

微波原位还原制备 Fe/Fe₂SiO₄ 基金属陶瓷的研究

高陈波, 徐鹏飞*, 阮 飞, 李红霞

(内蒙古科技大学材料与冶金学院, 内蒙古 包头 014000)

摘 要:以磁选铁精矿为主要原料, 高岭土作为添加剂采用微波原位还原制备 Fe/Fe₂SiO₄ 基金属陶瓷。概括介绍了利用微波加热原位还原磁选铁精矿研制铁基金属陶瓷的理论基础、主要技术路线和反应机理, 结合 XRD、SEM 等分析测试方式, 探究了高岭土添加含量对铁基金属陶瓷复合材料的物相、物理性能及微观组织的影响, 为微波加热还原磁选铁精矿制备铁基多功能陶瓷材料的相关研究领域提供参考, 对于促进矿产资源的高效综合利用具有重要的意义。结果表明: 当烧结温度为 835 °C, 保温时间为 1 h, 高岭土含量为 15% 时, 制备的铁基金属陶瓷的综合性能最优, 其主晶相为 α-Fe, 密度为 5.56 g/cm³, 维氏硬度值为 7.35 GPa。

关键词: Fe/Fe₂SiO₄ 基金属陶瓷; 铁精矿; 高岭土; 微波加热; 原位还原; 密度; 维氏硬度

中图分类号: TF12, TG148 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)03-0135-08

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.03.021

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Study on preparation of Fe/Fe₂SiO₄-based cermets by microwave in-situ reduction

Gao Chenbo, Xu Pengfei*, Ruan Fei, Li Hongxia

(School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014000, Inner Mongolia, China)

Abstract: Fe/Fe₂SiO₄-based cermets were prepared with magnetic separation iron concentrate as the main raw material and kaolin as the additive by means of microwave in-situ reduction. The theoretical basis, main technical route, and reaction mechanism of iron-based cermets developed by using microwave heating in situ reductions of magnetic separation iron concentrates are summarized. Combined with XRD, SEM, and other analysis and testing methods, the effect of kaolin content on phase, physical properties, and microstructure of iron-based cermets composites had been explored. The results show that under conditions of Kaolin content at 15%, sintering at 835 °C for 1 hour can make iron-based cermets composites achieve the best comprehensive properties, where dominant phase is α-Fe, its density is 5.56 g/cm³, and Vickers hardness is 7.35 GPa.

Key words: Fe/Fe₂SiO₄-based cermet, iron concentrate, Kaolin, microwave heating, in-situ reduction, density, Vickers hardness

收稿日期: 2021-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(51704172); 内蒙古科技大学创新基金(2016QDL-B27)。

作者简介: 高陈波 (1996—), 男, 江苏南通人, 硕士研究生, 主要从事无机非金属材料方面的研究工作, E-mail: 18168079445@163.com; *通讯作者: 徐鹏飞 (1987—), 男, 河南南阳人, 博士, 硕士生导师, E-mail: 24681012.qq.com@163.com。

0 引言

我国铁矿矿产资源丰富,产能分布不均,而传统的冶炼方式造成了极大的环境污染及资源浪费,寻求一种新的矿物处理方式迫在眉睫^[1-3]。

在传统工业上,矿物处理流程多为开采-破碎-选矿-冶炼-成型等,而冶炼多采用熔炼还原法,该法在冶炼过程中,需要消耗大量能源,并且对环境造成极大的污染。因此直接利用矿物制备各种复合材料吸引了很多学者的关注。陈敏等人以钛精矿和石墨通过碳热还原法制备的 Fe-TiCN 复合粉为原料,加入少量添加剂通过热压烧结制备 Fe-TiCN 金属陶瓷^[4];尹雪亮等人利用铝土矿、石灰石矿制备致密 CA₂-CA₆ 复合材料^[5];马子均等人利用硅酸盐工业尾矿制备发泡陶瓷^[6]。这些方式的矿物直接利用多采用常规烧结,需要为样品提供较高的温度及压力条件,烧结费时长、耗能大,因此寻求一个利用矿物直接制备复合材料并且满足费时短、低能耗的制备方法迫在眉睫。而微波对矿物直接处理制备出复合材料恰能满足这一系列要求。微波作为一种集高效、经济和环保等优点的较为新颖的技术手段,具有体积加热、选择性加热、快速加热、节能降耗及绿色环保等优越特性^[7],已被广泛应用于矿物的粉碎^[8]、干燥^[9]、还原^[10-12]等领域,受到了国内外研究者的广

泛关注。

铁基金属陶瓷由于其具有耐磨、耐高温以及良好的导电系数等特点,广泛应用于基础工业、化工以及航空航天等领域。目前,常见的铁基金属陶瓷的制备方式主要为表面涂层法(PM)^[13]、自蔓延高温合成法(SHS)^[14]、反应铸造法以及金属溶液浸渗法(MW)^[15]等,这些制备方式工艺复杂且能耗大。并且某 Fe₂SiO₄ 铁橄榄石陶瓷相在常规烧结的方式温度需达到 1 100 ℃ 左右^[16],而采用微波烧结在 835 ℃ 的条件下即可获得。

笔者着重讨论某地区磁选铁精矿通过微波处理得到金属陶瓷材料的行为及相关特点,并对其制备过程中添加剂含量的影响进行了初步的探讨,实现了矿物直接制备金属陶瓷复合材料的目标。

1 试验原料及方法

1.1 试验原料及配比

笔者采用内蒙古某地区的磁选铁精矿作为原料,采用 XRF 分析测试了该矿的主要成分,如表 1 所示。试验中所用到的还原剂为分析纯颗粒活性炭(>99.9%),其粒度集中在 0.6~1 mm,加入化学纯高岭土(>99.5%)作为添加剂。试验设备包括行星球磨机、压片机、等静压机、微波烧结炉、X 射线衍射仪、扫描电子显微镜、硬度仪及电子天平等。

表 1 磁选铁精矿的化学成分

Table 1 The chemical compositions of iron concentrate by magnetic separation

							%
TFe	FeO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO ₂	TiO ₂
65.50	27.90	2.47	0.047	0.76	0.88	1.01	0.029
Na ₂ O	S	Nb ₂ O ₅	K ₂ O	BaO	P	F	
0.25	1.08	0.073	0.1	0.036	0.069	0.28	

1.2 试验方法

试验采用的工艺流程见图 1。工艺过程主要包括:①配料。将磁选铁精矿、活性炭粉和高岭土按照一定比例(表 2)均匀混合,将混合后的矿物加入分析纯酒精(>99%)作为助磨剂,置于行星球磨机研磨 24 h,转速为 480 r/min。②干燥。将球磨后的矿物放入电热鼓风箱中于 80 ℃ 下烘干 12~24 h 至其助磨剂全部挥发。③制样。烘干结束后将样品置于玛瑙研钵中手动研磨,过筛使样品粒度达到 74~178 μm。采用直径为 25 mm 的模具,使用压片机压片成型(压力为 6 MPa,保压 1 min)。将样品置

于等静压机中,控制压力为 220 MPa,保压 2 min。④微波烧结。将等静压后的样品放入工业微波炉中,采用颗粒活性炭作为助热剂并提供还原反应所需的气氛,微波工作频率为 2 450 MHz,最大功率为 8 kW,工作温度小于 1 300 ℃,通过接触式热电偶自动控温。烧结结束后,材料随炉冷后取样。

本试验采用的工业微波炉含有 4 个均匀分布的微波发射器,如图 2 所示,可使样品受热均匀。另外,由于微波是以体加热为主体,可有效防止烧结过程中出现热应力不均的现象。

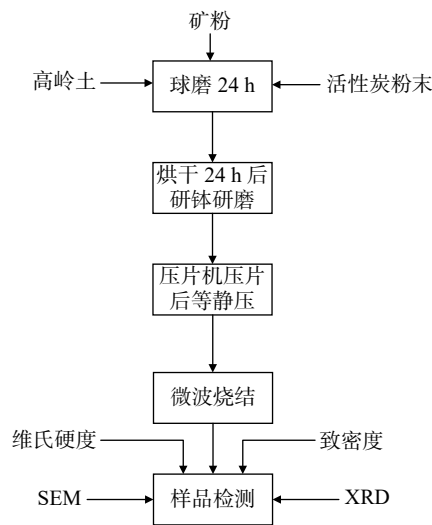


图 1 试验流程
Fig. 1 Experimental flowchart

表 2 试样配比
Table 2 Sample ratio

编号	原料/g	高岭土/%
C1	50	5
C2	50	10
C3	50	15
C4	50	20

注: 原料配比为矿粉: 活性炭=17: 3。

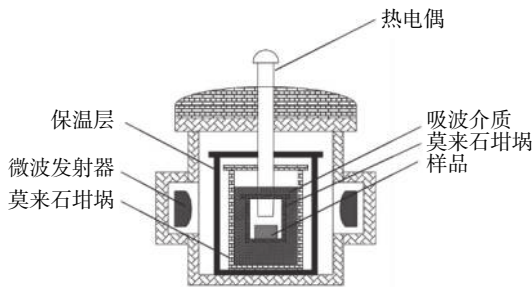


图 2 微波烧结示意
Fig. 2 Schematic diagram of microwave sintering

烧结时将样品置于莫来石坩埚内, 采用热电偶控温、活性炭对坩埚进行埋烧。在密闭的炉腔内, 活性炭作为吸波助热剂的同时, 还可为炉内提供还原反应所需的氛围。

1.3 样品检测

将不同配比所制备出来的样品经一定的处理后, 采用 X 射线衍射仪对样品进行物相结构分析; 采用 SEM 对样品表面及断面进行观察; 采用 EDS 对样品进行元素分析; 采用硬度仪对样品进行测定, 具体实施方法如下: 利用 HV-5 型数显维氏硬度计对已

表面抛光的试样表面进行打点(压力 1 kg, 保压 15 s), 并在 50 倍光镜下通过测量压痕对角线显示出维氏硬度值, 计算公式为 $HV=F/(g \cdot S)$ (F 为施加压力, S 为压痕变面积); 采用阿基米德排水法对试样进行密度的测定, 具体操作如下: 称取试样质量 m_1 ; 将装满去蒸馏水的比重瓶质量记为 m ; 将试样破碎后放入装满蒸馏水的比重瓶中, 并擦干瓶外溢出水, 测得此时试样、蒸馏水和比重瓶的质量为 m_3 。则溢出水的质量为 $m_2 - (m_3 - m_1)$ 。试样密度为 $\rho = \frac{m_1}{m_2 - (m_3 - m_1)}$ 。

2 试验结果及分析

2.1 相分析

在原料配粉末活性炭 15%、还原温度为 835 °C、还原时间 30 min, 高岭土含量为磁选铁精矿与还原剂总质量的 5% 条件下, 探究样品中的相变。对烧结后的样品采用 X 射线衍射仪进行检测, 扫描角度为 10° ~ 80°, 扫描速率为 4°/min, 扫描步长为 0.01°, 得到图 3 所示图谱。

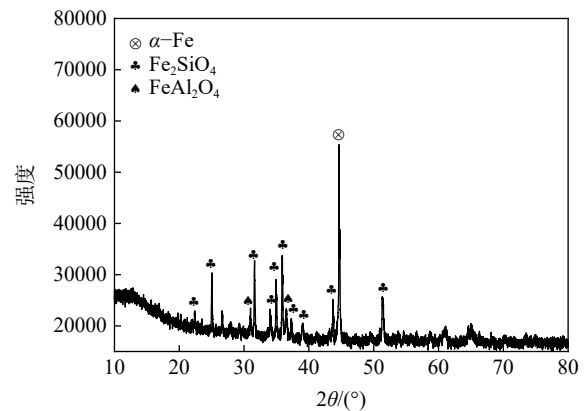


图 3 样品 C1 保温 30 min 物相分析
Fig. 3 Phase analysis result of sample C1 incubated for 30 minutes

图 3 表明, 微波烧结原位碳热还原生成了 α-Fe 相, 同时生成了 Fe₂SiO₄ 铁橄榄石及部分 FeAl₂O₄ 铁尖晶石。物相中的 α-Fe 相来源于铁氧化物与活性炭在微波场作用下还原的结果。原料中铁的氧化物主要以 Fe₃O₄ 为主, 伴有少量的 Fe₂O₃ 及 Fe_xO (一般简称为 FeO), 其中 Fe_xO 低温下不稳定, 温度低于 570 °C 分解为 Fe₃O₄ 和 α-Fe^[17]。

在反应过程中, 存在直接还原及间接还原两种方式。由于在密闭的炉腔内存在少量的空气, 而助热剂又采用活性炭。因此在炉内有一部分铁氧化物

的还原方式为间接还原。间接还原是指以 CO 为还原剂, 产物为 CO₂ 的还原方式, 其主要反应为: 2C+O₂=2CO, Fe₃O₄+CO→3FeO+CO₂, FeO+CO→Fe+CO₂, CO₂+C=2CO^[18]

流程中存在的直接还原并不是固体活性炭与固体 FeO 之间的直接反应, 是借助于碳素溶损反应与间接还原反应叠加而成, 其反应机理为: FeO+C→Fe+CO₂, CO₂+C→2CO, FeO+C→Fe+CO。

由于活性炭与铁氧化物有良好的吸波材质, 因此配入的活性炭先与 Fe₃O₄ 反应生成 Fe_xO, 再借助活性炭的气化反应实现铁氧化物的还原^[18]。

综上, 铁氧化物在微波场作用下整体的还原反应过程如下:



由纯物质热力学数据^[19]绘制图 4, 在微波加热方式制备铁基金属陶瓷的过程中, 需要将原料中的部分铁氧化物还原成金属铁, 则需要合理的控制加入合适的还原剂活性碳的含量, 炉内才能够提供利于反应进行的还原气氛。根据热力学公式 $\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$, 当温度达到 627 °C 左右以后, 各反应剧烈发生, 因此需要保证此试验工艺温度大于 627 °C。

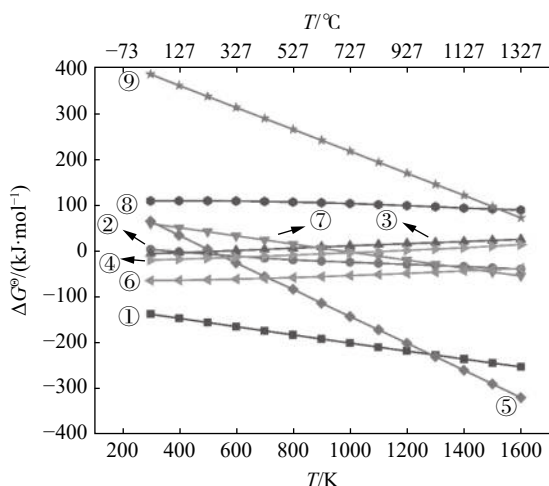
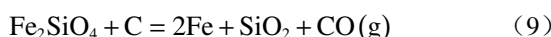


图 4 反应吉布斯自由能与温度关系

Fig. 4 Relationship between reaction temperature and Gibbs free energy

高岭土与铁氧化物反应流程如下所示^[19]。



微波场作用下高岭土率先发生分解反应, 随后与铁氧化物反应生成的铁橄榄石和铁铝尖晶石。

如图 5 所示, 铁橄榄石的来源分为两类, 第一类为分解后的高岭土中的二氧化硅与铁氧化物发生反应, 生成 Fe₂SiO₄, 如反应(7)所示; 第二类如反应(8)所示, 在还原气氛及微波场的作用下, 铁氧化物与高岭土中的氧化铝反应生成 FeAl₂O₄ 铁尖晶石与游离的二氧化硅发生反应生成 Fe₂SiO₄^[19-21]。

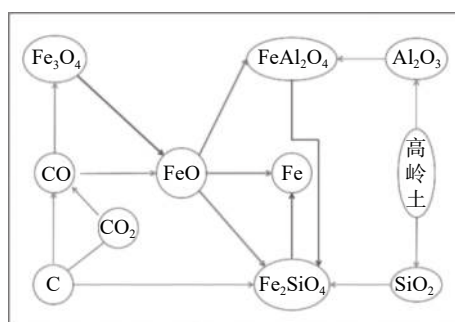


图 5 产物示意

Fig. 5 Schematic diagram of the product

由图 4 可知, 从热力学上讲, 整个试验反应皆能正常进行, 并且高岭土分解反应(5)的化学推动力最大。由反应(6)可知, 样品中铁氧化物与高岭土摩尔比大于 1, 且在足量的还原气氛下, 高岭土不可避免的转化为铁尖晶石, 并通过反应式(8)进一步转变为铁橄榄石^[20]。在此反应流程中, 当温度超过 617 °C 左右时, 能促进铁尖晶石进一步转化为铁橄榄石, 并且当存在足量的碳时, 可促进整体流程中金属铁及铁橄榄石的生成。

在本体系中, 高岭土可通过受热分解产生游离的 SiO₂ 及 Al₂O₃。而在以铁氧化物为主的原料中, Al₂O₃ 的加入有利于提高铁氧化物的活度, 使得反应条件大为改善, 促进 FeAl₂O₄ 陶瓷相的生成^[22]。另外, 高岭土作为陶瓷复合材料中常用的添加剂, 能够起到将金属相与非金属相粘结的作用。在反应中, 可将金属铁均匀弥散的分布在生成的 Fe₂SiO₄ 铁橄榄石及 FeAl₂O₄ 铁铝尖晶石陶瓷相上, 获得性能良好的金属陶瓷。

2.2 高岭土添加量对物相的影响

在原料配粉末活性炭 15%、还原温度为 835 °C、还原时间 60 min 的条件下, 考察添加剂高岭土含量对物相转变的影响。高岭土含量分别为磁选铁精矿

与还原剂总质量的 5%、10%、15% 和 20%。

对烧结后的样品采用 X 射线衍射仪进行检测, 扫描角度为 10 ~ 80°, 扫描速率为 4°/min, 扫描步长为 0.01°, 得到图 6 所示图谱。由图 6 可知, 在任意高岭土添加条件下, 皆能生成 Fe₂SiO₄ 铁橄榄石, 并且随着烧结时间的延长, 样品 C2 和 C3 中出现较多的 FeAl₂O₄ 铁铝尖晶石相。

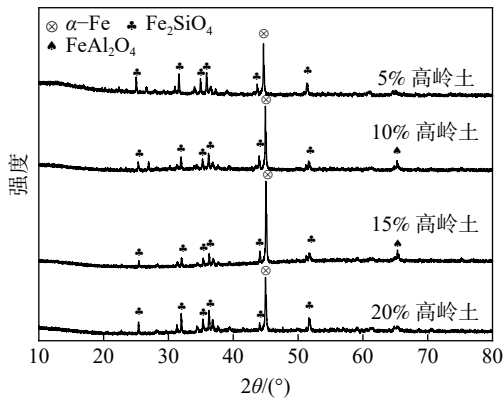


图 6 不同高岭土添加量 XRD 物相图

Fig. 6 XRD phase diagram of resulted cement with different kaolin additions

随着高岭土含量的增加, 样品中 α-Fe 的衍射峰有增强的趋势, 而 Fe₂SiO₄ 铁橄榄石衍射峰强度变化小。当高岭土含量为 15% 时, α-Fe 衍射峰显著增强, 表明适当提高高岭土的添加量有助于促进 α-Fe 的生成。此外, 通过对比 20% 高岭土添加量, 可以认为过量的高岭土会阻碍 α-Fe 的生成, 并且此时 Fe₂SiO₄ 铁橄榄石衍射峰有所增强。结合反应方程式可知, 这是由于过量的高岭土消耗了部分 C 生成较多的 Fe₂SiO₄ 铁橄榄石, 使得铁氧化物的直接还原反应难以进行, 致使 α-Fe 衍射峰有所下降。样品中由于存在 CaO 等碱性氧化物, 在此碱性条件下, 高岭土中游离的 Al₂O₃ 可与 FeO 反应生成 FeAl₂O₄ 铁铝尖晶石相^[22]。

2.3 高岭土添加量对微观形貌的影响

采用 SEM 及 EDS 检测高岭土含量(5%、10%、15%、20%)条件下样品的微观形貌及元素分布, SEM 采用二次电子成像, 加载电压为 3.00 kV, 放大倍数为 20 000 倍; EDS 采用特征 X 射线, 加载电压为 20 kV, 放大倍数为 5 000 倍, 检测结果如图 7 所示。

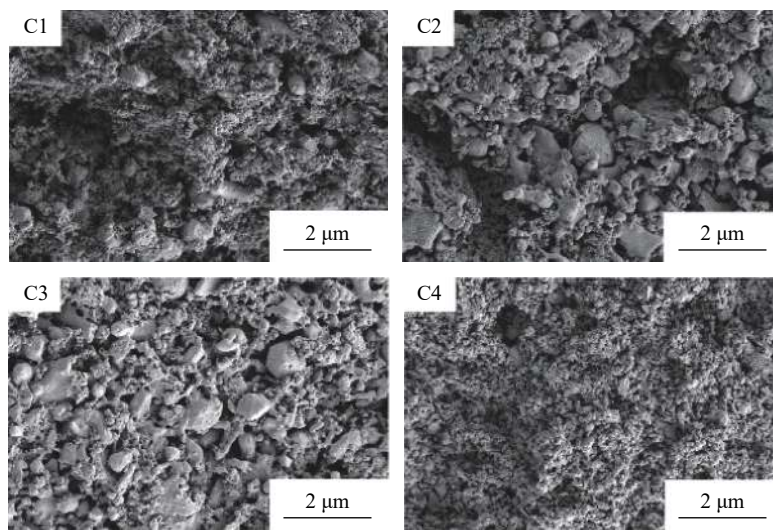


图 7 样品 C1-C4 断面微观结构

Fig. 7 Microstructure of sample C1-C4 section

从图 7 可以看出, 产物结构致密, 陶瓷相和金属相都细小均匀。在保温时间及烧结温度不变的情况下, 高岭土的含量对材料粒径尺寸有明显的影响。当高岭土含量较低时, 颗粒较为紧凑, 大部分晶粒尺寸在 2 ~ 5 μm。由图 8 的 EDS 结果可知, 亮白色部分为金属 Fe 基体, 暗的部分为 Fe₂SiO₄ 铁橄榄石增强相, 铁基相的组织以颗粒状分布, 颗粒之间还存在少量的微孔缺陷, 这与样品中的碳反应生成的 CO

为完全排出有关。高岭土含量为 15% 时, 样品中的 α-Fe 含量最多, 且材料晶体之间实现紧密的结合, 空隙少, 结构清晰, 这是由于原料中高岭土、活性炭及矿粉间的配比达到最优值, 金属铁的转化率最大, 在微观上表现出为最佳结构。高岭土含量为 20% 时, 晶粒尺寸在 1 ~ 3 μm, 金属铁颗粒更为细小, 但金属铁与铁橄榄石相互嵌入, 难以辨认, 这是由于过量的高岭土阻碍了金属铁的直接还原, 致使无法

还原出大量的金属铁颗粒,造成铁橄榄石相的堆积。在微波场的作用下,金属铁由 Fe_2SiO_4 铁橄榄石包裹其中,结构中呈现金属颗粒均匀弥散的现象,形成

以 Fe_2SiO_4 为基体, $\alpha-Fe$ 为增强相的金属陶瓷复合材料。

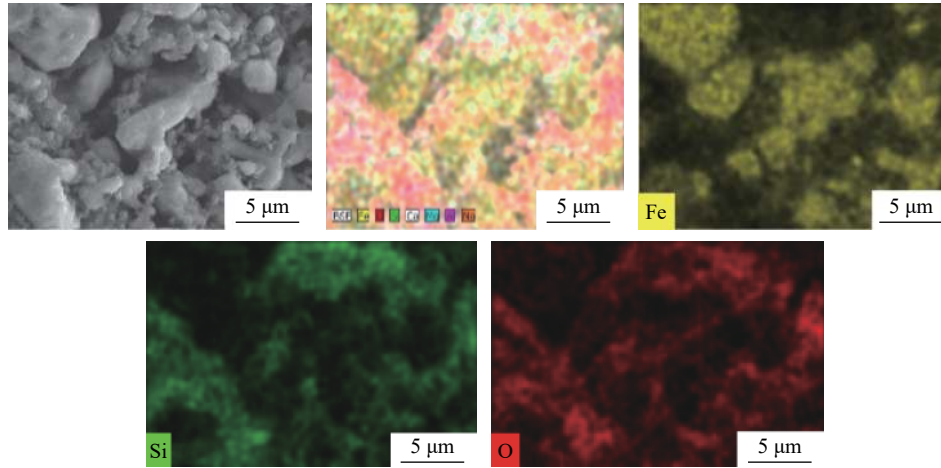


图8 样品 C3 断面 EDS 图
Fig. 8 EDS images of sample C3 section

2.4 高岭土含量对密度的影响

采用阿基米德法测试不同高岭土含量(5%、10%、15%、20%)条件下铁基金属陶瓷的密度,检测得其含量对密度的影响结果如图9所示。

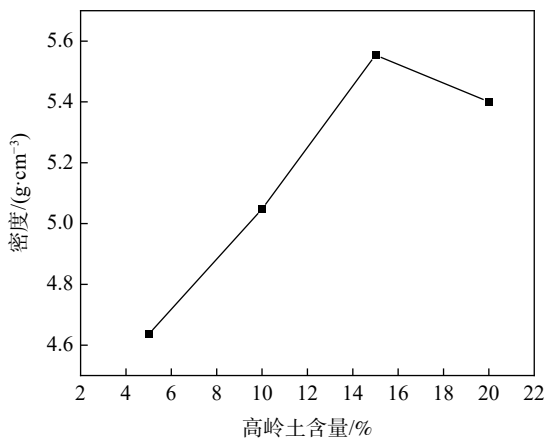


图9 不同高岭土添加量与密度关系
Fig. 9 Relationship between cement density and Kaolin addition

从图9可以看出,随着高岭土含量的不断增加,样品的密度由 4.63 g/cm^3 上升至 5.56 g/cm^3 ,后又下降至 5.4 g/cm^3 ,呈现非单调变化的规律。在高岭土含量为15%的条件下制备的样品密度最大,达到 5.56 g/cm^3 左右,这是因为在试验过程中,随着高岭土含量的提高,根据反应流程可知,高岭土持续与原料中的铁的氧化物及活性炭发生反应,生成大量的 $\alpha-Fe$,从而使陶瓷的密度提高。铁尖晶石需与固体

碳反应才能生成金属铁,而过量的高岭土将样品中的固体活性炭粉消耗殆尽,致使其的转化率降低,进而导致样品的密度有所下降^[23]。

2.5 高岭土含量对硬度的影响

根据 GB/T 16534—1996 “工程陶瓷维氏硬度试验方法”行业标准,测试不同高岭土含量(5%、10%、15%、20%)条件下铁基金属陶瓷的硬度,如图10所示。

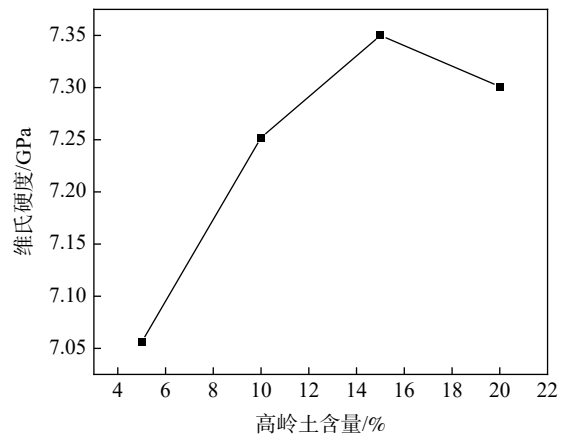


图10 不同高岭土添加量与维氏硬度关系
Fig. 10 Relationship between Vickers hardness of resulted cement and Kaolin addition

从图10可以看出,随着高岭土含量的增加,样品的维氏硬度值由 7.056 GPa 上升至 7.35 GPa ,后又下降至 7.301 GPa ,呈现非单调变化的规律。在高岭土含量为15%的条件下,维氏硬度值最佳,达 7.35 GPa ,当高岭土含量增加至20%时,样品硬度

又有所下降。生成的金属铁与高岭土含量的有一定的影响, 适量的高岭土能够促进金属铁及铁橄榄石的生成, 过量的高岭土则会降低铁尖晶石转化率^[23]。材料的硬度与晶粒的大小、烧结体的密度有关, 适量的高岭土促进了铁相与陶瓷相的弥散分布及烧结体致密化并保证了金属颗粒不过分细小, 使得硬度达到最优, 而过量的高岭土阻碍了晶粒致密化, 导致硬度降低。

3 结论

以磁选铁精矿为原料, 采用固相法、微波烧结制备出铁基金属陶瓷。探究了反应机理及高岭土含量对此材料相变、微观形貌、密度及硬度的影响。可以得出以下结论:

1) 利用磁选铁精矿为主要原料, 加入适量高岭土, 采用微波烧结原位还原可以制备出高性能的铁基金属陶瓷, 获得了一种有别于钢厂的选矿-炼铁-炼钢工艺的新工艺, 为同类型的矿物开辟了新的用途。

2) 在采用磁选铁精矿制备金属陶瓷的过程中存

在着复杂的物相转化, 不仅包括铁氧化物的还原, 还有铁氧化物、活性炭及高岭土之间的反应。铁氧化物按照化合价逐渐降低的顺序发生还原反应, 最终还原为金属铁。高岭土与活性炭及铁氧化物按直接和间接反应两种方式生成铁橄榄石相, 直接方式为高岭土直接与铁氧化物反应生成铁橄榄石相, 间接方式为高岭土与铁氧化物先生成铁尖晶石后, 铁尖晶石继续与样品中的成分反应生成铁橄榄石相。

3) 试验过程中随着高岭土含量的增多, 制备的铁基金属陶瓷的密度和硬度呈现先上升后下降的趋势。当烧结温度为 835 °C, 保温时间为 1 h, 高岭土含量为 15% 时, 制备的铁基金属陶瓷的综合性能最优, 其主晶相为 α -Fe, 密度为 5.56 g/cm³, 维氏硬度值为 7.35 GPa。

4) 在微波加热条件下, 适量的高岭土可与部分铁氧化物及活性炭在低于常规金属冶炼

的温度下以固态形式直接发生反应, 形成的金属基陶瓷相, 制备出性能良好的金属颗粒均匀弥散的陶瓷复合材料。

参考文献

- [1] Wu Qiuji, Lu Zhenfu, Cao Jincheng. Study on the status quo of the development and utilization of my country's large-scale iron ore resource base[J]. *Modern Mining*, 2020, 36(8): 113-115, 138.
(武秋杰, 吕振福, 曹进成. 我国铁矿大型资源基地开发利用现状研究[J]. *现代矿业*, 2020, 36(8): 113-115, 138.)
- [2] Luo Xiaoli. The status quo of my country's iron ore resources exploration and development and countermeasures[J]. *Modern Mining*, 2019, 35(12): 28-32.
(罗小利. 我国铁矿资源勘查开发现状及对策建议[J]. *现代矿业*, 2019, 35(12): 28-32.)
- [3] Jiang Xuwei. Analysis of the development status and prospects of China's iron ore industry[J]. *China Metal Bulletin*, 2017, (7): 160-161.
(姜雪薇. 中国铁矿行业发展现状及前景分析[J]. *中国金属通报*, 2017, (7): 160-161.)
- [4] Chen Min, Xiao Xuan, Tang Aitao. Study on Fe-TiCN cermet prepared by titanium concentrate[J]. *Non-Ferrous Metal Science and Engineering*, 2015, 6(5): 69-72, 134.
(陈敏, 肖玄, 汤爱涛. 钛精矿制备Fe-TiCN金属陶瓷的研究[J]. *有色金属科学与工程*, 2015, 6(5): 69-72, 134.)
- [5] Yin Xueliang, Ma Heli, Liu Yang, et al. Preparation of dense CA₂-CA₆ composites from bauxite and limestone ore[J]. *Refractories*, 2020, 54(4): 326-329.
(尹雪亮, 马贺利, 刘洋, 等. 铝土矿、石灰石矿制备致密CA₂-CA₆复合材料[J]. *耐火材料*, 2020, 54(4): 326-329.)
- [6] Ma Zijun. Study on the preparation of foamed ceramics using silicate industrial waste (tailing) ore[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2019.
(马子钧. 利用硅酸盐工业废(尾)矿制备发泡陶瓷的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2019.)
- [7] Zhou Shuzhu, Wu Xiaobo, Gao Lingyan, et al. Research progress and industrial application status of microwave sintering of ceramic materials[J]. *Cemented Carbide*, 2012, 29(3): 174-181.
(周书助, 伍小波, 高凌燕, 等. 陶瓷材料微波烧结研究进展与工业应用现状[J]. *硬质合金*, 2012, 29(3): 174-181.)
- [8] Cui Lisheng, Han Yuexin. Application of microwave technology in mining industry[J]. *Nonferrous Mining and Metallurgy*, 2005, (S1): 54-55, 57.
(崔礼生, 韩跃新. 微波技术在矿业中的应用[J]. *有色矿冶*, 2005, (S1): 54-55, 57.)
- [9] Schuy S A. Application of microwave in mining[J]. *Mining Engineering*, 2003, (6): 14-18.

- (施尤伊 S A. 微波在矿业中的应用[J]. 矿业工程, 2003, (6): 14-18.)
- [10] Lin Jing, Su Jie, Peng Jinhui, *et al.* Application status and prospects of microwave technology in the field of metallurgical smelting[J]. Vacuum Electronic Technology, 2016, (6): 36-42.
(蒯璠, 苏杰, 彭金辉, 等. 微波技术在冶金熔炼领域应用现状及前景[J]. 真空电子技术, 2016, (6): 36-42.)
- [11] Li Lei, Zhu Hongbo, Zhang Libo, *et al.* Extended research on microwave carbothermic reduction of ilmenite[J]. Materials Review, 2015, 29(10): 124-127.
(李磊, 朱红波, 张利波, 等. 微波碳热还原钛铁矿扩试研究[J]. 材料导报, 2015, 29(10): 124-127.)
- [12] Guo Yufeng, You Gao, Jiang Tao, *et al.* Solid state reduction behavior of Panzhihua ilmenite[J]. Journal of Central South University (Natural Science Edition), 2010, 41(5): 1639-1644.
(郭宇峰, 游高, 姜涛, 等. 攀枝花钛铁矿固态还原行为[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2010, 41(5): 1639-1644.)
- [13] Fahamsyah H Latief, Naser A Alsaleh, Nashmi Alrasheedi, *et al.* Effects of oxidation and alumina addition on the physical and mechanical properties of Ti/ Al₂O₃ composites prepared by semi-powder metallurgy method[J]. Oxidation of Metals, 2019, 92(5-6): 561-572.
- [14] Sharifitabar M. On the formation of Al₂O₃ nanofibers during self-propagating high-temperature synthesis of TiO₂-Al-C system in various environments[J]. Ceramics International, 2020, 46(10): 603.
- [15] Tian Zhihao, Wu Xiaobo, Gao Pingping, *et al.* Research progress on toughening of Ti(C, N)-based cermets[J]. Cemented Carbide, 2019, 36(4): 313-320.
(田智豪, 伍小波, 高平平, 等. Ti(C, N)基金属陶瓷增韧研究进展[J]. 硬质合金, 2019, 36(4): 313-320.)
- [16] Zhao Yonghong, Zimmerman M, Kohlstedt D L. Experimental study on high temperature deformation of iron-rich olivine[J]. Acta Petrologica Sinica, 2005, (3): 999-1004.
(赵永红, Zimmerman M, Kohlstedt D L. 富铁橄榄石的高温变形实验研究[J]. 岩石学报, 2005, (3): 999-1004.)
- [17] Bulin Chaoke, Guo Ting, Zhang Bangwen, *et al.* Analysis of the origin of Fe₂O₃ stepwise reduction sequence[J]. Metal Mine, 2013, (6): 53-57, 92.
(布林朝克, 郭婷, 张邦文, 等. Fe₂O₃逐级还原顺序起源分析[J]. 金属矿山, 2013, (6): 53-57, 92.)
- [18] Wang Xiaoliu. Iron and steel metallurgy (Ironmaking part) [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007: 79-96.
(王筱留. 钢铁冶金学(炼铁部分)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2007: 79-96.)
- [19] Li Xiaobin, Wang Hongyang, Zhou Qiusheng, *et al.* Reaction behavior of kaolinite with ferric oxide during reduction roasting[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(1): 93.
- [20] Zhou Qiusheng, Li Chuang, Li Xiaobin, *et al.* Reaction behavior of Fe₂O₃ during reduction sintering of Fe₂O₃-SiO₂-Al₂O₃ system[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016, 26(3): 842-848.
- [21] BARIN I. Thermochemical data of pure substances [M]. Weinheim: VCH Verlagsgesellschaft mbH, 1995.
- [22] Mei Xiangong, Yuan Mingliang, Chen Yin. A preliminary study on the effect of alkaline oxides in the direct reduction process of a high-iron red peat-based coal[J]. Comprehensive Utilization of Mineral Resources, 1995, (2): 1-5.
(梅贤恭, 袁明亮, 陈彦. 某高铁赤泥煤基直接还原过程中的碱性氧化物效应初探[J]. 矿产综合利用, 1995, (2): 1-5.)
- [23] Han Yuexin, Sun Yongsheng, Li Yanfeng, *et al.* Evolution of phase and structure of oolitic hematite deep reduction[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2019, 31(2): 95-102.
(韩跃新, 孙永升, 栗艳锋, 等. 鲕状赤铁矿深度还原物相及结构的演化规律[J]. 钢铁研究学报, 2019, 31(2): 95-102.)

编辑 杨冬梅

龙佰钛业拟出资 4 亿元成立甘肃佰利联化学

5月28日, 龙佰钛业发布公告称, 根据公司经营及战略发展的需要, 为进一步提高公司市场占有率, 加强公司竞争力, 公司全资子公司龙佰四川钛业有限公司(“龙佰钛业”)拟出资4亿元人民币在甘肃省金昌市成立甘肃佰利联化学有限公司(暂定名, 最终名称以工商行政管理部门核准登记为准)。

摘自 <http://stock.10jqka.com.cn/20210528/c629776960.shtml>