

菱镁矿制备氧化镁技术进展及趋势

何艳¹, 王连勇^{1,2}, 崔家新¹, 王睿¹

(1. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 国家环境保护生态工业重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 这是一篇矿业工程领域的论文。我国菱镁矿资源丰富且品质优良, 储量与品位皆位居世界第一, 工业上常用其来制备氧化镁。菱镁矿在煅烧过程中微观结构的改变是影响氧化镁产品性能的关键。以此为切入点, 首先概述了菱镁矿制备高性能氧化镁产品的技术进展, 之后根据行业发展的制约因素分析了该领域的未来发展趋势。

关键词: 矿业工程; 菱镁矿; 环境保护; 资源节约; 氧化镁

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2024.05.014

中图分类号: TD952 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2024) 05-0095-07

引用格式: 何艳, 王连勇, 崔家新, 等. 菱镁矿制备氧化镁技术进展及趋势[J]. 矿产综合利用, 2024, 45(5): 95-101.

HE Yan, WANG Lianrong, CUI Jiaxin, et al. Technology progress and development trend of preparing magnesium oxide from magnesite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(5): 95-101.

2019年我国菱镁矿已查明储量达35.0亿t, 约占世界菱镁矿资源的1/4^[1]。其中, 辽宁省矿产储量约占全国总储量的85%, 主要分布在海城、大石桥、辽阳、岫岩等地, 预计其远景储量可达80亿t左右^[2]。菱镁矿常被用来制备各种氧化镁产品, 2009年我国氧化镁产品年产量已达1160万t, 遥遥领先于其他国家。根据用途的不同氧化镁可以分为试剂级氧化镁、建筑用氧化镁、冶金类氧化镁和化工类氧化镁四大类; 按照加工工艺的不同又可以分为合成氧化镁和煅烧氧化镁两大类, 其中煅烧氧化镁又有轻烧、重烧和电熔之分。氧化镁产品种类丰富、广泛应用于化工^[3]、医药^[4]、建材^[5]、钢铁^[6]、水泥^[7]等行业。

工业上, 主要通过菱镁矿热处理法来制备氧化镁^[8]。热处理时, 工艺条件的不同会引起矿石微观结构的改变, 影响氧化镁产品的性能, 以往落后的技术及粗放的管理使得我国以低性能氧化镁产品的生产为主, 高性能的氧化镁产品仍要依赖

进口, 积极探索新的工艺条件生产高性能氧化镁产品吸引了很多研究者的目光。此外, 菱镁矿煅烧大都沿用以前的设备, 装置老旧且资源浪费、环境污染现象严重, 制约了镁砂行业的进一步发展。本文梳理了制约镁砂行业发展的因素, 总结当前的新兴技术及行业未来发展趋势。

1 菱镁矿热处理法制备氧化镁

用热处理法制备氧化镁时, 菱镁矿在500~600℃开始分解, 700~1000℃时会有大量CO₂逸出, 形成比表面积大、活性高的轻烧镁粉, 若继续升温使其在1400~1800℃煅烧, CO₂全部逸出便会形成结构致密的重烧镁^[9]。

1.1 菱镁矿热分解机理及性能变化

菱镁矿属碳酸盐类, 其化学组成为MgCO₃, 主要成分MgO一般占35%~47.81%, 此外还有CaO、SiO₂、Fe₂O₃等其他成分存在。菱镁矿煅烧时, MgCO₃在500~600℃开始分解, 菱镁矿晶

收稿日期: 2022-11-03

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0304200)

作者简介: 何艳(1998-), 女, 硕士研究生, 主要从事工业节能减排。

通信作者: 王连勇(1976-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为冶金工程。

粒出现裂纹,有 CO_2 逸出和小尺寸、晶格有缺陷的 MgO 晶粒生成,但此时生成的 MgO 晶粒仍保持原有 MgCO_3 的晶型结构,即出现“假晶”形态。之后继续煅烧, MgCO_3 持续分解的同时 MgO 开始烧结,此时缺陷的 MgO 晶粒不断生长,排列逐渐有序、尺寸逐渐变大。直到 $1\,000\text{ }^\circ\text{C}$ 左右菱镁矿完全分解,生成疏松、活性较大的轻烧氧化镁,之后继续煅烧则进入 MgO 晶体的结构调整期,晶粒不断长大, MgO 结构越来越致密^[10]。 $1\,200\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,会有钙镁橄榄石(CMS)和镁橄榄石(M_2S)形成, $1\,350\text{ }^\circ\text{C}$ 后进入液相烧结阶段^[11],此时 CaO 、 SiO_2 、 Fe_2O_3 等杂质生成的物相已经完毕, $1\,400\sim 1\,700\text{ }^\circ\text{C}$ 结晶相长大, MgO 体积收缩,趋于致密化,生成重烧 MgO 。在煅烧 MgCO_3 生成轻烧 MgO 和重烧 MgO 的过程中,其晶格常数由最初的 $0.548\,0\text{ nm}$ 到 $0.421\,2\text{ nm}$ 再到 $0.420\,1\text{ nm}$ 。

在上述轻烧氧化镁的生成过程中, MgCO_3 不断分解生成 CO_2 和 MgO ,从微观上看 MgO 的晶体结构从最初的无序、有缺陷逐渐生长到规则、致密光滑,“假晶”以及非晶亚稳态结构逐渐消失,研究发现这一微观结构的改变会影响 MgO 参与化学反应的能力,是使其活性降低的根本原因^[12]。而从宏观上看,菱镁矿煅烧工艺的不同会影响其微观结构,研究学者们着眼于此,研究矿物粒度、煅烧温度、煅烧时间及升温速率等条件对氧化镁活性的影响,探索高活性氧化镁产品的较佳制备工艺。

菱镁矿的高温重烧普遍在竖窑进行,窑内料柱高 $20\sim 50\text{ m}$,矿石在自重下完成热压烧结生成致密镁砂。镁砂的 MgO 含量、体积密度、 CaO/SiO_2 值及显微结构是镁砂具有较好耐高温抗折强度、抗渣性及耐侵蚀性的根本原因,也是衡量镁砂性能的主要指标。 MgO 含量是影响镁砂耐高温侵蚀性能的关键因素;体积密度是衡量镁砂烧结程度和致密性的重要标准; CaO/SiO_2 值会影响烧结镁砂的结合相,只有当 $\text{CaO/SiO}_2<1$ 或 $\text{CaO/SiO}_2>2$ 时,镁砂的结合相才为高熔点的镁橄榄石(M_2S)、硅酸二钙(C_2S)和硅酸三钙(C_3S),最终的镁砂产品具有较好的高温结构强度和耐侵蚀性;此外,镁砂的显微结构,即方镁石晶粒大小及结合状态对镁砂产品的高温抗折强

度、抗渣性能和抗腐蚀性能都有影响^[13]。因此,如何控制工艺条件制备高纯、高致密镁砂产品成为研究热点。

1.2 制备高性能产品

1.2.1 高活性氧化镁的制备

一般将吸碘值大于 120 mg/g 的活性氧化镁称为高活性氧化镁,高活性氧化镁比表面积大、胶凝性好、活性高,主要应用于橡胶领域作氯丁橡胶、丁腈橡胶等的促进剂、活化剂,市场需求量大。目前,我国普通氧化镁的产量占总轻烧氧化镁产量的 70% 以上,高活性氧化镁仍然依靠进口。当前研究者们聚焦于此,探究各种工艺条件对菱镁矿活性的影响、寻求制备高活性氧化镁的较佳工艺^[14]。

以往用菱镁矿制备氧化镁都是将矿石直接煅烧到一定温度后保温,煅烧温度、煅烧时间都对氧化镁活性有影响:煅烧温度高、时间长,氧化镁分解完全但活性降低,煅烧温度低,氧化镁活性高但分解又不完全。基于此,邓玉芬^[15]采用阶梯化升温保温的方式对菱镁矿进行阶梯式煅烧:先令菱镁矿在低温下煅烧并尽可能保持其活性,再升温煅烧使其尽可能分解完全,整个过程力求维持氧化镁产品的高活性。结果显示,菱镁矿先在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 下煅烧保温 7 h ,再在 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 下保温 2 h ,产品中氧化镁含量达 84% ,在该煅烧条件下氧化镁分解率高、活性较佳;此外,菱镁矿在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 或 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 煅烧条件下采用合理的阶梯式煅烧方式也比直接升温保温得到的产品性能好,证明了阶梯式煅烧方法的优越性。

陈建铭等^[16]采用碳化法,将轻烧镁粉在 MgCl_2 溶液中消化、过滤除去钙离子后置于定-转子反应器中完成碳化,再经热解、煅烧制得高活性氧化镁。实验表明,定-转子反应器运行时营造的高剪切反应环境能够极大的缩短碳化时间、提高生产效率,将碳化后的轻烧粉在 $95\text{ }^\circ\text{C}$ 下热解、 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 下煅烧 2 h 便可获得较为理想的高活性氧化镁。

当前,高活性氧化镁的用途越来越广泛:制备新型水泥^[17]、混凝土^[18]、作为凝胶材料的碱激发剂^[19]、用作抗菌药物^[20]等。高活性氧化镁广泛的应用极大的刺激了市场需求,因此掌握各工艺条件对氧化镁活性的影响,找到一种低成本、高效率制备高活性氧化镁的工业化方法尤为重要。

1.2.2 高纯镁砂的制备

在我国, MgO 质量分数大于 98%, 体积密度大于 3.40 g/cm^3 的烧结镁砂被称为高纯镁砂。高纯镁砂因良好的耐高温性能被广泛用作炉衬耐火材料、高档碱性耐火材料、烧结助剂等。我国是镁砂生产、出口大国, 但我国当前的镁砂生产都集中在价值较低的普通镁砂上, 高纯镁砂生产较少。据统计我国辽南地区重烧镁砂竖窑有 335 座而高纯镁砂竖窑仅有 60 座, 高纯镁砂产品的研究制备迫在眉睫。

现有的无压烧结^[21]、热压静压烧结^[22]等方法都是制备致密氧化镁的有效辅助方法, 但这些方法产量小, 无法满足耐火材料和陶瓷行业的需求。Jin^[23]为了去除氧化镁生坯快速压制形成的不均匀孔隙、提高氧化镁的致密度, 提出了真空压实烧结技术: 将菱镁矿经烧水化后制得活性氧化镁, 然后在真空高压下将氧化镁粉末压制成型, 再经过 1600°C 高温煅烧 2 h, 此法有效去除了产品中的残留气体、减小了孔径、大大提高了产品的密度。

王汇平^[24]从添加剂对烧结镁砂性能的影响入手, 在低品位菱镁矿制备烧结镁砂时向其中加入 La_2O_3 , 经过 1600°C 保温 3 h 后制得高纯镁砂。实验发现: 在菱镁矿中加入 La_2O_3 后生成的硅酸钙锶矿物相能够增大镁砂的抗折强度, 提高镁砂的力学性能。当加入 2% 的 La_2O_3 时其力学性能更佳, La_2O_3 的加入能促进方镁石晶粒的生长, 但当 La_2O_3 加入量超过 2% 后方镁石晶粒的增长有所减缓。

2 行业发展趋势

镁质产品在我国冶金、建材、医药、化工等各个行业都有所应用, 其制备工艺的优劣尤为重要。现针对我国氧化镁制备工艺良莠不齐, 镁砂行业进一步发展受到制约的现状, 将制约因素与行业发展趋势梳理总结如下。

2.1 资源制约

我国丰富的菱镁矿资源支持着镁砂行业的飞速发展, 却也助长了矿石开采的“取优弃劣”行为。菱镁矿的不规范开采导致优质菱镁矿资源锐减, 大量低品位菱镁矿资源却被闲置丢弃。意识到资源浪费的严重性后, 研究者从菱镁矿选矿

提纯工艺入手, 解决资源对发展的制约问题。

2.1.1 发展选矿提纯工艺

为了充分利用低品位菱镁矿资源, 人们开始研究菱镁矿的提纯工艺, 力求去除杂质、提高矿石品质。常用的提纯工艺有: 利用各矿石物理化学性质差异进行的浮选法^[25]、利用各矿物热力学性质不同进行的热选提纯法^[26]、利用各矿石密度差异进行的重选法, 还有化学与磁选提纯以及电选法^[27]等。

各提纯工艺都有各自的优势, 在具体应用时要根据矿石的杂质成分以及对提纯品位的要求选择合适的提纯工艺。王恩雷^[28]利用 ZEISS Sigma 500 扫描电镜、矿物自动分析系统对海城和大石桥两地的菱镁矿进行研究分析, 对比后发现海城菱镁矿矿物分布粒度细、成分复杂且菱镁矿与其他矿石包裹严重, 选矿难以进行。对此他在对菱镁矿进行反浮选一次粗选, 正浮选一次粗选两次精选的选矿过程中分别加入了 N-牛酯基丙撑二胺和醚胺混合捕收剂、脂肪酸和烃类化合物混合捕收剂, 最终得到了海城菱镁矿石 64.36% 的一级品精矿产率, 大石桥菱镁矿特级品的精矿, 大大提高了菱镁矿石的精矿产率。针对目前矿石机械破碎、化学浮选成本高、工艺复杂的现象, 曹云霄^[29]采用脉冲放电破碎矿石与电选结合的方法提纯低品位菱镁矿, 对比机械破碎的菱镁矿颗粒, 经过脉冲破碎的菱镁矿电选后 Si 杂质分离得更彻底、精矿产率更高, 验证了脉冲破碎与电选提纯的可行性。存在的问题是: 所述方法目前还处于试验阶段且脉冲破碎矿物单次处理量有限, 矿物破碎后的收集工作还要依靠人力完成。

近年来镁矿质量下降已是事实, 而我国镁矿正面临一等矿石、二等工艺的困境, 为高效利用镁矿资源, 必须大力发展选矿提纯工艺。

2.2 设备制约

辽南地区有我国近 95% 的菱镁矿资源, 现今的镁砂行业已经发展成为辽南地区重要的优势性产业。但菱镁矿煅烧多沿用落后的技术与设备, 造成的资源浪费、环境污染等问题令人担忧。据统计, 我国辽南地区镁砂制造产业目前有反射窑 1790 多座, 竖窑 489 余座、回转窑 1 座、悬浮炉 4 座、多层炉 2 座, 良莠不齐的设备严重制约了镁砂行业的进一步发展。煅烧设备的优缺点见表 1。

表 1 菱镁矿煅烧设备的优缺点
Table 1 Advantages and disadvantages of magnesite calcination equipment

菱镁矿煅烧设备	优点	缺点
反射炉	工艺简单	重污染, 能耗高, 逐渐淘汰
竖炉	工艺简单	重污染, 产品质量不稳定
悬浮炉	受热均匀、能耗低、自动化	原料要求高、检修困难
多层炉	效果好、自动化	成本高
回转窑	煅烧均匀、能耗低、效果好	CO ₂ 、NO _x 排放

2.2.1 淘汰落后产能采用新型设备

针对工业上轻烧菱镁矿多用反射炉, 煅烧技术落后的现象, 沈阳化工大学提出了菱镁矿粉的闪速轻烧技术, 即在输送床输送菱镁矿粉的过程中完成轻烧。为了推动该技术的进一步发展, 获得菱镁矿粉在输送中轻烧反应的各种参数, 姜微微等^[30]利用微型流化床反应分析仪 (MFBRA) 和热重分析仪 (TGA) 模拟了菱镁矿粉在 N₂ 和空气中的煅烧过程, 对比分析两者的反应动力学参数证明了 MFBRA 能消除煅烧过程中生成的 CO₂ 对反应的影响, 其测试结果更可靠, 并得到了菱镁矿在 N₂ 和空气中分解的活化能分别为 125.74、124.16 kJ/mol, 指前因子分别为 4.0×10^5 、 $4.89 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$, 为输送床反应器的设计提供了参考, 为菱镁矿粉闪速轻烧技术的工业化发展奠定了基础。孙聪等^[31]在此基础上模拟了菱镁矿闪速轻烧工业输送床反应, 探究了煅烧温度、煅烧时间及矿石粒度对菱镁矿热分解、氧化镁活性的影响。结果表明: 150 μm 以下的菱镁矿分解为秒级反应, 1~2 s 内就可达到 98% 的分解率, 且利用输送床制得的氧化镁比传统方法制备的氧化镁活性好, 并给出了较佳反应条件, 验证了菱镁矿闪速轻烧技术的可行性。

对于反射窑以堆积态煅烧物料, 能耗高、产品活性低的问题, 彭强^[32]利用小型悬浮态煅烧装置及马弗炉在实验室模拟菱镁矿的悬浮态煅烧, 对比悬浮态和堆积态煅烧得到的氧化镁尺寸、结构及活性差异, 发现悬浮状态下菱镁矿 1 min 便可达到 98% 的分解率, 且得到的产品性质更均匀、晶粒尺寸更小、活性更高, 产品质量显著优于菱镁矿的堆积态煅烧。

反射炉轻烧菱镁矿在我国已经有七八十年的历史, 其工艺简单粗放但污染大、能耗高, 现已

逐渐淘汰, 悬浮炉、多层炉、回转窑等新型工艺设备的应用势在必行。

2.3 环境制约

我国建设“环境友好型”社会的脚步从未停歇, 国家对企业环保的把控越来越严格, 各企业们现已纷纷投身于绿色环保建设中, 而菱镁矿的开采、运输、煅烧过程均会造成严重的环境污染, 给社会造成巨大的环保压力, 镁砂行业的绿色环保改革势在必行。

2.3.1 走低碳之路

我国一直坚持走可持续发展道路, 碳达峰、碳中和伟大战略目标的实现需要各行各业的共同努力。在镁砂行业, 菱镁矿高温煅烧时碳酸镁分解会释放大量 CO₂, 造成了大量温室气体排放, 研究人员积极探索 CO₂ 处理新工艺, 为我国控制碳排放事业做出努力。

唐竹胜等^[33]一改往日的内加热式回转窑转而采用外加热回转窑, 利用专利产品万能滚筒烘干预热机和隔焰式旋焰回转窑在绝氧高温条件下煅烧小颗粒菱镁矿, 矿石在回转窑真空环境下分解产生活性氧化镁和 CO₂, 以此来制备高纯活性氧化镁并回收高纯 CO₂ 联产干冰。该工艺极大的降低了常规菱镁矿煅烧时的粉尘和 CO₂ 排放量, 充分利用 CO₂ 联产干冰副产品, 改变了以往重污染的现象, 在提高公司效益的同时实现了节能降碳环保, 具有广阔的发展前景。

基于液化天然气的冷能利用及菱镁矿加工时产生的大量 CO₂, Wang Xiu 等^[34]首次提出了级联嵌套有机朗肯循环 (ORC) 系统, 包括二氧化碳捕集子系统、ORC 发电子系统和液化天然气再气化子系统。该系统分别将液化天然气和菱镁矿煅烧的烟气作为系统的散热器和热源, 通过液化天然气再气化释放的巨大冷能冷凝烟气中的 CO₂, 实现液化天然气冷能发电和二氧化碳捕集一体化, 充分利用了液化天然气巨大的冷能又解决了菱镁矿加工过程中大量的 CO₂ 排放问题。存在的问题是: 该系统中, 液化天然气的冷能一部分用于发电一部分用于捕获 CO₂, 导致该系统的发电量低于其他专注于发电的系统。尽管如此, 该系统在回收液化天然气冷能的同时, 每年可减少菱镁矿加工过程 870 万 t 的 CO₂ 排放量, 得到工业余热发电量 6 777 万 kw/h, 具备广阔发展前景。

2.3.2 行低氮之举

利用菱镁矿制备氧化镁时窑内会有部分 NO_x 产生，随着 NO_x 污染越发严重，国家对 NO_x 排放限值愈发严格，菱镁矿的低氮轻烧引起了人们的关注，而 2018 年发布的辽宁省地方标准 DB 21/3011—2018：自 2021 年 1 月 1 日起所有轻烧窑、温度低于 1 400 ℃ 的回转窑、隧道窑 NO_x 排放量均不能超过 100 mg/m³，无疑给各镁砂企业带来了新挑战。

石灰石在回转窑内 1 800 ℃ 左右的高温煅烧

时会产生大量 NO_x，所以水泥行业的低氮燃烧技术发展较为成熟，如何利用回转窑实现菱镁矿的低氮轻烧可以借鉴水泥行业已有的低氮燃烧技术。下表中所述的低氮燃烧器、分级燃烧技术都是水泥行业常见的低氮燃烧技术，应用广泛、技术娴熟，O₂/CO₂ 燃烧技术虽刚刚兴起但具有很大的降氮潜力，各低氮燃烧的工艺技术及脱硝效率见表 2。镁砂行业的脱硝事业刚刚开始，但有其他行业成功的案例在前，相信镁砂行业的脱硝事业一定能顺利推进。

表 2 水泥行业常用的低氮燃烧技术

Table 2 Low nitrogen combustion technology commonly used in cement industry

低氮燃烧技术	工艺技术	脱硝效率	参考文献
低氮燃烧器	由单通道燃烧器现已发展到多通道燃烧器，通过低一次风量、高一次风速，大速差强旋流、拢焰罩等设计抑制 NO _x 的生成	10%~15%	[35]
分级燃烧	燃料和助燃空气分级送入，有燃料分级和空气分级燃烧之分，通过改变燃烧氛围尽可能的抑制 NO _x 的生成	15%~25%	[36]
O ₂ /CO ₂ 燃烧技术	O ₂ 与富含 CO ₂ 的烟气混合再送入窑内，从源头上降低 N 含量，减少 NO _x 的生成	实验室阶段	[37]

3 存在的问题及展望

我国是菱镁矿资源大国，丰厚的菱镁矿资源支撑着镁砂行业的发展，未来我国必定会从镁砂生产大国走向镁砂生产强国。尽管国内外很多研究学者就菱镁矿制备氧化镁工艺有了很多研究，但仍有以下问题存在：

(1) 矿山企业门槛低，企业多、散、小，严重的乱采私采现象导致菱镁矿资源利用不合理、优质矿石日益减少。未来需要整合企业，加强对企业的监管，合理规划采矿项目并予以资金和技术支持，大力提倡低品位菱镁矿的利用及选矿技术的发展，保障菱镁矿的合理利用，坚持可持续发展。

(2) 轻烧镁、重烧镁砂的热工设备主要为反射窑、竖窑，技术简单但工艺落后、自动化程度低、污染严重、分布分散、缺少标准化规程，政府要制定相关政策淘汰落后产能，早日实现自动化、集中化、规范化的转型，同时要加强对镁砂企业的监管力度，制定并实行环保章程。

(3) 没有充分发挥菱镁矿的资源优势，仍停留在以资源换取暂时发展的阶段。氧化镁生产仍以低价值的普通氧化镁产品为主，有关高性能氧化镁产品的制备大都停留在实验室阶段，浪费资源影响企业效益。当前国内外市场对高性能氧化镁产品的需求越来越大，快速将实验室理论工业

化迫在眉睫。

(4) 菱镁矿煅烧基本采用常规燃烧器，燃烧过程产生了大量 NO_x，末端烟气 NO_x 含量超标，排放浓度在 300 mg/m³ 以上，各企业要尽快进行设备更新，采用多通道低氮燃烧器代替常规燃烧器，同时进行技术革新以分级燃烧技术辅助，控制窑内氛围，降低 NO_x 生成量。

参考文献：

[1] 国家统计局. 2020 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
State Statistics Bureau. China Statistical Yearbook 2020[M]. Peking: China Statistics Press, 2020.
[2] 祁欣, 罗旭东, 李振, 等. 高硅菱镁矿的选矿提纯与应用研究进展[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(2):485-492.
QI X, LUO X D, LI Z, et al. Research progress on beneficiation, purification and application of high silicon magnesite[J]. Silicate Bulletin, 2021, 40(2):485-492.
[3] FOUDA A, HASSAN S E-D, SAIED E, et al. Photocatalytic degradation of real textile and tannery effluent using biosynthesized magnesium oxide nanoparticles (MgO-NPs), heavy metal adsorption, phytotoxicity, and antimicrobial activity[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9(4):105346-105346.
[4] FOUDA A, AWAD M A, EID A M, et al. An eco-friendly approach to the control of pathogenic microbes and anopheles stephensi malarial vector using magnesium oxide nanoparticles (Mg-NPs) fabricated by penicillium chrysogenum[J].

International Journal of Molecular Sciences, 2021, 22(10):5096-5096.

[5] SMAKOSZ Ł, KREJA I, POZORSKI Z. Edgewise compressive behavior of composite structural insulated panels with magnesium oxide board facings[J]. *Materials*, 2021, 14(11):3030-3030.

[6] MIGUEL V C, FINI D S, PINTO V S, et al. Crack-free caustic magnesia-bonded refractory castables[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(12):17255-17261.

[7] WANG L, LI C, SHU C X, et al. Influence of lightly burned MgO on the mechanical properties and anti-carbonization of cement-based materials[J]. *Coatings*, 2021, 11(6):714-714.

[8] 王倩倩, 陈中航, 李晓安, 等. 热处理菱镁矿制备氧化镁的国内研究进展[J]. *矿产综合利用*, 2019(2):9-15.

WANG Q Q, CHEN Z H, LI X A, et al. Progress of domestic research on preparation of magnesium oxide from heat treated magnesite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(2):9-15.

[9] 马鹏程. 高活性氧化镁和高密度烧结镁砂的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014: 5-6+28.

MA P C. Study on high activity magnesium oxide and high density sintered magnesia[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014: 5-6+28.

[10] BAI L M, MA Y X, ZHAO W Q, et al. Optimization and mechanism in preparing active magnesium oxide from magnesite[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2017, 129(2):1103-1109.

[11] 周宝余, 李志坚, 吴锋, 等. 块状菱镁矿烧结中期液相烧结行为[J]. *辽宁科技大学学报*, 2014, 37(5):493-498.

ZHOU B Y, LI Z J, WU F, et al. Liquid phase sintering behavior of massive magnesite in the middle stage of sintering[J]. *Journal of Liaoning University of Science and Technology*, 2014, 37(5):493-498.

[12] MITINA, N A, LOTOV, V A. Investigation of the change in the phase composition, properties, and hydraulic activity during the thermal treatment of magnesian materials[J]. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2017, 58(3):331-337.

[13] 任伟康. 新疆和静菱镁矿烧结实验研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2017.

REN W K. Experimental study on sintering of magnesite in Hejing, Xinjiang[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.

[14] 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.

XU P, ZHU J, GAO X M, et al. Preparation of high activity MgO by calcination of magnesite[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2013(2):40-44.

[15] 邓玉芬, 白丽梅, 张俊, 等. 菱镁矿阶梯化煅烧制备活性

氧化镁[J]. *非金属矿*, 2017, 40(1):16-18.

DENG Y F, BAI L M, ZHANG J, et al. Preparation of active magnesia by stepped calcination of magnesite[J]. *Nonmetallic Ore*, 2017, 40(1):16-18.

[16] 陈建铭, 牛晓红, 王晓彤, 等. 采用定-转子碳化反应器制备高活性氧化镁[J]. *无机盐工业*, 2016, 48(12):40-43.

CHEN J M, NIU X H, WANG X T, et al. Preparation of highly reactive magnesium oxide using fixed-rotor carbonization reactor[J]. *Inorganic Salt Industry*, 2016, 48(12):40-43.

[17] PENG L, CHEN B. Study on the basic properties and mechanism of waste sludge solidified by magnesium phosphate cement containing different active magnesium oxide[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 281:122609-122609.

[18] FORERO J A, BRAVO M, PACHECO J, et al. Fracture behaviour of concrete with reactive magnesium oxide as alternative binder[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(7):2891-2891.

[19] 陈友治, 王一飞, 孙涛, 等. 活性氧化镁对高矿物掺和料水泥基材料固化氯离子能力的影响[J]. *硅酸盐通报*, 2017, 36(1):276-281+287.

CHEN Y Z, WANG Y F, SUN T, et al. Effect of active magnesium oxide on chloride ion curing ability of cement based materials with high mineral admixtures[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramics Society*, 2017, 36(1):276-281+287.

[20] THAMILVANAN D, JAISO J, HII Y S, et al. Sol-gel coupled ultrasound synthesis of photo-activated magnesium oxide nanoparticles: optimization and antibacterial studies[J]. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 2020, 99(2):502-518.

[21] SHENG L L, CHUN J S, XIAO Y Q, et al. Densification and grain growth behavior of highly dense MgO ceramics in pressureless sintering[J]. *Ceramics International*, 2015, 41(8):10148-10151.

[22] CHEN M Q, HE J J, ZHANG Y L, et al. Densification and grain growth behaviour of high-purity MgO ceramics by hot-pressing[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(2):1775-1780.

[23] JIN E D, YU J K, WEN T P, et al. Effects of the molding method and blank size of green body on the sintering densification of magnesia[J]. *Materials*, 2019, 12(4):647-647.

[24] 王汇平, 崔妍, 曲殿利. 添加 La₂O₃ 对菱镁矿制备烧结镁砂性能的影响[J]. *耐火材料*, 2021, 55(1):61-63+68.

WANG H P, CUI Y, QU D L. Effect of La₂O₃ addition on properties of magnesite sintered magnesia[J]. *Refractories*, 2021, 55(1):61-63+68.

[25] 胡生操, 王晨晨, 付金涛, 等. 新疆某菱镁矿浮选工艺试验研究[J]. *矿产综合利用*, 2022(2):69-73.

HU S C, WANG C C, FU J T, et al. Research on flotation process test of magnesite in xinjiang[J]. *Multipurpose*

Utilization of Mineral Resources, 2022(2):69-73.

[26] 谢鹏永, 罗旭东, 郝长安. 低品位菱镁矿的热选提纯工艺研究[J]. 耐火材料, 2017, 51(1):53-56.

XIE P Y, LUO X D, HAO C A. Study on the purification process of low grade magnesite by thermal separation[J]. Refractories, 2017, 51(1):53-56.

[27] URVANTSEV A M, KASHCHEEV I D. Magnesite enrichment by a dry method[J]. [Refractories and Industrial Ceramics](#), 2012, 53(2):78-81.

[28] 王恩雷, 李晓安, 姜效军, 等. 辽宁海城某菱镁矿难选原因分析及浮选研究[J]. 矿产综合利用, 2021(2):13-16+7.

WANG E L, LI X A, JIANG X J, et al. Cause analysis and flotation research on refractory magnesite in Haicheng, Liaoning Province[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2021(2):13-16+7.

[29] 曹云霄. 低品位菱镁矿水中脉冲放电破碎与电选分离研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.

CAO Y X. Study on pulse discharge crushing and electric separation of low grade magnesite in water[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.

[30] 姜微微, 郝文倩, 刘雪景, 等. 微型流化床内菱镁矿轻烧反应特性及动力学[J]. 化工学报, 2019, 70(8):2928-2937.

JIANG W W, HAO W Q, LIU X J, et al. Characteristics and kinetics of magnesite light burning reaction in a micro fluidized bed[J]. Journal of Chemical Engineering, 2019, 70(8):2928-2937.

[31] 孙聪, 闫博威, 蔡长庸, 等. 菱镁矿输送床轻烧过程反应与产物微观结构特性[J]. 化工学报, 2020, 71(12):5735-5744+5352.

SUN C, YAN B W, CAI C Y, et al. Reaction and

microstructure characteristics of products in light burning process of magnesite transport bed[J]. Journal of Chemical Engineering, 2020, 71(12):5735-5744+5352.

[32] 彭强, 郭玉香, 曲殿利, 等. 菱镁矿悬浮态与堆积态煅烧对产物特性的影响[J]. 人工晶体学报, 2017, 46(6):1088-1091.

PENG Q, GUO Y X, QU D L, et al. Influence of magnesite calcination in suspension and accumulation state on product characteristics[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2017, 46(6):1088-1091.

[33] 唐竹胜, 陶立群, 唐佳. 菱镁矿煅烧活性氧化镁联产干冰新工艺简介[J]. 中国金属通报, 2018(3):94-95.

TANG Z S, TAO L Q, TANG J. Brief introduction of new process of magnesite calcination active magnesia co production of dry ice[J]. China Metal Bulletin, 2018(3):94-95.

[34] WANG X, ZHAO L, ZHANG L H, et al. A novel combined system for LNG cold energy utilization to capture carbon dioxide in the flue gas from the magnesite processing industry[J]. [Energy](#), 2019, 187:115963.

[35] DITARANTO M, BAKKEN J. Study of a full scale oxy-fuel cement rotary kiln[J]. [International Journal of Greenhouse Gas Control](#), 2019, 83:166-175.

[36] DU L, JIN B, ZHENG X, et al. Effect of reburning zone condition on no reduction efficiency in an online precalciner-type kiln system[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2016, 35(2):439-446.

[37] FRANCISCO C M, REINHOKD S, KRISTINA F, et al. Oxy-fuel combustion technology for cement production-state of the art research and technology development[J]. [International Journal of Greenhouse Gas Control](#), 2016, 45:189-199.

Technology Progress and Development Trend of Preparing Magnesium Oxide from Magnesite

HE Yan¹, WANG Lianrong^{1,2}, CUI Jiaxin¹, WANG Rui¹

(1.School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2.State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-industry, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: This is an article in the field of mining engineering. Magnesite in China is rich and good in quality. Its mineral quantity and grade rank the first in the world. It is widely used as the raw material for the production of magnesium oxide in industry. The change of microstructure of magnesite during calcination is the key to performance the properties of magnesia products. Taking this as the starting point, the technical progress of preparing high-performance magnesia products from magnesite is summarized firstly. Then, according to the restrictive factors of industry development, this article analyzes the future development trend of this field briefly.

Keywords: Mining engineering; Magnesite; Environmental protection; Resource saving; Magnesium oxide