

多孔镁基镁铁铝复合尖晶石耐火骨料的合成机理

陈茜琳¹, 鄢 文¹, 王 晓²

(1. 武汉科技大学, 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 武汉 430081; 2. 青海大学化工学院, 西宁 810016)

摘 要: 多孔骨料是对耐火材料进行轻量化设计的关键。以轻烧菱镁矿、氢氧化铝和铁红为原料, 采用原位分解合成法, 成功制备了多孔镁基镁铁铝复合尖晶石耐火骨料, 在分析烧成温度(1 000~1 600 °C)对显微结构与强度影响的基础上, 研究了多孔骨料的合成机理。研究表明: 当烧成温度为 1 000~1 300 °C 时, 试样内气孔来自微颗粒内和微颗粒之间, 基本没有颈部连接; 当烧成温度升高到 1 400~1 600 °C 时, 微颗粒内气孔合并长大、迁出, 颈部显著长大, 强度提高; 镁铁铝复合尖晶石的形成过程分为 2 步, 一是在氢氧化铝假象表面生成 MgAl_2O_4 后, 再与 Fe^{3+} 反应生成环状镁铁铝复合尖晶石, 二是在 MgO 位置生成 MgFe_2O_4 , 再与 Al^{3+} 反应生成粒状和条状镁铁铝复合尖晶石; 当烧成温度为 1 550 °C 时, 试样具有优异的综合性能, 其显气孔率为 24.4%, 中位孔径为 25.89 μm , 导热系数为 2.79 W/(m·K)(1 000 °C), 耐压强度为 74.4 MPa, 与市售烧结镁砂相比, 导热系数降低了 64.7%。

关键词: 多孔耐火骨料; 镁基镁铁铝复合尖晶石; 原位分解合成法; 显微结构; 强度

中图分类号: TQ175 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2023)03-0571-08

网络出版时间: 2023-02-08

Synthesis of Porous Magnesia Based Composite Spinel ($\text{Mg}(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_4$)
Refractory AggregatesCHEN Qianlin¹, YAN Wen¹, WANG Xiao²(1. Wuhan University of Science and Technology, The State Key Laboratory of Refractories and Metallurgy, Wuhan 430081, China;
2. Qinghai University, School of Chemical Engineering, Xining 810016, China)

Abstract: Porous aggregates are a key material for the lightweight refractory. Porous magnesia based composite spinel ($\text{Mg}(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_4$) refractory aggregates were prepared by an *in-situ* decomposition synthesis method with calcined magnesite, $\text{Al}(\text{OH})_3$ and iron oxide as raw materials. The influence of sintering temperature (*i.e.*, 1 000–1 600 °C) on the microstructures and strengths was investigated, and the synthesis mechanism of porous aggregates was analyzed. The results show that the pores in the samples are composed of the pores in the micron-sized particles and the pores among micron-sized particles as well as they have a few neck connections at the sintering temperatures of 1 000–1 300 °C, and the pores in the micron-sized particles migrate to the gaps and the necks grow with a further increase of sintering temperature to 1 400–1 600 °C, thus promoting the compressive strength of the samples. The formation of composite spinel ($\text{Mg}(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_4$) in the samples involves that MgAl_2O_4 is formed on the surface of $\text{Al}(\text{OH})_3$ pseudomorph and reacts with Fe^{3+} to form the composite spinel ($\text{Mg}(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_4$) with a ring structure, and MgFe_2O_4 is formed in the position of MgO and reacts with Al^{3+} to form the composite spinel ($\text{Mg}(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_4$) with the granular and strip structures. The porous magnesia based composite spinel ($\text{Mg}(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_4$) refractory aggregates have the optimum performance (*i.e.*, an apparent porosity of 24.4%, a median pore size of 25.89 μm , a thermal conductivity of 2.79 W/(m·K) at 1 000 °C and a compressive strength of 74.4 MPa) at the sintering temperature of 1 550 °C. Meanwhile, compared with the existing sintered magnesia, the thermal conductivity of porous magnesia based composite spinel ($\text{Mg}(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_4$) refractory aggregates synthesized can be reduced by 64.7%.

Keywords: porous refractory aggregates; magnesia based composite spinel ($\text{Mg}(\text{Fe}, \text{Al})_2\text{O}_4$); *In-situ* decomposition synthesis method; microstructures; strengths

收稿日期: 2022-09-28。 修订日期: 2022-10-28。

基金项目: 国家自然科学基金(U1908227, U21A2058)。

第一作者: 陈茜琳(1998—), 女, 博士研究生。

通信作者: 鄢 文(1981—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2022-09-28. Revised date: 2022-10-28.

First author: CHEN Qianlin (1998–), female, Doctorial candidate.

E-mail: 1435294394@qq.com

Correspondent author: YAN Wen (1981–), male, Ph. D., Professor.

E-mail: yanwen@wust.edu.cn

水泥回转窑作为水泥生产的重要热工装备,其节能降耗一直是关注的焦点^[1-3]。水泥回转窑协同处理城市固废是一项节能、环保的好技术^[4-7],不但节约能源^[8-11],还能提高水泥产量。方镁石-铁铝尖晶石耐火材料作为水泥回转窑烧成带用主要耐火品种之一,因固废协同处理时的富氧燃烧环境仍面临 2 个问题:1) 方镁石-铁铝尖晶石耐火材料由致密的镁砂和铁铝尖晶石制备而成^[12-14],导热系数高,不利于隔热保温;2) 由于水泥回转窑内富氧燃烧环境^[15]会使铁铝尖晶石中 Fe^{2+} 极易转变为 Fe^{3+} ,带来体积变化,造成材料损毁。因此,亟待开发一种导热系数低、体积稳定性好的水泥回转窑烧成带用替代耐火产品。

采用多孔骨料替代致密骨料对耐火材料进行轻量化设计是降低导热系数的有效途径^[16-19]。如 Yan 等^[20]采用多孔方镁石-镁铝尖晶石骨料替代致密镁砂骨料对方镁石-镁铝尖晶石浇注料进行轻量化设计,发现相比于致密方镁石-镁铝尖晶石浇注料,轻量化方镁石-镁铝尖晶石浇注料抗折强度提高了 136.8%,导热系数降低了 18.8%(1 000 $^{\circ}\text{C}$),抗侵蚀性能提高了 9.7%。Chen 等^[21]采用多孔刚玉-尖晶石骨料制备了轻量化刚玉-尖晶石浇注料,并研究了 SiC 含量对其性能的影响,发现当 SiC 含量为 1.9%(质量分数)时,轻量化刚玉-尖晶石浇注料具有较高的抗折强度(19.66 MPa)和耐压强度(116.15 MPa),较低的导热系数[0.978 W/(m·K), 1 000 $^{\circ}\text{C}$]。

采用镁铁铝复合尖晶石相代替铁铝尖晶石相或许是解决现有方镁石-铁铝尖晶石耐火材料体积稳定性差的另一途径。如李森等^[22]以高纯镁砂和烧结铁铝尖晶石粉为原料制备了镁铁铝复合尖晶石砖,

研究发现其中生成了镁铁铝复合尖晶石,使得材料具有良好的挂窑皮性。Liu 等^[23]研究了水泥回转窑用方镁石-复合尖晶石耐火材料显微结构与性能,发现镁铁铝复合尖晶石相具有优异的抗盐碱侵蚀能力和挂窑皮能力。

通过以上分析可知,将多孔结构和镁铁铝复合尖晶石物相 2 种优点相结合,研发一种多孔镁基镁铁铝复合尖晶石耐火骨料有望兼具低导热、稳定性好的优点,以解决方镁石-铁铝尖晶石耐火材料面临的上述 2 个问题。尽管目前多孔镁基镁铁铝复合尖晶石耐火骨料研究并未见报道,但关于多孔方镁石-镁铝尖晶石耐火骨料的研究可以提供一些启示。如 Yan 等^[24]以菱镁矿和 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 为原料,采用原位分解合成法,通过控制孔结构演变,成功制备了显气孔率为 42.1%~44.2%、耐压强度为 21.1~52.0 MPa 的多孔 $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ 质耐火骨料。在此工作启示下,向菱镁矿和氢氧化铝原料体系中引入氧化铁源,有望通过控制反应过程和结构演变,制备具有高强度的多孔镁基镁铁铝复合尖晶石耐火骨料。

本工作拟以轻烧菱镁矿、氢氧化铝和铁红为原料,采用原位分解合成法,制备多孔镁基镁铁铝复合尖晶石耐火骨料,并在研究烧成温度对多孔耐火骨料结构与性能影响基础上,提出了该材料合成机理。

1 实验

1.1 样品制备

以轻烧菱镁矿($D_{50}=26.42\text{ }\mu\text{m}$,河南瑞泰耐火材料科技有限公司)、氢氧化铝($D_{50}=88.90\text{ }\mu\text{m}$,中国铝业有限公司)和铁红($D_{50}=482\text{ nm}$,浙江联合颜料有限公司)为原料,其化学组成见表 1。

表 1 轻烧菱镁矿、氢氧化铝和铁红的化学组成

Table 1 Chemical compositions of calcined magnesite, $\text{Al}(\text{OH})_3$ and iron oxide red

w/%

Raw material	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2	IL
Calcined magnesite	1.31	0.28	1.19	1.62	93.98	0.10	0.72	0.02	
$\text{Al}(\text{OH})_3$	0.08	66.07	0.005	0.05	0.01	0.04	0.01		33.37
Fe_2O_3	0.17	0.02	86.34	0.02	0.01	0.01	0.39		

w—Mass fraction.

按镁铁铝复合尖晶石理论含量为 16%(质量分数)(75.70%轻烧菱镁矿, 12.46%氢氧化铝, 11.84%铁红)的配方进行配料。将配好的原料置于聚氨酯混料桶中以刚玉球为介质(球料质量比为 1:2)混料 2 h 后,颗粒的尺寸呈现双峰分布,小粒径峰

为 $0.48\text{ }\mu\text{m}$,大粒径峰为 $51.38\text{ }\mu\text{m}$,中位粒径为 $28.24\text{ }\mu\text{m}$,如图 1 所示。在 100 MPa 压力下压制成 $\phi 36\text{ mm}\times 36\text{ mm}$ 的圆柱体试样,试样经 110 $^{\circ}\text{C}$ 保温 24 h 后,再分别于电炉中经 1 000、1 200、1 300、1 400、1 500、1 550 $^{\circ}\text{C}$ 和 1 600 $^{\circ}\text{C}$ 保温 3 h,随炉冷却。

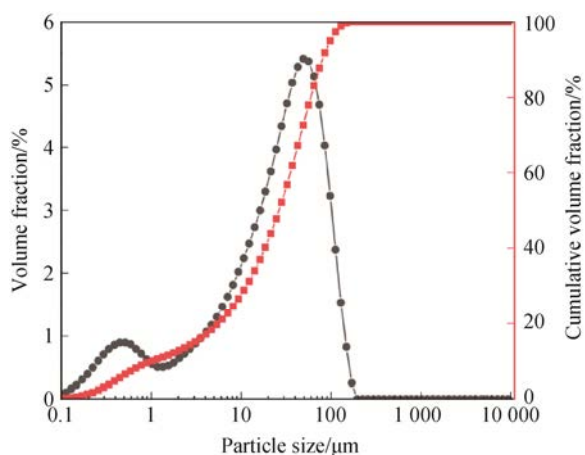


图 1 混合后原料的粒度分布和累积分布

Fig. 1 Particle size and cumulative distribution curves of particles after mixed

1.2 样品表征

采用 Philips Xpert TMP 型 X 射线衍射仪以 $2^\circ/\text{min}$ 的扫描模式从 10° 到 90° 记录 2θ 角表征试样的物相组成。用带有 INCA IE 350 Penta FET X-3 型能谱分析仪的 Nova 400 Nano 型场发射扫描电子显微镜观察试样的显微结构、元素分布和孔径特性,利用 MIAPS 软件统计颈部尺寸,利用 Image pro 图像分析软件测定孔径大小和分布状态。按照 GB/T 2997—2004《致密定形耐火制品的体积密度、显气孔率试验方法》,以煤油为介质测定试样的体积密度和显气孔率。按照 GB/T 5072—2008《耐火材料的常温耐压强度试验方法》测定试样的常温耐压强度。利用 Flashline-5000 型激光导热仪测定试样的导热系数,分别采用 FactSage[®] 6.2 中的 Equilib 模块和 Viscosity 模块计算试样在高温下的液相含量和液相黏度。

2 结果与讨论

2.1 物相组成

图 2 为经不同温度烧后各试样的 XRD 谱。由图 2 可见:当烧成温度为 $1\,000^\circ\text{C}$ 时,试样的主要物相为方镁石、赤铁矿、刚玉和铁酸镁固溶体;当烧成温度为 $1\,200^\circ\text{C}$ 时,出现少量镁铝尖晶石;当烧成温度升高至 $1\,300\sim 1\,600^\circ\text{C}$ 时,试样的主要物相为方镁石、镁铁铝复合尖晶石 ($\text{Mg}_{0.7}\text{Al}_{1.97}\text{Fe}_{0.23}\text{O}_4$, JCPDS01-089-8734) 和铁酸镁固溶体。

2.2 显微结构

本工作对所有烧后试样的显微结构进行了表征后,发现 $1\,000^\circ\text{C}$ 、 $1\,200^\circ\text{C}$ 、 $1\,300^\circ\text{C}$ 、 $1\,400^\circ\text{C}$ 、 $1\,550^\circ\text{C}$ 和 $1\,600^\circ\text{C}$ 烧后试样的显微结构具有典型显微结构

特征,能反映出烧成温度对显微结构的影响特点,因此本部分给出了 6 个温度烧后试样的显微结构照片。

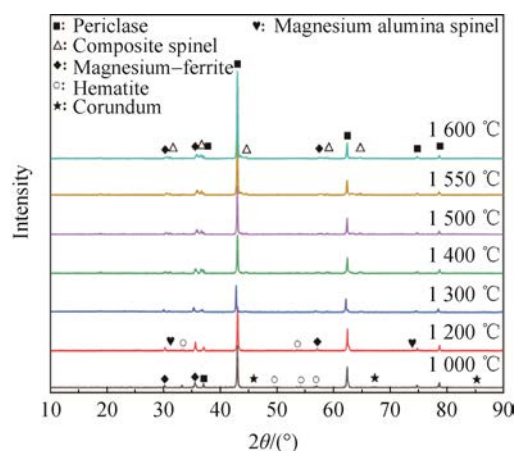
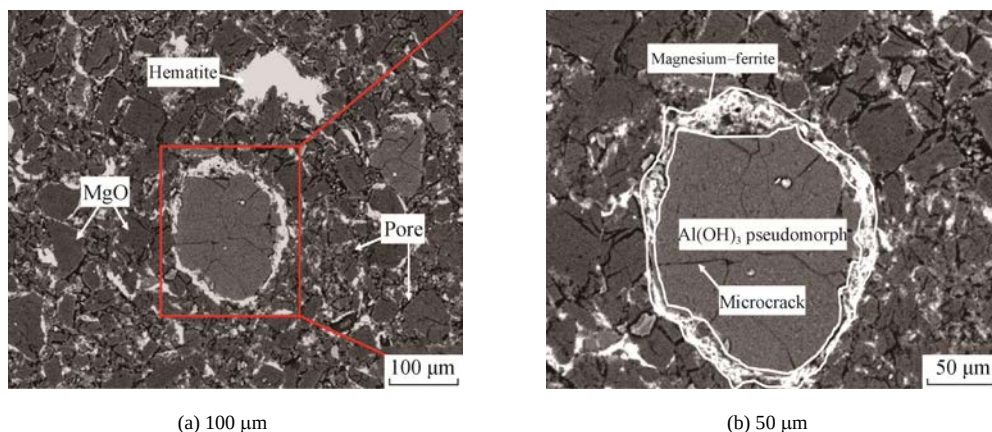


图 2 经不同温度烧后各试样的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of samples sintered at different temperatures

图 3、图 4 和图 5 分别为经 $1\,000^\circ\text{C}$ 、 $1\,200^\circ\text{C}$ 和 $1\,300^\circ\text{C}$ 烧成后试样的显微结构照片。由图 3a、图 3b、图 4a、图 4b、图 5a 和图 5b 可见,当烧成温度为 $1\,000^\circ\text{C}$ 时,试样由氧化铁、氧化镁和多孔氧化铝团聚体 3 种微颗粒和极少量铁酸镁固溶体组成,其中,分布在微颗粒间的白色区域为氧化铁,占大部分区域的深灰色为氧化镁;中间浅灰色区域为多孔氧化铝团聚体,称之为氢氧化铝假象;氢氧化铝假象周围暗白色区域为铁酸镁固溶体,表明氧化镁和氧化铁之间存在较微弱的反应。当烧成温度由 $1\,000^\circ\text{C}$ 升高至 $1\,300^\circ\text{C}$ 时,氢氧化铝假象外层的 Al^{3+} 先与 Mg^{2+} 开始反应生成一定量的镁铝尖晶石,再与 Fe^{3+} 反应,生成镁铁铝复合尖晶石,试样中微颗粒重排,微颗粒内部气孔合并长大、迁出,使微颗粒间气孔长大。

图 6、图 7 和图 8 分别为经 $1\,400^\circ\text{C}$ 、 $1\,550^\circ\text{C}$ 和 $1\,600^\circ\text{C}$ 烧后试样的显微结构照片。由图 6a、图 6b、图 7a、图 7b、图 8a 和图 8b 可见,当烧成温度为 $1\,400^\circ\text{C}$ 时,在原氢氧化铝假象的位置形成了环状结构的镁铁铝复合尖晶石;同时,在氧化镁微颗粒上形成较多粒状和条状镁铁铝复合尖晶石,微颗粒间形成了少量颈部,平均颈部尺寸为 $5.52\,\mu\text{m}$ 。当烧成温度由 $1\,400^\circ\text{C}$ 升高至 $1\,600^\circ\text{C}$ 时,环状结构的镁铁铝复合尖晶石内部气孔变大,与周围氧化镁微颗粒界面结合更好;氧化镁微颗粒上粒状和条状的镁铁铝复合尖晶石明显增多,内部气孔减少,颈部增多,平均颈部尺寸增大至 $21.18\,\mu\text{m}$,微颗粒间气孔减小。

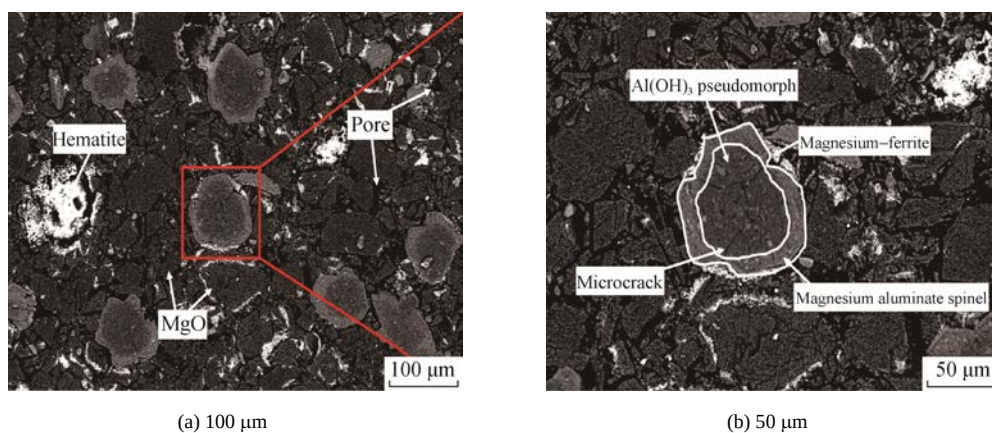


(a) 100 μm

(b) 50 μm

图 3 经 1000 °C 烧后试样的显微结构照片

Fig. 3 Microstructure photos of the sample sintered at 1000 °C

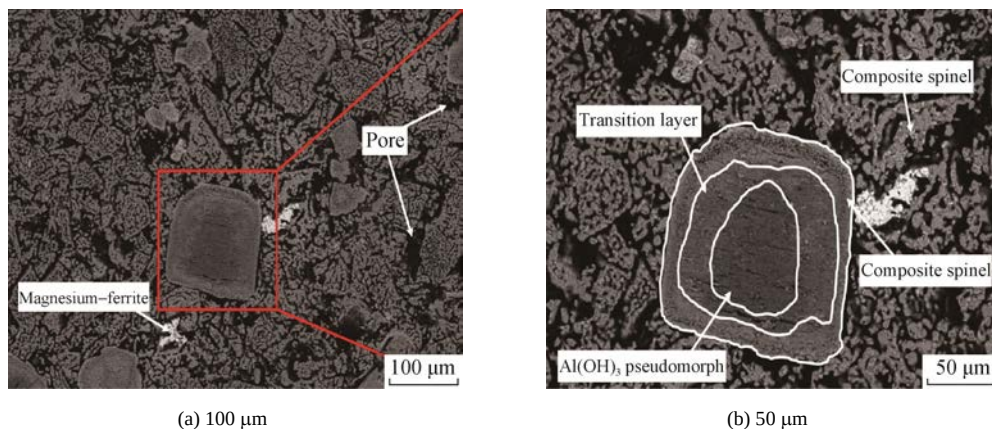


(a) 100 μm

(b) 50 μm

图 4 经 1200 °C 烧后试样的显微结构照片

Fig. 4 Microstructure photos of the sample sintered at 1200 °C



(a) 100 μm

(b) 50 μm

图 5 经 1300 °C 烧后试样的显微结构照片

Fig. 5 Microstructure photos of the sample sintered at 1300 °C

2.3 物理性能

图 9 为经不同温度烧后试样的孔径分布和累积分布图。由图 9 可以看出, 试样中的孔径分布均为双峰分布, 其中小孔峰和大孔峰分别位于 0.65~2.06 μm 和 3.25~51.30 μm 之间。小孔位于氧化镁微颗粒内部, 大孔位于微颗粒间和镁铁铝复合尖晶石

环内。经统计, 经 1000、1200、1300、1400、1550 °C 和 1600 °C 烧后试样的中位孔径为 3.25、5.28、11.06、20.77、25.89 μm 和 34.88 μm。

图 10 为经不同温度烧后试样的显气孔率和体积密度。由图 10 可知, 当烧成温度为 1000~1200 °C 时, 显气孔率为 52.1%~56.5%, 体积密度

为 $1.59\sim 1.78\text{ g/cm}^3$; 而当烧成温度升高至 $1550\sim 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 显气孔率减小至 $21.8\%\sim 24.4\%$, 体积密度增大至 $2.83\sim 2.93\text{ g/cm}^3$ 。

图 11 为经不同温度烧后试样的耐压强度。由图 11 可见: 当烧成温度为 $1000\sim 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,

试样的耐压强度很小, 为 $5.4\sim 6.3\text{ MPa}$; 当烧成温度升高至 $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 试样的耐压强度显著提高至 25.3 MPa ; 而当烧成温度进一步升高至 $1550\sim 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 试样的耐压强度急剧增大至 $74.4\sim 82.4\text{ MPa}$ 。

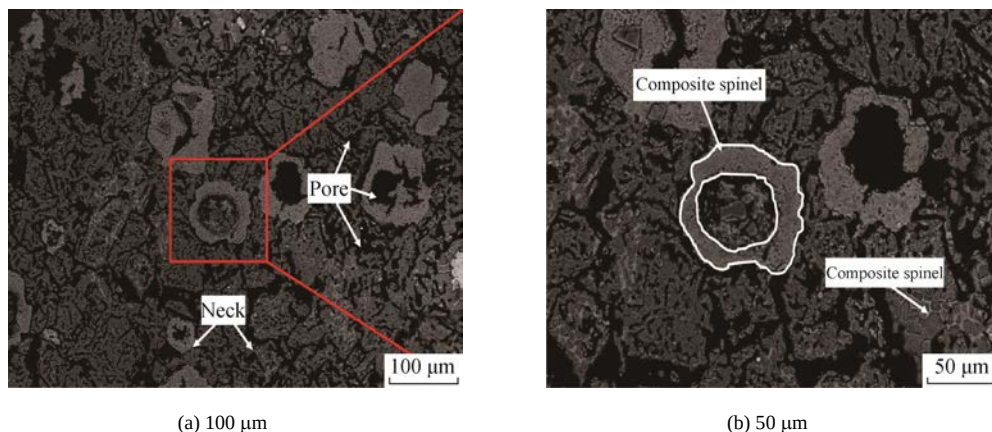


图 6 经 $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烧后试样的显微结构照片

Fig. 6 Microstructure photos of the sample sintered at $1400\text{ }^{\circ}\text{C}$

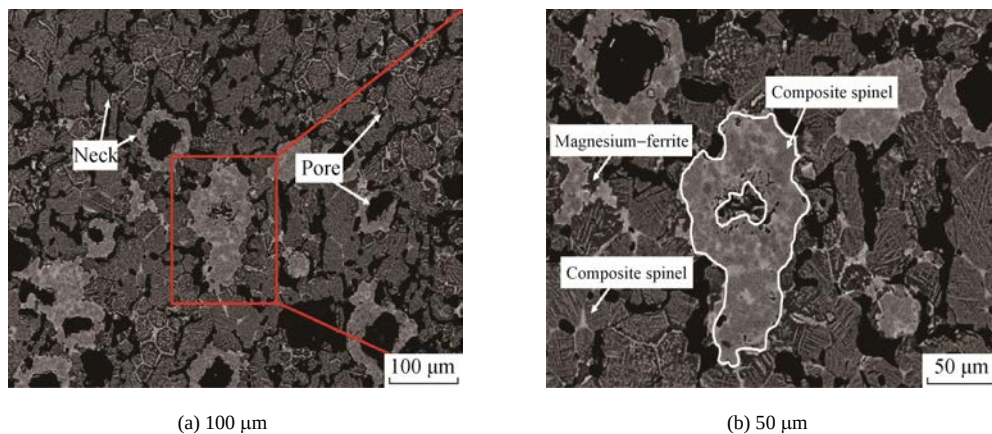


图 7 经 $1550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烧后试样的显微结构照片

Fig. 7 Microstructure photos of the sample sintered at $1550\text{ }^{\circ}\text{C}$

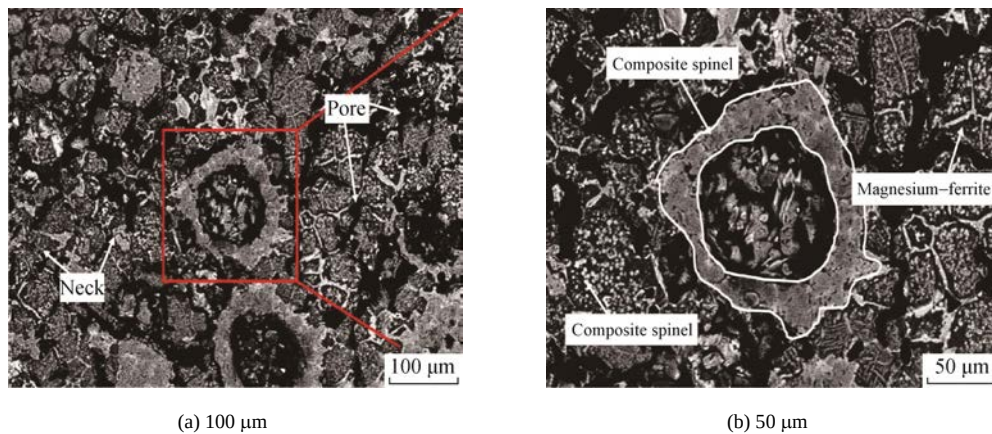


图 8 经 $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烧后试样的显微结构照片

Fig. 8 Microstructure photos of the sample sintered at $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$

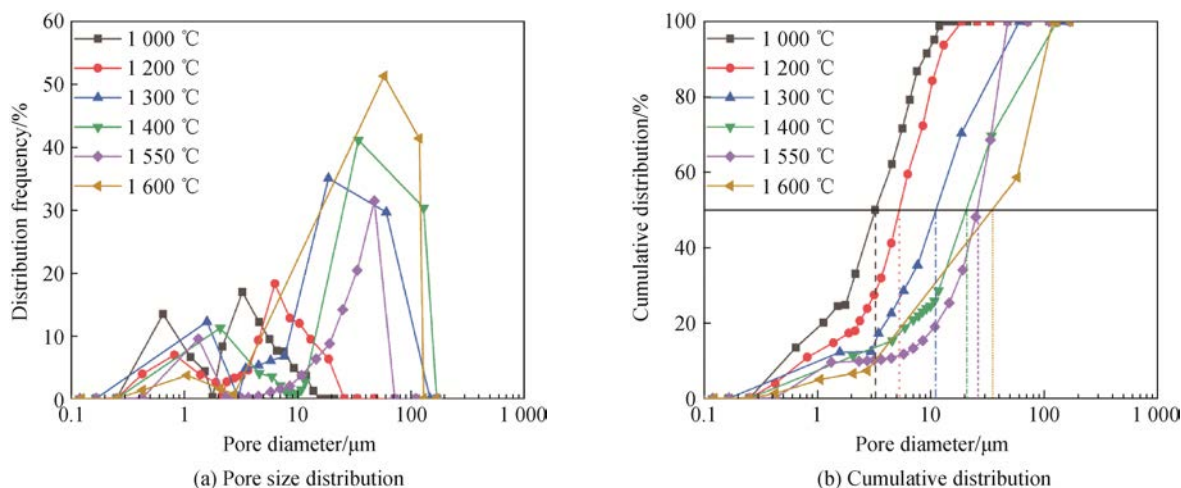


图9 经不同温度烧后试样的孔径分布和累积分布曲线

Fig. 9 Pore size distribution and cumulative distribution curves of samples sintered at different temperatures

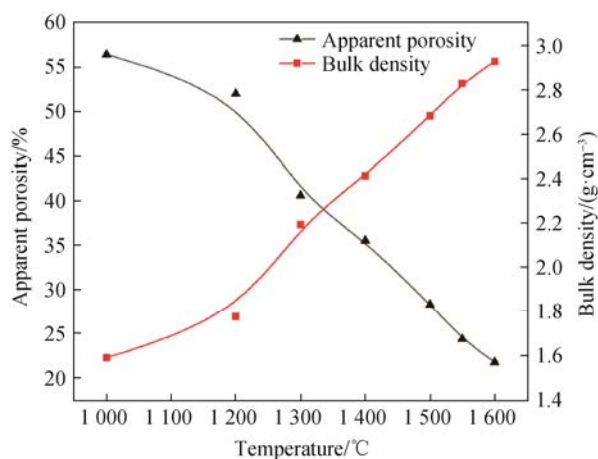


图10 经不同温度烧后试样的显气孔率和体积密度

Fig. 10 Apparent porosities and bulk densities of samples sintered at different temperatures

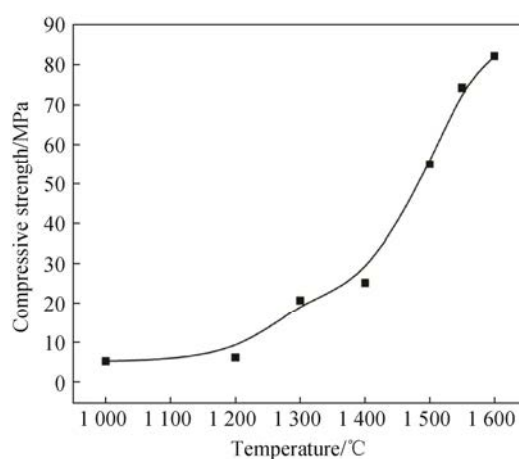


图11 经不同温度烧后试样的耐压强度

Fig. 11 Compressive strengths of samples sintered at different temperatures

此外,对比了经1550℃烧后的多孔耐火骨料与市售烧结镁砂的导热系数,发现前者导热系数为2.79 W/(m·K)(1000℃),烧结镁砂的导热系数为7.90 W/(m·K)(1000℃),多孔耐火骨料比市售烧结镁砂导热系数降低了64.7%。

2.4 讨论

由上述结果可知,以轻烧菱镁矿、氢氧化铝和铁红为原料,采用原位分解合成法,经1550℃烧后,成功制得了高强度的多孔镁基镁铁铝复合尖晶石耐火骨料。下面将从原料分解、复合尖晶石形成以及气孔结构演变角度对多孔耐火骨料的合成机理进行探讨,具体分为4个阶段,如图12所示。

1) 初始阶段:受颗粒堆积行为影响,如图12a所示,主要由轻烧菱镁矿、氢氧化铝和铁红3种微颗粒堆积而成,其中,轻烧菱镁矿内部因 MgCO_3

分解已含有大量气孔。由于轻烧菱镁矿含量占绝大部分,轻烧菱镁矿微颗粒堆积构成骨架结构,而氢氧化铝和铁红则填充于轻烧菱镁矿微颗粒间。

2) 分解阶段:氢氧化铝在670℃左右时开始分解,形成含有大量气孔和氧化铝微晶的多孔氧化铝团聚体,即氢氧化铝假象,如图12b所示。

3) 初始反应阶段:当温度升高到1000~1300℃时,试样中存在的少量杂质会导致0.64%~1.53%液相的形成,其黏度为1.63~3.85 Pa·s,如图13所示。液相形成促进了 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 的互扩散。在 MgO 和 Fe_2O_3 接触的局部区域, Mg^{2+} 和 Fe^{3+} 相互扩散,通过反应式(1)形成铁酸镁固溶体,如图12c所示。在 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 假象与 MgO 接触的局部区域, Mg^{2+} 和 Al^{3+} 相互扩散,通过反应式(2)形成 MgAl_2O_4 ,如图12d所示。同时,由于该阶段液相量较少,试

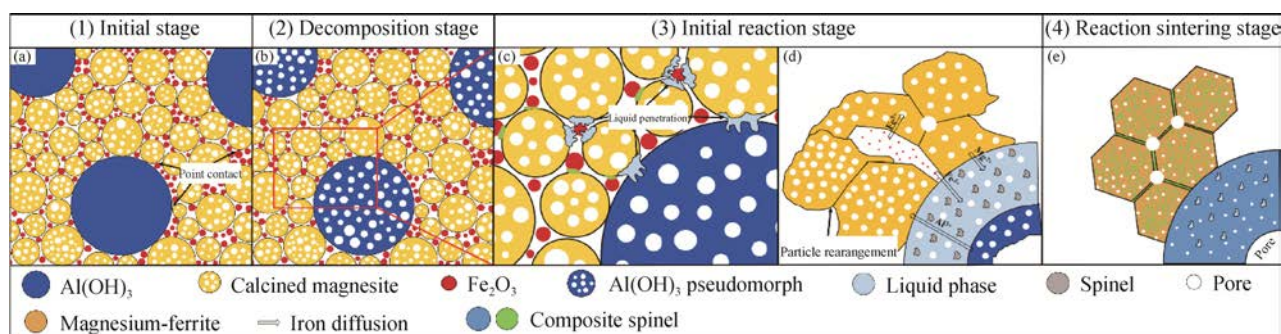
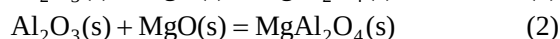


图 12 多孔镁基镁铁铝复合尖晶石耐火骨料的成孔机理示意图

Fig. 12 Schematic diagram of formation mechanism of porous magnesia based composite spinel (Mg(Fe, Al)₂O₄) refractory aggregates

样内气孔并没有明显地合并长大, 因此, 经 1 000~1 300 °C 烧后试样包含 0.65~1.58 μm 的微颗粒内气孔和 3.25~18.70 μm 的微颗粒间气孔, 如图 3~图 5 和图 9 所示。



4) 反应烧结阶段: 当烧成温度升高至 1 400~1 600 °C 时, 液相含量增大至 5.42%~7.66%, 黏度减小至 0.46~1.17 Pa·s, 这不仅通过加速 Mg^{2+} 、 Al^{3+} 和 Fe^{3+} 之间的互扩散促进了镁铁铝复合尖晶石和铁酸镁固溶体的形成, 也促使了微颗粒间颈部形成与长大, 如图 12e 所示。镁铁铝复合尖晶石主要形成在 2 个区域: 1) 氢氧化铝假象的原位置, Mg^{2+} 先扩散至氢氧化铝假象表面处, 与 Al^{3+} 形成 MgAl_2O_4 , 在此过程中, 为了保持电价平衡, 3 mol 的 Mg^{2+} 会与 2 mol 的 Al^{3+} 进行置换, 在氢氧化铝假象内部留下 kirkendal 孔洞^[25], 而后 Fe^{3+} 再与此 MgAl_2O_4 反应生成具有环状结构的镁铁铝复合尖晶石; 2) 在 MgO 微颗粒处, Mg^{2+} 先与 Fe^{3+} 反应生成 MgFe_2O_4 , 再与 Al^{3+} 反应生成镁铁铝复合尖晶石。

通过液相的物质扩散不仅加快了反应进程, 而且增大了烧结程度, 促进了微颗粒内部以及微颗粒间的气孔合并长大、迁出, 在降低显气孔率的同时, 使微颗粒间气孔尺寸增大, 如图 10 和图 6~图 8 所示。当烧成温度为 1 550 °C 时, 尽管液相增多促进烧结使微颗粒内以及微颗粒间的气孔都向外迁移, 一定程度减小了显气孔率, 但更多的颈部形成显著增大了耐压强度(74.4 MPa)。

综合比较各温度烧后试样的显气孔率、孔径分布、耐压强度和导热系数, 当烧成温度为 1 550 °C 时, 多孔镁基镁铁铝复合尖晶石耐火骨料具有最优性能, 其显气孔率为 24.4%, 中位孔径为 25.89 μm, 导热系数为 2.79 W/(m·K)(1 000 °C), 耐压强度为 74.4 MPa, 有望应用于轻量化耐火材料。

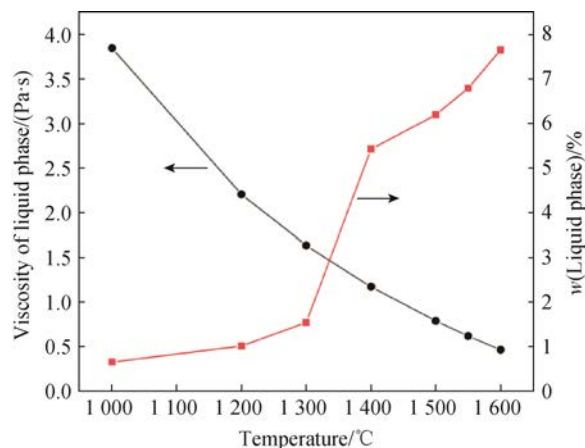


图 13 不同温度下试样中液相的含量和黏度

Fig. 13 Liquid phase content and viscosity of liquid phase of samples sintered at different temperatures

3 结论

以轻烧菱镁矿、氢氧化铝和铁红为原料, 采用原位分解合成法成功制备了多孔镁基镁铁铝复合尖晶石耐火骨料, 烧成温度对其显微结构和强度有重要影响。

1) 当烧成温度为 1 000~1 300 °C 时, 气孔包括微颗粒间和微颗粒内气孔, 微颗粒间基本没有颈部连接, 强度较低; 当烧成温度为 1 400~1 600 °C 时, 液相含量增多, 铁酸镁固溶体和镁铁铝复合尖晶石生成速率加快, 促进微颗粒致密化, 尽管微颗粒间气孔长大, 但形成更多的颈部大幅增加了骨料强度。

2) 镁铁铝复合尖晶石的生成包括 2 种情况: 一种是在氢氧化铝假象表面的 Al^{3+} 和 Mg^{2+} 生成 MgAl_2O_4 , 再与 Fe^{3+} 生成环状镁铁铝复合尖晶石; 另一种是 MgO 微颗粒的 Mg^{2+} 和 Fe^{3+} 生成 MgFe_2O_4 , 再与 Al^{3+} 生成粒状、条状镁铁铝复合尖晶石。

3) 当烧成温度为 1 550 °C 时, 多孔镁基镁铁铝复合尖晶石耐火骨料具有优异的综合性能, 其显气

孔率为24.4%，中位孔径为25.89 μm ，导热系数为2.79 W/(m·K)(1 000 $^{\circ}\text{C}$)，耐压强度为74.4 MPa；与市售烧结镁砂相比，其导热系数降低了64.7%。

参考文献:

- [1] JANATI K I. Thermo-elastic behavior study of rotary kilns for cement plants[J]. Eng Fail Anal, 2020, 118: 104896.
- [2] ATMACA A, YUMRUTAŞ R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry[J]. Appl Therm Eng, 2014, 66(1/2): 435–444.
- [3] OKOJI A I, ANOZIE A N, OMOLEYE J A, et al. Energetic assessment of a precalcining rotary kiln in a cement plant using process simulator and neural networks[J]. Alex Eng J, 2022, 61(7): 5097–5109.
- [4] LIU J, WANG Z, XIE G, et al. Resource utilization of municipal solid waste incineration fly ash-cement and alkali-activated cementitious materials: A review[J]. Sci Total Environ, 2022, 852: 158254.
- [5] SAIKIA N, KATO S, KOJIMA T. Production of cement clinkers from municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash[J]. Waste Manage, 2007, 27(9): 1178–1189.
- [6] KLEIB J, AOUAD G, ABRIAK N E, et al. Production of Portland cement clinker from French Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash[J]. Case Stud Constr Mat, 2021, 15: e00629.
- [7] WU K, SHI H, GUO X. Utilization of municipal solid waste incineration fly ash for sulfoaluminate cement clinker production[J]. Waste Manage, 2011, 31(9/10): 2001–2008.
- [8] JANATI K I. Thermo-elastic behavior study of rotary kilns for cement plants[J]. Eng Fail Anal, 2020, 118: 104896.
- [9] ATMACA A, YUMRUTAŞ R. Analysis of the parameters affecting energy consumption of a rotary kiln in cement industry[J]. Appl Therm Eng, 2014, 66(1–2): 435–444.
- [10] OKOJI A I, ANOZIE A N, OMOLEYE J A, et al. Energetic assessment of a precalcining rotary kiln in a cement plant using process simulator and neural networks[J]. Alex Eng J, 2022, 61(7): 5097–5109.
- [11] MIRHOSSEINI M, REZANIA A, ROSENDAHL L. Power optimization and economic evaluation of thermoelectric waste heat recovery system around a rotary cement kiln[J]. J Clean Prod, 2019, 232: 1321–1334.
- [12] LI B, CHEN H, CHEN J, et al. Improvement of thermal shock performance by residual stress field toughening in periclase-hercynite refractories[J]. Ceram Int, 2018, 44(1): 24–31.
- [13] 周芬, 赵惠忠, 王立峰, 等. FeAl_2O_4 对方镁石-铁铝尖晶石质耐火材料性能的影响[J]. 耐火材料, 2014, 48(2): 89–93.
- [14] ZHOU Fen, ZHAO Huizhong, WANG Lifeng, et al. Refractories (in Chinese), 2014, 48(2): 89–93.
- [15] HAO M, CHEN S, YUAN L, et al. Effect of hercynite addition on the properties of magnesite-hercynite brick[J]. Bull Chin Ceram Soc, 2014, 33(11): 2822–2827.
- [16] GRANADOS D A, CHEJNE F, MEJÍA J M, et al. Effect of flue gas recirculation during oxy-fuel combustion in a rotary cement kiln[J]. Energy, 2014, 64: 615–625.
- [17] WU G, YAN W, SCHAFFÖNER S, et al. A comparative study on the microstructures and mechanical properties of a dense and a lightweight magnesite refractories[J]. J Alloy Compd, 2019, 796: 131–137.
- [18] CHEN Z, YAN W, SCHAFFÖNER S, et al. Microstructure and mechanical properties of lightweight Al_2O_3 -C refractories using different carbon sources[J]. J Alloy Compd, 2021, 862: 158036.
- [19] PENG W, CHEN Z, YAN W, et al. Advanced lightweight periclase-magnesium aluminate spinel refractories with high mechanical properties and high corrosion resistance[J]. Constr Build Mater, 2021, 291: 123388.
- [20] CHEN Z, YAN W, DAI Y, et al. Effect of microporous corundum aggregates on microstructure and mechanical properties of lightweight corundum refractories[J]. Ceram Int, 2019, 45: 8533–8538.
- [21] YAN W, WU G, MA S, et al. Energy efficient lightweight periclase-magnesium alumina spinel castables containing porous aggregates for the working lining of steel ladles[J]. J Eur Ceram Soc, 2018, 38: 4276–4282.
- [22] CHEN Z, YAN W, SCHAFFÖNER S, et al. Effect of SiC powder content on lightweight corundum-magnesium aluminate spinel castables[J]. J Alloy Compd, 2018, 764: 210–215.
- [23] 李森, 封立杰, 王前, 等. 烧成温度对镁铁铝尖晶石砖性能的影响[J]. 耐火材料, 2016, 50(6): 458–460.
- [24] LI Sen, FENG Lijie, WANG Qian, et al. Refractories (in Chinese), 2016, 50(6): 458–460.
- [25] LIU G, LI N, YAN W, et al. Composition and microstructure of a periclase-composite spinel brick used in the burning zone of a cement rotary kiln[J]. Ceram Int, 2014, 40(6): 8149–8155.
- [26] YAN W, CHEN Q, LI N, et al. Preparation and characterization of porous $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ refractory aggregates using an *in-situ* decomposition pore-forming technique[J]. Ceram Int, 2015, 41: 515–520.
- [27] SALOMÃO R, ARRUDA C C, PANDOLFELLI V C, et al. Designing high-temperature thermal insulators based on densification-resistant *in situ* porous spinel[J]. J Eur Ceram Soc, 2021, 41: 2923–2937.