

农田供水工程管道材料选择对系统使用寿命的影响研究

周慧平¹ 乔金虎²

1.内蒙古恒源水利工程有限公司 内蒙古自治区 呼和浩特 010010

2.西安市三河一山生态管护中心 陕西 西安 710000

【摘要】：农田供水工程作为农业生产的重要基础设施，其系统使用寿命直接关系到灌溉效率、农业生产成本与粮食安全。管道材料作为系统的核心组成部分，其物理性能、化学稳定性与环境适应性是决定工程寿命的关键因素。本文通过对比分析 PVC-U、PE、钢管、混凝土管等常用管道材料的力学性能、抗腐蚀能力、施工适应性及经济成本，结合不同农田环境（如盐碱地、高水位区、冻土区）的应用案例，揭示材料选择与系统使用寿命的关联机制。研究表明：在盐碱地农田选用 PE100 级管道（环刚度 $\geq 8\text{kN/m}^2$ ），可使系统寿命延长至 15-20 年；而在季节性冻土区采用双层熔接钢管（壁厚 $\geq 6\text{mm}$ ），能有效抵御冻胀破坏，寿命较普通钢管提升 50%。研究成果为农田供水工程材料选型提供技术依据，可降低全生命周期成本 20%-30%。

【关键词】：农田供水工程；管道材料；使用寿命；抗腐蚀性能；环境适应性

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.030

1 引言

我国农田灌溉面积达 10.3 亿亩，其中 70% 依赖于管道输水系统。然而，由于材料选择不当，许多农田供水工程出现过早失效现象：某省调查显示，30% 的管道系统在使用 5-8 年后因腐蚀、破裂等问题需要大修，20% 的工程寿命不足 10 年（远低于设计的 15 年）。例如，盐碱地农田中使用的普通 PVC-U 管道，因抗渗性不足导致接口渗漏，5 年内灌溉效率下降 40%；冻土区采用的混凝土管，因冻胀作用出现裂缝，维修成本占工程总投资的 35%。因此，研究管道材料选择对系统寿命的影响具有重要现实意义。建立“材料性能-环境因素-寿命衰减”的量化关系模型，完善农田水利工程材料选型理论体系。提出基于环境特征的材料选择方案，为不同类型农田供水工程提供可操作的选型指南，延长系统使用寿命（平均延长 5-8 年）。

2 农田供水工程常用管道材料性能对比

2.1 主要材料分类及核心性能

农田供水工程管道材料需满足耐压性（设计压力 0.4-1.0MPa）、抗腐蚀性（适应农田化肥、农药侵蚀）、柔韧性（抵御地基沉降）三大核心要求，常用材料性能如下。

(1) 聚氯乙烯(PVC-U)管：公称压力 0.6-1.0MPa，拉伸强度 $\geq 40\text{MPa}$ ，断裂伸长率 $\geq 80\%$ ，但低温脆性明显（ -5°C 以下易开裂）。耐酸碱性能优良（pH 值 2-12 范围内稳定），但对有机溶剂（如农药中的甲苯）敏感，长期接触会导致溶胀。平原非盐碱地农田，不适用于冻土区或高浓度农药使用区。

(2) 聚乙烯(PE)管：PE80 级公称压力 0.4-0.8MPa，

环刚度 6-8kN/m²，适用于低压灌溉系统；PE100 级公称压力 0.8-1.2MPa，环刚度 $\geq 8\text{kN/m}^2$ ，断裂伸长率 $> 350\%$ ，柔韧性优异（可承受 30°弯曲不变形）。耐化学腐蚀（包括强酸、强碱、农药），在浓度 5% 的硫酸溶液中浸泡 12 个月，性能衰减 $< 5\%$ ，适用于盐碱地、沼泽地等腐蚀性强或地基沉降大的区域。

(3) 钢管：焊接钢管壁厚 4-8mm，公称压力 1.0-1.6MPa，强度高（屈服强度 $\geq 235\text{MPa}$ ），但重量大（15-30kg/m）；镀锌钢管表面锌层厚度 $\geq 85\mu\text{m}$ ，短期抗锈蚀能力强，但焊接处易腐蚀。裸管在潮湿环境中年锈蚀速率 0.1-0.2mm，需防腐处理（如涂环氧煤沥青，涂层厚度 $\geq 0.3\text{mm}$ ）。适用于高压输水段（如泵站出口）、穿越公路或铁路的埋地段。

表 1 材料性能对比矩阵

材料类型	公称压力 (MPa)	抗腐蚀等级	柔韧性 (弯曲半径)	寿命 (年)	单价(元 /m, DN200)
PVC-U 管	0.6-1.0	B(耐酸碱)	差($\geq 20\text{D}$)	8-12	35-45
PE80 管	0.4-0.8	A(耐化学)	优($\geq 12\text{D}$)	10-15	50-60
PE100 管	0.8-1.2	A+	优($\geq 10\text{D}$)	15-20	70-80
镀锌钢管	1.0-1.6	C(需防腐)	中($\geq 30\text{D}$)	8-15	120-150
预应力混凝土管	0.6-1.2	B-	差(刚性)	15-25	90-110

玻璃钢 (FRP)管	0.6-2.0	A+	中($\geq 15D$)	20-30	180-220
---------------	---------	----	-----------------	-------	---------

注：续表 1。抗腐蚀等级 $A+ > A > B > B- > C$ ；D 为管道公称直径。

3 材料选择对系统使用寿命的影响机制

3.1 物理性能与结构寿命的关联

(1) 强度与耐压性影响：管道的环刚度直接决定其抵抗外部荷载（如土壤压力、农机碾压）的能力。例如田间道路下方的管道需承受 50kN/m^2 的荷载，PE100 级管（环刚度 8kN/m^2 ）可承受该压力而变形率 $< 2\%$ ，而 PE80 级管（环刚度 6kN/m^2 ）变形率达 5% ，5 年后因结构疲劳出现破裂。泵站出口高压段（压力 1.0MPa ）选用壁厚 6mm 的钢管（屈服强度 235MPa ），可承受长期高压冲击，而 PVC-U 管在 1.0MPa 压力下，接口处易出现渗漏（寿命缩短至 5 年）。

(2) 柔韧性与地基适应性：农田地基多存在不均匀沉降（年沉降量 $3\text{-}5\text{cm}$ ），管道柔韧性不足会导致接口开裂。PE 管（断裂伸长率 350% ）可随地基沉降产生适应性变形，在沉降量 10cm 的区域，接口渗漏率仅 0.5% ；混凝土管（刚性材料）在同样沉降条件下，接口错位率达 15% ，3 年内出现结构性裂缝。

3.2 化学性能与腐蚀寿命的关联

(1) 抗化学腐蚀能力：农田灌溉水中含有化肥（如尿素、磷酸二铵）、农药（如有机磷）等化学物质，对管道的腐蚀作用显著。在使用含氯农药（浓度 0.5% ）的农田，PE 管因耐化学性优异，5 年内内壁腐蚀厚度 $< 0.1\text{mm}$ ，而 PVC-U 管内壁出现溶胀（腐蚀厚度 0.5mm ），导致输水阻力增加 20% 。盐碱地（土壤 $\text{pH} > 8.5$ ）中，PE100 管的抗渗性（渗透系数 $< 10^{-11}\text{m/s}$ ）可有效阻止盐分侵入，而混凝土管因孔隙率高（ $10\%\text{-}15\%$ ），盐分渗透导致钢筋锈蚀，结构寿命缩短至 10 年（设计 20 年）。

(2) 生物腐蚀抵抗性：稻田等富营养化水体易滋生微生物（如硫酸盐还原菌），对金属管道产生生物腐蚀。普通钢管在稻田水中年腐蚀速率 0.2mm ，5 年壁厚减薄 1mm ，需频繁更换；内衬环氧树脂的钢管（涂层厚度 $\geq 0.3\text{mm}$ ）可隔绝微生物接触，腐蚀速率降至 0.05mm/年 ，寿命延长至 20 年。

3.3 环境因素的耦合影响

(1) 地质条件（盐碱地、软土地基）：盐碱地土壤电阻率 $< 20\Omega\cdot\text{m}$ ，对金属管道腐蚀性强，需选用非金属材料（如 PE100 管）或防腐处理钢管（镀锌厚度

$\geq 100\mu\text{m}$ +环氧涂层）。某盐碱地项目对比显示，PE100 管 10 年完好率 90% ，而普通钢管仅 40% 。软土地基承载力 $< 100\text{kPa}$ ，需选用柔韧性材料（如 PE 管），配合土工格栅（抗拉强度 $\geq 20\text{kN/m}$ ）减少沉降影响。某软土地项目采用 PE 管后，5 年管道破损率 5% ，远低于混凝土管的 30% 。

(2) 水文条件（高水位、酸性水体）：高地下水位（埋深 $< 1\text{m}$ ）管道长期浸泡水中，需选用抗渗性强的材料（如 PE 管热熔接口，渗透系数 $< 10^{-12}\text{m/s}$ ）。某项目中，PE 管接口渗漏率 0.3% ，而橡胶圈连接的混凝土管渗漏率 12% 。酸性废水灌溉区（ $\text{pH} < 5.5$ ）混凝土管会发生碳化反应（年碳化深度 1mm ），建议选用 FRP 管或 PVC-U 管（但需避免高温环境）。

4 不同农田环境下材料选择案例与成效

4.1 盐碱地农田供水工程（以宁夏引黄灌区为例）

(1) 环境特征：土壤 pH 值 $8.5\text{-}9.5$ ，地下水矿化度 $3\text{-}5\text{g/L}$ ，存在强盐渍化腐蚀；年降水量 200mm ，灌溉依赖黄河水（含沙量 $10\text{-}20\text{kg/m}^3$ ）。

(2) 材料选择方案：主干管选用 $\text{DN}300\text{mmPE}100$ 管（环刚度 10kN/m^2 ），热熔对接接口（耐内压 1.0MPa ），抗盐腐蚀且耐磨（含沙水流冲刷 5 年，内壁磨损 $< 0.2\text{mm}$ ）。分支管 $\text{DN}110\text{mmPE}80$ 管，电熔连接（适应田间复杂地形）。

(3) 应用成效：系统运行 10 年，管道完好率 92% ，接口渗漏率 $< 1\%$ ，远高于同期使用的混凝土管（完好率 55% ）；灌溉水利用系数从 0.75 提升至 0.88 ，年节水 15万 m^3 ；全生命周期成本（含维修）较混凝土管方案降低 30% 。

4.2 季节性冻土区农田（以东北松嫩平原为例）

(1) 环境特征：冬季极端低温 -30°C ，冻土层厚度 1.2m ，春季融沉量 $5\text{-}8\text{cm}$ ；土壤为黑钙土，含水率 $25\%\text{-}30\%$ 。

(2) 材料选择方案：深埋段（管顶埋深 $> 1.2\text{m}$ ） $\text{DN}200\text{mmPE}100$ 管， $\text{SDR}17$ （标准尺寸比），可承受冻胀压力而不破裂。浅埋段（穿越农田道，埋深 $0.8\text{-}1.0\text{m}$ ）双层熔接钢管（外层 $\text{Q}235$ 钢+内层防腐涂层），壁厚 6mm ，外包 30mm 厚聚氨酯保温层，防止冻融循环破坏。

(3) 应用成效：冬季管道冻裂率从传统钢管的 12% 降至 1.5% ；春季融沉导致的接口错位率 $< 2\%$ ，系统寿命预计达 20 年（传统方案 10 年）；年维修费用从 5万元/km 降至 0.8万元/km 。

4.3 高地下水位农田（以江苏里下河地区为例）

(1) 环境特征：地下水位埋深 0.5-0.8m，雨季管槽长期积水；土壤为淤泥土（承载力 80kPa），存在轻微沉降。

(2) 材料选择方案：管道材料 DN400mmPE100 管（公称压力 0.8MPa），采用“热熔对接+支墩固定”方式，支墩间距 10m（C25 混凝土，尺寸 80cm×80cm×60cm）。基础处理管槽底部铺设 20cm 厚级配砂石（压实度 93%）+1 层土工布（渗透系数 10^{-3} m/s），防止管底淤陷。

5 农田供水工程管道材料选择的优化策略

5.1 基于全生命周期的选型决策体系

构建“环境适配性-技术可行性-经济合理性”三维决策模型，实现材料选择从“经验判断”向“数据驱动”转变。

(1) 环境适配性量化评估：建立农田环境特征指标体系，通过权重赋值（地质条件 30%、水文条件 25%、气候条件 25%、作物类型 20%）确定材料选择优先级。盐碱地土壤盐含量 >3% 时，PE100 管权重得分（85 分）显著高于钢管（45 分），成为最优选择；冻土区冻深 >1.0m 时，PE 管（柔韧性得分 90 分）优于混凝土管（刚性得分 50 分），配合保温层后综合得分提升至 95 分。通过该模型，某项目材料选型准确率从 70% 提升至 92%，避免因适配性不足导致的早期失效。

(2) 技术可行性验证方法：在工程选址区搭建 100m 试验段，采用候选材料（如 PE100 管与玻璃钢管）进行为期 1 年的埋地测试，监测接口密封性能（渗漏率）、材料力学衰减（环刚度损失率），某项目通

过试验淘汰了初期看好但实际抗腐蚀不足的玻璃钢管；利用有限元软件（如 ANSYS）模拟不同材料在极端条件下的表现（如 -30℃ 冻胀力作用下 PE 管的应力分布），提前预判结构风险，某冻土区项目通过模拟优化钢管壁厚从 5mm 增至 6mm，避免冻裂风险。

5.2 材料选择的技术创新路径

(1) 复合改性材料研发应用：钢塑复合管内层高密度聚乙烯（PE100）提供抗腐蚀性，外层镀锌钢（壁厚 3mm）提供强度，适用于高压（1.2MPa）且腐蚀性中等的区域，某项目使用该管材后，寿命较纯钢管延长 8 年；碳纤维增强 PE 管添加 5% 短切碳纤维（长度 5mm），使 PE 管环刚度从 8kN/m^2 提升至 12kN/m^2 ，同时保留柔韧性，适用于荷载大且沉降明显的农田道下方，变形率控制在 1% 以内。

(2) 接口密封技术升级：针对 PE 管，采用“阶梯式升温”工艺（从 160℃ 逐步升至 190℃），使接口熔接强度达管材本体的 95%，较传统恒温加热提升 15%；钢管采用“法兰+橡胶密封圈+防腐涂层”组合密封，橡胶圈选用氢化丁腈橡胶（耐温 -40℃-120℃），在高温农田区使用 5 年无老化渗漏。

6 结论

管道材料的物理性能（环刚度、柔韧性）、化学性能（抗腐蚀、耐老化）与环境因素（盐碱、冻胀、高水位）的匹配度，是决定系统寿命的核心因素；PE100 管在盐碱地、软土地等复杂环境中表现最优，系统寿命可达 15-20 年；防腐处理钢管适用于高压段，配合保温层可在冻土区长寿命运行；全生命周期成本分析显示，PE100 管的经济性优于传统材料，尤其在运维成本高的区域优势显著。

参考文献：

- [1] 郑勇,邢浩,郑伟.自来水管道工程施工中的新材料与新技术应用[J].中国建筑金属结构,2025,24(06):46-48
- [2] 王进国.给水管道工程设计中管道材料的选择[J].化学工程与装备,2021,(11):181-182+86.
- [3] 李倚可.长距离供水工程输水管道材料优化[J].中国高新科技,2020,(13):128-129.
- [4] 叶入恺,徐绍方.给水管道工程中管道材料的选择及应用[J].石化技术,2015,22(08):73.
- [5] 丁宝福.大口径 FRP 在晋江市供水工程的应用[J].中国资源综合利用,2009,27(05):11-13.