

海上溢油堰式回收技术的原理与改进

张银东, 杨杰, 张兴明

(大连海事大学轮机工程学院, 辽宁大连 116026)

摘要:堰式回收技术在海上溢油污染治理中应用广泛。应用堰过流理论对堰式撇油器中回收堰的过流性能进行分析,确定薄壁回收堰发生过流不稳而导致回收效率变差的原因,提出应用曲线形实用堰代替薄壁堰以改进回收堰的过流稳定性和回收速度,并给出曲线形实用堰的设计方法,为堰式撇油器实现溢油的快速高效回收奠定了理论基础。

关键词:溢油;回收堰;曲线形实用堰;撇油器

中图分类号:X55 文献标识码:A 文章编号:1007-6336(2015)02-0290-04

Working principle and improvement of weir technology in recovering oil spill

ZHANG Yin-dong, YANG Jie, ZHANG Xing-ming

(College of Marine Engineering, Dalian Maritime University, Dalian 116026, china)

Abstract:Weir recovery technology has been widely used in dealing with marine oil spill. The theory of weir flow is presented to analyze discharge capacity of recovery weir in weir skimmer, and the reason of flow instability, which occurs to thin-walled recovery weir and results in decreased recovery efficiency, is ascertained. The curved practical weir is presented to enhance flow stability and recovery rate of thin-walled recovery weir, and design method of curved practical weir is provided, which lay the theoretical foundation for achieving more rapid and efficient oil spill recovery by weir skimmer.

Key words:oil spill;recovery weir;the curved practical weir;skimmer

随着海上石油开采和运输规模的不断扩大,溢油已经成为海洋环境污染的重大危险源,大量的原油及其炼制品在溢油事故发生时泄露到海洋环境中,会对当地的海洋生态环境带来灾难性的破坏,并造成巨大的经济损失及严重危害人体健康。为减轻溢油对海洋环境的损害,需要立即采取有效的技术手段对水面溢油污染进行应急治理。目前,溢油污染的应急治理方法主要有燃烧法、化学法、生物法、机械回收法等,其中溢油机械回收法由于既可以将水中溢油彻底清除,又能回收宝贵的石油资源,因此已成为世界范围内应用最为广泛的溢油应急治理方法。现在常用的溢油

机械回收技术有多种,如堰式、水动力式、粘附式等^[1-4]。由于海上溢油数量巨大和水上作业困难,只有回收速度(单位时间内回收的纯油数量)和回收效率(单位时间内回收的油水混合物中纯油含量百分比)高、抗风浪能力强的溢油机械回收技术才能满足海上大规模溢油事故的应急处理要求,而目前的各种溢油回收技术均无法满足上述要求。堰式溢油回收技术的回收速度较高,但是其回收效率较低,本文将研究堰式回收技术的机理,确定其回收效率较低的原因,并提出对堰式回收技术的改进方法,以保证堰式回收技术能够实现海上大规模溢油的快速高效回收。

收稿日期:2014-04-07,修订日期:2014-06-14

基金项目:国家自然科学基金项目(51109021);中央高校青年骨干教师基金项目(3132013028);交通部基础研究项目(2014329225040)

作者简介:张银东(1979-),男,内蒙古赤峰人,副教授,博士,主要研究方向为海洋溢油污染治理,E-mail: dong-zyd@163.com

1 堰式溢油机械回收技术的工作原理

1.1 堰过流原理分析

堰式回收技术是目前较为常用的海上溢油清除技术,其主要原理如图1所示,利用堰的过流将水面漂浮的厚油层(150~400 mm)直接送入撇油器中完成回收,是高速回收溢油的首选技术。

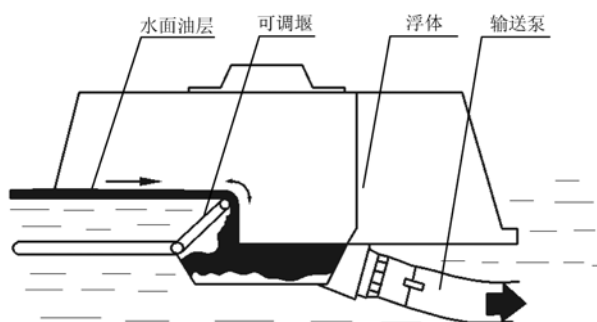


图1 可调堰式撇油器工作原理

Fig.1 Working principle diagram of adjustable weir oil skimmer

为分析堰过流的原理,建立水面油水混合物的过堰流动分析模型,如图2所示。

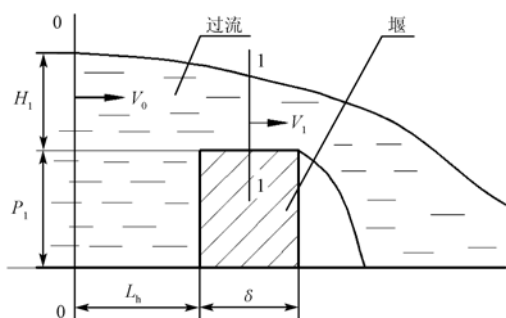


图2 水面浮油的过堰流动

Fig.2 Weir flow of floating oil

当水面油水混合物通过堰顶时,流线收缩,流速加大,自由表面逐渐下降。根据水力学原理,堰前液面尚无明显下降的断面称为堰前断面,其距离堰顶的长度为 L_h ,则 $L_h = (3-5)H$,或 $L_h = 2.67P_1$ 。 H 为堰顶水头, P_1 为上游堰高。过堰的油水混合物的形态主要取决于堰壁厚度 δ 与堰顶水头 H 之比:当 $\delta/H < 0.67$ 时,堰上油水混合物的流动形态为薄壁堰流,当 $0.67 < \delta/H < 2.5$ 时,堰上油水混合物的流动形态为实用堰流^[4]。

用能量方程可以分析堰流的基本流动过程^[5-7]。如图2所示,0-0断面为渐变流,1-1断面为急变流,其断面上压强分布不符合静水压强分布规律。现假定1-1断面上各点的测压管水头平

均值为 $(z + \frac{p}{\gamma})_1 = \zeta H_0$, ζ 为比例系数。则能量方程为:

$$H + \frac{a_0 V_0^2}{2g} = \left(z + \frac{p}{\gamma}\right)_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + \varepsilon \frac{V_1^2}{2g} \quad (1)$$

$$\text{或改写为 } H_0 - \zeta H_0 = (a_1 + \varepsilon) \frac{V_1^2}{2g}, \text{ 即}$$

$$V_1 = \frac{1}{\sqrt{a_1 + \varepsilon}} \sqrt{2g(H_0 - \zeta H_0)} \quad (2)$$

式中: V_0 为0-0断面平均流速; V_1 为1-1断面平均流速; $H_0 = H + \frac{a_0 V_0^2}{2g}$ 为包括行进流速水头在内的堰顶水头; ε 为堰的局部损失系数; p 为压力; γ 为比重。

设堰顶过流断面是宽度为 b 的矩形断面,并假设1-1断面的过流厚度为 KH_0 , K 为反映堰顶过流垂直收缩的系数,则堰顶的过堰流量即溢油回收能力 Q 为:

$$Q = KH_0 b V_1 = KH_0 b \frac{1}{\sqrt{a_1 + \varepsilon}} \sqrt{2gH_0(1 - \zeta)} \quad (3)$$

可将 $Q = mb \sqrt{2g} H_0^{\frac{3}{2}}$ 做为堰顶过流的基本公式,它适用于过流断面为矩形的任意堰形。其中:

$\varphi = 1/\sqrt{a_1 + \varepsilon}$ 为流速系数,与局部损失的大小有关; $m = \varphi K \sqrt{1 - \zeta}$ 为流量系数,显然 $m = f(\varphi, K, \zeta)$,即流量系数为过堰水流的局部损失 φ 、垂直收缩程度 K 及1-1断面与压强分布有关的 ζ 值的函数。在堰顶水头一定的条件下,堰的流量系数主要决定于堰的边界条件,如上游堰高、堰顶边缘形状、堰壁厚度等。

1.2 薄壁堰过流分析

现在大量应用的堰式撇油器采用的都是薄壁堰,其过流如图3所示,在计算堰式撇油器的回收能力时,计算无侧收缩的矩形薄壁堰的过流量即可得出。

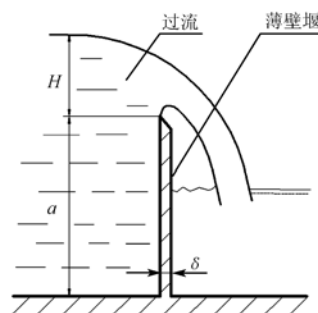


图3 薄壁堰的过流

Fig.3 schematic diagram of thin-walled weir flow

为了计算方便,可以将堰流基本公式改写为下式进行计算:

$$Q_b = m_0 b \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (4)$$

式中: Q_b 为薄壁堰堰顶的过堰流量, b 为堰的宽度, H 为堰上水头; m_0 可用雷保克 (T. Rehbock) 的经验公式^[8]计算:

$$m_0 = 0.4034 + 0.0534 \frac{H}{a} + \frac{1}{1610H - 4.5} \quad (5)$$

式中: a 为上游堰高。 H, a 均以 m 计, 式(5)的适用条件为 $H \geq 0.025 \text{ m}$, $H/a \leq 2$ 。

从图3可以看出,当油水混合物流过薄壁堰时,在水流下部有与空气相通的空间,造成了过流的不稳定,另外当堰顶水头较小时 ($H < 0.025 \text{ m}$), 油水混合物的溢流会受到表面张力的作用,出流将不稳定,这也是现在各种堰式撇油器在回收薄油膜时性能低下的主要原因。通常为了实现薄油膜的回收,目前的堰式撇油器只能通过增加堰顶水头来提高回收能力,但是这样会导致回收效率的大幅降低,回收的油水混合物油少水多,甚至失去回收意义。此外,油水混合物在经过薄壁堰后由于不稳定经常发生严重的油水“掺混”现象,油的乳化倾向加剧,对于后继的油水分分离操作十分不利。因此,目前应用的薄壁堰式回收技术亟待改进以适应高速高效的海上溢油机械回收要求^[9-11]。

2 堰式溢油机械回收技术的改进

2.1 曲线型实用堰工作原理

为提高薄壁堰对于油水混合物的过流能力和过流稳定性,在一定的定型水头下,可将堰形剖面的轮廓设计成如图4所示的曲线型实用堰。

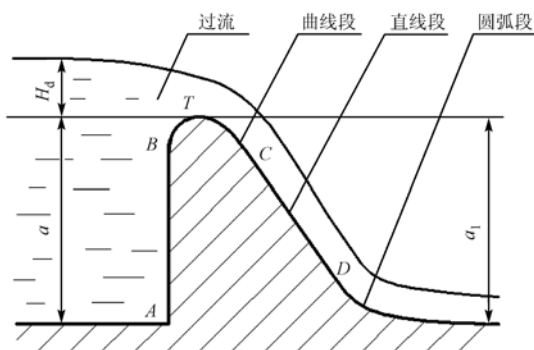


图4 曲线型实用堰过流示意

Fig. 4 Schematic diagram of curved practical weir

在曲线型实用堰中,堰顶曲线 BT 及 TC 段对液流的特性影响最大,是设计剖面形状的关键。

如果 BT, TC 段与同样条件下薄壁自由出流时的水流下缘相吻合,水流不受堰面的影响,堰面压强为大气压,这时油水的混合程度是最轻的。如果堰面突出于水流下缘,堰面将顶托水流,使堰面压强增大,过水能力降低。反之,若堰面低于水流下缘,溢流水流与堰面间形成负压,等于加大了作用水头,过水能力也将加大,但是过大负压会使水流不稳定。因此,为兼顾溢油回收过程中的回收速度和过流稳定性,堰式回收技术的最佳堰型应设计成与相应水头的薄壁堰过流水流下缘的形状相吻合,并通过试验来修改轮廓线,使堰顶附近的动水压强接近于零而不出现负值,通过上述方法得到的堰,其过流能力是正常条件下最大的,并且过堰水流的稳定性也优于薄壁堰流。

2.2 曲线型实用堰的堰型设计

通过对曲线型实用堰过流机理的分析,建立曲线型实用堰的剖面,如图5所示。

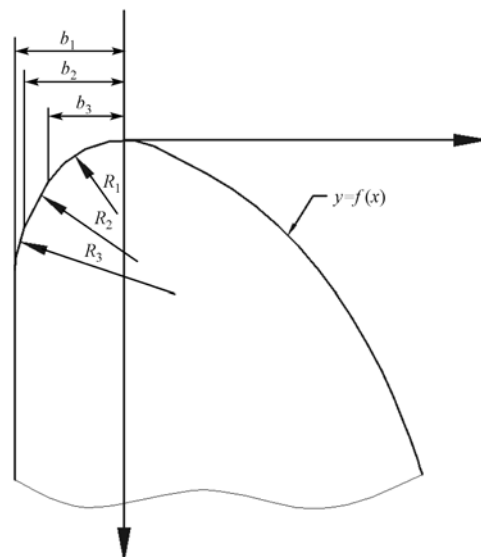


图5 曲线型实用堰的堰顶剖面

Fig. 5 The curved practical weir crest profile

在图5中,曲线型实用堰的堰顶上游部分曲线采用三段圆弧(半径分别为 R_1, R_2, R_3)连接的曲线,与上游面平顺地连接,从而改善了堰面的压力条件,增大了过流能力。剖面上各尺寸值可根据设计水头高度 H_d 而定,通过实验可以获取具体设计参数为:

$$R_1 = 0.480H_d, R_2 = 0.194H_d, R_3 = 0.042H_d, b_1 = 0.178H_d, b_2 = 0.280H_d, b_3 = 0.282H_d。$$

其堰顶下游部分的函数曲线 $y=f(x)$ 用下列函数表示^[12]:

$$y = \frac{x^{1.85}}{2H_d^{0.85}} \quad (6)$$

曲线型实用堰剖面的下部可与一倾斜直线相连接,斜直线下端可用圆弧与下游的流道相接,以便水流的平稳流动,如图5所示。斜直线的坡度一般取为1:0.65~1:0.75^[13]。

2.3 两种堰型过流性能的对比分析

曲线型实用堰的过堰流量可以表示为^[14]

$$Q_q = \sigma m b \sqrt{2g} H^{3/2} \quad (7)$$

式中: Q_q 为曲线型实用堰堰顶的过堰流量, σ 为淹没系数; b 为堰的宽度; H 为堰上水头; m 为流量系数。

当曲线型实用堰的水头 H 等于设计水头 H_d 时,相应的流量系数 m 为堰的设计流量系数 m_d 。对于上述曲线型实用堰,根据实验可以测量得出其流量系数 $m_d = 0.501$ ^[15]。当 $a = 0.25$ m, H 为0~0.5 m,利用式(5)计算出的薄壁堰流量系数,在相同堰顶水头高度变化条件下,对薄壁堰与实用堰的过堰流量进行计算和对比,如图6所示。从图中可以看出,实用堰的过流能力要优于薄壁堰。

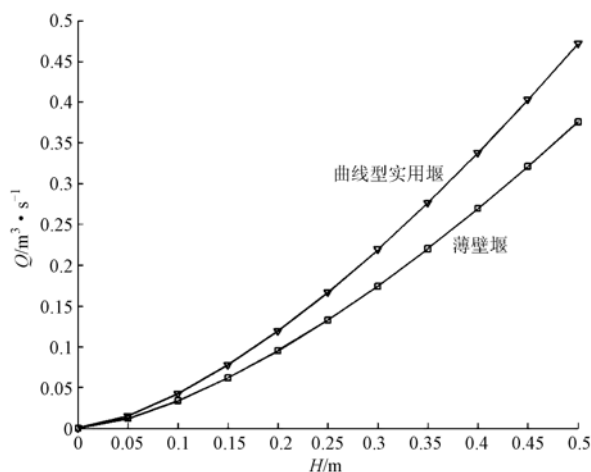


图6 薄壁堰和实用堰的过堰流量对比

Fig. 6 Flow capacity comparison between curved practical-weir and thin-walled weir

3 结论

本文通过对堰式溢油机械回收技术工作原理的分析,建立了基于堰过流理论的回收能力计算模型,确定了影响堰式回收技术性能的关键因素,从机理上解释了目前堰式回收技术大都采用的薄壁堰型存在的过流稳定性缺陷产生的原因,提出了对薄壁堰的改进方法,即应用曲线型实用堰代替薄壁堰作为回收堰,并给出了曲线型实用堰的设计方法。通过理论分析和仿真计算可以得出,将曲线型实用堰代替薄壁堰应用于堰式溢油机械

回收技术,不但可以提高堰的过流量以改善回收能力,而且最重要的是可以提高堰的过流稳定性,减小油水掺混的程度,为提高堰式溢油机械回收技术的回收效率创造了有利条件,使堰式回收技术在海上溢油污染治理中具有了更广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] 熊善高,李洪远,丁晓,等.中国海域船舶溢油事故特征与预防对策[J].海洋环境科学,2013,32(6):875-879.
- [2] 张银东,李文华,侯解民,等.堰式撇油器的改进[J].辽宁工程技术大学学报,2007,26(3):438-441.
- [3] VENTIKOS N P, VERGETIS E, PSARAFTIS H N, et al. A high-level synthesis of oil spill response equipment and countermeasures[J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 107(1/2): 51-58.
- [4] NORDVIK A B. Time window-of-opportunity strategies for oil spill planning and response[J]. Pure and Applied Chemistry, 1999, 71(1): 5-16.
- [5] 刘兴华,王笃波,栾清华,等.基于ActiveX Automation的溢流重力坝WES堰面设计[J].灌溉排水学报,2007,26(4B):114-115.
- [6] SCHMOCKER L, HALLDÓRSÐÓTTIR B R, HAGER W H. Effect of weir face angles on circular-crested weir flow[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(6): 637-643.
- [7] QU J, RAMAMURTHY A S, TADAYON R, et al. Numerical simulation of sharp-crested weir flows[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, 36(9): 1530-1534.
- [8] EAD S A, KATOPODIS C, SIKORA G J, et al. Flow regimes and structure in pool and weir fishways[J]. Journal of Environmental Engineering and Science, 2004, 3(5): 379-390.
- [9] BROJE V, KELLER A A. Improved mechanical oil spill recovery using an optimized geometry for the skimmer surface[J]. Environmental Science & Technology, 2006, 40(24): 7914-7918.
- [10] NORDVIK A B, SIMMONS J L, BITTING K R, et al. Oil and water separation in marine oil spill clean-up operations[J]. Spill Science & Technology Bulletin, 1996, 3(3): 107-122.
- [11] XU H L, CHEN J N, WANG S D, et al. Oil spill forecast model based on uncertainty analysis: A case study of Dalian Oil Spill[J]. Ocean Engineering, 2012, 54: 206-212.
- [12] KABIRI-SAMANI A, JAVAHERI A, BORGHEI S M, et al. Discharge coefficient of a rectangular labyrinth weir[J]. Proceedings of the ICE - Water Management, 2012, 166(8): 443-451.
- [13] MUSLU Y. Lateral weir flow model using a curve fitting analysis[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7): 712-715.
- [14] EMIROGLU M E, BAYLAR A. The effect of broad-crested weir shape on air entrainment[J]. Journal of Hydraulic Research, 2003, 41(6): 649-655.
- [15] TONG H H, AI K M, DING X Q. Discharge capacity of broken-line practical weir[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(2): 7-8.