

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.20.007

给水用球墨铸铁管全生命周期成本分析方法研究

刘云帆¹, 易拓新², 施超超³, 梁东博¹

(1. 中国城市建设研究院有限公司, 北京 100120; 2. 新兴际华医药控股有限公司, 北京 100120; 3. 聚联智汇水务科技有限公司, 北京 100120)

摘要: 球墨铸铁管在国内供水工程中应用广泛。基于我国球墨铸铁管工程应用资料,参考国际标准 *Life Cycle Analysis and Recycling of Ductile Iron Pipes for Water Applications* (ISO 21053:2019),提出适用于我国的给水用球墨铸铁管全生命周期成本(LCC)分析方法,明确LCC计算中采购成本、运行成本、管网渗漏及事故修理成本和寿命终止成本等部分的计算过程和关键参数,以提高球墨铸铁管LCC计算的科学性和可信度,为其他供水管材进行LCC计算提供参考。

关键词: 给水工程; 球墨铸铁管; 全生命周期成本; 成本管理

中图分类号: TU991 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)20-0048-05

Study on Whole Life Cycle Cost Analysis Method of Ductile Iron Pipe for Water Supply

LIU Yun-fan¹, YI Tuo-xin², SHI Chao-chao³, LIANG Dong-bo¹

(1. China Urban Construction Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100120, China;
2. Xinxing Cathay International Pharmaceutical Co. Ltd., Beijing 100120, China; 3. Julian Zhihui Water Technology Co. Ltd., Beijing 100120, China)

Abstract: Ductile iron pipes are widely used in domestic water supply projects. Referencing the international standard for the *Life Cycle Analysis and Recycling of Ductile Iron Pipes for Water Applications* (ISO 21053:2019), the whole life cycle cost (LCC) of ductile iron pipe for water supply is proposed. Based on application data from ductile iron pipe engineering projects in China, the calculation methods and key parameters of procurement cost, operation cost, network leakage and accident repair cost, and end-of-life cost within LCC calculation are clarified, so as to enhance the scientific accuracy and reliability of LCC calculations for ductile iron pipes, and provides reference for LCC calculation of other types of water supply pipe.

Key words: water supply engineering; ductile iron pipe; whole life cycle cost; cost management

球墨铸铁管是当前我国供水工程中常用的管材之一,该管材由添加球化剂的铸造铁水高速离心铸造而成,其耐腐蚀性好、强度高、韧性好,具有良好的可挠性和伸缩性,能够吸收因地基沉降而产生的压力,避免管道破裂,而且施工工艺简单、施工速度快、使用寿命长。然而,大口径球墨铸铁管价格

昂贵,一次投资成本较高,一定程度上限制了其更大范围的推广使用。如果从管材的全生命周期成本(Whole Life Cycle Cost, LCC)角度分析,球墨铸铁管与供水工程中常用的钢管及PCCP管相比仍具有明显的经济和质量优势^[1-2]。当前,国内对给水管材全生命周期成本的研究较少,对给水管道全生命周

期成本的计算尚未形成统一的认识,相关标准尚属空白。

以我国球墨铸铁管在给水工程中实际应用的情况为基础,梳理分析后给出适合我国使用的球墨铸铁管采购成本、运行成本、维护成本、寿命终止成本或收入的计算方法,明确给水用球墨铸铁管全生命周期成本的计算方法,确保计算结果的准确性和可对比性,便于决策人员合理判断。该研究可为开展各类供水管材全生命周期成本分析计算及标准化工作奠定基础。

1 全生命周期成本的计算方法

1.1 成本构成

全生命周期成本应包括运行成本(如泵运行的电力使用成本)、维护成本(如泄漏成本)和寿命终止成本或收入的总和。根据 ISO 21053:2019,全生命周期成本应按下式计算:

$$C_L = C_A + C_O + C_M + C_E \quad (1)$$

式中: C_L 为全生命周期成本; C_A 为采购成本,包括管材成本、施工成本和设计/测量成本; C_O 为运行成本,包括泵送成本、设备租金、人工费用等; C_M 为维护成本,包括渗漏成本、事故修理费、巡检成本、检测成本等; C_E 为寿命结束时的成本或收入,包括处理成本和回收的收益。

1.2 计算方法

计算给水用球墨铸铁管全生命周期成本时,应采用折现率将未来成本转换为现值。如果评估期不等于使用寿命的倍数,则应将剩余价值从寿命周期成本中扣除。当分析周期小于使用寿命时,应按下式计算给水用球墨铸铁管生命周期成本:

$$C_L = C_A + \sum_{t=1}^{t_n} \frac{C_{O,t} + C_{M,t}}{(1+r)^t} - \frac{C_A(t_m - t_n)}{t_m(1+r)^{t_n}} \quad (2)$$

式中: t 为运行时间; t_n 为分析周期; t_m 为设计使用年限; $C_{O,t}$ 为第 t 年的运营成本; $C_{M,t}$ 为第 t 年的维护成本; r 为折现率。

当分析周期等于使用寿命时,应按下式计算给水用球墨铸铁管的全生命周期成本:

$$C_L = C_A + \sum_{t=1}^{t_n} \frac{C_{O,t} + C_{M,t}}{(1+r)^t} + \frac{C_E}{(1+r)^{t_n}} \quad (3)$$

当分析周期大于使用周期,且小于两倍的使用周期时,按下式计算给水用球墨铸铁管的生命周期成本:

$$C_L = C_A + \frac{C_A}{(1+r)^{t_m}} + \sum_{t=1}^{t_n} \frac{C_{O,t} + C_{M,t}}{(1+r)^t} + \frac{C_E}{(1+r)^{t_n}} - \frac{C_A(2t_m - t_n)}{t_m(1+r)^{t_n}} \quad (4)$$

2 关键参数的选择

2.1 管材成本

在城市供水项目中,管道工程投资占70%以上。管道材料既是影响管道经济合理性的主要因素,又基本决定了管道质量的可靠性。球墨铸铁管管材费用取值可依据项目所在地的市场价格确定,综合采购成本可参考《给水排水工程概预算与经济评价手册》《市政工程投资估算指标:第3册 给水工程》并依据工程预算测算结果确定。在调研多家水务公司管道工程项目中实际采购球墨铸铁管的管材成本资料后,对各种管径球墨铸铁管的管材成本及综合采购成本进行数据拟合形成拟合曲线(见图1),可供参考。值得注意的是,球墨铸铁管综合采购成本受管道埋深及施工项目所在地区的影响较大。管道埋深增加会导致管道投资费用增大,我国东部地区球墨铸铁管的综合采购成本略高于中西部地区。

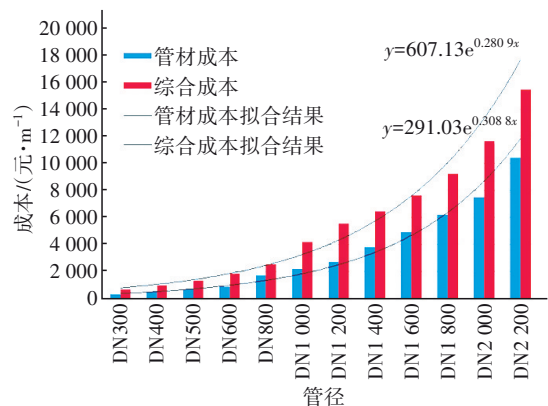


图1 球墨铸铁管管材成本及综合采购成本拟合曲线

Fig.1 Fitting curve of ductile iron pipe cost and comprehensive procurement cost

2.2 运行成本

年运行成本包括泵运行的电力使用成本等抽水成本。年运行成本应按下式计算:

$$C_{O,t} = O_{P,t} \quad (5)$$

式中: $O_{P,t}$ 为第 t 年的泵送成本。

泵送成本随电价和管道老化(取决于管道使用寿命)而增加。泵送成本计算公式如下:

$$O_{p,t} = E \times 365 \times Y_e \times (1 + y_e)^t \quad (6)$$

式中: E 为日泵送能耗, $\text{kW} \cdot \text{h/d}$, 可以参考国际标准 ISO 21053:2019 确定; Y_e 为电价, 元/($\text{kW} \cdot \text{h}$); y_e 为泵送能耗的增加率, 由实际运行经验获取, %; t 为使用年份。

2.3 管网渗漏及事故修理成本

2.3.1 泄漏事故率

在维护成本 C_m 中, 管网渗漏及事故修理成本占总维护成本的 90% 以上, 漏损水量是管网无效供水量, 也是供水量的一部分, 漏损量越大, 制水成本越高, 对供水企业来说经济效益越差。如果因管网漏失而造成大面积的道路开挖, 还会造成更大的经济损失, 因此, 降低管网漏损率可大幅提高供水企业的经济效益和社会效益。

实践证明, 球墨铸铁管因管体损伤或接头漏水引起的泄漏事故率极低。对国内多家供水企业 2006 年—2022 年管网运行资料进行分析, 运行 0~5、6~10、11~15、16~18 年的球墨铸铁管泄漏事故率分别为 0.002 6、0.006 0、0.007 2、0.007 4 次/($\text{km} \cdot \text{a}$), 且泄漏事故率随管径增大而减小。

由于我国供水工程中大规模使用球墨铸铁管的时间较短, 因此, 参考国外长时间序列的球墨铸铁管泄漏事故率调查数据, 假设管道事故率服从时间指数模型^[3], 则其计算公式如下:

$$N_t = N_{t_0} e^{r'(t-t_0)} \quad (7)$$

式中: N_t 为第 t 年管道单位长度故障次数, 次/($\text{km} \cdot \text{a}$); t_0 为分析的起始年份; N_{t_0} 为在分析的起始年管段的故障次数, 根据我国工程案例统计, 当管径 $< \text{DN}400$ 时, N_{t_0} 取 0.002 7 次/($\text{km} \cdot \text{a}$); 当管径为 $\text{DN}400 \sim \text{DN}800$ 时, N_{t_0} 取 0.001 5 次/($\text{km} \cdot \text{a}$); 当管径为 $\text{DN}800 \sim \text{DN}1\,200$ 时, N_{t_0} 取 0.000 8 次/($\text{km} \cdot \text{a}$); 当

管径 $> \text{DN}1\,200$ 时, N_{t_0} 取 0.000 7 次/($\text{km} \cdot \text{a}$); r' 为管段故障增长系数, 取 0.05~0.10, 管径越大取值越小。

2.3.2 事故修理成本

管网事故修理成本与管道管径、事故类型、管道损坏位置关系密切, 为便于统计, 整理了天津、合肥、绍兴等地发生的 271 次球墨铸铁管事故资料, 损坏类型包括管身横断、管身纵断、管身漏水、接口损坏、配件损坏等, 各规格球墨铸铁管单次事故修理费用统计结果如图 2 所示。

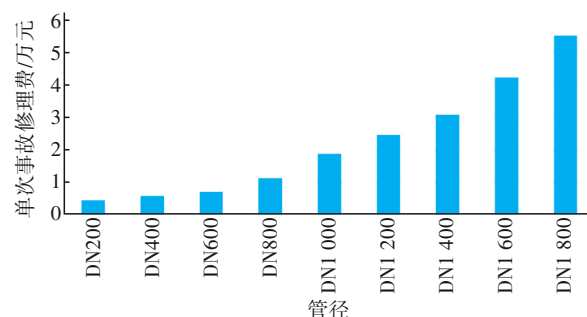


图2 各规格球墨铸铁管单次事故修理费用

Fig.2 Repair costs of ductile iron pipes of different specifications per accident

2.3.3 年渗漏成本

年渗漏成本包括因管道渗漏和管道损坏时清洗造成的水损失费用, 具体算式如下:

$$M_{L,t} = D_R P_L (L_V + V_C) U_P \quad (8)$$

式中: $M_{L,t}$ 为年渗漏成本, 元; D_R 为泄漏事故率, 次/($\text{km} \cdot \text{a}$); P_L 为管道总长度, km ; L_V 为漏水量, $\text{m}^3/\text{次}$; V_C 为清洗用水量, 当出现长时间停水或水质问题时需进行冲洗, 如果不需要可不计入, $\text{m}^3/\text{次}$; U_P 为水价, 元/ m^3 。

通过整理国内多地发生的球墨铸铁管漏水事故资料可知, 漏水事故平均抢修时间为 7.7 h, 各管径管道平均单次事故漏水量见表 1。

表1 不同管径球墨铸铁管平均单次事故漏水量统计结果

Tab.1 Statistical results of average single accident leakage of ductile iron pipes with different diameter m^3

管径	DN400	DN500	DN600	DN700	DN800	DN1 000	DN1 200	DN1 400	DN1 600	DN1 800
平均单次事故漏水量	975.33	1 466.67	2 141.56	2 388.00	3 267.33	4 272.00	5 657.78	7 326.67	10 064.78	11 713.33

2.4 寿命终止成本或收入

寿命终止成本或收入应为管道拆除成本和废物处理成本之和和减去材料回收收入, 计算公式如下:

$$C_E = E_P + E_W - E_R \quad (9)$$

式中: E_P 为管道拆除费用; E_W 为废物处理成本; E_R 为材料回收的收入。

3 全生命周期成本计算案例

3.1 案例概况

该案例位于广西壮族自治区东南部贵港市, 于 2006 年施工并竣工, 验收后于当年投入运行。管线折现率设定为 3.33%, 管线运行至今发生过 1 次漏水事故, 目前保持正常运行状态。管材信息见表 2。

表2 管材信息
Tab.2 Pipe information

管材	管径	管道长度/km	接口型式	公称壁厚/mm	内防腐	外防腐
球墨铸铁管	DN400	5.6	T型	8.1	普通硅酸盐水泥内衬	锌层+终饰层

3.2 设计使用年限

根据《城市给水工程项目规范》(GB 55026—2022)规定,目前管道结构的设计使用年限一般取50年。国外相关研究显示,水泥砂浆衬里球墨铸铁管的使用寿命通常超过100年。考虑到球墨铸铁管具有的优异韧性和耐腐蚀性,故将设计使用寿命设定为100年。

表4 2006年—2022年运行成本统计结果

Tab.4 Statistics results of operation cost from 2006 to 2022

运行年份	年平均流量/ (m ³ ·s ⁻¹)	管道末端压力/m	管道始端压力/m	水力效率/%	电力效率/%	每日泵送时间/(h·d ⁻¹)	年均电价/ [元·(kW·h) ⁻¹]	年运行成本/元
2006	0.015 1	34.29	35.5	75	80	24	0.626 3	1 637.03
2007	0.017 6	33.98	35.6	75	80	24	0.626 3	2 557.02
2008	0.018 8	33.44	35.3	78	84	24	0.626 3	2 880.53
2009	0.021 4	33.01	35.1	78	84	24	0.626 3	3 668.29
2010	0.022 6	32.61	34.8	78	84	24	0.626 3	4 069.91
2011	0.026 4	32.23	34.5	78	84	24	0.626 3	4 921.68
2012	0.028 9	31.01	33.4	78	84	24	0.626 3	5 675.37
2013	0.030 1	30.50	33.0	78	84	24	0.626 3	6 194.69
2014	0.032 7	29.59	32.3	78	84	24	0.626 3	7 274.64
2015	0.035 2	28.35	31.4	78	84	24	0.626 3	8 817.12
2016	0.035 2	27.93	31.2	78	84	24	0.626 3	9 453.10
2017	0.036 4	27.73	31.0	78	84	24	0.626 3	9 790.71
2018	0.037 7	26.73	29.4	78	84	24	0.626 3	8 269.92
2019	0.038 9	26.83	29.6	78	86	24	0.626 3	8 659.46
2020	0.038 9	26.73	29.3	78	86	24	0.626 3	8 034.23
2021	0.040 2	26.53	28.9	78	86	24	0.750 0	9 158.55
2022	0.042 7	26.73	28.6	78	86	24	0.810 0	8 292.25

3.3.3 维护成本

管线的维护成本包括渗漏成本、事故修理费、日常巡检及管网检测成本等,根据项目维护数据资料统计,项目每年巡检费用总计6 325元。该项目

3.3 计算过程

3.3.1 采购成本

该项目的一次性采购成本包括管材成本、施工成本和设计测量成本,经统计项目资料,采购成本计算结果如表3所示。

表3 采购成本

Tab.3 Procurement cost 元

项目	管材成本	施工成本及其他	合计
数值	1 833 895	2 511 438	4 345 333

3.3.2 运行成本

根据项目2006年—2022年的运行资料,按照式(5)、(6)进行年运行成本的计算,具体统计结果如表4所示。

发生过一次漏水事故,事故年份为2018年,漏水量约4 000 m³,以当年水价1.73元/m³计,当年漏水费用为6 920元,此次漏水事故修理费用约6 000元。维护费用信息见表5。

表5 维护费用

Tab.5 Maintenance cost

项目	泄漏事故率/ (次·km ⁻¹ ·a ⁻¹)	事故漏水量/ (m ³ ·次 ⁻¹)	漏水费用/元	巡检及管网检测费用/元	事故维修费用/元	折现后维护成本/元
2018年	0.013 7	4 000	6 920	6 325	6 000	21 913
2006年—2022年总和	0.010 5	4 000	6 920	107 525	6 000	122 237

3.3.4 全生命周期成本

目前,该管线的分析周期小于使用周期寿命,

管线全生命周期成本按式(2)计算。2006年—2022年全生命周期成本计算结果见表6。若要预测未来

一段时间分析周期内管线的全生命周期成本,可结合本地实际工程经验和市场价格,按上述计算方法进行计算。例如,要测算 2023 年—2055 年即管龄为 50 年时的全生命周期成本,可按式(2)进行计算,结果见表 7。若要测算 2105 年即管龄为 100 年时的全生命周期成本,则应按式(3)计算,结果见表 8。

表 6 2006 年—2022 年全生命周期成本计算结果

Tab.6 Calculation results of LCC from 2006 to 2022

项目	管龄/ a	建设成本/元	运行成本合计 (折现价值)/元	维护费用合计 (折现价值)/元	泄漏事故率/ (次·km ⁻¹ ·a ⁻¹)	事故漏水成本合计/元	维修成本 合计/元	当年水价/ (元·m ⁻³)	残值/元	全生命周期 成本累计/元
数值	17	4 345 333	135 028.75	122 237	0.010 5	6 920	6 000	1.73	3 606 626	995 972.75

表 7 2023 年—2055 年全生命周期成本计算结果

Tab.7 Calculation results of LCC from 2023 to 2055

年份	管龄/a	建设成本/ 万元	年运行成本 (折现价值)/万元	年巡检成本 (折现价值)/万元	泄漏事故率/ (次·km ⁻¹ ·a ⁻¹)	事故漏水成本/万元	维修成本/ 万元	残值/万元	全生命周期 成本累计/ 万元
2023	18	434.53	0.85	0.63	0.011	0.01	0.060	356.32	102.67
2033	28	434.53	0.85	0.63	0.023	0.02	0.014	312.86	161.19
2043	38	434.53	0.85	0.63	0.050	0.05	0.029	269.41	220.01
2055	50	434.53	0.85	0.63	0.127	0.12	0.074	217.27	291.49

表 8 管龄为 100 年时的全生命周期成本计算结果

Tab.8 Calculation results of LCC for 100 years of pipe age

年份	管龄/a	建设成本/万元	年运行成本(折现价值)/万元	年巡检成本(折现价值)/万元	泄漏事故率/(次·km ⁻¹ ·a ⁻¹)	事故漏水成本/万元	维修成本/万元	残值/万元	管道处理费用/万元	全生命周期成本累计/万元
2105	100	434.53	0.85	0.63	2.961	2.79	1.71	0	6.6	660.27

4 结论

① 球墨铸铁管管材延展性和防腐性能优异,泄漏事故率低、管道寿命长、运维成本较低,采用全生命周期成本分析方法选择管材,更能体现球墨铸铁管的优势。推介全生命周期成本理念,有益于引导投资方不仅关注一次性管线投资,更应关注长期投资的回报率。

② 给出了计算球墨铸铁管全生命周期成本的基本方法,经工程项目实例应用,使用该方法可以对球墨铸铁管全生命周期成本进行合理核算。该方法还可以用于其他管材的全生命周期成本计算,使用时应结合相应管材更改相关参数。

参考文献:

[1] 钱吉洪. 初探管网全生命周期评估建设[J]. 城镇供水, 2022(4): 54-58.
QIAN Jihong. Preliminary exploration of the full life cycle assessment and construction for pipeline network [J]. City and Town Water Supply, 2022(4): 54-58 (in Chinese).

[2] 李晓明,白占顺,王宁,等. 大口径球墨铸铁管用于长距离输水工程的优势分析[J]. 中国给水排水, 2015, 31(14):30-33.
LI Xiaoming, BAI Zhanshun, WANG Ning, et al. Performance analysis of large diameter ductile iron pipes in large-scale water diversion project [J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(14):30-33 (in Chinese).
[3] 刘威,宋朝阳. 基于事故率的城市供水管网全寿命运行可靠性[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(9):1286-1293.
LIU Wei, SONG Zhaoyang. Accident rate-based lifecycle operational reliability of urban water distribution networks [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2019, 47(9):1286-1293 (in Chinese).

作者简介:刘云帆(1988—),男,北京人,硕士,高级工程师,主要从事给排水设计、规划、标准化工作。

E-mail:lyfsoar@pku.org.cn

收稿日期:2023-11-08

修回日期:2024-03-13

(编辑:丁彩娟)