

硝酸侵蚀喷射混凝土 NO_3^- 扩散研究

王家滨¹, 牛荻涛^{2,3}

(1. 西安工业大学 建筑工程学院, 陕西 西安 710021; 2. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055;
3. 省部共建西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要:以一般大气环境喷射混凝土衬砌长大公路隧道为背景,以汽车尾气中氮氧化物与水的主要产物硝酸为侵蚀介质,开展喷射混凝土硝酸浸泡试验,研究喷射混凝土衬砌结构耐久性能退化规律。采用固液萃取法和电化学分析法,测试侵蚀喷射混凝土 pH 值和 NO_3^- 含量,分析浸泡龄期、硝酸溶液 pH 值、钢纤维和混凝土成型方式等因素对喷射混凝土 pH 值和 NO_3^- 扩散的影响,研究硝酸侵蚀喷射混凝土物理力学性能劣化机理。结果表明,硝酸侵蚀喷射混凝土 pH 值高于模筑混凝土,而 NO_3^- 含量较低,喷射混凝土硝酸侵蚀耐久性优于模筑混凝土。侵蚀溶液 pH 值不大于 2 时,钢纤维喷射混凝土 pH 值和 NO_3^- 含量分别大于和小于普通喷射混凝土。综合分析钢纤维喷射混凝土物理力学性能、pH 值及 NO_3^- 含量,钢纤维对提升低 pH 值硝酸侵蚀喷射混凝土耐久性能具有明显的作用。

关键词:隧道工程;喷射混凝土;硝酸侵蚀;混凝土 pH 值;硝酸根离子扩散

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)01-0075-08

Study on nitrate ion diffusion of lining shotcrete exposed to nitric acid

WANG Jiabin¹, NIU Ditao^{2,3}

(1. School of Civil & Architecture Engineering, Xi'an Tech. Univ., Xi'an 710021, China;
2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
3. National Key Laboratory of Green Building in West China, Xi'an 710055, China)

Abstract: Durability degradation of shotcrete-lining-long-highway-tunnel in general atmospheric environment which is corroded nitrogen dioxide in automobile exhaust was analyzed. Shotcrete was immersed in nitric acid solution with pH of 1.0, 2.0 and 3.0. The pH values and nitrate ion diffusion of concrete specimens which were immersed in nitric acid solution were measured by using solid-liquid extraction method and electrochemical method. In the meantime, the influence factors of pH values and nitrate ion diffusion on shotcrete was discussed in terms of immersion aging, pH value of nitric acid solution, steel fiber and formation way, respectively. Result shows that the pH value of normal shotcrete was higher than that of normal concrete, while nitrate ion content was lower. Therefore, the durability of shotcrete exposed to nitric acid was better than that of normal concrete. As nitric acid solution pH value was less than 2, the pH value and nitrate ion content of steel fiber reinforced shotcrete were higher and lower than those of normal shotcrete, respectively. It was indicated that steel fiber can obviously improve the shotcrete durability exposed to low pH value nitric acid.

Key words: tunnel engineering; shotcrete; nitric acid corrosion; concrete pH value; nitrate ion diffusion

喷射混凝土是在空气压力作用下,通过充气软管或管道,将混凝土或水泥砂石拌合物高速喷射到受喷面且瞬时压密的混凝土^[1]。自 1930 年在英国 Mersey 隧道中作为衬砌混凝土使用以来^[2],随着喷射器械和施工技术的发展,喷射混凝土被广泛应用于隧道、矿井巷道及基坑边坡支护、结构加固维修等领域^[3]。

在隧道运营过程中,特别是一般大气环境长大公路隧道,内部空气流动速度慢,汽车尾气长期积聚,使隧道内含有高浓度的碳氧化物、氮氧化物和较高的温湿度。相比于碳氧化物,氮氧化物与空气中气态水发生反应生成侵蚀性较强的硝酸,在衬砌混凝土表面沉积并向内部渗透,使混凝土产生酸侵蚀,继而造成混凝土剥落,对衬砌

收稿日期: 2017-12-27

修改稿日期: 2019-01-15

基金项目: 国家自然科学基金重大项目支课题(51590914); 陕西省自然科学基金(2018JQ5032); 陕西省教育厅自然科学研究专项(18JK0376); 西安工业大学校长基金(XAGDJJ17019)

第一作者: 王家滨(1986—),男,博士,讲师,主要研究混凝土结构耐久性。E-mail: wangjiabin@xatu.edu.cn

结构耐久性及使用寿命带来较为严重的威胁^[4]。现代隧道设计和施工过程中,喷射混凝土单层永久衬砌因其施工速度快和造价低,越来越受到重视且逐渐在工程中应用^[5]。喷射混凝土由于速凝剂的作用和喷射施工方式的影响,具有极短的终凝时间和高早龄期强度^[6],且水化硬化过程、水化产物及微观结构与普通混凝土具有较大差别^[7]。因此,开展硝酸侵蚀喷射混凝土衬砌耐久性能研究具有重要意义。

近些年来,国内外学者对普通混凝土酸侵蚀结构性能退化进行了研究。雷宏刚^[8]、Glass^[9]等对硝酸侵蚀混凝土及 T 型混凝土梁受弯性能进行了研究,认为硝酸可使混凝土中氢氧化钙和水化硅酸钙溶出,造成混凝土强度降低,梁受弯性能下降。Yuan^[10,11]等建立了考虑化学反应的硫酸侵蚀混凝土力学性能退化的简易模型。Fan^[12]和尹蓉蓉^[13]等对酸雨侵蚀混凝土机理及受侵蚀公路隧道混凝土衬砌结构安全性进行了研究。而针对硝酸侵蚀喷射混凝土耐久性能退化的研究尚未见报道。

基于此,试验分别采用 pH 值为 1、2 和 3 的硝酸溶液,对同配合比模筑混凝土、普通喷射混凝土和钢纤维喷射混凝土开展浸泡试验,以动弹性模量、质量、立方体抗压强度和劈裂抗拉强度等宏观物理力学性能为指标,分析硝酸侵蚀喷射混凝土物理力学性能变化规律。采用固液萃取法和电化学分析法,测试硝酸侵蚀喷射混凝土 pH 值和 NO_3^- 含量,研究 pH 值变化及 NO_3^- 扩散规律及其影响因素,为进一步研究硝酸侵蚀喷射混凝土损伤产生及演化提供理论依据。

1 试验概况

1.1 喷射混凝土试验原材料

试验用原材料均来自宝鸡至兰州高速铁路麦积山隧道施工现场:水泥为宝鸡海螺 42.5 普通硅酸盐水泥,粉煤灰为 II 级粉煤灰,细集料为细度模数 3.4 的渭河粗砂,粗集料 5~10 mm 连续级配卵石。钢纤维为冷压剪切波浪形钢纤维,抗拉强度不小于 600 MPa,等效长径比 25。速凝剂为山西桑穆斯 RC-4A 型粉状速凝剂,初凝时间不大于 5 min,28 d 相对抗压强度比不小于 75%^[14];减水剂为山西凯迪 KDSP-01 早强型聚羧酸高性能减水剂,减水率为 27%。

1.2 喷射混凝土试件制作及配合比

喷射混凝土采用干喷大板法在宝鸡至兰州高速铁路麦积山隧道施工现场按照 GB50086-2015 进行制作,大板尺寸为 1 000 mm × 500 mm × 120 mm。喷射混凝土大板成型 3 h 后拆模,运入隧道中同环境养护至 7 d,而后移出隧道并使用自动岩石切割机按照试验要求将喷射混凝土大板进行切割(400 mm × 100 mm × 100 mm 棱柱体和 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体),然后将其置于标准养护室养护至 28 d,最后将试件自然养护至 90 d。

喷射混凝土试验配合比以衬砌喷射混凝土配合比为基准,同时考虑混凝土成型方式和钢纤维的影响,共分为三组。试验混凝土水胶比为 0.43,砂率 50%,减水剂掺量为胶凝材料用量的 1%,速凝剂为 4%(模筑混凝土无)。试验混凝土配合比示于表 1,抗压强度和劈裂抗拉强度示于表 2。

表 1 试验混凝土配合比

Tab. 1 Mix proportion of experiment concrete

kg · m⁻³

配合比	水泥	瓜子石	河砂	粉煤灰	水	钢纤维	减水剂	速凝剂
C43F10	411	892	892	46	197	/	4.56	/
S43F10	411	892	892	46	197	/	4.56	18.24
S43F10SF50	411	892	892	46	197	50	4.56	18.24

注: C43F10 为模筑混凝土、S43F10 为普通喷射混凝土、S43F10SF50 为钢纤维喷射混凝土。

表 2 混凝土力学性能

Tab. 2 Compressive and splitting tensile strength of concrete specimens

MPa

试件	抗压强度			劈裂抗拉强度		
	1 d	28 d	90 d	1 d	28 d	90 d
C43F10	9.37	40.14	57.34	1.75	3.68	4.52
S43F10	10.21	28.78	41.63	1.43	2.97	4.29
S43F10SF50	13.71	40.19	52.24	1.72	4.36	5.12

1.3 耐久性试验方法

1.3.1 混凝土硝酸浸泡试验

喷射混凝土硝酸侵蚀试验以 pH 值为 1、2 和 3 的硝酸溶液为介质开展浸泡试验, 每浸泡 30 d 为 1 个试验龄期, 试验共进行 6 个龄期. 试验开始前, 首先将混凝土试件置于鼓风干燥箱中 60 °C 烘干 24 h, 待试件晾至室温后, 将用于离子含量测试的试件采用环氧树脂进行密封, 仅保留一个面作为侵蚀面. 然后, 将所有的试件放入蒸馏水中浸泡 4 d. 最后, 将试件移入相应 pH 值的硝酸溶液中开始浸泡试验. 试验期间, 每 12 h 采用 pH 计测量浸泡溶液 pH 值, 并采用分析纯硝酸调节浸泡溶液 pH, 使其 pH 值分别稳定在 1 ± 0.1 、 2 ± 0.1 和 3 ± 0.2 之间. 浸泡溶液每 7 d 更换一次, 防止溶液中 NO_3^- 富集引起试验结果偏差.

待到达相应的试验龄期时, 测试试件的物理性能(动弹性模量、质量)和力学性能(立方体抗压强度、劈裂抗拉强度). 其中, 动弹性模量采用超声波(NM-4B 非金属超声波检测仪, 北京康科瑞)对测法进行测试, 并按式(1)计算相对动弹性模量.

$$E = \frac{E_{rd,n}}{E_{rd,0}} \times 100\% = \frac{t_0^2}{t_n^2} \times 100\% \quad (1)$$

式中: E 为相对动弹性模量; $E_{rd,n}$ 为第 n 试验龄期混凝土动弹性模量, MPa; $E_{rd,0}$ 为混凝土初始动弹性模量, MPa; t_n 为第 n 试验龄期混凝土超声波对测声时, μs ; t_0 为混凝土初始超声波对测声时, μs .

1.3.2 混凝土 pH 值和 NO_3^- 含量

混凝土 pH 值和 NO_3^- 含量测试采用 100 mm \times 100 mm \times 100 mm 的立方体试件, 每种离子测试各使用 3 个试件. 待至试验龄期时, 采用单边磨粉法沿试件一维方向进行分层取粉, 其中距试件表面 1~10 mm 每 1 mm 取 1 层; 距表面 11~20 mm 每 2 mm 取 1 层. 而后, 采用固液萃取法(混凝土粉末和蒸馏水按质量比为 1:20)和电化学分析法, 分别测试硝酸侵蚀混凝土 pH 值(C2100 Pro 实验室 pH 计, 美国奥豪斯)和 NO_3^- 摩尔浓度(PXSJ-216F 型离子计, 上海仪电科学仪器). 而后, 按照式(2)计算混凝土中 NO_3^- 含量.

$$W_{\text{NO}_3^-} = \left(\frac{M_{\text{NO}_3^-} \times 10^{-\text{pNO}_3^-} \times V}{G} \right) \times 100\% \quad (2)$$

式中: $W_{\text{NO}_3^-}$ 为混凝土中水溶性 NO_3^- 占混凝土粉末质量百分比, 精确至 0.001%; $M_{\text{NO}_3^-}$ 为 NO_3^- 摩尔质量, 取 62.01 g/mol; G 为所用的混凝土粉末质量, g, 试验取 10.000 0 g; V 为浸泡混凝土粉

末所用蒸馏水体积, L, 本试验取 0.2 L.

2 试验结果与讨论

2.1 硝酸侵蚀混凝土物理力学性能变化

硝酸侵蚀混凝土的物理(动弹性模量、质量)力学性能(抗压强度、劈裂抗拉强度)示于图 1.

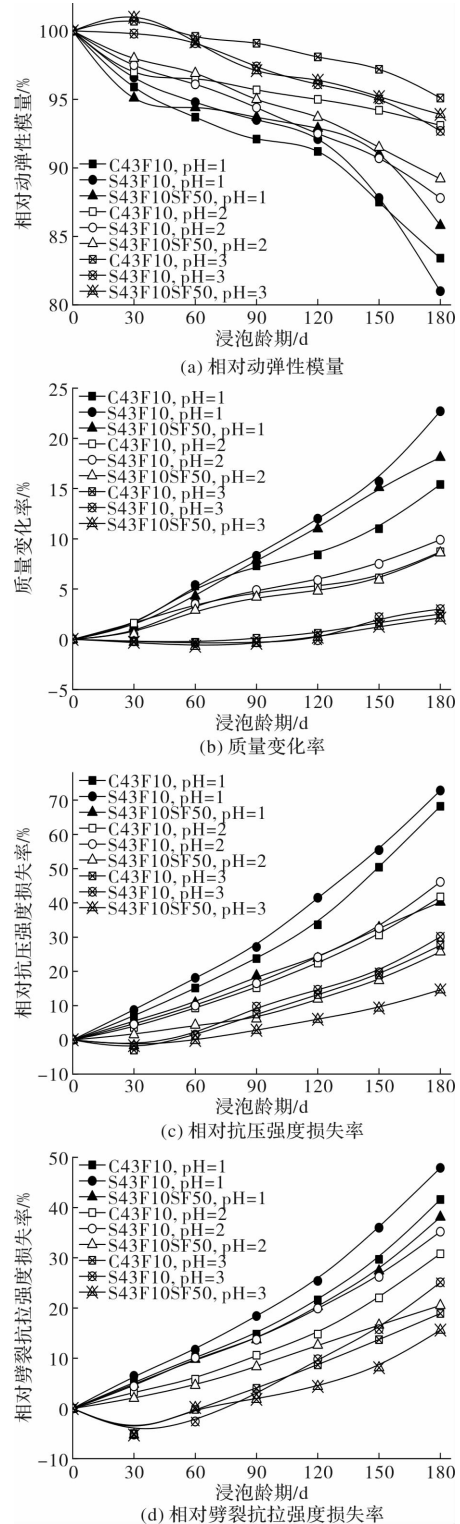


图1 硝酸侵蚀混凝土物理力学性能

Fig. 1 Physical and mechanical properties of concrete exposed to nitric acid

2.1.1 物理性能变化

从图 1(a)和图 1(b)可看出,混凝土物理性能随着浸泡龄期增大和侵蚀溶液 pH 值减小而降低. 侵蚀溶液 pH 值不大于 2 时,混凝土相对动弹性模量及质量损失率由大到小为 S43F10 → S43F10SF50 → C43F10. 当硝酸溶液 pH 值大于 2 时,相对动弹性模量及质量损失率由大到小为 S43F10 → C43F10 → S43F10SF50. 另外,在硝酸溶液 pH 值为 3 时,出现了相对动弹性模量和质量的微增,这是由于生成的侵蚀产物在混凝土表层毛细孔中堆积,使试件密实度提升造成的.

2.1.2 力学性能变化

从图 1(c)和图 1(d)可看出,混凝土抗压强度及劈裂抗拉强度损失率随侵蚀溶液 pH 值的降低而快速增大. 在同浸泡龄期、同浸泡溶液 pH 值情况下, S43F10SF50 相对抗压强度及劈裂强度高且损失率最小, S43F10 强度偏低. 当溶液 pH 值为 3 时,试件相对力学性能出现了一个上升段,这与物理性能微升的原因一致.

2.1.3 试验结果分析

从受侵蚀混凝土的物理力学性能变化分析可知, S43F10 性能下降速度最快, C43F10 和 S43F10SF50 性能变化与侵蚀溶液 pH 值有直接关系. 这是由于喷射混凝土特殊的成型方式和快速水硬化造成其孔隙率及渗透性较高,硝酸向试件内部扩散速度和化学反应速度快造成的. 钢纤维可有效减少因喷射混凝土早期化学收缩和干缩而形成的微裂缝数量,使喷射混凝土密实度增大,抗硝酸侵蚀性能提升.

2.2 硝酸侵蚀混凝土 pH 值

硝酸侵蚀混凝土 pH 值变化曲线示于图 2. 从图 2 可看出,混凝土 pH 值与浸泡龄期、硝酸溶液 pH 值、钢纤维及混凝土成型方式有关.

2.2.1 浸泡龄期影响

随着浸泡龄期增加,混凝土表层 pH 值快速降低. 但随着距试件表面深度增大, pH 值逐渐增大并处于稳定. 侵蚀初期,混凝土表层水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及水化硅酸钙 C-S-H 与溶液中 H^+ 发生反应,形成可溶性钙盐及 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$. 由于孔溶液碱度下降, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 分解释放 OH^- 以维持 pH 稳定.

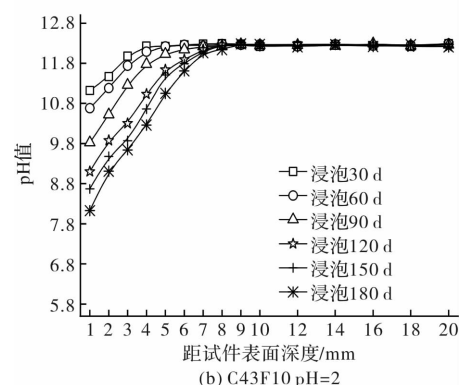
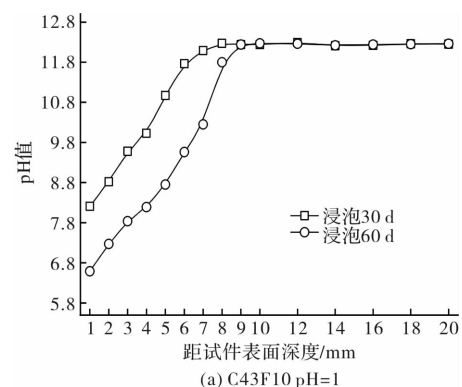
但随着浸泡时间增大,试件表面碱性水化产物逐渐被消耗,水泥浆体及骨料剥蚀,毛细连通

孔增多, H^+ 扩散速度加快,使混凝土内部 pH 值逐渐降低. 随着距试件表面深度增加, H^+ 扩散阻力增大,化学反应减慢直至停止. 因此,在变化曲线中存在 pH 值增长段和稳定段两部分. 在增长段,混凝土 pH 值变化剧烈,但总体逐渐增大;在稳定段,试件 pH 值保持上下浮动在 0.03 之间,这是由于测试电极电流微弱的变动造成的.

2.2.2 硝酸溶液 pH 值影响

从图 2(d)~图 2(f)可看出,混凝土 pH 值随着硝酸溶液 pH 值增大而增大,但变化规律又有所不同. 硝酸溶液 pH 为 1 时,混凝土 pH 值变化分为三个阶段:缓慢增长段、快速增长段和稳定段. 而硝酸溶液 pH 值大于 2 时,试件孔溶液 pH 值变化则分为两个阶段:快速增长段和稳定段.

硝酸溶液 pH 值每降低 1,溶液中 H^+ 摩尔浓度增大 10 倍. 硝酸溶液 pH 值较低时,混凝土与 H^+ 发生剧烈的中和反应和分解反应,表层水化产物与粗骨料快速被溶蚀分解,形成海绵状酥松产物层,并吸附大量 H^+ ,因此在曲线中出现 pH 值小于 7 的缓慢增长段(浸泡龄期 90 d). 随着距试件表面深度增大,化学反应速度减慢,混凝土 pH 值快速增大,并进入稳定段. 当硝酸溶液 pH 为 3 时,溶液中 H^+ 摩尔浓度低(仅为 0.001 mol/L),侵蚀反应慢,混凝土 pH 值增长段为 9 mm,小于 pH 为 2 的 10 mm 和 pH 为 1 的 12 mm.



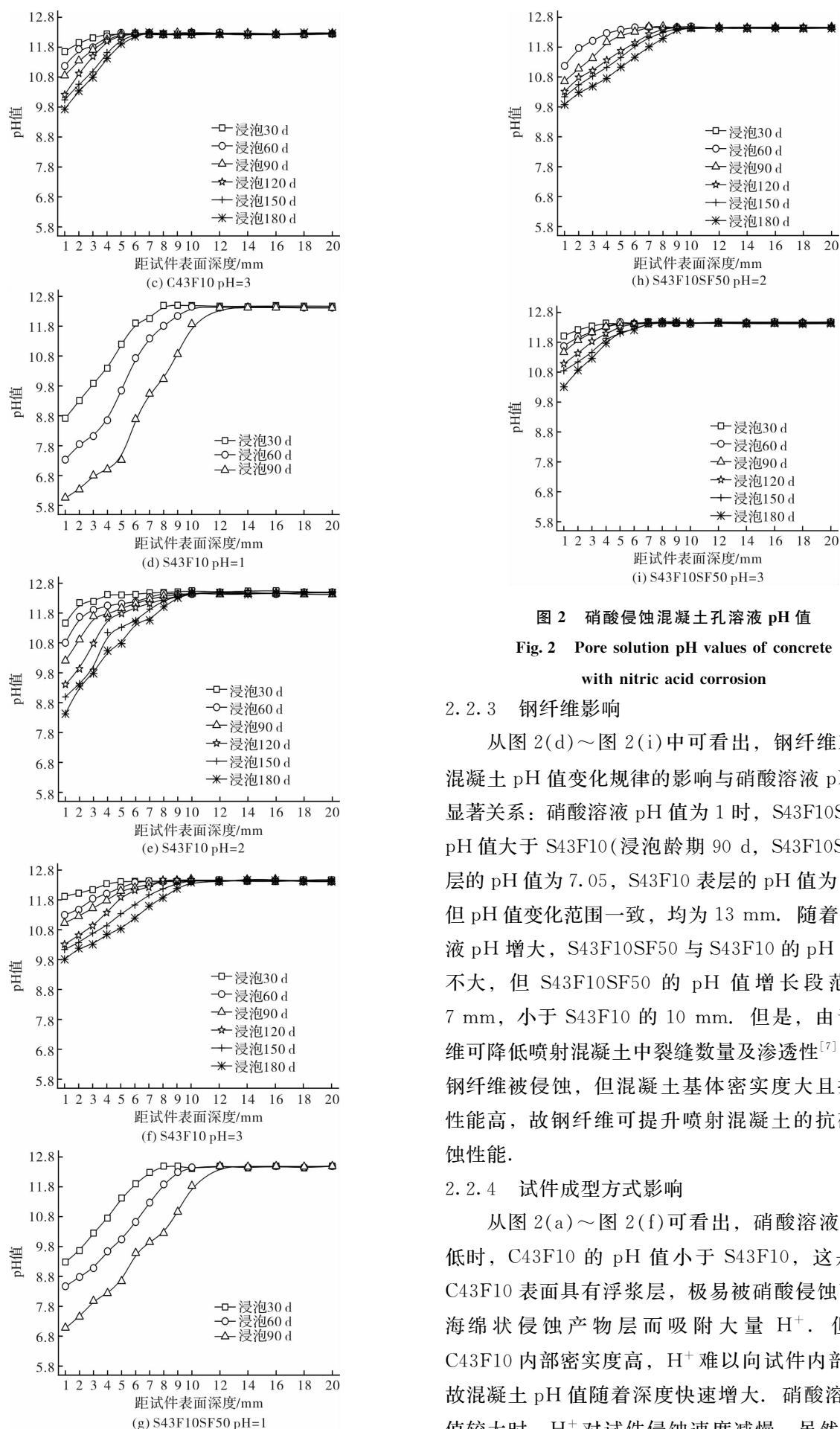


图 2 硝酸侵蚀混凝土孔溶液 pH 值

Fig. 2 Pore solution pH values of concrete with nitric acid corrosion

2.2.3 钢纤维影响

从图 2(d)~图 2(i)中可看出, 钢纤维对喷射混凝土 pH 值变化规律的影响与硝酸溶液 pH 值有显著关系: 硝酸溶液 pH 值为 1 时, S43F10SF50 的 pH 值大于 S43F10(浸泡龄期 90 d, S43F10SF50 表层的 pH 值为 7.05, S43F10 表层的 pH 值为 6.06), 但 pH 值变化范围一致, 均为 13 mm. 随着侵蚀溶液 pH 增大, S43F10SF50 与 S43F10 的 pH 值差异不大, 但 S43F10SF50 的 pH 值增长段范围为 7 mm, 小于 S43F10 的 10 mm. 但是, 由于钢纤维可降低喷射混凝土中裂缝数量及渗透性^[7]. 虽然钢纤维被侵蚀, 但混凝土基体密实度大且抗侵蚀性能高, 故钢纤维可提升喷射混凝土的抗硝酸侵蚀性能.

2.2.4 试件成型方式影响

从图 2(a)~图 2(f)可看出, 硝酸溶液 pH 较低时, C43F10 的 pH 值小于 S43F10, 这是因为 C43F10 表面具有浮浆层, 极易被硝酸侵蚀而形成海绵状侵蚀产物层而吸附大量 H^+ . 但由于 C43F10 内部密实度高, H^+ 难以向试件内部扩散, 故混凝土 pH 值随着深度快速增大. 硝酸溶液 pH 值较大时, H^+ 对试件侵蚀速度减慢. 虽然 pH 值

略小于喷射混凝土, 但 pH 值增长段范围远小于 S43F10 的 10 mm. 说明喷射混凝土的特殊孔结构造成其渗透性较大, 抗离子迁移性能较差.

2.3 硝酸侵蚀混凝土 NO_3^- 含量

硝酸侵蚀混凝土 NO_3^- 含量分布曲线示于图 3. 从图中可看出, 混凝土 NO_3^- 含量变化规律与 pH 值一致, 与浸泡龄期、硝酸溶液 pH 值、钢纤维以及混凝土成型方式有关.

2.3.1 浸泡龄期影响

随着浸泡龄期增加, NO_3^- 含量逐渐增大, 且增幅随着浸泡龄期的增大而增大. 但随着距试件表面深度增大, NO_3^- 含量先增大后减小, NO_3^- 含量峰值逐渐向试件内部迁移, 且峰值后离子含量迅速降低, 继而趋于稳定. 侵蚀初期, 混凝土表面侵蚀较弱且 pH 值高, NO_3^- 扩散阻力较大. 故浸泡龄期小于 60 d 时, 试件内部 NO_3^- 含量较低. 随着侵蚀进行, 试件表面浆体被剥蚀, 孔隙率增大, NO_3^- 快速向试件内部扩散.

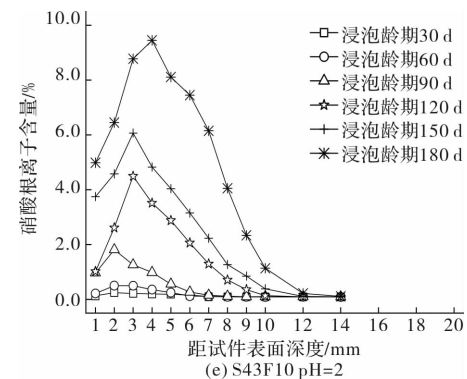
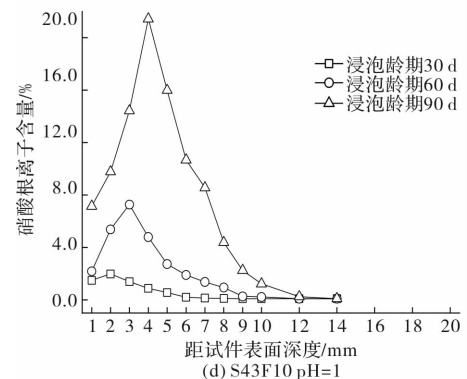
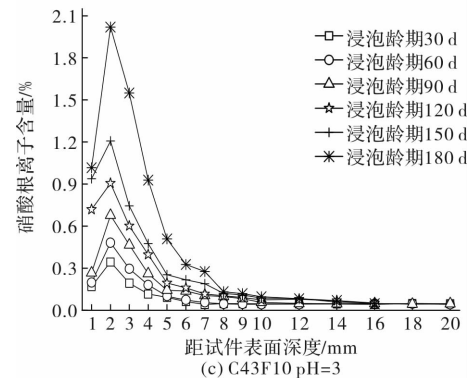
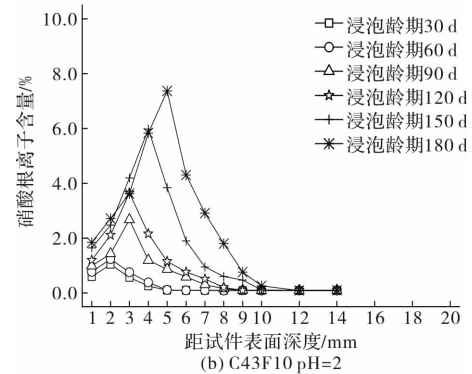
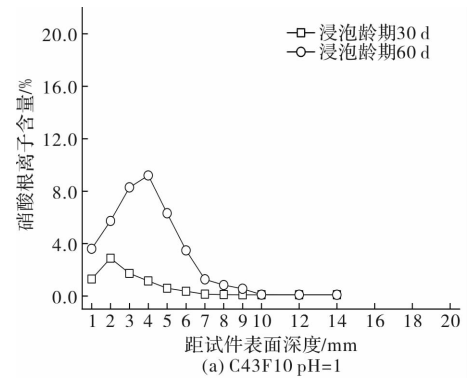
由于 H^+ 在毛细孔溶液中的扩散速度较快, 在侵蚀前区与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及 C-S-H 反应, 使侵蚀前区 Ca^{2+} 含量增大, 为保持侵蚀区电中性, NO_3^- 向混凝土内扩散, 故在前后区界面处发生聚集. 因此, NO_3^- 含量曲线出现了峰值, 且峰值前 NO_3^- 含量逐渐增大, 峰值后 NO_3^- 快速降低. 另外, NO_3^- 含量曲线中深度在 1 mm 处的实验数据较小, 是因为混凝土表面砂浆剥落造成的.

2.3.2 浸泡溶液 pH 值影响

从图 3(d)~图 3(f)可看出, 随着硝酸溶液 pH 值增大, NO_3^- 含量降低, 龄期之间混凝土 NO_3^- 含量差值减小. 溶液 pH 值增大, NO_3^- 浓度同步降低, 其在混凝土表面浓度梯度减小造成 NO_3^- 扩散减缓. 另外, 高 pH 的硝酸溶液对喷射混凝土侵蚀程度快速减弱, NO_3^- 扩散阻力大. NO_3^- 扩散深度从 14 mm (pH=1) 降至 10 mm (pH=3). 因此, 高 pH 值硝酸溶液侵蚀喷射混凝土 NO_3^- 含量低.

2.3.3 钢纤维影响

从图 3(d)~图 3(i)中可看出, 与 S43F10 相比, S43F10SF50 中 NO_3^- 含量低于 S43F10. 当硝酸溶液 pH 值不大于 2 时, S43F10SF50 的 NO_3^- 含量峰值距试件表面深度大于 S43F10; 当硝酸溶液 pH 值为 3 时, S43F10SF50 的 NO_3^- 含量峰值位置与 S43F10 相同. 这是因为钢纤维酸侵蚀活性高于混凝土基体, 被侵蚀后形成孔道加速 NO_3^- 扩



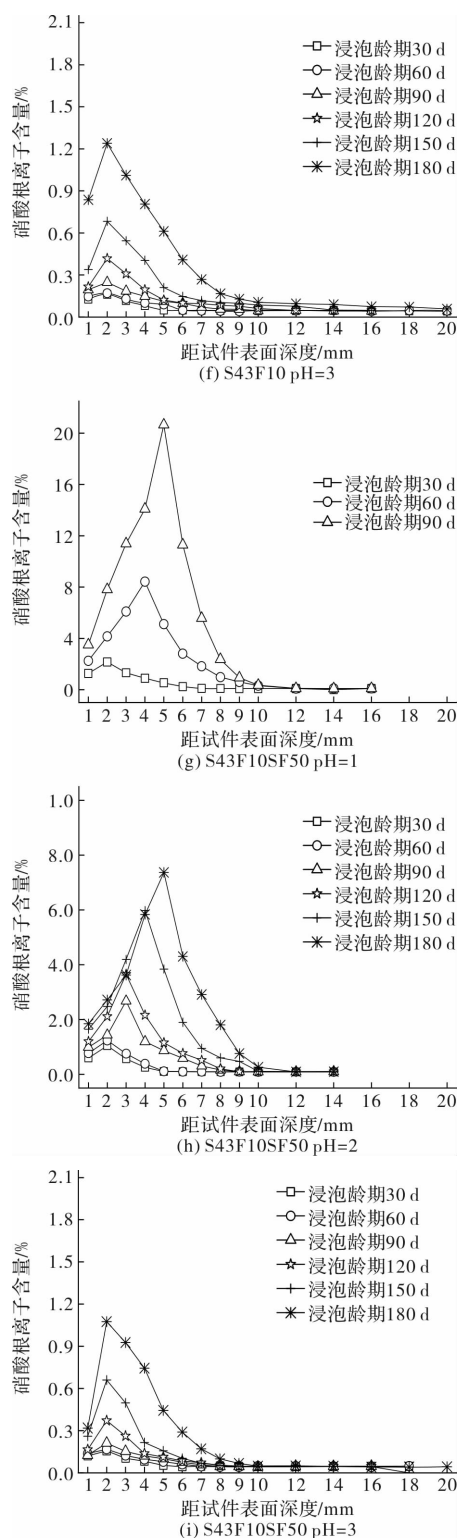
图3 硝酸侵蚀混凝土孔溶液 NO_3^- 含量分布曲线

Fig. 3 Nitrate ion distribution in pore solution of concrete with nitric acid

散, 故 S43F10SF50 在低 pH 溶液侵蚀后 NO_3^- 峰值位置较深. 但是, S43F10SF50 的混凝土基体密实度高, NO_3^- 在混凝土中扩散较慢. 因此, S43F10SF50 的 NO_3^- 峰值位置较深但 NO_3^- 峰值含量低. 综合分析, 钢纤维可提升喷射混凝土抗硝酸侵蚀性能.

2.3.4 试件成型方式影响

从图 3(a)~图 3(f) 中可看出, C43F10 中 NO_3^- 含量大于 S43F10. 同浸泡龄期, NO_3^- 含量峰值距试件表面深度较 S43F10 大, 峰值前离子含量快速增大, 峰值后离子含量快速下降. 其主要原因是 C43F10 表面浮浆层及内部密实度较高所致.

3 结论

采用固液萃取法和电化学分析法, 测定硝酸侵蚀混凝土的 pH 值和 NO_3^- 含量, 分析 pH 值变化和 NO_3^- 扩散的规律及影响因素, 研究喷射混凝土耐久性退化过程和机理. 得出以下结论:

(1) 混凝土相对动弹性模量随着硝酸浸泡龄期增大而减小, 质量损失率、抗压强度和劈裂抗拉强度损失率随着浸泡龄期增大而增大. 普通喷射混凝土物理力学性能下降最快, 钢纤维喷射混凝土和模筑混凝土性能下降与浸泡溶液 pH 值有关.

(2) 硝酸侵蚀混凝土 pH 值降低, 而 NO_3^- 含量快速增大. 模筑混凝土孔溶液 pH 值和 NO_3^- 含量分别小于和大于普通喷射混凝土. 当侵蚀溶液 pH 值不大于 2 时, 钢纤维喷射混凝土孔溶液 pH 值和 NO_3^- 含量分别大于和小于普通喷射混凝土, 但变化范围略大于普通喷射混凝土. 当硝酸溶液 pH 值大于 2, 钢纤维喷射混凝土二者数值与普通喷射混凝土相差不明显.

(3) 综合分析硝酸侵蚀混凝土物理力学性能退化规律、pH 值及 NO_3^- 含量, 钢纤维可显著提升 pH 硝酸溶液侵蚀喷射混凝土的耐久性能.

参考文献 References

- [1] THOMAS A. Sprayed concrete lined tunnel[M]. New York: Taylor & Francis, 2012.
- [2] GARY B. Hemphill. Practical tunnel construction [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- [3] LEUNG C K Y, LAI R, LEE A Y F. Properties of wet-mixed fiber reinforced shotcrete and fiber reinforced concrete with similar composition [J]. Cement and Concrete Research, 2005, 35:788-795.
- [4] 《中国公路学报》编辑部. 中国隧道工程学术研究综述·2015[J]. 中国公路学报, 2015, 28(5):1-65. Editorial department of China journal of highway and transport. Review on China's tunnel engineering research: 2015 [J]. China Journal of Highway and Transport, 2015, 28(5):1-65.
- [5] TOMAS F, GARSHOL K F, TOMISAWA N.

- Sprayed concrete for final lining: ITA working group report [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2001, 16: 295-309.
- [6] 王家滨, 牛荻涛, 张永利. 喷射混凝土力学性能、渗透性及耐久性试验研究[J]. 土木工程学报, 2016, 49(5): 96-109.
- WANG Jiabin, NIU Ditao, ZHANG Yongli. Investigation of mechanical, permeability and durability performance of shotcrete with and without steel fiber[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(5): 96-109.
- [7] WANG Jiabin, NIU Ditao, DING Sha, et al. Micro-structure, permeability and mechanical properties of accelerated shotcrete at different curing age[J]. Construction & Building Materials, 2015, 78: 203-216.
- [8] 雷宏刚, 吴涛, 吕建国. 在硝酸盐作用下混凝土结构的腐蚀与防护[J]. 建筑结构, 2007, 37(S1): 8-11.
- LEI Honggang, WU Tao, LÜ Jianguo. Preservation and protection of concrete corroded by nitrate[J]. Construction Structure, 2007, 37(S1): 8-11.
- [9] GLASS G K, BUENFELD N R. Differential acid neutralization analysis[J]. Cement & Concrete Research, 1999, 29(10): 1681-1684.
- [10] YUAN H, DANGLA P, CHATELLIER P, et al. Degradation modeling of concrete submitted to biogenic acid attack [J]. Cement & Concrete Research, 2015, 70(2): 29-38.
- [11] YUAN H, DANGLA P, CHATELLIER P, et al. Degradation modelling of concrete submitted to sulfuric acid attack [J]. Cement & Concrete Research, 2013, 53(2): 267-277.
- [12] FAN Y F, HU Z Q, ZHANG Y Z, et al. Deterioration of compressive property of concrete under simulated acid rain environment[J]. Construction & Building Materials, 2010, 24(10): 1975-1983.
- [13] 尹蓉蓉, 朱合华. 酸侵蚀对公路隧道安全性影响的模拟计算[J]. 扬州大学学报(自然科学版), 2011, 14(3): 70-73.
- YIN Rongrong, ZHU Hehua. Safety influenced by acid medium to deep highway tunnel[J]. Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition), 2011, 14(3): 70-73.
- [14] 中国国家标准化管理委员会. 喷射混凝土用速凝剂: GB/T 35159-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- Standardization administration of the PRC. Flash setting admixtures for shotcrete: GB/T 35159-2017[S]. Beijing: China Standard Press, 2017.

(编辑 桂智刚)

(上接第 66 页)

- [4] 赵国藩. 结构可靠度理论 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.
- ZHAO Guofan. Structural reliability theory[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2000.
- [5] HASOFER A M. Exact and invariant second-moment code format [J]. Journal of Engineering Mechanics Division, 1974, 100(111-21).
- [6] BUCHER C G, BOURGUND U. A fast and efficient response surface approach for structural reliability problems [J]. Structural Safety, 1990, 7(1): 57-66.
- [7] IMAN R L, CONOVER W J. A distribution-free approach to inducing rank correlation among input variables [J]. Communications in Statistics-Simulation and Computation, 1982, 11(3): 311-34.
- [8] CARDOSO J B, DE ALMEIDA J R, DIAS J M, et al. Structural reliability analysis using Monte Carlo simulation and neural networks[J]. Advances in Engineering Software, 2008, 39(6): 505-513.
- [9] MADSEN H O, HANSEN P F. A Comparison of some algorithms for reliability based structural optimization and sensitivity analysis [M]. 2015.
- [10] HURTADO J E, ALVAREZ D A. Neural-network-based reliability analysis: a comparative study [J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2001, 191(1): 113-32.
- [11] HORNIK K, STINCHCOMBE M, WHITE H. Multilayer feedforward networks are universal approximators [J]. Neural Networks, 1989, 2(5): 359-66.
- [12] BRANDES K. Life-Cycle-Cost Analysis and Design of Civil Infrastructure Systems [J]. Stahlbau, 2015, 72(7): 534-.
- [13] 杨杰, 张崎, 黄一. 结构可靠性灵敏度因子的一种新指标 [J]. 工程力学, 2013, 30(6): 16-21.
- YANG Jie, ZHANG Qi, HUANG I. A new index of structural reliability sensitivity factor [J]. Engineering Mechanics, 2013, 30(6): 16-21.
- [14] LI J, LI A, FENG M Q. Sensitivity and reliability analysis of a self-anchored suspension bridge [J]. Journal of Bridge Engineering, 2013, 18(8): 703-11.
- [15] SAMAREH, JAMSHID A. Survey of shape parameterization techniques for high-fidelity multidisciplinary shape optimization[J]. AIAA Journal, 2001, 39(5): 877-884.

(编辑 桂智刚)