

文章编号:1007-9629(2024)06-0479-08

# 丙烯酸乳液改性氯氧镁水泥的性能及其机理研究

李晓晴<sup>1</sup>, 卞立波<sup>1,\*</sup>, 丁林娜<sup>1</sup>, 张璐<sup>2</sup>, 魏霞<sup>3</sup>

(1.北京建筑大学土木与交通工程学院,北京 100044; 2.北京市首发天人生态景观有限公司,北京 102600; 3.北京国建联信认证中心有限公司,北京 100831)

**摘要:**基于有机聚合物乳液的吸附及络合作用,采用丙烯酸乳液(AE)对氯氧镁水泥(MOC)进行改性,对改性后的MOC工作性能、力学性能、耐水性能及微观结构进行研究,揭示AE对MOC的改性机理.结果表明:AE在MOC中的分散作用可增大MOC的流动性;AE在水泥颗粒及水化产物表面形成的膜结构在抑制5·1·8相晶体生长的同时,还改变了晶体形态,对MOC的凝结时间及强度产生了影响;AE不仅降低了MOC内部有害孔的体积分数,还在MOC内部形成了膜结构,在这两者共同作用下,5·1·8相晶体的水解得以延缓,Mg(OH)<sub>2</sub>晶体的生成量减少,从而改善了MOC的耐水性能.

**关键词:**氯氧镁水泥;丙烯酸乳液;力学性能;耐水性能;微观结构

中图分类号:TU526

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.06.001

## Properties of Acrylic Emulsion Modified Magnesium Oxychloride Cement and Its Mechanism

LI Xiaoqing<sup>1</sup>, BIAN Libo<sup>1,\*</sup>, DING Linna<sup>1</sup>, ZHANG Lu<sup>2</sup>, WEI Xia<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Shoufa Tianren Ecological Landscape Co., Ltd., Beijing 102600, China; 3. Beijing National Union Standard Certification Co., Ltd., Beijing 100831, China)

**Abstract:** The adsorption and complexation of organic polymer emulsion, acrylic emulsion (AE) was used to modify magnesium oxychloride cement (MOC). The working properties, mechanical properties, water resistance and microstructure of modified MOC were systematically investigated, and the mechanism of the modification of MOC by AE was revealed. The results show that the dispersing effect of AE in MOC can increase the fluidity. AE formed membrane structures on the surface of cement particles and hydration products not only inhibit 5·1·8 phase crystals growth, but also change its morphology so as to influence the setting time and strength of MOC. Meanwhile, AE reduces the volume fraction of harmful pores of MOC. Combined with the membrane structure generated by AE inside the MOC, it can delay the hydrolysis of 5·1·8 phase crystals and reduce the generation of Mg(OH)<sub>2</sub> crystals. Thus, the water resistance of the MOC is improved.

**Key words:** magnesium oxychloride cement (MOC); acrylic emulsion (AE); mechanical property; water resistance; microstructure

氯氧镁水泥(MOC)是一种由轻烧MgO、MgCl<sub>2</sub>及H<sub>2</sub>O混合而成的气硬性胶凝材料<sup>[1]</sup>,具有抗压强度和抗弯强度高、耐火性和耐磨性好、导热系数低<sup>[2]</sup>,以

及抗盐卤性能优异<sup>[3-4]</sup>等特点.与硅酸盐水泥相比,MOC具有更低的碳排放量及碱性<sup>[5-6]</sup>,更适合与多种无机、有机骨料制备复合材料<sup>[2]</sup>.MOC的主要水化产

收稿日期:2023-08-15; 修订日期:2023-11-10

基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2022YFC3803400)

第一作者:李晓晴(1998—),女,北京人,北京建筑大学硕士生. E-mail: sxcaqli@163.com

通讯作者:卞立波(1984—),男,河南济源人,北京建筑大学副教授,硕士生导师,博士. E-mail: bianlibo@bucea.edu.cn

物是由活性  $MgO$ 、 $MgCl_2$  及  $H_2O$  经化学反应生成的  $5Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$  (5·1·8相) 及  $3Mg(OH)_2 \cdot MgCl_2 \cdot 8H_2O$  (3·1·8相) 晶体<sup>[7]</sup>, 其中 5·1·8相晶体为 MOC 强度的主要贡献者。

尽管如此, MOC 仍具有返卤、泛霜及耐水性差等缺点<sup>[8]</sup>, 其中耐水性差是其应用受限的主要因素<sup>[9]</sup>。宁亚瑜等<sup>[10]</sup>针对 MOC 的耐水性能对该材料的养护制度、摩尔比及  $MgCl_2$  溶液浓度进行了调整, 研究发现该调整虽能在一定程度上提高 MOC 的耐水性能, 但其软化系数低于 0.75。邓德华<sup>[11]</sup>研究发现, 在 MOC 中掺入外加剂能够形成稳定的水化产物晶相。Guo 等<sup>[12]</sup>研究发现, 掺入粉煤灰能够提高 MOC 的 28 d 软化系数。此外, 柠檬酸及酒石酸能够提高 MOC 制品中 5·1·8相晶体的含量, 使其软化系数达到 0.8<sup>[13]</sup>。曹锋等<sup>[14]</sup>研究表明, MOC 的力学性能及耐水性能在复掺 1% 丙烯酸乳液(AE)与 15% 青稞秸秆灰时有所提高。然而, 有关 AE 在 MOC 内部的成膜效应及其

对 MOC 的改性机理研究较少。

鉴于此, 本文采用掺量(质量分数, 文中涉及的掺量、含量等除特别注明外均为质量分数)不同的 5 组 AE 对 MOC 进行改性, 研究了 AE 改性 MOC 的工作性能、力学性能及耐水性能, 同时结合扫描电镜(SEM)、X 射线衍射仪(XRD)、傅里叶红外光谱(FTIR)及压汞法(MIP)对其性能进行分析, 明确了 AE 在 MOC 内部的成膜效应及其对 MOC 的改性机理。

## 1 试验

### 1.1 原材料

轻烧  $MgO$  为建材级 85 粉,  $MgO$  及活性  $MgO$  含量分别为 85.59% 及 62.31%。卤片为  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ,  $MgCl_2$  含量为 46.12%。外加剂采用水性丙烯酸乳液(AE), 由丙烯酸单体为主的乙烯基单体经乳液聚合而成, 主要性能指标见表 1。砂为 ISO 标准石英砂。

表 1 AE 的主要性能指标

Table 1 Main performance indicators of AE

Solid content(by mass)/%	pH value(25 °C)	Viscosity/(mPa·s)	Number of free monomer	Minimum film forming temperature/°C
50.0±1.0	6.5-8.0	≤1 000	≤300	5

### 1.2 试验配合比及试件制备

试验用 MOC 浆体的  $n(MgO):n(MgCl_2):n(H_2O)=8:1:12$ 。AE 改性 MOC 的配合比见表 2。提前 24 d 配制  $MgCl_2$  溶液, 使  $n(MgCl_2):n(H_2O)=1:12$ , MOC 净浆和胶砂试件制备步骤如下: 首先将  $MgCl_2$  溶液与 AE 均匀混合, 加入轻烧  $MgO$ , 在净浆搅拌机中搅拌, 形成 AE 改性 MOC 净浆, 测试其凝结时间; 然后在 AE 改性 MOC 浆体中加入标准砂, 在胶砂搅拌机中均匀搅拌, 形成 AE 改性 MOC 胶砂, 测试其流动度; 最后将净浆及胶砂试件在室温下先养护 24 h, 脱模后再置于养护室((20±2)°C、相对湿度(70±5)%)中养护至规定龄期。

表 2 AE 改性 MOC 的配合比

Table 2 Mix proportions of AE modified MOCs

Specimen No.	Unit:g				
	Light-burned MgO	$MgCl_2 \cdot 6H_2O$	$H_2O$	Sand	AE
Control	450.0	181.0	189.0	1 350.0	0
1%AE-MOC	450.0	181.0	186.8	1 350.0	4.5
2%AE-MOC	450.0	181.0	184.5	1 350.0	9.0
3%AE-MOC	450.0	181.0	182.3	1 350.0	13.5
4%AE-MOC	450.0	181.0	180.0	1 350.0	18.0

### 1.3 试验方法

参照 WB/T 1019—2002《菱镁制品用轻烧氧化

镁》、GB/T 1364—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》、GB/T 2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》及 GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》对 AE 改性 MOC 的工作性能及力学性能进行测试。采用 SEM 对其微观形貌进行表征, 采用 XRD 和 FTIR 对其水化产物进行物相及定性分析; 采用 MIP 对其累计孔体积及孔径分布进行分析。

AE 改性 MOC 胶砂试件的软化系数  $R_f$  计算式为:

$$R_f = \frac{f_{c,w}}{f_{c,d}} \quad (1)$$

式中:  $f_{c,w}$  为试件浸水后的抗压强度, MPa;  $f_{c,d}$  为试件干燥养护后的抗压强度, MPa。

## 2 结果与分析

### 2.1 工作性能

AE 改性 MOC 的凝结时间和流动度如图 1 所示。由图 1 可见: (1) 掺入 AE 延长了 MOC 的凝结时间, 起到缓凝作用; MOC 的凝结时间随着 AE 掺量的增加呈先升后降趋势, 当 AE 掺量为 2% 时, MOC 的凝结时间最长, 其初凝及终凝时间分别达到 275、301 min。(2) 随着 AE 掺量的增加, MOC 的流动度呈

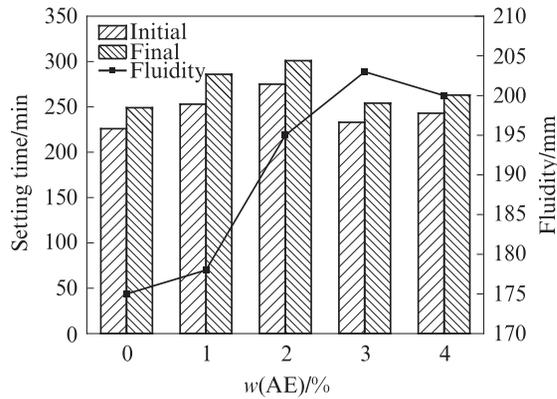


图1 AE改性MOC的凝结时间和流动度

Fig. 1 Setting time and fluidity of AE modified MOC

上升趋势,当AE掺量为3%时,其流动度最大,达到203 mm. 这是由于AE颗粒以滚珠形式存在于浆体

中,具有较好的分散作用,降低了MOC浆体的流动阻力<sup>[15]</sup>,增大了其流动度.

AE对MOC的缓凝作用示意图见图2. 由图2可见:(1)AE作为一种有机聚合物乳液,具有一定的吸附作用,其在水泥颗粒表面的吸附量最高<sup>[16]</sup>,能够直接在MgO颗粒表面形成一层隔离薄膜.(2)当轻烧MgO中的活性MgO进入MgCl<sub>2</sub>溶液中时,电离出的[Mg(OH)(H<sub>2</sub>O)<sub>x</sub>]<sup>+</sup>与OH<sup>-</sup>先包裹在MgO颗粒表面(离子反应式见式(2));再进一步与OH<sup>-</sup>反应生成Mg(OH)<sub>2</sub>(离子反应式见式(3))<sup>[17-18]</sup>. (3)AE内部的羧基基团与[Mg(OH)(H<sub>2</sub>O)<sub>x</sub>]<sup>+</sup>发生络合作用(离子反应式见式(4)),在MgO颗粒表面生成有机镁络合层,阻碍活性MgO颗粒与MgCl<sub>2</sub>溶液的有效反应,延缓MOC的水化进程,进而延长了MOC的凝结时间.

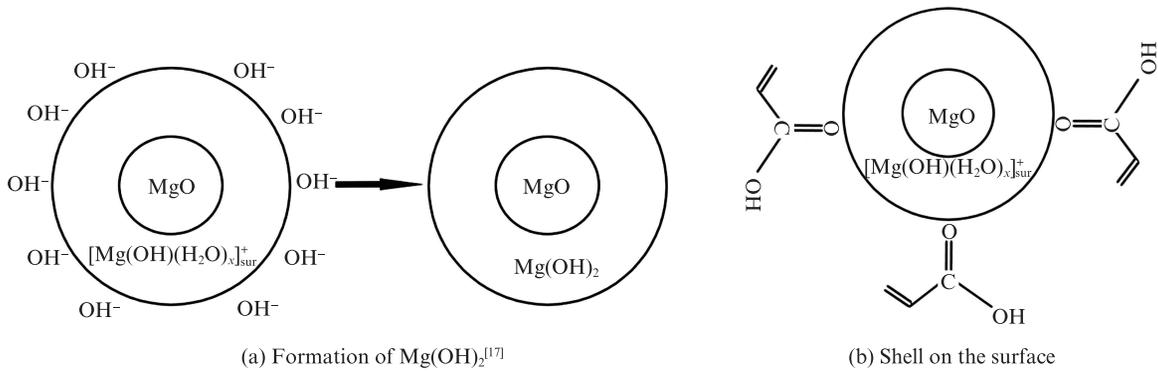
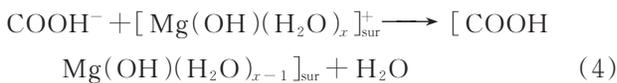
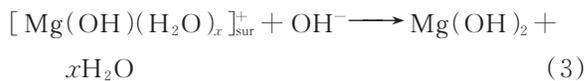
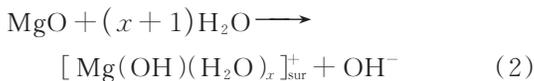


图2 AE对MOC的缓凝作用示意图

Fig. 2 Schematic diagram of AE's retarding effect on MOC



2.2 力学性能

AE改性MOC的28 d折压比见表3. 表3显示, AE改性MOC的28 d折压比整体上随着AE掺量的增加而增大,表明掺入AE后,MOC的韧性有所提高.

表3 AE改性MOC的28 d折压比

Table 3 28 d flexural compression ratios of AE modified MOC

w(AE)/%	0	1	2	3	4
28 d flexural compression ratio	0.25	0.33	0.32	0.36	0.38

AE改性MOC的力学性能如图3所示. 由图3可见:(1)AE改性MOC的7、28 d抗折强度 $f_b$ 及抗压强度 $f_{c,d}$ 均随着AE掺量的增加而降低,当AE掺量为4%时,MOC的28 d抗折强度及抗压强度达到最低

值,分别为8.8、23.1 MPa.(2)掺入AE后,虽然MOC的28 d抗折强度下降幅值较大,但当AE掺量为1%或2%时,其28 d抗折强度仍在10 MPa以上. 这是由于AE掺量较低时,被隔离膜及有机镁络合层包裹的水泥颗粒及水化产物较少,MOC浆体的水化程度受影响程度较小,因此MOC仍具有较高的抗折强度.(3)AE作为一种柔性聚合物乳液,压缩性能较差<sup>[18]</sup>. 当AE掺量由0%增至4%时,MOC的28 d抗压强度由74.8 MPa降至23.1 MPa,降低69.1%. 这是由于AE在水泥颗粒及水化产物表面生成的隔离膜及有机镁络合层不仅抑制了水泥颗粒的水化,还抑制了5·1·8相晶体的生长,进而对MOC的抗压强度具有显著负面影响<sup>[14,19]</sup>.

2.3 耐水性能

AE改性MOC的耐水性能如图4所示.

对比图3(b)及图4(a)可见:(1)AE改性MOC浸水7、28 d时的抗压强度 $f_{c,w}$ 与未浸水试件变化趋势一致,然而浸水试件的抗压强度显著低于未浸水试件.(2)AE改性MOC的强度损失率随着AE掺量的增加呈先降后升趋势,且在AE掺量为2%时达到最小值.

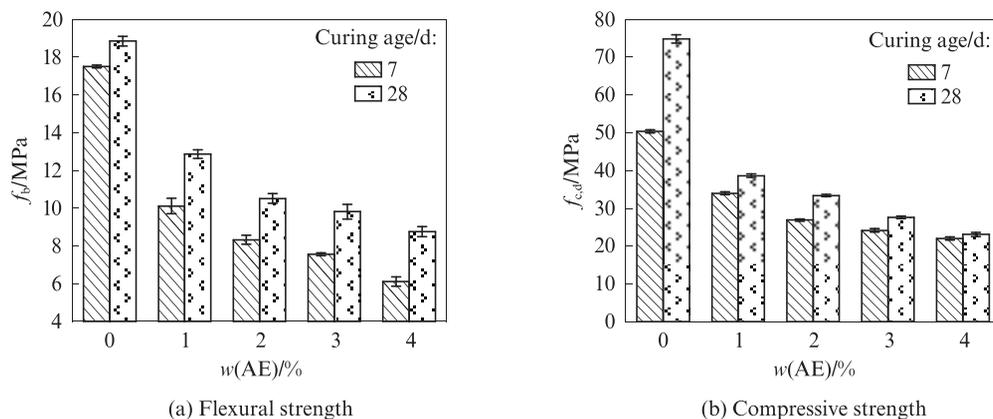


图3 AE改性MOC的力学性能

Fig. 3 Mechanical properties of AE modified MOC

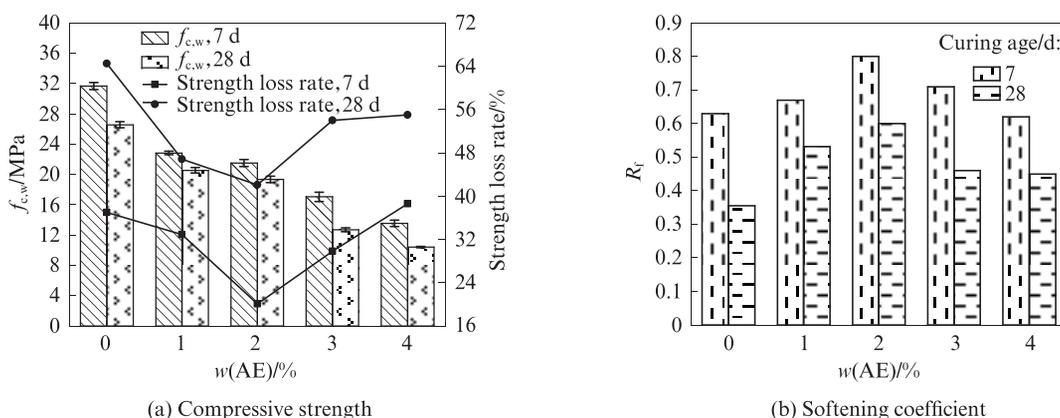


图4 AE改性MOC的耐水性能

Fig. 4 Water resistances of AE modified MOC

由图4(b)可见:(1)AE改性MOC浸水7、28d时的软化系数随着AE掺量的增加呈先升后降趋势,与其强度损失率的变化趋势相反。(2)当AE掺量为2%时,MOC浸水7、28d时的软化系数分别为0.8、0.6,较对照组增大27%、67%。其主要原因是5·1·8相晶体在浸水过程中发生严重水解,生成了 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 片状晶体;掺入AE后,AE在MOC中的水化产物表面形成的隔离膜及有机镁络合层能够延缓5·1·8相晶体的水解,减少 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 晶体的生成,进而提高了MOC的耐水性能。

## 2.4 微观结构及机理分析

### 2.4.1 微观形貌分析

AE改性MOC养护28d时的SEM照片如图5所示。

由图5(a)~(c)可见:(1)3组试样中均可观察到5·1·8相针状晶体,该晶体是为MOC提供强度的主要水化产物。(2)对照组中的主要水化产物为相互交错且晶体形态良好的5·1·8相针状晶体;掺入AE后,AE改性MOC中的5·1·8相针状晶体相互胶结在一起,形成团簇状结构。

由图5(d)~5(e)可见:AE具有一定的吸附及络合作用<sup>[15]</sup>,可在水泥颗粒及水化产物表面形成膜结构,即隔离膜及有机镁络合层;MOC中的大部分5·1·8相针状晶体均被膜结构包裹,该膜结构抑制了5·1·8相针状晶体的生长且改变了其晶体形态,减弱了5·1·8相针状晶体为MOC提供强度的能力。然而,AE形成的膜结构在MOC浸水28d的过程中可有效保护MOC内部的大部分5·1·8相晶体不受水的侵蚀,进而提高了MOC的28d软化系数,改善了其长期耐水性能。

AE改性MOC浸水7d前后净浆硬化体的SEM照片如图6所示。

由图6(a)~(c)可见:未浸水时,3组试样中均可观察到相互交错的5·1·8相长针状晶体;随着AE掺量的增加,5·1·8相针状晶体由长针状晶体变为短针状晶体,当AE掺量为4%时,AE改性MOC中的5·1·8相针状晶体长度最短。这表明,掺入AE能够改变5·1·8相针状晶体的形态,抑制晶体的生长。

由图6(d)~(f)可见:(1)浸水7d后,MOC中除5·1·8相针状晶体外,还生成了 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 片状晶体;

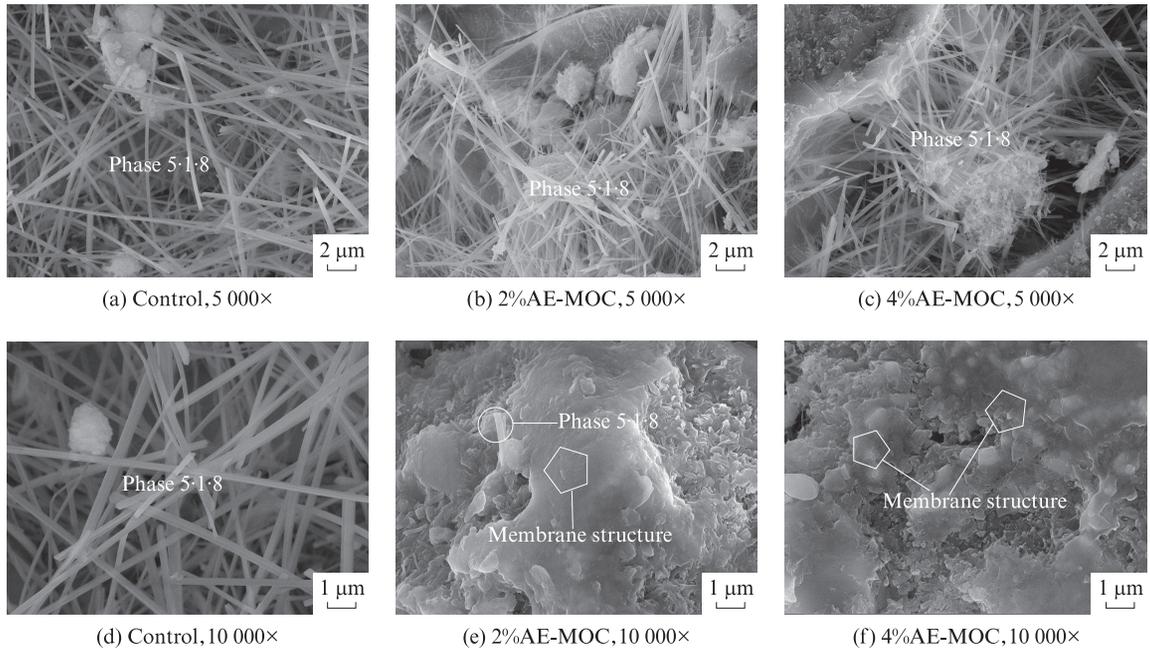


图5 AE改性MOC养护28 d时的SEM照片  
Fig. 5 SEM images of AE modified MOC curing for 28 d

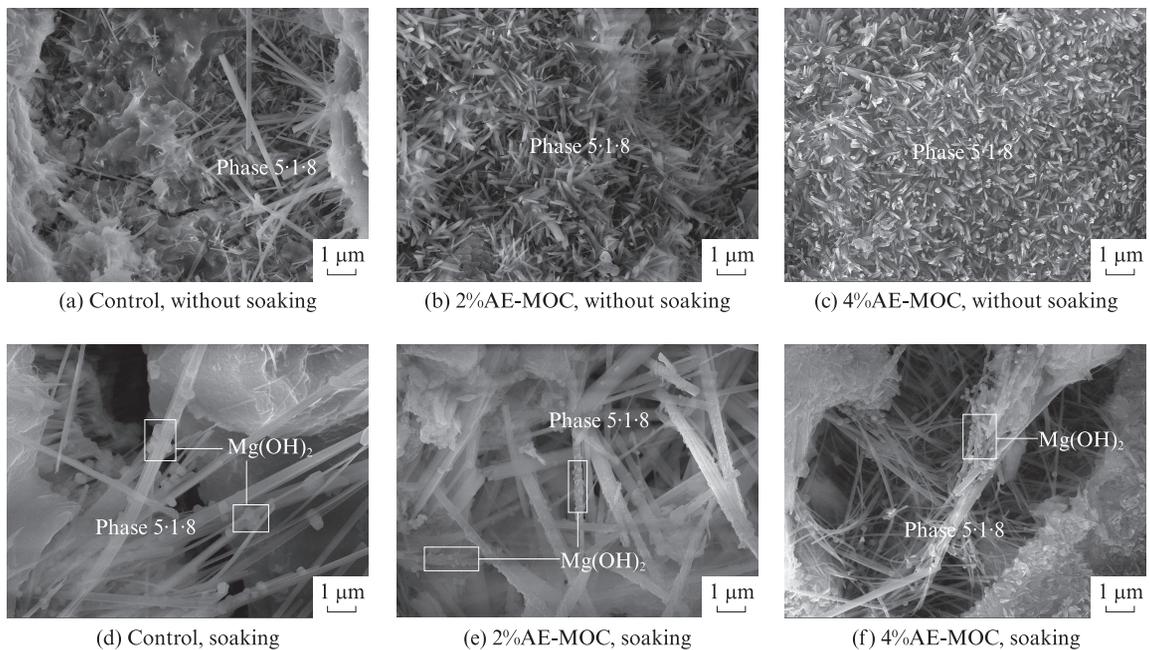


图6 AE改性MOC浸水7 d前后的SEM照片  
Fig. 6 SEM images of AE modified MOC before and after 7 days of soaking in water

AE在水化产物表面生成的膜结构延缓了5·1·8相针状晶体的水解,减少Mg(OH)<sub>2</sub>片状晶体的生成。(2)当AE掺量为2%时,浸水7 d后MOC中的5·1·8相针状晶体保留较好,且Mg(OH)<sub>2</sub>片状晶体的尺寸及数量均小于其余两组试样。这表明,掺入2% AE的MOC浸水7 d后的强度损失率较低,软化系数较高,耐水性能较好。

2.4.2 水化产物分析

AE改性MOC养护28 d时的XRD图谱和FTIR

光谱如图7所示。

由图7(a)可见:对照组中仅存在5·1·8相晶体及MgCO<sub>3</sub>晶体的衍射峰,表明对照组水化较为完全;AE改性MOC中不仅含有5·1·8相及MgCO<sub>3</sub>晶体,还有MgO晶体的衍射峰,表明AE形成的膜结构阻碍了活性MgO颗粒与MgCl<sub>2</sub>的化学反应。

由图7(b)可见:(1)在对照组的红外光谱中可观察到在1 606、1 654、3 424 cm<sup>-1</sup>处由结晶水伸缩振动引起的3组吸收峰,证明存在5·1·8相晶体;同

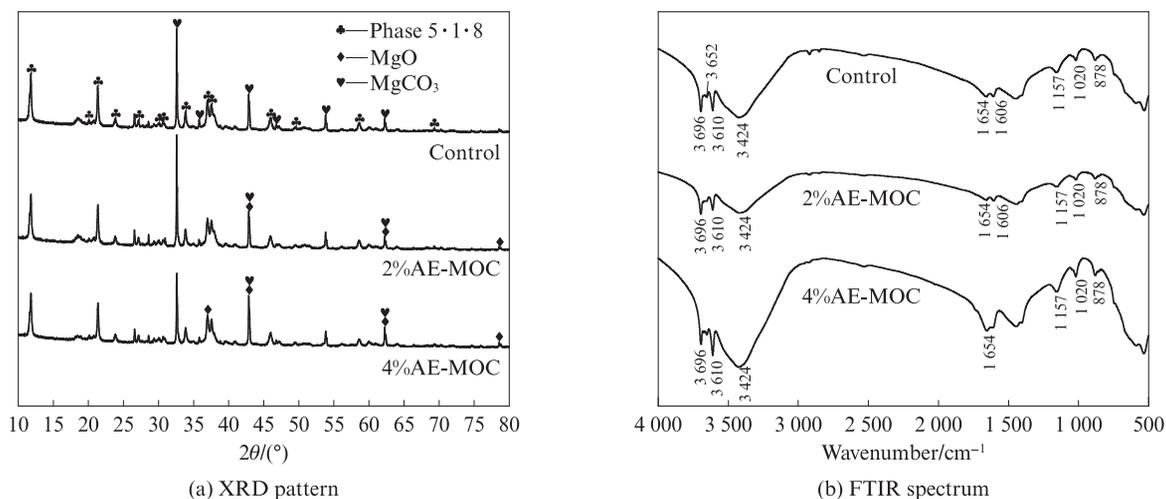


图7 AE改性MOC养护28d时的XRD图谱及红外光谱

Fig. 7 XRD patterns and FTIR spectra of AE modified MOCs curing for 28 d

时,  $3\ 610$ 、 $3\ 652$ 、 $3\ 696\ \text{cm}^{-1}$  的3处吸收峰均为  $5\cdot 1\cdot 8$  相晶体中  $\text{Mg—OH}$  引起的弯曲振动<sup>[20]</sup>;  $878\ \text{cm}^{-1}$  处为  $\text{MgCO}_3$  中的  $\text{CO}_3^{2-}$  引起的阴离子红外吸收峰。(2) 掺入2%和4% AE后, 2组AE改性MOC的红外光谱中均缺少  $3\ 652\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰, 其中掺入4% AE的MOC试样中还缺少  $1\ 606\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰。其原因是, AE抑制了  $5\cdot 1\cdot 8$  相晶体的增长, 使其含量有所减少。此外, 当AE掺量为2%时,  $1\ 020$ 、 $1\ 157\ \text{cm}^{-1}$  处由  $\text{C—O}$  键伸缩振动引起的吸收峰强度明显增加, 证明AE中的羧基基团与电离出的  $[\text{Mg}(\text{OH})(\text{H}_2\text{O})_x]^+$  发生了络合反应。

AE改性MOC浸水7d前后的XRD图谱和FTIR光谱如图8所示。

由图8(a)可见:(1)未浸水的3组试样中含有  $5\cdot 1\cdot 8$  相晶体、 $\text{MgO}$  晶体及  $\text{MgCO}_3$  晶体的衍射峰, 其中提供强度的  $5\cdot 1\cdot 8$  相晶体衍射峰最多。(2)浸水7d后, 3

组试样中  $5\cdot 1\cdot 8$  相晶体的衍射峰明显少于未浸水的3组试样, 且生成了新的  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  晶体。  $5\cdot 1\cdot 8$  相晶体的持续水解及  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  晶体含量的持续增加是导致浸水后MOC抗压强度及耐水性能下降的主要原因<sup>[21]</sup>。

由图8(b)可见:(1)浸水7d前后AE改性MOC的红外光谱中均检测到  $1\ 611$ 、 $1\ 657$ 、 $3\ 425\ \text{cm}^{-1}$  处由结晶水伸缩振动引起的吸收峰, 以及在  $3\ 611$ 、 $3\ 696\ \text{cm}^{-1}$  处由  $\text{Mg—OH}$  弯曲振动引起的吸收峰, 表明  $5\cdot 1\cdot 8$  相晶体的形成。(2)对照组未浸水试样中的结晶水吸收峰强度较高, 表明该试样中  $5\cdot 1\cdot 8$  晶体含量较多; 与未浸水试样相比, 浸水试样在  $3\ 611$ 、 $3\ 696\ \text{cm}^{-1}$  处的吸收峰较强, 说明此处含有由  $\text{Mg—OH}$  伸缩振动引起的吸收峰<sup>[5]</sup>, 表明浸水试样中存在  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 。(3)当AE掺量为2%时, 浸水MOC试样中  $\text{Mg—OH}$  吸收峰强度较其余两组低, 表明该试样

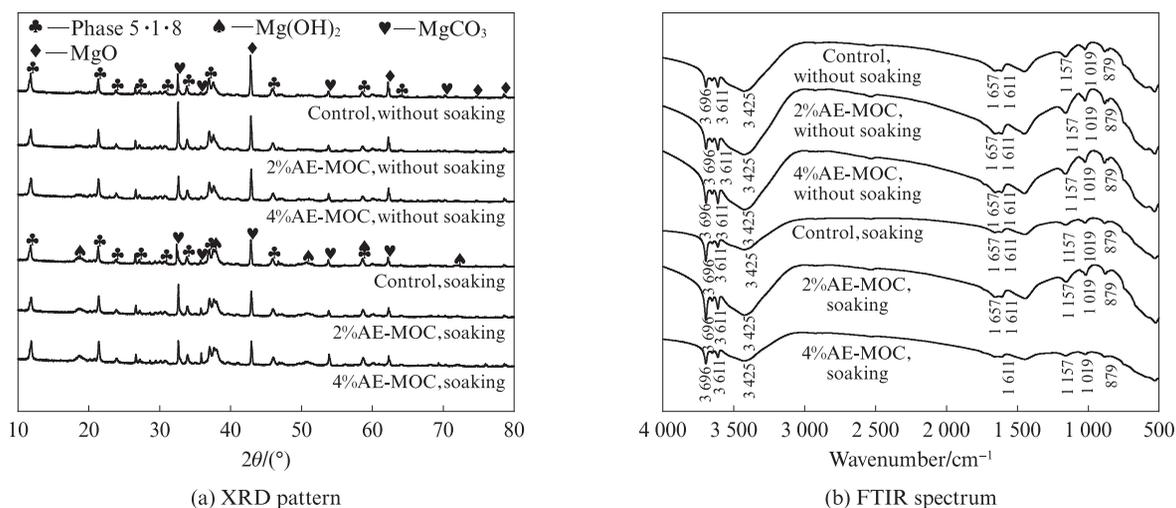


图8 AE改性MOC浸水7d前后的XRD图谱与红外光谱

Fig. 8 XRD patterns and FTIR spectra of AE modified MOC before and after 7 days of soaking in water

中 $Mg(OH)_2$ 含量较低.这是因为,尽管AE的掺入阻碍了原材料之间的化学反应并抑制了5·1·8相晶体的生长,但其内部羧基基团与电离出的 $[Mg(OH)(H_2O)_x]^+$ 反应生成的有机镁络合层,能够抑制5·1·8相晶体在浸水过程中向 $Mg(OH)_2$ 晶体的转化.因此,浸水后,掺入2% AE的MOC抗压强度下降幅度较小,短期及长期软化系数均有所提高.

#### 2.4.3 孔结构分析

孔隙的大小与材料的软化系数及强度等性能密切相关<sup>[22]</sup>. AE改性MOC净浆硬化体的累计孔

体积及孔径分布曲线如图9所示.由图9可见:(1)当AE掺量为2%时,MOC试样中孔径小于20 nm及20~50 nm的无害孔及少害孔的累计孔体积高于其余两组试样;孔径大于50 nm后,其累计孔体积开始呈下降趋势,表明该试样中的孔主要为无害孔及少害孔.(2)3组试样中最可几孔径均小于20 nm,证明AE改性MOC净浆中无害孔最多.其中AE掺量为2%的MOC在无害孔处的最可几孔径峰最高,表明该试样中的无害孔较其余两组多,其耐水性能较好.

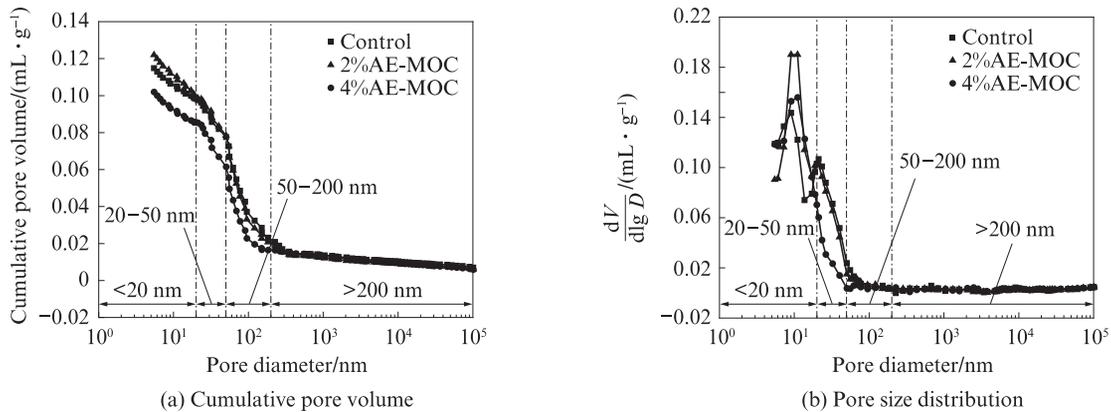


图9 AE改性MOC的累计孔体积及孔径分布曲线

Fig. 9 Accumulated pore volume and pore size distribution curves of AE modified MOC

### 3 结论

(1)由于AE具有吸附及络合作用,其在水泥颗粒表面形成的膜结构能够延长MOC的凝结时间.当AE掺量为2%时,MOC的初凝、终凝时间分别达到275、301 min. AE在MOC浆体中的分散作用能够增大其流动度,当AE掺量为3%时,MOC的流动度达到203 mm.

(2)AE中的羧基基团参与了MOC的水化反应,阻碍了活性MgO颗粒与 $MgCl_2$ 溶液的化学反应,抑制了5·1·8相针状晶体的生长,改变了其晶体形态,降低了AE改性MOC的强度.当AE掺量为4%时,MOC的抗折强度及抗压强度达到最低值,分别为8.8、23.1 MPa.

(3)AE在MOC水化产物表面形成的膜结构起到一定的防水作用,延缓了5·1·8相晶体在水中的水解,减少了 $Mg(OH)_2$ 晶体的生成,且降低了MOC中有害孔的体积分数,优化了耐水性能.当AE掺量为2%时,MOC的7、28 d软化系数达到最大值,分别为0.8、0.6.

AE具有一定的吸附及络合作用,其在水泥颗粒及水化产物表面形成的膜结构对MOC的力学性能

及5·1·8相针状晶体造成的负面影响不应忽视.此外,由于聚合物乳液的成膜效应受温度影响较大,AE对MOC水化动力学的影响需要进行相应的系统研究;且其对MOC整体性能的改善并不理想,仍需继续寻找能够优化MOC整体性能的新方法.

#### 参考文献:

- [1] 顾康,陈兵.柠檬酸和柠檬酸铵对氯氧镁水泥水稳定性的改善机理[J].建筑材料学报,2022,25(5):441-446.  
GU Kang, CHEN Bing. Mechanism of citric acid and ammonium citrate tribasic on improving water stability of magnesium oxychloride cement[J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(5):441-446. (in Chinese)
- [2] BEAUDOIN J J, RAMACHANDRAN V S. Strength development in magnesium oxychloride and other cements[J]. Cement and Concrete Research, 1975, 5(6):617-630.
- [3] 陈克凡,乔宏霞,王鹏辉,等.氯氧镁水泥钢筋混凝土通电锈蚀的断裂性能分析[J].建筑材料学报,2020,23(3):557-562.  
CHEN Kefan, QIAO Hongxia, WANG Penghui, et al. Fracture behavior analysis of magnesium oxychloride cement reinforced concrete under electric corrosion [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(3):557-562. (in Chinese)
- [4] 王鹏辉,乔宏霞,冯琼,等.氯氧镁水泥混凝土中涂层钢筋的耐久性退化研究[J].建筑材料学报,2020,23(3):563-571.

- WANG Penghui, QIAO Hongxia, FENG Qiong, et al. Study on durability degradation of coated steel bar in magnesium oxychloride cement concrete[J]. *Journal of Building Materials*, 2020, 23(3):563-571. (in Chinese)
- [ 5 ] CAO F, QIAO H X, SHU X Y, et al. Potential application of highland barley straw ash as a new active admixture in magnesium oxychloride cement[J]. *Journal of Building Engineering*, 2022, 59:105108.
- [ 6 ] SGLAVO V M, DE GENUA F, CONCI A, et al. Influence of curing temperature on the evolution of magnesium oxychloride cement [J]. *Journal of Materials Science*, 2011, 46 (20) : 6726-6733.
- [ 7 ] DEHUA D, CHUANMEI Z. The formation mechanism of the hydrate phases in magnesium oxychloride cement [J]. *Cement and Concrete Research*, 1999, 29(9):1365-1371.
- [ 8 ] 彭嘉伟, 邓德华, 刘赞群. 电导率法测定氯氧镁水泥中醇可抽提氯离子含量[J]. *建筑材料学报*, 2022, 25(8):877-884.  
PENG Jiawei, DENG Dehua, LIU Zanqun. Determination of alcohol leachable chloride ion content of magnesium oxychloride cement by conductivity method[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(8):877-884. (in Chinese)
- [ 9 ] 李颖, 余红发, 董金美, 等. 氯氧镁水泥的水化产物、相转变规律和抗水性评价方法的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2013, 41(11):1465-1473.  
LI Ying, YU Hongfa, DONG Jinmei, et al. Research development on hydration product, phase transformation and water resistance evaluation method of magnesium oxychloride cement[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2013, 41 (11):1465-1473. (in Chinese)
- [10] 宁亚瑜, 张冷庆, 丁向群. 几种因素对氯氧镁水泥性能的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2016, 35(7):2287-2290.  
NING Yayu, ZHANG Lengqing, DING Xiangqun. Influence of some factors on the properties of magnesium oxychloride cement [J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2016, 35(7) : 2287-2290. (in Chinese)
- [11] 邓德华. 磷酸根离子对氯氧镁水泥水化物稳定性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2002, 5(1):9-12.  
DENG Dehua. Effect of the phosphate anion on the stabilization of hydrate in magnesium oxychloride cement [J]. *Journal of Building Materials*, 2002, 5(1):9-12. (in Chinese)
- [12] GUO Y Y, ZHANG Y X, SOE K, et al. Effect of fly ash on mechanical properties of magnesium oxychloride cement under water attack[J]. *Structural Concrete*, 2020, 21(3):1181-1199.
- [13] YANG J J, ZHANG H G, YU T, et al. Study on the modification mechanism of modifiers on the properties of sawdust-magnesium oxychloride cement composite [J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 344:128172.
- [14] 曹锋, 乔宏霞, 李双营, 等. 丙烯酸乳液/青稞秸秆灰改性氯氧镁水泥的耐水性能研究[J]. *功能材料*, 2022, 53(10) : 10122-10129.  
CAO Feng, QIAO Hongxia, LI Shuangying, et al. Study on water resistance of magnesium oxychloride cement modified by acrylic emulsion and highland barley straw ash[J]. *Journal of Functional Materials*, 2022, 53(10):10122-10129. (in Chinese)
- [15] 孔祥明, 卢子臣, 张朝阳. 水泥水化机理及聚合物外加剂对水泥水化影响的研究进展[J]. *硅酸盐学报*, 2017, 45(2):274-281.  
KONG Xiangming, LU Zichen, ZHANG Chaoyang. Recent development on understanding cement hydration mechanism and effects of chemical admixtures on cement hydration[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2017, 45(2):274-281. (in Chinese)
- [16] WU C Y, YU H F, ZHANG H F, et al. Effects of phosphoric acid and phosphates on magnesium oxysulfate cement [J]. *Materials and Structures*, 2015, 48(4):907-917.
- [17] 陈啸洋, 毕万利, 张婷婷, 等. 柠檬酸对氯氧镁水泥的改性[J]. *硅酸盐学报*, 2019, 47(7):884-890.  
CHEN Xiaoyang, BI Wanli, ZHANG Tingting, et al. Modification of magnesium oxychloride cement by citric acid[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2019, 47(7):884-890. (in Chinese)
- [18] SHI C, ZOU X W, YANG L, et al. Influence of humidity on the mechanical properties of polymer-modified cement-based repair materials[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 261: 119928.
- [19] RIBEIRO M S S, GONÇALVES A F, BRANCO F A B. Styrene-butadiene polymer action on compressive and tensile strengths of cement mortars[J]. *Materials and Structures*, 2008, 41(7):1263-1273.
- [20] HAN Y, XU Y, SHI S Q, et al. Cuttlebone-inspired magnesium oxychloride cement reinforced by biochar as green adhesive for wood industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 370: 133365.
- [21] ABDEL-GAWWAD H A, KHALIL K A. Preparation and characterization of one-part magnesium oxychloride cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 189:745-750.
- [22] LI K, WANG Y S, YAO N N, et al. Recent progress of magnesium oxychloride cement: Manufacture, curing, structure and performance[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 255:119381.