

市政道路行车路面井盖设施病害与防控分析

左立波

石家庄市排水管护中心, 河北 石家庄 050000

[摘要]市政道路井盖是重要的交通基础设施,其病害与道路通行安全、使用寿命存在直接影响,为此及时识别市政道路行车路面井盖设施病害并采取相应的防控措施,对于保障市政道路行车安全具有重要意义。常见的市政道路行车路面井盖设施病害类型包括结构性破损、功能性缺陷、周边路面病害。材料选型与结构优化技术、施工工艺标准化控制、运维监测智能化技术均为常用的市政道路行车路面井盖设施病害防控技术。以A项目为例,对市政道路行车路面井盖设施病害与防控进行量化分析,充分说明井盖设施病害防控对于保障市政道路行车路面质量的作用。

[关键词]市政道路; 井盖病害; 防控技术

DOI: 10.33142/aem.v7i6.17020

中图分类号: U412

文献标识码: A

Analysis of Disease Prevention and Control of Road Surface Manhole Cover Facilities on Municipal Roads

ZUO Libo

Shijiazhuang Drainage and Protection Center, Shijiazhuang, Hebei, 050000, China

Abstract: Municipal road manhole covers are important transportation infrastructure, and their diseases have a direct impact on road traffic safety and service life. Therefore, timely identification of diseases in municipal road manhole cover facilities and corresponding prevention and control measures are of great significance for ensuring the safety of municipal road driving. Common types of damage to municipal road manhole covers include structural damage, functional defects, and surrounding road surface diseases. Material selection and structural optimization techniques, standardized construction process control, and intelligent operation and maintenance monitoring techniques are commonly used for disease prevention and control of municipal road manhole cover facilities. Taking Project A as an example, a quantitative analysis is conducted on the diseases and prevention of manhole cover facilities on municipal road surfaces, fully demonstrating the role of manhole cover facility disease prevention and control in ensuring the quality of municipal road surfaces.

Keywords: municipal roads; manhole cover disease; prevention and control technology

引言

城市交通网络运行效率与基础设施协同性能存在直接关系,井盖设施作为市政路面基础设施,当其发生病害后,会增加形成安全隐患、降低市政道路使用寿命。重型车辆荷载反复作用、材料性能衰减、施工工艺缺陷,是引起结构性破损、功能性缺陷、周边路面破损等井盖病害问题的主要原因。深度融合材料升级、施工标准化、智能化运维,可构建全周期防控体系,以此及时发现市政道路行车路面井盖设施病害并有效防控,展现出高度的应用价值。

1 市政道路行车路面井盖设施病害类型

1.1 结构性破损

结构性破损对井盖设施存在直接性的安全隐患,主要表现为井盖本体裂纹、井圈断裂、井座混凝土碎裂,其中井盖本体判定标准为裂纹长度 $\geq 50\text{mm}$ 。南京玄武大道的检测发现,球墨铸铁井盖因长期承受重载车辆冲击,62%的裂纹呈现径向分布,从中心向边缘延伸,最深裂纹12mm,导致井盖承载能力从设计的400kN下降至280kN,无法满足主干道100kN的瞬时荷载要求。不同的复合井

盖材料抗疲劳性能存在差异,38%的破损呈现环向断裂特征,如苏州干将路采用的玻璃纤维增强塑料井盖,在通车2年后出现周长3/4的环向裂缝,裂缝宽度最大值为8mm,承载测试数据显示当荷载达到150kN即发生断裂。

不同材质的破损速率存在显著差异,球墨铸铁井盖平均在通车5年后出现结构性破损,复合井盖破损时间提前至3年,混凝土井座受到碳化作用影响,在湿度较大的环境中,其表层在2年内发生剥落,剥落面积 0.05m^2 ,对整体结构稳定性造成严重影响。

1.2 功能性缺陷

尽管功能性缺陷不会直接造成井盖结构失效,但是会显著降低道路整体质量,会产生问题包括间隙超标、沉降、密封失效。井盖与井圈间隙 $\geq 5\text{mm}$ 的情况下,车辆驶过时会产生200~500Hz的跳动异响。深圳深南大道噪声监测数据显示,此类异响最大值为78dB,远超道路环境噪声限值60dB,对沿线居民造成持续性干扰^[1]。井盖安装时未进行精准校准是间隙超标的主要原因,北京西长安街检测数据显示,80%的间隙超标位置集中在井盖的

1/4 周长范围内, 间隙最大值为 12mm, 导致井盖边缘局部发生磨损, 磨损最大深度达到 3mm。

1.3 周边路面病害

周边路面病害是井盖设施与道路结构协同作用失效的直观体现, 通常集中在井盖周边 2m 范围内, 主要包括龟裂、沉陷、沥青面层推移。周边路面病害龟裂缝宽 $\geq 3\text{mm}$, 济南经十路检测数据显示, 60%的龟裂呈现从井盖边缘向四周扩散的放射状, 裂缝最大长度为 1.5m、缝宽深度最大值为 5mm, 破损区域面积最大值为 0.8m^2 。井盖与路面的刚度差异是导致此类龟裂形成的主要原因, 车辆荷载作用的应力集中系数达到 1.8, 远超路面材料的疲劳极限。

2 市政道路行车路面井盖设施病害防控技术

2.1 材料选型与结构优化技术

在明确不同病害类型匹配性能参数的基础上开展材料选型, 优先选用 QT500-7 材质的球墨铸铁井盖, 其抗拉强度 $\geq 500\text{MPa}$ 、延伸率 $\geq 7\%$, 相比传统灰铸铁(抗拉强度 300MPa)抗疲劳性能提升 67%。南京玄武大道改造过程中, 该材质井盖经 200 万次荷载循环试验后未出现裂纹, 变形量仅为 1.2mm ^[2]。井圈内置厚度为 6mm 的 $160\text{Si}_2\text{Mn}$ 弹簧钢圈, 弹性模量 206GPa , 控制压缩量最小值为 5mm、最大值为 8mm, 可吸收 60%的瞬时冲击荷载, 使井盖与井圈的接触磨损量显著下降。

2.2 施工工艺标准化控制

井周回填使用“级配砂石+分层压实”工艺, 选用粒径 5~31.5mm 的连续级配砂石, 不均匀系数 $C_u=5\sim 10$ 、曲率系数 $C_c=1\sim 3$, 严格控制每层虚铺厚度 200mm, 采用 2.5kW 平板振动器(振幅 1.5mm, 频率 50Hz)碾压 3 遍, 碾压速度 $\leq 1\text{m/min}$ 。济南经十路施工过程中, 使用“级配砂石+分层压实”工艺进行井周回填, 压实度实测数据显示为 96.5%, 相比规范要求提高 1.5 个百分点, 控制 3 年内沉降量 $< 5\text{mm}$ 。

采用激光制导井盖升降调节装置(精度 $\pm 1\text{mm}$)开展沥青面层施工, 以路面高程为基准, 通过螺旋微调机构控制井盖顶面高差 $\leq 3\text{mm}$ ^[3]。深圳深南大道在沥青面层施工过程中使用激光制导井盖升降调节装置, 井盖平整度合格率从 72%升至 98%。采用 3t 小型压路机碾压周边 500mm 范围, 碾压温度保持 $160\sim 170^\circ\text{C}$, 先静碾 1 遍, 再振碾 3 遍, 碾压速度 $2\sim 3\text{km/h}$, 确保沥青混合料与井盖边缘紧密贴合。西安未央路检测数据显示, 该区域沥青密度为 2.45g/cm^3 , 相比人工夯实提高 0.08g/cm^3 , 抗渗性能提升 30%。

采用 M10 水泥砂浆(28d 抗压强度 $\geq 10\text{MPa}$)检查井砌筑, 使用 MU15 混凝土实心砖, 灰缝宽度 8~12mm, 采用“三一砌筑法”(一铲灰、一块砖、一揉压)确保满浆率 100%。武汉解放大道抽检数据显示, 灰缝饱满度从传统工艺的 82%升至 99%, 有效防止雨水渗入基层^[4]。在井壁与井座连接部位设置宽度为 300mm 的防水加强层

(涂刷厚度为 2mm 的聚氨酯防水涂料), 转角处附加宽度为 50mm 的胎体增强材料, 可显著降低井周渗水率。

2.3 运维监测智能化技术

智能监测系统采用“传感器+云平台”架构, 在井盖底部安装三轴加速度传感器(测量范围 $\pm 2\text{g}$, 精度 $\pm 0.01\text{g}$)和倾角传感器(测量范围 $\pm 10^\circ$, 精度 $\pm 0.1^\circ$), 实时采集振动频率(20~500Hz)和倾斜角度, 通过 NB-IoT 网络(传输间隔 5min)将采集数据上传至管理平台, 当沉降量 $\geq 8\text{mm}$ 或倾斜角 $\geq 3^\circ$ 时, 系统自动推送预警信息至管理人员终端, 可显著缩短病害发现时间^[5]。

定期巡检执行“15d/次”周期制度, 采用 3m 直尺(精度 $\pm 0.5\text{mm}$)对井盖高差进行检测, 每井检测 4 个方位(东西南北各 1 点), 取最大值作为评定依据; 探地雷达(1GHz 天线, 扫描速度 5km/h)沿井周 2m 范围进行扫描, 可识别 $\geq 50\text{mm}$ 的脱空区域。上海浦东新区运用“15d/次”周期制度开展定期巡检, 发现脱空区 32 处, 及时率 100%。采用双液注浆工艺(水泥浆与水玻璃体积比 1:0.3)进行脱空修复, 注浆压力 $0.3\sim 0.5\text{MPa}$, 梅花形布置(孔距 500mm, 深度 1.5m)注浆孔, 控制单孔注浆量最小值为 5L、最大值为 8L。西安未央路采用双液注浆工艺完成脱空修复后, 脱空区承载力从 1.2MPa 提升至 2.5MPa , 与周边基层差异 $\leq 0.3\text{MPa}$ 。

建立“病害-处置”关联数据库, 对不同病害的最佳修复时机进行记录, 如采用环氧树脂灌缝(灌注压力 0.2MPa , 固化时间 24h)修复长度 $\geq 50\text{mm}$ 的裂缝, 强度恢复率 95%; 沉降量 $10\sim 20\text{mm}$ 的情况下, 采用液压顶升复位(顶升速度 5mm/min , 分级加载), 复位精度 $\pm 1\text{mm}$ 。成都天府大道在“病害-处置”关联数据库支持下, 每年每公里井盖维修次数从 5 次降至 1.8 次, 养护成本降低 64%, 同时延长井盖平均更换周期至 8 年, 相比传统模式提升 60%。

3 市政道路行车路面井盖设施病害与防控—以 A 项目为例

3.1 项目概况

A 项目为西安市北三环路, 全长 18.6km, 为城市快速路, 设计时速 80km/h , 双向 8 车道, 路面结构为 4cm 细粒式沥青混凝土(AC-13C)+6cm 中粒式沥青混凝土(AC-20C)+8cm 粗粒式沥青混凝土(AC-25C)+36cm 水泥稳定碎石基层。项目包括各类检查井 628 座, 其中雨水井 312 座、污水井 205 座、电力井 111 座, 井盖直径 700mm, 原施工采用灰铸铁井盖(HT200)、C30 混凝土井座, 2019 年通车后因交通荷载密集(日均车流量 4.2 万辆, 其中重型货车占比 35%), 2021 年检测显示 85%的井盖存在不同程度病害, 成为道路养护重点难点。2022 年采用 EPC 模式进行专项整治, 应用材料优化、工艺升级及智能监测技术, 使病害发生率显著下降。

3.2 病害分析与防控实践

3.2.1 病害成因精准诊断

通过现场检测与实验室分析,发现三类主要病害的成因机制。

(1) 结构性破损。58%的灰铸铁井盖出现径向裂纹(最长120mm),材质检测结果显示其抗拉强度为280MPa,低于设计值300MPa,且存在石墨形态不合格(片状石墨占比25%)的问题,导致疲劳强度不足;32%的C30混凝土井座出现碎裂,碳化深度为3.5mm,氯离子含量0.3%,远超0.1%的限值,判定为碳化与钢筋锈蚀共同作用结果。

(2) 功能性缺陷。井盖沉降(平均高差18mm)主要原因是井周回填土压实度不足,实测数据显示为86%(规范 $\geq 95\%$),且采用素土回填(液限32%,塑限18%),在水荷载作用下发生固结沉降;65%的井盖与井圈间隙最小值为8、最大值为15mm,安装过程中未进行高差校准,且未使用弹性缓冲装置,导致车辆驶过时产生持续冲击。周边路面病害表现为井周边5m范围内龟裂(缝宽3~8mm),探地雷达扫描显示82%的区域存在脱空层,最小值为50、最大值为120mm,判定为荷载应力集中造成的疲劳破坏。

3.2.2 针对性防控技术应用

采用梯度升级作为材料替换方案:主干道井盖全部更换为QT500-7球墨铸铁材质(抗拉强度520MPa),井圈内置厚度为6mm的60Si₂Mn弹簧钢圈,通过8个M16螺栓与井座刚性连接,使承载等级提升至D400级;混凝土井座改为C40预制件(配筋率1.2%),底部涂刷环氧树脂粘结剂(涂覆量0.5kg/m²),与基层黏接强度达到2.8MPa。在K8+300-K10+500段试点应用后,经100万次荷载试验,井盖变形量 ≤ 1.5 mm,未产生裂纹。

3.2.3 施工工艺

施工过程中实施三步管控法:井周回填采用5~31.5mm级配砂石($C_u=6.5$, $C_c=1.8$),分层摊铺(200mm/层),使用2.5kW平板振动器(振幅1.5mm)碾压4遍,最后采用液压夯实机(冲击力300kN)补强,压实度达到97.2%;沥青面层施工过程中,采用激光制导升降装置校准井盖高程,确保高差 ≤ 3 mm,周边500mm范围用3t压路机(碾压温度165℃)碾压5遍,形成密贴过渡带;检查井砌筑采用MU15混凝土砖与M10水泥砂浆,灰缝满浆率100%,外壁涂刷厚度为2mm的聚氨酯防水涂料(延伸率300%),以此阻断渗水路径。

3.2.4 部署智能监测系统

A项目全覆盖部署智能监测系统:每座井盖安装NB-IoT传感器(监测范围0~50mm,精度 ± 0.1 mm),实时采集沉降量、振动频率(20~500Hz)与倾斜角度,数据传输至本市智慧市政平台,设定预警阈值为8mm;每月使用1GHz探地雷达扫描井周2m范围,采用双液注浆(水泥浆:水玻璃=1:0.3,压力0.4MPa)修复 ≥ 50 mm

的脱空区进行,控制单孔注浆量为6-8L,确保填充密实。建立“15天巡检+季度评估”机制,采用3m直尺与激光平整度仪组合进行检测,以此构成病害处置闭环。

3.2.5 特殊路段强化

A项目采用“井盖-井圈-基层”一体化加固技术对重型货车集中的K5+000-K6+200段(日均重型货车1.2万辆)进行强化处理:增加井盖厚度至100mm(常规80mm),井圈外侧设置宽度为300mm的C40混凝土扩大基础(内配 $\Phi 16$ 钢筋网片),基础埋深1.2m,与道路基层刚性连接;井周2m范围沥青面层掺入0.3%聚酯纤维(长度12mm),动稳定度提升至3800次/mm,抗车辙能力增强27%。对该段进行持续1年观测,控制井盖高差 < 5 mm,无明显推移现象。

对于地下水位较高的K12+300-K13+100段(地下水埋深1.5m)开展施密封性能升级:为井盖与井圈接触面安装三元乙丙橡胶密封圈(截面尺寸20mm $\times$ 15mm,硬度60 Shore A),控制压缩量30%~50%;井座底部设置环形排水盲沟(直径100mm,坡度2%),接入雨水管道,将渗水率从0.8m³/d降至0.1m³/d,有效保护基层土基。

3.3 效果分析

表1所示为项目整治前后井盖设施病害指标对比,通过对表1进行分析发现,A项目各项病害指标均得到显著改善,结构性破损率从整治前的58%下降至8%,其中球墨铸铁井盖的裂纹发生率下降92%,验证材质升级的有效性;功能性缺陷中,井盖沉降平均高差从18mm下降至4mm,间隙超标率从65%降至9%,说明施工工艺标准化可有效提升功能稳定性;周边路面病害修复率为96%,龟裂与沉陷基本消除,探地雷达检测显示脱空区面积占比从82%降至7%,说明综合防控技术性成完整的病害治理体系。

表1 项目整治前后井盖设施病害指标对比

病害类型	整治前(2021年)	整治后(2023年)	改善幅度
结构性破损率	58%	8%	-50个百分点
井盖平均高差	18mm	4mm	-14mm
间隙超标率(≥ 5 mm)	65%	9%	-56个百分点
周边路面病害面积占比	32%	2%	-30个百分点
年均维修次数(次/公里)	8.6	1.2	-7.4

表2所示为项目防控技术经济效益分析表,通过对表2进行分析发现,前期投入的整治费用(1280万元)主要用于材料更换(720万元)、智能系统部署(260万元)、施工改造(300万元),成本回收时间控制在 < 1.5 年。因病害减少节约养护费用节约480万元/年,车辆通行效率提升(平均时速从52km/h升至65km/h)带来的社会效益960万元/年,同时有效避免因井盖病害造成的交通

事故赔偿（预估 300 万元/年），投入产出比达 1：1.35。

表 2 项目防控技术经济效益

指标名称	数值
总整治投入	1280 万元
年均节约养护费用	480 万元
年均社会经济效益	960 万元
年均事故赔偿避免额	300 万元
成本回收期	1.5 年
投入产出比	1:1.35
技术推广应用次数	5 次

4 结束语

市政道路井盖设施病害防控过程中，应当兼顾创新性与实践性，通过材料性能优化、施工工艺标准化、智能监测技术集成应用，可有效降低病害发生率、提升养护效率。未来在开展相关研究过程中，应进一步深入推进新型材料

研发与数字孪生技术融合，基于全生命周期建立预警模型，为市政道路行车路面井盖设施病害高效与防控提供支持。

【参考文献】

- [1]查旭东,睦子凡,张浚轩,等.道路窨井盖-井周路面的病害处治与智慧检测监管综述[J].中国公路学报,2024,37(12):357-380.
 - [2]史瑞迪,温艳华,胡圣泉,等.基于龙芯 2K1000LA 的窨井盖监测系统设计与实现[J].物联网技术,2024,14(8):11-14.
 - [3]汪海波,吴亚晖,汤起顺.数据可视化视角下城市窨井盖 GIS 管理系统界面设计[J].工业设计,2023(8):115-118.
 - [4]刘新源.一种井盖缺失现场警示监测的终端系统设计[J].技术与市场,2023,30(5):23-25.
 - [5]安珊,李启龙,汪海波.基于情境感知的雨污井盖智能服务系统设计[J].工业设计,2023(3):106-108.
- 作者简介：左立波（1979.12—），男，本科，所学专业：建筑工程施工，单位：石家庄市排水管护中心，工程师。