

# 生命周期评价在优化建筑给排水管材中的应用

郝兢一

(上海交通建设总承包有限公司, 上海 200000)

**摘要:** 建筑给排水系统管材选择的优劣与节能与否直接相关。文章采用生命周期评价与层次分析法相结合的方法, 对建筑给排水系统中不同管道的能耗及对环境的影响进行分析。结果表明: PVC-U 管材的能耗及综合环境影响较低, 替代金属管道可减少对环境的影响。研究结果为工程设计及施工提供参考。

**关键词:** 给排水管材; 生命周期; 层次分析; 能源消耗; 环境影响

中图分类号: TL353

文献标识码: A

文章编号: 1008-1305(2024)05-0089-05

## 0 引言

随着社会经济的快速发展, 资源枯竭、环境污染等环境问题在许多国家得到了广泛关注<sup>[1]</sup>。建筑业推动了经济快速发展, 也造成了一定的环境污染。建筑给排水系统(BWSDS)是建筑中不可缺少的组成部分, 对系统设计进行优化可实现减少对环境的影响<sup>[2]</sup>。选择资源能耗低、环境影响小的管材, 有利于实现城市的可持续发展<sup>[3]</sup>。在 BWSDS 的管材选择过程中, 以往主要考虑管材的性能和一次性成本, 缺乏对所选系统全生命周期的分析。BWSDS 管材的选择不仅要考虑原材料供应的可持续性和经济可行性, 以及使用过程中对客户健康的影响, 还要注意对环境的影响, 满足减少资源使用和节能的要求<sup>[4]</sup>。

生命周期评价(LCA)是一种环境影响评价理论工具, 可为改善环境提供建议和措施<sup>[5]</sup>。对于城市建筑, 大多数关于 LCA 的现有论文都研究了建筑中使用的新材料或新的建筑计划。关于 BWSDS 的 LCA 的论文很少。下文以 LCA 为工具, 利用 LCA 和层次分析法(AHP)对不同管道的资源消耗、能耗和环境影响进行评价, 为优化建筑给排水系统提供参考。

## 1 系统描述

住宅楼层高为 3.2m, 共 6 层, 每层有 2 户, 为 3 室 2 厅 2 卫。在建筑给水系统的设计过程中, 采用 PVC-U(未增塑聚氯乙烯)管、热镀锌钢管和铜管对供水系统进行计算, 利用 LCA 对 3 种管材

在全生命周期的能耗进行分析。建筑排水系统的设计过程中, 本文使用 PVC-U 管和铸铁管对排水系统进行计算, 使用 LCA 分析 2 种管材在整个生命周期(50 年)中的消耗。

采用水泵-水箱组合的供水方式。系统中设置 2 条进水管, 将其引入 2 个机组。1 根进水管连接 4 根供水立管, 负责为 2 户的浴室和厨房供水。对建筑进行初步评价后, 建筑的排水系统采用了单立管系统。2 户的厕所和厨房废水通过每户的 4 个排水立管排放。根据建筑物的运行要求, 得到各管段的设计流程。计算出设计二次流的管段后, 根据流量与速度之间的流动方程确定各管段的管径。BWSDS 管道对比数据如表 1 所示。

## 2 方法

### 2.1 构建 LCA 模型

满足设计水量的前提下计算管道的重量, 对物料清单进行分析, 物料清单主要包括材料在生产、运输、安装运行阶段、可再生能源消耗阶段、资源消耗阶段和污染物排放阶段, 得到整个生命周期内的总能耗(不包括回收材料的质量)和每条管道的污染物排放量。本文建立了基于 BWSDS 生命周期分析的 LCA 模型。

### 2.2 目标和范围定义

BWSDS 的 LCA 评价过程包括原材料开采、原

收稿日期: 2023-11-10

作者简介: 郝兢一(1988 年—), 男, 工程师。

E-mail: fu48765@163.com

材料制造、管道生产、产品运输、管道安装、运行、维护、拆除和回收。生命周期的每个阶段都需要消耗资源和能源。

表1 不同管道的规格和数量

系统	管材	直径 /mm	管长 /m	单位质量 /(kg/m)	质量 /kg	总质量 /kg
给水系统	PVC-U	20	156.9	0.17	26.13	72.23
		25	57.8	0.26	15.29	
		32	77.1	0.34	26.43	
		40	8.6	0.51	4.38	
	热镀锌钢	20	141.7	1.60	226.40	694.89
		25	53.7	2.37	127.27	
		32	77.1	3.07	236.36	
		40	27.9	3.76	104.86	
	铜	20	141.7	0.84	119.45	416.89
		32	53.7	1.81	97.03	
		32	77.1	1.81	139.32	
		40	27.9	2.19	61.09	
排水系统	PVC-U	50	55.0	0.57	31.28	458.16
		75	77.4	0.89	69.03	
		110	189.2	1.89	357.85	
	铸铁	50	55.0	7.25	399.15	4179.95
		80	77.4	11.96	925.39	
		100	189.2	15.09	2855.41	

管道的生命周期范围可以定义为从原材料的使用开始到最终去除和回收。根据管材的制造工艺和应用情况,运用 LCA 分析了不同管材的资源能耗和环境影响,给水管选用 PVC-U 管、热镀锌钢管和铜管,排水管选用 PVC-U 管和铸铁管。库存分析是建筑 LCA 的主要部分,包括材料和能耗的库存分析,包括生产、现场作业、运输、作业、拆除、总能耗等。本文简化了分析,只考虑主要因素,忽略次要因素。影响分析和结论主要基于生产、运输和运营能耗。

### 2.3 功能单元

在生命周期分析中,功能单元是指产品系统的量化性能,在生命周期评价中用作参考单元。功能单元设置的前提是与规定相关联的因素相同或相似,在管道供水量相同的前提下进行 LCA 评价。本文选用了与基础机组供水能力相同的机组管质。为了比较一致性,将不同的能量单位换算成标准煤进行计算。本文以 kgce/t 和 tec/t 作为功能单位其

中,1t 产品需要 1t/kg 标准煤。

## 3 管材分析

### 3.1 PVC-U 管

聚氯乙烯的原料是氯乙烯。生产 1t 氯乙烯需要 0.489t(能耗 1.928tec/t) 乙烯和 0.601t 氯(能耗 0.791tec/t),能耗为 0.09tec。我国聚氯乙烯的主要生产方式是悬浮法,生产 1t 聚氯乙烯需要 1.01t 氯乙烯,能耗为 0.25tec。PVC-U 管材的生产,除聚氯乙烯外,一般还需添加约 5% 轻质碳酸钙(能耗 0.32tec/t)。根据其生产工艺和单位能耗,计算出 PVC-U 管材的原料能耗为 1.694t/tec( $E_1$ )。现有材料生产 1tPVC-U 管材需要 0.32tec( $E_j$ )。由于产品会被回收利用,所以平均循环次数、再生率、再生过程能耗值和加工成功率分别为 3.333( $n$ )、70%( $X_z$ )、0.15tec/t( $E_2$ )和 88%( $X_c$ )。乙烯的生产主要来自石油,生产 1tPVC-U 需要 5t 混矿。

根据国家统计局的数据,我国 30% 的塑料制品及其原材料由汽车运输,其余的由铁路运输,经历的运输距离分别为 60km 和 775km,计算原材料运输能耗( $E_{cy}$ )和制成品运输能耗( $E_{yy}$ )为 6kgce/t。

### 3.2 热镀锌钢管

镀锌钢的主要原料是钢材。炼钢原料主要是铁水、废钢和炉渣。在炼钢过程中,生产 1t 铁需要 1.82t 混矿、0.5t 焦炭和 0.08t 粉煤灰,其中烧结和炼铁过程的能耗值分别为 0.06tec/t 和 0.43tec/t。炼制过程的综合能耗为 1.21tec/t( $E_1$ ),再生率为 80%( $X_z$ ),平均循环次数为 5( $n$ ),再生过程的能耗为 0.46tec/t( $E_2$ ),加工成功率为 73%( $X_c$ )。材料成形加工能耗为 0.146tec/t( $E_j$ )。

运输能耗根据国家统计局提供的数据计算。汽车运输占金属和其他原材料运输的 30%,铁路运输占 70%。金属矿石和成品金属的铁路运输平均距离分别为 562km<sup>2</sup> 和 1103 公里。煤炭铁路运输的平均距离为 569 公里,双方公路货物运输的平均距离为 58 公里。根据上述数据,可以计算出金属矿石原料综合运输的能耗为 5kgce/t( $E_{cy}$ ),金属制品运输的能耗为 7kgce/t( $E_{yy}$ )。

### 3.3 铜管

导电制铜法是生产铜材料最常用的方法。原材料和再生过程的能耗值分别为 4.59tec/t( $E_1$ )和 0.66tec/t( $E_2$ ),加工成功率为 72%( $X_c$ ),1t 铜管的生产需要 5t 原油资源。

由于铜管和钢管都是金属,运输过程中消耗的能源相同。所以  $E_{cy}$  为 5kgec/t,  $E_{yy}$  为 7kgec/t。成型过程能耗为 0.676tec/t ( $E_j$ ),再生率为 88% ( $X_z$ ),平均循环次数为 10( $n$ )。

采用层次分析法模型进行评价,根据管道生命周期内污染物的排放情况,将污染物对环境的影响分为全球变暖、大气酸化、生物毒性、水体富营养化。通过污染物的潜在影响因素对各种污染物统一量化指标,再通过单一指标的分层分析过程评价对环境的影响。

## 4 结果与讨论

### 4.1 不同管道的生命周期内能耗

#### 4.1.1 给水管道的生产和运输阶段

采用分配法计算每根管道在生命周期内的能耗。计算公式如下:

$$E_z = (E_1 + E_{yy})(1 - X_z) + E_{z2}X_z + E_2 \left( \frac{1}{X_c} - 1 \right) + \left( \frac{E_j}{X_c} \right) + E_{cy} + E_e \quad (1)$$

$$E_{z2} = \frac{E_1 + E_{yy} + (n-1)(E_2 + E_{cy})}{n} \quad (2)$$

式中,  $E_1$ —原材料能耗,tec/t;  $E_2$ —管材再生过程能耗,tec/t;  $E_{z2}$ —管道材料全生命周期单位生产能耗,tec/t;  $E_{yy}$ —原材料运输能耗,tec/t;  $E_{cy}$ —材料运输能耗,tec/t;  $n$ —材料平均循环次数,  $X_c$ —材料加工成管道的成功率;  $X_z$ —材料再生率;  $E_j$ —材料加工成管道的能耗,tec/t;  $E_e$ —生产中的能源损失,约为 10%。

PVC-U 管、热镀锌钢管、铜管单位生产能耗分别为 1.51、1.22 和 2.83tec/t,不同管材的能耗存在明显差异。生产满足供水能力的 PVC 管需石油原料 256.36kg,生产镀锌钢管和铜管分别需要矿石原料 1502.53、2469.71kg。可以看出,不同的管道在生产过程中对原材料的需求差异较大,对于金属管道来说,更多的资源消耗可能导致更高的能耗。同时,回收率的引入将减少不同管道的能耗差异。有回收率的铜管的单位能耗比无回收率的低 40%,而 PVC-U 和镀锌钢管的单位能耗分别为 12% 和 0.7%。因此,对于管材来说,不考虑回收利用率会放大资源、能源消耗和对环境的影响。

总能耗方面,PVC-U、镀锌钢管、铜管的能耗分别为 126.05、966.37、1416.28kgec。PVC-U 是 3 种管道中能耗最低的。从其重量需求量来看,PVC-U 需求量最低。因此,PVC-U 所需的资源和

能耗更少,PVC-U 在降低能耗方面具有很大的优势。虽然铜管的重量比镀锌钢管低,但铜管的能耗却比镀锌钢管高。这主要是因为铜管生产需要更多的矿石材料,生产成功率较低。因此,提高回收率,选择资源消耗少的管材来降低能耗非常必要。

#### 4.1.2 排水管道的生产和运输阶段

PVC-U 排水管 and 铸铁排水管全生命周期内的直接能耗分别为 801.33kgec 和 5795.71kgec。其资源消耗分别为石油 1621.67kg 和矿石 9016.57kg。PVC-U 管材的能耗是 3 种管材中最低的。排水管道的能耗差异比供水管道的能耗差异大。主要原因是管道的管径较大,导致管道材料的消耗较多。因此,选择管径较大的管材时,在管材的选择中不能忽视能耗的影响。

#### 4.1.3 管道运行阶段

由于水泵在运行阶段的功率消耗相同,3 种不同管道的能耗均为 57021.28kgec。因此,以下的环境影响评价不包括运行阶段。

管道在使用过程中会发生一些不可避免的事故,需要进行维修和保养。由于这部分能耗较小,对整个生命周期评价的影响可以忽略不计,在此不做考虑。

### 4.2 建筑给排水系统全生命周期环境影响评价

通过对环境影响进行分类,将同一影响类型下的不同影响因素用环境负荷指数的方法进行汇总,得到各影响类型的综合环境负荷。环境影响 ( $EB$ ) 表示一组物质的排放对特定环境类别产生某种影响的潜在程度,数值越大,影响越大, $EB$  计算公式:

$$EB = \sum_{i=1}^n (W_i \cdot PF_i) \quad (3)$$

式中,  $i$ —排放物中所含的各种化学物质;  $W_i$ —某物质的重量,kg;  $PF_i$ —某物质对不同环境影响类别的潜在因素,如表 2 所示。

发电过程中污染物排放量和工业燃料油和煤的排放系数如表 3 和表 4 所示。

通过提供全球变暖、大气酸化、富营养化和生物毒性的标度值,可以构建如表 5 所示的数据矩阵。

利用层次分析法计算出特征向量  $W = [0.466 \quad 0.277 \quad 0.161 \quad 0.096]$ ,矩阵的最大特征值  $\lambda_{\max} = 4.031$ 。

表2 不同环境影响类别的潜在因素

影响类别	影响物质	PF
富营养化	N	0.9
	P	0.07
生物毒性	Cu	1.1
	Hg	16.7
	Cd	1.9
大气酸化	NH <sub>3</sub>	1.9
	NO <sub>2</sub>	0.7
	SO <sub>2</sub>	1.1
全球变暖	CO <sub>2</sub>	1.2
	CH <sub>4</sub>	20.8
	NO <sub>x</sub>	39.6
	CO	2.9

表3 发电过程中不同污染物的排放量(kW·h)

单位: kg

名称	污染物名称	排放量	小计
空气污染物	一氧化碳	0.076	4.077
	二氧化碳	0.628	
	碳氢化合物	0.033	
	氮氧化物	3.21	
	二氧化硫	0.13	
水污染物	冲灰水	2.521	2.521
固体污染物	废石及尾矿	0.583	0.753
	粉煤灰	0.151	
	矿渣	0.019	

表4 工业燃料油和煤的颗粒物与气体排放系数

单位: kg/t

排放系数	微粒	SO <sub>2</sub>	CO	CH <sub>4</sub>	NO <sub>2</sub>	醛
燃油	2.7	17	0.0023	0.32	6.8	0.12
燃煤	6.6	18	0.97	0.49	7.6	0.0026

表5 构建判断矩阵

影响类别	全球变暖	大气酸化	富营养化	生物毒性
全球变暖	1	2	3	4
大气酸化	1/2	1	2	3
富营养化	1/3	1/2	1	2
生物毒性	1/4	1/3	1/2	1

通过公式(3)计算出PVC-U给水管在全球变暖、大气酸化、水生毒性和富营养化的EB值。

以EB值作为向量  $A = [118.02 \quad 4.15 \quad 0.0013 \quad 0.000017]$ 。由此可得单项指数  $B = A \cdot W = 56.13$ 。同理可算出给水系统的热镀锌钢管和铜管的单项指数分别为431.13和621.46。排水系统的PVC-U管和铸铁管的单项指数分别为361.38和2605.62。

统计BWSDS各管道给水系统的污染物排放量及排水系统的污染物排放量。可以看出,在生产和运输阶段,大量的CO<sub>2</sub>被排放到大气中。这是因为当今的能源主要来自石油和煤炭等化石燃料。高排放燃料的使用是大部分CO<sub>2</sub>排放的主要原因。由于金属管道的隐含能量较高,温室气体在其生产和运输阶段的排放量高于PVC-U管。

对BWSDS各管道环境影响单项指数评价,结果表明全球变暖(CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>)是影响该指标的重要因素。其中氮氧化物对全球变暖影响的贡献率超过58%,致使其在BWSDS的整个生命周期中成为全球变暖的重要贡献者。导致全球变暖在环境影响评价中占主导地位的根本原因是化石燃料的大量使用。选择能源和资源消耗较少的PVC-U管材,有利于减少建筑给排水系统在生命周期内对环境的影响<sup>[6-9]</sup>。除全球变暖以外的其他影响对环境影响评价的贡献不高,在建筑给排水系统中使用PVC-U管替代镀锌钢管和铜管,可减少87%和89%的环境影响。在排水系统中使用PVC-U管替代铸铁管,可减少90%的环境影响。PVC-U管的低资源和低能耗是造成这一结果的主要原因。

## 5 结论

本文以LCA为工具,研究了BWSDS的构建。利用LCA和AHP对不同管道的资源消耗、能耗和环境影响进行评价。结果表明:给水系统中,PVC-U管材在能耗方面具有最小值和指数值。因此,给水系统中使用PVC-U管替代镀锌钢管和铜管,可减少87%和89%的环境影响。在排水系统中使用PVC-U管替代铸铁管,可减少90%的环境影响。用PVC-U管材替代金属管材可显著减少给排水工程对环境的影响。

## 参考文献

- [1] 马海灵. 新农村建设背景下生态环境问题及整治对策[J]. 绿色环保建材, 2021(12): 49-50.

- [2] 刘志. 绿色建筑中给排水节能新技术应用[J]. 陶瓷, 2022(8): 145-146.
- [3] 李文磊. 硬聚氯乙烯(PVC-U)管材性能及质量检测的研究综述[J]. 清洗世界, 2021(9): 131-133.
- [4] 杨军超. 引汉济渭二期工程输水管道管材比选[J]. 水利规划与设计, 2022(8): 106-109.
- [5] 谢明辉, 满贺诚, 段华波, 等. 生命周期影响评价方法及本地化研究进展[J]. 环境工程技术学报, 2022(6): 2148-2156.
- [6] 刘玉玲. 河槽雨洪暗蓄工程运营管理模式研究[J]. 水利技术监督, 2022(3): 70-72.
- [7] 颜志庆, 陈宇光, 李佳. 湛江引调水超大口径球墨铸铁管和钢管混合管材水压试验[J]. 广东水利水电, 2023(4): 26-29.
- [8] 裴建生, 徐燕. 干旱区内陆河流坎儿井式灌溉与排水工程研究[J]. 水利规划与设计, 2023(9): 66-71.
- [9] 王静. 基于GIS的农村排水管网模型快速构建[J]. 水利规划与设计, 2023(10): 103-108.

(上接第59页)低风险指数要高于其他类型风险, 在业主自身风险中, 较高风险指数要高于其他类型风险指数, 较高风险指数在0.32~0.45之间, 对他其他类型风险而言, 低风险指数在0.32~0.45之间, 其他风险中低风险程度高于其他类型风险。通过对不同准则层风险指数进行综合评估, 大型输水工程支洞施工进度风险度为(0.329, 0.292, 0.268, 0.345, 0.315), 按照风险度最高而言, 其发生高风险概率程度较高, 风险度为0.329。

表6 大型输水工程支洞施工进度风险综合评估结果

方案层	风险度				
	高风险	较高风险	一般风险	较低风险	低风险
A <sub>1</sub>	0.45	0.14	0.23	0.32	0.41
A <sub>2</sub>	0.23	0.32	0.32	0.41	0.45
A <sub>3</sub>	0.32	0.23	0.41	0.23	0.45
A <sub>4</sub>	0.41	0.32	0.23	0.45	0.23
B <sub>1</sub>	0.32	0.41	0.23	0.45	0.23
B <sub>2</sub>	0.45	0.23	0.14	0.32	0.41
B <sub>3</sub>	0.23	0.23	0.27	0.32	0.14
C <sub>1</sub>	0.23	0.45	0.41	0.23	0.32
C <sub>2</sub>	0.32	0.45	0.23	0.41	0.32
C <sub>3</sub>	0.45	0.32	0.23	0.41	0.14
D <sub>1</sub>	0.41	0.23	0.14	0.32	0.41
D <sub>2</sub>	0.32	0.23	0.32	0.41	0.45
D <sub>3</sub>	0.14	0.23	0.32	0.23	0.32

### 3 结语

(1)施工安全风险评估指标对施工进度影响最为明显, 其次为地质灾害条件风险和项目分包风险, 为保障施工进度, 应尽量降低施工安全和项目分包风险指数, 加大对地质灾害风险

的防范措施。

(2)施工安全风险、地质灾害条件风险、项目分包风险评估指标熵权值建议高于0.4, 可提高大型水利工程施工进度风险综合评估的合理性。

(3)对于水利工程施工进度影响因子较为复杂, 本文主要选取的典型要风险指标进行评估, 指标覆盖面还有所不足, 在后续研究中还需对其指标体系进行补充和完善。

### 参考文献

- [1] 支铭伟, 卢林. BIM技术的水利工程施工进度控制方法研究[J]. 水利技术监督, 2020(5): 138-141, 176.
- [2] 张瑞春. 水利工程施工进度影响因素与控制方法分析[J]. 水利技术监督, 2016, 24(4): 50-52, 61.
- [3] 崔婉苗. 水利工程建设施工管理的有效对策[J]. 水利技术监督, 2016, 24(3): 44-45, 60.
- [4] 盛东伟. 水利工程施工进度风险分析研究[J]. 水利科技与经济, 2023, 29(11): 124-128.
- [5] 王烁然. 水利工程施工监理质量和进度控制对策研究[J]. 工程建设与设计, 2023(4): 235-237.
- [6] 郝仕阳. 基于遗传算法和BIM的输水箱涵施工进度优化[D]. 河北农业大学, 2022.
- [7] 杨娜. 基于可拓物元理论的水利工程施工进度风险评价[J]. 河南水利与南水北调, 2022, 51(11): 75-77.
- [8] 张青, 周鑫. 基于直觉模糊集的水利工程施工进度风险评价[J]. 四川水泥, 2022(7): 81-83.
- [9] 李博. 调水工程施工进度风险评价研究[D]. 郑州大学, 2022.
- [10] 朱以明, 陈允生, 陆红. 基于模糊决策的水利施工安全风险识别方法[J]. 珠江水运, 2022(3): 111-113.
- [11] 王海霞. 基于结构方程模糊评估模型的水利工程项目施工阶段风险研究[J]. 内蒙古水利, 2021(5): 21-23.
- [12] 魏超. 海上疏浚工程施工安全风险防控研究[J]. 住宅与房地产, 2021(6): 227-228.
- [13] 刘雪山. 水利工程施工风险及防范对策研究[J]. 工程建设与设计, 2021(1): 220-221, 239.
- [14] 钟婉婷. 基于模糊网络分析法的水利水电工程施工风险分析[J]. 水电站机电技术, 2020, 43(11): 177-178.
- [15] 秦璇璇, 方必和. 基于AHP-灰色关联度分析法的水利工程风险评价研究[J]. 项目管理技术, 2020, 18(8): 74-79.