

文章编号:1007-9629(2024)03-0197-09

煅烧沸石粉对硫氧镁水泥耐水性的影响

周俊峰¹, 陈啸洋^{1,2}, 陈兵³, 毕万利^{1,4}, 关岩^{1,4,*}

(1. 辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁鞍山 114051; 2. 辽宁科技大学化学工程与技术学院, 辽宁鞍山 114051; 3. 上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院, 上海 200240; 4. 辽宁科技大学科大峰驰镁建材研究院, 辽宁鞍山 114051)

摘要:为提高硫氧镁水泥(MOSC)的耐水性,以煅烧沸石粉为掺合料制备MOSC,研究了煅烧前后沸石粉对MOSC凝结时间、力学性能、耐水性、相组成、微观形貌和孔结构的影响.结果表明:掺入煅烧沸石粉提高了MOSC的力学性能,且煅烧前后的沸石粉均可在MOSC体系中反应形成水化硅酸镁(M-S-H)凝胶,降低了MOSC的总孔隙率,提高了MOSC的耐水性,但掺入煅烧沸石粉的MOSC耐水性更优;MOSC中掺入20%经200℃煅烧、升温速率15℃/min处理的沸石粉后,MOSC的耐水性最优,其28d抗压和抗折强度保留系数分别可达0.91、0.95.

关键词:硫氧镁水泥;煅烧;沸石粉;耐水性;相组成;微观形貌

中图分类号:TQ172.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.03.002

Effect of Calcined Zeolite Powder on Water Resistance of Magnesium Oxysulfate Cement

ZHOU Junfeng¹, CHEN Xiaoyang^{1,2}, CHEN Bing³, BI Wanli^{1,4}, GUAN Yan^{1,4,*}

(1. School of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China; 2. School of Chemical Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China; 3. School of Naval Architecture, Ocean & Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China; 4. Reseach Institution of Keda Fengchi Magnesium Building Materials, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: To improve the water resistance of magnesium oxysulfate cement (MOSC), MOSC were prepared using calcined zeolite powder as an admixture. The effects of calcined zeolite powder before and after calcination on the setting time, mechanical properties, water resistance, phase composition, microstructure, and pore structure of MOSC were investigated. The results indicate that the mechanical properties of MOSC are improved by adding calcined zeolite powder, and the hydrated magnesium silicate gel can be formed by the reaction of zeolite powder before and after calcination in the MOSC system, which reduces the total porosity of MOSC and improves the water resistance of MOSC, but the water resistance of MOSC mixed with calcined zeolite powder is better. After adding 20% zeolite powder that has been calcined at 200 °C and treated at a heating rate of 15 °C/min, the water resistance of MOSC is optimal. The retention coefficients of compressive and flexural strength at 28 days can reach 0.91 and 0.95, respectively.

Key words: magnesium oxysulfate cement; calcination; zeolite powder; water resistance; phase composition; microstructure

收稿日期:2023-04-25; 修订日期:2023-06-06

基金项目:辽宁省教育厅项目(LJKFZ20220193);“十三五”国家重点研发计划子课题(2020YFC1909304)

第一作者:周俊峰(1998—),男,辽宁葫芦岛人,辽宁科技大学硕士生.E-mail:1662608176@qq.com

通讯作者:关岩(1971—),女,辽宁鞍山人,辽宁科技大学副教授,硕士生导师,硕士.E-mail:15841293909@163.com

硫氧镁水泥(MOSC)是由轻烧氧化镁粉与一定浓度 $MgSO_4$ 溶液混合而成的镁质胶凝材料^[1-2],其反应体系为 $MgO-MgSO_4-H_2O$ 三元胶凝体系. MOSC 具有质轻、耐磨、导热系数低等优点,已被应用于轻质保温板和装饰材料等材料^[3-5]. 前期工作发现, MOSC 浸水一段时间后,体系中未反应的 MgO 会持续水化形成 $Mg(OH)_2$, 导致 MOSC 基体膨胀,甚至开裂,力学性能降低^[6],其浸水 28 d 的抗压强度保留系数仅为 0.20~0.40,这是造成 MOSC 耐水性差的主要原因. 向 MOSC 体系中掺入活性或非活性掺合料(如花岗岩石粉、硅灰、粉煤灰和纳米 SiO_2 等^[7-10])后, MOSC 的 28 d 抗压强度可进一步提升至 75 MPa 左右,浸水 28 d 后的抗压强度保留系数可提升至 0.80.

沸石粉(ZE)经过煅烧后具有一定的活性,可与水泥浆体中的 $Ca(OH)_2$ 反应生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶,从而改善水泥的力学性能^[11]. 因此,若以煅烧沸石粉为硅源掺入至 MOSC 体系,煅烧沸石粉中的活性 SiO_2 可通过吸附 MOSC 体系中游离的镁离子,反应生成水化硅酸镁(M-S-H)凝胶,从而提高浸水后 MOSC 的力学性能和耐水性^[12]. 为提高 MOSC 的耐水性,本文以柠檬酸为改性剂,以煅烧沸石粉为掺合料,制备了 MOSC,研究了煅烧前后沸石粉对 MOSC 凝结时间、力学性能、耐水性、相组成、微观形貌和孔结构的影响.

1 试验

1.1 原料

轻烧氧化镁粉(LBM)来自辽宁镁菱有限公司,其粒径累积分布 10% 的颗粒粒径 D_{10} 、50% 的颗粒粒径 D_{50} 、90% 的颗粒粒径 D_{90} 分别为 3.49、20.98、56.89 μm ,活性氧化镁($\alpha-MgO$)含量(质量分数,文中涉及的含量、组成等除特殊说明外均为质量分数)为 65.5%^[13](水合法). 七水硫酸镁和柠檬酸(CA)均为分析纯试剂,来自国药集团化学试剂有限公司. 沸石粉来自丹东某企业,其 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} 分别为 0.90、27.66、130.80 μm . LBM 和 ZE 的化学组成见表 1,其激光粒度分布曲线见图 1.

表 1 LBM 和 ZE 的化学组成

Table 1 Chemical compositions (by mass) of LBM and ZE

Material	Unit: %					
	MgO	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Other
LBM	86.50	2.32	2.34	1.47	1.42	5.95
ZE	1.21	75.35	3.68	1.68	13.92	4.16

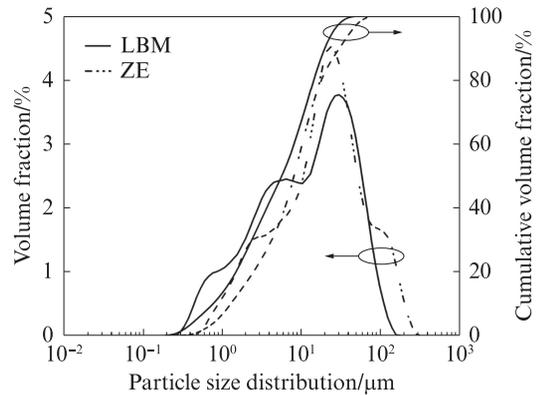


图 1 LBM 和 ZE 的激光粒度分布曲线

Fig. 1 Laser particle size distribution of LBM and ZE

1.2 试样制备

为了得到力学性能较好的 MOSC,其原料摩尔比通常为: $n(\alpha-MgO)/n(MgSO_4)=6\sim 10$; $n(H_2O)/n(MgSO_4)=18\sim 21$ ^[14-15]. 本文选用 $n(\alpha-MgO)/n(MgSO_4)/n(H_2O)=9:1:20$,以轻烧氧化镁粉的质量计, CA、ZE 的掺量分别为 0.5%、20%. 设置 ZE 的煅烧温度为 200、400 $^{\circ}C$,升温速率为 5、10、15 $^{\circ}C/min$. 将制得的煅烧 ZE 命名为 Z-X-Y,其中 X、Y 分别为 ZE 的煅烧温度及升温速率. MOSC 的制备过程为: 先将称好的 CA 倒入所需浓度的 $MgSO_4$ 溶液中,搅拌直至得到澄清透明的混合溶液;接着将预先干混均匀的 LBM 和 ZE 缓慢倒入混合溶液中,继续混合搅拌,以得到混合均匀的 MOSC 浆体;然后将所得 MOSC 浆体分别倒入尺寸为 40.0 mm \times 40.0 mm \times 40.0 mm, 40.0 mm \times 40.0 mm \times 160.0 mm 和 25.4 mm \times 25.4 mm \times 285.0 mm 的钢模具中;最后将模具置于温度为 $(20\pm 3)^{\circ}C$ 、相对湿度 RH 为 $(60\pm 5)\%$ 的恒温恒湿养护箱中,养护至 24 h 后脱模,并将所得试样置于空气中继续养护至不同龄期 t . 将制得的 MOSC 命名为 T-X-Y. 为进行对比,制备了未掺 ZE 的 MOSC 对照组(control)及掺入未煅烧 ZE(Z-0)的 MOSC (UMOS).

1.3 试验方法

根据 GB/T 51003—2014《矿物掺合料应用技术规范》检测煅烧前后 ZE 的反应活性指数;利用 S8 Tiger 型 X 荧光分析仪检测 LBM 和 ZE 的化学组成;利用 Mastersizer 2000 型激光粒度分析仪检测 LBM 和 ZE 的细度;利用物理吸附仪检测 ZE 热处理前后多点比表面积的变化. 按照 GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》,使用维卡仪检测 MOSC 的初、终凝时间;按照 GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性试验方法》测定 MOSC 的流动度(扩展直径);按照 GB/T 17671—2021《水泥

胶砂强度检验方法》,使用 YDE-300D 型和 YES-2000 型万能试验机测试 MOSC 的抗压强度和抗折强度;按照 JC/T 313—2009《膨胀水泥膨胀率试验方法》,使用比长仪检测 MOSC 浸水前后的体积稳定性.

利用 X'Pert powder 型 X 射线扫描仪(XRD)检测 MOSC 的相组成,并用 Topas 6.0 软件根据 Rietveld 分析方法测定 MOSC 的矿物相含量;利用 Vertex 80v 型傅里叶红外光谱仪(FTIR)测试 MOSC 的水化产物;利用 SIGMA HD 型扫描电子显微镜(SEM)观察喷金后 MOSC 试样断口处的微观形貌;采用 SEM-X 射线微区分析(EDS)测试矿物相表面的元素组成;利用 Pore Master 33 型压汞仪(MIP)检测 MOSC 的总孔隙率和孔径分布.

待 MOSC 空气养护至 28 d(浸水前)后,将其置于自来水中浸泡 28 d(浸水后),测试其浸水前后的抗

压强度和抗折强度.MOSC 的抗压强度保留系数 R_{cs} 和抗折强度保留系数 R_{fs} 分别为:

$$R_{cs} = \frac{R_{c28}}{R_{c0}} \quad (1)$$

$$R_{fs} = \frac{R_{f28}}{R_{f0}} \quad (2)$$

式中: R_{c0} 、 R_{f0} 分别为浸水前试样的抗压强度和抗折强度; R_{c28} 、 R_{f28} 分别为浸水后试样的抗压强度和抗折强度.

2 结果与讨论

2.1 煅烧过程对沸石物理化学特性的影响

煅烧前后 ZE 的微观形貌见图 2.由图 2 可见:未煅烧 ZE 的表面附着大量无规则状颗粒;煅烧后 ZE 的表面光滑平整.表明煅烧后 ZE 的活性更强,其原因为煅烧后 ZE 颗粒之间的相互作用较少,活性位点更容易暴露并参与反应,从而导致其活性提高.

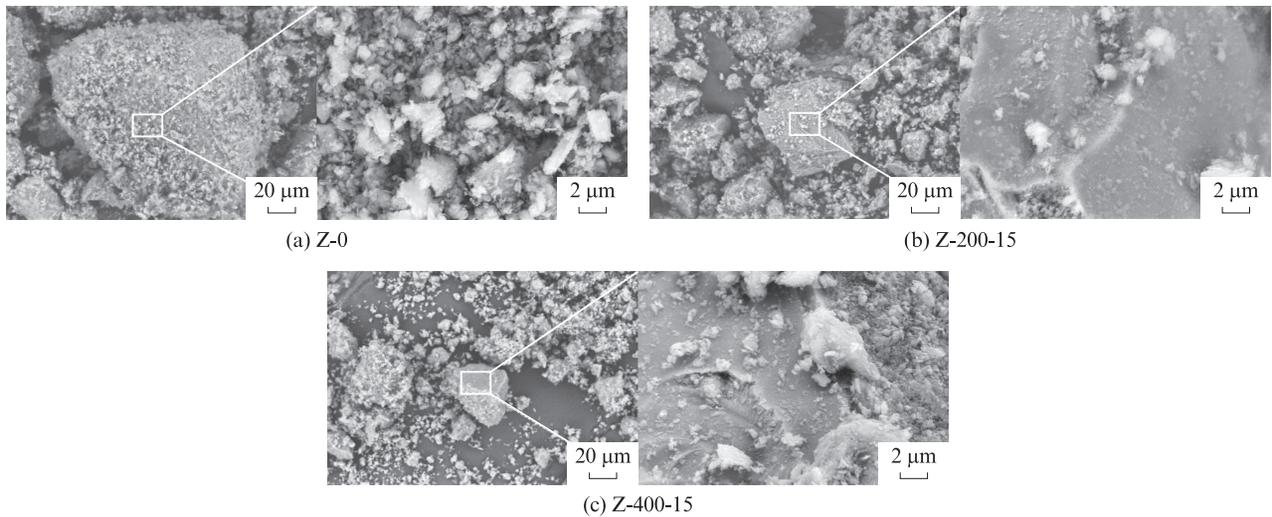


图 2 煅烧前后 ZE 的微观形貌
Fig. 2 Microstructure of ZE before and after calcination

煅烧前后 ZE 的比表面积、活性指数和晶粒尺寸见表 2.由表 2 可见:当升温速率固定时,ZE 的比表面

表 2 煅烧前后 ZE 的比表面积、活性指数和晶粒尺寸
Table 2 Specific surface area, activity index and crystal size of ZE before and after calcination

Sample	Specific surface area/($m^2 \cdot g^{-1}$)	Activity index/%	Crystal size/nm
Z-0	820.446 5	28.59	36.378 8
Z-200-5	849.403 2	27.58	37.375 2
Z-200-10	851.074 2	27.85	33.639 8
Z-200-15	854.426 2	29.25	30.973 1
Z-400-5	843.731 1	27.49	39.517 7
Z-400-10	846.486 6	27.74	36.115 1
Z-400-15	852.732 2	27.96	32.784 8

积和活性指数均随着煅烧温度的提高而降低,晶粒尺寸随着煅烧温度的提高而增大,其原因为随着煅烧温度的提高 ZE 的活性指数降低,孔道的数量和大小^[16]减少,从而使 ZE 的比表面积和活性指数降低;当煅烧温度固定时,随着升温速率的提高,ZE 的比表面积和活性指数提高,晶粒尺寸降低,其原因为升温速率较低易造成 ZE 晶体结构生长完整,活性指数和比表面积降低,晶粒尺寸增大^[17].

2.2 煅烧前后沸石粉对 MOSC 凝结时间和流动度的影响

MOSC 的凝结时间和流动度见图 3.由图 3 可见:煅烧前后的 ZE 均缩短了 MOSC 的初、终凝时间;当升温速率固定时,掺入煅烧后 ZE 的 MOSC 初、终

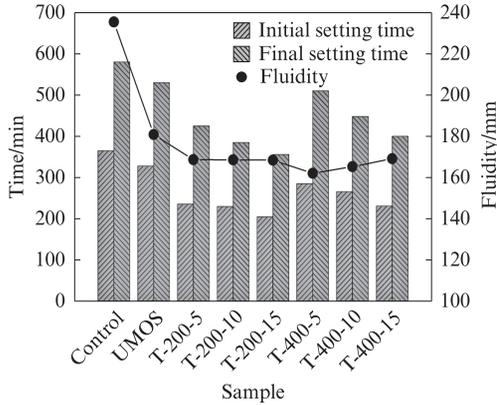


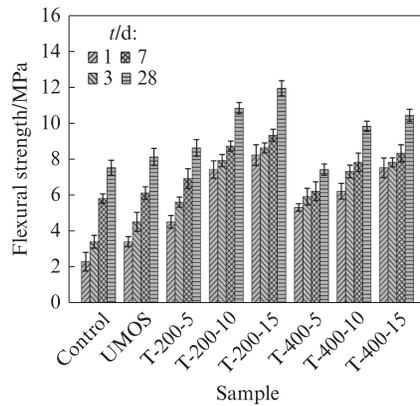
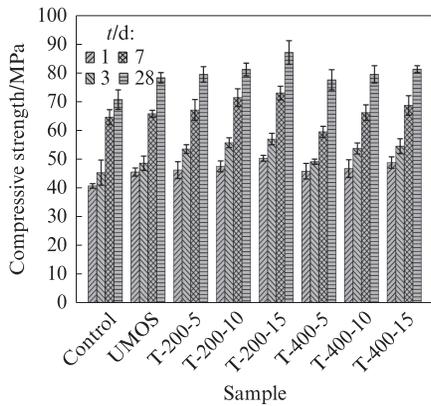
图3 MOSC的凝结时间和流动度
Fig. 3 Setting time and fluidity of MOSC

凝时间均随着煅烧温度的提高而延长,其原因为煅烧温度的提高破坏了ZE的活性位点,降低了其活性指数,从而降低了ZE的比表面积^[16],延长了其凝结时间;当煅烧温度固定时,MOSC的初、终凝时间均

随着升温速率的提高而缩短,其原因为随着升温速率的提高,ZE的活性指数和比表面积提高,MOSC的凝结时间缩短;煅烧前后的ZE均降低了MOSC的流动度,其原因为ZE为多孔材料,可吸收MOSC浆料中的水分,从而降低了MOSC浆体的流动性。

2.3 煅烧前后沸石粉对MOSC强度的影响

MOSC的抗压强度和抗折强度见图4.由图4可见:MOSC的抗压强度和抗折强度均随着养护龄期的延长而提高,且掺入煅烧前后的ZE均提高了MOSC的抗压强度和抗折强度;当升温速率固定时,掺入煅烧后ZE的MOSC抗压强度和抗折强度均随着煅烧温度的提高呈现先增加后降低的趋势;当煅烧温度固定时,掺入煅烧后ZE的MOSC抗压强度和抗折强度均随着升温速率的提高而增加;试样T-200-15在空气中养护28d的抗压强度和抗折强度最高,较对照组分别提高了23.16%和58.67%。



(a) Compressive strength

(b) Flexural strength

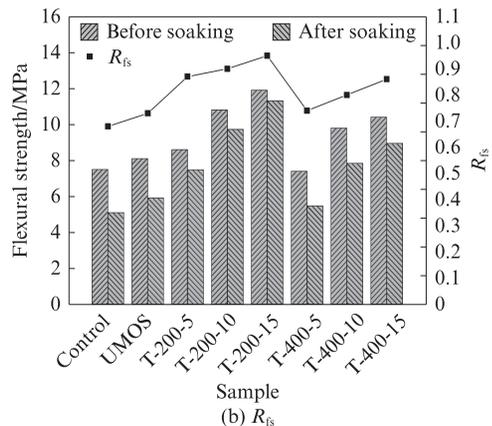
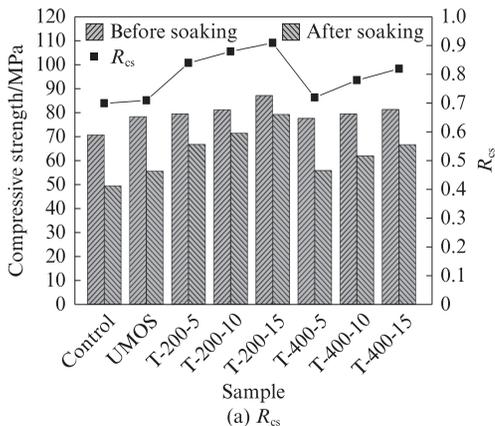
图4 MOSC的抗压强度和抗折强度

Fig. 4 Compressive strength and flexural strength of MOSC

2.4 煅烧前后沸石粉对MOSC耐水性的影响

浸水前后的MOSC抗压强度、抗折强度及保留系数见图5.由图5可见:煅烧前后的ZE均提高了

MOSC的耐水性;对照组试样的 R_{cs} 和 R_{fs} 分别为0.70、0.68,掺入未煅烧ZE后,MOSC的 R_{cs} 和 R_{fs} 提升至0.71、0.73,而试样T-200-15的 R_{cs} 和 R_{fs} 提升至



(a) R_{cs}

(b) R_{fs}

图5 浸水前后MOSC的抗压强度、抗折强度及保留系数

Fig. 5 Compressive strength, flexural strength and retention factor of MOSC before and after soaking in water

0.91、0.95。可见掺入煅烧后ZE对MOSC耐水性的提升效果更强。

2.5 煅烧前后沸石粉对MOSC体积稳定性的影响

浸水前后MOSC的膨胀率见图6。由图6可见:浸水前,由于自由水的蒸发,对照组、试样UMOS及掺入煅烧温度200℃ZE的试样组均随着养护龄期的延长出现体积收缩现象^[18],但未处理和煅烧温度200℃的ZE提高了MOSC在空气中的体积稳定性;掺入煅烧温度400℃ZE的试样均出现体积膨胀现象,且MOSC的体积膨胀率随着处理ZE升温速率的增加而增加;浸水后,掺入煅烧前后ZE的MOSC均出现体积膨胀现象,其原因为MOSC浸水后,体系中未反应的氧化镁继续水化形成氢氧化镁,导致MOSC体积膨胀。

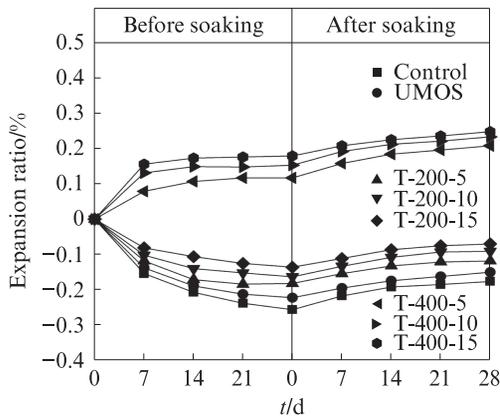


图6 浸水前后MOSC的膨胀率
Fig. 6 Expansion ratio of MOSC before and after soaking in water

2.6 煅烧前后沸石粉对MOSC相组成的影响

MOSC的FTIR光谱见图7。由图7可见:在539.7、667.4 cm^{-1} 处的吸收谱带是由 SO_4^{2-} 的S—O对称和不对称变形振动引起的;在1110.4、1454.2 cm^{-1} 处的吸收谱带属于 SO_4^{2-} 的S—O对称和不对称伸缩振动,表明 SO_4^{2-} 存在于MOSC体系中;在1110.4、1624.6 cm^{-1} 处的吸收谱带属于 CO_3^{2-} 的C—O伸缩振动;在1624.6 cm^{-1} 、3442.5 cm^{-1} 处的吸收谱带分别是由MOSC体系中结晶水和517相中O—H的伸缩振动导致的;在990.0~1050.0、1090.0~1200.0 cm^{-1} 区间内的吸收谱带分别是由M-S-H中的Si—O—Si内部伸缩振动(Q^3)和不对称外部伸缩振动(Q^4)导致的,表明试样UMOS和T-200-15中形成了M-S-H凝胶^[19-20]。

浸水前后MOSC的XRD图谱、矿物相含量和水中产物的晶粒尺寸见图8。由图8(a)可见:MOSC的主要矿物相为517相、 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 MgO 、 SiO_2 、

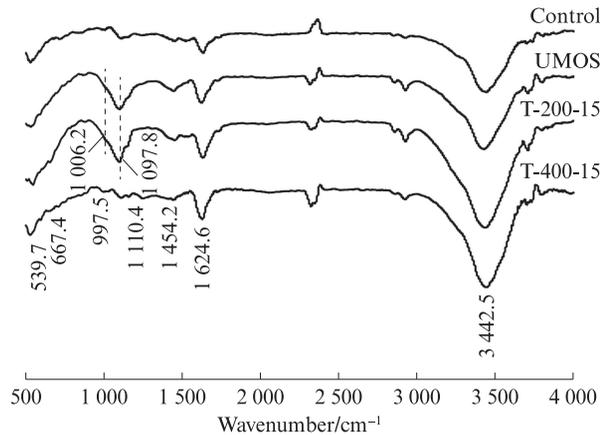


图7 MOSC的FTIR光谱
Fig. 7 FTIR spectra of MOSC

MgCO_3 ,其中517相与 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 为MOSC的主要水化产物,其余矿物相均来自LBM及ZE;ZE的掺入降低了 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 在 38.0° 、 58.6° 的衍射峰峰强,提高了517相在 17.8° 、 37.3° 的衍射峰峰强,说明ZE促进了517相的生长,抑制了 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的形成。由图8(b)可见:掺入未煅烧的ZE后抑制了 MgO 水化,降低了 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 和517相的生成量;掺入煅烧后的ZE降低了未反应 MgO 和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的含量,提高了517相的含量,其原因为煅烧后ZE的活性指数提高,有利于ZE中活性 SiO_2 与MOSC中的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 反应形成M-S-H凝胶,从而降低了 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的含量;浸水后,试样UMOS中517相含量较对照组降低了8.7%,而试样T-200-15、T-400-15中517相含量分别提高了7.7%、2.5%,表明掺入煅烧后的ZE提高了517相在水中的稳定性。由图8(c)可见:掺入未处理ZE及Z-200-15均有利于MOSC中517相晶体生长得更完整,并抑制 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的生长;掺入煅烧后的ZE较掺入未处理的ZE对提高517相在水中稳定性的效果更强。

2.7 煅烧前后沸石粉对MOSC微观形貌的影响

MOSC的微观形貌见图9。由图9可见:MOSC气孔通道中生长出短棒状的517相,这些晶体填充了MOSC基体内部的孔隙,为MOSC提供了强度;掺入煅烧前后的ZE,ZE的小颗粒填充于基体内部,ZE颗粒表面生长着大量517相晶体,且MOSC基体中生长出片状矿相。

试样T-200-15的SEM-EDS分析见图10。由图10可见,试样T-200-15中片状矿相的摩尔比 $n(\text{Al}):n(\text{Mg}):n(\text{Si}):n(\text{O})=0.77:1.64:1.00:5.91$,接近M-S-H的理论值 $n(\text{Mg}):n(\text{Si})=1:1$,表明体系中形成了M-S-H凝胶^[21],该凝胶有效地填充了由517相晶体交织形成的大量孔隙,并提高了MOSC的耐水性。

MOSC的SEM-EDS分析见图11。由图11

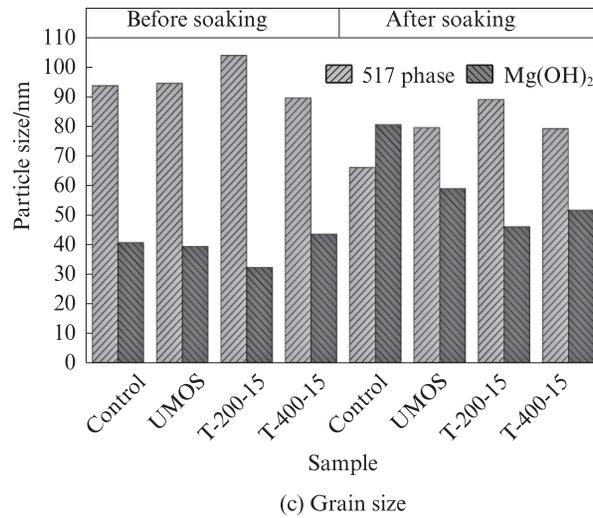
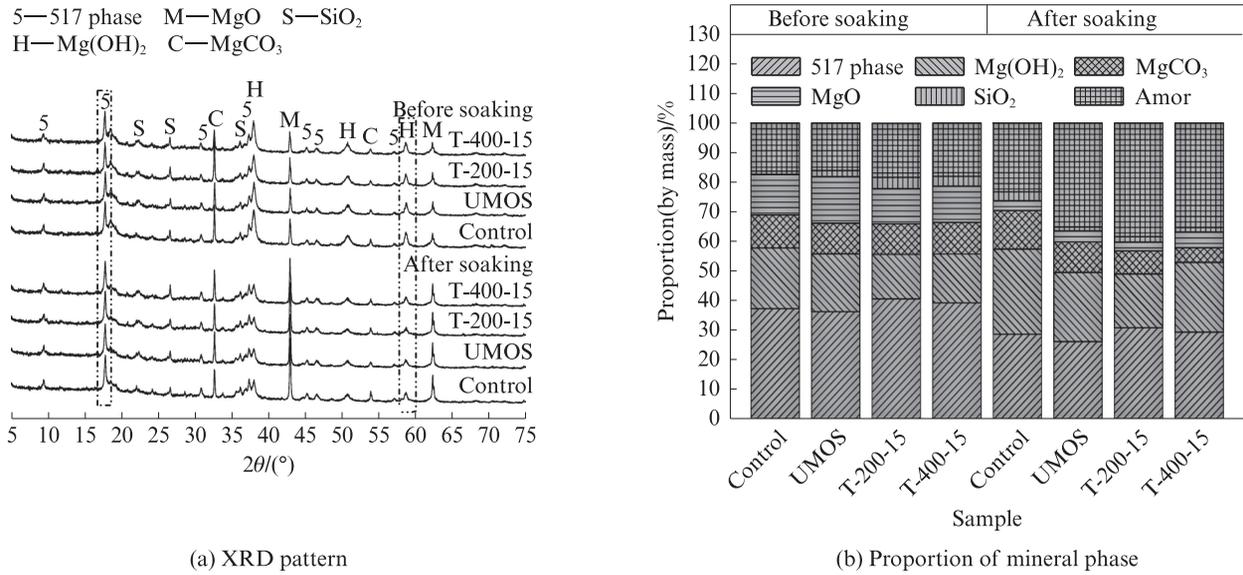


图8 浸水前后MOSC的XRD图谱、矿物相含量和水化产物的晶粒尺寸

Fig. 8 XRD pattern, proportion of mineral phases and grain size of hydration product of MOSC before and after soaking in water

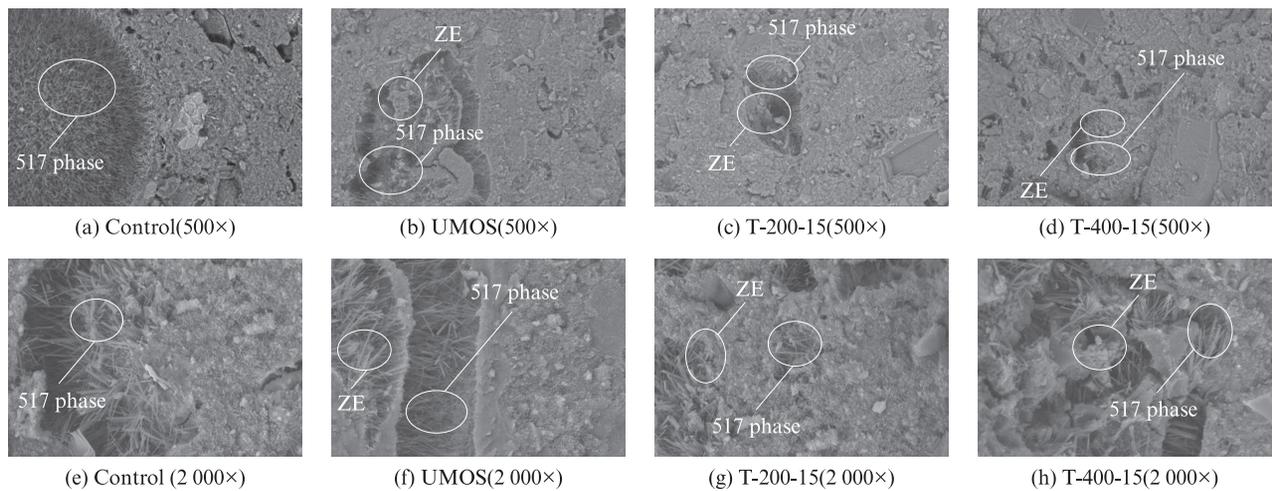


图9 MOSC的微观形貌

Fig. 9 Microstructures of MOSC

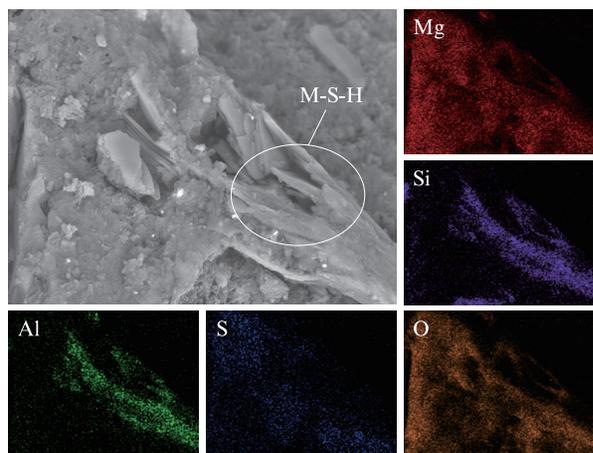


图10 试样 T-200-15 的 SEM-EDS 分析
Fig. 10 SEM-EDS analysis of sample T-200-15

可见,对照组和试样 T-200-15 中生长出层状的 $Mg(OH)_2$, 而试样 T-400-15 生长出六边形片状的 $Mg(OH)_2$, 这些 $Mg(OH)_2$ 晶体在 MOSC 中继续生长, 相互挤压导致 MOSC 体积膨胀, 与体积稳定性分析结果一致.

MOSC 的孔结构见表 3(表中 d 为孔径). 由表 3 可见: 对照组总孔隙率为 12.04%; 掺入未处理和煅烧温度 200 °C、升温速率 15 °C/min 的 ZE 均降低了 MOSC 的总孔隙率; 掺入煅烧温度 400 °C, 升温速率 15 °C/min 的 ZE 提高了 MOSC 的总孔隙率. 其原因为试样 T-400-15 中的六边形片状 $Mg(OH)_2$ 晶体相互挤压, 浆体内相连的孔隙增加, 从而提高了 MOSC 的总孔隙率.

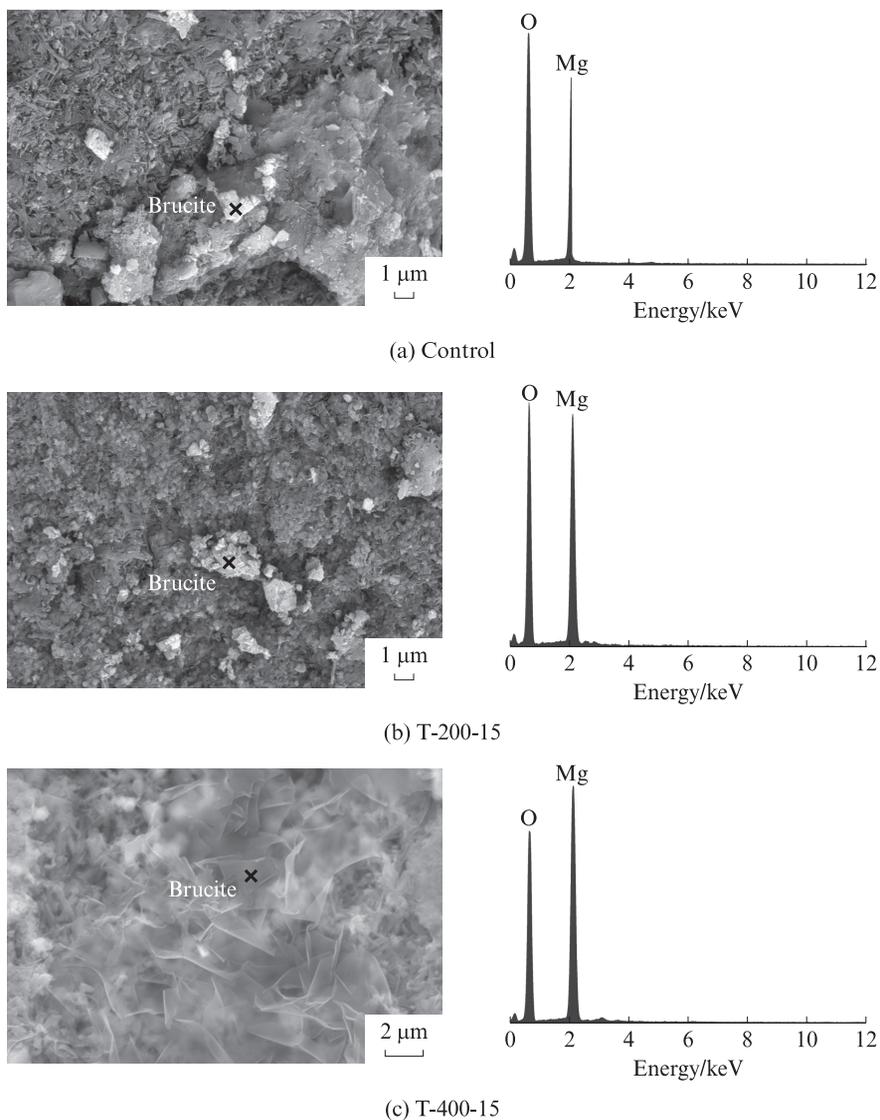


图11 MOSC 的 SEM-EDS 分析
Fig. 11 SEM-EDS analysis of MOSC

表3 MOSC的孔结构
Table 3 Pore structure of MOSC

Sample	Total intrusion volume/(mL·g ⁻¹)	Total porosity(by volume)/%	Pore size distribution/%		
			$d \leq 10$ nm	$10 \text{ nm} < d < 100$ nm	$d \geq 100$ nm
Control	0.112 5	12.04	20.65	75.49	3.86
UMOS	0.134 1	11.22	23.81	73.73	2.46
T-200-15	0.107 4	10.66	24.48	72.47	3.05
T-400-15	0.114 1	13.47	22.76	74.13	3.11

3 结论

(1)当升温速率固定时,掺入煅烧后沸石粉MOSC的初、终凝时间均随着煅烧温度的提高而延长;当煅烧温度固定时,掺入煅烧后沸石粉MOSC的初、终凝时间均随着升温速率的提高而缩短。

(2)煅烧后的沸石粉促进了MOSC体系中517相的生长,抑制了Mg(OH)₂的形成,从而提高了MOSC的力学性能.掺入煅烧温度200℃,升温速率15℃/min沸石粉MOSC 28 d抗压和抗折强度最高,较未掺沸石粉MOSC分别提高了23.16%、58.67%。

(3)未煅烧的沸石粉在MOSC体系中反应形成水化硅酸镁凝胶,该凝胶可填充MOSC基体内部的孔隙,从而提高MOSC的力学性能和耐水性.而煅烧后的沸石粉具有更高的化学反应活性,这使得沸石粉中的活性SiO₂更容易与MOSC体系中的Mg(OH)₂反应形成水化硅酸镁凝胶.同时,煅烧后的沸石粉可降低体系中Mg(OH)₂的含量及抑制Mg(OH)₂的生长,从而进一步提高MOSC的耐水性.其中,掺入煅烧温度200℃,升温速率15℃/min沸石粉MOSC浸水28 d后的抗压和抗折强度保留系数最高,分别为0.91和0.95。

参考文献:

- [1] WALLING S A, PROVIS J L. Magnesium-based cements: A journey of 150 years, and cements for the future? [J]. Chemical Reviews, 2016, 116(7):4170-4204.
- [2] JIANG Y Z, WANG C Y, XU Z S, et al. Surface modification mechanism of magnesium oxysulfate whiskers via wet chemical method[J]. Rare Metals, 2015, 35(11):874-880.
- [3] WU C Y, YU H F, ZHANG H F, et al. Effects of phosphoric acid and phosphates on magnesium oxysulfate cement [J]. Material and Structures, 2015, 48(4):907-917.
- [4] BA M F, XUE T, HE Z M, et al. Carbonation of magnesium oxysulfate cement and its influence on mechanical performance[J]. Construction and Building Materials, 2019, 223:1030-1037.
- [5] 柳俊哲, 孙武, 巴明芳, 等. 碳化对水泥石中硫元素分布的影

响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(3):477-481.

LIU Junzhe, SUN Wu, BA Mingfang, et al. Effect of carbonization on the distribution of sulfur in cement stone [J].

Journal of Building Materials, 2015, 18(3):477-481. (in Chinese)

- [6] CHEN X Y, ZHANG T T, CHEESEMAN C R, et al. Production of rapid-hardening magnesium oxysulfate (MOS) cement containing boric acid [J]. Journal of Materials of Civil Engineering, 2022, 34(5):04022045.

- [7] 靳凯戎, 许星星, 陈啸洋, 等. 花岗岩石粉对硫氧镁水泥耐水性性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(8):767-772, 780.

JIN Kairong, XU Xingxing, CHEN Xiaoyang, et al. Effect of granite powder on water resistance of magnesium oxysulfate cement [J]. Journal of Building Materials, 2022, 25(8):767-772, 780. (in Chinese)

- [8] 朱杰兆, 薛涛, 巴明芳. 高抗折硫氧镁基无机复合胶凝材料的制备及其机理[J]. 宁波大学学报(理工版), 2017, 30(6):66-72. ZHU Jiezhao, XUE Tao, BA Mingfang. Preparation and mechanism of high refractive magnesium sulfoxide-based inorganic composite cementitious material [J]. Journal of Ningbo University (Science and Technology), 2017, 30(6):66-72. (in Chinese)

- [9] LIU T, LI C Q, LI L, et al. Effect of fly ash and metakaolin on properties and microstructure of magnesium oxysulfate cement [J]. Materials, 2022, 15(4):1334-1348.

- [10] ZHOU J Q, WU C Y. Effects of nano-silica and silica fume on properties of magnesium oxysulfate cement [J]. Journal of the Ceramic Society of Japan, 2020, 128(3):164-173.

- [11] 刘业金. 沸石粉和玻璃粉复合对混凝土性能的影响[J]. 非金属矿, 2021, 44(1):43-46.

LIU Yejin. Effects of zeolite powder and glass powder on the properties of concrete [J]. Non-metallic Mines, 2021, 44(1):43-46. (in Chinese)

- [12] 陈啸洋, 张婷婷, 常钧, 等. 硅酸对硫氧镁水泥耐水性性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2023, 51(8):2017-2026.

CHEN Xiaoyang, ZHANG Tingting, CHANG Jun, et al. Effect of silicic acid on water resistance of magnesium sulfate cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2023, 51(8):2017-2026. (in Chinese)

- [13] 许星星, 李晶, 陈啸洋, 等. 蔗糖和活性氧化镁对硫氧镁水泥水化进程的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(2):193-199.

XU Xingxing, LI Jing, CHEN Xiaoyang, et al. Effects of sucrose and activated magnesium oxide on the hydration process of magnesium oxysulfate cement [J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(2):193-199. (in Chinese)

- [14] TANG S W, YUAN J H, CAI R J, et al. In situ monitoring of hydration of magnesium oxysulfate cement paste: Effect of MgO/MgSO₄ ratio[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 251: 119003.
- [15] 巴明芳,朱杰兆,薛涛,等.原料摩尔比对硫氧镁胶凝材料性能的影响[J].*建筑材料学报*, 2018, 21(1):124-130.
BA Mingfang, ZHU Jiezhao, XUE Tao, et al. Influence of molar ratio on properties of magnesium oxysulfate cementitious materials [J]. *Journal of Building Materials*, 2018, 21(1): 124-130. (in Chinese)
- [16] MERTENS G, SNELLINGS R, VANBALEN K, et al. Pozzolanic reactions of common natural zeolites with lime and parameters affecting their reactivity[J]. *Cement and Concrete Research*, 2009, 39(3):233-240
- [17] 汪衢,白丽梅,马玉新,等.菱镁矿煅烧制备氧化镁及其活性检测的研究进展[J].*有色金属(冶炼部分)*, 2022, 9(1):36-44.
WANG Qu, BAI Limei, MA Yuxin, et al. Research progress on preparation of magnesium oxide by calcination of spinel and its activity detection[J]. *Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy)*, 2022, 9(1):36-44. (in Chinese)
- [18] MALTELE C, PISTOLESI C, LOLLI A, et al. Combined effect of expansive and shrinkage reducing admixtures to obtain stable and durable mortars[J]. *Cement and Concrete Research*, 2004, 35(12):2244-2251.
- [19] BERNARD E, LOTHENBACH B, GOFF F L, et al. Effect of magnesium on calcium silicate hydrate (CSH)[J]. *Cement Concrete Research*, 2017, 97:61-72.
- [20] SIMONSEN M, SONDERBY C, LI Z, et al. XPS and FTIR investigation of silicate polymers[J]. *Journal of Materials Science*, 2009, 44(8):2079-2088.
- [21] DAUZERES A, ACHIEDO G, NIED D, et al. Magnesium perturbation in low-pH concretes placed in clayey environment-solid characterizations and modeling[J]. *Cement and Concrete Research*, 2016, 79:137-150.