

无氟超疏水混凝土全寿命周期成本及市场前景分析

牟陆滢¹, 刘晋宁¹, 黄佳敏¹, 余德密², 徐亦冬¹, 窦怀著³

¹浙大宁波理工学院, 土木建筑工程学院, 浙江 宁波

²浙江大学建筑工程学院, 浙江 杭州

³浙江省二建建设集团有限公司, 浙江 宁波

Email: 1021421808@qq.com

收稿日期: 2021年5月13日; 录用日期: 2021年5月27日; 发布日期: 2021年6月9日

摘要

对超疏水混凝土进行了全寿命周期成本分析。选取喷涂氟碳防腐涂料的混凝土与无氟超疏水混凝土两种方案进行经济性研究, 运用费用年值法计算每种方案在施工、运维阶段的成本。结果表明, 无氟超疏水混凝土在维修间隔大于7年时, 其全寿命周期成本较喷涂氟碳防腐涂料的混凝土更低。借助SWOT分析法, 得出无氟超疏水混凝土具有更好的经济性与推广应用价值。

关键词

无氟超疏水混凝土, 全寿命成本分析, 市场分析

Life Cycle Cost and Market Prospect Analysis of Non-Fluorinated Super-Hydrophobic Concrete

Luying Mou¹, Jinning Liu¹, Jiamin Huang¹, Demi Yu², Yidong Xu¹, Huaizhu Dou³

¹School of Civil Engineering and Architecture, Ningbo Tech University, Ningbo Zhejiang

²College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang

³Zhejiang Erjian Construction Group Co., Ltd., Ningbo Zhejiang

Email: 1021421808@qq.com

Received: May 13th, 2021; accepted: May 27th, 2021; published: Jun. 9th, 2021

Abstract

Life cycle cost analysis of super-hydrophobic concrete was conducted. Two kinds of concrete

文章引用: 牟陆滢, 刘晋宁, 黄佳敏, 余德密, 徐亦冬, 窦怀著. 无氟超疏水混凝土全寿命周期成本及市场前景分析[J]. 管理科学与工程, 2021, 10(2): 128-134. DOI: 10.12677/mse.2021.102017

sprayed with fluorocarbon anticorrosive coating and non-fluorinated super-hydrophobic concrete were selected for cost analysis, and the cost of each project was calculated by the annual cost method during the construction and operation and maintenance stages. The results showed that the non-fluorinated super-hydrophobic concrete was under maintenance and when the interval is greater than 7 years, the life cycle cost is lower than that of concrete sprayed with fluorocarbon anticorrosive coating. With the help of SWOT analysis method, it is concluded that non-fluorinated super-hydrophobic concrete has better economic efficiency and promotion application value.

Keywords

Non-Fluorinated Super-Hydrophobic Concrete, Life Cycle Cost Analysis, Market Analysis

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 概述

混凝土是一种由凝胶材料、粗骨料、细骨料、水、外加剂和掺合料按照一定比例混合，经搅拌、浇筑成型、养护硬化得到的人工石材[1]。混凝土硬化后表面及内部均分布着不同直径的孔隙，这些孔隙为水的渗入提供了通道和空间，同时其中的毛细管会产生毛细管作用，使水在混凝土中的渗透加剧。此外，混凝土内部存在大量水泥水化反应时析出的羟基(羟基为亲水性基团)进一步增强了混凝土的亲水特性[2][3]。水侵入时会将溶解在水中的酸性离子(Cl^- 、 SO_4^{2-} 等)带入混凝土中，酸性离子与混凝土中的硅酸钙凝胶或水泥水解时产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应，降低混凝土强度[4]。甚至，带有酸性离子的水会侵入到钢筋通道中，造成钢筋腐蚀，使钢筋体积增大，导致钢筋混凝土结构出现爆裂、局部脱落和结构破坏等现象。在盐碱地区、酸雨地区及沿海地区，这种现象尤为严重。因此，如果能够减少甚至避免水渗入混凝土中，就能够有效增强混凝土结构的耐久性，同时大大降低运营维护成本。虽然这必然会增加初期投资成本，但从全寿命周期角度来看，这能够显著提升混凝土基础设施的安全性及使用寿命。

超疏水表面为极端润湿性表面的一种，如图1所示，表现为水滴在特定的表面上接触角大于 150° ，滚动角小于 10° 。水滴在超疏水表面上可以自由滚动而不发生粘附，具有良好的自清洁性[5][6]。本研究依据超疏水表面的相关理论，采用涂层方式对混凝土表面进行疏水改性。对低成本无氟混凝土超疏水涂层进行研究和制备，并将其喷涂至混凝土表面，使混凝土拥有超疏水性能，如图2所示。

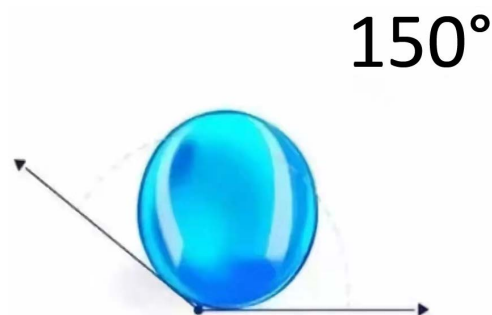


Figure 1. Diagram of contact Angle of water droplets
图1. 水滴接触角示意图



Figure 2. Non-fluorinated super-hydrophobic concrete
图 2. 无氟超疏水混凝

超疏水混凝土表面的超疏水特性使其拥有良好的自清洁性能与抗渗性能, 在利用雨水等带走混凝土表面灰尘脏污的同时, 还能够有效阻挡侵蚀性离子的渗透, 防止混凝土开裂与破坏, 增强建筑结构的耐久性。此外, 市售的多数混凝土防腐涂料为封闭性涂层, 而超疏水涂层仅对混凝土外表面进行修饰, 并未封闭混凝土内部孔道, 因此可有效避免使用普通表面密封型涂料因不透气引发的热胀冷缩导致涂料与混凝土表面气压改变造成涂层破坏的问题, 且依靠表面疏水性使混凝土表面透气不透水, 可以达到自清洁、防渗透的效果。采用硬脂酸和凹凸棒石制备的超疏水涂料, 与市面上多数氟碳防腐涂料及虽无氟但售价较高的超疏水涂料相比, 在保证超疏水性能的同时, 制备方式简单, 成本较低, 且相对环保, 有利于环境的可持续发展。本研究通过对无氟超疏水混凝土的全寿命周期成本及市场前景分析, 全方位对比各类混凝土防腐涂料在施工、运维阶段的成本与经济效益, 为无氟超疏水混凝土的实际应用与推广提供理论基础。

2. 无氟超疏水混凝土全寿命周期成本分析

2.1. 全寿命周期成本的定义

全寿命周期成本即 LCC(Life Cycle Cost), 是指项目在设计、开发、建造、使用、维护和报废过程中发生的费用。在 LCC 中, 不仅包括资金成本, 还包括环境成本、社会成本[7]。

1) 资金成本: 指从项目构思、投入使用到最终废弃拆除全过程中可量化的资金投入消耗的总和, 主要包括建设成本、使用成本(能耗成本、运维成本、管理成本)和弃置成本。

2) 环境成本: 项目在全寿命周期内对于环境潜在的和明显的不利影响。

3) 社会成本: 项目从构思、产品建成投入使用直至报废全过程对社会经济造成的不利影响。

全寿命周期成本有以下特点: 首先, 效益和成本是全寿命成本分析研究的主要对象, 为管理者决策提供科学依据; 其次, 由于在我国工程建设实践中对于环境成本和社会成本还没有统一的方法对其进行量化处理, 只能从定性分析入手探讨, 因此在本文中只考虑项目资金成本; 第三, 全寿命成本对工程实行动态预控, 随着工程不断进行, 全寿命周期成本不断比较现时成本和预期成本的差异, 对项目成本进行修正和调整, 从而达到控制成本的目的[8]。

基于上述分析, 本文从资金成本入手, 将超疏水混凝土全寿命周期分成施工、运维两阶段进行分析。

2.2. 不同混凝土在全寿命周期成本中的对比分析

从本质上分析, 只考虑项目施工成本而忽略后期运维费用的成本分析是非常片面的。因而本文对比

喷涂氟碳防腐涂料的混凝土以及无氟超疏水混凝土在施工、运维两个阶段中投入费用的不同, 进行全过程分析, 以量化值进行决策, 最终找出全过程成本最少的混凝土, 以获得经济利益的最大化。

本文假定应用场景为东部沿海地区混凝土基础设施, 混凝土试件尺寸为 $b \times h \times l = 1 \text{ m} \times 0.24 \text{ m} \times 1 \text{ m}$, 两种不同类型的混凝土使用寿命皆为 70 年, 下表 1 为不同处理方式的混凝土全寿命阶段对比。

Table 1. Comparison table of life stage of different types of concrete
表 1. 不同类型混凝土全寿命阶段对比表

	喷涂氟碳防腐涂料的混凝土(70 a)	无氟超疏水混凝土(70 a)
	500 元/0.24m ³ 混凝土	500 元/0.24m ³ 混凝土
施工阶段	13.64 元/m ² 氟碳防腐涂料(涂料费每 3 年上涨 2%) 混凝土浇筑 80 元/m ³ (人工费每年上涨 3%) 涂料喷涂 8 元/m ² (人工费每年上涨 3%)	5 元/m ² 无氟超疏水涂料(每 3 年上涨 3%) 混凝土浇筑 80 元/m ³ (人工费每年上涨 3%) 涂料喷涂 8 元/m ² (人工费每年上涨 3%)
运维阶段	15 年维修一次 材料费 13.64 元/m ² (涂料费每 3 年上涨 2%) 人工机械费 8 元/m ² (人工费每年上涨 3%)	n 年维修一次 材料费 5 元/m ² (涂料费每 3 年上涨 3%) 人工机械费 8 元/m ² (人工费每年上涨 3%)

1) 施工阶段: 项目施工阶段主要包含购买 C50 混凝土的费用; 氟碳防腐涂料或无氟超疏水涂料的费用; 混凝土浇筑费用; 相应涂层喷涂费用, 用 $C_{E,j}$ 表示。

$$C_{E,j} = C_{e,j} \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (1)$$

式中 i 为折现率, 取 12%

2) 运维阶段: 本文暂定在设定的应用场景下喷涂氟碳防腐涂料的混凝土 15 年修复一次, 修复初始价为 21.64 元/m²; 喷涂无氟超疏水涂料的混凝土 n 年修复一次, 修复初始价为 13 元/m², 总维修成本用 $C_{M,j}$ 表示。

$$C_{M,j} = \sum_{j=1}^n C_{m,j} \times \frac{1}{(1+i)^n} \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (2)$$

式中 i 为折现率, 取 12%。

2.3. LCC 理论分析

本文采用费用年值法计算总成本并进行对比分析(混凝土转化为 1 m³ 计算, 涂料按 1 m² 计算)。费用年值法指将不同方案的资金按照基准折现率折算到某基准年的总费用平均分摊到项目运营期的各年, 费用年值越小的方案经济效果越优。

$$C_{LCC} = C_{E,j} + C_{M,j} \quad (3)$$

按式(3)计算全寿命周期总成本, 计算过程如下所示:

1) 喷涂氟碳防腐涂料的混凝土

$$C_{LCC1} = [(120 + 13.64) + 80 + 8 + A] \times \frac{12\% \times (1 + 12\%)^{70}}{(1 + 12\%)^{70} - 1} = 27.40 \text{ 元}$$

$$\begin{aligned}
 A = & \left[13.64 \times (1+2\%)^5 + 8 \times (1+3\%)^{15} \right] \times \frac{1}{(1+12\%)^{15}} \\
 & + \left[13.64 \times (1+2\%)^{10} + 8 \times (1+3\%)^{30} \right] \times \frac{1}{(1+12\%)^{30}} \\
 & + \left[13.64 \times (1+2\%)^{15} + 8 \times (1+3\%)^{45} \right] \times \frac{1}{(1+12\%)^{45}} \\
 & + \left[13.64 \times (1+2\%)^{20} + 8 \times (1+3\%)^{60} \right] \times \frac{1}{(1+12\%)^{60}}
 \end{aligned}$$

2) 喷涂无氟超疏水涂料的混凝土

$$\begin{aligned}
 C_{LCC2} = & \left[(120+5) + 80 + 8 + B \right] \times \frac{12\% \times (1+12\%)^{70}}{(1+12\%)^{70} - 1} \\
 B = & \left[5 \times (1+3\%)^{\lfloor \frac{n}{3} \rfloor} + 8 \times (1+3\%)^n \right] \times \frac{1}{(1+12\%)^n} \\
 & + \left[5 \times (1+3\%)^{\lfloor \frac{2n}{3} \rfloor} + 8 \times (1+3\%)^{2n} \right] \times \frac{1}{(1+12\%)^{2n}} \\
 & + \left[5 \times (1+3\%)^{\lfloor \frac{3n}{3} \rfloor} + 8 \times (1+3\%)^{3n} \right] \times \frac{1}{(1+12\%)^{3n}} \\
 & + \left[5 \times (1+3\%)^{\lfloor \frac{4n}{3} \rfloor} + 8 \times (1+3\%)^{4n} \right] \times \frac{1}{(1+12\%)^{4n}} + \dots
 \end{aligned}$$

式中： $\lfloor \frac{n}{3} \rfloor$ 指对 $\frac{n}{3}$ 取整。

根据计算得出， $n = 7$ 时， $C_{LCC2} = 27.32$ 元，且随着 n 的增大， C_{LCC2} 的值将进一步下降。

综上，可以得出两者计算结果较接近且 $C_{LCC2} < C_{LCC1}$ ，表明无氟超疏水混凝土全寿命周期成本在维修间隔为 7 年时已小于氟碳防腐涂料混凝土的全寿命周期成本，因此当维修间隔在大于 7 年时，无氟超疏水混凝土是从全寿命周期成本分析角度出发的最优选择。

3. 无氟超疏水混凝土的市场前景分析

设此时无氟超疏水混凝土维修间隔期已大于 7 年，现将其投入市场，借助 SWOT 分析法分析其市场前景，并制定相应的市场战略，有助于其迅速找准市场定位，面对市场竞争。

3.1. 无氟超疏水混凝土 SWOT 分析

下表 2 通过 SWOT 分析法来具体分析无氟超疏水混凝土在市场和行业中的优劣势及机会与威胁，进一步分析其市场前景。

3.2. 无氟超疏水混凝土的市场战略分析

针对表 2 列举的四个象限，下文进行两两态势分析，提出四种战略模型，利于无氟超疏水混凝土在市场中充分发挥优势，利用机会，积极克服劣势，回避威胁。

从下表 3 可以看出无氟超疏水混凝土投入市场后积极实施的战略应为扭转型战略，依靠国家政策支持，通过宣传等手段使大众迅速熟知，凭借其与传统普通混凝土相比更优的自清洁性、抗渗性、抗冻性

及与含氟超疏水混凝土相比更优的环保性等优良特性获得大众青睐，快速打开市场。总体而言，无氟超疏水混凝土的市场前景较好，具有可行性。

Table 2. Non-fluorinated super-hydrophobic concrete SWOT analysis table

表 2. 无氟超疏水混凝土 SWOT 分析表

优势(Strength)	劣势(Weakness)
1) 无氟超疏水混凝土具有自清洁性，生产方式简便且成本低，不含氟，生态环保 2) 无氟超疏水混凝土抗渗性较好，可以有效防止内部钢筋锈蚀，延长钢筋混凝土结构使用寿命 3) 目前廉价且生产简便的超疏水混凝土的市场占有率低，一旦技术成熟投入大规模生产，可迅速抢占市场份额	1) 无氟超疏水混凝土与喷涂氟碳防腐涂料的混凝土相比耐磨性较差，持久性较弱 2) 使用无氟超疏水混凝土将增加初期投资，且民众普及率较低，市场推广难度较大
机会(Opportunity)	威胁(Threats)
1) 十七大报告指出“把建设资源节约型、环境友好型社会放在工业化、现代化发展战略的突出位置”。因此无氟超疏水混凝土积极响应国家政策，不含氟，生态环保，利于其推广 2) 大众环保意识的大幅提高，利于无氟超疏水混凝土在市场的推广与发展	1) 无氟超疏水混凝土的应用还需要匹配相应的技术人员解决应用过程中产生的问题，需要投入较多资金 2) 超疏水涂料可替代品多，且价格参差不齐，让产品效益大打折扣

Table 3. SWOT strategy analysis of super-hydrophobic concrete

表 3. 超疏水混凝土 SWOT 战略分析

内部因素 外部因素	优势 (Strength)	劣势(Weakness)
机会 (Opportunity)	SO 战略 1) 利用无氟超疏水混凝土良好的自清洁性、抗渗性、环保性等特点，积极响应国家政策号召，顺应民众环保意识逐渐提高的市场环境，率先给民众树立良好的产品形象 2) 密切关注市场动向，利用其生产方式简便且成本低廉的特点，顺应国家政策的支持，大力推广无氟超疏水混凝土，率先抢占市场	WO 战略 1) 利用绿色环保政策支持，增加宣传力度，利用物联网等媒介进行宣传，在无形中获得市场份额，降低总体投入 2) 引起垂直客户分享，获得二次传播机会 3) 跟踪市场需求，进行技术改良，进一步提高无氟超疏水混凝土的耐磨性与持久性，更好适应市场竞争
威胁 (Threats)	ST 战略 1) 排摸市场上超疏水涂料的性能与价格，了解市场及竞争对手的情况，再结合无氟超疏水混凝土的特点，趋利避害，制订一份有竞争力的销售方案 2) 在项目初期，为客户提供免费技术支持，降低客户对技术人员的资金投入 3) 随时跟踪客户反馈，汇总问题并进行技术优化，形成成熟的商业化生产体系，减少相应生产事故发生 4) 改良无氟超疏水混凝土，进行深度研发，增加产品品类，提高市场竞争力	WT 战略 1) 找到合适的市场定位，明白竞争对手的优劣势，在市场中找到立足之地 2) 完善生产技术和生产流程，提高无氟超疏水混凝土的生产效率，提高市场竞争力

4. 结论

无氟超疏水混凝土具有良好的疏水性、自清洁性、抗渗性、抗冻性等性能，且生产方式简便，生产成本低，更为环保。从全寿命周期角度对其进行成本分析得出，在维修间隔大于 7 年时，其全寿命周期成本比喷涂氟碳防腐涂料的混凝土更低，整体经济效益更优。再结合 SWOT 分析法，分析其市场前景，制定最优方案，以实现超疏水混凝土利益最大化。

基金项目

国家大学生创新创业训练计划项目(202013022028)。

参考文献

- [1] 李宇翔. 低成本超疏水混凝土涂层制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [2] 贾曦, 梅艳, 胡小冬, 等. TiO₂/SiO₂ 非晶复合薄膜的超亲水性能研究[J]. 化工新型材料, 2017(3): 75-77.
- [3] Pizarro, G.D.C., Marambio, O.G., Jeria-Orell, M., *et al.* (2010) Preparation, Characterization, and Thermalproperties of Hydrophilic Copolymers: p-Chlorophenylmaleimides with Hydroxyethyl Methacrylate and β -Methylitaconate. *Polymer International*, **56**, 1166-1172. <https://doi.org/10.1002/pi.2256>
- [4] Zhang, P., Cong, Y., Vogel, M., *et al.* (2017) Steel Reinforcement Corrosion in Concrete under Combined Actions: The Role of Freeze-Thaw Cycles, Chloride Ingress, and Surface Impregnation. *Construction and Building Materials*, **148**, 113-121. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.078>
- [5] Lu, Y., Sathasivam, S., Song, J., *et al.* (2015) Robust Self-Cleaning Surfaces That Function When Exposed to Either Air or Oil. *Science*, **347**, 1132-1135. <https://doi.org/10.1126/science.aaa0946>
- [6] Mammen, L., Deng, X., Butt, H., *et al.* (2012) Candle Soot as a Template for a Transparent Robust Superamphiphobic Coating. *Science*, **335**, 67-70. <https://doi.org/10.1126/science.1207115>
- [7] 刘伊生. 工程造价管理基础理论与相关法规[M]. 北京: 中国计划出版社, 2006: 91-111.
- [8] Meredith, J.R. and Mantel Jr., S.J. (2003) Project Management. 5th Edition. New Wiley.