

主 编

于 航 白景峰

# 污水深海排放 扩散器

设计与案例研究

非 外 借



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

于 航 白景峰

主 编

# 污水深海排放 扩散器

设计技术与案例研究



北京大学出版社  
PEKING UNIVERSITY PRESS

## 图书在版编目(CIP)数据

污水深海排放扩散器设计技术与案例研究/于航,白景峰主编. —北京:北京大学出版社, 2017. 12.

ISBN 978-7-301-29134-4

I. ①污… II. ①于… ②白… III. ①污水处置—研究 IV. ①X703

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 327540 号

- 书 名 污水深海排放扩散器设计技术与案例研究  
WUSHUI SHENHAI PAIFANG KUOSANQI SHEJI JISHU YU ANLI YANJIU
- 著作责任者 于 航 白景峰 主编
- 责任编辑 王树通
- 标准书号 ISBN 978-7-301-29134-4
- 出版发行 北京大学出版社
- 地 址 北京市海淀区成府路 205 号 100871
- 网 址 <http://www.pup.cn> 新浪微博: @北京大学出版社
- 电子信箱 [zpup@pup.cn](mailto:zpup@pup.cn)
- 电 话 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62765014
- 印 刷 者 三河市北燕印装有限公司
- 经 销 者 新华书店
- 730 毫米 × 1020 毫米 16 开本 14.75 印张 300 千字  
2017 年 12 月第 1 版 2017 年 12 月第 1 次印刷
- 定 价 55.00 元

---

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话: 010-62752024 电子信箱: [fd@pup.pku.edu.cn](mailto:fd@pup.pku.edu.cn)

图书如有印装质量问题,请与出版部联系,电话: 010-62756370

# 编委会

主 编 于 航 白景峰

副主编 赵 林 陶 磊

编 委 王心海 赵宏鑫 陈瑶泓伶 薛永华 张春意

井 亮 张斌斌 杨秀妍 杨 阳 王清彪

王 瑞 周 鑫 何泽慧

# 前 言

当前我国沿海各类产业园区的发展速度逐渐加快,同时也带来了一系列的水环境问题。海洋本身具有巨大的自净能力,陆源入海可溶性物质在海洋动力的作用下被迅速地稀释、输运,同时,各种物质成分伴随着水体自然循环的过程,在低浓度水平上随着不断进行的化学和生化反应而逐渐降低或同化,达到海洋水体的本底。为改变我国沿海目前废水乱排的实际状况,在现有国情条件下,走人工治理与天然处置相结合之路,利用海洋的这种自净能力,实施污水海洋处置工程,是解决沿海港口环境问题和废水出路的优选方案。

污水深海排放是在严格控制排污混合区的位置和范围、符合排放水域的水质目标要求、不影响周围水域使用功能和生态平衡的前提下,选定合适的排污口位置,选取设计合理、运行可靠的污水排放方式,采取科学的工程系统措施,合理利用海域的净化能力处置达标污水的一种工程技术措施。目前在废水离岸排放工程中,为了提高污水稀释扩散效果,往往应用扩散器作为排海工程的污水末端处置装置,其结构型式是否合理对于工程后期运行及污水环境影响具有重要的作用。本书通过对国内外现有污水深海排放工程及扩散器结构设计方法进行系统梳理,以数值模拟与物模实验为技术手段,对排海工程末端扩散器的设计方法进行系统研究,并以不同实际工程为例,进行了扩散器设计的具体论证,为我国沿海港口及产业园区的达标污水处置以及近海生态环境保护提供了技术支撑。

本书编写由作者团队完成,白景峰、陶磊等人负责编写基础理论、研究进展、模拟方法等部分,陈瑶泓伶,薛永华,井亮等人负责实例工程的编写,全书由于航统稿。在此对参与本书编写工作的各位同事表示衷心的感谢。另外,在编写期间得到了天津大学、天津市环境保护科学研究院等单位的大力支持,在此一并表示感谢。

限于作者的学识与能力,本书研究的深度和广度有待进一步深化,对书中的不足之处,还望广大读者和学界同仁不吝指正。

编 者

2017年9月

# 目 录

|       |                    |      |
|-------|--------------------|------|
| 第 1 章 | 绪言                 | (1)  |
| 1.1   | 污水深海排放工程背景         | (2)  |
| 1.2   | 污水深海排放工程的基本原则与要求   | (2)  |
| 第 2 章 | 污水深海排放工程末端扩散器概念与作用 | (6)  |
| 2.1   | 末端扩散器的作用与概念        | (6)  |
| 2.2   | 末端扩散器的走向形式与结构型式    | (7)  |
| 2.3   | 排海工程管道及末端扩散器的材质    | (9)  |
| 第 3 章 | 国内外污水深海排放扩散器研究进展   | (12) |
| 3.1   | 污水深海排放工程研究进展       | (12) |
| 3.2   | 末端扩散器机理研究进展        | (17) |
| 3.3   | 研究进展小结             | (32) |
| 第 4 章 | 扩散器结构参数设计的政策与方法    | (34) |
| 4.1   | 污水深海排放的政策法规        | (34) |
| 4.2   | 有关水质及排放标准          | (35) |
| 4.3   | 研究方法与设计参数          | (39) |
| 第 5 章 | 扩散器环境效应数值模拟        | (41) |
| 5.1   | 研究方法               | (41) |
| 5.2   | 计算步骤               | (42) |
| 5.3   | 计算过程               | (46) |
| 第 6 章 | 扩散器环境效应物模试验        | (47) |
| 6.1   | 物理模拟概述             | (47) |
| 6.2   | 试验理论               | (48) |
| 6.3   | 试验设备               | (49) |
| 6.4   | 试验模型设计             | (52) |
| 6.5   | 试验方案与内容            | (53) |
| 第 7 章 | 扩散器水力特性数值模拟        | (54) |
| 7.1   | 水力计算要求             | (54) |
| 7.2   | 水力计算影响因素           | (55) |
| 7.3   | 计算流程               | (56) |
| 7.4   | 扩散器水力设计计算参数的选取     | (57) |

|               |                                   |              |
|---------------|-----------------------------------|--------------|
| 7.5           | 边界与网格设置 .....                     | (58)         |
| <b>第 8 章</b>  | <b>扩散器水力特性物模试验技术 .....</b>        | <b>(59)</b>  |
| 8.1           | 试验模型 .....                        | (59)         |
| 8.2           | 试验技术 .....                        | (60)         |
| 8.3           | 不同流量情况下扩散器喷口封闭方案物模试验 .....        | (61)         |
| 8.4           | 出流效果计算内容 .....                    | (62)         |
| <b>第 9 章</b>  | <b>营口仙人岛港区污水排海工程扩散器设计实例 .....</b> | <b>(65)</b>  |
| 9.1           | 工程概况 .....                        | (65)         |
| 9.2           | 扩散器设计基础资料 .....                   | (65)         |
| 9.3           | 污水海洋处置工程的控制要求 .....               | (67)         |
| 9.4           | 扩散器初步设计计算 .....                   | (69)         |
| 9.5           | 扩散器环境效应数值模拟计算 .....               | (72)         |
| 9.6           | 扩散器近区稀释扩散物模试验分析 .....             | (77)         |
| 9.7           | 扩散器水力计算 .....                     | (84)         |
| 9.8           | 扩散器水力物模试验分析 .....                 | (92)         |
| <b>第 10 章</b> | <b>天津南港工业区污水排海工程扩散器设计实例 .....</b> | <b>(97)</b>  |
| 10.1          | 工程概况 .....                        | (97)         |
| 10.2          | 扩散器设计基础资料 .....                   | (105)        |
| 10.3          | 工程控制要求 .....                      | (107)        |
| 10.4          | 扩散器初步设计计算 .....                   | (109)        |
| 10.5          | 扩散器环境效应数值模拟计算 .....               | (110)        |
| 10.6          | 扩散器近区稀释扩散物模试验 .....               | (138)        |
| 10.7          | 扩散器水力数值计算 .....                   | (149)        |
| 10.8          | 扩散器水力物模试验分析 .....                 | (160)        |
| <b>第 11 章</b> | <b>惠州大亚湾污水排海工程扩散器设计实例 .....</b>   | <b>(169)</b> |
| 11.1          | 工程概况 .....                        | (169)        |
| 11.2          | 扩散器设计基础资料 .....                   | (170)        |
| 11.3          | 工程控制要求 .....                      | (172)        |
| 11.4          | 扩散器初步设计计算 .....                   | (174)        |
| 11.5          | 扩散器环境效应数值模拟计算 .....               | (175)        |
| 11.6          | 扩散器近区稀释扩散物模试验 .....               | (188)        |
| 11.7          | 扩散器水力数值计算 .....                   | (195)        |
| 11.8          | 扩散器水力物模试验分析 .....                 | (210)        |
|               | <b>参考文献 .....</b>                 | <b>(220)</b> |

# 第1章 绪 言

中国拥有 18 000 多千米的海岸线,4 亿多人口生活在沿海地区。沿海地区纵跨 11 个省、市、自治区,是目前国内经济最发达的地区,沿海工农业总产值占全国总产值的 60%左右。由于沿海地区港口发达、人口集中,部分污水和落后生产工艺所生产的“三废”带来的环境问题日益严重。据统计,目前沿海地区城市与港口排放污水量差不多为全国日排放污水量的 1/5。这些污水存在着岸边排放、无组织排放的乱排现象,致使近岸海域环境受到污染,有机物和石油类污染普遍严重,并存在富营养化导致的赤潮危害。目前海洋、河口水环境日趋恶化,尤其是港口毗邻的海域,水污染较为严重。因此,沿海港口污水的出路问题已成为制约我国港口及航海事业发展的重要因素。

近三十年来,发达国家相继以大量建设二级(乃至三级)污水处理厂,并以污水集中处理作为水体污染控制的主要手段。这种措施的确获得了成效,改善了水域环境的质量。但是,污水处理厂需要巨额的基建投资和高昂的运行管理费用,由于经济能力的限制,目前我国尚无力对如此大量的污水进行深度处理。为了降低污水处理的成本,我国部分港口利用滨临海洋的优势,实施污水深海排放工程,为解决沿海港口污水出路问题提供了又一项选择。

污水深海排放是在严格控制排污混合区的位置和范围、符合排放水域的水质目标要求、不影响周围水域使用功能和生态平衡的前提下,选定合适的排污口位置,选取设计合理、运行可靠的污水排放方式,采取科学的工程系统措施,合理利用海域的净化能力,处置达标污水的一种工程技术措施。即污水经过规定要求的预处理后,达到一定处理标准。通过铺设于海底很长的放流管,离岸输送到一定的水下深度,再利用有相当长度、具备特殊构造的末端多孔扩散器,使污水与周围水体迅速混合,在尽可能小的范围内高度稀释,达到要求的标准。无严格控制要求和自由乱排及无完整水下工程的岸边排放,都不是科学的污水海洋处置,不利于海洋资源的合理开发利用,而污水深海排放工程恰好可以避免该类问题的出现。

随着我国沿海经济与港口建设的飞速发展,港口及各类产业园区的日常污水产生量越来越大,虽然有部分污水可以实现回用,但就目前工艺而言,若达到污水全部回用仍需较长时间,剩余部分污水如果不能得到较好处置或随意排放,会对港口周边的生态环境造成较大影响。同时,近年来国家对于港口污水处置的要求逐渐提高以及港口污水量的逐渐增加,也对港口污水的处置问题提出了更高的要求。深海排放工程通过合理利用海洋的稀释净化能力,为港口的污水处置提供了一种



新的办法,能够减小港口污水对于周边环境的影响,是我国水运港口发展的有力保障。

### 1.1 污水深海排放工程背景

海洋本身具有巨大的自净能力,陆源入海可溶性物质在海洋动力的作用下被迅速地稀释、输运,同时,各种物质成分伴随着水体自然循环的过程,在低浓度水平上随着不断进行的化学和生化反应而逐渐降低或同化,达到海洋水体的本底。为改变我国沿海目前废水乱排的实际状况,在现有国情条件下,走人工治理与天然处置相结合之路,利用海洋的这种自净能力,实施污水海洋处置工程,是解决沿海港口环境问题和废水出路的优选方案,或者可以说是必由之路。因此,《中国海洋 21 世纪议程》提出“合理利用海洋自净能力。深水管道排污可以减少污水治理费用,利用海洋自净能力净化污水。沿海港口地区应逐步推广污水深水管道排海工程。”

当前我国沿海各类产业园区的发展速度逐渐加快,同时也带来了一系列的水环境问题。交通船舶排放的废油、废渣,动力装置的冷却水、油污水,洗舱水,生活污水,船舶事故或码头及水上作业造成的油泄漏和其他污染物散落在水中,园区排放的未经充分净化处理的生产废水和生活污水,经污水处理厂处理后形成的达标污水。这些污水如果随意处置或在沿海产业园区近岸区域排放,会对周边水环境造成极大影响。我国沿海区域海区辽阔,近岸海域是目前化工园区废水海洋处置的主要场所,其中有很多是水深流急、水体交换能力强,宜于处置的近岸深海和开敞海域。因此合理利用这些海洋资源,实施污水深海排放工程是有效解决沿海港口及各类产业园区废水处置的技术手段。而末端扩散器的结构参数对于污水排海效果具有极为重要的意义,因此根据实地工程的不同,采用科学的研究方法,设计合理的扩散器走向形式和结构型式,优化排海工程的环境效应与水力特性,已经成为排海工程中的重点研究领域。

### 1.2 污水深海排放工程的基本原则与要求

废水离岸处置工程是禁止或限制污水岸边排放和自由乱排的有效措施,污水经过工程系统集中预处理后,经管道输送到海洋中一定的水下深度,由扩散器进行排放,使之在尽可能小的范围内高度稀释,以减小对环境的冲击。这种污水海洋处置工程,同常规的污水二级处理相比,可节约  $1/2 \sim 1/3$  的基建投资和运行管理费用,占地减少  $30\% \sim 40\%$ ,效益是巨大的。工程主要是通过提升泵站(或高位井)和排海管道,输送经过处理的港口或沿海产业园区处理达标后的生产废水和工业污水到合适海域位置排放,利用海洋巨大的稀释能力来解决污水排海问题。同时,为了使该处海水具有最佳的净化能力,拟在排放点采用离岸潜设的多孔扩散管进

行排放,整体系统及装置如图 1.2-1~图 1.2~5 所示。

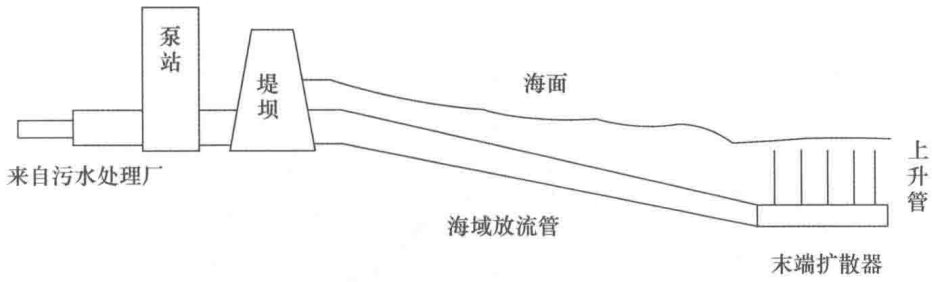


图 1.2-1 污水深海排放工程系统示意图

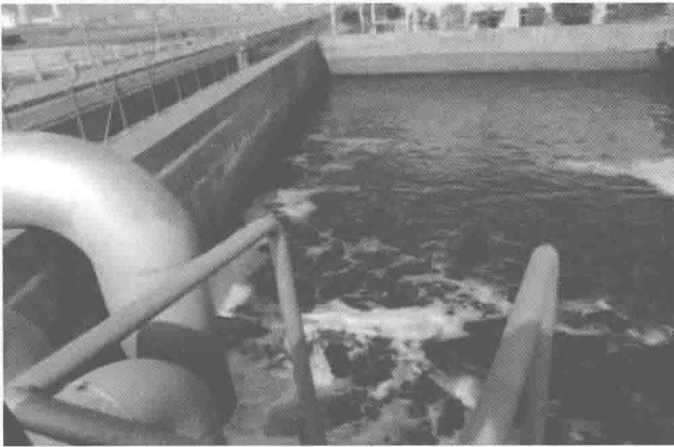


图 1.2-2 污水处理厂达标污水



图 1.2-3 污水陆上输送管线



图 1.2-4 污水海上输送管廊



图 1.2-5 污水立管下海

为了保护海洋环境,不是含有任何污染物的污水都可以进行深海排放的。深海排放的目的是为了利用海洋的自然净化能力,节约污水处理费用,改善近岸水环境质量,保证纳污水域的功能。无法自然净化和危及生态环境的污染物,可在海水、海底沉积物和海洋生物中累积富集的有毒物质。污水中的过量固体悬浮物和漂浮物等,都是禁止深海排放的,因而在污水深海排放工程中应对上述物质加以去

除。施工现场如图 1.2-6 所示。

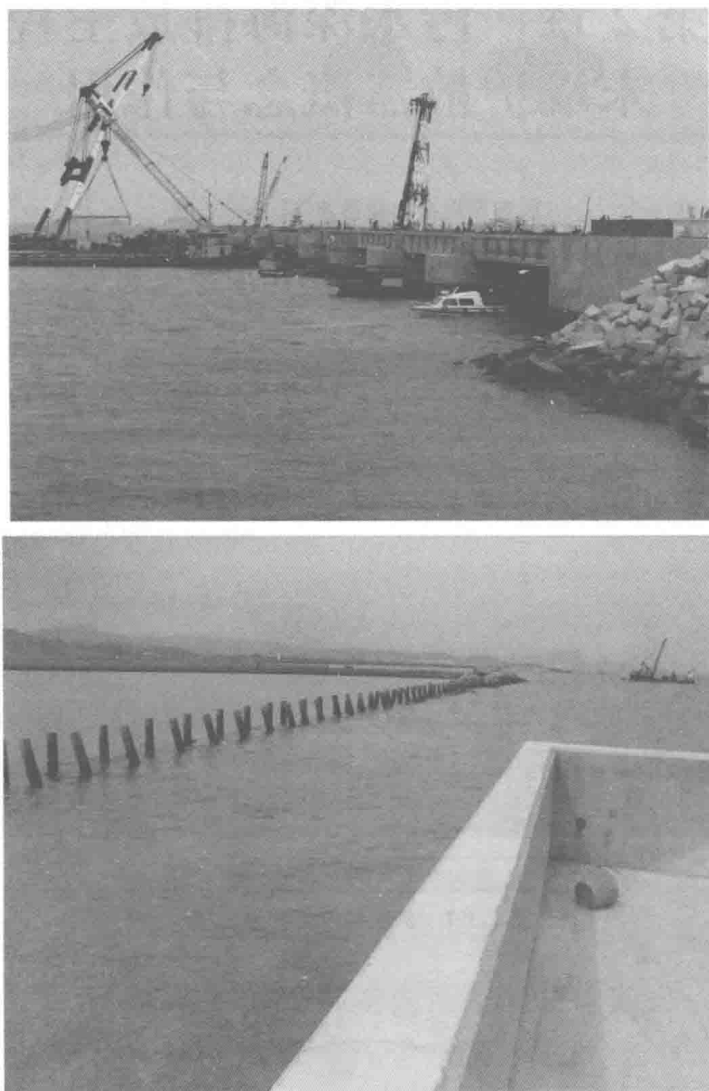


图 1.2-6 污水排海工程海上施工现场

# 第2章 污水深海排放工程 末端扩散器概念与作用

## 2.1 末端扩散器的作用与概念

目前在废水离岸排放工程中,为了提高污水稀释扩散效果,往往应用扩散器作为排海工程的污水末端处置装置。扩散器是污水深海排放工程中的关键部分,一般分为单孔或多孔型式。扩散器是由扩散管道上多个喷嘴组成的复杂结构,污水由扩散器竖管上安装的喷口以高速流入环境水体,实现污水在短时间内与周围水体的混合(图 2.1-1,图 2.1-2)。通过选择得当的扩散器布置位置、组合形式以及水动力参数,可以使排放的污水达到最佳的稀释效果(图 2.1-3,图 2.1-4)。

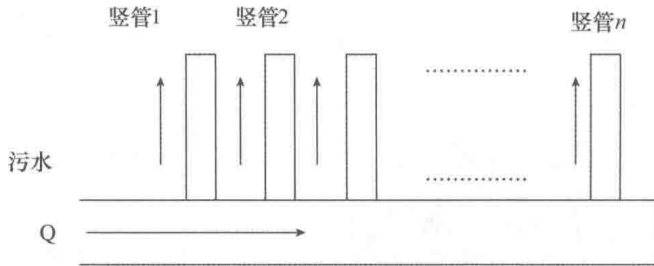


图 2.1-1 扩散器与竖管示意图

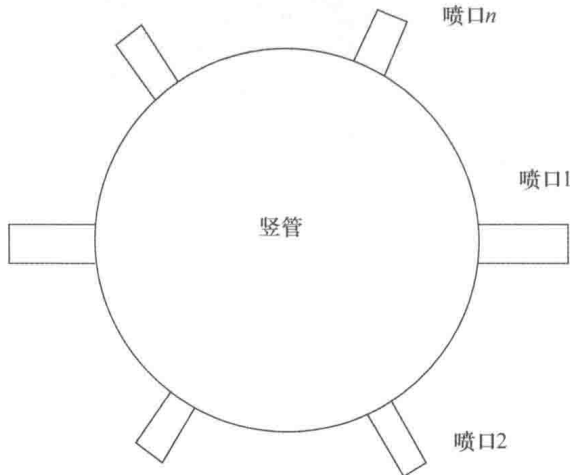


图 2.1-2 扩散器竖管上喷口布置示意图

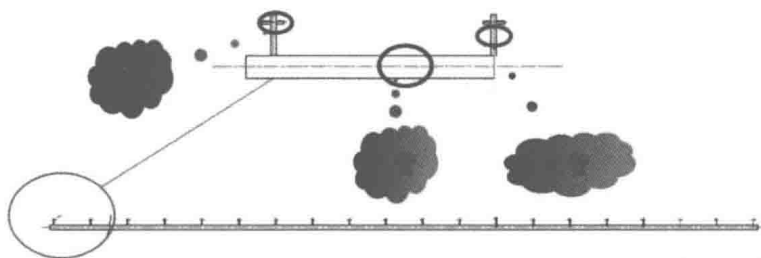


图 2.1-3 扩散器整体结构示意图



图 2.1-4 扩散器现场图

## 2.2 末端扩散器的走向形式与结构型式

### 1. 扩散器的走向形式

污水排海工程末端处置扩散器走向形式基本分为三种,即 I 型、T 型及 Y 型。

扩散器走向形式的选择,主要取决于潮流或海流的流向,由于在潮流及海流与扩散器垂直时,可充分利用扩散器的长度并使从喷口流出的污水在海水中产生最大的稀释。因此对于顺岸流一般选择 I 型扩散器(图 2.2-1),向岸或离岸流一般选择 T 型扩散器,而在水流方向不定时一般选择 Y 型扩散器。

### 2. 扩散器喷口结构型式

扩散器的喷口结构型式一般有两种:一种为管壁开孔;另一种为扩散器上有上升管,在上升管上开孔。前一种方式适用于扩散器铺设在海底海床上,而后一种方式则主要适用于扩散器管道埋设在海底。表 2.2-1 为管壁开孔型扩散器的

特点。

表 2.2-1 管壁开孔扩散器的特点

| 序号 | 开孔位置                      | 特 点  |
|----|---------------------------|--|
| 1  | 与基准面成 $0^\circ$ 夹角        | 管壁开孔型扩散器主要为开单孔,从 1 到 4 可以在不同位置开孔。在以上顺序中,在 4 位置中不会发生海水倒灌现象。而在 1、2 位置时,通常采用安装单向阀的形式,来预防海水倒灌的发生。1、2、3 为常用开孔位置形式,4 基本上不采用。 |
| 2  | 在基准面以上与基准面成 $45^\circ$ 夹角 |  |
| 3  | 在基准面以下与基准面成 $45^\circ$ 夹角 |  |
| 4  | 在基准面以下与基准线成 $90^\circ$ 夹角 |  |

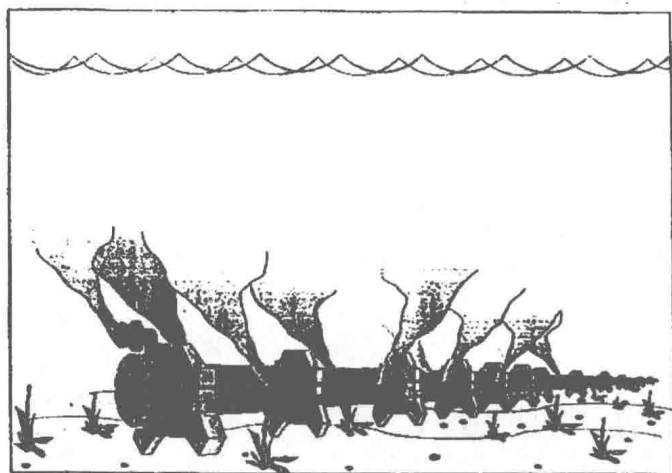


图 2.2-1 澳大利亚 Latrobe Valley 排海工程末端扩散器示意图

对于扩散器有立管(上升管)的,开孔型式还可具体分为立管单喷口型及立管多喷口型。立管多喷口型扩散器主要用于隧道型污水排海工程及大型污水排海工程中,通过采用单一立管增加开孔数的方式,来减少由于更多的立管带来的施工困难等问题,并减少工程造价。对于立管上的开孔数,最多为 8 个,因为 Boston 污水排海工程的水力模型试验表明,在立管上喷口开孔数多于 8 个时,由于羽流排出喷口形成一个上升的圆环,从而减少了海水对污水的稀释度。表 2.2-2 为立管开孔型扩散器的特点。

表 2.2-2 立管开孔扩散器的特点

| 序号 | 立管的位置 | 特 点   |
|----|-------|---|
| 1  | 在底部开孔 | 立管开孔位置在第一种方式,当发生海水倒灌而进行冲洗时,较容易将海水全部冲走,而第二种方式则较难一些,但总体来看,对于该种方式海水冲洗的难度,主要取决于立管的高度,立管越高冲洗所用水量越多。因此,对于隧道式,由于立管较高,多采用第一种方式。 |
| 2  | 在顶部开孔 |   |

### 3. 扩散器尾端结构型式

对于裸置于海底的扩散器,可在扩散器末端安装一个翻板闸门,平时关闭,进行冲洗时打开。

对于埋设在海底面以下的立管多喷口扩散器,其末端通常倾斜伸出海底。另外,有时为了便于扩散器内部的清理,可以设置检查口,检查口间距大约为 200 m。

## 2.3 排海工程管道及末端扩散器的材质

### 2.3.1 常用管材及其特性比较

#### 1. 排海工程常用的几种管材

随着科学技术的不断发展,铸铁管、热铁管、木制管、波纹管 and 陶瓷管均不再使用。最常使用的管材有钢管、水泥管和塑料管(高密聚乙烯管、聚氯乙烯管和玻璃钢管)。

##### (1) 钢管

碳钢管的基本特点是易于施工和连接,抗变形能力强,抗拉强度大,且它的市场丰富,容易得到。它被广泛用于排海管道,但碳钢不耐海水侵蚀,使用时需要防腐措施。

##### (2) 水泥管

水泥管的基本特点是造价低,有一定的抵抗人为外力损坏的能力,在海水中寿命较长。在早期,它被广泛用于大管径放流管的安装。通常管径大于 1200 mm。由于其重量大,需采用逐段铺设法,采用扩锥形接口和承接口,但无法架设无支撑的大跨度的管道。

在海洋环境中,水泥管会发生腐蚀胀裂,钢筋混凝土内钢筋生锈也能使混凝土胀裂。因此,水泥管抗变形能力差,泄漏难以修补,连接工艺比较复杂,施工不易进行,并且施工费用比较高。

##### (3) 塑料管

塑料管(HPDE,PVC)的基本特点是重量轻,抗腐蚀性强,耐蚀寿命长,有一定的抗变形能力,但强度低,没有很强的耐破坏性,易被船锚破坏。常用的塑料管有高密度聚乙烯管、聚氯乙烯管。

塑料管可作为湖泊、海湾和无风浪水体的放流管,但不宜用在放流管长的管道。塑料管采用焊接的方法链接。由于塑料管较轻,在施工时,需要增加配重层,以防管道漂浮,因此施工比较复杂。

在世界范围内,塑料管道应用历史很短,目前还没有这种材料使用情况的长期记录。



#### (4) 玻璃钢

玻璃钢(FRP)也是一种塑料。玻璃钢材料的基本特点是比重小、强度大、防腐性能好、不易发生泄漏,其寿命比钢管长数倍。从理论上推导,玻璃钢的一般使用寿命可用 50 年。它可作钢管的防腐衬里,玻璃钢只耐 16 个大气压,因此,只限于用于水深 16 m 以内的排海管道。玻璃钢直接采用承插接口连接,外部涂敷树脂和玻璃布。

### 2. 四种管材性能的比较

#### (1) 材料的耐蚀性能

根据试验和实践应用得出,碳钢不耐海水和污水腐蚀;混凝土、塑料、玻璃钢耐海水腐蚀良好;水泥、塑料耐污水腐蚀一般,玻璃钢耐污水腐蚀性能良好。

在耐蚀性能方面,除碳钢之外,其余三种材料均可作为排海管道材料,其中玻璃钢的耐蚀性能更为优越。

#### (2) 材料的物理性能

在材料的物理性能比较中,强度是最主要的设计依据。在这些材料中,碳钢的强度最高,其次是玻璃钢、塑料和混凝土。

### 3. 小结

四种管材性能分析见表 2.3-1。

表 2.3-1 四种管材性能分析表

| 管材名称        | 性 能       |     |    |                      |    |             |              |
|-------------|-----------|-----|----|----------------------|----|-------------|--------------|
|             | 耐污水       | 耐海水 | 强度 | 施工                   | 价格 | 耐蚀年限        | 适用范围         |
| 水泥管         | 可以,但有明显腐蚀 | 优良  | 低  | 逐段铺设,采用扩锥形接口和承接口施工方案 | 低  | 较长          | 管径大于 1200 mm |
| 玻璃钢管        | 良好,腐蚀轻或无  | 良好  | 较强 | 承插接口连接               | 中  | 理论推导可用 50 年 | 只耐 16 个大气压   |
| 塑料管         | 可用,但有明显腐蚀 | 良好  | 较低 | 需加配重层,施工比较复杂         | 中  | 无长期使用记录     | 湖波、海岸及无风浪水体  |
| 钢管          | 不可用,腐蚀严重  | 差   | 强  | 容易施工,焊接或法兰连接         | 中  | 一般 0.5~5 年  | 适用范围广泛       |
| 采取有效防腐措施的钢管 | 可用        | 良好  | 强  | 容易施工,焊接或法兰连接         | 中  | 30 年以上      | 适用范围广泛       |