第 48 卷第 5 期
2020 年 5 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 5
May，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.2020.05.20190480

硅酸镁胶凝材料体积稳定性及水化特性

王 倩[1]，武志红[1,2]，张国丽[1]，张路平[1]，郑海康[1]

(1. 西安建筑科技大学材料科学与工程学院，西安 710055；
2. 中钢集团洛阳耐火材料研究院有限公司 先进耐火材料国家重点实验室 河南 洛阳 471039)

摘 要：用硅灰(SF)和不同温度煅烧后 MgO 制备水化硅酸镁($MgO\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$，M-S-H)胶凝材料，研究其流动度、凝结时间、pH 值与 M-S-H 胶凝材料强度及膨胀特性的相互关系。采用 X 射线衍射和热重分析等测试手段分析了不同温度煅烧的 MgO 对 MgO-SF 净浆水化产物和 M-S-H 结构的影响。结果表明：随着煅烧温度增加，MgO 衍射峰强度增加，峰宽变窄，晶粒尺寸增加，活性降低。1 150 ℃煅烧 MgO 制备的净浆中 $Mg(OH)_2$ 和 M-S-H 物相含量高，且 M-S-H 硅氧四面体聚合程度最大。1 150 ℃煅烧 MgO 制备的 MgO-SF 流动度适中易成型(净浆和砂浆流动度分别为 129 mm 和 206 mm)，净浆 pH 值和凝结时间适中，砂浆强度高、自由膨胀率(ε_t)最小。ε_t 与 $Mg(OH)_2$ 的含量变化幅度正相关。

关键词：水化硅酸镁；自由膨胀率；水化产物；氧化镁
中图分类号：TM25　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)05–0682–07
网络出版时间：2020–03–06



Volume Stability and Hydration Characteristics of Magnesium Silicate Cementious Materials

WANG Qian[1], *WU Zhihong*[1,2], *ZHANG Guoli*[1], *ZHANG Luping*[1], *ZHENG Haikang*[1]
(1. College of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;
2. State Key Laboratory of Advance Refractories, Sinosteel Luoyang Institute of Refractories Research Co., Ltd., Luoyang 471039, Henan, China)

Abstract: The relationships among the fluidity, setting time, and pH value of hydrated magnesium silicate ($MgO\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$, M-S-H) prepared by silica fume (SF) and MgO after calcination at different temperatures were investigated, and the strength and shrinkage characteristics of M-S-H cementious materials were analyzed. The effect of MgO on the hydrated products of MgO-SF and the structure of M-S-H at different calcination temperatures was investigated by X-ray diffraction and thermogravimetric analysis. The results show that the intensity of MgO diffraction peak increases, the peak width becomes narrower, the grain size increases, and the activity decreases as the calcination temperature increases. The contents of $Mg(OH)_2$ and M-S-H in the pure pulp prepared by calcining MgO at 1 150 ℃ are the highest, and the degree of polymerization of M-S-H silicon tetrahedron becomes the maximum value. The MgO-SF pulp and mortar slump prepared by calcining MgO at 1 150 ℃ are 129 mm and 206 mm, respectively, in accordance with the large-flow concrete. The pH value and setting time of the pulp are moderate, the mortar strength is high, and the dry shrinkage rate (ε_t) is the minimum value. ε_t is positively correlated to the change in $Mg(OH)_2$ content.

Keywords: hydrated magnesium silicate; drying shrinkage characteristics; hydration product; magnesium oxide

硅酸盐水泥($CaO\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$)胶凝材料在社会发展中起着重要的作用，广泛应用于民用建筑及普通的工业建筑中。然而随着科技的发展，在一些特种行业如固封核废料、海洋建筑及高温材料应用等方面，普通硅酸盐水泥则难以胜任。因此亟须研究一种新型胶凝材料来弥补这一空白。可替代胶凝材料的理论研究和技术开发已成为建筑材料领域的重要研究方向[1]。水化硅酸镁($MgO\text{-}SiO_2\text{-}H_2O$，M-S-H)胶凝材料具有低腐蚀[2–4]、耐高温、良好表面光泽度、轻质和优良的力学性能，可应用于固封核废料或者

收稿日期：2019–07–08。　修订日期：2019–11–29。
基金项目：国家自然科学基金项目(51974218)；西安建筑科技大学基础研究基金(JC149 6)；先进耐火材料国家重点实验室开放基金(SKLAR201905)。
第一作者：王 倩(1994—)，女，硕士研究生。
通信作者：武志红(1974—)，男，博士，副教授。

Received date: 2019–07–08.　**Approved date:** 2019–11–29.
First author: WANG Qian (1994–), female, Master candidate.
E-mail: 976636508@qq.com
Correspondent author: WU Zhihong (1974–), male, Ph.D., Associate Professor.
E-mail: zhihong@xauat.edu.cn

危险废弃物[2,5]、墙体保温材料[6]和耐火材料浇注料[7]等领域，被认为是一种最有发展前景的新型胶凝材料[2,5]，在建筑材料领域有着巨大的应用价值。

当前 M-S-H 性能的研究主要集中在原料种类比例、活性及养护温度上，并取得了一定的成果。例如，原料 Mg/Si 比可影响 M-S-H 的组成。当 Mg/Si 比在 0.75 和 1.5 之间时，以滑石($Mg_3(Si_2O_5)_2(OH)_2$)和蛇纹石($Mg_3(Si_2O_5)(OH)_4$)形式存在[8–9]。Mg/Si 比≥1~1.5，以类利蛇纹石或叶蛇纹石(蛇纹石前驱体)形式存在[10–12]。宋强[1]和 Szczerba[6]研究了养护温度对 M-S-H 物相组成的影响，表明适当的养护温度有助于 MgO 水化和后期 M-S-H 的形成，温度过高则会抑制 $Mg(OH)_2$ 水解和 M-S-H 的形成。虽然较高温度煅烧的 MgO 制备的 M-S-H 具有流动度良好和强度稳定增长的性能[1]，但存在活性下降及水化产物有效成分不足的问题。李兆恒[5]的研究证实，不同种类及活性的原料，对 M-S-H 强度影响很大，具有较高反应活性的 MgO 可使水化反应速率加快，有效成分 M-S-H 含量增多，但本文作者探索发现存在后期强度倒缩问题，不利于实际应用。综上可见，要获得性能良好的水化硅酸镁胶凝材料，需同时考虑原料成分比例、活性及养护温度等对材料性能的协同作用。另一方面，水化硅酸镁胶凝材料的体积稳定性也是需要加以考虑。对可投入大规模使用的可替代混凝土来说，硅酸镁胶凝材料应具有稳定增长的强度和良好的体积稳定性。

本工作中研究了在 900、1 150、1 450 ℃保温 2 h 煅烧后 MgO 制备的 MgO-SF 流动度、凝结时间、pH 值与水化硅酸镁胶凝材料强度及膨胀特性的相互关系，并分析了 M-S-H 物相组成和微观结构。

1　实验

以碱式碳酸镁($(MgCO_3)_4$•$Mg(OH)_2$• H_2O，分子量 485.80，天津市天力化学试剂有限公司生产)为引入 MgO 的原料。硅灰(SF)由宁夏某硅铁厂提供，其化学成分(质量分数)为：95.73% SiO_2，1.25% CaO，1.05% K_2O，0.64% MgO，0.51% Al_2O_3，0.35% Na_2O 及 0.15%烧失量。减水剂为聚羧酸减水剂(上海钦和化工有限公司生产)。

1.1　活性 MgO 制备及检测

将碱式碳酸镁分别在 900、1 150 ℃和 1 450 ℃保温 2 h，冷却至室温从高温炉中取出，得到不同活性 MgO。采用柠檬酸法[10]测试不同温度煅烧 MgO 的活性。称取 1.7 g 活性 MgO 放入干燥烧杯中，置于恒温 30 ℃的磁力搅拌器上，快速加入 200 mL 30 ℃的柠檬酸溶液(68 mmol/L，预先滴加酚酞指示剂)，同时打开秒表，开动磁力搅拌器(约 500 r/s)，待溶液刚呈现红色立即记录秒表读数。根据反应的时间，衡量 MgO 活性，时间越短 MgO 反映活性越高。

1.2　MgO-SF 制备及检测

将硅灰分别与 900、1 150 ℃和 1 450 ℃煅烧后 MgO 按质量比 3:2 的混合物以 M1、M2、M3 表示。M1、M2、M3 中加入 0.7%减水剂备用。分别称取 450 g 上述粉料、225 g 自来水及 1 350 g 标准砂制备砂浆并测试其流动度(按照 GB/T2419— 2016《水泥胶砂流动度测定方法》)，然后注入模具制备强度试样(依据 GB/T17671—1999《水泥胶砂强度检验方法 ISO 法》)。另称取 200 g 上述粉料，100 g 自来水制成净浆，采用 GB/T8077—2012《混凝土外加剂匀质性试验方法》的“水泥净浆流动度”测试净浆流动度。

根据 GB/T1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》，水灰比为 0.5，分别测定 M1、M2、M3 标准稠度需水量下的减水剂掺量分别为 0.7%、0.55%、0.50%，在此基础下测试水泥净浆的凝结时间。本实验用固液萃取法提取孔溶液，将养护至龄期的净浆试样加无水乙醇并干燥，粉磨后过筛(0.08 mm 方孔筛)，称取 3 g 粉末溶于 30 g 的去离子水中，放入磁子，放置磁力搅拌机上，搅拌 0.5 h 后静置，用真空泵和布氏漏斗抽取溶液。采用 pH 计(PHSJ-3F 型，上海仪电科学仪器股份有限公司，±0.01)测量孔溶液 pH 值。采用的 XRD-Rietveld 全谱拟合定量分析[13]对 MgO-SF 净浆中 MgO 含量进行计算。选用 ZnO 作为内标物，掺量为 20%对组分含量进行修正，并用 Jade 6 软件进行分析。得到 M1、M2、M3 浆体中 MgO 含量变化。

参考文献[14–15]的体积稳定性测试制样。粉料与标准砂质量比为 1:2，水灰比 0.5，减水剂 0.7%制备砂浆试块，将制备好的砂浆分两次装入模具中，应保证成型端板处安装的钉头在成型后试块的轴线上且钉头伸入端板的深度为(10±1) mm。试体自加水时算起，养护 2 d 脱模后测得初始长度，水养 1 d，取出后安装于比长仪上，获得首次自由膨胀率数据。在温度(25±2)℃，湿度(56±2)%下养护。根据下式(1)计算各龄期自由膨胀率 ε_t：

$$\varepsilon_t = \frac{L_t - L_1}{L_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：ε_t为试块在龄期 t 时的自由膨胀率(%)；L_t为 t 时的自由膨胀测试值(mm)；L_1为初始长度(mm)；L_0为原始净长(mm)。

将 MgO-SF 净浆用水浸泡，室温密封养护至龄期后取出，在无水乙醇中终止水化 12 h 后，放入烘箱 60 ℃烘干后磨细，进行 X 射线衍射(XRD)，热重分析(TGA)。采用日本理学 Rigaku 型 X 射线衍射仪测定净浆水化产物，测试参数为 Cu 靶 K_α 线，管压 40 kV，管流 30 mA，扫描范围为 5°~85°，连续扫描方式，扫描速率为 1 (°)/min。用瑞士梅特勒-托利多公司 TGA/DSC1/1600 同步热分析系统进行热重分析，温度准确度：+/–0.5 ℃。

2 结果与讨论

2.1 煅烧 MgO 活性和 XRD 分析

图 1 为不同温度煅烧 MgO 的 XRD 谱，2θ=37°、43°、62°、75°和 79°处峰位对应 MgO 的特征衍射峰。MgO 的活性与其晶粒尺寸与晶格畸变有关。按照文献[16]计算 MgO 的晶粒尺寸、晶格畸变和所测活性见表 1。可以看出，煅烧温度从 900 ℃到 1 450 ℃，特征衍射峰强度增强，峰宽变窄，对应特征峰的晶粒尺寸变大，晶格畸变减小，晶格趋于完整；MgO 水解消耗柠檬酸的时间长，活性降低。

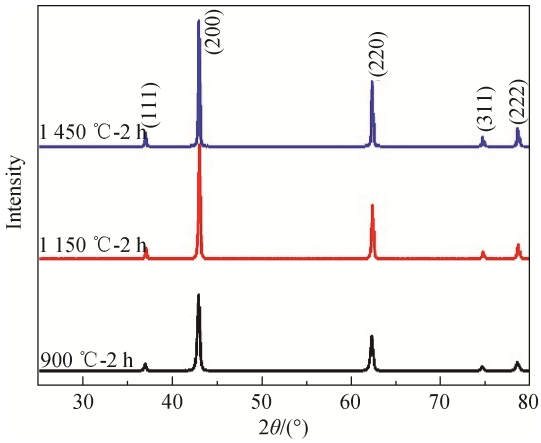


图 1 不同温度煅烧 MgO 的 XRD 谱

Fig. 1 XRD patterns of MgO prepared at different temperatures

表 1 不同温度煅烧 MgO 的活性值、晶粒尺寸和晶格畸变

Table 1 Activity values, grain size and lattice distortion of MgO prepared at different temperatures

Temperature/℃	Reactivity value/s	Grain size/nm	Lattice distortion/%
900	53.5	27.73	0.271
1 150	195.5	38.12	0.196
1 450	308.5	53.99	0.145

2.2 MgO-SF 的流动度和凝结间、pH 值、强度及膨胀性。

MgO-SF 的流动度和凝结时间见图 2。从 M1 到 M3，砂浆和净浆的流动度增强，净浆凝结时间变长。MgO 煅烧温度为 1 450 ℃时，发生烧结现象(MgO 呈淡黄色且结块)，晶粒尺寸增大，比表面积变小，活性降低[5]。低活性 MgO 水化速率慢，$Mg(OH)_2$ 生成速率慢且量少；MgO 的比表面积小，减少了与水的接触面，使得吸附于 MgO 颗粒的水减少。因而流动度变好。高活性 MgO 快速与水反应生成 $Mg(OH)_2$，pH 值升高使得 SF 溶解速率高，$Mg(OH)_2$ 与溶解的水合二氧化硅生成具有胶凝性的 M-S-H，凝结时间缩短。

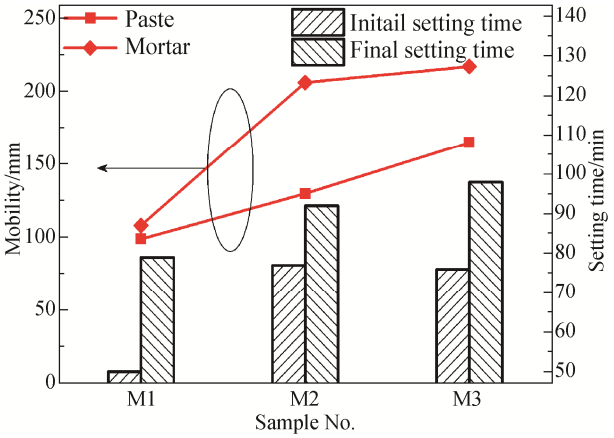


图 2 MgO-SF 的流动度和凝结时间

Fig. 2 Fluidity of MgO-SF mixture and setting time of pastes

图 3 为测定 MgO-SF 净浆孔溶液的 pH 值。表 2 为计算得到的 MgO-SF 净浆中的 MgO 含量。由图 3 和表 2 可见，相同龄期下，从 M1 到 M3，净浆的 pH 值减小，MgO 含量增大。主要是因为 M1 净浆原料的 MgO 活性高水化速率快，水化生成 $Mg(OH)_2$ 速率快，OH^-增多，pH 值大；未发生水化剩余的 MgO 含量低。随时间的增大，M1、M2、M3 的 pH 值变化规律相同，加水后 pH 值迅速增大，水化 5 h 时出现最大值后逐渐下降，3~7 d 大幅度下降，7 d 后下降速度明显减缓。MgO 含量在 7 d 内降低幅度大，后缓慢减小。M1 该含量远低于 M2 和 M3 且随龄期变化速率快。pH 值和 MgO 含量变化表征了净浆的 MgO 水化速率和其水化产物 $Mg(OH)_2$ 与溶解 SF 形成 M-S-H 的速率。早期净浆 pH 值的上升是 MgO 水化生成 $Mg(OH)_2$ 引起的，后下降则是中间产物 $Mg(OH)_2$ 与溶解的 SF 生成 M-S-H。

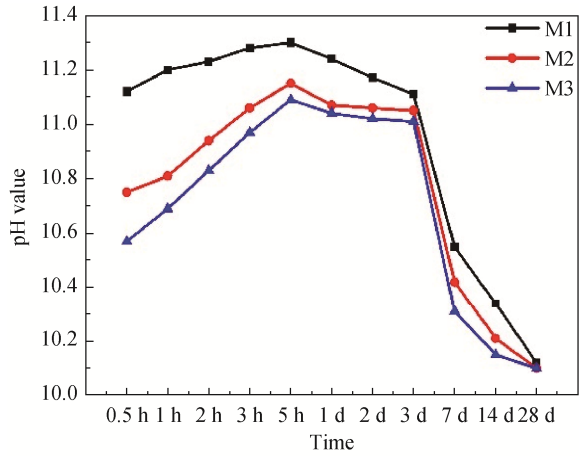


图 3　MgO-SF 净浆孔溶液的 pH 值

Fig. 3　pH value of pore solution in MgO-SF mixtures

表 2　MgO-SF 净浆中 MgO 含量

Table 2　Content of MgO in MgO-SF mixtures　*w*/%

Curing time/d	M1	M2	M3
3	16.8	32.7	34.7
7	9.2	16.6	26.7
28	0.3	10.9	20.6

图 4 为 MgO-SF 砂浆强度变化。从图 4 可看出，砂浆强度随 MgO 煅烧温度升高而降低。M1 在 7 d 内强度增长快且强度最高，但 28 d 时出现强度倒缩，M2 和 M3 随龄期强度稳固增加，这是因为 M2 和 M3 的 MgO 活性较低，生成 $Mg(OH)_2$ 缓慢，含量变化小体积膨胀小。56 d 时，M2 样品的抗压强度最高达 56 MPa，抗折强度达 4.16 MPa。

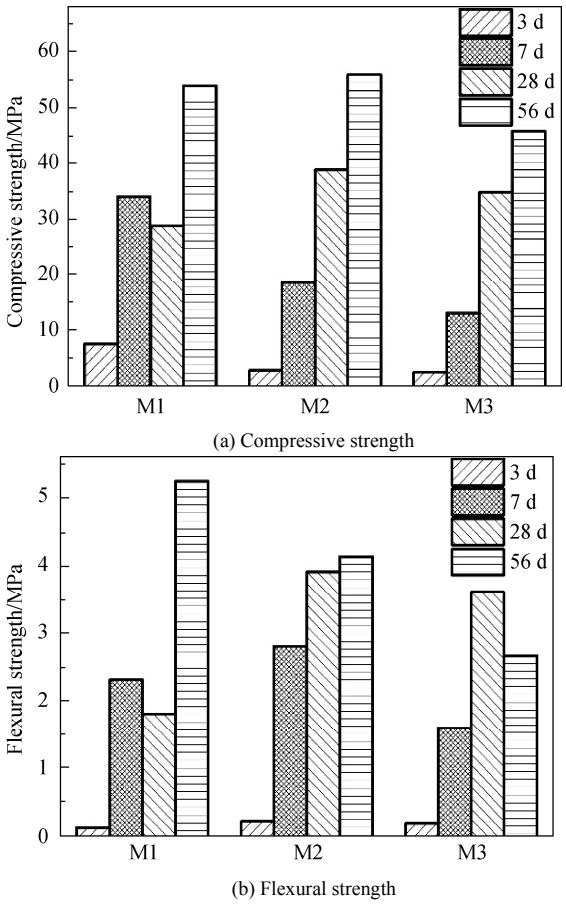


图 4　MgO-SF 砂浆的强度

Fig. 4　Strength of MgO-SF mortars

MgO-SF 砂浆自由膨胀率随龄期增长而减小(图 5)，M1 在 3~14 d 内增长幅度大，17 d 后趋于定值；M2 和 M3 在 3~7 d 内增长幅度大，14 d 后 M2 和 M3 基本不变。ε_t 变化 $\Delta\varepsilon_{3\text{-}7d}(\varepsilon_{7d}-\varepsilon_{3d})$最大，M1、M2 和 M3 的 $\Delta\varepsilon_{3\text{-}7d}$ 分别占总 $\Delta\varepsilon_{17\text{-}0d}(\varepsilon_{0d}-\varepsilon_{17d})$变化的 63.825%、82.223%和 78.556%左右。结果表明：M1 的 ε_t 变化速率大，特别是在 7 d 后 ε_t 仍大幅度增加，17 d 后稳定的 ε_t 值最大，印证 M1 的 28 d 强度数据。M2 的 ε_t 变化速率最小，$\Delta\varepsilon_t$ 变化小，体积稳定性好；这也和强度、pH 数据保持一致。

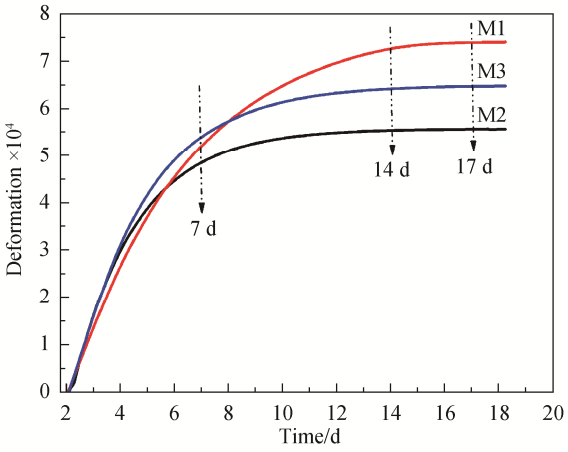


图 5　MgO-SF 砂浆的自由膨胀率

Fig. 5　Free expansion rate of MgO-SF mortars

2.3　水化产物的物相及热稳定性

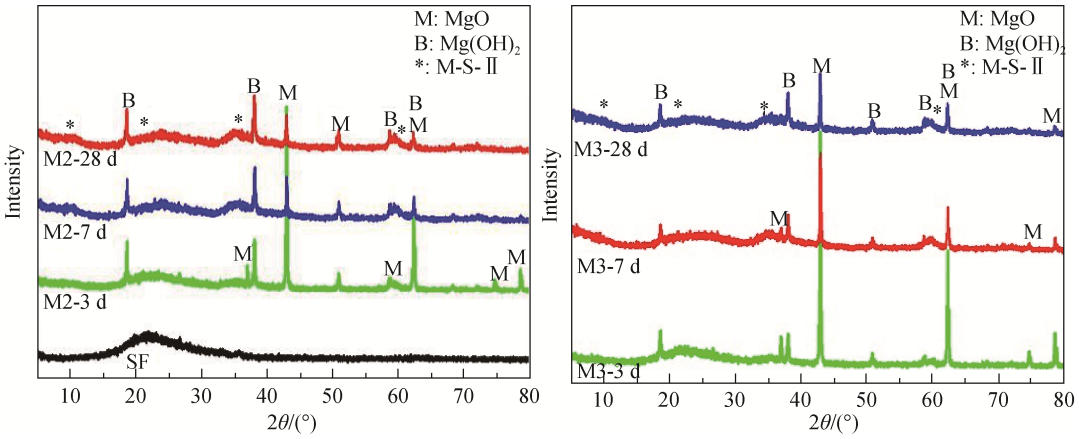
图 6 为 MgO-SF 净浆和原料 SF 的 XRD 谱。在图 6a 中，SF 在 2θ 介于 15°~30°之间有明显包峰。净浆 3 d 时，SF 包峰明显降低，此后包峰变化不大。3 d 时 2θ 位于 36.94°、74.64°、78.66°出现 MgO 衍射峰，7 d 消失。在 2θ=42.9°出现 MgO 最强衍射峰(见图 1，2θ=42.9°)，随龄期增长强度减弱。2θ 位于 62°附近是 MgO 的次强峰(见图 1，2θ=62.3°)与水化产物 $Mg(OH)_2$ 第 5 衍射峰(2θ=62.3°)合峰，该峰强度随龄期增长减弱。表明 MgO 含量随龄期增长降低。在 2θ 分别位于 18°、38°、50°附近出现 $Mg(OH)_2$ 衍射峰，该峰强度在 3 d 最高，随后降低。

图 6b 中，2θ 位于 36.94°和 74.64°处的 MgO 衍射峰 28 d 消失，78.66°处 MgO 衍射峰仍存在。结合图 6a 上述衍射峰在 7 d 消失和 MgO 最强衍射峰(2θ=42.9°)强度远低于图 6b，说明 M3 净浆中的 MgO

水化程度低且反应缓慢。$Mg(OH)_2$ 衍射峰(2θ 位于18°、38°、50°附近)随龄期增长变化不大，且该衍射峰强度明显高于图 6b，说明 M2 净浆中的 MgO 水化生成 $Mg(OH)_2$ 速率高，和 pH 值、强度数据保持一致。

由图 6a 和图 6b 可看出，M-S-H 凝胶具有 4 个宽峰[8]，分别位于 8°~12°、23°~25°、32°~38°和 58°~62°。从 3~7 d 该宽峰强度增强，7 d 后变化不大。M2 净浆该宽峰更明显且强度较高，结合 $Mg(OH)_2$ 衍射峰变化情况，可以认为 7 d 后 M-S-H 的形成明显减缓。

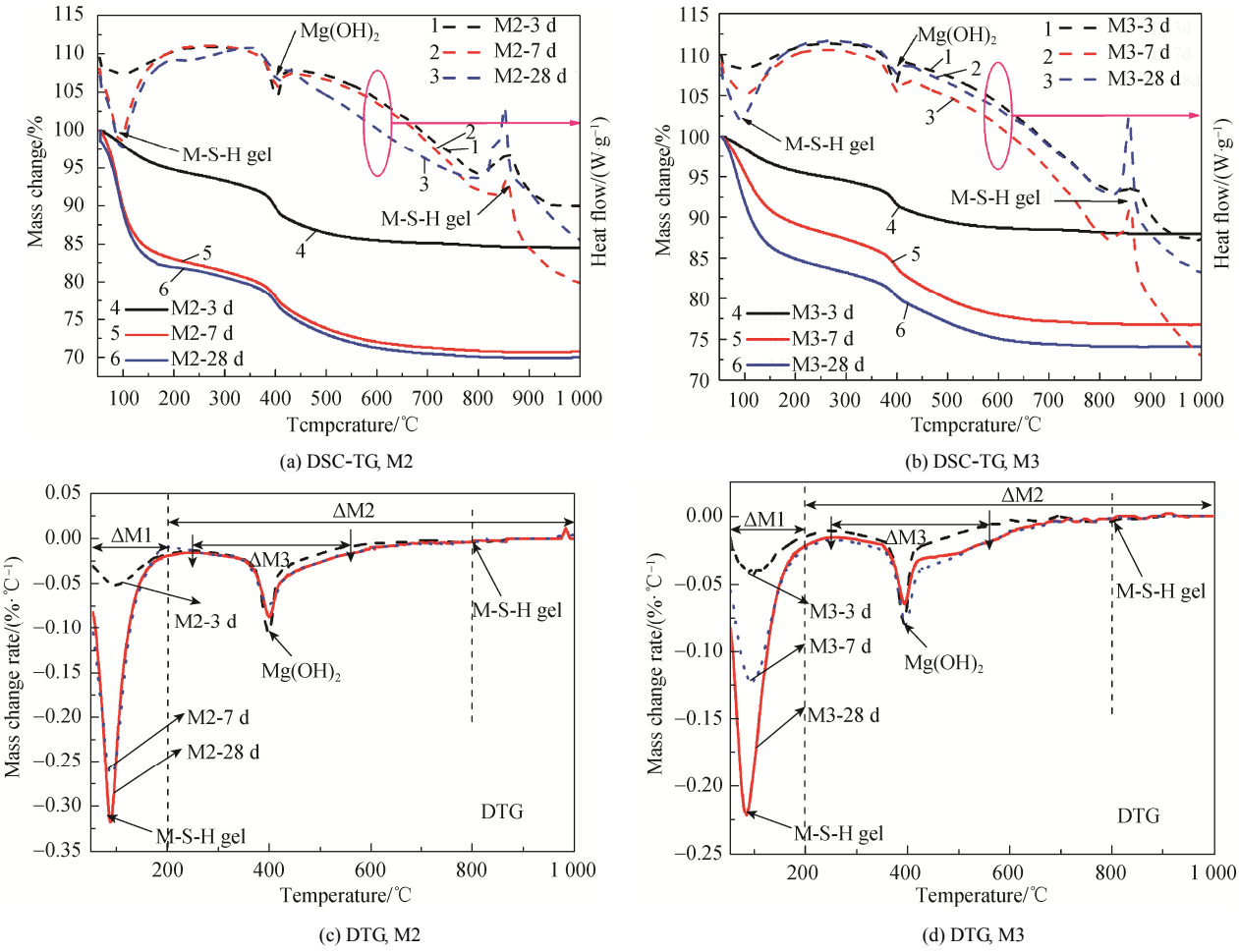
图 7 为 MgO-SF 净浆 DSC-TG 和 DTG 曲线。DSC 曲线在 85 ℃和 400 ℃的吸热谷分别对应反应



(a) MgO-SF paste of M2 and SF (b) MgO-SF paste of M3

图 6 MgO-SF 净浆和 SF 的 XRD 谱

Fig.6 XRD spectra of MgO-SF paste and SF



(a) DSC-TG, M2 (b) DSC-TG, M3

(c) DTG, M2 (d) DTG, M3

图 7 MgO-SF 净浆(M2、M3)的 DSC-TG 及 DTG 曲线

Fig. 7 DSC-TG and DTG curve of MgO-SF pastes (M2 and M3)

产物(主要是 M-S-H 凝胶)的物理吸附水脱附[8]和 $Mg(OH)_2$ 脱羟吸热；860 ℃处出现显著的放热峰，是由于 M-S-H 凝胶的重结晶放热形成镁橄榄石和顽辉石[8,17]。随龄期增长，DSC 曲线中第 1 个吸热谷逐渐增大，且 860 ℃左右的放热峰也逐渐增大，表明净浆中 $Mg(OH)_2$ 持续与 $[SiO_4]^{4-}$ 生成 M-S-H。与 DSC 曲线对应，TG 曲线在 100 ℃左右出现的质量损失对应 M-S-H 失去层间水，随龄期增长失重逐渐增大。400 ℃附近出现第 2 次质量损失，这归因于 $Mg(OH)_2$ 的脱羟基。430 ℃以上的质量损失，是 M-S-H 凝胶中的 Mg-OH 和 Si-OH 继续脱羟基引起。

MgO-SF 净浆反应产物主要为 $Mg(OH)_2$ 和 M-S-H 凝胶。由 DTG 图并根据公式(3)和式(4)，计算 MgO-SF 净浆中 $C_{Mg(OH)_2}$ 和 $C_{M\text{-}S\text{-}H}$[5]，见表 3 和表 4。

$$C_{Mg(OH)_2}=\Delta M_3\times\frac{M_{Mg(OH)_2}}{M_{H_2O}} \quad (3)$$

$$C_{M\text{-}S\text{-}H}=\Delta M_1+\Delta M_2-\Delta M_3 \quad (4)$$

表 3　M2 净浆中 $Mg(OH)_2$ 和 M-S-H 的质量分数

Table 3　Mass fraction of $Mg(OH)_2$ and M-S-H in M2 paste

w/%

Curing time/d	$Mg(OH)_2$	M-S-H
3	16.0	7.0
7	14.8	17.5
28	14.6	18.7

表 4　M3 净浆中 $Mg(OH)_2$ 和 M-S-H 的质量分数

Table 4　Mass fraction of $Mg(OH)_2$ and M-S-H in M3 paste

w/%

Curing time/d	$Mg(OH)_2$	M-S-H
3	11.6	6.2
7	13.3	13.5
28	10.2	15.3

结果表明：随龄期增加，M-S-H 生成量持续增长。M2 净浆在 3 d 时 $Mg(OH)_2$ 含量最高，3~7 d 减少 1.2%，7~28 d 减少 0.2%。M3 净浆的 $Mg(OH)_2$ 含量 3~7 d 增加 1.7%，7~28 d 减少 3.1%。可看出 3 d 时，M2 比 M3 净浆的 $Mg(OH)_2$ 变化快，3~7 d 和 7~28 d 则相反。且 M2 比 M3 净浆的 $Mg(OH)_2$ 和 M-S-H 含量高，与 pH、强度、膨胀数据和 XRD 分析结果一致。

3　结论

1) 随 MgO 煅烧温度增加，晶粒尺寸增加，活性降低。

2) M1 到 M3，MgO-SF 净浆和砂浆流动度增强，pH 值降低，强度先增加再减小。由于 M2 中 $Mg(OH)_2$ 生成速度得到控制，含量变化小体积膨胀小，M2 强度稳定增长，较好的解决了强度倒缩问题。

3)自由膨胀率变化速率与 $Mg(OH)_2$ 含量变化呈正相关。且 M2 的自由膨胀率小，自由膨胀率变化速率小，体积稳定性更好。

4) 7 d 内，M-S-H 生成速率快，其硅氧四面体聚合程度明显提高，7 d 后减缓。M2 比 M3 净浆的 $Mg(OH)_2$ 和 M-S-H 含量高，硅氧四面体聚合程度更高。

参考文献:

[1] 宋强, 胡亚茹, 王倩, 等. MgO 活性和养护温度对 MgO-SiO_2-H_2O 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. Chin Ceram Soc, 2019, 47(2): 220–227.

[2] ZHANG T T, VANDEPERRE L J, CHEESEMAN C R. Formation of magnesium silicate hydrate (MSH) cement pastes using sodium hexametaphosphate[J]. Cem Concr Res, 2014, 65: 8–14.

[3] LI Z H, ZHANG T S, HU J, et al. Characterization of reaction products and reaction process of MgO-SiO_2-H_2O system at room temperature[J]. Constr Build Mater, 2014, 61: 252–259.

[4] FEI J, ABIR A-T. Thermogravimetric study on the hydration of reactive magnesia and silica mixture at room temperature[J]. Thermochim Acta, 2013, 566: 162–168.

[5] 李兆恒. MgO-SiO_2-H_2O 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 Zhaoheng. Reaction Mechanisms and Application Study of MgO-SiO_2-H_2O Cementitious System (in Chinese, dissertation). Guangdong: South China University of Technology, 2015.

[6] SZCZERBA J, PROROK R, SNIEZEK E, et al. Influence of time and temperature on ageing and phases synthesis in the MgO-SiO_2-H_2O system[J]. Thermochim Acta, 2013, 567: 57–64.

[7] 张同生. 水泥熟料与辅助性胶凝材料的优化匹配[D]. 广州, 华南理工大学, 2012.
ZHANG Tongsheng. Optimized matching of cement clinker and supplementary cementitious materials (in Chinese, dissertation). Guangdong: South China University of Technology, 2012.

[8] BREW D R M, GLASSER F P. Synthesis and characterisation of magnesium silicate hydrate gels[J]. Cem Concr Res, 2005, 35(1): 85–98.

[9] TEMUUJIN J, OKADA K, MACKENZIE K J D. Formation of layered magnesium silicate during the aging of magnesium hydroxide-silica mixtures[J]. J Am Ceram Soc, 1998, 81(3): 754–756.

[10] 崔鑫, 邓敏. 氧化镁制备方法、活性与水化测定方法综述[J].硅酸盐通报, 2008, 27(1): 136–141.
CUI Xing, DENG Ming. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2008, 27(1): 136–141.

[11] ELLINA B, BARBARA L, DANIEL R, et al. Formation of magnesium silicate hydrates (M-S-H)[J]. Phys Chem Earth, 2017, 99: 142–157.

[12] NIED D, ENEMARK-RASMUSSEN K, L'HOPITAL E, et al. Properties of magnesium silicate hydrates (M-S-H)[J]. Cem Concr Res,

2016, 79: 323–332.

[13] 曹丰泽, 阎培渝. 水胶比对氧化镁膨胀剂的水化程度及膨胀性能的影响[J]. 硅酸盐学报. 2019, 47(2): 171–177.
CAO Fengze, YAN Peiyu. Chin Ceram Soc, 2019, 47(2): 171–177.

[14] 翟智皓, 段星泽, 马婷婷, 等. QXRD 方法定量分析水泥浆体中 MgO 的水化程度[J]. 硅酸盐通报, 2019(6): 1942–1945.
ZHAI Zhihao, DUAN Xingze, MA Tingting, et al. Bull Chin Ceram Soc(in Chinese), 2019(6): 1942–1945.

[15] JC-T603-2004 水泥胶砂干缩试验方法[S].

[16] 孙文华, 崔崇, 张宏华, 等. MgO 的晶粒大小和晶格畸变与水化活性的关系[J]. 武汉工业大学学报, 1991, 13(4): 21–24.
SUN Wenhua, CUI Chong, ZHANG Honghua, et al. J Wuhan Univ Technol (in Chinese), 1991, 13(4): 21–24.

[17] TEMUUJIN J, OKADA K, MACKENZIE K J D. Role of water in the Mechanochemical Reactions of MgO-SiO_2 Systems[J]. J Solid State Chem, 1998, 138: 169–177.