

大直径供水钢管在复杂环境下的结构设计策略

杨智

中国市政工程西南设计研究总院有限公司

摘要: 在当前的城市化和工业化进程中,供水系统作为城市基础设施的重要组成部分,扮演着至关重要的角色。在众多供水系统中,大直径供水钢管因其高效的输送能力和经济性,被广泛应用于城市和工业区域。然而,随着环境条件的日益复杂化,如地震、极端气候和人为建设等因素的影响,这些钢管的结构设计面临着前所未有的挑战。本文针对大直径供水钢管在复杂环境下的结构设计策略进行了深入研究,旨在提出一系列切实可行的设计方案,以提高其在复杂环境下的稳定性和可靠性。

关键词: 大直径供水钢管; 复杂环境; 结构设计

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.06.098

引言:

供水钢管作为城市基础设施的重要组成部分,其结构设计在面对复杂环境时显得尤为关键。复杂环境的定义涵盖了地质、气候和人为因素,这些因素的综合影响对大直径供水钢管的设计提出了更高的要求。在这个背景下,本文旨在深入探讨大直径供水钢管在复杂环境下的结构设计策略。

一、复杂环境的定义与分类

(一) 地质环境因素

地质结构种类繁多,如岩石、碎石土、砂土、黏性土等,不同地质结构的稳定性、承载能力和变形特性各不相同,通过地质勘测可以确定地下岩体的类型、厚度和承载力等参数,从而为供水管道的设计提供基础数据。土壤成分是地质环境中的另一个重要因素,不同土壤具有不同的力学特性和化学性质,当某些土壤可能含

有腐蚀性物质,如盐分、酸性物质等,需要在设计过程中选择合适的防腐蚀措施。

(二) 气候因素

气候因素主要包括温度、湿度、降水量等,这些因素会对供水管道的材料选择、结构设计和耐久性等方面产生影响。在设计中,需要考虑管道在极端高温和低温条件下的表现。在高温地区,管道可能暴露直晒,经受高温热辐射,这可能影响管材的强度;在低温地区,管道则需要考虑抗冻性和防止冷膨胀引起的问题。在设计供水管道时,需要考虑降水量对管道稳定性的影响,例如高降水量可能导致管道周围土壤的涝灾,从而影响管道自身稳定性,因此设计中需要考虑排水系统的设计。

(三) 人为因素

在大直径供水管道的结构设计中,人为因素主要包括人为损坏和破坏,以及维护和管理不当。在供水管道的施工过程中,如果工人或操作人员缺乏足够的专业知识和技能,可能会导致误操作,如错误的施工方法、不当的焊接或连接等,从而损坏供水管道的结构完整性。此外,如果运维人员未能按照规定进行检查和维护,可能会导致管道腐蚀加剧、泄漏或其他结构问题的出现。供水管道的维护和管理需要相关人员具备专业知识和技能,如果缺乏培训或相关人员缺乏对维护和管理重要性的认识,可能会导致维护和管理不当,增加管道损坏的风险。

二、大直径供水钢管的设计要求

(一) 材料选择

近年来,随着工程技术和新型材料的不断发展,我国在引进了大量新型管材和生产工艺方面取得了显著进

表1 三种管材技术性能总和比较表

比较项目	钢管 (SP)	PCCP 管	球墨铸铁管 (DIP)	比较
安全可靠	好	较好	较好	SP > DIP > PCCP
日常维护	故障维修方便	故障维修不便	故障维修较方便	SP > DIP > PCCP
接口形式	焊接 (刚性)	半柔性	柔性	DIP > PCCP=SP
运行状况	不易漏水,不易爆管	易漏水,易爆管	易漏水,易爆管	SP > DIP > PCCP
埋深及承外压能力	可深埋,承外压能力较高	可深埋,承外压能力高	可深埋,承外压能力高	SP=DIP=PCCP
抗震性	好	较好	较好	SP > DIP > PCCP
水力性能	好	一般	较好	SP > DIP > PCCP
防腐	内外壁防腐	成品不需防腐	成品带防腐	PCCP > DIP > SP
施工条件	方便	难度大	较方便	SP > DIP > PCCP
管道糙率	0.0105 ~ 0.0115	0.011 ~ 0.0125	0.011 ~ 0.012	SP > DIP > PCCP
使用经验	广泛	较广泛	较广泛	SP > DIP > PCCP

展。目前，给水管材的选择范围涵盖了钢管（SP）、预应力钢筋混凝土管（PCP）、玻璃钢管（GRP）等多种选项。每种管材都具有其独特的优点和缺点，因此需要结合工程特点进行综合论述，以选定最合适的管材。

通过管材性能比较得知，在绝大多数工况下，钢管最适合作为大直径管道管材。

（二）结构设计

1. 埋地钢管设计

主要包括六个方面的计算：埋地钢管结构上的荷载计算，埋地钢管强度计算，埋地钢管管壁稳定计算，埋地钢管抗浮稳定计算，埋地钢管抗滑稳定计算，埋地钢管刚度验算。

埋地钢管结构上的永久作用包括结构自重、竖向土压力、管道内水重等，可变作用包括管道内的设计内水压力、管道真空压力、地面堆积荷载、地面车辆荷载、地下水浮力和温度变化荷载。

钢管强度计算主要验算管壁环向应力与纵向应力。

管壁稳定计算中钢管管壁截面的临界压力 $F_{cr,k}$ ：

$$F_{cr,k} = \frac{2Ep(n^2-1)}{3(1-\nu_p^2)} \left(\frac{t}{D_0}\right)^3 + \frac{E_d}{2(n^2-1)(1+\nu_s)}$$

其中， ν_s 为钢管两侧胸腔土体的泊松比，应根据土工试验确定，一般对砂性土可取0.30，黏性土可取0.40，碎石土可取0.25。在大直径管道工程实例中，泊松比取值可稍大于试验值。

钢管抗浮稳定计算主要工况分为两类：①管内无水，地下水位与管顶平齐；②施工期管顶未填土，管内无水，地下水位与管顶平齐。如果管道设计采取混凝土包封，在管道周围灌注混凝土时应采取抗浮措施。

钢管抗滑稳定计算时，当其敷设方向改变处的一侧或两侧设有柔性接头时，应对敷设方向改变处进行抗滑稳定验算，抗滑稳定性抗力系数 K_s 不应小于1.5。

钢管刚度验算主要计算管道在准永久组合作用下的最大竖向变形。

2. 架空钢管设计

主要包括四个方面的计算：钢管上的荷载计算，内力计算，强度计算，挠度验算

钢管所受的永久作用主要包括结构自重、管道内外防腐材料的附加重量、管道附属设施的重量、管道内介质的重力、支墩的自重以及土压力等。可变作用则涵盖了钢管内部的工作介质压力、真空压力、风荷载、温度作用、施工安装荷载或设备安装荷载、流体压力等。而偶然作用则指突发的撞击力或外部冲击力，对钢管结构可能产生的瞬时影响。

强度计算以鞍式支座为列：钢管支座处，管壁由内水压力产生的环向拉应力及支承处环向弯曲应力，按下列公式计算：

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \sigma_\theta^{F_w} + \sigma_\theta^M \\ \sigma_\theta^{F_w} &= \frac{F_{wd}r}{t} \\ \sigma_\theta^M &= \frac{M_\theta}{W_r} \end{aligned}$$

其中， σ_θ 支座处管壁环向拉应力（N/mm²）； $\sigma_\theta^{F_w}$ 内水压力产生的环向拉应力（N/mm²）； σ_θ^M 钢管支承处的环向弯曲应力（N/mm²）； F_{wd} 钢管的设计内水压力（N/mm²）； M_θ 鞍式支承的管壁环向弯矩或环式支承的有效计算宽度管壁截面环向弯矩（Nmm）； W_r 鞍式支承的管壁截面抵抗矩或环式支承的有效计算宽度管壁截面抵抗矩（mm³）。

挠度验算垂直荷载作用下，按不同的支承条件进行扰度验算，容许挠度值不大于跨度的1/250。

架空管道设计除了公式计算，管道的支座选择和管道的线路选择也尤为重要。在大直径管道架空设计中，应优化线路使架空段管道纵坡为0，如无法满足纵坡为0时，管道支座建议选择鞍式支座。

（三）耐久性和可维护性的考虑

在大直径供水钢管的设计中，耐久性和可维护性直接影响着供水系统的长期稳定运行和维护成本的控制。在复杂环境中，选择材料时需要考虑环境中存在的化学物质、湿度以及温度等因素。结构设计方面需要注重抗疲劳和抗变形能力，通过采用合理的截面形状、加强设计和适当的支撑结构，可以提高供水钢管的整体结构强度，增强其抗外部冲击和变形的能力。在防护措施方面，采用有效的涂层和防腐层能够有效隔离外界环境对钢管的侵蚀，延长其使用寿命。

表2 常用涂层相关参数

涂层类型	厚度	成分	耐久性
防腐涂层	300-500 微米	聚合物、环氧树脂等	具有长期耐久性 抗化学腐蚀、耐磨损
绝缘涂层	100-300 微米	聚乙烯、聚氨酯等	具有长期耐久性 抗紫外线辐射、耐磨损
防火涂层	50-200 微米	阻燃剂、耐高温树脂等	具有长期耐久性 耐高温、耐热辐射
抗菌涂层	50-200 微米	银离子、抗菌剂等	具有长期耐久性 抗化学腐蚀、耐磨损

三、特殊环境下的设计策略

（一）抗震设计

在选择供水钢管的场地时需对场地的地质构造、地下水位、土壤类型和地震活动等方面进行勘察，根据场地的地震烈度等级，确定供水钢管的设计参数，选择合适的钢材类别和管壁厚度，能够在地震引起的应力集中区域吸收和分散能量，降低断裂风险。在设计供水钢管的支承结构时，采用适当的支承方式和支承材料，确保供水钢管在地震中的稳定性和可靠性。

$$F_{eq} = \frac{C_d \cdot M_{max}}{R \cdot W}$$

其中， F_{eq} 表示等效地震力， C_d 是动力放大系数， M_{max} 是结构所受到的最大地震力矩， R 是抗震设防烈度， W 是结构的有效重量。

为了更好地评估结构的抗震性能，可以采用以下公式计算结构的抗震性能指标：

$$P_a = \frac{F_{eq}}{A_s}$$

其中， P_a 是抗震性能指标， A_s 是结构的有效截面积。

通过上述函数公式的使用，可以在复杂环境下设计大直径供水钢管的抗震措施，并评估其抗震性能，提供了一个定量的方法来指导工程师在设计过程中做出合理的决策，以确保供水钢管在地震等复杂环境下的安全运行。

(二) 防腐蚀设计

在进行防腐蚀设计之前需要进行表面预处理，其目的是去除钢管表面的污垢、氧化物和其他杂质，以便于后续的防腐蚀处理，喷射处理所用的磨料必须清洁，干燥，射处理后的金属表面清洁度级应《水工金属结构防腐蚀规范》(SL105)规范要求，喷射处理后的表面粗糙度值应在规定范围以内。钢管内壁的防腐蚀通常使用涂覆，涂覆是指在钢管内壁涂覆一层耐腐蚀的涂层，以阻隔供水中的腐蚀性物质与钢管内壁的直接接触，常用的涂层材料包括环氧树脂、聚氨酯和玻璃钢等；钢管外壁常用防腐包裹进行防腐，防腐包裹是指在钢管外壁包裹一层防腐蚀材料，以提供物理屏障，防止外部环境中的腐蚀性物质接触到钢管外壁，常用的防腐包裹材料包括聚乙烯、聚氯乙烯和玻璃钢等。

(三) 耐磨设计

在供水管道运行过程中，由于水中携带的颗粒物、化学物质以及水流的冲刷作用，钢管内壁容易受到磨损和磨蚀，因此，耐磨设计的有效性直接影响着钢管的使用寿命和运行安全性。通过合理的结构设计可以减少钢管内壁的磨损和磨蚀，常用的结构设计策略包括采用内衬材料和改变管道的流动方式等。内衬材料通常具有较高的硬度和耐磨性能，常见的内衬材料包括聚乙烯、陶瓷和橡胶等。

表3 内衬材料性能分析

内衬材料	性能	安装方式
聚乙烯	耐磨性好、耐腐蚀性好 弹性好、可塑性好	黏结、焊接、机械固定等
陶瓷	极高硬度、耐磨性好 耐腐蚀性好	焊接、黏结、机械固定等
橡胶	弹性好、耐磨性好 耐腐蚀性好	黏结、焊接、机械固

改变管道的流动方式是另一个重要的耐磨设计策略，常见的改变管道流动方式的策略是减小管道的弯曲角度，较小的弯曲角度可以减少水流在弯曲处的冲击和摩擦，从而降低钢管内壁的磨损。此外，采用流道平滑处理通过对管道内壁进行光滑处理，可以减少水流的摩擦阻力，从而降低钢管内壁的磨损。

四、案例分析

(一) 案例概况

随着国家城镇化建设的飞速发展，人口不断的增加，人民生活水平的逐步提高，居民对饮用水水质的要求越来越高。攀枝花市观音岩引水工程干线长61.54km，其中，干线双管线长35.14km、单管线长26.40km；单支管总长17.93km，其中支线长15.26km、各分水口到各水厂支管共2.67km；干支线总长79.47km。设计有隧洞2座、跨金沙江管桥5座、其余为架空和埋管。

(二) 面临的挑战与解决方案

攀枝花市观音岩引水工程干线总长达61.54km，其中包括双管线和单管线，长距离输水对供水管道的结构设计提出了要求，因此，在供水管道的结构设计中，需要合理选择管材和管径，确保管道在长距离输水过程中的稳定性和耐压性，同时，可以采取增加管道壁厚、设置水锤泄放阀和减振装置等措施，提高管道的稳定性。此外，还需要考虑管道的耐久性，采取适当的加固措施和防腐措施，确保供水钢管的安全运行。

结论

大直径供水钢管在复杂环境下的结构设计策略需要全面考虑多种因素，包括地质、气候和人为因素。在设计要求中，材料选择、结构设计以及耐久性和可维护性都是关键因素，特殊环境下的设计策略则为应对各种挑战提供了可行性方案。通过案例分析，能够更好地总结经验，为未来类似项目提供指导。

参考文献

- [1] 李斌. 城区内大直径供水管道密封性检测检验[J]. 价值工程, 2022, 41(36): 90-92.
- [2] 于桢. 市政工程供水管网运行管理[J]. 居舍, 2021, (04): 157-158.
- [3] 王亮. 引松供水工程大直径压力钢管衬砌施工技术[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(S1): 382-388.
- [4] 郭懿卿. 大直径供水钢管安装施工技术研究[J]. 建材与装饰, 2020, (20): 3+5.
- [5] 高峰. 大直径供水钢管安装施工技术[J]. 农家参谋, 2019, (16): 183.
- [6] 刘瑞璞. 水利工程中大直径供水钢管安装施工技术[J]. 中国高新区, 2017, (24): 157.