

牛建刚, 刘威亨. 酸雨侵蚀混凝土研究进展[J]. 灾害学, 2020, 35(4): 147–150, 168. [NIU Jiangang and LIU Weiheng. Research Progress on Acid Rain Erosion of Concrete[J]. Journal of Catastrophology, 2020, 35(4): 147–150, 168. doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.027.]

# 酸雨侵蚀混凝土研究进展\*

牛建刚, 刘威亨

(内蒙古科技大学, 内蒙古 包头 014010)

**摘要:** 随着世界各国工业化进程不断加快, 酸性物质大量排放到大气中, 酸雨区逐渐扩大, 酸雨酸性也逐渐增强。此外, 酸雨对混凝土结构产生较大的危害, 处于酸雨区的混凝土结构耐久性大幅下降。该文分别综述了不同酸性侵蚀介质、不同 pH 值溶液、不同混凝土水胶比和不同矿物掺合料、酸雨与多因素耦合对混凝土的影响以及混凝土预防酸雨的措施, 并对进一步的研究提出建议。

**关键词:** 侵蚀性介质; 溶液 pH 值; 水胶比; 矿物掺合料; 混凝土

**中图分类号:** TU528; X4; X915.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2020)04-0147-05  
doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2020.04.027

通常酸雨包含氢离子、硫酸根离子和硝酸根离子等多种侵蚀离子且其 pH 值小于 5.6<sup>[1]</sup>。酸性物质的来源一方面如火山爆发、森林火灾和闪电等天然排放, 另一方面是人类大量燃烧煤<sup>[2]</sup>、石油<sup>[3]</sup>等化石燃料。我国酸雨大部分属于硫酸型, 主要分布在长江以南<sup>[3-4]</sup>的地区。进入工业革命后, 工作效率提升显著, 同时建立了大量钢厂、硫酸厂等工厂<sup>[5-6]</sup>, 不可避免的产生了大量酸性气体, 导致环境污染问题严重。

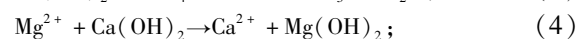
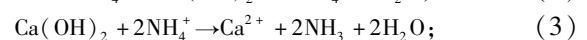
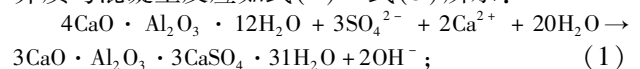
混凝土由于其在力学性能、材料来源和工程造价等方面的优势, 广泛应用于工业和民用建筑中。但对处于酸雨区的混凝土结构, 受到酸雨的侵蚀其耐久性会降低。学者大量研究了酸雨对混凝土的腐蚀机理, 越来越多的防腐蚀性设计应用到实际工程中。本文综述了各种因素对酸雨侵蚀混凝土的影响以及预防酸雨的措施, 以期为进一步研究酸雨对混凝土的耐久性提供参考。

## 1 酸雨对混凝土腐蚀的现象及机理

### 1.1 不同酸性侵蚀介质对混凝土的影响

我国大部分酸雨区都是硫酸型酸雨, 侵蚀性介质主要是  $H^+$  和  $SO_4^{2-}$ , 其中在酸雨和混凝土的反应中,  $H^+$  主要起溶蚀作用,  $SO_4^{2-}$  主要起膨胀作用<sup>[7-8]</sup>。梁咏宁等人<sup>[9]</sup>分别研究了侵蚀介质为  $H^+$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  对混凝土的影响, 发现在腐蚀后期硫酸钠溶液比硫酸镁溶液侵蚀作用更强。陈梦成等人<sup>[10]</sup>研究了酸雨侵蚀介质为  $H^+$  和  $SO_4^{2-}$  对水泥浆的影响, 发现在酸雨作用下水泥浆表面、

内部损伤程度和速率与酸雨侵蚀介质浓度以及产生的侵蚀产物有关。张扬等人<sup>[11]</sup>研究了酸雨侵蚀介质为  $SO_4^{2-}$  对混凝土抗压强度的影响, 发现酸雨环境下混凝土立方体抗压强度随  $SO_4^{2-}$  浓度增大而下降且  $SO_4^{2-}$  浓度相比于溶液 pH 值、混凝土水胶比和粉煤灰掺量对抗压强度影响最大。肖佳等人<sup>[12]</sup>研究了酸雨侵蚀介质为  $H^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $Ca^{2+}$ 、 $SO_4^{2-}$  对粉煤灰砂浆的影响, 溶液 pH 值为 1.1, 发现经酸液侵蚀后试件表面粗糙并伴有剥落现象, 当粉煤灰掺量为胶凝材料的 25%~35% 时, 随着试件粉煤灰掺量增多或粉煤灰比表面积增大, 抵抗强度下降系数下降加快且  $SO_4^{2-}$  与水泥水化产物作用最终生成石膏。林明强等人<sup>[13]</sup>研究了硫酸溶液对钢筋混凝土梁斜截面受剪性能, 发现硫酸腐蚀混凝土梁后对其受剪破坏影响不显著, 但对试验梁受剪破坏临界状态和受剪承载力影响较大, 尤其是降低混凝土和钢筋的黏结力。郑山锁等人<sup>[14, 15]</sup>研究了酸雨环境下钢筋混凝土框架结构的抗震性能, 发现在  $H^+$  和  $SO_4^{2-}$  离子的共同侵蚀作用下, RC 框架梁混凝土表面出现蚀洞且在侵蚀前期, RC 框架梁的承载力、刚度、延性和耗能能力略有增加而随着酸雨侵蚀程度加深, 试件的强度、刚度、延性和耗能能力均降低<sup>[16]</sup>。不同酸雨侵蚀介质与混凝土反应如式(1)~式(5)所示:

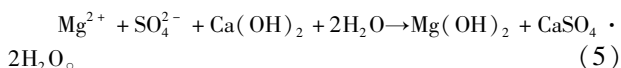


\* 收稿日期: 2020-02-20

修回日期: 2020-05-28

基金项目: 国家自然科学基金(50908112); 内蒙古科技大学青年骨干基金(2014QNGG03)

第一作者简介: 牛建刚(1976-), 男, 山西太原人, 博士, 教授, 主要从事混凝土耐久性研究. E-mail: niujiangang@imust.edu.cn

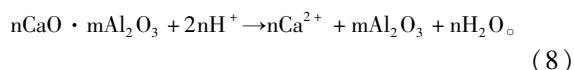
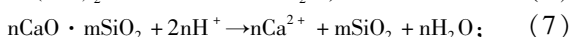
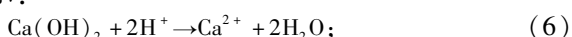


我国酸雨以硫酸型为主,但随着人们生活水平提高,汽车出行更加普遍,我国酸雨类型也逐渐由硫酸型酸雨转变为硫酸与硝酸混合型酸雨,而一些发达国家则是以硝酸型为主,针对这一现象,学者进行了大量的研究:张倩等人<sup>[17]</sup>研究了酸雨侵蚀介质为  $\text{H}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  对混凝土的影响,发现水泥凝胶材料反应生成的主要水化产物氢氧化钙和托贝莫来石等与酸雨之间发生的化学反应使水泥固体水化产物变为液体成分流失。胡晓波<sup>[18]</sup>研究了侵蚀介质为  $\text{H}^+$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  和  $\text{NO}_3^-$  对混凝土的影响, $\text{SO}_4^{2-}$  浓度为 168 ~ 192 mg/L、 $\text{NO}_3^-$  浓度为 20 ~ 24 mg/L,溶液 pH 值为 3.4,发现在使用寿命期内,酸雨对混凝土的力学性能影响较小但会显著改变混凝土的表面。张力伟等人<sup>[19]</sup>使用声发射研究了硫酸和硝酸混合侵蚀混凝土对其损伤的影响,发现受腐蚀混凝土的初始损伤值较大且加载过程中损伤发展较快。王家滨等人<sup>[20]</sup>研究了硝酸对混凝土的侵蚀作用,发现  $\text{H}^+$  在侵蚀前期的速率快于侵蚀后期的速率, $\text{NO}_3^-$  随侵蚀时间增加侵蚀速率不断加快。

酸性侵蚀介质对混凝土性能劣化的影响较显著,但各种侵蚀介质混合与混凝土发生化学反应,其生成物仍需通过试验进一步研究。

## 1.2 不同溶液 pH 值对混凝土的影响

不同地区大气的酸性来源不同,酸性物质对大气污染程度也不同,因此酸雨的酸性也不同。刘惠玲等人<sup>[7]</sup>研究了溶液 pH 值为 1.0、2.0、3.5 和 5.6 对混凝土的影响,发现曝晒于酸雨酸度高的混凝土更容易被侵蚀。张倩等人<sup>[17]</sup>研究了溶液 pH 值为 1.0、3.0、5.6 对混凝土的影响,发现酸性较强的酸雨使混凝土破坏速度加快。Du 等人<sup>[21]</sup>研究了酸雨对水泥浆体的影响,发现酸雨 pH 值和硫酸根离子的存在对钙的浸出浓度和浸出率有较大影响。郑山锁等人<sup>[22]</sup>研究了溶液 pH 值为 1.0、3.0 和 4.5 对混凝土的影响,发现随着 pH 值减小,混凝土峰值应力呈线性降低,而峰值应变相应增加。张英姿等人<sup>[23-26]</sup>研究了溶液 pH 值为 1.5、2.5 和 3.5 对混凝土的影响,发现混凝土轴心抗压强度和相对弹性模量随腐蚀时间的延长先增加后逐渐减小且腐蚀初期损伤指标波动较大,而后随着侵蚀时间增加损伤指标增大。张扬等人<sup>[11]</sup>研究了溶液 pH 值为 3.0、4.0 和 5.0 对混凝土的影响,发现在侵蚀初期 pH 值对其抗压强度的影响最显著且溶液 pH 值越小,混凝土抗压强度下降得越快。周昌林等人<sup>[27]</sup>研究了溶液 pH 值为 1.5、2.5 和 3.5 对混凝土断裂性能的影响,发现随着腐蚀时间增加,混凝土试件的开裂荷载与峰值荷载先增加后减小且溶液 pH 值越低,断裂韧度增长周期越短,最终的损失越大。 $\text{H}^+$  和混凝土反应如式(6)~式(8)所示:



溶液 pH 值对腐蚀初期的影响最显著,溶液 pH 值越低,酸性越强,对混凝土的侵蚀作用越强,混凝土劣化的速度越快。

## 1.3 酸雨对不同水胶比混凝土的影响

水泥强度和水胶比是影响混凝土强度的决定性因素,水胶比太大或太小都会在混凝土内部留下大量孔洞,使其强度降低。此外,混凝土的孔洞使酸雨更容易侵蚀到混凝土的内部,加快混凝土劣化的速度。于忠等人<sup>[28]</sup>研究了  $\text{SO}_2$  气体对混凝土的影响,水灰比为 0.48、0.59 和 0.75,发现  $\text{SO}_2$  气体对混凝土的外观、抗压强度和中性化深度都产生影响,低水灰比和表面有涂料可降低混凝土被侵蚀的速度。牛建刚等人<sup>[29]</sup>研究了  $\text{SO}_2$  气体对混凝土的影响,水胶比为 0.36、0.45 和 0.55,发现混凝土水胶比越大,混凝土质量变化越明显且混凝土硫化深度越深。刘海涛等人<sup>[30-31]</sup>研究了酸雨环境下水灰比对砂浆性能的影响,水灰比为 0.40、0.45、0.50、0.55 和 0.60,发现合理的水灰比范围是 0.45 ~ 0.50,此时开口孔隙率在 6.5% ~ 7% 范围内,砂浆的质量溶蚀量最低且砂浆抗酸雨性能最强。姜健等人<sup>[32]</sup>研究了酸雨侵蚀混凝土的损伤机理,水胶比为 0.3 和 0.5,发现酸雨对两种水胶比配制而成的混凝土腐蚀机理一致,水胶比越小,混凝土抗酸雨侵蚀的能力越强。张扬等人<sup>[11]</sup>研究了酸雨环境对混凝土立方体抗压强度的影响,水胶比为 0.35、0.45 和 0.55,发现水胶比对酸雨腐蚀混凝土抗压强度的影响较大。

水胶比对酸雨侵蚀混凝土强度的影响较大但水胶比不改变酸雨对混凝土的腐蚀机理,通常最终破坏是由于质量损失率先达到 5% 而不是强度损失率达到 75%<sup>[32]</sup>。

## 1.4 酸雨对不同矿物掺合料混凝土的影响

掺入矿物掺合料一方面可以改善混凝土的工作性,另一方面使粉体材料更密实<sup>[33]</sup>。

对于在水泥中单掺矿物掺合料,张扬等人<sup>[11]</sup>研究了酸雨环境下粉煤灰掺量为 0、15% 和 30% 对混凝土抗压强度的影响,发现粉煤灰混凝土的抗压强度呈先增加后减小的变化规律且粉煤灰掺量越大混凝土抗压强度下降得越显著。牛建刚等人<sup>[29]</sup>研究了  $\text{SO}_2$  气体侵蚀粉煤灰掺量为 10%、20% 和 30% 对普通混凝土和轻骨料混凝土性能的影响,发现粉煤灰混凝土在抵抗  $\text{SO}_2$  腐蚀方面优于不掺粉煤灰的混凝土且轻骨料混凝土仅在减轻硫化深度方面优于普通混凝土。牛荻涛等人<sup>[34]</sup>研究了酸雨对粉煤灰混凝土中性化的影响,粉煤灰掺量为 0、19% 和 36%,发现粉煤灰掺量越大,混凝土中性化深度越大,混凝土受酸雨腐蚀越严重。胡晓波等人<sup>[35]</sup>分别研究了粉煤灰、矿渣和羧基丁苯胶乳聚合物对混凝土力学性能的影响,发现矿渣、粉煤灰和羧基丁苯胶乳聚合物可提高混凝土后期力学性能,降低酸雨对混凝土侵蚀的速率。石立安等人<sup>[36]</sup>研究了酸雨对粉煤灰混凝土的影响,发现粉煤灰掺量为胶凝材料的 17% 时,粉煤灰混

凝土结构致密,在酸雨作用下混凝土最终生成石膏和 $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 。张世义等人<sup>[37]</sup>研究了酸雨环境下纳米高岭土掺量为胶凝材料用量的0、1%、3%和5%对砂浆的影响,发现纳米高岭土有效改善了砂浆的微观结构,减缓 $\text{H}^+$ 和 $\text{SO}_4^{2-}$ 进入砂浆基体内部的速率,显著提高砂浆抗酸雨腐蚀的能力。Ahmad等人<sup>[38]</sup>研究了酸雨环境下谷壳灰对水泥的影响,发现掺入5%的稻壳灰对酸雨环境下混凝土的力学性能有提高的作用,此外还改善水泥的微观结构。范颖芳等人<sup>[39]</sup>模拟酸雨环境下粉煤灰掺量为12%对钢筋混凝土梁抗弯性能的影响,发现人工降雨与干湿交替侵蚀钢筋混凝土梁对其抗弯性能的影响相似,但完全浸泡后钢筋混凝土梁抗弯性能的退化更显著。许开成等人分别模拟酸雨环境下掺入锂渣的钢筋混凝土梁抗弯性能<sup>[40]</sup>和掺入锂渣的钢筋混凝土柱轴压性能<sup>[41]</sup>,锂渣掺量为15%,发现随着酸雨酸性增加,掺锂渣钢筋混凝土梁的极限抗弯承载力和开裂弯矩都明显降低,掺锂渣钢筋混凝土柱承载力下降较快。

对于在水泥中复掺矿物掺合料,孙鑫鹏等人<sup>[42]</sup>研究了酸雨侵蚀作用下分别单掺粉煤灰和矿渣掺量25%、35%和45%,粉煤灰5%、7%和9%分别与矿渣20%、28%和36%复掺对高强混凝土的影响,发现矿物掺合料双掺的效果优于矿物掺合料单掺的效果且双掺最佳掺量为25%。王凯等人<sup>[43]</sup>研究了酸雨环境下三种矿物掺合料复掺(高钙粉煤灰掺量10%、粒化磨细高炉矿渣掺量12%和硅灰掺量8%)对混凝土的影响,发现在混凝土中掺入适量的矿物掺合料,可延缓酸雨对混凝土的侵蚀,但最终仍会破坏。

矿物掺合料对混凝土抗酸雨侵蚀的能力有提高的作用,学者对在水泥中掺入粉煤灰研究较多,而对于单掺其他矿物掺合料和复掺矿物掺合料对混凝土化学成分变化仍需进一步研究。

### 1.5 酸雨与多因素耦合对混凝土的影响

实际建筑结构总是处于多种复杂的环境因素共同作用,大量学者对酸雨和多种因素耦合作用下对混凝土的影响进行研究:牛荻涛等人<sup>[34]</sup>研究了酸雨和应力耦合作用对混凝土的影响,发现拉应力加速混凝土的酸雨腐蚀作用,压应力减缓酸雨对混凝土的腐蚀。肖前慧等人<sup>[44]</sup>研究了酸雨和冻融耦合作用下对混凝土损伤的影响,发现混凝土在冻融-酸雨耦合环境下,混凝土损伤大于冻融单独作用下混凝土损伤。高秀利等人<sup>[45]</sup>研究了酸雨和碳化耦合作用下混凝土的劣化规律,发现酸雨使混凝土表层结构疏松从而加速碳化进程,干燥及碳化过程使表层脱水反过来加速酸腐蚀进程。王信刚等人<sup>[46]</sup>研究了酸雨和干湿循环耦合作用对水泥浆的影响,发现在早期水化,氢氧化钙逐渐减少,生成少量石膏,随着腐蚀时间增加,水泥水化生成的水化硅酸钙逐渐减少,石膏不断增加。Lv等人<sup>[47]</sup>研究了酸雾与 $\text{CO}_2$ 耦合作用下钢筋混凝土梁的劣化的影响,发现当混凝土开裂时,腐蚀速度迅速增加,锈蚀钢筋与劣化混凝土的粘

结强度降低,钢筋混凝土梁在受弯荷载作用下的破坏模式由压区混凝土压碎转变为钢筋屈服。许崇法等人<sup>[48]</sup>研究了酸雨、应力和碳化耦合作用对混凝土的影响,发现拉应力加速混凝土中性化而压应力抑制混凝土中性化,酸雨对碳化有抑制作用,酸雨和碳化耦合系数小于1。王凯<sup>[49]</sup>研究了酸雨、碳化和冻融耦合作用下对混凝土的影响,发现碳化能改善混凝土抗酸雨侵蚀的性能。在前2个侵蚀周期,冻融对混凝土抗酸性能的影响不明显,随后冻融可加快混凝土试件的酸雨侵蚀速率,冻融和酸雨对混凝土的侵蚀表现出协同作用。

随着气候愈来愈复杂,酸雨与多因素耦合对混凝土的影响也显得愈来愈重要。拉应力和冻融循环可加速酸雨侵蚀混凝土,而压应力和碳化作用减缓酸雨侵蚀混凝土的速率。

## 2 预防酸雨侵蚀的措施

酸雨侵蚀混凝土结构,降低其使用寿命。王凯等人<sup>[50]</sup>研究了不同品种水泥对酸雨环境下混凝土抗侵蚀性能的影响,发现水泥抗酸雨侵蚀性能由高到低依次为:抗硫酸盐水泥、矿渣硅酸盐水泥、普通硅酸盐水泥。Grandclerc等人<sup>[51]</sup>研究了硫酸盐对不同胶凝材料的侵蚀模型,发现铝酸钙水泥比硅酸盐水泥具有更好的抗硫酸侵蚀能力。高英力等人<sup>[52]</sup>研究了高致密保护层混凝土抗 $\text{SO}_2$ 侵蚀的性能,发现高致密保护层混凝土的抗酸性气体侵蚀性能良好,可以延长结构的使用寿命。李北星等人<sup>[53]</sup>研究混凝土酸性化预测模型,模型基于灰色系统理论考虑了粉煤灰掺量、pH值和时间的影 响,发现酸雨环境下混凝土表面采用水性渗透型无机防水剂或清水混凝土保护涂料防腐,混凝土结构寿命可大幅增加。孙红尧等人<sup>[54]</sup>研究了混凝土桥梁的防腐蚀设计,介绍了混凝土表面防护涂料(水性氟树脂涂料和防碳化耐酸雨涂料)、混凝土表面憎水处理(低聚物有机硅憎水渗透剂)、混凝土表面防护层(聚合物树脂乳液砂浆)和电化学保护(锌网/电化学活性砂浆阴极保护技术)等防腐设计方法。研究酸雨侵蚀混凝土的机理,可以提高混凝土抗侵蚀的能力,以便在设计时就有效避免混凝土易被腐蚀的缺陷,增加其使用寿命。

## 3 结论与展望

本文主要从混凝土酸性侵蚀性介质、溶液pH值、水胶比、矿物掺合料、酸雨与多因素耦合等几个角度出发,对目前酸雨侵蚀混凝土的研究成果进行了综述,得出如下结论:

(1)加强环境保护力度,控制含硫含氮污染物的排放,开发使用脱硫脱氮的技术及设备,尽量使用清洁能源。

(2)抗酸雨侵蚀的设计和施工方案(主要包括控制水胶比和掺入矿物掺合料用量等)应愈来愈多

地运用到实际工程中。

(3) 采取抗酸雨侵蚀混凝土的措施小幅增加一次性投资,但其更具有综合经济效益和社会效益。

为了进一步推进酸雨侵蚀混凝土的发展与完善,对尚待研究的内容总结如下:

(1) 多种矿物掺合料复掺和酸雨与多因素耦合作用对酸雨侵蚀混凝土的影响由于其劣化机理本身复杂,更应深入的研究。

(2) 使用理论分析、试验验证和数值模拟等方法,系统与深入地研究酸雨侵蚀混凝土的形成机理、微细观结构与宏观性能的关系,揭示酸雨侵蚀混凝土宏观性能的劣化机理。

(3) 制定、修订和完善酸雨侵蚀混凝土的相关标准与规范,以实现混凝土结构安全评定、维修及加固和全寿命设计等目标。

## 参考文献:

- [1] 王凯,张泓源,徐文媛,等. 混凝土酸雨侵蚀研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2014, 33(9): 2264-2268.
- [2] 陈圆圆,田贺忠,杨懂艳,等. 1997-2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析[J]. 环境科学, 2013, 34(5): 1958-1963.
- [3] 赵艳霞,侯青. 1993-2006年中国区域酸雨变化特征及成因分析[J]. 气象学报, 2008, 66(6): 1032-1042.
- [4] 张新民,柴发合,王淑兰,等. 中国酸雨研究现状[J]. 环境科学研究, 2010, 23(5): 527-532.
- [5] IBRAHIM H G, OKASHA A Y, Elatrash M S, et al. Emissions of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and PMs from Cement Plant in Vicinity of Khoms City in North Western Libya[J]. Journal of Environmental Science and Engineering A, 2012, 1: 620-628.
- [6] WANG S, CHEN B. Accounting of SO<sub>2</sub> Emissions from Combustion in Industrial Boilers[J]. Energy Procedia, 2016, 88: 325-329.
- [7] 刘惠玲,周定,谢绍东. 我国西南地区酸雨对混凝土性能影响的研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1997, 29(6): 101-104.
- [8] 曹琛,郑山锁,胡卫兵. 酸雨环境下混凝土结构性能研究综述[J]. 材料导报, 2019, 33(11): 1869-1874.
- [9] 梁咏宁,袁迎曙. 硫酸盐侵蚀环境因素对混凝土性能退化的影响[J]. 中国矿业大学学报, 2005, 34(4): 452-457.
- [10] 陈梦成,王凯,谢力. 酸雨侵蚀下水泥基材料的腐蚀损伤与评价——酸雨介质的影响[J]. 建筑科学, 2012, 28(3): 20-24.
- [11] 张杨,牛获涛,杨红霞. 酸雨环境下粉煤灰混凝土抗压强度的灰关联分析[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(6): 1995-1999.
- [12] 肖佳,周士琼. 酸雨条件下低钙粉煤灰对水泥砂浆强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2005, 8(4): 440-445.
- [13] 林明强,牛获涛,王玲,等. 硫酸腐蚀钢筋混凝土梁斜截面受剪性能试验研究[J]. 工业建筑, 2019, 49(6): 7-13.
- [14] 郑山锁,张艺欣,黄莺歌,等. 酸雨环境下钢筋混凝土框架梁抗震性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(9): 20-27.
- [15] 郑山锁,左河山,刘巍,等. 一般大气环境下低剪跨比 RC 框架梁抗震性能试验研究[J]. 工程力学, 2017, 34(7): 186-194.
- [16] 张钰. 人工模拟酸雨环境下腐蚀 RC 框架柱抗震性能试验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [17] 张倩,赵洁,成华. 酸雨对水泥砂浆强度影响的模拟及其腐蚀的化学机理分析[J]. 重庆交通学院学报, 2005, 24(3): 49-51.
- [18] 胡晓波. 酸雨侵蚀混凝土的试验模拟分析[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(S1): 147-152.
- [19] 张力伟,赵颖华,范颖芳,等. 腐蚀混凝土损伤特征的声发射试验研究[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(5): 763-769.
- [20] 王家滨,牛获涛. 喷射混凝土的硝酸侵蚀: 孔溶液 H<sup>+</sup> 与 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 的扩散规律及侵蚀机理[J]. 材料导报, 2019, 33(6): 991-999.
- [21] DU Y, JIANG N, SHEN S, et al. Experimental investigation of influence of acid rain on leaching and hydraulic characteristics of cement-based solidified/stabilized lead contaminated clay [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 225: 195-201.
- [22] 郑山锁,关永莹,黄莺歌,等. 酸雨环境下约束混凝土本构关系试验[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(2): 237-241.
- [23] 张英姿,范颖芳,刘江林,等. 模拟酸雨环境下 C40 混凝土抗压性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2010, 13(1): 105-110.
- [24] 张英姿,赵颖华,范颖芳. 受酸雨侵蚀混凝土弹性模量研究[J]. 工程力学, 2011, 28(2): 175-180.
- [25] 张英姿,范颖芳,李宏男,等. 模拟酸雨环境下混凝土抗拉性能试验研究[J]. 建筑材料学报, 2012, 15(6): 857-862.
- [26] 王志红,朱哲明. 酸沉降环境下混凝土断裂韧度的试验研究[J]. 工业建筑, 2017, 47(7): 122-126.
- [27] 周昌林,朱哲明,朱爱军,等. 酸雨腐蚀对混凝土材料断裂特性的影响[J]. 工程科学与技术, 2019, 51(1): 144-151.
- [28] 于忠,胡蔚儒. 化工大气环境中混凝土的腐蚀机理及性能研究[J]. 工业建筑, 2000, 30(5): 16-20.
- [29] 牛建刚,胡伟勋,杨鹏飞. 二氧化硫腐蚀对混凝土性能影响试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(1): 44-51.
- [30] 刘海涛,倪淑娜,罗永乐. 水灰比对建筑砂浆抗酸雨性能的影响分析[J]. 工业建筑, 2009, 39(S1): 868-871.
- [31] 成丕富,刘海涛,李方方,等. 水灰比和孔隙率对砂浆抗酸雨腐蚀性能的影响[J]. 混凝土, 2008(11): 19-21.
- [32] 姜健,徐惠,唐铁繁. 酸雨模拟液侵蚀混凝土的损伤劣化研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(5): 1407-1411.
- [33] 龙广成,王新友,肖瑞敏. 矿物掺合料对 C<sub>3</sub>S 胶凝体系的填充密实效应研究[J]. 建筑材料学报, 2002, 5(3): 215-219.
- [34] 牛获涛,周浩爽,牛建刚. 承载混凝土酸雨侵蚀中性化试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2009, 28(3): 411-415.
- [35] 胡晓波,龙亨,陶新明,等. 模拟酸雨条件下 C50 混凝土力学性能变化的研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2009, 21(4): 380-383.
- [36] 石立安,麻海燕,柯凯. 混凝土的抗酸雨腐蚀性及其机理研究[J]. 南京理工大学学报, 2012, 36(4): 717-723.
- [37] 张世义,范颖芳,李宁宁. 纳米高岭土改性砂浆抗酸雨侵蚀试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2014, 44(3): 668-672.
- [38] AHMAD I A, PARUNG H, TJARONGE M W, et al. Durability of Concrete Using Rice Husk Ash as Cement Substitution Exposed to Acid Rain[J]. Journal of Engineering Research and Applications, 2014, 4(5): 144-149.
- [39] 范颖芳,王大为,栾海洋. 模拟酸沉降环境混凝土梁承载性能研究[J]. 工程力学, 2014, 31(4): 147-154.
- [40] 许开成,陈子超,聂行,等. 模拟酸雨环境下掺锂渣钢筋混凝土梁抗弯性能试验研究[J]. 工业建筑, 2018, 48(3): 21-25.
- [41] 许开成,张智星,阳翌舒,等. 模拟酸雨腐蚀环境下锂渣钢筋混凝土轴压短柱试验研究[J]. 建筑结构, 2019, 49(4): 64-69.
- [42] 孙鑫鹏,李益进,尹健,等. 酸雨对桥梁用 C50 高强混凝土侵蚀性能影响分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2010(1): 9-12.
- [43] 王凯,马保国,张泓源. 矿物掺合料对混凝土抗酸雨侵蚀特性的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(3): 416-421.
- [44] 肖前慧,牛获涛. 冻融与酸雨侵蚀共同作用下混凝土损伤分析[J]. 冰川冻土, 2014, 36(6): 1484-1489.
- [45] 高秀利,谢德擎,穆松,等. 酸雨-碳化耦合侵蚀环境下混凝土的劣化规律与机理[J]. 混凝土, 2016(10): 21-24.
- [46] 王信刚,陈皓,扶兴国. 酸雨-干湿耦合作用下树脂-水泥界面腐蚀特性[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3): 358-364.

(下转第 168 页)

## Dynamic Method of Emergency Decision-making Based on Prospect Theory

GAO Shan and WANG Hanyi

(Business School, Central South University, Changsha 430074, China)

**Abstract:** Regarding the features of unpredictability of information beforehand, and the evolutionary process of before-event and during-event emergency, we propose a dynamic approach to emergency decision-making both before-event and during-event based on prospect theory, by considering the possible consequence caused by the implementation effect of firsthand prevention and mitigation to the emergency response. Firstly, we illustrates the description of emergency decision-making issues in both before-event and during-event stages, as well as depicts relative determinants by intervals. Secondly, it provides with setup methods of dynamic references to emergency decision-making before-event and during event. Thirdly, based on the idea of prospect theory, we shows calculations of general value and plancost-a quantitative description of the decision maker's comprehensive psychological perception regarding casualties, property losses and program costs at different scenarios. Lastly, via weighing the calculations of both before-event and during event scenarios, a comprehensive foreground value for alternative emergency decision-making options is acquired, along with the optimal solution grounded on the size of the composite foreground value.

**Key words:** emergencies; emergency decision-making; prospect theory; dynamic reference points

(上接第 150 页)

- [47] LV H, WU Y, FANG Z, et al. Deterioration behavior of reinforced concrete beam under compound effects of acid-salt mist and carbon dioxide[J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 253-259.
- [48] 许崇法, 曹双寅, 范沈龙, 等. 应力、碳化及酸雨作用下混凝土中性化试验研究[J]. 土木工程学报, 2014, 47(5): 64-70.
- [49] 王凯. 酸雨与碳化、冻融耦合作用下的混凝土耐久性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2017.
- [50] 王凯, 马保国, 龙世宗, 等. 不同品种水泥混凝土的抗酸雨侵蚀性能[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(2): 1-4.
- [51] GRANDCLERC A, DANGLA P, GUEGUEN-MINERBE M, et al. Modelling of the sulfuric acid attack on different types of cementitious materials[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 105: 126-133.
- [52] 高英力, 马保国, 王信刚, 等. 钢筋保护层混凝土细观界面过渡区优化及耐久性[J]. 土木建筑与环境工程, 2009, 31(4): 19-24.
- [53] 李北星, 蔡老虎. 基于灰色系统的混凝土酸性化预测模型研究及应用[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(10): 1375-1380.
- [54] 孙红尧, 杨争, 徐雪峰, 等. 混凝土结构桥梁的防腐蚀设计研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2013, 32(S1): 746-751.

## Research Progress on Acid Rain Erosion of Concrete

NIU Jiangang and LIU Weiheng

(Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

**Abstract:** With the continuous acceleration of industrialization in the world, a large number of acid substances are discharged into the atmosphere. The acid rain area is gradually expanded, and the acid rain is gradually more acidic. In addition, acid rain does great harm to concrete structure, and the durability of concrete structure in acid rain area decreases greatly. In this paper, the influence of different acid erosion media, different pH values, different concrete water-binder ratio and different mineral admixtures, acid rain and multi-factor coupling on concrete and measures to prevent concrete from being eroded by acid rain are reviewed, and suggestions for further research are proposed.

**Key words:** erosive medium; pH value of solution; water-binder ratio; mineral admixture; concrete