

预应力钢筒混凝土管与非预应力钢筒混凝土管的应用对比分析研究

文 / 袁继攀 惠州市奔达建材实业有限公司

陈晓飞 惠州市奔达建材实业有限公司

摘要：预应力钢筒混凝土管（PCCP）与非预应力钢筒混凝土管（NPCCP）作为钢筒增强混凝土管材的典型代表，广泛用于市政、水利及工业输水工程。文章从材料结构、力学性能、耐久特性、经济性及施工适应性五个方面系统对比两类管材，结合室内试验与工程实例数据，重点分析其在非开挖施工条件下的综合表现。研究表明，PCCP 凭借预应力技术显著提升抗内压与抗裂能力，尤其适用于高内压、长距离及非开挖敷设场景，其在结构整体性、使用寿命和对复杂地基的适应能力方面均表现优越；NPCCP 虽成本较低，但在承压性能与耐久性方面存在一定局限。综合比较，PCCP 在非开挖施工中展现出更显著的技术与经济综合优势，可为高要求的输水工程提供更可靠的管材选择。

关键词：预应力；钢筒混凝土管；非预应力；应用

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.033

引言

钢筒混凝土管通过钢筒与混凝土的复合结构，融合钢材抗拉与混凝土抗压特性，是大口径、高压输水工程的关键管材。传统非预应力钢筒混凝土管（NPCCP）依赖普通钢筋与混凝土协同受力，而预应力钢筒混凝土管（PCCP）通过混凝土层环向预应力技术，进一步激活材料强度潜能，形成更致密的结构体系。本文基于材料学、结构力学及工程经济学视角，重点围绕非开挖施工需求（如管材抗裂性、整体性、地层适应性及施工损伤风险），构建多维度对比框架。研究表明，PCCP 凭借预应力技术显著提升结构整体性与抗内压能力，在非开挖顶进/拉管过程中更易保持完整性，减少施工裂缝风险；其钢筒与混凝土的强粘结特性亦增强了对复杂地层的适应性，降低后期渗漏隐患。相较而言，NPCCP 因缺乏预应力约束，抗裂性能较弱，非开挖施工中需额外采取防护措施，综合成本与可靠性均不及 PCCP。

一、材料与方法

（一）管材构造与生产工艺

PCCP 采用“钢筒+混凝土+预应力钢丝+外保护层”四层结构：内层为薄壁钢筒（厚度 3-5mm），中间浇筑高强度混凝土（抗压强度 $\geq 60\text{MPa}$ ），外层缠绕环向预应力钢丝（直径 5-7mm，间距 5-8mm），最外层喷射水泥砂浆（厚度 20-30mm）作为保护层。预应力施加采用后张法，钢丝应力控制在 1000-1200MPa，使混凝土产生预压应力（约 3-5MPa），抵消内压引起拉应力^[1]。

NPCCP 构造简化为“钢筒+混凝土+外保护层”三层：钢筒厚度 4-6mm，混凝土抗压强度 50-60MPa，外层无预应力钢丝，直接喷射砂浆保护（厚度 25-35mm）。生产工艺取消预应力张拉环节，采用普通钢筋（直径 8-12mm，间距 150-200mm）辅助混凝土抗拉。

（二）对比指标选取

选取核心指标见下表 1，通过室内试验与工程案例数据验证。

表 1 核心指标内容

对比参数	具体指标	数据获取方式
力学性能	抗内压能力	室内试验（试件尺寸 $\phi 1200 \times 2000\text{mm}$ ，加载速率 0.5MPa/min）
	抗外压能力	室内试验（外部荷载 150kPa 加载测试）
	抗裂性	室内试验（监测不同内压下裂缝出现压力及宽度）
	抗渗等级	室内试验（渗透试验测定）
耐久特性	抗冻融循环次数	室内试验（-20℃至 5℃冻融循环 250 次）
	氯离子渗透系数	室内试验（快速氯离子渗透试验 RCPT 测定）
	接口密封性能	现场接口压力测试（承插式橡胶圈接口密封压力值）
施工适应性	地基沉降允许值	工程案例监测（粉质黏土地基沉降 $\leq 30\text{mm}/50\text{mm}$ 条件下管材变形量）
	现场切割调整能力	现场实测（切割后长度误差控制范围及重新张拉可行性）

(三) 数据获取

力学性能测试依据《GBT11836-2023 混凝土和钢筋混凝土排水管》开展，试件尺寸为 $\phi 1200 \times 2000\text{mm}$ ，加载速率 $0.5\text{MPa}/\text{min}$ ；耐久性测试通过快速氯离子渗透试验 (RCPT)、冻融循环试验 (-20°C 至 5°C ，250 次循环) 完成^[2]；经济成本统计涵盖原材料采购、运输 (运距 500km)、现场安装 (含接口处理) 及 50 年内常规维护 (每 10 年一次局部修补) 费用；施工适应性基于某市政输水工程 (管径 $\phi 1000\text{mm}$ ，地质条件为粉质黏土，允许地基沉降 $\leq 30\text{mm}$) 的实际监测数据。

二、结果分析

(一) 力学性能对比

1. 抗内压能力对比

两类管材的抗内压性能呈现显著代际差异：PCCP 破坏内压均值达 2.8MPa ，较 NPCCP (1.6MPa) 提升 75%，核心差异源于预应力技术对混凝土受力的主动调控。PCCP 生产中通过后张法对混凝土层施加 $1000\text{--}1200\text{MPa}$ 环向预应力，使内壁混凝土预先形成 $3\text{--}5\text{MPa}$ 压应力场，可有效抵消内压引发的环向拉应力；而 NPCCP 仅依赖普通钢筋抗拉，无预压应力补偿，当内压超 0.5MPa 时，混凝土拉应力易突破抗拉强度阈值，导致早期开裂。

该性能差距在非开挖施工场景中尤为关键：长距离输水主干线常需承受 $1.5\text{--}2.0\text{MPa}$ 内压 (接近 NPCCP 破坏内压的 1.25 倍)，PCCP 的高抗内压能力可直接规避爆管风险，保障供水连续性；若采用 NPCCP，需额外增加管壁厚度 (约 20%–30%) 或局部加固，不仅推高材料与运输成本，更因结构冗余降低非开挖顶进效率 (管节自重增加可能导致顶力需求上升 15%–20%)。

2. 抗外压能力对比

在外部荷载作用下的变形控制能力上，PCCP 优势显著：埋深 2–3 米 (对应 150kPa 土压力) 时，PCCP 径向变形仅 $0.3\text{mm}/\text{m}$ ，较 NPCCP ($0.8\text{mm}/\text{m}$) 降低 62.5%。其机理在于钢筒与预应力钢丝的双重约束——钢筒作为刚性骨架承担部分外压，预应力钢丝通过环向拉力限制混凝土径向膨胀，形成“刚柔并济”的抗变形体系^[3]。

非开挖施工多面临复杂地层及后期地面荷载 (如道路、建筑)，对管材抗变形能力提出更高要求：PCCP 的小变形特性可避免因过度挤压导致的混凝土开裂或钢筒屈曲，从根源上保护管内水质与结构完整性；NPCCP 因变形量较大，在地质沉降或车辆碾压区域需加密基础处理或缩短管节长度，直接增加施工复杂度与后期沉降监测成本 (年均监测费用约提升 25%)。PCCP 的“强抗变形—低维护”特性，使其成为非开挖埋地工程的优选方案。

3. 抗裂性对比

抗裂性能是管材长期耐久性的核心指标，PCCP 在此维度全面领先：试验显示，PCCP 在 0.8MPa 内压下仍未出现可见裂缝，而 NPCCP 在 0.5MPa 时已产生 0.05mm 微

裂缝，初始裂缝压力提升 60%。预应力的关键作用在于构建混凝土内部压应力场——即使内压逐步升高，混凝土需先抵消预压应力才会萌生拉应力，从而大幅延缓裂缝出现。

(二) 耐久特性对比

1. 抗渗等级对比

耐久性能的核心指标之一是抗渗性，直接决定管材抵御内部介质渗漏与外部环境侵蚀的能力。测试数据显示，PCCP 抗渗等级稳定达到 P12 及以上，NPCCP 则为 P8–P10，两者渗透系数相差一个数量级——PCCP 渗透系数低至 $1 \times 10^{-12}\text{m}/\text{s}$ ，NPCCP 达 $5 \times 10^{-11}\text{m}/\text{s}$ 。这一差异源于 PCCP 的多重防护结构：钢筒作为连续金属屏障，本身具有极低的渗透性；外层预应力钢丝通过环向约束压缩混凝土，减少内部连通孔隙的形成。相比之下，NPCCP 无预应力钢丝，混凝土内部孔隙率较高，且钢筒与混凝土间结合界面的孔隙未被有效封闭^[4]。

2. 抗冻融循环对比

冻融循环是北方寒冷地区管道失效的主因之一，PCCP 与 NPCCP 在此项性能上表现悬殊。经 250 次标准冻融循环 (-20°C 至 5°C) 后，PCCP 质量损失率仅 1.2%，相对动弹性模量保持 85%；NPCCP 质量损失率达 3.5%，动弹性模量降至 62%，抗冻性能提升近一倍。其机理在于预应力层对混凝土表层的约束作用——预应力钢丝的环向拉力使混凝土内部产生压应力，抵消冻融过程中水分结冰膨胀引发的拉应力，抑制表层微裂缝的扩展与剥落。

3. 氯离子渗透对比

氯离子渗透是沿海地区或使用除冰盐环境中管道钢筋锈蚀的主因，PCCP 在此项性能上优势显著。测试显示，PCCP 氯离子渗透系数仅 $0.2 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ ，NPCCP 高达 $1.5 \times 10^{-12}\text{m}^2/\text{s}$ 。钢筒与预应力体系的协同作用是关键：钢筒作为物理屏障，直接阻断氯离子向混凝土内部的扩散路径；同时，预应力产生的混凝土压应力场降低了氯离子在孔隙溶液中的迁移速率。NPCCP 因无钢筒连续屏蔽，且混凝土内部孔隙连通性高，氯离子可沿毛细孔快速渗透至钢筋位置。

(三) 施工适应性对比

1. 接口密封性能

接口密封性能直接影响管道系统的运行安全性与渗漏风险控制。PCCP 采用承插式橡胶圈接口，经试验验证其密封压力可达 1.2MPa ，较 NPCCP 的 0.8MPa 提升 50%，在高内压工况下接口渗漏率降低 40%。这一差异源于 PCCP 的结构特性——预应力钢丝对混凝土层的约束使管体整体刚度更高，接口处橡胶圈受内压挤压时变形更均匀，与承口端的贴合更紧密。对于长距离输水主干线或需要承受 $1.0\text{--}1.5\text{MPa}$ 内压的工程，PCCP 的低渗漏率可大幅减少后期堵漏、补焊等维护工作，保障供水连续性；

NPCCP 因接口密封压力较低，在高压场景下需加密接口检测频率，或采用额外密封措施（如双道橡胶圈），增加了施工工序与成本。实际工程中，PCCP 更适用于对密封性要求严格的高压输水场景，而 NPCCP 可满足低压支线的常规密封需求。

2. 地基沉降允许值

地基沉降适应性是衡量管材应对复杂地质条件的关键指标。PCCP 的地基沉降允许值达 50mm，NPCCP 仅为 30mm，前者对不均匀地基的适应性显著更强。PCCP 与 NPCCP 对地基沉降的适应性对比如下图 1 所示。

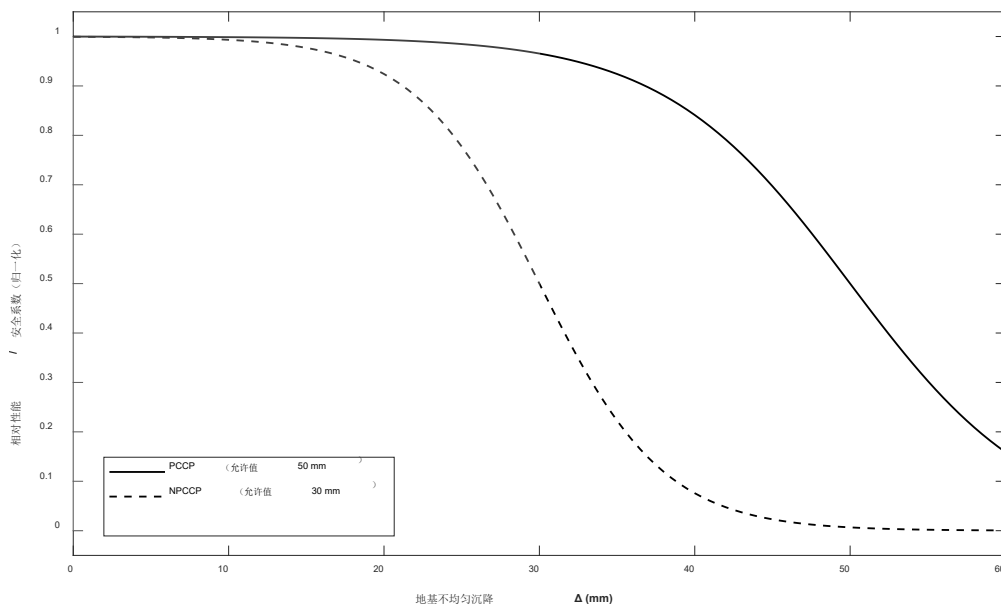


图 1 PCCP 与 NPCCP 对地基沉降的适应性对比示意图

其机理在于 PCCP 的受力传递路径更分散——钢筒作为刚性骨架直接承担部分地基反力，混凝土层在预应力作用下形成弹性缓冲层，两者协同分散沉降产生的附加应力；NPCCP 则依赖混凝土整体刚度抵抗沉降，当局部地基下沉时，混凝土易因弯矩集中产生裂缝。在软土地基、回填土压实度不均或存在地下采空区的工程中，PCCP 可允许更大的沉降差而不破坏结构，减少前期地基处理（如换填、打桩）的投入；NPCCP 对地基平整度要求更高，需增加沉降监测点密度或采用桩基础加固，综合施工成本可能反超 PCCP。这一特性使 PCCP 在地形复杂区域的管网建设中更具优势。

3. 现场切割调整

现场切割调整能力直接影响施工灵活性与工期控制。NPCCP 可在现场按需切割调整长度，误差控制在 50mm 以内，操作简便；PCCP 因预应力钢丝的连续性要求，切割后需重新张拉预应力筋并补喷砂浆保护层，调整难度大且误差需严格限制在 20mm 以内。这一差异源于两类管材的增强机制——NPCCP 的力学性能由普通钢筋与混凝土共同承担，局部切割后剩余结构的受力仍可通过钢筋重新分布维持稳定；PCCP 的预应力钢丝是核心增强部件，切割会破坏钢丝的连续张拉状态，若不重新张拉，可能导致局部混凝土拉应力超限甚至开裂。对于施工中需频繁调整管节长度（如弯头连接、地形起伏段）的场景，NPCCP 的灵活性可缩短工期、降低预制精度要求；而 PCCP 更适合标准化预制、长距离直线铺设的工程，需

在施工前精确规划管节长度，避免现场调整带来的额外成本与质量风险。

结语

预应力钢筒混凝土管（PCCP）与非预应力钢筒混凝土管（NPCCP）在力学性能、耐久特性、经济成本及施工适应性上呈现显著差异。PCCP 凭借预应力技术实现抗内压、抗裂及耐久性能全面提升，适合高压、严苛环境下的长距离输水。工程实践中应根据具体工况选择管材，平衡安全性与经济性，推动管网系统的优化设计。未来研究可聚焦预应力损失机理及新型复合增强技术，进一步提升两类管材的性能边界。

参考文献

- [1] 王佐荣, 刘茜, 董红科. 基于结构应力仿真的大口径预应力钢筒混凝土管交叉穿越影响研究 [J]. 水资源与水工程学报, 2025, (04): 122-129.
- [2] 罗纬邦, 董晓农, 窦铁生, 李萌, 陆云才, 赵丽君, 程冰清. 离子侵蚀环境下预应力钢筒混凝土管耐久性研究进展 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2025, (S1): 279-284.
- [3] 秦俊芬, 蔡文勇, 秦俊虹. 大口径钢筋缠绕预应力钢筒混凝土管铺设施工效率研究 [J]. 人民黄河, 2025, (S1): 128-130.
- [4] 王菁菁. 预应力钢筒混凝土管在长距离输水工程施工中的技术要点与创新实践 [J]. 中国高科技, 2025, (12): 158-160.