分布进行了数值模拟。通过与 Dow Ambtman 物理模型试验数据的对比, 验证了该数值模拟方法的合理性和可靠性。模拟分析发现冰块底面水压力与冰块前缘形状、冰厚和流速均有关系: 前缘圆形断面冰块比前缘矩形断面冰块有着较弱的前缘分流效应和相同的文丘里效应; 冰厚、流速增大时, 冰块底面的压差增大, 冰块前缘最大压差的范围也增大, 且压强恢复速度变慢。

关键词: 浮冰块; 压力分布; 数值模拟; RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型; VOF 法

中图分类号: O242.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2013)02-0010-05

Numerical simulation of pressure distribution at bottom of floating ice block

LUO Fangxin, ZHAO Xin

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: When floating ice block meets resistance in the process of movement, it will rest against the ice cover or become entrained in the flow. The behaviors of floes rely on the hydrodynamic forces acting on floes. By applying RNG $k-\varepsilon$ turbulence model and VOF method, numerical simulation was made to the pressure distribution of the bottom beneath a floating ice block. The comparison between physical model experimental results and numerical simulation results was conducted, and they are in good agreement, which proved that the simulation results are reasonable and reliable. The results of numerical calculation show that the pressure distribution depends on the shape of ice, ice thickness and flow velocity. A ice block with a rounded leading edge has a weaker leading-edge effect compared to the rectangle ice block, and they have the same Venturi effect. Therefore, the magnitude and length of the maximum pressure differential at the leading edge of the round ice block are smaller than the rectangle ice block, but they have the same Venturi pressure. When ice thickness or flow velocity increases, the pressure differential beneath ice block will increase, and the pressure reduction zone will be longer and the pressure recovery rate will be slower.

Key words: floating ice block; pressure distribution; numerical simulation; RNG $k-\varepsilon$ turbulence model; VOF method

输水工程冬季经过寒冷地区时^[1], 可能遭受不同程度的冰害, 其中尤以冰塞与冰坝的危害最为严重, 影响输水能力, 危害输水建筑物安全, 甚至会威胁沿线人民群众的生命财产安全, 而冰块的下潜和累积是冰塞冰坝形成发展的基础。

冰块运动过程中遇到阻碍时(例如冰盖), 将有可能在冰盖前缘停滞^[2], 使冰盖长度平铺增加; 也有可能冰盖前缘发生下潜。冰块下潜后, 可能继续随水流在冰盖底部运动, 并在下游发生堆积或重

新露出水面; 也可能在下潜前缘不远处进行堆积, 从而形成加厚冰盖。冰块是否下潜以及下潜后是否向下游运动, 均取决于水流施加于冰块上的力。因此, 研究冰块底面的水压力分布对研究冰块的下潜和累积有重要的意义。

由于冰块底面的水压力分布无法通过原型观测得到, 人们只能采取物理试验和数值模拟的方法来研究。在物理模型试验方面, Coutermarsh 和 McGil-

收稿日期: 2012-12-05; 修回日期: 2012-12-10

基金项目: 国家重大科技专项(2012ZX07205005); 国家创新研究群体科学基金(51021004); 长江学者和创新团队发展计划(IRT0851)

作者简介: 罗昉昕(1987-), 男, 河南人, 硕士, 主要从事输水工程仿真与控制及冰水力学研究。

通讯作者: 赵新(1984-), 男, 辽宁开远人, 博士后, 主要从事输水工程仿真与控制及冰水力学研究。

vary^[3-5]尝试着用试验方法测量了浮冰块底面的水压力分布,并发现冰块底面的水压力有正有负,呈马鞍形分布。Kawai 等^[6]对冰盖前缘的浮冰块进行了大量的试验研究,描绘了其运动状态并提出了临界密度弗劳德数。Dow Ambtman^[7-8]也用物理模型试验测量了浮冰块底面的水压力分布,发现冰块前缘处水压力最小(压差最大),最小压力持续一段距离后逐渐增大恢复。但是物理模型试验存在着信息获得不全面、干扰流场、耗时费力等缺点,随着近些年来计算机水平的发展,数值模拟成为一个新的发展趋向。而目前关于冰期输水中冰的相关问题的数值模拟研究主要集中在冰的生成和输运,冰塞的形成和发展,以及冰块对建筑物的撞击力上,对冰块底面水压力分布的研究成果甚少。

本文运用 RNG $k-\varepsilon$ 紊流模型结合自由面追踪的 VOF 方法对矩形和圆形(前缘断面是以冰厚为直径的半圆,如图 1 所示)两种不同前缘断面形状的冰块在不同冰厚,不同流速等条件下的浮冰块底面水压力分布进行了数值模拟,通过与 Dow Ambtman 物理模型试验数据的对比,验证了该数值模型的可靠性和准确性。并进一步分析了冰块底面水压力分布与冰厚、流速以及冰块前缘形状之间的关系。

1 数学模型的建立

1.1 水流控制方程

数值模拟计算中水流控制方程包括连续方程、动量方程、紊动能 k 方程、紊动能耗散率 ε 方程^[7]。连续方程:

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

动量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} &= f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \\ \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\nu + \nu_t) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] & \quad (2) \end{aligned}$$

k 方程:

$$\frac{\partial (u_i k)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + p_r - \varepsilon \quad (3)$$

ε 方程:

$$\frac{\partial u_i \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\nu + \frac{\nu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{C_{s1} \varepsilon p_r - C_{s2} \varepsilon^2}{k} \quad (4)$$

式中: p_r 为紊动能生成率, $p_r = \nu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j}$; ν_t

为涡粘性系数, $\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$; $C_\mu = 0.0845$; $C_{s1} =$

$$\begin{aligned} 1.42 - \frac{\bar{\eta}(1 - \bar{\eta}/\bar{\eta}_0)}{1 + \beta \bar{\eta}^3}, C_{s2} &= 1.68; \sigma_k = 0.7194; C_\varepsilon \\ &= 0.7194; \bar{\eta} = Sk/\varepsilon, S = (2S_{i,j} \cdot S_{i,j})^{1/2}; \bar{\eta}_0 = \\ 4.38; \beta &= 0.012; S_{i,j} = \frac{1}{2} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \circ \end{aligned}$$

自由面追踪采用目前应用较多的 VOF (Volume of Fluid) 方法可由下式表示:

$$\rho = \alpha_w \rho_w + (1 - \alpha_w) \rho_a \quad (5)$$

$$\mu = \alpha_w \mu_w + (1 - \alpha_w) \mu_a \quad (6)$$

式中: ρ 和 μ 是体积分数的函数,而不是常数; α_w 为水的体积分数; ρ_w 和 ρ_a 分别为水和气的密度; μ_w 和 μ_a 分别为水和气的分子粘性系数。

1.2 网格划分及计算条件

计算区域为一矩形水槽,冰块放置在水槽中段。网格划分采用笛卡尔正交结构化网格,为了减少计算区域的网格数量和提高计算精度,采用分块网格和嵌套网格相结合的形式,对重点研究部分进行渐变加密。水槽进口段、冰块所在段和水槽出口段为 3 个相连的分块网格。水槽进口到靠近冰块前缘位置为网格块 1,冰块尾端后到水槽出口为网格块 4,其网格单元的边长较大,为 0.8 cm;冰块所在区域为网格块 2,进行一次加密,网格单元边长为 0.4 cm,见图 2;为了重点研究冰块底面中线的水压力,将冰块中线及下部水体进行再加密,作为网格块 3 嵌套于网格块 2 中,网格块 3 单元边长为 0.2 cm,见图 3。细部网格划分情况见图 4。

边界条件的设置如下:进口边界设为速度进口,出口边界设为压力出口,槽底为无滑移固体边界,与空气接触的顶面设为对称面。对自由表面的处理,采用 VOF 法。

2 数值模型的验证

由于冰块底面的水压力沿冰宽 (Y 方向) 基本相同,本文重点研究冰块底面沿水流 X 方向的压力分布。国内外关于冰块底面水压力分布的物理模型试验的文献资料不多,其中以 Dow Ambtman 的数据资料最为全面,为校核和验证上述数学模型的可靠性和准确性,以 Dow Ambtman 物理模型试验为参考,建立数值仿真模型:矩形水槽长 7.5 m、宽 0.75 m、高 0.45 m、水深 0.3 m;模型冰长 0.5 m,宽 0.75 m,浸在水中的冰厚 t_s 为冰厚 t 的 0.92 倍。由于冰块的下潜与水流运动后冰块底面压强减小而形成的压差有重要关系,因此本文用冰块底面的水压差分布来代表冰块底面的水压力分布来进行研究分析。

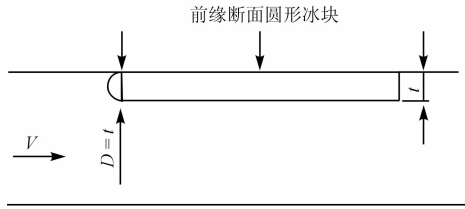


图1 前缘圆形断面冰块示意图

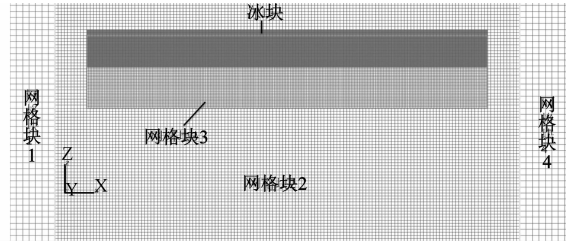


图2 部分计算区域网格划分示意图(X-Z平面)

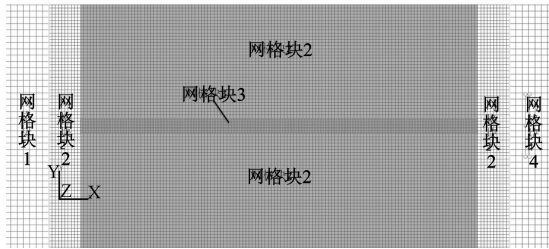


图3 部分计算区域网格划分示意图(X-Y平面)

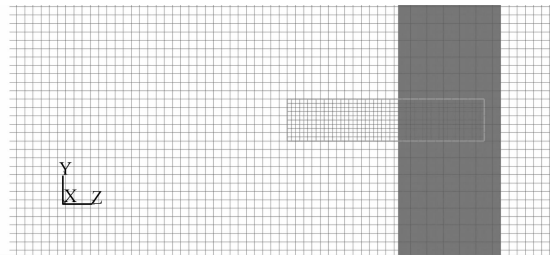


图4 部分计算区域网格划分示意图(Y-Z平面)

图5~图7分别为 $t/H = 0.05$ 、 $t/H = 0.1$ 、 $t/H = 0.15$ 时在 $V_1 = 0.35 \text{ m/s}$ 、 $V_2 = 0.48 \text{ m/s}$ 、 $V_3 = 0.61 \text{ m/s}$ 等不同条件组合下的试验和数值模拟的前缘矩形断面冰块中线的压差分布图。由图可以看出,数值模拟结果与试验数据具有较高的一致性。在冰块前缘附近,压差最大,压强减小到一个最小值,这是冰块前缘分流效应和文丘里效应的综合体现,冰块前缘下的流体的加速和分离使压强骤减,而后压强逐渐增大恢复,在快接近冰块尾端处开始变得平稳,此时的压差是由于文丘里效应造成的,称作文丘里压强 $P_{\text{文丘里}}$,可由伯努利方程来估算:

$$P_{\text{文丘里}} = \rho_w \frac{1}{2} (V^2 - V_u^2) \quad (7)$$

式中: ρ_w 为水的密度; V 为冰块前水流平均流速; V_u 为冰块下水的平均流速。

为了定量地对比数值模拟值与试验值,列出了上述不同工况下文丘里压强的数值模拟值及试验值与理论计算值的对比表,如表1所示。由表可看出,

数值模拟值与试验值的相对误差都在10%以内。计算可知试验值与理论值的标准差为6.73 Pa,模拟值与理论值的标准差为4.54 Pa。Dow Ambtman 物理模型试验的误差可能是由试验测量误差等原因造成的。但这进一步证明了本文所建立的数值模拟方法的可靠性和准确性。

表1 不同工况下文丘里压强的理论值、试验值与模拟值 Pa, %

不同工况	理论值	试验值	模拟值	模拟与试验相对误差
$tH0.05 - V_1$	-6.85	-6.62	-7.03	6.19
$tH0.05 - V_2$	-13.45	-13.28	-14.14	6.47
$tH0.05 - V_3$	-22.12	-24.49	-25.98	6.08
$tH0.1 - V_1$	-14.36	-16.29	-15.54	-4.60
$tH0.1 - V_2$	-28.16	-36.73	-33.17	-9.69
$tH0.1 - V_3$	-46.11	-62.36	-56.24	-9.81
$tH0.15 - V_1$	-24.95	-19.79	-19.40	-1.97
$tH0.15 - V_2$	-48.77	-50.63	-46.55	-8.06
$tH0.15 - V_3$	-83.25	-90.77	-87.96	-3.10

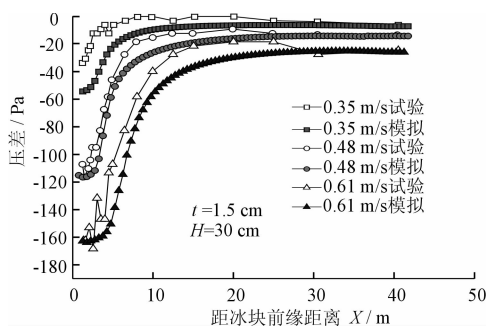


图5 $t/H = 0.05$ 时前缘矩形断面冰块中线的压差分布

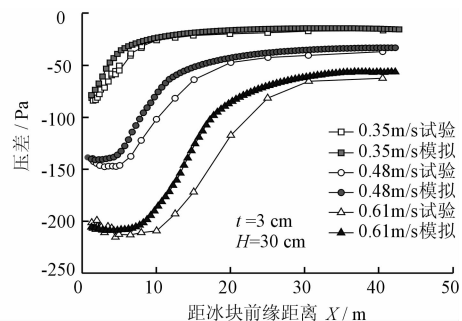


图6 $t/H = 0.1$ 时前缘矩形断面冰块中线的压差分布

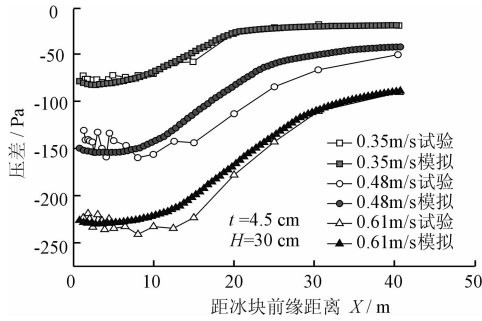


图 7 $t/H = 0.15$ 时前缘矩形断面冰块中线的压差分布

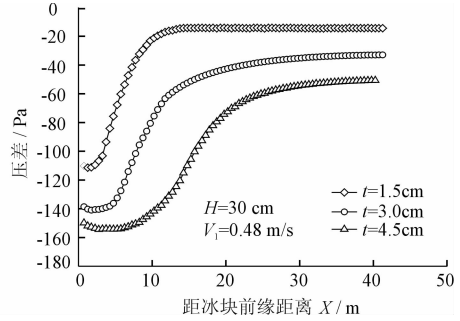


图 8 不同冰厚时前缘矩形断面冰块中线的压差分布

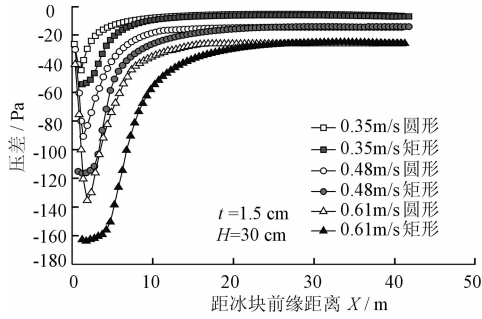


图 9 $t/H = 0.05$ 时不同前缘形状的冰块中线的压差分布

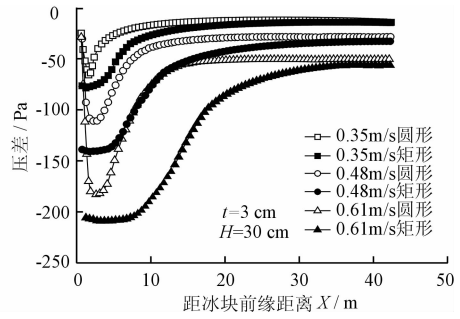


图 10 $t/H = 0.1$ 不同前缘形状的冰块中线的压差分布

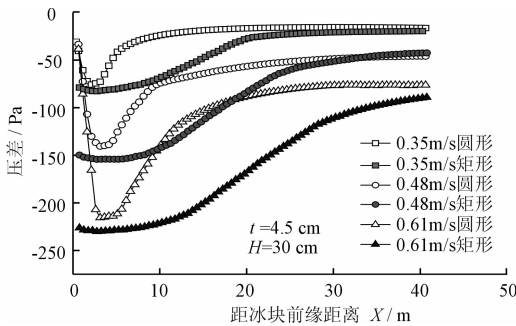


图 11 $t/H = 0.15$ 不同前缘形状的冰块中线的压差分布

3 冰块底面水压力分布影响因素分析

冰块底面的压差主要是由冰块的前缘分流效应和文丘里效应两部分组成。下面来分析冰块底面的水压差分布与流速、冰厚和冰块前缘形状的关系。

(1) 流速对前缘矩形断面冰块底面水压差分布的影响。图 5 ~ 图 7 分别为固定 t/H , 不同流速时, 前缘矩形断面冰块中线的压差分布图。从图中可以看出, 当 t/H 不变、流速增大时, 冰块前缘水流加速显著增大, 冰块底面的最大压差显著增大, 冰块前缘区域压强减小区的范围也有一定程度地增大, 文丘里压强增大。

(2) 冰厚对前缘矩形断面冰块底面水压差分布的影响。图 8 为水深、流速相同, 冰厚不同时, 前缘矩形断面冰块中线的压差分布图。从图中可以看出, 当冰厚增大时, 冰块的分流效应增强, 分离区增

长, 从而使冰块底面的最大压差逐渐增大, 冰块前缘区域出现更大范围的压强减小区, 且压差的恢复速度逐渐变慢, 同时冰下过水断面减小, 冰下平均流速增大, 使得冰块底面的压强减小而文丘里压强增大。

(3) 不同前缘形状对冰块底面水压差分布的影响。图 9 ~ 图 11 为不同前缘形状的冰块中线的压差分布图。从图中可以看出, 因为圆弧比起矩形有着较弱的分离效应, 前缘圆形断面冰块底面的最大压差比相同条件下前缘矩形断面冰块小, 并且当压差达到最大时, 没有像前缘矩形断面冰块那样延续一段距离, 而是迅速开始恢复, 更快地达到了文丘里压强。另一方面, 前缘形状对文丘里效应几乎没有影响。

同时由图 9 ~ 图 11 还可看出, 流速和冰厚对前缘圆形断面冰块的影响与前缘矩形断面冰块类似。

4 结 语

本文运用 RNG $k - \epsilon$ 紊流模型结合自由面追踪的 VOF 法对浮冰块底面水压差分布进行了数值模拟, 模拟结果同 Dow Ambtman 试验结果吻合较好, 表明本文所采用的紊流数学模型是可靠的。研究表明: 冰块底面的水压差主要是由冰块的前缘分流效应和文丘里效应两部分造成, 且冰块底面的水压差分布与冰厚、流速和冰块的前缘断面形状均有关系:

(1) 对于前缘矩形断面冰块而言, 冰厚、流速增

大时,冰块前缘最大压差的数值与范围增大,且压强恢复速度变慢,文丘里压强也增大;

(2)对于前缘圆形断面冰块而言,冰厚、流速增大时,冰块底面的最大压差和文丘里压强均随之增大,且达到最大压强后迅速恢复到文丘里压强;

(3)前缘圆形断面冰块比起前缘矩形断面冰块有着较弱的前缘分流效应和几乎一样的文丘里效应。

参考文献:

- [1] 王军. 冰盖前缘处冰块稳定性分析[J]. 人民黄河, 1997,19(1):9-12.
- [2] 赵新,练继建,黄焱. 基于真冰模型试验的冰盖稳定性研究[J]. 水利水电技术, 2011,42(10):132-136.
- [3] Coutermarsh B, McGilvary W R. Pressure distribution of an underturning ice floe [C] // Proc. 6th Workshop on River Ice, 1991:143-163.
- [4] Coutermarsh B, McGilvary W R. Static analysis of floating ice block stability [J]. Journal of Hydraulic Research, 1993,31(2):147-160.
- [5] Coutermarsh B, McGilvary W R. Analyzing the stability of floating ice floes [R]. CRREL Report,1994.
- [6] Kawai T, Hara F, Masaki S, et al. Experimental study on the process of ice jam development [C] // Proc. 9th Workshop on River Ice, CGU-HS CRIPE, Lethbridge, Alberta, Canada, 1997:245-256.
- [7] Dow Ambtman Karen Elizabeth. Analysis of the Stability of Floating Ice Blocks [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011,137(4):412-422.
- [8] Dow Ambtman K E. Experimental investigation of ice floe stability [D]. University of Alberta Libraries, Edmonton, AB, Canada,2009.
- [9] 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,2004.
- [3] Kashiwada S, Ishikawa H, Miyamoto N, et al. Fish test for endocrine - disruption and estimation of water quality of Japanese rivers [J]. Water Research, 2002,36(8):2161-2166.
- [4] Kim K B, Seo K W, Kim Y J, et al. Estrogenic effects of phenolic compounds on glucose - 6 - phosphate dehydrogenase in MCF - 7 cells and uterine glutathione peroxidase in rats [J]. Chemosphere, 2003,50(9):1167-1173.
- [5] Krupcik J. Determination of ECD relative response factors for HRGC quantitative trace analysis of PCBs [J]. Fuel Energy Abstracts, 1998,39(1):13.
- [6] 周海东. 城市污水中微量有机污染物的分布与迁移研究 [R]. 北京:清华大学环境系, 2008.
- [7] 袁理, 曾光明, 张长, 等. 痕量壬基酚及相关化合物的样品预处理和测定 [J]. 环境污染与防治, 2004,26(6):475-478.
- [8] Zuo Y, Zhang K. Suitability of N,O - bis(trimethylsilyl) trifluoroacetamide as derivatization reagent for the determination of the estrogens estrone and 17 [alpha] - ethinylestradiol by gas chromatography mass spectrometry [J]. Journal of Chromatography A, 2005,1095(1-2):201-202.
- [9] 刘桂芳, 马军, 秦庆东, 等. 水中典型内分泌干扰物的臭氧氧化研究 [J]. 环境科学, 2007,28(7):1466-1471.
- [10] Hoigné J, Bader H. Rate constants of reaction of ozone with organic and inorganic compounds in water - I: dissociating organic compounds [J]. Water Research, 1983,17(2):85-194.
- [11] Weavers L K, Ling F H, Hoffmann M R. Aromatic compound degradation in water using a combination of sonolysis and ozonolysis [J]. Environmental Science and Technology, 1998,32(18):2727-2733.
- [12] Neppolian B, Jung H, Choi H, et al. Sonolytic degradation of methyl tert - butyl ether: The role of coupled fenton process and persulphate ion [J]. Water Research, 2002,36(19):4699-4708.
- [13] 高乃云, 张可佳. 超声联合臭氧在水处理中的反应机理及应用 [J]. 净水技术, 2008,27(3):1-4.
- [14] 于颖慧. O₃/H₂O₂ 对水中内分泌干扰物质的去除及机理探讨 [D]. 哈尔滨:黑龙江大学,2002.

(上接第9页)