

不同环境中矿物掺合料混凝土抗硫酸盐 侵蚀性能的研究进展

刘芳¹, 尤占平¹, 汪海年¹, 盛燕萍²

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710061)

(2. 长安大学材料科学与工程学院, 陕西 西安 710061)



刘芳

摘要: 硫酸盐侵蚀是混凝土耐久性研究的热点之一。矿物掺合料的掺入改变混凝土内部的组成, 细化了混凝土的孔结构, 对混凝土抗硫酸盐侵蚀起着重要作用。掺合料的化学组成、细度、掺量等对混凝土抗硫酸盐侵蚀均有很大的影响。外界腐蚀环境的不同, 矿物掺合料混凝土抗硫酸盐侵蚀的性能也有显著的差别。大量的研究表明, 在连续浸泡的硫酸盐溶液中, 矿物掺合料只要掺量适当能够提高混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力。在干湿循环与硫酸盐溶液共同作用下, 矿物掺合料混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力有所争议, 有些研究表明矿物掺合料能够提高干湿循环条件下混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力; 然而有些研究结果却呈现相反的结论, 这需要进一步探索。

关键词: 矿物掺合料; 硫酸盐侵蚀; 干湿循环; 连续浸泡; 耐久性

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2014)11-0682-07

Research Progress on Sulfate Resistance of Concrete with Mineral Admixture in Different Environments

LIU Fang¹, YOU Zhanping¹, WANG Hainian¹, SHENG Yanping²

(1. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

(2. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710061, China)

Abstract: Sulfate attack is one of the hot topics in the study of concrete durability. The incorporation of mineral admixtures changes concrete composition and refines pore structure of concrete, which plays an important role on the concrete resistance to sulfate attack. Chemical composition, fineness, dosage, etc. of admixture have great influence on concrete resistance to sulfate attack. When external corrosion environment is different, the resistance to sulfate attack of mineral admixture concrete also has significant difference. Abundant studies manifest that mineral admixtures can significantly improve the ability of resistance to sulfate attack of concrete in continuous immersion of sulfate solution as long as the content is appropriate. In dry-wet circulation and sulfate solution condition, it is controversial that mineral admixtures of concrete resist to sulfate attack. Some studies have shown that mineral admixtures can improve the ability of resistance to sulfate attack of concrete, some studies, however, hold the opposite conclusion, which need further study.

Key words: mineral admixtures; sulfate attack; dry-wet circulation; continuous immersion; durability

1 前言

中国西部地区含 SO_4^{2-} 的盐碱地非常多, 这些地区的基础设施在使用寿命内遭受严重的侵蚀破坏, 带来巨大的经济损失和不良的社会影响。东部沿海地区的一些

近海工程如跨海大桥、港口码头等也在经受着海水硫酸盐的侵蚀破坏。如何减轻或者预防硫酸盐对混凝土结构的侵蚀破坏是目前国内外研究的热点问题。以粉煤灰、矿渣、硅灰为代表的矿物掺合料应用于混凝土中除减少资源消耗、节省成本外, 还能减轻其排放对环境造成的负面影响, 这也是低碳经济时代的高性能混凝土研究与发展的趋势^[1]。

国内外学者在矿物掺合料混凝土抗硫酸盐腐蚀方面做了大量的研究, 也取得了一些建设性的成果。各种矿物掺合料的化学成分和结构构成等不同, 对水泥混凝土

收稿日期: 2014-05-14

基金项目: “十二五”国家科技支撑项目(No. 2011BAE27B04)

第一作者及通讯作者: 刘芳, 女, 1978年生, 博士研究生,

Email: cherry1226@yeah.net

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2014.11.06

抗硫酸盐侵蚀性能的影响有很大差别^[2-4]。掺合料混凝土在不同的外界腐蚀环境中抗硫酸盐侵蚀的性能也会不同。本文归纳国内外的研究成果, 主要介绍了在不同外部侵蚀环境中掺合料提高混凝土抗硫酸盐侵蚀能力的效果及作用机理。

2 矿物掺合料混凝土在连续浸泡的硫酸盐溶液环境中抗侵蚀性的研究

2.1 粉煤灰

粉煤灰是一种具有潜在活性的工业废渣, 在混凝土中掺入粉煤灰可以提高混凝土的密实度, 细化混凝土的孔结构, 降低 C_3A 的含量和 $Ca(OH)_2$ 的浓度, 改善混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力。粉煤灰的化学组成、细度、掺量等都会对混凝土抗硫酸盐侵蚀产生影响。一般认为低钙粉煤灰能够提高混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力。Lj Fi-sang^[5]通过研究提出了 R 值的判据准则, 表示为式(1):

$$R = [w(CaO) - 5] / w(Fe_2O_3) \quad (1)$$

式中: $w(CaO)$ 、 $w(Fe_2O_3)$ 分别代表相应氧化物质量分数中的分子部分数值。 R 值越小, 对混凝土抵抗硫酸盐侵蚀越有利。实际上, 随着研究的深入, 发现用 R 值考查并不全面, 它忽视了粉煤灰的其它成分的影响。李观书^[6]研究了粉煤灰种类、先期养护时间和温度对粉煤灰混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能的影响。结果表明: 石灰含量、硫酸盐浓度和玻璃相中的碱含量是影响粉煤灰混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的主要因素。程云虹^[7]等研究了粉煤灰改善混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的效果。以 30%、40%、50%、60% 掺量的粉煤灰代替水泥, 试验结果表明粉煤灰掺量越大, 混凝土抗硫酸盐侵蚀的效果越好, 在高浓度硫酸盐溶液里这种效果更加显著。这与亢强^[8]等人的试验结果相一致, 亢强等用 10%、30%、50% 的粉煤灰取代水泥, 将 40 mm × 40 mm × 160 mm 混凝土试件在 10% 的 Na_2SO_4 溶液中浸泡 8 个月, 以抗压抗蚀系数与抗弯抗蚀系数来表示抗硫酸盐侵蚀的效果。结果表明粉煤灰对混凝土抗 Na_2SO_4 侵蚀性能有改善作用, 且这种改善的效果随粉煤灰掺量的增大而线性增大(图 1)。

粉煤灰由于其矿物组分、化学成分及颗粒形态等特征, 在混凝土中产生火山灰效应、形态效应及微集料效应^[9-11]。在混凝土中掺入粉煤灰之后, 对混凝土各方面的性能都有较大的影响。粉煤灰中的活性成分与 $Ca(OH)_2$ 发生反应, 对减少钙矾石和石膏的生成有利。随着粉煤灰掺量的增加, 水泥石中 $Ca(OH)_2$ 的含量不断降低, 从组成上改善了混凝土的抗硫酸盐侵蚀破坏性

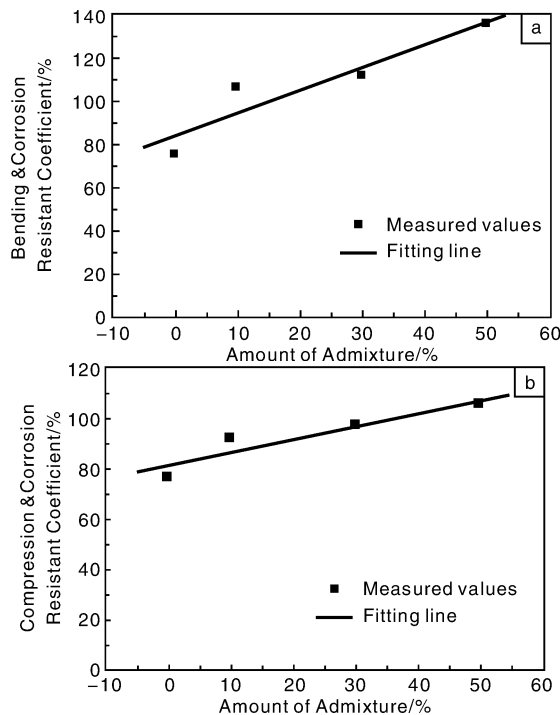


图 1 不同粉煤灰掺量的混凝土抗蚀系数及关系拟合曲线: (a) 抗弯抗蚀系数, (b) 抗压抗蚀系数

Fig. 1 Bending & corrosion resistant coefficients (a) and compression & corrosion resistant coefficients (b) of concrete with different content of fly ash

能。粉煤灰通过二次水化和分散填充的致密作用使水泥石的孔结构高度细化, 改善了混凝土的孔结构, 从结构上改善了混凝土的抗硫酸盐侵蚀破坏性能^[12]。

2.2 矿渣

矿渣是冶炼生铁时产生的副产品, 早在 19 世纪初就用来制造混凝土或者水泥制品, 其具有潜在的活性。在混凝土中掺入矿渣, 可以改善混凝土的孔结构, 减少温度裂缝, 降低易侵蚀组分 CH 的含量, 稀释 C_3A , 提高混凝土抵抗硫酸盐侵蚀的能力^[13]。李华^[14]等将掺有 50% 矿渣的水泥净浆和水泥砂浆在 5% 的 Na_2SO_4 溶液中浸泡 2 a, 结果表明: 不掺矿物掺合料的净浆试件表层浆体开裂, 掺矿渣的净浆试件仍保持较好完整性, 表面未开裂但较粗糙, 普遍出现麻点蚀坑现象; 不掺矿物掺合料的砂浆试件破损严重, 表面普遍出现麻面坑蚀现象, 表层浆体发生龟裂, 部分区域浆体剥落使砂粒外露, 且试件发生明显扭曲变形; 掺矿渣的砂浆试件保持完整, 表面略微粗糙, 出现零散点坑。从 CT 扫描图片(图 2)可见: 不掺矿物掺合料的净浆试件从表层向内开裂的深度比掺矿渣的净浆试件大; 不掺矿物掺合料的砂浆试件在表层和内部浆体-集料的界面过渡区均出现较大裂缝, 掺 50% 矿渣的砂浆试件均未出现可视的裂缝。

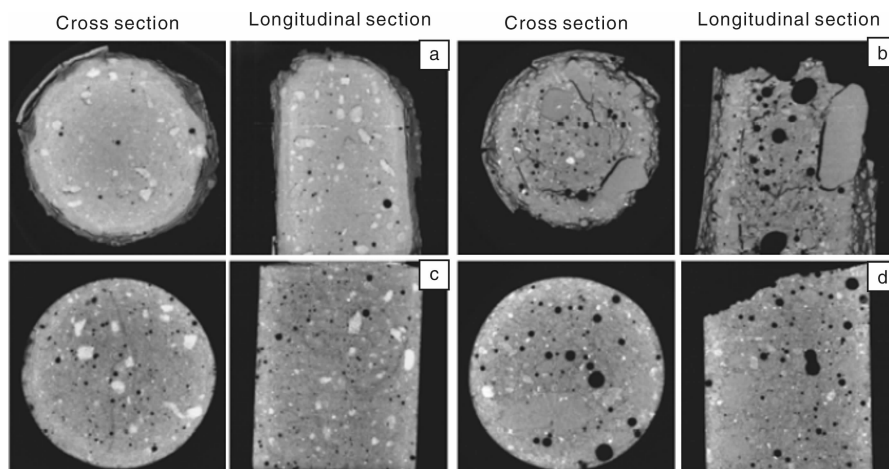


图2 水泥试件在 5% Na_2SO_4 溶液中浸泡 2 a 后其横截面和纵截面的 CT 扫描图片: 未掺入矿物混合料的净浆试件(a)和砂浆试件(b), 掺入矿渣的净浆试件(c)和砂浆试件(d)

Fig. 2 CT scan images of cross and longitudinal sections of specimens submerged in 5% Na_2SO_4 solution for 2 years: undoped cement paste(a) and cement mortar(b), slag doped cement paste(c) and cement mortar(d)

矿渣 C_3A 含量稀释效应等使得试件的抗 Na_2SO_4 侵蚀能力显著提高。当矿渣中活性 Al^{3+} 含量较高时, 能与 SO_4^{2-} 反应生成大量钙矾石, 掺量不当对混凝土抗 Na_2SO_4 侵蚀能力不利。这与胡曙光等人的研究结果相一致。胡曙光^[13] 等认为当矿渣中氧化铝含量比较高时, 矿渣在混凝土中掺量必须达到 65% 以上才能充分显示其对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的有利影响。若矿渣中氧化铝含量高, 则会释放大量的 Al 到混凝土孔溶液中, 加速钙矾石的形成。当矿渣掺量较高时, 相当多的 Al 被束缚到 C-S-H 凝胶中, 参与形成钙矾石的 Al 相对减少, 混凝土抗硫酸盐侵蚀能力增强。由此可见, 同种矿渣即便掺量不同, 抵抗硫酸盐侵蚀的效果也不同。

矿渣掺量大, 对混凝土抗硫酸盐侵蚀有利, 但混凝土早期的强度比较低。有学者通过对矿渣进行处理, 配制出较低矿渣掺量但又能抗硫酸盐侵蚀的混凝土。郭书辉^[15] 等将掺 15% 和 25% 超细矿渣粉的水泥砂浆, 在硫酸盐溶液中连续浸泡。结果表明: 超细矿渣粉取代部分水泥既能提高水泥砂浆的强度, 又可以显著改善水泥砂浆的抗硫酸盐侵蚀性能。如图 3 所示, 不掺矿渣粉的水泥砂浆试块后期的腐蚀程度更加厉害, 在 10% Na_2SO_4 溶液中浸泡 60 d 后其抗蚀系数仅为 0.95。而掺加 15%、25% 超细矿渣粉的水泥砂浆试块抗蚀系数变化幅度却很小。超细矿渣粉改善水泥砂浆抗硫酸盐侵蚀能力, 主要是归因于矿渣粉与水泥水化体系 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的化学反应和微集料效应, 同时依赖于单位砂浆中 C_3A 含量的减少。由此可见矿渣的细度也是影响混凝土抗硫酸盐侵蚀能力的重要因素之一。

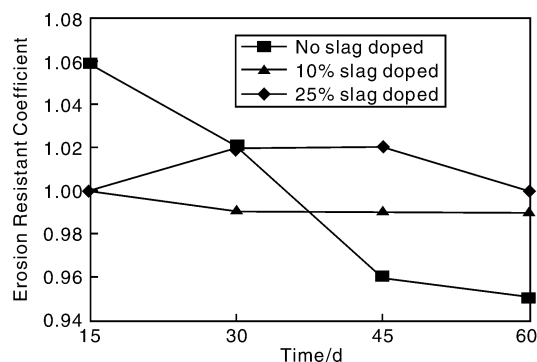


图3 浸泡于 10% Na_2SO_4 介质中的水泥砂浆试块在不同龄期的抗蚀系数

Fig. 3 Erosion resistance coefficients of cement mortar specimens submerged in 10% Na_2SO_4 solution at different ages

2.3 硅灰

硅灰是从硅铁冶炼、工业的废气中收集到的副产品。肖佳^[16] 等采用 5%、10% 的硅灰等量取代水泥, 结果表明在水泥净浆中掺入硅灰能有效阻止其强度的下降, 减缓其劣化的速度。杨德斌^[17] 等通过对水泥砂浆中掺入 5%、10%、15% 的硅灰, 研究硅灰对混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能的影响, 试验结果表明, 硅灰的掺量在 15% 以下, 掺入硅灰可显著提高混凝土抗硫酸盐侵蚀能力, 并且掺量越大, 抗硫酸盐侵蚀的能力越强。在混凝土中掺入硅灰, 硅灰的火山灰效应能将 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 转化成 C-S-H 凝胶, 并填充在水泥水化产物之间, 降低了混凝土的孔隙率, 改善了混凝土的孔结构^[18]。

2.4 矿物掺合料复掺

黄维蓉^[19] 等以硅灰、矿渣和粉煤灰总量为 40% 的

比例取代普通混凝土中的水泥, 设计出 3 种配合比混凝土系列: C_1 (3% 硅灰 + 14% 矿渣 + 23% 粉煤灰)、 C_2 (5% 硅灰 + 19% 矿渣 + 16% 粉煤灰)、 C_3 (7% 硅灰 + 24% 矿渣 + 9% 粉煤灰), 将其浸泡在 10% 的 Na_2SO_4 溶液中, 测量的相对动弹性模量经时变化规律见图 4。相对动弹性模量呈前期增长后期下降的规律, 但不同系列混凝土在增长与下降阶段的变化幅度不同。在 180 d 龄期时, 普通混凝土 C_0 的相对动弹性模量为 70.2%, 而加掺合料的 C_1 、 C_2 、 C_3 系列混凝土对应的相对动弹性模量分别为 83.1%、89.2%、93.6%, 相对 C_0 系列分别提高了 18.4%、27.1%、33.3%。矿物掺合料复掺混凝土的抗硫酸盐侵蚀性能相对普通混凝土有较大幅度的提高。

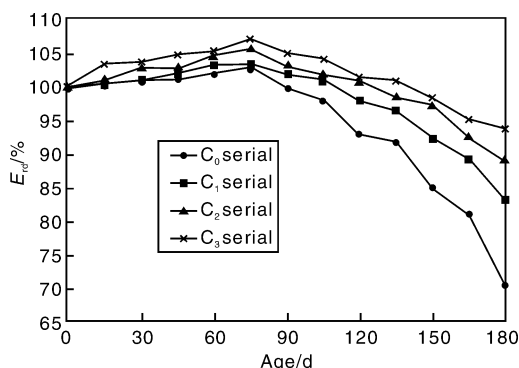


图 4 混凝土相对动弹性模量经时变化

Fig. 4 Variations of the relative dynamic modulus of elasticity of mineral admixtures doped concrete with age

马保国等^[20]研究了粉煤灰、矿粉、钢渣单掺及复掺混凝土的抵抗硫酸盐侵蚀能力。结果表明, 加入掺合料对试件抵抗硫酸盐侵蚀有明显的预防缓解作用。矿渣、钢渣的活性相对而言比粉煤灰高, 矿渣、钢渣从较早龄期就开始发挥作用, 粉煤灰由于活性低, 火山灰反应主要发生在后期。从强度损失来评价抗硫酸盐侵蚀性能, 30% 的粉煤灰的效果最佳, 这是因为在 20 ℃ 硫酸盐的活性激发下, 粉煤灰的增强作用反而优于矿渣、钢渣。

3 干湿循环环境下矿物掺合料混凝土抗硫酸盐侵蚀性的研究

盐湖地区的浪溅区和沿海地区的混凝土结构经常不同程度地遭受干湿循环和硫酸盐的共同作用。与连续浸泡环境相比, 干湿循环环境下硫酸盐侵蚀破坏机理更为复杂, 国内外学者对矿物掺合料混凝土抵抗干湿循环与硫酸盐的耦合作用做了不少的研究, 但研究结果不尽一致, 关于干湿循环作用下矿物掺合料对混凝土抗硫酸盐

侵蚀能力的影响有所争议。大量的研究表明, 矿物掺合料只要掺量适当, 能够提高干湿循环环境下混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力。然而, 另外的一些研究表明, 矿物掺合料不能提高干湿循环环境下混凝土抗硫酸盐侵蚀的性能, 相比普通的混凝土而言, 掺入矿物掺合料反而会加剧硫酸盐的腐蚀。

3.1 粉煤灰

乔红霞^[21]等认为在干湿循环与硫酸盐侵蚀条件下, 粉煤灰混凝土由于二次水化反应具有良好耐硫酸盐结晶侵蚀性。粉煤灰的掺量直接影响它的耐侵蚀性能, 掺量太多和太少都不利于二次水化反应对抗硫酸盐侵蚀能力的提高, 存在一个合理掺量问题。

图 5 中 C-1、C-3、C-5、C-6 分别指不掺粉煤灰的混凝土、粉煤灰掺量为 10%、15%、20% 的混凝土。试样 C-3、C-5、C-6 在循环结束的时候, 随着粉煤灰掺量的增加相对动弹性模量依次降低。其中 C-3 曲线高于 C-1, C-6 低于 C-1^[22]。余振新^[23]等研究发现, 在 40% 荷载-干湿交替-5% Na_2SO_4 耦合作用下, 不掺矿物掺合料的混凝土与掺 30% 粉煤灰的混凝土相比, 相对动弹性模量下降明显, 降幅也最大。粉煤灰的掺入, 在一定程度上抑制了混凝土的损伤劣化过程。

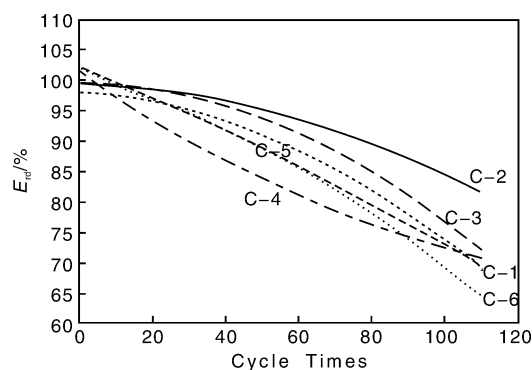


图 5 4.9% Na_2SO_4 溶液中试件相对动弹性模量随干湿循环作用次数的变化曲线

Fig. 5 Variations of the relative dynamic modulus of elasticity of specimens in 4.9% Na_2SO_4 solution with times of dry-wet cycle

3.2 矿渣

金祖权^[24]等将采用 30%、50%、65% 矿渣等量取代水泥的混凝土在 5% 的硫酸盐溶液中进行干湿循环, 结果如图 6 所示。图 6 中 S1、S2、S3、S4 分别代表不掺矿渣的普通混凝土、矿渣掺量为 30%、50%、65% 的混凝土。由图 6 可知, S1 和 S2 混凝土经过 280 次循环, 其抗压强度分别下降了 38.8% 和 11%。当矿渣掺量提高到 50% 和 65% 后, 其抗压强度反而上升了

15.4% 和 23%。这表明混凝土抗硫酸盐腐蚀能力随矿渣掺量增加而大幅度提高。

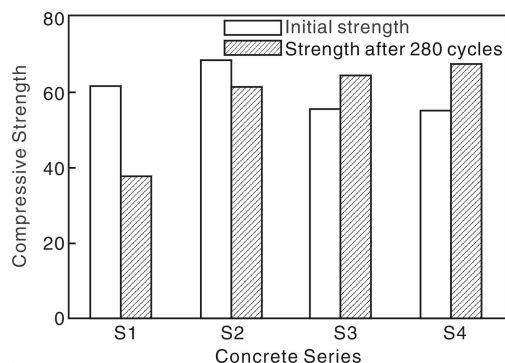


图 6 混凝土在 5% 硫酸盐溶液中经过 280 次循环后的抗压强度演变规律

Fig. 6 Evolutions of compressive strength of concrete after 280 cycles in 5% sulfate solution

3.3 矿物掺合料的复掺

曹鹏飞^[25]等以不同比例的粉煤灰和矿粉取代水泥,在浓度为 5% 的 Na_2SO_4 溶液中对混凝土进行干湿循环侵蚀。通过结合宏观与微观组织分析发现,混凝土中掺入适量的矿物掺合料可以很好地改善其内部结构,磨细矿粉的掺入可以提高混凝土抗硫酸盐性能。粉煤灰掺量对混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力有较大的影响,只有粉煤灰的掺量适当才能提高混凝土抗硫酸盐侵蚀的性能。这与乔红霞等人的研究结论相一致。

黄维蓉^[26]等将以不同比例的矿渣、硅灰和粉煤灰取代水泥的混凝土在 10% 的 Na_2SO_4 溶液中进行干湿循环。其相对动弹性模量随干湿循环作用次数的变化规律见图 7。图 7 中的 A0 指普通混凝土, A1 指掺 24% 矿渣 + 7% 硅灰 + 9% 粉煤灰的混凝土。由图 7 可知,试验前期混凝土的相对动弹性模量呈增长趋势,后期开始下降,但掺矿物掺合料的混凝土下降较平缓,相对动弹性模量较普通混凝土明显提高。普通混凝土相对动弹性模量在循环 135 次时就开始低于 60%, 掺矿物掺合料的混凝土循环 180 次其相对动弹性模量大于 60%。这说明矿物掺合料在一定程度上改善了混凝土抗硫酸盐的侵蚀。

Sahmaran^[27]等的研究表明,掺加火山灰和粉煤灰的混凝土经受干湿循环后,强度损失远大于普通混凝土和抗硫酸盐的混凝土。杨钱荣^[28]以 25%、50% 的钢渣 - 矿渣 - 粉煤灰复合掺合料等量取代水泥,在 10% 的 Na_2SO_4 溶液中进行连续浸泡和干湿循环,结果表明:在干湿循环环境中,化学侵蚀引起的破坏远小于硫酸盐结晶引起的破坏。掺加复合掺合料的混凝土抵抗硫酸盐

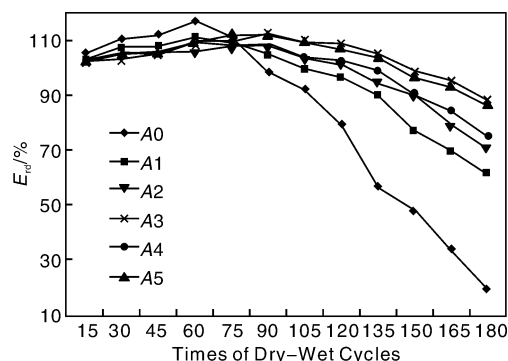


图 7 在 10% Na_2SO_4 溶液中混凝土的相对动弹性模量随干湿循环作用次数的变化曲线

Fig. 7 Variations of the relative dynamic modulus of elasticity of concrete with times of dry-wet cycles

结晶破坏的能力随着掺量的增大而下降,见图 8。从图 8 可以看到,普通混凝土和掺量为 25% 的混凝土经 22 次干湿循环后的膨胀不是很明显,掺量为 25% 的混凝土有膨胀增大的趋势。而复合微粉掺量增加到 50% 时,干湿循环超过 14 次后试件出现急剧膨胀的现象,经 22 次干湿循环后其膨胀率达到了 1%。袁晓露^[29]等研究表明:干湿循环与硫酸盐侵蚀的耦合作用下,矿物掺合料的掺入非但未改善混凝土的抗侵蚀性能,反而加剧了其力学性能的损伤,见图 9。掺入矿物掺合料之所以加快了干湿循环与硫酸盐侵蚀耦合作用下混凝土的损伤,可能是因为干湿循环的环境影响了矿物掺合料火山灰活性的发挥。在干湿交替的环境中,硫酸盐结晶是造成混凝土破坏的主要因素。混凝土养护 28 d 后进行试验,此时掺合料的二次火山灰反应并不充分,其产生的填充和孔细化等有利效果也没有得到充分体现。相对化学侵蚀而言,这种情况对混凝土的盐结晶破坏尤其不利。随着养护龄期的增长,这种不利影响可能会降低。

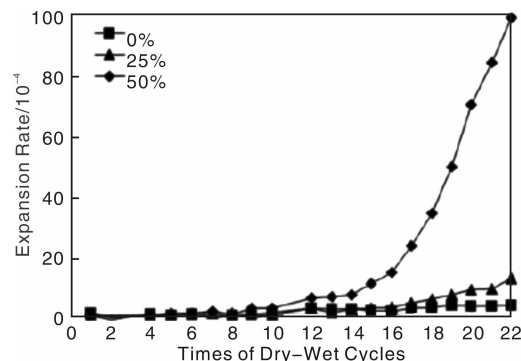


图 8 复合微粉混凝土在 Na_2SO_4 溶液中干湿循环后的膨胀率

Fig. 8 The expansion rate of concrete mixed with composite powder after dry-wet cycles in Na_2SO_4 solution

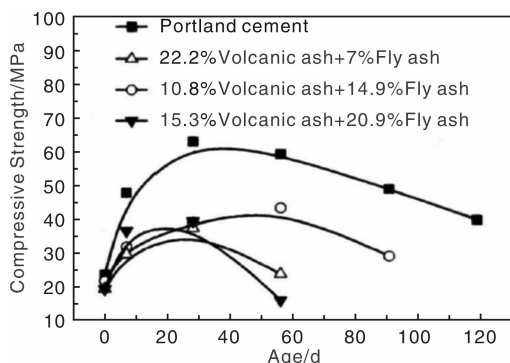


图9 矿物掺合料混凝土的抗压强度(在5% Na_2SO_4 溶液中进行干湿循环试验, 浸泡6 d, 然后100℃干燥1 d)

Fig. 9 Compressive strength of concrete mixed with mineral admixture after dry-wet cycles in 5% Na_2SO_4 solution for 6 d, then dried at 100℃ for 1 d

4 结 语

(1) 矿物掺合料混凝土在连续浸泡的硫酸盐溶液中, 矿物掺合料只要掺量适当, 能够提高混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力。

(2) 矿物掺合料混凝土在连续浸泡的硫酸盐溶液中, 矿渣的细度与矿渣的掺量密切相关。矿渣细度越细, 降低掺量也能够提高混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力。

(3) 干湿循环与硫酸盐耦合作用下, 矿物掺合料抵抗硫酸盐侵蚀的能力研究结论不尽一致。大量的研究认为矿物掺合料能够提高改善混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力, 另外一些研究认为由于干湿循环的环境以及腐蚀前养护的龄期短, 影响了火山灰活性的发挥, 矿物掺合料不能提高混凝土抗硫酸盐侵蚀的能力。适当的延长腐蚀前的养护时间, 可能会有所改善。在干湿循环环境下, 矿物掺合料究竟能不能改善混凝土抗硫酸盐侵蚀能力, 是矿物掺合料本身的化学组成问题? 掺量的问题? 还是干湿循环的制度问题? 当前的研究几乎没有涉及到, 这都需要以后做大量的研究。

(4) 研究矿物掺合料抗硫酸盐侵蚀时应多考虑结构混凝土真正的服役状况, 比如荷载、环境因素等, 这样才更具有实际的应用价值, 又能减少其排放对环境造成的负效应。

参考文献 References

[1] Gao Lixiong (高礼雄). Study on Resistance to Sulfate Attack on Cement Based Composites Material Containing Mineral Additive (掺矿物掺合料水泥基材料的抗硫酸盐侵蚀性研究)[D].

Beijing: China Building Materials Academy, 2005.

- [2] Niu Quanlin (牛全林), Zhang Yong (张 勇). 矿物质混合材对水泥砂浆抗硫酸盐腐蚀的影响[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society* (硅酸盐学报), 2006, 34(1): 114-117.
- [3] ROY D M, ARJUNAN P, SILSBEE M R. Effect of Silica Fume, Metakaolin and Low-Calcium Fly Ash on Chemical Resistance of Concrete [J]. *Cem Concr Res*, 2001, 31(12): 1 809-1 813.
- [4] ESHMAIEL G, HOMAYOON S P. Effect of Magnesium and Sulfate Ions on Durability of Silica Fume Blended Mixes Exposed to the Seawater Tidal Zone [J]. *Cem Concr Res*, 2005, 35(7): 1 332-1 343.
- [5] FISANG L J, DJURIC M. An Optimization of Fly Ash Quantity in Cement Blending[J]. *Cement and Concrete Research*, 1995, 25(7): 1 480.
- [6] Li Guanshu (李观书). 粉煤灰混凝土抗硫酸盐侵蚀性能[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society* (硅酸盐学报), 2012, 40(1): 39-48.
- [7] Cheng Yunhong (程云虹), Jiang Weidong (蒋卫东), Yin Zhengfeng (尹正风), et al. 粉煤灰对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能影响的试验研究[J]. *Highway* (公路), 2006(11): 128-130.
- [8] Kang Qiang (亢 强). 矿物掺合料对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能影响的研究[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization* (粉煤灰综合利用), 2009(3): 47-49.
- [9] Wang Aiqin, Zhang Chengzhi, Sun Wei. Fly Ash Effects I: The Morphological Effect of Fly Ash [J]. *Cement and Concrete Research*, 2003(33): 2 023-2 029.
- [10] Wang Aiqin, Zhang Chengzhi, Sun Wei. Fly Ash Effects II: The Active Effect of Fly Ash [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004(34): 2 027-2 060.
- [11] Wang Aiqin, Zhang Chengzhi, Sun Wei. Fly Ash Effects III: The Microaggregate Effect of Fly Ash [J]. *Cement and Concrete Research*, 2004(34): 2 061-2 066.
- [12] Gao Lixiong (高礼雄), Yao Yan (姚 燕), Wang Ling (王玲). 粉煤灰对混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响[J]. *Journal of Guilin University of Technology* (桂林工学院学报), 2005, 25(2): 205-207.
- [13] Hu Shuguang (胡曙光), Qin Lixiang (覃立香), Ding Qingjun (丁庆军), et al. 矿渣对混凝土抗硫酸盐侵蚀性的影响[J]. *Journal of Wuhan University of Technology* (武汉工业大学学报), 1998, 20(1): 1-3.
- [14] Li Hua (李 华), Sun Wei (孙 伟), Zuo Xiaobao (左晓宝). 矿物掺合料改善水泥基材料抗硫酸盐侵蚀性能的微观分析[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society* (硅酸盐学报), 2014, 40(8): 1 119-1 126.
- [15] Guo Shuhui (郭书辉), Pan Zhihua (潘志华), Wang Xuebing (王学兵), et al. 掺有超细矿渣粉的水泥砂浆的抗硫酸盐

- 侵蚀性能[J]. *Concrete*(混凝土), 2013(5): 127-129.
- [16] Xiao Jia(肖佳), Deng Dehua(邓德华), Yuan Qiang(元强), *et al.* 硅灰对水泥净浆抗硫酸盐侵蚀性能的改善作用[J]. *Journal of Southwest Petroleum Institute*(西南石油学院学报), 2006, 28(3): 103-105.
- [17] Yang Debin(杨德斌), Zhou Junlong(周俊龙), Wang Hongtao(汪宏涛), *et al.* 外加剂与矿物掺合料对混凝土抗硫酸盐侵蚀的有效性研究[J]. *Concrete*(混凝土), 2003(4): 12-15.
- [18] Jiang Demin(姜德民). 硅灰对高性能混凝土强度的作用机理研究[J]. *Building Technique Development*(建筑技术开发), 2001, 28(4): 44-46.
- [19] Huang Weirong(黄维蓉), Zhang Shulin(张淑林), Huang Xing(黄星). 多元掺合料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能试验研究[J]. *Concrete*(混凝土), 2011(9): 64-67.
- [20] Ma Baoguo(马保国), Luo Zhongtao(罗忠涛), Gao Xiaojian(高小建), *et al.* 矿物掺合料对水泥砂浆硫酸盐侵蚀的影响及机理[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*(铁道科学与工程学报), 2006, 3(6): 46-49.
- [21] Qiao Hongxia(乔红霞), He Zhongmao(何忠茂), Liu Cuilan(刘翠兰). 粉煤灰混凝土在硫酸盐环境中的动弹性模量研究[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*(粉煤灰综合利用), 2006(1): 6-8.
- [22] Qiao Hongxia(乔红霞), Zhou Mingru(周茗如), He Zhongmao(何忠茂), *et al.* 硫酸盐环境中混凝土的性能研究[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*(应用基础与工程科学学报), 2009, 17(1): 77-83.
- [23] Yu Zhenxin(余振新), Gao Jianming(高建明), Song Lu-guang(宋鲁光), *et al.* 荷载-干湿交替-硫酸盐耦合作用下混凝土损伤过程[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*(东南大学学报(自然科学版)), 2012, 42(3): 487-491.
- [24] Jin Zuquan(金祖权), Guo Xuewu(郭学武), Hou Baorong(侯保荣), *et al.* 矿渣混凝土硫酸盐腐蚀研究[J]. *Journal of Qingdao Technological University*(青岛理工大学学报), 2009, 30(4): 75-78.
- [25] Cao Pengfei(曹鹏飞), Wu Bin(吴斌), Liu Guanguo(刘冠国), *et al.* 临海地区混凝土结构抗硫酸盐干湿循环侵蚀试验研究[J]. *Special Structures*(特种结构), 2012, 29(6): 1-4.
- [26] Huang Weirong(黄维蓉), Yang Debin(杨德斌), Zhou Jianing(周建庭), *et al.* 复掺技术对混凝土抗硫酸盐干湿循环性能的影响[J]. *Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science)*(重庆交通大学学报(自然科学版)), 2012, 31(2): 243-246.
- [27] Sahmaran M, Erdem T K, Yaman I O. Sulfate Resistance of Plain and Blended Cements Exposed to Wetting-Drying and Heating-Cooling Environments[J]. *Construction and Building Materials*, 2007, 21: 1 771-1 778.
- [28] Yang Qianrong(杨钱荣), Tang Yue(唐越), Hua Xia(华夏). 掺复合掺合料混凝土抗硫酸盐侵蚀性能研究[J]. *Fly Ash Comprehensive Utilization*(粉煤灰综合利用), 2010(2): 3-6.
- [29] Yuan Xiaolou(袁晓露), Li Beixing(李北星), Cui Gong(崔巩), *et al.* 干湿循环-硫酸盐侵蚀下混凝土损伤机理的分析[J]. *Highway*(公路), 2009(2): 163-166.