

预应力钢筒混凝土管(PCCP)结构 承载安全评价理论与实践

胡少伟 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

预应力钢筒混凝土管(PCCP)结构 承载安全评价理论与实践

胡少伟 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

02

Tu 757.4
2

21

内 容 提 要

本书是首部系统的对 PCCP 尤其是超大口径 PCCP 结构分析与安全评价研究方面的专著, 详述了作者带领的课题组在 PCCP 管道结构安全评价试验与理论建模分析等方面研究成果。

预应力钢筒混凝土管(简称 PCCP)作为具有适用范围广、经济性强、寿命长、抗震性能好、安装方便、运行费用低、防渗性能好等优点, 可广泛应用于长距离输水、城市给水和电厂回水等。许多输水工程一旦出现安全事故, 如爆裂, 将损失重大, 且维修很难。作者在国家科技支撑计划、国家自然科学基金、南京水利科学研究院院基金等项目陆续资助下, 首次系统地完成了 4m 口径 PCCP 内压和外载下(完整管、裂缝管、断丝管、预应力松弛管)的原型试验与 1.2m 口径 PCCP 的破坏性试验、安全评价与理论分析等。本书主要包括第 1 章绪论; 第 2 章 PCCP 承载能力试验研究; 第 3 章 PCCP 结构安全数值模拟与评价; 第 4 章 PCCP 实际承载能力分析; 第 5 章 PCCP 承受内水压全过程分析。第 6 章 PCCP 结构安全评价——裂缝对承载能力影响; 第 7 章 PCCP 结构安全评价——断丝对承载能力影响分析; 第 8 章 PCCP 结构安全评价——预应力松弛对承载能力影响; 第 9 章 PCCP 承载能力理论分析与建模; 第 10 章基于薄壁理论与新型计算方法的 PCCP 分析; 第 11 章 PCCP 裂缝、断丝与预应力松弛产生机理及防治措施; 第 12 章 PCCP 实际工程应用与分析; 第 13 章本书的研究总结与展望。本书可供 PCCP 制造、设计与施工企业产品检验、制作设计时作为技术指导书, 也可供水利、电力、市政给排水的科研、设计、施工等工程技术人员和高等院校师生参考。本书的出版得到南京水利科学研究院专著出版基金的资助。

图书在版编目(CIP)数据

预应力钢筒混凝土管(PCCP)结构承载安全评价理论与实践 / 胡少伟著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011. 10

ISBN 978-7-5084-9120-2

I. ①预… II. ①胡… III. ①预应力混凝土管: 钢筋混凝土管—承载力—安全评价 IV. ①TU757.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第216785号

书 名	预应力钢筒混凝土管 (PCCP) 结构承载安全评价理论与实践
作 者	胡少伟 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
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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 12.5 印张 296 千字
版 次	2011 年 10 月第 1 版 2011 年 10 月第 1 次印刷
印 数	0001—1000 册
定 价	40.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前言



随着国民经济的调整与发展,缺水已成为制约我国各地发展的主要因素,并由于供水水质的要求及地形限制,长距离大口径管道输(供)水工程越来越需要建设。PCCP作为一种大口径、高工压、长寿命的管道,在长距离引水工程、高压给水工程、高覆土引水工程、城市给水管网改造以及电厂的补充水、循环水和水力输送系统等应用效果良好,重要性日益突出,早已引起国内外普遍重视。

PCCP是“Prestressed Concrete Cylinder Pipe”的缩写,即“预应力钢筒混凝土管”,它是指在带钢筒的混凝土管芯上缠绕环向预应力钢丝并制作水泥砂浆保护层而制成的管子。其基本结构是在带有钢筒、内壁光滑的高强混凝土管芯上缠绕环向预应力钢丝,并在其上制作密实而耐久的富水泥砂浆保护层、承插口钢圈带有能够容纳止水橡胶圈的凹槽,并同钢筒焊接在一起。PCCP管有内衬式和埋置式两种,内衬式是指钢筒包在混凝土管芯外面,用于管径1.5m以下的管道;埋置式的钢筒 embed 埋在混凝土管芯内靠近管内壁的三分之一处,用立式浇筑法制作,目前,世界上生产的PCCP管的最大直径已达6m。根据研究、设计、生产和应用的经验,预应力钢筒混凝土管的优点可概括如下:①高强度:由于复合结构的特点,国内应用其输水工作压力已达2.0MPa,覆土已达12m;②高抗渗性:最优化地利用钢材和混凝土,薄钢板起到高抗渗的作用;③高密封性:采用钢制承插口接头和两道密封胶圈,密封性得到了保证;④耐久性好:管体表面不需防腐涂料,而钢筒由水泥混凝土包裹,受到碱性钝化膜的保护,寿命得到了延长;⑤接口尺寸精确,因可使用限制接口(Restained joint),管道转弯时可免去支墩,安装方便,加快了施工进度;⑥管道维护费用低:据美国压力管协会统计,在钢管、混凝土管、球墨铸铁管中PCCP管的维护费用最低。同时PCCP管还可以带压打孔,安装支线。

目前在美国、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、泰国等国家许多引水供水工程采用PCCP管作为输水管道。我国是从20世纪80年代起引进了美国的工艺和设备,于1996年8月1日正式颁布实施了建材行业标准JC 625-1996。在其后的近十年中,PCCP逐渐成为了国内最为重要的输水管道材料之一,年设计生产能力已达上千公里。为了满足国内PCCP的发展需要,在2004年底顺利颁布了PCCP新国家标准,标准编号为GB/T 19685-2005。随着我国综合国力的增加和环境保护意识的日益提高,采用封闭、有压输水必将成为发展的主流,PCCP管已经广泛

使用于我国的水利、电力、市政给排水等各个领域，应用的管径日益增加。

许多输水工程都是关系经济、社会和生态协调发展的重大工程，一旦出现大管径 PC-CP 管道安全事故，如爆裂，将损失重大，且维修很难，应保证 PCCP 管道在 50~100 年的使用中不需要大的维修。国家标准 GB/T 19685—2005《预应力钢筒混凝土管》，以指导 PCCP 的制造，而且实际上 ANSI/AWWA C301—99 也只是用于最大管径为 144 英寸 (3657.6mm)，而不能适用于 144 英寸 (3657.6mm) 以上的超大口径 PCCP 的设计、制造。2005 年 GB/T 19685—2005《预应力钢筒混凝土压力管》，此标准均是对美国标准的引用和简化，缺乏对管道结构安全的全面深入分析，所以国家标准 GB/T 19685—2005《预应力钢筒混凝土管》指导 DN3600mm 以上的 PCCP 管的生产理论依据亦然不充分。虽然管道制造工艺已基本过关，设备制造也已具有相当水平，但是对管道结构的研究几乎空白，致使工程设计人员对结构设计方法的选用产生困惑，一直以来国内外专家及工程技术人员不同程度地对管道结构可靠性及耐久性产生担忧。南水北调中线所用的 PCCP 管道直径已达 4m，对管道技术问题提出了更高要求，因此开展 PCCP 的技术研究，如设计方法、预应力损失、管芯和保护层的应力应变规律、管芯裂缝、耐久性问题势在必行。

目前，影响 PCCP 结构安全主要有：①管道混凝土开裂：导致渗水和腐蚀介质的侵入，寿命急剧降低；②高强钢丝断丝：一旦一根钢丝断裂，临近钢丝会受更大应力，导致多根钢丝断裂，就会有爆裂危险，高强钢丝断裂而发生 PCCP 爆裂已成为其主要的事故模式；③管芯混凝土徐变：由于超大管径 PCCP 管道材料加工以及施工安装周期长，在野外堆放 270 天以上，如此长时间的堆放会造成管芯混凝土的徐变，进而造成管道的预应力损失，从而不能满足 PCCP 管道的安全使用性能。

本书结合试验，针对裂缝、断丝和混凝土徐变等影响进行安全评估，为 PCCP 设计提出依据：在计算方法方面将为修订及完善我国现有 PCCP 设计规程提供相关依据和支撑，解决我国 PCCP 计算设计滞后于现实工程应用的问题，为保证 PCCP 安全性提供技术支撑，为 PCCP 管道制造原材料选用、裂缝预防和断丝控制提供理论依据。结合南水北调中线工程实际，起到服务当前工程建设并指导未来技术发展的作用，推动我国 PCCP 技术的发展进步。从 2006 年初作者开始带领课题组，历时五年多，在国家支撑计划项目《超大口径 PCCP 管道结构安全与质量控制研究》(编号 2006BAB04A04)、国家自然科学基金《基于 FEMOL 的大口径 PCCP 结构计算与安全评价》(批准号：50879048)、南京水利科学研究院院基金项目《基于 FEMOL 的 PCCP 结构安全试验与数值分析》等陆续资助下完成的。

本书主要内容包括：第 1 章 绪论，主要介绍了 PCCP 起源与应用情况、国内外安全评价现状、PCCP 参照标准，及其研究意义等；第 2 章 PCCP 承载能力试验研究：介绍了国内外尚属首次的超大口径 PCCP 现场原型试验与室内破坏性试验，试验具有源头创新性；第 3 章 PCCP 结构安全数值模拟与评价，建立本构关系和屈服准则，对 PCCP 内水压承载性能进行了结构安全评价；第 4 章 PCCP 实际承载能力分析，阐述了 PCCP 管的破坏机理分析、破坏特征，并对 PCCP 承载能力进行了数值分析；第 5 章 PCCP 承受内水压

全过程分析,通过递推公式推导出钢丝上的应力,将计算结果与试验结果对比,能为 PC-CP 的数值计算和内水压试验提供一定的参考价值;第 6 章 PCCP 结构安全评价——裂缝对承载能力影响。通过对 4m 直径原型管试验和 2 根 2m 裂缝管和完好管的对比试验,得出管芯混凝土纵向裂缝没有明显降低 PCCP 的外载能力;基于现场试验和数值计算结果,对 PCCP 进行了安全性评价;第 7 章 PCCP 结构安全评价——断丝对承载能力影响分析:对实际工程使用的 PCCP 采用先断丝后加压和先加压后断丝两种方法进行三点法外载试验,计算了实际断丝管的承载力;第 8 章 PCCP 结构安全评价——预应力松弛对承载能力影响:通过预埋光纤光栅应变计,选取原型管与松弛管进行内水压对比试验,分析比较了两根 PCCP 的承载能力,采用非线性有限元理论进行了 PCCP 承载能力数值模拟,得出有价值的结论;第 9 章 PCCP 承载能力理论分析与建模:详细分析了预应力钢筒混凝土管道承担内水压的受力过程与结构破坏的全过程;第 10 章基于薄壁理论与新型计算方法的 PCCP 分析;第 11 章 PCCP 裂缝、断丝与预应力松弛产生机理及防治措施:结合南水北调中线工程,详细介绍了 PCCP 在南水北调中线工程中的应用情况;第 12 章介绍了 PC-CP 实际工程应用与分析;第 13 章为本书的研究总结与展望。

本书是首部系统对 PCCP 尤其是对超大口径 PCCP 结构安全分析与评价研究方面的专著:是由作者主笔撰写与统筹编排,多人参与完成的。作者的首位博士生沈捷同学参与完成了 4m 直径 PCCP 的现场试验,并完成了裂缝、断丝与预应力松弛对 PCCP 结构的安全影响评价工作,参与编著了第 2 章、第 6 章、第 7 章、第 8 章等;刘晓鑫硕士历时三年完成了 PCCP 管道结构的破坏性试验与基于 FEMOL 的 PCCP 结构分析,参与编著了第 2 章、第 5 章、第 10 章等;游日硕士协助我完成了裂缝对 PCCP 结构安全评价的影响分析建模与钢丝断丝模型建立分析工作;胡汉林硕士参与完成了裂缝位置对 PCCP 结构承载力分析工作等。应该指出的是完成的超大口径 PCCP 管裂缝、断丝与预应力松弛结构安全现场试验是在北京市水利规划设计研究院协调与南水北调中线工程建设管理局资助下,由南京水利科学研究院作者领导的课题组提出试验方案,与北京市水利规划设计研究院、北京韩建河山管业有限公司、中国水利水电科学研究院、清华大学等共同完成的。北京市水利规划设计研究院王东黎教高、北京韩建河山管业有限公司总工程师刘江宁教高等为现场试验的完成付出了巨大的辛勤劳动,在此表示由衷的感谢!

书稿完成后,南京水利科学研究院沈捷博士、刘晓鑫硕士、范向前博士、乔艳敏高工帮助进行了校核,并对部分插图进行了绘制,对书中的计算程序进行了校验。对上述人员在此表示衷心感谢。

作者历时一年,数易其稿,完成本书。限于作者水平,不当之处在所难免,敬请读者不吝赐教!感谢南京水利科学研究院专著出版基金的资助!

胡少伟

2011 年 6 月 18 日于南京虎踞关

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 PCCP 起源、发展（外、内）、应用情况	1
1.2 国内外安全评价现状	9
1.3 国内外 PCCP 参照标准	11
1.4 研究意义及其研究内容	12
第 2 章 PCCP 承载能力试验研究	14
2.1 试验目的	14
2.2 1.2m 直径 PCCP 试验	14
2.3 现场 4m 直径 PCCP 原型试验	25
2.4 内水压承载试验	31
2.5 三点法外载试验	34
2.6 本章小结	38
第 3 章 PCCP 结构安全数值模拟与评价	39
3.1 非线性本构关系	39
3.2 破坏准则	41
3.3 PCCP 有限元模型	44
3.4 钢丝预应力的模拟	49
3.5 分析步骤	50
3.6 计算结果	50
3.7 试验与理论计算结果对比	53
3.8 本章小结	54
第 4 章 PCCP 实际承载能力分析	56
4.1 PCCP 管的破坏机理分析	56
4.2 PCCP 实际承载数值分析	60
4.3 本章小结	63
第 5 章 PCCP 承受内水压全过程分析	64
5.1 概述	64
5.2 模型建立与理论推导	64

5.3	混凝土开裂后的分析计算	66
5.4	算例与试验的对比	68
5.5	本章小结	70
第6章	PCCP 结构安全评价——裂缝对承载能力影响	71
6.1	试验研究	71
6.2	2m 直径 PCCP 外载试验对比	73
6.3	数值计算分析	78
6.4	裂缝位置对超大直径混凝土管道承载力影响分析	97
6.5	安全性评价	100
6.6	本章小结	101
第7章	PCCP 结构安全评价——断丝对承载能力影响分析	102
7.1	PCCP 断丝试验研究	102
7.2	PCCP 断丝承载能力数值计算	111
7.3	本章小结	118
第8章	PCCP 结构安全评价——预应力松弛对承载能力影响	119
8.1	钢丝预应力松弛测试	119
8.2	预应力钢丝松弛管内水压承载试验研究	121
8.3	预应力钢丝松弛管内水压承载数值计算	125
8.4	本章小结	130
第9章	PCCP 承载能力理论分析与建模	131
9.1	PCCP 受力状态分析	131
9.2	预应力钢丝作用机理	132
9.3	管芯混凝土开裂前受力计算公式——弹性模型	133
9.4	管芯混凝土开裂后受力计算公式——正交异性模型	135
9.5	算例与试验的对比	140
9.6	本章小结	141
第10章	基于薄壁理论与新型计算方法的 PCCP 分析	142
10.1	基于有限元线法的 PCCP 受力分析	142
10.2	FEMOL 在 PCCP 受力中的分析应用	150
10.3	程序编制与计算结果	151
10.4	本章小结	152
第11章	PCCP 裂缝、断丝与预应力松弛产生机理及防治措施	153
11.1	南水北调工程中裂缝形式	153
11.2	现场裂缝检测	154
11.3	PCCP 裂缝产生机理与防治措施	155
11.4	PCCP 断丝与预应力松弛机理及处理措施	157

第 12 章 PCCP 实际工程应用与分析	158
12.1 南水北调工程背景	158
12.2 PCCP 施工、安装与运输	161
12.3 南水北调中线 PCCP 裂缝形式与处理	162
12.4 PCCP 在利比亚人工大运河工程的应用	164
12.5 PCCP 在山西万家寨水利枢纽中的应用	164
12.6 本章小结	165
第 13 章 研究总结与展望	166
13.1 总结	166
13.2 展望	167
附录 1 美国 ANSI/AWWA C304 规范规定的 PCCP 设计方法	169
附录 2 国内规范规定的 PCCP 设计方法	179
附录 3 ANSI/AWWA C304 与国内规范 CECS 140 对 PCCP 设计方法规定的区别	181
参考文献	183

第 1 章 绪 论

1.1 PCCP 起源、发展 (外、内)、应用情况

PCCP 起源于 1893 年, 巴黎工程师邦纳 (Bonna) 设计和制造了钢筒混凝土管, 管径为 1800mm, 内压力 0.35MPa, 第 1 次铺设于巴黎科隆贝 (Clombes) 引水管网, 其长度为 1.5km。1939 年法国邦纳管道公司利用新发明的预应力混凝土的原理, 制造了预应力钢筒混凝土管, 即 PCCP, 敷设于巴黎郊区。1942 年美国洛克昭公司也开发了预应力钢筒混凝土管, 使其在技术上得以发展进步。1950 年司曼 (F. Fseaman) 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. Siule) 研究管子结构性能和设计标准, 1967 ~ 1972 年鲁必逊 (R. C. Robinson) 对保护层进行了研究, 20 世纪 80 ~ 90 年代黑格 (F. J. Heger)、兹加米 (MZ. Zarhamee) 和丹纳 (W. R. Dama) 等学者对预应力钢筒混凝土管的力学性能和计算进行了广泛深入的研究。1992 年美国国家标准研究所和美国供水协会 (AWWA) 联合颁布了预应力钢筒管 (prestressed concrete cylinder pipe 以下称 PCCP 管) 的标准 ANSI/AWWA C301 和 ANSI/AWWA C304, 内容包括 PCCP 管制造和设计, 几年修改 1 次, 至今已是 ANSI/AWWAC 301—99 和 ANSI/AWWA C304—99 规范, 同时还编制了混凝土压力管道手册 (Concrete Pressure Pipe) AWWA M9, 内容包括管子水力因素、结构设计参数、安装方法等。

PCCP 从问世以来, 显示了其强劲的生命力。在北美有 10 家制管公司到 1994 年已制管 3 万多 km, 使用于 2.8 万多个工程项目, 美国的 100 个大中城市就有 90 多个使用 PCCP 管道于水电、市政等基础工程建设中。目前, PCCP 是北美地区长距离大口径有压输水管道的首选项材, 已生产和使用的 PCCP 的最大管径达到 7.6m, 最大使用内压达到 2.75MPa, 最大覆土深度达到 30.5m。但是, PCCP 的发展过程中其质量控制也不是一帆风顺, 经历了许多波折。其质量控制乃至整个工程的质量控制也是通过对 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逐步提高的。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: 阿麦隆 (Ameron)、普莱斯兄弟公司 (Price Brothers)、即福希 (Gifford Hill Ameccan) 和格瑞太克斯 (Gretex), 其中以阿麦隆和兄弟公司规模最大。阿麦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, 距离不长。目前, 世界上规模最大 PCCP 使用工程为非洲利比亚“大人工河”输水工程, “大人工河”工程总调水量为每年 25 亿 m^3 , 输水干线总长 4500km, 计划总投资 300 多亿美元 (为 1984 年价格)。“大人工河”工程采取分期建设

方式：第一期工程管道总长 1872km，主管道采用两条直径为 4m 的预应力钢筒混凝土管，日输水能力 200 万 m^3 ，计划年输水量 7 亿 m^3 ，1983 年开工，1992 年完工通车；第二期工程管道总长 1731km，主管道采用两条直径为 4m 的 PCCP，日输水能力 200 万 m^3 ，计划年输水量 9 亿 m^3 ，工程于 1992 年开工，1996 年基本建成；第三期工程是将第一、二期工程连接起来，管线长 190km，目前正在施工之中；第四期工程计划将南部另外两个地下水源分别再引到北部沿海地区；第五期工程是构建地中海沿岸地区的农业灌溉水网工程。“大人工河”的水源工程包括道路建设、电厂及供电系统，打井，建抽水泵站和铺设管道等工程。该项目被称为世界土木建筑史上的第八大奇迹。

PCCP 是由预应力钢丝、钢筒、混凝土构成的复合管材，是预应力钢筒混凝土管 (Pressressed Concrete Cylinder Pipe) 的英文缩写。这种管材结构形式详见图 1.1~图 1.3。

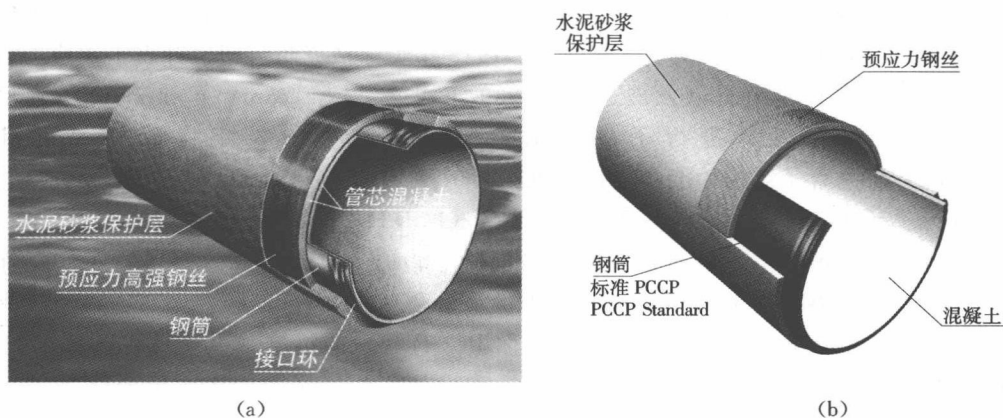


图 1.1 PCCP-E 标准结构图

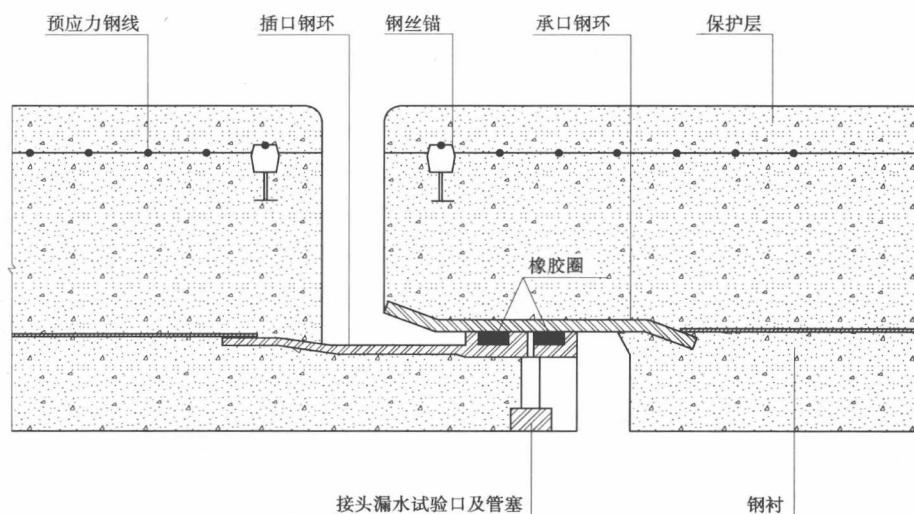


图 1.2 PCCP-E 埋置式预应力钢筒混凝土管

PCCP 从结构型式上分为两种：一种为内衬式预应力钢筒混凝土管 (PCCP-L)，即

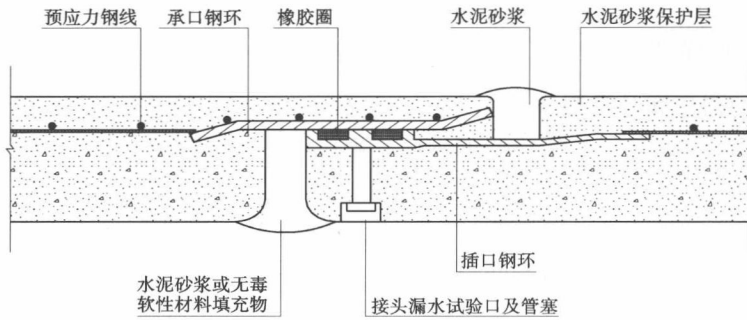


图 1.3 PCCP-L 内衬式预应力钢筒混凝土管

在钢筒内壁成型混凝土，在钢筒外面缠绕环向预应力钢丝，然后喷射砂浆保护层而制成的管道；另一种是埋置式预应力钢筒混凝土管（PCCP-E），是将钢筒埋置在管芯混凝土里面，然后在管芯混凝土上缠绕环向预应力钢丝后喷射砂浆保护层。

1.1.1 PCCP 的构成部分

1. 高强度混凝土管芯

它是管道的主要结构部分，可提供光滑的内表面以利水流。该管芯内的钢筒起防渗作用和提供纵向抗拉强度，并可增加环向强度。在 PCCP-E 型管道中，钢筒嵌在混凝土管芯中，在 PCCP-L 型管道中，钢筒包在混凝土管芯的外部。钢筒两端连接钢制承、插口环和弹性“O”形橡胶环，它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。PCCP-E 型管混凝土在钢模内立式浇筑，多用于大管径 PCCP。PCCP-L 型管的混凝土靠离心浇筑或在钢筒内径向压实浇筑，多用于小管径 PCCP。

2. 冷拉预应力钢丝

以一定的拉应力螺旋式缠绕在管芯上，在管芯上产生均匀的预压应力以抵偿由内压和外荷载产生的拉应力。可根据具体运行条件设计钢丝直径、预压应力和缠丝密度，以提供所需的最佳预应力。

3. 一个密实的水泥砂浆保护层

保护高强度钢丝和管芯，使之免受物理损坏和外界腐蚀。

4. 钢制承、插口接头

焊在钢筒的两端，是 PCCP 的连接件和密封件。

1.1.2 PCCP 的技术、经济特性

1. 设计方法先进、安全

PCCP 设计采用美国供水协会 AWWA C304 设计规范，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，将预压力、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、合理地发挥钢材抗拉、易密封性的混凝

土的抗压及耐腐蚀性，安全地限制了混凝土的抗拉和抗压应力，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。

2. 承受高的内压和外荷载

因为 PCCP 使用了经过水压检验的钢筒，解决了一般混凝土管存在的渗水问题，所以它可以承受很高的工作压力，我国产品的标准工作压力指标为 0.4~2.0MPa，国外应用的 PCCP 工作压力有的高达 3.0 MPa 以上。由于 PCCP 在设计上考虑充分运用混凝土的抗压强度，所以它较其他管材可承受更大的外荷载。

3. 良好的抗渗性及耐久性

PCCP 利用埋藏在混凝土中的经过水压试验的钢筒抗渗，利用水泥砂浆对预应力钢丝进行保护使其不受外界腐蚀，从而保证 PCCP 的抗渗性、耐久性。对于 PCCP，要保证和提高管体的抗渗性，只有加厚管壁或使用高密度混凝土或者两者并举，这就对混凝土的配制、搅拌、浇筑和振捣提出了十分严格和苛刻的要求。但由于工厂工艺条件的限制，批量生产标号过高的混凝土是不现实的，因此也就很难达到要求的抗渗性。另外，从生产工艺来看，PCCP 的水压抗渗试验是在管材缠丝后才进行的，该水压试验并不能检验混凝土管芯本身的水密性。混凝土作为一种多孔材料，仅提高其抗裂性并不意味着其抗渗性也得到相应的提高，作为压力输水管道用的管材，在单向压力状态下长期处于饱水状态下的混凝土，不可避免地会发生渗漏，造成预应力钢丝的锈蚀，从而影响了管材的耐久性。而钢管虽然具有较好的防渗性能，但钢管的使用寿命与输送的介质和管道周围的环境介质有很大的关系。如果设计时没有相应的防腐措施，施工、运行维护不当，则会达不到预期的使用年限，一般 15 年左右就需要维修才能维持使用。

4. 接头密封好

PCCP 接头采用公差配合，PCCP 密封接头形式见图 1.4，采用滑动“O”形胶圈密封，安装时“O”形胶圈沿承插滑动“O”形胶圈密封，其钢质承口圈和插口圈，加工尺寸精度高（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，密封橡胶圈按照与胶槽等断面设计，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

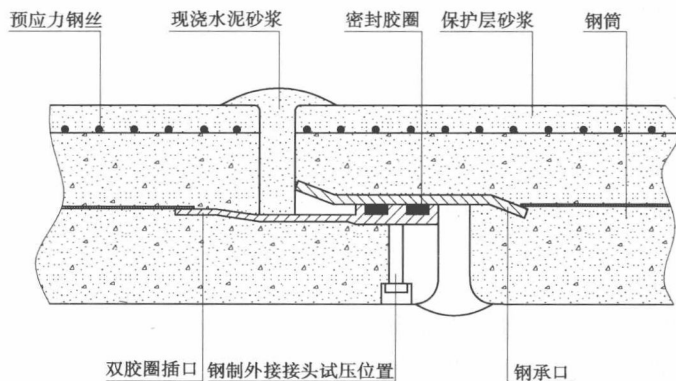


图 1.4 PCCP 管密封接头

接头安装后,一般都能一次打压成功,滴水不漏。这种型式的接头可以承受高达 3.0 MPa 以上的水压力。

PCCP 承口、插口的结合采用间隙配合,滚动胶圈密封。安装时“O”形胶圈沿承、插口工作面滚动,胶圈受压形成水密性接头,但是胶圈在插口槽内滚动过程中易发生胶圈扭曲、不同步、撕裂和不到位等弊病。由于 PCCP 的承、插口尺寸是由模具端板来保证,长期使用后模具的变形或端板的磨损都会影响承插口工作面的尺寸,间隙随之发生变化,影响胶圈的密封效果。此外胶圈在密封时仅受承插口上、下两个面的挤压,很难保证接头的水密性,从而加大了输水成本,影响工程质量。

5. 耐腐蚀性能好

由于构成 PCCP 的所有钢材都被密实的混凝土或水泥砂浆所包裹,经防腐处理的承口钢圈和插口钢圈安装后其外露部位又都用水泥砂浆灌注封口,混凝土或砂浆提供的高碱性环境使得包裹在 PCCP 内部的钢材纯化而不会发生腐蚀,因而使 PCCP 具有良好的防腐性能,一般能达到 60 年以上,而没有采取针对性防腐处理的钢管很容易被腐蚀,一般 20 年左右就必须更换管材。不同管材耐久性比较见图 1.5。

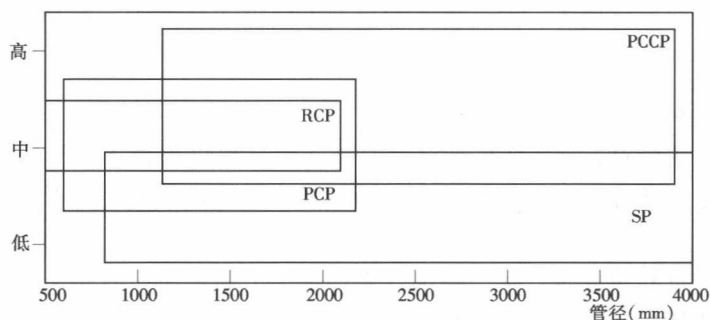


图 1.5 耐久性比较

6. 较高的通水能力

PCCP 及其接头的内表面非常光滑,不结垢,使得管线在运行服务期间能保持很高的通水能力。PCCP 经水力摩阻试验测定:离心成型的 PCCP-L 管, $n=0.012$; 对于立式振动成型的 PCCP-E 管, $n=0.0107$, 可见 PCCP 的粗糙率 n 值是很小的,大大降低了 PCCP 对水流的摩阻力,提高了其通水能力。

7. 安装速度快

PCCP 采用胶圈密封的自对中钢制接头,使其安装快捷,管线一般一次打压成功,而钢管采用现场焊接的方法,其铺设速度相对 PCCP 较慢,且管线往往需要多次试压才能成功。

8. 能够抵抗一定的推力

当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 管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,不仅能够方便施工而且不需要建造止推墩降低了工程造价。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。PCCP 中的钢制承插口和钢筒还起着传递轴向力作用，钢筒的壁厚可根据传递推力的大小来调整。而 PCP 的接头由混凝土制成，无法“捆绑”，因而不能充分利用管内的纵向配筋。

9. PCCP 半刚性接头对地基适应性好

PCCP 半刚性接头使得此种管道既有一定程度的刚性，又具有一定的柔性，其接头能够转动一定的角度，因而抵抗不均匀沉降的能力较强，对基础的要求不高，可以适应地基变化的性能比其他管材要好。管道允许相对转角见表 1.1。

表 1.1 管道允许相对转角

管径(mm)	600~800	900	1000	1200	1400	1600	1800	2000	2200	2400	2600	3000
转角(°)	1.50	1.45	1.25	1.10	0.95	0.85	0.74	0.67	0.60	0.56	0.53	0.46

10. 抗震能力强

大量实例表明，PCCP 管材的抗震性能优良，在强地震下也能保持完好无损。而钢管的抗震性较差，发生地震时易损坏。1999 年台湾“9·21”大地震最大加速度接近 $1g$ 时，其他管材如钢管、球墨铸铁管、塑胶管等都遭到不同程度的损坏，而 PCCP 管线在离震中不到 5km 的情况下没有出现任何损坏。

11. 可以制作各类配件和异形管

作为输水管线用管材，PCCP 具有很大的灵活性，可以提供不同形式 PCCP，适应不同工程的地质、地形条件，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。但选择 PCP 时，就无法做到，只能选用许多配件来补偿短缺的管材，使得管线的设计和安装复杂化，从而增加了工程成本。

12. 工程造价和维护费用低

由于 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 的价格比其他管材低廉，其价格比钢管少 10% 以上，而且其铺设成本低、铺设工期短，其维护费用只有钢管的五分之一，尤其是大直径 PCCP，其优越性更明显。

PCCP 为直筒型，运输、安装方便，且钢质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，综合造价低，运行维修费用小，经久耐用，社会综合效益好。不同管材成本比较见图 1.6。

1.1.3 PCCP 制造工序

预应力钢筒混凝土管（Ameron 公司埋置式制管）的工艺流程见图 1.7。

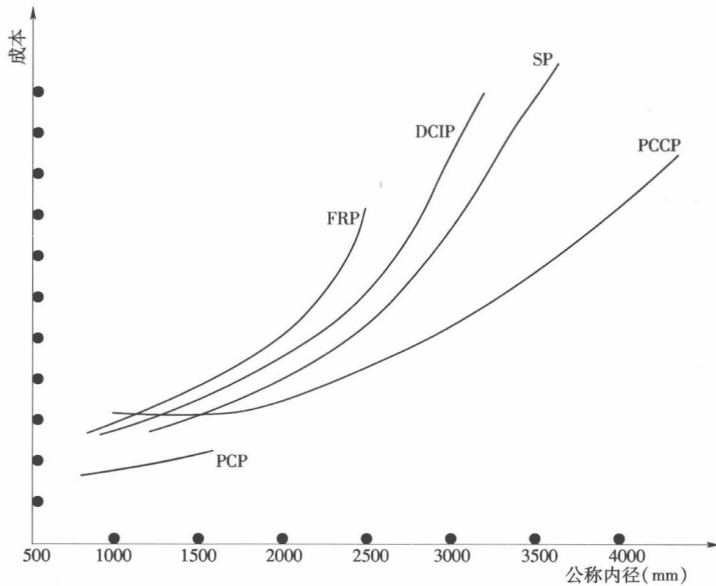


图 1.6 不同管材成本比较图

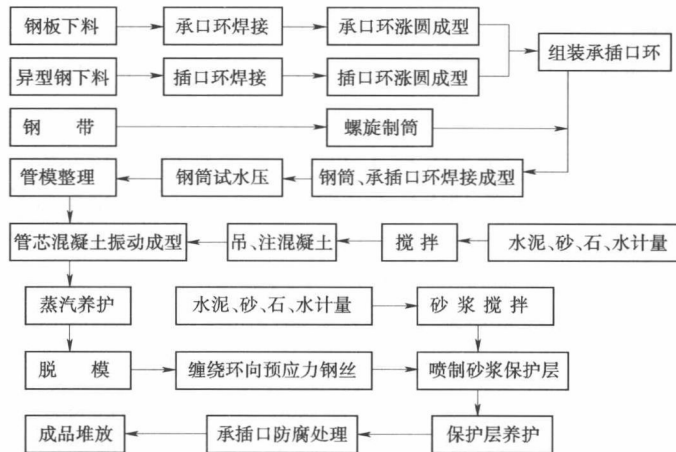


图 1.7 PCCP 生产工艺流程图

1. 承、插口接头加工

PCCP 接头采用承、插口连接方式，承口钢圈和插口钢圈是管材连接、止水的重要部件，经钢板剪切、卷环焊接、承口钢圈压边成型、承口和插口钢圈胀圆等工序，达到承、插口两钢圈应有的配合精度。

2. 钢筒制作

钢筒是管体防渗的主要部分。将加工好的承口、插口钢圈装在螺旋制筒机上，按设计要求将 1.5~3mm 厚的卷板卷成钢筒，边卷边焊；钢圈与钢筒一次焊接成型，经打压试验无渗漏点即为合格产品。

3. 管芯混凝土浇筑

混凝土管芯是承受管材的内水压和外荷载的主要部分。钢筒制好后吊入模具中,浇筑混凝土,钢筒镶嵌在混凝土之中,经过强力振捣,形成 PCCP 混凝土管芯,管芯经过养护,混凝土强度达到设计强度的 70% 时,即可进入缠丝工序。

4. 预应力钢丝缠绕

将管芯吊至缠丝机工作台,钢丝以一定的拉应力螺旋式缠绕在管芯上,不允许密绕,钢丝间最大螺距不得超过 38mm (PCCP-E),应力波动值不得超过规定应力的 $\pm 10\%$,缠丝过程需要同时喷涂水泥净浆。缠丝是一道关键工序,管材的质量高低很大程度上取决于缠丝的质量,可谓“一丝重千钧”。

5. 水泥砂浆保护层

水泥砂浆保护层对钢丝起保护作用,喷浆前首先按规定水灰比喷水泥净浆,然后采用高速辊射机辊射水泥砂浆保护层。保护层净厚度最小为 19mm,经检测达到设计要求后,结束喷浆,进行养护。

我国研制、生产 PCCP 起步较晚。20 世纪 80 年代才开始初步研制。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制作了直径为 0.6m 的 PCCP,并应用于输水工程中。1985 年江苏省南京市水泥管厂与北京市政工程研究所合作,采用自应力混凝土研制了直径为 0.6m 和直径为 1.2m 的 PCCP,并安装于福建建阳水电站工程和南京供水管线上。随后,在改革开放的方针指导下,国外先进技术和信息通过各种渠道进入中国市场,PCCP 也随之进入国内人们的视界,国内企业在引进和消化吸收国外先进技术和关键设备的基础上发展了 PCCP 这一新型管材。1989 年,山东电力管道工程公司从美国阿麦隆公司引进 PCCP 工艺技术和关键设备(钢筒螺旋焊机、承插口生产设备和管模、振动器等),建立了 PCCP 生产线,并于 1990 年 6 月生产出第一批口径为 2600mm 的 E-PCCP 管,从而拉开了我国成产 PCCP 管的序幕。随后,深圳太阳管道有限公司于 1992 年引进了美国普莱斯兄弟 (Price Brothers) 公司全套设备,可生产直径为 900~2600mm 的 PCCP。无锡华毅管道有限公司与外商合资,于 1995 年 4 月建成了 PC-CP 生产线。该公司也引进了美国阿麦隆的钢筒卷焊机和承插口设备,由国家电力公司杭州机械设计研究所改进设计立式差速绕丝机和立式辊射机翼及钢筒吊具、管芯吊具等设备,建成了一条设备非常完善的生产线。到 2000 年底,这三个公司生产了直径为 600~3000mm 的 PCCP 达 600 多 km,已应用于 80 多个大小工程项目。从 2000 年后,国内掀起了 PCCP 的建厂高潮。目前,国内除了最先建厂的 3 个公司外,还有四川成都金炜集团公司与成都自来水公司合作于 2000 年 4 月成立了成都金炜制管有限责任公司,公司拥有 2 条生产线,年生产能力 100km 以上;新疆国统管道股份有限公司,公司由新疆天山建材(集团)有限责任公司和中国台湾的 PCCP 制造企业——台湾国统国际股份有限公司于 2001 年联合成立的股份制公司,拥有 9 条 PCCP 生产线,年设计生产能力 350km 以上;山东淄博龙泉管道工程有限公司拥有 12 条 PCCP 生产线,年设计生产能力 224km;吉林电力管道公司拥有 12 条生产线,年设计生产能力 100km;北京河山管业有限公司拥有 2 条 PCCP 生产线,年设计生产能力 15km。据不完全统计,目前国内