

PPSU-X600 文丘里管在深圳地铁深井降水的应用研究

彭兴强

中国中铁隧道局集团, 广东 深圳 518000

DOI:10.61369/EPTSM.2025080008

摘 要 : 深圳地铁建设常面临复杂的富水地层条件, 深井降水作为控制地下水位的核心技术, 其设备性能直接影响工程安全与效率。本文以 PPSU-X600 文丘里管为研究对象, 通过分析其材料特性与结构设计优势, 结合深圳地铁某线路区间隧道的深井降水工程实例, 探究该文丘里管在富水砂层、砾石层中的应用效果。研究采用现场监测与理论计算相结合的方法, 对比传统金属文丘里管, 重点分析 PPSU-X600 文丘里管在降水效率、能耗损失、抗腐蚀性能及运维成本方面的表现。结果表明: 在深圳富水地层条件下, PPSU-X600 文丘里管的水头损失较传统金属管降低 15% ~ 22%, 降水稳定周期缩短 1 ~ 2 天, 且抗地层水中氯离子腐蚀寿命延长 3 ~ 5 年, 综合运维成本降低 20% 以上。该研究为深圳地铁及类似富水地区地下工程的深井降水技术优化提供了实践参考。

关 键 词 : PPSU-X600 文丘里管; 深圳地铁; 深井降水; 富水地层; 降水效率; 抗腐蚀性

Application Study of PPSU-X600 Venturi Tube in Deep Well Dewatering of Shenzhen metro

Peng Xingqiang

China Railway Tunnel Group, Shenzhen, Guangdong 518000

Abstract : Shenzhen metro construction frequently encounters complex water-rich strata conditions. Deep well dewatering, as a core technology for controlling groundwater levels, directly impacts engineering safety and efficiency through equipment performance. This study focuses on PPSU-X600 Venturi tubes, analyzing their material characteristics and structural design advantages. Using a deep well dewatering project case from a Shenzhen metro tunnel section, we investigate the application effectiveness of these tubes in water-rich sand and gravel layers. Combining field monitoring with theoretical calculations, this research compares PPSU-X600 Venturi tubes with traditional metal counterparts, emphasizing their performance in dewatering efficiency, energy consumption loss, corrosion resistance, and operational costs. Results demonstrate that under Shenzhen's water-rich strata conditions, PPSU-X600 Venturi tubes reduce head loss by 15% ~22% compared to traditional metal tubes, shorten dewatering stability cycles by 1-2 days, extend chloride ion corrosion resistance in stratum water by 3-5 years, and lower overall operational costs by over 20%. This study provides practical references for optimizing deep well dewatering technologies in Shenzhen metro and similar water-rich regional underground projects.

Keywords : PPSU-X600 Venturi tube; Shenzhen metro; deep well dewatering; water-rich stratum; precipitation efficiency; corrosion resistance

引言

深圳作为我国南方沿海城市, 地质条件复杂多样, 地铁建设过程中频繁穿越富水砂层、砾石层及强风化岩层^[1]。地下水位过高易导致基坑突涌、管涌、周边地面沉降等工程风险, 因此深井降水技术成为深圳地铁施工中的关键环节^[2]。传统深井降水系统中多采用金属材质文丘里管, 但其水头损失大、抗腐蚀性能差、长期运维成本高, 尤其是在深圳沿海地区氯离子含量高的地层水中, 金属文丘里管的使用寿命大幅缩短, 频繁更换不仅增加工程成本, 而且会影响施工进度与安全^[3]。PPU 材质是高性能工程塑料, 其具有耐高温、抗腐蚀、力学强度高优点, 基于该材质研制的 PPSU-X600 文丘里管在结构设计上优化了收缩段与扩散段的角度参数, 理论上可以降低流体阻力, 提高降水效率。但目前实际应用于深圳地铁深井降水中的 PPSU-X600 文丘里管研究比较少, 其在复杂地层条件下的性能、适用范围及优化措施有待于进一步验证^[4]。本文结合深圳地铁 12 号线某区间隧道的深井降水工程, 通过现场试验与数据监测, 系统研究 PPSU-X600 文丘里管的应用效果, 目的是为解决深圳地铁深井降水技术瓶颈提供新的技术路径, 为类似富水地下工程的设备选型提供参考^[5]。

作者简介: 彭兴强 (1973-), 男, 汉族, 广东省乐昌市人, 学历: 大专, 职称: 特级技师, 研究方向: 电力。

一、PPSU-X600 文丘里管的技术特性分析

（一）材质性能优势

PPU-X600文丘里管采用的聚苯砜（PPSU）材质属芳香族聚醚砜类高分子材料，在分子结构上，刚性的苯环与柔性的醚键使材料具有优异的综合性能。通过实验室检测，该材质的拉伸强度可达85MPa，弯曲强度120MPa，在80℃的地层水环境中仍能保持90%以上的力学性能，能够满足深井降水系统中长期承压运行的需要。抗腐蚀性研究针对深圳地层水中常见的氯离子 Cl^- 、硫酸根离子 SO_4^{2-} ，分别进行6个月的浸泡试验^[9]。结果发现，在浓度为5000mg/L的氯离子溶液中，PPSU材质的质量损失率只有0.2%，远低于传统304不锈钢材质的1.8%；在浓度为3000mg/L的硫酸根离子溶液中，PPSU材质无明显腐蚀痕迹，而304不锈钢表面有明显的锈斑。这一特性，使它能适应深圳沿海地区高腐蚀性的地层水环境，从而大大延长设备的使用寿命。此外，PPSU材质也有良好的耐磨性与抗结垢性，地层水中的泥沙颗粒流入管内时，不易在管壁形成附着结垢，可以减少因管内堵塞而引起的降水效率下降问题，降低定期清管的运维工作量^[7]。

（二）结构设计优化

文丘里管的降水效率主要是由文丘里管的收缩段、喉部与扩散段的结构参数设计决定的。PPU-X600文丘里管是在传统文丘里管结构的基础上，采用流体力学仿真软件Fluent对文丘里管各段角度与长度进行优化。其中，收缩段的圆锥角设计为 21° ，较传统金属管的 15° 增大，可减少流体在收缩过程中的漩涡损失；喉部直径根据深圳地铁深井常用的 $\Phi 300\text{mm}$ 井管尺寸，设计为 $\Phi 80\text{mm}$ ，保证流体在喉部达到最佳流速，提升负压抽吸效果；扩散段采用双段角度设计，前段圆锥角为 8° ，后段为 12° ，通过梯度扩散可有效降低流体的动能损失，减少水头损失。通过数值模拟计算，在相同的进水量（ $50\text{m}^3/\text{h}$ ）条件下，PPSU-X600文丘里管的总水头损失为1.2m，较传统304不锈钢文丘里管的1.5m降低20%，较铸铁文丘里管的1.8m降低33.3%。结构设计的优化使得PPSU-X600文丘里管在流体力学性能上显著优于传统金属管，为提升深井降水效率奠定了结构基础^[9]。

二、深圳地铁深井降水工程背景与试验方案

（一）工程地质与水文地质条件

本次试验工程选取深圳地铁12号线某区间隧道，该隧道采用盾构法施工。根据地质勘察报告，该区间地层从上至下依次为素填土、粉质粘土、富水砂层、砾石层与强风化花岗岩。水文地质条件上，该区域存在两层地下水：第一层为潜水，主要赋存于素填土与粉质粘土层中；第二层为承压水，主要赋存于富水砂层与砾石层中，属于强透水地层^[9]。由于盾构施工前需将承压水位降至隧道开挖面以下一定深度，因此需采用深井降水系统对水位进行控制，以满足施工安全要求。该区间隧道所处地层条件对盾构施工影响显著，富水砂层与砾石层的强透水性，使得地下水易在施工过程中涌入作业面，不仅可能导致盾构机卡顿，还会增加

管涌、基坑变形等风险，威胁工程结构安全与周边环境稳定。而潜水层与承压水层的双层分布，进一步加大了水位控制难度，若仅采用常规降水手段，难以精准将承压水位稳定在安全范围。因此，针对该复杂地质与水文条件设计深井降水试验，不仅是保障本区间隧道盾构施工安全的关键，其研究成果还能为深圳地铁后续穿越类似地层的线路提供降水技术参考，助力解决富水强透水地层中降水效率与施工安全平衡的行业难题。

（二）试验方案设计

为对比PPSU-X600文丘里管与传统金属文丘里管的应用效果，在该区间隧道沿线设置降水井并分为两组，试验组采用PPSU-X600文丘里管，对照组采用传统304不锈钢文丘里管，两组降水井布置参数保持一致，包括降水井直径、井深及滤管段位置、抽水泵型号、文丘里管安装位置等。试验监测内容涵盖多方面：地下水位变化监测，通过在每组降水井周边设置观测孔，追踪水位相关动态；管内水头损失监测，借助在文丘里管进出口安装压力传感器实现；能耗监测，通过在抽水泵配电箱装电能表记录；设备腐蚀状况监测，在试验结束后拆除文丘里管观察并检测。试验周期分为两个阶段，前期监测水位下降过程，后期监测系统运行稳定性与能耗情况^[10]。

三、PPSU-X600 文丘里管的应用效果分析

（一）降水效率提升效果

降水阶段的水位监测数据显示，试验组（PPSU-X600文丘里管）的水位下降速率明显高于对照组（304不锈钢文丘里管）。试验初期（前7天），试验组平均水位下降速率为 0.8m/d ，对照组为 0.65m/d ，试验组较对照组提升23.1%；当水位降至目标埋深7.0m时，试验组平均耗时12天，对照组平均耗时14天，试验组降水稳定周期缩短14.3%。稳定降水阶段，试验组的水位波动范围较小，平均波动幅度为 $\pm 0.2\text{m}$ ，对照组为 $\pm 0.35\text{m}$ 。分析原因：一方面，PPSU-X600文丘里管的水头损失较小，抽水泵的有效扬程更高，对地下水的抽吸能力更强，能够快速响应水位变化；另一方面，PPSU材质的抗结垢性较好，管内未出现明显泥沙堆积，保证了水流通道的畅通，避免了因管内堵塞导致的降水效率波动。

（二）能耗与运维成本降低效果

能耗监测数据显示，在稳定降水阶段，试验组单井平均耗电量为 $8.5\text{kW}\cdot\text{h/d}$ ，对照组为 $10.6\text{kW}\cdot\text{h/d}$ ，试验组较对照组能耗降低19.8%。这一结果与文丘里管的水头损失特性直接相关：PPSU-X600文丘里管的水头损失更低，抽水泵无需额外消耗电能克服管内阻力，因此能耗显著降低。按该区间20口降水井运行6个月（180天）计算，采用PPSU-X600文丘里管可节省总耗电量为 $(10.6-8.5)\times 10\times 180=3780\text{kW}\cdot\text{h}$ ，按深圳工业用电单价 $0.8\text{元}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 计算，可节省电费约3024元。在运维成本方面，试验结束后对两组文丘里管进行检查：对照组304不锈钢文丘里管内壁出现明显腐蚀锈迹，局部壁厚从初始3mm减至2.2mm，需进行更换；试验组PPSU-X600文丘里管内壁无腐蚀、无结垢，

壁厚无明显变化，可继续使用。参考市场价格，单根304不锈钢文丘里管（Φ80mm）价格约800元，单根PPSU-X600文丘里管价格约1200元，但不锈钢管的使用寿命约2年，PPSU管的使用寿命约5年，按5年周期计算，不锈钢管的总更换成本为 $800 \times (5 \div 2) \times 10 = 20000$ 元，PPSU管的总成本为 $1200 \times 10 = 12000$ 元，PPSU管较不锈钢管节省运维成本40%。

（三）抗腐蚀性能表现

试验结束后，对两组文丘里管的腐蚀状况进行检测，结果如下：对照组304不锈钢文丘里管内壁的腐蚀速率为0.4mm/年，局部出现点蚀现象，腐蚀产物主要为 Fe_2O_3 与 $\text{FeO}(\text{OH})$ ，这是由于地层水中的氯离子穿透不锈钢表面的钝化膜，引发局部腐蚀；试验组PPSU-X600文丘里管内壁无任何腐蚀痕迹，通过能谱分析（EDS），管壁表面未检测到氯离子吸附，说明PPSU材质对氯离子具有良好的阻隔性，不会发生电化学腐蚀反应。此外，在砾石层段，由于地层水中含有较多棱角状砾石颗粒，对照组不锈钢管内壁出现明显划痕与磨损，而试验组PPSU管内壁的磨损深度仅为0.1mm，远低于不锈钢管的0.3mm，表明PPSU材质的耐磨性也优于传统金属材质，进一步延长了设备的使用寿命。

四、应用过程中的问题与优化措施

（一）存在的问题

在试验过程中，PPSU-X600文丘里管也暴露出一些问题：1低温脆性问题：在深圳冬季极端低温天气（最低温度5℃）时，部分PPSU文丘里管喉部有轻微开裂现象，虽不影响正常使用，但存在安全隐患。分析原因：PPSU材质玻璃化转变温度约为220℃，但低温下材料冲击韧性下降，管内水流较快时，喉部受到的冲击力增大，易出现脆性开裂；2连接密封性问题：PPSU文丘里管与金属输水管的连接采用橡胶密封圈密封，在长期运行过程中，部分接口出现渗漏现象，渗漏量约0.5m³/d，主要原因是

PPSU材质与金属材质的热膨胀系数不同。

（二）优化措施

将5%的弹性体，如聚醚醚酮PEEK添加在PPSU原料中，通过共混改性，提高材料的低温冲击韧性。实验室测试表明，改性后的PPSU材质在-10℃时的冲击强度从原来的6kJ/m²提升至10kJ/m²，可有效解决低温脆性问题；②连接结构优化：将传统的橡胶密封圈密封改为“金属卡箍+柔性密封垫”的连接方式，柔性密封垫采用耐老化的三元乙丙橡胶（EPDM），并在密封垫内侧设置止水肋条，增强密封性能。同时，在PPSU文丘里管与金属管的连接部位设置温度补偿段，采用波纹管结构，抵消两者因热膨胀系数差异产生的伸缩量，避免接口渗漏。

五、结论

本文通过深圳地铁12号线某区间隧道的深井降水工程试验，系统研究PPSU-X600文丘里管的应用效果后得出结论：该文丘里管材质性能优异，在深圳富水高腐蚀地层中，抗氯离子腐蚀性能远优于传统304不锈钢文丘里管，使用寿命大幅延长，且具备良好的耐磨性与抗结垢性，能减少运维工作量；其结构设计优化后，水头损失明显降低，降水效率显著提升，降水稳定周期缩短，能耗减少，长期运行可大幅节省工程成本；针对应用中出现的低温脆性与连接密封性问题，通过材质改性与连接结构优化，可进一步提升其运行稳定性，满足深圳地铁复杂地质条件下的深井降水需求。未来可从多方面深化该文丘里管应用研究：针对深圳不同区域地质差异，开展适应性研究并优化设备参数；结合智能监测技术开发实时监测系统，实现故障预警与智能运维；探索PPSU材质与其他高性能材料的复合应用，提升其力学性能与耐候性，拓展在更深埋深、更复杂地层条件下的应用范围。

参考文献

- [1] 秦圣权. 同轴深井埋管在合肥某大型住宅小区中的应用[J]. 工程技术研究, 2019, 4 (24): 52-53.
- [2] 李循迹, 赵密锋, 周理志, 常泽亮, 陈博. 深井阳极地床设计和施工中的关键问题[J]. 腐蚀与防护, 2016, 37 (10): 852-854+864.
- [3] 周鹏遥, 杨向同, 刘洪涛, 周怀光, 巴旦, 于东兵. 连续管在塔里木油田高温高压深井复杂作业的应用[J]. 钻采工艺, 2016, 39 (02): 116-118.
- [4] 胡彪, 何世明, 刘爱民, 王欢. 实体膨胀管在封隔深井侧钻并复杂泥岩段的应用[J]. 石油矿场机械, 2014, 43 (06): 84-88.
- [5] 崔亚凡, 董学琪. 钢塑复合管在深井扬水系统中的应用[J]. 铁道劳动安全卫生与环保, 2004, (05): 239-240.
- [6] 孙静佳. 浅谈无砂砼管在深井管井降水的应用及造价的确定[J]. 广东建材, 2003, (08): 51-52.
- [7] 江杰才, 崔建建, 陆鹏举. 塑料导爆管在延深井施工中的应用[J]. 煤炭技术, 2001, (12): 25-26.
- [8] 塑料井管在深井中的应用[J]. 勘察技术资料, 1974, (06): 36-39+75.
- [9] 魏明. 富水地层基坑分级轻型井点降水工法应用与效益研究[J]. 黑龙江水利科技, 2025(7): 2-26.
- [10] 潘宇强. 软土地区超大深基坑土方开挖及支护技术分析[J]. 安徽建筑, 2025(5): 5-6.