

文章编号:1007-9629(2023)01-0053-08

硝酸和弯曲应力作用下的混凝土碳化

周志军*, 王浩, 田叶青, 张志鹏

(长安大学公路学院, 陕西西安 710064)

摘要:为研究公路隧道衬砌在酸性气体环境和围岩荷载作用下的碳化特性,开展了硝酸侵蚀与弯曲应力共同作用下的混凝土快速碳化试验,测试分析了混凝土的碳化深度、碳化物质含量和微观结构。结果表明:硝酸和弯曲应力均能促进混凝土的碳化;随着硝酸浓度和弯曲应力水平的提高,混凝土的碳化深度增大,碳化物质含量减少;硝酸会消耗水化产物,削弱 CaCO_3 对孔隙的填充,形成微裂缝,最终增大混凝土的孔隙率;弯曲应力促使微裂缝发展形成受拉裂缝,并与碳化协同形成微裂缝。

关键词:混凝土;碳化;硝酸侵蚀;弯曲应力;微观分析

中图分类号:TU528

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.01.008

Concrete Carbonation under Nitric Acid and Bending Stress

ZHOU Zhijun*, WANG Hao, TIAN Yeqing, ZHANG Zhipeng

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: To study the effect of acid gas and bending stress on the carbonation durability of highway tunnel lining, the accelerated carbonation test of concrete under the combined action of nitric acid erosion and bending stress was carried out, and the carbonation depth, carbonation substance content and microstructure of concrete were tested and analyzed. The results show that both nitric acid and bending stress can promote the carbonation of concrete. With the increase of nitric acid concentration and stress level, the carbonization depth increases and the content of carbonized substances decreases. Nitric acid erosion consumes alkaline substances and weakens the filling effect of CaCO_3 on pores, forms microcracks and increases porosity. The bending stress makes the microcracks develop further, form tensile cracks, and the microcracks are formed in coordination with carbonation.

Key words: concrete; carbonation; nitric acid erosion; bending stress; microscopic analysis

碳化是导致钢筋混凝土隧道衬砌耐久性劣化的重要原因之一^[1-2]。影响公路隧道衬砌耐久性的环境因素主要包括 CO_2 浓度、环境温湿度以及其他酸性气体的侵蚀^[3]。 CO_2 浓度的增大会提高碳化速率^[4-5], 环境温湿度对混凝土耐久性的影响主要是通过影响气体的扩散速率来实现的, 碳化速率与环境的相对湿度成正比, 与相对湿度成反比^[6]。公路隧道内部除了高浓度的 CO_2 外, 还有汽车尾气所积聚的较高浓度酸性气体(如 NO_2), 两者都会影响混凝土的碳化进程^[7]。王家滨等^[8]和张丹等^[9]采用硝酸溶液浸泡来模拟 NO_2 对喷射混凝土的侵蚀, 发现硝酸与混凝土内部的水化产物发生了化学反应, 导致混凝土的耐久

性劣化。此外, 外部应力会影响混凝土的气体渗透性能和碳化速度^[10], 围岩荷载的作用使得部分衬砌混凝土处于弯曲受拉状态, 从而产生裂缝, 加速了衬砌结构的损伤^[3]。

目前, 碳化深度是衡量混凝土碳化程度的基本指标^[11]。一些新型测试方法被运用于分析混凝土的碳化程度: Turcry 等^[12]通过酚酞测试和热重分析(TGA)研究了不同初始湿度混凝土的碳化进程; Witkowski 等^[13]通过傅里叶变换红外光谱(FTIR)测定了自密实混凝土的碳化过程; Chang 等^[14]结合 TGA、FTIR、X 射线衍射(XRD)研究了混凝土碳化过程中相关物质的变化规律; 郭寅川等^[15]通过扫描

收稿日期:2021-12-01; 修订日期:2022-01-16

第一作者(通讯作者):周志军(1975—),男,江苏泰州人,长安大学教授,博士生导师,博士.E-mail:5974100@qq.com

电镜(SEM)研究了内养生混凝土碳化前后的微观形貌;Liu等^[16]通过SEM和压汞试验研究了碳化与氯离子侵蚀耦合作用下混凝土微观结构的变化。

因此,本文基于快速碳化试验,采用酚酞指示剂、TGA、FTIR、XRD和SEM等测试方法,分析了硝酸与弯曲应力作用下混凝土碳化深度、碳化物质含量的变化规律,从微观角度揭示了硝酸与弯曲应力作用下混凝土的碳化机理,以期为公路隧道衬砌耐久性的研究提供一定的参考。

1 室内快速碳化试验

1.1 原材料及试件制备

水泥采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其熟料占比(质量分数,文中涉及的占比、减水率、含量等除特别说明外均为质量分数)87%,混合料(粉煤灰、石灰石)占比8%,石膏占比5%,其基本指标见表1;砂为渭河天然砂,细度模数为3.4;碎石为连续级配5~15 mm的瓜米石;减水剂为聚羧酸系高性能减水剂,减水率27%。试验采用尺寸为100 mm×100 mm×400 mm的棱柱体试件,浇筑成型后静置24 h再脱模,标号后送入混凝土养护室,在20℃、相对湿度95%的环境下养护28 d,然后进行抗折强度(f_t)测试,同时对同期浇筑的标准立方体试件进行抗压强度(f_c)测试。混凝土的配合比及28 d强度如表2所示。

1.2 试验设计

快速碳化试验参照GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》进行,试验过程中控制温度为(20±2)℃、相对湿度(70±5)%、CO₂气体体积分数(20±3)%。试件选择1个100 mm×400 mm的面作为测试面,相邻面用石蜡封闭,在碳化时间(t)为3、7、14、28 d时测定其碳化深度(x_c)。

采用硝酸浸泡来模拟隧道大气中酸性气体(以NO_x为主)对混凝土碳化过程的影响,碳化测试面浸

泡于3种不同浓度(0.01、0.05、0.10 mol/L)的硝酸溶液中。在碳化试验开始前(0 d)和碳化进行到7、14、21 d时,将测试面浸泡在对应浓度的硝酸溶液中1 d,干燥后继续进行快速碳化试验。为模拟衬砌受到的弯曲荷载作用,通过图1所示装置采用四点加载法加载试件,设置4个分级荷载值(对应混凝土试件的抗折强度),应力水平分别为0.3 f_t 、0.5 f_t 、0.7 f_t ,采用扳手和螺母施加荷载,并通过压力传感器控制加载量。选择纯弯段(试件中部100 mm范围)为碳化测试区。不同硝酸浓度及不同应力下的工况均为4组,每种工况1个试件,共16个试件。试验工况设置见表3。

1.3 碳化指标测试

采用1%(质量分数,下同)酚酞-酒精溶液进行碳化深度测试,随后进行递进取粉:在距试件表面0~10 mm处每2 mm 1层,10~25 mm处每3 mm 1层,共10层,将获得的混凝土粉末密封保存。采用Discovery SDT 650型TGA和Bruker Tensor II型FTIR分析所取粉末的碳化物质含量,采用AXS D8 Advance X型XRD分析粉末的矿物组成。选取混凝土表面1~3 mm的薄片,采用Hitachi S-4800型SEM观察碳化区的微观形貌。

2 结果与分析

2.1 碳化深度分析

试件的碳化深度如图2所示。由图2可见:

(1)硝酸浓度与弯曲应力水平的提高均能促进碳化深度的增加,且各试件的碳化深度发展均呈现出相似的规律,即碳化深度随着时间的延长而增加,但增长幅度逐渐下降。

(2)在0.3 f_t 、0.5 f_t 、0.7 f_t 弯曲应力工况下,碳化深度的平均提升幅值分别为3.65%、7.51%、13.71%。其中试件A-4的碳化深度明显高于其他3个试件,说明较大的弯曲应力会显著提升混凝土的碳化深度。

表1 水泥的基本指标

Table 1 Basic indexes of cement

Chemical composition(by mass)/%							Density/ (g·cm ⁻³)	Specific surface area/(cm ² ·g ⁻¹)	Fineness (by mass)/%
CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	f-CaO	IL			
58.12	20.30	4.45	2.28	0.23	0.75	4.05	3.10	3 630	2.70

表2 混凝土的配合比和28 d强度

Table 2 Mix proportion and 28 d strength of concrete

Mix proportion/(kg·m ⁻³)					f_c /MPa	f_t /MPa
Water	Cement	Sand	Crushed stone	Water reducing admixture		
166.0	360.0	727.0	1 137.0	3.6	32.3	5.1

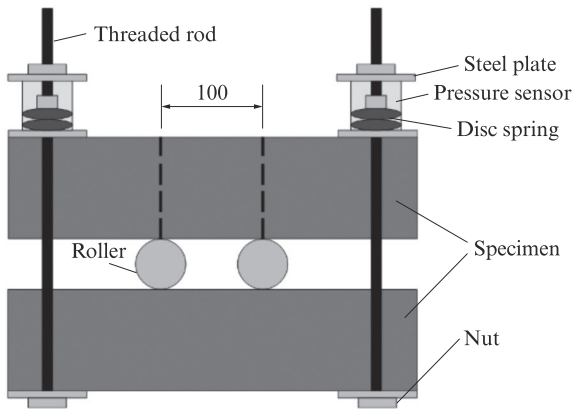


图1 试件加载装置

Fig. 1 Specimen loading system(size: mm)

(3)试件 B-1、C-1、D-1 的碳化深度相较于试件 A-1 分别提升了 13.66%、23.88%、30.36%，碳化深度随着硝酸浓度的增长具有非常显著的先快后慢趋势，较低浓度的硝酸即可对碳化深度产生显著的影响。然而，当硝酸浓度呈倍数提升时，碳化深度的提升幅值相较于硝酸浓度的提升较小，表明当硝酸浓度较高时，混凝土碳化深度受硝酸浓度变化的影响有限。

碳化深度随着时间的延长而线性增加，符合 Fick 第一定律，碳化深度 x_c 与碳化时间 t 的关系如式(1)所示：

$$x_c = k\sqrt{t} \tag{1}$$

式中： k 为碳化深度影响系数。

表3 试件编号与对应工况

Table 3 Specimen number and corresponding working condition

No.	Stress level	$c(\text{HNO}_3)/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	No.	Stress level	$c(\text{HNO}_3)/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	No.	Stress level	$c(\text{HNO}_3)/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	No.	Stress level	$c(\text{HNO}_3)/(\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$
A-1	0	0	B-1	0	0.01	C-1	0	0.05	D-1	0	0.10
A-2	$0.3f_i$	0	B-2	$0.3f_i$	0.01	C-2	$0.3f_i$	0.05	D-2	$0.3f_i$	0.10
A-3	$0.5f_i$	0	B-3	$0.5f_i$	0.01	C-3	$0.5f_i$	0.05	D-3	$0.5f_i$	0.10
A-4	$0.7f_i$	0	B-4	$0.7f_i$	0.01	C-4	$0.7f_i$	0.05	D-4	$0.7f_i$	0.10

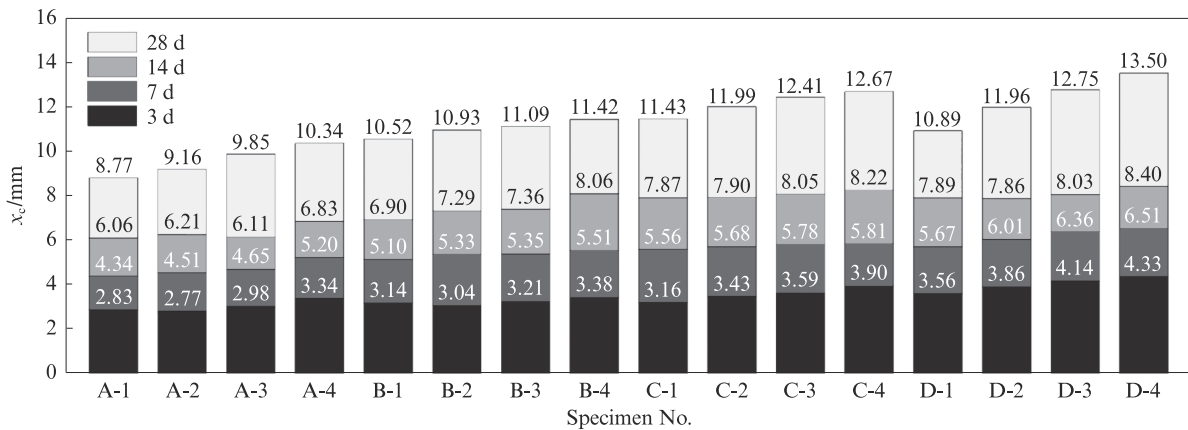


图2 试件的碳化深度

Fig. 2 Carbonation depths of specimens

根据式(1)拟合后得到不同硝酸浓度下应力水平与碳化深度影响系数之间的关系，如图3所示。由图3可见：碳化深度影响系数的增长趋势进一步反映了硝酸浓度对碳化深度的提升有限；在不同的硝酸浓度下，碳化深度均与弯曲应力水平呈现正相关的线性增长，在相同硝酸浓度下，碳化深度影响系数随着应力水平的增加基本呈线性增长，说明随着应力水平的增加，碳化速率逐渐提升。未加硝酸时， $0.3f_i$ 、 $0.5f_i$ 、 $0.7f_i$ 应力水平时碳化深度影响系数的增长率分别为 3.45%、8.11%、16.74%；当硝酸浓度为 0.05 mol/L 时，随着应力水平的增加，碳化深度影响系数的增长率分别为 1.56%、5.49%、10.53%。原因在于弯曲应

力的作用使得混凝土原有的孔隙和微裂缝扩展，促进了 CO_2 气体的扩散。

2.2 碳化物质含量分析

图4为不同硝酸浓度下的碳化区域划分。显然，随着深度的增加，氢氧化钙(CH)的含量呈现明显的区域特征，即分为完全碳化区、部分碳化区和未碳化区3个部分。由图4(a)、(b)可见：试件 A-1 和 B-1 的完全碳化区约为 $0\sim 9.0 \text{ mm}$ ，CH 的含量几乎为 0， CaCO_3 的含量较大，但随着深度的增加呈下降趋势；部分碳化区约为 $9.0\sim 17.5 \text{ mm}$ ，CH 的含量出现了明显增大的趋势，而 CaCO_3 的含量迅速下降；未碳化区内 ($>17.5 \text{ mm}$) 两者的含量保持稳定，CH 质量约占混凝土固体质量的

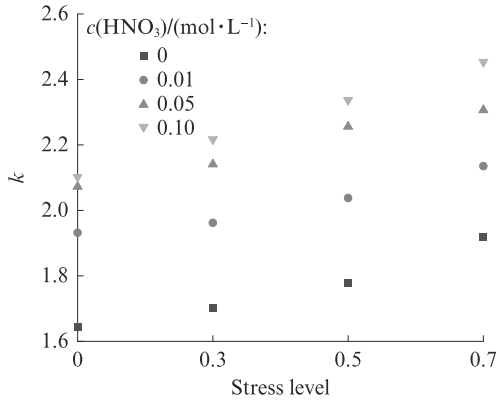


图3 不同硝酸浓度下应力水平与碳化深度影响系数之间的关系
Fig. 3 Relationship between stress level and k value under different nitric acid concentrations

5.00%左右, CaCO_3 约占 11.50%~12.50%. 根据计算, 质量分数为 5.00% 的 CH 完全碳化所形成 CaCO_3 的质量分数仅为 6.76%, 而表层混凝土 CaCO_3 的质量分数接近 30%(A-1), 说明有超过 10.00% 的 CaCO_3 是由 CH 以外的碳化物质(主要为水化硅酸钙 CSH 凝

胶)生成, 这也解释了完全碳化区内随着深度的增加, CH 的含量不变而 CaCO_3 的含量不断下降的现象.

由图 4(c)、(d) 可见: 试件 C-1 和 D-1 的完全碳化区约为 0~11.5 mm; 试件 C-1 的 CaCO_3 含量随着深度的增加而下降, 但变化速率较试件 A-1 和 B-1 更小; 试件 D-1 的 CaCO_3 含量呈现先上升后下降的趋势, 部分碳化区的长度和该范围内的曲线形态无明显变化.

对比不同硝酸浓度下 CH 和 CaCO_3 的含量, 可以发现: 部分碳化区内 CH 的含量与硝酸浓度负相关, 曲线的形态较为一致; 表层 CaCO_3 的含量与硝酸浓度负相关, 在部分碳化区内则为正相关, 说明硝酸侵蚀减少了浅层混凝土的 CaCO_3 含量, 同时也加快了碳化进程. 原因在于表层混凝土在碳化与硝酸浸泡的双重作用下, 碱性迅速降至较低值, CH 的含量大幅减少, 难以进一步发生碳化生成 CaCO_3 . 由于硝酸会进一步与混凝土中的部分碳酸盐矿物及硅酸盐矿物反应, 使其含量减少的同时生成硝酸盐, 在宏观层面上使得混凝土的结构疏松, 孔隙增大, 从而提升了碳化速率.

采用 FTIR 测试了不同深度试样的 C—O 键特

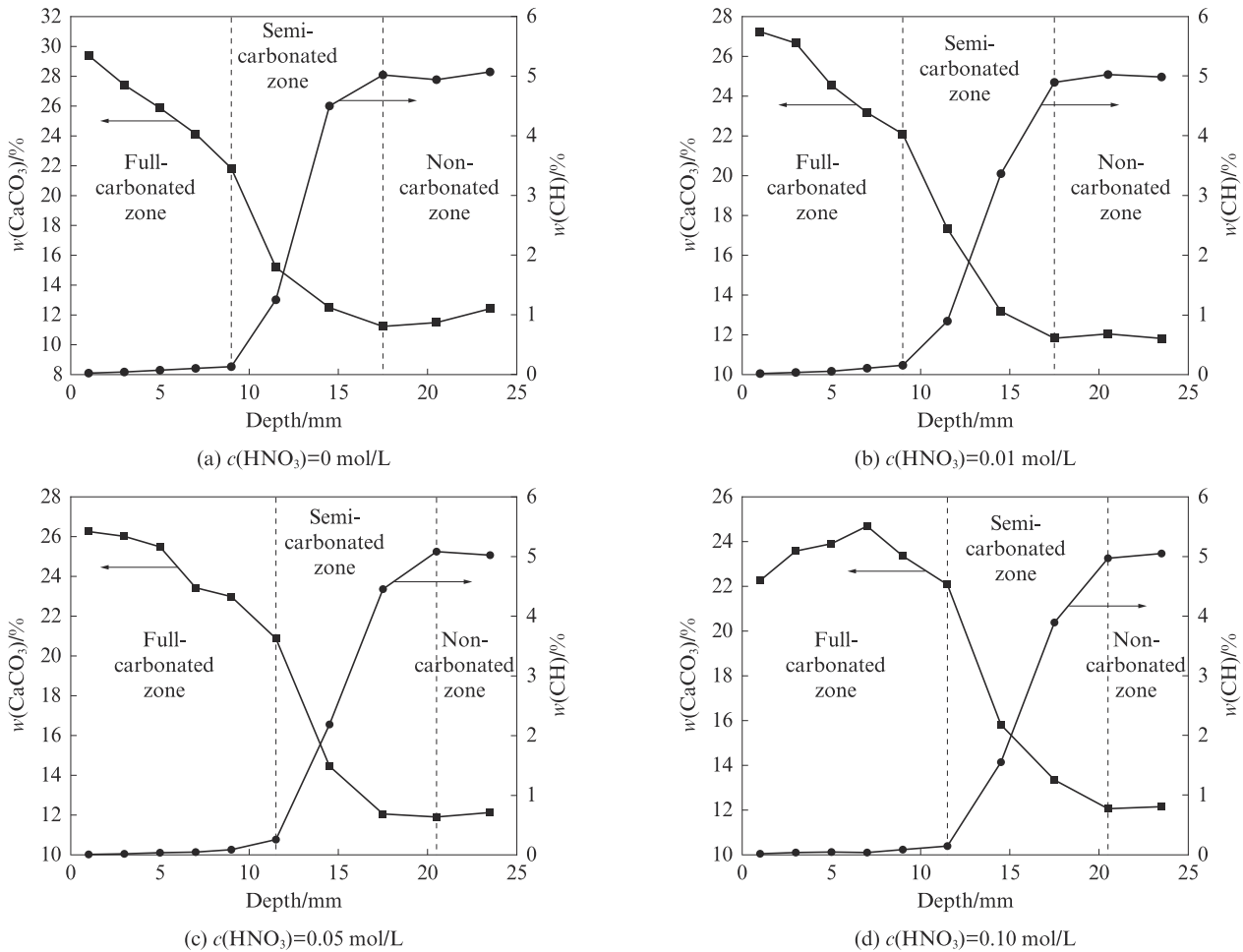


图4 不同硝酸浓度下的碳化区域划分
Fig. 4 Division of carbonation area under different nitric acid concentrations

征峰的吸光度,即间接得到了相应位置的CaCO₃含量.图5为不同碳化时间和弯曲应力工况下吸光度的变化曲线,并根据曲线形态用虚线标注碳化区界限.由图5可见:随着碳化时间的延长,碳化区CaCO₃的含量显著提升,完全碳化区和部分碳化区的长度均

随着时间的延长明显增长;对比不同弯曲应力工况下的CaCO₃含量曲线,可见增大弯曲应力值使得不同深度处CaCO₃的含量得到了小幅提升,但由于碳化前CaCO₃的含量较高且存在一定波动,使得弯曲应力值对CaCO₃含量的提升幅度较小.

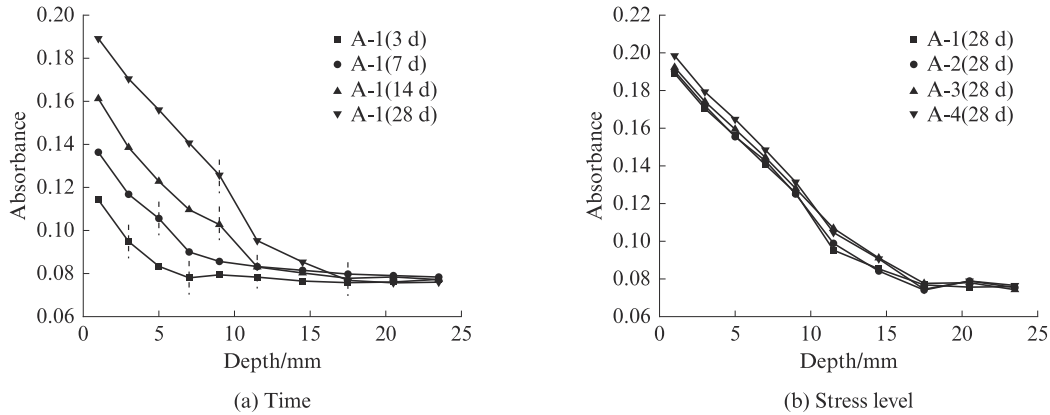


图5 不同碳化时间和弯曲应力工况下吸光度的变化曲线
Fig. 5 Absorbance curves under different carbonation time and bending stress conditions

3 碳化机理分析

3.1 硝酸侵蚀环境下混凝土的碳化机理分析

通过XRD可以分析混凝土碳化前后矿物组成和含量的变化,选取不同硝酸浓度下试件A-1~D-1碳化28 d的0~2 mm粉末试样以及无碳化的对照组试样进行测试,得到不同硝酸浓度下碳化混凝土试样的XRD图谱,如图6所示.图中各峰用数字或字母表示其对应矿物,1表示CH,2表示石英(SiO₂),3表示钠长石(NaAlSi₃O₈),4表示硫酸钙晶体(CaSO₄·xH₂O),5表示钾长石(KAlSi₃O₈),6表示CaCO₃,7表示钙长石(CaAl₂Si₂O₈),A表示NaNO₃,B表示Ca(NO₃)₂,C表示KNO₃.

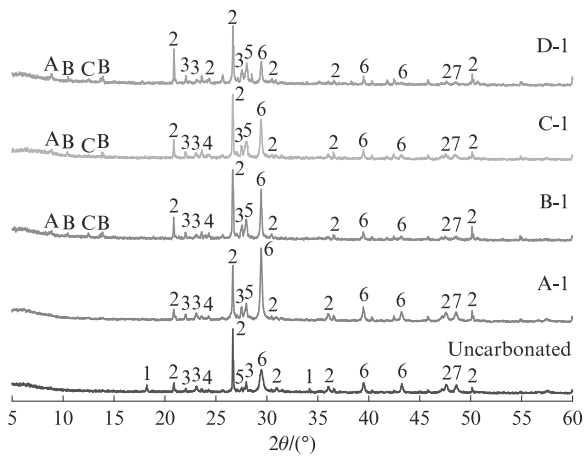


图6 不同硝酸浓度下碳化混凝土试样的XRD图谱
Fig. 6 XRD patterns of carbonated concrete samples under different nitric acid concentrations

由图6可见:

(1)在未碳化的情况下,混凝土内的晶相主要来源于骨料的石英、长石及CaCO₃.此外,还有部分水化产物,如CH、硫酸钙晶体(包括AFt和AFm)等.主要水化产物CSH为无定型凝胶,无明显的衍射峰.

(2)随着碳化的进行,CaCO₃对应的峰(主要位于29.5°)大幅增加,CH峰(主要位于14.1°处)则几乎消失.硝酸的侵蚀使得混凝土内产生了新的物质,即NaNO₃、Ca(NO₃)₂、KNO₃.同时,与试件A-1碳化28 d的XRD图谱相比,硝酸浸泡后CaCO₃的含量普遍较低,并且随着硝酸浓度的增加,CaCO₃所对应的峰值进一步降低,即硝酸浓度的提高能有效减少浅层CaCO₃的含量,更利于部分碳化区碳化的进一步进行.

图7为硝酸侵蚀后CSH的微观形貌.由图7可见:在硝酸作用下水化产物和骨料矿物受到腐蚀,CSH表面的CaCO₃基本消失,CSH受到硝酸侵蚀;当硝酸浓度较低时,CSH受硝酸侵蚀,表面出现分解条纹;在较高浓度硝酸的侵蚀下,CSH几乎被完全分解为无胶凝性的SiO₂.

另一方面,硝酸侵蚀下,混凝土表层CaCO₃的含量随着硝酸浓度的增加而下降,原因在于表层混凝土在CO₂和硝酸的双重侵蚀下,CH和CSH的含量迅速降低到较低水平,难以继续碳化生成CaCO₃.而硝酸会进一步侵蚀碳化生成的CaCO₃和骨料中的CaCO₃,使硝酸侵蚀作用下混凝土的微观组成和碳化

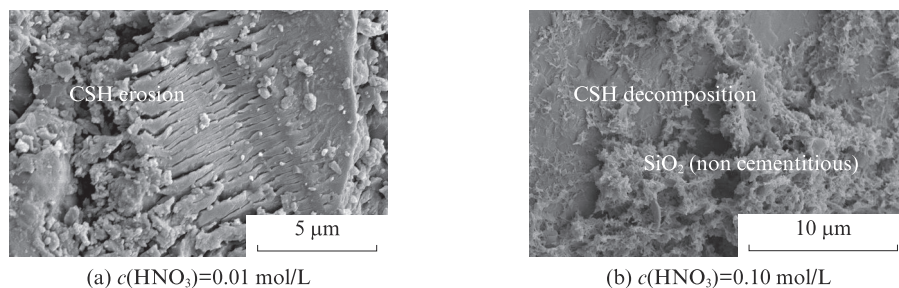


图7 硝酸侵蚀后CSH的微观形貌

Fig. 7 Microstructure of CSH after nitric acid corrosion

机理发生了较大的改变。

图8为硝酸侵蚀作用下混凝土的碳化过程.由图8可见:

(1)碳化反应生成了大量球状的 CaCO_3 颗粒.由于孔隙空间的限制,碳化生成的 CaCO_3 颗粒大多直径在 $1\ \mu\text{m}$ 以下,具有较高的堆积密度.其附着在孔隙表面,将CSH包裹覆盖,使得 CO_2 难以进一步与CSH反应,碳化速率大大下降.

(2)同时,生成的 CaCO_3 填充了孔隙,减小了孔隙的直径和连通度,阻碍了 CO_2 的扩散^[17].因此,碳化速

率会随着时间的延长不断下降.在硝酸侵蚀环境下,硝酸会和孔隙表面的 CaCO_3 反应,使被包裹的CSH外露,使得碳化反应能持续进行,有效提升了混凝土的后期碳化速率;当硝酸浓度较大时,还会进一步与CSH等碱性物质反应,有效减小了固相体积,使得孔隙体积增大,促进了 CO_2 的扩散.另一方面,硝酸沿孔隙通道、微裂缝等渗透到固相内部发生侵蚀反应,部分产物(如 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$)产生了一定的膨胀应力,使得孔隙扩大、微裂缝发展,提升了各类物质的传输速率,促进了碳化反应的进行.

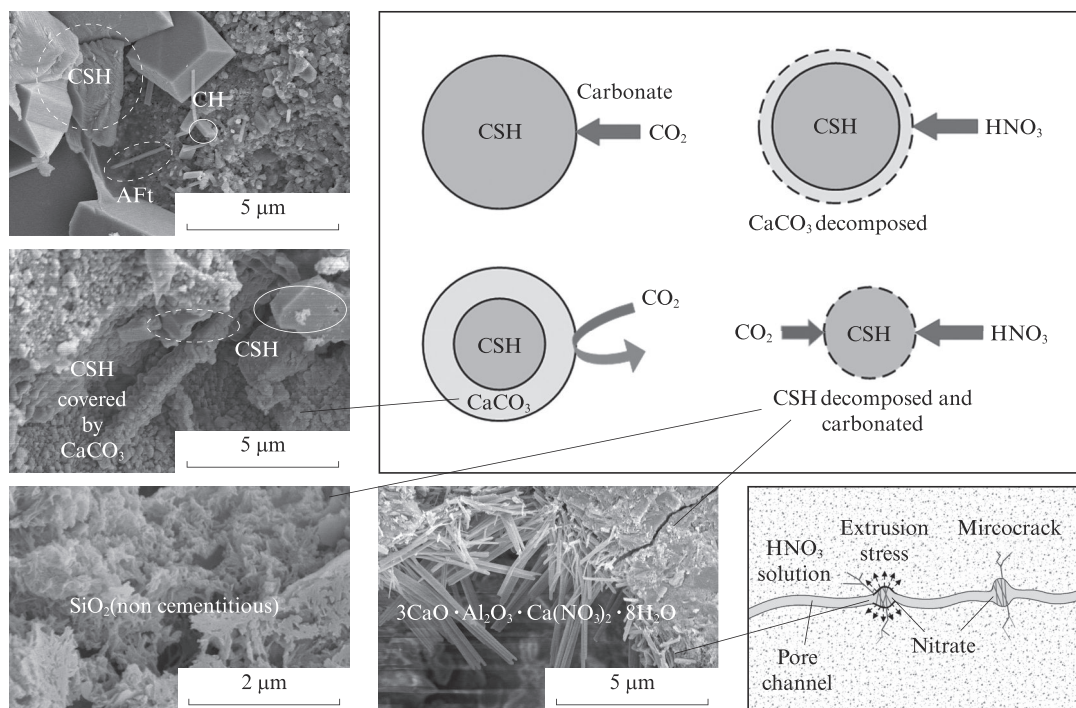


图8 硝酸侵蚀作用下混凝土的碳化过程

Fig. 8 Carbonation process of concrete under nitric acid corrosion

3.2 弯曲应力作用下混凝土的碳化机理分析

不同弯曲应力水平作用下混凝土的裂缝如图9所示.由图9可见:无弯曲应力试件A-1的表面较为完整,但仍有不明显的细微裂缝,原因在于混凝土自身发生的各类收缩所造成的结构缺陷;在弯曲应力

作用下,微裂缝宽度明显随着弯曲应力的增加而增大;同时,在弯曲应力作用下容易产生应力集中,在孔隙和微裂缝结构的薄弱处发生破坏,使裂缝得到进一步的扩展.增大裂缝宽度能够有效提升 CO_2 在混凝土的扩散速度.根据试验数据,当弯曲应力水平

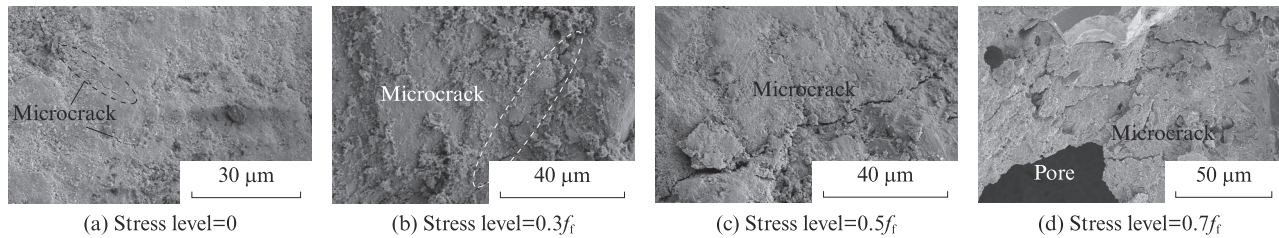


图9 弯曲应力作用下碳化混凝土的微裂缝

Fig. 9 Microcrack in carbonated concrete under bending stress action

较高时($0.7f_t$),弯曲应力对碳化的促进作用更为显著,原因在于混凝土的轴心抗拉强度通常低于抗折强度,如C30混凝土的轴心抗拉强度为2.01 MPa,而抗折强度一般为4.0~4.5 MPa^[18];当弯曲应力超过抗拉强度时,混凝土受拉区的外边缘处出现宏观受拉裂缝,促进了 CO_2 气体向混凝土内部的扩散.此外,微裂缝也是碳化反应的场所,新出现的微裂缝使得附近区域的碳化物质能直接发生碳化反应,无需经过物质传输,进一步提升了碳化效率.

弯曲应力与硝酸的共同作用促进了混凝土的碳

化.图10为碳化与弯曲应力共同作用形成微裂缝的示意图.由图10可见,碳化消耗了水化产物,减少了胶凝颗粒的数量,并破坏了胶凝颗粒间的相互联结,宏观表现为水泥浆体的结构疏松,强度下降.因此,通常碳化后混凝土的力学性能有所降低.在弯曲应力的作用下,碳化水泥浆体更容易产生微裂缝,而这些微裂缝又进一步为外界物质进入混凝土提供了通道,对碳化产生了循环促进作用,在一定程度上削弱了 CaCO_3 对孔隙的封闭效应.因此,弯曲应力作用下混凝土的碳化速率在碳化后期仍能维持在较高的水平.

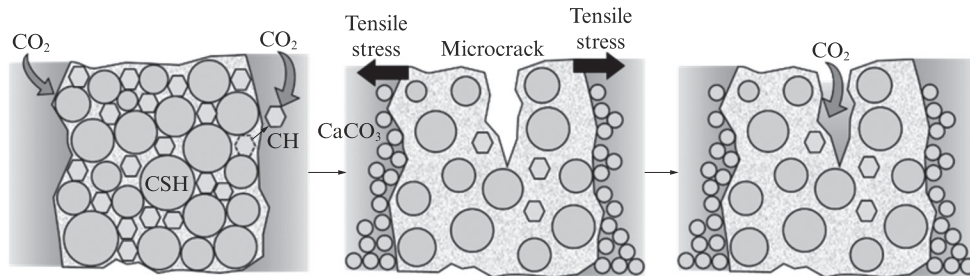


图10 碳化与弯曲应力共同作用形成微裂缝的示意图

Fig. 10 Formation diagram of microcrack by the combined action of carbonation and bending stress

4 结论

(1)硝酸与弯曲应力对混凝土的碳化均具有促进作用.随着硝酸浓度和弯曲应力水平的提高,混凝土的碳化深度增加,前者的提升作用随着时间的延长逐渐降低,后者则逐渐增加.

(2)混凝土的碳化深度、完全碳化区和部分碳化区的长度较为接近,均随着碳化时间的延长而增大.完全碳化区CH的含量小于1.00%, CaCO_3 的含量随着深度的增加而降低.部分碳化区内CH的含量迅速上升至约5.00%, CaCO_3 的含量迅速下降至约12.00%. CaCO_3 的增长量大部分来自于CSH的碳化,小部分为CH的碳化.硝酸侵蚀使浅层混凝土中 CaCO_3 的含量下降,部分碳化区 CaCO_3 的含量提高.弯曲应力能小幅增加碳化区 CaCO_3 的含量.

(3)硝酸与CH、CSH及 CaCO_3 、长石等反应,消

耗了碱性物质并削弱了 CaCO_3 对孔隙的填充效应,同时部分产物(如 $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Ca}(\text{NO}_3)_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$)的膨胀促使混凝土的微裂缝增加,使得混凝土的结构疏松,孔隙率增大,更易开裂,从而促进了混凝土的长期碳化.弯曲应力使微裂缝发生扩展,在较高应力水平下产生受拉裂缝,并与碳化的影响形成循环促进效应,使其对混凝土碳化的影响程度随着时间的延长而提高,同样增大了混凝土在后期的碳化速率.

参考文献:

- [1] 王蕾. 基于环境因素的高速隧道衬砌结构碳化耐久性研究[D]. 西安:长安大学, 2020.
WANG Lei. Research on carbonization durability of highway tunnel lining structure based on environmental factors[D]. Xi'an: Chang'an University, 2020. (in Chinese)
- [2] 韩兴博, 叶飞, 梁晓明, 等. 公路隧道钢筋混凝土衬砌碳化耐久性区划[J]. 浙江大学学报(工学版), 2021, 55(8):1436-1443,

1463.
HAN Xingbo, YE Fei, LIANG Xiaoming, et al. Carbonization durability zoning of highway tunnel reinforced concrete lining[J]. Journal of Zhejiang University(Engineering Science), 2021, 55(8):1436-1443,1463. (in Chinese)
- [3] 翁其能, 张丽珺, 秦伟. 公路隧道环境因子对混凝土衬砌耐久性影响综述[J]. 材料导报, 2014, 28(15):93-97.
WENG Qineng, ZHANG Lijun, QIN Wei. Summary of the impact of highway tunnel environmental factors on the durability of concrete lining[J]. Materials Guide, 2014, 28(15):93-97. (in Chinese)
- [4] 谢东升. 高性能混凝土碳化特性及相关性能的研究[D]. 南京: 河海大学, 2005.
XIE Dongsheng. Research on carbonation characteristics and related properties of high performance concrete[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese)
- [5] TALUKDAR S, BANTHIA N, GRACE J, et al. Climate change-induced carbonation of concrete infrastructure [J]. Construction Materials, 2014, 167(3):140-150.
- [6] 高冠一, 张铨, 麻凤海. 混凝土抗碳化性能影响因素试验研究[J]. 混凝土, 2020(6):30-32.
GAO Guanyi, ZHANG Cheng, MA Fenghai. Experimental study on factors affecting the carbonation resistance of concrete [J]. Concrete, 2020(6):30-32. (in Chinese)
- [7] 任光明, 赵志祥, 聂德新, 等. 深埋长隧道有害气体发生的地质条件初探[J]. 山地学报, 2002, 20(1):122-125.
REN Guangming, ZHAO Zhixiang, NIE Dexin, et al. A preliminary study on the geological conditions of harmful gas occurrence in deep-buried long tunnels[J]. Journal of Mountain Research, 2002, 20(1):122-125. (in Chinese)
- [8] 王家滨, 牛荻涛. 喷射混凝土的硝酸侵蚀:孔溶液 H^+ 与 NO_3^- 的扩散规律及侵蚀机理[J]. 材料导报, 2019, 33(6):991-999.
WANG Jiabin, NIU Ditao. Nitric acid erosion of shotcrete: Diffusion law and erosion mechanism of pore solution H^+ and NO_3^- [J]. Materials Review, 2019, 33(6):991-999. (in Chinese)
- [9] 张丹, 牛荻涛, 王家滨. 硝酸侵蚀与碳化耦合作用下粉煤灰喷射混凝土中性化研究[J]. 混凝土, 2016(5):91-94.
ZHANG Dan, NIU Ditao, WANG Jiabin. Study on neutralization of fly ash shotcrete under the coupling action of nitric acid erosion and carbonization[J]. Concrete, 2016(5):91-94. (in Chinese)
- [10] 唐官保, 姚燕, 王玲, 等. 应力作用下混凝土碳化深度预测模型[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(2):304-308.
TANG Guanbao, YAO Yan, WANG Ling, et al. Prediction model of concrete carbonation depth under stress[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(2):304-308. (in Chinese)
- [11] KHUNTHONGKEAW J, TANGTERMSIRIKUL S, LEELAWAT T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete[J]. Construction and Building Materials, 2006, 20(9):744-753.
- [12] TURCRY P, OKSRI-NELFIA L, YOUNSI A, et al. Analysis of an accelerated carbonation test with severe preconditioning[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 57:70-78.
- [13] WITKOWSKI H, KONIORCZYK M. New sampling method to improve the reliability of FTIR analysis for self-compacting concrete[J]. Construction and Building Materials, 2018, 172:196-203.
- [14] CHANG C F, CHEN J W. The experimental investigation of concrete carbonation depth[J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(9):1760-1767.
- [15] 郭寅川, 黄忠财, 王文真, 等. 湿热环境下SAP内养生混凝土抗碳化性能及机理研究[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(1):16-23.
GUO Yinchuan, HUANG Zhongcai, WANG Wenzhen, et al. Research on the anti-carbonization performance and mechanism of SAP internal curing concrete in hot and humid environment[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(1):16-23. (in Chinese)
- [16] LIU J, QIU Q W, CHEN X C, et al. Understanding the interacted mechanism between carbonation and chloride aerosol attack in ordinary Portland cement concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2017, 95:217-225.
- [17] RAMEZANIANPOUR A A, GHAHARI S A, ESMAELI M. Effect of combined carbonation and chloride ion ingress by an accelerated test method on microscopic and mechanical properties of concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 58:138-146.
- [18] 王家滨, 牛荻涛, 马蕊, 等. 弯曲应力作用下喷射混凝土抗碳化性能研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2015, 47(增刊1):84-90.
WANG Jiabin, NIU Ditao, MA Rui, et al. Research on the anti-carbonation performance of shotcrete under bending stress[J]. Journal of Sichuan University(Engineering Science), 2015, 47(Suppl 1):84-90. (in Chinese)