

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2023.264

碳化对含花岗岩石粉硫氧镁水泥的抗压强度和耐水性的影响

靳凯戎^{1a}, 张晓静^{1a}, 毕万利², 王德志^{1a,1b,1c,1d}, 韩静云³

(1. 宁夏大学 a. 土木与水利工程学院; b. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心; c. 宁夏土木工程防震减灾工程技术研究中心; d. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 银川 750021; 2. 辽宁科技大学材料与冶金学院, 辽宁鞍山 114051; 3. 北方民族大学土木工程学院, 银川 750030)

摘要:以 CO₂ 气氛作为养护条件, 研究了不同掺量的花岗岩石粉 (GP) 对硫氧镁 (MOS) 水泥性能的影响, 结合 X 射线衍射仪 (XRD)、同步综合热分析仪 (TG-DSC)、扫描电镜 (SEM) 和压汞仪 (MIP) 对 MOS 水泥水化产物及微观结构做了分析。结果表明, 碳化 28 d 后的掺加 40% GP 的 MOS 水泥强度保留系数提高至 1.12; 碳化 28 d 后浸水 120 d 强度保留系数为 0.94, 较空白样提高了 123.8%; MOS 水泥碳化过程中基体内 Mg(OH)₂ 转化为 MgCO₃·zH₂O 晶体, 有利于改善 MOS 水泥的力学性能; GP 改善了 MOS 水泥孔结构, 提高了密实度, 降低了 CO₂ 吸收率, 减弱了 CO₂ 的侵蚀作用; GP 和碳酸镁相的共同作用提升了 MOS 水泥碳化后的力学性能和耐水性。

关键词: 硫氧镁水泥; 碳化; 耐水性; 碳酸镁

中图分类号: TU528.01

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2024)06-035-08

Effect of carbonation on the properties of granite-bearing oxysulfate oxide cement

JIN Kairong^{1a}, ZHANG Xiaojing^{1a}, BI Wanli², WANG Dezhi^{1a,1b,1c,1d}, HAN Jingyun³

(1a. School of Civil & Water Conservancy Engineering; 1b. Water Resources Engineering Research Center in Modern Agriculture in Arid Regions; 1c. Ningxia Center for Research on Earthquake Protection and Disaster Mitigation in Civil Engineering; 1d. Engineering Technology Research Center of Water-Saving and Water Resource Regulation, Ningxia University, Yinchuan 750021, P. R. China; 2. College of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology, Anshan 114051, Liaoning, P. R. China; 3. School of Civil Engineering, North Minzu University, Yinchuan 750030, P. R. China)

Abstract: The properties of magnesium oxysulfate (MOS) cement with different granite powder (GP) contents with CO₂ curing were studied. The hydration products and microstructure of MOS cement were analyzed using X-

收稿日期: 2023-03-15 网络出版日期: 2023-10-08

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51968060, 52368037); 宁夏青年拔尖人才培养工程 (2080116); 宁夏重点研发计划项目 (2022BEE03001); 宁夏一流学科项目 (NXYLXK2021A03); 宁夏自然科学基金 (2023AAC03040)。

Supported by National Natural Science Foundation of China (51968060, 52368037), the Ningxia Youth Talent Support Program (2080116), the Key Research and Development Program of Ningxia Province (2022BEE03001), Ningxia First Class Discipline Project (NXYLXK2021A03), and the National Natural Science Foundation of Ningxia (2023AAC03040).

作者简介: 靳凯戎 (1994—), 男, 博士研究生, 主要从事土木工程材料方向的研究。

通信作者: 王德志, 男, 博士生导师, (E-mail) wangdz@nxu.edu.cn。

ray diffraction (XRD), simultaneous comprehensive thermal analyzer (TG-DSC), scanning electron microscope (SEM) and mercury porosimeter (MIP). The results shows that the strength retention coefficient of MOS cement containing 40% GP reached 1.12 with standard curing for 28 days followed by 28 days of CO_2 curing; when MOS cement was CO_2 -cured for 28 days and then immersed in water for 120 days, the strength retention coefficient reached 0.94, which was 123.8% higher than that of blank samples. $\text{MgCO}_3 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ crystals were generated after MOS cement underwent CO_2 curing, which had a positive effect on the mechanical properties and water resistance by reducing matrix expansion caused by MgO hydrating to $\text{Mg}(\text{OH})_2$. GP increased the matrix density, reduced the CO_2 capture rate, and decreased CO_2 erosion of MOS cement by optimizing the pore structure. The presence of GP and magnesium carbonate phases improved the compressive strength of MOS cement after carbonation and immersion.

Keywords: magnesium oxysulfate cement; carbonation; water resistance; magnesium carbonate

硫氧镁(MOS)水泥是一种具有诸多优良特性的绿色建筑材料^[1-4],广泛用于防火板、装饰材料等领域,但耐水性能相对较差,限制了MOS水泥在土木工程领域的应用范围。使用加速碳化的方法消耗MOS水泥基体内的 MgO ,是提升和改善MOS水泥力学性能或耐水性的途径之一。MOS水泥碳化可以有效吸收 CO_2 ,同时碳化作为一种养护制度,可以提高MOS水泥的力学性能^[5]。研究人员在对碳化机理的研究过程中发现,影响碳化性能的因素主要有水泥用量、矿物掺合料等^[6]。将钢渣掺入MOS水泥中,并进行碳化养护,发现碳化加速了钢渣中 C_2S 的水化,形成了 Ca-Mg-C 胶凝相,抑制了 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的形成,提高了基体的致密性,改善了硫氧镁水泥的耐水性^[7]。在MOS水泥碳化过程中,低钙粉煤灰与 CO_2 共同作用可以提高体积稳定性,改善耐水性^[8-9]。使用 CO_2 养护掺加高炉矿渣的MOS水泥时,高炉矿渣可抑制MOS水泥基体内 MgO 水化,提高MOS水泥的抗干湿循环性能和耐水性^[10]。轻质碳酸镁可以在MOS水泥中与过剩的 MgO 形成 $\text{MgO-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$ 体系,可以改善MOS水泥基体致密性,从而提高MOS水泥的强度和耐水性^[11]。因此,在 CO_2 养护条件下,矿物掺合料在MOS水泥基体内可以通过细化孔隙、提高基体致密度、参与水化过程等,提高MOS水泥的力学性能和耐水性^[11-13]。

花岗岩石粉(GP)作为矿物掺合料的一种,是工业活动中产生的固体废弃物,具有产量大、易扬尘、填埋会占用大量土地资源的特点^[14]。将GP引入水泥基材料中,有利于废弃物再利用,同时,可以提高水泥基材料的性能。在混凝土中掺加GP可以提高混凝土的抗压强度和耐久性,促进C-S-H凝胶的形成^[15]。GP可以通过降低水泥浆体的孔隙率,改善力学性能和耐氯离子侵蚀性能^[16-17]。在水工混凝土中掺加20%(0~150 μm)或5%(0~45 μm)GP时,早期碳化性能达到最好,不同细度的GP掺入后可以优化孔结构,细化孔隙^[18]。使用GP代替混凝土中的细集料,在自然环境下养护,发现GP可以有效提高混凝土碳化后的力学性能^[19]。GP在水泥基材料中可以通过细化孔隙、促进水化,提升水泥基材料的力学性能和碳化性能。目前相关研究主要集中在硅酸盐水泥体系内,笔者将GP引入MOS水泥中,一方面提高MOS水泥碳化性能,改善MOS水泥耐水性;另一方面提高固体废弃物利用率,拓展GP利用途径,同时探究了碳化对MOS水泥力学性能、物相组成、微观结构的影响。

1 试 验

1.1 原材料

试验所用轻烧氧化镁(LBM)和七水硫酸镁($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)均来自辽宁省;七水硫酸镁纯度>99.0%;花岗岩石粉(GP)来自湖北省;化学添加剂为柠檬酸(CA,AR);试验用水为自来水。LBM和GP的化学组成如表1所示。

表1 LBM和GP的化学组成
Table 1 Chemical compositions of LBM and GP

物质	化学组成							%
	w(MgO)	w(SiO ₂)	w(CaO)	w(Al ₂ O ₃)	w(Fe ₂ O ₃)	w(K ₂ O)	w(Na ₂ O)	
LBM	82.47	7.35	1.79	0.54	0.43			7.42
GP	0.92	70.80	2.41	13.95	2.43	4.70	3.52	1.27

1.2 试样制备

试验所用LBM活性氧化镁(a-MgO)含量使用水合法测得为65.5%;a-MgO、MgSO₄·H₂O摩尔比为8:1:20;CA、GP掺量以LBM质量计;CA掺量为0.5%;GP掺量从0%以10%递增至50%,试样编号则为GP0、GP20至GP50。称取LBM和GP,混合均匀后,倒入按照摩尔比配制,并静置24h的MgSO₄溶液,待搅拌均匀,倒入40mm×40mm×40mm的模具内,室温下养护24h后拆模,然后放入标准养护箱内(20℃±2℃,60%±5%RH),养护至龄期后进行测试。

1.3 测试方法

试样养护至28d后,放入40℃烘箱内烘烤48h,然后在室温下,放入CO₂分压为0.3MPa的反应釜中进行碳化;将CO₂通入位于反应釜中敞口容器的蒸馏水内,以使在碳化期间,反应釜内相对湿度接近100%^[20]。碳化28d后浸水至120d,取出试样进行力学性能及微观结构测试。按照式(1)的方法计算碳化及浸水后MOS水泥强度保留系数。

$$R_f = \frac{R(n)}{R(28)}, \quad (1)$$

式中: $R(n)$ 为试样碳化或者碳化后浸水 n d的抗压强度; $R(28)$ 为试样在标准养护条件下养护28d的抗压强度。

按照式(2)所示方法计算MOS水泥CO₂吸收率^[21]

$$W_{CO_2} = \frac{\Delta M_{CO_2}}{M} \times 100\%, \quad (2)$$

式中: ΔM_{CO_2} 为试样在500~700℃温度区间内损失的质量^[10]; M 为试样在干燥时的质量; W_{CO_2} 是试样碳化过程中CO₂吸收率。

使用YES-2000型万能试验机对试样抗压强度进行测试,每组试样的抗压强度取3个试样抗压强度的平均值;使用X'Pert powder型X射线衍射仪(XRD),检测MOS水泥的物相组成;利用STA 449F3型综合热分析仪(TG-DSC)探究碳化及浸水对MOS水泥水化产物含量的影响;采用SIGMA HD型扫描电镜(SEM)和AutoPoreIV9500型压汞仪(MIP)检测MOS水泥的微观形貌及孔隙结构。

2 结果与讨论

2.1 不同养护条件对MOS水泥力学性能的影响

图1是掺加GP的MOS水泥在不同养护条件的强度保留系数。碳化14d后,GP40强度保留系数最高,为1.06;GP0强度保留系数最低,为0.83;碳化28d后,GP40强度保留系数提高至1.12;GP30强度保留系数最低,为0.68。掺加GP有利于改善MOS水泥碳化后的机械性能。碳化28d后,将MOS水泥浸水120d,GP40强度保留系数最高,为0.94;GP0强度保留系数最低,为0.42。GP40强度保留系数较GP0提高123.8%。掺加GP的MOS水泥碳化后浸水,强度保留系数均大于空白样,GP有利于提升碳化后MOS水泥的耐水性能。

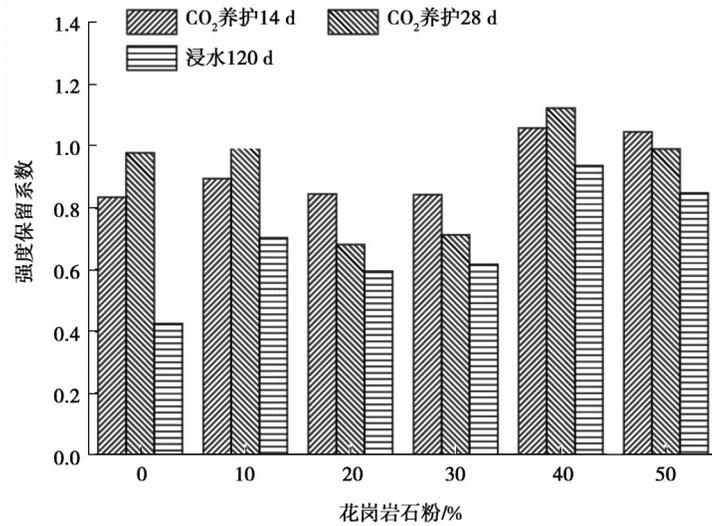
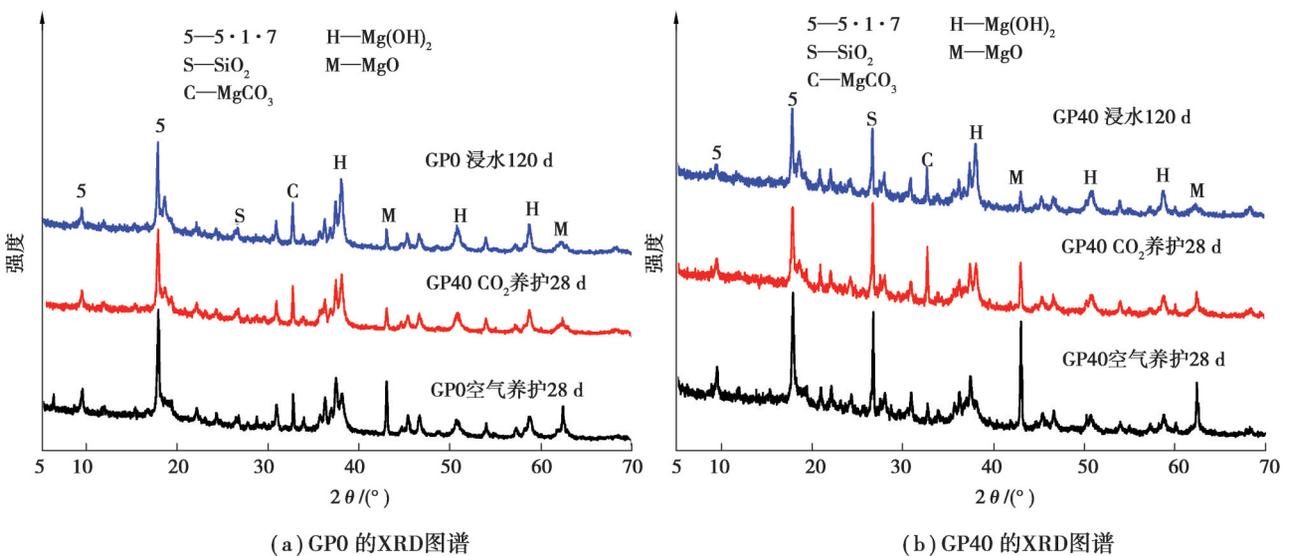
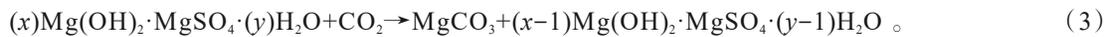


图1 掺加GP的MOS水泥在不同养护条件的强度保留系数

Fig. 1 The strength retention coefficient of MOS cement containing GP with different curing conditions

2.2 碳化及浸水对MOS水泥水化产物组成的影响

图2是掺加GP的MOS水泥在不同养护条件的XRD图谱。GP0养护28 d的XRD图谱与GP40对比可以发现,5·1·7相衍射峰强度变弱,MgO衍射峰强度变强,掺加GP影响了MOS水泥基体内5·1·7相的生成,这是GP20和GP30碳化后强度保留系数下降的原因。在碳化过程中,碳化釜内保持一定湿度,这会使得MOS水泥基体内部分剩余的MgO转化为Mg(OH)₂,部分Mg(OH)₂与CO₂反应形成MgCO₃。标准养护28 d与标准养护28 d后继续碳化28 d的XRD图谱对比,MgCO₃衍射峰强度变强,MgO衍射峰强度变弱。在碳化后5·1·7相衍射峰强度变弱,这是由于在碳化过程中5·1·7相发生如式(3)所示反应^[3],这会使得部分5·1·7相分解。浸水后Mg(OH)₂衍射峰强度变强,这是由于基体内未在碳化过程中水化的MgO继续水化为Mg(OH)₂,产生膨胀,引起MOS水泥浸水后机械性能下降。



(a) GP0的XRD图谱

(b) GP40的XRD图谱

图2 掺加GP的MOS水泥在不同养护条件的XRD图谱

Fig. 2 XRD patterns of MOS cement containing GP with different curing conditions

图3是掺加GP的MOS水泥在不同养护条件的TG-DTG曲线。在MOS水泥进行TG-DSC测试过程中,分解的水化产物主要有5·1·7相、Mg(OH)₂、MgCO₃、MgSO₄·nH₂O。MOS水泥在45~200 °C温度区间的失重是

由5·1·7相、 $\text{MgSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ 失去结晶水引起的。图3中,由于MOS水泥在碳化过程中存在如式(3)所示的5·1·7相分解,MOS水泥碳化后在45~200 °C的温度区间失重变小,这与图2中5·1·7相衍射峰强度变弱对应。T1、T2处,DTG曲线变化剧烈,是由于碳化后基体内生成较多的 MgCO_3 分解造成的。在T2处,DTG曲线变化程度小于T1处曲线变化程度,表明GP40中 MgCO_3 含量较低,GP在一定程度上阻止了 CO_2 侵蚀。浸水后基体内 MgO 水化为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,MOS水泥失重增加。

MOS水泥水化产物在升温过程中的失重变化如图3所示。使用如式(2)所示方法计算MOS水泥 CO_2 吸收率,可得GP0在标准养护28 d并继续碳化28 d后 CO_2 吸收率为2.35%,GP40为1.26%,说明GP降低了MOS水泥 CO_2 吸收率,有助于改善MOS水泥抗碳化性能。

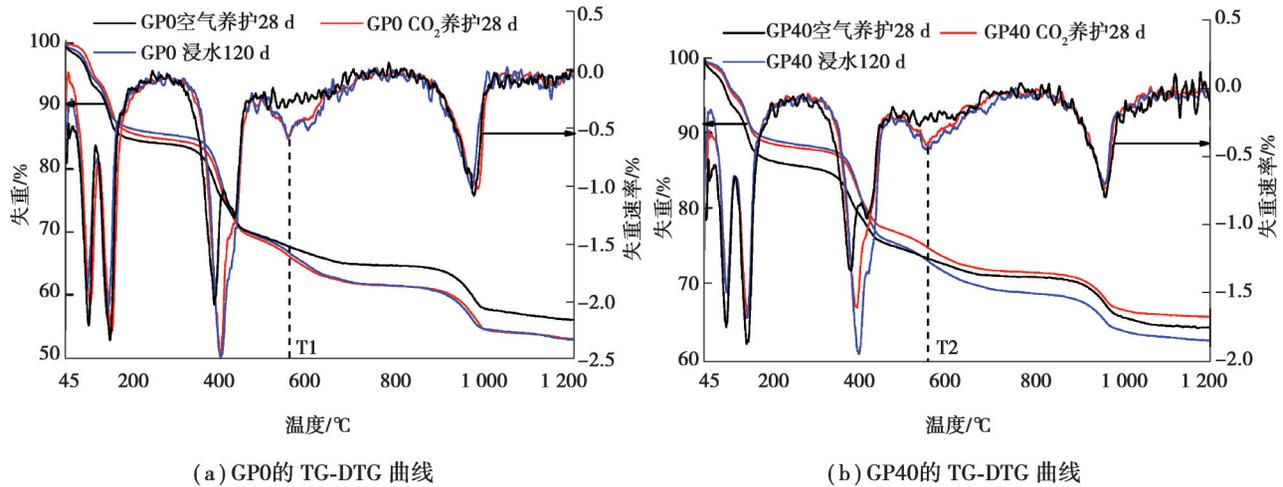


图3 掺加GP的MOS水泥在不同养护条件的TG-DTG曲线

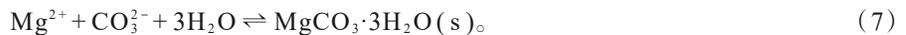
Fig. 3 TG-DTG curves of MOS cement containing GP with different curing conditions

2.3 碳化对MOS水泥微观形貌的影响

图4为掺加GP的MOS水泥在不同养护条件的SEM图。在图4(a)(b)可以看到,碳化后基体及孔隙内存在不同形态的碳酸镁相。由图4(b)中碳酸镁相形貌^[22]及EDS能谱推断,为 $\text{MgCO}_3 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ 。从图4(c)(d)可看出,浸水后,孔隙中出现裂缝,GP0中孔隙贯穿气孔,延展到气孔外,MOS水泥基体内过剩的 MgO 继续水化为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 引起基体产生裂缝。MOS水泥中掺加GP,提高了MOS基体致密度,降低了孔隙率(见图5),使得GP40孔隙裂缝宽度小于GP0孔隙裂缝宽度。

MOS水泥在碳化过程中基体内生成较多的碳化产物和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,引起膨胀,导致强度下降。掺加GP后,基体致密度提高,阻止了 CO_2 进入基体内部,减少了基体内 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 与 CO_2 接触,生成的 $\text{MgCO}_3 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ 晶体可以填充孔隙(见图4(b)),提高了碳化后MOS水泥的抗压强度。浸水后,基体内过剩的 MgO 继续水化为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$,产生膨胀。GP0强度保留系数下降明显,掺加GP后,基体密实度得到提高(见图5),增强了MOS水泥碳化后的耐水性。

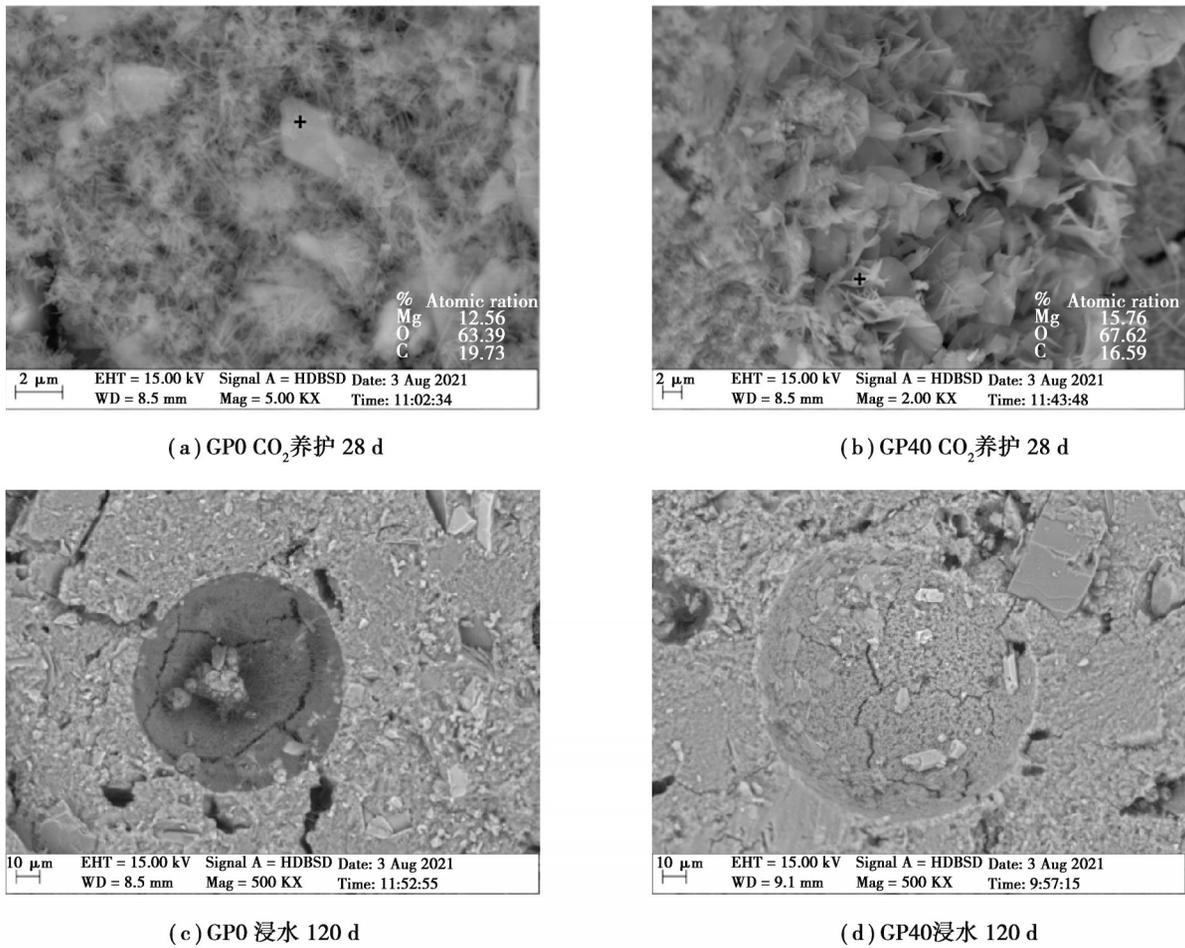
MOS水泥碳化时,其体系内存在如下所示热力学平衡^[23]



这为 $\text{MgCO}_3 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ 晶体的形成提供了条件。如式(6)所示, $\text{MgCO}_3 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ 晶体的形成以 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 作为中间体,减少了体系内因 MgO 水化为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 引起的体积膨胀,同时GP在体系内会提供更多的成核节点^[24-25],促进形成 $\text{MgCO}_3 \cdot z\text{H}_2\text{O}$ 晶体。

图5是掺加GP的MOS水泥在不同养护条件下的孔径分布,最可几孔径和孔隙率随着养护时间的延长,逐渐增大。这一阶段孔隙率的变化是由碳化过程产生的碳化产物和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 引起。MOS水泥碳化28 d后继续浸水120 d,基体内过剩的 MgO 水化为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 引起孔隙率上升。GP40最可几孔径和孔隙率均小于

GP0。掺加GP有利于提升MOS水泥基体密度,优化孔结构。GP与CO₂的耦合作用,减弱了因碳化和浸水导致MOS水泥基体内部生成过量的碳化产物和Mg(OH)₂对基体结构产生的破坏作用,MOS水泥体系内一定量的MgCO₃·zH₂O可以填充孔隙,胶结水泥颗粒(见图4),改善MOS水泥碳化后的力学性能。

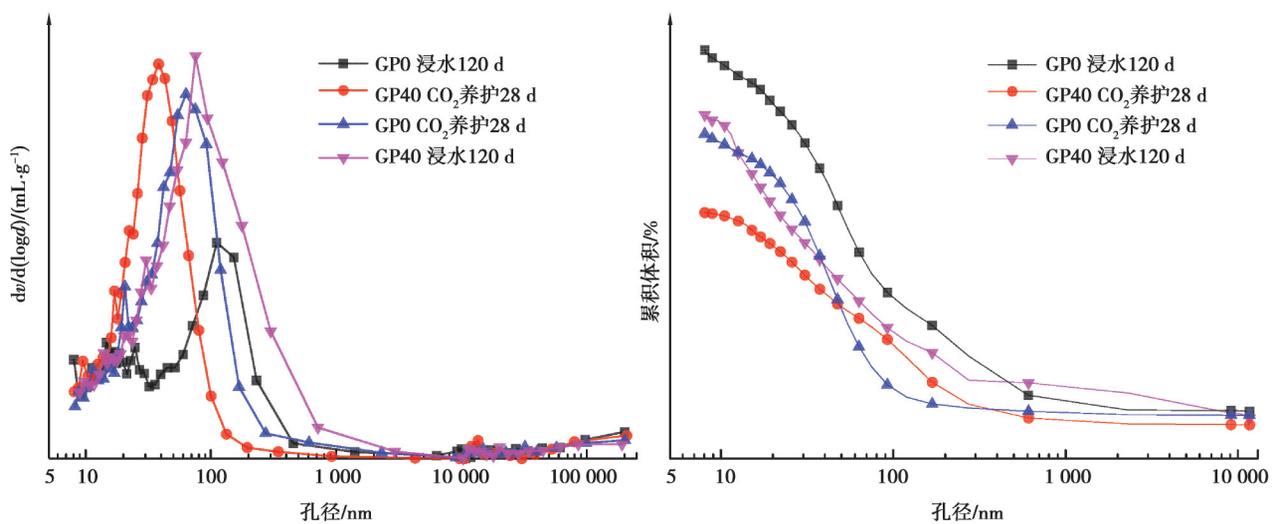
(a) GP0 CO₂养护 28 d(b) GP40 CO₂养护 28 d

(c) GP0 浸水 120 d

(d) GP40 浸水 120 d

图4 掺加GP的MOS水泥在不同养护条件的SEM图

Fig. 4 SEM images of MOS cement containing GP with different curing conditions



(a) 硫氧镁水泥的孔径分布曲线

(b) 硫氧镁水泥的孔隙率

图5 掺加GP的MOS水泥在不同养护条件下的孔径分布

Fig. 5 Pore distribution of MOS cement containing GP with different curing conditions

掺加 GP 的 MOS 水泥碳化后力学性能提升,未掺加 GP 的 MOS 水泥碳化后力学性能及强度保留系数下降,掺加 GP 引起了 MOS 水泥碳化后性能的变化(见图 1),同时碳化后 MOS 水泥基体内存在的一定量的碳化相亦有利于改善 MOS 水泥碳化后的耐水性(见图 3 和图 4)。MOS 水泥中掺加 GP 后,水灰比降低,GP40 碳化后的失重曲线与未碳化时,几乎重叠,GP0 碳化后有较大失重(见图 3),因此,GP 降低了 MOS 水泥的碳化程度。图 2 中,MOS 水泥掺加 GP 后,MgO 衍射峰强度增加,5·1·7 相衍射峰强度降低,GP 影响了 MOS 水泥中水化产物的生成。图 3 中,GP0 碳化后相较于 GP40 有较大失重,GP0 基体内有较多碳化产物和 $Mg(OH)_2$ 生成(见图 2),这引起了 GP0 力学性能的下降。图 5 中,GP 改善了 MOS 水泥的孔结构,这对应于图 3 中,GP40 碳化后失重较小,GP 对基体致密性的改善影响了 MOS 水泥的碳化程度。GP 降低了 MOS 水泥的孔隙率(见图 5),同时 MOS 水泥基体内,一定量的碳化相有利于 MOS 水泥碳化后力学性能的提升(见图 2 和图 3),浸水后,GP 和碳化相的共同作用提升了 MOS 水泥的耐水性。

3 结 论

1)掺加 40%GP 的 MOS 水泥碳化 28 d 后强度保留系数提高至 1.12。未掺加 GP 的 MOS 水泥碳化 28 d 后浸水 120 d,强度保留系数为 0.42,掺加 40%GP 的 MOS 水泥强度保留系数较其提高 123.8%。掺加 40%GP 的 MOS 水泥碳化后力学性能和耐水性达到最好。

2)GP 减少了 MOS 水泥基体内部裂缝的产生,提高了基体密度,降低了 MOS 水泥的 CO_2 吸收率。

3)掺加 GP 的 MOS 水泥碳化后,基体内生成的 $MgCO_3 \cdot zH_2O$ 可以通过填充孔隙,胶联水泥颗粒,有利于改善 MOS 水泥碳化后的力学性能。GP 和一定量的碳酸镁相共同作用提高了 MOS 水泥碳化后的力学性能和耐水性。 $Mg(OH)_2$ 转化为 $MgCO_3 \cdot zH_2O$ 减少了 MOS 水泥基体内 MgO 水化引起的基体膨胀。

参考文献

- [1] 左迎峰,王健,肖俊华,等. 镁系无机发泡材料强度和孔结构调控研究[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(3): 394-401.
Zuo Y F, Wang J, Xiao J H, et al. Modulation of strength and pore structure of magnesium inorganic foaming material[J]. Journal of Building Materials, 2018, 21(3): 394-401. (in Chinese)
- [2] Gu K, Cheng B, Cui Q. Experimental research on properties of magnesium oxysulfate cement during high temperature exposure[J]. Composites Part B, 2022, 244: 110168.
- [3] 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 C Y, Yu H F, Wen J, et al. Study of phase compositions and properties of modified magnesium oxysulphate cement[J]. New Building Materials, 2013, 40(5): 68-72. (in Chinese)
- [4] 巴明芳,张丹蕾,赵启俊,等. 碳化与氯盐复合作用下硫氧镁胶凝材料的护筋性[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 946-951.
Ba M F, Zhang D L, Zhao Q J, et al. Corrosion resistance of steel bars of magnesium oxy-sulfate cementitious material under the combined action of carbonation and chloride salt[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5): 946-951. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 陈嘉俊. 碳化环境混凝土耐久性劣化机理与影响因素分析[J]. 江西建材, 2021(1): 14-15, 17.
Chen J J. Deterioration mechanism and influencing factors of concrete durability in carbonation environment[J]. Jiangxi Building Materials, 2021(1): 14-15, 17.(in Chinese)
- [7] Hu Z Q, Guan Y, Chang J, et al. Effect of carbonation on the water resistance of steel slag-magnesium oxysulfate (MOS) cement blends.[J]. Materials, 2020, 13(21): 5006.
- [8] Zhang N, Yu H F, Gong W, et al. Effects of low-and high-calcium fly ash on the water resistance of magnesium oxysulfate cement[J]. Construction Building and Materials, 2020, 230: 116951.
- [9] Zhang N, Yu H F, Ma H Y, et al. Effects of CO_2 curing on properties of magnesium oxysulfate cement[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2022, 34(12): 04022322.
- [10] Li Q Y, Su A S, Gao X J. Preparation of durable magnesium oxysulfate cement with the incorporation of mineral admixtures and sequestration of carbon dioxide[J]. The Science of The Total Environment, 2022, 809: 152127.
- [11] 胡智淇,关岩,毕万利. 含镁碳酸盐矿物对硫氧镁水泥耐水性的影响[J]. 建筑材料学报, 2022, 25(2): 184-190.

- Hu Z Q, Guan Y, Bi W L. Effect of magnesium carbonate minerals on water resistance of magnesium oxysulfate cement[J]. *Journal of Building Materials*, 2022, 25(2): 184-190. (in Chinese)
- [12] Chang H L, Wang Y F, Wang X L, et al. Effects of carbonation on phase composition of Metakaolin-blended cement pastes[J]. *Construction and Building Materials*, 2022, 324: 126639.
- [13] Li T, Wang S L, Xu F, et al. Study of the basic mechanical properties and degradation mechanism of recycled concrete with tailings before and after carbonation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 259: 120923.
- [14] Ying P J, Liu F S, Shu X R, et al. The research on the effect of granite powder on concrete performance[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 1975: 204-208.
- [15] Singh S, Khan S, Khandelwal R, et al. Performance of sustainable concrete containing granite cutting waste[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 119: 86-98.
- [16] Lu L, Yang Z X, Lin Y, et al. Partial replacement of manufactured sand with homologous granite powder in mortar: the effect on porosity and capillary water absorption[J]. *Construction and Building Materials*, 2023, 376: 131031.
- [17] Zhang H R, Ji T, He B J, et al. Performance of ultra-high performance concrete (UHPC) with cement partially replaced by ground granite powder (GGP) under different curing conditions[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 213: 469-482.
- [18] 范华峰, 段光林, 翟盛通, 等. 花岗岩石粉对水工混凝土抗碳化性能的影响[J]. *中国农村水利水电*, 2020(9): 236-241, 247. Fan H F, Duan G L, Zhai S T, et al. The effect of granite powder on the carbonation resistance of hydraulic concrete[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2020(9): 236-241, 247.(in Chinese)
- [19] Silva J L D, Campos D B D C, Lordsleem A C, et al. Influence of the partial substitution of fine aggregate by granite powder in mortar on the process of natural carbonation[J]. *Waste Management & Research*, 2020, 38(3): 19870599.
- [20] 王雪. 钢渣碳化潜能评估及脱硫石膏激发钢渣碳化建材的制备[D]. 北京: 北京科技大学, 2021. Wang X. The carbonation potential evaluation on steel slag and the preparation of desulfurization-gypsum-stimulated carbonation-cured steel slag building material[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2021. (in Chinese)
- [21] Xuan D X, Zhan B J, Poon C S, et al. Innovative reuse of concrete slurry waste from ready-mixed concrete plants in construction products[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2016, 312: 65-72.
- [22] Dung N T, Unluer C. Advances in the hydration of reactive MgO cement blends incorporating different magnesium carbonates[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 294: 123573.
- [23] 张翠钰, 方莉, 廖洪强, 等. 三水碳酸镁在氢氧化镁-二氧化碳-水体系中的沉淀结晶[J]. *无机盐工业*, 2018, 50(6): 36-41. Zhang C Y, Fang L, Liao H Q, et al. Crystallization of $MgCO_3 \cdot 3H_2O$ in $Mg(OH)_2-CO_2-H_2O$ system[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2018, 50(6): 36-41. (in Chinese)
- [24] Ma J, Yu Z Q, Ni C X, et al. Effects of limestone powder on the hydration and microstructure development of calcium sulphoaluminate cement under long-term curing[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 199: 688-695.
- [25] Moon G D, Oh S, Jung S H, et al. Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete[J]. *Construction and Building Materials*, 2017, 135: 129-136.

(编辑 郑洁)