

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2024 年 11 月 28 日 (28.11.2024)



(10) 国际公布号
WO 2024/239355 A1

(51) 国际专利分类号:
G06F 30/23 (2020.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2023/097012

(22) 国际申请日: 2023 年 5 月 30 日 (30.05.2023)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
202310597741.1 2023年5月25日 (25.05.2023) CN

(71) 申请人:东南大学(SOUTHEAST UNIVERSITY) [CN/
CN]; 中国江苏省南京市江宁区东南大学
路2号, Jiangsu 211100 (CN)。

(72) 发明人:王凤娟(WANG, Fengjuan); 中国江苏省南京
市江宁区东南大学路2号, Jiangsu 211100 (CN)。
王赟程(WANG, Yuncheng); 中国江苏省南京市江宁
区东南大学路2号, Jiangsu 211100 (CN)。 蒋金洋
(JIANG, Jinyang); 中国江苏省南京市江宁区东南大
学路2号, Jiangsu 211100 (CN)。 穆松(MU, Song);
中国江苏省南京市江宁区醴泉路118号, Jiangsu
211100 (CN)。 刘志勇(LIU, Zhiyong); 中国江苏省
南京市江宁区东南大学路2号, Jiangsu 211100

(CN)。 李映泽(LI, Yingze); 中国江苏省南京市江
宁区东南大学路2号, Jiangsu 211100 (CN)。

(74) 代理人: 北京卓胜佰达知识产权代理有
限公司(BEIJING ZHUOSHENG BAIDA IP AGENT
LTD.); 中国北京市通州区水仙西路99号2
层01-2222, Beijing 101100 (CN)。

(81) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的国家
保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG,
BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU,
CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI,
GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IQ,
IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ,
LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, MG, MK, MN,
MU, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA,
PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD,
SE, SG, SK, SL, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ,
UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国(除另有指明, 要求每一种可提供的地区
保护): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ,
NA, RW, SC, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚
(AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE,

(54) **Title:** CONCRETE SERVICE LIFE CALCULATION METHOD CONSIDERING PROTECTION AND REPAIR EFFECTS
IN PLATEAU ENVIRONMENT

(54) 发明名称: 一种高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法

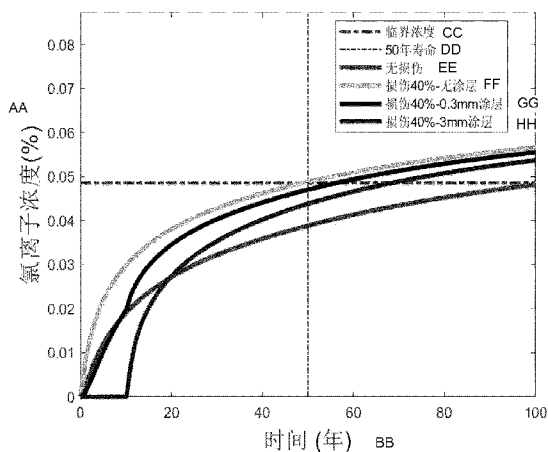


图 9

AA Chloride ion concentration (%)
BB Time (year)
CC Critical concentration
DD 50-year service life
EE No damage
FF Damage 40%-no coating
GG Damage 40%-0.3 mm coating
HH Damage 40%-3 mm coating

(57) **Abstract:** A concrete service life calculation method considering protection and repair effects in a plateau environment, comprising: establishing a mapping relationship among the plateau environment, a load parameter and time; constructing a concrete geometric model, and determining material attributes of each phase in the geometric model; establishing a multi-factor coupling action physical field equation, and setting boundary conditions and an initial condition on the basis of the concrete geometric model; solving for the internal temperature, humidity, salt concentration, and stress distribution of concrete, and the change conditions of the internal temperature, humidity, salt concentration, and stress distribution of the concrete along with time; and calculating the time when reinforcing steel bars in the concrete reach a critical corrosion concentration to generate a depassivation state, and determining the service life of the concrete. The present invention simulates the internal temperature, humidity, stress response and service life of the concrete after a single surface protection coating, a crack repairing material, and a reinforcing steel bar corrosion repairing material are used or several types of protection and repairing materials are simultaneously used in different plateau environments, thereby providing a basis for design and construction of a concrete structure in a plateau environment.



BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR,
HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, ME, MK, MT, NL, NO,
PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF,
CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN,
TD, TG)。

本国际公布：
— 包括国际检索报告(条约第21条(3))。

(57) 摘要：一种高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，包括：建立高原环境、荷载参数与时间的映射关系；构建混凝土几何模型，确定几何模型中各物相的材料属性；建立多因素耦合作用物理场方程，在混凝土几何模型的基础上设定边界条件和初始条件；求解混凝土内部温度、湿度、盐浓度、应力分布及其随时间的变化情况；计算混凝土内部的钢筋达到临界锈蚀浓度发生脱钝状态的时间，确定混凝土服役寿命；通过模拟不同高原环境下使用单一的表面防护涂层、裂缝修复材料和钢筋锈蚀修复材料或同时使用几类防护与修复材料后混凝土内部温度、湿度、应力响应和服役寿命，从而为高原环境下混凝土结构设计与施工提供依据。

说明书

发明名称: 一种高原环境考虑防护 与修复效果的混凝土寿命计算方法

技术领域

[0001] 本发明属于混凝土服役寿命计算领域，特别是涉及一种高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法。

背景技术

[0002] 我国川藏铁路、青藏高速公路等国家重大交通工程正在往高原地区推进。该类工程区域具有最大 28°C 昼夜温差、 $30\%-50\%$ 相对湿度、最低气温 -32°C 低温严寒、180天以上正负温交替高频冻融、盐浓度超标准上限数倍超盐渍土等极端环境特征。大温差、极端干燥、非饱和冻融与盐渍土的耦合作用，导致混凝土性能快速劣化、施工运维困难，对桥隧为主体的重大交通工程安全服役与耐久形成严峻挑战。表层防护、基体损伤修复与钢筋锈蚀修复是保障高频冻融、大温差、超盐渍土等高原环境下钢筋混凝土耐久性的重要途径。

[0003] 目前，国内外学者开展了较多冻融、盐侵蚀、干湿交替环境下混凝土腐蚀劣化实验，收集氯离子、硫酸盐等离子浓度分布，从而预测混凝土服役寿命。然而，高原环境复杂，防护与修复材料种类多、性能参差不齐，现有研究方法对于单一高原环境下混凝土寿命计算不准确，无法适用于高原多因素耦合环境下的混凝土寿命计算，更无法计算考虑防护与修复作用的混凝土服役寿命。

[0004] 发明内容

[0005] 本发明的目的是提供一种高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，以解决现有方法无法计算高原环境下考虑防护与修复效果的混凝土服役寿命问题。

[0006] 为实现上述目的，本发明提供了一种高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，包括以下步骤：

- [0007] S1.确定模拟高原环境的温度、湿度、盐浓度和内、外力荷载作用情况，建立高原环境、荷载参数与时间的映射关系；
- [0008] S2.构建高原环境下考虑防护与修复作用的混凝土几何模型，并确定所述几何模型中各物相的材料属性；
- [0009] S3.建立温度-湿度-盐浓度-荷载多因素耦合作用物理场方程，在所述混凝土几何模型的基础上设定内部、外部边界条件和初始条件，其中，所述外部边界条件为所述高原环境、荷载参数与时间的映射关系；
- [0010] S4.求解高原环境和荷载作用下考虑防护与修复作用的混凝土内部温度、湿度、盐浓度、应力分布及其随时间的变化情况；
- [0011] S5.计算考虑防护与修复作用的混凝土内部的钢筋达到临界锈蚀浓度发生脱钝状态的时间，确定混凝土服役寿命。
- [0012] 可选的，所述S1中，所述高原环境、荷载参数与时间的映射关系，为固定不变或任意形式变化的温度、湿度、盐浓度和内、外力荷载；盐为侵蚀介质，包括：氯化钠、氯化钙、氯化铯、硫酸钠、硫酸镁；内、外力荷载包括：重力、内部孔隙膨胀力、外部荷载。
- [0013] 可选的，所述S2中，所述混凝土几何模型的构建过程为：采用蒙特卡洛方法随机生成混凝土细观结构，在混凝土表层添加任意厚度的防护涂层几何模型，所述防护涂层几何模型在1维结构中为与混凝土相连的线段，在2维模型中为与混凝土贴合的四面体，在3维结构模型中为与混凝土相贴合的六面体，损伤修复材料是均匀分布在水泥浆体内部的点阵或空间域；
- [0014] 可选的，所述S2中，所述混凝土几何模型包含粗骨料、细骨料和水泥浆体，粗细骨料级配类型可自由设置，骨料体积分数在0%~80%之间，混凝土表面防护涂层是粘附在混凝土表面的连续涂层，混凝土修复材料是以场域形式均匀分布在水泥浆体内部，产生损伤后自动触发修复作用，降低侵蚀介质传输速率并恢复混凝土力学性能。
- [0015] 可选的，所述S2中，所述物相包括：骨料、浆体、涂层；

[0016] 所述浆体的材料属性包括：弹性模量、泊松比、密度、抗拉强度、断裂能、相变温度、相变温度间隔、相变潜热、导热系数、恒压热容、离子扩散系数、孔隙率、孔径分布；

[0017] 所述涂层的材料属性包括：导热系数、恒压热容、离子扩散系数；

[0018] 所述骨料和所述涂层的相关实验参数通过实验测试获得；所述浆体由砂和水泥浆体组成，浆体的参数由细观力学等效介质理论计算得到。

[0019] 可选的，所述S3中，所述多因素耦合作用物理场方程包括：温度传导方程、水分传输方程、盐传输方程和力作用方程；

[0020] 可选的，所述温度传导方程为：

$$\rho C \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - L \frac{d\theta}{dt}$$

[0021] 其中， ρ 为密度， C 为比热容， T 为温度， t 为时间， λ 为导热系数， L 为相变潜热， θ_L 为含水率；内部初始温度设定为与高原环境初始温度保持一致，边界条件选用dirichlet边界条件，与S1中确定的高原环境温度参数保持一致；

[0022] 所述水分传输方程考虑了气态水和液态水的两项传输作用，表达如下：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\left(\frac{dP_c}{d\theta} \frac{K_{sl} K_{rl}}{\varphi \eta} + \frac{dP_c}{d\theta} \left(\frac{M_w}{RT \rho_l} \right)^2 D_{g0} \varphi^{4/3} (1-\theta)^{10/3} \frac{P_{gs}}{\varphi} e^{\frac{M_w P_c}{RT \rho_l}} \right) \nabla \theta \right]$$

[0023] 其中， P_c 为水分特征曲线， K_a 为饱和状态下水在材料中的渗透系数， φ 为孔隙率， η 为水的粘度， K_a 为液相的相对渗透系数， M_w 为水的摩尔质量， R 为相对气体常数， ρ_l 为水的密度， D_{g0} 为水蒸气在空气中的自由扩散系数； P_{gs} 为饱和蒸气压；

[0024] 内部初始水分含量根据实际混凝土设定，范围在0~100RH%，边界条件选用dirichlet边界条件，与S1中确定的高原环境水分参数保持一致；

[0025] 盐离子传输仅考虑对流和扩散两个作用，不考虑化学反应时，所述盐传输方程如下：

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot \left\{ \left[D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \left(1 + \left(\frac{1-\theta}{1-\theta_c} \right)^4 \right)^{-1} e^{\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \frac{(1-f_r d)}{1+R_b} + f_r d D_f \right] \nabla c - c \frac{dP_c}{d\theta} \frac{K_{sl}}{\varphi \eta} K_{rl} \nabla \theta \right\}$$

[0026] 其中, c 为盐离子浓度, D_0 为浆体中的基准离子扩散系数, t_0 为基准离子扩散系数测定的时间, m 为时间依赖系数, θ_c 为孔隙临界饱和度, U 为混凝土中的离子活化能, T_{ref} 为基准离子扩散系数测定时的温度, d 为损伤因子, 由损伤力学能量法求得, f_r 为修复材料对损伤的修复率, D_e 为离子在水中的扩散系数, R_b 为混凝土对离子的结合影响因子; 内部初始离子浓度设定为0, 边界条件选用dirichlet边界条件, 与S1中确定的高原环境离子参数保持一致;

[0027] 所述力作用方程如下:

$$\nabla \cdot \sigma = b \dot{p}^*$$

[0028] 其中, σ 为应力, b 为Biot系数, p^* 为环境作用等效荷载, 所述环境作用等效荷载包括: 冻融、硫酸盐因素引起的内膨胀等效荷载;

$$p^* = \sum_{i=1}^n \omega_i p_i^*$$

$$p_{FT}^* = \frac{1}{\varphi} \int_{r_{min}}^{r_{max}} p_f(r) dr,$$

$$p_f(r) = \begin{cases} \frac{K\epsilon + b_L \Sigma_m \Delta T + 3\alpha_s K \Delta T}{b} & C \\ \frac{K\epsilon - b_C \Sigma_m \Delta T + 3\alpha_s K \Delta T}{b} & L \\ p_{atm} - p_{atm0} & G \end{cases},$$

$$\epsilon = -3 \left[\alpha_s + \frac{\varphi M b}{K + b^2 M} (S_C \alpha_C + S_L \alpha_L - \alpha_s) \Delta T \right] + \frac{M}{K + b^2 M} \left(\frac{b_C}{K_L} - \frac{b_L}{K_C} \right) \Sigma_m \Delta T + \frac{\varphi M b}{K + b^2 M} S_C \left(1 - \frac{\rho_C^0}{\rho_L^0} \right)$$

[0029] 其中, p_{FT}^* 为冻融引起的内膨胀荷载力, r_{max} 和 r_{min} 为基体内最大和最小孔径, K 、 K_L 、 K_C 分别为浆体、水和冰的基体模量, ϵ 为浆体的应变, b_L 、 b_C 分别为水和冰的Biot系数, α_s 为浆体的热膨胀系数, p_{atm} 为高原环境气压, p_{atm0} 为浇筑浆体时的环境气压, S_C 、 S_L 、 S_G 分别为对应温度下冰、水和气孔的体积分数, p_s^* 为硫酸盐侵蚀引起的内膨胀等效荷载, v_{AFc} 为膨胀钙矾石体积分数, ω_i 为对应环境作用影响因子, p_i^* 分别代表冻融、硫酸盐、镁盐环境等效荷载。

[0030] 可选的, 所述S5具体为: 以钢筋开始锈蚀时的寿命为混凝土的最终服役寿命, 通过步骤S1-S4求解不同深度处的离子浓度, 对比临界浓度确定混凝土服役寿

命，钢筋锈蚀修复材料会提高钢筋的临界离子浓度，因此混凝土服役寿命计算如下：

$$t_c = t|_{c(x_d)=f_{rr}*ccr}$$

[0031] 其中， t_c 为混凝土服役寿命， x_d 为钢筋埋置深度， f_{rr} 为钢筋锈蚀修复材料作用因子， ccr 为钢筋固有的锈蚀临界浓度。

[0032] 本发明的技术效果为：

[0033] 本发明可以模拟不同高原环境下使用单一的表面防护涂层、裂缝修复材料和钢筋阻锈材料或同时使用几类防护与修复材料后混凝土内部温度、湿度、应力响应和服役寿命，从而为高原环境下混凝土结构设计与施工提供依据。

附图说明

[0034] 构成本申请的一部分的附图用来提供对本申请的进一步理解，本申请的示意性实施例及其说明用于解释本申请，并不构成对本申请的不当限定。在附图中：

[0035] 图1为本发明实施例中的为2维形式考虑防护与修复材料的几何模型示意图；

[0036] 图2为本发明实施例中的使用不同类型防护涂层后混凝土表面0-5mm处侵蚀介质浓度分布情况示意图；

[0037] 图3为本发明实施例中的使用不同类型防护涂层后钢筋埋置深度处侵蚀介质浓度分布情况示意图；

[0038] 图4为本发明实施例中的使用不同厚度的防护涂层后混凝土内部的侵蚀介质浓度分布情况示意图；

[0039] 图5为本发明实施例中的使用不同寿命的防护涂层后混凝土内部的侵蚀介质浓度分布情况示意图；

[0040] 图6为本发明实施例中的使用修复率为50%的裂缝修复材料后混凝土内部的侵蚀介质浓度分布情况示意图；

[0041] 图7为本发明实施例中的使用修复率为70%的裂缝修复材料后混凝土内部的侵蚀介质浓度分布情况示意图；

[0042] 图8为本发明实施例中的使用修复率为90%的裂缝修复材料后混凝土内部的侵蚀介质浓度分布情况示意图；

[0043] 图9为本发明实施例中的使用防护涂层后钢筋深度处的混凝土侵蚀介质浓度和临界浓度比较情况示意图；

[0044] 图10为本发明实施例中的使用损伤修复材料和钢筋锈蚀修复后钢筋深度处的混凝土侵蚀介质浓度和临界浓度比较情况示意图。

具体实施方式

[0045] 需要说明的是，在不冲突的情况下，本申请中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。下面将参考附图并结合实施例来详细说明本申请。

[0046] 本发明的目的是提供一种高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，解决现有方法无法计算高原环境下考虑防护与修复效果的混凝土服役寿命问题。

[0047] 一种高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，包括以下步骤：

[0048] (1)确定模拟高原环境的温度、湿度、盐浓度和内、外力荷载作用情况，建立上述环境和荷载参数与时间的映射关系；

[0049] (2)构建考虑防护与修复作用的混凝土细观结构几何模型，并确定几何模型中各物相的材料属性；

[0050] (3)建立温度-湿度-盐浓度-荷载多因素耦合作用物理场方程，在步骤(2)建立的混凝土几何模型基础上设定内部、外部边界条件和初始条件，其中外部边界条件为步骤(1)中确定的高原环境和荷载参数与时间的映射关系；

[0051] (4)求解高原环境和荷载作用下考虑防护与修复作用的混凝土内部温度、湿度、盐浓度、应力分布及其随时间的变化情况；

[0052] (5)计算考虑防护与修复作用的混凝土内部的钢筋达到临界锈蚀浓度发生脱钝状态的时间，确定混凝土服役寿命。

[0053] 其中，所述步骤(1)中环境和荷载参数与时间的映射关系，可以是固定不变的或任意形式变化的温度、湿度和外荷载作用。

[0054] 所述步骤(2)中考虑防护与修复作用的混凝土几何模型，采用蒙特卡洛方法随机生成混凝土细观结构，在混凝土表层添加任意厚度的防护涂层几何模型，防护涂层几何模型在1维结构中为与混凝土相连的线段，在2维模型中为与混凝土贴

合的四面体，在3维结构模型中为与混凝土相贴合的6面体。损伤修复材料是均匀分布在水泥浆体内部的点阵或空间域。

[0055] 所述步骤(2)的考虑防护与修复作用的混凝土几何模型中存在骨料、浆体、涂层等物相，浆体需提供包括弹性模量、泊松比、密度、抗拉强度、断裂能、相变温度、相变温度间隔、相变潜热、导热系数、恒压热容、离子扩散系数、孔隙率、孔径分布等参数，涂层需提供导热系数、恒压热容、离子扩散系数。

[0056] 其中，骨料和涂层的相关实验参数通过实验测试获得。由于浆体由砂和水泥浆体组成，因此是一种复合材料，浆体的参数由细观力学等效介质理论计算得到。

[0057] 所述步骤(3)中的考虑防护与修复作用时，混凝土中的多因素耦合作用物理场方程包括温度传导方程、水分传输方程、盐传输方程和力作用方程。其中温度传导方程如下：

$$\rho C \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - L \frac{d\theta}{dt}$$

[0058] 式中具体的 ρ 为密度， C 为比热容， T 为温度， t 为时间， λ 为导热系数， L 为相变潜热， θ 为含水率。

[0059] 内部初始温度设定为与高原环境初始温度保持一致，边界条件选用dirichlet边界条件，与步骤(1)中确定的高原环境温度参数保持一致。

[0060] 其中水分传输方程考虑了气态水和液态水的两项传输作用，如下所示：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\left(\frac{dP_c}{d\theta} \frac{K_{sl} K_{rl}}{\varphi \eta} + \frac{dP_c}{d\theta} \left(\frac{M_w}{RT \rho_l} \right)^2 D_{g0} \varphi^{4/3} (1 - \theta)^{10/3} \frac{P_{gs}}{\varphi} e^{\frac{M_w}{RT} P_c} \right) \nabla \theta \right]$$

[0061] 式中具体的 P_c 为水分特征曲线， K_a 为饱和状态下水在材料中的渗透系数。 φ 为孔隙率， η 为水的粘度， K_a 为液相的相对渗透系数， M_w 为水的摩尔质量， R 为相对气体常数， ρ_l 为水的密度， D_{g0} 为水蒸气在空气中的自由扩散系数； P_{gs} 为饱和蒸气压。

[0062] 内部初始水分含量根据实际混凝土设定，范围在0~100RH%，边界条件选用dirichlet边界条件，与步骤(1)中确定的高原环境水分参数保持一致。

[0063] 其中盐离子传输仅考虑对流和扩散两个作用，不考虑化学反应时，控制方程如下：

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot \left\{ \left[D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \left(1 + \left(\frac{1 - \theta}{1 - \theta_c} \right)^4 \right)^{-1} e^{\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T} \right)} \frac{(1 - f_r d)}{1 + R_b} + f_r d D_f \right] \nabla c - c \frac{dP_c}{d\theta} \frac{K_{sl}}{\varphi \eta} K_{rl} \nabla \theta \right\}$$

[0064] 式中的具体的 c 为盐离子浓度， D_0 为浆体中的基准离子扩散系数， t_0 为基准离子扩散系数测定的时间， m 为时间依赖系数， θ_c 为孔隙临界饱和度， U 为混凝土中的离子活化能， T_{ref} 为基准离子扩散系数测定时的温度， d 为损伤因子，由损伤力学能量法求得， f_r 为修复材料对损伤的修复率， D_f 为离子在水中的扩散系数， R_b 为混凝土对离子的结合影响因子。

[0065] 内部初始离子浓度设定为0，边界条件选用dirichlet边界条件，与步骤(1)中确定的高原环境离子参数保持一致。

[0066] 其中力作用方程如下：

$$\nabla \cdot \sigma = b \dot{p}^*$$

[0067] 式中的具体的 σ 为应力， b 为Biot系数， p^* 为环境作用等效荷载，在高原环境中，主要包括冻融、硫酸盐等因素引起的内膨胀等效荷载。

[0068] 其中，高原环境下由冻融引起的内膨胀等效荷载按下列步骤求解：①先确定特定温度下的浆体孔隙中气态、液态和冰晶的含量；②依据气态、液态和冰晶含量求解计算内膨胀荷载。

[0069] ①步骤计算按下式进行：

$$r_c = \frac{2\gamma_{CL}}{\Sigma_m \Delta T} + \delta$$

$$S_{l0}(r) = \begin{cases} 1 - S_G - (\varphi - \varphi(r_{sc})) & r > r_{sc} \\ 1 & r \leq r_{sc} \end{cases}$$

$$S_c(r) = \begin{cases} S_{l0}(r)/0.917 & S_{l0}(r) < 0.917 \\ 1 & S_{l0}(r) \geq 0.917 \end{cases} \quad \begin{matrix} r > r_c \\ r \leq r_c \end{matrix}$$

$$S_L(r) = \begin{cases} 0 & r > r_c \\ S_{l0}(r) & r \leq r_c \end{cases}$$

[0070] 式中具体的 r_c 为对应温度下的临界冻结孔径， γ_{cl} 为水冰界面能， Σ_m 为水冰相变熵， ΔT 为高原环境下实际温度与对应高原气压环境下溶液冰点的温度差，受高原气压、孔隙等影响， δ 为孔壁边水膜厚度，厚度通过非饱和C-S-H凝胶孔中水分分布的分子动力学模拟获得， $S_{l0}(r)$ 、 $S_c(r)$ 、 $S_L(r)$ 分别为对应孔径下初始液态水饱和度函数、冰晶饱和度函数和液态水饱和度函数， S_g 为浆体孔隙中气体饱和度和， r_{sc} 为临界饱和孔隙同样由分子动力学模拟获取， $\varphi(r_{sc})$ 为孔径小于 r_{sc} 的孔隙率。

[0071] ②步骤计算按下式进行：

$$p_{FT}^* = \frac{1}{\varphi} \int_{r_{min}}^{r_{max}} p_J(r) dr$$

$$p_J(r) = \begin{cases} \frac{K\epsilon + b_L \Sigma_m \Delta T + 3\alpha_s K \Delta T}{b} & C \\ \frac{K\epsilon - b_c \Sigma_m \Delta T + 3\alpha_s K \Delta T}{b} & L \\ p_{atm} - p_{atm0} & G \end{cases}$$

$$\begin{aligned} \epsilon = & -3 \left[\alpha_s + \frac{\varphi M b}{K + b^2 M} (S_c \alpha_c + S_L \alpha_L - \alpha_s) \Delta T \right] + \frac{M}{K + b^2 M} \left(\frac{b_c}{K_L} - \frac{b_L}{K_C} \right) \Sigma_m \Delta T \\ & + \frac{\varphi M b}{K + b^2 M} S_c \left(1 - \frac{\rho_c^0}{\rho_L^0} \right) \end{aligned}$$

[0072] 式中具体的 p_{FT}^* 为冻融引起的内膨胀荷载力， r_{max} 和 r_{min} 为基体内最大和最小孔径， K 、 K_L 、 K_C 分别为浆体、水和冰的基体模量， ϵ 为浆体的应变， b_L 、 b_C 分别为水和冰的Biot系数， α_s 为浆体的热膨胀系数， p_{atm} 为高原环境气压， p_{atm0} 为浇筑浆体时的环境气压， M 为计算系数， S_c 、 S_L 、 S_g 分别为对应温度下冰、水和气孔的体积分数。

[0073] 其中，高原环境下由硫酸盐等侵蚀性离子侵入并发生化学反应，在浆体孔隙中产生膨胀性侵蚀介质产生的内膨胀力按下列步骤求解：①考虑化学反应作用，

求解不同离子在浆体中的浓度分布；②依据离子浓度分布，计算化学反应体积膨胀力。

[0074] ①以硫酸盐侵蚀步骤计算按下式进行：

$$\frac{\partial c_{SO_4^{2-}}}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{SO_4^{2-}} \nabla c_{SO_4^{2-}} - c_{SO_4^{2-}} \frac{dP_c}{d\theta} \frac{K_{sl}}{\phi\eta} K_{rl} \nabla \theta) - k c_{SO_4^{2-}} c_{CA}$$

$$\frac{\partial c_{Ca^{2+}}}{\partial t} = \nabla \cdot (D_{Ca^{2+}} \nabla c_{Ca^{2+}} + D_{Ca^{2+}} c_{Ca^{2+}} \nabla \ln \gamma_{Ca^{2+}})$$

$$\frac{\partial c_{CA}}{\partial t} = -k_2 \frac{c_{gpy} c_{CA}}{q}$$

$$\frac{\partial c_{gpy}}{\partial t} = k_1 c_{SO_4^{2-}} c_{Ca^{2+}} - k_2 c_{gpy} c_{CA}$$

[0075] 式中具体的 $c_{SO_4^{2-}}$ 、 $c_{Ca^{2+}}$ 、 c_{CA} 、 c_{gpy} 、 $c_{Ca^{2+}}$ 分别为硫酸根离子、钙离子、氢氧化钙、石膏和钙离子的浓度， k 、 k_1 、 k_2 为化学反应系数， $D_{SO_4^{2-}}$ 、 $D_{Ca^{2+}}$ 为硫酸根离子和钙离子扩散系数， q 为混凝土腐蚀系数， $\gamma_{Ca^{2+}}$ 为钙离子活度。

[0076] ②步骤计算按下式进行：

$$p_s^* = \frac{RT}{v_{AFt}} \ln \left(\frac{Q_{AFt}}{K_{AFt}} \right)$$

$$\frac{Q_{AFt}}{K_{AFt}} = \frac{(c_{Ca}^p)^6 (c_{Al}^p)^2 (c_{OH}^p)^4 (c_t^p)^3}{(c_{Ca \text{ eq}}^p)^6 (c_{Al \text{ eq}}^p)^2 (c_{OH \text{ eq}}^p)^4 (c_{eq}^p)^3}$$

[0077] 式中具体的 p_s^* 为硫酸盐侵蚀引起的内膨胀等效荷载， v_{AFt} 为膨胀钙矾石体积分数，由步骤①中计算浓度结合化学反应方程确定。

[0078] 其他镁盐等腐蚀性产物在浆体中的内膨胀力可按其化学反应方程，结合步骤①进行计算。

[0079] 当高原环境同时存在冻融和硫酸盐等侵蚀介质作用时，浆体所受最终的内膨胀荷载计算如下：

$$p^* = \sum_{i=1}^n \omega_i p_i^*$$

[0080] 式中具体的 ω_i 为对应环境作用影响因子， p_i^* 分别代表冻融、硫酸盐、镁盐等环境等效荷载。

[0081] 所述步骤(4)求解上述高原环境考虑防护与修复作用的混凝土数值模型，可采用有限元法进行求解。

[0082] 所述步骤(5)以钢筋开始锈蚀时的寿命为混凝土的最终服役寿命。通过步骤(1-4)求解不同深度处的离子浓度，对比临界浓度确定混凝土服役寿命。钢筋锈蚀修复材料会提高钢筋的临界离子浓度，因此混凝土服役寿命计算如下：

$$t_c = t|_{c(x_d)} = f_{rr} * ccr$$

[0083] 式中具体的 t_c 为混凝土服役寿命， x_d 为钢筋埋置深度， f_{rr} 为钢筋锈蚀修复材料作用因子， ccr 为钢筋固有的锈蚀临界浓度。

[0084] 实施例一

[0085] 如图1-10所示，本实施例中提供一种高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，具体过程如下：

[0086] 选择我国一处服役于高原环境的混凝土墩柱，墩柱接触水，温度范围为-8~20℃，氯盐浓度为20000mg/L，无硫酸盐，不承受额外的外荷载作用，使用不同类型的防护涂层(绿化聚乙烯涂层CPE/氯丁乳液涂层CR/氯偏乳液涂层PVDC/氯化聚氯乙烯涂层CPVC)，使用不同裂缝损伤修复材料(修复率50%/70%/90%)，使用不同的钢筋锈蚀修复材料(临界浓度提高10%/30%)。

[0087] 依据步骤(1-4)构建高原环境下考虑防护作用的数值模型(图1)，并求解获得各参数在混凝土中的分布情况，以最易引起钢筋锈蚀的氯离子浓度为例(图2-8)。

[0088] 由图2可知，在2年内，水分和离子均未穿过防护涂层，在第5年时，混凝土表层骨料较少的局部区域中出现了少量水分和氯离子，但在防护涂层生效的10年内，混凝土内部并未出现大量的水分和氯离子，这也表明了防护涂层的使用寿命内防护涂层可有效隔绝水和离子的作用，直接提高混凝土抗侵蚀性能。在防护涂层的失效后，相当于水分和氯离子直接接触了混凝土表面，随即混凝

土内部的水分和氯离子含量大幅增加。由于氯离子传输主要以水位为载体，且混凝土内部存在吸附结合作用，水分传输速率远超过混凝土，在30年时，混凝土内部的整体饱和度接近于1，但氯离子仅在表层存在。使用服役寿命为10年的表层防护涂层，在15年、30年、50年、100年时，氯离子传输深度分别为8mm、37mm、34mm、40mm和48mm。

[0089] 由图3可知，混凝土氯离子浓度随时间的推移而不断增长，且增长趋势由急剧上升到缓慢提高。防护涂层的使用推迟了混凝土中氯离子的侵蚀时间点，延缓了氯离子在混凝土中的扩散速度。混凝土氯离子浓度与防护涂层寿命密切相关。随着防护涂层寿命的增加，混凝土中氯离子开始侵入的时间点逐渐被推迟，混凝土氯离子浓度也呈线性下降，表明防护涂层寿命的增加可有效降低混凝土使用过程全寿命周期中所含的氯离子浓度，提高防护涂层的寿命是阻隔延缓氯离子侵蚀和提高混凝土服役寿命的有效手段。

[0090] 由图4可知，防护涂层厚度的增加可以有效降低混凝土表面以及内部最终的氯离子浓度，且对混凝土内部氯离子浓度的降低比混凝土表面更加明显。当防护涂层厚度在1mm以内时，混凝土表面开始出现氯离子的时间点并没有被推迟；而当防护涂层厚度超过1mm时，混凝土表面氯离子浓度才开始逐渐上升。表明防护涂层厚度至少应在1mm以上时才可在涂层预期寿命内有效阻隔介质侵入混凝土中，但即使防护涂层厚度逐渐增加至3mm，依然会存在氯离子侵入混凝土表面。

[0091] 由图5可知，与未使用防护涂层相比，使用氯化聚乙烯涂层(CPE)、氯丁乳液涂层(CR)、氯偏乳液涂层(PVDC)和氯化聚氯乙烯涂层(CPVC)四种防护涂层对混凝土的最终氯离子浓度分别降低了86%、40%、70%和84%。其中，CPE、CR、PVDC和CPVC四种防护涂层均可有效延缓混凝土氯离子侵入时间，降低混凝土内部氯离子浓度，提高混凝土服役寿命。

[0092] 由图6-8可知，损伤修复材料的修复率为70%时，对于100年时30mm处的氯离子含量为未修复时的73%，损伤修复材料的损伤修复率为90%时，可将氯离子含量降低至未修复时的35%。但损伤修复率从70%~90%的变化，对于5mm内的侵蚀介质传输影响不大，因为并未完全修复损伤，由于溶液在表层裂纹中的抽吸

作用，侵蚀介质随着通道早已快速侵入混凝土内部。修复材料的修复率对于10~30mm范围内的侵蚀介质浓度降低有较大提高。

[0093] 分别考虑防护涂层、损伤修复材料和钢筋锈蚀修复材料的作用效应，依据步骤(5)求解混凝土服役寿命(图9-10)。

[0094] 由图9可知，由环境引发损伤的混凝土服役寿命为50年，若使用0.3mm的防护涂层后，寿命可提高至56年，若使用3mm的防护涂层后，寿命可提高至70年。

[0095] 由图10可知，对于不使用防护材料的混凝土，考虑损伤修复效应和锈蚀修复效应，使用损伤修复率为80%的修复材料下，可达到78年服役寿命，若使用可使临界浓度提高10%的钢筋锈蚀修复材料时，服役寿命可达63年，若同时使用两类修复材料，可保障混凝土达到100年的服役寿命。

[0096] 因此，本方法可有效计算高原环境下考虑防护与修复作用的混凝土服役寿命，为工程实践提供重要的指导作用。

[0097] 以上所述，仅为本申请较佳的具体实施方式，但本申请的保护范围并不局限于此，任何熟悉本技术领域的技术人员在本申请揭露的技术范围内，可轻易想到的变化或替换，都应涵盖在本申请的保护范围之内。因此，本申请的保护范围应该以权利要求的保护范围为准。

权利要求书

- [权利要求 1] 一种高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，其特征在于，包括以下步骤：
- S1.确定模拟高原环境的温度、湿度、盐浓度和内、外力荷载作用情况，建立高原环境、荷载参数与时间的映射关系；
- S2.构建高原环境下考虑防护与修复作用的混凝土几何模型，并确定所述几何模型中各物相的材料属性；
- S3.建立温度-湿度-盐浓度-荷载多因素耦合作用物理场方程，在所述混凝土几何模型的基础上设定内部、外部边界条件和初始条件，其中，所述外部边界条件为所述高原环境、荷载参数与时间的映射关系；
- S4.求解高原环境和荷载作用下考虑防护与修复作用的混凝土内部温度、湿度、盐浓度、应力分布及其随时间的变化情况；
- S5.计算考虑防护与修复作用的混凝土内部的钢筋达到临界锈蚀浓度发生脱钝状态的时间，确定混凝土服役寿命。
- [权利要求 2] 根据权利要求1所述的高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，其特征在于，
- 所述S1中，所述高原环境、荷载参数与时间的映射关系，为固定不变或任意形式变化的温度、湿度、盐浓度和内、外力荷载；盐为侵蚀介质，包括：氯化钠、氯化钙、氯化铯、硫酸钠、硫酸镁；内、外力荷载包括：重力、内部孔隙膨胀力、外部荷载。
- [权利要求 3] 根据权利要求1所述的高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，其特征在于，
- 所述S2中，所述混凝土几何模型的构建过程为：采用蒙特卡洛方法随机生成混凝土细观结构，在混凝土表层添加任意厚度的防护涂层几何模型，所述防护涂层几何模型在1维结构中为与混凝土相连的线段，在2维模型中为与混凝土贴合的四面体，在3维结构模型中为

与混凝土相贴合的六面体，损伤修复材料是均匀分布在水泥浆体内部的点阵或空间域。

[权利要求 4] 根据权利要求1所述的高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，其特征在于，
所述S2中，所述混凝土几何模型包含粗骨料、细骨料和水泥浆体，粗细骨料级配类型可自由设置，骨料体积分数在0% ~ 80%之间，混凝土表面防护涂层是粘附在混凝土表面的连续涂层，混凝土修复材料以场域形式均匀分布在水泥浆体内部。

[权利要求 5] 根据权利要求1所述的高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，其特征在于，
所述S2中，所述物相包括：骨料、浆体、涂层；
所述浆体的材料属性包括：弹性模量、泊松比、密度、抗拉强度、断裂能、相变温度、相变温度间隔、相变潜热、导热系数、恒压热容、离子扩散系数、孔隙率、孔径分布；
所述涂层的材料属性包括：导热系数、恒压热容、离子扩散系数；
所述骨料和所述涂层的参数通过实验测试获得；所述浆体由砂和水泥浆体组成，浆体的参数由细观力学等效介质理论计算得到。

[权利要求 6] 根据权利要求1所述的高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，其特征在于，
所述S3中，所述多因素耦合作用物理场方程包括：温度传导方程、水分传输方程、盐传输方程和力作用方程。

[权利要求 7] 根据权利要求6所述的高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，其特征在于，
所述温度传导方程为：

$$\rho C \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) - L \frac{d\theta}{dt}$$

其中， ρ 为密度， C 为比热容， T 为温度， t 为时间， λ 为导热系数， L 为相变潜热， θ_L 为含水率；

内部初始温度设定为与高原环境初始温度保持一致，边界条件选用dirichlet边界条件，与S1中确定的高原环境温度参数保持一致；
所述水分传输方程考虑了气态水和液态水的两项传输作用，表达如下：

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\left(\frac{dP_c}{d\theta} \frac{K_{sl} K_{rl}}{\varphi \eta} + \frac{dP_c}{d\theta} \left(\frac{M_w}{RT \rho_l} \right)^2 D_{g0} \varphi^{4/3} (1-\theta)^{10/3} \frac{P_{gs}}{\varphi} e^{\frac{M_w P_c}{RT \rho_l}} \right) \nabla \theta \right]$$

其中， P_c 为水分特征曲线， K_{sl} 为饱和状态下水在材料中的渗透系数， φ 为孔隙率， η 为水的粘度， K_{rl} 为液相的相对渗透系数， M_w 为水的摩尔质量， R 为相对气体常数， ρ_l 为水的密度， D_{g0} 为水蒸气在空气中的自由扩散系数； P_{gs} 为饱和蒸气压；

内部初始水分含量根据实际混凝土设定，范围在0~100RH%，边界条件选用dirichlet边界条件，与S1中确定的高原环境水分参数保持一致；

盐离子传输仅考虑对流和扩散两个作用，不考虑化学反应时，所述盐传输方程如下：

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \nabla \cdot \left\{ \left[D_0 \left(\frac{t_0}{t} \right)^m \left(1 + \left(\frac{1-\theta}{1-\theta_c} \right)^4 \right)^{-1} e^{\frac{U}{R} \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T} \right)} \frac{(1-f_r d)}{1+R_b} + f_r d D_f \right] \nabla c - c \frac{dP_c}{d\theta} \frac{K_{sl}}{\varphi \eta} K_{rl} \nabla \theta \right\}$$

其中， c 为盐离子浓度， D_0 为浆体中的基准离子扩散系数， t_0 为基准离子扩散系数测定的时间， m 为时间依赖系数， θ_c 为孔隙临界饱和度和， U 为混凝土中的离子活化能， T_{ref} 为基准离子扩散系数测定时的温度， d 为损伤因子，由损伤力学能量法求得， f_r 为修复材料对损伤的修复率， D_f 为离子在水中的扩散系数， R_b 为混凝土对离子的结合影响因子；

内部初始离子浓度设定为0，边界条件选用dirichlet边界条件，与S1中确定的高原环境离子参数保持一致；

所述力作用方程如下：

$$\nabla \cdot \sigma = b \dot{p}^*$$

其中， σ 为应力， b 为Biot系数， p^* 为环境作用等效荷载，所述环境作用等效荷载包括：冻融、硫酸盐因素引起的内膨胀等效荷载；

$$p^* = \sum_{i=1}^n \omega_i p_i^*$$

$$p_{FT}^* = \frac{1}{\varphi} \int_{r_{min}}^{r_{max}} p_f(r) dr,$$

$$p_f(r) = \begin{cases} \frac{K\epsilon + b_L \Sigma_m \Delta T + 3\alpha_s K \Delta T}{b} & C \\ \frac{K\epsilon - b_c \Sigma_m \Delta T + 3\alpha_s K \Delta T}{b} & L, \\ p_{atm} - p_{atm0} & G \end{cases}$$

$$\epsilon = -3 \left[\alpha_s + \frac{\varphi M b}{K + b^2 M} (S_c \alpha_c + S_L \alpha_L - \alpha_s) \Delta T \right] + \frac{M}{K + b^2 M} \left(\frac{b_c}{K_L} - \frac{b_L}{K_C} \right) \Sigma_m \Delta T + \frac{\varphi M b}{K + b^2 M} S_c \left(1 - \frac{\rho_c^0}{\rho_L^0} \right)$$

其中， p_{FT}^* 为冻融引起的内膨胀荷载力， r_{max} 和 r_{min} 为基体内最大和最小孔径， K 、 K_L 、 K_C 分别为浆体、水和冰的基体模量， ϵ 为浆体的应变， b_L 、 b_C 分别为水和冰的Biot系数， α_s 为浆体的热膨胀系数， p_{atm} 为高原环境气压， p_{atm0} 为浇筑浆体时的环境气压， S_c 、 S_L 、 S_G 分别为对应温度下冰、水和气孔的体积分数， p_s^* 为硫酸盐侵蚀引起的内膨胀等效荷载， v_{AFt} 为膨胀钙矾石体积分数， ω_i 为对应环境作用影响因子， p_i^* 分别代表冻融、硫酸盐、镁盐环境等效荷载。根据权利要求1所述的高原环境考虑防护与修复效果的混凝土寿命计算方法，其特征在于，

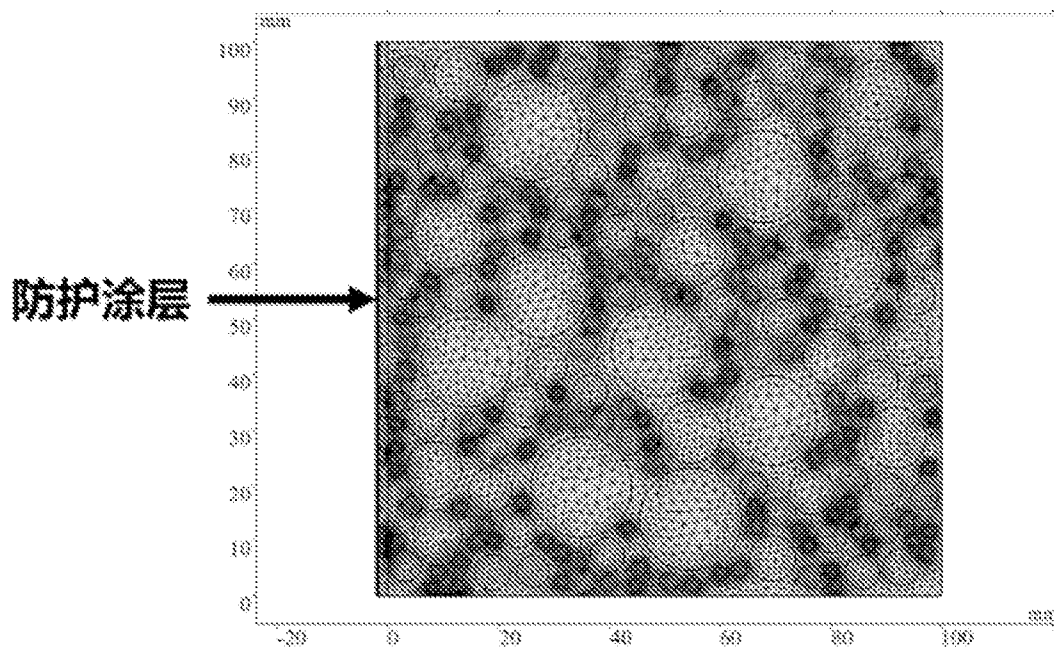
[权利要求 8]

所述S5具体为：以钢筋开始锈蚀时的寿命为混凝土的最终服役寿命，通过S1-S4求解不同深度处的离子浓度，对比临界浓度确定混凝土服役寿命，混凝土服役寿命计算如下：

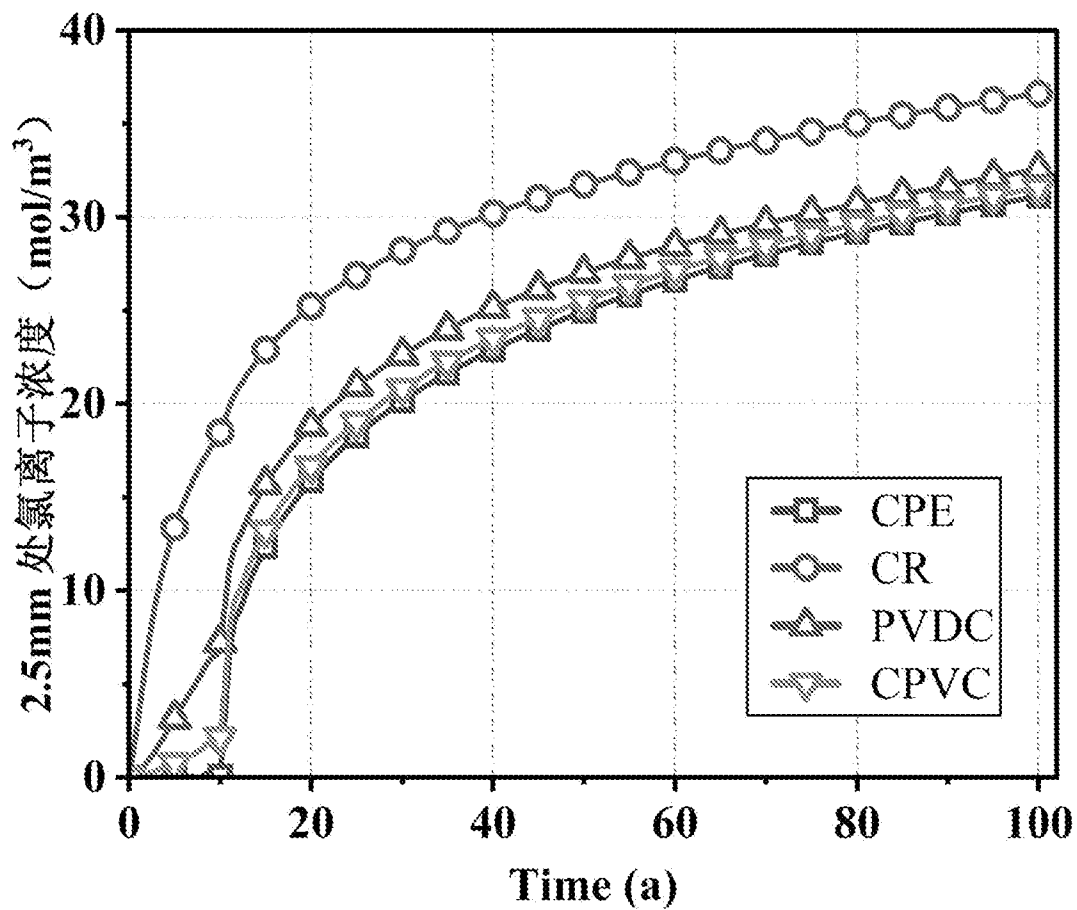
$$t_c = t|_{c(x_d)} = f_{rr} * ccr$$

其中， t_c 为混凝土服役寿命， x_d 为钢筋埋置深度， f_{rr} 为钢筋锈蚀修复材料作用因子， ccr 为钢筋固有的锈蚀临界浓度。

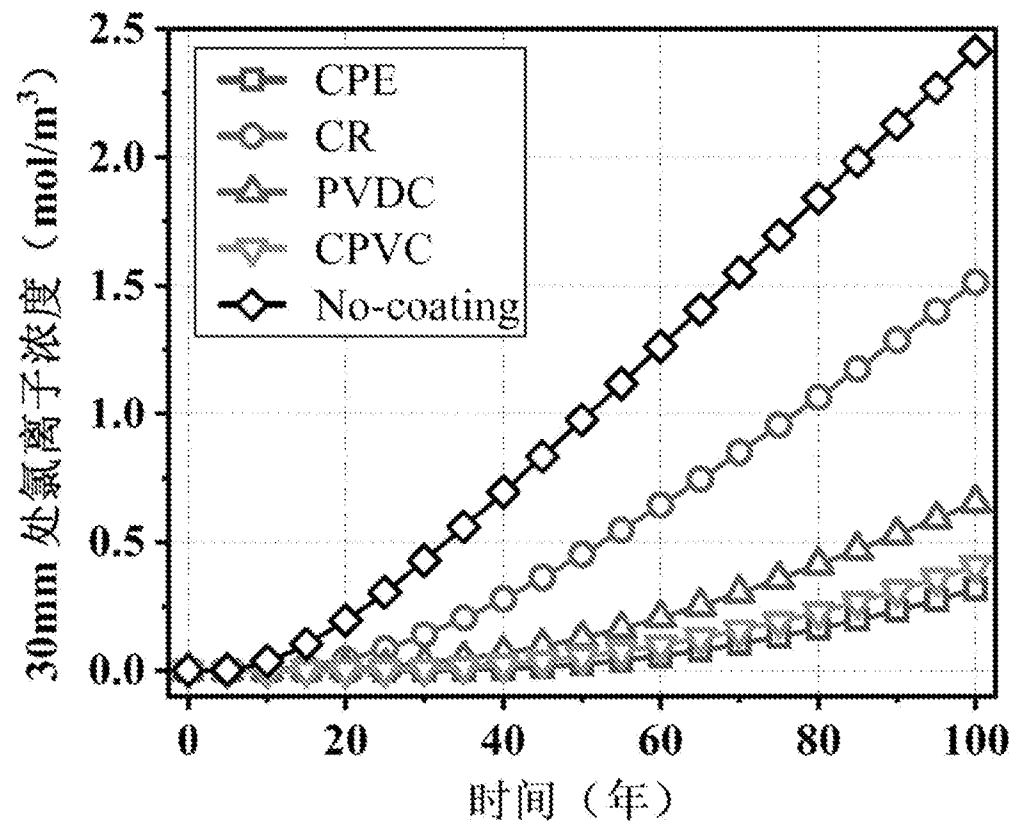
[图 1]

细则 91,
20.06.2023

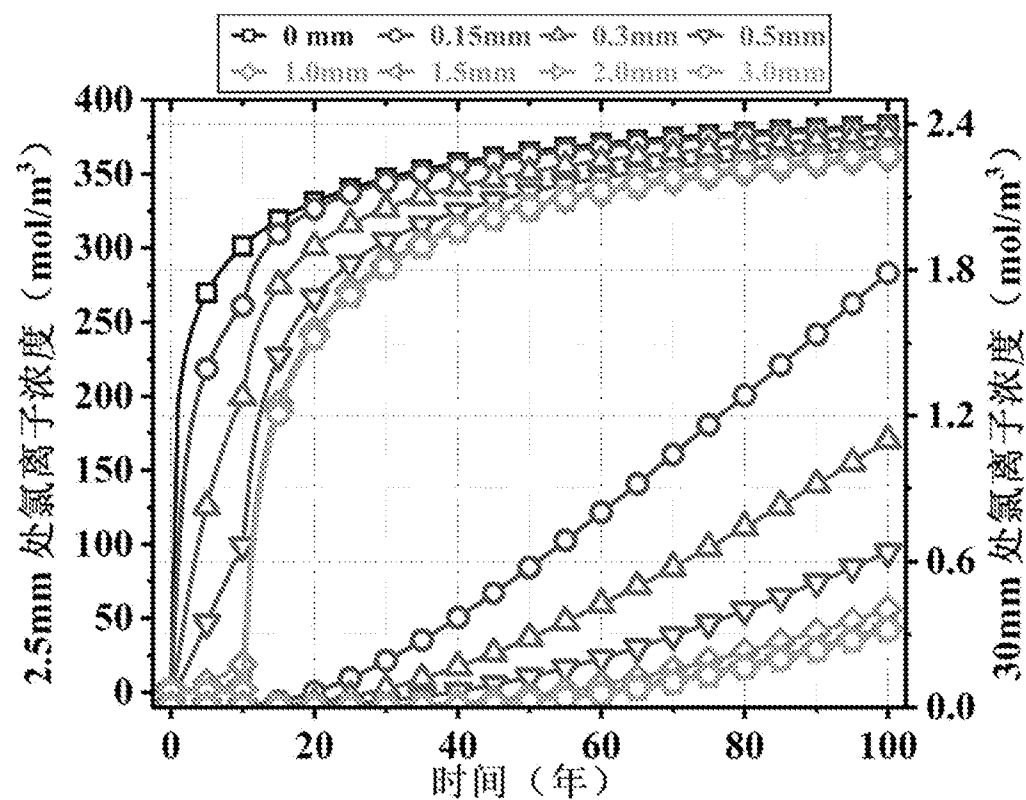
[图 2]

细则 91,
20.06.2023

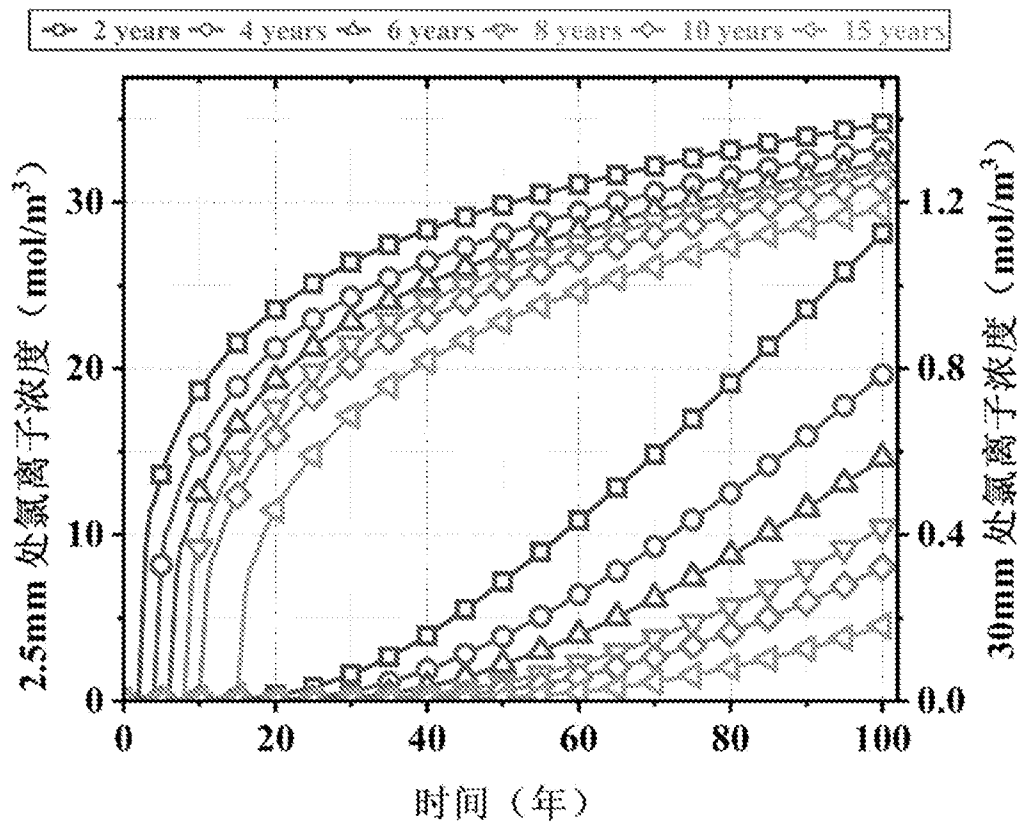
[图 3]



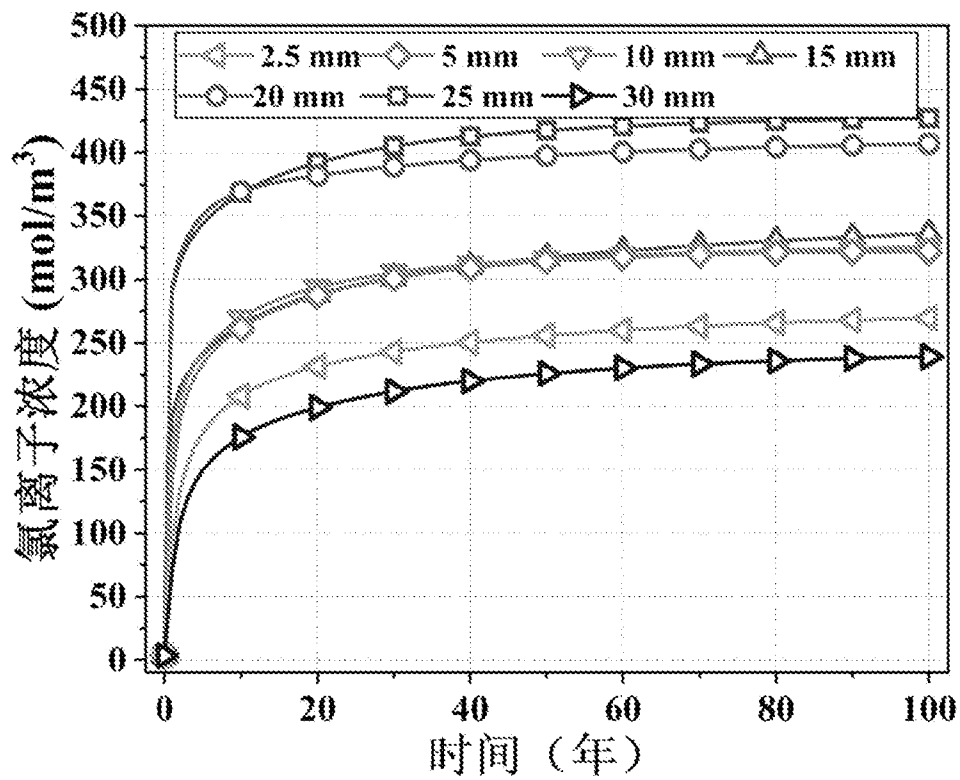
[图 4]

细则 91,
20.06.2023细则 91,
20.06.2023

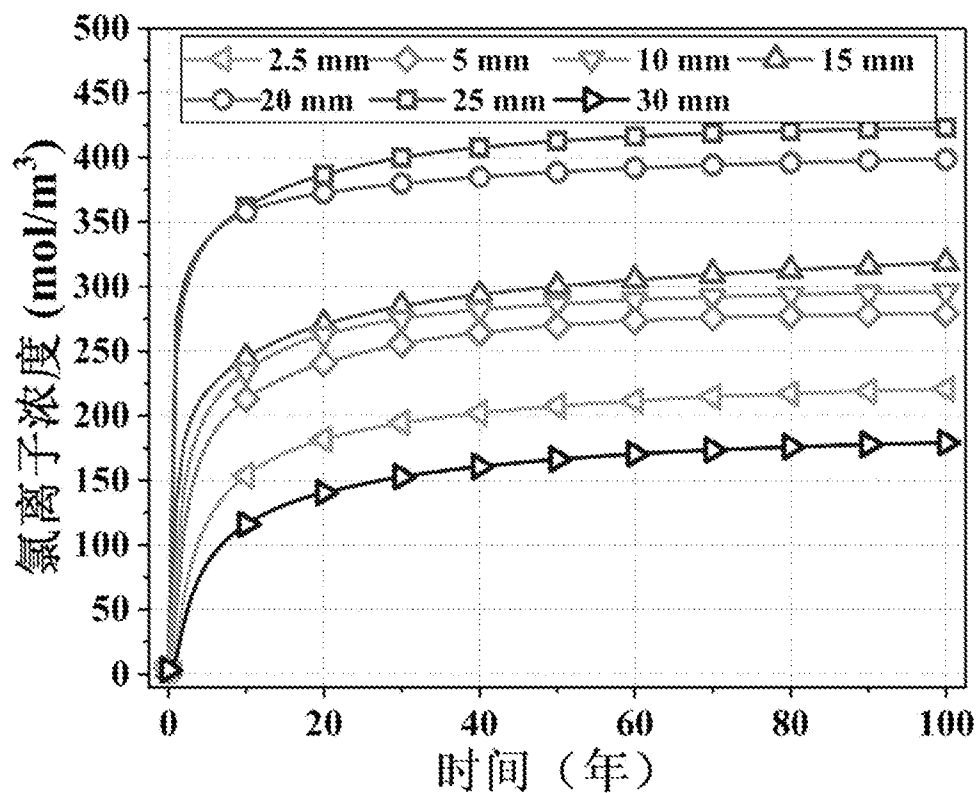
[图 5]



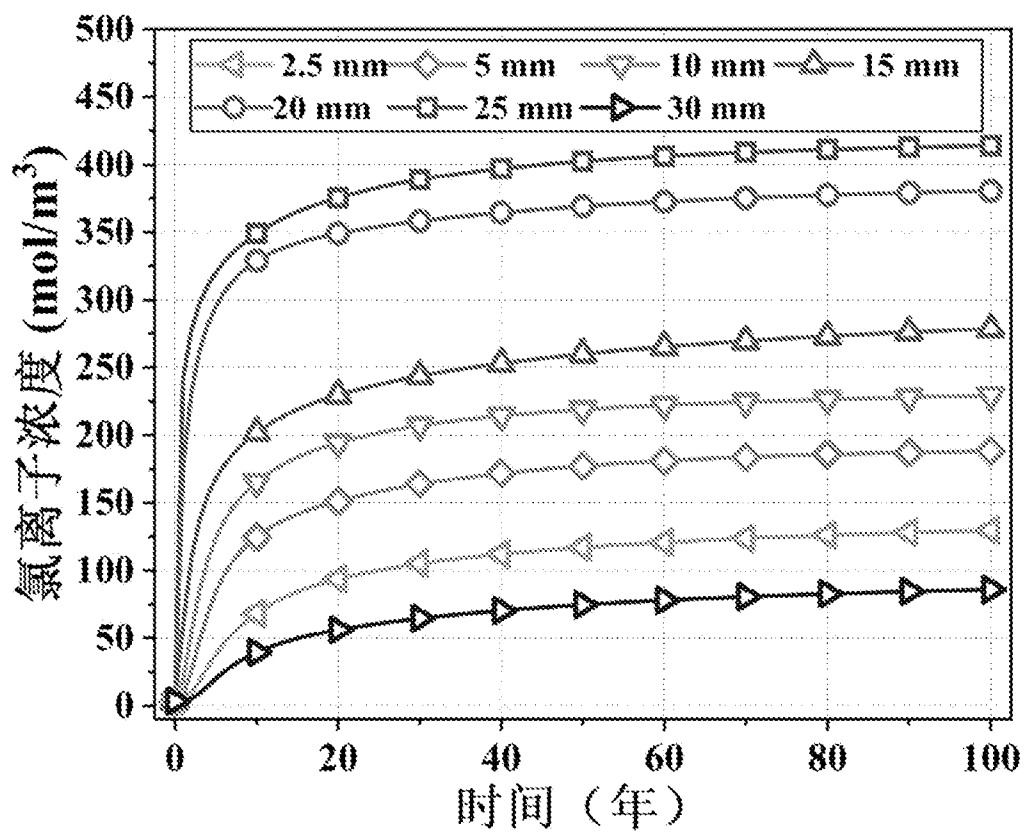
[图 6]

细则 91,
20.06.2023细则 91,
20.06.2023

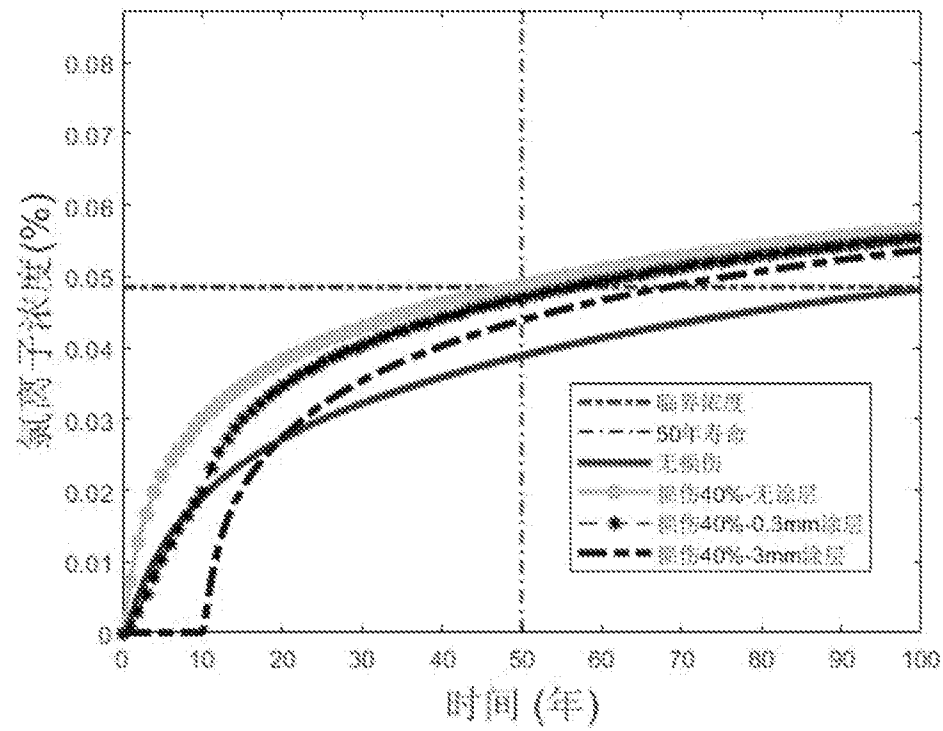
[图 7]



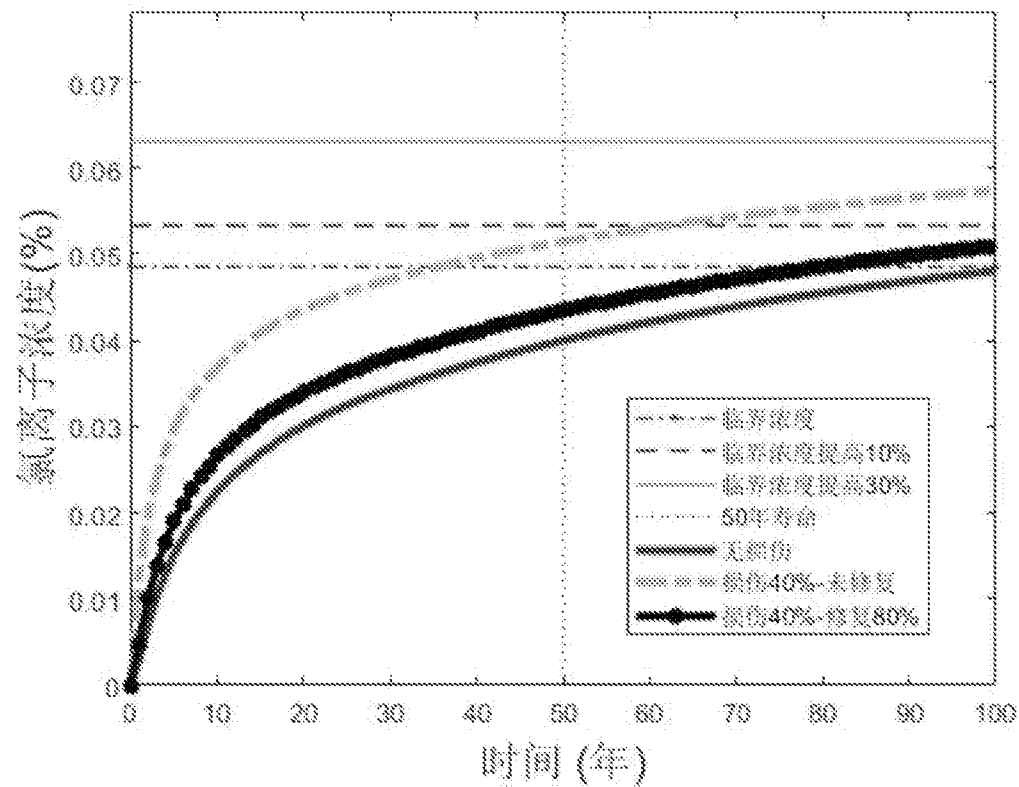
[图 8]



[图 9]



[图 10]

细则 91,
20.06.2023细则 91,
20.06.2023

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/097012

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G06F30/23(2020.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC:G06F

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNTXT, ENTXT, WPABS, DWPI, CNKI, 万方, WANFANG, IEEE: 混凝土, 硫酸, 氯, 耐久, 湿度, 寿命, 水分, 温度, 耦合, 荷载, 保护层, 涂层, 修复, concrete, humidity, temperature, coupling, plateau, sulfate, chloride, age, protect, durability

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	陈路敏 (CHEN, Lumin). "混凝土中氯离子扩散数值模拟及结构耐久性分析 (Mesoscopic Numerical Simulation of Chloride Ion Diffusion in Concrete and Structural Durability Analysis)" 万方学位论文 (Wanfang Theses and Dissertations), 19 October 2022 (2022-10-19), pages 9-17, 29-37, and 64-72	1-6, 8
Y	李万金 (LI, Wanjin). "荷载与环境因素作用下氯离子侵蚀混凝土过程模拟 (Simulation of Chloride Ions Erosion in Concrete under Loadings and Environmental Factors)" 万方学位论文 (Wanfang Theses and Dissertations), 06 November 2020 (2020-11-06), pages 63, 72, and 121	1-6, 8
Y	李双营 (LI, Shuangying). "改性磷酸镁钢筋混凝土在盐湖地区耐久性研究及寿命预测 (Durability Study and Life Prediction of Modified Magnesium Phosphate Reinforced Concrete in Salt L. Area)" 万方学位论文 (Wanfang Theses and Dissertations), 24 February 2023 (2023-02-24), pages 111-115	8



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"D" document cited by the applicant in the international application

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

27 July 2023

Date of mailing of the international search report

26 August 2023

Name and mailing address of the ISA/CN

China National Intellectual Property Administration (ISA/
CN)
China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao, Haidian District,
Beijing 100088

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2023/097012

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	蒋金洋等 (JIANG, Jinyang et al.). "多场耦合作用下的超高索塔混凝土结构自变形分析 (Autogenous Deformation Analysis of Ultra High Pylons Concrete Structure under Multi-field Interaction)" 武汉理工大学学报 (<i>Journal of Wuhan University of Technology</i>), Vol. 37, No. 8, 31 August 2015 (2015-08-31), 56-61 entire document	1-8
A	US 2021356451 A1 (QINGDAO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 18 November 2021 (2021-11-18) entire document	1-8
A	US 2014249788 A1 (SIMCO TECHNOLOGIES INC.) 04 September 2014 (2014-09-04) entire document	1-8
A	CN 114861496 A (HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY) 05 August 2022 (2022-08-05) entire document	1-8
A	CN 112414902 A (QINGDAO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY) 26 February 2021 (2021-02-26) entire document	1-8

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2023/097012

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
US	2021356451	A1	18 November 2021	WO	2021031664	A1	25 February 2021
				US	11268946	B2	08 March 2022
				EP	4001855	A1	25 May 2022
				EP	4001855	A4	14 September 2022
				EP	4001855	B1	19 April 2023
				JP	6785515	B1	18 November 2020
				JP	2021034031	A	01 March 2021
				CN	110567513	A	13 December 2019
				CN	110567513	B	26 June 2020
US	2014249788	A1	04 September 2014	CA	2839056	A1	01 September 2014
				CA	2839056	C	11 October 2016
				US	9436783	B2	06 September 2016
CN	114861496	A	05 August 2022	CN	114861496	B	11 November 2022
CN	112414902	A	26 February 2021	CN	112414902	B	15 October 2021

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2023/097012

A. 主题的分类 G06F30/23 (2020.01) i 按照国际专利分类 (IPC) 或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类		
B. 检索领域 检索的最低限度文献 (标明分类系统和分类号) IPC: G06F 包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献 在国际检索时查阅的电子数据库 (数据库的名称, 和使用的检索词 (如使用)) CNTXT, ENTXT, WPABS, DWPI, CNKI, 万方, IEEE: 混凝土, 硫酸, 氯, 耐久, 湿度, 寿命, 水分, 温度, 耦合, 荷载, 保护层, 涂层, 修复, concrete, humidity, temperature, coupling, plateau, sulfate, chloride, age, protect, durability		
C. 相关文件		
类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
Y	陈路敏. “混凝土中氯离子扩散细观数值模拟及结构耐久性分析” 万方学位论文, 2022年10月19日 (2022 - 10 - 19), 第9-17, 29-37, 64-72页	1-6, 8
Y	李万金. “荷载与环境因素作用下氯离子侵蚀混凝土过程模拟” 万方学位论文, 2020年11月6日 (2020 - 11 - 06), 第63, 72, 121页	1-6, 8
Y	李双营. “改性磷酸镁钢筋混凝土在盐湖地区耐久性研究及寿命预测” 万方学位论文, 2023年2月24日 (2023 - 02 - 24), 第111-115页	8
A	蒋金洋等. “多场耦合作用下的超高索塔混凝土结构自变形分析” 武汉理工大学学报, 第37卷, 第8期, 2015年8月31日 (2015 - 08 - 31), 56-61 全文	1-8
A	US 2021356451 A1 (UNIV QINGDAO TECHNOLOGY) 2021年11月18日 (2021 - 11 - 18) 全文	1-8
☒ 其余文件在C栏的续页中列出。 ☒ 见同族专利附件。		
* 引用文件的具体类型: “A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件 “D” 申请人在国际申请中引证的文件 “E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利 “L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件 (如具体说明的) “O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件 “P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件 “T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件 “X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性 “Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性 “&” 同族专利的文件		
国际检索实际完成的日期 2023年7月27日		国际检索报告邮寄日期 2023年8月26日
ISA/CN的名称和邮寄地址 中国国家知识产权局 中国北京市海淀区蓟门桥西土城路6号 100088		授权官员 严开元 电话号码 (+86) 027-59371939

C. 相关文件		
类 型*	引用文件，必要时，指明相关段落	相关的权利要求
A	US 2014249788 A1 (SIMCO TECHNOLOGIES INC) 2014年9月4日 (2014 - 09 - 04) 全文	1-8
A	CN 114861496 A (哈尔滨工业大学) 2022年8月5日 (2022 - 08 - 05) 全文	1-8
A	CN 112414902 A (青岛理工大学) 2021年2月26日 (2021 - 02 - 26) 全文	1-8

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号

PCT/CN2023/097012

检索报告引用的专利文件				公布日 (年/月/日)		同族专利		公布日 (年/月/日)	
US	2021356451	A1	2021年11月18日	WO	2021031664	A1		2021年2月25日	
				US	11268946	B2		2022年3月8日	
				EP	4001855	A1		2022年5月25日	
				EP	4001855	A4		2022年9月14日	
				EP	4001855	B1		2023年4月19日	
				JP	6785515	B1		2020年11月18日	
				JP	2021034031	A		2021年3月1日	
				CN	110567513	A		2019年12月13日	
				CN	110567513	B		2020年6月26日	
US	2014249788	A1	2014年9月4日	CA	2839056	A1		2014年9月1日	
				CA	2839056	C		2016年10月11日	
				US	9436783	B2		2016年9月6日	
CN	114861496	A	2022年8月5日	CN	114861496	B		2022年11月11日	
CN	112414902	A	2021年2月26日	CN	112414902	B		2021年10月15日	