

盐湖卤水侵蚀喷射混凝土宏观性能及微观结构

牛荻涛^{1,2,3}, 袁 斌¹, 王家滨¹

(1. 西安建筑科技大学 土木工程学院, 陕西 西安 710055; 2. 西部绿色建筑重点实验室协同创新中心, 陕西 西安 710055;
3. 结构工程与抗震教育部重点实验室, 陕西 西安 710055)

摘要:通过对普通混凝土、普通喷射混凝土和钢纤维喷射混凝土的质量损失率、相对抗压强度、相对动弹性模量、损伤层厚度、X 射线衍射分析(XRD)和扫描电子显微镜(SEM)结果进行分析,研究了(干湿循环+盐湖卤水侵蚀)共同作用下喷射混凝土的宏观性能和微观结构。结果表明:宏观性能方面,质量损失率、相对抗压强度和相对动弹性模量均呈现出先增长后下降的趋势,损伤层厚度为普通混凝土<普通喷射混凝土<钢纤维喷射混凝土;微观结构方面,喷射混凝土中发现的侵蚀产物硅灰石膏,其 CO_3^{2-} 来源于混凝土内部分含碳酸盐骨料或干燥过程中发生的碳化,由于侵蚀前普通混凝土和普通喷射混凝土存在很多毛细孔,导致其比受钢纤维约束而较为致密的钢纤维喷射混凝土更易遭受盐湖卤水的侵蚀。

关键词:喷射混凝土;干湿循环;盐湖卤水侵蚀;微观结构

中图分类号: TU528.53

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2017)05-0617-08

Macro performance and microstructure of shotcrete under salt lake brine erosion

NIU Ditao^{1,2,3}, YUAN Bin¹, WANG Jiabin¹

(1. Department of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;
2. Collaborative Innovation Center of Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an 710055, China;
3. Key Laboratory of Structural Engineering and Seismic of Ministry of Education, Xi'an 710055, China)

Abstract: The ordinary concrete, ordinary shotcrete and steel fiber shotcrete weight loss ratio, relative compressive strength, relative dynamic elastic modulus, thickness of damaged layer, X-ray diffraction analysis (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) results are analyzed to study the shotcrete micro performance and microstructure under the combined action of (salt lake brine erosion and wetting-drying cycles). The results show that in the macro properties, weight loss ratio, relative compressive strength and relative dynamic elastic modulus showed increase first and then decrease trend and the thickness of damaged layer for ordinary concrete < ordinary shotcrete < steel fiber shotcrete; In the microstructure, shotcrete corrosion products of thaumasite were found, and the sources of CO_3^{2-} is derived from the part containing carbonate aggregate or carbonization in the process of drying of concrete, Because ordinary concrete and shotcrete has many pores before erosion, resulting in them more vulnerability to the salt lake brine erosion than steel fiber shotcrete constrained by the steel fiber.

Key words: shotcrete; wetting-drying cycles; salt lake brine erosion; microstructure

喷射混凝土真正意义上于 1930 年在英国的 Mersey 隧道中首次使用,随后在工程领域逐步得到发展^[1-5]。喷射混凝土与一般混凝土不同,它是借助喷射机械将拌合料高速喷射到受喷面(如岩石壁面、基坑边坡、建筑结构等)上凝结硬化而成的一种混凝土^[6-7]。随着技术的不断提高和研究的逐渐深入,喷射混凝土在性能上有了很大的提升,广泛应用于隧道、公路桥涵等基础建设中。

目前,国内外专家对喷射混凝土进行了大量

研究。掺合料及外加剂方面,不少学者研究了矿物掺合料、纤维和速凝剂等对喷射混凝土性能的影响^[8-13];测试方法方面,Stackelberg D 等^[14]提出了通过测量试件内部的电阻率和温度发展来预测喷射混凝土的硬化和强度发展的新方法,Adam H 等^[15]采用有损和无损的测试方法对喷射混凝土基本性能进行评估;力学性能方面, Bernard E S^[16-18]分析了早龄期钢纤维喷射混凝土的抗载、抗冲切和开裂后性能;侵蚀劣化方面, Niu D T

等^[19]研究了喷射混凝土在干湿循环与硫酸盐侵蚀共同作用下的劣化机理, Usman M 等^[20]和 Lee S 等^[21]研究了多种因素作用下喷射混凝土的长期耐久性; 微观结构方面, Chen J X 等^[22]研究了冻融环境下喷射混凝土的微观结构损伤, Wang J B 等^[23]研究了不同水化龄期下喷射混凝土的微观结构变化. 然而, 尚未有关于喷射混凝土在(干湿循环+盐湖卤水侵蚀)共同作用下的基本性能及微观结构方面的研究.

本文对喷射混凝土在(干湿循环+盐湖卤水侵蚀)共同作用下的宏观性能和微观结构进行了试验研究, 采用质量损失率、抗压强度、动弹性模量和损伤层厚度来评价喷射混凝土的宏观性能, 采用 X 射线衍射和扫描电子显微镜对微观结构进行分析. 通过对宏观与微观结合研究, 将喷射混凝土宏观劣化过程在微观上更为详细准确的展示出来. 试验过程中, 对比分析了普通混凝土和喷射混凝土

土的异同, 同时还考虑并分析了钢纤维的掺加对喷射混凝土在(干湿循环+盐湖卤水侵蚀)共同作用下的宏观性能和微观结构的影响.

1 实验

1.1 原料

水泥: P·O 42.5 普通硅酸盐水泥.

粉煤灰: II 级粉煤灰.

速凝剂: 低碱速凝剂.

减水剂: 聚羧酸系高性能减水剂.

细集料: 细河砂.

粗集料: 连续级配瓜子石.

钢纤维: 冷轧剪切波浪形钢纤维.

拌合水: 自来水.

水泥、粉煤灰及速凝剂的化学成分见表 1, 混凝土配合比见表 2, 其劈裂抗拉强度及抗压强度见表 3.

表 1 水泥、粉煤灰及速凝剂的化学组成

Tab. 1 Chemical composition of cement, fly ash and accelerator

材料	组成 $w/\%$							
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl
水泥	57.57	19.50	6.45	3.08	1.21	0.25	1.35	0.028
粉煤灰	5.62	43.64	25.38	4.19	0.84	0.91	1.36	0.011
速凝剂	32.72	—	18.83	4.17	0.64	9.29	1.73	0.004

注: w —质量分数.

表 2 混凝土配合比

Tab. 2 Mix proportion of concrete

试件编号	W/B	配合比 $/(kg \cdot m^{-3})$							
		水泥	粉煤灰	水	沙	石	钢纤维	减水剂	速凝剂
MA2	0.43	411	46	197	892	892	—	4.56	—
A2	0.43	411	46	197	892	892	—	4.56	18.24
C2	0.43	411	46	197	892	892	50	4.56	18.24

注: MA2—普通混凝土; A2—普通喷射混凝土; C2—钢纤维喷射混凝土; W/B—水胶比.

表 3 试件力学性能

Tab. 3 Mechanical properties of specimens

试件编号	劈裂抗拉强度/MPa			抗压强度/MPa		
	7 d	28 d	90 d	7 d	28 d	90 d
MA2	—	3.68	4.52	—	40.14	57.34
A2	2.54	3.18	4.14	23.49	28.78	41.63
C2	3.01	3.81	4.68	33.19	40.19	52.24

1.2 方法

1.2.1 试件制作

喷射混凝土试件通过隧道施工现场喷射混

凝土大板进行制作, 切割成所需的棱柱体试件和标准立方体试件, 而后置于标准养护室进行养护.

1.2.2 盐湖卤水侵蚀试验模拟

盐湖卤水成分分别为 5% Na_2SO_4 、5% MgSO_4 和 3.5% NaCl , 采用干湿循环方式进行试验. 试验过程中, 一次干湿循环历时 24 h, 分别为盐湖卤水浸泡 16 h, 鼓风干燥箱 60 °C 烘干 8 h. 分别在干湿循环 15 次、30 次、60 次、90 次、120 次及 150 次进行相应的数据采集.

1.3 测试

1.3.1 质量损失率与相对抗压强度

试件质量采用余姚金诺 TD 10000 型电子天平称量, 精度 0.1 g; 试件抗压强度测定采用无锡建议 TYA-2000 型电液式压力试验机, 精度 0.01 kN. 每个周期结束后, 对立方体试件进行质量称量和抗压强度测量, 用相对抗压强度(即受侵蚀试件的抗压强度与未受侵蚀试件初始强度之比)和质量损失率(即侵蚀前试件初始质量减去侵蚀后试件质量并与初始质量之比)表征试件劣化程度.

1.3.2 相对动弹性模量与损伤层厚度

试件超声波声时采用北京康科瑞 NM-4B 型非金属检测仪测定, 精度 0.2 μs . 每个周期结束后, 对棱柱体试件采用对测法测定超声波声时(见图 1(a)), 对棱柱体试件采用平测法测定损伤层厚度(见图 1(b)), 用相对动弹性模量(即侵蚀前试件的初始超声波声时与侵蚀后试件超声波声时比值的平方)与损伤层厚度对试件劣化程度进行表征.

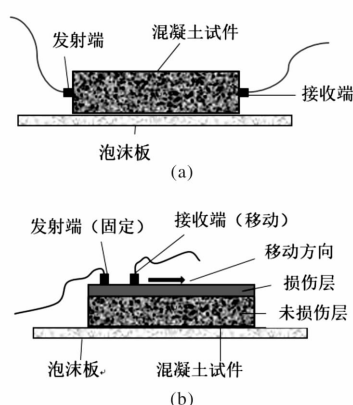


图1 超声波声时及损伤层厚度测量示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the ultrasonic wave transit time and the thickness of the damaged layer measurements

1.3.3 XRD 分析

相应侵蚀周期结束后, 将试件烘 48 h, 随后采用混凝土单面打磨机分层取粉, 距混凝土表层 20 mm 内每 2 mm 为一层进行取粉, 用公称直径为 0.16 mm 的方孔筛进行粉末的筛选, 将过筛的粉末置于 105 ± 5 °C 烘箱中烘 2 h, 取出后放入干燥器

冷却至室温备用. 采用日本理学 D/MAX2400 型 X 射线衍射仪测定侵蚀试件产物 XRD 图谱, 并用 Jade 6.5 物相分析软件分析其物相组成, 扫描范围为 $5 \sim 45^\circ$.

1.3.4 SEM 分析

待强度测试后将试件破碎, 选取试件表面附近浆体部分的薄片状混凝土, 放入无水乙醇中以终止水化, 制备试验用样品, 采用日本日立产 S4800 型冷场发射扫描电子显微镜(FESEM-EDS)观察试件侵蚀后的微观形貌变化.

2 结果与讨论

2.1 盐湖卤水侵蚀宏观性能

2.1.1 质量损失率与相对抗压强度

图 2 为试件质量损失率及相对抗压强度随侵蚀龄期的变化. 图 2(a) 为试件质量损失率随侵蚀龄期的变化, 由图可知, 在侵蚀 120 d 以前, MA2、A2 和 C2 质量损失率均为负, 但均呈下降趋势, 各组混凝土质量增长至最高时, 其净增长分别为 0.94%、1.70% 和 1.21%. 一方面, 反映了在侵蚀初期盐物理结晶(占主导)和侵蚀性产物对混凝土内部孔隙的填充作用比较明显; 另一方面, 反映了混凝土内部有害孔隙数量由多至少依次为 A2、C2 和 MA2, 说明 A2、C2 由于其施工方式不同, 其在施工过程中引入大量的空气使内部有害孔隙数量较 MA2 多. 同时, 发现 MA2 质量损失速率最快, 在侵蚀 150 d 时其质量损失率为正, 而 C2 的质量损失比较平缓, 且其质量净增长还高达 1.11%.

图 2(b) 为试件相对抗压强度随侵蚀龄期的变化, 从图中可看出, 各试件在侵蚀初期抗压强度均表现出一定的增长, 而后呈下降趋势, 与图 2(a) 中质量损失率变化相一致, 抗压强度增长至最高时其净增长分别为 3.07%、5.48% 和 3.86%. 在侵蚀 150 d 时, 抗压强度由大至小分别为 C2、A2 和 MA2, 表明 C2 的抗盐湖卤水侵蚀性能最好, 与图 2(a) 中 C2 相印证.

2.1.2 相对动弹性模量与损伤层厚度

图 3 为试件相对动弹性模量与损伤层厚度随侵蚀龄期的变化. 图 3(a) 为试件相对动弹性模量随侵蚀龄期的变化, 由图可知, MA2、A2 和 C2 在侵蚀初期相对动弹性模量与质量损失率及相对抗压强度变化趋势一致, 也呈现出先增长后下降; 且 MA2、A2 和 C2 的增长期随着侵蚀龄期增加而呈现出相应延长, 增长达到的最高值分别为

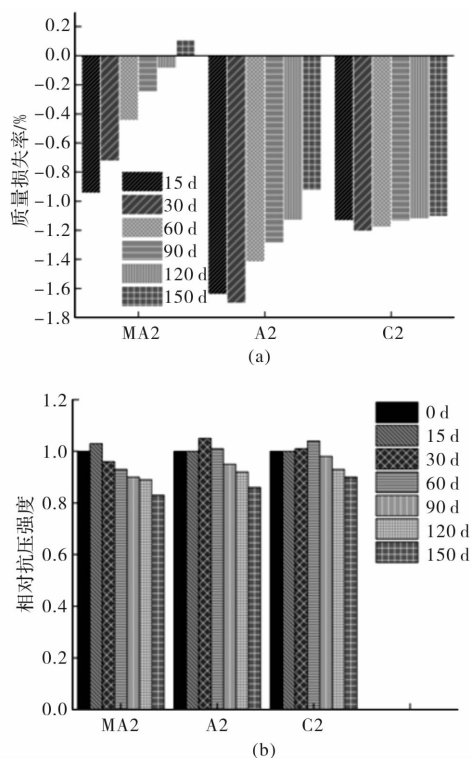


图 2 试件质量损失率及抗压强度随侵蚀龄期的变化

Fig. 2 The variation of weight loss ratio and relative compressive strength of specimen with attacked age

100.82%、101.94%和 101.98%；C2 在下降过程中最缓慢，在侵蚀 150d 时其仍然是三者中最高，与图 2 分析相印证。

图 3(b)为试件损伤层厚度随侵蚀龄期的变化，由图明显可知，在侵蚀初期，MA2、A2 和 C2 的损伤层厚度分别为 1.5 mm、0 mm 和 0 mm，A2 和 C2 分别在侵蚀 30 d 和 60 d 时才出现损伤层，说明 A2 和 C2 的初期的抗盐湖卤水侵蚀性能优于 MA2；随着侵蚀龄期增加，MA2、A2 和 C2 的损伤层厚度都分别不同程度加深，期间 MA2 的损伤层厚度增长最为迅速，C2 增长则最为缓慢，表明 MA2 在侵蚀初期侵蚀较轻，在后期则表现出侵蚀加速现象；而在侵蚀 150 d 时，MA2 和 A2 的损伤层厚度分别为 C2 的 3.45 倍和 2.83 倍，说明在长期侵蚀下 C2 的抗盐湖卤水侵蚀性能最好，这与图 2 及图 3(a)的结论一致。

综合以上分析可知，在宏观性能上，普通混凝土虽然其内部有害孔隙数量上相对较少，侵蚀初期表现出不错的抗盐湖卤水侵蚀性能，但后期侵蚀加速，劣化最为严重；普通喷射混凝土内部有害孔隙数量最多，在侵蚀初期最易受到侵蚀，后期侵蚀速度也加快，劣化较为严重；而钢纤维喷射混凝土，由于有钢纤维的掺加，钢纤维对混凝土起到增韧阻裂的作用，而对其产生较强的约束，因此无论是相对抗压强度还是相对动弹性模

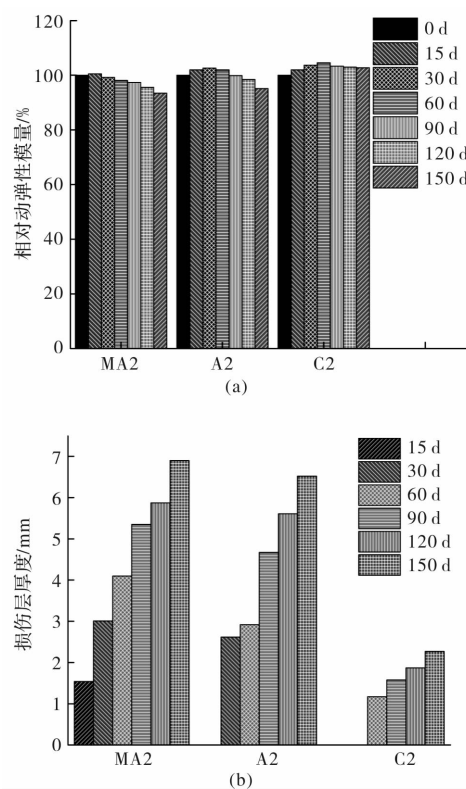


图 3 试件相对动弹性模量与损伤层厚度随侵蚀龄期的变化

Fig. 3 The variation of relative dynamic elastic modulus and thickness of damaged layer of specimen with attacked age

量，都有相对较长的增长期，且增长幅度最大，而质量损失率和损伤层厚度均较小。总体来看，钢纤维喷射混凝土的抗盐湖卤水侵蚀性能在三者中最好。

2.2 盐湖卤水侵蚀微观结构

2.2.1 XRD 分析

图 4 为不同的侵蚀龄期下试件表层 XRD 分析。结果表明，除来自砂石的石英(SiO_2)和钠长石($\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$)以外，MA2 在未受侵蚀时(图 4(a))，还含有少量的方解石(CaCO_3)、AFt($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 31.7\text{H}_2\text{O}$)、高岭石($2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、CH、硅酸三钙(Ca_3SiO_5)和硅灰石(CaSiO_3)。在侵蚀 60 d 后(图 4(b))，还含有少量的方解石、硬石膏(CaSO_4)、石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)、AFt、CH、五水硫酸镁($\text{MgSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)和羟基硫酸镁($\text{MgSO}_4 \cdot 2\text{Mg}(\text{OH})_2$)，在侵蚀 150 d 后(图 4(c))，还含有少量的方解石、硬石膏、石膏、AFt、高岭石、白钠镁矾($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)、五水硫酸镁和羟基硫酸镁，同时还有微量的 NaCl 和 MgCl_2 。

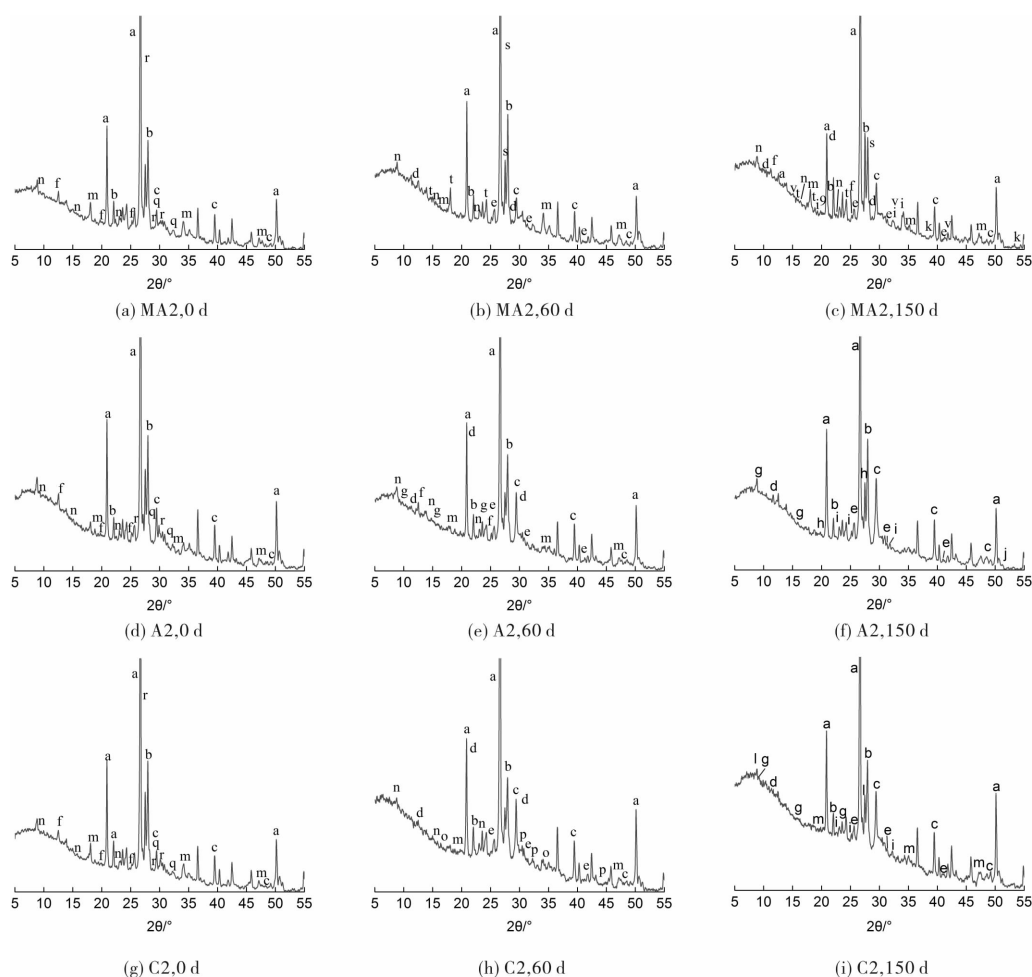
A2 在未受侵蚀时(图 4(d))，还存在少量的方解石、AFt、高岭石、CH、硅酸三钙和硅灰石，在侵蚀 60 d 后(图 4(e))，还含有少量的方解石、硬石膏、石膏、AFt、CH、高岭石、硅灰石膏

($\text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$), 在侵蚀 150 d 后(图 4(f)), 还含有少量的方解石、硬石膏、石膏、硅灰石膏、白钠镁矾、白云石($\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$)和微量的无水芒硝(Na_2SO_4).

C2 在未受侵蚀时(图 4(g)), 还存在少量的方解石、AFt、高岭石、CH、硅酸三钙和硅灰石, 在侵蚀 60 d 后(图 4(h)), 还含有少量的方解石、硬石膏、石膏、AFt、CH、硅酸二钙(Ca_2SiO_4)、莫来石($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), 在侵蚀 150 d 后(图 4(i)), 还含有少量的方解石、硬石膏、石膏、CH、硅灰石膏、水镁石($\text{Mg}(\text{OH})_2$)和硫代硫酸钠($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 0.6667\text{H}_2\text{O}$), 微量的无水芒硝.

在以上 XRD 分析中, 未受侵蚀时, MA2、A2 和 C2 的矿物组分均一致; 在侵蚀 60 d 后,

MA2 新生成了五水合硫酸镁和碱式硫酸镁, A2 新生成了高岭石和硅灰石膏(CO_3^{2-} 来源于部分含碳酸盐骨料或在干燥过程中发生的碳化, 而其在常温下形成与 Crammond N A^[24]的研究相一致), 而 C2 还存在少量的硅酸二钙(说明水泥水化产物还未被完全侵蚀), 同时新生成了莫来石(铝硅酸盐在高温下生成的矿物, 是 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 系中在常压下唯一稳定的二元化合物, 天然的莫来石非常少, 可能在干湿交替中温度较高时形成); 在侵蚀 150 d 后, 混凝土中出现了微量 NaCl 、 MgCl_2 及无水芒硝, 表明侵蚀后期开始出现物理结晶侵蚀, 而 C2 中还发现了硫代硫酸钠(表明碱金属 Na^+ 参与了化学侵蚀).



a—石英; b—钠长石; c—方解石; d—石膏; e—硬石膏; f—高岭石; g—硅灰石膏; h—白钠镁矾; i—无水芒硝; j—白云石; k—水镁石; l—硫代硫酸钠; m—CH; n—AFt; o—莫来石; p—硅酸二钙; q—硅酸三钙; r—硅酸钙; s—羟基硫酸镁; t—五水硫酸镁; u— NaCl ; v— MgCl_2 .

图4 不同的侵蚀龄期下试件表层 XRD 谱分析

Fig. 4 XRD patterns analysis of surface for layer specimens at different attacked age

2.2.2 SEM 分析

图 5 为不同的侵蚀龄期下试件表层 SEM 分析. 由图 5(a)可见, MA2 未受侵蚀时的微观结构比较疏松, 存在较多的微小孔隙, 由于有足够的

发育空间, CSH 凝胶以纤维状为主, 同时还有很多的六方板状 CH 晶体(尺寸约为 $1\sim2\ \mu\text{m}$)及少量的针棒状 AFt 晶体, 能看到由于在养护过程中发生了碳化而形成的 CaCO_3 结晶体; 图 5(b)为 MA2

侵蚀 60 d 的微观形貌, CSH 凝胶和 CH 晶体遭受侵蚀, 孔隙变大(孔径约为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$), 孔隙中充满了穿插于网状 CSH 中的针棒状 AFt 晶体; MA2 侵蚀 150 d 时(见图 5(c)), 出现很多相互连通的大孔隙, CSH 凝胶和 CH 晶体已被完全侵蚀, 结构极为疏松。

2.2.2 SEM 分析

图 5 为不同的侵蚀龄期下试件表层 SEM 分析。由图 5(a)可见, MA2 未受侵蚀时的微观结构比较疏松, 存在较多的微小孔隙, 由于有足够的

发育空间, CSH 凝胶以纤维状为主, 同时还有很多的六方板状 CH 晶体(尺寸约为 $1\sim 2\ \mu\text{m}$)及少量的针棒状 AFt 晶体, 能看到由于在养护过程中发生了碳化而形成的 CaCO_3 结晶体; 图 5(b)为 MA2 侵蚀 60 d 的微观形貌, CSH 凝胶和 CH 晶体遭受侵蚀, 孔隙变大(孔径约为 $2\sim 5\ \mu\text{m}$), 孔隙中充满了穿插于网状 CSH 中的针棒状 AFt 晶体; MA2 侵蚀 150 d 时(见图 5(c)), 出现很多相互连通的大孔隙, CSH 凝胶和 CH 晶体已被完全侵蚀, 结构极为疏松。

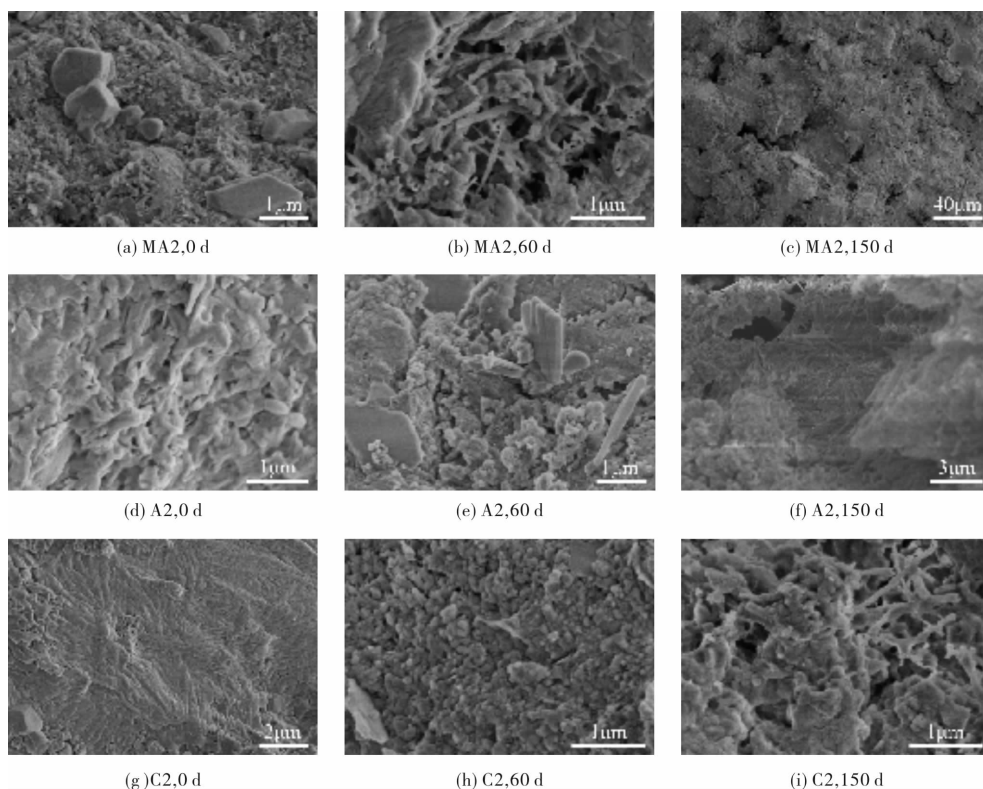


图 5 不同的侵蚀龄期下试件表层 SEM 分析

Fig. 5 SEM analysis of surface for layer specimens at different attacked age

由图 5(d)可见, A2 未受侵蚀时的微观结构依然比较疏松, 也存在较多的微小孔隙, CSH 凝胶由颗粒堆积而成, 未发现 CH 晶体, 表明晶体尺寸较小的 CH 很容易淹没在 CSH 凝胶中; 图 5(e)为 A2 侵蚀 60 d 的微观形貌, 可见在粒状 CSH 凝胶间的 CH 被溶解形成了柱状石膏并留下较大孔隙, 还有一些板状 CH 晶体, 及 CH 晶体受侵蚀而在其上形成的颗粒状石膏, 相互连通的孔隙加速了盐湖卤水的渗透和侵蚀; A2 侵蚀 150 d 时(见图 5(f)), 孔隙的孔径更大, 已观察不到 CSH 凝胶和 CH 晶体, 孔隙内发现发育良好的柱状硅灰石膏。

由图 5(g)可见, C2 未受侵蚀时的微观结构最为致密, 由及其细小的粒子组成的 CSH 凝胶将 AFt 及 CH 晶体包裹起来, 基本上看不到孔隙的存在, 说明钢纤维的掺加对微观结构有很好的约束

作用; 图 5(h)为 C2 侵蚀 60 d 的微观形貌, 可见 CSH 凝胶主要以小颗粒状存在, 粒状石膏生长在 CH 表面, 同时可观察到一些细小孔隙; C2 侵蚀 150 d 时(见图 5(i)), 白色针状的硅灰石膏填充在 CSH 凝胶间的 CH 晶体溶解而形成的大孔隙中, 孔隙周边存在粒状石膏。

综合以上 SEM 分析, 侵蚀前在微观结构上, MA2 和 A2 比较疏松并存在很多的毛细孔, 随着侵蚀的进行, 毛细孔孔径扩大并与膨胀性产物对混凝土造成的膨胀裂缝相互连通, 为盐湖卤水的进入创造了通道, 使侵蚀速率逐渐加快; 而 C2 在钢纤维约束下伴随着未水化水泥和粉煤灰的继续水化, 形成由大量微小 CSH 颗粒组成的致密结构, 原本存在水化产物间的大量毛细孔已完全观察不到, 从而使 C2 在长期侵蚀中侵蚀速率较慢。

3 结论

(1)普通混凝土、普通喷射混凝土和钢纤维喷射混凝土在盐湖卤水侵蚀初期质量损失率、相对抗压强度和相对动弹性模量均表现出一定的增长,而后随侵蚀龄期推移呈现下降趋势,损伤层厚度均随侵蚀龄期推移逐渐变大,整个龄期中钢纤维喷射混凝土损伤层厚度最小且增长最为缓慢。

(2)普通混凝土、普通喷射混凝土和钢纤维喷射混凝土由于存在部分含碳酸盐骨料或在烘干过程中发生碳化,从而为盐湖卤水侵蚀中硅灰石膏的形成提供了 CO_3^{2-} 的来源;三种混凝土均发生了碳酸盐、硫酸盐、镁盐的化学侵蚀和盐湖卤水中盐的物理结晶侵蚀。

(3)未受侵蚀时,普通混凝土和普通喷射混凝土的微观结构中毛细孔较多,侵蚀过程中,普通混凝土和普通喷射混凝土的劣化速度逐渐加快;而钢纤维喷射混凝土在钢纤维的约束作用下劣化速度缓慢得多,在盐湖卤水长期作用下抗侵蚀性能最好。

参考文献 References

- [1] SONG H W, LU S M. Repair of a deep-mine permanent access tunnel using bolt, mesh and shotcrete[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2001, 16(3): 235-240.
- [2] LIU H Y, Small J C, Carter J P. Full 3D modelling for effects of tunnelling on existing support systems in the Sydney re-gion[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(4): 399-420.
- [3] Ahmed Lamis, Ansell Anders. Vibration vulnerability of shotcrete on tunnel walls during construction blasting[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 42: 105-111.
- [4] 宋战平, 刘京, 吴焕通, 等. 长陡斜井钢纤维喷射混凝土单层衬砌试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2013, 45(3): 348-355.
SONG Zhanping, LIU Jing, WU Huantong, et al. Experimental research on single-layer tunnel lining of steel fiber shotcrete and the application in motenlin deviated well[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology(Natural Science Edition), 2013, 45(3): 348-355.
- [5] 杨富民, 孙成晓, 仇鹏, 等. 高强喷射混凝土在铁路隧道中的应用研究[J]. 铁道建筑, 2015 (10): 111-113, 131.
YANG Fumin, SUN Chengxiao, QIU Peng, et al. Research on application of high strength shotcrete in railway tunnels[J]. Railway Engineering, 2015 (10): 111-113, 131.
- [6] Thomas Alun. Sprayed concrete lined tunnel[M]. New York: Taylor & Francis, 2012.
- [7] GARY B H. Practical tunnel construction[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 2013.
- [8] 胡红梅, 马保国, 钱刚. 影响地下隧道衬砌混凝土抗蚀性因素的优化设计[J]. 硅酸盐学报, 2008, 36(1): 99-104.
HU Hongmei, MA Baoguo, QIAN Gang. Optimum designs of influence factors for the corrosion resistance of concrete lining for underground tunnels[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2008, 36(1): 99-104.
- [9] JENG Fushu, LIN Minglang, YUAN Shihche. Performance of toughness indices for steel fiber reinforced shotcrete[J]. Railway Engineering, 2002, (17): 69-82.
- [10] Sahranavard Hassan, Aghanoori Reza. Use of polymer fiber (HPP) reinforced shotcrete instead of final lining in khomary tunnel[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21(3/4): 342-350.
- [11] YUN Kyongku, CHOI Sungyong, JUANG Heumyeon. Effects of admixtures on the rheological properties of high-performance wet-mix shotcrete mixtures[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 194-202.
- [12] MALTESE C, PISTOLESI C, BRAVO A, et al. A case history: Effect of moisture on the setting behaviour of a Portland cement reacting with an alkali-free accelerator[J]. Cement and Concrete Research, 2007, 37(6): 856-865.
- [13] 杨富民, 孙成晓, 仇鹏, 等. 液体速凝剂在铁路隧道喷射混凝土中的应用研究[J]. 铁道建筑, 2015 (9): 74-77.
YANG Fumin, SUN Chengxiao, QIU Peng, et al. Study on application of liquid accelerating agent in shotcrete of railway tunnels[J]. Railway Engineering, 2015 (9): 74-77.
- [14] Adam H, Jiri B, Rudolf H. Comparison of properties of shotcrete tested using destructive and non-destructive method[J]. Procedia Engineering, 2013, 65: 63-68.
- [15] Stackelberg David, Wilge Boris, Boiko Shimon. Principles of Monitoring Hardening and Strengthening of Shotcrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(5): 568-573.
- [16] Bernard Erik Stefan. Age-dependent changes in post-crack performance of fibre reinforced shotcrete linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2015, 49: 241-248.
- [17] Bernard Erik Stefan. Early age load resistance of fibre reinforced shotcrete linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23: 451-460.
- [18] Bernard Erik Stefan. Influence of geometric factor on the punching load resistance of early age fibre reinforced shotcrete linings[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2011, 26: 541-547.
- [19] NIU Ditao, WANG Youde, MA Rui, et al. Experiment study on the failure mechanism of dry-mix shotcrete under the combined actions of sulfate attack and drying-wetting cycles[J]. Construction and Building Materials, 2015, 81: 74-80.
- [20] Usman Muhammad, Galler Robert. Long term deterioration of lining in tunnels[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2013, 64: 84-89.
- [21] LEE Sangpil, KIM Donghyun, RYU Jonghyun, et al. An experimental study on the durability of high performance shotcrete for permanent tunnel support[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2006, 21: 431-436.
- [22] CHEN Jianxun, DENG Xianghui, LUO Yanbin, et al. Investigation of microstructural damage in shotcrete under a freeze thaw environment[J]. Construction and Building Materials, 2015, 83: 275-282.
- [23] WANG Jiabin, NIU Ditao, DING Sha, et al. Microstructure, permeability and mechanical properties of accelerated shotcrete at different curing age[J]. Construction and Building Materials, 2015, 78: 203-216.
- [24] Crammond N A. Thaumate form of sulfate attack in the UK[J]. Cement and Concrete Composites, 2003, 25(8): 809-818.

(编辑 沈波)