

DOI:10.7524/j.issn.0254-6108.2024042601

CSTR:32061.14.hjhx.2024042601

宋学文, 朱海斌, 唐紫薇, 等. 利用盐湖镁资源制备 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 技术研究进展[J]. 环境化学, 2025, 44(9): 3350-3364.

SONG Xuwen, ZHU Haibin, TANG Ziwei, et al. A review on the preparation of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ from salt lake magnesium resources[J]. Environmental Chemistry, 2025, 44 (9): 3350-3364.

利用盐湖镁资源制备 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 技术研究进展*

宋学文^{1,2**} 朱海斌¹ 唐紫薇¹ 李明菲¹ 穆思成¹ 罗仙平^{1,2}

(1. 西安建筑科技大学资源工程学院, 西安, 710055; 2. 江西理工大学江西省矿冶环境污染控制重点实验室, 赣州, 341000)

摘 要 氢氧化镁具有许多优良和独特的物理化学性质, 在工业生产领域得到了广泛的关注和应用. 盐湖镁资源是制备高纯氢氧化镁产品的重要来源, 利用盐湖镁资源制备高性能氢氧化镁产品在科学领域和实际应用领域都具有极大的意义. 本文系统地综述了目前利用盐湖镁资源生产氢氧化镁的制备方法、制备工艺以及制备工艺参数对氢氧化镁结晶和成核过程以及物理化学性能影响的研究进展. 指出了每种制备方法的优缺点, 各个制备工艺的优点及不足和制备工艺参数的主要作用及今后的研究和发展方向. 总结了不同制备方法、制备工艺和工艺参数对氢氧化镁结晶过程的影响和作用机理, 以及形成过程中的主要作用. 氢氧化镁作为重要的无机功能材料, 开展盐湖镁资源制备氢氧化镁的研究可以促使氢氧化镁大规模应用得到快速发展.

关键词 盐湖镁资源, 氢氧化镁, 沉淀剂, 制备方法, 反应条件.

中图分类号 X-1; O6 **文献标识码** A

A review on the preparation of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ from salt lake magnesium resources

SONG Xuwen^{1,2**} ZHU Haibin¹ TANG Ziwei¹ LI Mingfei¹
MU Sicheng¹ LUO Xianping^{1,2}

(1. School of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, 710055, China; 2. Jiangxi Key Laboratory of Mining and Metallurgy Environmental Pollution Control, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, 341000, China)

Abstract Magnesium hydroxide has many excellent and unique physical and chemical properties, and has been widely concerned and applied in the field of industrial production. Salt lake magnesium resources are an important source for the preparation of high-purity magnesium hydroxide products. The use of salt lake magnesium resources to prepare high-performance magnesium hydroxide products is of great significance in the field of science and practical applications. This article systematically reviews the current research progress in the preparation methods, preparation processes, and preparation process parameters of the magnesium hydroxide crystallization and nucleation process as well as the physical and chemical properties of magnesium hydroxide. The

2024 年 4 月 26 日收稿(Received: April 26, 2024).

* 国家重点研发计划(2022YFC2904305), 国家自然科学基金(52304295), 青海省重大科技专项项目(2020-GX-A1)和青海省海西州基础研究计划(2022-JC-Q01)资助.

Supported by National Key Research and Development Plan (2022YFC2904305), National Natural Science Foundation of China (52304295), Major Science and Technology Project of Qinghai Province (2020-GX-A1) and Haixi Basic Research Plan of Qinghai Province (2022-JC-Q01).

** 通信联系人 **Corresponding author**, E-mail: songxwhl@163.com

advantages and disadvantages of each preparation method, the advantages and disadvantages of each preparation process, the main role of the preparation process parameters and the future research and development directions are pointed out. The influence and mechanism of different preparation methods, preparation processes and process parameters on the crystallization process of magnesium hydroxide are summarized, as well as the main functions in the formation process. Magnesium hydroxide is an important inorganic functional material. Research on the preparation of magnesium hydroxide from salt lake magnesium resources can promote the rapid development of large-scale applications of magnesium hydroxide.

Keywords salt lake magnesium resources, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, precipitation agent, preparation method, reaction conditions.

氢氧化镁作为一种重要的功能材料和无机化工产品的中间体,在许多领域得到了广泛地应用.氢氧化镁具有无毒、无污染、耐高温、耐腐蚀等优良的物理化学性能,被广泛地用作抗菌^[1-2]、废水、废气和酸性水污染物的处理^[3-5]、造纸工业中的填充剂^[6-8]、电子和光学器件^[9-10]、生产氧化镁的前驱体^[11]及新一代的阻燃剂^[12-14].制备氢氧化镁的镁源主有两类,一是以菱镁矿、白云石等为原料的固体矿,另一类是以盐湖卤水或者海水为原料的液体矿.天然固体矿物制备氢氧化镁,具有来源广、成本低等优势,然而使用矿产法制备的氢氧化镁形貌不规则、纯度低,大量杂质难以去除,严重限制了其在高端工业领域的应用.近年来,随着电子工业等行业的不断进步,高纯度、高档次的氢氧化镁产品需求得到了大幅度的增长,推动了高品质氢氧化镁制备工艺的不断进步.海水和盐湖卤水中的液体矿杂质含量少,工业应用中具有原料除杂工艺简单等优点,能够实现高品质氢氧化镁产品的制备.我国拥有大量的盐湖资源,制备高品质氢氧化镁具有天然的资源优势,相比于海水制备氢氧化镁具有更大的市场应用潜力.

由于国家服务钾肥生产的战略,在生产钾肥时产生了大量镁资源,以往由于对盐湖镁资源开发利用认识的不足,几乎没有相关方面的开发,造成了镁资源的严重浪费,镁资源的大量堆存对盐湖生态环境平衡也造成了严重的破坏.随着环保意识的增强和国家对盐湖镁资源利用开发的重视,如何有效开发利用盐湖镁资源是当前的一个重要课题.由于当今科学技术的不断进步,对先进和创新材料的需求越来越高.近年来发展起来的利用工业副产物,如选矿尾渣、冶金固废、粉煤灰等固体废弃物循环再利用制备有价值的材料,已经成为解决材料科学创新的关键科学领域,同时也进一步加速了循环科学发展,促进了环境友好型功能材料的广泛研究,毫无疑问,这其中包括氢氧化镁无机功能材料.氢氧化镁的重要性反映在其科学出版物的数量上,检索知网和 Web of Science 近 10 年(2014—2024)以氢氧化镁为主题的文章分别为 3704 条和 7685 条,而且其发文数量进入新世纪后不断上升.利用盐湖丰富的镁资源生产具有性能好、用途广、附加值高的氢氧化镁功能材料不仅能很好地处理盐湖“镁害”,为现代镁产业开辟新的发展机遇,而且能实现经济、资源和环境的可持续发展,因此,盐湖镁资源制备氢氧化镁生产工艺的研究具有重要的理论价值和实际意义.

众所周知,氢氧化镁产品的形貌、粒径大小、粒径分布、分散性、比表面积、白度和纯度等物理化学性质对其在应用领域方面起着关键作用.氢氧化镁产品的制备不仅要求高纯度,而且要在制备过程中对氢氧化镁粒径和形貌等物理化学性质进行调控,此方面的研究已经有了大量的相关报道^[15-19].本文从盐湖镁资源合理利用的角度出发,综述了盐湖镁资源水氯镁石($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)和硫酸镁($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$)的液体矿化工法制备氢氧化镁功能材料的技术研究进展,并结合当前国内外学者在此领域内的研究热点,对利用盐湖镁资源制备氢氧化镁功能材料的开发和研究进行了分析和展望.

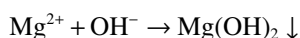
1 盐湖镁资源概况(Overview of magnesium resources in salt lake)

我国镁矿资源占世界总储量的 22.5%,居世界首位^[20].其中液体矿储量约有 50 亿吨,主要为液态氯化镁和硫酸镁.根据相关统计我国目前已编入储量表的盐湖镁资源矿产共 39 处,其中氯化镁 25 处,硫酸镁 14 处.中国是个多盐湖的国家,有广阔海域和盐湖,分布极广,辽宁、河北、山西、江苏、浙江、甘肃、青海、内蒙古等都有大量的盐湖镁资源^[21].长期以来,我国对盐湖卤水的利用多以提钠、提钾为主,

镁资源的利用薄弱,造成了大量的盐湖镁资源堆存. 山西运城盐湖的氯化镁含量居全国之冠,总量为65亿吨^[22]. 青海更是拥有大量的盐湖镁资源,主要以氯化镁和硫酸镁的形成存在,氯化镁储量达32亿吨、硫酸镁保有储量达16亿吨^[23],主要集中在柴达木盆地,仅柴达木盆地的察尔汗盐湖氯化镁储量就高达25亿吨. 此外,察尔汗马海、东、西台吉乃尔、一里坪、大浪滩、大柴旦、昆特依等盐湖中也包含大量的氯化镁和硫酸镁等镁资源^[24-25].

2 制备方法的研究进展(Research progress of preparation methods)

盐湖镁资源制备氢氧化镁反应原理如下:



盐湖镁资源制备氢氧化镁反应过程为反应体系中游离的 Mg^{2+} 离子与游离的 OH^{-} 发生反应生成氢氧化镁沉淀,沉淀经过滤形成氢氧化镁产品. 根据最新的文献报道,氢氧化镁产品的最终性质,特别是产品的形貌,强烈依赖于使用沉淀剂的类型. 目前使用的沉淀剂主要为石灰、氨水/氨气和氢氧化钠,还有少量关于其他沉淀剂的报道. 按照提供沉淀剂种类的不同制备方法又分为卤水-氨法、卤水-石灰法和卤水-氢氧化钠法. 沉淀剂的选择在这个看似简单的反应体系中至关重要,对氢氧化镁产品的形貌和粒径等物理化学性质以及镁离子的转化率具有显著的影响.

2.1 卤水-石灰法

石灰-卤水法是指以石灰或白云石为碱种,制备氢氧化镁的方法. 以石灰即氧化钙作为碱种时可直接水化得到石灰乳,然后加入卤水溶液中制备氢氧化镁产品. 利用白云石为碱种制造氢氧化镁产品,主要原理为:首先对白云石进行煅烧处理,使其转变为活性白云石灰(CaO 、 MgO),然后用水消化去渣后得到富含 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的白云灰乳浆料,将浆料加入卤水溶液中, Mg^{2+} 被灰乳中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 转化为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$. 此方法适用于有较多卤水的地区,且生成产物 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 以胶体形式存在,故难以制备高纯度产物,制备的氢氧化镁产品较多应用于净水吸附杂质与废气固硫^[26].

该法制备氢氧化镁时,石灰/白云石的杂质含量是影响产品性能的主要因素. 石灰和白云石作为碱种原料廉价易得,使用石灰乳法制备氢氧化镁成本较低,产品市场竞争力高. 但是石灰乳中含大量不溶物和铁、硅、铝等杂质,氢氧化镁产品表面活性高,极易吸附杂质,石灰中的杂质会降低产品纯度,导致产品只适用于对产品纯度要求不太高的行业使用,无法实现高纯度氢氧化镁的制备,不能够体现盐湖镁资源制备氢氧化镁的优势. 另外,此法制备氢氧化镁时要求原料含镁浓度低,同时原料中不能含有硫酸盐(否则将形成硫酸钙沉淀),因此只能利用水氯镁石作为原料,无法对硫酸镁进行利用. 科研工作者在卤水-石灰法的基础上,又衍生出了卤水-石灰水法,此法是对传统的石灰乳法进行改进,采用石灰水代替石灰石,能够有效避免石灰石中杂质进入氢氧化镁产品中,刘卫平等^[27]的研究结果表明采用石灰水法取代传统的石灰乳法能有效提高氢氧化镁产品的纯度.

2.2 卤水-氨法

卤水-氨法是制备氢氧化镁的重要方法,利用氨气/氨水为沉淀剂与镁离子反应生成氢氧化镁的方法称为氨法. 氨法中氨气和氨水都可使用,氨水或氨气作为沉淀剂的制备主要区别是进入体系的状态不同,液态氨气能够形成稳定的氨气源,有利于形成稳定的制备环境,从而有利于形成性能优良的产品^[28-29]. 相比而言,氨气法制备的氢氧化镁产品较规则,氨水法制备的氢氧化镁产品由于水的代入导致产品形貌不规则,团聚严重^[30]. 氨水/氨气作为沉淀剂时,氨水为弱碱,反应体系中镁离子浓度通常较高,能够使氢氧化镁的溶解度加大,因而反应过程容易控制,制备的氢氧化镁产品结晶好、沉降速率快,易于过滤和洗涤,后续操作工艺简单,反应结束过滤后的母液还可重复利用,或经浓缩后制成含 N、P、K、Mg 和 B 等复合肥,或加入石灰乳以回收氨再利用,实现氨的循环利用,降低生产成本,同时又能保证产品质量,但是必须在规模经济下效果才明显. 从技术和工艺上来说,氨法反应速度快,周期短,产品纯度高,尤其是产品中杂质含量很低. 氨气相比于工业氨水作为沉淀剂不会带入杂质,获得的产品相比工业氨水法制备的产品纯度略高,但是氨气作为碱种,易挥发,大规模储存危险性较大.

以卤水-氨法制备氢氧化镁时,产品的纯度较高、结晶良好,主要不足是氨水的利用率和镁转化率

较低,且废水中氨氮含量高、环境污染大,原料成本较石灰乳法高. 氢氧化镁的回收率受过饱和度、pH 等影响较大,由于氨水为弱碱,因此相同条件下相比于其他碱沉淀剂需要添加更大浓度的氨水才能达到高的镁收率,镁的回收率一般在 50%—90%,只有在特殊条件(如密闭反应器及控制氨浓度等)下才能够达到 90%. Yang 等^[31]采用氨法在水热条件下制备出结晶度高、形貌更规则、分散性良好的六方片状氢氧化镁,如图 1 所示. Zhang 等^[32]提出一种强制循环管式反应器制备氢氧化镁的连续工艺,以可溶性镁盐和氨为原料,制备了不同形貌、分散性较好、结晶形态良好的氢氧化镁产品,但镁离子转化率较低. 闫平科等^[33]以海盐卤水为原料,氨水为沉淀剂,以镁离子回收率为研究对象,优化反应条件,制备出纯度 99.1% 的氢氧化镁,结晶度高且颗粒性能良好,制备的氢氧化镁回收率为 79.8%. Shi 等^[34]以水氯镁石和氨为原料,在常规氨法的基础上提出了以反应后滤液为氨载体合成小颗粒氢氧化镁的先进工艺,成功合成了中值粒径为 1.70 μm 、形貌小且呈不规则薄片的氢氧化镁产品,且镁收率达到 90.06%.

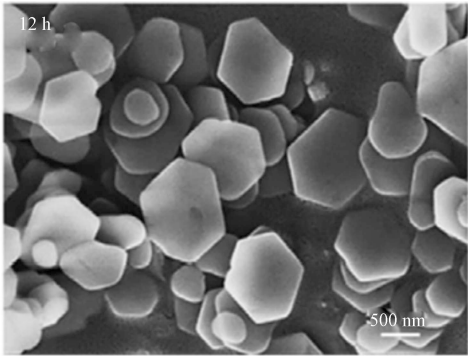


图 1 水热法制备的氢氧化镁产品 SEM 图^[31]

Fig.1 SEM image of magnesium hydroxide product prepared by hydrothermal method

2.3 卤水-氢氧化钠法

卤水-氢氧化钠法是指以氢氧化钠为沉淀剂制备氢氧化镁产品的方法. 此法的研究目前已有大量的报道^[16,35-39],以 NaOH 作为沉淀剂, MgSO_4 和 MgCl_2 为镁源,都能够实现高品质氢氧化镁的制备. 该法中由于氢氧化钠碱性高,使用此法时体系中的氢氧根离子与镁离子会迅速形成大量晶核,导致产品晶形不易控制,晶体结晶过程中钠离子,杂质离子尤其是氯离子等极易夹杂乃至结晶至氢氧化镁晶核中,降低产品纯度;同时由于结晶过程快,工艺条件略有控制不当就会导致产品粒径偏小,引起产品团聚导致难以过滤. 小粒径产品在工业生产过程中通常采用离心等设备进行脱水,无法实现连续化生产. 另外由于氢氧化钠的碱性高,极易腐蚀设备,且其价格贵,生产成本低,不利于大规模的工业化生产. 总体而言,相比于其他沉淀剂,该法生产工艺操作简单,与石灰法相比引入其他金属杂质较少,并且副产物 NaCl 能够实现再利用,制备的产品具有粒度均一、粒径小、产品纯度高等优点.

2.4 其他沉淀剂

目前还有一些其他沉淀剂的研究, Jin 等^[40]和 Chen 等^[41]都以 $\text{N}_2\text{H}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$ 作为沉淀剂制备了六角片状的纳米级氢氧化镁. Sabet 等^[42]使用乙二胺作为沉淀剂获得了纳米级氢氧化镁. 顾惠敏等^[43]以氨水和氢氧化钠组成的复合碱液作为沉淀剂, 刘有智等^[44]以 NaOH 和 $\text{CO}(\text{NH}_2)_2$ 为混合碱液合成了氢氧化镁. 使用这些沉淀剂晶体成核、结晶过程都会发生变化,改变获得的氢氧化镁产品的粒径、形貌、分散性等物理化学性质,然而由于这些沉淀剂都不常见,目前使用这类沉淀剂作为制备氢氧化镁产品的碱种研究还比较少,相关研究领域具有很大发展潜力.

卤水-石灰法、卤水-氨法和卤水-氢氧化钠法都有一定的优势和不足,使用不同沉淀剂制备的氧化镁产品性能与碱种和体系都有着紧密的联系. 对不同沉淀剂反应体系,须严格控制其合成条件,如初始浓度、离子比、pH、反应温度、反应时间、搅拌速度、加碱速度、浓度等. 否则制备的氢氧化镁不易过滤,粒径大小和分布不合适,产品中杂质含量,产品质量达不到应用需求. 在这 3 种方法中,氨法使用大量的氨水,不仅造成环境污染,而且废水难以处理,增加了成本. 氢氧化钠法中使用的氢氧化钠价格较高,同样会造成成本较高. 而钙法使用的石灰原料易得,价格低廉,生产成本较低,但是制备的产品纯度

低. 氨法制备氢氧化镁会生成大量的副产物氯化铵难以回收, 而且原料氨水具有强挥发性, 使得生产环境恶劣, 容易污染环境. 而钙法使用的石灰原料易得, 价格低廉, 生产成本较低, 但是制备的产品纯度低. 氨-石灰联合法卤水制取高纯氢氧化镁技术由中南大学联手青海西部矿业集团攻关数年开发成功^[45]. 该方法将氨法副产物氯化铵与石灰反应, 通过蒸氨工艺回收大部分氨, 兼具氨法和石灰法的优点, 既可得到纯度高、粒径大的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 产品, 又通过循环利用, 减少氨的损失, 降低能耗. 该方法可实现连续自动化生产, 生产效率高. 然而, 该法会产生大量氯化钙废液, 造成环境污染, 对其的处理依然是一个需要关注和解决的问题. 因此, 在实际生产中, 需根据市场产品需求, 选择合适的沉淀剂制备氢氧化镁.

3 制备工艺的研究进展(Research progress of preparation technology)

3.1 化学沉淀法

化学沉淀法由于成本低、操作简单、制备过程易调节等优点是目前应用最广泛的制备方法, 也是能够实现大规模生产氢氧化镁最可行的方法, 得到了广泛的关注^[46-47]. 但是, 化学沉淀法制备的氢氧化镁产品粒径大、团聚度高、微观形貌无序严重影响了产品性能.

3.1.1 正向沉淀法

正向沉淀法是将沉淀剂加入到配置的镁盐溶液中, 一定条件下析出沉淀, 经洗涤、抽滤和干燥等工艺得到目标产物的过程. 正向沉淀法制备过程中溶液的变化会使得颗粒电位由正至负, 当颗粒表面电荷为零, 颗粒会发生二次团聚, 粒径增大, 最终获得的氢氧化镁产品形貌不规则, 粒径分布宽, 杂质含量高. 正向沉淀法制备氢氧化镁具有独特的优势, 不仅制备工艺简单, 而且生产成本非常低. 但缺点在于, 碱性沉淀剂加入溶液时, 容易造成溶液中局部的浓度过高, 导致产品粒径分布宽, 易出现严重的团聚现象.

3.1.2 反向沉淀法

反向沉淀法是在直接沉淀法的基础上发展起来的, 不同之处在于其合成过程是将盐溶液加入到碱性沉淀剂中, 反应过程中反应体系始终保持碱性, 颗粒表面始终保持的负电荷避免了直接沉淀法中必须通过的等电点区间, 能够有效阻止颗粒间的二次团聚, 实现小粒度氢氧化镁的制备. 反向沉淀法制备的产品容易出现粒度分布不均匀. 较之直接沉淀法, 反向沉淀法制得的产物分散性和均匀性都有显著改善.

3.1.3 均匀沉淀法

均匀沉淀法体系中沉淀剂是由溶液中某种物质通过与水发生化学反应缓慢、均匀地产生, 溶液中沉淀剂的浓度始终保持稳定, 从而使反应在溶液中均匀进行的方法. 尿素是此法最常见的沉淀剂^[48], 此外使用离子交换树脂也能够实现缓慢释放沉淀剂, 冯冲等^[49]以离子交换树脂作为缓慢释放沉淀剂的介质, 获得了形貌规则、分散性好、厚度 30 nm 左右的六方片状 $\text{Mg}(\text{OH})_2$. 反应过程中沉淀剂是在均匀沉淀反应时逐渐生成的, 所以只要确保沉淀是通过某一良好速度析出, 即可避免反应过程中因局部浓度过高, 颗粒生成不均匀现象的产生, 并且把溶液的过饱和度控制在反应所需要的尺度范围内, 就可以实现粒径较好的产品制备. 但此方法的不足之处在于实验中沉淀剂使用量大, 生产过程中对温度的要求非常高、反应时间长, 产品产量相对较低.

3.2 水热法/溶剂热

水热合成是指镁盐和沉淀剂在一定压力的体系中, 反应体系高于水溶液沸点的条件下在水溶液或蒸汽等介质中进行一系列复杂化学反应生成氢氧化镁的过程. 该法为氢氧化镁的反应和结晶提供了一个在常压常温条件下无法得到的、特殊的物理和化学环境. 水在这里主要有两个作用: 一是部分溶解介质, 二是传递压力. 溶剂热合成技术在原理上与水热合成相似, 区别在于以有机溶剂代替水, 大大拓宽了水热法的应用范围. 非水溶剂可以起到传递压力、媒介和矿化剂的作用, 同时非水溶剂本身的一些特性, 如配位络合性能、热稳定性等, 为从反应热力学、动力学的角度去认识氢氧化镁结晶过程中化学反应的实质与晶体生长的特性, 提供了研究线索, 有可能以其他手段制取难以获得的某些特殊形貌的氢氧化镁产品. 溶剂热/水热法制备氢氧化镁产品的研究是当前的研究热点, 其作用主要基于以下

3 个方面^[31,50-55]: 一是氢氧化镁结晶生长过程在温度超过水的临界温度和临界压强时会发生很大的变化, 相比常温常压, 水热/溶剂热条件下晶体成核和生长速度会发生改变; 二是水热处理降低了晶面微观内应力以及晶体表面能, 改善了晶粒间的团聚, 使其在聚合物中的分散性、相容性都得到增强; 三是已生成的氢氧化镁晶体也会发生一系列的溶解和重组. 溶剂热/水热法工艺通过以上几个方面的作用, 能够降低氢氧化镁表面极性、改善过滤性能, 实现氢氧化镁形貌调控和粒径控制, 最终得到的氢氧化镁产品具有热稳定性高、粒径小且分布均匀、结晶度高、纯度高的特点. 与其他制备方法相比, 该法最终获得的氢氧化镁产品具有晶体结晶度好、发育完整、粒径小、粒度分布均匀、分散性高、团聚程度低等优点, 可以实现高品质氢氧化镁产品的制备. 然而此法相比于直接沉淀法反应时间长、能量消耗高, 溶剂热更是需要大量的有机溶剂, 去除难, 对环境有害, 严重制约了其在工业上大规模的生产应用.

3.3 微乳液法

微乳液法的原理是在微乳液体系中, 晶粒调整剂将两种连续但却互不相溶的介质分割, 形成微型反应器, 该微型反应器的尺寸处于纳米级, 因此反应物在“微型反应器”中生成的产物尺寸也处于纳米级. 陈德宏等^[56]和 Wu 等^[57]采用微乳液法都实现了纳米级氢氧化镁的制备. 微乳液法制备氢氧化镁产品时, 表面活性剂的种类和含量、水/油的比例对制备的产物的形貌和粒径具有决定性的影响. 微乳液反应体系中镁离子浓度和表面活性剂/油/水比的增大, 都会使得微乳液中液滴直径增大, 导致产物最终直径变大^[58]. 此法通过调控反应体系中表面活性剂、水、油等的比例, 能够调控产品的粒径, 同时此法工艺简单、能耗低、操作过程易控制, 与其他方法相比粒径易于控制, 制备的产品粒径分布窄, 能够实现纳米级氢氧化镁的制备. 但由于其体系中含水溶液较少, 致使单位体积产出较少, 产量低, 加之产物的分离有一定困难, 且表面活性剂、油等无法实现循环利用, 生产成本高.

3.4 全返均质乳化法

全返均质乳化法是通过将镁离子和碱性沉淀剂之间的反应在全返混均质乳化器中完成. 全返混均质乳化器是由网孔状定子和互成一定角度的叶轮状转子组成. 在电机的高速驱动下, 反应物料被加入到转子里并在瞬间接受多次剪切作用, 形成一个个微细的液膜单元, 沉淀反应就在这些微小单元上进行, 戴焰林等^[59]和段雪等^[60]团队都使用此法制备出了纳米氢氧化镁. 该法通过控制过饱和度将晶体成核与晶体生长过程隔离进行, 在晶体长大的同时没有新核形成, 从而使 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 颗粒晶化更加完整, 制备过程中 Mg^{2+} 浓度、反应温度、转子速度都会影响产品质量, 此法实现粒径分布均匀、分散较好的氢氧化镁的制备. 但该法操作复杂, 反应过程时间长、产量低, 如晶化过程需要 16 次循环, 每次要循环 1—24 h, 会导致生产成本大幅增加.

3.5 超声化学法

随着技术的发展, 超声波辅助技术逐渐引入到了氢氧化镁的制备过程中. 张梦婷等^[61]和 YOUSEFI 等^[15]在超声辅助的条件下, 分别合成了具有良好分散性的层片状氢氧化镁和纳米氢氧化镁, 这些研究表明超声化学辅助法可以实现纳米级氢氧化镁的制备. 超声辐照可在液体中产生微气泡, 微气泡的空化塌陷可产生极高的温度 (5000 K)、压力 (1000 atm)、加热和冷却速率 ($>10^{-9} \text{ K} \cdot \text{s}^{-1}$)、液体射流 ($400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$) 和强烈的冲击波^[62-63]. 因此, 超声辐照提供更多的能量促进反应的进行, 加速反应过程的同时对氢氧化镁成核体系周围产生物理化学作用, 从而影响其成核和结晶过程, 进而改变其组织结构^[64-65], 使用超声法时晶体生长过程被控制, 晶体非极性面的生长能够得到促进, 极性面的结合可以提高, 获得的产品表面极性低, 团聚少, 微孔更小, 产物形貌更加密实, 过滤性能好^[66-67]. 超声化学辅助法制备氢氧化镁的研究主要集中于超声波功率对氢氧化镁物理化学性质影响的研究, 在机理方面的研究还比较薄弱. 超声反应法和溶剂热/水热法都能够显著降低氢氧化镁产品表面极性, 但是与溶剂/水热法制备氢氧化镁相比, 超声化学法不需要压力控制和高温, 可以减少气压、pH 等参数的改变. 超声辅助法不仅具有反应速度快、反应温度低等优点, 而且此法结合通过条件优化能够调控结晶过程, 改变产物极性和粒径、形貌等物理化学性质, 因此在不久的将来有望得到大规模的使用.

3.6 微波辅助法

微波技术由于能使样品内部的热量更均匀、更迅速地传递而引起人们的广泛关注. 微波技术相比

于电阻加热需要更少的能量,相比于气体或油加热器产生的污染较少,具有较强的环保性.与传统的加热方法相比,使用微波加热可以使反应时间从几天缩短到几分钟.此外,微波辅助法可以在整个样品中形成均匀的高温,微波的快速加热可以增强反应过程动力学.因此,使用微波辅助法制备氢氧化镁也引起了一定的关注,目前微波辅助工艺的研究相对还比较少,但是现有的研究表明微波辅助法可以提高所得氢氧化镁粉末的结晶度,缩短反应时间,同时还能实现纳米级产品的制备^[68].有文献报道^[48],水热法和微波法结合使用可能在许多无机化合物的高效合成方面具有优势,因此,微波辅助法和水热法的结合制备氢氧化镁阻燃剂也能够具有一定的研究应用价值.使用微波辅助法制备氢氧化镁产率高且工艺简单,成本较低.但是,目前相关方面的研究还比较少,后续可根据相关需求增强微波辅助法在氢氧化镁制备方面的研究.

3.7 超重力辅助法/均质流体法

超重力法实验所用设备为超重机,也叫旋转填料床,利用旋转流化床提供超重力环境,该设备由一个形状如桶状的旋转填料床构成,可用于气-固、液-固、液-液和气-液-固三相系统^[69].高重力作用下促使镁离子与氢氧根离子微观混合和传动速度加快,实现强制对流反应^[70-71].该法反应过程快,转速是反应过程的关键影响因素^[72-73],能够实现纳米级氢氧化镁产品的制备.超重力法转速影响氢氧化镁产品粒径在于高转速能够提高剪切力,在此条件下流化床中的流体被更强烈地分散或分裂成更薄的薄膜、流线或更小的液滴,从而加速了传质和流体元件的微混合,获得更小粒径的氢氧化镁产品,相比于超声和微波化学法,此法易实现工业化生产.但是,使用此种方法制备的氢氧化镁产品易包裹钠离子和氯离子等杂质,产品纯度较低,此法能耗较大.北京化工大学杜以波^[74]将可溶性镁盐与碱溶液通过均质流体法强制沉淀反应合成氢氧化镁产品.此法原理上与超重力相似,都是利用反应器转子产生的巨大剪切力使微观混合和传质过程得到极大的强化,避免成核过程在非均匀的微观环境中进行,能够实现纳米级且分散性较好的氢氧化镁产品的制备.赵建海等^[75]在此基础上,采用撞击流反应结晶方法制备了高纯纳米氢氧化镁,但该方法仍存在固液分离困难及能耗大的问题.

4 制备工艺参数的研究进展(Research progress of preparation process parameters)

由于制备氢氧化镁的反应过程速度较快,成核速度也相对较快,工艺参数对氢氧化镁产品的形貌、结构、粒径和分散性有重要影响.由于其重要性,大量的科研工作者正在开展相关研究,以确定对反应过程最有利的反应条件,从而实现产物特定性能的获得.通过对制备过程中工艺参数的调控,实现对产品粒度的控制,改善过滤性能,以及调控氢氧化镁晶体沿各个方向的生长速率,改变氢氧化镁表面极性,从而获得形貌和粒径可控的氢氧化镁产品.因此探究初始反应物的浓度、离子比、pH、反应温度、反应时间、搅拌速度、添加方式等工艺参数对氢氧化镁产品性能的影响是目前制备氢氧化镁产品研究的重点.

4.1 初始浓度、离子比和反应 pH

镁盐和碱种初始浓度及镁离子/氢氧根离子的比对产物有着至关重要的影响,反应物初始浓度影响反应体系的过饱和度.过饱和度作为结晶的推动力,当成核速率大于生长速率时,过饱和的消耗主要集中在成核上,最终得到大量的细晶.相反,当生长速率较高时,过饱和的消耗主要是颗粒生长而不是成核,此体系下易得到大粒径产品.在高镁离子初始浓度条件下,形成的氢氧化镁产品晶面带有正电荷,颗粒间静电斥力较强,在高氢氧根离子条件下,形成的氢氧化镁产品表面带有负电荷,颗粒间静电排斥力小于正电荷;静电力不同的条件下,反应体系中晶核生长和团聚过程不同,最终得到的氢氧化镁形貌和粒径也不相同^[76-77].由此可得,可根据需求通过调控初始浓度和离子比调控氢氧化镁的形貌和粒径.

反应 pH 能够影响氢氧化镁的晶核形成机制^[46,78].在低 pH 条件下,晶体成核速率能够实现控制,避免晶核的团聚.在较高的 pH 条件下,晶体成核速率较快,晶体成核后在强碱性条件下立即被 OH⁻离子吸附,表面带负电荷,并通过氢键相互连接,形成团聚,最终导致制备的氢氧化镁产品形貌改变、粒径增大.

4.2 添加方式、添加速率和搅拌速度

添加方式能够影响氢氧化镁产品的粒径大小和分布,氯化镁在最佳的添加次数下能够获得粒度分

布较均匀, 粒径较小的氢氧化镁产品^[79]. 通常采用正向和反向添加法制备的氢氧化镁产品过滤性能都很差, 双向注入法制备的氢氧化镁产品过滤性能较好, 水含量也明显降低^[80]. 不同添加方式下反应体系的过饱和度不同, 最终会引起产品的沉降性能发生变化, 改变产品的粒径大小和粒径分布^[81]. 添加方式的改变本质上会引起晶体成核速度和生长速度的改变, 反映至产品上, 是粒径大小和粒径分布及过滤性能发生变化.

添加速率能够影响氢氧化镁产品的粒径大小和粒径分布及过滤性能. 添加速率越快, 生成氢氧化镁晶核的速度越快, 体系中晶核生成速率大于其生长速率, 生成的晶粒小, 具有较强的表面极性, 很容易发生二次团聚, 最终产品粒径分布宽; 由于生成的氢氧化镁表面极性高极易与水通过氢键交联, 微粒之间又形成黏连, 导致难以过滤. 若进料速度较慢, 则晶核有较长的生长时间, 能够降低产品表面极性低, 但是在较低的添加速率下, 反应时间长, 晶体生长时间长, 会导致最终产品的粒径增大.

搅拌速度会影响溶液分散度, 不同搅拌速度下氢氧化镁饱和溶液的瞬时过饱和度不同, 体系中晶体生长速率会发生变化, 当搅拌速率增大到一定的程度, 又会使剪切力变大, 造成氢氧化镁二次成核, 导致晶体的粒度分布不均匀^[82]. 搅拌速度的变化对产品的粒径大小和粒径分布及过滤性能造成显著性的影响^[83].

4.3 反应温度和反应时间

反应温度是影响体系化学反应速率、晶体成核和晶体生长的一个重要因素. 范天博等^[84]的研究结果表明, 反应温度影响氢氧化镁产品的形貌. 反应温度影响氢氧化镁的结晶过程主要体现在两个方面^[85-86]: 一是影响沉淀剂(氨水)的溶解度; 二是影响氢氧化镁的成核和结晶过程. 过低的反应温度不利于氢氧化镁的成核和结晶, 过高的反应温度会使成核速率加快, 导致结晶速度过快, 产品容易团聚和粒径过大.

反应时间较短, 氢氧化镁不能完全成核, 晶型不完整, 反应时间较长时, 反应体系中形成的氢氧化镁产品会发生熟化、再生长, 导致产品粒径增大^[87]. 反应时间增长会提高氢氧化镁产品纯度, 减少杂质含量, 降低氢氧化镁极性, 增强分散性^[88]. 总而言之, 较长的反应时间有利于降低氢氧化镁产品的极性, 提高分散性和产品纯度, 但会导致氢氧化镁粒径增大, 增加生产成本.

5 工业制备和应用的主要困难(Major difficulties in industrial preparation and application)

氢氧化镁晶体属于类似 CdI_2 层状结构的六方晶系, 主要晶面为(001)、(101)、(110)面. 其中(001)晶面属于非极性面, 是由 $\text{Mg}-\text{OH}$ 离子键所构成的生长基元在上面的延伸^[89], (101)晶面是极性较强的面, 是生长基元层与层之间的叠加, 主要是通过弱氢键相连, 如图 2 所示. 因此, (001)面和(101)面的生长差异能够获得不同形貌的氢氧化镁^[55], 如图 3 所示. 由于制备方法、工艺参数的不同会导致氢氧化镁晶面的生长差异, 最终呈现不同的形态, 形态特征的变化也使得其应用性能不同.

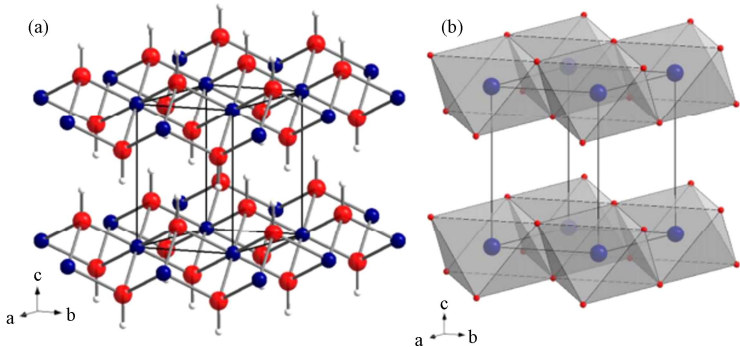


图 2 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的晶体结构^[89]

(a. 球棒表示, Mg 为蓝色球体, O 为红色球体, H 为白色球体; b. 多面体表示, 显示了通过氢键沿<001>方向连接的共享面 $\text{Mg}(\text{OH})_6^{4-}$ 八面体层)

Fig.2 Crystal structure of $\text{Mg}(\text{OH})_2$

(Figures a as a ball-and-stick representation with Mg as blue spheres, O as red spheres and H as white spheres, respectively; figures b as a polyhedral representation showing layers of face-sharing octahedra connected along the <001> direction via hydrogen bonding)

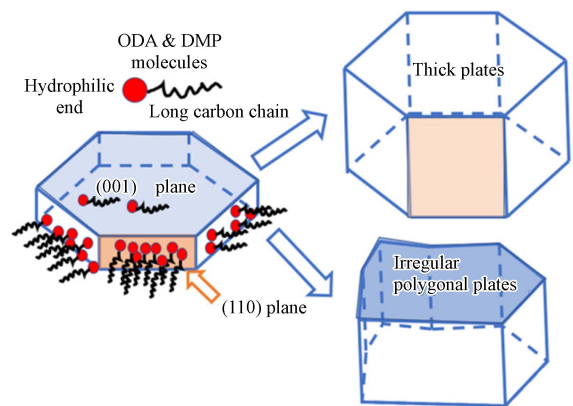


图 3 氢氧化镁不同晶面生长对形貌的影响图^[55]

Fig.3 Effect of different crystal surface growth of magnesium hydroxide on the morphology

氢氧化镁颗粒的形貌、粒径大小、粒径分布、表面极性和纯度等能够决定产品的物理化学性质,更是其应用性能的关键指标.六角片状氢氧化镁是一种良好的高分子材料阻燃剂.纤维状氢氧化镁可以增强高分子材料的耐冲击性能.针状或棒状氢氧化镁^[90]可以显著提高纤维材料的轴向应力.因此利用盐湖卤水制备特殊形貌的氢氧化镁是镁资源综合利用的一条有效途径. Weng 等^[91]以西部镁业大粒径氢氧化镁产品为原料,对其进行水热改性制备出形貌和结晶度良好、粒径较小的六角片状氢氧化镁(见图 4—6),为利用盐湖资源实现高性能氢氧化镁提供了理论支持.

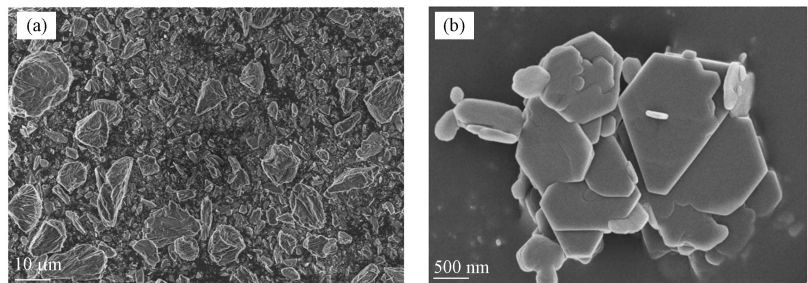


图 4 水热改性前后氢氧化镁 SEM 图^[91]
(a. 水热处理前; b. 水热处理后)

Fig.4 SEM images of magnesium hydroxide before and after hydrothermal modification
(a. Before hydrothermal treatment; b. After hydroheat treatment)

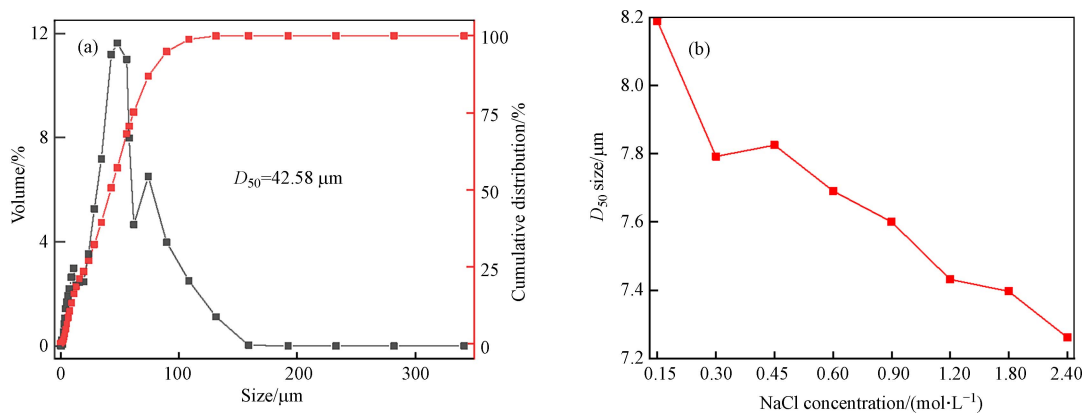


图 5 水热改性前后氢氧化镁粒径图^[91]
(a. 水热处理前的粒径分布; b. 水热处理后的粒径变化)

Fig.5 Particle size of magnesium hydroxide before and after hydrothermal modification
(a. Particle size distribution before hydrothermal treatment; b. Particle size change after hydrothermal treatment)

利用青海地区镁资源对 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的开发与生产已有 20 余年历史. 2018 年, 西部矿业集团西部镁业公司在 10 万吨/年高纯氢氧化镁项目平稳运行的基础上, 不断改进工艺、延伸产业链, 生产出 5 种

“世界第一”的高纯氢氧化镁系列产品, 产能和工艺均达到世界领先水平, 投放到市场后得到了国内外市场的高度好评, 着手扩能年产 20 万吨氢氧化镁生产线^[92]. 目前, 青海西部镁业有限公司已在规模化开发利用盐湖镁资源方面获得突破, 生产规模已达到年产 15 万吨高纯氢氧化镁、2 万吨高纯超细氢氧化镁^[93]. 下一步, 西部矿业力争在“十四五”期间氢氧化镁生产规模达到年产 55 万吨, 将西部镁业打造成国内行业知名的盐湖镁资源开发利用的科技创新型企业, 成为国际知名的盐湖镁资源开发利用和新型高端镁质非金属材料的制造中心.

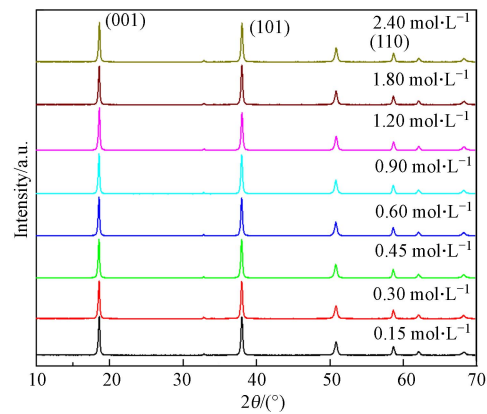


图 6 水热改性后的氢氧化镁 XRD 图^[91]

Fig.6 XRD pattern of magnesium hydroxide after hydrothermal modification

目前关于利用盐湖镁资源制备 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 技术的基础研究较多, 但是产业化研究相对较少, 虽然氢氧化镁的生产规模不断扩大, 但仍存在产品粒径过大、品质不高、工艺不够先进和附加值低等问题, 远没有发挥出青海镁资源的优势. 应进一步加强基础研究, 特别是重点研究氢氧化镁结晶过程的动力学和热力学, 探明影响氢氧化镁晶体生长的各种因素, 从而实现对氢氧化镁形貌和尺寸的可控制备, 开发出高品质氢氧化镁产品, 同时要加强对产业化的研究.

利用盐湖镁资源制备的高性能氢氧化镁, 在实际应用中的作用主要包括强化、催化、吸附和阻燃等. 根据氢氧化镁来源的不同, 氢氧化镁产品可以分为天然产品和合成产品两种. 合成的氢氧化镁材料具有独特的粒子形态和结构, 相比于天然产品在电子、光学、催化、陶瓷和纳米复合材料等领域的应用前景就更加广泛. 因此, 尽管在世界上许多地方都拥有天然存在的氢氧化镁产品, 但在中国和美国, 用于生产高性能氢氧化镁的先进和高端技术仍然不断地被开发并引进至工业生产中^[94]. 然而, 需要特别指出的是, 高端技术在工业上的使用往往面临许多困难, 如在利用盐湖镁资源制备氢氧化镁产品的过程中, 为降低杂质含量和提高产品纯度, 则需要加大过滤次数, 然而, 过滤次数的增加会导致生产成本提高, 从而降低产品市场竞争力.

氢氧化镁的形貌是应用的关键因素, 在大规模的工业生产中氢氧化镁产品的形貌往往呈现杂乱状, 目前也难以在工业生产中实现产品形貌的调控. 氢氧化镁的粒径大小和粒径分布更是氢氧化镁产品应用的决定性因素, 然而目前的制备技术根本无法实现在大规模工业制备中对氢氧化镁的成核和结晶过程控制, 最终导致制备的产品粒径分布较宽且较大, 工业生产中制备的产品粒径高达 50—60 μm , 远高于市场所需粒径小于 2 μm 甚至是微纳米的产品. 其次, 即使能够实现此类产品的制备, 在实际生产中产品的脱水、干燥成本又会大幅度增加.

当前, 实际生产中氢氧化镁产品的形貌、粒径、纯度等关键物理化学性质的控制还面临着极大的困难, 在工业规模上实现具有明确的物理化学性质、形态和微观结构特性的高质量氢氧化镁产品的制备仍然是一个重大的挑战.

6 结论与展望(Conclusion and prospect)

针对盐湖镁资源制备氢氧化镁可从以下几个方面着手.

(1)实验室制备的形貌规则、粒度均匀、分散性好的氢氧化镁产品在工业化生产中很难获得, 严重

制约了相关行业的发展,当前应根据工业需求,以实验室研究为基础,开展半工业和工业化生产试验研究,探索大规模生产中控制氢氧化镁成核和晶体生长的关键工艺技术,解决大规模工业化生产时氢氧化镁成核无序,晶体生长无规律的顽疾,在工业化生产中实现高性能氢氧化镁产品的制备。

(2)实验室的研究主要使用分析纯 $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 作为镁源制备氢氧化镁,盐湖镁资源中含有的微量杂质对氢氧化镁的成核和结晶过程具有严重的影响,目前关于盐湖镁资源中杂质离子对产品制备过程影响的研究还很少,后续的研究应更多地以实际含镁原料出发,并结合盐湖卤水中主要杂质,开展杂质离子对氢氧化镁成核、结晶过程和最终产品物理化学性质的影响研究。

(3)目前的研究主要集中于氢氧化镁制备方法、制备工艺和工艺参数等实验调控方面的研究,理论上关于主观因素对氢氧化镁生长过程影响的研究还不够成熟,从而严重限制了高品质氢氧化镁产品的制备,急需加强氢氧化镁产品成核和生长过程相关理论知识的研究。

(4)盐湖镁资源制备的氢氧化镁产品粒径小、活性高,在工业生产中难以控制氢氧化镁产品的团聚,反应体系也容易呈胶体状态,严重影响后续的洗涤、过滤及干燥效率,延长了反应周期,增加了生产成本,对下游的生产应用也产生了严重影响,这都是亟待解决的问题。

(5)进一步提高盐湖镁资源开发利用率是我国经济可持续发展战略所需,加快实现国内镁行业的结构调整,充分合理地利用我国盐湖卤水中的镁资源,加大创新投入,提高科技含量,实现高端氢氧化镁产品的制备,对提高我国在镁行业领域的竞争力具有极大的战略价值。

参考文献 (References)

- [1] CASTORENA-SÁNCHEZ A M, VELÁZQUEZ-CARRILES C A, LÓPEZ-ÁLVAREZ M A, et al. Magnesium nanohydroxide (2D brucite) as a host matrix for thymol and carvacrol: Synthesis, characterization, and inhibition of foodborne pathogens[J]. *Green Processing and Synthesis*, 2023, 12(1): 20230145.
- [2] ZHU Y, TANG Y F, RUAN Z, et al. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ nanoparticles enhance the antibacterial activities of macrophages by activating the reactive oxygen species[J]. *Journal of Biomedical Materials Research. Part A*, 2021, 109(11): 2369-2380.
- [3] LI H Y, LIU S Y, ZHAO J H, et al. Removal of reactive dyes from wastewater assisted with Kaolin clay by magnesium hydroxide coagulation process[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2016, 494: 222-227.
- [4] WANG K, ZHAO J H, LI H Y, et al. Removal of cadmium (II) from aqueous solution by granular activated carbon supported magnesium hydroxide[J]. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 2016, 61: 287-291.
- [5] EL BOURAIE M, MASOUD A A. Adsorption of phosphate ions from aqueous solution by modified bentonite with magnesium hydroxide $\text{Mg}(\text{OH})_2$ [J]. *Applied Clay Science*, 2017, 140: 157-164.
- [6] ZHAO J C, ZHANG M L, WANG S N, et al. Efficient protection of paper-based cultural relics via *in situ* synthesis of carbon dots/layered double hydroxide[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024: 2401067.
- [7] WANG S N, YANG X, LI Y H, et al. Colloidal magnesium hydroxide nanoflake: One-step surfactant-assisted preparation and paper-based relics protection with long-term anti-acidification and flame-retardancy[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2022, 607: 992-1004.
- [8] KANG M, WANG G X, LIU W X, et al. Fabrication of highly flame-retardant paper by *in situ* loading of magnesium hydroxide/basic magnesium chloride onto cellulose fibers[J]. *Cellulose*, 2023, 30(11): 7295-7312.
- [9] ZAHRAN H Y, SHNEOUDA S S, YAHIA I S, et al. Facile and rapid synthesis of nanoplates $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and MgO via Microwave technique from metal source: Structural, optical and dielectric properties[J]. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 2018, 86(1): 104-111.
- [10] YOUSEFI S, GHASEMI B, TAJALLY M, et al. Optical properties of MgO and $\text{Mg}(\text{OH})_2$ nanostructures synthesized by a chemical precipitation method using impure brine[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 711: 521-529.
- [11] GLIŃSKI M, CZAJKA A, ULKOWSKA U, et al. A hands-on guide to the synthesis of high-purity and high-surface-area magnesium oxide[J]. *Catalysts*, 2022, 12(12): 1595.
- [12] LI C, LONG Y, LOU Y M, et al. Three-in-one novel flame retardant through grafting organophosphorus onto Fe-MOF functionalized $\text{Mg}(\text{OH})_2$ for improving fire safety and mechanical properties of PBS composites[J]. *Sustainable Materials and Technologies*, 2024, 40: e00906.
- [13] JI J T, NI D H, SHI Y Q, et al. A simple method for preparing flame retardancy EVA/POE-g-MAH composites with high tensile strength by modified magnesium hydroxide and aluminum hydroxide[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2024, 141(24): e55505.
- [14] DESAI S, KAMBLE V, OZARKAR V, et al. Designing of layered double hydroxide, metal oxides, and borate-reinforced thermoplastic

- polyurethanes composites[J]. *Polymers for Advanced Technologies*, 2024, 35(3): e6334.
- [15] YOUSEFI S, GHASEMI B, NIKOLOVA M P. Opto-structural characterization of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and MgO nanostructures synthesized through a template-free sonochemical method[J]. *Applied Physics A*, 2021, 127(7): 549.
- [16] ROMANO S, TRESPI S, ACHERMANN R, et al. The role of operating conditions in the precipitation of magnesium hydroxide hexagonal platelets using NaOH solutions[J]. *Crystal Growth & Design*, 2023, 23(9): 6491-6505.
- [17] 方华东. 大颗粒高纯氢氧化镁的制备研究 [J]. *纯碱工业*, 2022(6): 16-18.
FANG H D. Study on preparation of large granular high purity magnesium hydroxide[J]. *Soda Industry*, 2022(6): 16-18 (in Chinese).
- [18] 曾书航, 杜莹, 陈婷, 等. 液相沉淀法制备高纯超细阻燃型氢氧化镁 [J]. *塑料科技*, 2024, 52(2): 94-99.
ZENG S H, DU Y, CHEN T, et al. Preparation of high purity ultrafine flame retardant magnesium hydroxide by liquid precipitation method[J]. *Plastics Science and Technology*, 2024, 52(2): 94-99 (in Chinese).
- [19] RAJABIMASHHADI Z, NAGHIZADEH R, ZOLRIASATEIN A, et al. Novel synthesis of nano $\text{Mg}(\text{OH})_2$ by means of hydrothermal method with different surfactants[J]. *Nanomaterials*, 2023, 13(3): 454.
- [20] 王永昌. 中国镁工业的未来: 察尔汗盐湖 [J]. *广东化工*, 2018, 45(17): 113-114.
WANG Y C. The future of China's magnesium industry—Qarham salt lake[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(17): 113-114 (in Chinese).
- [21] 刘佳, 葛飞, 李玉婷, 等. 2010 年至 2019 年中国国家自然科学基金资助中国盐湖研究项目分析 [J]. *无机盐工业*, 2021, 53(4): 14-19.
LIU J, GE F, LI Y T, et al. Analysis of projects on salt lakes funded by the National Natural Science Foundation of China from 2010 to 2019[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2021, 53(4): 14-19 (in Chinese).
- [22] 胡庆福. 镁化合物生产与应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
HU Q F. Production and application of magnesium compound[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004(in Chinese).
- [23] 王春艳. 单分散纳米氢氧化镁晶须形成机制研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2015.
WANG C Y. Formation mechanism of the monodisperse magnesium hydroxide nanowhiskers[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2015 (in Chinese).
- [24] 马广超, 狄跃忠, 彭建平, 等. 青海盐湖氯镁石利用技术现状 [J]. *矿产保护与利用*, 2019, 39(3): 160-166.
MA G C, DI Y Z, PENG J P, et al. Utilization technical status of bischofite in Qinghai salt lake[J]. *Conservation and Utilization of Mineral Resources*, 2019, 39(3): 160-166 (in Chinese).
- [25] 周园, 李丽娟, 吴志坚, 等. 青海盐湖资源开发及综合利用 [J]. *化学进展*, 2013, 25(10): 1613-1624.
ZHOU Y, LI L J, WU Z J, et al. Exploitation and comprehensive utilization for Qinghai salt lakes[J]. *Progress in Chemistry*, 2013, 25(10): 1613-1624 (in Chinese).
- [26] GUO J M, ZHOU Z, MING Q, et al. Recovering chemical sludge from the zero liquid discharge system of flue gas desulfurization wastewater as flame retardants by a stepwise precipitation process[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 417: 126054.
- [27] 刘卫平, 徐徽, 程俊峰, 等. 底液对石灰水法制备氢氧化镁沉降性能的影响 [J]. *材料导报*, 2012, 26(增刊 2): 313-316.
LIU W P, XU H, CHENG J F, et al. Effects of base liquid on the settlement property of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ prepared by lime method[J]. *Materials Reports*, 2012, 26(Sup 2): 313-316 (in Chinese).
- [28] YU H L, WANG D X, CHEN G, et al. Insights into the diffusion coefficient and adsorption energy of NH_3 in MgCl_2 from molecular simulation, experiments, and machine learning[J]. *Journal of Molecular Liquids*, 2024, 395: 123822.
- [29] GUO H F, HU H, XIE J Y, et al. Gaseous ammonia: Superior to aqua ammonia in the precipitation of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ under mild conditions[J]. *RSC Advances*, 2014, 4(54): 28822-28825.
- [30] 姚建平, 范天博, 王健, 等. 氨状态对氨法制备氢氧化镁颗粒性质的影响 [J]. *化工学报*, 2012, 63(1): 314-319.
YAO J P, FAN T B, WANG J, et al. Influence of ammonia state on particle characterization of magnesium hydroxide prepared via ammonia method[J]. *CIESC Journal*, 2012, 63(1): 314-319 (in Chinese).
- [31] YANG Q Z, GAO X T, FANG L, et al. Controllable crystal growth of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ hexagonal flakes and their surface modification using graft polymerization[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(7): 2634-2644.
- [32] ZHANG Y, XIA L, ZHANG L, et al. Study on preparation of magnesium hydroxide by continuous forced circulation process[J]. *Crystal Research and Technology*, 2023, 58(8): 2300071.
- [33] 闫平科, 何泓江, 白扬, 等. 氨水沉淀制备氢氧化镁试验研究 [J]. *非金属矿*, 2018, 41(3): 17-19.
YAN P K, HE H J, BAI Y, et al. Experimental study on preparation of magnesium hydroxide by ammonia precipitation[J]. *Non-Metallic Mines*, 2018, 41(3): 17-19 (in Chinese).
- [34] SHI X Y, CHEN H, SUN Y Z, et al. Synthesis of magnesium hydroxide using post-reaction filtrate as ammonia carrier and morphology analysis[J]. *Crystal Research and Technology*, 2022, 57(8): 2200014.
- [35] REN M Y, YANG M, LI S L, et al. High throughput preparation of magnesium hydroxide flame retardant via microreaction technology[J]. *RSC Advances*, 2016, 6(95): 92670-92681.

- [36] MASLENNIKOVA T P, KOTOVA M E, LOMAKIN M S, et al. Role of mixing reagent solutions in the formation of morphological features of nanocrystalline particles of magnesium hydroxide and oxide[J]. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*, 2022, 67(6): 810-819.
- [37] JAROSINSKI A, RADOMSKI P, LELEK L, et al. New production route of magnesium hydroxide and related environmental impact[J]. *Sustainability*, 2020, 12(21): 8822.
- [38] 贾炎涛, 陈杭, 孙玉柱, 等. 高盐废水反应结晶制备氢氧化镁 [J]. 化学工程, 2022, 50(3): 6-12.
JIA Y T, CHEN H, SUN Y Z, et al. Preparation of magnesium hydroxide by reactive crystallization of high-salinity wastewater[J]. *Chemical Engineering (China)*, 2022, 50(3): 6-12 (in Chinese).
- [39] 刘明星, 李佳, 张蕾, 等. 卤水制备阻燃用六角片状氢氧化镁研究 [J]. 盐科学与化工, 2022, 51(10): 16-20.
LIU M X, LI J, ZHANG L, et al. Study on preparation of hexagonal flake magnesium hydroxide for flame retardant using brine[J]. *Journal of Salt Science and Chemical Industry*, 2022, 51(10): 16-20 (in Chinese).
- [40] JIN D L, GU X Y, YU X J, et al. Hydrothermal synthesis and characterization of hexagonal $\text{Mg}(\text{OH})_2$ nano-flake as a flame retardant[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2008, 112(3): 962-965.
- [41] CHEN H Y, XU C J, LIU Y Q, et al. Formation of flower-like magnesium hydroxide microstructure via a solvothermal process[J]. *Electronic Materials Letters*, 2012, 8(5): 529-533.
- [42] SABET M, SALAVATI-NIASARI M, FARD Z A. Synthesis and characterization of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and MgO nanostructures via simple hydrothermal method[J]. *Synthesis and Reactivity in Inorganic, Metal-Organic, and Nano-Metal Chemistry*, 2016, 46(5): 681-686.
- [43] 顾惠敏, 王伟, 翟玉春. 高纯纳米晶氢氧化镁粉体制备及表征 [J]. 稀有金属材料与工程, 2010, 39(1): 169-172.
GU H M, WANG W, ZHAI Y C. Preparation and characterization of high-purity nano-crystal $\text{Mg}(\text{OH})_2$ powder[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2010, 39(1): 169-172 (in Chinese).
- [44] 刘有智, 白梅, 申红艳, 等. 均相沉淀法制备超细氢氧化镁 [J]. 无机盐工业, 2012, 44(3): 30-32.
LIU Y Z, BAI M, SHEN H Y, et al. Preparation of superfine magnesium hydroxide by homogeneous precipitation method[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2012, 44(3): 30-32 (in Chinese).
- [45] 马书涛, 狄跃忠, 彭建平, 等. 青海盐湖氯镁石制备氢氧化镁的进展 [J]. 盐湖研究, 2024, 32(3): 123-132.
MA S T, DI Y Z, PENG J P, et al. Research progress in preparation of magnesium hydroxide from bischofite in Qinghai salt lakes[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2024, 32(3): 123-132 (in Chinese).
- [46] BHATT P, CHATTOPADHYAY S, MISRA K P, et al. Effect of temporal pH variation of the reaction mixture on $\text{Mg}(\text{OH})_2$ morphology precipitated from an aqueous $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$ -NaOH system[J]. *Advanced Powder Technology*, 2021, 32(7): 2289-2299.
- [47] 申纯宇, 李翠利, 汤建伟, 等. 纳米氢氧化镁制备及其阻燃应用进展 [J]. 化工进展, 2023, DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1298.
SHEN C Y, LI C L, TANG J W, et al. Preparation of nano magnesium hydroxide and its flame retardant application progress[J]. *Progress in chemical industry*, 2023, DOI:10.16085/j.issn.1000-6613.2023-1298(in Chinese).
- [48] BEALL G W, DURAIA E S M, EL-TANTAWY F, et al. Rapid fabrication of nanostructured magnesium hydroxide and hydromagnesite via microwave-assisted technique[J]. *Powder Technology*, 2013, 234: 26-31.
- [49] 冯冲. 离子交换树脂法制备高纯超细氢氧化镁 [D]. 大连: 大连交通大学, 2009.
FENG C. Preparation of high purity and ultrafine magnesium hydroxide by ion exchange resin method[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2009 (in Chinese).
- [50] 赵卓雅, 李祥高, 王世荣, 等. 六角片状氢氧化镁 (001) 晶面优先生长条件的研究 [J]. 人工晶体学报, 2014, 43(7): 1611-1619.
ZHAO Z Y, LI X G, WANG S R, et al. Study on the priority growth of (001) plane of hexagonal magnesium hydroxide[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2014, 43(7): 1611-1619 (in Chinese).
- [51] 宋雪雪, 李丽娟, 姬连敏, 等. 纳米及微米级六角片状氢氧化镁的制备 [J]. 盐湖研究, 2018, 26(2): 66-74,80.
SONG X X, LI L J, JI L M, et al. Preparation of nano and micron-sized hexagonal magnesium hydroxide[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2018, 26(2): 66-74,80 (in Chinese).
- [52] 刘春英, 冯锡兰, 李汝奕, 等. 片状氢氧化镁阻燃剂的制备、表面改性及其测试 [J]. 当代化工, 2021, 50(1): 76-79.
LIU C Y, FENG X L, LI R Y, et al. Preparation, surface modification and performance test of lamellar magnesium hydroxide flame retardant[J]. *Contemporary Chemical Industry*, 2021, 50(1): 76-79 (in Chinese).
- [53] 曹雨微, 刘远, 孔会民, 等. $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 低极性晶面选择性生长控制及机理 [J]. 精细化工, 2022, 39(10): 2035-2043.
CAO Y W, LIU Y, KONG H M, et al. Selective growth control and mechanism analysis of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ low-polarity crystal surfaces[J]. *Fine Chemicals*, 2022, 39(10): 2035-2043 (in Chinese).
- [54] GONG L, YAO Z Y, ZHU C M, et al. Synthesis of porous $\text{Mg}(\text{OH})_2$ nanowires for phosphate removal from water[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2023, 676: 132137.
- [55] SHI X Y, CHEN H, SUN Y Z, et al. Effects of flotation reagents on the morphology of magnesium hydroxide: Experimental and simulation study[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2023, 62(23): 9246-9256.

- [56] 陈德宏, 陈鸣才, 曹现福, 等. 氢氧化镁的制备及其表面接枝改性 [J]. *无机盐工业*, 2006, 38(7): 14-17.
CHEN D H, CHEN M C, CAO X F, et al. Preparation of magnesium hydroxide and its surface grafted modification[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2006, 38(7): 14-17 (in Chinese).
- [57] WU J M, YAN H, ZHANG X H, et al. Magnesium hydroxide nanoparticles synthesized in water-in-oil microemulsions[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2008, 324(1/2): 167-171.
- [58] 邹华生, 陈江凡, 陈文标. 油包水微乳液体系的稳定性分析 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(3): 32-36.
ZOU H S, CHEN J F, CHEN W B. Stability analysis of water-in-oil microemulsion system[J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2008, 36(3): 32-36 (in Chinese).
- [59] 戴焰林, 洪玲, 施利毅. 全返混均质乳化法制备纳米氢氧化镁工艺研究 [J]. *化工矿物与加工*, 2003, 32(8): 8-10.
DAI Y L, HONG L, SHI L Y. Study on nanometer magnesium hydroxide powder prepared by full-back-mix and homoemulsification method[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2003, 32(8): 8-10 (in Chinese).
- [60] 段雪, 何静, 赵芸, 等. 一种纳米尺寸氢氧化镁的制备方法: CN1142098C[P]. 2004-03-17.
DUAN X, HE J, ZHAO Y, et al. A preparation method of nanometer size magnesium hydroxide: CN1142098C[P]. 2004-03-17(in Chinese).
- [61] 张梦婷, 白丽梅, 马玉新, 等. 超声辅助水化条件对氢氧化镁分散性的影响 [J]. *非金属矿*, 2020, 43(5): 5-7.
ZHANG M T, BAI L M, MA Y X, et al. Effects of ultrasound-assisted hydration conditions on dispersion of magnesium hydroxide[J]. *Non-Metallic Mines*, 2020, 43(5): 5-7 (in Chinese).
- [62] SUSLICK K S. Sonochemistry[J]. *Science*, 1990, 247(4949): 1439-1445.
- [63] SONG G L, MA S D, TANG G Y, et al. Ultrasonic-assisted synthesis of hydrophobic magnesium hydroxide nanoparticles[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2010, 364(1/2/3): 99-104.
- [64] ALAVI M A, MORSALI A. Syntheses and characterization of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ and MgO nanostructures by ultrasonic method[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2010, 17(2): 441-446.
- [65] 钱鹏, 唐国翌, 宋国林. 超声波辅助制备分散性良好的球形花瓣状氢氧化镁 [J]. *功能材料*, 2014, 45(1): 1117-1121.
QIAN P, TANG G Y, SONG G L. Ultrasonic-assisted preparation of well-dispersed magnesium hydroxide with spherically flower shape[J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(1): 1117-1121 (in Chinese).
- [66] MOMENIAN H R, GHOLAMREZAEI S, SALAVATI-NIASARI M, et al. Sonochemical synthesis and photocatalytic properties of metal hydroxide and carbonate (M: Mg, Ca, Sr or Ba) nanoparticles[J]. *Journal of Cluster Science*, 2013, 24(4): 1031-1042.
- [67] KHANJANI S, MORSALI A. Ultrasound-promoted coating of silk yarn with different morphology of magnesium hydroxide nanostructures[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2013, 20(2): 729-733.
- [68] KHALED M S, SHAUKAT S, ROLA M A S, et al. Microwave assisted preparation of magnesium hydroxide nano-sheets[J]. *American Journal of Nanomaterials*, 2014, 2(2): 21-25.
- [69] 宋云华, 陈建铭, 刘立华, 等. 超重力技术制备纳米氢氧化镁阻燃剂的应用研究 [J]. *化工矿物与加工*, 2004, 33(5): 19-23.
SONG Y H, CHEN J M, LIU L H, et al. Preparation of nano-sized magnesium hydroxide as a flame retardant by high gravity technology and its application[J]. *Industrial Minerals and Processing*, 2004, 33(5): 19-23 (in Chinese).
- [70] YANG H J, CHU G W, ZHANG J W, et al. Micromixing efficiency in a rotating packed bed: experiments and simulation[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(20): 7730-7737.
- [71] YI F, ZOU H K, CHU G W, et al. Modeling and experimental studies on absorption of CO_2 by Benfield solution in rotating packed bed[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 145(3): 377-384.
- [72] TAI C Y, TAI C T, CHANG M H, et al. Synthesis of magnesium hydroxide and oxide nanoparticles using a spinning disk reactor[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2007, 46(17): 5536-5541.
- [73] SUN Q, CHEN B, WU X, et al. Preparation of transparent suspension of lamellar magnesium hydroxide nanocrystals using a high-gravity reactive precipitation combined with surface modification[J]. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2015, 54(2): 666-671.
- [74] 杜以波. 均质流体法制备纳米氢氧化镁: CN1332116A[P]. 2002-01-23.
DU Y B. Preparation of nanometer magnesium hydroxide by homogeneous fluid method: CN, 1332116A[P]. 2001.08. 20(in Chinese).
- [75] 赵建海, 李毓, 高富, 等. 撞击流制备高纯纳米氢氧化镁技术研究 [J]. *无机盐工业*, 2007, 39(8): 22-24.
ZHAO J H, LI Y, GAO F, et al. Research on preparation technology of high purity nano-sized magnesium hydroxide by impinging stream[J]. *Inorganic Chemicals Industry*, 2007, 39(8): 22-24 (in Chinese).
- [76] WANG P P, LI C H, GONG H Y, et al. Morphology control and growth mechanism of magnesium hydroxide nanoparticles via a simple wet precipitation method[J]. *Ceramics International*, 2011, 37(8): 3365-3370.
- [77] 申红艳, 刘有智. 纳米氢氧化镁的超重力沉淀法制备及沉降性能 [J]. *化工进展*, 2016, 35(10): 3281-3287.
SHEN H Y, LIU Y Z. Preparation of magnesium hydroxide nanoparticles by high gravity precipitation method and their settlement property[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(10): 3281-3287 (in Chinese).

- [78] LI X, MA C, ZHAO J Y, et al. Preparation of magnesium hydroxide nanoplates using a bubbling setup[J]. *Powder Technology*, 2010, 198(2): 292-297.
- [79] 练佳佳, 唐庆杰, 贾盼, 等. MgCl_2 添加方式对 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 形貌及粒度分布的影响 [J]. 功能材料, 2015, 46(10): 10039-10041.
LIAN J J, TANG Q J, JIA P, et al. Effect of the means of adding MgCl_2 on the morphology and particle size distribution of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ [J]. *Journal of Functional Materials*, 2015, 46(10): 10039-10041 (in Chinese).
- [80] SONG X F, SUN S Y, ZHANG D K, et al. Synthesis and characterization of magnesium hydroxide by batch reaction crystallization[J]. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, 2011, 5(4): 416-421.
- [81] 申红艳, 刘有智, 马鹏程, 等. 不同制备方法对纳米氢氧化镁性能的影响 [J]. 化工进展, 2016, 35(4): 1149-1153.
SHEN H Y, LIU Y Z, MA P C, et al. Effect of different preparation methods on the properties of magnesium hydroxide nanoparticles[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2016, 35(4): 1149-1153 (in Chinese).
- [82] 孙淑英, 宋兴福, 张登科, 等. 废水水氯镁石反应结晶制备高纯氢氧化镁 [J]. 环境科学与技术, 2010, 33(增刊 2): 298-300.
SUN S Y, SONG X F, ZHANG D K, et al. Preparation of high purity magnesium hydroxide by reactive crystallization of waste bischofite[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 33(Sup 2): 298-300 (in Chinese).
- [83] 曹俊雅, 宋昱霖, 孙振华, 等. 阳离子型聚丙烯酰胺对含超细氢氧化镁浆料过滤性能的影响 [J]. 化工进展, 2020, 39(7): 2775-2781.
CAO J Y, SONG Y L, SUN Z H, et al. Effect of cationic polyacrylamide on the filtration performance of ultrafine magnesium hydroxide[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(7): 2775-2781 (in Chinese).
- [84] 范天博, 姜宇, 刘露萍, 等. 一步水热法合成六方片状氢氧化镁及其生长习性分析的研究 [J]. 人工晶体学报, 2017, 46(12): 2319-2325.
FAN T B, JIANG Y, LIU L P, et al. Crystal growth habit of hexagonal flake magnesium hydroxide synthesized by one-step hydrothermal method[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2017, 46(12): 2319-2325 (in Chinese).
- [85] YUAN Q H, LU Z W, ZHANG P X, et al. Study of the synthesis and crystallization kinetics of magnesium hydroxide[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2015, 162: 734-742.
- [86] 范天博, 李雪, 马超, 等. 氯化镁溶液氨气鼓泡反应制备纳米氢氧化镁 [J]. 化工学报, 2010, 61(11): 3025-3032.
FAN T B, LI X, MA C, et al. Preparation of magnesium hydroxide nanoparticles by bubbling gaseous ammonia into magnesium chloride solution[J]. *CIESC Journal*, 2010, 61(11): 3025-3032 (in Chinese).
- [87] 李振兴, 陈建铭, 宋云华. 棒状氢氧化镁的合成 [J]. 无机化学学报, 2010, 26(1): 8-12.
LI Z X, CHEN J M, SONG Y H. Rod-like magnesium hydroxide preparation[J]. *Chinese Journal of Inorganic Chemistry*, 2010, 26(1): 8-12 (in Chinese).
- [88] JIANG W J, HUA X, HAN Q F, et al. Preparation of lamellar magnesium hydroxide nanoparticles via precipitation method[J]. *Powder Technology*, 2009, 191(3): 227-230.
- [89] BALDUCCI G, BRAVO DIAZ L, GREGORY D H. Recent progress in the synthesis of nanostructured magnesium hydroxide[J]. *CrystEngComm*, 2017, 19(41): 6067-6084.
- [90] 杨喜云, 于培峰, 徐徽, 等. 盐湖卤水制备棒状氢氧化镁 [J]. 中南大学学报(自然科学版), 2014, 45(1): 25-32.
YANG X Y, YU P F, XU H, et al. Preparation of rod-like magnesium hydroxide from brine[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2014, 45(1): 25-32 (in Chinese).
- [91] WENG C J, SONG X W, ZHU H B, et al. Influence of alkali metal ions (K^+ and Na^+) on the preparation of magnesium hydroxide hexagonal flakes[J]. *RSC Advances*, 2024, 14(21): 14640-14647.
- [92] 西部镁业五个“世界第一”产品远销海外 [C]//中国无机盐工业协会镁化合物分会, 河南省巩义市人民政府, 河北科技大学. 2018 年镁化合物行业年会暨行业发展论坛论文集. 西部矿业集团, 2018.
Five "World first" products of magnesium industry in western China are exported overseas [C]//Magnesium Compound Branch of China Inorganic Salt Industry Association, Gongyi Municipal People's Government of Henan Province, Hebei University of Science and Technology. Proceedings of 2018 Magnesium Compound Industry Annual Meeting and Industry Development Forum. Western Mining Group, 2018(in Chinese).
- [93] 西部矿业积极融入世界级盐湖产业基地建设 [J]. 中国有色冶金, 2021, 50(5): 84.
Western mining industry actively integrates into the construction of world-class salt lake industrial base[J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2021, 50(5): 84 (in Chinese).
- [94] LEBLANC J L. Filled polymers: science and industrial applications[M]. CRC Press, 2009.