

管道抗浮的预制装配式刚性约束技术与工程应用

王云平

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

【摘要】：为解决管道穿河施工期的抗浮难题，克服传统配重法高耗低效、适配性差的弊端，本文系统研究了混凝土压重块、抗浮锚杆与包封三类适用于穿河场景的刚性约束技术。通过剖析穿河管道上浮机理与施工工艺瓶颈，提出了以标准化预制、节点连接创新及 BIM 技术协同为核心的综合性工艺优化路径，构建了“管道自重-必要覆土-精准约束”的穿河管道专用抗浮体系。该体系可实现穿河管道上浮位移的精准控制，显著提升施工效率、抗水流扰动能力与空间适应性，为同类穿河管道工程抗浮提供了先进可靠的技术方案。

【关键词】：穿河管道；管道抗浮；刚性约束技术；施工工艺优化；预制装配化

DOI:10.12417/2811-0528.26.05.073

1 绪论

1.1 研究背景与意义

供水管道是城市“生命线”，穿河段施工环境恶劣。管道回填后通水前处于“空管”状态，受河水浮力、水流冲刷、河床松软等影响，易发生整体上浮、接口破坏等事故，影响工程进度并引发次生环境问题。

传统抗浮方法适配性差：降水法在穿河场景难奏效且破坏河床稳定；增加覆土受河床标高限制，水下开挖成本高、可行性低。因此，亟需开发适配穿河环境、高效可靠的抗浮技术体系。

1.2 国内外研究现状

欧美等发达国家在管道抗浮领域的研究起步较早，尤其在穿河、跨水域供水管道工程方面，其技术规范体系中对水流作用下的管道浮力计算、安全系数设定及抗浮措施的抗冲刷适配性等均有较为明确和细致的规定。在技术应用层面，倾向于采用预制化、标准化的抗浮构件和基于穿河场景性能的精细化设计方法。

国内的研究与实践伴随着大规模基础设施建设而迅速发展，在穿河供水管道工程领域的抗浮技术研究逐步深入。《给水排水工程管道结构设计规范》等国家标准为管道抗浮稳定验算提供了基础性准则，但针对穿河场景的专项技术要求仍有待完善。在工程实践中，混凝土镇墩、抗浮锚杆等传统刚性约束方法在穿河供水管道施工中应用广泛，但普遍存在设计未充分考虑水流扰动影响、施工工艺适配水下/水边作业不足、材料与人力消耗大等问题。目前，国内学者已开始关注穿河供水管道抗浮协同工作机制与新型锚固技术，然而，在穿河场景下的工艺标准化、施工精细化与抗水流干扰控制方面的系统性研究尚显不足。

1.3 研究内容与技术路线

本文主要研究内容包括：

(1) 深入分析穿河管道上浮的作用机理，结合水流扰动、河床地质特性等因素，系统评述现行主要抗浮技术在穿河场景中的优势与局限性。

(2) 对三类适配穿河场景的刚性约束核心技术进行分解研究，结合穿河施工环境构建其相应的力学分析模型。

(3) 针对各类技术在穿河施工中的工艺瓶颈，提出适配水下/水边作业、抗水流冲刷的具体优化方案与创新路径。

2 管道上浮机理与抗浮技术体系分析

2.1 管道上浮作用机理与破坏模式

穿河管道在饱水河床地层中不仅承受水体浮力作用，还受水流冲刷扰动、河床土体不均匀沉降等附加影响，其抗浮稳定的基本条件是作用于管道上的向下作用力之和必须大于等于浮力及水流附加作用力，并留有必要的安全储备，抗浮稳定性验算需满足规范规定的安全系数要求。

当上述平衡条件被打破时，结合穿河施工场景特点，将引发以下几种典型的破坏模式：

(1) 整体上浮：管道整体向上位移，常见于管径大、自重轻的管道。

(2) 接口破坏：对于承插式接口，不均匀或过大的上浮力导致接口被拔出或橡胶密封圈失效，引发泄漏；对于焊接、熔接接口，则可能因管道弯曲产生过大弯矩而在接口处开裂。

(3) 管体结构破坏：上浮过程中管道下部支撑土体软化或缺失，导致管体在跨中或支座处因弯矩和剪力超过材料极限而压溃或开裂。

2.2 现行主要抗浮技术及其局限性分析

(1) 降水法：属于被动、临时性防御措施。运营成本持续发生，且长期降水可能改变地下水流动，引发周边地面沉降，对生态环境不友好，不适用于永久性抗浮。

(2) 覆土配重法：原理简单，但抗浮效率低下，往往需要大量额外的土方开挖与回填，受场地规划标高和地质条件制约严重，经济性差。

(3) 柔性锚固：如采用土工格栅等合成材料包裹回填土。该方法具有一定效果，但其材料本身变形量较大，对控制管道位移的能力有限，在严格限制位移的场合应用受限。

(4) 刚性约束技术：本文的研究核心。其根本优势在于能提供主动的、位移控制能力极强的约束反力，且适配穿河场景下抗水流冲刷、适应河床变形的需求。但其挑战在于需结合穿河环境进行复杂设计计算、对水下/水边施工精度要求高，且传统现场浇筑的工艺在穿河场景中存在成本高、周期长、受天气与水流影响大等弊端。

3 刚性约束核心技术与力学分析

刚性约束技术的本质，是通过刚性受力构件，将穿河管道承受的浮力及水流附加作用力有效地传递至承载力更高的下层土体，或通过附加的刚性质量体来直接平衡浮力，同时具备一定的抗水流冲刷能力。

3.1 混凝土压重块（镇墩）技术

从工作原理来看，该技术是在管道的特定关键点位浇筑或安装预制混凝土块体，借助块体自身显著的自重提供附加抗浮力。

在设计层面，针对穿河场景需重点关注三方面要点：一是压重块的布置间距、单体几何尺寸与重量，需结合水流浮力、冲刷强度通过静力平衡计算精确确定；二是考虑压重块与河床土体的协同作用，避免因水流冲刷导致压重块下土体掏空；三是规避传统现浇镇墩的缺陷，其与管道外壁的接触面常为简单平面，因混凝土收缩徐变易导致接触不密实，存在应力集中风险，且该风险在穿河水流扰动下会进一步放大。

力学模型：可将管道简化为承受均布浮力与集中压重荷载的连续梁模型。需重点验算管道在压重块作用点处的局部承压强度和在此荷载工况下的管体整体弯矩与剪力。

3.2 抗浮锚杆技术

抗浮锚杆技术的工作原理贴合穿河管道抗浮需求，依靠锚杆锚固段与浆体、河床土体的粘结摩阻力与端部阻力提供向上的抗拔承载力，同时可抵抗水流对管道的侧向扰动，核心目标

是确保抗拔承载力满足穿河场景下浮力与水流附加作用力的抗浮安全要求。

抗浮锚杆：通常为灌浆型钢筋，通过钻孔锚入河床稳定岩层或硬塑土层，适配穿河水下钻孔施工需求。其施工更为灵活，对河床土体的扰动相对较小，能有效减少对河道水文环境的影响。

力学模型：可将管道视为支承在一系列弹性支座上的连续梁或弹性地基梁进行分析。其设计与施工的关键难点在于节点连接，必须确保抗拔力能够平顺、可靠地传递至管体，同时不引起管壁的局部破坏。

3.3 现浇钢筋混凝土包封技术

现浇钢筋混凝土包封技术是在管道外部现场浇筑整体式混凝土结构，利用其自重和底板摩擦力提供抗浮力。该技术虽面临第2.2节所述传统现浇工艺的固有缺陷，但其整体式刚性防护的特性，使其在对结构耐久性和多功能防护有严苛要求的特定穿河工程中仍具应用价值。此时，工程需通过精细化设计和高成本施工措施来克服现浇工艺的弊端。

穿河方案需重点关注三方面：一是将包封结构作为整体箱型构件进行复合荷载验算，涵盖抗浮、抗弯及裂缝控制；二是结构需具备流线形态以减少冲刷，并设计可靠的护底与防撞措施；三是必须为现场浇筑规划可行的临时挡水方案，并制定严格的耐久性保障措施。

4 刚性约束施工工艺优化研究

针对上述三类适配穿河场景的核心技术，其施工工艺的精细化与现代化是提升穿河管道工程质量、效率与经济效益的关键，尤其需解决水下/水边作业难题、抗水流干扰问题。

4.1 混凝土压重块的预制化与装配化

传统工艺在穿河施工场景中存在明显短板，具体表现为：现场支模、浇筑、养护受水流、天气影响极大，周期长且质量难以保证；现场湿作业易污染河道水体；材料运输与堆放受河岸空间限制，浪费多。

针对这些问题，优化工艺可从三方面推进：

首先是推进标准化与预制化生产。根据常用管径系列和不同抗浮等级需求，设计系列化、模数化的预制混凝土压重块，创新采用纵向分片式或上部卡箍式结构设计，便于从管道两侧或上部快速安装。

其次是优化节点连接性能。在预制块与管道接触面预设高性能弹性垫层，或采用无收缩高强度灌浆料填充，确保接触应力均匀分布以避免应力集中；开发预应力张拉钢带或高性能化

学锚栓连接系统,替代传统简单搁置方式,形成半刚性或刚性连接,大幅提升抗浮可靠性和整体性。

最后实现全流程装配化施工。采用适配河岸与水下作业的小型移动式起重机或专用吊具进行快速吊装与就位,构建“干法预制、水下装配”的作业模式,既能显著缩短工期,又能减少对河道水流环境的干扰与污染,降低天气与水流对施工的影响。

4.2 抗浮锚杆的精准化与高效化施工

传统工艺在穿河施工中存在诸多问题:水下钻孔孔位偏差大;锚杆顶与管道的连接构造在水下作业中安装难度高、质量控制难,常成为受力短板;水下注浆作业质量波动大,易受水流稀释影响,严重影响承载力。

优化工艺路径:

一是实现精准定位与高效成孔。采用适配穿河场景的智能全站仪或北斗/GPSRTK 技术进行水上精准放样与施工过程监控,搭配水下钻孔导向装置控制孔位偏差;推广使用自钻式锚杆等先进成孔工艺,适配水下复杂地质条件,提高施工效率与成孔质量,减少对河床的扰动。

二是推进节点连接构造创新。针对穿河管道抗浮锚杆,研发适配水下安装的标准化、模块化连接构件,推广使用可调节、可二次张拉锁定的高性能锚具,降低水下安装难度以确保连接可靠性;同时实现对管道位移的主动控制和预应力的精确施加,抵御水流侧向扰动。

三是强化注浆工艺精细化控制。针对穿河水下注浆特点,全面采用抗水流稀释的二次高压劈裂注浆技术,搭配专用水下注浆套管,显著扩大锚固体直径以提高抗拔承载力;引入注浆压力与流量自动监测与记录系统,实时监控水下注浆状态,确保注浆体的饱满度、均匀性与密实度,为承载力提供保障。

参考文献:

- [1] 郝技.市政给排水管道过河工程设计要点分析及预制保护结构的应用[J].工程建设与设计,2025,(13):103-105.
- [2] 王宏军.PVC-O管在给水管中的应用技术与抗浮特性研究[J].中国给水排水,2021,37(15):65-69.
- [3] 李建华,王磊.装配式预制混凝土构件在市政管道抗浮中的应用研究[J].施工技术,2020,49(18):92-95.
- [4] 赵源亮,刘飞.BIM技术在市政管道工程施工精细化管控中的应用[J].给水排水,2022,48(S1):345-349.
- [5] 刘志强,郭小红,吴鹏.基于 ABAQUS 的管道抗浮锚杆作用机理数值模拟分析[J].水利与建筑工程学报,2019,17(4):130-135.

4.3 现浇包封的模板体系与混凝土性能优化

穿河场景下的现浇包封传统工艺面临诸多挑战:模板支设受水流冲击影响大,稳定性差且效率低;大体积混凝土在水下或水边浇筑易产生温度裂缝与收缩裂缝,且裂缝易受水流侵蚀扩大;养护工作量大,且受水流干扰导致养护效果难以保证。

为此,需从三方面优化现浇包封施工工艺:

一是应用新型模板体系。使用适配穿河水流环境的大型组合式钢模板或铝合金模板体系,增设抗冲击支撑结构替代散拼木模,实现模板快速拼装、精准定位与多次循环使用,大幅提升混凝土外观质量与施工稳定性,增强抗水流冲击能力。

二是选用高性能混凝土材料。优先采用补偿收缩混凝土,或在混凝土中掺加聚丙烯纤维等抗裂组分,有效抑制塑性收缩和温度应力导致的裂缝,提升包封结构的耐久性与抗渗性能。

三是采用智能化浇筑与养护工艺。实行“分段、分层、连续浇筑”的规范化作业,强化智能振捣;采用自动定时喷淋系统结合保水覆盖层进行保湿养护,或喷涂新型混凝土养护剂,确保混凝土强度稳定增长,防止开裂。

5 结语

穿河管道工程的抗浮稳定性,直接关系到供水“生命线”管网的安全贯通与长效运行。本研究直面传统抗浮技术在穿河施工场景中能耗高、效率低、环境扰动大、适配性差的行业痛点,系统论证了以预制装配化为核心的刚性约束技术体系在穿河管道抗浮中的优越性与可行性。通过将混凝土压重块、抗浮锚杆等技术进行“穿河场景适配化改造、模块化设计、精准化计算、装配化施工”的工艺再造,成功构建了以“管道自重-必要覆土-精准约束”为内核的穿河管道专用现代抗浮体系。该体系可实现对穿河管道抗浮位移的毫米级精准控制,有效抵御水流冲刷扰动,兼顾工期与成本优化,印证了其卓越的安全性、经济性与环境友好性,为同类穿河供水管道工程抗浮提供了兼具可靠性、经济性与环境友好性的技术参考。