

DOI: 10.11949/0438-1157.

雾化反应器制备氢氧化镁传质性能研究

于红蕾, 梁慧, 房信, 王嘉辉, 范丽华

(沈阳工业大学化工装备学院, 辽宁 辽阳 111000)

摘要: 通过理论模型与实验验证相结合, 探讨了雾化反应器制备氢氧化镁的传质性能。基于表面更新理论建立了传质模型, 预测精度较好 (误差 $<10\%$)。实验结果表明, 液气流量比和溶液浓度显著影响传质效率, 最佳条件为液体流量 60 L/h, 氨气流量 300 L/h (液气流量比 2×10^{-3})、氯化镁溶液浓度 25 wt%、温度 308 K, 此时传质系数 (K_{LA}) 达到最大值 $2.53 \text{ kmol}\cdot\text{kPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$ 。雾化反应器在 30 min 内转化率达 77.61%, 较鼓泡反应器提升 8.2%。反应时间缩短 40 min, 产物氢氧化镁粒径更小 (D_{50} 降低 74.12%)、分布更窄, 晶体结构稳定。延长雾化时间至 90 分钟可获得规则六角片状氢氧化镁, 提高分散性。本研究可为相关工艺优化提供基础理论与数据参考。

关键词: 反应器; 传质; 结晶; 雾化; 氢氧化镁; 过程强化

中图分类号: TQ132.2

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-13

Mass transfer characteristics of an atomizing reactor in the preparation of magnesium hydroxide

YU Honglei, LIANG Hui, FANG Xin, WANG Jiahui, FAN Lihua

(College of Chemical Equipment, Shenyang University of Technology, Liaoyang 111000, Liaoning, China)

Abstract: The mass transfer performance of an atomizing reactor for magnesium hydroxide preparation was investigated through a combination of theoretical modeling and experimental validation. A mass transfer model based on surface renewal theory was developed and exhibited good predictive capability, with an error below 10%. The results demonstrated that the liquid - gas flow ratio and magnesium chloride solution concentration significantly influenced the mass transfer efficiency. Optimal conditions were obtained at a liquid flow rate of 60 L h⁻¹, an ammonia flow rate of 300 L h⁻¹ (liquid - gas flow ratio of 2×10^{-3}), a MgCl₂ solution concentration of 25 wt%, and a temperature of 308 K. Under these conditions, the volumetric mass transfer coefficient (K_{LA}) reached a maximum value of $2.53 \text{ kmol}\cdot\text{kPa}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$. The atomizing reactor achieved a conversion of 77.61% within 30 min, representing an 8.2% increase compared with a conventional bubble reactor, while reducing the reaction time by 40 min. Moreover, the obtained Mg(OH)₂ exhibited a significantly smaller particle size (D_{50} reduced by 74.12%), narrower size distribution, and stable crystal structure. Extending the atomization time to 90 min resulted in well-defined hexagonal plate-like Mg(OH)₂ with improved dispersion. This research can provide fundamental theories and data references for the optimization of related processes.

Keywords: reactor; mass transfer; crystallization; atomization; magnesium hydroxide; process intensification

收稿日期: 2026-02-10 修回日期: 2026-06-01

通信作者: 于红蕾(1994—),女,博士,讲师, hlyu@sut.edu.cn

第一作者: 于红蕾(1994—),女,博士,讲师, hlyu@sut.edu.cn

基金项目: 辽宁省博士科研启动基金项目(2025-BS-0315)

引用本文: 于红蕾, 梁慧, 房信, 王嘉辉, 范丽华. 雾化反应器制备氢氧化镁传质性能研究[J]. 化工学报, XXXX, XX(XX): 1-13

Citation: YU Honglei, LIANG Hui, FANG Xin, WANG Jiahui, FAN Lihua. Mass transfer characteristics of an atomizing reactor in the preparation of magnesium hydroxide[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(XX): 1-13

引 言

在全球能源结构转型与生态环境保护的双重背景下,资源高效利用与绿色化工技术发展成为核心议题。青海盐湖作为锂、镁等战略资源的重要储备基地,在提锂产业快速发展的同时,每年产生超6000万立方米的氯化镁副产物,形成“镁灾”现象,对区域生态环境构成严重威胁,合理回收利用卤水中的镁资源^[1,2]制备高附加值氢氧化镁产品,成为保障盐湖生态安全与产业可持续发展的关键举措。氢氧化镁作为环保阻燃剂、废水处理剂等高端材料,市场需求持续增长,进一步推动了盐湖镁资源高值化、精细化利用的研究热潮^[3,4]。

目前,氨气沉淀法制备氢氧化镁的主流技术以鼓泡反应器为核心设备,但该传统装置存在明显技术瓶颈:气泡易合并导致气液接触面积有限,传质效率低下;液相返混严重、停留时间分布不均,反应转化率受限;微观混合效果差,产物粒径偏大、分布不均,难以满足高端应用要求^[5-7]。为突破上述限制,过程强化技术成为化工反应优化的关键方向,其中雾化技术凭借独特优势脱颖而出^[8-11]。雾化可将液相分散为微米级雾滴,大幅增大气液接触比表面积,显著强化传质与混合,缩短反应时间,为氢氧化镁高效、可控制备提供了新路径^[12-14]。

从传质理论来看,气液传质过程的强化始终是化工反应优化的核心。传统双膜理论适用于界面相对稳定的传质系统,而雾化反应器内液滴高速运动、界面持续扰动、表面快速更新,气液界面处于高度不稳定状态,双膜理论难以精准描述其复杂传质行为^[15]。Danckwerts表面更新理论通过引入表面更新速率参数,更贴合高度湍动条件下的传质动力学特征,为雾化反应器传质模型建立提供了重要理论支撑^[16]。当前,氨气-氯化镁体系的雾化反应机制、传质动力学规律、工艺参数与晶体形貌的协同调控等基础研究尚不完善,缺乏精准理论模型与系统工艺指导,制约了雾化技术在氢氧化镁制备中的工业化推广。

在镁基材料制备与改性研究领域,针对氢氧化镁的形貌控制与性能优化已开展大量探索。姜天彪^[17]等针对盐湖镁热解炉体系,开展了六水氯化镁溶液的雾化特性研究,揭示了操作参数对雾滴粒径、分布及运动行为的影响规律,为盐湖镁资源雾化利用提供了基础数据支撑;范天博等^[18]通过一步

水热法合成六方片状氢氧化镁,揭示了晶体生长习性与工艺参数的关联;刘志启等^[19]采用气液接触法制备球形氢氧化镁,为产物形貌调控提供了新思路。然而,在氢氧化镁制备领域,现有研究多聚焦单一工艺条件对产物形貌的影响,尚未形成传质过程与晶体生长协同调控的系统方法。传统鼓泡法反应温度高、能耗大、产物粒径可控性差;新型超重力、撞击流等设备虽能强化传质,但存在结构复杂、能耗较高、放大效应不明确等问题。相比之下,雾化反应器结构简单、气液接触高效、反应条件温和,在低能耗、规模化制备高纯六角片状氢氧化镁方面具有显著优势。

综上,针对盐湖镁资源高值化利用需求与传统反应器缺陷,本研究以雾化反应器制备氢氧化镁的传质性能为核心,基于表面更新理论建立传质模型,系统探究液气流量比、氯化镁溶液浓度、反应温度等关键参数对体积传质系数 K_L 的影响规律;对比传统鼓泡反应器,分析雾化技术对转化率、反应时间、产物粒径与形貌调控的影响;研究雾化时间对氢氧化镁晶体生长及六角片状形貌形成过程的作用规律。

1 实验

1.1 实验材料和实验装置

$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ 纯度 $\geq 95.5\%$,青海西部镁业有限公司提供;氨气纯度 $\geq 99.9\%$,沈阳盛兴气体有限公司提供;去离子水,实验室自制。

雾化实验装置由液体供应系统、气体供应系统、雾化反应器和检测模块组成,实验流程的示意图见图1。雾化反应器腔体为圆柱形亚克力容器,内径1.3 m,有效高度2.0 m。实验装置采用双路独立气路与液路设计:氯化镁溶液经隔膜泵由喷嘴液相入口进入,压缩空气经空压机由喷嘴气相入口进入,二者在气液双流体雾化喷嘴内部混合后,从反应器顶部向下雾化喷出;反应氨气由独立管路从反应器底部直接通入腔体,不进入雾化喷嘴,与自上而下沉降的微米级雾滴形成逆流接触,实现高效气液传质与反应。预先配置的氯化镁溶液存放在雾化容器中,隔膜泵将其通过输液管道输送至两相流喷嘴。压缩空气由空气压缩机提供,经减压阀、气压表与转子流量计调节后,作为雾化气体进入气液双流体雾化喷嘴的气体通道,与氯化镁溶液在喷嘴

内部混合腔混合并实现雾化,随后从喷嘴出口喷入雾化反应器。通过转子流量计和压力表监测两相的流量和压力,实验过程中采用高速摄像机对雾化形态进行实时监测,确保雾化连续、均匀且稳定,保证所有传质实验均在合格的雾化状态下完成。本文重点研究反应器传质性能,高速摄像机仅用于过程监控,未在结果中展示相关图像与数据。

喷嘴的最大处理能力为100 L/h。主要由喷嘴主体、液体帽、空气帽组成,主体采用不锈钢材料。液体帽设有一个液体入口和两个注射孔。液体入口的直径为5.0 mm,而注射孔的直径为1.5 mm,且

共有四个注射孔,直径为2.0 mm。气体帽的出口直径也为2.0 mm。气液两相混合物通过液体帽的注射孔进入混合室,最终通过气体帽的出口喷出,实现雾化。

本实验通过调节雾化器的供气压力来控制雾化效果。一般而言,雾化压力越高,产生的液滴平均粒径(Sauter mean diameter, d_{32})越小,液滴的初始动能越大。这将直接影响反应过程中的传质界面特性,特别是表面更新速率(S),其具体影响将在后续的传质模型中进行讨论。

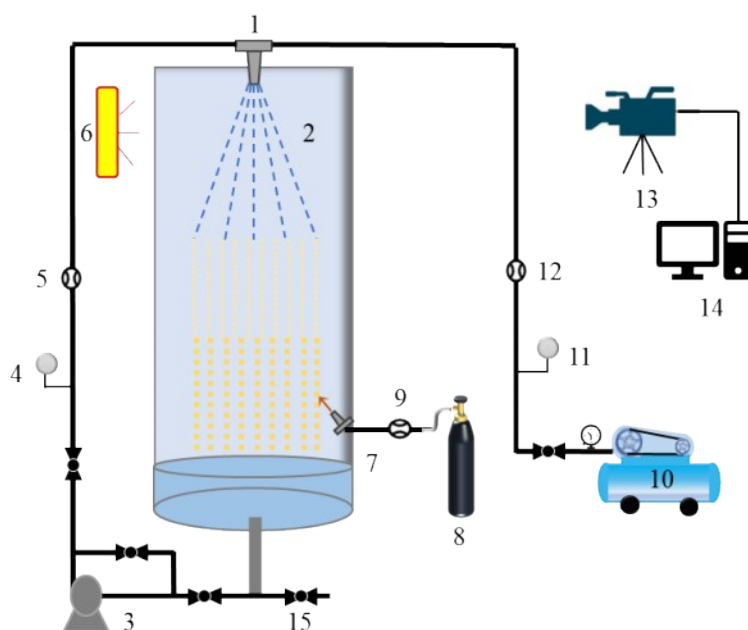


图1 实验流程示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental procedure

注:1—空气雾化喷嘴;2—反应器;3—隔膜泵;4—液路压力表;5—液路转子流量计;6—补光灯;7—单相流气体喷嘴;8—氨气瓶;9—气路转子流量计;10—空气压缩机;11—气路压力表;12—气路转子流量计;13—高速摄像机;14—计算机;15—阀门

该装置由氨气管路、供液管路、供气管路、检测装置等组成。设备的具体参数详见表1。

1.2 实验方法

将六水氯化镁溶解于去离子水中,并经滤膜过滤以去除不溶性杂质。随后,将10 L、浓度为1.5 mol/L的氯化镁溶液加入储液罐中,通过计量泵以恒定流量(1 L/h)输送至雾化反应器,并在加热装置作用下升温至308 K。实验过程中,供液压力控制在0.2 - 0.5 MPa,雾化压缩空气压力控制在0.2 - 0.5 MPa。

氨气作为独立反应气路,由反应器底部通过单相气体喷嘴引入,不进入雾化喷嘴系统。氨气流量

由质量流量控制器调节为300 L/h,以维持反应体系中氨气的相对过量状态。在该条件下,结合液体进料流量(1 L/h),体系液气流量比(L/Q)约为 3.3×10^{-3} 。

反应过程中,气液两相在反应器内充分接触并发生反应。氨气通入结束后,保持体系温度及雾化条件不变,继续循环雾化30 min以促进反应完全进行。

反应结束后,对产物进行过滤分离,并用去离子水充分洗涤滤饼直至滤液中无氯离子。最后,将滤饼置于台式鼓风干燥箱中于(请补充具体温度,如353 K)干燥10 h,得到 $Mg(OH)_2$ 产物。

表1 主要实验设备
Tab.1 Main experimental equipment

系统	设备	功能	型号参数
供液管路	隔膜泵	为液路提供压力	DP-160
	转子流量计	测量溶液的流量	DK800 10~100 L/H
	液压表	测量溶液压力	Y60BF 1MPa
供气管路	空压机	提供压缩空气	VW-0.36/8
	转子流量计	测量空气流量	DK800 200~2000L/h
	气压表	测量空气压力	Y60BF 1.6 MPa
氨气管路	雾化喷嘴	雾化液体	D 系列
	单相流喷嘴	输送氨气	Spraying Systems Co. TG 系列
	氨气流量计	测量氨气流量	Alicat MCS 系列 0 ~ 500 L/h
其他	亚克力雾化容器	雾化容器	直径 1.3 m, 高 2.0 m
	计算机	图像保存及处理	
	PVC 阀门	控制流量及压力	
	PVC 管路	输送流体	
	喷嘴到液面距离	控制雾化过程与反应效率	1.8m

反应前后 Mg^{2+} 浓度采用梅特勒-托利多 S500-B 多参数测试仪 (Mg^{2+} 离子选择性电极) 测定。以 Mg^{2+} 标准溶液绘制标准曲线 ($R^2 > 0.999$), 样品经离心过滤、 $\text{pH}=9\sim 10$ 缓冲体系校正干扰后平行测定 3 次, 加标回收率 96%~99%, $\text{RSD} < 1.5\%$, 保证定量结果准确可靠。 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的 XRD 由 Cu-K α 辐射的 X 射线衍射仪 (D8X 射线衍射计, Bruker, Germany, XRD) 在 $5^\circ\sim 80^\circ$ 的扫描范围内分析 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的 XRD 图谱; 使用德国 ZEISS GeminiSEM 300 扫描电子显微镜 (SEM) 观察 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 的粒度和形态; 使用丹东百特 BT-9000 激光粒度分析仪测量粒度。

反应前后 Mg^{2+} 浓度采用梅特勒-托利多 S500-B 多参数测试仪 (Mg^{2+} 离子选择性电极) 测定。以 Mg^{2+} 标准溶液绘制标准曲线 ($R^2 > 0.999$), 样品经离心过滤、 $\text{pH}=9\sim 10$ 缓冲体系校正干扰后平行测定 3 次, 加标回收率 96%~99%, $\text{RSD} < 1.5\%$, 保证定量结果准确可靠。通过式 (1) 计算 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 转化率。

(1)

式中, ϕ 为 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 转化率; C_1 为反应前 Mg^{2+} 摩尔浓度, mol/L; C_2 为反应后 Mg^{2+} 摩尔浓度, mol/L。

1.3 传质模型的建立

在雾化反应器中, 雾滴与氨气的流动方式决定了气液的接触形式, 主要包括并流式、逆流式和混流式三种。反应器采用气液逆流接触方式: 氯化镁溶液经喷嘴雾化后, 雾滴与雾化压缩空气一同由上向下运动; 反应氨气自反应器底部向上逆流扩散, 微米级雾滴在沉降过程中与上升氨气直接接触反

应, 完成高效传质与化学反应。这种方式使雾滴的停留时间较长, 有利于热量和物质的传递, 从而提高雾化效率。

1.3.1 氨气与氯化镁溶液发生的化学反应 NH_3 与 MgCl_2 溶液中发生的化学反应如下所示^[20]:

(2)

(3)

上述反应的反应速率可由以下二级反应速率方程得到^[21, 22]:

(4)

当满足式 (5) 时, 上述反应可视为拟一级反应^[23, 24]:

(5)

在本研究中, 式 (5) 的左侧比右侧小 100 倍以上。因此, 拟一级反应的速率常数可以表示为:

(6)

1.3.2 传质机理模型 为对雾化反应器雾滴控制的传质过程进行理论分析和预测, 必须建立可靠的数学模型。

本研究采用“液膜控制”作为传质模型的核心理论假设, 主要基于以下三方面依据: 首先, 氨气 (NH_3) 是一种高溶解度气体 (亨利常数约 $0.75 \text{ atm}\cdot\text{m}^3/\text{mol}$)。根据双膜理论, 高溶解度气体的传质过程主要由液膜阻力控制, 因为其气相传质阻力远小于液相传质阻力。其次, 本体系涉及 NH_3 与 Mg^{2+} 反应生成氢氧化镁 ($\text{Mg}(\text{OH})_2$) 沉淀, 该沉淀反应的溶度积常数极小 ($K_{\text{sp}} \approx 1.5 \times 10^{-11}$), 可视为瞬时反应。这种

伴有瞬时沉淀的气体吸收过程,相当于在液膜内形成了高效的“化学陷阱”,使得吸收速率由反应物在液膜中的扩散速率控制,进一步强化了液膜控制机制。最后,通过八田数的理论判据进行分析,由于反应速率常数 k_2 极大,计算得到的Ha数远大于3,表明该反应属于快速反应,且主要发生在液膜内,符合液膜控制的经典条件。

对于传质系数的计算,本研究采用 Danckwerts 的表面更新模型而非传统的双膜模型。经典的双膜理论适用于气液界面相对稳定的系统,而本研究的雾化反应器通过将液体分散为大量高速运动的微米级液滴,实现了极致的界面扰动和表面更新。液滴的生成、运动、碰撞和合并过程,使得气液界面处于高度动态更新状态,液面由大量具有不同“寿命”的液体微元构成。表面更新理论能更准确地描述此种高度湍动条件下的传质动力学。

(1)模型假设

1)假设氨气以外的气相组分既不溶于水也不与氯化镁溶液发生化学反应^[22]。

2)考虑到雾化反应器内气体分子的布朗扩散作用^[25],导致雾滴表面的快速更新,因此使用表面更新模型来计算传质系数^[16]。

3)由于氯化镁溶液对氨气的吸收过程典型地受到液膜控制,因此总相传质系数将依据液相传质系数进行计算^[22]。

4)传质总面积为雾滴表面积之和。

5)由于反应器内的氨气速度远远小于雾滴速度,因此氨气与雾滴的相对速度视为雾滴速度^[17]。

(2)数学模型

模型基于 Danckwerts 的表面更新理论^[26-28],该理论是本研究的传质动力学基础^[29]。液相传质系数由下式给出:

$$K_L = \sqrt{D \cdot S_1} \quad (7)$$

如式(7)所示,总传质系数 K_{La} 与表面更新速率 S 的平方根成正比。表面更新速率 S (单位: s^{-1})是本传质模型的关键参数,其物理意义是单位时间内被新鲜流体微元更新的表面积的比例。该参数综合表征了相界面的动态变化剧烈程度。在本研究的雾化反应器中, S 的大小主要由雾化器产生的液滴群的动力学特性(如液滴平均直径、速度、气液相对速度)决定。由于 S 的直接测量极其困难,在本文中将其视为一个待拟合的模型参数,通过实验测得的 K_{La} 反算得到,以量化不同操作条件对传质过程的强化

效果。因此,在本研究中,通过调节雾化压力来改变液滴平均速度 u_L 和索特平均直径 D_{vs} ,进而直接调控表面更新速率 S ,最终影响传质系数

D :氨气在溶液中的扩散系数 [m^2/s]。 S :表面更新速率 [$1/s$]。这是模型的关键动态参数,表征液面更新的快慢。雾化过程中,液滴速度越快、粒径越小,其表面更新就越剧烈。据此建立物理关系:

$$S \propto \frac{u_L}{D_{vs}} \quad (8)$$

u_L 雾滴平均速度 [m/s]。可通过高速摄像机图像分析获得。 D_{vs} 雾滴索特平均直径 [m]。可通过激光粒度仪或图像分析测量。将实验关联式(8)代入理论核心式(7),得到传质系数与实验参数的明确关系:

$$K_L \propto \sqrt{D \cdot \frac{u_L}{D_{vs}}} \quad (9)$$

该式表明,传质系数由物性(D)和可测量的雾滴动力学参数(u_L, D_{vs})共同决定。工程上更关心体积传质系数 K_L 。它由传质系数 K_L 和比表面积 a 共同决定。比表面积 a :对于雾化系统,其与液体流量和雾滴粒径相关,关系式为:

$$a \propto \frac{Q_L}{D_{vs}^2} \quad (10)$$

Q_L :液体体积流量 [m^3/s]。由实验中的转子流量计直接测量。最终模型:综合式(9)和式(10),得到最终的半经验模型:

$$K_L a = k \cdot \frac{Q_L}{D_{vs}^2} \cdot \sqrt{D \cdot u_L} \quad (11)$$

k :为模型常数,综合了比例系数、几何因子等,需通过实验数据拟合确定。为进一步说明雾滴内部传质过程及模型构建思路,建立了雾滴传质模型示意图,如图2所示。

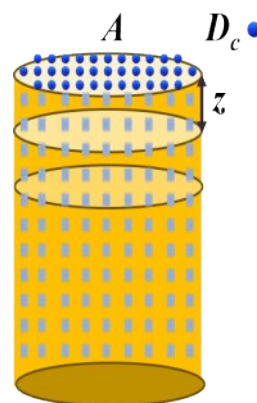


图2 雾滴传质模型示意图

Fig.2 Schematic diagram of the mass transfer model in droplets

2 结果与讨论

2.1 氢氧化镁生长机理分析

成核与生长理论:氢氧化镁在水溶液中的结晶过程遵循经典的成核-生长理论。在过饱和溶液中, Mg^{2+} 和 OH^- 离子首先通过均相成核或异相成核形成晶核,随后晶核通过表面反应和扩散过程生长为晶体颗粒。过饱和度是控制成核速率和晶体生长速率的关键因素,过饱和度越高,成核速率越快,生成的晶体粒径越小。

片状形貌的形成机制:本实验制备的氢氧化镁呈现典型的六角片状形貌(图4),这与其晶体结构密切相关。氢氧化镁属于三方晶系,具有层状结构, Mg^{2+} 位于 OH^- 形成的八面体中心,层与层之间通过氢键连接。在晶体生长过程中,沿[001]晶向的生长速率远低于沿[100]和[010]晶向,导致晶体优先沿二维方向扩展,最终形成片状形貌。

雾化过程对晶体生长的影响:雾化技术将溶液破碎为微米级液滴,极大地增加了气液接触面积,提高了传质速率。同时,液滴的快速运动和表面更新促进了过饱和度的均匀分布,有利于形成粒径分布均匀、形貌规整的氢氧化镁晶体。此外,雾化过

程限制了晶体在反应器中的停留时间,有效控制了晶体生长,避免了过度生长和团聚现象。

沉淀反应动力学:氢氧化镁的沉淀反应为瞬时反应,反应速率受传质过程控制。氨气在液滴表面的快速吸收和扩散,以及 Mg^{2+} 在液滴内部的扩散,共同决定了晶体生长的最终形貌和粒径。在雾化反应器中,传质过程得到了显著强化,有利于生成小粒径、高比表面积的氢氧化镁产物。

与气-液-固生长机制的对比:本工作通过雾化辅助沉淀法,成功制备了由晶体学各向异性主导的六角片状氢氧化镁。这与合成一维纳米材料常见的气-液-固机制形成鲜明对比。为了进一步阐明氢氧化镁晶体的尖端生长过程及其与VLS机制的区别,建立了晶体生长过程示意图,如图3所示。在典型的VLS生长过程中,随着氨气的持续供给,晶须不断生长,同时将微米液滴抬升,直至生长停止,最终微米液滴留在晶须的顶端,形成VLS机制特有的晶须形态。而在本研究的 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 沉淀体系中,微米液滴仅作为强化传质的反应微反应器,其内部发生的是均相的成核与生长过程,反应路径和热力学驱动力从根本上决定了二维片状形貌的生成,与VLS机制有本质区别^[18,30]。

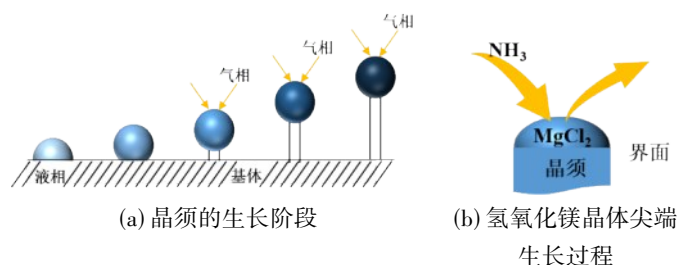


图3 合成 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 尖端生长过程示意图

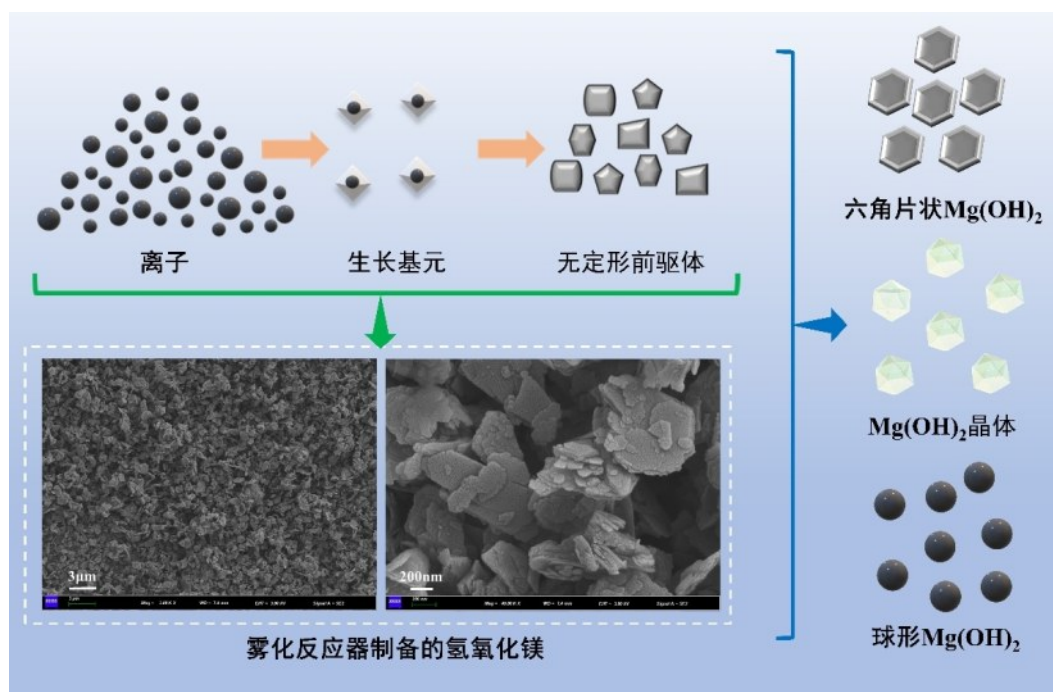
Fig.3 Schematic illustration of the tip-growth process of $\text{Mg}(\text{OH})_2$

本文中镁水合物生长的碱性环境是由氨气提供,氨气的扩散增加了溶液的pH,以提供镁水合物沉淀所需的 OH^- 。在雾化喷嘴的作用下,氨气在含有镁离子的微米液滴中的连续扩散使微米液滴在反应体系中同时达到最高的pH,满足镁水合物逐渐生长的基本条件。图4显示了氢氧化镁形成示意图及反应时间为30 min时雾化反应器制备的氢氧化镁电镜图像。此时,镁水合物的晶核开始在溶液中全面形成,同时晶体进行深度结晶。由于重力的作用,镁水合物晶核和表面形成的晶体逐渐沉降。水合镁是一种表面极性强的化合物。为了在不受外

界干扰的情况下降低镁水合物的表面极性,以及 Cl^- 相对较大的空间位阻,生长单元选择O(或OH)最多的晶面进行键合^[19]。

2.2 传质模型验证

在本章实验条件下,采用了14组有效的实验数据,基于所建立的传质机理模型对雾化反应器内总体传质系数 K_{La} 进行预测,并与实验测定结果进行对比验证。模型参数的确定基于部分实验数据拟合,其余实验数据用于模型验证,以评估模型的预测能力与适用性。为定量评价模型预测精度,采用决定系数(R^2)及相对误差(relative error, RE)作为评

图4 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 生长示意图Fig.4 Schematic illustration of $\text{Mg}(\text{OH})_2$ growth

价指标。其中,相对误差定义为:

(12)

其中, $K_L a_{pred}$ 和 $K_L a_{exp}$ 分别表示模型预测值与实验测量值。

图5给出了模型预测值与实验值的对比关系及误差分布情况。从图中可以看出,所有数据点均分布于对角线附近,表明模型预测值与实验值具有良好的一致性。统计结果显示,在所考察工况范围内,模型预测结果的决定系数 R^2 为 0.96,说明模型能够较好地解释实验数据的变化趋势;同时,大部分数据点的相对误差小于 10%,表明模型具有较高的预测精度。

此外,对预测残差(即和 $K_L a_{exp}$)进行分析发现,其在零值附近呈随机分布,未表现出明显的系统性偏差,进一步说明模型在当前研究范围内具有较好的可靠性。

在后续传质性能影响因素分析中,模型计算结果与实验数据变化趋势保持一致,进一步验证了该模型在描述雾化反应器中氨气-氯化镁溶液体系传质行为方面的适用性。

需要说明的是,由于模型中部分参数(如表面更新速率 S 及动力学常数 k)仍依赖实验数据进行标定,本文所建立模型主要适用于本研究所涉及的操作条件范围,其在更广泛工况下的外推能力仍有

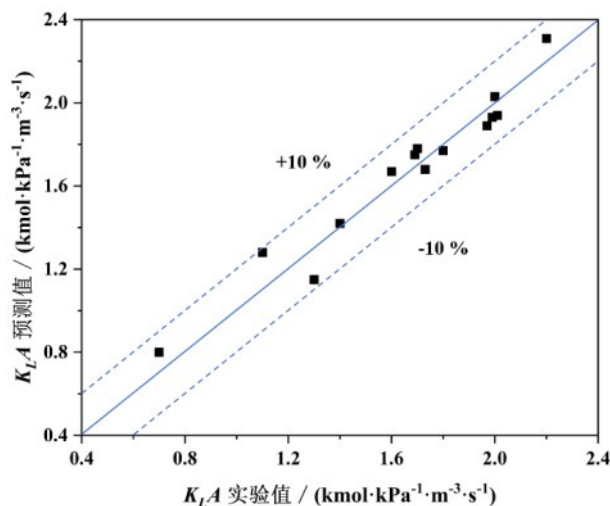
待进一步研究。

为明确液滴尺寸、比表面积及反应动力学对传质效率的贡献权重,基于建立的传质模型(式11)进行定量分解^[31]。通过固定两项参数、改变第三项参数的控制变量法分析表明:液滴索特平均直径(D_{vs})对 $K_L a$ 的影响权重最大(贡献占比 42%),当 D_{vs} 从 50 μm 减小至 20 μm 时, $K_L a$ 从 1.21 $\text{kmol} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$ 提升至 2.38 $\text{kmol} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$,这归因于液滴粒径减小导致比表面积(a)显著增大(式10);液滴平均速度(u_L)的贡献占比为 35%, u_L 从 0.5 m/s 提升至 1.2 m/s 时,表面更新速率(S)同步增加,进而强化液相传质系数(K_L);反应动力学常数(k)的贡献占比为 23%,其影响通过溶液浓度与温度调控实现,与 2.2.1 节中溶液浓度和温度对 $K_L a$ 的影响趋势一致。该定量分解结果表明,优化雾化参数以减小液滴尺寸、提高液滴运动速度是强化传质的核心路径,为雾化反应器的结构设计与工艺优化提供了明确方向。

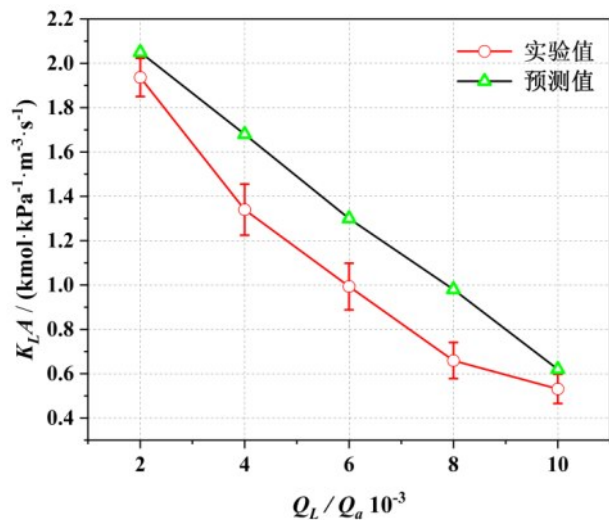
2.2.1 传质性能影响因素分析 (1)液气流量比的影响

在 1.2 节所述的基准实验条件下,考察了液气流量比对 $K_L a$ 的影响,结果如图 6 所示。

图 6 为雾化反应器中液气流量比对 $K_L a$ 的影响。可以看出,当液气流量比从 2×10^{-3} 增加到 10×10^{-3}

图5 K_{LA} 预测值与实验值的误差Fig.5 Error of predicted vs. experimental K_{LA} values

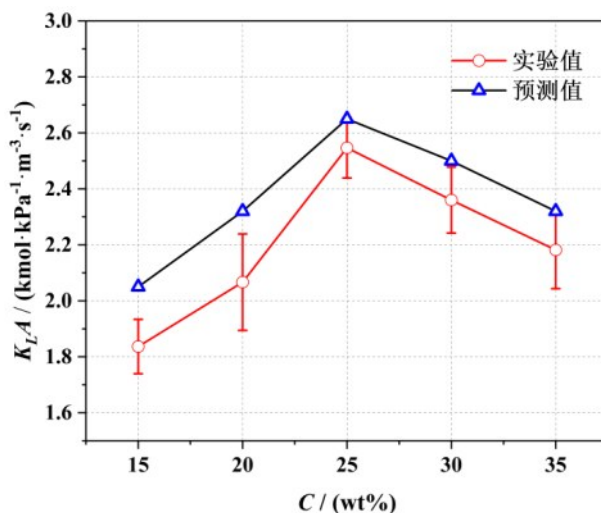
时, K_{LA} 明显降低。从本研究中发现液气流量比 Q_L/Q_G 增加时, 雾滴尺寸呈指数增大的趋势, 因此雾化性能降低, 气体与液滴之间的接触面积减小。粒径变大的雾滴使得液体表面更新速率降低, 进而影响了液相传质。此外, 从图中发现计算值 K_{LA} 在合理的误差内均高于实验值, 这是因为在实验过程中, 雾化空气中含有其它气体会参与反应, 进而影响实验结果, 以及原料未能完全反应。因此, 在本研究中, 较小的液气流量比更有利于提高传质系数 K_{LA} 。

图6 液气流量比对 K_{LA} 的影响Fig.6 Effect of liquid-to-gas flow rate ratio on K_{LA}

(2) 溶液浓度的影响

图7揭示了氯化镁溶液浓度(C)对雾化反应器中 K_{LA} 的影响。当溶液浓度由15 wt%增加到25 wt%时, K_{LA} 由 $1.85 \text{ kmol} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 增至最大值2.53

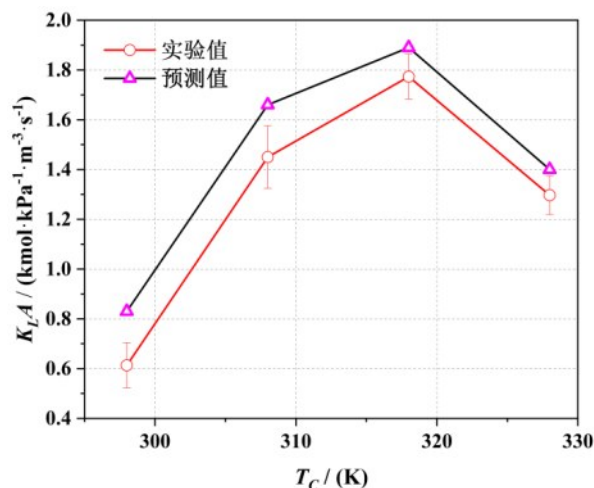
$\text{kmol} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, 提高了36.76%。继续提高溶液浓度至30 wt%时, K_{LA} 开始减小, 溶液浓度增加至35 wt%时, K_{LA} 降低为 $2.18 \text{ kmol} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。可以发现, 当增加氯化镁溶液浓度时, 可以促使化学反应向正向进行, 但是过高的浓度的氯化镁溶液由于粘度的增加, 雾滴粒径增大, 雾化效果较差, 因而 K_{LA} 开始减小。因此, 在制备过程中, 25 wt%的氯化镁溶液浓度既可以促使化学反应快速的正向进行, 又可以获得较好的雾化效果, 进而可以完成高效的传质。

图7 溶液浓度比对 K_{LA} 的影响Fig.7 Effect of solution concentration ratio on K_{LA}

(3) 温度的影响

如图8考察了溶液温度对 K_{LA} 的影响, K_{LA} 随溶液温度的变化呈现明显的趋势。当溶液温度(T_c)从298 K升高至308 K时, K_{LA} 由 $0.61 \text{ kmol} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 增加至 $2.53 \text{ kmol} \cdot \text{kPa}^{-1} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。随着温度的继续升高, K_{LA} 开始下降。这一现象表明, 温度对氨气-液相传质系数有双重影响。升高温度可以促进氨气分子的扩散, 从而加速反应, 显著提高传质系数。然而, 氨气在水中的溶解度随温度的升高而降低, 这意味着虽然扩散能力增强, 但氨气的有效浓度减小, 导致反应效率下降。因此, 当温度升至328 K时, 过高的温度抑制了反应进行, K_{LA} 随之下降。温度在化学反应过程中起着关键作用。

在雾化反应器中, 适当升高温度可以有效提高氨气的传质系数, 加快氢氧化镁的生成。然而, 过高的温度会导致氨气溶解度降低, 进而影响反应速率。综合考虑扩散效率和溶解度的平衡, 最佳反应温度为308 K, 此时 K_{LA} 达到最大值, 有利于氢氧化镁

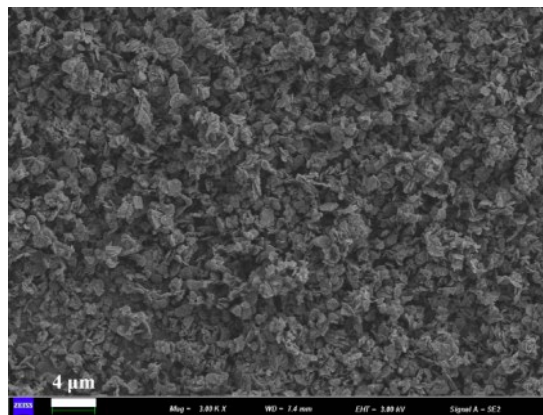
图8 温度对 K_L 的影响Fig.8 Effect of temperature on K_L

的生成。因此,氯化镁溶液温度设置为 308 K 是雾化反应器中制备氢氧化镁的最优选择。这一温度条件能够确保氨气的扩散和溶解平衡,最大化提高传质效率,同时避免反应效率的下降。

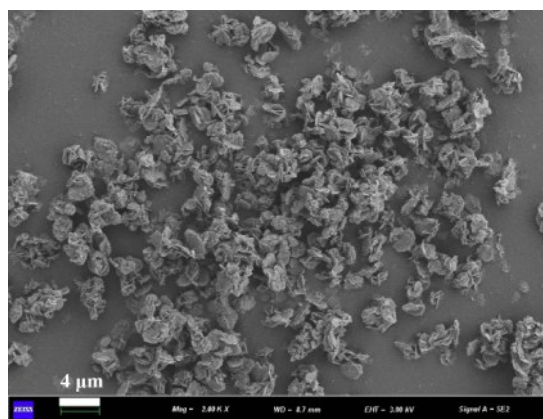
2.3 六角片状氢氧化镁的制备

基于先前的分子模拟计算工作结果^[30],在碱性环境下, NH_3-MgCl_2 的第一溶剂层体系更稳定,体系能量越低,越有利于氢氧化镁晶体的结构生长,以及氢氧化镁生长机理可知^[32],氨气的持续通入可以增加溶液的 pH 值,以提供镁水合物沉淀所需的 OH^- ,因此以反应时间 30 min 转化效率达到最大值时为起点,探究雾化循环时间对晶型的影响。

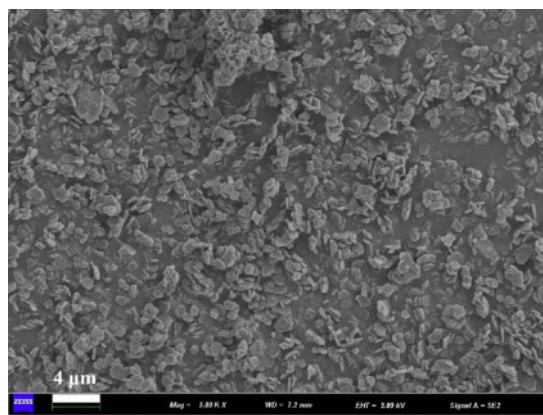
图9展示了不同雾化循环时间制备的氢氧化镁的电镜图像。从图中可以观察到,随着雾化循环时间的增加,氢氧化镁的晶体形貌发生了明显变化。在雾化时间为 30 min 时,晶体呈现出无定型结构,且团聚现象严重。随着时间延长至 50 分钟,晶体逐渐呈现出类圆片状的形态。继续延长至 70 min 时,晶体厚度增加,形貌逐步向六角片状转变,且团聚现象有所改善。当循环时间达到 90 min 时,氢氧化镁基本呈现出规则的六角片状结构,且分散性显著提高。



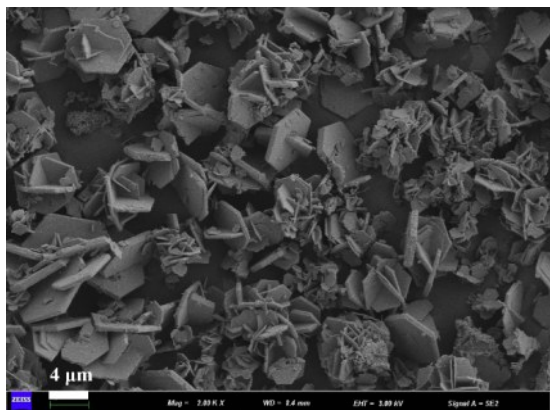
(a) 30 min



(b) 50 min



(c) 70 min



(d) 90 min

图9 Mg(OH)₂的SEMFig.9 SEM images of Mg(OH)₂

这一变化过程表明,雾化循环时间对氢氧化镁的晶体生长和形貌具有显著影响。反应时间为30 min时,由于反应不充分,晶体尚未发育成熟,导致形成无定型结构,并且颗粒间容易相互团聚。随着雾化时间延长,晶体逐渐完成从类圆片状向六角片状的转变。这是由于随着时间的推移,溶液中氨气的持续通入使晶体进一步生长,最终形成更加规整的六角片状结构。反应时间为90 min时,氢氧化镁的形貌和分散性达到了最佳状态。从实验结果可以得出,适当延长雾化循环时间不仅有助于晶体的发育,还能够显著改善颗粒的分散性和形貌规整性。雾化循环时间和氨气通入量的优化,能够促使制备出高质量、分散性优良的六角片状Mg(OH)₂,这为提高材料的性能和应用潜力提供了关键工艺参数。

2.4 反应器对比分析

为公平比较,雾化反应器与鼓泡反应器的性能对比均在相同的氨气流量(300 L/h)和相同的氯化镁溶液进料条件(10 L, 1.5 mol/L)下进行。

图10显示了氢氧化镁的XRD图谱,如图2θ=18.48、37.94°处存在的XRD峰所示。根据PDF#84-2164氢氧化镁标准光谱,这两个峰对应于氢氧化镁在(001)、(101)晶面上的特征反射,经分析说明所得产物为纯氢氧化镁。(001)和(101)晶面上衍射峰的相对强度反映了氢氧化镁晶体表面的极性,(001)平面具有弱极性,而(101)平面表现出强极性。 $I(001)/I(101)=1.04$, (001)和(101)平面之间的衍射峰强度差异小,表明了优化条件下合成的氢氧化镁显示出弱极性、低微观内应力、稳定的结构。

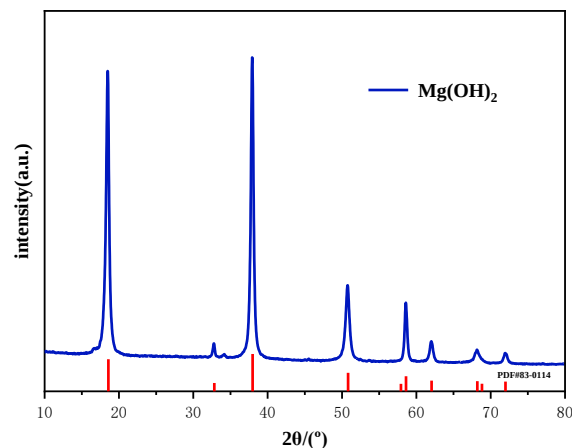


图10 制备氢氧化镁XRD图谱

Fig.10 XRD patterns of synthesized Mg(OH)₂

雾化反应器与鼓泡反应器^[25]转化过程的转化率随时间变化曲线如图11所示。由图可看出,在最优化条件下,40 min之前鼓泡搅拌反应器中转化率随时间增加而增加,在40 min时转化率达到68.9%,继续增加时间转化率变化不明显,在90 min时达到最大值69.41%。雾化反应器的转化率在30 min前迅速增加,随后转化率趋于平稳。30 min时转化率达到最大的77.61%,比鼓泡反应器的转化率(69.41%)提高了8.2%,并且达到反应平衡的时间比鼓泡反应器提前了40 min,转化效率提高了57.14%。雾化反应器强化转化反应的效果更好、反应时间更短。

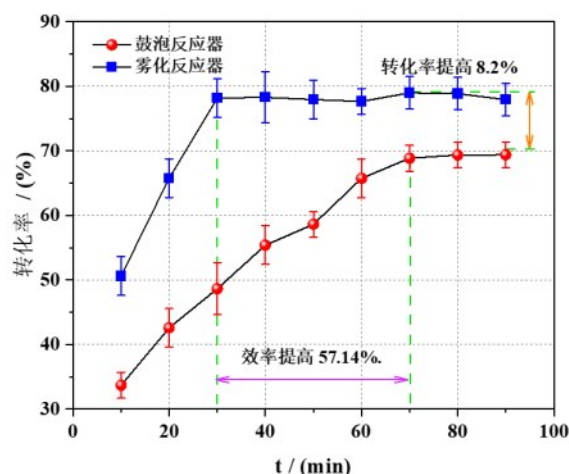


图11 制备方式对转化率的影响

Fig.11 Effect of preparation method on conversion efficiency

图12为鼓泡反应器和雾化反应器制备的氢氧化镁粒径分布,鼓泡反应器制得的产品 D_{50} 为1.43 μm, D_{90} 为2.40 μm,雾化反应器制备的产品 D_{50} 为0.37 μm, D_{90} 为1.47 μm,与鼓泡反应器相比,雾化反

应器制备的氢氧化镁 D_{50} 和 D_{90} 粒径分别减小了 74.12% 和 38.75%。由数据可知雾化反应器制备的氢氧化镁粒径更小,粒度分布更窄,产品的粒径分布更均匀。

为了进一步比较不同制备方法和反应器结构

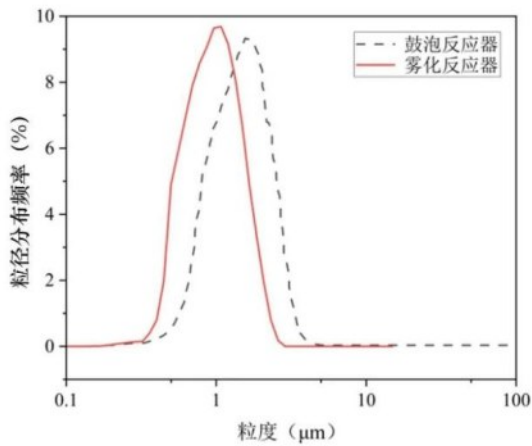


图 12 制备方式对粒径分布的影响

Fig.12 Effect of preparation method on particle size distribution

表 2 不同方法制备氢氧化镁的工艺条件与反应器对比

Table 2 Comparison of preparation methods, process conditions, and reactors for magnesium hydroxide production

原料	沉淀剂	工艺	设备/仪器	反应温度	晶型	转化率	规模
轻烧粉	氨气	鼓泡搅拌沉淀	三孔烧瓶	90 ℃	类六方片状	81.2%	实验室 ^[33]
氯化镁	氨气	鼓泡搅拌沉淀	四口烧瓶	80 ℃	六方片状	91.8%	实验室 ^[34]
水氯镁石	氨气	鼓泡搅拌沉淀	四口烧瓶	60 ℃	六方片状	69.41%	实验室 ^[35]
MgCl ₂ ·6H ₂ O	氢氧化钠	撞击流-旋转填料床	超重力反应器	60 ℃	六方片状	/	中试 ^[36]
MgCl ₂ ·6H ₂ O	氨气	气液接触	雾化反应器	35 ℃	六方片状	77.61%	中试

3 结论

本研究成功地将表面更新理论应用于雾化反应器的传质建模,并通过实验验证了模型的可靠性。系统研究揭示了液气流量比、溶液浓度和温度对传质过程的显著影响,并确定了最佳工艺参数。与传统的鼓泡反应器相比,雾化反应器在转化率、反应速率和产物粒径控制方面均展现出显著优势。本工作的主要贡献在于:(1)基于表面更新理论,建立了一个能有效预测雾化反应器传质系数 K_{La} 的半经验模型,预测误差小于 10%;(2)明确了雾化工艺参数可显著调控氢氧化镁晶体形貌,实现从无定形向规则六角片状的定向转变。这一发现为功能性无机材料的可控制备提供了新思路。然而,本研究主要集中于实验室尺度。未来的研究工作应致力

对氢氧化镁生成过程及转化效率的影响,对近年来典型研究中氢氧化镁制备的原料体系、沉淀剂类型、工艺条件、反应设备以及转化率等关键参数进行了整理与归纳,结果如表 2 所示。由表中不同反应体系的对比可以看出,传统鼓泡搅拌沉淀法在制备六方片状产物时通常需要较高的反应温度。例如,以轻烧粉或氯化镁为原料时反应温度需达到 80~90 ℃,即使以水氯镁石为原料,反应温度仍需约 60 ℃。较高的反应温度不仅增加了能耗,也提高了工艺运行成本。相比之下,雾化反应器通过将液体雾化为微小液滴,显著增大气液接触面积并强化传质过程,使反应能够在 35 ℃ 的较低温度条件下进行,反应条件更加温和,从而有效降低了系统能耗。此外,传统鼓泡沉淀体系多停留在实验室规模,本研究采用的雾化反应器具备良好的工程放大潜力,为后续工业化探索提供了实验基础。综上,雾化反应器在降低反应温度、减少能耗以及实现规模化应用方面具有明显优势,显示出良好的工业化推广潜力。

于:(1)考察反应器的放大效应,为工业化设计提供数据支持;(2)探究更复杂的真实盐湖卤水体系下的反应行为。

符号说明

- a — 气液比表面积, m^{-1}
- C — 溶液质量分数, wt%
- D — 扩散系数, $m^2 \cdot s^{-1}$
- D32 — 雾滴索特平均直径, m
- Ha — 八田数
- k — 模型常数
- KL — 液相传质系数, $m \cdot s^{-1}$
- KLA — 体积传质系数, $kmol \cdot kPa^{-1} \cdot m^{-3} \cdot s^{-1}$
- QL — 液体体积流量, $m^3 \cdot s^{-1}$
- S — 表面更新速率, s^{-1}

T — 热力学温度, K

uL — 液滴平均速度, m · s⁻¹

参考文献

- [1] 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.
- [2] Pan X J, Dou Z H, Zhang T A, et al. Separation of metal ions and resource utilization of magnesium from saline lake brine by membrane electrolysis[J]. Separation and Purification Technology, 2020, **251**: 117316.
- [3] Xu X Y, Lin Y J, Evans D G, et al. Layered intercalated functional materials based on efficient utilization of magnesium resources in China[J]. Science China Chemistry, 2010, **53**(7): 1461–1469.
- [4] 宋彭生, 李武, 孙柏, 等. 盐湖资源开发利用进展[J]. 无机化学学报, 2011, **27**(5): 801–815.
Song P S, Li W, Sun B, et al. Recent development on comprehensive utilization of salt lake resources[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2011, **27**(5): 801–815.
- [5] Satoshi Y, Seichiro O, Hiroyuki H, et al. Simultaneous crystallization of phosphate and potassium as magnesium potassium phosphate using bubble column reactor with draught tube[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2013, **1**(4): 1154–1158.
- [6] Shen H Y, Liu Y Z. In situ synthesis of hydrophobic magnesium hydroxide nanoparticles in a novel impinging stream-rotating packed bed reactor[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2016, **24**(9): 1306–1312.
- [7] Cheng L, Li T, Keener T C, et al. A mass transfer model of absorption of carbon dioxide in a bubble column reactor by using magnesium hydroxide slurry[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, **17**: 240–249.
- [8] 蒋仲安, 许峰, 王亚朋, 等. 空气雾化喷嘴雾化机理及影响因素实验分析[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, **50**(10): 2360–2367.
Jiang Z A, Xu F, Wang Y P, et al. Experimental analysis of atomization mechanism and influencing factors of air atomizing nozzle[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, **50**(10): 2360–2367.
- [9] Wang P F, Shi Y J, Zhang L Y, et al. Effect of structural parameters on atomization characteristics and dust reduction performance of internal-mixing air-assisted atomizer nozzle[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2019, **128**: 316–328.
- [10] 程泽宇, 谢宇, 郭志辉. 双旋流气动雾化喷嘴近场区初始雾化特征实验研究[J]. 航空动力学报, 2025, **40**(7): 178–190.
Cheng Z Y, Xie Y, Guo Z H. Experimental study on primary atomization characteristics of double swirl air-blast atomizer in near field region[J]. Journal of Aerospace Power, 2025, **40**(7): 178–190.
- [11] Trofymenko P E, Khomenko O V, et al. Energy-saving technologies of liquid atomization: theoretical bases and engineering solutions[J]. Romanian Journal of Physics, 2025, **70**(5/6): 907.
- [12] 余爱萍. 盐湖氯化镁连续制备高纯 Mg(OH)₂ 工艺研究[D]. 大连: 大连海事大学, 2008.
Yu A P. Study on continuous synthesizing technology of high purity magnesium hydroxide using magnesium chloride from salt lakes[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2008.
- [13] 张婉婷, 许晓波, 邓列征, 等. 直叶片离心喷雾气液反应器分离性能[J]. 大连理工大学学报, 2020, **60**(4): 358–364.
Zhang W T, Xu X B, Deng L Z, et al. Separation performance of straight blade centrifugal atomized gas-liquid reactor[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2020, **60**(4): 358–364.
- [14] Yu H L, Li Y L, Wang D X, et al. Analysis of atomization characteristics and efficient synthesis of Mg(OH)₂ in micron scale atomization reactor[J]. Physics of Fluids, 2024, **36**(8): 083340.
- [15] Yu H L, Fan L H, Wang D X, et al. Enhancing mixing characteristics of MgCl₂ solution within atomization nozzles: a computational fluid dynamics investigation of structural parameter[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2024, **212**: 378–390.
- [16] 阙永生, 杨辉, 汪海风, 等. 采用表面更新模型与微观涡流模型制备 MgAl-CO₃ LDHs 纳米颗粒[J]. 材料科学与工程学报, 2013, **31**(6): 813–818.
Que Y S, Yang H, Wang H F, et al. Synthesis of MgAl-CO₃ LDHs nanoparticles via surface renewal model and eddy cell model[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2013, **31**(6): 813–818.
- [17] 姜天彪. 盐湖镁热解炉内六水氯化镁溶液雾化特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
Jiang T B. Study on atomization characteristics of magnesium chloride hexahydrate solution in salt lake magnesium pyrolysis furnace[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [18] 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.
- [19] 刘志启, 李丽娟, 张东生, 等. 气液接触法制备球形氢氧化镁[J]. 无机化学学报, 2014, **30**(3): 705–709.
Liu Z Q, Li L J, Zhang D S, et al. Spherical magnesium hydroxide prepared by gas-liquid contact method[J]. Chinese Journal of Inorganic Chemistry, 2014, **30**(3): 705–709.
- [20] 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.
- [21] Tsai C Y, Chen Y S. Effective interfacial area and liquid-side mass transfer coefficients in a rotating bed equipped with baffles[J]. Separation and Purification Technology, 2015, **144**: 139–145.
- [22] 刘知邦. 多级折流反应器强化 CO₂ 吸收工艺与机制研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2022.
Liu Z B. Study on processes and mechanism of CO₂ absorption intensified by a multistage rotating zigzag bed[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2022.
- [23] Luo Y, Chu G W, Zou H K, et al. Mass transfer studies in a rotating packed bed with novel rotors: chemisorption of CO₂[J].

- Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, **51**(26): 9164–9172.
- [24] Li Y W, Si J M, Arowo M, et al. Experimental investigation of effective gas–liquid specific interfacial area in a rotor–stator reactor[J]. Chemical Engineering and Processing – Process Intensification, 2020, **148**: 107801.
- [25] Magnin Y, Dirand E, Orsikowsky A, et al. A step in carbon capture from wet gases: understanding the effect of water on CO₂ adsorption and diffusion in UiO–66[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2022, **126**(6): 3211–3220.
- [26] Castellví F. An advanced method based on surface renewal theory to estimate the friction velocity and the surface heat flux[J]. Water Resources Research, 2018, **54**(12): 10, 134–10, 154.
- [27] 郭达, 祁贵生, 刘有智, 等. 错流旋转填料床的质、热同传性能及传热机理研究[J]. 化工学报, 2021, **72**(11): 5543–5551.
- Guo D, Qi G S, Liu Y Z, et al. Research on mass and heat synchronous performance and heat transfer mechanism of cross–flow rotating packed bed[J]. CIESC Journal, 2021, **72**(11): 5543–5551.
- [28] 郭奋. 错流旋转床内流体力学与传质特性的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 1996.
- Guo F. Study on hydrodynamics and mass transfer characteristics in cross–flow rotating bed[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 1996.
- [29] 张君, 彭本军, 黄浩. 圆盘塔中 CO₂ 吸收的传质动力学研究[J]. 石油与天然气化工, 2010, **39**(2): 128–130.
- Zhang J, Peng B J, Huang H. Study on mass transfer kinetics of carbon dioxide absorption in disc column[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2010, **39**(2): 128–130.
- [30] Yu H L, Wang D X, Chen G, et al. Insights into the diffusion coefficient and adsorption energy of NH₃ in MgCl₂ from molecular simulation, experiments, and machine learning[J]. Journal of Molecular Liquids, 2024, **395**: 123822.
- [31] Sklabinskyi V, Pavlenko I, Skydanenko M, et al. Improvement of mass transfer characteristics for the gas–liquid system in a vortex counterflow apparatus[J]. Energies, 2025, **18**(4): 1–18.
- [32] 王鑫, 张莹, 张丽. 六方片状氢氧化镁的制备及其热分解动力学研究[J]. 无机盐工业, 2026, **58**(4): 49–55.
- Wang X, Zhang Y, Zhang L. Study on preparation and thermal decomposition kinetics of hexagonal plate–like magnesium hydroxide[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2026, **58**(4): 49–55.
- [33] 李雪, 程沛, 侯睿, 等. 轻烧粉氨气法制备氢氧化镁阻燃剂的研究[J]. 无机盐工业, 2016, **48**(11): 21–24.
- Li X, Cheng P, Hou R, et al. Preparation of Mg(OH)₂ with caustic calcined magnesite through ammonium circulation[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2016, **48**(11): 21–24.
- [34] 孙晓君, 丁珂, 仇龙, 等. 以轻烧粉制备六方片状氢氧化镁[J]. 硅酸盐学报, 2019, **47**(4): 538–544.
- Sun X J, Ding K, Qiu L, et al. Preparation of hexagonal–sheet magnesium hydroxide by surfactant free method[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2019, **47**(4): 538–544.
- [35] 宋雪雪, 李丽娟, 刘志启, 等. 氨气法制备氢氧化镁工艺研究[J]. 化学工程, 2014, **42**(6): 74–78.
- Song X X, Li L J, Liu Z Q, et al. Preparation of magnesium hydroxide by ammonia gas method[J]. Chemical Engineering (China), 2014, **42**(6): 74–78.
- [36] 申红艳, 刘有智, 朱芝敏. 超重力反应器制备纳米氢氧化镁的实验研究[J]. 无机盐工业, 2019, **51**(4): 14–18, 31.
- Shen H Y, Liu Y Z, Zhu Z M. Study on preparation of magnesium hydroxide nanoparticles with high–gravity reactor[J]. Inorganic Chemicals Industry, 2019, **51**(4): 14–18, 31.