

## 聚氨酯混凝土在强碱环境下的耐碱性能试验研究

章文<sup>1</sup>, 杜英歌<sup>1</sup>, 杨光耀<sup>1</sup>, 许海东<sup>1</sup>, 房昕宇<sup>1</sup>, 朱宗山<sup>1</sup>, 冷冰<sup>1,\*</sup>

1. 北华大学, 土木与交通学院, 吉林 吉林, 132013

**摘要:** 为评价聚氨酯混凝土(PUC)在强碱环境下的耐腐蚀性能及结构稳定性, 采用质量分数10%的NaOH溶液对PUC试件进行3 d、7 d、14 d和28 d浸泡试验, 并通过宏观形貌、质量变化率、抗压强度保持率、XRD和FTIR分析其性能变化。结果表明: 浸泡28 d后, 试件表面未出现明显变色、起皮、剥落、裂缝及边角破损; 3 d、7 d、14 d和28 d的质量变化率分别为0.18%、0.17%、0.18%和0.26%, 整体变化较小; 抗压强度保持率分别为99.36%、98.30%、95.86%和93.30%, 虽随浸泡时间延长有所降低, 但28 d后仍高于90%。XRD和FTIR结果显示, 浸泡前后主要物相和特征官能团变化不明显, 未发现明显新物相生成或官能团结构破坏。综合分析可知, 在10% NaOH溶液短期浸泡条件下, PUC具有较好的质量稳定性和抗压性能保持能力, 但其长期耐碱性能仍需进一步验证。

**关键词:** 聚氨酯混凝土; NaOH溶液; 耐碱性能; 性能保持; 结构表征

## Experimental Study on Alkali Resistance of Polyurethane Concrete in a Strong Alkaline Environment

Wen Zhang<sup>1</sup>, Yingge Du<sup>1</sup>, Guangyao Yang<sup>1</sup>, Haidong Xu<sup>1</sup>, Xinyu Fang<sup>1</sup>, Zongshan Zhu<sup>1</sup>, Bing Leng<sup>1,\*</sup>

1. School of Civil and Transportation Engineering, Beihua University, Jilin 132013, China

**Abstract:** To evaluate the corrosion resistance and structural stability of polyurethane concrete (PUC) in a strong alkaline environment, PUC specimens were immersed in a 10 wt.% NaOH solution for 3 d, 7 d, 14 d, and 28 d. The performance changes were analyzed based on macroscopic morphology, mass change rate, compressive strength retention rate, X-ray diffraction (XRD), and Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR). The results show that after 28 d of immersion, no obvious discoloration, peeling, spalling, cracking, or edge damage was observed on the specimen surface. The mass change rates at 3 d, 7 d, 14 d, and 28 d were 0.18%, 0.17%, 0.18%, and 0.26%, respectively, indicating only slight overall variation. The compressive strength retention rates were 99.36%, 98.30%, 95.86%, and 93.30%, respectively. Although the retention rate decreased with increasing immersion time, it remained above 90% after 28 d. The XRD and FTIR results indicate that the main phases and characteristic functional groups showed no significant changes before and after immersion, and no obvious formation of new phases or destruction of functional group structures was observed. Comprehensive analysis indicates that PUC exhibits good mass stability and compressive strength retention under short-term immersion in 10 wt.% NaOH solution; however, its long-term alkali resistance still requires further investigation.

**Keywords:** Polyurethane concrete; NaOH solution; Alkali resistance; Performance retention; Structural characterization

混凝土结构在化工地坪、工业储槽、碱性废液处理设施、碱性地下水及盐碱地区等环境中, 可能长期受到碱性介质作用。与酸侵蚀相比, 碱性环境对普通水泥基体的破坏通常不表现为明显溶蚀, 因此其劣化过程更容易被忽视。然而, 在强碱和水分共同作用下, 碱性离子迁移及其可能诱发的碱骨料反应仍会影响材料长期稳定性。碱骨料反应是由托马斯-斯坦顿(Thomas Stanton)在约80年前

首次发现的,如今已被认为是混凝土结构中最常见、最具破坏性的劣化机制之一。已有研究表明,碱骨料反应是指砂石骨料中活性成分与原材料中碱性物质( $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ )之间发生的有害化学反应。这种反应会生成膨胀性产物,造成混凝土开裂破坏、耐久性降低,是严重危害混凝土结构健康与安全的“癌症”。其还受孔隙液碱度、骨料活性、水分和温度等因素影响,可能导致混凝土性能下降<sup>[1-3]</sup>。同时,胶凝材料组成和孔结构会影响碱性介质在材料内部的迁移过程,辅助胶凝材料可通过降低可用碱含量、改善孔结构等方式抑制碱—硅酸反应发展<sup>[4,5]</sup>。因此,对含骨料、矿物填料和聚合物相的新型复合材料开展耐碱性能评价仍有必要。

聚氨酯混凝土(PUC)是一类以聚氨酯相作为重要胶结或改性组分的复合材料。聚氨酯相不仅填充了混凝土中的孔隙,而且在无机物团块周围包裹了一层有机网膜,增强了水泥石与骨料的粘结力,使混凝土结构变得致密。由于聚合物的填充增加了水泥石单位体积固相,使水泥石由原来的多孔体相对地变成致密的整体,从而使得混凝土具有高阻抗和高抗渗的特性。但聚氨酯材料并非在所有化学环境中均完全稳定,其耐久性与分子结构、软硬段组成、化学键类型及外部介质条件有关<sup>[6]</sup>;已有研究表明,聚氨酯材料在特定介质条件下可能发生结构变化<sup>[7]</sup>。因此,评价PUC耐碱性能时,除宏观外观外,还需结合质量变化、抗压强度保持率、物相组成和官能团变化等指标综合分析。

近年来,PUC在结构修复、界面黏结、堵漏防渗及桥面铺装等方面受到关注。已有研究表明,聚氨酯—水泥复合材料具有较好的抗压、抗弯和黏结性能,可用于混凝土结构修复<sup>[8]</sup>;PUC与水泥混凝土及钢筋之间的界面黏结性能受界面粗糙度影响明显<sup>[9]</sup>;该类材料在渗流控制和裂隙封堵方面也具有一定应用潜力<sup>[10]</sup>。Zhang等<sup>[11]</sup>对PUC的力学性能、黏结性能及酸碱腐蚀性能进行了研究,结果显示其经化学腐蚀后未出现明显可见劣化。此外,相关研究还从温度作用、疲劳性能和桥面铺装适用性等方面对PUC进行了评价<sup>[12-15]</sup>。总体来看,现有研究多集中于PUC的力学性能、界面黏结和路用性能,而其在强碱溶液浸泡条件下的性能保持和结构变化仍需进一步研究。

基于此,本文以质量分数10%的NaOH溶液为强碱浸泡介质,对PUC开展短期耐碱性能评价。通过宏观形貌、质量变化率、抗压强度保持率、XRD和FTIR测试,分析其浸泡前后的性能保持、物相组成及官能团结构变化,为PUC在碱性介质环境中的应用提供参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 原材料

本研究制备PUC所用原材料主要包括异氰酸酯、聚醚多元醇、普通硅酸盐水泥、粉煤灰、玄武岩骨料及除湿剂。异氰酸酯选用巴斯夫聚氨酯黑料,聚醚多元醇由山东腾展聚氨酯有限公司提供,二者反应形成聚氨酯基体;42.5级普通硅酸盐水泥、粉煤灰和玄武岩骨料用于提高材料强度、填充密实性和骨架稳定性。为减少水分引起的发泡和孔隙缺陷,制备过程中加入白色粉末状除湿剂。聚氨酯主要原料的基本性能指标见表1。

表1 聚氨酯主要原料的基本性能指标

材料	外观	黏度 (mPa·s)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
异氰酸酯	深棕色液体	200~300	1.1
聚醚多元醇	无色或淡黄色	300~500	1.05

### 1.2 样品制备

试件制备前,将水泥、粉煤灰、粗骨料和细骨料在 120 °C 条件下干燥 2 h,冷却至室温后备用。按设计配合比称取各组份后,先将聚醚多元醇、异氰酸酯和除湿剂低速搅拌 30 s,再依次加入水泥、粉煤灰、粗骨料和细骨料,并继续搅拌 2 min,使其充分混合。拌合物静置 30 s 后倒入 100 mm × 100 mm × 100 mm 模具中,在室温条件下静置 24 h 后脱模,得到 PUC 试件。

### 1.3 NaOH 溶液浸泡试验

参照《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》GB/T 50082—2024 中耐久性试验的相关思路<sup>[16]</sup>,设计 NaOH 溶液浸泡试验,PUC 试件制备及 NaOH 浸泡试验流程如图 1 所示。PUC 试件成型后统一编号,并在 (20 ± 5) °C 条件下养护 28 d。养护结束后,将试件置于质量分数为 10% 的 NaOH 溶液中浸泡,以评价其短期耐碱性能。

浸泡龄期设为 3 d、7 d、14 d 和 28 d,每组不少于 3 个试件,并设置未浸泡对照组。浸泡过程中,试件完全浸没于溶液中,底部采用塑料网架空支撑,使各表面充分接触碱液;每 3 d 更换一次新配制的 10% NaOH 溶液,浸泡温度控制在 (20 ± 5) °C。达到相应龄期后,取出试件进行宏观观察、质量测试和抗压强度测试,结果取平均值。



图 1 PUC 试件制备及 NaOH 浸泡试验流程图

Fig. 1 Flowchart of PUC specimen preparation and NaOH immersion test

### 1.4 分析方法

各浸泡龄期结束后,取出 PUC 试件,用去离子水冲洗并擦拭至表干状态。随后对试件表面及切面进行宏观观察。试件质量采用精度为 0.1 g 的电子天平测定,并计算质量变化率;抗压强度参照 GB/T 50081—2019<sup>[17]</sup>进行测试,抗压强度耐蚀系数参照 GB/T 50082—2024<sup>[16]</sup>计算,后文表述为抗压强度保持率。选取未浸泡和浸泡 28 d 后的代表性样品,经干燥、研磨后用于 XRD 和 FTIR 测试。XRD 采用 LabX XRD-6100 型 X 射线衍射仪,Cu K $\alpha$  辐射,扫描范围为 5° ~ 80°;FTIR 采用 KBr 压片法,扫描范围为 4000 ~ 400 cm<sup>-1</sup>,分辨率为 4 cm<sup>-1</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 宏观形貌特征

NaOH 溶液浸泡后,PUC 试件整体外观未发生明显变化。各龄期试件表面颜色基本保持一致,未出现明显变色、泛白、起皮、剥落及局部破损等现象;试件边角较完整,未观察到明显缺损。切开

后观察可见, 试件内部结构整体保持致密, 未发现贯通裂缝、明显分层或大范围疏松区域。上述结果说明, 在 10% NaOH 溶液短期浸泡条件下, PUC 试件宏观表面和内部形貌均保持较稳定, 碱性介质对其外观完整性的影响较小。

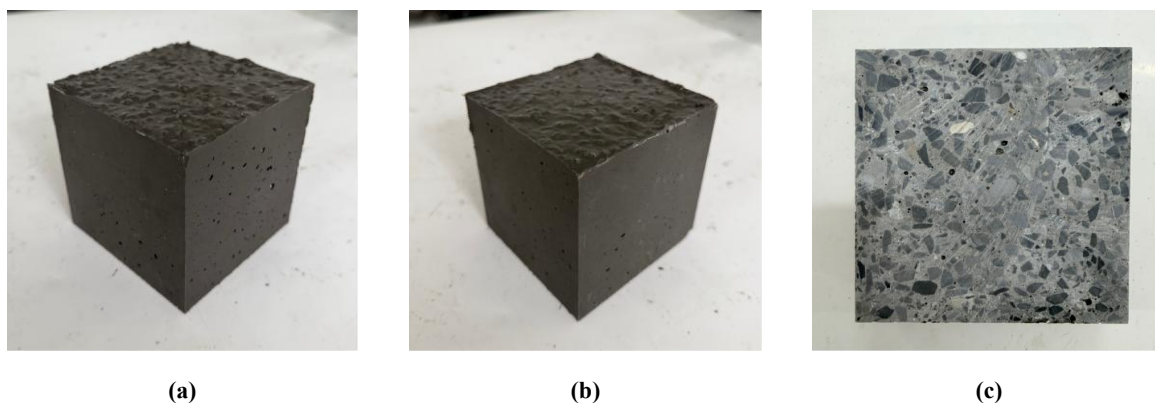


图 2 10% NaOH 溶液浸泡前后 PUC 试件表面及切面形貌: (a) 未浸泡; (b) 浸泡 28 d; (c) 浸泡 28 d 后切面

Fig. 2 Surface and cross-sectional morphology of PUC specimens before and after immersion in 10% NaOH solution:

(a) unsoaked; (b) immersed for 28 d; (c) cross-section after 28 d of immersion

## 2.2 质量变化与抗压强度保持率

PUC 试件在 10% NaOH 溶液中浸泡后的质量变化率和抗压强度保持率如图 3 所示。由图 3 (a) 可知, PUC 试件质量变化率整体较小, 浸泡 3 d、7 d、14 d 和 28 d 时分别为 0.18%、0.17%、0.18% 和 0.26%, 整体在 0.17%~0.26% 范围内波动, 表明碱液浸泡过程中试件质量仅发生轻微增加, 未出现明显质量降低或表面剥落现象。28 d 时质量变化率略有升高, 可能与碱液向孔隙或界面区域渗入、表面吸附及局部微结构变化有关。总体来看, PUC 在短期碱液作用下质量稳定性较好。

由图 3 (b) 可知, PUC 试件抗压强度保持率随浸泡龄期延长逐渐降低, 3 d、7 d、14 d 和 28 d 时分别为 99.36%、98.30%、95.86% 和 93.30%。这说明 NaOH 溶液对 PUC 力学性能存在一定削弱作用, 但 28 d 后抗压强度保持率仍高于 90%, 表明在 10% NaOH 溶液短期浸泡条件下, PUC 仍保持了较好的抗压性能, 未发生严重力学劣化。

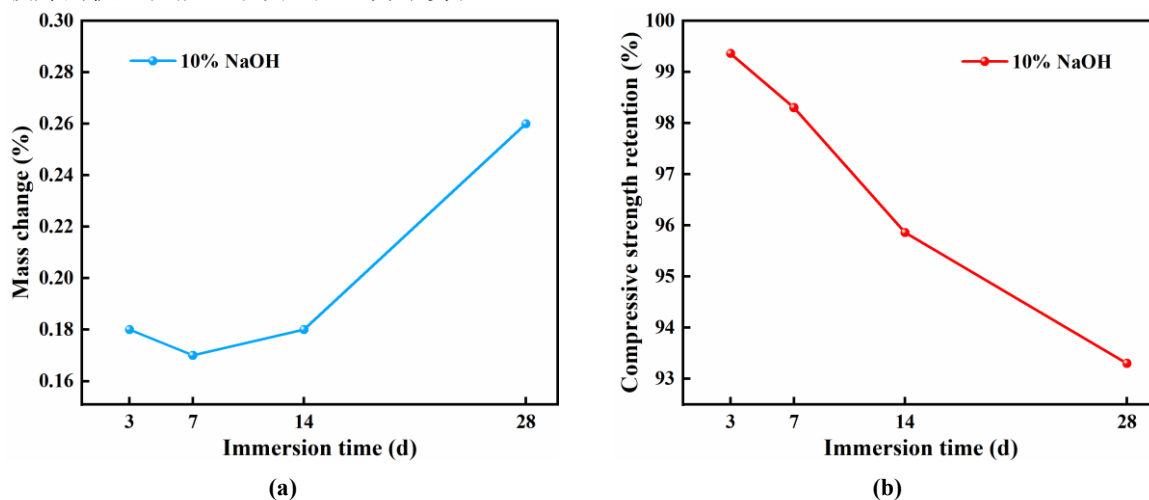


图 3 10% NaOH 溶液浸泡后 PUC 试件的性能变化: (a) 质量变化率; (b) 抗压强度保持率

Fig. 3 Performance changes of PUC specimens after immersion in 10% NaOH solution: (a) mass change rate; (b) compressive strength retention rate

## 2.3 物相与官能团特征

PUC 试件经 10% NaOH 溶液浸泡 28 d 前后的 XRD 和 FTIR 结果如图 4 所示。由图 4 (a) 可知, 浸泡前后 PUC 试件 XRD 图谱整体峰形基本一致, 主要衍射峰位置未发生明显偏移, 也未观察到新的强特征衍射峰, 说明短期碱液浸泡未导致主要晶体物相发生显著变化。浸泡后部分衍射峰强度存在一定差异, 可能与表层组分、界面状态或测试区域差异有关, 但不足以说明材料内部发生明显新物相生成或晶体结构重构。

由图 4 (b) 可知, 浸泡前后 PUC 主要红外吸收峰位置基本一致, 说明其主要有机官能团结构在 10% NaOH 溶液作用 28 d 后仍较为稳定; 部分吸收峰强度的轻微变化可能与碱液渗入、表面吸附水分或局部化学环境变化有关。综合来看, 10% NaOH 溶液短期浸泡未引起 PUC 明显物相转变或主要官能团破坏, 这与质量变化较小、抗压强度保持率较高的结果基本一致。

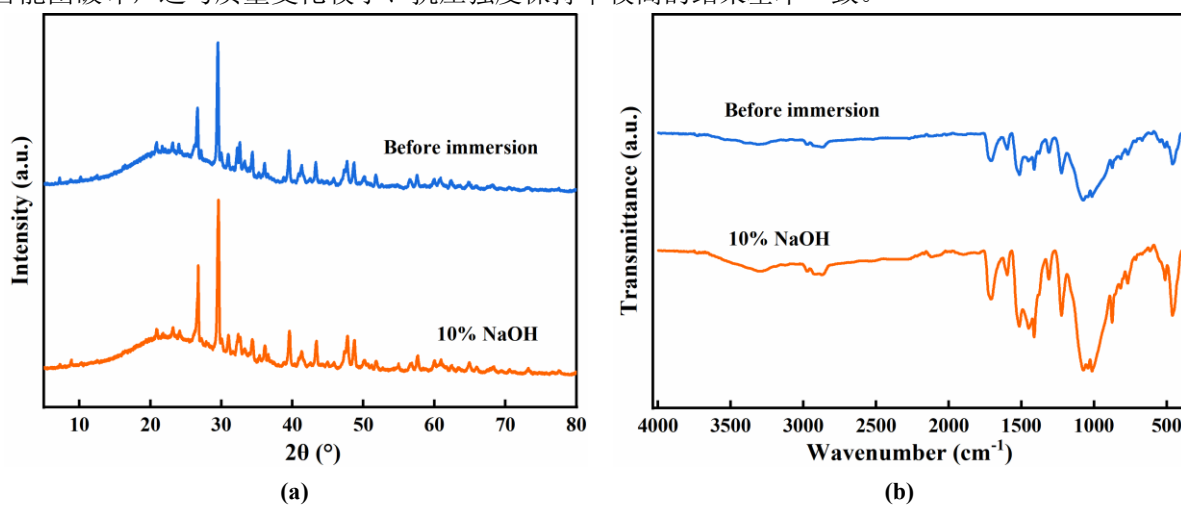


图 4 10% NaOH 溶液浸泡 28 d 前后 PUC 试件的结构表征结果: (a) XRD; (b) FTIR

Fig. 4 Structural characterization results of PUC specimens before and after immersion in 10% NaOH solution for 28 d: (a) XRD; (b) FTIR

### 3 结论

(1) 10% NaOH 溶液浸泡 28 d 后, PUC 试件表面及切面均未出现明显变色、起皮、剥落、裂缝、分层和边角破损等现象, 宏观形貌保持较好, 说明短期强碱浸泡未造成明显外观劣化。

(2) PUC 试件质量变化率较小, 浸泡 3 d、7 d、14 d 和 28 d 时分别为 0.18%、0.17%、0.18% 和 0.26%, 表明 NaOH 溶液浸泡过程中试件未出现明显质量损失, 质量变化幅度较小。

(3) PUC 试件抗压强度保持率随浸泡时间延长有所降低, 浸泡 3 d、7 d、14 d 和 28 d 时分别为 99.36%、98.30%、95.86% 和 93.30%。这表明 NaOH 溶液对 PUC 抗压性能存在一定削弱作用, 但 28 d 后强度保持率仍高于 90%, 整体力学性能劣化程度较轻。

(4) XRD 和 FTIR 结果表明, NaOH 溶液浸泡前后 PUC 主要物相和特征官能团未发生明显变化, 未发现明显新物相生成或主要官能团结构破坏。综合宏观形貌、质量变化率、抗压强度保持率及结构表征结果可知, PUC 在 10% NaOH 溶液浸泡 28 d 条件下表现出较好的短期耐碱稳定性。需要指出的是, 本文仅考察了单一 NaOH 浓度和 28 d 短期浸泡条件, 其长期耐碱性能仍需进一步研究。

### 参考文献

- [1] Fournier B, Bérubé M A. Alkali-aggregate reaction in concrete: A review of basic concepts and engineering implications[J]. Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, 27(2): 167-191.
- [2] Rajabipour F, Giannini E, Dunant C, et al. Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and

- the knowledge gaps[J]. *Cement and Concrete Research*, 2015, 76: 130-146.
- [3] Lindgård J, Andiç-Çakır Ö, Fernandes I, et al. Alkali-silica reactions (ASR): Literature review on parameters influencing laboratory performance testing[J]. *Cement and Concrete Research*, 2012, 42(2): 223-243.
- [4] Thomas M. The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review[J]. *Cement and Concrete Research*, 2011, 41(12): 1224-1231.
- [5] Fanijo E O, Kolawole J T, Almakrab A. Alkali-silica reaction (ASR) in concrete structures: Mechanisms, effects and evaluation test methods adopted in the United States[J]. *Case Studies in Construction Materials*, 2021, 15: 00563.
- [6] Xie F, Zhang T, Bryant P, et al. Degradation and stabilization of polyurethane elastomers[J]. *Progress in Polymer Science*, 2019, 90: 211-268.
- [7] Yamane S, Watanabe R, Ata S, et al. Solvent-induced degradation of polyurethane studied by two-dimensional (2D) infrared (IR) correlation spectroscopy[J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2020, 108: 103062.
- [8] Hussain H K, Liu G W, Yong Y W. Experimental study to investigate mechanical properties of new material polyurethane - cement composite (PUC)[J]. *Construction and Building Materials*, 2014, 50: 200-208.
- [9] Wang Y, Sun Q, Ding H, et al. Investigation of interfacial bonding properties of polyurethane concrete and cement concrete/steel reinforcement[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 2022(1): 5644468.
- [10] Li C, Bai J, Jiang Y, et al. Investigating the seepage control and plugging capabilities of polyurethane-cement composites: A comprehensive study on material properties[J]. *Construction and Building Materials*, 2024, 416: 135191.
- [11] Zhang K, Li D, Qi T, et al. Study on the properties of polyurethane-cement composite (PUC)[J]. *Stavební Obzor - Civil Engineering Journal*, 2021, 30(2): 560-571.
- [12] Lei J, Feng F, Xu S, et al. Study on mechanical properties of modified polyurethane concrete at different temperatures[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(6): 3184.
- [13] Jia Z, Jia D, Sun Q, et al. Preparation and mechanical-fatigue properties of elastic polyurethane concrete composites[J]. *Materials*, 2021, 14(14): 3839.
- [14] Jiang Z, Tang C, Yang J, et al. A lab study to develop polyurethane concrete for bridge deck pavement[J]. *International Journal of Pavement Engineering*, 2022, 23(5): 1404-1412.
- [15] Niu S L, Wang J Y, Wang Z C, et al. Overall feasibility assessment of polyester polyurethane concrete used as steel bridge deck pavement[J]. *Frontiers in Materials*, 2022, 9: 1071316.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T 50082—2024[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2024.
- [17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土物理力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.

**基金项目:** 北华大学博士科研启动基金项目(202301), 2026年吉林省留学人员创新创业资助项目, 北华大学校级大学生创新创业项目。

<sup>1</sup> **第1作者简介:** 章文(1999-), 男, 硕士在读, 研究方向: 聚氨酯混凝土耐腐蚀研究。 E-mail: zhangwendyg@163.com。

**\*通讯作者简介:** 冷冰(1979-), 男, 工学博士, 副教授, 研究方向: 复合材料结构损伤仿真研究。 E-mail: lengbing@beihua.edu.cn。