



高等学校教材

杨明华 主编

海洋油气管道工程

天津大学出版社

海洋油气管道工程

杨明华 主编



天津大学出版社

内 容 提 要

本书是有关海洋石油、天然气输送管道工程的编著,全面介绍海洋油气管道工程的设计、施工、检验和维护等方面所涉及到的基本技术内容。全书共分七章,分别介绍了国内外海洋管道工程的发展与工程的总体规划,论述了管道工程海洋环境的设计标准及其荷载计算,从输油工艺基本要求出发设计管道结构及其强度计算,管道在外力作用下的稳定性设计,各种稳定措施的设计,立管型式与结构设计,海洋管道保温层、加重层的施工方法以及海洋管道在铺设安装时典型受力状态的应力分析,最后介绍了管道的腐蚀及防腐设计。

本书可供高等学校海洋工程专业及船舶工程专业本科生使用,也可作为其它建筑工程专业学生的参考书,并可供从事海洋工程的技术人员参考。

(津)新登字 012 号

海洋油气管道工程

杨明华 主编

*

天津大学出版社出版

(天津大学内)

河北省永清县第一胶印印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本:787×1092毫米 1/16 印张:10.75 字数:268千字

1994年10月第一版 1994年10月第一次印刷

印数:1-600

ISBN 7-5618-0719-8

TV·26

定价:5.50元

出版说明

根据国务院国发(1978)23号文件批转试行的“关于高等学校教材编审出版若干问题的暂行规定”,中国船舶工业总公司负责全国高等学校船舶类专业教材编审、出版组织工作。

为了做好这一工作,中国船舶工业总公司相应地成立了“船舶工程”、“船舶动力”两个教材委员会和“船电自动化”、“惯性导航及仪器”、“水声电子工程”、“液压”、“水中兵器”五个教材小组,聘请了有关院校的教授、专家60余人参加工作。船舶类专业教材委员会(小组)是有关船舶类专业教材建设的研究、指导、规划和评审方面的专家组织,其任务是做好高等学校船舶类专业教材的编审工作,为提高教材质量而努力。

在总结前三轮教材编审、出版工作的基础上,根据国家教委对“八·五”规划教材要“抓好重点教材,全面提高质量,适当发展品种,力争系统配套,完善管理体制,加强组织领导”的要求,船舶总公司于1991年又制定了《1991—1995年全国高等学校船舶类专业规划教材选题》。列入规划的选题共107种。

这批教材由各有关院校推荐,同行专家评阅,教材委员会(小组)评议,完稿后又经主审人审阅,教材委员会(小组)复审,然后分别由国防工业出版社、人民交通出版社以及有关高等学校的出版社出版。

为了不断地提高教材质量,希望使用教材的单位和广大师生提出宝贵意见。

中国船舶工业总公司教材编审室

1992年5月

前 言

海洋油气管道工程,是海洋石油开发中不可缺少的重要环节。油田开发的油、气,常常用海洋管道输送出来,虽然此工程投资高,风险大,技术复杂,但因其特有的优越性而在当今世界上已被广泛应用。随着我国海洋石油开发事业的发展,尤其是改革开放以来,海洋油气管道工程建设得到高速发展。1985年以后,在我国渤海、南海西部、南海东部、东海和沿岸极浅海海域的油田相继建成或正在建设各种各样的海洋油气管道工程。

天津大学自1971年创办海洋工程专业以来,一直开设“海洋油气集输和海洋管道工程”课程。本书是在原有讲义基础上,吸收大量国内外资料,结合管道工程规范等重新编写而成。本书重点讲述海洋管道的设计、施工、检验和维护等方面所涉及到的基本技术内容,并以管道的海洋环境及其荷载、各种荷载下的管道稳定、结构强度以及施工铺设中管道受力典型分析为重点,同时本书也给出了一些当前海洋管道工程实用的设计计算方法,施工和维护的指导性对策。内容系统、精练,重点突出。

本书由天津大学杨明华主编,并由杨明华编写第一、三、六章,安国亭编写第二、四章,孟昭瑛编写第五、七章。

海洋管道工程在我国起步较晚,从设计理论到工程实践都存在许多有待深入研究的问题,作者力求本书能反映国内外发展水平。由于时间较短、水平有限、书中难免有不当之处,敬请读者指正。

编 者

1992年于天津大学

目 录

第一章 概论	(1)
§ 1-1 海洋管道工程的发展	(1)
§ 1-2 海洋管道工程的规划	(1)
§ 1-3 海洋管道工程重要术语	(2)
§ 1-4 海洋管道工程的设计	(3)
第二章 海洋管道工艺设计与计算	(5)
§ 2-1 概述	(5)
§ 2-2 等温输送管道的工艺计算	(6)
§ 2-3 热油输送管道的工艺计算	(14)
§ 2-4 油、气混输管道的水力计算	(22)
第三章 海洋管道环境外力及稳定性设计	(24)
§ 3-1 概述	(24)
§ 3-2 管道风力设计与计算	(24)
§ 3-3 管道波浪力的设计与计算	(26)
§ 3-4 管道水流力的设计与计算	(34)
§ 3-5 海床基础对海洋管道稳定的影响	(38)
§ 3-6 海洋管道稳定性设计	(48)
§ 3-7 保持海洋管道系统稳定的工程措施	(53)
第四章 海洋管道结构设计与计算	(65)
§ 4-1 海洋管道的结构设计	(65)
§ 4-2 海洋管道的结构强度设计与计算	(71)
§ 4-3 海洋管道的结构稳定设计与计算	(78)
§ 4-4 特殊荷载作用下管壁强度校核	(81)
第五章 海洋管道的立管设计	(89)
§ 5-1 立管的型式与组成	(89)
§ 5-2 立管的设计与受力分析	(94)
§ 5-3 立管的安装	(100)
第六章 海洋管道的施工	(108)
§ 6-1 海洋管道施工概述	(108)
§ 6-2 管道防腐层、保温层、加重层的施工	(110)

§ 6-3	海洋管道施工中的重力调节	(111)
§ 6-4	海洋管道的埋设	(112)
§ 6-5	海洋管道施工、铺设中的典型受力分析	(117)
§ 6-6	海洋管道施工、保养技术要求概述	(137)
第七章	海洋管道的防腐	(139)
§ 7-1	海洋管道的腐蚀	(139)
§ 7-2	海洋管道的防腐	(143)
§ 7-3	电化学阴极保护	(149)
参考文献	(157)
附录	钢管主要技术参数	(159)

第一章 概 论

§ 1-1 海洋管道工程的发展

管道运输是目前世界上第四种重要的运输方式。石油工业中的油(气)输送绝大部分采用管道,其中,海洋油田油、气、水的集输、贮运,多是通过海底管道来完成的。海洋管道把海上油田的整个生产密切地联系起来。

海洋管道运输有其自身的优点,首先是运输的连续性,一旦投入运转后,运输可连续不断地进行,减少中间装卸、转运过程的时间耽搁,其运输能力远远大于陆运和水运。其次,管道运输是密闭的,可以大大减少运输过程产生的损失,一旦管道建成,它几乎可以不受水深、地形、海况等条件限制,能高效、安全地完成油(气)的输送。据资料统计,管道($D > 700\text{mm}$)输送石油每吨公里的成本,只为海运的二分之一,为铁路运输的四分之一;其能源消耗只为海运的四分之一,为铁路运输的三分之一。在事故率上,公路运输最高,铁路、水运次之,管道运输最小,只2%。但是,海洋管道运输工程风险性较大,一次性投资较多;同时管道通常处于海底,所以检查维护、日常管理不方便,一旦出了事故,修复极为困难。

尽管有着上述缺点,但是近30年来海洋管道发展很快。自从1936年美国布朗——路特(Brown—Root)公司,在加尔沃斯頓(GaLvestan)铺设世界第一条海底管道以来,至今已完成了近万公里的海洋管道工程,最大管径达1422.4mm(56英寸),最大铺设水深达560m。虽然我国海底管道运输起步较晚,但近几年来有了较大的发展。如1985年我国渤海湾按国际标准和通用作法建成了第一条埕北油田海底输油管道,其后又有BZ28—1油田、BZ—34—2/4油田和JZ—20—2油田的海底管道相继建成。同时我国南海西部和东部也铺设了海底管道。总共近20条,总长约150km。最近我国南海崖13—1气田进入开发阶段,拟建一条通往香港的800km长、管径710mm(28英寸)的海底输气管道,以及一条通往海南岛的100km长、管径为355mm(14英寸)的海底混输管道。在我国东海“平湖”气田开发中,通往上海的400km长、管径为406mm(16英寸)的海底输气管道正在实施。随着我国石油化工工业的蓬勃发展,原油的进口和油产品的外运,建设与海上输油终端配套的大口径海底管道工程,也将被提到议事日程。

所有这些工程建设的实施,将会大大促进我国海洋管道工程事业的迅速发展,将对我国海洋管道工程的设计、施工技术、科学实验研究、工程建设管理、检验法规以及人材培养等方面提出更高的要求。

§ 1-2 海洋管道工程的规划

海洋管道工程规划的目的是在海上油气区已被证实,对海区的地质构造、地球物理、水文气象、油气资源以及实际生产能力等情况大致了解以后,在研究设计各种油田开发方案时,作为油气集输方案的一部分而进行的规划。海洋油气集输的方法很多,是否选用海洋管

道方式,要在各种方案进行技术经济评估后才能确定。

海洋管道工程规划的主要内容是,根据油田开发方案中所拟定的生产系统,即井的布置、平台、海底井口、陆上设施的位置,以及被输送介质的种类(油、气、水)、特性和日输送量,再根据海区的工程地质、水文气象、登陆点的位置……,初步选择所要铺设的海洋管道的类型、轴线的位置以及各类管道的长度、管径、结构型式、施工方法和工程进度计划,估算每年的投资额和作业费以及整个工程造价。

海洋管道的类型通常按其使用范围分为四类:①出流管,它是连接井口或井口管汇与平台之间的管道,靠地下油气层的压力输送介质,它通常是直径100~254mm(4~19英寸)的油气混输管道,也可以是一组管束。②集油管,是连接平台与平台之间的管道或管束,管内介质(油或油、气)靠泵或压缩机加压流动,工作压力一般为6.9~9.7MPa;管径为203~406mm(8~16英寸)。③长输管道,又称干管,其作用是将海上油气输送到岸上,直径一般为406~1016mm(16~40英寸)。④装卸管道,是连接平台或海底管汇与装油设施之间的管道,管径有大有小,大的为762~1422mm(30~56英寸),小的与出流管相当,通常只输送液态油类;这类管道也可以从岸上敷设到海上装卸终端,长度一般为1~5km,也有长达35km的。

海洋管道工程规划中重要的一环就是管道线路的选择,它是工程中所有问题的综合抉择,体现了工程主体的优劣态势,决定整个工程的成功与失败,所以必须慎重。确定海洋管道轴线的一般原则为:①要满足生产工艺和总体规划的要求。②使线路的起点至终点的距离最短最合理。③线路力求平直,避免跨越深沟或较大起伏的礁石区,且所选海底力求平坦不得有活动断层、软弱滑动土层和严重冲刷或淤积。④尽量避开繁忙航道、水产捕捞和船舶抛锚区。⑤海底管道的干管与海底障碍物的水平距离一般不小于500m,距原有管道或海底电缆不小于30m。交叉时,其垂直距离不小于30cm。⑥登陆管道的登陆上岸地点极为重要,它与岸坡地质地貌、风浪袭击方位、陆地占地面积和施工条件等因素有关。根据以上原则,结合具体工程情况作出合理的规划。

§ 1-3 海洋管道工程重要术语

海洋管道工程中常用重要术语释义如下。

(1) 海洋管道系统 用于输送石油、天然气及其液态产品的管道系统工程设施的所有组成部分,包括架设在水面上的栈桥管道、海底管道、立管、支撑构件、管道附件、防腐系统、加重层及稳定系统、泄露监测系统、报警系统、应急关闭系统和与其相关的全部海底装置。

(2) 海底管道 在最大潮汐期间,海洋管道系统中,全部或部分位于水面以下的管道。(立管除外)包括与陆岸连接的管段部分。海底管道也称作海洋管道。

(3) 立管 连接海底管道与平台(包括人工岛)上生产设备之间的管段,其底部的膨胀弯管也属立管的一部分。

(4) 管道附件 与管道或立管组装成一个整体系统的零部件,如弯头、法兰、三通、阀门和固定卡等。

(5) 一区 距生产平台或建筑物500m以外的海床地段。

二区 距生产平台或建筑物500m以内的海床地段。

(6) 设计高/低水位 在有潮位历时累积频率资料时,设计高/低水位可采用历时累积频率 1%/历时累积频率 98%的潮位,也可采用高潮(潮峰)累积频率 10%/低潮(潮谷)累积频率 90%的潮位。

(7) 校核高/低水位 重现期为 50 年一遇的高/低潮位。

(8) 飞溅区 以高天文潮位加上 100 年一遇波高的 65%为上限,以低天文潮位减去 100 年一遇波高的 35%为下限的海平面区间。

(9) 淹没区 海洋飞溅区以下的区间,包括海水、海床和埋没带的区域。

(10) 大气区 海洋飞溅区以上的区域。

(11) 管道运行期(在位状态) 指管道安装完成后的状态,包括运行(正常运行与不正常运行)与维护(可以是停工)状态,但不包括检修状态。

(12) 管道安装期(施工状态) 系指在全部安装完成前的各种状态,如铺设、拖曳、埋置、吊装、运输……,运行期中的检修状态也包括在内。

(13) 内压与设计内压 管道内部的压力为内压,可以是绝对压力或表压力。设计内压指在正常流动状态或静力条件下,管道系统内任一点最大内压力与最小外压力之差。

(14) 外压与设计外压 管道外部直接作用的压力,可以是绝对压力也可以是表压力。设计外压是指管道任一点上最大外压力与最小内压力之差。

(15) 试验压力 制造施工完成时,或经过适当运行期后,施加于管道、容器和各种部件上的规定的压力。

(16) 强度试验压力 为进行强度检验施加的数值大于试验压力,而持续时间短的压力。

(17) 约束管道 受固定支座或管道与土壤之间摩擦力的约束,而在轴向不能膨胀或收缩的管道。

(18) 非约束管道 最多有一个固定支座,没有相应轴向约束、没有显著摩擦力的管道。

§ 1-4 海洋管道工程的设计

海洋管道工程设计的最根本的要求,就是在一定的设计条件下,保证管道能安全、高效地完成海洋油气输送,在使用期中保证管道在设计环境条件下安全运转,在施工安装中保证管道能经受各种施工外荷的考验。

海洋管道工程设计的主要内容包括如下方面。

(1) 论证并确定管道设计的基础数据和线路的选择。主要是环境条件数据和工艺条件数据(如沿管道的设计水深、潮位、风、波、海流、冰凌、地基土壤、地震、气温和海生物的情况。以及该区域的人文、地貌、交通、材料和材质情况),并合理确定其设计标准。同时对所输送介质的特性(如油品的密度、动力粘度、凝固点、比重、出口压力和温度以及开发年限等基本参数)作出选择。综合优化管道轴线。

(2) 管道工艺设计计算。其目的是选择合理的管径及其附属材料,使其既能满足输送量的要求,又使能量的损耗不大,也就是流速和压降的损失都适合。由于所输送的介质不同,可分为单相油(或气)的输送和油气两相输送。单相输油时,对高粘、高凝点的油品,因流动时的压力、温度都有变化,影响流动甚至造成堵管事故。为改善输送条件,需将油预热到较高

的温度,并对管道进行保温,进行热油输送,这时流动油的压降不但和流速有关,还和温度变化后引起介质粘度变化有关,故要进行管道的温降计算,以确定输送时初始需要加热的温度和中途需要加热的程度。

工艺设计所确定的压降和温降,是工艺设计的主要参数,也是选择输送时所需加压、加温设备规格的主要依据。但是对管道运行中其它重要工艺技术,如管道中的段塞流、停输时间、再启动、水击压力、管内冲蚀以及化学注剂等重要生产作业,也要进行分析。

(3) 管道的稳定性设计,其目的是使管道在使用期间基本保持在原来的位置。假若管道发生较大的上升、下沉或侧向移动,影响管道系统的安全运转,就叫破坏了稳定性。管道稳定性的丧失是由于外力引起的管道与环境之间平衡的破坏,所以一开始就要从长期运转的角度出发,进行满足这一平衡的管道稳定性设计。采取各种工程措施防止管道的稳定性丧失,设计计算措施的具体环节,核算由此而引起的管道额外应力。

(4) 立管设计。主要是立管和膨胀弯管等系统的结构型式、布置、保护结构和联接方式的设计,立管系统整体强度和局部强度的分析计算,以及立管系统的施工安装方法和施工中的强度分析计算。

(5) 管道的施工设计。主要是根据施工现场和管道的具体情况,选定管道施工方法,设计管道的加工、焊接、开沟、铺设,管段的联接和就位、埋置等施工步骤,计算完成这些步骤所需的设备,材料和劳力,分析管道在施工中的受力情况和稳定情况,同时根据工期安排施工进度,并作出工程预算。

(6) 管道的防腐设计。目的是控制管道的腐蚀,设计防止内、外腐蚀的具体方法。

思考题

1. 海洋管道系统包括哪些内容?
2. 海洋管道系统设计的要求有哪些?
3. 海洋管道工程规划的依据和内容有哪些?
4. 海洋管道系统的主要设计内容有哪些?

第二章 海洋管道工艺设计与计算

§ 2-1 概 述

海洋管道系统的工艺设计内容是:根据油田总体规划中确定的工艺流程和分流规划,对管道系统进行一系列的工艺计算与分析,如压降、温降计算,段塞流分析,允许停输时间计算,再启动分析,注水注剂计算等,其中最主要的是压降、温降所必需的水力计算和热力计算。其目的是为选择合理的管径和管断面型式,确定最大输送量、输送温度、压力及沿线温降等,并为选择泵机组和加热设备等提供必要的技术参数,也为管道结构设计与计算提供基础。

根据海洋管道输送的介质不同,可以有单相油输送、单相气体输送和油气两相混输等输送状态。

海洋管道管径的确定主要根据流量,也要考虑输送时的流速和压降,它们和输送的介质性质(如粘度、天然气含量等)有关。确定管径的准则是:

(1)按使用期的最大流量计算。一般最大流量为正常流量的1.2~1.5倍。如能预计到流量的波动幅度精确值,例如根据类似生产系统的测算结果,就更可靠。

(2)管道内的压降应包括各种管附件如阀、弯头、三通等引起的压降。计算时,通常用一段当量压降的管长代替。有时在管路系统初选时因各类管附件类型、数目不太齐全,初步计算中可将管道计算长度增大5%~15%,对长管道可取较小值。

表2-1是不同管径管道各种附件的当量压降管长度值。

表 2-1 不同管径管道上各种附件的当量压降管长度值(m)

管 径		球心阀 球 型 单向阀	角 阀	插板式 单向阀	旋阀 闸阀 球阀	45° 弯头	小口径 弯 头	大口径 弯 头	T形 支管
(in)	(mm)								
6	152.4	66.7	33.3	16	1.3	1.3	3.7	2.7	9.3
8	203.2	86.7	41.7	21.3	2	2	5	3	12.3
10	254	110	53.3	26.7	2.3	2.3	6	4	15.7
12	304.8	133	63.3	31.7	3	3	7.3	4.7	18.3
14	355.6	150	70	35	3.3	3.3	8.7	5.3	20.7
16	406.4	166.7	80	40	3.7	3.7	9.7	6	24
18	457.2	183	93.3	46.7	4	4	11	6.7	27.3
20	508	216.7	100	51.7	4.7	4.7	12	7.7	30
22	558.8	229	111.7	56.7	5	5	13.3	8.3	33.3
24	609.6	250	123.3	61.7	5.3	5.3	14.7	9	36.7

(3) 计算出来的管径要依工程实际情况做必要的调整,使管径规范化。

管道内径取得小,管道本身的费用低。但管内的摩擦损失大,因而要增加输送压力和泵的容量,使输送的营运费增加。相反,管道内径取得大,管道本身的费用虽然增加,但输送的营运费可减少。因此,应在强度条件许可的情况下,选取管道的最佳内径,使管道本身费用与输送营运费用之总和为最小。一般在长距离输油中,若采用高压油泵则可选小的内径,若采用低压油泵则应选大的内径。选取管道内径时,应根据管道内石油的流动状态(层流还是紊流)考虑管路的摩阻损失。对卫星井引出的出油管道,由于原油内含有天然气,当原油在管道内流经一定距离后而油压不足时,或是管道内径大而油井喷出的油量不够多时,天然气就会从原油中释出,形成油气两相流动,甚至在管内汇集成一大段天然气团把管内原油流动隔断,使得管路中的压头损失增大,原油从管道出口端断断续续流出,时而喷气,时而出油,形成所谓“涌流”现象。因此在长距离输油的海底管道设计中,应注意不要选比设计流量所要求的内径大得多的管径,以避免“涌流”现象。

表 2-2 所示为苏联输油管技术经济指标。

表 2-2 输油管技术经济指标

原油管道			成品油管道		
管外径 (mm)	压力 (MPa)	输送能力 $10^4(t/a)$	管外径 (mm)	压力 (MPa)	输送能力 $10^4(t/a)$
530	5.4~6.5	600~800	219	9.0~10.0	70~90
630	5.2~6.2	1000~1200	273	7.5~8.5	130~160
720	5.0~6.0	1400~1800	325	6.7~7.5	180~230
820	5.0~6.0	2200~2600	377	5.6~6.5	250~320
920	4.8~5.8	3200~3600	426	5.5~6.5	350~480
1020	4.6~5.6	4200~5000	530	5.5~6.5	650~850
1220	4.4~5.4	7000~7800			

用于海底管道的钢管,一般都是无缝钢管和直缝焊接钢管。当钢管直径不大时可采用国产碳素钢、碳锰钢和低合金钢的钢管;直径大时可采用高强度钢、合金钢钢管,例如,美国石油学会的 API 5LX 规格的 X52、X56、X60、X70 等级的钢管。一般来说,所采用的钢材应具有足够的强度、延性、韧性和抗腐蚀性,而且要易于焊接。API 5LX 型钢材最为合适,一般常用 X52 与 X56 等级。API 5LX52 的力学性能为:抗拉强度 455MPa;屈服强度 359MPa;伸长率 25%。

近年来,海底管道工艺设计普遍使用了计算机模拟程序进行计算分析,如美国的 PIPESIM 软件、PIPEPHASE 软件、加拿大的 PIPEFLOW 等软件。这些软件中均汇编了多种计算方法以及一些修正系数、参考数据库等供设计者选择。

§ 2-2 等温输送管道的工艺计算

对于低粘度,低凝固点的油或沿线温降很小的热油管道,在工程上都可称为等温输送管

道。这类管道的工艺计算,是以一般管道输送水力计算为基础。例如,某一输油管道所担负的输油量,需选用多大管径,配备多大的泵机组,就需由输送过程中的能耗而定。

一、单相输油管道

对于单相输油管道,在输送最大流量时,为了减小通过控制阀前的油中气体因压力突降而分离或闪蒸,流速不应超过 3m/s;而为了不使流动油液中的砂子或其它固粒淤积管内,实际流速也不应小于 1m/s。

对于等温输油管道进行水力计算时,由给定的正常输油量 Q 和大致选定的平均流速 \bar{V} (可采用经济流速参考值,见表 2-3),由式 $D_i = 1.128 \sqrt{\frac{Q}{\bar{V}}}$ 初步选定一个或几个管内径 D_i ,这样有了流量 Q 、流速 \bar{V} 、管内径 D_i 再根据输送油品的特性和条件(粘度、温度等)以及管路内部的油流流态,即可进行水力计算。计算后,取 ΔP 最小的那个内径作为设计管径。在计算管道的压降 ΔP 时,可采用下述两种方法。

表 2-3 管路中油流(或气流)的经济流速参考值

油品运动粘度 (mm ² /s)	平均流速 (m/s)	
	吸入管路	排出管路
1~12	1.5	3.5~2.5
12~28	1.3	2.5~2.0
28~72	1.2	2.0~1.5
72~146	1.1	1.5~1.2
146~438	1.0	1.2~1.1
438~977	0.8	1.1~1.0
压缩性气体	8~20	
饱和蒸气	30~40	
橡胶软管	一般 6~9,极限 13~15	

注:除注明外均系钢管内油流平均速度。

1. 用管道水力学方法计算

管道作等温输送时的压降 ΔP (即摩阻损失 h) 为沿程摩阻损失 h_L 和管道上局部摩阻损失 h_c 之和,即 $\Delta P = h = h_L + h_c$ 。其中,沿程摩阻损失

$$h_L = \lambda \frac{L}{D_i} \frac{\bar{V}^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (2-1)$$

式中 L ——管道计算长度, m;

D_i ——管道内径, m;

\bar{V} ——管路内油流平均流速, m/s;

g ——重力加速度, m/s²;

λ ——水力摩阻系数,与管路内油流的流态有关,由雷诺数 Re 确定。

管路内油流的流态,用 Re 的大小表示时可分为三种流态:层流、紊流和介于两者之间的过渡状态。在紊流状态中再根据 Re 的大小和管路内壁粗糙度,又可细分为紊流水力光滑区、紊流混合摩阻区和紊流阻力平方区。 $Re = \frac{\bar{V} D_i}{\nu}$, 其中 ν 为管路中油流的运动粘度,单位为

m²/s。

当 $Re < 2000$ 时, 管路内油流的流态为层流。这时, $\lambda = 64/Re$ 。当 $2000 < Re < 3000$ 时, 称为流态的过渡段。在过渡段内的水力摩阻系数, 没有成熟的公式可依。工程上多数按紊流水力光滑区的 λ 计算公式计算, $\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$ 。当 $Re > 3000$ 时, 管路内油流的流态是紊流。管壁相对粗糙度 ϵ 对水力摩阻系数 λ 的影响很大。紊流的 3 个区也随 ϵ 变化。 $\epsilon = 2e/D_i$, D_i 是管子内径, e 是管壁的绝对当量粗糙度。绝对当量粗糙度 e 值, 如表 2-4 所示。

表 2-4 各种管路的绝对当量粗糙度 e

管路种类	e (mm)	管路种类	e (mm)
新无缝钢管	0.05~0.15	旧直缝焊接钢管	0.15~0.35
旧无缝钢管	0.10~0.30	橡胶软管	0.01~0.03
新直缝焊接钢管	0.12~0.20		

紊流状态时, 水力摩阻系数 $\lambda = f(Re, \epsilon)$ 。不同流态的水力摩阻系数 λ 值如表 2-5 所示。

表 2-5 不同流态的 λ 值

流态	划分范围	$\lambda = f(Re, \epsilon)$
层流	$Re < 2000$	$\lambda = 64/Re$
紊流	水力光滑区 $3000 < Re < Re_1 = \frac{59.5}{\epsilon^{8/7}}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 2 \lg \frac{Re \sqrt{\lambda}}{2.51}$ 当 $Re < 10^5, \lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}}$
	混合摩阻区 $\frac{59.5}{\epsilon^{8/7}} < Re < Re_2 = \frac{665 - 765 \lg \epsilon}{\epsilon}$	$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1.8 \lg \left[\frac{6.8}{Re} + \left(\frac{\epsilon}{7.4} \right)^{1.11} \right]$
	阻力平方区 $Re > Re_2 = \frac{665 - 765 \lg \epsilon}{\epsilon}$	$\lambda = \frac{1}{(1.74 - 2 \lg \epsilon)^2}$

注: ① $Re = 2000 \sim 3000$, 按 $\lambda = 0.3164/Re^{0.25}$ 计算;

② 水力光滑区的 λ 计算公式, 还可采用 $\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1.8 \lg Re - 1.53$;

③ 混合摩阻区的 λ 计算公式, 还可采用 $\lambda = 0.11 \left(\frac{68}{Re} + \epsilon \right)^{0.25}$ 。

这样, 有了不同情况下油流流态的 λ 值, 直接利用式 (2-1) 即可求出管道沿程摩阻损失

h_L 。

$$\begin{aligned}
 \text{局部摩阻损失} \quad h_r &= \lambda \sum \left(\frac{L_D}{D_i} \right) \frac{\bar{V}^2}{2g} \\
 \text{或 } h_r &= \sum \zeta \frac{\bar{V}^2}{2g}
 \end{aligned} \tag{2-2}$$

式中 L_D —— 管路计算当量长度, m;

ζ —— 管件局部摩阻系数。

其余符号同式 (2-1)。

如果管路上只有一个管件的局部摩阻损失时, 由式 (2-2) 可得出: $\zeta = \lambda \frac{L_D}{D_i}$

则

$$L_D = \zeta \frac{D_i}{\lambda} \quad (2-3)$$

式中 ζ ——对应于某一管件的局部摩阻系数；

L_D ——对应各类管件的当量长度，即某一管件的局部摩阻损失相当于同管径直管段沿程摩阻损失的长度；

D_i ——管子内径；

λ ——水力摩阻系数。

在紊流状态下，测得的各类管件的局部摩阻系数和 $\frac{L_D}{D_i}$ 值，如表 2-6 所示。

如管路油流状态是层流，应用表 2-6 中的 ζ 值时，应乘以系数 φ 。因为在紊流时的 ζ 值与雷诺数 Re 无关，而在层流时的 ζ 值与雷诺数 Re 有关，其关系用 φ 表示。所以，层流时管件的局部摩阻系数应为 $\zeta_0 = \varphi \zeta$ 。 φ 与 Re 的关系如表 2-7 所示。

表 2-6 部分管件局部摩阻系数 ζ 及对应的 L_D/D_i 值

序号	管 件 名 称	ζ	$\frac{L_D}{D_i}$	序号	管 件 名 称	ζ	$\frac{L_D}{D_i}$
1	弯管的弯头 $R=D$	0.5	20	14	转心阀	0.5	23
2	弯管的弯头 $R=(2-8)D$	0.25	10	15	逆止阀(止回阀)	1.5	75
3	45°焊接弯头	0.3	14	16	带过滤网逆止阀	4.0	160
4	90°单折焊接弯头	1.3	60	17	π型补偿器	2.0	90
5	90°双折焊接弯头	0.65	30	18	波纹补偿器	0.3	14
6	通过三通 	0.04	2	19	轻油过滤器	1.7	77
7	通过三通 	0.1	4.5	20	重油过滤器	2.2	100
8	通过三通 	0.4	18	21	流量计	10 15	460 690
9	转弯三通 	1.3	60	22	全启式安全阀(全开)	4.0	160
10	转弯三通 	2.7	136	23	无保险门油罐出口	0.5	23
11	转弯三通 	0.9	40	24	有保险门油罐出口	0.9	40
12	闸板阀	0.45	18	25	有起落管油罐出口	2.2	100
13	截止阀	7.0	320	26	球阀 $D \geq 50$	7.0	320

表 2-7 层流状态的 φ 值

Re	φ	Re	φ	Re	φ
200	4.2	1200	3.12	2400	2.26
400	3.81	1400	3.01	2600	2.12
600	3.51	1600	2.95	2800	1.98
800	3.37	2000	2.90		
1000	3.22	2200	2.84		

2. 用美国石油学会 API RP 14E 中的公式计算^①。

由给定的设计流量 Q , 可有多种管道内径 D_i , 以满足管道的平均流速 \bar{V} 在 0.9~3m/s (3~10ft/s) 的范围。

如选定内径为 D_i 的管子, 当通过流量 Q 时, 则管内液体平均流速 \bar{V} 的计算用下式:

$$\bar{V} = \frac{0.012Q}{D_i^2} \quad (2-4)$$

式中 \bar{V} —— 液体平均流速, ft/s;

Q —— 液体流量, bbl/d;

D_i —— 管道内径, in。

如计算出的 \bar{V} 在 3~10ft/s 内, 但在 D_i, Q 时流动所产生的压降 ΔP 不一定是最小的。所以, 可以在符合流速 3~10ft/s 的各 D_i 中计算出压降 ΔP 最小的那个 D_i 作为设计管径。 ΔP 的计算可用下式:

$$\Delta P = \frac{0.00115fQ^2S}{D_i^5} \quad (2-5)$$

式中 ΔP —— 压降, pis/100ft;

f —— 摩阻系数, 无量纲;

Q —— 液体流量, bbl/d;

S —— 所输液体与水的相对密度, 无量纲;

D_i —— 管道内径, in。

管道中的摩阻系数 f 是雷诺数 Re 和管内表面粗糙度 e 的函数, 可由图 2-1 确定。其中:

$$\left. \begin{aligned} Re &= \frac{\rho D_i \bar{V}}{\mu} \\ \text{或} \quad Re &= \frac{D_i \bar{V}}{\nu} \end{aligned} \right\} \quad (2-6)$$

式中 Re —— 雷诺数, 无量纲;

ρ —— 管内流体的密度, lb/ft³;

D_i —— 管道内径, ft;

\bar{V} —— 平均流速, ft/s;

μ —— 液体动力粘度, lb/(ft·s);

ν —— 液体运动粘度, $\nu = \frac{\mu}{\rho}$, ft²/s。

① 为应用图表, 公式中的单位仍用英制。