

文章编号:1007-9629(2021)03-0466-07

焙烧菱镁尾矿制 MgO 膨胀剂对水泥砂浆 膨胀性能的影响

刘子源^{1,2}, 毕万利^{1,2,3}, 关岩^{1,3}, 张婷婷^{2,4}, 陈啸洋²

(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 科大峰驰镁建材研究院, 辽宁 鞍山 114051; 3. 辽宁省镁资源与镁质材料工程技术研究中心, 辽宁 鞍山 114051; 4. 大连理工大学 建设工程学部, 辽宁 大连 116024)

摘要: 为降低大体积混凝土收缩现象, 将焙烧菱镁尾矿制成 MgO 膨胀剂, 掺入水泥砂浆中, 研究了焙烧温度对 MgO 膨胀剂矿物组成、晶粒尺寸及活性等的影响. 采用 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)、热分析仪等分析了内掺 MgO 膨胀剂水泥砂浆的矿物组成、水化进程、热稳定性和微观形貌. 结果表明: 在菱镁尾矿完全分解的条件(焙烧温度 1 000 °C 以上, 保温 1 h)下, 随着焙烧温度的提高, MgO 晶粒尺寸由 27.6 nm 增至 138.0 nm, 其活性从 70.8% 降至 3.3%, MgO 水化速率减慢, 晶粒尺寸与其反应活性之间存在线性关系; MgO 的活性影响水泥砂浆的膨胀限制率, 水泥砂浆试样 M-C-1000 的限制膨胀率最大, 在水养 20 °C 条件下, 其 7、28、120 d 的限制膨胀率分别为 0.022%、0.037% 和 0.062%. 此外, 体系中的水化产物 Mg(OH)₂ 在基体中呈片层状生长.

关键词: 菱镁尾矿; 焙烧温度; MgO 膨胀剂; 膨胀率; 水化进程

中图分类号: TU528.55

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.004

Impact of Expansive Agent from Calcinating Magnesite Tailings on Expansion Performance of Cement Mortar

LIU Ziyuan^{1,2}, BI Wanli^{1,2,3}, GUAN Yan^{1,3}, ZHANG Tingting^{2,4}, CHEN Xiaoyang²

(1. College of Materials and Metallurgy, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China; 2. Research Institution of Keda Fengchi Magnesium Building Materials, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China; 3. Liaoning Province Magnesium Resources and Magnesium Materials Engineering Technology Research Center, Anshan 114051, China; 4. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to reduce the shrinkage cracking of mass concrete, MgO expansive agent was made by calcinating magnesite tailings. The effects of different calcination temperatures on the mineral composition, particle size and activity of MgO expansive agent were studied. The changes of mineral composition, hydration process, thermal stability and micro morphology of cement mortar with MgO expansive agents were studied by means of X-ray diffraction, scanning electron microscope and thermal analyzer. The results show that under the condition of complete magnesite decomposition (calcination temperature over 1 000 °C, and constant temperature for 1 h), with the increase of calcination temperature the grain size of magnesium oxide increases from 27.6 nm to 138.0 nm, the activity decreases from 70.8% to 3.3%, and the hydration rate slows down. There is a linear relationship between the grain size of magnesium oxide

收稿日期:2020-02-26; 修订日期:2020-03-12

基金项目:辽宁科技大学服务地方经济发展项目(LKDFW201802)

第一作者:刘子源(1995—),男,辽宁营口人,辽宁科技大学硕士生. E-mail:aslkdlyz@163.com

通讯作者:毕万利(1963—),男,辽宁鞍山人,辽宁科技大学教授,硕士生导师,硕士. E-mail:asbwl@126.com

and the reactivity. MgO activity affects the expansion limit of cement mortar. The expansion limit of cement mortar mixed with MgO expansive agent made of calcination temperature 1 000 °C is the largest. Under the condition of 20 °C water curing, the expansion limit of 7, 28, 120 d can reach 0.022%, 0.037% and 0.062%, respectively. In addition, the hydrated product magnesium hydroxide in the system shows lamellar growth in the matrix.

Key words: magnesite tailing; calcination temperature; MgO expansive agent; expansion rate; hydration process

在外界环境的影响下,混凝土硬化时会体积收缩、开裂,从而影响混凝土的耐久性和强度^[1-2]. 众多学者发现在混凝土中掺入 CaO 或 MgO 等膨胀剂可改善混凝土的收缩变形,从而提高混凝土的使用寿命^[3-7]. 比较以上 2 种膨胀剂后发现, CaO 膨胀剂易吸水,在早期会产生明显的膨胀,起不到延时膨胀的效果^[8-9];而 MgO 膨胀剂既能够满足早期膨胀需求,又能通过延时膨胀特性补偿后期收缩,补偿温降收缩效果好且稳定^[10-13].

MgO 膨胀剂通常由菱镁矿、白云石及蛇纹石等富镁质矿物制备而成^[14]. 但由于高品质菱镁矿正在逐渐减少,且菱镁尾矿若直接排放,会严重污染环境,造成资源极大浪费^[15-18]. 因此,将菱镁尾矿焙烧制成 MgO 膨胀剂,既能节能环保,又能变废为宝. 刘加平等^[19]以菱镁矿为原料,选取了 800 °C 与 1 000 °C 2 种焙烧温度,制得 2 种活性 MgO 膨胀剂,对比了两者在不同水温养护条件下的膨胀效能,并利用水泥水化反应模型分析了 2

种 MgO 膨胀剂与水反应的活化能. Mo 等^[20]研究了焙烧条件对 MgO 膨胀剂微观结构、水化活性及膨胀性能的影响,认为影响 MgO 膨胀剂膨胀性能的内在因素是其微观结构,而焙烧条件是影响其膨胀性能的主要因素.

本文利用菱镁尾矿在不同焙烧温度下制备得到 MgO 膨胀剂,分析了焙烧温度对 MgO 膨胀剂矿物组成、晶粒尺寸及活性的影响. 并通过 X 射线衍射仪(XRD)、扫描电镜(SEM)、热分析仪等系统分析了其影响机理,以期推动菱镁尾矿制备 MgO 膨胀剂在实际工程中的应用.

1 试验

1.1 原材料

试验用菱镁尾矿来源于辽宁省海城市. 水泥为唐山冀东水泥股份有限公司产 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥. 标准砂来源于厦门艾思欧标准砂有限公司. 水泥与菱镁尾矿的化学组成如表 1 所示.

表 1 水泥与菱镁尾矿的化学组成
Table 1 Chemical compositions of cement and magnesite tailings

Material	CaO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	IL
Cement	63.75	4.86	21.32	2.31	3.08	0.67	2.23	0.19	1.49
Magnesite tailings	1.68	0.54	3.38		0.43		43.23		50.74

1.2 试样制备

先将菱镁尾矿在高温炉中焙烧,焙烧温度为 800~1 500 °C,保温 1 h;再将其置于空气中冷却;最后研磨成粒径小于 80 μm 的细颗粒,该细颗粒即为试验用 MgO 膨胀剂. 水泥砂浆配合比如表 2 所示. 试验首先按照表 2 配合比,向预混均匀的原料中加水搅拌 6 min,得到混合均匀的料浆;然后将料浆倒入尺寸为 40 mm×40 mm×160 mm,装有纵向限制器的三联模具中,置于振幅为 0.6 mm、频率为 46.7 Hz 的振动台上振动 20 s;接着放入 20 °C、相对湿度为 90% 的养护箱中养护 24 h,脱模后测量试样的初始长度;最后将试样放入(20±1)°C 的恒温水中养护至不同龄期. 本文将 MgO 膨胀剂掺量(质量分数)固

定为 10%,将掺入不同焙烧温度 MgO 膨胀剂的水泥砂浆试样编号为 M-C-X(X 表示焙烧温度),相应的水泥净浆试样编号为 P-C-X.

表 2 水泥砂浆配合比
Table 2 Mix proportion of cement mortar

Cement	Expansive agent	Sand	Water
607.5	67.5	1 350.0	270.0

1.3 试验方法

1.3.1 MgO 活性测定

(1) 柠檬酸法:根据 DL/T 5296—2013《水工混凝土掺用氧化镁技术规范》,先将 200 mL 柠檬酸溶液(质量分数 1.3%)置于恒温(30±1)°C 的磁力搅拌器中,再将 1.700 g MgO 加到柠檬酸溶液中,同

时向其中滴加 2~3 滴酚酞指示剂,开始计时,直至溶液颜色变红,计时结束,以此计时时间 $t(s)$ 来表征 MgO 的活性。

(2) 水合法:根据 YB/T 4019—2006《轻烧氧化镁化学活性测定方法》中的水合法,测定水化前后 MgO 的质量,来计算活性 MgO 含量。将 2.00 g MgO 加入装有 20 mL 蒸馏水的玻璃容器中,在 $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(70 \pm 5)\%$ 条件下静置 24 h 后,放入 100°C 干燥箱内水化至近干,然后升温至 150°C ,烘干至恒量,在干燥箱内冷却至室温,称重,并以质量分数 $W(\%)$ 表征活性 MgO 含量。活性 MgO 含量计算式如下:

$$W = \frac{W_2 - W_1}{0.45W_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: W_1 为 MgO 水化前的质量, g; W_2 为 MgO 水化后的质量, g。

1.3.2 限制膨胀率

采用 ISOBY-160 型比长仪测量水泥砂浆试样的长度,以试样 6 次长度的平均值作为计算值。依据 GB 23439—2009《混凝土膨胀剂》,计算试样在 3、7、14、28、60、90、120 d 时的限制膨胀率 $\epsilon(\%)$ 。限制膨胀率的计算式如下:

$$\epsilon = \frac{L_1 - L_2}{L_3} \times 100\% \quad (2)$$

式中: L_1 为试样在各龄期的长度, mm; L_2 为试样的初始长度, mm; L_3 为试样的基准长度, 本文取为 140 mm。

1.3.3 矿物组成

采用荷兰帕纳科 X-Pert powder 型 X 射线衍射仪,测试 MgO 膨胀剂和水泥净浆试样的矿物组成。测试条件为铜靶 $\text{Cu K}\alpha$,工作电流和电压分别为 40 mA 和 40 kV。测试范围为 $2\theta = 5^\circ \sim 90^\circ$,步长为 0.006° 、扫描速率为 5 s/步。

1.3.4 综合热分析

采用耐驰 STA 449F3 型综合热分析仪对掺 MgO 膨胀剂的水泥净浆水化产物进行热分析。热分析采用氮气气氛,升温速率为 $10^\circ\text{C}/\text{min}$,温度范围为室温至 1000°C 。

1.3.5 微观形貌

采用蔡司 SIGMA HD 型扫描电子显微镜观察不同养护龄期水泥砂浆试样断口处的微观形貌。断口表面预先镀金。

2 结果与讨论

2.1 MgO 膨胀剂矿物组成与化学组成

图 1 为采用不同焙烧温度制备的 MgO 膨胀剂

的 XRD 图谱。由图 1 可见:在焙烧温度为 800°C 、保温 1 h 条件下, MgO 膨胀剂中仍存在许多未分解的菱镁矿,且分解出的方镁石含量也较低;随着焙烧温度的升高,菱镁矿逐渐分解,方镁石含量逐渐增高,当焙烧温度达到 1000°C 且保温 1 h 时, MgO 膨胀剂中的菱镁矿分解趋于完全;当焙烧温度超过 1100°C 时, MgO 膨胀剂中的菱镁矿衍射峰彻底消失。

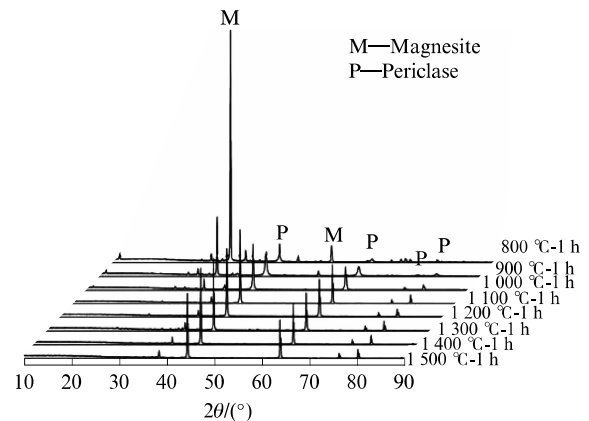


图 1 不同焙烧温度制备的 MgO 膨胀剂的 XRD 图谱
Fig. 1 XRD patterns of MgO expansive agent prepared by calcination of magnesite tailings at different temperatures

表 3 为采用不同焙烧温度制备的 MgO 膨胀剂的化学组成。由表 3 可见,当焙烧温度超过 1000°C 时, MgO 含量趋于稳定且烧失量较低,说明菱镁矿分解趋于完全。

表 3 采用不同焙烧温度制备的 MgO 膨胀剂的化学组成
Table 3 Chemical compositions of MgO expansive agent prepared at different calcination temperatures $w/\%$

Sample	SiO_2	CaO	MgO	Fe_2O_3	Al_2O_3	IL
800 °C-1 h	4.08	0.97	51.32	0.50	0.84	42.54
900 °C-1 h	5.70	1.24	71.66	0.85	0.87	19.71
1000 °C-1 h	6.37	1.46	89.41	0.85	0.87	1.04
1100 °C-1 h	6.61	1.56	89.60	0.92	0.92	0.39
1200 °C-1 h	6.75	1.56	89.65	0.81	0.87	0.36
1300 °C-1 h	6.63	1.56	89.88	0.88	0.95	0.10
1400 °C-1 h	6.10	1.56	90.94	0.61	0.68	0.11
1500 °C-1 h	6.06	1.56	90.98	0.65	0.66	0.09

2.2 不同焙烧温度对 MgO 晶粒尺寸与活性的影响

根据文献[21]中的谢乐公式计算焙烧温度为 $800 \sim 1500^\circ\text{C}$ 、保温 1 h 的 MgO(200)晶面的晶粒(简称 MgO 晶粒)尺寸,结果如图 2 所示。由图 2 可见,随着焙烧温度的升高, MgO 晶粒尺寸逐渐增大,当焙烧温度由 800°C 升至 1500°C 时, MgO 晶粒尺寸由 14.7 nm 增大至 187.3 nm。

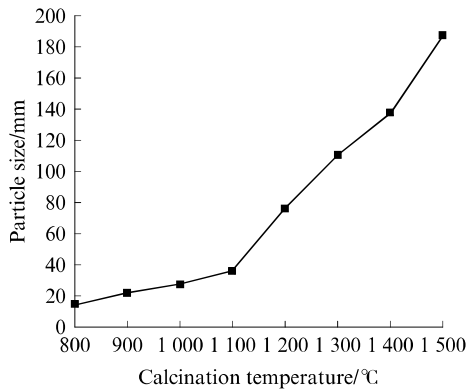


图 2 不同焙烧温度制备的 MgO 晶粒尺寸
Fig. 2 Particle size of MgO prepared at different calcination temperatures

需要说明的是,由于采用文献[21]中的谢乐公式计算尺寸大于 100 nm 的晶粒会产生误差,因此本文采用 SEM 观察 MgO 颗粒的微观形貌,以进行参考对比.焙烧温度 1 400 °C 制备的 MgO 膨胀剂的微观形貌见图 3.

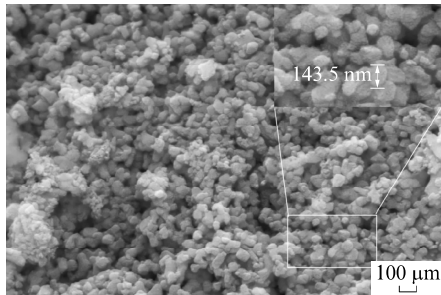


图 3 焙烧温度 1 400 °C 制备的 MgO 膨胀剂的微观形貌
Fig. 3 Microstructure of MgO expanding agent prepared by calcinating magnesite tailings at 1 400 °C

图 4 为采用柠檬酸法和水合法测得的 MgO 膨胀剂的活性曲线.由图 4 可见:采用柠檬酸法和水合法所测的 MgO 活性规律一致,随着焙烧温度的升高,MgO 膨胀剂活性先升高后降低;当焙烧温度为 1 000 °C 时,MgO 膨胀剂活性最高,水化所需时间最短,采用柠檬酸法测得的反应时间为 115 s,采用水合法测得的 MgO 膨胀剂中活性 MgO 含量达 70.8%;焙烧 1 500 °C 制备出的 MgO 膨胀剂中活性 MgO 含量仅为 3.3%.需要说明的是,因活性过低,与柠檬酸中和反应时间过长(反应时间大于 3 000 s),未能在图 4 中显示.

由 2.1 可知,采用焙烧温度为 800、900 °C 制备的 MgO 膨胀剂中,部分菱镁矿尚未分解,MgO 含量较低,从而影响 MgO 反应时间,致使其活性降低.因此,为避免因 MgO 含量不同而影响 MgO 的活性,在分析晶粒尺寸与其反应活性关系的过

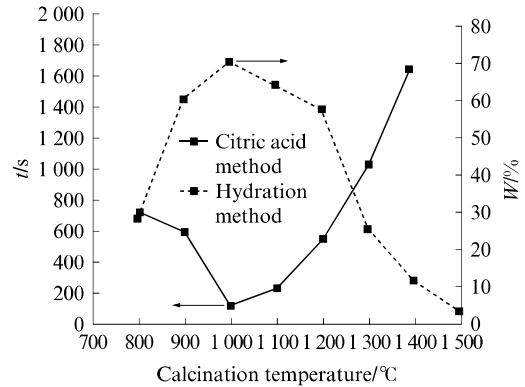


图 4 不同焙烧温度制备的氧化镁膨胀剂的活性
Fig. 4 Activity of MgO expansive agent prepared at different calcination temperatures

程中,本文选择焙烧温度为 1 000~1 400 °C,该温度范围内,菱镁矿完全分解,制备出的氧化镁膨胀剂中的 MgO 含量基本相同.图 5 为 MgO 晶粒尺寸与 MgO 反应活性的关系.由图 5 可见:在菱镁矿完全分解的条件下,随着 MgO 晶粒尺寸的增大,MgO 的反应活性降低,MgO 晶粒尺寸由 27.6 nm 增长到 138.0 nm,反应活性从 70.8% 降至 3.3%;MgO 晶粒尺寸与反应活性之间存在线性关系,拟合方程的相关系数 R^2 为 0.951. MgO 经高温煅烧后,晶体尺寸变大,活性降低,缺陷减少,提高了 MgO 的耐腐蚀性能.

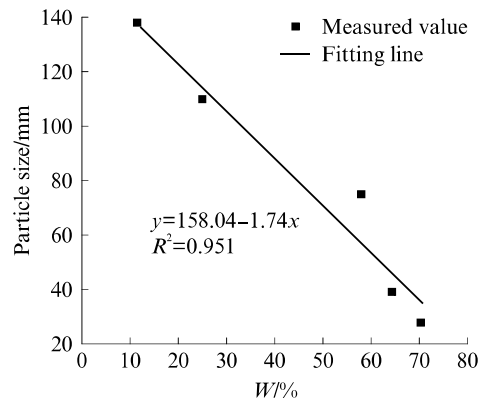


图 5 MgO 晶粒尺寸与其反应活性的关系
Fig. 5 Relationship between particle size and reactivity of MgO

2.3 掺有 MgO 膨胀剂的水泥砂浆限制膨胀率

图 6 为 20 °C 恒温水养条件下,MgO 膨胀剂对水泥砂浆试样限制膨胀率的影响.由图 6 可见:(1)相较空白水泥砂浆试样(C),内掺 10% MgO 膨胀剂的水泥砂浆试样均产生了有效膨胀,且后期膨胀量保持稳定.(2)分别掺入 8 组采用不同焙烧温度制备的 MgO 膨胀剂后,各水泥砂浆前 3 d 的限制膨

胀率均较为接近,其中 M-C-900 水泥砂浆试样在养护 3 d 时的限制膨胀率最大,可达 0.014%。M-C-1000 水泥砂浆试样养护 7 d 时的限制膨胀率达到 0.022%。(3)随着养护龄期的延长,采用不同焙烧温度制备的 MgO 膨胀剂在水泥砂浆中表现出的膨胀效果有所不同,900~1 300 °C 下制备的 MgO 膨胀剂在水泥砂浆的限制膨胀率与 MgO 膨胀剂的活性成负相关。(4)养护 28 d 时,M-C-1000 水泥砂浆试样的限制膨胀率最高,为 0.037%;养护 120 d 时,其限制膨胀率达到 0.062%,M-C-900 与 M-C-1100 水泥砂浆试样的限制膨胀率较为接近,为 0.057%和 0.055%;M-C-1500 水泥砂浆试样的限制膨胀率为 0.028%;M-C-1400 和 M-C-1500 水泥砂浆试样前期膨胀缓慢,在养护 60 d 后的曲线斜率开始变大。由此可见,低活性的 MgO 膨胀剂在后期开始表现出更佳的延时膨胀效果。这是因为水泥砂浆的膨胀率主要取决于 MgO 的水化率,活性高的 MgO 膨胀剂水化速率快于活性低的 MgO 膨胀剂,在早期(7 d 内)膨胀速率更快。若 MgO 活性过高,在水泥硬化前就会发生水化,产生无效膨胀。MgO 活性越低,膨胀时间越久,延时膨胀效果越显著。

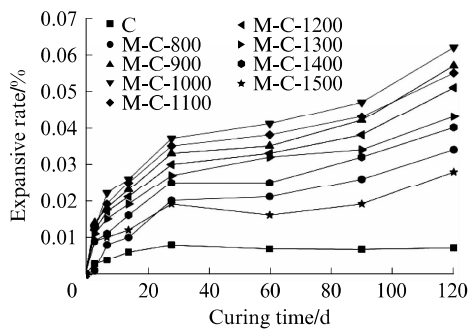


图 6 MgO 膨胀剂对水泥砂浆试样限制膨胀率的影响
Fig. 6 Effect of MgO expansive agent on restrained expansive rate of cement mortar samples

2.4 掺有 MgO 膨胀剂的水泥净浆矿物组成及 TG-DSC 分析

空白水泥净浆试样(P-C)和水泥净浆试样 P-C-800、P-C-1000、P-C-1400 在 20 °C 水养 7、28 d 时的矿物组成如图 7 所示。由图 7 可见,P-C-800 水泥净浆试样中有较多菱镁矿,而 MgO 的存在说明其并未完全水化。此外,随着原料焙烧温度的升高,MgO 所对应的衍射峰峰强逐渐增强,说明较高焙烧温度所制备的 MgO 膨胀剂水化进程较慢;且随着试样养护龄期的延长,MgO 峰强均随之减弱,说明 MgO 继续水化,即 Mg(OH)₂ 的形成并未终止。

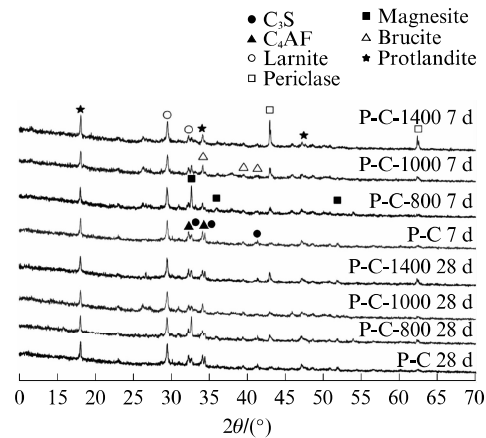


图 7 水泥净浆的 XRD 图谱
Fig. 7 XRD patterns of cement paste samples

图 8 为养护 7 d 时的水泥净浆试样 P-C-1000 和 P-C-1400 的 TG-DSC 曲线。由图 8 可见:在 DSC 曲线中 340~420 °C 和 420~470 °C 出现了 2 个明显的吸热峰,分别对应为 Mg(OH)₂ 和 Ca(OH)₂ 的分解;P-C-1400 试样中 Mg(OH)₂ 吸热峰较小,说明早期水化产物中 Mg(OH)₂ 较少,与限制膨胀率的测试结果相吻合;空白水泥净浆试样 P-C 中未观察到 Mg(OH)₂ 吸热峰。

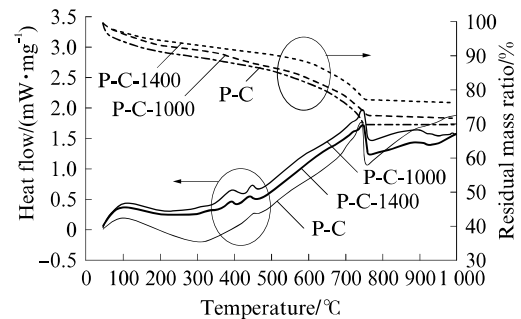


图 8 掺 MgO 膨胀剂水泥净浆水化 7 d 时的 TG-DSC 曲线
Fig. 8 TG-DSC curves of cement paste hydration with MgO expansive agent at 7 d

根据 TG 曲线可估算水泥浆体中 Mg(OH)₂ 的含量,其计算式如下:

$$w(\text{Mg}(\text{OH})_2) = 58 \times \frac{\Delta w}{18} \quad (3)$$

式中: $w(\text{Mg}(\text{OH})_2)$ 为水泥浆体中形成的 Mg(OH)₂ 含量,%; Δw 为 TG 曲线中的质量损失,%;58 和 18 分别为 Mg(OH)₂ 和 H₂O 的相对分子质量。

试样 P-C-1000 中 Mg(OH)₂ 含量达 7.54%(试样中内掺 10% MgO 膨胀剂且该膨胀剂中方镁石含量为 89.41%,MgO 占试样总量的 8.94%),未水化的 MgO 含量达 3.74%;试样 P-C-1400 中 Mg(OH)₂ 含

量达 5.08% (试样中内掺 10% 氧化镁膨胀剂且该膨胀剂中方镁石含量为 90.94%, MgO 占试样总量的 9.09%), 未水化的 MgO 含量达 5.60%。

采用 TOPAS6.0 软件进行 Rietveld 定量分析, 确定水泥净浆试样 P-C-1000 和 P-C-1400 中未水化的 MgO 含量, 如图 9 所示。由图 9 可见: 养护 7 d 时的 P-C-1000 试样中未水化的 MgO 含量达 4.17%, 随着养护龄期的延长, MgO 的含量降低; 活性较低的 MgO 膨胀剂水化进程明显比活性较高的 MgO 膨胀剂慢, 因此, 高活性 MgO 膨胀剂提供早期膨胀, 低活性 MgO 膨胀剂提供后期膨胀; 相较水泥净浆试样 P-C-1000, 试样 P-C-1400 中未水化的 MgO 含量明显较高, 且养护 120 d 时的试样 P-C-1400 中未水化的 MgO 含量达 3.04%, 说明在后期试样 P-C-1400 的膨胀停止时间将长于试样 P-C-1000。此 Rietveld 定量分析结果与热分析定量结果之相符。

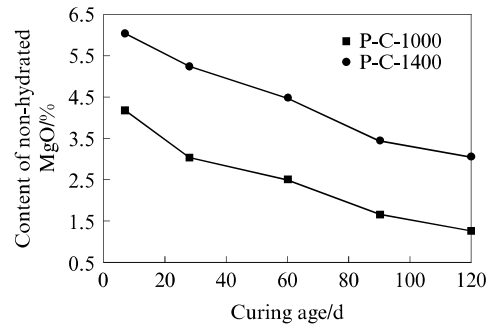


图 9 水泥净浆试样中未水化的 MgO 含量
Fig. 9 Content of non-hydrated MgO in cement paste

2.5 MgO 膨胀剂对水泥砂浆微观形貌的影响

图 10 为水泥砂浆试样 M-C-1000 和 M-C-1400 在水中养护 7、28 d 后的微观形貌。由图 10 可见: 水养 7 d 时, 试样 M-C-1400 中的 $Mg(OH)_2$ 呈短片状或纤维状且发育不完全, 试样 M-C-1000 中的 $Mg(OH)_2$ 呈片层状; 水养 28 d 时, 试样 M-C-1400

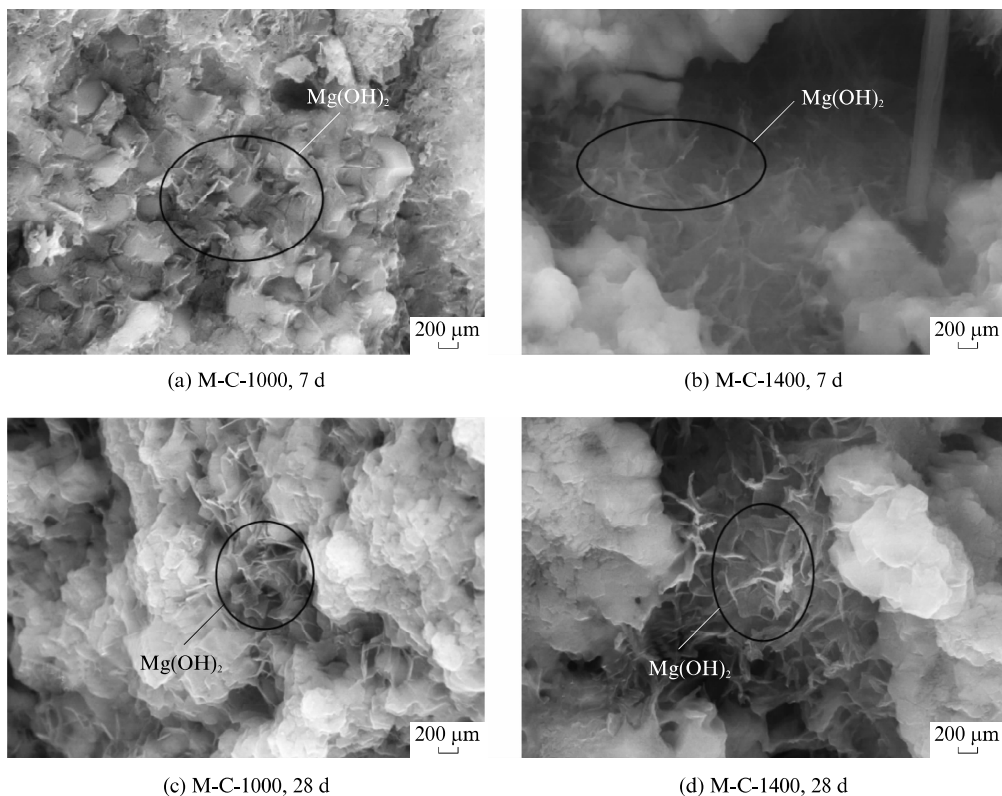


图 10 M-C-1000 和 M-C-1400 水泥砂浆试样 7、28 d 时的微观形貌
Fig. 10 Microstructure of M-C-1000 and M-C-1400 at 7, 28 d

中的 $Mg(OH)_2$ 继续发育长大, 但仍不如试样 M-C-1000 中的 $Mg(OH)_2$ 结构致密。

3 结论

(1) 焙烧温度影响 MgO 膨胀剂的活性。在菱镁

矿完全分解的条件下, 随着焙烧温度的升高, MgO 晶粒粒径由 27.6 nm 增至 138.0 nm, 活性从 70.8% 降至 3.3%, 水化速率减慢, MgO 的晶粒尺寸与反应活性间存在线性关系。

(2) MgO 膨胀剂的活性影响水泥砂浆的膨胀

率.高活性 MgO 膨胀剂在水泥砂浆中的水化速率比活性较低的 MgO 膨胀剂快,在 28 d 产生更多的膨胀.水泥砂浆试样 M-C-1000 早期限制膨胀率最高,可达 0.037%.

(3) 相较水泥砂浆试样 M-C-1400,试样 M-C-1000 基体中的水化产物 $Mg(OH)_2$ 结构更为致密,且呈片层状生成.

参考文献:

- [1] 施惠生,郭晓璐.混凝土膨胀剂研究及其应用[J].粉煤灰,2006(1):12-15.
SHI Huisheng, GUO Xiaolu. Study of concrete expansion admixture and its application[J]. Coal Ash, 2006(1):12-15. (in Chinese)
- [2] 王世伟.钢管混凝土结构的特性和研究现状[J].安徽建筑,2003,3(6):66.
WANG Shiwei. Characteristics and research status of CFST structure[J]. Anhui Architee, 2003, 3(6):66. (in Chinese)
- [3] 游宝坤,赵顺增.我国混凝土膨胀剂发展的回顾和展望[J].膨胀剂与膨胀混凝土,2012(2):1-5.
YOU Baokun, ZHAO Shunzeng. Review and prospect of the development of concrete expansive agent in China[J]. Expansive Agent and Expansive Concrete, 2012(2):1-5. (in Chinese)
- [4] 王新娟.轻烧氧化镁和钙矾石的膨胀性能对比研究[D].南京:南京工业大学,2006.
WANG Xinjuan. Comparative study on expansion properties of light burned magnesia and Ettringite[D]. Nanjing: Nanjing Tech University, 2006. (in Chinese)
- [5] MO L W, DENG M, TANG M S. et al. MgO expansive cement and concrete in China: Past, present and future[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 57:1-12.
- [6] 胡概.水工混凝土温控防裂措施研究的理论与实践[D].合肥:合肥工业大学,2007.
HU Kai. Theory and practice of research on temperature control and crack prevention measures of hydraulic concrete[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2007. (in Chinese)
- [7] YAN P Y, QIN X. The effect of expansive agent and possibility of delayed ettringite formation in shrinkage-compensating massive concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31:335-337.
- [8] YAN P Y, ZHENG F, PENG J, et al. Relationship between delayed ettringite formation and delayed expansion in massive shrinkage-compensating concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26:687-693.
- [9] YAN P Y, QIN X, YANG W Y, et al. The semiquantitative determination and morphology of ettringite in pastes containing expansion agent cured in elevated temperature[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(9):1285-1290.
- [10] CHOI S W, JANG B S, LEE K M, et al. Durability characteristics of fly ash concrete containing lightly burnt MgO[J]. Construction and Building Materials, 2014, 58:77-84.
- [11] GAO P W, XU S Y, CHEN X, et al. Research on autogenous volume deformation of concrete with MgO[J]. Construction and Building Materials, 2013, 40:998-1001.
- [12] MO L W, DENG M, TANG M S. Effects of calcination condition on expansion property of MgO-type expansive agent used in cement-based materials[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40:437-446.
- [13] GAO P W, LU X L, GENG F, et al. Production of MgO-type expansive agent in dam concrete by use of industrial by-products[J]. Building and Environment, 2008, 43:453-457.
- [14] 徐玲玲,邓敏,王侠,等.新型镁质膨胀材料的制备[J].材料科学与工程学报,2004,5(2):249-253.
XU Lingling, DENG Min, WANG Xia, et al. Studies on preparation of a new expansive agent based on MgO[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2004, 5(2):249-253. (in Chinese)
- [15] 杨国华,郭建文,王建华.尾矿综合利用现状调查及其意义[J].矿业工程,2010,8(1):55-57.
YANG Guohua, GUO Jianwen, WANG Jianhua. Investigation and significance of comprehensive utilization of tailings[J]. Mining Engineering, 2010, 8(1):55-57. (in Chinese)
- [16] 何勇,姜明.我国菱镁矿资源的开采利用现状及存在的问题[J].耐火与石灰,2012,37(3):25-28.
HE Yong, JIANG Ming. Present situation of minging and utilization and existing problems of magnesite resource of our country[J]. Refractories and Lime, 2012, 37(3):25-28. (in Chinese)
- [17] LI C M. Basic mechanics and long term durability of concrete mixed with MgO[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2000, 20(5):30-35.
- [18] MO L W, DENG M, TANG M S. Potential approach to evaluating soundness of concrete containing MgO-based expansive agent[J]. Aci Materials Journal, 2010, 107(2):99-105.
- [19] 刘加平,王育江,田倩,等.轻烧氧化镁膨胀剂膨胀性能的温度敏感性及其机理分析[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(2):359-364.
LIU Jiaping, WANG Yujiang, TIAN Qian, et al. Temperature sensitivity of light calcined magnesia expansion agent and its mechanism analysis[J]. Journal of Southeast University(Natural Science), 2011, 41(2):359-364. (in Chineses)
- [20] MO L W, DENG M, TANG M S. Effects of calcination condition on expansion property of MgO-type expansive agent used in cement-based materials[J]. Cement and Concrete Research, 2010, 40(3):437-446.
- [21] BURTON A W, ONG K, REA T, et al. On the estimation of average crystallite size of zeolites from the Scherrer equation: A critical evaluation of its application to zeolites with one-dimensional pore systems[J]. Microporous Mesoporous Mater. 2009, 117(1):75-90.