

综述与专论

DOI: 10.11949/0438-1157.

高温煅烧菱镁矿制备烧结镁砂工艺研究进展

张庆瑾^{1,2}, 郭昊¹, 付亮亮², 冯颖¹, 许光文², 白丁荣^{2,3}

(¹ 沈阳化工大学机械与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142; ² 沈阳化工大学资源化工与材料教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110142; ³ 鄂尔多斯实验室, 内蒙古 鄂尔多斯 017010)

摘要: 烧结镁砂作为生产碱性耐火材料的基础原料, 广泛应用于钢铁、有色、建材、化工等高温工业以及国防军工、航空航天等高科技领域。竖窑高温煅烧菱镁矿制备烧结镁砂工艺存在传热传质速率低、温度分布不均等技术缺陷, 导致所生产的烧结镁砂致密性差、能耗高, 促使我国高密度优质烧结镁砂高度依赖进口, 严重制约了高温工业及高科技产业的发展。为此, 本综述在概述高温竖窑煅烧菱镁矿制备烧结镁砂工艺的基础上, 分析了煅烧方式、烧结温度、坯料活性、成型压力及添加剂等因素对烧结镁砂致密度的影响; 剖析了传统竖窑高温煅烧大球团工艺难以制备高密度烧结镁砂的技术原因, 提出了高温流态化技术制备高密度烧结镁砂的新方法; 并展望了传统竖窑高温煅烧菱镁矿及高温流态化制备高密度烧结镁砂的未来研究方向, 以期高效、低能耗生产高密度优质烧结镁砂提供理论依据和技术参考。

关键词: 菱镁矿; 镁砂; 烧结; 耐火材料; 移动床; 流态化

中图分类号: TQ132.2

文献标志码: A

文章编号: 0438-1157 (XXXX) XX-0001-14

Research progress on preparation of sintered magnesia by high temperature calcination of magnesite

ZHANG Qingjin^{1,2}, GUO Hao¹, FU Liangliang², FENG Ying¹, XU Guangwen², BAI Dingrong^{2,3}

(¹ College of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; ² Key Laboratory on Resources Chemicals and Material of Ministry of Education, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China; ³ Ordos Laboratory, Ordos, Inner Mongolia, 017010, China)

Abstract: As a fundamental raw material for basic refractory production, sintered magnesia has been widely utilized in high-temperature industries such as steel, non-ferrous metals, building materials, and chemicals, as well as in defense, aerospace, and other high-tech sectors. The production of sintered magnesia via shaft-kiln calcination of magnesite suffers from inherent technical drawbacks, including low heat and mass transfer rates and non-uniform gas-solid flow and temperature distribution, which lead to poor densification of the final product and excessive energy consumption. These limitations have rendered China heavily dependent on imports of high-density premium sintered magnesia, severely restricting the development of high-temperature industries and advanced manufacturing sectors. To address these challenges, this review first provides an overview of the high-temperature calcination process for sintered magnesia production from magnesite, and then systematically analyzes the effects of calcination

收稿日期: 2026-06-12 修回日期: 2026-07-27

通信作者: 白丁荣(1959—),男,博士,教授,drbai@syuct.edu.cn;许光文(1966—),男,博士,教授,gwxu@syuct.edu.cn

第一作者: 张庆瑾(1993—),男,博士研究生,zqj785075@163.com

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目(U22A20410, U25A20605)

引用本文: 张庆瑾, 郭昊, 付亮亮, 冯颖, 许光文, 白丁荣. 高温煅烧菱镁矿制备烧结镁砂工艺研究进展[J]. 化工学报, XXXX, XX(X): 1-14

Citation: ZHANG Qingjin, GUO Hao, FU Liangliang, FENG Ying, XU Guangwen, BAI Dingrong. Research progress on preparation of sintered magnesia by high temperature calcination of magnesite[J]. CIESC Journal, XXXX, XX(X): 1-14

mode, sintering temperature, raw material reactivity, compaction pressure, and additives on the densification behavior of sintered magnesia. The underlying technical barriers that hinder the production of high-density sintered magnesia in conventional shaft kilns employing large pellets are critically examined, based on which a novel approach utilizing high-temperature fluidization technology is proposed. Finally, future research directions are outlined for both conventional shaft-kiln calcination and the emerging high-temperature fluidization route, with the aim of providing theoretical basis and technical guidance for the energy-efficient production of high-density premium sintered magnesia.

Keywords: magnesite; magnesia; sintering; refractory; moving bed; fluidization

引 言

烧结镁砂(又称重烧镁砂)是以方镁石(MgO)为主晶相的碱性耐火原料,由菱镁矿、水镁石或卤水提取的氢氧化镁等镁质原料经高温煅烧而成^[1]。高密度优质烧结镁砂(体积密度 $\geq 3.40 \text{ g/cm}^3$, MgO 含量 $\geq 98\%$)因具有耐高温(熔点达 2800°C)、耐腐蚀、优异的高温抗折强度及良好的抗渣侵蚀性能等优点,是生产碱性耐火材料不可替代的基础原料。以镁砂为原料制备的镁砖、镁铬砖、镁碳砖等耐火材料,被广泛应用于钢铁冶炼(转炉、电炉、钢包炉衬)、有色金属熔炼、水泥回转窑、玻璃熔窑等高温工业的关键部位,同时也是国防军工、航空航天等高科技领域热防护系统的重要结构材料^[2-4]。其中,钢铁工业是烧结镁砂最大的消费市场,其消耗量约占镁砂总产量的70%以上^[5]。

我国菱镁矿(理论 MgO 含量为47.8%)资源储量丰富,现已探明的菱镁矿资源约占世界总量的10%,主要分布于辽宁、山东、新疆、西藏等地^[6]。在众多菱镁矿资源化利用途径中,高温煅烧菱镁矿制备烧结镁砂是最具产业规模和经济价值的核心路径。与利用水镁石或卤水提取氢氧化镁进而制备烧结镁砂技术相比,以菱镁矿为原料经高温煅烧制备烧结镁砂,具有原料成本低、储量大、工艺流程相对简洁等显著优势,因此成为我国乃至全球镁砂生产的主导路线^[7]。目前,工业中利用高温竖窑煅烧菱镁矿制备烧结镁砂工艺一般包含两种方法:(1)一步煅烧法:将菱镁矿直接进行 1600°C 以上的高温煅烧获得烧结镁砂;(2)两步煅烧法:先对菱镁矿进行 $600\text{--}1200^\circ\text{C}$ 的煅烧,使其完全热分解为轻烧氧化镁;之后对轻烧氧化镁进行研磨、加压成型制备球团原料,最后利用 $1400\text{--}1900^\circ\text{C}$ 的高温对球团原料进行煅烧以获得烧结镁砂^[8]。

尽管我国菱镁矿资源储量丰富、品质优良,但

我国以菱镁矿为原料生产的镁砂产品仍以中低档为主,高密度优质镁砂的供给仍高度依赖进口^[9,10]。随着我国高温工业和高科技产业的不断发展,高密度优质镁砂的需求将持续增长,这一“资源大国、产品小国”的结构性矛盾已成为亟待突破的产业瓶颈。因此,将天然菱镁矿转化为高密度、高纯度、高均一性的优质烧结镁砂,是实现菱镁矿从低价值矿物向高端耐火材料跃升的关键环节,也是保障我国高温工业产业链供应链安全、提升菱镁资源附加值的必然选择。为此,研发高密度优质镁砂制备技术已成为国内众多学者研究的核心课题^[11,12]。

国内外学者围绕煅烧方式^[13]、烧结温度^[14]、轻烧氧化镁活性^[15]、成型压力^[16]或在坯体中引入添加剂^[17]等工艺参数开展了大量系统研究,在实验室条件下,以菱镁矿为原料,对其进行高温煅烧已成功制备出体积密度超过 3.40 g/cm^3 的高密度烧结镁砂。然而,在实际工业生产过程中,由于传统竖窑内大尺寸球团原料导致的低传热传质速率^[18],即使采用超高温、超长时间的烧结制度,也难以规模化生产体积密度大于 3.40 g/cm^3 的高密度烧结镁砂。与此同时,超高温、超长时间的烧结过程往往会导致镁砂生产过程中一次能源利用效率较低,促使高二氧化碳排放强度^[19]。上述问题严重制约了我国高温工业产业链供应链的安全保障能力和镁砂产业自身的绿色低碳转型。

针对传统竖窑高温煅烧菱镁矿制备烧结镁砂技术困境,本文从以下三个方面开展系统论述:首先,综述高温煅烧菱镁矿制备烧结镁砂的工艺研究进展,阐明煅烧方式、烧结温度、坯料活性、细磨程度、成型压力及添加剂等关键因素对镁砂致密化的影响规律,为优化工艺参数提供理论依据;其次,深入剖析传统竖窑工艺的核心技术难点,揭示制约高密度镁砂制备的内在机制;最后,提出并论证高温流态化制备烧结镁砂的变革性技术路径,以期为高

效、绿色、低碳生产高密度优质烧结镁砂提供理论支撑与技术参考。

1 菱镁矿高温煅烧制备烧结镁砂过程特性

高温煅烧菱镁矿制备高密度烧结镁砂的主要过程为:以菱镁矿为原料,经破碎、筛分、轻烧以及研磨等工序后压制成球送入竖窑(固定床),在1600℃以上的高温下进行煅烧,使菱镁矿(MgCO_3)完全分解并发生固相烧结,最终得到以方镁石(MgO)为主晶相的烧结镁砂^[20]。该过程本质上是一个涉及多相反应与微观结构演化的高温固相烧结过程,通常经历烧结初期、中期和末期三个阶段^[21]。各阶段的致密化行为受煅烧方式、烧结温度、轻烧氧化镁活性、坯体成型压力及方式、添加剂种类与含量等多种工艺因素影响。阐明这些因素对

镁砂烧结致密化的作用规律,是优化工艺参数、突破传统竖窑生产烧结镁砂技术瓶颈的基础。

1.1 煅烧方式的影响

高温煅烧菱镁矿制备烧结镁砂的煅烧方式通常分为一步煅烧法和两步煅烧法,其工艺流程如图1所示。由图1可知,一步煅烧法是将破碎后的菱镁矿直接进行1600℃以上的高温煅烧,获得烧结镁砂。两步煅烧法则先于800–1200℃温度下对菱镁矿颗粒进行首次煅烧,使其分解为轻烧氧化镁,随后对轻烧氧化镁进行研磨、加压成型等处理,再将成型坯料在1400℃以上的高温进行二次煅烧,获得烧结镁砂。也有学者提出三步煅烧法^[12],其与两步煅烧法不同之处在于将轻烧所获得的轻烧氧化镁进行水化处理,获得氢氧化镁,对氢氧化镁进行脱水、研磨、成型以及煅烧工序后,再经高温煅烧获得烧结镁砂。目前,两步煅烧法是制备高密度烧结镁砂的主流方法。

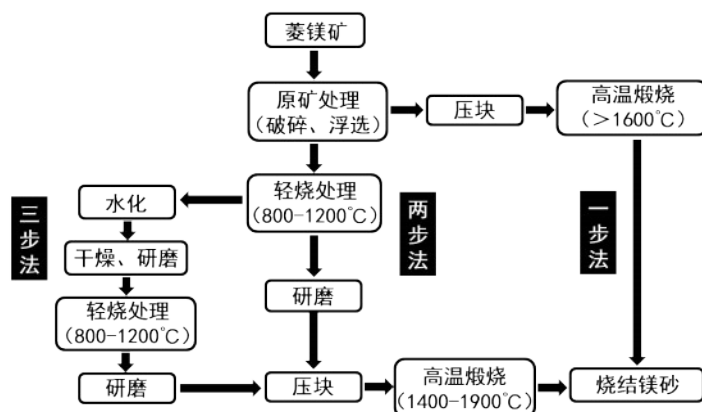


图1 高温煅烧菱镁矿制备烧结镁砂流程图

Fig.1 Process diagram of preparing sintered magnesite by high temperature calcination of magnesite

Zhang等^[22]利用一步法高温煅烧菱镁矿制备烧结镁砂,通过对菱镁矿进行球磨处理,经高温煅烧所制的烧结镁砂体积密度达3.45 g/cm³。秦嘉晨等^[13]通过两步煅烧法制备高密度烧结镁砂。首先以800℃将菱镁矿浮选精矿煅烧3 h,获得轻烧氧化镁,之后以1800℃将所获得轻烧氧化镁煅烧3 h,制备出烧结镁砂。通过两步法所制备的烧结镁砂体积密度达3.41 g/cm³。田晓利等^[23]以微晶菱镁矿为原料,利用两步煅烧法制备烧结镁砂。研究表明,微晶菱镁矿经过两次煅烧,首次煅烧温度为900℃,二次煅烧温度达到1850℃以上时,烧结镁砂体积密度可以达到3.40 g/cm³。不同煅烧方式制备烧结镁砂研究进展见表1。

由表1可知,一步煅烧法相较于两步煅烧法具有操作简单、对原料矿品质要求较低等优点,但一步煅烧法制备出的烧结镁砂质量普遍低于两步煅烧法制备的烧结镁砂,这是由于一步法制备镁砂时,菱镁矿球团烧结,球团内部气体要溢出,但球团外表面的烧结会阻止球团内部气体溢出,导致镁砂烧结致密性较低。两步煅烧需首先对菱镁矿进行轻烧处理,促使菱镁矿分解时产生的CO₂溢出,因此可以制备出高密度镁砂,并且两步法中的研磨工艺可有效消除“假晶”现象,此操作步骤的加入也可有效提升镁砂致密性,但利用两步煅烧法制备镁砂往往需要较大能耗且对原料矿质量有较高要求^[28]。三步煅烧法中包含两道研磨工艺,两道研磨工艺的加

表1 不同煅烧方式对烧结镁砂致密度影响研究进展

Table 1 Research progress on the effect of different calcination methods on the bulk density of sintered magnesia			
煅烧方式	烧结镁砂体积密度	缺点	优点
一步煅烧	2.88–3.25 g/cm ³ 3.20 g/cm ³	烧结镁砂致密性较差。	工艺相对简单;对原料(菱镁矿)品质要求较低;较低生产能耗。
两步煅烧	3.41 g/cm ³ 3.50 g/cm ³	原料纯度要求较高;操作较为复杂;生产成本较高。	烧结镁砂致密性较高。
三步煅烧	3.46 g/cm ³ 3.47 g/cm ³	操作复杂;易产生粉尘污染,不适用于工业生产。	烧结镁砂致密性高;可降低烧结温度。

入不仅有效破坏晶体间的团聚,也可有效消除假晶现象,因此可以降低烧结温度并提高烧结镁砂致密性^[15]。但三步煅烧法在制备烧结镁砂时操作过程繁琐,两道研磨工艺显著增加了成本投入,且研磨后的细粉易造成粉尘污染,因此目前不适用于大型工业化生产。

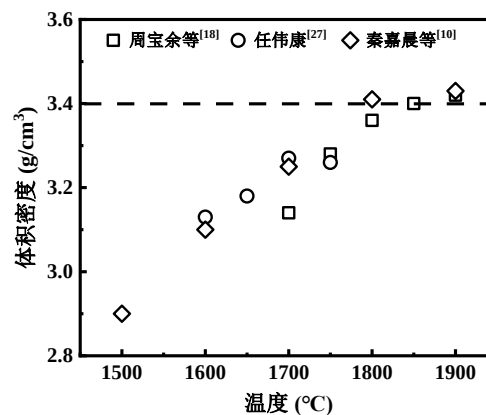
1.2 烧结温度的影响

菱镁矿或轻烧氧化镁经 1400–1900 °C 煅烧生成烧结镁砂的过程称为烧结过程,此过程一般包含初期、中期以及末期三个阶段。菱镁矿或轻烧氧化镁在此过程中表面空隙逐渐收缩,晶界及晶格扩散逐渐增强,晶粒长大,体积收缩,进而生成致密烧结镁砂^[29]。烧结过程中的烧结温度对镁砂致密性具有显著影响。

Jin 等^[30]在 1500、1550 以及 1600 °C 温度条件下对高活性氧化镁进行烧结处理,保温时间 2 h。研究结果表明,当烧结温度为 1600 °C 时,烧结镁砂体积密度达 3.43 g/cm³。Allison 等^[31]将利用 1650–1870 °C 的高温对 MgO 含量分别为 98.5% 和 99.3% 的氧化镁粉进行烧结处理。发现烧结温度越高,烧结镁砂体积密度越大,当烧结温度为 1870 °C 时,两种烧结镁砂的体积密度分别为 3.33 g/cm³ 以及 3.45 g/cm³。

图 2 为文献中^[13, 23, 32],不同烧结温度条件下,烧结镁砂体积密度变化图,由图 2 可知,随着烧结温度的升高,烧结镁砂体积密度逐渐增大,这是由于菱镁矿或轻烧氧化镁高温煅烧制备烧结镁砂的主要致密化机制为晶界扩散,随着煅烧温度的升高,烧结驱动力随之增大,促使晶界移动速度加快,孔隙数量减少,致密化程度增大。由不同烧结温度下所获得镁砂颗粒的微观形貌图(图 3)可知,当烧结温度达到 1850 °C,烧结镁砂体积密度达到 3.40 g/cm³ 后,继续升高烧结温度对镁砂致密化的促进作用有限,烧结温度的提升反而会导致能耗增加和资源浪费^[23]。因此,确定合理的烧结温度,可在获得高

质量镁砂的同时有效降低能耗。

图2 不同烧结温度下烧结镁砂体积密度^[13, 23, 32]Fig.2 Bulk density of sintered magnesia under different sintering temperatures^[13, 23, 32]

1.3 坯料(氧化镁)活性的影响

在利用两步煅烧法制备烧结镁砂过程中,通常将菱镁矿在 600–1200 °C 下进行轻烧处理,获得多孔疏松且具有一定活性的轻烧氧化镁。然后经研磨、加压成型等步骤制备出烧结坯体,最后对坯体进行煅烧,获得高密度烧结镁砂。轻烧氧化镁的活性对烧结镁砂的致密度有重要影响^[33]。

李环等^[27]以菱镁矿为原料,在不同温度下对其进行轻烧处理,获得不同活性轻烧氧化镁,后对所获得的轻烧氧化镁进行烧结处理。结果表明,轻烧温度为 600 °C 时,轻烧氧化镁活性最好,且镁砂质量最好,体积密度达 3.47 g/cm³。然而,郭玉香等^[34]研究发现,轻烧氧化镁活性过高会使晶体增长速率过快,导致烧结镁砂的致密度有所下降。轻烧氧化镁活性对烧结镁砂致密度影响研究进展见表 2。

由表 2 可知,菱镁矿经适度过烧处理后,所获得的低活性轻烧氧化镁制备出的烧结镁砂致密度最高。这是由于过低的轻烧温度导致菱镁矿分解不完全,残留的母盐假相会严重影响烧结镁砂颗粒间的紧密结合,降低镁砂致密度;随着轻烧温度升高,

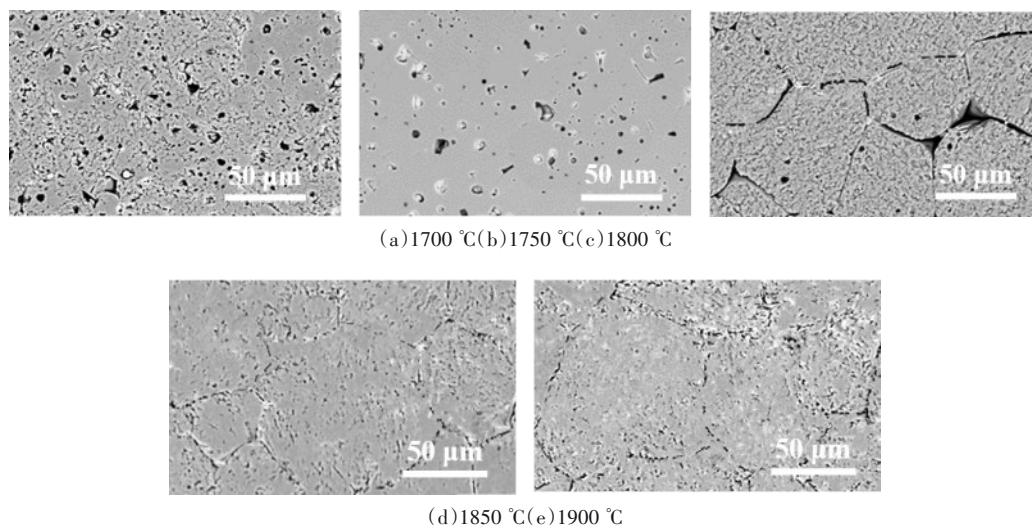
图3 1700–1900 °C下制得的烧结镁砂SEM图^[23]Fig.3 SEM images of sintered magnesia prepared at 1700–1900 °C^[23]

表2 轻烧氧化镁活性对烧结镁砂质量影响研究进展

Table 2 Research progress on the influence of light calcined magnesia activity on the bulk density of sintered magnesia

轻烧温度	氧化镁活性最高轻烧温度	最佳轻烧温度	烧结镁砂体积密度	文献
500–900 °C	600 °C	850 °C	3.46 g/cm ³	[15]
650–1200 °C	950 °C	1200 °C	3.17 g/cm ³	[35]
700–900 °C	800 °C	900 °C	3.41 g/cm ³	[36]
500–900 °C	650 °C	850 °C	3.32 g/cm ³	[37]

轻烧氧化镁活性增强,晶格缺陷增多,产生较大的烧结驱动力,可有效促进高温烧结阶段MgO晶体的生长发育,提高烧结镁砂致密度。但过高的活性会增加高温煅烧过程中的内部传质阻力,使晶界迁移速率过快,导致晶粒异常长大、气孔难以排除,反而使烧结镁砂致密性下降。此外,严重的过烧会使轻烧氧化镁发生初始烧结,降低其在高温烧结阶段的烧结能力。因此,对菱镁矿进行适当温度的轻烧处理,获得活性适宜的轻烧氧化镁,可使其在高温烧结过程中保持适中的收缩速率和晶粒均匀长大,得到致密度较高的烧结镁砂^[28]。

1.4 坯体成型压力及方式的影响

在进行高温烧结工艺之前,通常将结合剂与轻烧氧化镁、菱镁矿或氢氧化镁进行混合,之后对混合料进行加压成型处理形成坯体。坯体成型压力的大小及成型方式不仅直接影响坯体的初始致密化程度,也影响烧结镁砂的最终致密度。这是由于高的坯体致密度可有效破坏假晶结构,并降低煅烧

过程中MgO克服烧结阻碍所需的活化能,促进烧结过程进行,获得高致密度烧结镁砂^[38]。

周宝余等^[29]采用四柱油压机在45、135、225、250和300 MPa的成型压力下将氢氧化镁成型成坯体,之后进行高温煅烧以获得烧结镁砂。研究表明,随着成型压力的增加,镁砂致密化程度逐渐增大,成型压力在250 MPa时,烧结镁砂体积密度为3.29 g/cm³。Jin等^[39]通过高温煅烧菱镁矿制备烧结镁砂,对比了真空压实和传统机械压实两种工艺对镁砂致密度的影响,发现经真空压实工艺处理所获烧结镁砂的致密度优于传统机械压实工艺。成型压力及方式对镁砂致密度影响的研究进展见表3。

表3 成型压力及方式对镁砂致密性影响研究进展

Table 3 Research progress on the influence of forming pressure and methods on the quality of magnesia

压实成型方式	成型压力范围	最佳压实压力	烧结镁砂体积密度	文献
机械压实法	200、300、400 MPa	300 MPa	3.37 g/cm ³	[27]
机械压实法	100、200、300、400 MPa	300 MPa	3.38 g/cm ³	[40]
机械压实法	100、200、300、400 MPa	300 MPa	3.40 g/cm ³	[16]
真空压实法	100、150、200、250、300 MPa	200 MPa	3.40 g/cm ³	[30]

由表3可知,采用机械压实法生产坯体所需的最佳成型压力一般为300 MPa,这是因为较大的压力可以有效排除坯体内气体并破坏假晶结构。真空压实法则可在较低压实压力(200 MPa)下有效促进镁砂致密度。其原因是由于传统的机械压实法在压实过程中会导致空气在坯体中滞留且无法及时排出,形成不均匀的孔隙,这些气孔在烧结过程

中很难完全消除,影响镁砂致密化。而真空压实法可有效排出坯体中滞留的空气,降低孔隙中的气压,去除大孔隙,提高坯体密度,改善显微结构,从而有效提升镁砂致密度^[30],但真空压实法设备投资大、生产效率较低,限制了其大规模工业应用。在实际生产中,应综合考虑经济性与镁砂致密性来选取适宜的坯体成型压力及方式。

1.5 添加剂的影响

菱镁矿中通常包含有 SiO_2 、 CaO 、 Fe_2O_3 以及 Al_2O_3 等杂质,这些杂质在高温煅烧时不仅会形成低熔点化合物,影响以烧结镁砂为原料所制备耐火材料的耐高温及力学性能,而且烧结过程中形成的高粘度液相也会阻碍 MgO 晶粒的迁移,降低烧结镁砂致密性^[41]。针对上述问题,通常采用引入添加剂加以解决。

通过引入添加剂来提升烧结镁砂致密度的作用机理,主要可归纳为以下两个方面:(1)添加剂在体系内形成有限固溶体,使 MgO 晶格出现缺陷结

构,降低晶体生长活化能,提升扩散能力,提高镁砂致密性^[42];(2)添加剂与菱镁矿中的杂质反应生成高熔点新相,新相分布于 MgO 晶界处,形成镶嵌结构,有效提升烧结镁砂致密性以及以烧结镁砂为原料所制镁质耐火材料的性能^[43]。张汪年等^[44]以 CoO 为添加剂,研究不同添加量(0.25%、0.50%、0.75% 和 1.00%)对烧结镁砂致密性的影响。通过不同 CoO 添加量下的烧结镁砂 SEM 图(图4)可知,高温条件下 CoO 与氧化镁发生固溶反应,致使氧化镁晶格产生缺陷,促进晶体生长,当 CoO 添加量为 0.75% (wt) 时,烧结镁砂体积密度为 3.28 g/cm^3 。王汇平等^[45]通过添加一定剂量的 La_2O_3 ,促使 La_2O_3 与菱镁矿中的 CaO 、 SiO_2 反应生成新相硅酸钙镧,新生成的物质呈树枝状交错分布在 MgO 晶界处,有效提升了烧结镁砂的抗折强度。常见的添加剂主要包括稀土氧化物(La_2O_3 、 Y_2O_3 等)、过渡金属氧化物(NiO 、 ZnO 等)、活性碳以及氯化氧化镁等。通过添加添加剂提升镁砂致密性详细研究内容见表4。



图4 CoO 添加量对烧结镁砂显微结构的影响^[44]

Fig.4 Effect of CoO contents on microstructure of sintered magnesia^[44]

注:(a)0.00% (b)0.25% (c)0.50% (d)0.75% (e)1.00%

表4 添加剂对烧结镁砂致密性影响研究进展

Table 4 Research progress on the effect of additives on the quality of sintered magnesia

添加剂	反应杂质相	新相	添加剂最佳添加量	烧结镁砂体积密度	原理	文献
Sc_2O_3	CaO	CaSc_2O_4	3% (wt)	3.22 g/cm^3	与杂质反应,形成高熔点新相	[41]
Y_2O_3	SiO_2	$\text{Y}_2\text{Si}_2\text{O}_7$	0.5% (wt)	3.41 g/cm^3		[46]
TiO_2	CaO	CaTiO_3	3% (wt)	3.50 g/cm^3		[43]
NiO	无	无	6% (wt)	3.62 g/cm^3	生成固溶体,提升晶体扩散能力	[47]
ZnO	无	无	4% (wt)	3.57 g/cm^3		[48]
活性炭	无	无	0.03–0.05% (wt)	3.50 g/cm^3		[49]
ZrO_2	无	无	15% (wt)	3.41 g/cm^3		[50]
CeO_2	无	无	2% (wt)	3.48 g/cm^3		[51]

由表4可知,目前最常用的添加剂为 Y_2O_3 、 CeO_2 等稀土氧化物以及 NiO 、 ZnO 等过渡金属氧化物。此类添加剂在较低用量下即可有效促进镁砂烧结,提高烧结镁砂致密性。然而,过量使用添加剂不仅无法进一步提升镁砂致密性,反而会导致其致密性下降^[52]。此外,添加剂的引入会带入其它杂质,降低镁砂纯度;若烧结过程中生成低熔点相,还会劣化

镁质耐火材料的耐高温性能。同时,稀土氧化物类添加剂价格昂贵,导致烧结镁砂生产成本显著增加^[53]。综合考虑添加效果与经济性,开发高效、低成本的新型添加剂体系仍是未来研究的重要方向。

1.6 其它因素的影响

除上述因素外,研究者也从菱镁矿形态^[54]、产地^[55]以及煅烧设备^[56]等方面出发,考察这些因素对

高温煅烧菱镁矿所制烧结镁砂致密性的影响。吴锋等^[57]利用高温煅烧块状菱镁矿制备烧结镁砂。研究表明,煅烧温度超过 1800 °C 后,菱镁矿块度对烧结镁砂的致密性基本没有影响。Guo 等^[58]对比两个产地菱镁矿(辽宁、新疆)经过高温煅烧所制备烧结镁砂致密性差异。研究表明,菱镁矿(西藏)在经过 1750 °C 煅烧后,可获得体积密度为 3.48 g/cm³ 的烧结镁砂,而菱镁矿(辽宁)只需经过 1670 °C 烧结则可获得体积密度为 3.47 g/cm³ 的烧结镁砂。史树威和郭宗奇^[59]为克服传统竖窑热耗高,烧结镁砂质量不稳定,环境污染等一系列缺点,设计了一种新型节能环保机械化竖窑应用于烧结镁砂的生产。利用新型竖窑生产的烧结镁砂理化性能稳定,体积密度 ≥ 3.20 g/cm³。

2 传统竖窑烧结大尺寸球团制备烧结镁砂技术分析

传统竖窑烧结大尺寸球团制备烧结镁砂工艺如图 5 所示^[18]。经高压压制成型的大尺寸球团从窑顶进入,依靠重力缓慢下移,与向上流动的高温气体接触并被逐渐加热,在 1900–2300 °C 的高温区烧结后,经燃烧空气冷却从窑底排出,再经自然冷却、破碎,得到粒径小于 4.75 mm 的烧结镁砂产品。然而,由于大尺寸球团在竖窑内传热传质速率极低以及移动床存在的气固流动与温度分布不均匀性,导致该工艺存在能耗高、污染重、产品体积密度低、品质不均一等严重问题^[18]。以下从基础理论、工艺控制、原料适配与环保能耗四个维度,系统剖析该工艺的核心技术瓶颈。

2.1 传热传质受限导致镁砂致密化困难

在气固两相流中,固体颗粒尺寸越大,其比表面积越小,传热传质速率也越低。竖窑煅烧菱镁矿制备烧结镁砂所用球团原料的尺寸一般为长 26–40 mm、宽 15–30 mm、厚 12–18 mm^[60, 61]。上述尺寸球团在竖窑中与气体的传热系数约为 5–20 W/(m²·K),对应球团加热或冷却速率为 5–15 °C/min。在如此低的传热速率条件下,为了使球团内部达到理论烧结温度(约 1300 °C)或以上,竖窑操作温度必须高达 1900–2300 °C^[62]。同时,将球团从室温加热到所需烧结温度(如 1600 °C)至少需要 1–2 h,加上烧结和冷却时间,球团在竖窑内总停留时间长达 8–11 h,对应产能低于 7–10 t/(m³·d)^[63, 64]。

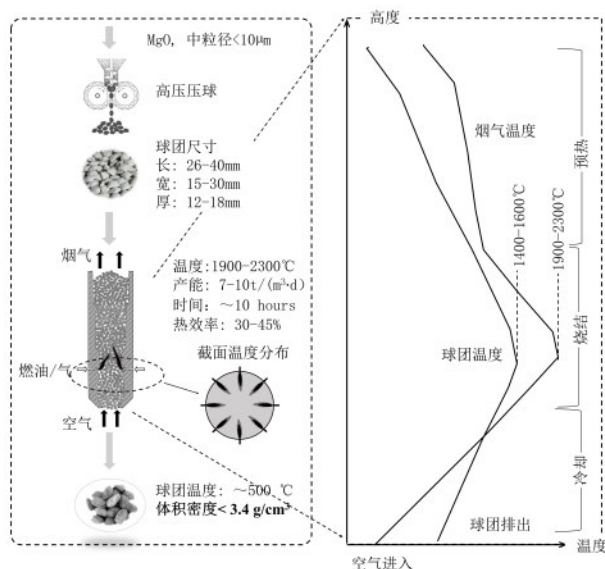


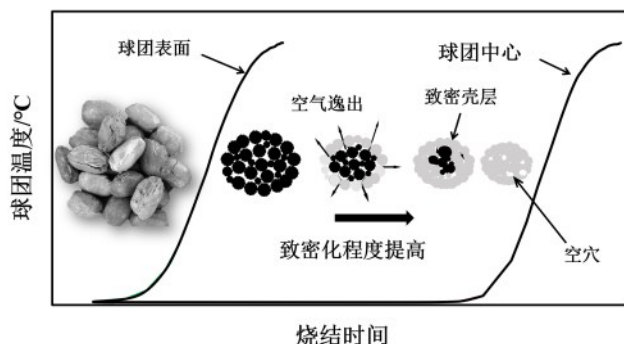
图5 传统竖窑烧结大尺寸球团生产烧结镁砂工艺^[18]

Fig.5 Production process of sintered magnesite by traditional shaft kiln sintering large size pellets^[18]

如图 6 所示,球团在竖窑内被缓慢加热时,其外表面首先达到烧结温度并开始烧结形成致密的壳层,而球团内部颗粒间隙中的气体(主要为空气)压力随温度升高而增大,迫使其向球团外部逸出。随着传热和烧结不断进行,不断加厚的致密化外壳层既抑制热量由球团外表面向内部传递,也阻碍内部气体向外部逸出。在这种情况下,球团内部高压气体在向外挤压过程中可能造成球团出现裂缝甚至破碎,如图 6 中烧结镁砂球团照片所示。当致密化壳层使气体完全无法排出时,气体在球团内部挤压迫使颗粒移动形成圆球形或近圆球形空穴,从而大幅降低球团的体积密度^[65, 66]。上述现象充分说明,大尺寸球团导致的低传热传质速率是制约烧结镁砂体积密度无法达到 3.40 g/cm³ 的根本原因之一。张晓虎等^[67]通过 CFD 数值模拟进一步验证了这一分析,发现竖窑内大尺寸球团的传热主要受气固对流传热控制,球团导热热阻占比较大,导致球团中心与表面之间存在显著温度梯度,无法实现同步致密化。

2.2 温度分布不均造成产品质量差异性大

传统竖窑通过烧结大尺寸球团制备烧结镁砂,该过程属于典型的移动床操作。如图 5 所示,沿移动床横向截面,气固流动和温度分布理论上即存在不均性^[18, 67–69],尤其是为了达到 2000 °C 以上的高温,目前竖窑普遍采用多个燃烧器将燃料直接喷射到窑内物料间隙中与空气混合燃烧的方式,这使得高

图6 球团烧结致密化过程示意图^[18]Fig. 6 Schematic illustrations of sintering and densification of a compacted briquette^[18]

温烟气流动和温度在竖窑横向截面的分布更加不均匀。因此,在实际操作过程中,处于窑内不同区域的球团所经历的热历史不同,烧结致密化程度差异显著,大大降低了烧结镁砂质量的均匀性^[70]。

2.3 原料适配性差与高能耗高排放问题

传统竖窑大球团工艺对原料粒度、纯度及成型性能有较高要求。首先,原料需经过高压压制成型,对粉料的粒度分布、比表面积及结合剂添加量均有严格限制,这增加了前处理工序的复杂度和成本。其次,菱镁矿中 SiO_2 、 CaO 等杂质在高温竖窑内易与 MgO 反应生成低熔点硅酸盐相,不仅降低产品纯度,还可能在窑内形成局部熔融结圈,影响气固流动均匀性,严重时导致停产清理^[18, 60]。此外,由于大球团传热速率低,尽管将高温竖窑有效高度已从最初的7–9 m增加到近20 m,以延长气–固接触时间,但所制得的烧结镁砂体积密度依然难以稳定达到 3.40 g/cm^3 。生产过程中,烟气排出温度高于 200°C ,球团排出温度高于 500°C ,导致烧结过程热效率低于50%。此外,提高竖窑高度增加了散热面积,使热量损失严重,加之操作温度高、处理时间长,导致烧结过程能耗高达每吨产品100 kg标准煤以上,大幅提高了生产成本。大球团的压球过程粉尘排放大,难以治理;窑内高温烟气 NO_x 浓度高达约 2000 mg/m^3 ,环境污染严重。致使该工艺在日益严格的环保政策下面临淘汰风险^[61, 70]。

综上,传统竖窑烧结大尺寸球团制备烧结镁砂工艺在传热传质、气固流动及温度分布方面存在固有技术缺陷,这是导致其产能小、产品体积密度低、能耗高、污染重等问题的根本原因。因此,亟需通过根本性技术革新以突破高密度优质镁砂制备的技术瓶颈。

3 高温流态化制备高密度优质烧结镁砂研究

依托国家自然科学基金联合基金,沈阳化工大学白丁荣团队联合南京工业大学范益群团队提出了高温流态化烧制高密度优质镁砂技术。凭借气固流态化的高效混合与快速传热传质特性,该技术克服了传统竖窑烧结大尺寸球团制备烧结镁砂工艺在传热传质、气固流动及温度分布方面存在的技术缺陷,有望成为推动镁砂产业变革的新技术。

3.1 高温流态化研究现状

在高温流化床运行过程中,颗粒烧结或化学转化导致颗粒间作用力增强,易诱发粘结聚团,进而造成床层“失流”或“死床”现象,严重影响高温流化床的连续稳定运行^[71–73]。为实现镁砂颗粒在流化床内的固相烧结与高度致密化,实际操作温度需高达 $1400\text{--}1600^\circ\text{C}$ 。然而,现有高温流态化基础研究多局限于 1000°C 以下^[74–77],远低于镁砂致密化所需的烧结温度,严重制约了高温流态化技术在镁砂制备工艺中的发展与应用。

为推进高温流态化制备烧结镁砂技术的工业化应用,许光文团队通过理论分析与实验研究,对操作温度高达 1600°C 的高温气–固流化床的流体力学特性、传热特性等基础研究进行了系统研究^[78–88],部分实验结果如图6所示。

如图6(a)和(b)所示,Fu等^[88]首次实现超高温下(1650°C)镁砂颗粒的稳定流化。并发现其最小流化速度随温度的上升先降低后升高。Zhang等^[82]通过压力波动法研究了 $25\text{--}1600^\circ\text{C}$ 内湍动态起始气速变化规律,由图6(c)可知,由于颗粒间力的增大,湍动态起始气速随温度的升高呈现先增大、后平稳、最后降低趋势。如图6(d)所示,Fu等^[80]发现,温

度低于颗粒软化点温度,温度升高,压力脉动信号主频增大,方差减小,这表明气固流动主导机制为气泡行为,温度高于颗粒软化点温度,温度升高,压力脉动信号主频降低,方差增大,这表明气固流动主导机制为颗粒行为。如图6(e)和(h)所示,Chen等^[79]以及Xie等^[87]对不同温度条件下(25–1600 °C)的气固流化床内的传热、传质特性进行研究,研究发现,气固流化床内的传热效率随温度上升逐渐增强,但是颗粒粘结会导致其下降,传质效率在1000 °C之后基本保持稳定。如图6(f)所示,Gao

等^[78]研究发现,温度低于300 °C,床内气体接近平推流,温度高于300 °C,气体返混情况加剧,温度高于1200 °C后,气体流动形态再次趋于平推流。如图6(g)所示,Zhang等^[84]对不同温度条件下的床层膨胀进行了研究,发现床层随温度升高逐渐膨胀,当温度超过颗粒软化点后开始收缩。Zhang等^[86]测量了稳定流化状态下的颗粒间力,由图6(i)可知,颗粒间力在1200 °C之后的增加速率明显加快。上述研究对高温流态化制备烧结镁砂技术的工业化应用提供了系统的理论依据与实验基础。

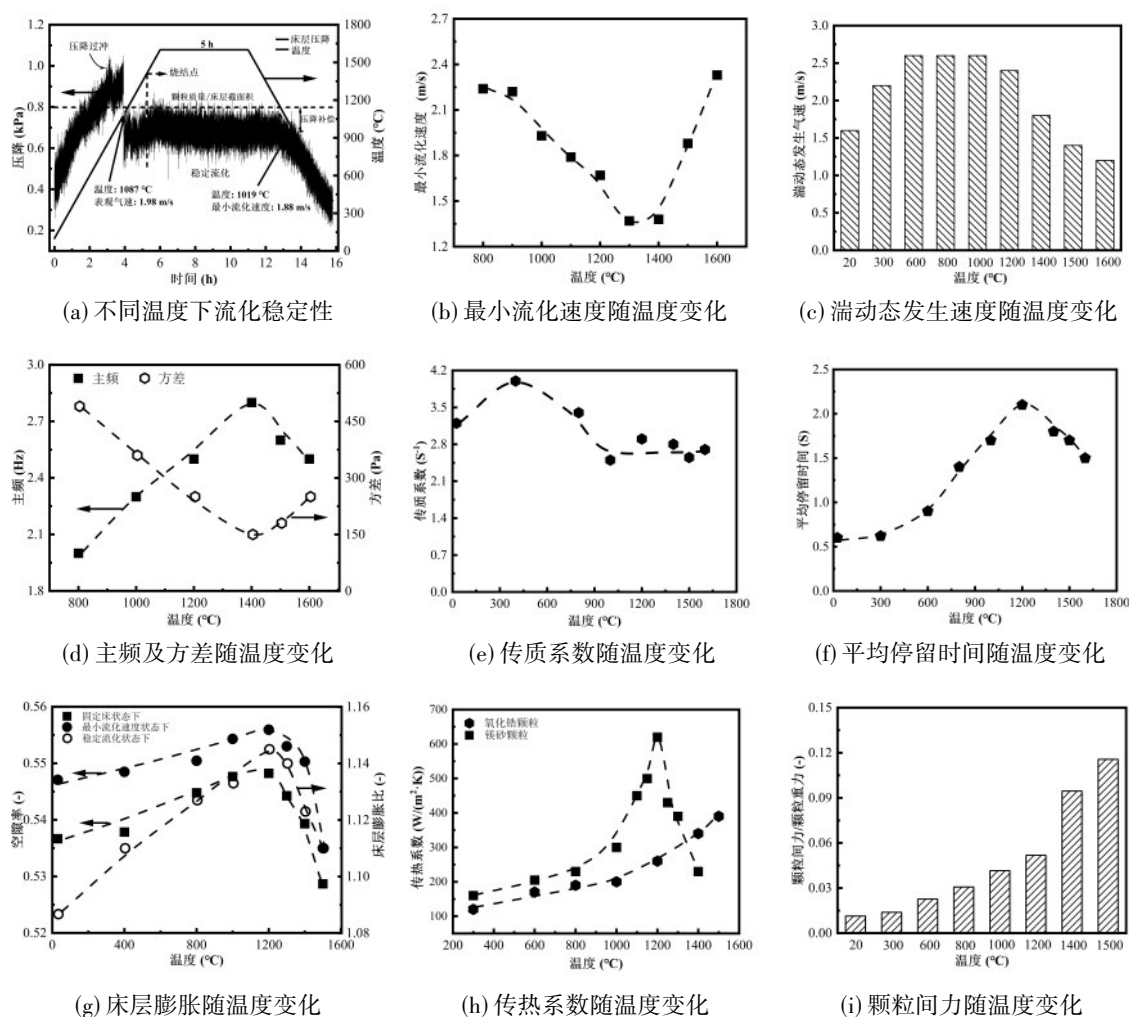


图6 高温流态化研究现状

Fig. 6 Research status of high temperature fluidization

3.2 高温流化床煅烧菱镁矿制备高密度烧结镁砂

团队利用高温流化床反应器(图7(a)),开展了高温流态化制备高密度烧结镁砂实验,并将高温流态化制备的镁砂与传统竖窑煅烧大尺寸球团制备的镁砂进行对比。由图7(b)可知,直径小于0.50 mm菱镁矿颗粒在1600 °C,烧结时间5–10 min以内,

菱镁矿颗粒体积密度达到3.40 g/cm³以上;而直径20 mm的菱镁矿圆柱体在1600 °C烧结5 h及菱镁矿大尺寸球团在竖窑以2000 °C高温烧结10 h所制备的镁砂,其体积密度均达不到3.40 g/cm³。由图7(c)可知,高温流态化煅烧细颗粒菱镁矿所制备的烧结镁砂(图7(c上))与传统竖窑煅烧大尺寸球团(图7(c

下))相比,微观结构致密,晶粒尺寸大。上述实验证明了高温流态化制备优质镁砂的可行性。付亮亮^[89]利用高温流态化煅烧菱镁矿颗粒制备烧结镁砂,研究表明,在1600℃的煅烧温度条件下,经过短时间(1 min)煅烧即可使样品相对密度超过95%。聂辉等^[90]基于高温流态化制备烧结镁砂技

术,进一步探究了菱镁矿晶型种类对烧结镁砂致密性的影响。研究发现高温流态化技术更适用于显晶型菱镁矿颗粒制备烧结镁砂,显晶型菱镁矿颗粒在1600℃下煅烧10 min,其体积密度即可达到3.40 g/cm³以上。

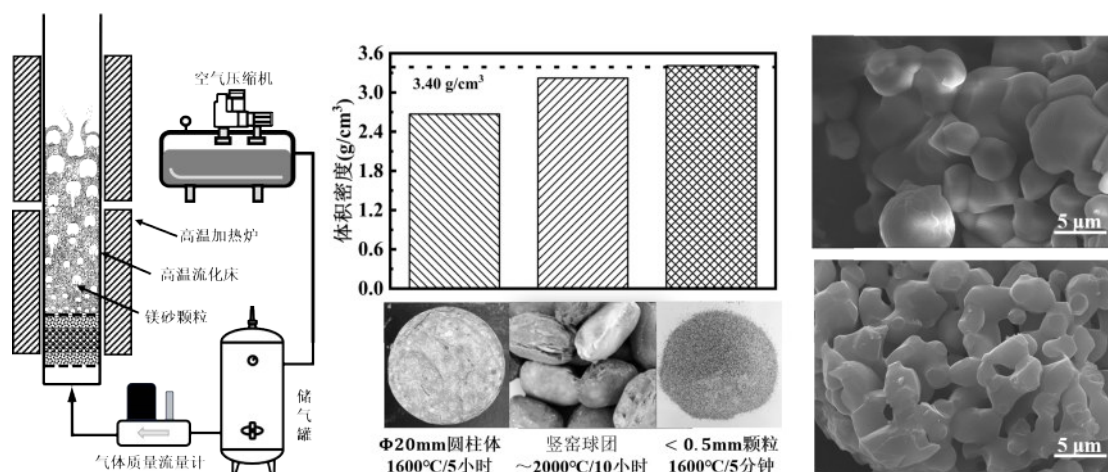


图7 高温流态化与竖窑煅烧大尺寸球团制备烧结镁砂体积密度对比

Fig.7 Comparison of bulk density of sintered magnesite prepared by high temperature fluidization and shaft kiln calcination of large size pellets

注:(a)装置图 (b)烧结镁砂体积密度 (c)烧结镁砂SEM图

4 结论与展望

烧结镁砂作为生产碱性耐火材料的基础原料,广泛应用于钢铁、有色、化工等高温工业及国防军工、航空航天等高科技领域。目前,其制备主要以竖窑高温煅烧菱镁矿(或轻烧氧化镁)大球团工艺为主。通过优化煅烧方式、烧结温度、坯料活性、成型压力及添加剂等操作参数,可一定程度上提升烧结镁砂致密度。然而,由于该工艺存在传热传质差、温度分布不均及原料适配性差等固有缺陷,致使所制备的镁砂致密性差、质量不均一,且能耗高、碳排放量大。针对上述问题,本综述提出了高温流态化制备烧结镁砂的新工艺路径。初步实验表明,该技术可在1600℃、5-10 min内将0.5 mm的菱镁矿煅烧成体积密度达3.40 g/cm³以上的烧结镁砂,展现出突破传统工艺瓶颈的潜力。基于对传统工艺局限性的系统分析和新工艺可行性的初步验证,未来可从以下几个方向开展深入研究。

4.1 传统竖窑煅烧工艺的优化方向

(1)原料特性与工艺参数的精准匹配:系统建立不同产地、不同晶型菱镁矿的“原料特性-最佳煅

烧制度-镁砂性能”数据库,明确各产地原料的最优轻烧温度、二次煅烧温度及保温时间等关键参数,实现“因矿制宜”的精准煅烧。

(2)复合添加剂的协同作用与配方优化:重点研究稀土氧化物与过渡金属氧化物的复合添加剂体系,探索“固溶促进+杂质固化”双功能协同配方,兼顾添加剂对镁砂纯度及高温性能的综合影响。

(3)数据驱动的煅烧过程智能优化:引入机器学习等方法,建立“原料特性-工艺参数-镁砂性能”的多目标预测模型,实现工艺参数的快速筛选与优化,为工业过程的智能决策提供支撑。

4.2 高温流态化制备烧结镁砂的研究方向

(1)烧结致密化机制与微观结构调控:探明细颗粒镁砂致密化和晶粒生长与烧结温度、时间的定量关系,建立致密化动力学模型;考察颗粒形貌、结晶程度及晶粒尺寸的演变规律,揭示微观结构调控机制。

(2)反应-传递耦合机制与工艺放大:研究烧结过程中颗粒内的化学反应、传质和传热行为,揭示原子扩散和晶粒生长规律,探明反应与热/质传递的耦合机制;在此基础上开展中试规模工艺优化与反

应器设计,解决放大过程中的气固分布、颗粒分级及床层稳定性等关键工程问题。

参考文献

- [1] 陈英春,周佳芬,路贵民,等.高纯镁砂及氧化镁陶瓷研究进展[J].化工进展,2019,38(1):505-515.
Chen Y C, Zhou J F, Lu G M, et al. A review on the production technologies of high-purity magnesia and magnesium oxide ceramics[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2019, 38(1): 505-515.
- [2] Chen L G, Li S L, Jones P T, et al. Identification of magnesia-chromite refractory degradation mechanisms of secondary copper smelter linings[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2016, 36(8): 2119-2132.
- [3] 陈洋,邓承继,娄晓明,等.低碳MgO-C耐火材料结构和性能优化的研究进展[J].硅酸盐通报,2022,41(6):2153-2159.
Chen Y, Deng C J, Lou X M, et al. Research progress on structure and property optimization of low-carbon MgO-C refractories[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(6): 2153-2159.
- [4] 汪超,李亚伟,徐小峰,等.普通烧结镁砂骨料中杂质相对镁碳耐火材料抗热震性和高温断裂行为的影响[J].硅酸盐学报,2024,52(6):2094-2106.
Wang C, Li Y W, Xu X F, et al. Influence of impurities in ordinary sintered magnesia aggregates on thermal shock resistance and high temperature fracture behavior of MgO-C refractory[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(6): 2094-2106.
- [5] 赵琪,黄琳,李颖,等.中国菱镁矿需求趋势分析[J].中国矿业,2016,25(12):38-42,47.
Zhao Q, Huang C, Li Y, et al. Analysis of the trend of the magnesite demand in China[J]. China Mining Magazine, 2016, 25(12): 38-42, 47.
- [6] 赵瑞,苏廷龙,彭西高,等.全球菱镁矿资源供需现状分析[J].耐火与石灰,2025,50(1):1-6.
Zhao R, Su T L, Peng X G, et al. Analysis of the current supply and demand status of global magnesite resources[J]. Refractories & Lime, 2025, 50(1): 1-6.
- [7] 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 Y, Wang L Y, Cui J X, et al. Technology progress and development trend of preparing magnesium oxide from magnesite[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2024, 45(5): 95-101.
- [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,2019,40(2):9-15.
Wang Q Q, Chen Z H, Li X A, et al. Domestic progress in preparation of magnesia from magnesite by heat treatment[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2019, 40(2): 9-15.
- [9] 陈峥,刘素芹,张金娜.高纯氧化镁的研究与开发[J].盐科学与化工,2017,46(4):32-35.
Chen Z, Liu S Q, Zhang J N. Research and development of high pure magnesium oxide[J]. Journal of Salt Science and Chemical Industry, 2017, 46(4): 32-35.
- [10] 刘小楠,罗旭东,彭子钧,等.烧结氧化镁的研究进展[J].耐火材料,2020,54(4):365-368.
Liu X N, Luo X D, Peng Z J, et al. Research progress of sintered magnesia[J]. Refractories, 2020, 54(4): 365-368.
- [11] 马北越,张誉忠,高陟,等.致密与多孔氧化镁材料研究进展[J].耐火材料,2021,55(2):169-173.
Ma B Y, Zhang Y Z, Gao Z, et al. Research progress of dense magnesia and porous magnesia materials[J]. Refractories, 2021, 55(2): 169-173.
- [12] Guo Z Q, Bi D L, Ma Y, et al. Approaches to high-grade sintered magnesia from natural magnesite[J]. China's Refractories, 2021, 29(3): 7-12.
- [13] 秦嘉晨,周驰,王春艳,等.二步烧结法制备高致密度镁砂的研究[J].耐火材料,2026.
Qin J C, Zhou C, Wang C Y, et al. Research on the preparation of high-density magnesia sand by two-step sintering method[J]. Refractories, 2026.
- [14] Ma B Y, Ren X M. Effects of key factors on the densification and grain growth behaviour of sintered magnesia from magnesite[J]. Ceramics International, 2022, 48(23): 35525-35535.
- [15] 李环,于景坤,匡世波.菱镁石轻烧水化法制备高密度烧结镁砂[J].耐火材料,2007,41(2):122-125,129.
Li H, Yu J K, Kuang S B. Preparation of high-density magnesia by hydration of magnesite[J]. Refractories, 2007, 41(2): 122-125, 129.
- [16] Tian X L, Li Z X, Feng R T, et al. Preparation of active MgO and high purity sintered magnesia from microcrystal[J]. China's Refractories, 2018, 27(04): 6-12.
- [17] Ji P, Liu Z L, Zhang G C, et al. Effects of $\text{La}_2\text{Ce}_2\text{O}_7$ on the phase composition, microstructure, wetting behaviour and corrosion resistance of magnesia refractory[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1010: 177390.
- [18] Fu L L, Yue J R, Liu W J, et al. Analysis and experiment of sintering and densification of magnesia particles[J]. Chemical Engineering Science, 2023, 268: 118396.
- [19] 张雅茜,马赞彭,侯庆冬,等.重烧镁砂窑炉煅烧菱镁矿机理的研究[J].耐火与石灰,2026.
Zhang Y H, Ma Z P, Hou Q D, et al. Research on the calcination mechanism of magnesite for producing dead-burned magnesia in a shaft kiln[J]. Refractories & Lime, 2026.
- [20] 王聪,郑连营,王莹莹,等.不同生产工艺的镁砂显微结构分析和对比[J].耐火与石灰,2023,48(6):40-44.
Wang C, Zheng L Y, Wang Y Y, et al. Analysis and comparison of magnesia's microstructure from different processes[J]. Refractories & Lime, 2023, 48(6): 40-44.
- [21] 周宝余,李志坚,吴锋,等.块状菱镁矿烧结初期方镁石颗粒致密化行为[J].材料热处理学报,2015,36(5):1-4.
Zhou B Y, Li Z J, Wu F, et al. Periclase particles densification behavior at early stage of block magnesite sintering[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2015, 36(5): 1-4.
- [22] Zhang R N, Liu Z Y, Yu J K. Exploring microfine magnesite based on thermal decomposition and sintering kinetics: a new direction in the one-step preparation of high-density sintered magnesia[J]. Ceramics International, 2024, 50(17): 29108-29119.
- [23] 田晓利,李志勋,冯润棠,等.煅烧制度对微晶菱镁矿制备高致密度烧结镁砂性能的影响[J].耐火材料,2022,56(5):400-406.
Tian X L, Li Z X, Feng R T, et al. Effect of calcination schedule on properties of high density sintered magnesia prepared from microcrystalline magnesite[J]. Refractories, 2022, 56(5): 400-406.
- [24] 鲁志燕,韩露,吴锋,等.新疆尖山菱镁矿一步煅烧制备烧结镁

- 砂[J]. 耐火材料, 2022, **56**(2): 158–161.
- Lu Z Y, Han L, Wu F, et al. Preparation of sintered magnesia by one-step calcination from Xinjiang Jianshan magnesite[J]. Refractories, 2022, **56**(2): 158–161.
- [25] 赵磊, 王蒙岩, 林江顺, 等. 一种利用菱镁矿精矿一步焙烧高纯镁砂的方法: CN201610546780.9[P]. 2016–12–07.
- Zhao L, Wang M Y, Lin J S, et al. Method for one-step roasting of high-purity magnesia using magnesite concentrate: CN201610546780.9[P]. 2016–12–07.
- [26] 刘弘. 高纯镁砂的制取方法: CN200710159368.2[P]. 2009–07–08.
- Liu H. Preparation method of high purity magnesia: CN200710159368.2[P]. 2009–07–08.
- [27] 李环, 苏莉, 于景坤. 高密度烧结镁砂的研究[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2007, **28**(3): 381–384.
- Li H, Su L, Yu J K. Investigation on process flow of high-density magnesia[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2007, **28**(3): 381–384.
- [28] Yamamoto K, Umeya K. Production of high density magnesia[J]. American Ceramic Society Bulletin, 1981, **60**(6): 636–639.
- [29] 周宝余, 李志坚, 吴锋, 等. 用菱镁矿碎矿生产烧结镁砂的试验研究[J]. 耐火材料, 2015, **49**(2): 137–139.
- Zhou B Y, Li Z J, Wu F, et al. Experimental study on producing sintered magnesia from magnesite crushed ore[J]. Refractories, 2015, **49**(2): 137–139.
- [30] Jin E D, Yu J K, Wen T P, et al. Fabrication of high-density magnesia using vacuum compaction molding[J]. Ceramics International, 2018, **44**(6): 6390–6394.
- [31] Allison A G, Sesler E C JR, Haldy N L, et al. Sintering of high-purity magnesia[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1956, **39**(4): 151–154.
- [32] 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 research on sintering behavior of Xinjiang HeJing magnesite[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2017.
- [33] 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.
- Ma P C. Study on high-activity and high-density MgO[D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [34] 郭玉香, 彭强, 曲殿利, 等. 轻烧氧化镁活性对镁砂烧结性能及显微结构的影响[J]. 耐火材料, 2018, **52**(3): 176–179.
- Guo Y X, Peng Q, Qu D L, et al. Influence of light calcined magnesia activity on sintering property and microstructure of magnesia[J]. Refractories, 2018, **52**(3): 176–179.
- [35] 李广垠, 李志坚, 徐娜, 等. 轻烧氧化镁活性对烧结镁砂性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2018, **37**(5): 1699–1703.
- Li G Y, Li Z J, Xu N, et al. Effect of light burned magnesia activity on properties of sintered magnesia[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, **37**(5): 1699–1703.
- [36] 徐徽, 蔡勇, 陈白珍, 等. 用低品位菱镁矿制取高纯镁砂[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2006, **37**(4): 698–702.
- Xu H, Cai Y, Chen B Z, et al. Preparation of high purity magnesia from low-grade magnesite[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2006, **37**(4): 698–702.
- [37] 徐文彪, 李亚伟, 鄢文, 等. 轻烧温度及球磨工艺对盐湖 Mg(OH)₂ 制备镁砂烧结行为影响[J]. 硅酸盐学报, 2024, **52**(9): 3003–3011.
- Xu Y B, Li Y W, Yan W, et al. Effects of calcination temperature and ball milling on sintering behavior of magnesia from salt lake Mg(OH)₂[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, **52**(9): 3003–3011.
- [38] 徐兴无, 饶东生. 菱镁矿母盐假相对 MgO 烧结致密化的影响[J]. 硅酸盐学报, 1988, **16**(3): 244–251.
- Xu X W, Rao D S. Influence of pseudomorph of magnesite on densification of MgO sintering[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 1988, **16**(3): 244–251.
- [39] 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.
- [40] 赵春燕. 高密度烧结镁砂的制备与研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- Zhao C Y. Preparation and investigation of high-density sintering magnesia[D]. Shenyang: Northeastern University, 2008.
- [41] 陈露, 张玲, 孟昕, 等. Sc₂O₃ 加入量对菱镁矿制备镁砂性能的影响[J]. 耐火材料, 2023, **57**(2): 145–148.
- Chen L, Zhang L, Meng X, et al. Effect of Sc₂O₃ on properties of magnesia prepared from magnesite[J]. Refractories, 2023, **57**(2): 145–148.
- [42] Chaudhuri M, Banerjee G, Kumar A, et al. Secondary phases in natural magnesite sintered with addition of titania, ilmenite and zirconia[J]. Journal of Materials Science, 1999, **34**(23): 5821–5825.
- [43] Kumar P, Burhanuddin, Kumar A, et al. Effect of titania on the microstructure evolution of sintered magnesite in correlation with its properties[J]. Ceramics International, 2015, **41**(7): 9003–9008.
- [44] 张汪年, 王利, 邓宁, 等. CoO 对菱镁矿制备镁砂性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2018, **36**(4): 292–296.
- Zhang W N, Wang L, Deng N, et al. Effect of CoO addition on the preparation of magnesia by magnesite[J]. Powder Metallurgy Technology, 2018, **36**(4): 292–296.
- [45] 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 sintered magnesia prepared from magnesite[J]. Refractories, 2021, **55**(1): 61–63, 68.
- [46] 马鹏程, 刘涛, 袁磊, 等. Y₂O₃ 对烧结镁砂致密性的影响[J]. 材料与冶金学报, 2013, **12**(3): 173–176, 202.
- Ma P C, Liu T, Yuan L, et al. Effect of yttria on densification of sintered magnesia[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2013, **12**(3): 173–176, 202.
- [47] Li S, Li X, Yin Z Y, et al. Effects of NiO addition on the microstructural evolution and performance of sintered magnesia aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2024, **443**: 137760.
- [48] Li S, Li X, Yin Z Y, et al. Enhancing sintered magnesia: Role of ZnO in densification, thermal conductivity, and corrosion resistance[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2024, **44**(10): 6024–6036.
- [49] Xie Y, Chen Z, Wu Y L, et al. Activated sintering of activated carbon-doped magnesia[J]. Ceramics International, 2014, **40**(10): 16543–16547.
- [50] Mi Y, Xu Y B, Li Y W, et al. Fabrication and thermal shock behavior of ZrO₂ toughened magnesia aggregates[J]. Ceramics

- International, 2021, **47**(18): 26475–26483.
- [51] Jin E D, Yu J K, Wen T P, et al. Effect of cerium oxide on preparation of high-density sintered magnesia from crystal magnesite[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, **9**(5): 9824–9830.
- [52] 杨海燕, 张汪年, 邓宁, 等. NiO 掺杂对菱镁矿烧结性能的影响[J]. 粉末冶金技术, 2019, **37**(4): 279–282, 287.
- Yang H Y, Zhang W N, Deng N, et al. Influence of NiO doping on the sintered properties of magnesite[J]. Powder Metallurgy Technology, 2019, **37**(4): 279–282, 287.
- [53] 刘磊, 王周福, 何俊鹏, 等. Y_2O_3 和 CeO_2 对镁砂烧结性能及显微结构的影响[J]. 耐火材料, 2012, **46**(5): 340–343.
- Liu L, Wang Z F, He J P, et al. Effects of Y_2O_3 and CeO_2 on sintering and microstructure of magnesite[J]. Refractories, 2012, **46**(5): 340–343.
- [54] 袁锐. 用菱镁矿粉矿制备高纯镁砂的研究[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2003, **19**(5): 24–25.
- Yuan R. High-purity dead-burned magnesia made from magnesite powder[J]. China Non-Metallic Mining Industry Herald, 2003, **19**(5): 24–25.
- [55] 饶东生, 朱秀英. 山东掖县浮选镁精矿易烧性能的研究[J]. 武汉钢铁学院学报, 1982, **5**(3): 52–64.
- Rao D S, Zhu X Y. A study of the factors enhancing the sinterability of the magnesite concentrate prepared by flotation of the raw magnesite(country of origin–Yexian county, Shandong)[J]. Journal of Wuhan University of Science and Technology, 1982, **5**(3): 52–64.
- [56] 许金帆, 侯庆冬, 黄煜培, 等. 竖窑烧结镁砂传热学数值模拟研究进展[J]. 钢铁研究学报, 2026, **38**(4): 467–477.
- Xu J F, Hou Q D, Huang Y P, et al. Research progress on numerical simulation of heat transfer for magnesite sintering in shaft kilns[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2026, **38**(4): 467–477.
- [57] 吴锋, 李志坚, 曲殿利, 等. 块状菱镁矿的烧结特性[J]. 材料研究学报, 2012, **26**(5): 557–560.
- Wu F, Li Z J, Qu D L, et al. Study on sintering characteristics of block magnesite[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2012, **26**(5): 557–560.
- [58] Guo Z Q, Ma Y, Rigaud M. Sinterability of macrocrystalline and cryptocrystalline magnesite to refractory magnesia[J]. International Journal of Ceramic Engineering & Science, 2020, **2**(6): 303–309.
- [59] 史树威, 郭宗奇. 利用节能环保机械化竖窑制备重烧镁砂[J]. 耐火材料, 2020, **54**(6): 536–539.
- Shi S W, Guo Z Q. Manufacture of ordinary sintered magnesia by eco-friendly, energy-saving and high automation shaft kiln[J]. Refractories, 2020, **54**(6): 536–539.
- [60] 张兴业. 我国超高温竖窑及其生产现状[J]. 工业炉, 2010, **32**(4): 15–18.
- Zhang X Y. Ultra-high temperature shaft kiln and its production status in China[J]. Industrial Furnace, 2010, **32**(4): 15–18.
- [61] 李鑫, 罗旭东, 于恣. 我国超高温镁砂竖窑回顾及发展[J]. 硅酸盐通报, 2017, **36**(2): 503–506.
- Li X, Luo X D, Yu M. Review and development of ultra high shaft kiln of China[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2017, **36**(2): 503–506.
- [62] 张晓虎, 赵亮, 董辉. 高纯镁砂颗粒床层气固传热系数实验[J]. 材料与冶金学报, 2026.
- Zhang X H, Zhao L, Dong H. Experiments on gas-solid heat transfer coefficient in a high-purity magnesia particle bed[J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2026.
- [63] 杨为振. 煅烧镁砂用高温油竖窑的操作技术[J]. 硅酸盐通报, 2003, **22**(4): 89–93.
- Yang W Z. Operation technique of high temperature oil shaft kiln for calcination of magnesite[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2003, **22**(4): 89–93.
- [64] Peters W C. The chemistry and technology of magnesia[J]. Choice Reviews Online, 2006, **44**(4): 671–672.
- [65] Itatani K, Nomura M, Kishioka A, et al. Sinterability of various high-purity magnesium oxide powders[J]. Journal of Materials Science, 1986, **21**(4): 1429–1435.
- [66] Garner S, Ruiz E, Strong J, et al. Mechanisms of crack formation in die compacted powders during unloading and ejection: an experimental and modeling comparison between standard straight and tapered dies[J]. Powder Technology, 2014, **264**: 114–127.
- [67] 张晓虎, 张晟, 赵亮, 等. 烧结镁砂煅烧竖炉内气固传热特性数值分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, **43**(1): 40–47.
- Zhang X H, Zhang S, Zhao L, et al. Numerical analysis of gas-solid heat transfer characteristics in shaft furnace for calcination of sintered magnesia[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2022, **43**(1): 40–47.
- [68] 张林进, 陈小娟. 高温竖窑燃烧状况的 CFD 模拟[J]. 工业炉, 2015, **37**(2): 7–10.
- Zhang L J, Chen X J. CFD simulation of combustion condition in high temperature shaft kiln[J]. Industrial Furnace, 2015, **37**(2): 7–10.
- [69] Rasul, M G, Saotayanan D. Modeling and simulation of thermodynamic processes of vertical shaft kiln used for producing deadburned magnesia[J]. International Journal of Energy and Environment, 2007, **1**(1): 37–44.
- [70] 丛伟. 新型重烧氧化镁竖炉能源利用分析[J]. 冶金能源, 2019, **38**(3): 59–61.
- Cong W. Analysis of energy utilization of dead-burned magnesia shaft furnace[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2019, **38**(3): 59–61.
- [71] Zhong Y W, Wang Z, Guo Z C, et al. Defluidization behavior of iron powders at elevated temperature: Influence of fluidizing gas and particle adhesion[J]. Powder Technology, 2012, **230**: 225–231.
- [72] Shabanian J, Sauriol P, Chaouki J. A simple and robust approach for early detection of defluidization[J]. Chemical Engineering Journal, 2017, **313**: 144–156.
- [73] Siegl J H. High-temperature de fluidization[J]. Powder Technology, 1984, **38**(1): 13–22.
- [74] Lettieri P, Macrì D. Effect of process conditions on fluidization[J]. KONA Powder and Particle Journal, 2016, **33**: 86–108.
- [75] Yates J G. Effects of temperature and pressure on gas-solid fluidization[J]. Chemical Engineering Science, 1996, **51**(2): 167–205.
- [76] 蔡平, 陈沙鹏, 金涌, 等. 温度、压力对鼓泡流态化向湍动流态化流型转变的影响[J]. 化工学报, 1990, **41**(2): 255.
- Cai P, Chen S P, Jin Y, et al. Influence of temperature and pressure on the flow pattern transition from bubbling fluidization to turbulent fluidization[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 1990, **41**(2): 255.

- [77] 金涌, 程易, 白丁荣, 等. 中国流态化技术研发史略[J]. 化工进展, 2023, **42**(6): 2761–2780.
- Jin Y, Cheng Y, Bai D R, et al. Fluidization research and development in China[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2023, **42**(6): 2761–2780.
- [78] Gao H, Chen Z S, Zhang Q J, et al. Insights into gas–solid flow structures in fluidized beds up to 1600 °C via analysis of gas residence time distributions[J]. Powder Technology, 2025, **449**: 120426.
- [79] Chen Z S, Gao H, Zhang Q J, et al. Understanding heat transfer and the role of bed hydrodynamics in high–temperature fluidized beds[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2025, **64** (1): 854–867.
- [80] Fu L L, Zhang Q J, Xu G W, et al. Pressure fluctuations in a gas–solid fluidized bed at temperatures up to 1650 °C[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, **468**: 143806.
- [81] Zhang Q J, Fu L L, Xu G W, et al. Flow regimes and transitions in an ultra–high temperature gas–solid fluidized bed[J]. Powder Technology, 2023, **430**: 119014.
- [82] Zhang Q J, Fu L L, Xu G W, et al. The transition to turbulent fluidization in a gas–solid fluidized bed operating from ambient temperature to 1600 °C[J]. Particuology, 2024, **93**: 111–124.
- [83] Zhang Q J, Fu L L, Xu G W, et al. Temperature influence on minimum fluidization velocity: Complexity, mechanism, and solutions[J]. Particuology, 2024, **88**: 344–349.
- [84] Zhang Q J, Fu L L, Xu G W, et al. Effect of temperature on bed voidages in static and fluidization states[J]. Applied Thermal Engineering, 2025, **278**: 127406.
- [85] Zhang Q J, Chen Z S, Gao H, et al. Effect of temperature on gas–solid flow structure in bubbling fluidized beds[J]. Chemical Engineering Science, 2025, **308**: 121380.
- [86] Zhang Q J, Fu L L, Xu G W, et al. Experimental quantification of interparticle forces in gas–solid fluidized beds operating at temperatures from ambient to 1500 °C[J]. Chemical Engineering Research and Design, 2024, **211**: 318–330.
- [87] Xie J C, Gao H, Zhang Q J, et al. Characteristics of mass transfer between bubble and emulsion phases of high–temperature gas – solid bubbling fluidized beds[J]. Particuology, 2025, **107**: 26–34.
- [88] Fu L L, Bai H L, Bai D R, et al. Hydrodynamics of gas–solid fluidization at ultra–high temperatures[J]. Powder Technology, 2022, **406**: 117552.
- [89] 付亮亮. 高温流态化制备高密度镁砂颗粒的基础研究[D]. 鞍山: 辽宁科技大学, 2024.
- Fu L L. Research on preparation of high–density magnesite particles by high–temperature fluidization[D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2024.
- [90] 聂琿, 付亮亮, 张庆瑾, 等. 不同晶型菱镁矿轻烧颗粒的烧结致密性研究[J]. 当代化工, 2025, **54**(6): 1271–1277.
- Nie H, Fu L L, Zhang Q J, et al. Study on densification characteristics of different crystalline magnesite particles in direct sintering[J]. Contemporary Chemical Industry, 2025, **54**(6): 1271–1277.