第 49 卷第 8 期
2021 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 8
August，2021

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200835

非岩溶地区隧道排水管堵塞模型及其应用

穆 松[1,2]，周 莹[1,2]，谢德擎[1,2]，刘 凯[1,2]，刘光严[1,2]，郭 政[1,2]

(1. 高性能土木工程材料国家重点实验室，江苏省建筑科学研究院有限公司，南京 210008；
2. 江苏苏博特新材料股份有限公司，南京 211103)

摘 要：利用结垢速率计算公式，结合隧道工程条件，建立了非岩溶地区隧道排水管堵塞模型，并分别用于计算既有和新建隧道的排水管堵塞时间。结果表明：对于既有隧道，模型计算结果与实际情况接近，验证了模型的有效性；对于新建隧道，要使排水管 20 a 内不堵塞，6 mol/L NH_4Cl 溶液冲刷溶蚀加速 14 d 后初支混凝土的钙离子溶出率不应大于 0.032%。

关键词：非岩溶；隧道；排水管；碳酸钙；堵塞；混凝土溶蚀
中图分类号：TU528　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)08–1706–07
网络出版时间：2021–07–15

Blockage Model and Applications of Tunnel Drainage Pipe in Non-karst Area

MU Song[1,2], *ZHOU Ying*[1,2], *XIE Deqing*[1,2], *LIU Kai*[1,2], *LIU Guangyan*[1,2], *GUO Zheng*[1,2]

(1. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Jiangsu Research Institute of Building Science Co. Ltd., Nanjing 211100, China; 2. Sobute New Materials Co. Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: Considering tunnel engineering conditions, we proposed a blockage model of tunnel drainage pipe in the non-karst area based on the calculation of calcium carbonate fouling rate. The model was used to calculate blockage time of the drainage pipe for existing and under construction tunnels. For existing tunnel, the calculation result of the model is close to the measured results, thus verifing the validity of the model. For under construction tunnel, in order to prevent the drainage pipe from being blocked within 20 years, Ca^{2+} leaching rate of primary support concrete subjected to 6 mol/L NH_4Cl solution eroding for 14 d should not exceed 0.032%.

Keywords: non-karst; tunnel; drainage pipe; calcium carbonate; blockage; concrete leaching

近年来随着国民经济的发展，我国的公路隧道建设数量和规模也在不断增加。根据智研咨询发布的《2019—2025 年中国公路隧道行业市场运营态势及投资战略咨询报告》数据统计：我国是世界上公路隧道个数最多且里程最长的国家。截至 2018 年底，我国大陆(不含港澳台地区)等级运营公路的隧道有 17 738 座，总长约 17 236.1 km[1]。大量的公路隧道投入使用后，存在着不同程度的损伤和劣化，其中排水管堵塞是公路隧道常见的病害之一。研究结果表明[2–7]：隧道排水管堵塞后会导致地下水位上升，围岩水压增加；另外，隧道围岩在地下水作用下力学性质发生劣化。隧道排水管堵塞将引发一系列严重后果，轻则导致隧道衬砌裂损，影响美观，重则导致隧道结构发生变形，支护结构稳定性降低，威胁行车安全。

排水管堵塞与地下水、围岩及初支混凝土的物理、化学、生物等的作用密切相关，堵塞物的来源主要包括：1) 地下水渗流作用在隧道排水管内所生成的碳酸盐沉淀结晶物，例如 $CaCO_3$，$MgCO_3$ 等；2) 地下水渗流过程中冲刷围岩所产生的围岩碎片

收稿日期：2020–11–04。　修订日期：2021–01–08。
基金项目：国家重点研发计划项目(2017YFB0309904)；江苏省自然科学基金项目(BK20181127)。
第一作者：穆 松(1982—)，男，博士，高级工程师。
通信作者：周 莹(1990—)，女，硕士，工程师。

Received date: 2020–11–04.　**Revised date:** 2021–01–08.
First author: MU Song (1982–), male, Ph. D., Senior Engineer.
E-mail: musong@cnjsjk.cn
Correspondent author: ZHOU Ying (1990–), female, Master, Engineer.
E-mail: 15365088318@163.com

和颗粒，随着地下水渗流作用进入排水管内发生堵塞；(3) 地下水流动带入的部分泥沙进入排水管内发生堵塞。在岩溶地区，如灰岩、白云岩、白云质灰岩及灰质白云岩等可溶性碳酸盐岩的地区，在地下水流的长期冲刷作用下，岩石会发生溶解，且同时伴生细小的围岩碎片及颗粒；溶解产生的 Ca^{2+}等离子伴随着地下水的运动转移到隧道排水管中，与溶于管道中的 CO_2 发生反应生成 $CaCO_3$ 晶体，从而堵塞管道[8–10]。在非岩溶地区，初支混凝土在地下水的作用下发生溶蚀破坏，水化产物溶解流失，并随着水流运动到排水管内。岩层中的植物、细菌等作用产生的 CO_2 含量较大，隧道工程的开挖会将 CO_2 从岩层中释放出来，使隧道排水管处的 CO_2 浓度增加，溶于水溶液形成 H_2CO_3，电离产生 CO_3^{2-}，与水中的 Ca^{2+}离子反应生成难溶性 $CaCO_3$，长时间作用后最终导致隧道排水管的堵塞。因而在岩溶地区造成排水管堵塞的主要原因是可溶性碳酸盐岩的溶解，在非岩溶地区主要原因是初支混凝土的溶蚀。

溶蚀是指水泥水化产物 $Ca(OH)_2$ 和 C–S–H 凝胶在外界水的作用下不断发生溶解的过程，Ca^{2+}在内外浓度差的作用下从孔溶液向环境中扩散[11]。

目前，国内外针对隧道排水管堵塞建立了很多相关模型：Lee 等[12]研究了地下水渗流对开挖掌子面和隧道结构的影响，研究了有效应力和渗透力同时作用下的围岩稳定性； Noorishad 等[13]建立了多相介质中应力与渗流耦合分析的有限元模型，通过裂隙岩体的应用验证了模型的有效性；岳健等[14]应用考虑渗流场与应力场的隧道结构计算模型，探讨了不同水位条件下应力场和渗流场的变化。上述研究的重点主要集中在排水管堵塞对隧道结构安全性的影响，对于排水管堵塞与隧道初支混凝土之间的关系较少关注，缺少相关模型计算排水管堵塞与初支混凝土抗溶蚀性能之间的关系。

本研究建立了非岩溶地区隧道排水管堵塞模型，计算了排水管堵塞所需的临界 Ca^{2+}溶出率，结合广东省某隧道堵管情况验证了既有结构混凝土 Ca^{2+}溶出率，并采用 NH_4Cl 加速方法计算了新建结构混凝土临界 Ca^{2+}溶出率。

1　隧道排水管堵塞模型

在隧道结构中，初支混凝土与围岩水直接接触，受到水的溶蚀作用，导致水中富含 Ca^{2+}，同时岩石土壤中的植物、细菌或其他生物产生 CO_2，或者深部碳酸盐类矿物受热分解出 CO_2，导致部分隧道土壤层中 CO_2 分压达到 6%及以上[15]，远大于空气中的 0.038%，因而围岩水中溶解大量 CO_2 并解离出大量 H^+，导致隧道初支混凝土被溶蚀，大量 Ca^{2+}溶解到水中。Ca^{2+}与 HCO_3^-和 CO_3^{2-}发生反应，形成难溶 $CaCO_3$。$CaCO_3$ 晶体附着在排水管道内壁慢慢生长，其反应原理如下所示：

$$HCO_3^- \rightarrow H^+ + CO_3^{2-} \tag{1}$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3\downarrow \tag{2}$$

$$Ca^{2+} + 2HCO_3^- \rightarrow CaCO_3\downarrow + CO_2\uparrow + H_2O \tag{3}$$

难溶 $CaCO_3$ 可以是无定型 $CaCO_3$、六水 $CaCO_3$、一水 $CaCO_3$、六方 $CaCO_3$、文石和方解石。方解石属三方晶系，是热力学最稳定的 $CaCO_3$ 晶型，也是各种 $CaCO_3$ 晶型在水中转变的终态产物[8]。

图 1 显示了以方解石沉淀为主的排水管堵管机制。当围岩水进入隧道排水系统中，外部环境突然改变，CO_2 分压降低、较高温度、一定流速、pH 值等，使得 HCO_3^-与 Ca^{2+}快速反应生成 $CaCO_3$ 沉淀。

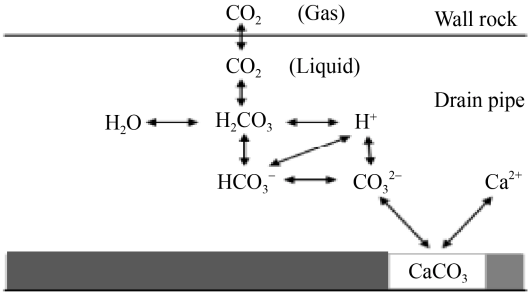


图 1　排水管堵管示意图

Fig. 1　Diagram of tunnel drainage pipe blockage

排水管的堵塞时间与 $CaCO_3$ 晶体的结晶速率密切相关。查询诸多文献，发现影响结垢速率的因素众多，包括围岩水 pH 值、CO_2 分压、温度、流速、排水管直径、管壁特性等。流速既影响溶蚀液中 Ca^{2+}浓度，又影响晶体结晶难易程度。研究表明：流速越大则溶出 Ca^{2+}浓度越高，生成的 $CaCO_3$ 晶体越多；但流速越大，$CaCO_3$ 晶体受到的冲刷越大，因而越不容易在排水管中发生堵塞。流速太小，溶蚀液中的 Ca^{2+}浓度太低不至于生成大量沉淀，也就不会造成排水管堵塞[8]。因此，以广东某隧道实测水流速度为计算依据，取流速为 16.8 mL/s。在该流速下，水中的 Ca^{2+}浓度计算公式如下式。

$$c(Ca^{2+}) = \frac{m(Ca^{2+})\times 10^6}{v\cdot t\times 10^3} \tag{4}$$

式中：$c(Ca^{2+})$为水中钙离子浓度，mg/L；$m(Ca^{2+})$为溶蚀出的钙离子质量，kg；v 为水流速度，mL/s；

t 为溶蚀时间，s。

文献[16–18]给出一定条件下方解石在管壁线性增厚速率的计算公式如下：

$$R_{\mathrm{L}} = K_{\mathrm{P}} * \left(S^{0.5} - 1\right)^2 \tag{5}$$

$$\lg K_{\mathrm{p}} = 0.126 * I^{0.5} - \frac{2400}{T + 273} - 0.34 * \mathrm{pH} + 0.444 \tag{6}$$

$$S = \frac{\left[\mathrm{Ca}^{2+}\right]\left[\mathrm{CO}_3^{2-}\right]}{K_{\mathrm{sp}}} \tag{7}$$

由于 CO_3^{2-}全部由 HCO_3^-解离出，因此

$$K_{\mathrm{a2}} = \frac{c\left(\mathrm{H}^+\right)c\left(\mathrm{CO}_3^{2-}\right)}{c\left(\mathrm{HCO}_3^-\right)} \tag{8}$$

式中：R_{L} 为方解石在管壁线性增厚速率，m/s；K_{p} 为经验反应速率常数，m/s；S 为 $CaCO_3$ 过饱和度；I 为溶液中离子强度，mol/L；T 为溶液温度，℃。

其中，$CaCO_3$ 过饱和度由式(7)、式(8)可知

$$S = \frac{K_{\mathrm{a2}} \cdot c\left(\mathrm{Ca}^{2+}\right)c\left(\mathrm{HCO}_3^-\right)}{K_{\mathrm{sp}} \cdot c\left(\mathrm{H}^+\right)} \tag{9}$$

式中：K_{a2} 为 HCO_3^-解离常数(20 ℃，4.8×10^{-11} mol/L)；K_{SP} 为 $CaCO_3$ 溶度积(20 ℃，4.96×10^{-9} $\mathrm{mol^2/L^2}$)。

根据式(5)~式(9)以及环境参数、水质参数计算方解石在管壁线性增厚速率。假设结晶体生长厚度为排水管半径 r 时，排水管发生堵塞，计算堵管时间为：

$$t_1 = r/R_{\mathrm{L}} \tag{10}$$

式中：t_1 为堵管时间，s；r 为排水管半径，m。

根据式(5)~式(10)，可以根据隧道现场环境和结构参数，计算排水管堵塞时间，也可反推出在某一时间内排水管不发生堵塞，初支混凝土的临界 Ca 溶出质量分数，从而对混凝土抗溶蚀性能提出要求。

2 既有隧道

2.1 环境、结构参数

广东省某隧道在建成 11 个月左右就出现排水管堵塞的问题，经测试分析属于隧道初支混凝土钙溶蚀结晶导致的。该隧道的水文地质勘察结果表明：(1) 隧址区处于低纬地区、属亚热带季风气候，气候温和，光照充足，雨量充沛，年平均气温 20.8 ℃，年平均降水量 1 739.1 mm；(2) 隧址区地层上部为第四系全新统的坡积层碎石土、坡残积粉质黏土层覆盖(进口处有薄层的冲洪积层发育)，下伏基岩为早侏罗世蓝塘群下亚群(J_1ln^a)砂岩、泥质粉砂岩、页岩及燕山一期($\gamma\delta_y^1$)侵入的花岗闪长岩，该隧道处于非岩溶地区；(3)根据地质勘测报告室内水质分析结果，隧址区的地下水在强透水层中对混凝土有弱腐蚀性(侵蚀 CO_2 含量为 9.99~19.78 mg/L，HCO_3^-浓度为 446 mg/L，CO_3^{2-}浓度为 45 mg/L)；(4) 在现场定时取水进行测定，得出其平均流速为 16.8 mL/s。

隧道施工参数分别为：半跨径为 9 m，排水管间距为 3 m，排水管半径为 4.75 cm，采用 C25 初支混凝土。隧道初支混凝土各原材料用量为(kg/m^3)：水泥 515，水 205，砂子 790，小石子 790，速凝剂 20.6。水泥为 P·O42.5 普通硅酸盐水泥，各氧化物含量为(质量分数，%)：SiO_2 19.39，Al_2O_3 5.03，Fe_2O_3 3.19，CaO 60.35，MgO 1.77，SO_3 2.58。

2.2 堵管时间计算

在隧道上取 1 段芯样，将其从靠近围岩处开始截取成 6 个 2 cm 厚的试块，如图 2 所示。假定最内侧的 1 个试块没有发生溶蚀破坏，以其作为基准，靠近围岩的 5 个试块发生不同程度的溶蚀破坏。采用 XRF 分析试块中的 CaO 含量，测试靠近防水板的混凝土含量作为基准 CaO 含量，同时测试围岩处混凝土试块中的 CaO 含量。基准 CaO 含量减去剩余 CaO 含量即为溶蚀 CaO。

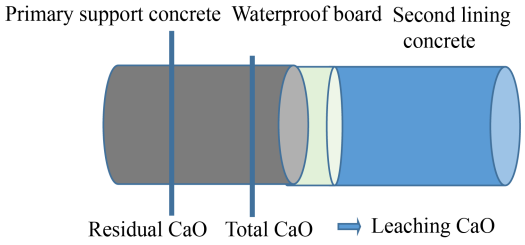


图 2 现场混凝土芯样溶蚀情况分析

Fig. 2 Leaching analysis of cored concrete samples on site

测试情况如表 1 所示。可以看出，靠近防水板处混凝土 CaO 质量分数为 34.5%，混凝土芯样靠近围岩处 Ca^{2+}溶出量最多，由表及里依次降低，0~10 cm 位置处 Ca 溶出质量分数(以 CaO 计)分别为 5.6%、5.4%、4.4%、3.5%和 2.9%。

表 1 现场混凝土芯样 XRF 测试结果

Table 1 XRF test results of concrete sample on site

Depth/cm	Mass fraction w/%	
	CaO	Leaching rate of CaO
2	28.9	5.6
4	29.1	5.4
6	30.1	4.4
8	31.0	3.5
10	31.6	2.9
40	34.5	0.0

根据隧道施工参数，每隔 3 m 设置 1 个排水管。假设隧道初支混凝土全部发生溶蚀破坏，则每根排水管对应的总溶出质量分数计算公式如下：

$$M(\mathrm{CaO})=\sum\left(d_{\mathrm{CaO\%}}\cdot\Delta x\cdot L_1\cdot L_2\cdot M_{\mathrm{m}}\right)=\sum d_{\mathrm{CaO\%}}\cdot\Delta x\cdot R\cdot\frac{\pi}{2}\cdot L_2\cdot M_{\mathrm{m}} \tag{11}$$

式中：M(CaO)为隧道服役期间(11 个月)CaO 总溶出质量分数，kg；$d_{\mathrm{CaO\%}}$为各位置砂浆中 CaO 含量降低幅度，%；Δx 为混凝土芯样切片厚度，m；L_1 为隧道 1/4 周长，m；R 为隧道半跨径，m；L_2 为排水管间距，m；M_{m} 为单方初衬混凝土中砂浆含量，kg。具体取值：$d_{\mathrm{CaO\%}}$取值如表 1 所示，Δx 取 0.02 m，R 取 9 m，L_2 取 3 m，M_{m} 取 1 524 kg。因此氧化钙的溶蚀总量为 281.8 kg，钙离子溶出量为 201.3 kg。

将上述结果代入式(6)中，计算得到水中的 Ca^{2+} 离子浓度为 268 mg/L，排水管半径 r 为 4.75 cm，溶液温度为 20 ℃，水中 HCO_3^-浓度为 750 mg/L，CO_3^{2-}浓度为 45 mg/L；将上述结果代入式(5)~式(10)可计算出堵管时间为 12 个月，与实际工程堵管时间 11 个月较为接近。但该方法中既有混凝土结构的堵管时间只计算了广州某隧道，结果准确性尚可，还应结合其他隧道堵管情况进行更多验证，以便对模型进行修正，提高其准确性。

3　新建隧道

3.1　加速方法

对于新建隧道，设计使用寿命一般为 50 a 及以上，在此期间排水管道不发生堵塞是其正常服役的基本要求，这就对初支混凝土抗溶蚀性能提出要求。自然环境中混凝土溶蚀是一个非常缓慢的过程，往往需要几年甚至几十年的时间才能看到比较明显的性能变化，因而通常采用一定的加速方法来评价混凝土的抗溶蚀性能。已知的混凝土溶蚀加速方法包括去离子水加速[19–20]、电化学加速法[21–22]、化学试剂加速法[23–25]和压力水加速法[26–27]等。化学试剂加速法加速效率较高且比较容易实现，是目前比较常见的混凝土溶蚀加速方法。其原理是利用水泥水化产物表现为碱性，易于与某些酸类或盐类介质发生化学反应，生成新的化合物从而达到溶蚀的目的。常用介质一般是一定浓度的 NH_4NO_3 和 NH_4Cl 溶液。在上述溶液中，发生侵蚀的反应方程如下：

$$Ca(OH)_2+2NH_4NO_3\leftrightarrow Ca^{2+}+2OH^-+2H^+ +2NH_3+2NO_3^-\leftrightarrow Ca(NO_3)_2+2NH_3aq+2H_2O \tag{12}$$

$$Ca(OH)_2+2NH_4Cl\leftrightarrow Ca^{2+}+2OH^-+2H^+ +2NH_3+2Cl^-\leftrightarrow CaCl_2+2NH_3aq+2H_2O \tag{13}$$

$$NH_3\cdot H_2O\leftrightarrow NH_3+H_2O \tag{14}$$

根据现场溶蚀情况，隧道初支混凝土主要的溶蚀形式为冲刷溶蚀。目前冲刷溶蚀没有可参考的实验方法，因此设计了冲刷溶蚀加速方法。选择 6 mol/L NH_4Cl 溶液来加速混凝土的溶蚀，实验装置如图 3 所示。节水阀和流量计用来控制和检测水流大小。混凝土试块置于液面以上，除上下 2 个底面外，其余 4 个侧面均涂刷环氧树脂，保证单面溶蚀。本试验中 NH_4Cl 溶液的浓度为 6 mol/L，冲刷速率为 4 L/min，环境温度为 20 ℃。不同龄期时取溶蚀液进行 ICP 测试分析，并更换溶蚀液，计算总的 Ca^{2+} 溶出率。

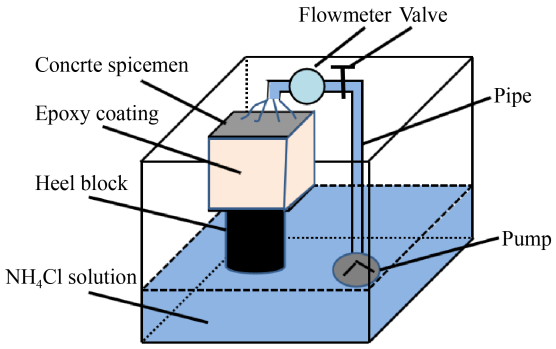


图 3　冲刷溶蚀装置示意图

Fig. 3　Schematic diagram of erosion apparatus

3.2　加速机理

溶蚀研究结果表明，以去离子水为介质，钙溶蚀过程中水泥净浆内固钙含量 c_{s} 与孔溶液中钙离子浓度 c 处于热力学平衡状态，其固液平衡曲线如图 4a 所示。x_1 为 C–S–H 凝胶快速溶蚀时孔溶液中的钙离子浓度，mol/m^3；x_2 为 CH 完全溶解时孔溶液中的 Ca^{2+}浓度，mol/m^3。在去离子水中混凝土的溶蚀分为 3 个阶段，并满足以下关系[28]：

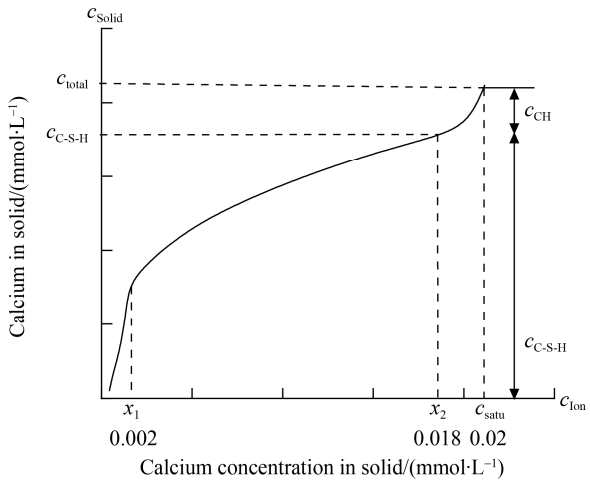
$$c_{\mathrm{CSH}}\left(\frac{c}{c_{\mathrm{satu}}}\right)^{\frac{1}{3}}\left(\frac{2}{x_1^3}c^3+\frac{3}{x_1^2}c^2\right)\quad 0\leqslant c\leqslant x_1 \tag{15}$$

$$c_{\mathrm{s}}=c_{\mathrm{CSH}}\left(\frac{c}{c_{\mathrm{satu}}}\right)^{\frac{1}{3}}\quad x_1\leqslant c\leqslant x_2 \tag{16}$$

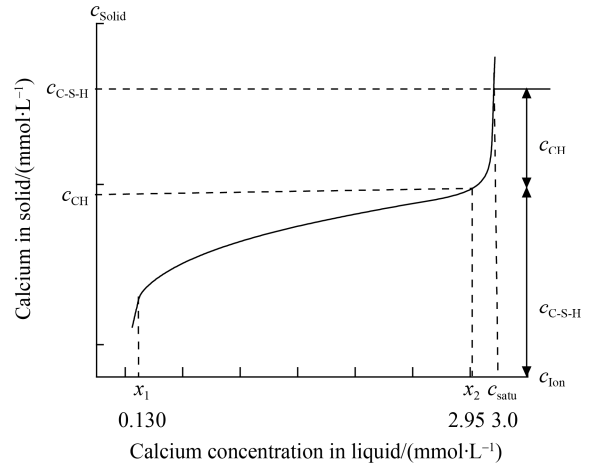
$$c_{\mathrm{CSH}}\left(\frac{c}{c_{\mathrm{satu}}}\right)^{\frac{1}{3}}+\frac{c_{\mathrm{CH}}}{\left(c_{\mathrm{satu}}-x_2\right)^3}\left(c-x_2\right)^3\quad x_2\leqslant c\leqslant c_{\mathrm{satu}} \tag{17}$$

式中：c_{CSH}，c_{CH} 分别为 C–S–H 凝胶相和 CH 相的含量，mol/m^3。

李林[29]研究了 6 mol/L NH_4Cl 溶液中的固液平衡曲线，如图 4b 所示。可以看出，混凝土的钙溶蚀依然分为 3 个阶段，但相比于去离子水溶蚀 x_1 和 x_2 处的值有所不同，这意味着二者有相似的溶蚀机理。



(a) Deionized water[28]



(b) 6 mol/L NH_4Cl solution[29]

图 4　混凝土钙溶蚀固液平衡曲线

Fig. 4　Solid-liquid equilibrium curve of Ca leaching of concrete

3.3　等效加速效率

对产生结晶堵塞排水管的隧道工程混凝土进行取样，并将其芯样切片，测试不同位置的钙离子溶出率。该芯样发生结晶堵塞的时间为 11 个月，在实验室加速环境中测试其达到相同溶出率所需要的时间，以此来计算加速效率。具体操作为：根据 2.2 所测结果，初支混凝土最大 CaO 溶出率为 5.6%，将未溶蚀的混凝土试块进行 NH_4Cl 冲刷加速溶蚀实验，测试达到相同溶蚀程度所需的时间，即为冲刷溶蚀等效加速速率。

$$K = t_r / t_a \tag{18}$$

式中：K 为加速效率；t_r 为实际溶蚀时间，d；t_a 为加速溶蚀时间，d。

等效加速方法下混凝土的钙离子溶出率变化见 图 5。从图 5 可以看出，NH_4Cl 加速下混凝土的溶蚀呈现先加速后减速的幂函数特点。按照模拟幂函数关系式计算，达到实际工程中 11 个月 5.6%的溶蚀率需要的时间为 44 d，因此冲刷法的加速效率为：

$$11\times30/44=7.5 \tag{19}$$

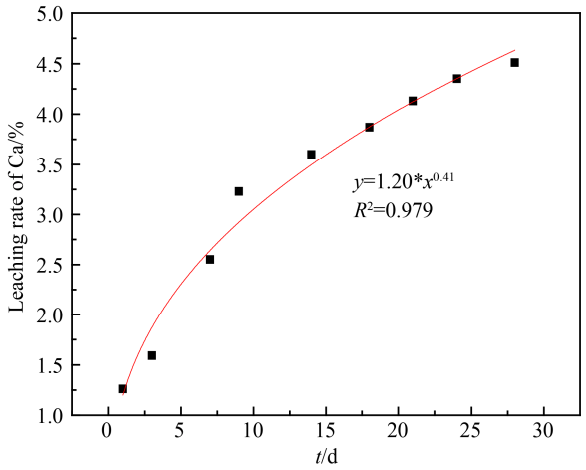


图 5　6 mol/L NH_4Cl 溶液冲刷初支混凝土的钙离子溶出率

Fig. 5　Ca^{2+} leaching rate of primary support concrete subjected to 6 mol/L NH_4Cl solution erosion test

3.4　临界钙离子溶出率

根据溶蚀加速效率，计算加速实验初支混凝土临界钙离子溶出率作为其工程控制指标。以广州某隧道为例，排水管半径 r 为 4.75 cm，溶液温度为 20 ℃，HCO_3^-浓度为 750 mg/L，CO_3^{2-}浓度为 45 mg/L，pH 值为 8.2，代入式(5)~式(10)计算堵管时间。

图 6 是不同堵管时间时初支混凝土的临界 Ca^{2+}溶出率。由图 6 可以看出，要使排水管 20 a 不堵，6 mol/L NH_4Cl 加速 14 d 后初支混凝土的 Ca^{2+}溶出率应小于 0.032%。

该方法的比较接近实际工程中混凝土的溶蚀破坏，且不改变混凝土溶蚀机理，因而可以用来定量评价混凝土抗溶蚀性能。但新建混凝土结构堵管临界钙离子溶出率计算是基于某隧道 C25 混凝土，并在 16.8 mL/s 的固定流速和指定环境条件下计算得到，其适用性有限。因此对于不同配合比的混凝土、不同服役环境条件，模型计算参数须进行调整，这也是本研究未来将要探讨的方向。

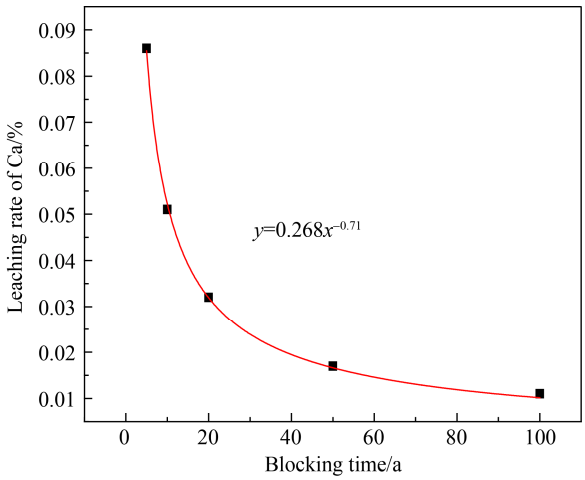


图 6 初支混凝土临界钙离子溶出率

Fig. 6 Critical leaching rate of calcium ion from primary support concrete

4 结论

1) 非岩溶地区，隧道排水管堵塞的主要原因是初支混凝土溶蚀破坏，水泥水化产物发生溶解生成 Ca^{2+}，与溶解在水中的二氧化碳发生反应生成 $CaCO_3$ 晶体堵塞管道。

2) 建立基于方解石结垢速率的堵管模型，计算隧道排水管堵管时间。对于既有隧道结构，结合工程水文地质条件和施工参数可以计算排水管堵塞时间。

3) 对于新建隧道，当地下水温度为 20 ℃，HCO_3^-浓度为 750 mg/L，CO_3^{2-}浓度为 45 mg/L，pH 为 8.2 的环境条件下，要求排水管 20 a 内不堵塞，则 6 mol/LNH_4Cl 溶液冲刷溶蚀加速 14 d 后混凝土的 Ca^{2+}溶出率不应大于 0.032%。为非岩溶地区隧道工程抑制排水管结晶堵塞的初支混凝土抗溶蚀性能设计提供参考。

参考文献:

[1] Analysis of the number and total mileage of road tunnels in China 2018. https://www.chyxx.com/industry/201909/783175.html

[2] MAIR R J. Tunnelling and geotechnics: New horizons[J]. Geotechnique, 2008, 58(9): 695–736.

[3] WONGSAROJ. Three-dimensional finite element analysis of short and long-term ground response to open-face tunnelling in stiff clay[D]. London: University of Cambridge, 2005.

[4] 简斌, 卢铁鹰, 李少巍, 等. 地下水浮力对地下建筑结构安全的影响[J]. 土木建筑与环境工程, 2010, 32(1): 56–60.
JIAN Bin, LU Tieying, LI Shaowei, et al. J Chongqing Jianzhu Univ (in Chinese), 2010, 32(1): 56–60.

[5] 李鹏飞, 张顶立, 房倩, 等. 基于连续介质模型的海底隧道支护结构受力特征[J]. 北京交通大学学报, 2009, 33(4): 7–12.
LI Pengfei, ZHANG Dingli, FANG Qian, et al. J Beijing Jiaotong Univ(in Chinese), 2009, 33(4): 7–12.

[6] 李建波, 陈健云, 李静. 渗流场对地铁隧道沉降与受力影响的流固耦合分析[J]. 防灾减灾工程学报, 2008(4): 441–446.
LI Jianbo, CHEN Jianyun, LI Jing. J Disaster Prevent Mitig Eng (in Chinese), 2008(4): 441–446.

[7] 房倩, 张顶立, 黄明琦. 基于连续介质模型的海底隧道渗流问题分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, (S2): 3776–3784.
FANG Qian, ZHANG Dingli, HUANG Mingqi. J Rock Mech Eng (in Chinese), 2007, (S2): 3776–3784.

[8] 翟明. 灰岩区隧道排水系统结晶堵塞规律研究[D]. 重庆交通大学, 2016.
ZHAI Ming. Study on the regularity of crystallization and blocking of tunnel drainage system in limestone area (in Chinese, dissertation). Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.

[9] 蒋雅君, 杜坤, 陶磊, 等. 岩溶隧道排水系统堵塞机理的调查与分析[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 131–135.
JIANG Yajun, DU Kun, TAO Lei, et al. Railway Standard Design (in Chinese), 2019, 63(7): 131–135.

[10] 周卓. 岩溶地区地下水渗流结晶堵塞隧道排水管机理研究及处治建议[D]. 长安大学, 2015.
ZHOU Zhuo. Study on the plug of the tunnel drainage pipe mechanism caused by groundwater seepage crystallization in karst area and the proposal of treatment (in Chinese, dissertation). Xi'an: Changan University, 2015.

[11] 阮燕, 方坤河, 曾力, 等. 水工混凝土表面接触溶蚀特性的试验研究[J]. 建筑材料学报, 2007, (5): 528–533.
RUAN Yan, FANG Kunhe, ZENG Li, et al. J Build Mater (in Chinese), 2007, (5): 528–533.

[12] Lee I M, Nam S W. The study of seepage force acting on the tunnel lining and tunnel face in shallow tunnels[J]. Tunnel Lin Underground Space Technol, 2001, 16(1): 31–40.

[13] NOORISHAD J, AYATOLLAHI M S，WITHERSPOON P A. A finite-element method for coupled stress and fluid flow analysis in fractured rock masses[J]. Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr, 1982, 19(4): 185–193.

[14] 岳健, 谭仁华, 安永林, 等. 河水位变化影响下水下隧道的施工力学行为[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(11): 2211–2219.
YUE Jian, TAN Renhua, AN Yonglin, et al. J Railway Sci Eng (in Chinese), 2016, 13(11): 2211–2219.

[15] HASSON D, BRAMSON D. Effectiveness of magnetic water treatment in suppressing calcium carbonate scale deposition[J]. Ind Eng Chem Res, 1985, 24(3): 123–132.

[16] ZHANG Y P, DAWE R. The kinetics of calcite precipitation from a high salinity water[J]. Applied Geochemistry, 1998, 13(2): 177–184.

[17] ZHANG Y P, SHAW H, FARQUHAR R, et al. The kinetics of carbonate scaling-Application for the prediction of downhole carbonate scaling[J]. J Petrol Sci Eng, 2001, 29(2): 85–95.

[18] LI Y M, PANG Z H, GALECZKA I M. Quantitative assessment of calcite scaling of a high temperature geothermal well in the Kangding geothermal field of Eastern Himalayan Syntax[J]. Geothermics, 2020, 8710–1844.

[19] HAGA K, SUTOU S, HIRONAGA M, et al. Effects of porosity on leaching of Ca from hardened ordinary Portland cement paste[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(9):1764–1775.

[20] 刘仍光, 张波, 阎培渝. 软水溶蚀环境中水泥–矿渣复合胶凝材料的浆体结构变化[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(11): 1487–1149.

LIU Rengguang, ZHANG Bo, YAN Peiyu. J Chin Ceram Soc, 2013, 41(11): 1487–1149.

[21] SAITO H, DEGUCHI A. Leaching tests on different mortars using accelerated electrochemical method[J]. Cem Concr Res, 2000, 30(11): 1815–1825.

[22] RYU J S, OTSUKI N, MINAGAWA H. Long-term forecast of Ca leaching from mortar and associated degeneration[J]. Cem Concr Res, 2002, 32(10): 1539–1544.

[23] CARDE C, ESCADEILLAS G, FRANCOIS R. Use of ammonium nitrate solution to simulate and accelerate the leaching of cement pastes due to deionized water[J]. Mag Concr Res, 1997, 49(181): 295–301.

[24] WAN K S, XU Q, LI L, et al. 3D porosity distribution of partly calcium leached cement paste[J]. Constr Build Mater, 2013, 48(19): 11–15.

[25] 张林松, 左晓宝, 汤玉娟, 等. 水泥净浆中氯离子和钙离子耦合传输模型及数值模拟[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 184–191.
ZHANG Linsong, ZUO Xiaobao, TANG Yujuan, et al. J Chin Ceram Soc, 2019, 47(2): 184–191.

[26] 孔祥芝, 纪国晋, 刘艳霞, 等. 水工混凝土渗透溶蚀试验研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2012, 10(1): 63–68.
KONG Xiangzhi, JI Guojin, LIU Yanxia, et al. J China Instit Water Resour Hydropower Res (in Chinese), 2012, 10(1): 63–68.

[27] 王凤波. 大坝混凝土材料渗透性及溶蚀性研究[D]. 河海大学, 2005.
WANG Fengbo. Study on permeability and dissolved-erosion of dam concrete material (in Chinese, dissertation). Nanjing: Hohai University, 2005.

[28] GÉRARD B, BELLEGO C L, BERNARD O. Simplified modelling of calcium leaching of concrete in various environments[J]. Mater Struct, 2002, 35(10): 632–640.

[29] 李林. 硬化水泥浆体钙溶出研究[D]. 东南大学, 2014.
LI Lin. The research of calcium leaching of hardened cement pastes (in Chinese, dissertation). Nanjing: Southeast University, 2014.