

文章编号:1007-9629(2023)02-0193-07

蔗糖和活性氧化镁对硫氧镁水泥水化进程的影响

许星星¹, 李 晶², 陈啸洋², 余红发³, 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 化学工程学院, 辽宁 鞍山 114051; 3. 南京航空航天大学 土木工程学院, 江苏 南京 210016;
4. 辽宁科技大学 科大峰驰镁建材研究院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要:为了缩短硫氧镁水泥(MOSC)的凝结时间,提高其早期力学性能,以蔗糖为分散剂,用不同水化活性的氧化镁(MgO)粉制备了 MOSC,分析了蔗糖对 MOSC 凝结时间、水化性能、抗压强度、物相组成、微观形貌和孔结构的影响。结果表明:活性为 75.0% 的 MgO 粉较活性为 65.5% 的 MgO 粉制备的 MOSC 凝结时间更短,早期抗压强度更高;蔗糖作为分散剂更适用于活性为 75.0% 的 MgO 粉制备的 MOSC 体系,通过其空间位阻效应的发挥,改善新拌浆体的流动度,延长新拌浆体的初凝时间和终凝时间,还能抑制 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的生长,降低硬化浆体的孔隙率,提高其 28 d 的抗压强度;蔗糖可促进 MOSC 吸收大气中的 CO_2 形成 MgCO_3 晶体。

关键词:硫氧镁水泥;活性氧化镁粉;蔗糖;水化进程;抗压强度;水化产物;孔结构

中图分类号:TQ172.1

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2023.02.012

Effect of Sucrose and Active Magnesia on the Hydration Process of Magnesium Oxysulfate Cement

XU Xingxing¹, LI Jing², CHEN Xiaoyang², YU Hongfa³, 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. Department of Civil Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;
4. Reseach Institution of Keda Fengchi Magnesium Building Materials, Anshan 114051, China)

Abstract: To shorten the setting time and improve the early mechanical property of magnesium oxysulfate cement (MOSC), MOSC was prepared using magnesia(MgO) powder with different activities, and sucrose was used as a dispersing agent. The effect of sucrose on the setting time, hydration performance, compressive strength, phase composition, microstructure and pore structure of MOSC was investigated. The results show that, compared with samples prepared using MgO powder with 65.5% hydration activity, the setting time of MOSC prepared using MgO powder with 75.0% hydration activity is shorter and its early compressive strength is higher. Sucrose is preferable to MOSC prepared using MgO powder with 75.0% hydration activity. The sterically hindered effect of sucrose improves the fluidity of fresh MOSC paste, prolongs the initial and final setting time, inhibits the formation of $\text{Mg}(\text{OH})_2$, reduces the total porosity and enhances the 28 d compressive strength of hardened MOSC paste. The addition of sucrose is beneficial for MOSC to absorb CO_2 in the atmosphere to form MgCO_3 .

Key words: magnesium oxysulfate cement (MOSC); active magnesia powder; sucrose; hydration process; compressive strength; hydration product; pore structure

收稿日期:2021-12-24; 修订日期:2022-04-09

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2020YFC1909304);国家自然科学基金资助项目(51778101)

第一作者:许星星(1998—),女,江苏盐城人,辽宁科技大学硕士生.E-mail:xuxx98@126.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)是由氧化镁(MgO)粉与硫酸镁溶液混合拌制而成的胶凝材料,常温常压下,其主要水化产物为 $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ ^[1].与制备普通硅酸盐水泥相比,制备MgO粉的煅烧温度更低,CO₂排放量更少,同时MOSC中的活性MgO(α -MgO)组分易吸收空气中的CO₂,形成碳酸盐矿物相,因此MOSC被视为“低碳”水泥^[2-3].MOSC具有质轻、耐磨、防火等优势,但 $3\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 为亚稳态晶体,会逐渐分解生成Mg(OH)₂,使MOSC的力学性能降低^[4].为改善MOSC的力学性能,诸多弱酸及其盐类被作为改性剂^[5-8]掺入到MOSC中.改性剂能够发挥吸附配位作用,促使MOSC中形成具有空间填充性的 $5\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 晶体(5·1·7相),从而优化MOSC的孔结构,提高其力学性能^[9-14].

虽然掺加改性剂在一定程度上改善了MOSC的某些性能,但却延长了新拌浆体的凝结时间^[5-6,8,12],降低了MOSC的早期力学性能和生产效率.传统MgO粉是由反射窑在约950℃条件下焙烧菱镁矿2h而成,其水化活性小于68%.高活性MgO粉是由悬浮窑在约800℃条件下焙烧菱镁矿约8s而成,其水化活性大于70%^[8].当高活性MgO粉与水溶液接触后,其中的 α -MgO会迅速水化为Mg(OH)₂,这虽不利于5·1·7相的生长,但可提高MOSC的早期水化速率^[8].为改善MOSC的早期力学性能,本文以硼酸和蔗糖作为改性剂,研究了蔗糖掺量变化对MOSC凝结时间、水化性能、抗压强度、物相组成、微观形貌和孔结构等的影响,通过对比使用传统MgO粉和高活性MgO粉分别制备的MOSC的力学性能和凝结时间,探讨了使用高活性MgO粉制备MOSC的可行性.

1 试验

1.1 原材料

活性MgO粉T-LBM来源于辽宁镁菱有限公司,为利用反射窑在约1000℃下焙烧菱镁矿所得,其比表面积为300.0 m²/kg, α -MgO含量(水合法^[8])为65.5%(质量分数,文中涉及的含量、纯度等除特别指明外均为质量分数);活性MgO粉H-LBM来源于辽宁东和新材料股份有限公司,为利用悬浮窑在约900℃下焙烧菱镁矿所得,其比表面积为420.5 m²/kg, α -MgO含量(水合法)为75.0%;七水硫酸镁、改性剂(硼酸和蔗糖)均来源于国药集团,为分析纯试剂.T-LBM和H-LBM的化学组成及激光粒度分布曲线分别见表1和图1.

表1 T-LBM和H-LBM的化学组成

Table 1 Chemical compositions of T-LBM and H-LBM

Material	MgO	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Other
T-LBM	89.13	1.41	2.34	0.47	0.42	6.23
H-LBM	82.88	10.35	1.68	0.68	0.92	3.49

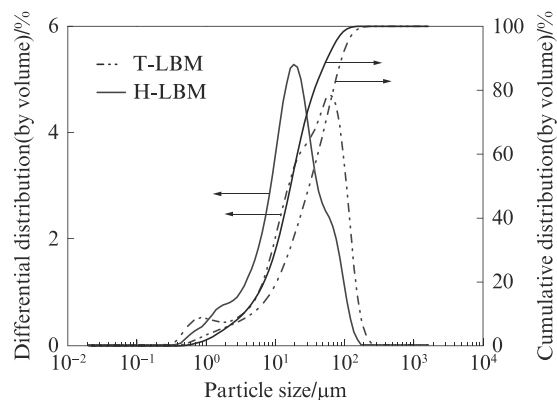


图1 T-LBM和H-LBM的激光粒度分布曲线

Fig. 1 Laser particle size distribution curves of T-LBM and H-LBM

1.2 试样制备

耐久性较好的MOSC,其原料摩尔比的范围通常为 $n(\alpha\text{-MgO}) : n(\text{MgSO}_4) : n(\text{H}_2\text{O}) = (6 \sim 10) : 1 : (18 \sim 21)$ ^[15-17],本试验用原材料摩尔比为 $n(\alpha\text{-MgO}) : n(\text{MgSO}_4) : n(\text{H}_2\text{O}) = 8.5 : 1 : 20$;硼酸掺量固定为MgO粉质量的0.7%;蔗糖掺量分别为MgO粉质量的0%、0.3%和0.7%,相应采用T-LBM制备的MOSC试样编号依次为TOSB、TOSBS和TOSBS1,相应采用H-LBM制备的MOSC试样编号依次为HOSB、HOSBS和HOSBS1.试样的具体制备步骤如下:按照原材料摩尔比分别称取七水硫酸镁和水,混合搅拌至得到澄清的硫酸镁水溶液;将称量好的改性剂(硼酸和蔗糖)溶于硫酸镁水溶液中并搅拌至其完全溶解,然后向其中加入称量好的MgO粉,继续搅拌约6 min以得到混合均匀的MOSC新拌浆体;将MOSC新拌浆体注入40 mm×40 mm×40 mm的模具中,经振动台振动20 s后,放于(23±2)℃,相对湿度(63±2)%的养护箱中养护约24 h后脱模,然后将试块置于温度不低于20℃的空气中继续养护至预定龄期.

1.3 测试方法

参照GB/T 1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》测定MOSC的凝结时间.参照GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性试验方法》测定MOSC新拌浆体的流动度.用RC-4HC型温度传感器检测MOSC水化前期(24 h内)的水化

放热温度,每组试样取3次测试结果的平均值;用TAM Air C80型水化热测定仪测试MOSC水化72 h内的累积水化放热量,测试仓环境温度为20℃.称取1 g按配合比混合好的MOSC粉末(颗粒尺寸 $\leq 60\ \mu\text{m}$)溶于10 mL的超纯水中,用THZ-82A型双数显旋转水浴振荡器振荡24 h后,取上层清液,用Zetasizer Nano-SZ型电泳仪和PHS-3C型pH计分别测试上层清液的Zeta电位和pH值.

测试MOSC养护0.5、1、3、7、28 d时的抗压强度,每组6个试块,取其平均值.

制备28 d龄期的MOSC硬化浆体的粉末样品,用X'Pert powder型X射线衍射仪($\text{Cu K}\alpha$, $\lambda = 0.154\ 18\ \text{nm}$)测试其物相组成,扫描范围(2θ)为 $5\sim 75^\circ$,步长为 0.02° ,扫描速率为 $0.5\ \text{s/步}$.在粉末样品中掺入15.0%的分析纯ZnO作为内标物,结合Topas 6.0软件,通过内标法^[8,18]计算试样中各矿物及无定形物相的含量.

从养护至28 d的MOSC硬化浆体中取薄片和粒径约为 $3\sim 5\ \text{mm}$ 的立方体试块,在 $45\ ^\circ\text{C}$ 的真空干燥箱中干燥至恒重.在薄片样品表面镀金,然后用SIGMA HD型场发射扫描电子显微镜(SEM)观察试样断口处的微观形貌.用Pore Master 33型压汞仪测试立方体试块的孔结构.

2 结果与讨论

2.1 凝结时间和流动度

图2为掺入蔗糖前后MOSC的凝结时间和流动度.由图2可见,蔗糖的掺入延长了MOSC的初、终凝时间.TOSB的初、终凝时间分别为253 min和405 min,掺入0.3%蔗糖后的TOSBS的初、终凝时

间分别延长至301 min和484 min,比TOSB分别延长了19.0%和19.5%;HOSB的初、终凝时间分别为68 min和97 min,掺入0.3%蔗糖后的HOSBS的初、终凝时间分别延长至106 min和154 min,比HOSB分别延长了55.9%和58.8%.由图2还可见:掺入0.3%蔗糖后的HOSBS的流动度为176.8 mm,比HOSB的流动度(134.3 mm)提高了31.6%,蔗糖的掺入改善了MOSC浆体的流动度,表明蔗糖可提高MOSC体系中颗粒的分散性;与T-LBM相比,H-LBM制备的MOSC的初、终凝时间更短,流动度更小,如HOSB的初、终凝时间分别比TOSB缩短了73.1%和76.0%,HOSB的流动度比TOSB的流动度(191.5 mm)降低了29.9%.

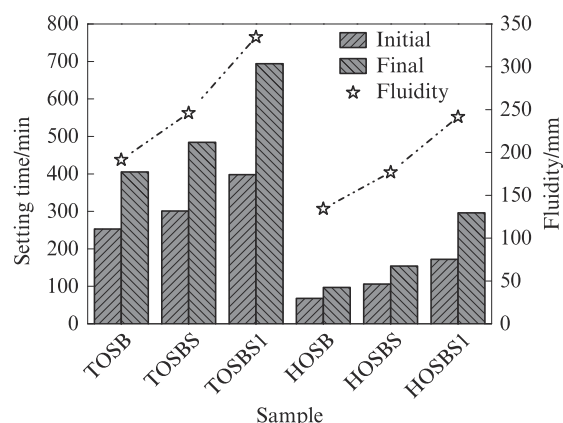
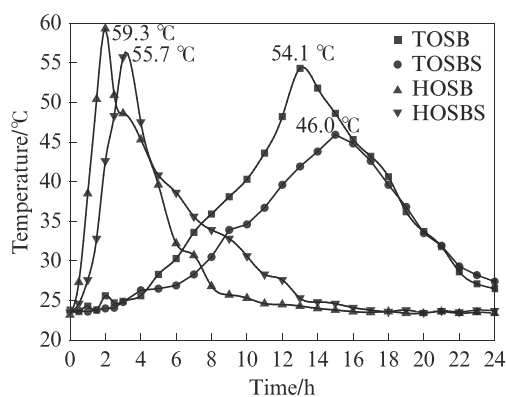


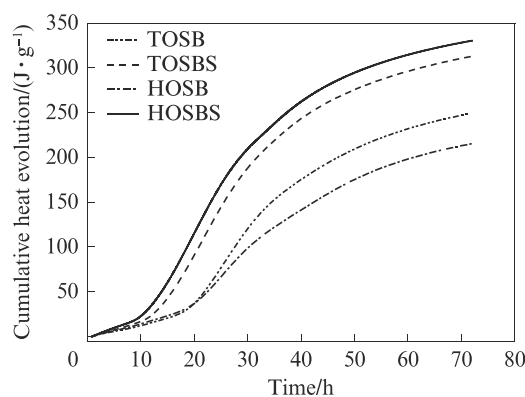
图2 掺入蔗糖前后MOSC的凝结时间和流动度
Fig. 2 Setting time and fluidities of MOSC with and without sucrose

2.2 水化放热温度和水化放热量

图3为掺入蔗糖前后MOSC的早期水化放热温度曲线和累积水化放热量曲线.由图3(a)可见:蔗糖可有效降低MOSC早期的水化放热温度,延缓



(a) Temperature evolution curves



(b) Cumulative heat evolution curves

图3 掺入蔗糖前后MOSC的早期水化放热温度曲线和累积水化放热量曲线

Fig. 3 Temperature evolution curves during early hydration and cumulative heat evolution curves of MOSC with and without sucrose

MOSC的水化速率,TOSB水化至约13 h时的水化放热温度最高,为54.1℃,TOSBS水化至约15 h时的水化放热温度最高,为46.0℃;与T-LBM相比,H-LBM制备的MOSC水化放热温度更高,达到峰值温度所需的水化时间更短,表明高活性MgO粉可提高MOSC的水化速率.由图3(b)可见:H-LBM制备的MOSC的水化放热量高于T-LBM制备的MOSC,表明H-LBM制备的MOSC水化反应更为剧烈;蔗糖的掺入降低了MOSC的水化放热量.

2.3 Zeta电位和pH值

图4为掺入蔗糖前后MOSC的Zeta电位和pH值.由图4可见:H-LBM制备的MOSC水化至约30 min时,其pH值高于T-LBM制备的MOSC;水化至1 h后,H-LBM制备的MOSC的pH值低于T-LBM制备的MOSC.这是由于H-LBM的水化活性高于T-LBM,其在硫酸镁水溶液中的溶解速率更快(见式(1))^[8],由其制备的MOSC中的活性MgO与硫酸镁水溶液接触后导致其碱度更高;随着活性MgO的继续溶解,H-LBM制备的MOSC比T-LBM制备的

MOSC更快达到水化产物生长所需的碱度,而5·1·7相和Mg(OH)₂的生长需消耗体系中的OH⁻,发生如式(2)和式(3)所示的反应^[19],因此,随着水化时间的延长,H-LBM制备的MOSC碱度低于T-LBM制备的MOSC.此外,蔗糖的掺入降低了MOSC水化早期的pH值,表明蔗糖抑制了活性MgO的溶解.

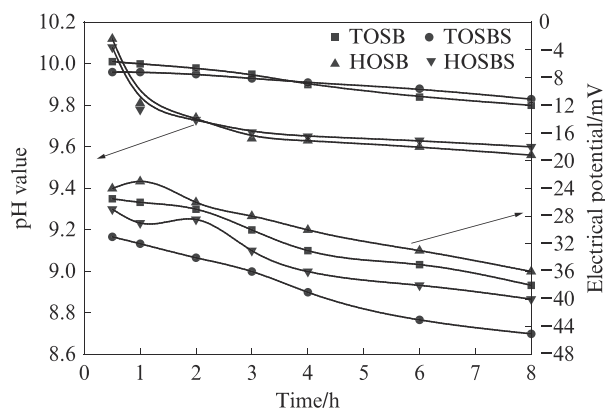


图4 掺入蔗糖前后MOSC的Zeta电位和pH值
Fig. 4 Zeta potentials and pH values of MOSC with and without sucrose



由图4还可见:MOSC体系的Zeta电位均为负值,表明体系中的负电荷吸附于活性MgO颗粒表面;蔗糖的掺入增加了MOSC体系的负电性,抑制了活性MgO的溶解,降低了MOSC体系的pH值,表明蔗糖可吸附于活性MgO表面,通过空间位阻效应提高体系中颗粒的分散性,而蔗糖与活性MgO颗粒间的吸附配位作用虽然改善了MOSC新拌浆体的流动度(见图2),却降低了MOSC体系的水化速率(见图3),延长了MOSC的凝结时间;活性更高的H-LBM中活性MgO颗粒在硫酸镁水溶液中更易出现团聚行为,因而H-LBM制备的MOSC体系的Zeta电位绝对值比T-LBM制备的MOSC体系更低;水化至约4 h后,MOSC体系的Zeta电位绝对值均高于30 mV,表明H-LBM和T-LBM中活性MgO颗粒在硫酸镁水溶液中均可表现出良好的分散行为.

2.4 抗压强度

图5为掺入蔗糖前后MOSC的抗压强度.由图5可见:各组MOSC试样的抗压强度均随龄期的延长而提高;H-LBM制备的MOSC抗压强度均高于同龄期T-LBM制备的MOSC,如TOSB和HOSB 1 d龄期的抗压强度分别为24.5 MPa和42.9 MPa,HOSB比TOSB提高了75.1%,这是因为H-LBM比

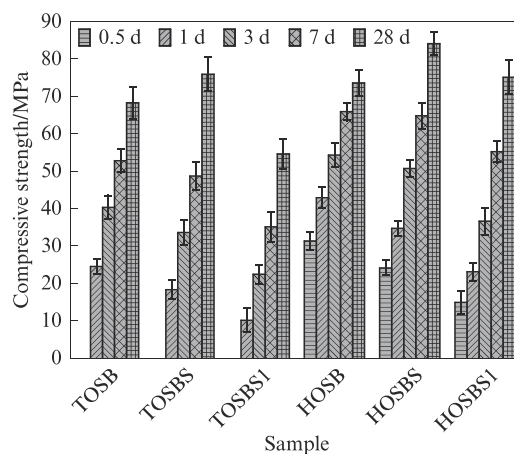


图5 掺入蔗糖前后MOSC的抗压强度
Fig. 5 Compressive strengths of MOSC with and without sucrose

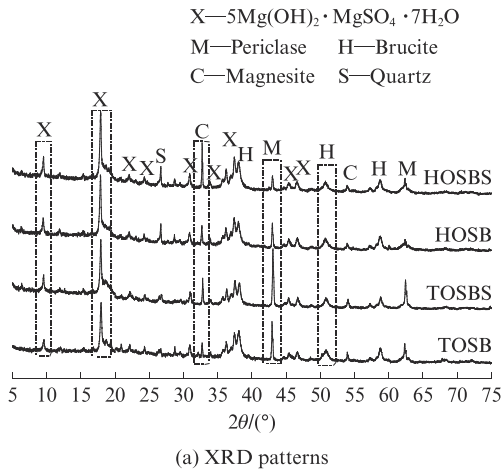
T-LBM的水化活性更高,H-LBM可在硫酸镁溶液中迅速溶解与水化,从而提高MOSC体系的碱度和水化温度,进一步促进体系中MgO颗粒的水化和水化产物的形成,使早期抗压强度更高,凝结时间更短;MOSC 7 d前的抗压强度随蔗糖掺量提高而降低,28 d抗压强度随蔗糖掺量提高呈先增加后降低的趋势,这是因为蔗糖的空间位阻效应抑制了MgO颗粒

的溶解与水化,降低了MOSC体系的水化速率及早期强度。

2.5 物相组成

图6为掺入蔗糖前后28 d龄期MOSC的XRD图谱及物相含量。

由图6(a)可见:各组MOSC试样中均含有5·1·7相、



$\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、未反应完全的 MgO 、 SiO_2 和 MgCO_3 ,其中5·1·7相和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 为MOSC的水化产物,其余物相均来源于 MgO 粉原料;蔗糖的掺入使得MOSC中5·1·7相在 2θ 约为 17.80° 处的衍射峰峰强有所增加,表明蔗糖的掺入有利于5·1·7相的生成,并使其生长发育更为完整。

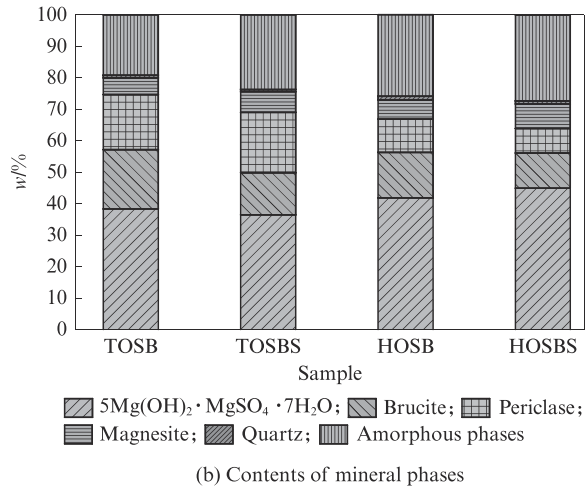


图6 掺入蔗糖前后28 d龄期MOSC的XRD图谱及物相含量

Fig. 6 XRD patterns and contents of mineral phases of MOSC with and without sucrose at the hydration time of 28 d

由图6(b)可见:水化28 d时,TOSBS体系中剩余 MgO 含量为19.2%,HOSBS体系中剩余 MgO 含量为7.8%,较前者减少了59.4%,H-LBM制备的MOSC中剩余 MgO 含量低于T-LBM制备的MOSC,表明高活性 MgO 在胶凝体系中的水化速率更快,有利于MOSC硬化浆体早期力学性能的增长;掺有蔗糖的HOSB试样中 MgO 的剩余量和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的生成量均较未掺蔗糖的试样少,但5·1·7相的生成量增加,这是由于HOSB体系中掺入的蔗糖与活性 MgO 间的吸附配位作用增大了活性 MgO 颗粒与硫酸镁水溶液的接触面积,抑制了体系中活性 MgO 的团聚,虽然活性 MgO 水化生成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的过程受到抑制,却仍有利于5·1·7相的生成;T-LBM的活性较低,与未掺蔗糖的TOSB相比,蔗糖的掺入虽然同样抑制了该体系中活性 MgO 水化为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,但并没有促进5·1·7相的生成,因而剩余 MgO 的含量较高;掺入0.3%蔗糖后,TOSB和HOSB体系中 MgCO_3 的含量分别提高了24.5%和27.9%,表明蔗糖可促进MOSC体系吸收空气中的 CO_2 形成 MgCO_3 晶体。

2.6 微观形貌和孔结构

图7为掺入蔗糖前后28 d龄期MOSC的SEM图片。由图7可见:各组MOSC硬化浆体中的5·1·7相在气孔中为长径比较大的针杆状晶体,在基体中

则为短棒状晶体,与文献研究一致^[19-20];具有空间填充性的5·1·7相晶体在MOSC基体中交互生长、相互穿插,为MOSC提供了机械强度。

图8为掺入蔗糖前后28 d龄期MOSC的孔径分布曲线。由图8(a)可见:TOSB、TOSBS、HOSB和HOSBS的最可几孔径分别为54.5、64.4、134.7、80.8 nm, H-LBM制备的MOSC最可几孔径较T-LBM制备的MOSC高,表明其中较大孔径的气孔含量更高,这与MOSC体系中单掺柠檬酸和硼酸的结果类似^[6,8];蔗糖的掺入使TOSB的最可几孔径增大,HOSB的最可几孔径减小,这是由于蔗糖的掺入降低了TOSB中5·1·7相晶体和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的生成量,且TOSB中存在较多未反应的 MgO 颗粒,但提高了HOSB中5·1·7相晶体的含量,且HOSB中存在较少的未反应 MgO 。由图8(b)可见:向HOSB和TOSB中掺入0.3%蔗糖后,MOSC的总孔隙率分别降至8.0%和9.7%,蔗糖的掺入降低了28 d龄期MOSC的总孔隙率,因而有利于其抗压强度的提高,此时其抗压强度分别可达84.1 MPa和75.9 MPa(见图5);HOSBS总孔隙率的降低是由于蔗糖的掺入提高了该体系中5·1·7相晶体的生成量(见图6(b)),TOSBS总孔隙率的降低是由于蔗糖的掺入使该体系中5·1·7相的结晶程度更高,晶体生长发育更为完整(见图7(b)),因而都有利于提高MOSC基体的致密度。

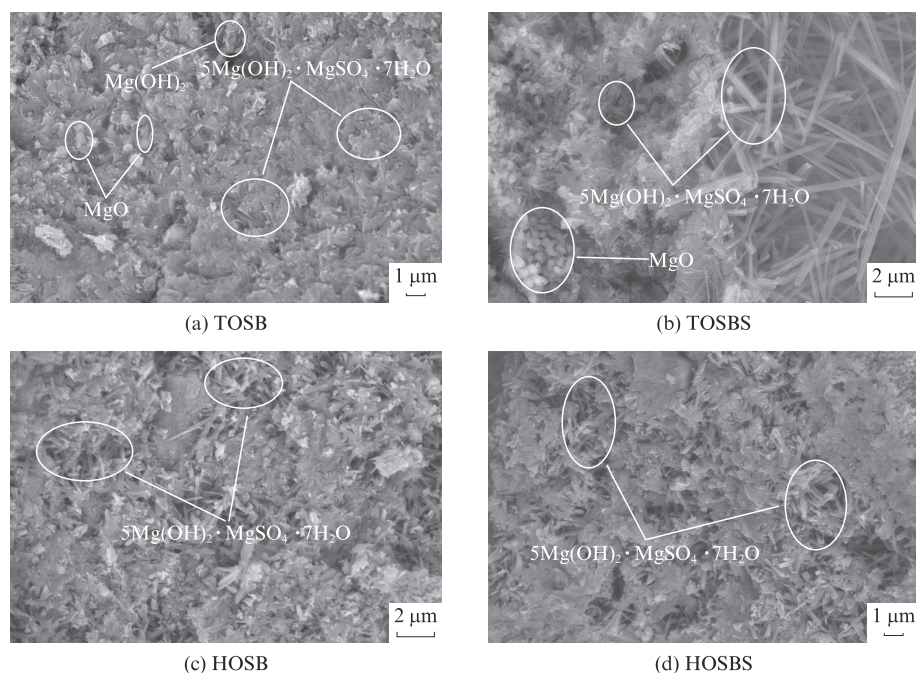


图7 掺入蔗糖前后28 d龄期MOSC的SEM图片

Fig. 7 SEM images of MOSC with and without sucrose at the hydration time of 28 d

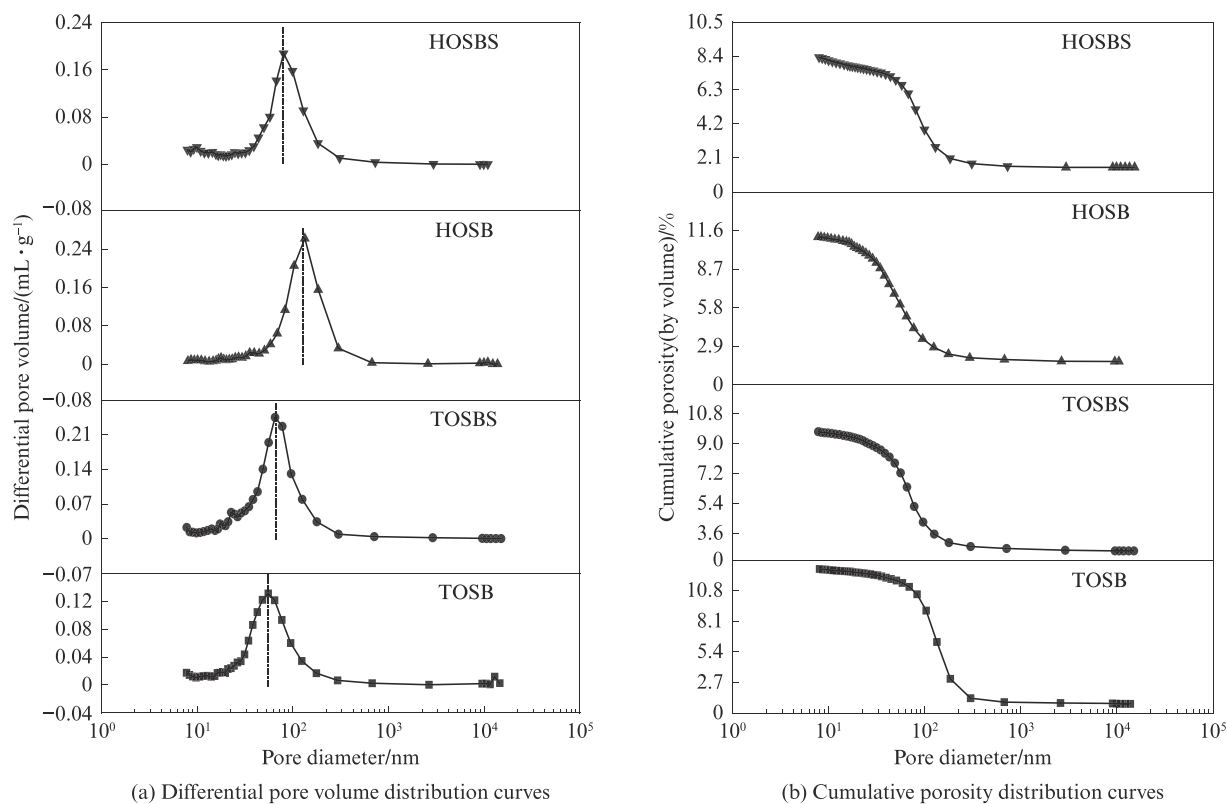


图8 掺入蔗糖前后28 d龄期MOSC的孔径分布曲线

Fig. 8 Pore size distribution curves of MOSC with and without sucrose at the hydration time of 28 d

3 结论

(1)高活性MgO粉在硫酸镁水溶液中的迅速溶解与水化,缩短了MOSC的凝结时间,提高了MOSC的早期力学性能.与用传统MgO粉制备的

MOSC相比,用高活性MgO粉制备的MOSC初、终凝时间分别缩短73.1%和76.0%,1 d龄期硬化浆体的抗压强度提高75.1%.

(2)蔗糖与活性MgO间的吸附配位作用,降低了MOSC体系的水化速率,延长了MOSC的凝结

时间. 向高活性 MgO 粉制备的 MOSC 体系中掺入 0.3% 蔗糖后, 其初、终凝时间分别延长 55.9% 和 58.8%.

(3) 蔗糖通过提高 MOSC 体系中 5·1·7 相晶体的生成量和结晶度, 降低了 MOSC 基体的总孔隙率, 改善了 MOSC 28 d 龄期硬化浆体的力学性能. 在传统 MgO 粉和高活性 MgO 粉制备的 MOSC 体系中掺入 0.3% 蔗糖后, 其 28 d 龄期硬化浆体的总孔隙率分别降低至 9.7% 和 8.0%, 此时其抗压强度分别可达 75.9 MPa 和 84.1 MPa. 蔗糖作为分散剂和缓凝剂更适用于高活性 MgO 粉制备的 MOSC 体系.

参考文献:

- [1] WU C Y, YU H F, DONG J M, et al. Effects of material ratio, fly ash, and citric acid on magnesium oxysulfate cement[J]. *ACI Materials Journal*, 2014, 111(3):291-297.
- [2] WALLING S A, PROVIS J L. Magnesia-based cements: A journey of 150 years, and cements for the future?[J]. *Chemical Reviews*, 2016, 116(7):4170-4204.
- [3] LI Q Y, ZHANG L C, GAO X J, et al. Effect of pulverized fuel ash, ground granulated blast-furnace slag and CO₂ curing on performance of magnesium oxysulfate cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 230:116990.
- [4] URWONGSE L, SORRELL C A. Phase-relations in magnesium oxysulfate cements[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1980, 63(9-10):523-526.
- [5] QIN L, GAO X J, LI W G, et al. Modification of magnesium oxysulfate cement by incorporating weak acids[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2018, 30(9):04018209.
- [6] WANG N, YU H F, BI W L, et al. Effects of sodium citrate and citric acid on the properties of magnesium oxysulfate cement[J]. *Construction and Building Materials*, 2018, 169:697-704.
- [7] 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.
- [8] CHEN X Y, ZHANG T T, CHEESEMAN C, et al. Production of rapid-hardening magnesium oxysulfate cement containing boric acid[J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2022, 34(5): 04022045.
- [9] RUNCEVSKI T, WU C Y, YU H F, et al. Structural characterization of a new magnesium oxysulfate hydrate cement phase and its surface reactions with atmospheric carbon dioxide [J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 2013, 96 (11): 3609-3616.
- [10] GU K, CHEN B. Research on the incorporation of untreated flue gas desulfurization gypsum into magnesium oxysulfate cement[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 271:122497.
- [11] GUO T, WANG H F, YANG H J, et al. The mechanical properties of magnesium oxysulfate cement enhanced with 517 phase magnesium oxysulfate whiskers [J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 150:844-850.
- [12] WU C Y, CHEN W H, ZHANG H F, et al. The hydration mechanism and performance of modified magnesium oxysulfate cement by tartaric acid[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 144:516-524.
- [13] 朱会荣. 硫氧镁胶凝材料性能的研究[D]. 长春:吉林建筑工程学院, 2010.
- ZHU Huirong. A study on the properties of magnesium oxysulfate cementitious material [D]. Changchun: Jilin Institute of Architecture and Civil Engineering, 2010. (in Chinese)
- [14] 巴明芳, 薛涛, 朱杰兆, 等. 水玻璃对硫氧镁胶凝材料强度稳定性和耐水性的影响[J]. *建筑材料学报*, 2019, 22(6):963-970.
- BA Mingfang, XUE Tao, ZHU Jiezhao, et al. Effects of sodium silicate on strength stability and water resistance of magnesium oxy-sulfate cemented materials[J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(6):963-970. (in Chinese)
- [15] TANG S W, WEI C R, CAI R J, et al. In situ monitoring of pore structure of magnesium oxysulfate cement paste: Effect of MgSO₄/H₂O ratio[J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2020, 83:387-400.
- [16] 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.
- [17] 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)
- [18] ZHAO J Y, XU J H, CUI C Y, et al. Stability and phase transition of 5·1·7 phase in alkaline solutions[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 258:119683.
- [19] TAN Y S, YU H F, BI W L, et al. Hydration behavior of magnesium oxysulfate cement with fly ash via electrochemical impedance spectroscopy [J]. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2019, 31(10):04019237.
- [20] 靳凯戎, 许星星, 陈啸洋, 等. 花岗岩石粉对硫氧镁水泥耐压强度和耐水性的影响[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 compressive strength and water resistance of magnesium oxysulfate cement[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(8):767-772, 780. (in Chinese)