

Buried Flexible Steel Pipe
Design and Structural Analysis

埋地柔性钢管 设计与结构分析

[美] William R. Whidden \ 著

周质炎 夏连宁 \ 编译



Buried Flexible Steel Pipe
Design and Structural Analysis

埋地柔性钢管 设计与结构分析

[美] William R. Whidden \ 著

周质炎 夏连宁 \ 编译

内 容 提 要

本书系统论述埋地柔性钢管的历史、管道力学、管土相互作用、设计案例和特殊埋设条件分析等,汇集美国几十年在输水钢管设计上的研究成果和实践经验。同时,为了读者更好地理解本书的核心内容“管土相互作用”的机理和分析方法,还引用土力学的基本概念,以及该领域先驱者沃特金斯(雷诺·金·沃特金斯)博士的学术论文和教案。本书内容可供从事输水管道设计、制造和施工相关技术人员借鉴,也可供科研院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

埋地柔性钢管设计与结构分析/[美]威廉·R.惠登
(William R. Whidden)著;周质炎,夏连宁编译。—

上海:上海科学技术出版社,2019.1

ISBN 978-7-5478-4189-1

I. ①埋… II. ①威… ②周… ③夏… III. ①埋地敷
设—柔性材料—管道钢管—结构设计 ②埋地敷设—柔性材
料—管道钢管—结构分析 IV. ①TG142

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第211697号

Translated and published by Shanghai Scientific & Technical Publishers with permission from ASCE. This translated work is based *Buried Flexible Steel Pipe: Design and Structural Analysis* by William R. Whidden. © 2009 ASCE. All Rights Reserved. ASCE is not affiliated with Shanghai Scientific & Technical Publishers or responsible for the quality of this translated work. Translation arrangement managed by RussoRights, LLC on behalf of the American Society of Civil Engineers.

上海市版权局著作权合同登记号 图字:09-2018-523号

埋地柔性钢管设计与结构分析

[美] William R. Whidden 著

周质炎 夏连宁 编译

上海世纪出版(集团)有限公司 出版、发行
上海科学技术出版社

(上海钦州南路71号 邮政编码200235 www.sstp.cn)

上海盛通时代印刷有限公司印刷

开本 787×1092 1/16 印张 9.75

字数 200千字

2019年1月第1版 2019年1月第1次印刷

ISBN 978-7-5478-4189-1/TU·268

定价:80.00元

本书如有缺页、错装或坏损等严重质量问题,请向工厂联系调换

译者序

由于具有的高强度、高密封、性能稳定等特性,钢管被广泛地应用于给排水、水利和石油等工程领域。埋地钢管也是目前工程中常用的敷设方法。根据常用钢管的尺寸和一般土体特性,可知输水钢管属于柔性管道。1941年,斯潘格勒(M·G·斯潘格勒)通过对柔性管道在土荷载作用下的变形试验,发现了柔性管道在埋置土的支撑作用下,其刚度有明显提高,认为柔性管道可以作为输水管道使用,同时提出了管土相互作用的概念,给出了计算埋地柔性管道变形的斯潘格勒公式。1958年,沃特金斯(雷诺·金·沃特金斯)和他的导师斯潘格勒共同发表了计算埋地柔性管道环变形的衣阿华修正公式(国内通常称为“斯式”公式)。该公式目前被广泛用于计算埋地柔性管道在组合荷载作用下的变形。《给排水工程管道结构设计规范》GB 50332—2002 中刚度验算引用该公式。

为了编撰本书,美国土木工程师学会(The American Society of Civil Engineers, ASCE)管道技术委员会召集了15位美国主要的管道结构技术权威组成了埋地柔性(钢制)管道荷载稳定性标准和设计委员会,其中包括衣阿华公式的修订者、柔性管道先驱之一的沃特金斯博士,斯蒂芬贝克特管道工程终身成就奖2015年获得者卡德(罗伯特·卡德)、2016年获得者巴达克简(亨利·巴达克简),美国输水钢管企业的总工程师们,管道设计咨询机构的专家,以及大学相关专业的教授等。威廉·R·惠登担任此书的主编。

本书先是详细介绍钢管应用的发展历程,使读者深入了解钢管应用的起源、柔性钢管特性的发现和钢管技术的创新过程。随后分别系统地介绍管道力学、土力学、管土相互作用等基本概念,使读者在应用相关计算公式时能够深入了解其公式的内涵,能够紧密结合工程条件,正确地把握相关计算参数的取值。最后通过工程实例演示柔性钢管设计过程,以及在特殊条件下柔性钢管的设计分析方法。

《埋地柔性钢管设计与结构分析》是一本非常系统的技术书籍,集聚美国在管道设计方面50多年的实践研究成果,对我国从事管道设计、制造和施工相关技术人员有很好的

参考价值。书中强调的对管土相互作用条件下管道变形计算的衣阿华公式应用的正确理解、环刚度的提高应着重提高埋置管道覆土质量而不是一味增加管壁厚度、流填料在埋置柔性管道工程应用的重要作用等,对推进我国在埋地管道工程应用技术的提高具有积极作用。

本书包含工程应用经验、算例、学术研究成果和专业基础理论等内容,其信息跨度较大。为了读者很好地理解管土相互作用的机理和分析方法,本书大量引用土力学的基本概念,如土的压缩性、土的抗剪强度和摩尔圆的应用等。它们都是专业人员熟知的概念,但是其表述方法与我国略有不同,特别是“soil slip”直译为“土体滑移”,在本书中作为重要概念多次被提到,从原文中可以理解为描述土体剪切破坏的极限平衡状态,为了符合原意,书中都以“土体滑移”来表述;还有土的模量,原文中采用了多种表述方式,为了很好地体现作者意图,也采用直译。另外,衣阿华公式中的土刚度模量 E' ,它不能从土工试验中直接测得。 E' 是通过实测环变形经衣阿华公式反推得到的,其取值参考《输水钢管设计与安装指导》AWWA M11 中表 5-3 管道埋置材料的土刚度 E' 。因此,阅读时不能从名词上来理解,还要看它的含义,以免发生误解。

本书虽然是以钢管为主来进行管道设计和结构分析,但其理论分析也适用于其他柔性管道(如球墨铸铁管、玻璃钢管、PE 管及各种塑料管等),对刚性管道(混凝土压力管等)也同样具有参考价值。

编译过程中,虽然希望既能充分表达原作的思路 and 想法,又能符合我国技术人员的专业背景和阅读习惯,但限于能力和时间,难免有欠妥之处,望读者不吝赐教,以便改正。

编译者

2018 年 6 月

前 言

每当打开水龙头,清澈干净的水流出的时候,许多人已经习以为常,不会想到那些输水管道系统的重要性。但是,当管道服务中断时,埋地管道对社区的重要性变得非常实际,需要优先解决。如果没有一个可靠的埋地管道系统,整个社区将无法保证正常运转。

本书的目的是为埋地柔性钢管设计与结构分析提供必要且符合本行业管土体系设计理念的信息。焊接钢管的结构设计要保证钢管有足够的服务年限和性能,必须根据使用寿命、性能极限(有时称作“失效”)进行设计。本书内容也包括性能极限设计,它基于钢管力学、土力学原理,以及管土相互作用的分析。然而,本书未涉及生产过程,相关内容请参见美国水工协会和其他标准机构的相关标准。

在使用个别概念进行设计之前,需要理解本书中的原理,否则单一设计推导的引用会导致一个错误的结论。

1958年,斯潘格勒和沃特金斯发表了计算埋地柔性管道环变形的衣阿华修正公式。柔性管在土荷载下会变形。环变形是环刚度和管周土支撑的作用结果。当时,在衣阿华公式中提出 E' 的初衷是通过一个指标来衡量影响柔性管侧向水平被动土的支撑。

如果 E' 值足够大,在允许范围内环变形是“可控的”。不幸的是,这个公式自建立以来, E' 被用来设计管道刚度而非土体刚度, E' 的这种用法是不恰当的, E' 最初是当作环变形的计算方法,并通过现场测量来验证这个环变形。此外,不能用检测土体的方法来确定这个原始的 E' 值。就本书而言,术语 E' 是指土体割线模量,而不是指衣阿华修正公式的 E' 。

本书提供适当的分析方法来解释管道设计的外荷载原理。自1950年代以来,犹他州立大学的沃特金斯博士和其他人发展了一些外荷载设计理念。

柔性管道定义,如术语柔性、半柔性、半刚性和刚性一直在行业中使用。实际上,管道设计只有两种基本理念:柔性和刚性。这两种设计理念的差别是抵抗内外压力的分析

方法。

对于刚性管道设计,内外压力是叠加的,需组合内外荷载进行分析,计算推力和弯曲力在管壁上产生的应力。

对于柔性管道设计,内外压力的分析是独立的,任何内外荷载的组合分析会使管壁上的应力减少,因此相比组合应力分析,独立分析对柔性管道更加可靠,柔性管环更宜适应变形,并随着埋地土体压缩变形后更趋于稳定。

设计钢管时,设计者还需考虑壁厚以外的问题,包括内外防腐类型,以及相应的接口形式。适应某种安装条件的涂层和内衬可能并不适合其他地方,对于接口形式的适应性也是一样的。

与其他设计一样,设计者往往要了解输入参数的特性和其计算结果对工程项目经济性的影响。经验法则不能作为绝对值来考虑,当评价项目设计要求时,设计者应考虑周全,必须确认性能极限和失效机理,因为性能极限并不意味着失效。

管道是一种经济有效的运输载体,可以输送流体、矿浆和气体,可作为导管,以及行人和车辆的通道等,管子还可以作为储罐。

作为流体输送管,第一步要确定:

- 输送什么?
- 流量是多少?
- 压力和压力变化情况如何?

设计的基本要素是管道设计、覆土设计和管土相互作用。

这本书旨在为学生和专业人员提供一个有条理的、按顺序的设计或计算过程。在这里简单介绍各章节和附件的内容。

第1章介绍埋地管道的历史,帮助读者理解埋地管道与土体之间的关系。

第2章介绍钢管设计的基本概念(不包括管道系统),这是一个理解埋地钢管设计的重要概念。其本质就是,钢管抵抗内压,土体抵抗外力。本章介绍设计准则、分析管应力和应变的参数,以及这些应变对管内衬和外涂覆的限制问题。

第3章介绍与埋地管道设计有关的土力学原理,项目的地质报告需包含的数据(帮助设计工程师分析和设计埋置土)和有效参数(包括土重度、土的可压缩性和土体滑移时的强度)。

第4章介绍分析步骤,分析管土之间的关系。它是成功设计的关键,其详细内容在第

5 章中叙述。

第 5 章介绍一些设计算例,演示前一章阐述的设计过程。

第 6 章介绍一些其他的设计和分析专题,对于多数埋地管线安装来说,它们也许不常见。例如:地震荷载以及支座上管道的纵向推力,它们对于一个完整设计或许只是一个补充;还有一些关于获得被动侧向支撑的可选方法,如流填料。

附录 A 介绍衣阿华公式。衣阿华公式用于环变形计算,它主要评价埋置土的作用,而不是为了进行钢管计算。这个公式被误用了许多年,本附录介绍该公式的合理应用。

附录 B 介绍地面沉降分析。“沉降”是土体剪切破坏的常见描述,通过使用莫尔应力圆分析一个无限小土立方,可以确定和建立土体稳定性。

附录 C 为工程师提供一个典型有限元模型的例子,选择与管道平行的沟槽开挖情况来指导和理解这个强大工具的好处和分析过程。

附录 D 介绍外部流体压力。因为外部流体压力能够使管壁塌陷,本附录提供一些信息和例子帮助工程师认识和评价这种状况,避免任何潜在问题的发生。

附录 E 称作“埋地钢管和储罐的故事”。致力于这一领域的学生应当了解他们选择行业的历史背景。沃特金斯博士,这一领域的先驱者、埋地钢管和储罐的历史见证者和缔造者,他本人经历了许多事件。本附录是关于他的历史轨迹,提供一个他个人历史的精彩缩影,以及介绍这些理论是如何进化的。

附录 F 论证非均匀环向压力作用下呈现的趋静定状态。对于这种近似的状态,需要验算静力平衡方程和变形方程。通过对管环施加虚拟的力或弯矩演示这种近似的状态。

附录 G 阐述与动荷载影响因子发展有关的原理。

附录 H 主要名称、常数和术语。

附录 I 为英制和公制的单位换算。

本书由美国土木工程师学会管道技术委员会下属的埋地柔性(钢制)管道荷载稳定性标准和设计委员会编制:

William R. Whidden, 注册工程师, 主席, PBS&J 公司

Brent Keil, 注册工程师, 副主席, 西北钢管公司

Robert J. Card, 注册工程师, 秘书长, LAN 公司

Reynold K. Watkins, 博士, 注册工程师, 犹他州立大学

Loren R. Anderson, 博士, 注册工程师, 犹他州立大学

James A. Bay, 博士, 犹他州立大学

Spyros A. Karamanos, 博士, 色萨利大学

Randall C. Hill, 注册工程师, CDM 公司

J. Edward Barnhurst, 注册工程师, MWH 公司

David L. McPherson, 注册工程师, MWH 公司

Stephen F. Shumaker, 注册工程师, CDM 公司

Bruce VanderPloeg, 西北钢管公司

Henry H. Bardakjian, 注册工程师, 阿美隆公司

John L. Luka, 注册工程师, 美国铸管公司螺旋焊管分公司

George F. Ruchti, 美国铸管公司螺旋焊管分公司

本书的审核委员会包括:

George J. Tupae

Roger L. Brockenbough

Sam Arnaout, 汉森压力管道公司

目 录

第 1 章 埋地管道的历史 1

- 1.1 古文明世界的管道 / 1
- 1.2 钢和铁管的历史 / 3
- 1.3 管道设计的先驱者 / 5

第 2 章 管道力学 11

- 2.1 内压 / 11
- 2.2 最小壁厚 / 12
- 2.3 环刚度 / 13
- 2.4 环压缩 / 14
- 2.5 水泥砂浆内衬和外涂敷的性能极限 / 15
- 2.6 环变形 / 18
- 2.7 屈服应力 / 18

第 3 章 土力学 20

- 3.1 土涵管 / 20
- 3.2 土体引入弹性理论的缺陷 / 20
- 3.3 土的重度 / 21
- 3.4 竖向土压力(应力) / 21
- 3.5 土体强度 / 23
- 3.6 土体滑移 / 24
- 3.7 土粒径和级配 / 24

- 3.8 土内摩擦角 / 26
- 3.9 被动抗力 / 27
- 3.10 土黏聚力 / 27
- 3.11 土体压缩 / 28
- 3.12 埋置土 / 29
- 3.13 选择性填料 / 30
- 3.14 液化 / 30
- 3.15 流沙状态 / 30
- 3.16 地面移动 / 31
- 3.17 地震 / 31
- 3.18 土体技术参数 / 31
- 3.19 有限元分析 / 33

第4章 管土相互作用

36

- 4.1 环变形 / 36
- 4.2 管和土在环变形上的相对影响 / 38
- 4.3 外水压导致的管壁塌陷 / 40
- 4.4 埋地柔性管道的环变形失效 / 40
- 4.5 最小覆土深度 / 45

第5章 设计分析

51

- 5.1 工况 1-内压和搬运 / 52
- 5.2 工况 1A-管环稳定性 / 53
- 5.3 工况 1B-真空时的管环稳定性 / 55
- 5.4 工况 1C-有地下水外压和真空压力的管环稳定性 / 57
- 5.5 工况 2A-管内部分真空,在给定深度下的管环稳定性 / 59
- 5.6 工况 2B-防止管壁塌陷的管刚度 / 62

第6章 特殊敷设条件

64

- 6.1 同一管沟内埋设双排管道 / 64

- 6.2 平行管沟 / 70
- 6.3 差土质的管沟 / 71
- 6.4 流填料 / 72
- 6.5 纵向力 / 73
- 6.6 在排架上的埋地管道 / 82
- 6.7 地震方面的考虑 / 89
- 6.8 全包封的管道 / 91

附 录

93

-
- 附录 A 衣阿华公式——是与非 / 94
 - 附录 B 土体滑移分析 / 97
 - 附录 C 有限元设计举例——管沟平行于一条埋地管道 / 103
 - 附录 D 管外流体压力 / 109
 - 附录 E 埋地钢管和储罐的故事 / 118
 - 附录 F 管环分析 / 130
 - 附录 G 土体冲击系数 / 135
 - 附录 H 主要名称、常数和术语 / 137
 - 附录 I 单位换算 / 144

第1章

埋地管道的历史

很久以前,在埋地管道是作为改善人们生活水平的一种手段之前,埋地管道的概念就已经存在于自然当中,从一段肠道到复杂的人体,这种“工程结构”存在于各种生命形态中。在昆虫世界,昆虫群体在地下挖掘错综复杂的隧道系统,啮齿动物钻入地下,在地下管道中栖息。

埋地管道的历史始于古代人类聚居区,大约公元前 2500 年,中国人就用竹子输水。在一些地中海国家,人们用陶土管供水到村中心的水井,古代波斯的埋地管道叫作“坎纳兹”(ghauats),是一种石块砌成的水渠,在山下由人工挖掘,收集干净的水,用管输水远至 30 mile(48.3 km)外干热的平原城市,山涧清泉流到被污水、牲畜、垃圾、蛇和蚊蝇等污染的沼泽地。

1.1 古文明世界的管道

古希腊时代,人们建造管道和沟渠用于城市地区输水和供水(图 1-1)。最著名的公共输水工程是东爱琴海岛屿的首都萨摩斯城的欧帕里诺斯渡槽,它始建于公元前 550 年(波吕克拉底统治时期),由工程师欧帕里诺斯主持建造,工程持续了 10 年。数年之后,在公元前 540~前 530 年之间,雅典的统治者,庇西特拉图建造了一段 2 800 m 长的渡槽,从亥米托斯山脚输水到雅典城,在城里,水通过地下管道系统分配供水。

在公元 100~300 年古罗马时期,罗马皇帝使用奴隶的廉价劳动力修建管道,管道成为皇帝和精英阶层重要的基础设施,水通过渡槽输送到罗马,然后经过铅管供水到他们的宅第和奢侈的罗马浴池。罗马帝国的衰落可能部分与这些铅管有关,经过一段时间,酸性水从管中溶解出铅,并导致铅中毒。但铅中毒在罗马并没有停止,含铅的水壶煮沸酸性葡萄汁制成糖浆,儿童爬行地板时接触脱落的庞培红丹漆,这些也会带来健康问题。铅中毒

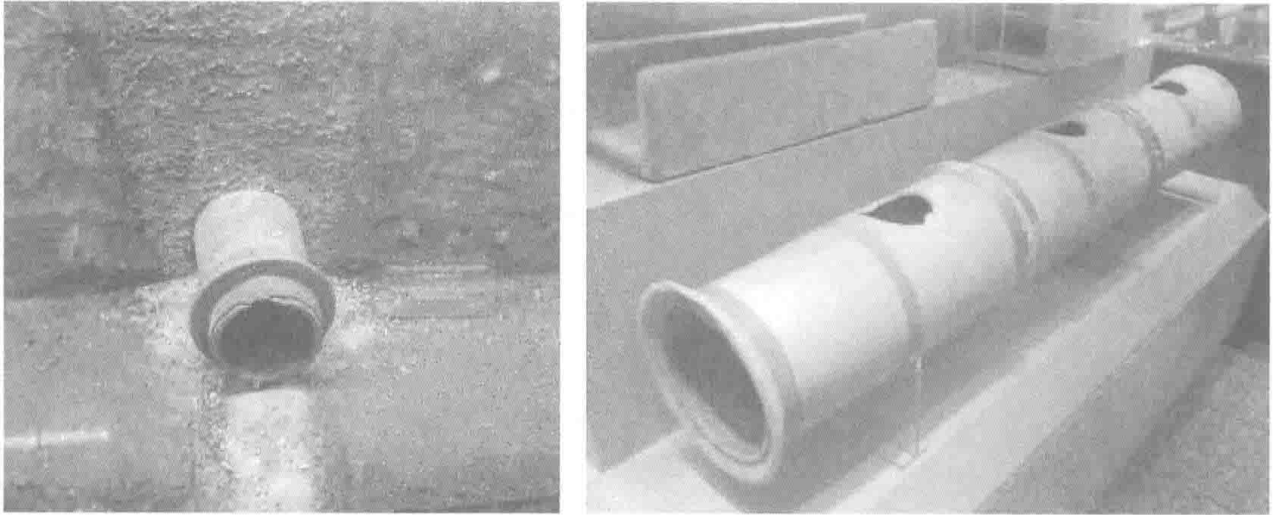


图 1-1 在雅典地铁站(福音医院站)展示的陶土管,来自庇西特拉图渡槽,希腊雅典(公元前 540~前 530 年)

会引起阳痿,生育减少,其后代也会存在大脑缺陷的情况。

文艺复兴时期,街道中弥漫着污水的臭味,巴黎和伦敦开始修建埋地排水管道。这些下水道是用砖砌的拱顶隧道,这种拱形早前已用于非凡的罗马建筑拱门和渡槽中。事实上,因为石块(砖块或石头)的相互挤压作用,下水道不需要砂浆砌筑。

1900 年后期,拱形概念被重新用于埋地管道的土拱作用。

在北美洲,第一批欧洲移民用挖空的原木做管。此后,他们将锯好的窄板条,用钢箍拼装在一起做成木管。箍桶也是采用这种原理制成的木桶和浴缸。一些早期的木板管道至今仍在使用,如图 1-2 所示。



图 1-2 建于 20 世纪初的一段木板管道

1.2 钢和铁管的历史

公元前 1000 年,铁就已经出现了。但是在文艺复兴之前,铁主要被用来做矛、剑和盾牌。铁用于制作枪是在 1346 年,枪的需求刺激了铁管的加工——“ingeniators”(Ingenious ones,工程师)的梦想——因为迅速发展的城市对水的需求,铁比竹子和陶土具有更高的强度。1824 年,詹姆斯·拉塞尔在英国发明了焊接铁管(多枪筒)的装置,将许多废弃的小口径枪管焊成大口径管,铁管得以迅速发展。手工制作的铁管输送燃气给街灯和精英阶层的住宅,其造价非常昂贵。1825 年,科尼利厄斯·怀特豪斯用拉拔的办法将加热的平板通过一个喇叭形的模具拉成长管。接下来的是贝塞麦转炉炼钢法的诞生,平炉可以大批量生产钢,实现了钢管生产,城市生活方式发生了改变,社区扩展成了大城市。

输水钢管和排水陶土管成为“城市的核心”。在《输水钢管的历史》(凯茨,1971 年)一书中,钢管的发展被归纳为以下四个主要阶段。

(1) 1830 年代,在美国建造了第一座生产熟铁管的炉子,之后迅速建造了更多的炼铁炉,由于快速增长的城市对水的需要使得钢管需求巨大。这些熟铁管口径较小,而且铁的供应量限制了铁管的大量生产。

(2) 钢的时代诞生于 1855 年的英国,贝塞麦开发了一种生产钢的工艺,1861 年的平炉发展可大批量生产钢——几千吨钢。在那之前,产钢量以磅计算。通常可以用冷加工钢板制成任何口径的管材。

1849 年加利福尼亚州(下简称加州)淘金热开始不久,钢板被制成直缝铆接钢管,管“板条”的每一侧有折边,其做法与火炉烟囱相似,然后嵌入另一根管板条的一侧,用锤击把它们简单地铆接在一起制成管节。从 1860 到 1900 年代,所有的输水管实际上都是钢板冷成型铆接的,在那个时期,美国安装了超过 200 万 ft(约 610 km)长的输水钢管(图 1-3)。



图 1-3 铆接钢管

(3) 第三个主要发展阶段是锁杆钢管,单根管节长达 30 ft(9.1 m)(图 1-4),首次在纽约制造。两瓣半圆管插在 H 形的长锁杆里合成圆管,半圆管边设计得厚一点,形成插

入锁杆的侧肩,然后两部分被压配在一起,管边被夹在锁杆里。纵向合缝完全密封,而铆接效能只有45%~70%的密封效果。它的管内比铆接管光滑,输送能力可提高15%~20%。在1915~1930年,约钢管安装了330万ft(1006 km)长的锁杆钢管和150万ft(457 km)长的铆接钢管。

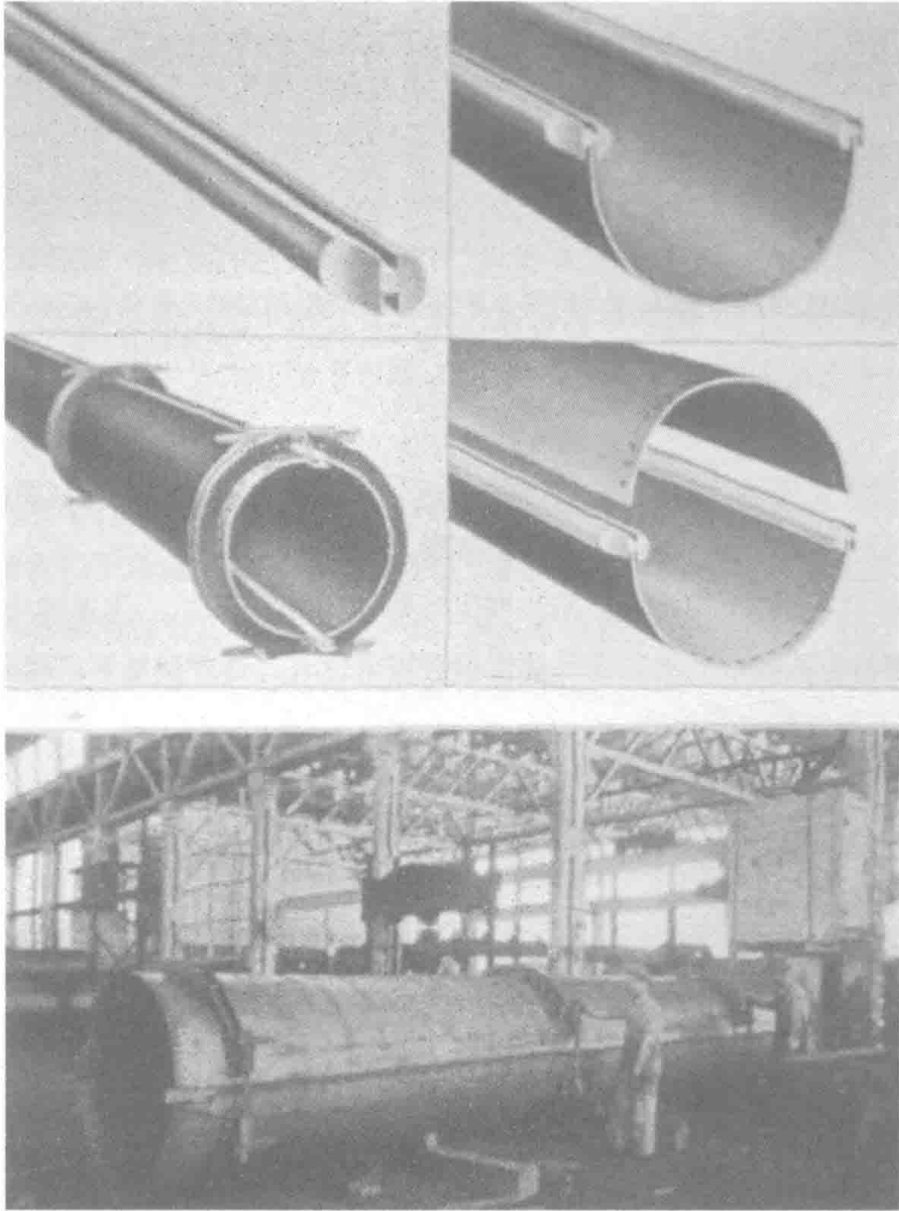


图 1-4 锁杆钢管

(4) 第四个主要发展阶段是自动电弧焊。电焊在1920年代还是新鲜事物,但是当焊机和焊剂开发出来后,电焊在1930年代得到了发展,在1920~1940年代期间,大约有700万ft(2134 km)长的焊接钢管被安装。

在第二次世界大战(二战)期间,几乎所有的钢材制品都用于战争,焊接对于建造战舰是必不可少的,焊接技术用于美国海军舰船,帮助缩短了建造时间,同时焊接技术也得到了发展。在1940年代后期,管厂开始用直缝电阻熔接焊来生产焊接

钢管,螺旋形(螺旋焊管)焊缝焊接才刚刚开始。在1950年代,管厂生产了大量的大尺寸钢管。

大口径钢管都是焊接的,最初焊接设计是仿照其他生产工艺,如压力容器。第一次世界大战(一战)后,焊接锅炉代替了铆接锅炉,因为高压下铆接会泄漏。几次锅炉爆炸发生后,出于对安全的需要,美国机械工程师协会(ASME)编写了一个ASME锅炉和压力容器规范。它参照了以往成功的安全案例。焊接主要为对接焊,或等同的“啮合连接”,当时设定的安全系数相当高。美国石油学会提出了一个规范,基于减少安全限制因素,导致了API和ASME委员会联合在1934年进行焊接标准化,直到1968年才制订一个ASME标准(第八章,第一部分,压力容器建造规则)。

高温高压焊接锅炉规程是不能用于低温低压的输水钢管焊接的,尤其是在埋地钢管的安装时,承插搭接焊比对接焊更可靠,接口更容易承插,现场焊接更容易控制,可以在管内或管外进行单焊缝搭接焊接,而双搭接焊是管内外都焊,不过双焊缝可提供检测焊缝密封的机会,一个阀(像轮胎阀杆)可以在焊缝之间接入,打气压后可通过压降找到焊缝泄漏点。

根据相关管道试验(布罗肯伯勒,1990年),单搭接焊的可靠性为75%~100%,双搭接焊的可靠性为85%~100%。双搭接焊的密封性能提高很少,这是因为双焊缝同样可能失效。

1.3 管道设计的先驱者

管道的发展是一个试错的过程。多少古波斯人在挖掘隧道时,在石块衬砌前发生的塌方中丧失了生命?古罗马人怎么知道使用铅管会中毒?谁能预测焊管会替代铆接和锁杆管?管道的演化是以经验为主的过程,而不靠设计发展的。埋地管道的设计还是近代的事,它始于1913年,当安森·马斯顿担任艾奥瓦州立学院工程系第一任主任时,他急切地意识到每次暴雨过后交通陷入瘫痪,每年春季解冻的土路变成泥潭,为此他寻找解决办法,公开呼吁采取行动:“让艾奥瓦从泥潭里走出来。”马斯顿认识到,要使路摆脱泥泞,必须做好道路排水。解决方法是沿路铺设排水管。政府注意到了这个问题,一个联邦公路研究董事会成立了,马斯顿担任董事长。马斯顿领导了第一个埋地排水管道的工程设计,他推导了一个关于管顶土荷载的公式。在那个时候,排水管是陶土管和水泥管,它们都属刚性管。他将设计的管道交给生产厂生产,生产的管子能够在三点法荷载试验中经受住“马斯顿荷载”(图1-5)。这是一种激进的设计理念,基于一种性能参数,而非一般工艺规范中的大量细节要求。