

轻烧镁制备及深加工研究进展*

巴浩静^{1,2}, 白丽梅^{1,2}, 赵文青^{1,2}, 马玉新^{1,2}, 尹小波^{1,2}

(1. 华北理工大学矿业工程学院, 河北唐山 063009; 2. 河北省矿业开发与安全技术重点实验室, 河北唐山 063009)

摘要:轻烧镁在不同行业均广泛利用, 其中活性轻烧镁、高纯轻烧镁更是制备高附加值产品的优质原料。对轻烧镁制备的影响条件以及基础理论进行了介绍, 并对以轻烧镁为原料制备高附加值产品的研究进行了介绍, 对其发展提出了建议。

关键词:轻烧镁; 活性; 晶型理论; 动力学; 镁质产品

中图分类号:TD973⁺.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0076(2017)01-0084-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2017.01.016

Review on Preparation and Processing of Caustic Calcined Magnesit

BA Haojing^{1,2}, BAI Limei^{1,2}, ZHAO Wenqing^{1,2}, MA Yuxin^{1,2}, YIN Xiaobo^{1,2}

(1. School of Mining Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063009, China; 2. Key Laboratory of Mining Development and Safety Technology of Hebei Province, Tangshan 063009, China)

Abstract: Caustic calcined magnesite is widely utilized in a variety of industries. And the active and highly pure caustic calcined magnesite are used as high-quality raw materials for preparing high value-added products. In this paper, influence factors and fundamental theory of caustic calcined magnesite preparation are introduced, and the research of preparing high value-added products from caustic calcined magnesite is elaborated. Finally, some suggestions about the development of caustic calcined magnesite are proposed.

Key words: caustic calcined magnesite; activity; crystal theory; kinetics; magnesite products

引言

轻烧氧化镁别称轻烧镁氧或苛性镁氧, 是含镁矿物经煅烧或其他加工后的重要产品, 主要采用在 700~1 000 °C 下煅烧天然菱镁矿的方法制取^[1-4]。据报道, 2010 年, 有接近 50% 的轻烧镁应用在了诸如水处理等的环境领域方向, 其余则应用于农林和

建造行业。而我国菱镁矿资源储量居世界第二位, 储量达 6.25 亿 t^[5-6], 为轻烧镁的制备、研究和利用提供了强有力的保障。轻烧镁的产品规格为 40~250 μm 不等, 根据生产方法和质量标准的不同, 又可分为普通、颗粒、高纯、活性等几种规格产品^[7-8]。普通轻烧镁、颗粒轻烧镁为煅烧温度为 900~1 000 °C 下制备的氧化镁。但是高温、高产的缺点尤为明

* 收稿日期: 2016-07-06

基金项目: 国家自然科学基金(51504078); 河北省自然科学基金(E2015209210); 大学生创新计划(X2015036)

作者简介: 巴浩静(1998-), 女, 博士研究生, 矿物加工工程专业, Email: 1936511822@qq.com。

通讯作者: 白丽梅(1979-), 女, 副教授, 主要从事复杂矿产资源选矿工艺及其深加工方面的教学科研工作。Email: limeibai@126.com。

显,即活性低,胶凝性能差^[9]。但国内仍以此为主要产品,产量超过轻烧镁总产量的70%^[10],其本身价值及附加值都较低,并且不适于作化工以及建筑材料。活性轻烧镁的煅烧温度为700~800℃,轻烧镁分散度高,化学活性大,胶凝性能强^[11],可以用作制备镁质水泥等不同材料。轻烧镁的制备与活性检测是分不开的,这里简要说明轻烧镁活性的检测方法,以下不再赘述。目前其测定方法有加水水合法、比表面积法、碘值吸收法、醋酸乙醇法、柠檬酸法、相成分和晶粒大小法等^[12]。其中,测定轻烧镁质量的最简便方法是水合法,它对配料有指导作用,同条件下所得的轻烧镁产品,随着颗粒粒径的减小,比表面积增大,与水接触以及反应的面积相应增加,水化程度越高,活性越好^[13-14]。

目前国内的研究方向主要集中在活性轻烧镁和高纯轻烧镁的制备上。高活性、高纯度的轻烧镁是制备优质氢氧化镁阻燃剂、高粘结性及可塑性的速凝氯镁水泥的必要原料,同时以其为原料制备的纳米级氧化镁作为吸附剂、载体等在各个方面甚至航空航天方面均得到广泛应用。因此将轻烧镁经过人工拣选、热选提纯、水选提纯清除CaO、SiO₂有害杂质等各种方式制备、优化成高纯活性轻烧镁^[15]。本文就制备优化及深加工两个方面阐述轻烧镁的研究进展。

1 轻烧镁的研究现状

1.1 轻烧镁制备工艺研究

煅烧制备的轻烧镁产品,其影响因素必然受到煅烧过程中一系列因素的影响,如煅烧温度、保温时间、升温速率等。无论是在节约能源方面,还是在产品活性的要求方面,最佳的煅烧工艺条件的研究都是必不可少的研究方向。目前研究趋势正朝向不同种类原料的煅烧条件更细化、更优化的方向发展。

目前对于煅烧温度较为统一的结论是随着煅烧温度的增加,生成的氧化镁颗粒的比表面积越小,活性越低;随着保温时间的延长,氧化镁颗粒增大即比表面积减小,活性降低。同时由于不同地区、不同种类的菱镁矿杂质含量不同^[16-18],导致各个具体试验的最佳条件不同,原因可能是杂质的比热容与菱镁矿的比热容不同,对热量的吸收程度不同导致的,但仍有规律可循。对于杂质含量较低的菱镁矿,750

℃和1.5 h下煅烧得到的氧化镁与柠檬酸反应变色时间最短,所得轻烧氧化镁活性最高^[19-21]。对于一级菱镁矿,菱镁矿煅烧温度为650℃、煅烧时间为45 min时得到的氧化镁的活性最好^[22]。四级矿在700~1 100℃范围内,850℃保温2 h活性最好^[23]。杂质含量较高的菱镁矿尾矿,煅烧温度在1 050℃,保温时间60 min时,菱镁尾矿完全分解,MgO活性最佳^[24]。由以上试验结果发现,随着菱镁矿品位的降低,杂质含量的升高,煅烧所需要的能量呈现出逐渐增加的趋势,同时当菱镁矿基本转化为氧化镁以后,煅烧温度和时间的增加将会使氧化镁的活性下降^[19-25]。

升温速率对轻烧镁活性的影响规律为升温速率越快,比表面积越大,MgO的活性高。而升温速率慢,则存在缺陷的氧化镁晶粒将会趋于规则完整^[26-28]。

除了煅烧温度、保温时间,菱镁矿颗粒粒度同样会影响氧化镁活性,但粒度的影响较小。粒度对轻烧镁活性的影响可以归因于在一定范围内粒度减小使内聚力降低,晶体内部[CO₂]更易析出,从而降低了反应的活化能。刘欣伟等研究结果表明:最佳煅烧条件是温度为750℃,煅烧时间为1.5 h,颗粒粒度为1 mm^[29]。

在实验的基础上,张强^[30]等人综合应用正交、方差的优化方法,并且引进了田口试验优化法,优化了轻烧镁煅烧制备过程中的参数以及对活性的调控,在对水化率的预测过程中体现了田口实验法的有效性。

另外,轻烧镁除煅烧菱镁矿可得到外,盐湖水也可以作为原料制备轻烧镁。齐誉^[31]等以新疆盐湖废弃物水合氯化镁为原料,采用碳铵法制备高纯氧化镁。碳酸氢铵采取固液混合加料,Mg²⁺浓度为1.5 mol/L,物料物质的量比NH₄HCO₃/Mg²⁺为3:1,pH值10,反应温度为90℃,时间为3.0 h。此条件下制得的碱式碳酸镁经750℃煅烧3 h,氧化镁的纯度可达99.28%。产品结晶性好,纯度高,氧化镁为球形,分散性好。

为了更好地控制轻烧镁的活性,探究轻烧镁的活性来源,反应受何种过程控制,如何从机理方面揭示轻烧镁的制备原理成为众多学者的研究方向。

2.1 轻烧镁制备基础理论研究

在大量实验的基础上,人们总结出多种影响轻

烧镁制备的理论,目前最主要的两种基础理论为烧结晶型理论和煅烧动力学。两种理论分别从晶体结构角度以及反应的控制理论两个方面进行了论述,为轻烧镁的制备、优化提供了理论依据。

2.1.1 轻烧镁烧结晶型理论的研究

轻烧镁煅烧制备过程的晶型形成理论,从分子结构的角形象化地阐述了其具体分解过程,有利于控制煅烧条件,制备较优化的轻烧镁,避免形成死烧或产生品位不合格的轻烧镁产品,避免浪费资源,进而达到有效控制生产过程及优化生产的目标。

从晶体结构角度出发,晶体结构的改变过程可以解释为:煅烧过程使 $MgCO_3$ 基于 $[CO_3]$ 结构单元分离出 $[CO_2]$, 化学键改变,产生 O 的物化性能活化点。晶体结构保持菱镁矿的结构,结构松散、不规则,晶体结构中 Mg-O 键键角大、键长长^[32],属于“假象”内的烧结,即氧化镁微晶在初始阶段构成一个保持原菱镁矿颗粒外形的硬团聚体,具有较高的化学活性^[33]。煅烧温度在 950 °C 以上时,任何保温时间的 $MgCO_3$ 均已完全分解。随着煅烧温度的增加及保温时间的延长,晶粒尺寸越大^[34],晶体结构调整和生长成为主导,晶粒尺寸扩张,即“假象”之间的烧结,趋向于死烧, MgO 逐渐失去化学活性^[35]。

2.1.2 轻烧镁煅烧动力学研究

轻烧镁煅烧过程动力学,是对其分解过程机理和控制步骤的研究,使其煅烧过程有了量化标准,从而达到有效控制生产过程及强化生产的目的。虽然有研究显示轻烧镁煅烧制备过程可能为传热控制或者分解反应控制^[36],但仅仅是定性的研究结论是不够的。如何解释吸热反应中各个影响因素与能量的关系,如何定量描述煅烧过程中能量的传递过程,给出反应阶段、反应等级、反应控制步骤的量化标准是值得关注的研究方向。

目前利用常用的动力学方程模型函数可以描述如菱镁矿等非均相固相反应过程,并通过 TG-DSC、TG-DTA 等方法根据所进行试验,求解出相应参数。并且 F. DEMIR^[37]、N. Khan^[38] 发现煅烧温度在 560 ~ 680 °C 时有明显的热重变化,这说明分解反应开始进行。随粒度的降低,表面积增加,分子结构内部对 CO_2 的束缚趋势降低,反应的活化能也随之降低。F. DEMIR^[37]、L. Turcaniova^[39]、M. Samtani^[40] 将菱镁矿的分解反应定义为一反应。

张强^[41]等依据热微商(DTG)曲线,Kissinger 及 Ozawa-Doyle 方法指出菱镁矿热分解过程属于三维相界反应。

对块状菱镁矿热分解机理及动力学方程,周宝余^[42]得出结论:在相同转化率条件下,块度($L = 20 \sim 50 \text{ mm}$)与活化能的关系为: $E = 4.795 \times L + 34.070 (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$,块度与活化能成正比。并将块状菱镁矿的分解划分为三个阶段:分解前期,Anti-Jander 方程控制的 $n = 2$ 的 3D 模型为最概然机理函数;分解中期,Avrami-Erofeev 方程控制的 $n = 3$ (Code: AE3) 的随机成核和随后长大模型为最概然机理函数;分解后期,Avrami-Erofeev 方程控制的 $n = 3/2$ 的随机成核和随后长大模型为最概然机理函数,分别建立了动力学方程。为制定块状菱镁矿生产 MgO 工艺提供了理论依据。这是目前论述轻烧镁不同形成时期的最细化的结论。

受动力学研究范围的限制,以及菱镁矿原料的来源、结晶环境、杂质含量不同、所采用的拟合方法的不同,往往动力学方程存在差异且具体研究结果只适用于部分矿物,更细化,更具有广泛意义和使用性的结论则有待进一步研究。

轻烧镁应用的必要性可以解释为:菱镁矿不具备较强的化学活性,用于深加工,其可行途径之一为与酸直接反应,反应设备大且过程不易控制,部分杂质同样会被酸溶解,不仅对菱镁矿的纯度要求高且反应极其缓慢且会造成酸的浪费。相反晶型理论的角度,轻烧镁的假象晶型提供了具有高活性的 Mg-O 键,应用起来十分方便。因此依托于高活性、高纯度的轻烧镁制备其他高附加值产品就成为必要的不可代替的途径,同时也是镁质材料的发展趋势。

2 以轻烧镁为原料制备高附加值产品的研究现状

以轻烧镁为原料制备高附加值产品的研究主要集中于以下几个方面。

2.1 以轻烧镁为原料制备氢氧化镁

氢氧化镁可作为绿色阻燃剂有抑烟能力强、热稳定性高、阻燃效果良好、原料易得、绿色环保等优点;作为吸附剂处理水体重金属污染具有接触面积大,吸附作用强烈,可有效避免二次危害和污染等优点^[43-44]。以轻烧镁为原料加水水合制备氢氧化镁

的优势在于:相对于直接沉淀法,产品不易团聚,分散性好。相对于水热法,反应过程及反应条件简单无需复杂设备支持。但产品的形貌和纯度往往达不到令人满意的效果,为改善这种状况,在水合过程中对各种药剂的研究成为了主要研究方向。

加入晶型控制剂和表面改性剂,可以制备出单分散表面极性低的氢氧化镁颗粒^[45]。水和过程中加入硫酸与菱镁矿尾矿制成的轻烧镁粉的反应,可以制备出纳米级片状氢氧化镁,则具有反应速度快的特点,但由于含有 Fe_2O_3 杂质,与酸反应后需要较准确地控制 pH 值使 Fe^{3+} 沉淀,具有一定的难度^[46]。

同时为了提高氢氧化镁的纯度,在轻烧镁水合的过程中加入氨水、硫酸铵与硫酸的混合溶液等物质。李三喜^[47-48]等成功地用以上两种物质分别得到了纯度可高达99%以上的,具有规则形貌、分散性好、结晶度较高的氢氧化镁。

2.2 以轻烧镁为原料制备高活性纳米氧化镁

纳米 MgO 的用途相当广泛,可用于生产抗菌陶瓷、抗菌塑料、化学吸附剂、亦可作为催化剂或作为其他催化剂的载体。在特种陶瓷、电子设备、航空航天、耐火及建筑、医疗材料等方面具有广泛的应用^[49-50]。以轻烧镁为原料制备纳米氧化镁是主要途径。利用轻烧镁合成纳米 MgO 的方法有很多种,但基本过程大致如下:轻烧镁—除杂—酸化或水合或加入沉淀剂—煅烧— MgO ,其产品的高活性就得益于它的纳米结构,目前的研究趋势趋向于制备出粒径更小、纯度更高的方向。

刘振^[51]以轻烧镁为原料,加入乙酸铵及尿素为原料,加入成胶剂柠檬酸并烘干,在一定温度下点燃并退火,可得立方面心晶体结构纳米氧化镁的晶粒尺寸 $<100\text{ nm}$,纯度为92.8%。而颜文斌^[52]等人制备得到了粒径为 80 nm 、纯度为99.1%的立方面心结构纳米氧化镁粉体。其方法是以菱镁矿为原料,制备成轻烧镁后,以草酸为沉淀剂,采用直接沉淀法。陈可可^[53]则得到了平均粒径约为 60 nm 的球形氧化镁粉体。其最佳条件是轻烧镁粉中加入工业级硫酸铵、碳酸氢铵及自制复配性表面改性剂,前驱体氢氧化镁在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 下煅烧 1.5 h 。储刚^[54]等制备出了平均粒径在 22 nm 的高活性纳米氧化镁。即将

菱镁矿在 $700\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧后用稀硝酸浸出含杂质的轻烧镁砂,加入浓氨水调节滤液的在 $\text{pH} = 8 \sim 9$,静置 2 h 过滤得到硝酸镁溶液,甘氨酸作燃烧剂(还原剂),在 $800\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧 2 h 。

以上方法的产物粒径越来越小,沉淀方法不同得到的氧化镁粒径、晶体形状不同,但其过程相对复杂,工业上尚得不到应用,如何生产出更高活性具有工业生产价值的产品,这有待于更深一步的研究。

2.3 以轻烧镁为原料制备镁质材料

建筑业上用轻烧镁与氯化镁混合制造含镁水泥。轻烧镁具有很高的粘结性,与其它填料混合成含镁水泥(称为索烈尔水泥)^[55],这种水泥具有很高的有机物结合性和可塑性,其硬化时间短强度高,适用于建筑装饰;尤其是应用于建材,在隔热、降噪、保温和抗磨性、硬度和弹性方面优于普通水泥。因此也成为代替普通水泥的研究方向。同时轻烧镁应用于其他材料的合成也具有提高弹性等性能的优势。

在结构方面,汤婷^[56]等以轻烧镁为原料,发现 MgO 能够在整个氯镁水泥空间形成连续而又致密的结晶结构。在强度方面,用轻烧镁水化后加入粉煤灰及硫酸铝等配料后得到了可以等同于42.5级普通硅酸盐水泥的强度要求^[57]。另外,活性氧化镁水泥生产耗能比传统水泥小,并且可以通过碳化反应在短时间内大幅度提高土体强度,改善土体耐久性并吸收大量 CO_2 。活性氧化镁水泥这种新型固化剂在减少环境污染、改善加固效果和有效利用资源方面具有广阔的应用前景和重要的社会经济意义^[58]。

在用于材料合成时,何伟^[59]等在加入轻烧 MgO 粉后,发现经纳米 MgO 粒子改性后的MC尼龙,其冲击强度和拉伸强度比纯MC尼龙都有所提高,具有增韧和增强的双重效果。陈后维^[60]添加轻烧氧化镁后,研制出一种耐水氯氧镁胶凝材料,并对镁质材料的强度、耐水性能进行了测试。研究结果表明改性过的镁质材料具有优良的耐水性能,其28d软化系数从0.76提高到了1.01,为镁质胶凝材料的制备提供了新思路。

轻烧镁除了上述所列举的主要合成方向,还可以用于合成三水碳酸镁晶体^[61]、纳米 $\text{Mg}-\text{Al}$ 水滑石等材料。有研究表明用轻烧镁合成的纳米 $\text{Mg}-\text{Al}$ 水滑石样品层比用硝酸镁试剂合成的样品层厚

很多^[62]。

2.4 以轻烧镁为原料处理废水废气

在作为吸附剂使用时,主要应用了轻烧镁粉体疏松多孔的特点。同时由于轻烧镁呈碱性,在处理含硫废气等方面具有较大优势。在水处理方面,刘永杰^[63]等发现添加了轻烧镁的吸附剂对活性艳红模拟染料废水的脱色率可达92%。轻烧镁用于除水体中的六价铬时,去除率达到99.5%^[64],且可多次反复利用。处理废气时,田露^[22]等发现将氧化镁用于烟气脱硫,脱硫效率达到100%。

2.5 轻烧镁的其他用途

轻烧镁在农业上填加于奶牛饲料时,可使奶牛免患因缺镁造成的晕倒症;用作肥料时可使根块作物增产^[65]。轻烧镁可与石棉或代用石棉混合制成绝热、隔音、保温材料,也广泛用于建筑物和锅炉、气缸、发电机、蒸汽管道上^[66]。在造纸工业中,轻烧镁是制作亚硫酸镁纸浆的原料之一;在橡胶工业中可用于控制硫化氯丁橡胶的生产^[67-69]。

3 结语

一方面,菱镁矿资源的巨大储量为我国轻烧镁的发展奠定了良好的物质基础;另一方面,轻烧镁本身质优价廉,且具有很高的开发潜力。因此,制备轻烧镁并将其进一步利用,将成为发展趋势之一。但轻烧镁的发展过程仍需注意以下几点:

(1)完善形成理论。在理论研究方面,尤其是煅烧动力学方面,更具普遍代表性的理论仍有待研究。不仅对反应过程的描述需要更加细化,各个过程之间的联系即整体性联系也需要进一步研究。

(2)以理论完善引导推动精细轻烧镁产品开发。目前,对轻烧镁制备的最优条件的探索取得了较大进展。但仍局限于对单一的能量传输控制,多阶段控温、结合理论细化温度梯度、在不同反应阶段采用相应的条件控制的研究仍然缺乏,并且其他条件如气氛等条件的影响也较为缺乏。结合理论、引进更多更好的优化方法使研究从粗放到精细转型将成为发展趋势。

(3)以精细产品为基础,优化制备高附加值产品。精细的轻烧镁产品,必然可以生产更高附加值的产品,无论是代替普通水泥、生产建材、用于环保领域都将有长足的发展。从而使对镁矿的利用不再

集中低端产品。

(4)形成完整的轻烧镁产业链条。有了以上发展基础,形成整体化的产业链条必然将推动行业发展,形成良性循环。

参考文献:

- [1] Erol P, Ali M ö, Salih D, et al. Adsorption of Cu^{2+} and Pb^{2+} ion on dolomite powder [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 167(1):1044-1049.
- [2] 王铁铮,辛明,傅莉莉,等.中国耐火材料生产与国际贸易情况[J].辽宁特种资源,2011,1(1):6-8.
- [3] 周自力,李雪艳.金属镁冶炼行业余热回收技术的应用及效益分析[J].有色冶炼,2001,11(4):15-16.
- [4] 全跃.镁质材料生产与应用[M].北京:冶金工业出版社,2008.
- [5] 鲍荣华,郭娟,许容,等.中国菱镁矿开发居世界重要地位[J].国土资源情报,2012(12):25-30.
- [6] 张国栋,袁政禾,游杰刚.辽宁省菱镁矿及镁质耐火材料产业的发展战略[J].耐火材料,2008,42(3):219-222.
- [7] 郑水林.非金属矿加工与应用[M].北京:化学工业出版社,2008.
- [8] 非金属矿工业手册编委会.非金属矿工业手册[M].北京:冶金工业出版社,1992.
- [9] 钟香崇.我国镁制耐火材料发展的战略思考[J].硅酸盐通报,2006(3):91-95.
- [10] 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.
- [11] 高玉娟,闫平科.低品位菱镁矿资源开发利用研究[J].中国非金属矿工业导刊,2011(3):17-18.
- [12] 于澹.我国菱镁矿的开发利用[J].砖瓦世界,1993(6):14-15.
- [13] 曾运新,黄绪通.氧化镁煅烧温度与其微膨胀性能关系的综述[J].广东水利电力职业技术学院学报,2003,1(3):29-31.
- [14] 张兴业.提高我国菱镁矿资源利用率的途径[J].矿产保护与利用,2008(4):23-25.
- [15] 徐平坤,魏国钊.耐火材料新工艺技术[M].北京:冶金工业出版社,2005,39-46.
- [16] 李承元.国内外菱镁矿资源开发利用现状及展望[J].世界有色金属,1997(12):30-34.
- [17] 王恩慧.菱镁耐火材料[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,1999.
- [18] 张鹏,曲月华,王—凌.X射线荧光光谱法测定镁砂、镁石及菱镁矿中主次成分[J].冶金分析,2010,30(9):28-31.
- [19] 孙永明,钱海燕,刘建兰.分散剂对制备超细氢氧化镁影响的实验研究[J].非金属矿,2005,28(4):54-56.
- [20] 钱海燕,邓敏,张少明.菱镁矿煅烧活性氧化镁实验研究[J].非金属矿,2004,27(6):1-2.
- [21] 林晓萍.菱镁矿煅烧活性氧化镁工艺研究[J].科技创新导报,2012(27):83-84.
- [22] 田露,Arash Tahmasebi,李先春,等.氧化镁活性及用于烟气脱硫的实验研究[J].化工矿物与加工,2015(4):22-28.

- [23] 关岩,毕万利,张玲. 低品位菱镁矿煅烧制备活性氧化镁试验[J]. 冶金能源,2015,34(4):33-36.
- [24] 黄明喜,薛建军,高培伟,等. 菱镁矿尾矿制备高活性 MgO 的性能表征[J]. 环境工程学报,2012,6(4):1315-1319.
- [25] 单琪堰,张悦,杨合. 低品位菱镁矿煅烧的新工艺[J]. 非金属矿,2011,34(3):15-18.
- [26] 吴建国,杜东兴,于陶然. 菱镁矿煅烧特性的实验研究[J]. 冶金能源,1997,16(1):50-52.
- [27] 徐鹏,朱静,高小明,等. 菱镁矿煅烧制备高活性 MgO 工艺[J]. 矿产综合利用,2013(2):40-44.
- [28] 王小娟,任爽,武艳妮,等. 煅烧非晶质菱镁矿对氧化镁活性的影响[J]. 盐业与化工,2009,39(1):7-9.
- [29] 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,2011,42(12):3912-3917.
- [30] 张强,何宏平,陶奇. 菱镁矿煅烧参数优化及其产物水化动力学解析[J]. 中国有色金属学报,2016,26(3):699-706.
- [31] 齐誉,乔秀文,曾宪佳,等. 新疆盐湖水合氯化镁制高纯氧化镁的研究[J]. 山东化工,2015,44(5):43-45.
- [32] 徐玲玲,杨南如,陶洪亮,等. MgO 活性对氯镁石材料开裂和耐水性的影响[J]. 硅酸盐学报,2003,31(8):759-769.
- [33] 李楠,陈荣荣. 菱镁矿煅烧过程中氧化镁烧结与晶粒生长动力学的研究[J]. 硅酸盐学报,1989,17(1):64-69.
- [34] 崔鑫,邓敏. 煅烧制度对 MgO 活性的影响[J]. 南京工业大学学报,2008,30(4):52-55.
- [35] V. S. S. Birchall, S. D. F. Rocha, V. S. T. Ciminelli. The effect of magnesite calcination conditions on magnesia hydration [J]. Minerals Engineering, 2000,13(9):1629-1633.
- [36] 路贵民,邱竹贤. 菱镁矿煅烧动力学[J]. 轻金属,1992(6):36-39.
- [37] F. DEMIR, B. DONMEZ, H. OKUR, et al. Calcination kinetic of magnesite from thermogravimetric data [J]. Trans IChemE, 2003,18(6):618-622.
- [38] N. Khan, D. Dollimore, K. Alexander, et al. The origin of the exothermic peak in the thermal decomposition of basic magnesium carbonate [J]. Thermochimica Acta, 2001, (367):321-323.
- [39] L. Turcaniova, G. Paholic, K. Mateova. Stimulating the thermal decomposition of magnesite [J]. Thermochimica Acta, 1996(277):77-84.
- [40] M. Samtani, D. Dollimore, K. S. Alexander. Comparison of dolomite decomposition kinetics with related carbonates and the effect of procedural variables on its kinetic parameters [J]. Thermochimica Acta, 2002, (392):135-145.
- [41] 张强,何宏图,陶奇. 基于热重分析的菱镁矿分解动力学解析[J]. 岩石矿物学杂志,2014,33(2):391-396.
- [42] 周宝余,李志坚,吴锋. 块状菱镁矿热分解机理及动力学方程的建立[J]. 人工晶体学报,2014,43(7):1823-1828.
- [43] H. Jost, M. Braun, Ch. Carius. The role of reactivity in synthesis and the properties of magnesium oxide [J]. Solid State Ionics, 1997, 103(11):221-228.
- [44] 苏明阳. 纳米氢氧化镁应用研究的最新进展[J]. 塑料助剂, 2015(2):1-5.
- [45] 白丽梅,韩跃新,印万忠,等. 菱镁矿制备优质活性镁技术研究[J]. 有色矿冶,2005,21:47-48.
- [46] 杜高翔,王柏昆. 利用菱镁矿尾矿制备纳米级片状氢氧化镁[J]. 地学前缘,2008,15(4):142-145.
- [47] 李三喜,任晓宇,王松. 水热改性对氢氧化镁的影响[J]. 沈阳工业大学学报,2015(4):372-376.
- [48] 李三喜,任晓宇,王松. 用轻烧氧化镁粉制备高纯氢氧化镁的研究[J]. 无机盐工业,2015,47(9):31-34.
- [49] 李海军,乔学亮,陈建国,等. 不同形态纳米氧化镁的制备和应用研究进展[J]. 材料导报,2007,S1:139-142.
- [50] 李环,苏莉,于景坤. 利用菱镁矿制备高活性氧化镁[J]. 耐火材料,2006,40(4):294-296.
- [51] 刘振. 凝胶-燃烧法由轻烧菱镁矿制备纳米氧化镁[J]. 应用化工,2015,44(5):810-812.
- [52] 颜文斌,石爱华,高峰. 轻烧菱镁矿制备高纯纳米氧化镁[J]. 硅酸盐学报,2010,38(1):110-113.
- [53] 陈可可. 低品位菱镁矿制备纳米氧化镁的工艺优化研究[J]. 新乡学院学报(自然科学版),2013,30(5):342-345.
- [54] 储刚,华陈,崔雪娇,等. 利用菱镁矿燃烧合成法制备纳米氧化镁[J]. 轻金属,2015(5):49-52.
- [55] 刘永杰,孙杰璟,孟庆凤. 利用菱镁矿尾矿制备镁硅酸盐水泥的研究[J]. 硅酸盐通报,2013,32(6):1126-1130.
- [56] 汤婷,张俊计,周慧,等. MgO 的活性及原料配比对氯氧镁水泥结构的影响[J]. 大连交通大学学报,2014,35(5):69-73.
- [57] 张巨松,徐跃丽. 镁质粉煤灰复合胶凝材料试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版),2016,32(2):298-305.
- [58] 曹菁菁,刘松玉. 活性氧化镁水泥碳化加固软土地基研究进展[J]. 江苏建筑,2014(6):40-45.
- [59] 何伟,苗丽丽,王思宁,等. MC 尼龙/纳米 MgO 复合材料的制备与性能[J]. 工程塑料应用,2015,43(2):7-10.
- [60] 陈后维,章祥林,靳廷甲,等. 低品级菱镁矿制耐水氯氧镁胶凝材料的研制[J]. 安徽建筑大学学报,2015,23(1):48-51.
- [61] 闫平科,卢智强,赵永帅,等. 低品位菱镁矿加压碳酸化法提纯试验研究[J]. 硅酸盐通报,2015,34(11):3372-3376.
- [62] 张悦,张连红,赵驰鹏. 菱镁矿制备纳米镁铝水滑石的研究[J]. 应用化工,2015,44(6):1033-1036.
- [63] 刘永次,刘桂萍. 废菌体/轻烧镁有机无机复合型吸附剂的研制[J]. 沈阳化工大学学报,2015,29(1):13-17.
- [64] 谷亚威,殷世强,朱新锋,等. 活性氧化镁处理含铬废水的研究[J]. 无机盐工业,2015(4):54-56.
- [65] 刘润静,徐恺,张腾腾. 我国轻烧粉、重烧粉及电熔镁砂生产现状分析[C]//全国镁化合物行业年会暨技术设备交流会专辑. 无锡:2014年全国镁化合物行业年会暨技术设备交流会,2014.
- [66] 张永奎. 我国菱镁矿的开发利用现状及前景分析[J]. 科技信息,2013(5):424-425.
- [67] 王兆敏. 中国菱镁矿现状与发展趋势[J]. 中国非金属矿业工业导刊,2006(5):6-8.
- [68] 由世宽. 浅谈合理利用菱镁矿资源[J]. 辽宁建材,2010,17(10):49.
- [69] 鲍荣华,郭娟,许容. 中国菱镁矿开发居世界重要地位[J]. 地质与矿产,2012,12(10):25-30.