

文章编号:1007-9629(2022)02-0184-07

含镁碳酸盐矿物对硫氧镁水泥耐水性的影响

胡智淇¹, 关 岩^{1,2,*}, 毕万利^{1,2,3}

(1. 辽宁科技大学 材料与冶金学院, 辽宁 鞍山 114051; 2. 辽宁省镁资源与镁质材料工程技术研究中心, 辽宁 鞍山 114051; 3. 辽宁科技大学 科大峰驰镁建材研究院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要:为提高硫氧镁水泥的耐水性,在硫氧镁水泥中掺入轻质碳酸镁或菱镁矿精矿粉,研究其对硫氧镁水泥浸水前后抗压强度、水化产物的物相组成及含量、微观结构的影响.结果表明:轻质碳酸镁、菱镁矿精矿粉的掺入,均有利于硫氧镁水泥耐水性的提高,当其掺量为 10% 时,试件的抗压强度分别提高至 77.9、76.7 MPa,软化系数分别提高了 26.3 %、15.0 %;随着轻质碳酸镁或菱镁矿精矿粉掺量大、养护龄期的延长,MgO 含量降低,硫氧镁水泥的安定性问题得到了有效缓解;轻质碳酸镁、菱镁矿精矿粉与硫氧镁水泥中的剩余 MgO 反应形成了 MgO-CO₂-H₂O 体系,该体系具有良好的耐水性,并使基体致密,从而提高了硫氧镁水泥的抗压强度与耐水性.

关键词:硫氧镁水泥;轻质碳酸镁;菱镁矿;水化产物;耐水性

中图分类号:TU528.55

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2022.02.011

Effect of Magnesium Carbonate Minerals on Water Resistance of Magnesium Oxysulfate Cement

HU Zhiqi¹, GUAN Yan^{1,2,*}, BI Wanli^{1,2,3}

(1. College of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China; 2. Liaoning Province Magnesium Resources and Magnesium Materials Engineering Technology Research Center, Anshan 114051, China; 3. Research Institution of Keda Fengchi Magnesium Building Materials, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: In order to improve the water resistance of magnesium oxysulfate (MOS) cement, hydromagnesite or magnesite was added into MOS cement. The effects of hydromagnesite and magnesite on the compressive strength, phase composition and content of hydration product, and microstructure of MOS cement were analyzed. The results show that the addition of hydromagnesite and magnesite is conducive to the water resistance of MOS cement. When the dosage of hydromagnesite or magnesite is 10 %, the compressive strength of MOS cement increase to 77.9 MPa and 76.7 MPa, and the softening coefficient increases by 26.3% and 15.0%, respectively. With the increase of the dosage of hydromagnesite or magnesite and the extension of curing age, the content of MgO decreases, and the soundness problem of MOS cement is effectively alleviated. Hydromagnesite and magnesite can react with the residual MgO in MOS cement to form the MgO-CO₂-H₂O system, which is stable in water and compacts the matrix, thus improving the compressive strength and water resistance of MOS cement.

Key words: magnesium oxysulfate cement; hydromagnesite; magnesite; hydration product; water resistance

硫氧镁(MOS)水泥是一种气硬性材料^[1],具有 早强、快硬和导热系数低等^[2]优点,被广泛应用于保

收稿日期:2020-10-04; 修订日期:2020-12-01

基金项目:辽宁科技大学校基金资助项目(2018FW02)

第一作者:胡智淇(1991—),男,辽宁鞍山人,辽宁科技大学硕士生.E-mail:Anshanhzq@163.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,博士.E-mail:15841293909@163.com

温隔热墙体材料^[3-5],吸引了很多学者对其进行研究。吴成友等^[6]发现了一种新型的硫氧镁水泥矿物,后被解析为517相^[7]。为了形成517相,MgO与MgSO₄物质的量之比往往大于5^[8-10],造成了大量MgO剩余,MgO遇水易水化形成Mg(OH)₂,水化过程中体积膨胀达147%^[11],导致硫氧镁水泥浸水后形成微裂纹,强度下降。通常可加入柠檬酸和磷酸^[8-10]等对硫氧镁水泥进行改性,通过弱酸在MgO表面形成一层保护层^[9]来抑制MgO的水化。Amaral等^[11-13]研究了弱酸对MgO水化反应的影响,发现弱酸可以降低MgO水化过程中的体积膨胀率以及减少开裂,但Deng^[14]表示少量的改性剂无法形成有效的保护层,在长时间水浸泡后,剩余MgO会继续与水反应形成Mg(OH)₂^[15]。Kuenzel等^[16]研究了轻质碳酸镁对MgO水化反应的影响,发现其可以与MgO或Mg(OH)₂反应形成一种水硬性碱式碳酸镁,具有一定强度,同时可以明显抑制MgO的水化和Mg(OH)₂的形成。这些水化碳酸镁体系可以通过填充孔隙以提高硬化浆体的致密度^[17],从而提高制品性能。

本文研究了轻质碳酸镁和菱镁矿精矿粉作为活性材料对硫氧镁水泥抗压强度、耐水性、水化产物的物相组成及含量、微观结构的影响,以期减少硫氧镁水泥中的剩余氧化镁来缓解安定性问题。

1 试验

1.1 原材料

轻烧氧化镁粉(L-MgO)取自华丰集团,由菱镁矿经850℃煅烧3h后制得,其活性MgO的含量¹⁾为60.11%^[18];轻质碳酸镁(HM)取自高林集团;七水硫酸镁、柠檬酸均为分析纯试剂。轻烧氧化镁粉、轻质碳酸镁及菱镁矿精矿粉(M)的化学组成见表1。经激光粒度测试,轻烧氧化镁粉、轻质碳酸镁及菱镁矿粉的中值粒径 d_{50} 分别为9.78、4.32、13.51 μm。

表1 轻烧氧化镁粉、轻质碳酸镁及菱镁矿精矿粉的化学组成
Table 1 Chemical compositions of L-MgO, hydromagnesite and magnesite

Material	w/%					
	MgO	CaO	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	SiO ₂	IL
L-MgO	85.60	2.46	1.60	0.23	5.56	4.50
HM	42.17	0.35	0.01	0.20	2.10	53.41
M	47.28	0.38			1.57	50.77

1.2 硫氧镁水泥的制备

将硫酸镁预先溶于水,并称取一定量的柠檬酸,

将硫酸镁溶液、轻烧氧化镁粉与添加剂加入净浆搅拌机中搅拌,制成硫氧镁水泥浆体,倒入40 mm×40 mm×40 mm模具,静置24 h脱模,放入相对湿度为(60±5)%、温度为(25±2)℃的养护箱中养护。活性MgO与硫酸镁物质的量之比为8,水灰比为0.41;以轻烧氧化镁的质量计,轻质碳酸镁、菱镁矿精矿粉的掺量分别为0%、2%、5%、10%,柠檬酸的掺量为0.3%。编号HY-2、MC-2分别表示轻质碳酸镁、菱镁矿精矿粉的掺量为2%的试件,其他类推;轻质碳酸镁、菱镁矿精矿粉掺量均为0%时为空白试件(control)。

1.3 试验方法

用量程为300 kN的压力机测试试件的强度,加载速率为0.6 kN/s。用AutoPoreIV9500型压汞仪测试试件的孔结构。用耐驰STA449F3型综合热分析仪(TG-DSC)测试水化产物的热稳定性,N₂气氛,升温速率为10℃/min。用Agilent Technologies Cary 630型Fourier红外光谱(FTIR)和X'Pert Powder型X射线衍射(XRD)仪对试件物相进行定性分析。用Topas 6.0软件对试件进行Rietveld定量相分析。用Zeiss SIGMA HD型扫描(SEM)仪观察产物的微观形貌,样品检测前用铂金溅射镀膜200 s。

用内标法测试熟料中可能存在的无定形物及未被确定的晶相物质含量(A_{cn}),内标物选取氧化锌含量大于99.5%的基准试剂。 A_{cn} 计算式为:

$$A_{cn} = (1 - w_{st}/w_{rst}) / (1 - w_{st}) \times 100\% \quad (1)$$

式中: w_{st} 为实际掺入内标物的质量分数(本文 w_{st} 为15%); w_{rst} 为Rietveld定量相分析结果中内标物的质量分数。

养护龄期达到28 d后,将试件浸入去离子水中,检测浸水56 d后试件的抗压强度,用软化系数 R_f 表征硫氧镁水泥的耐水性:

$$R_f = f_w / f_a \quad (2)$$

式中: f_w 为硫氧镁水泥浸水56 d后的抗压强度; f_a 为硫氧镁水泥养护28 d且浸水前的抗压强度。

2 结果与讨论

2.1 抗压强度

图1为不同养护龄期下试件的抗压强度。由图1可见:随着养护龄期的增加,各组试件的抗压强度均逐渐增大;掺入轻质碳酸镁的试件抗压强度明显大于掺入菱镁矿精矿粉的试件。

空气中养护28 d后,将试件浸入水中56 d,其浸水后的抗压强度和软化系数见图2。由图2可见:浸水后空

1) 文中涉及的含量、掺量、水灰比等除特殊说明外均为质量分数或质量比。

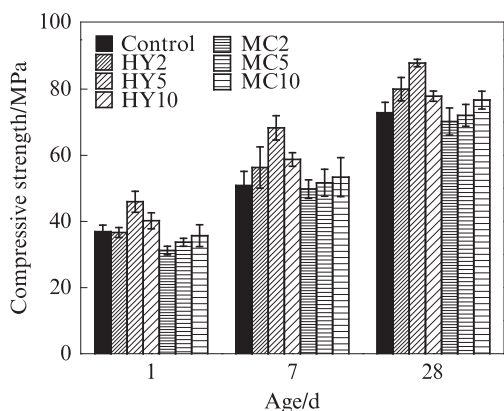


图1 不同养护龄期下试件的抗压强度

Fig. 1 Compressive strength of specimens at different curing ages

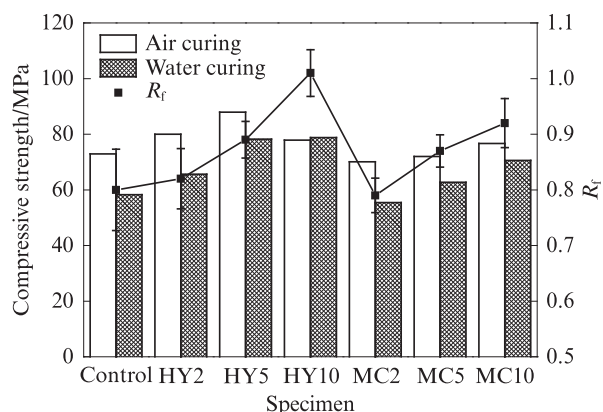


图2 浸水后试件的抗压强度和软化系数

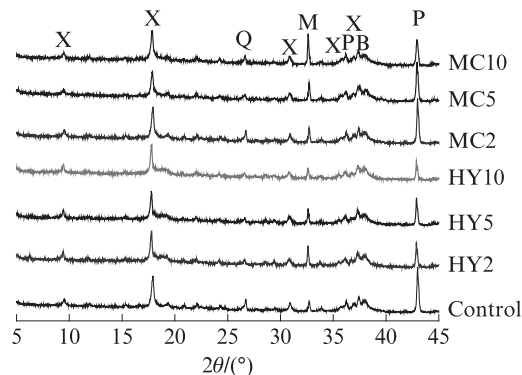
Fig. 2 Compressive strength and R_f of specimens after water immersion

白试件的抗压强度从72.9 MPa下降至58.3 MPa;除MC2外,其他试件浸水后的抗压强度均大于空白试件, HY10、MC10的抗压强度分别由空白试件的58.3 MPa提高至77.9、76.7 MPa;与空白试件相比,掺入轻质碳酸镁、菱镁矿精矿粉试件的软化系数分别提高了2.5%~26.3%、-1.3%~15.0%。由此可见,轻质碳酸镁和菱镁矿精矿粉均可以提高硫氧镁水泥的耐水性。

2.2 水化产物

养护28 d后试件的XRD图谱见图3。由图3可见:硫氧镁水泥的主要水化产物为517相和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,还有未反应的 MgO 、石英和碳酸镁;掺入轻质碳酸镁或菱镁矿精矿粉后,硫氧镁水泥的主要水化产物517相没有受到影响,而 MgO 的含量随着轻质碳酸镁、菱镁矿精矿粉掺量的增大逐渐减少。

空白试件、HY10、MC10的Rietveld物相定量分析结果见表2,表中W-14、W-56为空气中养护28 d后浸水14、56 d的试件; R_{wp} 为拟合权重优度。由表2



X:517 phase; Q:Quartz; M:Magnesite; B:Brucite; P:Periclase

图3 养护28 d后试件的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of specimens after curing for 28 d

可见:517相在1 d时开始形成,在7 d后含量保持稳定,且在浸水后含量也保持着相对的稳定,这与之前试验结果一致^[19];浸水56 d后,空白试件中的无定形物含量从0.408%下降到0.255%, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的含量从14.6%增加到36.8%;掺入轻质碳酸镁或菱镁矿精矿粉后,浸水56 d后HY10和MC10中的无定形物含量分别从0.461%、0.431%下降到0.439%、0.397%, $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 含量分别从13.1%、14.0%增加到20.8%、22.9%;此外,掺入10%轻质碳酸镁的试件在养护28 d后, MgO 含量从17.4%减少至4.0%,硫氧镁水泥的体积安定性问题得到了有效缓解;所有试件的拟合权重优度 R_{wp} 值较小,说明拟合结果较为准确。

空白试件、HY10和MC10养护28 d后的FTIR图谱见图4。由图4可见:680、1 080 cm^{-1} 分别为 SO_4^{2-} 的弯曲振动吸收峰^[7,20];1 420~1 480 cm^{-1} 为 CO_3^{2-} 和 HCO_3^- 的不对称伸缩振动吸收谱带^[21];1 650 cm^{-1} 是 H_2O 的弯曲振动吸收峰^[22];3 640 cm^{-1} 为517相和轻质碳酸镁的O—H的特征吸收峰^[7,23];3 700 cm^{-1} 为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 中O—H的不对称伸缩振动吸收峰^[23]。以往对纯碳酸镁的研究中发现碳酸镁在1 400 cm^{-1} 处存在单一的不对称伸缩振动吸收峰^[24],但本试验中发现空白试件在1 400、1 440 cm^{-1} 处存在2个吸收峰,这说明 CO_3^{2-} 存在2种状态^[25]。

空白试件、HY10和MC10养护28 d后的TG-DSC分析结果见图5。由图5可见:掺入轻质碳酸镁后, HY10在100 $^{\circ}\text{C}$ 之前没有明显失重及吸热峰,这与之前的试验有所差别^[7],说明其水化产物结构发生了改变;空白试件在550~650 $^{\circ}\text{C}$ 存在2个吸热峰,前者为无定形碳酸镁^[26]分解产生,后者是碳酸镁晶体分解的吸热峰;在此区间内HY10没有明显的分解吸热峰,说明碳酸镁主要以无定形形态存在。

表2 空白试件、HY10、MC10的Rietveld物相定量分析结果
Table 2 Rietveld phase quantitative analysis results of control, HY10 and MC10

Specimen	Age/d	Phase content (by mass)/%					$A_{\text{cn}}/\%$	$R_{\text{wp}}/\%$
		517 phase	MgO	Mg(OH) ₂	Magnesite	Quartz		
Control	1	29.1	15.5	2.6	7.3	1.2	0.443	8.716 1
	7	33.2	7.7	13.4	4.2	1.1	0.404	8.494 3
	28	32.3	7.0	14.6	4.2	1.1	0.408	8.101 2
	W-14	35.2	5.4	22.3	4.0	1.3	0.318	8.422 3
	W-56	29.2	3.3	36.8	4.3	0.9	0.255	9.461 2
MC10	1	21.2	19.1	0.8	15.6	0.9	0.424	9.231 6
	7	25.4	13.1	9.1	11.7	0.8	0.399	9.466 7
	28	25.1	7.0	14.0	10.1	0.7	0.431	9.642 1
	W-14	25.2	5.6	19.9	8.7	0.8	0.398	10.101 3
	W-56	24.7	4.3	22.9	7.7	0.7	0.397	10.036 1
HY10	1	26.9	17.4	1.2	11.2	0.9	0.424	8.206 5
	7	30.9	6.8	9.6	6.8	0.8	0.451	10.215 6
	28	31.5	4.0	13.1	4.6	0.7	0.461	9.364 8
	W-14	31.1	0.7	18.9	5.5	0.8	0.430	8.375 2
	W-56	30.8	0.1	20.8	3.7	0.7	0.439	9.946 3

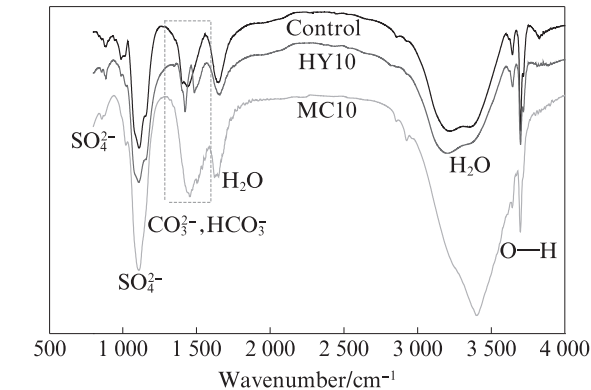


图4 空白试件、HY10和MC10养护28 d后的FTIR图谱
Fig. 4 FTIR spectra of control, HY10 and MC10 after curing for 28 d

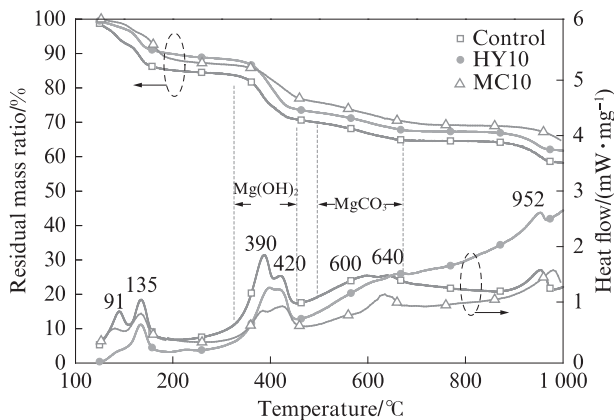


图5 空白试件、HY10和MC10养护28 d后的TG-DSC图谱
Fig. 5 TG-DSC spectra of control, HY10 and MC10 after curing for 28 d

2.3 微观结构

空白试件、HY10和MC10养护28 d的SEM照片见图6。由图6可见:空白试件气孔中的517相为针棒状晶体,生长致密,而在基体中的517相呈短柱状,且发现了层片状的Mg(OH)₂;掺入轻质碳酸镁后,基体的形貌发生了改变,MgO-CO₂-H₂O凝胶填充在517相和Mg(OH)₂之间;菱镁矿精矿粉的掺入也改变了基体的形貌,短柱状的517相之间填充着MgO-CO₂-H₂O无定形物质。

空白试件、HY10和MC10浸水56 d后的SEM照片见图7。由图7可见:空白试件浸水后,基体结构变得更致密,但产生了开裂,导致其抗压强度下降,且基体中物相主要以Mg(OH)₂为主;HY10和MC10浸水后,基体的形貌没有发生明显变化。

空白试件、HY10和MC10的孔径(D)分布见图8。由图8可见:空白试件浸水后,总孔隙率较低,随着MgO逐渐水化形成Mg(OH)₂,体系内孔隙率逐渐减小,基体中的微孔消失,直至膨胀开裂,并产生了大于1 000 nm的毛细孔,这与图7(a)中的观测结果一致,因此浸水后空白试件抗压强度下降;掺入轻质碳酸镁或菱镁矿精矿粉后,试件的总孔隙率增加,即使部分MgO在浸水过程中水化形成Mg(OH)₂导致膨胀,仍保留了一定的Mg(OH)₂生长空间,同时基体致密度提高,其抗压强度增大。

当MgO与水接触时,其水化程度取决于MgO的晶格缺陷,随着晶格缺陷的增加,MgO的水化速

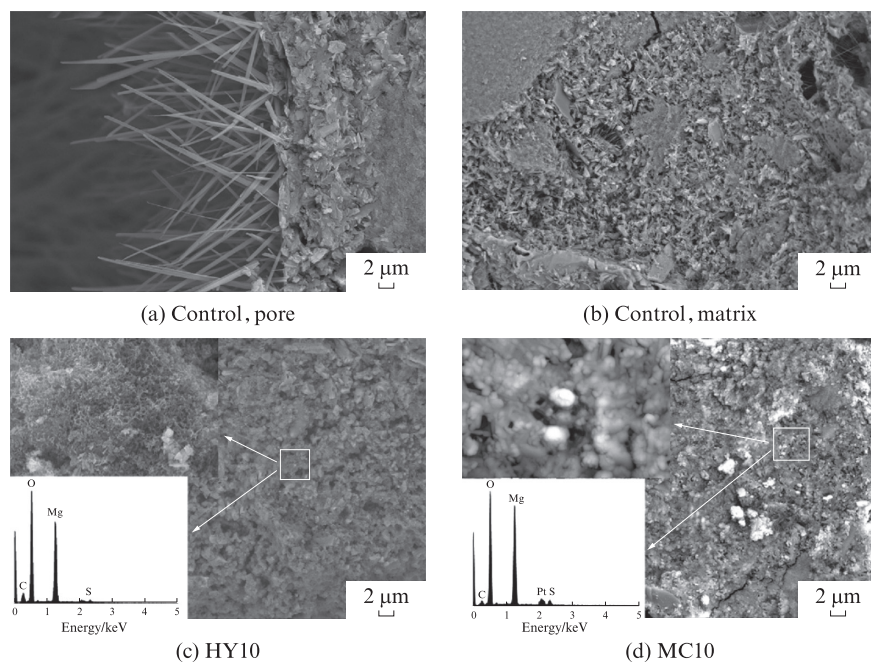


图6 空白试件、HY10和MC10养护28 d的SEM照片

Fig. 6 SEM images of control, HY10 and MC10 after curing for 28 d

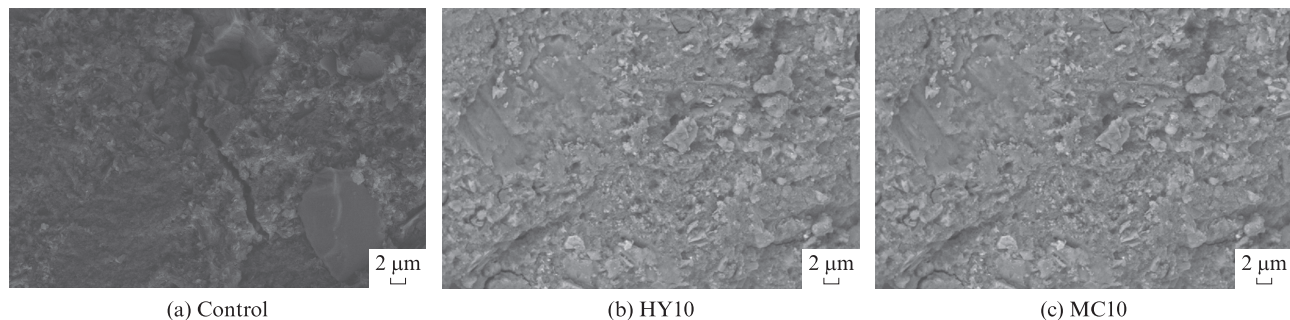


图7 空白试件、HY10和MC10浸水养护56 d的SEM照片

Fig. 7 SEM images of control, HY10 and MC10 after water immersion for 56 d

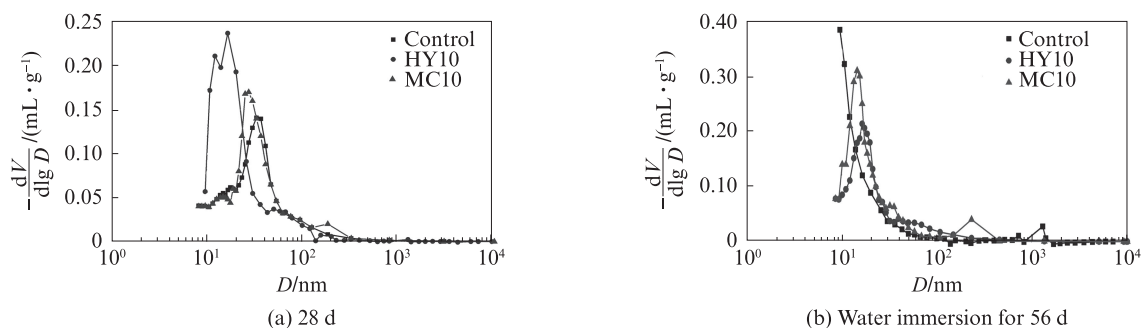


图8 空白试件、HY10和MC10的孔径分布

Fig. 8 Pore distribution of of control, HY10 and MC10

率增大^[27].本试验中约22.03%的MgO难以形成517相,轻质碳酸镁的加入促进了MgO的消耗,养护28 d时, HY10中MgO含量从17.4%减少至4.0%,有效缓解了硫氧镁水泥的安定性问题.掺入轻质碳酸镁或菱镁矿精矿粉后,由于轻质碳酸镁、碳酸镁在溶液中会溶解出少量的 OH^- 、 CO_3^{2-} ,根据溶

度积平衡常数计算^[28-29],在pH值小于10.0时,轻质碳酸镁、碳酸镁存在时 Mg^{2+} 的溶出受到抑制,而硫氧镁水泥浆体中的pH值在9.0~9.5之间;根据表2的结果,掺入10%菱镁矿精矿粉或轻质碳酸镁的试件浸水后,其无定形物含量比空白试件稳定,因此其耐水性提高.

3 结论

(1)轻质碳酸镁或菱镁矿精矿粉的掺入有利于硫氧镁水泥耐水性的提高,当其掺量为10%时,试件的抗压强度分别提高至77.9、76.7 MPa,软化系数分别提高了26.3%、15.0%。

(2)随着轻质碳酸镁或菱镁矿精矿粉掺量的增大、养护龄期的延长,MgO含量降低.掺入10%轻质碳酸镁的试件在养护28 d后,MgO含量从17.4%减少至4.0%,硫氧镁水泥的体积安定性问题得到了有效缓解。

(3)轻质碳酸镁、菱镁矿精矿粉可以与剩余MgO反应,生成 $\text{MgO}-\text{CO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 体系无定形物,这些无定形物提高了硫氧镁水泥水化产物在水中的稳定性,因此轻质碳酸镁、菱镁矿精矿粉的掺入提高了硫氧镁水泥的耐水性。

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] DANG L, NAI X Y, DONG Y P, et al. Functional group effect on flame retardancy, thermal, and mechanical properties of organophosphorus-based magnesium oxysulfate whiskers as a flame retardant in polypropylene[J]. *Rsc Advances*, 2017, 35 (7):21655-21665.
- [3] 许浩锋, 翟灵杰, 胡凯, 等. 纤维改性硫氧镁基仿木保温材料性能研究[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2020, 33 (2):60-65.
XU Haofeng, ZHAI Lingjie, HU Kai, et al. Properties of fiber modified magnesium oxysulfate based wood-like thermal insulation material[J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science and Engineering)*, 2020, 33 (2):60-65. (in Chinese)
- [4] QIN L, GAO X J, CHEN T F. Recycling of raw rice husk to manufacture magnesium oxysulfate cement based lightweight building materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 191: 220-232.
- [5] 朱效甲, 候卫东, 张秀娟, 等. 镁基复合夹芯轻质墙板的性能研究[J]. *江苏建材*, 2019(4):15-20.
ZHU Xiaojia, HOU Weidong, ZHANG Xiujuan, et al. Study on the properties of magnesium-based composite sandwich light wallboards[J]. *Jiangsu Building Materials*, 2019(4):15-20. (in Chinese)
- [6] 吴成友, 余红发, 文静, 等. 改性硫氧镁水泥物相组成及性能研究[J]. *新型建筑材料*, 2013, 40 (5):68-72.
WU Chengyou, YU Hongfa, WEN Jing, et al. Study of phase compositions and properties of modified magnesium oxysulfate cement[J]. *New Building Materials*, 2013, 40 (5):68-72. (in Chinese)
- [7] 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 American Ceramic Society*, 2013, 96 (11): 3609-3616.
- [8] 吴成友, 苗梦, 余红发. MgO活性和配比对碱式硫酸镁水泥强度影响机理[J/OL]. *建筑材料学报*, 2021:1-12 [2021-11-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20210309.1424.008.html>.
WU Chengyou, MIAO Meng, YU Hongfa. Effect of MgO activity and ratio on the strength of basic magnesium sulfate cement and its mechanism[J/OL]. *Journal of Building Materials*, 1-12 [2021-11-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20210309.1424.008.html>. (in Chinese)
- [9] 靳凯戎, 许星星, 陈啸洋, 等. 花岗岩石粉对硫氧镁水泥耐水性能的影响[J/OL]. *建筑材料学报*, 2021:1-12 [2021-11-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20210823.1821.002.html>.
JIN Kairong, XU Xingxing, CHENG Xiaoyang, et al. Effect of granite powder on water resistance of magnesium oxy-sulfate cement [J]. *Journal of Building Materials*, 2021: 1-12 [2021-11-09]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1764.tu.20210823.1821.002.html>. (in Chinese)
- [10] 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.
- [11] AMARAL L F, OLIVEIRA I R, BONADIA P, et al. Chelants to inhibit magnesia (MgO) hydration[J]. *Ceramics International*, 2011, 37:1537-1542.
- [12] DOS SANTOS T, DOS SANTOS J, LUZA A P, et al. Kinetic control of MgO hydration in refractory castables by using carboxylic acids[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2018, 38:2152-2163.
- [13] SALOMÃO R, PANDOLFELLI V C. Citric acid as anti-hydration additive for magnesia containing refractory castables [J]. *Ceramics International*, 2011, 37:1839-1842.
- [14] DENG D H. The mechanism for soluble phosphates to improve the water resistance of magnesium oxychloride cement [J]. *Cement Concrete Research*, 2003, 33 (9):1311-1317.
- [15] WU C Y, ZHANG H, ZHANG W Y, et al. Water resistance of basic magnesium sulfate cement [C]// *Proceedings of 2016 International Symposium on Materials Application and Engineering*. Chiangmai:[s.n.], 2016, 67:07008.
- [16] KUENZEL C, ZHANG F, FERRÁNDIZ-MA V, et al. The mechanism of hydration of MgO-hydromagnesite blends [J]. *Cement Concrete Research*, 2018, 103:123-129.
- [17] HÄNCHEN M, PRIGIOBBE V, BACIOCCHI R, et al. Precipitation in the Mg-carbonate system—Effects of temperature and CO₂ pressure[J]. *Chemical Engineering Science*, 2008, 63 (4):1012-1028.
- [18] CHAU C K, LI Z. Accelerated reactivity assessment of light burnt magnesium oxide [J]. *Journal of American Ceramic Society*, 2008, 91 (5):1640-1645.
- [19] ZHAO J Y, XU J H, CUI C Y, et al. Stability and phase

- transition of 517 phase in alkaline solutions[J]. Construction Building Materials, 2020, 258:119683.
- [20] CHOUDHARI B P, VAIDYA M C, DATAR D S. Physico-chemical studies on basic magnesium carbonates[J]. Indian Journal of Chemical, 1972, 10:731-733.
- [21] SAWADA Y, YAMAGUCHI J, SAKURAI O, et al. Thermal decomposition of basic magnesium carbonates under high-pressure gas atmospheres[J]. Thermochimica Acta, 1979, 32:277-291.
- [22] RAADE G. Dypingite, a new hydrous basic carbonate of magnesium, from Norway[J]. American Mineralogist, 1970, 55(9):1457-1465.
- [23] FROST R L, KLOPROGGE J T. Infrared emission spectroscopic study of brucite[J]. Spectrochimica Acta Part A-Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 1999, 55: 2195-2205.
- [24] LIU W B, PENG X Y, LIU W G, et al. Effect mechanism of the iso-propanol substituent on amine collectors in the flotation of quartz and magnesite[J]. Powder Technology, 2020, 360: 1117-1125.
- [25] BRUNI S, CARIATIF, FERMO P, et al. Characterization of ancient magnesian mortars coming from northern Italy[J]. Thermochimica Acta, 1998, 321:161-165.
- [26] UNLUER C, AL-TABBAA A. Impact of hydrated magnesium carbonate additives on the carbonation of reactive MgO cements[J]. Cement Concrete Research, 2013, 54:87-97.
- [27] EUBANK W R. Calcination studies of magnesium oxides[J]. Journal of American Ceramic Society, 1951, 34:225-229.
- [28] HUNNEL W, BERNER U, CURTI E, et al. Nagra/PSI chemical thermodynamic data base 01/01[J]. Radiochimica Acta, 2002, 90:805-813.
- [29] HELESON H C, DELANY J M, NESBITT H W, et al. Summary and critique of the thermodynamic properties of rock-forming minerals[J]. Journal of American Ceramic Society, 1978, 278:1-229.