DOI:10.20038/j.cnki.mra.2022.000315

# 制备工艺对镁质膨胀剂水化活性 和微观特性影响研究

# 杨永民<sup>1,2,3</sup>,曹宇虹<sup>2,3</sup>,纪宪坤<sup>4</sup>,徐可<sup>4</sup>,王海龙<sup>4</sup>

(1. 仲恺农业工程学院城乡建设学院,广东广州 510225; 2. 广东省岭南乡镇绿色建筑工业化工程技术研究中心, 广东广州,510225; 3. 仲恺农业工程学院建筑节能可持续发展研究所,广东广州 510225; 4. 武汉三源特种建材 有限责任公司,湖北 武汉 430000)

摘要:针对混凝土开裂问题,添加镁质膨胀剂可有效减少甚至消除混凝土因干缩和温度差而产生的收缩, 使混凝土具备优异的抗裂性能。为了确定合理的镁质膨胀剂煅烧工艺,研究了煅烧温度、保温时间、升温 速率及冷却方式对镁质膨胀剂晶粒尺寸、微观结构及活化性能的影响。结果表明:煅烧温度对镁质膨胀剂 的水化活性有决定性影响,随着煅烧温度提高,镁质膨胀剂晶粒尺寸不断变大,比表面积逐渐减小,晶格畸 变逐渐减小,水化放热量及活性逐渐降低;相同条件下,煅烧保温时间越长,镁质膨胀剂晶体晶粒尺寸越 大,比表面积越小,晶体结晶度越高,镁质膨胀剂水化活性越低;采用快速冷却方式,可以获得高活性镁质 膨胀剂。

**关键词:**氧化镁;煅烧工艺;膨胀剂;反应活性;微观特性 中图分类号:TU528.55 **文献标志码:**A

**文章编号:**1673-9981(2022)03-0442-07

**引文格式:**杨永民,曹宇虹,纪宪坤,等.制备工艺对镁质膨胀剂水化活性和微观特性影响研究[J].材料研究与应用,2022,16 (3):442-448.

YANG Yongmin, CAO Yuhong, JI Xiankun, et al. Influence of Preparation Process on Hydration Activity and Microscopic Properties of Magnesia Expansion Agent[J]. Materials Research and Application, 2022, 16(3):442-448.

目前,混凝土材料成为现代建筑工程领域应用 最为广泛的材料,其在现代社会的工业化、城市化过 程中起到了重要的作用<sup>[1-3]</sup>。水泥是混凝土材料中 的主要凝胶材料,在其水化硬化过程中会出现各类 收缩现象,在混凝土结构中受到钢筋作用、基础作用 或其它结构的限制,会产生收缩开裂<sup>[4-8]</sup>。由于混凝 土本身有很大的浇筑量,并且导热性较差,水泥水化 过程中会产生大量的热量使内部产生较大的温升, 但表面温度趋于环境温度,从而产生一个由内之外 的温度梯度,从而引起温度应力.当温度应力的强 度超过混凝土的抗拉强度后,则在混凝土的内部会 产生温差收缩的开裂,从而降低混凝土的抗渗性,进 而影响混凝土的耐久性<sup>[9-12]</sup>。

针对混凝土的收缩开裂和温度应力开裂,国内

外学者提出了补偿收缩混凝土的思路,即采用混凝 土膨胀剂,在混凝土内部产生均匀的体积膨胀,产生 一定的化学膨胀应力,这种作用力能够减少甚至消 除混凝土因干缩和温度差而产生的收缩,使得混凝 土具备了优异的抗裂性能。目前我国工程采用的膨 胀剂主要为氧化钙类、硫铝酸钙类、氧化钙-硫铝酸 钙复合类以及镁质膨胀剂<sup>[13-14]</sup>。镁质膨胀剂最早应 用于水利工程,用于水工大体积混凝土的温度应力 补偿,经过回转窑或沸腾炉工艺替代原立窑工艺得 以改进后在工业民用建筑、公路交通及地下工程等 多个领域中得以推广应用<sup>[15-18]</sup>。镁质膨胀剂的原材 料为菱镁石(Magnesite),以碳酸镁(MgCO<sub>3</sub>)为主要 成分.我国菱镁矿石总储量为34.7×10<sup>8</sup> t,占世界 总储量的三分之一左右<sup>[19]</sup>。镁质膨胀剂经过水化

收稿日期:2022-02-21

作者简介:杨永民(1981-),男,内蒙古赤峰市人,博士,教授,主要研究方向为高性能土木工程材料、无机纤维筋增强结构、材料修复水生态与水环境,E-mail:yangyongmin@zhku.edu.cn。

反应后可生成Mg(OH)₂,在完全反应后其固相体积 增大1.2倍,可以缓慢连续的产生膨胀,是一种温和 并可调控的膨胀剂,可有效的应用于补偿混凝土的 收缩变形<sup>[20]</sup>。镁质膨胀剂的品质及反应活性,受生 产工艺过程中的各类因素影响,如原材料的入窑细 度和粒径、窑内温度参数的变化等。相关研究表 明<sup>[23-26]</sup>:在600—800℃的低温下煅烧得到的氧化镁 膨胀剂早期水化速度较快,在混凝土硬化早期即可 达到很高的膨胀值,这有利于补偿小型构件的收缩 变形;在高温下煅烧得到的氧化镁膨胀剂(煅烧温度 通常在1000—1200℃)由于晶体结构致密,水化速 度较慢,其延迟膨胀效果与大体积混凝土的湿缩相 匹配,可以用来补偿大体积混凝土的收缩变形情况。

本文为了确定合理的镁质膨胀剂煅烧工艺,重 点研究菱镁石的煅烧温度、保温时间、升温速率、冷 却方式对镁质膨胀剂水化活性的影响,以及对镁质 膨胀剂晶粒尺寸和晶体结构等的影响,以确定合理 的镁质膨胀剂煅烧工艺。

## 1 原材料及试验方法

#### 1.1 原材料

制备镁质膨胀剂的主要材料为菱镁石(取自辽 宁海城)。菱镁石经过粉磨后,粉体的密度约为 3.00×10<sup>3</sup> kg·m<sup>-3</sup>,菱镁石具有较好的易磨性,经过 短时间的研磨,即可获得较大的比表面积,可以通过 提高菱镁石的入窑粒径或比表面积,提高菱镁石在 回转窑中的生产制备效率(表1),通过试验选择中 等研磨时间 20 min后的菱镁石作为试验原材料。

表 1 粉磨时间对菱镁石粉体特性的影响 Table 1 Effect of grinding time on magnesite powder characteristics

01	landeteristics		
研磨时间	密度	比表面积	$D_{50}$
/min	$/(\times 10^{-3}  \text{kg·m}^{-3})$	$/(m^{-2} \cdot kg^{-1})$	$/\mu m$
10	3.01	324.1	14.14
20	3.03	491.4	11.89
30	3.03	521.9	10.29
40	2.99	653.1	6.89

#### 1.2 试验方法

采用马弗炉作为煅烧设备,将研磨好的菱镁石 粉体放入马弗炉中,通过改变煅烧温度、煅烧保温时 间以及冷却制度,制备不同性能的镁质膨胀剂。

采用柠檬酸变色法(YBT 4019-2006)测定镁质 膨胀剂的化学活性,即在100 mL柠檬酸溶液中加入 酚酞指示剂,再将2.03g膨胀剂加入柠檬酸中,立即记下体系变红所需要的时间,时间越长活性越低,反之则越高。采用Mastersizer2000型激光粒度分析仪,对镁质膨胀剂的粒度分布进行分析(酒精为循环介质,湿测)。采用TAM Air水泥水化热测量仪,对镁质膨胀剂的水化放热量的进行测量。

采用 EVO18 型扫描电子显微镜(SEM,德国 Carl Zeiss公司生产)观察粉体和水化产物的微观形 貌,并用 EDS(OXFORD,X-MAX)测定试样微区的 元素组成。采用 X'pert PRO 型 X 射线衍射仪(Cu 靶,管压 40 kV,管流 40 mA,测试步长为 0.033°, $\lambda$ 为 0.15418 nm,扫描范围 5° $\leq 2\theta \leq 90$ °,荷兰 Panlytical公司生产),测定粉体材料的化学组成。

### 2 结果及讨论

#### 2.1 煅烧温度对水化活性的影响

为了研究煅烧温度对镁质膨胀剂的水化活性的 影响,选择研磨时间为20min的菱镁石,煅烧保温 时间为1h,煅烧后缓慢降至室温,进行菱镁石在不 同煅烧温度下的活性试验,结果如图1所示。从图1 可见,随着煅烧温度的升高镁质膨胀剂的水化活性 逐渐降低,700℃下煅烧制备的镁质膨胀剂活性值 为20s,1000℃下煅烧制备的镁质膨胀剂活性值 425s,1200℃下煅烧制备的镁质膨胀剂活性值 425s,1200℃下煅烧制备的镁质膨胀剂活性值大于 1200s。随着煅烧温度的提高,镁质膨胀剂活性逐 渐降低,作为补偿收缩用的膨胀剂,适宜的煅烧温度 在700—1000℃,根据不同的工程需求选择合适的 煅烧温度。



igure 1 Activity of magnesia expansion agent at different calcination temperatures

#### 2.2 煅烧保温时间对水化活性的影响

菱镁石经粉磨 20 min 后,在煅烧温度 700— 950℃下煅烧0.5、1、2、3h,然后缓慢降至室温,最后 进行菱镁石在不同煅烧保温时间的活性试验,试验 结果如图2所示。从图2可见:当煅烧保温时间不 同时,镁质膨胀剂的活性随着煅烧温度的提高先增 加后降低,当温度达750℃左右时活性达到最高;在 较低的煅烧温度下,要适当延长一定的煅烧保温时 间,可以获取到较高活性的镁质膨胀剂。为了提高 设备的周转,提高生产效率,选择750—800℃的煅 烧温度,煅烧保温时间控制在1h左右,根据实际工 程需要,即可获得适宜活性的镁质膨胀剂。



Figure 2 Activity of magnesia expansion agent under different holding time

#### 2.3 升温速率和冷却方式对水化活性的影响

通过提高升温速率、快速冷却的方式来减小镁 质膨胀剂的晶体尺寸、增大晶格畸变,这有利于进一 步提升镁质膨胀剂的活性。图3为菱镁石在不同升 温速率下煅烧制备的镁质膨胀剂的活性值。从图3 可见,升温速率对镁质膨胀剂活性存在较大的影响。 总体而言,升温速率越快,镁质膨胀剂活性越高,在 低温(750℃)下煅烧0.5h时,较慢的升温速率 (5 ℃·min<sup>-1</sup>)对提高镁质膨胀剂活性有利,在高温 (850 ℃)下煅烧时间稍长(2和3h)时,较慢的升温 速率(5℃·min<sup>-1</sup>)对提高镁质膨胀剂的活性有利。 其原因是:在较低煅烧温度且升温速率快时,菱镁石 不能够得到充分分解,造成镁质膨胀剂反应活性较 低;在较高煅烧温度且煅烧保持时间长的情况下,如 果升温速率过快,会导致镁质膨胀剂的结晶程度较 大,不利于活性的发挥。在实际生产过程中,应选择 适当的升温速率,速度过快或过慢都不利于生产高 活性的镁质膨胀剂。







图 4 为不同冷却制度下制备的镁质膨胀剂的活 性值。从图 4 可见,在 750、800 和 900 ℃煅烧温度



图 4 不同冷却方式下镁质膨胀剂的活性 Figure 4 Activity of magnesium expansion agent under different cooling modes

下,快冷时镁质膨胀剂的活性均较高,表明快速冷却可以显著提高镁质膨胀剂的水化活性。在实际生产

-700°C

-800℃ -900℃

1000

1

4

3

2

0

0.1

体积增量/%

过程中,可以考虑通过不同的冷却工艺生产不同活 性的镁质膨胀剂。

#### 2.4 镁质膨胀剂颗粒的微观形貌及特性

图 5 为粒径为 11.89 μm 的菱镁石在不同温度 下煅烧 2 h 后的粒度分布图。从图 5 可见:随着煅烧 温度的提高,镁质膨胀剂的平均粒径变大;当煅烧温 度超过 1000 ℃时,粉体粒径基本保持稳定,这是因 粉体基本处于结晶状态。

图 6 为煅烧后镁质膨胀剂的颗粒形貌.随着煅烧温度的升高,镁质膨胀剂粒径不断增大,比表面积不断降低。煅烧温度从 700 ℃升高至 1200 ℃时,镁质膨胀剂比表面积从 53.36 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>降低至 6.64 m<sup>2</sup>·g<sup>-1</sup>,这是因为随着煅烧温度的升高,镁质膨胀剂晶体尺寸逐渐长大,当遇水发生水化反应时,由于接触的比表面积小,不能很快地发生反应,从宏观上则表现为其活性相对较低。





Figure 5 Particle size distribution of magnesia expansion agent after calcination of magnesite powder at different temperatures



Figure 6 Micromorphology of magnesia expansion agent at different calcination temperatures

图 7 为不同煅烧温度下制备的镁质膨胀剂的 XRD图谱。从图 7 可见:氧化镁的衍射峰强度随着 煅烧温度的升高逐渐增强,即镁质膨胀剂中的主要 成分氧化镁结晶程度不断增强,这与镁质膨胀剂的







颗粒形貌的结果一致,即随着煅烧温度的升高,镁质 膨胀剂的结晶程度不断提高,导致其活性降低,参与 水化反应的速率降低。

不同煅烧温度制备的镁质膨胀剂的晶粒尺寸和 晶格畸变列于表 2 和表 3。由表 2 和表 3 可知,随着 煅烧温度的升高,镁质膨胀剂晶体尺寸逐渐增大,晶 格 畸变逐渐减小;当煅烧温度从 700 ℃升高至 1200 ℃时,晶体尺寸从 26.8 nm 增大至 110.5 nm, 晶格畸变从 0.370%降低至 0.104%.表明,随着煅 烧温度的升高,镁质膨胀剂的结晶度不断提高,这与 上述结果是一致的。

图 8 为粒径 11.89 μm 菱镁石在不同温度下煅烧 2 h 后的水化热。从图 8 可见:在开始的 0—2 h 时,镁质膨胀剂吸水放热,比表面积越大放热速率越 快,总放热量越大;在 2—50 h 期间,镁质膨胀剂反 应生成氢氧化镁,随着镁质膨胀剂活性提高,反应放 热速率越快;在 50—300 h 时,镁质膨胀剂溶解速率 降低,反应放热速率变小;当煅烧温度为 1000 ℃时, 镁质膨胀剂水化活性更低,当煅烧温度达到 1200 ℃ 时镁质膨胀剂在 50 h之后才开始缓慢反应。从图 8 可见,随着煅烧温度的升高,反应总体累计放热逐渐 降低。

	表2 不同煅烧温度镁质膨胀剂的晶粒尺寸
Table 2	Grain size of magnesia expansive agent at different calcination temperatures

Temperature/°C –		A				
	(111)	(200)	(220)	(311)	(222)	Average grain size/ nm
700	23.5	19.6	19.6	19.4	51.9	26.8
800	42.3	36.0	39.2	23.0	51.8	38.5
900	53.0	54.0	39.2	50.4	52.5	49.8
1000	71.0	72.3	78.7	84.7	87.0	78.7
1200	106.0	72.4	117.5	126.5	130.0	110.5

表3 不同煅烧温度下镁质膨胀剂的晶格畸变

Table 3	Lattice distortion c	f magnesia	expansion	agent at	different	calcination	temperatures

Lattice distortion/%					
(111)	(200)	(220)	(311)	(222) A	verage lattice distortion/ 70
0.515	0.526	0.370	0.316	0.125	0.370
0.306	0.305	0.198	0.271	0.125	0.241
0.254	0.215	0.198	0.134	0.109	0.182
0.200	0.170	0.110	0.087	0.081	0.130
0.146	0.169	0.079	0.064	0.060	0.104
	<ul> <li>(111)</li> <li>0. 515</li> <li>0. 306</li> <li>0. 254</li> <li>0. 200</li> <li>0. 146</li> </ul>	Lattice (111) (200) 0. 515 0. 526 0. 306 0. 305 0. 254 0. 215 0. 200 0. 170 0. 146 0. 169	Lattice distortion/%           (111)         (200)         (220)           0. 515         0. 526         0. 370           0. 306         0. 305         0. 198           0. 254         0. 215         0. 198           0. 200         0. 170         0. 110           0. 146         0. 169         0. 079	Lattice distortion/%           (111)         (200)         (220)         (311)           0.515         0.526         0.370         0.316           0.306         0.305         0.198         0.271           0.254         0.215         0.198         0.134           0.200         0.170         0.110         0.087           0.146         0.169         0.079         0.064	Lattice distortion/%         A           (111)         (200)         (220)         (311)         (222)           0. 515         0. 526         0. 370         0. 316         0. 125           0. 306         0. 305         0. 198         0. 271         0. 125           0. 254         0. 215         0. 198         0. 134         0. 109           0. 200         0. 170         0. 110         0. 087         0. 081           0. 146         0. 169         0. 079         0. 064         0. 060



图8 煅烧不同温度镁质膨胀剂水化放热

Figure 8 Hydration heat release of magnesia expansive agent calcined at different calcination temperatures

## 3 结论

(1)随着煅烧温度的提高,镁质膨胀剂活性逐渐降低,作为补偿收缩用的膨胀剂,适宜的煅烧温度在700—1000℃,根据不同的工程需求选择合适的煅烧温度。

(2)在各个煅烧保温时间下,镁质膨胀剂的活 性随着煅烧温度的提高先增加后降低,当煅烧温度 750℃左右时活性达到最高。在较低的煅烧温度 下,要适当延长煅烧保温时间,可获得较高活性的镁 质膨胀剂。根据实际工程需要,即可获得适宜活性 的镁质膨胀剂。

(3)升温速率过低或升温速率过快,对镁质膨胀 剂活性均存在影响,在实际生产过程中,应选择适当 的升温速率,速度过快或过慢都不利于生产高活性 的镁质膨胀剂。快速冷却可以显著提高镁质膨胀剂 的水化活性。在实际生产过程中,可以考虑通过不 同的冷却方式生产不同活性的镁质膨胀剂。

(4)随着煅烧温度的提高,镁质膨胀剂晶粒尺寸 不断变大,比表面积逐渐减小,晶格畸变逐渐减小, 水化放热量逐渐降低,水化活性逐渐降低。

#### 参考文献:

- [1] 梁小英,丰瑛,张小利,等.混凝土结构施工技术在土木 工程建筑中的运用[J].建筑科学,2021,37(9):183.
- [2] 邵旭东,樊伟,黄政宇.超高性能混凝土在结构中的应 用[J].土木工程学报,2021,54(1):1-13.
- [3] 杨文刚,张侃.新型混凝土材料在土木工程领域中的应 用[J].城市建设理论研究(电子版),2011,26:1-3.
- [4] 张少辉、王艳、牛荻涛.废旧纤维在水泥基材料中的应

用研究进展[J].材料导报,2020,34(23):23042-23050.

- [5] 石马刚,柯国军,邹品玉,等.碱-矿渣水泥的水化,力学及干缩性能研究进展[J].硅酸盐通报,2022,41(1): 162-173.
- [6] 黄维蓉,杨玉柱,崔通,等.含粗骨料超高性能混凝土收 缩变形性能的研究[J].混凝土,2021(8):99-103.
- [7] 钟卓,黄乐鹏,张恒.混凝土内部湿度场与自约束应力 场的研究[J].硅酸盐通报,2021,40(8):2609-2621.
- [8] 王海啸,王峻,唐风华,等.湿接缝混凝土早期收缩开裂 行为与裂缝控制技术研究[J].混凝土,2021(4):9-12.
- [9] 傅奕帆,王林峰,程平,等.箱式隧道现浇大体积混凝土 温度应力场及裂缝控制研究[J].现代隧道技术,2021, 58(6):173-181.
- [10] 赵立晓,王鹏刚,王兰芹,等.混凝土内部温湿度响应 参数分析:水分扩散系数与导热系数[J].材料导报, 2021,35(12):12075-12080.
- [11] 李潘武,梁肖倩,门凡,等.内外温控条件对超厚防辐射混凝土墙体的温度应力影响研究[J].混凝土,2021 (12):147-152.
- [12] 叶雯,杨永民.大体积混凝土施工温度监测及其温度 应力分析[J].混凝土,2008(9):104-107.
- [13] 范兴亚,王德民,凌骏,等.补偿收缩混凝土在大型污水处理厂中的应用[J].施工技术,2020,49(9):58-60.
- [14] 汪泉庆,杨俊平,唐剑.汉江特大桥拱肋自密实补偿收 缩混凝土顶升技术[J].施工技术,2020,49(15):28-30
- [15] 刘欣伟,冯雅丽,李浩然,等.菱镁矿制备轻烧氧化镁 及其水化动力学研究[J].中南大学学报(自然科学 版),2011,42(12):3912-3917.
- [16] 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.
- [17] 杨永民,张同生,陈泽鹏,等.模拟坝体温升的养护制 度对轻烧MgO混凝土力学性能的影响研究[J].膨胀 剂与膨胀混凝土,2018(2):186-194.

- [18] 柏红元,邓敏,唐明述.外掺轻烧氧化镁混凝土的膨胀 研究[J].科技导报,2008,26(10):61-64.
- [19] 胡庆福,宋丽英,胡晓湘.水菱镁石开发与利用[J].无 机盐工业,2005,37(11):48-50.
- [20] 曹丰泽,阎培渝.混凝土膨胀剂水化特性与反应产物 微观形貌的研究进展[J].电子显微学报,2017,36(2): 187-193.
- [21] GAO P W, WU S X, LU X L, et al. Soundness evaluation of concrete with MgO[J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(1):132-138.
- [22] MO Liwu, FANG Jianwei, HUANG Bei, et al. Combined effects of biochar and MgO expansive additive on the autogenous shrinkage, internal relative humidity and compressive strength of cement pastes[J]. Construction and Building Materials, 2019, 229: 116877.
- [23] ZHANG Peng, DAI Yuqing, WANG Wentao, et al. Effects of magnesia expansive agents on the self-

healing performance of microcracks in strain-hardening cement-based composites (SHCC) [J]. Materials Today Communications, 2020, 25: 101421.

- [24] CHEN Jiaqi, ZHANG Lanchun, DU Yinfei, et al. Three-dimensional microstructure based model for evaluating the coefficient of thermal expansion and contraction of asphalt concrete [J]. Construction and Building Materials, 2021, 284;112340.
- YU Lanqing, DENG Min, MO Liwu, et al. Effects of lightly burnt MgO expansive agent on the deformation and microstructure of reinforced concrete wall [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2019, 31:329-339.
- [26] CAO Fengze, MIAO Miao, YAN Peiyu. Effects of reactivity of MgO expansive agent on its performance in cement-based materials and an improvement of the evaluating method of MEA reactivity[J]. Construction and Building Materials, 2018, 187:257-266

# Influence of Preparation Process on Hydration Activity and Microscopic Properties of Magnesia Expansion Agent

YANG Yongmin<sup>1,2,3</sup>, CAO Yuhong<sup>2,3</sup>, JI Xiankun<sup>4</sup>, XU Ke<sup>4</sup>, WANG Hailong<sup>4</sup>

(1. School of Urban and Rural Construction, Zhongkai College of Agricultural Engineering, Guangzhou 510225, China; 2. Guangdong Lingnan Township Green Building Industrialization Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510225, China; 3. Institute of Sustainable Development of Building Energy Conservation, Zhongkai College of Agricultural Engineering, Guangzhou 510225, China; 4. Wuhan Sanyuan Special Building Materials Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

**Abstract**: To solve the problem of concrete cracking, adding a magnesium expansive agent can effectively reduce or even eliminate the shrinkage of concrete due to dry shrinkage and temperature difference so that the concrete has excellent crack resistance. In order to determine a reasonable calcination process for preparing magnesia expansion agent, the effects of calcination temperature, holding time, heating rate, and cooling mode on the grain size, microstructure, and activation properties of magnesia expansive agent were studied. The results show that the calcination temperature has a decisive influence on the hydration activity of magnesia expansive agent. With the increase of calcination temperature, the grain size of magnesia expansive agent increases continuously, while the specific surface area, the lattice distortion, the hydration heat release, and the activity decrease gradually. As the calcination holding time is longer under the same conditions, the magnesia expansion agent has a larger crystal grain size, lower specific surface area, higher crystallinity, and lower hydration activity. By adopting the rapid cooling method, a high-activity magnesia expansion agent can be obtained.

Keywords: magnesium oxide; calcination process; expansion agent; reactivity; microscopic properties

(学术编辑:宋琛)