

文章编号:1007-9629(2024)02-0139-07

镁硅比和养护温度对硅酸镁水泥电磁性能的影响

李悦^{1,2,*}, 李洪文^{1,2}, 金彩云^{1,3}, 林辉^{1,2}, 罗晓^{1,2}

(1.北京工业大学 重庆研究院,重庆 401121; 2.北京工业大学 城市建设学部,北京 100124;
3.北京工业大学 理学部,北京 100124)

摘要:采用波导法测定硅酸镁水泥的电磁性能,分析镁硅比和养护温度的影响,并基于微观测试结果进行机理分析.结果表明:提高养护温度可以显著增强硅酸镁水泥的早期强度;硅酸镁水泥的复介电常数实部随着镁硅比和养护温度的提高逐渐增大;提高养护温度使硅酸镁水泥的复介电常数虚部和损耗角正切值增大;与镁硅比相比,养护温度对硅酸镁水泥的透射率、反射率和吸收率的影响更为明显.微观测试结果显示含水量和孔结构对硅酸镁水泥的电磁性能有重要影响.

关键词:硅酸镁水泥;镁硅比;养护温度;电磁性能

中图分类号:TU525

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2024.02.006

Effects of Magnesium-Silicon Ratio and Curing Temperature on Electromagnetic Properties of Magnesium Silicate Cement

LI Yue^{1,2,*}, LI Hongwen^{1,2}, JIN Caiyun^{1,3}, LIN Hui^{1,2}, LUO Xiao^{1,2}

(1. Chongqing Research Institute of Beijing University of Technology, Chongqing 401121, China;
2. Faculty of Architecture, Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China; 3. Faculty of Science, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The electromagnetic properties of magnesium silicate cement were measured by waveguide method. The effects of magnesium-silicon ratio and curing temperature were analyzed and then the mechanism was analyzed based on the microscopic test results. The results show that the early age strength of magnesium silicate cement paste could significantly be enhanced by increasing the curing temperature. The real part of the complex permittivity increases with the increase of magnesium-silicon ratio and curing temperature. The imaginary part of the complex permittivity and the tangent of the loss angle increase by improving curing temperature. To compare with magnesium-silicon ratio, the transmittance, reflectivity and absorptivity are more obviously affected by the curing temperature. The microscopic test results indicate that the water content and pore structure have an important influence on the electromagnetic properties of magnesium silicate cement paste.

Key words: magnesium silicate cement; magnesium-silicon ratio; curing temperature; electromagnetic property

实现“碳达峰·碳中和”是中国的重要发展战略目标任务.然而目前硅酸钙水泥生产仍会排放大量CO₂^[1],因此发展低碳胶凝材料势在必行,其中的一个研究方向是镁质胶凝材料^[2].其包括氯氧镁水泥、硫氧镁水泥、磷酸镁水泥和硅酸镁水泥等^[3-7].硅酸镁水泥由氧化镁和硅灰加水拌和而成,具备吸收CO₂和优

异力学性能等优点,是新型负碳建筑材料^[8-9].硅酸镁水泥的流动性和力学性能受镁硅比、原料活性和养护温度等因素的影响,且镁硅比增大可以促进水化硅酸镁凝胶(M-S-H)生成^[10].周凌峰等^[11]研究发现,硅酸镁水泥的流动性随着氧化镁活性的增大而增大,28 d强度呈先增后降趋势.宋强等^[12]和李兆恒^[13]

收稿日期:2023-02-24;修订日期:2023-04-26

基金项目:重庆市自然科学基金资助项目(CSTB2022NSCQ-MSX1250);国家自然科学基金资助项目(52078015)

第一作者(通讯作者):李悦(1972—),男,河北唐山人,北京工业大学教授,博士生导师,博士.E-mail:liyue@bjut.edu.cn

的研究结果显示,提升养护温度可以显著增大硅酸镁水泥的早期强度,但后期强度会倒缩。

目前,5G通讯正在快速发展,建筑材料的电磁性能对5G信号的传输有重要影响^[14]。作为一种可用于制备墙体防护材料的新型建筑材料,硅酸镁水泥的电磁性能理应受到关注,但针对硅酸镁水泥的研究主要集中于力学性能方面。鉴于此,本文探究了镁硅比(质量比,文中涉及的比值、含量等除特别注明外均为质量比或质量分数)和养护温度对硅酸镁水泥电磁性能的影响,研究了硅酸镁水泥的微观结构变化并进行了机理分析,以期对硅酸镁水泥在电磁传输领域的应用提供参考。

1 试验

1.1 原材料

原材料为轻烧氧化镁粉、白色硅灰和六偏磷酸钠(NaPO_3)₆。轻烧氧化镁粉的平均粒径为80 μm ,采用柠檬酸法测定其活性为360 s, MgO 含量为85.3%;白色硅灰中的 SiO_2 含量为98.4%,中值粒径 $d_{50}=1.406 \mu\text{m}$;(NaPO_3)₆为分析纯。

1.2 试样配合比和养护制度

为探究养护温度对硅酸镁水泥性能的影响,设置了2种养护制度——(1)始终将试样置于20℃、相对湿度大于95%的环境中养护;(2)试样装入模具后,先将其置于50℃、相对湿度大于95%的环境中养护至3 d龄期,再将其转移到20℃、相对湿度大于95%的环境中继续养护。需要说明的是,当养护温度为50℃时,硅酸镁水泥的28 d抗压强度显著低于其3 d抗压强度^[13],为避免高温养护下硅酸镁水泥强度发生明显倒缩,本试验将高温养护时长设为3 d。

胶凝材料轻烧氧化镁粉和白色硅灰的质量比(镁硅比)为2:3、1:1和3:2。试样的水胶比为0.25,其中(NaPO_3)₆质量为胶凝材料质量的2%。根据试样配合比和养护制度,将其编号为M2S3-20、M1S1-20、M3S2-20、M2S3-50、M1S1-50和M3S2-50,其中M2S3-20为镁硅比2:3、养护温度20℃,其他类推。

1.3 测试方法

硅酸镁水泥的流动度和抗压强度测定方法分别参照GB/T 8077—2012《混凝土外加剂匀质性试验方法》和GB/T 17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》。试样尺寸为40.00 mm×40.00 mm×40.00 mm。

硅酸镁水泥的电磁性能采用微波网络矢量分析仪进行测试,测试方法为波导法,测试频率为3.94~5.99 GHz。试样尺寸为22.00 mm×47.25 mm×

10.00 mm。测试仪器及详细测试方法见文献[15]。

硅酸镁水泥的微观结构试验包括X射线衍射仪(XRD)分析、热重(TG)分析、扫描电镜(SEM)观测和压汞(MIP)测试。其中XRD型号为Rigaku SmartLab SE,采用铜靶,扫描角度为5°~90°,扫描速率为5(°)/min;TG测定用仪器型号为Hitachi 7200,测试温度为30~1 000℃,升温速率为10℃/min;SEM型号为TESCAN MIRA LMS,分辨率为1.0 nm,加速电压为0.2~30.0 kV;MIP型号为Micromeritics AutoPore V 9620,测定孔径范围为5 nm~400 μm 。

2 试验结果

2.1 硅酸镁水泥的流动度和抗压强度

硅酸镁水泥搅拌完成后即进行流动度测试,测试过程在室温下进行。镁硅比为2:3、1:1和3:2的试样流动度分别为160、178、175 mm,与镁硅比为2:3的试样相比,镁硅比为1:1和3:2的试样流动度分别增大11.3%和9.4%,表明硅灰含量下降有助于提升硅酸镁水泥的流动度。与普通灰色硅灰相比,本试验用白色硅灰表面更为光滑,黏度更低,分散性和流动性更好,在水胶比为0.25的情况下,上述3组试样的流动度均可达到160 mm以上,而使用普通灰色硅灰很难达到这种效果。硅酸镁水泥的3、28 d抗压强度如表1所示。

表1 硅酸镁水泥的抗压强度

Table1 Compressive strengths of magnesium silicate cements

Sample No.	Compressive strength/MPa		Sample No.	Compressive strength/MPa	
	3 d	28 d		3 d	28 d
M2S3-20	5.5	79.7	M2S3-50	73.4	63.7
M1S1-20	4.2	88.9	M1S1-50	89.7	78.9
M3S2-20	5.8	77.1	M3S2-50	79.9	71.9

由表1可知:(1)当养护温度为20℃时,试样的3 d抗压强度较低,在4.2~5.8 MPa之间;当养护温度为50℃时,试样的3 d抗压强度显著提升,分别是20℃养护温度试样的13.3、21.4、13.8倍。(2)当养护温度为20℃时,试样的28 d抗压强度与养护温度50℃下的试样3 d抗压强度基本一致。(3)当养护温度为50℃时,试样的28 d抗压强度较3 d抗压强度有所降低,降幅为10%~13%。

抗压强度试验结果表明:室温(20℃)养护条件下,硅酸镁水泥前期水化缓慢,后期强度增长快;短期高温(50℃)养护可显著提升硅酸镁水泥的早期强度,使其达到室温养护下的28 d抗压强度,但后

期强度有小幅下降.其他研究^[12-13]同样发现了这一问题——当养护温度始终为50℃时,硅酸镁水泥净浆和砂浆的28 d抗压强度比7 d时降低40%以上.与之相比,本试验由于仅使用3 d高温养护,硅酸镁水泥的抗压强度降幅保持在15%以内.

上述结果表明,当镁硅比为1:1时,硅酸镁水泥试样的流动度和抗压强度均为3组试样的最大值,说明这是一个较为优异的配合比.

2.2 硅酸镁水泥的电磁性能

2.2.1 介电常数

养护龄期为28 d时硅酸镁水泥复相对介电常数的实部 ϵ'_r 、虚部 ϵ''_r 和介电损耗角正切值 $\tan \delta$ 的变化曲线如图1所示(图中 f 为频率).由图1可见:(1)养护温度无论是20℃还是50℃,硅酸镁水泥的 ϵ'_r 均随着镁硅比的增大而逐渐增加.(2)在镁硅比相同的条件下,随着养护温度的升高,硅酸镁水泥的 ϵ'_r 逐渐增大.(3)硅酸镁水泥的 ϵ'_r 随 f 变化而变化,但不同养护温度下 ϵ'_r 的变化规律并不一致;同一养护温度下,镁硅比

对 ϵ'_r 的变化规律没有影响.上述结果表明,增大镁硅比和养护温度均有助于提高硅酸镁水泥的储能能力.

随着 f 的增大, ϵ''_r 和 $\tan \delta$ 均发生明显变化,其中养护温度为20℃时的变化更为明显.由于 ϵ''_r 和 $\tan \delta$ 两者变化趋势基本一致,限于篇幅,这里仅分析 $\tan \delta$ 的变化.由图1还可见:(1)当养护温度为20℃时,试样M2S3-20、M1S1-20和M3S2-20的 $\tan \delta$ 在3.94~4.75 GHz内变化较小,在4.75~5.99 GHz内急剧增大,硅酸镁水泥的介电损耗显著增加;在 f 相同条件下,试样M2S3-20的 $\tan \delta$ 最小,试样M1S1-20和M3S3-20的 $\tan \delta$ 接近.(2)当养护温度为50℃时,试样M2S3-50、M1S1-50和M3S2-50的 $\tan \delta$ 随 f 呈波动变化,且镁硅比不同的试样变化规律不一致;在 f 和镁硅比相同条件下,3.94~5.75 GHz内试样的 $\tan \delta$ 更大,而5.75~5.99 GHz内呈无规律变化.综上所述,与 ϵ'_r 相比,不同试样的 $\tan \delta$ 没有明显变化规律.

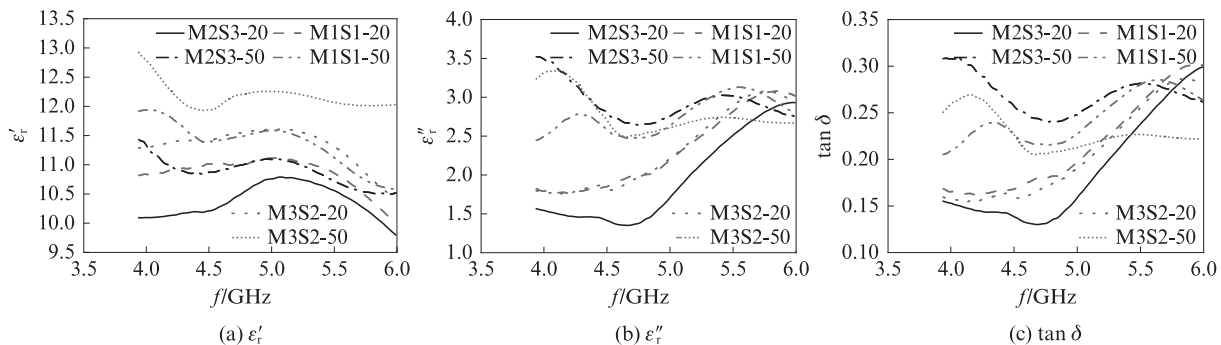


图1 养护龄期为28 d时硅酸镁水泥复相对介电常数的实部、虚部和介电损耗角正切值的变化曲线

Fig.1 Change curves of real part, imaginary part and dielectric loss tangent of complex relative dielectric constant of magnesium silicate cements cured for 28 d

2.2.2 透射率、反射率和吸收率

硅酸镁水泥的电磁波透射率 T 、反射率 R 和吸收率 A 测定结果如图2所示.由图2可见:(1)6组试样的透射率均随着频率的增加呈先升后降趋势.当养护温度为20℃时,试样M2S3-20具有最高透射率;当养护温度为50℃时,试样M2S3-50的透射率最低,表明养护温度对硅酸镁水泥的透射率具有显著影响.(2)6组试样的反射率均随着频率的增加先降后升.在3.94~4.50 GHz且养护温度为50℃时试样的反射率更低;而在4.50~5.99 GHz时其反射率更高.(3)6组试样的吸收率随频率变化趋势与透射率规律一致,在3.94~4.50 GHz且养护温度为50℃时试样的吸收率更高;而在4.50~5.99 GHz时其吸收率更低.

上述结果表明:养护温度对硅酸镁水泥的透射率、反射率和吸收率均有显著影响——一方面,温度

影响了具体数值的大小,比如试样M2S3-20的最大透射率比试样M2S3-50的最大透射率增加23.1%;另一方面,养护温度为20℃时试样的透射率、反射率和吸收率并非始终高于或者低于养护温度为50℃的试样,而是呈交替变换的规律.

2.3 硅酸镁水泥的微观结构

2.3.1 XRD和TG分析

养护龄期为28 d时硅酸镁水泥的XRD和TG测试结果如图3所示.由图3(a)可见:2 θ 为43.0°、62.4°、74.8°和78.8°的衍射峰对应MgO,2 θ 为54.0°的衍射峰对应Mg(OH)₂,2 θ 为32.8°的衍射峰对应MgCO₃,2 θ 在58.5°~60.0°之间的驼峰对应水化硅酸镁(M-S-H)凝胶^[13,16].不同镁硅比和养护温度下试样衍射峰的位置和数量没有变化,表明这二者不会改变硅酸镁水泥的物相种类.由图3(b)可见:250℃之前的质

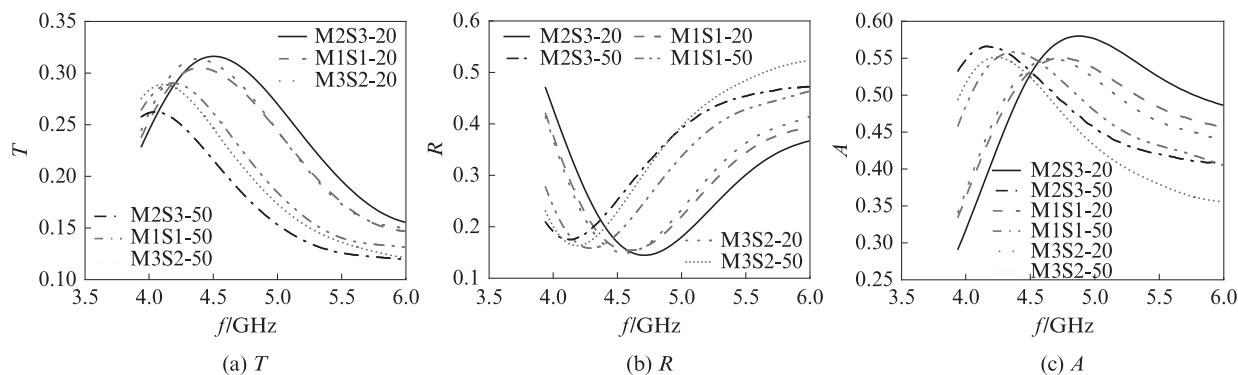


图2 养护龄期为28 d时硅酸镁水泥的电磁波透射率、反射率和吸收率

Fig. 2 Transmittivity, reflectivity and absorptivity of electromagnetic wave of magnesium silicate cements cured for 28 d

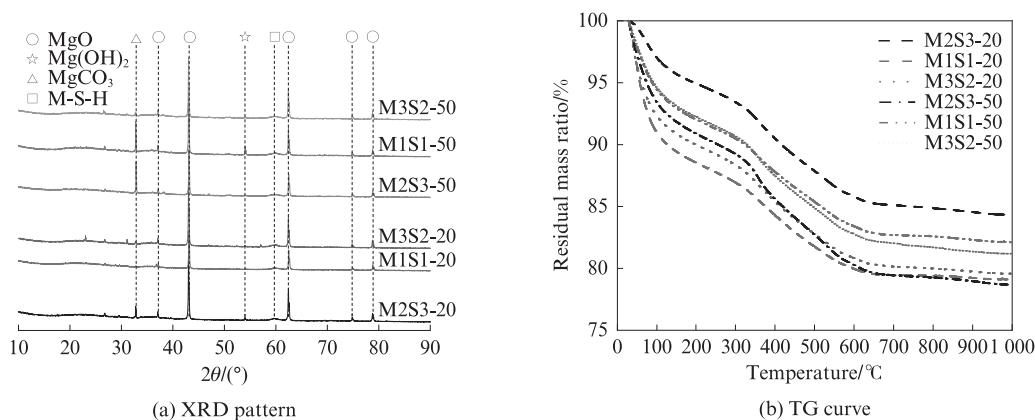


图3 养护龄期为28 d时硅酸镁水泥的XRD和TG测试结果

Fig. 3 XRD and TG results of magnesium silicate cements cured for 28 d

量损失为自由水和物理吸附水的蒸发;250~450 $^\circ\text{C}$ 的质量损失为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的分解;450 $^\circ\text{C}$ 之后的质量损失是 MgCO_3 的分解^[17].

根据测试结果计算硅酸镁水泥中水和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的含量,结果见表2.由表2可知:(1)试样M2S3-20的含水量显著低于其他试样;试样M2S3-50、M1S1-50和M3S2-50的含水量相差不大,其中试样M2S3-50

的含水量是3组试样中最高的.(2)养护温度无论是20 $^\circ\text{C}$ 还是50 $^\circ\text{C}$,镁硅比为1:1的试样M1S1-20(50)中的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 含量是3组配合比中最低的,且试样M1S1-20中的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 含量与试样M1S1-50中的几乎相等;同一镁硅比条件下,当养护温度升高后,镁硅比为2:3和3:2的试样中 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 含量均有所增大.

表2 硅酸镁水泥中水和 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的含量Table 2 Content of water and $\text{Mg}(\text{OH})_2$ in magnesium silicate cements

Sample No.	$w(\text{water})/\%$	$w(\text{Mg}(\text{OH})_2)/\%$	Sample No.	$w(\text{water})/\%$	$w(\text{Mg}(\text{OH})_2)/\%$
M2S3-20	5.8	16.5	M2S3-50	9.9	19.4
M1S1-20	12.2	15.8	M1S1-50	8.7	15.5
M3S2-20	10.8	16.8	M3S2-50	8.5	17.5

2.3.2 SEM 照片

图4展示了养护龄期为28 d时硅酸镁水泥的SEM照片.由图4可见:(1)试样M2S3-20中有未反应的硅灰、 MgO 颗粒、M-S-H凝胶及硅灰颗粒掉落后形成的凹面.(2)同一养护温度下,当镁硅比增大后,M-S-H逐渐包裹住硅灰颗粒.(3)不同养护温度下,试样M2S3-50和M1S1-50中硅灰的光滑程度要高于试样M2S3-20和M1S1-20,且硅灰颗粒掉落后形成的凹面

数量更多,表明养护温度为50 $^\circ\text{C}$ 时,试样的28 d水化反应程度更低,硅灰颗粒与M-S-H凝胶之间的黏结更差.

2.3.3 压汞测试

由前可知,镁硅比为1:1时硅酸镁水泥的流动度和抗压强度均最大,且试样M1S1-20和M1S1-50在介电性能上的差异比较明显,因此选择这2个试样进行压汞测试,结果如图5所示.图中 V 为孔体积, D 为孔径.由图5可见:试样M1S1-20和M1S1-50的孔径分布规律

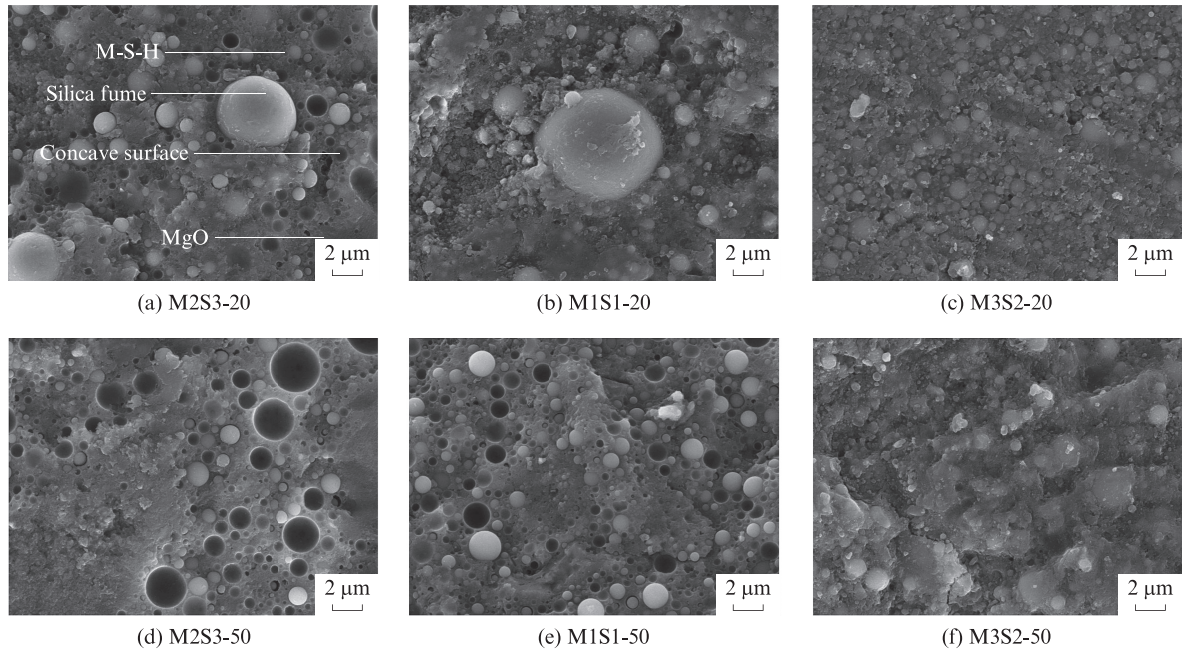


图4 养护龄期为28 d时硅酸镁水泥的SEM照片

Fig. 4 SEM images of magnesium silicate cements cured for 28 d

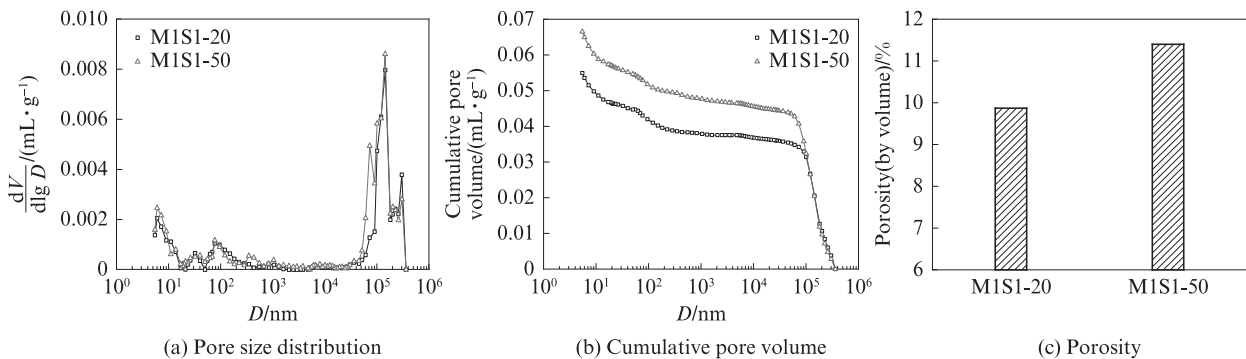


图5 养护龄期为28 d时硅酸镁水泥的压汞测试结果

Fig. 5 MIP results of magnesium silicate cements cured for 28 d

基本一致,仅在孔径为 7.3×10^4 nm时,试样M1S1-50的孔体积显著增大;累计孔体积的变化规律与孔径分布相似,在孔径大于 7.3×10^4 nm时,试样M1S1-50的累计孔体积高于试样M1S1-20;试样M1S1-20和M1S1-50的孔隙率分别为9.87%和11.40%,后者较前者增加15.5%。孔结构测试结果解释了试样M1S1-20的28 d抗压强度比试样M1S1-50高的原因。

3 结果讨论

电磁波的透射率、反射率和吸收率均与材料的介电性能密切相关,因此本试验主要对硅酸镁水泥的介电常数进行分析。硅酸镁水泥的复相对介电常数实部 ϵ'_r 随着硅灰含量的降低而增大。SEM结果显示,硅灰反应程度较低,颗粒完整,而硅灰自身的介电常数较低,因此出现了 ϵ'_r 随镁硅比增大而增大的

现象。

介电损耗源于极化产生的损耗,极化种类有多种,包括离子极化、偶极子极化、原子极化和电子极化等。在5G频段内,水泥基材料的电磁损耗主要源于偶极子极化。水是介电常数非常大的极性分子,极化过程中会产生大量的介电损耗,因此含水量减少可以有效降低介电损耗。TG分析结果显示,试样M1S1-20的含水量显著低于其他试样,其介电损耗角正切值 $\tan \delta$ 在3.95~5.4 GHz时最低,且其发展规律与其他试样也有明显区别。但表2显示,试样M1S1-50的含水量虽低于试样M1S1-20,但其介电损耗角正切更大,说明除含水量外,其他因素的影响也不可忽视。

研究表明,孔结构对水泥基材料的电磁性能也有重要影响,其影响程度由孔径大小决定: $D > 100$ nm的孔对电磁损耗几乎无影响; $D < 100$ nm的

孔可以视为纳米颗粒,在电磁场下会产生较大的介电损耗,因此 $D < 100$ nm的孔对电磁损耗有重要影响^[14-15]。试样 M1S1-20 和 M1S1-50 中 $D < 100$ nm 的孔的累计体积分别为 0.013 4、0.015 7 mL/g,表明试样 M1S1-50 中的孔体积更大,能够产生更大的电磁损耗,这也是试样 M1S1-50 中含水量虽然更低,但受孔结构的影响,其在 3.94~5.75 GHz 内介电损耗仍高于试样 M1S1-20 的原因。

4 结论

(1)在 50℃下养护 3 d 再进行标准养护不仅可显著提升硅酸镁水泥的 3 d 抗压强度,而且能够避免其 28 d 抗压强度大幅倒缩的问题。当镁硅比为 1:1 时,硅酸镁水泥的抗压强度最高。

(2)增大镁硅比和养护温度均可提高硅酸镁水泥的复介电常数实部,提高养护温度会增大介电损耗。养护温度对硅酸镁水泥的透射率、反射率和吸收率有显著影响,但规律性不明显。

(3)试样 M1S1-50 养护 28 d 时的孔隙率高于试样 M1S1-20,这是前者 28 d 抗压强度低于后者的主要原因。硅酸镁水泥的含水量和孔结构随镁硅比和养护温度的变化规律,可解释其在电磁性能上的差异。

参考文献:

- [1] 蒋正武,尹军. 可持续混凝土发展的技术原则与途径[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(6): 957-963.
JIANG Zhengwu, YIN Jun. Technical principles and approaches for development of sustainable concrete[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(6): 957-963. (in Chinese)
- [2] 陈伟,肖学英,张澜沁,等. 镁质水泥材料低碳发展及其应用研究——绿色建材低碳产品与技术案例[J]. 建设科技, 2022(19): 8-11.
CHEN Wei, XIAO Xueying, ZHANG Lanqin, et al. Research on low carbon development and application of magnesia cement—Low carbon products and technology cases of Green Building materials[J]. Construction Science and Technology, 2022(19): 8-11. (in Chinese)
- [3] 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)
- [4] 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)
- [5] LOTHENBACH B, NIED D, L'HÔPITAL E, et al. Magnesium and calcium silicate hydrates [J]. Cement and Concrete Research, 2015, 77: 60-68.
- [6] LI Y, SHI T F, LI Y Q, et al. Damage of magnesium potassium phosphate cement under dry and wet cycles and sulfate attack [J]. Construction and Building Materials, 2019, 210: 111-117.
- [7] ZHANG T T, VANDEPERRE L J, CHEESEMAN C R. Formation of magnesium silicate hydrate (M-S-H) cement pastes using sodium hexametaphosphate [J]. Cement and Concrete Research, 2014, 65: 8-14.
- [8] 李林安,戚佳颖,林泽辉,等. 纤维增强 MgO/SiO₂ 水泥的配比优化及水化反应机理研究[J]. 功能材料, 2020, 51(11): 11110-11115.
LI Lin'an, QI Jiaying, LIN Zehui, et al. Study on the proportion optimization and hydration mechanism of fiber reinforced MgO/SiO₂ cement[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(11): 11110-11115. (in Chinese)
- [9] ZHANG T T, DIECKMANN E, SONG S Z, et al. Properties of magnesium silicate hydrate (M-S-H) cement mortars containing chicken feather fibers [J]. Construction and Building Materials, 2018, 180: 692-697.
- [10] 肖建敏,胡亚茹. 不同镁硅摩尔比下水化硅酸镁凝胶的微观结构[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(6): 1131-1138.
XIAO Jianmin, HU Yaru. Microstructure of magnesium silicate hydrates in different Mg/Si molar ratios[J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(6): 1131-1138. (in Chinese)
- [11] 周凌峰,林旭健,王威. MgO 活性对新型水化硅酸镁水泥性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(1): 57-65.
ZHOU Lingfeng, LIN Xujian, WANG Wei. Effect of MgO reactivity on properties of new magnesium silicate hydrate cement [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(1): 57-65. (in Chinese)
- [12] 宋强,胡亚茹,王倩,等. MgO 活性和养护温度对 MgO-SiO₂-H₂O 胶凝材料性能的影响[J]. 硅酸盐学报, 2019, 47(2): 220-227.
SONG Qiang, HU Yaru, WANG Qian, et al. Effect of MgO reactivity and curing temperature on properties of MgO-SiO₂-H₂O system[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, 47(2): 220-227. (in Chinese)
- [13] 李兆恒. MgO-SiO₂-H₂O 胶凝体系的反应机制及应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
LI Zhaozheng. Reaction mechanisms and application study of MgO-SiO₂-H₂O cementitious system [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015. (in Chinese)
- [14] LIU J L, LI Y, JIN C Y, et al. Multi-scale quantitative study on dielectric properties of C-S-H synthesized by different molar ratio of Ca/Si [J]. Construction and Building Materials, 2022, 360: 129599.
- [15] LIU J L, LI Y, LI Y N, et al. Quantitative study on the dielectric properties of tricalcium silicate pastes under different W/C [J]. Construction and Building Materials, 2023, 366: 130245.

- [16] 王倩,武志红,张国丽,等. MgO活性对MgO-SiO₂-H₂O胶凝体系的影响[J]. 建筑材料学报, 2020, 23(4): 771-777.
WANG Qian, WU Zhihong, ZHANG Guoli, et al. Effect of MgO reactivity on MgO-SiO₂-H₂O cementitious system[J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 771-777. (in Chinese)
- [17] JIA Y, ZOU Y X, JIANG Y T, et al. Effect of a Ca-rich environment on the reaction process of the MgO-activated SiO₂ system [J]. Cement and Concrete Composites, 2023, 136: 104855.

(上接第 113 页)

- of characterization and classification[J]. Sedimentology, 2008, 55(1): 31-63.
- [16] LOZ P H F, ANGULO S C, REBMANN M S, et al. Use of a 3D structured-light scanner to determine volume, surface area, and shape of aggregates [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(9): 04021240.
- [17] OROSZ Á, ANGELIDAKIS V, BAGI K. Surface orientation tensor to predict preferred contact orientation and characterise the form of individual particles[J]. Powder Technology, 2021, 394: 312-325.
- [18] WANG S D, MIAO Y H, WANG L B. Investigation of the force evolution in aggregate blend compaction process and the effect of elongated and flat particles using DEM[J]. Construction and Building Materials, 2020, 258: 119674.
- [19] XIE H, FENG J L. Implementation of numerical mesostructure concrete material models: A dot matrix method[J]. Materials, 2019, 12 (23): 3835
- [20] WEI D H, WANG J F, NIE J Y, et al. Generation of realistic sand particles with fractal nature using an improved spherical harmonic analysis[J]. Computers and Geotechnics, 2018, 104: 1-12.
- [21] ZHU T Y, CHEN Z H, ZHANG L F, et al. Modeling and fracture behavior of mesoscale concrete considering actual aggregate shapes and placement domain shapes[J]. Construction and Building Materials, 2023, 400: 132821.
- [22] ZINGG T. Beitrag zur schotteranalyse[D]. Zurich: ETH Zurich, 1935.
- [23] 李北星, 王威, 陈梦义, 等. 粗骨料的等轴率、圆度和球度及其相互关系[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(4): 531-536.
LI Beixing, WANG Wei, CHEN Mengyi, et al. Isometric ratio, roundness and sphericity of coarse aggregates and their relationship [J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(4): 531-536. (in Chinese)
- [24] HE S, YANG E H. Non-normal distribution of residual flexural strengths of steel fiber reinforced concretes and its impacts on design and conformity assessment [J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 123: 104207.
- [25] BEYGI M H A, KAZEMI M T, IMAN M, et al. The influence of coarse aggregate size and volume on the fracture behavior and brittleness of self-compacting concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 66: 75-90.