

预应力钢筒混凝土管(PCCP) 的设计、生产、施工及数值分析

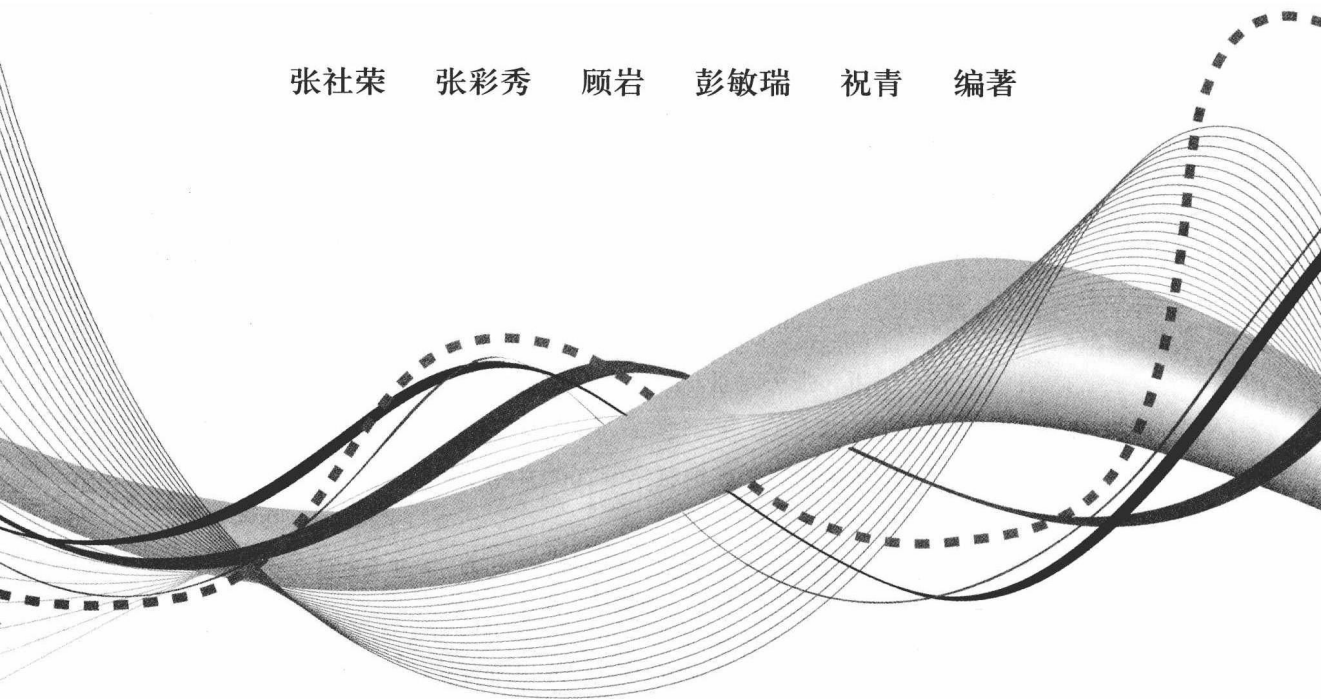
张社荣 张彩秀 顾岩 彭敏瑞 祝青 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

预应力钢筒混凝土管(PCCP) 的设计、生产、施工及数值分析

张社荣 张彩秀 顾岩 彭敏瑞 祝青 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

预应力钢筒混凝土管（简称 PCCP）在长距离引水工程、高压给水管道工程、高覆土引水工程、城市给水管网改造工程以及电厂的补充水、循环水和水力输送系统中的应用效果良好，重要性日益突出，早已引起国内外普遍重视。本书系统全面地论述了当前国内外通用的 PCCP 设计、生产制造、安装方法，旨在阐述 PCCP 从设计生产、安装使用到运行实践中的详细问题，重点突出设计、生产制造、施工、检测及运行时的结构仿真分析，总结 PCCP 运行实践经验，深化对 PCCP 的某些领域的认识，以丰富 PCCP 的理论，提高建造水平，给出建树性的结论及建议。

本书理论扎实、观点新颖、视野开阔、实例丰富，可供水利、电力、市政给排水的科研、设计、施工等工程技术人员和各高等院校师生参考。

图书在版编目（CIP）数据

预应力钢筒混凝土管（PCCP）的设计、生产、施工及数值分析/张社荣等编著. —北京：中国水利水电出版社，2009

ISBN 978 - 7 - 5084 - 6767 - 2

I. 预… II. 张… III. 预应力混凝土管：钢筋混凝土管
IV. TU757.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2009）第 150516 号

书 名	预应力钢筒混凝土管（PCCP）的设计、生产、施工及数值分析
作 者	张社荣 张彩秀 顾岩 彭敏瑞 祝青 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www. waterpub. com. cn E-mail: sales@waterpub. com. cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 9 印张 214 千字
版 次	2009 年 8 月第 1 版 2009 年 8 月第 1 次印刷
印 数	0001—1500 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前言

早在 1893 年巴黎总工程师邦纳 (Bonna) 设计和制造了钢筒混凝土管 (简称 PCCP), 第一次铺设于巴黎科隆贝 (Colombes) 引水管网, 1939 年邦纳公司制造了预应力钢筒混凝土管, 并敷设于巴黎郊区。

1942 年美国开发了预应力钢筒混凝土管, 生产的第一节 PCCP 是内衬式预应力钢筒混凝土管 (PCCP-L)。埋置式预应力钢筒混凝土管 (PCCP-E) 开始生产于 1952 年。

在我国, PCCP 是在引进和消化吸收美国先进技术和关键设备的基础上发展起来的, 近 20 年的发展过程中, PCCP 广泛使用于我国的水利、电力、市政给排水等各个领域, 有长距离引水工程、高压给水管道工程、高覆土引水工程、城市给水管网改造工程等大、小型工程。在长距离、大流量输水调水工程方面, 山西省万家寨引黄工程连接段输水工程 (上接汾河水库, 下连呼延水厂) 主要采用 PCCP 进行输水, 管线长度 43.2km, 单节管道长度 5m、内径 3m、最大内水压力 1.0MPa、最大覆土厚度 8m、最大管壁厚 270mm, 单节管道重约 27~35t, 各项指标均为国内之最。连接段 1~6 号隧洞长 7989.9m, 采用洞穿 PCCP 进行施工。如此长的 PCCP 洞穿管工程在国内尚属首例, 它解决了隧洞与埋管的衔接问题, 并保证了整个线路输水水力过渡过程的均匀、稳定。新疆引额 (额尔齐斯河) 济乌 (乌鲁木齐) 10km 大倒虹使用了管径 2.8m 的 PCCP 双线长度约 15km。深圳东部供水工程使用了管径 2.6m 的 PCCP 长度约 9.5km。举世瞩目的南水北调工程中线京石段应急供水工程 (北京段) 规划使用双排直径 4m 的大口径 PCCP, 管线长 55km, 2004 年 5 月, 北京华腾远通公司率先生产出内径 4m 的 PCCP, 并通过中国混凝土制品质量监督检验中心的检测, 19 项检测全部合格。在市政排水方面, 规模最大的是上海市污水治理二期工程, 在滨海软土地基上成功埋设了直径 3.6m、单根长 6.0m、总长 3.91km 的 PCCP 管道, 创造了对环境干扰最小、施工速度快的典型。山东电力管道公司生产的 PCCP 还使用于华能德州等数座电厂的补充水、循环水和水力输送系统中, 效果良好。同时, 几个大的 PCCP 管道公司生产的 PCCP 除了满足国内工程外, 还出口到越南、毛里求斯、新加坡等国家。

编著者的宗旨是抱着学习的目的，搜集了近年来国内外预应力钢筒混凝土管的发展历史、结构设计、生产制造、安装铺设及检测方面的资料，整理了大量的科技成果，突出涌现出来的新方法、新技术、新材料及新工艺。

本书的第5章对预应力钢筒混凝土管进行了结构数值仿真分析，从PCCP的制造、施工到运行分步进行计算分析，包括PCCP的预应力、变形、裂缝扩展过程、管芯混凝土及砂浆保护层应力分析、混凝土开裂前后钢丝及钢筒应力变化特征和PCCP的徐变效应，从理论上做了更详尽的论证，其中许多内容是作者的研究心得，也给出了许多建树性的结论及建议。本书的另一个特点是注重工程应用，书中列举了利比亚大人工河、山西省万家寨引黄工程等实际工程实例。

国内有关PCCP检测的文献资料较少，作者在大量翻阅了相关外文资料后，整理出了本书的第6章，相信会丰富我国关于PCCP检测的理论。

在本书的编写过程中，感谢天津万联管道工程有限公司对本书所给予的支持和帮助，体现了国内企业对于推广我国PCCP的应用、并促进其发展的责任心。

本书在编写过程中参考了许多文献资料，向本书引用文献资料的国内外作者致意。如因本书编者疏忽而有遗漏，请与编者联系，为此表示诚挚的谢意。

编著者历时两年，数易其稿，编写了这本书，力求准确达意，但限于水平，书中不当之处在所难免，敬请读者不吝赐教。

作者

2009年5月21日

目 录

前言

第 1 章 预应力钢筒混凝土管(PCCP)在国内外的的发展及应用	1
1.1 PCCP 的结构及其特点	1
1.2 PCCP 在国内外的的发展历史	6
1.3 PCCP 应用前景展望	9
参考文献	10
第 2 章 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的结构设计	11
2.1 概述	11
2.2 美国 ANSI/AWWA C304 规范规定的 PCCP 设计方法	11
2.3 国内规范规定的 PCCP 设计方法	20
2.4 ANSI/AWWA C304 与国内规范 CECS 140 对 PCCP 设计方法规定的区别	22
2.5 按照 ANSI/AWWA C304 规范对 PCCP 进行程序设计的流程	23
参考文献	28
第 3 章 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的生产制造	29
3.1 制管构造要求	29
3.2 生产工艺流程	30
3.3 管件原材料质量控制	38
3.4 管体生产过程的质量控制	47
3.5 缺陷处理	56
参考文献	57
第 4 章 预应力钢筒混凝土管(PCCP)的铺设	59
4.1 PCCP 在铺设中的优越性	59
4.2 PCCP 安装的工艺流程	59
4.3 沟槽开挖	60
4.4 PCCP 铺设安装	62
4.5 沟槽回填	68
4.6 止推结构	69
4.7 管线静水压试验	71
4.8 管道防腐	72

4.9	PCCP 隧洞安装的施工方法	75
4.10	工程实例:利比亚大人工河输水工程	79
	参考文献	87
第 5 章	预应力钢筒混凝土管(PCCP)数值仿真分析	90
5.1	PCCP 数值分析现状	90
5.2	仿真模型及加载步骤	91
5.3	PCCP 有限元分析	95
5.4	PCCP 的徐变效应	107
5.5	数值分析成果	115
	参考文献	115
第 6 章	预应力钢筒混凝土管(PCCP)的检测	117
6.1	PCCP 管道的破坏阶段	118
6.2	现有 PCCP 检测的主要技术	118
6.3	小直径 PCCP 的检测	123
6.4	管道风险管理体系	125
6.5	管道检测实例	127
	参考文献	134

预应力钢筒混凝土管 (PCCP) 在国内外的应用

预应力钢筒混凝土管 (Prestressed Concrete Cylinder Pipe, 简称 PCCP) 是目前世界上广泛使用的大口径、高工压的优质复合型管材, 它是一种将高强钢丝的抗拉、混凝土的抗压和钢板的防渗有机结合在一起, 充分合理利用了材料各自的物理力学特性的高品质的输水管材。这种管兼备钢管和预应力混凝土管的优点, 能承受高覆土、高工压, 具有接头密封性好、耐腐蚀、使用寿命长、抗震性能好、安装方便、运行费用低、防渗性能好等特点。此项技术源于法国 Bonna 公司, 20 世纪 40 年代, 欧美各国竞相研制开发。世界上主要制造预应力钢筒混凝土管的厂家有美国的 Ameron 公司、美国的 Price Brother 公司、法国的 Bonna 公司和德国的 Dyckerhoff—Widmann 公司。PCCP 管材被世界各国广泛应用于市政、引水、污水处理、热力、天然气等各种管线。

1.1 PCCP 的结构及其特点

1.1.1 PCCP 的构造

PCCP 是在带钢筒的混凝土管芯上缠绕一层或多层环向预应力高强钢丝, 并喷涂水泥砂浆保护层而制成的新型复合管子, 混凝土管芯处的钢筒与两端的承插口及橡胶圈组成一个密封体。

PCCP 的主要构成部分包括: 带钢筒的混凝土管芯、缠在管芯外的高强预应力钢丝、辊射在钢丝外的水泥砂浆保护层和钢制承插口接头。PCCP 构造如图 1.1 所示。

(1) 带钢筒的混凝土管芯: 它是管道的主要构成部分, 由经过水压试验的钢筒和混凝土管芯共同组成, 使 PCCP 兼有钢管和混凝土管的优点和性能。

(2) 高强预应力钢丝: 以一定的拉应力螺旋式缠绕在管芯上, 使管芯产生均匀的预压应力以抵消由内压和外荷载产生的拉应力。在管芯一定的情况下,

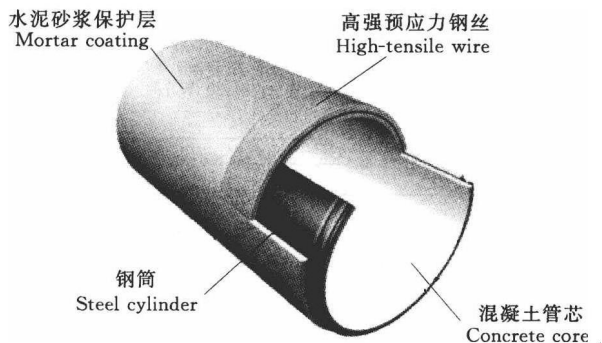


图 1.1 PCCP 构造图

通过改变高强预应力钢丝的直径、拉应力和缠丝密度,可使管芯产生不同的预压应力,以达到不同承载能力设计要求。

(3) 水泥砂浆保护层: 辊射在预应力钢丝外, 保护钢丝和管芯免受物理损坏和外部侵蚀。

(4) 钢制承插口接头: 焊在钢筒的两端, 结合“O”形橡胶圈, 可为管与管间的连接提供止水, 并可使相邻两管道中心对齐, 是 PCCP 的连接件和密封件。

1.1.2 PCCP 产品分类、产品标记

1. 产品分类

按照 PCCP 的结构型式不同, 可将其分为内衬式预应力钢筒混凝土管 (PCCP—L) 和埋置式预应力钢筒混凝土管 (PCCP—E); 按管子的接头密封类型又分为单胶圈预应力钢筒混凝土管 (PCCPSL 或 PCCPSE) 和双胶圈预应力钢筒混凝土管 (PCCPDL 或 PC-CPDE)。

2. 产品标记

在国家标准《预应力钢筒混凝土管》(GB/T 19685—2005) 中, PCCP 产品标记由管子代号、公称内径、有效长度、工作压力 (P)、覆土深度 (H) 和标准号组成, 如:

$$\text{PCCPDE } 4000 \times 5000 / \text{P1.5/H3} \\ \text{GB/T 19685—2005}$$

代表公称内径 4000mm、管子有效长度为 5000mm、工作压力为 1.5MPa、覆土深度为 3m 的双胶圈埋置式预应力钢筒混凝土管。

1.1.3 PCCP 的结构型式

PCCP 从结构型式上分为两种: 一种是内衬式 (Lined Cylinder Type) 预应力钢筒混凝土管 (PCCP—L), 如图 1.2 所示, 是在钢筒内部衬以混凝土后, 在钢筒外面缠绕环向预应力钢丝, 再辊射砂浆保护层, 多采用离心工艺成型, 适合小口径管 ($DN \leq 1400\text{mm}$); 另一种是埋置式 (Embedded Cylinder Type) 预应力钢筒混凝土管 (PCCP—E), 如图 1.3 所示, 是将钢筒埋置在混凝土里面, 然后在管芯混凝土外表面上缠绕环向预应力钢丝, 再辊射砂浆保护层, 多采用立式振动工艺成型, 适合较大口径管 ($DN \geq 1200\text{mm}$)。

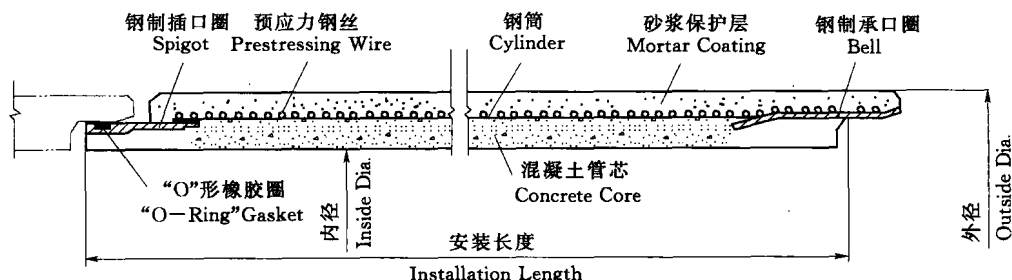


图 1.2 内衬式预应力钢筒混凝土管 (PCCP—L) 结构图

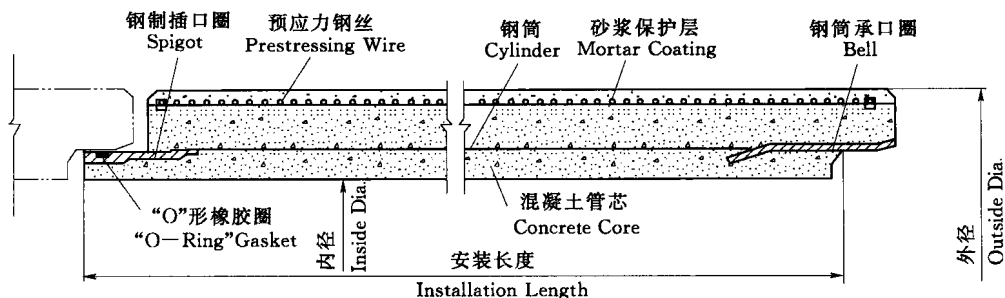


图 1.3 埋置式预应力钢筒混凝土管 (PCCP—E) 结构图

以下针对 PCCP 的适用范围、管径范围、有效长度、管材标准、管材设计标准、工作压力、原材料进行简要介绍。

(1) 适用范围：主要适用于城市、工业和农业灌溉系统的供、配水管线，电厂循环水管道、各种压力排污主管道、海水冷却循环水管道、下水管道，也可用于倒虹吸管、压力隧道用衬管和高覆土下的涵管，尤其适合铺设高工压、大口径、长距离的输水管道工程。

(2) 管径范围：我国 PCCP 的标准公称内径为 $DN400 \sim DN4000\text{mm}$ ，国外应用的 PCCP 最大可达 $DN7600\text{mm}$ 。

(3) 有效长度：PCCP 的有效长度一般为 $5 \sim 6\text{m}$ ，目前最大可达 7.5m 。

(4) 管材标准：ANSI/AWWA C301—99 “AWWA Standard for Prestress Concrete Pressure Pipe, Cylinder Type” (钢筒型预应力混凝土压力管) 产品标准。

(5) 管材设计标准：ANSI/AWWA C304—99 “AWWA Standard for Design of Prestressed Concrete Cylinder Pipe” (预应力钢筒混凝土压力管设计标准)。

(6) 工作压力：我国 PCCP 的标准工作压力指标为 $0.4 \sim 2.0\text{MPa}$ ，更高工作压力的管材可根据工程要求设计。国外应用的 PCCP 工作压力最高达 5.0MPa 。

(7) 原材料：ASTM (American Society for Testing and Materials 美国材料与试验协会) 系列标准。

1.1.4 管道接口形式

PCCP 采用钢制承插口橡胶密封圈接头。钢制承插口与管身钢筒焊接，加工精度高 (承口和插口工作面直径配合间隙最小 0.5mm ，最大 2mm)，承口呈钟形环状，具有安装自定位的作用，插口是带有单凹槽或双凹槽的特制型钢。橡胶密封圈应采用实心滑入式安装，按照与凹槽等断面设计，填充在凹槽内，安装好以后的橡胶圈受到双向挤压，形成很好的密封力。在预应力钢筒混凝土管道的接头处，对内、外部缝隙，应根据输送水质及环境防腐条件，采用水泥砂浆或其他柔性材料嵌填严实。

PCCP 按管子的接头密封类型分为两种：一种是单胶圈预应力钢筒混凝土管，指管子接头采用了单根橡胶密封圈进行柔性密封连接的预应力钢筒混凝土管，包括单胶圈内衬式预应力钢筒混凝土管 (PCCPSL) 和单胶圈埋置式预应力钢筒混凝土管 (PCCPSE)，如图 1.4 所示；另一种是双胶圈预应力钢筒混凝土管，指管子接头采用了两根橡胶密封圈进行

柔性密封连接的预应力钢筒混凝土管，包括双胶圈内衬式预应力钢筒混凝土管（PCCP-DL）和双胶圈埋置式预应力钢筒混凝土管（PCCPDE），如图 1.5 所示。

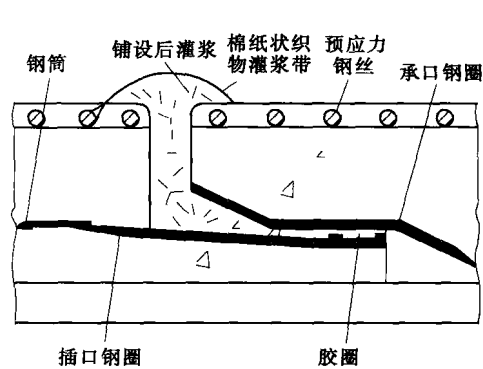


图 1.4 单胶圈接口

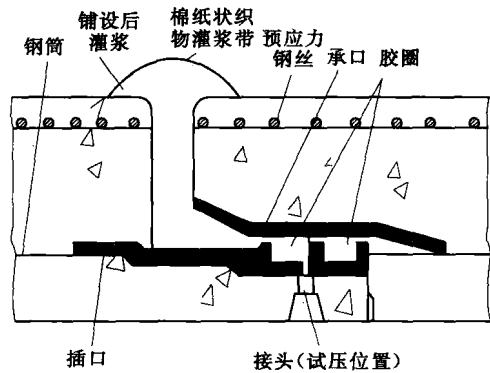


图 1.5 双胶圈接口

1.1.5 PCCP 的特点

PCCP 在世界上被广泛推广应用，是由它的经济技术价值决定的。它与其他材质的管材相比，具有耐腐蚀、抗渗、水密性好、寿命长、刚度好、抗地震性能强、不污染水质等显著优点。

1. 设计方法先进、安全

PCCP 设计采用美国水工协会（American Water Works Association）制定的美国国家标准，即 ANSI/AWWA C304—1999 “STANDARD FOR DESIGN OF PRESTRESS CONCRETE CYLINDER PIPE”（预应力钢筒混凝土压力管设计标准）。设计过程中综合考虑了使用极限状态准则、弹性极限状态准则和强度极限准则，将预加应力、内压力和外荷载合理组合，考虑了管壁的弹性变形和非弹性变形，充分综合地发挥了钢材的抗拉、易密封性及混凝土的抗压和耐腐蚀性，从而使得设计工程师可以根据管线的实际情况进行最经济、最可靠的管材设计。设计荷载简图如图 1.6 所示。

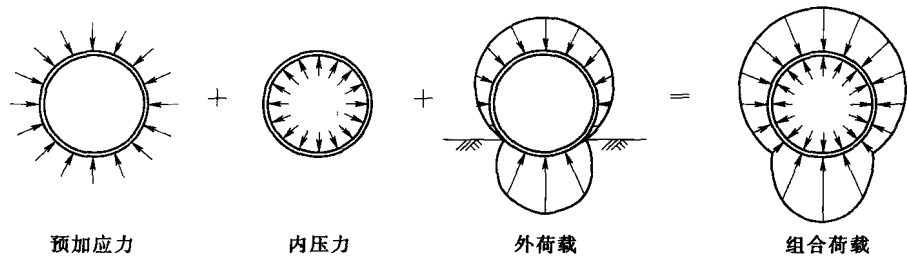


图 1.6 设计荷载简图

2. 承受较高的内压和外荷载

一方面，PCCP 采用经过水压试验的钢筒和钢制承插口橡胶密封圈接头，保证了管体和接头处的抗渗性，解决了一般混凝土管存在的渗水问题，故可承受很高的内水压力；另

一方面, 由于 PCCP 在设计上考虑充分利用混凝土的抗压强度, 利用管身缠绕的高强钢丝对管体施加预应力, 使管芯被压缩, 当管体承受内压和外荷载时, PCCP 所受到的张力被原先的预压应力所抵消, 使得 PCCP 能承受很高的内压及外荷载。并且可以根据内、外荷载的要求, 采用单层、双层或多层缠丝, 对管体施加更大的环向预应力, 使管体承受较高的外荷载。

3. 通水能力强

PCCP 及其接头的内表面光滑, 不形成瘤节, 表面不结垢, 流水阻力小。经水力摩阻试验测定: 离心成型的 PCCP—L 管, 糙率 $n=0.012$; 对于立式振动成型的 PCCP—E 管, 糙率 $n=0.0107$ 。可见 PCCP 对水流的摩阻力较小, 这使得管线在运行服务期间能保持很高的通水能力。

4. 接头密封性能好, 管体具有良好的抗渗性

PCCP 属于工厂化生产, 钢板被卷成管状, 经过水压试验, 可保证其不渗漏, 保证管身的不透水性能。

PCCP 接口采用钢环承插口, 钢环与管身钢筒焊接, 承插口嵌入“O”形橡胶圈, 形成密封体系。钢制承插口加工精度高(承口和插口工作面直径配合间隙最小 0.5mm, 最大 2mm), 承口呈钟形, 具有安装自定位的作用, 插口是带有单凹槽或双凹槽的特制型钢。密封橡胶圈按照与凹槽等断面设计, 填充在凹槽内, 安装好以后的橡胶圈受双向挤压, 形成很好的密封力。

PCCP 有其独特的复合结构和独特的接头形式, 利用埋藏在混凝土中的钢筒抗渗, 又采用橡胶圈受压反弹密封机制, 建成的管线经泵压试验等检验, 管线的性能有保证, 既不会出现管身渗水, 也不会出现接头漏水现象。

5. 有良好的耐腐蚀性, 耐久性强

PCCP 的预应力钢丝、钢筒都被密实的混凝土或水泥砂浆所包裹, 经防腐处理的承插口安装后其外露部位又用砂浆灌注封口, 混凝土或砂浆提供的高碱性环境使得包裹在 PCCP 内部的钢材钝化, 即使在酸性土壤中也能使钢材免于腐蚀, 而处于地下的混凝土或水泥砂浆, 因处于湿润的环境, 其强度也会随着时间的增长而逐渐增强, 因此 PCCP 具有良好的耐腐蚀性和耐久性, 设计使用寿命为 50 年以上, 美国水工协会(AWWA)耐腐蚀委员会的研究认为, PCCP 可以使用 100 年。

6. 安装便捷快速

PCCP 接口尺寸准确, 还可以根据工程需要采用各种限制接头, 替代镇墩或止推墩, 安装方便, 加快了施工进度, 且减少工程投资; 承插口设计允许承受少量的位移及一定的转角, 使施工迅速简捷, 如进行小倒虹施工等, 尤其是在软土地区安装更具有广泛的适应性; 采用胶圈密封的自对中钢制接头, 管线一般一次打压成功; 管材的刚性可防止管材在吊装、运输、安装过程中损坏, 对管基及回填土施工要求低。

7. 对地基适应性好

PCCP 采用的半刚性接头使得此种管材既具有一定程度的刚性, 又具有较好的柔性, 允许有一定的转角, 而不影响管道使用。所以适应地基变化的能力较其他管材要好。管道

表 1.1 管道接头允许相对转角

公称内径 (mm)	管道接头允许相对转角 (°)	
	单胶圈接头	双胶圈接头
400~1000	1.5	—
1200~4000	1.0	0.5

注 依管线工程实际情况,在进行管道结构设计时可适当增加管道接头允许相对转角。

接头允许相对转角见表 1.1。

8. 抵抗轴向推力能力强

当管线轴向存在推力,施工现场不方便做混凝土支墩抵抗推力或经比较做混凝土支墩不经济时,PCCP 可将转角处一定数量管道设计成铠装接头或将钢质接口焊接起来,以抵抗轴向推力,使管道结构得到加强,既方便了施工,又避免了建造止推墩,可降低工程造价。PCCP 用的铠装接头具有工厂批量生产的可靠

性,可保证安装时要求的精度。

9. 较好的抗震性能

表面的高摩擦系数及承插口伸缩设计,使 PCCP 具有高抗震性。大量实例表明,PC-CP 抗震性能优良,在强地震下也能保持完好无损。如台湾自来水公司对 1999 年 9 月 21 日发生的 7.3 级大地震后对管线造成的损害进行了调查,结果发现,所有管线中只有 PC-CP 管线无一例损害,是最佳的防震管材。

10. 配件和异形管丰富

PCCP 具有很大的灵活性,可以提供不同形式的异型管和配件,适应不同工程地质地形条件下的管网布置。可以根据施工现场的具体情况提供各类短管,满足修改后管线的铺设长度,还可以利用斜口管组合或接头的自由转动特性实现一定曲率半径的管线转弯,而无须厂家添置其他设备,在不增加投资的情况下满足用户的需要。

综上所述,PCCP 运输、安装方便,且钢制接头使得安装过程中无损耗;安装时沟槽开挖宽度窄,接口工作面较浅;PCCP 具有很强的承受外压能力,使之对基础和回填土的要求比柔性管低得多,降低了铺设成本;PCCP 具有良好的防腐蚀性、抗渗性和耐久性,使用寿命很长,在各种管材中维护费用最低;可以制作各类配件和异形管,节约了工程投资;PCCP 可通过在现场焊接部分接头以抵抗推力,不仅便于施工而且不需建造止推墩,降低了工程造价。在同样管径及内外压条件下,PCCP 的综合价格有一定优势,而且其铺设成本低、铺设工期短,相应的维护费用也较低,尤其是大直径 PCCP,其优越性更明显。

1.2 PCCP 在国内外的应用历史

1.2.1 PCCP 在国外的应用历史

世界上工业化国家在大型输水工程中,除日本较多采用钢管外,其他欧美各国多采用预应力钢筋混凝土管和预应力钢筒混凝土管作主要输水管材。现在美国、加拿大、英国、法国、德国、意大利、巴西、土耳其、沙特、利比亚、韩国、印尼、泰国等国家都有 PC-CP 生产厂。

早在 1893 年, 巴黎总工程师邦纳 (Bonna) 设计和制造了 PCCP, 管径为 1800mm, 内压力 0.35MPa, 第一次铺设于巴黎科隆贝 (Colombes) 引水管网, 其长度为 1500m, 1939 年邦纳公司制造了 PCCP, 并敷设于巴黎郊区。

1942 年, 美国洛克昭公司 (LookJoint) 开发了 PCCP, 生产的第一节 PCCP 是内衬式预应力钢筒混凝土管 (PCCP—L)。起初, 内衬式预应力钢筒混凝土管的内径局限于 0.4~1.2m, 到 1979 年颁布的 ANSI/AWWA C301 “AWWA Standard for Prestress Concrete Pressure Pipe, Cylinder Type” (钢筒型预应力混凝土压力管) 产品标准将 PCCP—L 的管径提高到了 1.5m。埋置式预应力钢筒混凝土管 (PCCP—E) 开始生产于 1952 年, 内径至少可达 0.6m。20 世纪 50 年代, 对 PCCP 的设计与制造作了多次改变: 1949 年, 美国水工协会 (AWWA) 发布了第一本 PCCP 技术规范——ANSI/AWWA C301, 内容包括生产和设计, 此后经 3 次版本更新和 4 次修改, 于 1992 年的第四版首次将 PCCP 生产和设计分开, 形成了 ANSI/AWWA C301—92 (PCCP 生产、运输标准) 和 ANSI/AWWA C304—92 (PCCP 设计标准) 两个标准。目前这两个标准的最新版本为 1999 年修订的 ANSI/AWWA C301—99、ANSI/AWWA C304—99。除此之外, 学者们对 PCCP 作了各方面的研究, 主要有: 1950 年司曼 (F. E. Seaman) 和 1960 年肯尼逊 (H. F. Kennison) 对管体进行了荷载试验; 从 1950~1963 年肯尼逊和司祖勒 (A. B. Szule) 研究了 PCCP 结构性能和设计标准; 1967~1972 年鲁必逊 (R. C. Robinson) 对保护层和抗腐蚀进行了研究。20 世纪 80~90 年代黑格 (F. J. Heger)、兹加米 (M. Z. Zarghamee) 和丹纳 (W. R. Dana) 等学者对 PCCP 的力学性能和计算进行了广泛深入的研究。

在 1991 年前北美 9 家管道公司生产的 1.55 万 km, PCCP 管道应用于 1.7 万个项目中, 因制造和其他缺陷而损坏的管道根数仅为十万分之七, 其质量是显而易见的。但是, 在 PCCP 的发展过程中其质量控制也出现问题, 20 世纪 70 年代初开始发生不同程度的爆管事件, 人们开始对 PCCP 进行监测, 根据监测结果评估管线的状况从而决定管线的修复措施并且预估其残余强度和剩余寿命, 在这期间, 人们发明了多种无损损伤性的监测技术以及修复措施、方案, 而且一直以来不断地改进技术提高监测结果的精确性、可靠性。通过对 PCCP 生产与设计的改进、对原材料指标的质量控制、对成品管检验和对管道防腐方法的改进来逐步提高对 PCCP 的质量乃至整个工程的质量控制。

美国生产厂家从开始 2 家, 后来发展至 8 家, 经过演变, 现在只有 4 家, 即阿美隆 (Ameron)、兄弟公司 (Price Brother)、即福希 (Gifford—Hill—American) 和格瑞太克斯 (Cretex), 其中以阿美隆 (Ameron) 和兄弟公司 (Price Brother) 规模最大。阿美隆公司为美国加州的中央亚利桑那工程制作了管径为 6.4m 的大型管道, 内压 0.98MPa, 管顶覆土 10.5m, 修建长度 10.5km; 卡司太克工程管径为 5.1m, 内压 0.95MPa, 长度 9.5km, 管顶覆土 13.5m; 还有管径为 7m 的倒虹吸工程。兄弟公司除美国中部、东部工程外, 为利比亚的大人工河现场制作了大直径的预应力钢筒混凝土管。位于北部非洲的利比亚“大人工河”输水工程, 无疑是目前世界上最大的 PCCP 工程项目, 该工程也是成功运用 PCCP 的一个范例。利比亚管道输水工程是将埋藏在利比亚南部沙漠中的地下水, 通过打井抽水集中起来, 然后通过管道输送到北部沿海地区, 并联成全国统一的地下供水管

网。工程共分四期进行,第一期工程长度为1900km,第二期工程长度为1700km,管径大部分是4m,内压大部分是1.0~1.2MPa,现已通水运营。

1.2.2 PCCP在国内的发展历史

在国内,PCCP是在引进和消化吸收美国先进技术和关键设备的基础上发展起来的。1984年苏州混凝土水泥制品研究院与辽宁省营口市自来水公司管厂合作采用简易方法研制了直径DN600mm的内衬式预应力钢筋混凝土管(PCCP-L),并在输水管线上试用;1985年江苏省南京市水泥管厂与北京市市政工程研究所合作,采用自应力混凝土试制了口径DN600mm和口径DN1200mm的PCCP-L,并分别安装在福建建阳水电站工程和南京市供水管线上试用。这个时期属于探索研制阶段,特点是制作方法简单、管材数量少,管径小。

1989年,山东电力管道工程公司最早引进美国阿美隆公司(Ameron)的部分关键设备——钢管卷焊机,承、插口生产设备,专用管模等,并由国家电力公司杭州机械设计研究所配套研究设计的两台主机——立式差速绕丝机、立式辊射喷浆机,仿制设计了 $\phi 1.6\text{m}$ 钢管卷焊机的芯模,建成了一条设备完善、工艺先进的大口径PCCP生产线,并于1990年6月生产出第一批口径为2.6m的PCCP-E管,填补了国内空白。1991年为山东淄博引黄工程生产了12.5km、口径1.6m的PCCP-E管,于1992年1月一次性通水试验成功。近10年来生产了口径2.6m以下的各种规格的PCCP,1998年又从美国引进了一台生产口径1.2m以下的小口径钢管卷焊机,是目前国内设备比较完善的PCCP制管公司。

1992年,深圳太阳管道有限公司引进美国普莱斯兄弟公司(Price Brother)全套设备,可生产口径为0.9~2.6m的PCCP。1999年由国家电力公司杭州机械设计研究所杭州和达混凝土机械工程有限公司提供了一台可生产口径为3m的立式差速绕丝机,为深圳地区生产的口径为3m的PCCP,是当时国内生产最大口径的PCCP。

1995年,无锡华毅管道有限公司与外商合资建成了一个PCCP管道公司。该公司也引进了美国阿美隆公司(Ameron)的钢管卷焊机和承、插口设备等,由国家电力公司杭州机械设计研究所改进设计了立式差速绕丝机和立式辊射喷浆机以及钢管吊具、管芯吊具等设备,建成了一条设备更为完善的生产线。

到2000年底,山东电力管道工程公司、深圳太阳管道有限公司和无锡华毅管道有限公司三个公司共生产了直径0.6~3.0m的PCCP 600多km,已应用于大小80多个工程项目。近年来国内掀起了一股建厂热潮,目前国内除最先建厂的三个公司外,还有呼和浩特万联、江苏中毅、山东淄博、新疆国统、四川金炜等PCCP生产厂,已建成了40多条生产线。其中,有的是新建厂,有的是由PCP厂转产的,部分生产线生产的PCCP已用于工程中。年设计生产能力达1000多km,涉及管材规格范围从DN400~DN4800mm,适用工作压力最高达1.6MPa,适用最大覆土深度达10m以上。据悉,目前还有拟建和在建的PCCP工厂,这种现象说明国内PCCP生产应用正处于蓬勃发展的良好势头之中,但是如何使这些厂家都生产出合格的PCCP,促进中国PCCP生产的健康发展,是一项很重要的任务。

国内预应力钢筋混凝土管设计、生产、铺设及监理的主要技术依据,仍然是ANSI/

AWWA C301—99 和 ANSI/AWWA C304—99。1996 年我国建材行业颁布了行业标准《预应力钢筒混凝土管》(JC 625—1996), 2002 年国内颁布了《给水排水工程埋地管芯缠丝预应力混凝土管和预应力钢筒混凝土管管道结构设计规程》(CECS 140: 2002), 2005 年由中国建材工业协会颁布了国家标准《预应力钢筒混凝土管》(GB/T 19685—2005), 该标准结合国内传统标准要求, 列入了成品管材的物理力学性能检验内容和方法, 与传统标准相比, 详细列入了产品制造过程控制条款和部分生产工艺参数, 使得标准内容更为丰富, 大大方便了国内预应力钢筒混凝土管的产品设计、产品制造、安装铺设及施工监理部门的工作。

近 20 年的发展过程中, PCCP 广泛应用于我国的水利、电力、市政给排水等各个领域, 有长距离引水工程、高压给水管道工程、高覆土引水工程、城市给水管网改造工程等大、小型工程。在长距离、大流量输水调水工程方面, 山西省万家寨引黄工程连接段输水工程(上接汾河水库, 下连呼延水厂)主要采用 PCCP 进行输水, 管线长度 43.2km, 单节管道长度 5m、内径 3m、最大内水压力 1.0MPa、最大覆土厚度 8m、最大管壁厚 270mm, 单节管道重约 27~35t, 各项指标均为当时国内之最。连接段 1~6 号隧洞长 7989.9m, 采用洞穿 PCCP 进行施工, 如此长的 PCCP 洞穿管工程在国内尚属首例, 它解决了隧洞与埋管的衔接问题, 并保证了整个线路输水水力过渡过程的均匀、稳定。新疆引额(额尔齐斯河)济乌(乌鲁木齐)10km 大倒虹使用了管径 2.8m 的 PCCP 长度约 15km。深圳东部供水工程使用了管径 2.6m 的 PCCP 长度约 9.5km。举世瞩目的南水北调工程中线京石段应急供水工程(北京段)规划使用双排直径 4m 的大口径 PCCP, 管线长 55km。2004 年 5 月, 北京华腾远通公司率先生产出内径 4m 的 PCCP。在市政排水方面, 规模最大的是上海市污水治理二期工程, 在滨海软土地基上成功埋设了直径 3.6m、单根长 6.0m、总长 3.91km 的 PCCP 管道, 创造了对环境干扰最小、快速施工的典型。山东电力管道公司生产的 PCCP 还使用于华能德州等数座电厂的补充水、循环水和水力输送系统中, 效果良好。同时, 几个大的 PCCP 管道公司生产的 PCCP 除了满足国内工程外, 还出口到越南、毛里求斯、新加坡等国家。

1.3 PCCP 应用前景展望

国外发达国家的长期使用经验和发展中国家快速推广的无数实践, 已经证明预应力钢筒混凝土管是一种性能优良很有发展前途的多用途管材, 我国 PCCP 生产应用的发展前景非常光明。

我国是一个水资源相对缺乏又分布严重不均衡的国家, 随着经济社会的快速发展, 未来城镇建设、工矿企业建设和农田水利建设, 以及以南水北调为标志的水资源优化配置、大规模引水调水已经拉开了序幕。随着我国综合国力的增强和环境保护意识的日益提高, 采用封闭、有压管道输水必将成为发展的主流。为此, 必须以前瞻的眼光, 参与国际竞争, 积极投身于新一轮发展和建设热潮中。国内 PCCP 生产应用快速发展和参与国际竞争的客观要求, 给人们提出了新的命题: 同国际通行标准接轨, 注重 PCCP 的质量, 努力提高服务水平。

参考文献

- [1] American National Standard, ANSI/AWWA C301—99 AWWA Standard For Design of Prestressed Concrete Cylinder PIPE, 1999.
- [2] 中华人民共和国国家标准, GB/T 19685—2005 预应力钢筒混凝土管, 2005.
- [3] A. Almugerhiy Abdullah, M. Elaiish Reafat, M. Enawaa Khalifa, Rehabilitation Management of Pre-Stressed Concrete Cylinder Pipe Using Remote Field Current / Transformer Coupling (RFEC/TC) and Other Technologies. Baltimore, Maryland, USA, International Conference on Pipeline Engineering and Construction 2003: 786—792.
- [4] 孙绍平. 预应力钢筒混凝土管若干基本问题的分析. 特种结构, 2001, 18 (3): 17—33.
- [5] 胡连生, 郝满仓. 浅谈 PCCP 及其发展. 山西水利科技, 1999, 增刊: 84—85.
- [6] 唐忠德, 应宪. 大口径 PCCP 管施工方法介绍. 中国给水排水, 2002, 18 (9): 88—90.
- [7] 乔孝平. 预应力钢筒混凝土管在供水工程中的应用. 山西水利, 2003, (4): 32—33.
- [8] 周冠洋. PCCP 管在我国的研制和应用, 制冷空调与电力机械. 2001, 22 (1): 25—26.
- [9] 朱金明, 刘强. 大型给排水输水管线——预应力钢筒混凝土管(PCCP). 江苏建材, 2000, (4): 20—22.
- [10] 魏新宇, 马念尊, 李杏敏. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)在给水管道路工程中的应用. 管道技术与设备, 2001, (2): 30—32.
- [11] 张亚平. 预应力钢筒混凝土管的应用. 施工材料与设备, 1999, 25 (5): 54—57.
- [12] 孙绍平. 预应力钢筒混凝土管若干基本问题的分析. 特种结构, 2001, 18 (3): 17—33.
- [13] 温开亮. PCCP 的发展和应用. 山西水利科技, 2005, (1): 86—87.
- [14] 秦见斌, 陈刚. 预应力钢筒混凝土管(PCCP)在给水管工程中的应用. 特种结构, 1997, 14 (2): 63—64.
- [15] 何维华. 展望十五年内供水管网中将会常用的几种管材. [2005—09—05]. [http: // www1. h2o—china. com/](http://www1.h2o-china.com/).
- [16] 南水北调中线干线工程建设管理局. PCCP 简介. [2006—05—17]. [http: // www. nsbd. cn/n524903/n586928/26304. html](http://www.nsbdcn/n524903/n586928/26304.html).