

引用本文:蒋建华,林明益,裘佳琪.抗裂型外加剂对混凝土硫酸盐腐蚀行为的影响[J].建筑科学与工程学报,2021,38(2):108-116.  
JIANG Jian-hua, LIN Ming-yi, QIU Jia-qi. Effect of Anti-cracking Admixture on Sulfate Corrosion Behavior of Concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2021, 38(2): 108-116.

DOI:10.19815/j.jace.2020.07077

# 抗裂型外加剂对混凝土硫酸盐腐蚀行为的影响

蒋建华,林明益,裘佳琪

(河海大学 土木与交通学院,江苏 南京 210098)

**摘要:**为了解抗裂型外加剂对混凝土耐久性能的影响,考虑不同外加剂种类和掺量,分析了混凝土受硫酸盐侵蚀后质量、腐蚀深度、抗压强度随腐蚀龄期的变化,并通过吸水特性试验研究了混凝土硫酸盐腐蚀损伤程度的差异。结果表明:掺抗裂外加剂混凝土受硫酸盐腐蚀后质量变化可分为 3 个阶段,即增长、稳定及显著下降阶段;掺不同抗裂外加剂混凝土试件的腐蚀深度变化规律不同,长腐蚀龄期下,相同掺量的 HME-V 抗裂剂相较于 UEA 膨胀剂具有更优异的抗硫酸盐腐蚀能力;掺 UEA 膨胀剂的混凝土 90 d 后出现膨胀破坏,导致腐蚀速率加快;掺 HME-V 抗裂剂的混凝土未出现膨胀破坏,始终保持均匀的腐蚀速率;外加剂掺量相同时,掺 HME-V 抗裂剂混凝土腐蚀后强度均大于掺 UEA 混凝土;腐蚀层结构较未腐蚀层相对疏松,吸水量大;表层吸水量随着腐蚀程度的增加而增大;掺 HME-V 抗裂剂混凝土表层受腐蚀损伤程度小于掺 UEA 膨胀剂混凝土;总体而言,相同外加剂掺量的 HME-V 抗裂剂相较于 UEA 膨胀剂具有更优异的抗硫酸盐腐蚀能力。

**关键词:**混凝土;抗裂型外加剂;硫酸盐腐蚀;质量变化;腐蚀深度;吸水特性

中图分类号:TU503

文献标志码:A

文章编号:1673-2049(2021)02-0108-09

## Effect of Anti-cracking Admixture on Sulfate Corrosion Behavior of Concrete

JIANG Jian-hua, LIN Ming-yi, QIU Jia-qi

(College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

**Abstract:** In order to understand the effect of anti-cracking admixture on the durability of concrete, considering the different contents and types of anti-cracking admixture, the changes of concrete quality, corrosion depth and compressive strength with corrosion age after sulfate corrosion were studied, and the difference of sulfate corrosion damage degree of concrete was studied by water absorption test. The results show that the quality change after corrosion can be divided into three stages, namely, growth, stability and significant decline. The change rules of corrosion depth of concrete specimens with different anti-crack additives are different. Compared with UEA expansive agent, the HME-V anti-cracking agent with the same content has better sulfate corrosion resistance under long corrosion age. The concrete with UEA expansive agent appears expansion failure after 90 d, which leads to the accelerated corrosion rate. The concrete with HME-V anti-cracking agent has no expansion failure, and keeps the same corrosion rate. At

收稿日期:2020-07-16

基金项目:国家自然科学基金项目(51408192);中央高校基本科研业务费专项资金项目(B200202232)

作者简介:蒋建华(1982-),男,重庆忠县人,副教授,工学博士,E-mail:jhjiang82@126.com。

the same content of admixture, the strength of concrete with HME-V anti-cracking agent is higher than that with UEA expansive agent after sulfate corrosion. The water absorption of the corrosion layer is large due to the looser structure compared with the non-corrosion layer, and the water absorption of the surface layer increases with the increase of the corrosion degree. The surface corrosion damage degree of concrete with HME-V is less than that with UEA expansive agent. In general, HME-V anti-cracking agent with the same amount of admixture have better sulfate corrosion resistance than UEA expansion agent.

**Key words:** concrete; anti-cracking admixture; sulfate corrosion; quality change; corrosion depth; water absorption characteristics

## 0 引 言

中国作为混凝土用量最多且硫酸盐环境分布广泛的国家,硫酸盐侵蚀问题十分突出。在混凝土凝结硬化过程中,混凝土内部不可避免地形成气穴、微孔和微裂缝,在外力或温湿度变化作用下,微裂纹不断扩展至形成宏观裂缝。混凝土裂缝的存在又增加了有害物质进入混凝土内部的途径,这会加剧硫酸盐对混凝土的腐蚀,严重影响混凝土结构的耐久性<sup>[1-2]</sup>。为了解决混凝土早龄期开裂问题,有必要使用抗裂型外加剂<sup>[3-9]</sup>。等杨勇<sup>[10]</sup>研究了超早强外加剂对混凝土耐久性的影响,结果表明超早强外加剂对后期的耐久性无太大影响。杜迎东等<sup>[11]</sup>对复掺外加剂体系对低水胶比混凝土耐久性影响的研究表明,耐久性均随着外加剂掺量的增加先变好后变差。王伟等<sup>[1]</sup>研究发现不同 UEA 掺量的水泥砂浆在硫酸钠溶液中抗蚀系数差别极小,并且基本无明显变化。冯小忠等<sup>[12]</sup>的研究结果表明膨胀剂与磨细矿渣部分取代水泥后显著提高了抗蚀系数,降低了砂浆的膨胀率,缓解了硫酸盐侵蚀后期混凝土质量急剧损失的状况。高培伟等<sup>[13]</sup>发现在碾压混凝土中掺入膨胀剂可略微提高混凝土抗硫酸盐侵蚀能力。现有研究对抗裂型外加剂研究主要集中在外加剂作用效果上,而鲜有不同种类外加剂抗硫酸盐腐蚀效果的对比。

本文针对抗裂型外加剂对混凝土耐久性能的影响,选取 2 类抗裂型外加剂,考虑不同抗裂型外加剂掺量,研究粉煤灰混凝土受硫酸盐侵蚀后宏观性能的改变,并通过腐蚀后吸水特性结果对比混凝土微观损伤程度的差异,探究不同组分的抗裂型外加剂对混凝土抗硫酸盐腐蚀性能的影响。

## 1 试验方案

### 1.1 原材料

水泥为 P. O42.5 普通硅酸盐水泥。试验采用

F 级粉煤灰,细度为 43  $\mu\text{m}$ ,密度为 2.4  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ,水泥与粉煤灰化学成分见表 1。粗骨料为粒径 5~15 mm 的碎石,级配良好。细骨料为河砂(中砂),细度模数为 2.5。

表 1 水泥与粉煤灰化学成分  
Tab. 1 Chemical Composition of Cement and Fly Ash

%					
材料	$\omega(\text{SiO}_2)$	$\omega(\text{Al}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{Fe}_2\text{O}_3)$	$\omega(\text{TiO}_2)$	$\omega(\text{CaO})$
水泥	18.57	5.40	2.84	0.28	52.82
粉煤灰	14.13	5.27	1.55	0.25	32.02
材料	$\omega(\text{MgO})$	$\omega(\text{SO}_3)$	$\omega(\text{K}_2\text{O})$	$\omega(\text{Na}_2\text{O})$	$\omega(\text{LOI})$
水泥	1.16	2.59	0.45	0.20	15.59
粉煤灰	8.61	0.16	0.67	0.13	36.12

注: $\omega(\cdot)$ 为各化学成分质量分数; $\omega(\text{LOI})$ 为烧失量质量分数。

本试验采用 2 种外掺型抗裂剂,分别是 UEA 型膨胀剂、HME-V(温控、防渗)高效抗裂防渗剂。UEA 型膨胀剂以硫铝酸盐为主,通过适度膨胀补偿收缩。HME-V(温控-防渗)高效抗裂防渗剂具有调控水泥水化放热速率、补偿水泥基材料收缩双重作用的水泥基膨胀材料,由水化温升抑制剂与氧化钙类或硫铝酸钙-氧化钙类或氧化镁复合膨胀剂按照一定比例复合。2 种外加剂的外观状态见图 1。

### 1.2 试件设计

试件设计为 100 mm×100 mm×300 mm 棱柱体,水灰比为 0.40,混凝土中粉煤灰掺量(质量分数)为 20%,参照各类型外加剂的适用掺量范围,UEA 型膨胀剂考虑 2%,5% 和 8% 三种掺量,HME-V 的掺量考虑 5%,8% 和 10%,粉煤灰和外加剂均采用等量取代水泥的方式。表 2 为掺入 2 种外加剂的混凝土试件配合比。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 模拟加速腐蚀的试验方法

将用于硫酸盐腐蚀试验的混凝土试件养护至 28 d 龄期后,放入温度(20±3)℃,质量分数 15%

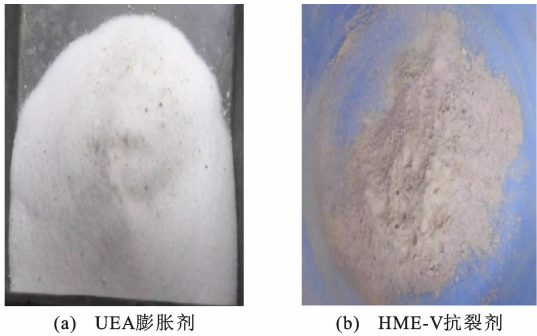


图 1 UEA 膨胀剂与 HME-V 抗裂剂

Fig. 1 UEA Expansive Agent and HME-V Anti-cracking Agent

表 2 混凝土试件配合比

Tab. 2 Mix Proportion of Concrete Specimen

工况 编号	各材料用量/(kg·m <sup>-3</sup> )						
	水	水泥	石	砂	粉煤灰	UEA	HME-V
1	180	351.0	1 165	655	90	9.0	
2		337.5				22.5	
3		324.0				36.0	
4		337.5					22.5
5		324.0					36.0
6		315.0					45.0

的 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 溶液中以全浸泡的方式模拟腐蚀环境。腐蚀详情见图 2。

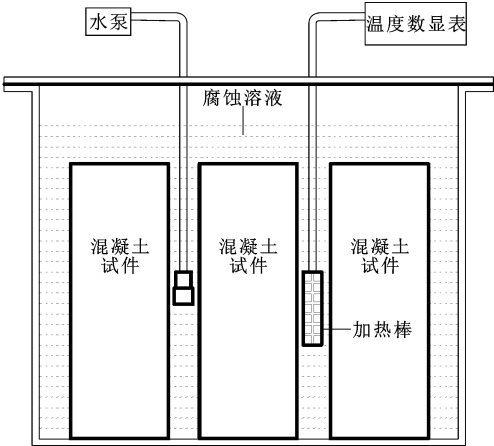


图 2 硫酸盐溶液腐蚀示意图

Fig. 2 Corrosion Diagram of Sulfate Solution

1.3.2 腐蚀后的质量与强度测试

到达腐蚀龄期后,取出试件,用清水冲洗表面,拭去其表面水分,然后将其置于室内(室内温度恒定为 20℃)通风处 24 h,用电子天平称量(精度为 0.1 kg)其质量并记录。

强度测试采用 200 t 微机控制电液伺服万能试验机,根据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2019)进行抗压强度试验。测得的

抗压强度用于对比和研究不同工况下试件力学性能的变化规律。

1.3.3 腐蚀后的无损检测试验方法

本文采用单面平测法测损伤层厚度表征混凝土损伤<sup>[14]</sup>,所用仪器为 ZBL-F800 裂缝综合测试仪,仪器参数如表 3 所示。

表 3 超声检测仪性能指标

Tab. 3 Performance Index of Ultrasonic Detector

参数	参数值
工作频率/kHz	52
声时范围/ $\mu$ s	0.1~1 999.9
声时精度/ $\mu$ s	0.1
换能器直径/mm	40

单面平测法用以检测棱柱体混凝土损伤层厚度,使用时将发射换能器固定于一点,接收换能器以等间距连续变动,以凡士林做耦合剂,将发射换能器置于离边界 50 mm 处,接收换能器按 25,50,75,100,125,150,175,200,225 mm 测距连续测定声时值。通过测试记录的结果绘制出“声时-测距( $t-l$ )”曲线(图 3, $l_i$ , $t_i$  分别为各测点的测距和对应的声时值),得到腐蚀与未腐蚀层的声速,按文献[15],[16]给出的方法计算腐蚀深度。

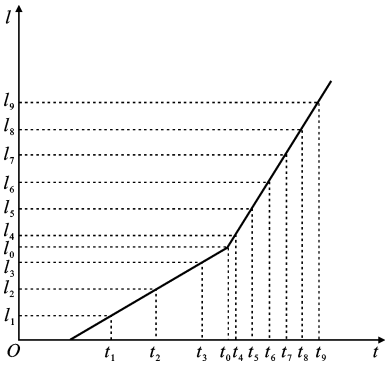


图 3 声时-测距关系曲线

Fig. 3 Sound-time Distance Relation Curve

1.3.4 吸水特性试验方法

取出腐蚀后的棱柱体试件,放入烘箱,恒温 105℃,烘至恒重,留 100 mm×100 mm 的底面作为吸水面,其余各面用铝箔胶带密封,测得各试件初始质量为  $M_0$ ,将试件放入装有清水的养护箱,水位高出试件浸水面约 3 mm(图 4)。质量称重前擦拭试件表面多余水分,每隔 1 h 测试质量  $M(t)$ ,连续测试 7 h 后,将测试时间间隔  $t$  调整至 1 d,直至 7 d 测试龄期。计算间隔  $t$  内的质量差  $\Delta M(t)$ ,得到  $\Delta M(t)-t$  曲线。

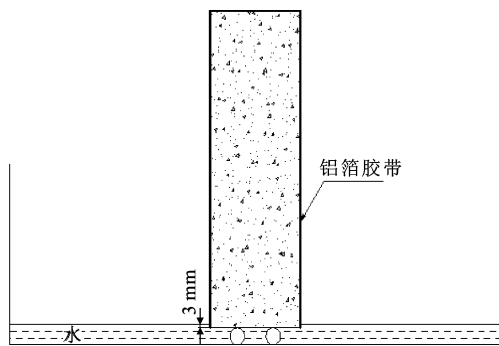


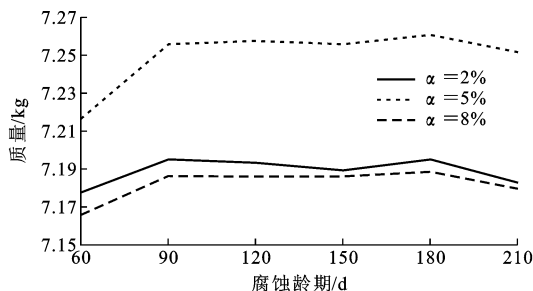
图 4 吸水试验示意图

Fig. 4 Schematic Diagram of Water Absorption Test

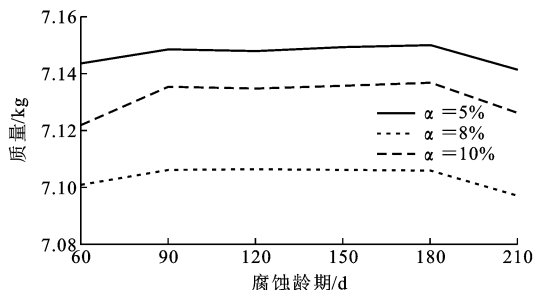
## 2 试验结果与分析

### 2.1 混凝土质量随腐蚀龄期的变化规律

质量作为宏观物理指标直观反映了试件微观结构内部物质的变化情况,是表征混凝土腐蚀损伤程度的重要指标之一。掺加 2 种抗裂型外加剂的混凝土硫酸盐侵蚀后 60~210 d 的质量变化如图 5 所示,其中,  $\alpha$  为外加剂质量分数。



(a) 掺UEA



(b) 掺HME-V

图 5 棱柱体质量随腐蚀龄期的变化

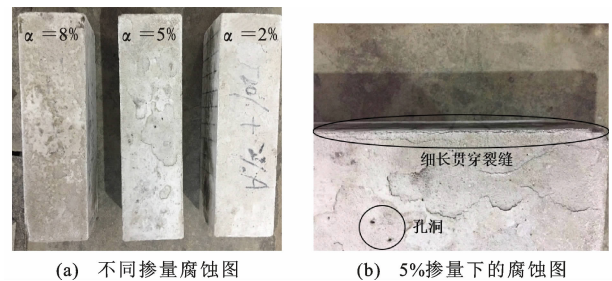
Fig. 5 Variation of Quality of Prism with Corrosion Age

#### 2.1.1 UEA 膨胀剂的影响

图 5(a)表明,试件质量在腐蚀龄期内呈现为动态变化过程。60~90 d 腐蚀龄期内,棱柱体质量呈现较大的增长,2%,5%,8% UEA 膨胀剂掺量下试件质量分别增长 0.24%,0.54%和 0.29%。质量的增加一方面是由于试件吸水,另一方面是由于硫酸根离子侵入内部与水化物 C—S—H 生成钙矾石等

膨胀产物,在本试验设计的高浓度硫酸盐环境下早期质量的增长较为显著。此后由于其膨胀密实作用,离子渗透十分缓慢,质量在较长时间内较为恒定;当腐蚀龄期超过 180 d 时,结构表面轻微剥蚀,混凝土内环境碱度的持续降低导致内部组分溶出,试件质量逐渐减小。

试件表观结构的变化可以定性地反映其总体质量的下降过程及腐蚀程度。腐蚀 210 d 后不同外加剂掺量下棱柱体试件表观特征对比如图 6 所示,混凝土试件表面出现细小孔洞,表层剥蚀现象较为严重,棱柱体试件边缘出现较为明显的细长贯穿裂缝。同时,由于棱角处密实度低于面部,导致棱角受腐蚀程度愈为严重;由于含有粗骨料的部位砂浆层较薄,导致离子更易侵入混凝土内部,膨胀应力导致表层剥落。相较于其余 2 组工况,5%掺量的混凝土试件表面剥蚀十分严重,表面出现较大孔洞,棱边开裂现象十分明显。



(a) 不同掺量腐蚀图

(b) 5%掺量下的腐蚀图

图 6 不同 UEA 掺量的混凝土试件腐蚀后表观特征

Fig. 6 Apparent Characteristics of Concrete Specimens with Different UEA Contents After Sulfate Corrosion

#### 2.1.2 HME-V 抗裂剂的影响

由图 5(b)可以看出,210 d 腐蚀龄期内不同 HME-V 抗裂剂掺量下的棱柱体试件质量变化过程可分为增长、稳定、显著下降三阶段。60~90 d 腐蚀龄期内 5%,8%,10% 掺量下的质量分别增长 0.13%,0.06%,0.24%,此阶段的表现是硫酸根离子的侵入致使膨胀产物逐渐累积的结果;5%,8%,10% 掺量下试件 180 d 平均质量相较于 90 d 分别减小 0.037%,0.076%和 0.027%,由于早期的硫酸根离子侵蚀作用,石膏等化学生成物大量填充内部孔隙,90~180 d 内离子渗透性降低,侵蚀反应相对减缓,棱柱体内部水化胶凝产物析出量较少,对宏观质量的影响并不显著,该阶段内质量较为恒定;随着腐蚀程度逐步加剧,试件表层的水泥浆体逐渐软化、剥落,凝胶产物不断析出,180 d 后质量逐渐减小,5%,8%,10% 掺量下 210 d 的试件平均质量较 180 d 分别下降 0.12%,0.12%和 0.15%。



图 7 为 210 d 腐蚀龄期下掺 HME-V 抗裂剂试件的表观特征。3 种掺量下腐蚀程度较为接近,表层与棱角处均只表现为轻微腐蚀。对比掺 UEA 膨胀剂的混凝土试件,剥蚀程度较轻,且棱边未出现较为粗大的贯穿裂纹,表明仍处于较早的腐蚀破坏阶段。通过对比图 6 和图 7 表观特征可知,210 d 腐蚀龄期内,相同硫酸盐腐蚀环境和同一外加剂掺量下,掺 HME-V 抗裂剂较 UEA 膨胀剂减缓了硫酸盐腐蚀损伤程度,表明其提高了混凝土抗硫酸盐腐蚀性能。

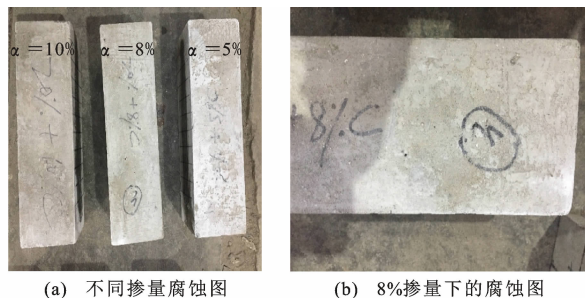


图 7 不同 HME-V 掺量的混凝土试件腐蚀后表观特征

Fig. 7 Apparent Characteristics of Concrete Specimens with Different HME-V Contents After Sulfate Corrosion

## 2.2 腐蚀深度对比分析

试件表面不断形成损伤层且损伤厚度不断增加,表现为腐蚀深度的持续增长。在所有测试龄期里对试件进行超声检测,获得对应的声速。选取各龄期不同外加剂掺量下试件测距与声时进行比较分析,按第 1.3 节中方法计算得到混凝土试件的腐蚀深度随龄期的变化,如图 8 所示。

### 2.2.1 UEA 膨胀剂的影响

图 8(a)表明,90 d 至 120 d 腐蚀龄期内,2% UEA 掺量试件的腐蚀深度大于 8% 和 5% 两个掺量。随着腐蚀龄期增加,离子逐渐向内扩散,腐蚀深度增加。90~120 d 时由于前期粉煤灰的二次水化作用及硫酸根离子的侵入与水泥水化物生成钙矾石、石膏等膨胀产物,内部结构密实,孔隙率减小,阻碍离子的侵入,腐蚀深度增长缓慢。当腐蚀龄期达到 120 d 时,不同掺量下的腐蚀深度最为接近。120 d 后孔隙内部的膨胀产物持续累积,形成较大的膨胀应力,逐步破坏微观结构,随着 C—S—H 组成的混凝土骨架破坏,结构腐蚀程度加剧,离子侵蚀速率加快,此后腐蚀深度增长显著。

该结果表明,随着侵蚀持续进行,各掺量试件出现膨胀破坏,5% 掺量下的混凝土最先发生膨胀破坏,后期的侵蚀破坏程度表现为 UEA 膨胀剂掺量

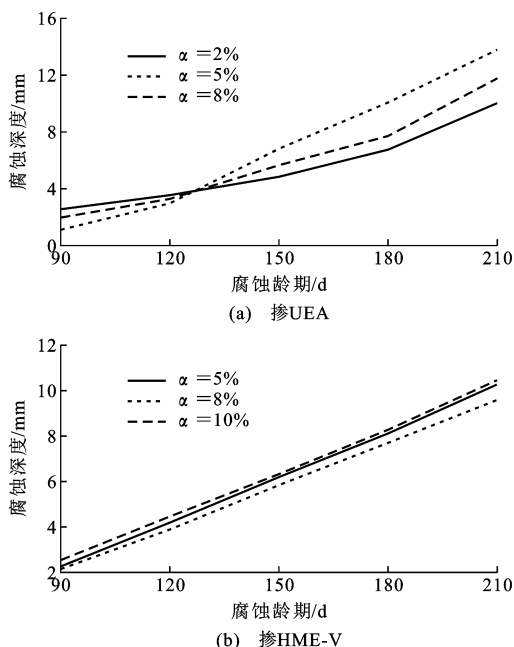


图 8 混凝土腐蚀深度随腐蚀龄期的变化

Fig. 8 Change of Corrosion Depth of Concrete with Corrosion Age

为 5% 的混凝土试件大于掺量为 8% 和 2% 的试件。

### 2.2.2 HME-V 抗裂剂的影响

图 8(b)表明,3 种不同掺量下腐蚀深度变化较为接近,90 d 至 210 d 龄期的腐蚀深度随龄期近似表现为线性增长。早期腐蚀深度的增长与结构的微观结构致密性存在正相关性。自由膨胀条件下,随着掺量的进一步增加,结构内部产生细微裂纹。腐蚀深度表现为 8% 掺量分别小于 5% 和 10% 掺量,10% 外加剂掺量下的腐蚀深度略大于 5% 掺量。在 210 d 腐蚀龄期内,混凝土腐蚀深度缓慢增加,试件未表现出明显的膨胀应力破坏。

### 2.2.3 不同外加剂对比分析

由 2 类外加剂 5% 掺量下腐蚀深度随龄期的变化曲线(图 9)可知,90 d 至 120 d 腐蚀龄期内,腐蚀深度表现为掺 5% 的 HME-V 抗裂剂混凝土大于掺 UEA 膨胀剂混凝土。120 d 腐蚀龄期后,掺 UEA 膨胀剂混凝土腐蚀深度增长速率逐渐增大,掺 HME-V 抗裂剂混凝土仍基本保持线性增长趋势。

UEA 是硫铝酸盐类膨胀剂,通过结晶水化物抵消干缩应力,具有预防混凝土开裂并填充内部孔隙的作用<sup>[17]</sup>。作用机理是由于水化物(Aft)的生成,膨胀后约为水化前体积的 2.5 倍,与纤维状硅酸钙凝胶结合成网状结构,使水泥石体积膨胀<sup>[18]</sup>。HME-V 是氧化钙类外加剂,膨胀过程分为两阶段:水化初期,水泥骨架间隙生成胶凝状  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  引

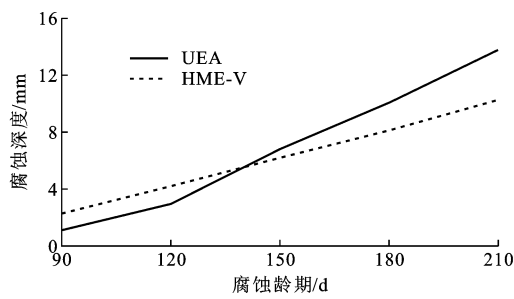


图 9 不同外加剂混凝土腐蚀深度随腐蚀龄期的变化

Fig. 9 Variation of Corrosion Depth of Concrete with Different Admixtures with Corrosion Age

起早期膨胀;此后  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  重结晶,直至晶体全转换为大的异方型六角板状结晶,随着晶体转化,体积膨胀。

由于两外加剂膨胀源的差异性,硫酸根离子进入内部时,反应速率不同。HME-V 抗裂剂通过水化生成  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  引起膨胀,而 UEA 膨胀剂通过钙矾石补偿收缩,前者的生成物对腐蚀阶段的化学反应具有促进作用,由此导致前期的腐蚀深度增长速率较快,UEA 膨胀剂生成产物膨胀应力较大,易使混凝土发生膨胀破坏。腐蚀深度计算结果表明,掺 UEA 膨胀剂混凝土后期腐蚀破坏程度较高,且破坏时间相对较早,抗裂剂对混凝土抗硫酸盐腐蚀性能的提高与龄期有关。通过选择合理的外加剂类型,可有效提高混凝土抗硫酸盐腐蚀性能。相同硫酸盐腐蚀环境中,等量粉煤灰、外加剂掺量下,HME-V 相较于 UEA 延缓了硫酸盐腐蚀进程,进一步提升了混凝土抗硫酸盐的耐久性。

2.3 抗压强度对比分析

本文选取特定龄期,对掺量相同的 2 种外加剂混凝土进行腐蚀后抗压强度测试。不同外加剂掺量混凝土试件抗压强度随腐蚀龄期的变化如图 10 所示。

掺 UEA 膨胀剂混凝土腐蚀 150 d 抗压强度相较初始强度增长 31.5%;掺 HME-V 抗裂剂混凝土腐蚀 60 d 抗压强度较未腐蚀混凝土强度增加 1 倍,抗压强度显著增长,至 210 d 腐蚀龄期,抗压强度仍未表现出下降趋势。2 种掺量下,掺 HME-V 抗裂剂混凝土抗压强度总在掺 UEA 的混凝土之上。

2.4 吸水特性对比分析

在相同的环境条件下,吸水量与试件内部微观孔隙率及孔径密切相关。本文对 210 d 腐蚀龄期的试件进行吸水特性试验,对比了不同组试件受硫酸盐腐蚀后损伤程度的差异性。不同外加剂掺量下混

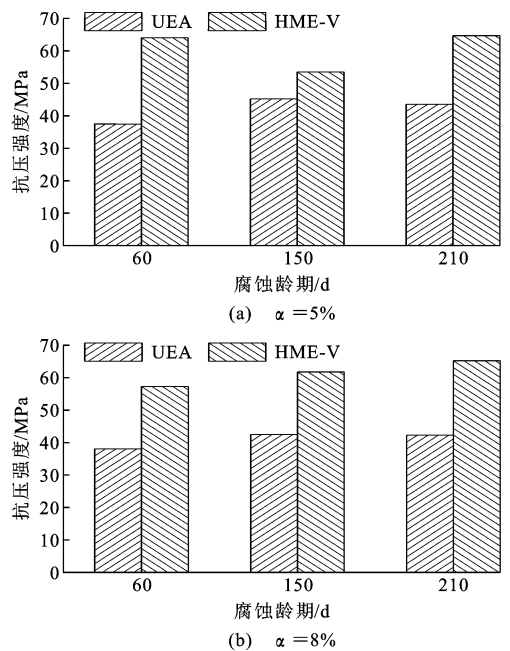


图 10 不同类型外加剂混凝土抗压强度随腐蚀龄期的变化

Fig. 10 Change of Compressive Strength of Concrete with Different Admixtures with Corrosion Age

凝土净吸水量与时间的关系曲线如图 11 所示。

由图 11 可知:混凝土前 7 h 内吸水量随时间的变化规律主要反映腐蚀层的吸水特性;7 d 内吸水量随时间的变化主要反映未腐蚀层吸水特性。

2.4.1 UEA 膨胀剂的影响

试验前 1 h 内,吸水量随时间的增速显著,1~7 h 内吸水量随时间基本表现为线性增长趋势。根据腐蚀深度计算结果认为,早期由于腐蚀程度不同,5%UEA 膨胀剂掺量下的试件内部结构损伤较为严重,存在更多的细微裂纹,密实度低,相同时间内表现为 UEA 膨胀剂掺量为 5%的混凝土试件吸水量大于掺量为 8%和 2%的试件。随着吸水量增加,逐渐地反映为试件原始孔隙率及密实程度。图 11(b)的试验结果表明,24 h 后 5%掺量下的试件吸水量小于掺量为 8%和 2%的试件,二者相互印证。进一步得到单位面积吸水量随时间开方的变化规律,见图 12。

由图 12 可知,掺 UEA 膨胀剂混凝土腐蚀层单位面积吸水量与时间的开方呈现出正相关性,斜率即为试件毛细吸水系数,可以量化反映了混凝土吸水速率的快慢。2%,5%,8%掺量下的试件吸水系数  $S$  分别为 0.98,1.41,1.36  $\text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})^{-1}$ 。根据文献[15],[19]可知,裂纹的宽度及数量严重影响混凝土渗透性,而腐蚀层损伤开裂程度较大,裂纹对混凝土渗透性起主导影响,吸水性反映渗透性大

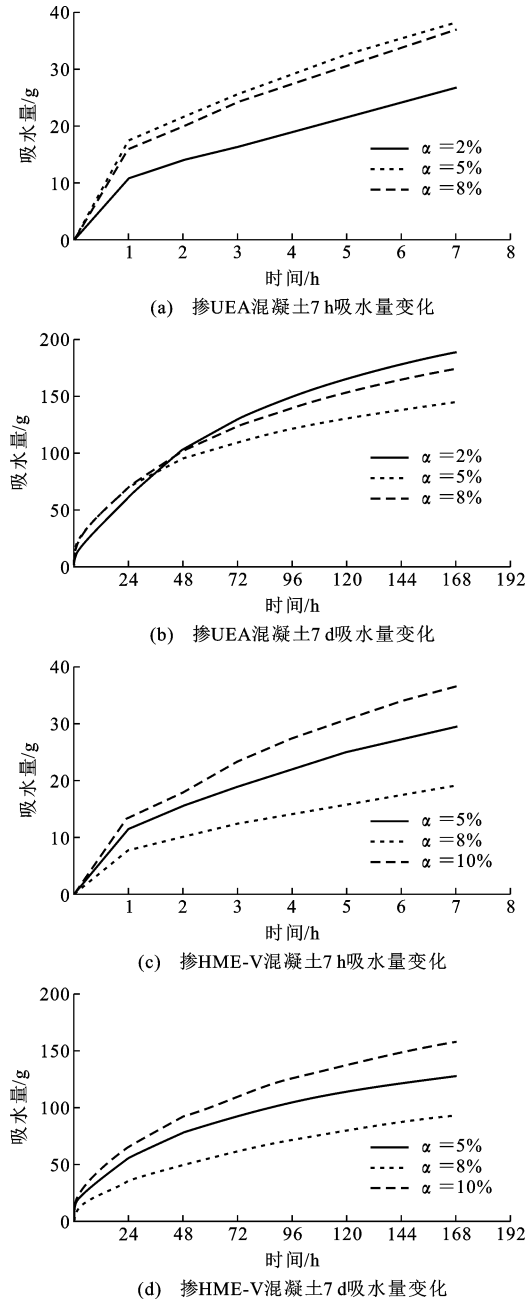


图 11 掺外加剂混凝土吸水量随时间的变化  
Fig. 11 Variation of Water Absorption of Concrete with Admixtures with Time

小,毛细吸水系数表明 5% 掺量下试件的腐蚀层渗透性大于 8% 和 2% 掺量的试件,该掺量下试件的损伤程度相对严重。

2.4.2 HME-V 抗裂剂的影响

由图 11 可知,7 d 腐蚀龄期内均表现为 8% 掺量下的混凝土吸水量小于 5% 和 10% 掺量的混凝土。前 7 h 的吸水量与腐蚀后微观结构损伤程度相关,后期吸水量则主要由未受硫酸盐腐蚀的原始结构孔隙率直接影响。试验结果表明,腐蚀后试件损

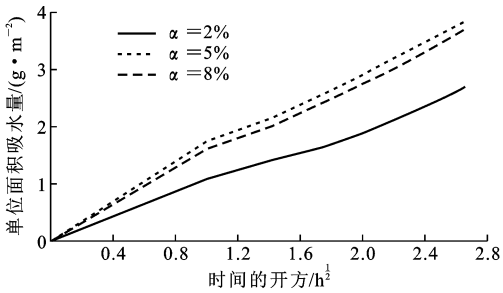


图 12 掺 UEA 混凝土前 7 h 单位面积吸水量随时间开方的变化

Fig. 12 Variation of Water Absorption Per Unit Area of Concrete with UEA with Time Square Root in the First 7 h

伤程度表现为 8% 掺量依次小于 5% 和 10%,与腐蚀深度分析结果一致。经处理得到掺 HME-V 抗裂剂混凝土前 7 h 单位面积吸水量随时间开方的变化规律如图 13 所示。

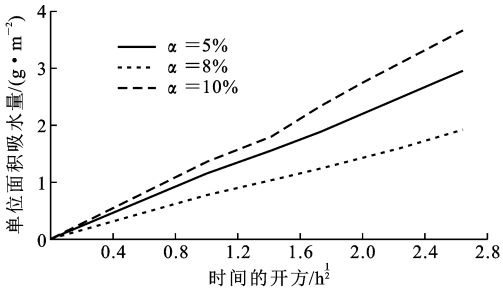


图 13 掺 HME-V 混凝土前 7 h 单位面积吸水量随时间开方的变化

Fig. 13 Variation of Water Absorption Per Unit Area of Concrete with HME-V with Time Square Root in the First 7 h

由图 13 可知,掺 HME-V 抗裂剂混凝土腐蚀层单位面积吸水量与时间的开方呈现出较好的线性相关性。5%,8%,10% 掺量下的吸水系数  $S$  分别为  $1.11, 0.71, 1.40 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})^{-1}$ 。显然,10% 掺量下的混凝土腐蚀层渗透性大于 5% 和 8% 掺量的混凝土,表明 10% 掺量下的试件损伤程度大于 5% 和 8% 两掺量下的试件。

2.4.3 不同外加剂对比分析

HME-V 抗裂剂以  $\text{CaO}$  为主要成分,在水化过程中使混凝土内部保持高碱度,且通过“供钙”能够激发矿物掺合料二次水化作用,因此,在长期硫酸盐腐蚀环境下,相较于掺硫铝酸盐类外加剂混凝土具有更高密实度<sup>[20]</sup>。5% UEA 膨胀剂掺量下的混凝土吸水量依次大于同掺量 HME-V 抗裂剂混凝土。7 h 内的吸水量反映为腐蚀层受损程度,细微裂纹

的存在显著促进湿质在混凝土内部的扩散速率,由此认为 UEA 膨胀剂作用下的混凝土试件受损伤程度大于 HME-V 抗裂剂。

图 14 为掺不同外加剂混凝土腐蚀层单位面积吸水量随时间开方的增长规律。

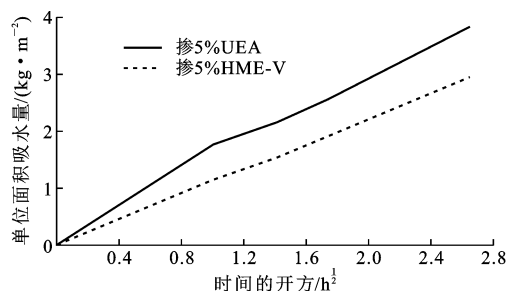


图 14 相同外加剂掺量混凝土前 7 h 单位面积吸水量随时间开方的变化

Fig. 14 Variation of Water Absorption Per Unit Area of Concrete with Same Admixture Content with Time Square Root in the First 7 h

由图 14 可知,5% UEA 膨胀剂、5% HME-V 抗裂剂掺量下的混凝土表层吸水系数  $S$  分别为 1.41,  $1.11 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h}^{1/2})^{-1}$ ,定量表明掺 HME-V 抗裂剂混凝土表层受腐蚀损伤程度小于掺 UEA 膨胀剂混凝土。

### 3 结 语

(1)在腐蚀龄期内,掺 UEA 膨胀剂和掺 HME-V 抗裂剂的混凝土受硫酸盐腐蚀后的质量变化均可分为三个阶段,即增长阶段、稳定阶段和下降阶段。

(2)不同外加剂的腐蚀深度变化规律不同。对于掺 UEA 膨胀剂的混凝土试件,早期为 5% 掺量的试件腐蚀深度小于 8% 和 2% 掺量的试件,随着损伤加剧,2% 掺量下试件的腐蚀深度逐渐小于 8% 和 5% 掺量的试件。掺 HME-V 抗裂剂混凝土试件在 210 d 内腐蚀相对较轻,腐蚀深度始终表现为 8% 掺量下的试件小于 5% 和 10% 掺量的试件,5% 和 10% 两掺量试件腐蚀深度十分接近。210 d 腐蚀龄期下,相同外加剂掺量的 HME-V 抗裂剂相较于 UEA 膨胀剂具有更优异的抗硫酸盐腐蚀能力。

(3)相同硫酸盐掺量下,掺 HME-V 抗裂剂混凝土在腐蚀后的抗压强度高于掺 UEA 的混凝土。

(4)腐蚀层结构较未腐蚀层相对疏松,吸水量增大;表层吸水量随着腐蚀程度的增加而增大,未腐蚀层结构吸水量随着密实度的增加而减小。表层吸水系数计算结果表明,5% UEA 膨胀剂掺量下的试件损伤开裂程度大于 8% 和 2% 掺量的试件,10%

HME-V 抗裂剂掺量下试件损伤程度依次大于 5% 和 8% 掺量的试件,掺 HME-V 抗裂剂混凝土表层受腐蚀损伤程度小于掺 UEA 膨胀剂混凝土。

### 参考文献:

#### References:

- [1] 王伟,杨德斌,刘志前. 掺膨胀剂混凝土抗硫酸盐侵蚀性能研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 6(3): 117-118, 123.  
WANG Wei, YANG De-bin, LIU Zhi-qian. Research on Sulfate Attack Resistance of Concrete with Expansive Admixture[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2008, 6(3): 117-118, 123.
- [2] 高培伟,吴胜兴,林萍华,等. 硫酸盐对碾压混凝土侵蚀开裂的机理微观分析[J]. 水利学报, 2005, 36(3): 360-364.  
GAO Pei-wei, WU Sheng-xing, LIN Ping-hua, et al. Microstructure Analysis on Mechanism of Sulfate Attack on RCC[J]. Journal of Water Resources, 2005, 36(3): 360-364.
- [3] PARK J J, YOO D Y, KIM S W, et al. Drying Shrinkage Cracking Characteristics of Ultra-high-performance Fibre Reinforced Concrete with Expansive and Shrinkage Reducing Agents[J]. Magazine of Concrete Research, 2013, 65(4): 248-256.
- [4] MIGUEL J O, ANTONIO B R, FERNANDO G B. Combined Effect of Expansive and Shrinkage Reducing Admixtures to Control Autogenous Shrinkage in Self-compacting Concrete[J]. Construction and Building Materials, 2014, 52: 267-275.
- [5] MO L W, DENG M, TANG M S. Effects of Calcination Condition on Expansion Property of MgO-type Expansive Agent Used in Cement-based Materials [J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(3): 437-446.
- [6] AHN J K, PARK K T, KWON S J. Evaluation of Crack Resistant Performance in Cement Mortar with Steel Fiber and CSA Expansion Admixture[J]. Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, 2014, 18(3): 125-132.
- [7] LIU S H, FANG K H, LI Z. Influence of Mineral Admixtures on Crack Resistance of High Strength Concrete[J]. Key Engineering Materials, 2006, 302-303: 150-154.
- [8] 张巨松,韩自博,王立巍,等. 抗裂防水剂与矿物掺合料复合对混凝土  $\text{Cl}^-$  扩散系数的影响[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版, 2009, 25(5): 948-953, 958.  
ZHANG Ju-song, HAN Zi-bo, WANG Li-wei, et al.



- The Study on the Effect of Compound of the Crack-resistance Waterproofing Agent and Mineral Admixtures to Concrete Chloride-ion-diffusion-coefficient [J]. Journal of Shenyang Jianzhu University; Natural Science, 2009, 25(5): 948-953, 958.
- [9] LEE J S, NOH W H. Admixture for Cement Mortar Having Crack Resistance and Cement Mortar Including the Same; US, US20120006233A1 [P]. 2012-01-12.
- [10] 杨 勇, 张建纲, 严 涵, 等. 超早强外加剂在混凝土中的性能研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2017(5): 11-15.
- YANG Yong, ZHANG Jian-gang, YAN Han, et al. Study on Performance of Super Early Strength Admixture in Concrete [J]. China Concrete and Cement Products, 2017(5): 11-15.
- [11] 杜迎东, 王起才, 张戎令, 等. 复掺外加剂体系对低水胶比混凝土强度及耐久性影响试验研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2016, 13(4): 654-661.
- DU Ying-dong, WANG Qi-cai, ZHANG Rong-ling, et al. Experience Study on Impact of Strength and Durability of Compound Admixture System of Low Water-binder Ratio Concrete [J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2016, 13(4): 654-661.
- [12] 冯小忠, 刘胜松, 唐修生, 等. 水工混凝土抗硫酸盐侵蚀性能改善研究[J]. 混凝土, 2014(5): 41-43, 48.
- FENG Xiao-zhong, LIU Sheng-song, TANG Xiu-sheng, et al. Improvements of Sulfate Attack Resistant Property of Hydraulic Concrete [J]. Concrete, 2014(5): 41-43, 48.
- [13] 高培伟, 吴胜兴, 林萍华, 等. 含膨胀剂的碾压混凝土抗硫酸盐侵蚀机理与理论模型[J]. 水力发电学报, 2006, 25(1): 90-93, 84.
- GAO Pei-wei, WU Sheng-xing, LIN Ping-hua, et al. Mechanism and Model of Sulfate Attack on RCC with Expansive Agent [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2006, 25(1): 90-93, 84.
- [14] 王家滨, 牛获涛, 马 蕊. 硫酸盐侵蚀喷射混凝土损伤层及微观结构研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(10): 105-112.
- WANG Jia-bin, NIU Di-tao, MA Rui. Study on Damage Layer and Microstructure of Shotcrete After Sulfate Attack [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(10): 105-112.
- [15] OULD NAFFA S, GOUEYGOU M, PIWAKOWSKI B, et al. Detection of Chemical Damage in Concrete Using Ultrasound [J]. Ultrasonics, 2002, 40(1-8): 247-251.
- [16] 张风杰, 袁迎曙, 杜健民. 硫酸盐腐蚀混凝土构件损伤检测研究[J]. 中国矿业大学学报, 2011, 40(3): 373-378.
- ZHANG Feng-jie, YUAN Ying-shu, DU Jian-min. Ultrasonic Detection in Concrete Structures of Damage from Sulfate Attack [J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2011, 40(3): 373-378.
- [17] 张晓辉, 董利华. UEA 膨胀剂在大体积混凝土中的应用[J]. 建设科技, 2011(23): 87-88.
- ZHANG Xiao-hui, DONG Li-hua. Application of UEA Expansive Agent in Mass Concrete [J]. Construction Science and Technology, 2011(23): 87-88.
- [18] 吴钟瑾, 刘斌云, 邢振贤. 硫铝酸盐类膨胀剂的理论研究与应用[J]. 水利水电技术, 1998, 29(6): 15-19.
- WU Zhong-jin, LIU Bin-yun, XING Zhen-xian. Theoretic Study of Sulphoaluminous Expansion Agent and Its Application [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1998, 29(6): 15-19.
- [19] WANG K J, JANSEN D C, SHAH S P. Permeability Study of Cracked Concrete [J]. Cement and Concrete Research, 1997, 27(3): 381-393.
- [20] 李 鹏. HCSA 膨胀剂补偿高强混凝土收缩及影响因素研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- LI Peng. Study on Shrinkage Compensation and Influence Factors of High Strength Concrete [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.