

基于高铝粉煤灰的堇青石-莫来石复合材料制备

胡朋朋^{1,2,3}, 张建波^{1,2}, 李少鹏^{1,2}, 李占兵^{1,2}, 李会泉^{1,2,3}

(1. 中国科学院过程工程研究所 绿色过程与工程中科院重点实验室, 北京 100190; 2. 湿法冶金清洁生产国家工程实验室, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 为了实现高铝粉煤灰的高值化利用, 以高铝粉煤灰为单一铝硅原料, 依次对其进行酸、碱预处理, 将处理后的高铝粉煤灰与滑石粉混合, 通过一步原位烧成制备堇青石-莫来石复合材料, 进一步考察原料配比和烧成条件对烧成样品性能的影响规律。结果表明, 烧成温度为 1 370 ℃、烧成时间为 2 h、堇青石和莫来石理论质量比为 50 : 50 时, 可制备出体积密度为 1.96 g/cm³、显气孔率为 30.47%、常温抗折强度为 66.44 MPa 的堇青石-莫来石复合材料, 其主要指标均达到 YB/T 4549—2016《堇青石-莫来石窑具》的要求, 该方法实现了以粉煤灰为主要原料, 灵活制备具有不同堇青石和莫来石配比的复合材料, 为高铝粉煤灰的高值化利用提供新途径。

关键词: 高铝粉煤灰; 堇青石-莫来石; 酸处理; 脱硅; 烧成

中图分类号: TQ133

文献标志码: A

文章编号: 1006-6772(2018)05-0113-07

Preparation of cordierite-mullite composite from high-alumina coal fly ash

HU Pengpeng^{1,2,3}, ZHANG Jianbo^{1,2}, LI Shaopeng^{1,2}, LI Zhanbing^{1,2}, LI Huiquan^{1,2,3}

(1. Key Laboratory of Green Process and Engineering, Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. National Engineering Laboratory for Hydrometallurgical Cleaner Production Technology, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to realize the high value utilization of high-aluminum coal fly ash (HAFAs), HAFAs were treated with acid solution and alkaline solution in sequence, subsequently the pretreated HAFAs mixed with talcum powder and then calcined to prepare the cordierite-mullite composites. The effects of raw materials ratio and calcination conditions on the properties of calcination products were studied. It is found that the cordierite-mullite composite with bulk density of 1.96 g/cm³, apparent porosity of 30.47% and bending strengths of 66.44 MPa could be successfully prepared when the raw materials' theoretical mass ratio of cordierite to mullite is 50 : 50, the calcination time is 2 h and the calcination temperature is 1 370 ℃. The properties of the product meet the requirements of the standard of cordierite-mullite kiln furniture (YB/T 4549—2016), which provides a new approach to transfer HAFAs into high-value products.

Key words: high-alumina coal fly ash; cordierite-mullite; acid treatment; desilication; calcination

0 引 言

我国内蒙古中西部、山西北部 and 宁夏东部地区年产生高铝粉煤灰超过 3 000 万 t, 综合利用率不足 30%^[1], 主要用于建材(水泥、混凝土、墙体材料)制

备^[2-3], 高铝粉煤灰的大量堆存对当地生态环境造成严重破坏。高铝粉煤灰中氧化铝含量为 40% ~ 50%, 氧化硅含量 35% ~ 45%, 同时伴生镉等金属, 可作为一种特色资源加以利用^[4-5]。目前, 对高铝粉煤灰提取氧化铝的技术研究与工程化验证较

收稿日期: 2018-07-02; 责任编辑: 白娅娜 DOI: 10.13226/j.issn.1006-6772.18070201

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB0603103); 山西省煤基低碳重大专项资助项目(MC2016-05); 中石化合作企业横向资助项目(317014-5)

作者简介: 胡朋朋(1990—), 男, 湖北随州人, 硕士研究生, 从事煤基固废资源化利用方面的研究。E-mail: hupengpeng0990@163.com。通讯作者: 李会泉, 研究员, 博士生导师。E-mail: hqli@ipe.ac.cn

引用格式: 胡朋朋, 张建波, 李少鹏, 等. 基于高铝粉煤灰的堇青石-莫来石复合材料制备[J]. 洁净煤技术, 2018, 24(5): 113-119.

HU Pengpeng, ZHANG Jianbo, LI Shaopeng, et al. Preparation of cordierite-mullite composite from high-alumina coal fly ash [J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(5): 113-119.

多^[6-8],部分形成规模化经济稳定运行的生产线。基于高铝粉煤灰的化学组成和矿相结构特点,以高铝粉煤灰为原料制备铝硅材料成为潜在的利用途径^[9-13]。

堇青石-莫来石复合材料既保留了莫来石高温稳定性好、机械强度高的特点,又吸收了堇青石热膨胀系数小、热震稳定性好等特点,应用广泛^[14]。目前,一般采用原生矿物或工业废弃物与原生矿物混合物通过配料—成型—烧结工艺制备堇青石-莫来石复合材料。Khattab等^[15]以废气硅微粉、煅烧氧化铝球、煅烧氧化铝和氧化镁为原料,合成了堇青石-莫来石复合材料,当复合材料中堇青石含量为70%、莫来石含量为30%时,该材料的体积密度、显气孔率和冷萃强度分别为2.10 g/cm³、11.49%和489 MPa。Ramezani等^[16]以废气催化剂、废蛇纹石、废弃陶瓷辊棒和高岭土为原料采用高温固相法合成了堇青石-莫来石复合材料,且其热膨胀系数低于工业产品。上述研究均能降低堇青石-莫来石生产原料成本,但原料来源种类杂多,组成不稳定且杂质难以有效调控。高铝粉煤灰中铝硅元素含量高,可作为堇青石-莫来石复合材料的重要原料;但其较低的铝硅比和较高的杂质含量是影响高铝粉煤灰制备铝硅材料的关键。目前主要通过添加铝源^[17-19]和碱脱硅提高铝硅比^[9-11]。添加铝源能有效调控原料铝硅比,但需消耗大量高品位含铝矿物,且杂质难以调控;碱脱硅法难以达到理想的脱硅效果,且副反应难以调控,杂质含量较高,无法满足铝硅复合材料产品要求。

本文借鉴高铝粉煤灰制备莫来石的预处理方法^[10-11],以高铝粉煤灰为单一原料,通过酸处理过程大幅降低其中杂质,通过碱处理过程提高原料铝硅比。以酸处理高铝粉煤灰、酸处理-碱脱硅高铝粉煤灰和滑石粉为原料,按照一定的堇青石和莫来石质量比进行混合配料,考察一步原位高温相转化制备过程中原料配比、烧成时间和烧成温度对合成的堇青石-莫来石材料的体积密度、显气孔率、常温抗折强度和矿相结构的影响,通过工艺优化得到满足国家标准要求的堇青石-莫来石复合材料。

1 试验

1.1 材料与试剂

高铝粉煤灰(下文简称粉煤灰)来自内蒙古国华准格尔电厂,滑石粉产自辽宁省海城市。盐酸

(36%~38%)、NaOH(96%)均为分析纯,产自北京化工厂。去离子水采用Millipore纯水仪(密理博中国有限公司)制备。

1.2 试验方法

1.2.1 高铝粉煤灰预处理

对粉煤灰进行酸处理(温度80℃、液固比4 mL/g、盐酸浓度200 g/L、时间120 min^[9]),反应结束后,经过滤、洗涤、干燥处理得到酸处理后的高铝粉煤灰(简称酸处理粉煤灰);对部分酸处理粉煤灰进行碱脱硅处理(温度95℃、液固比5 mL/g、NaOH质量浓度230 g/L、时间80 min^[9]);成型:向原料中添加5%的水,搅拌均匀;陈腐24 h后,用压样机对原料进行压样(成型压力150 MPa,条形样品尺寸约5 mm×5 mm×40 mm^[15-16])。

1.2.2 样品制备及材料合成

1)混料和湿磨。以酸处理粉煤灰、酸-碱处理粉煤灰和滑石粉为原料,按照一定的堇青石和莫来石理论质量比(简称C:M)进行混料(表1),并置于球磨罐中进行湿法球磨(含水率50%、球磨时间60 min、转速250 r/min)。

表1 不同堇青石和莫来石理论质量比及对应的原料占比
Table 1 Theoretical mass ratios of cordierite to mullite and corresponding fractions of raw materials

C : M	酸处理粉煤灰 质量分数/%	酸-碱处理粉煤灰 质量分数/%	滑石粉质 量分数/%
10 : 90	7.47	88.86	3.67
30 : 70	15.76	72.48	11.76
50 : 50	24.03	56.14	19.83
70 : 30	32.28	39.84	27.88
90 : 10	40.52	23.56	35.92

2)干燥。将湿料置于干燥箱中干燥(温度105℃、时间24 h)。

3)成型。向原料中添加5%的水,搅拌均匀;陈腐24 h后,用压样机进行压样(成型压力150 MPa,条形样品尺寸约5 mm×5 mm×40 mm)。

4)干燥。将条形样品置于干燥箱中干燥(温度105℃、时间3 h)。

5)烧成。将样品置于高温马弗炉中烧成,烧成过程为:从常温到1 000℃,升温速率5℃/min;从1 000℃到目标温度 T ,升温速率3℃/min;目标温度 T 下保温一段时间 t ;从目标温度 T 到1 000℃,降温速率3℃/min;从1 000~800℃,降温速率

5 °C/min;之后自然降温到 100 °C 以下。

1.2.3 样品分析

按照 GB/T 2997—2015《致密定形耐火制品体积密度、显气孔率和真气孔率试验方法》试样浸渍—常规法测定烧成样品的显气孔率和体积密度。使用 WDW 3020 微控电子万能试验机(长春科新试验仪器有限公司)测定样品的常温抗折强度。测定条件:加荷刀口移动速度 0.3 mm/min,三点弯曲跨距 30 mm,平行试样 3 个。

将原料置于 950 °C,保持 1 h,确定原料的烧失分(LOI)含量。对烧成后的样品粉碎、球磨处理,采用 X 射线荧光光谱仪(荷兰帕纳科公司,型号 AX-10S-MAX)分析粉末样品的化学组成。采用 X 射线衍射仪(荷兰帕纳科公司,型号 Empyrean)分析粉末

样品晶相组成。分析条件:CuK α 射线,管电流、电压分别为 40 kV、40 mA,扫描时间 29.45 min,扫描范围 5°~90°。采用扫描电子显微镜(日本 JEOL 公司,型号 JSM-7610F)分析样品的微观形貌。

2 结果与讨论

原料物理和化学特征是制备堇青石-莫来石复合材料的基础,而原料配比、烧成时间和烧成温度是影响制备堇青石-莫来石材料过程的主要因素,决定了产品的性能。

2.1 原料特征

2.1.1 原料化学组成和矿相组成

原料化学组成见表 2,粉煤灰、酸处理粉煤灰和酸-碱处理粉煤灰矿相组成如图 1 所示。

表 2 原料化学组成
Table 2 Chemical composition of raw materials

原料	化学组成							LOI
	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	MgO	
粉煤灰	50.14	39.17	3.07	2.26	1.47	0.17	0.17	1.77
酸处理粉煤灰	49.65	42.84	0.82	1.85	1.03	0.10	0.20	1.89
酸-碱处理粉煤灰	67.79	26.07	0.28	2.12	0.84	0	0.12	2.30
滑石粉	0.01	62.14	0.86	0	0.20	0	32.04	4.75

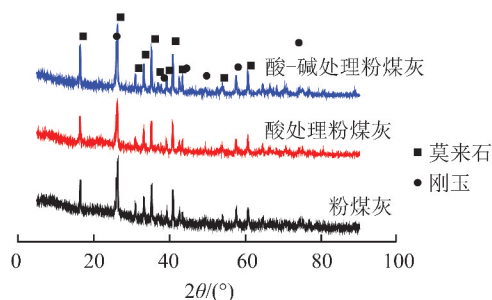


图 1 粉煤灰、酸处理粉煤灰和酸-碱处理粉煤灰矿相组成
Fig. 1 Mineral composition of coal fly ash (CFA), acid treated CFA and acid-alkali treated CFA

由表 2 可知,高铝粉煤灰主要含 Al₂O₃ 和 SiO₂,同时含少量 CaO、TiO₂、Fe₂O₃ 等杂质;高铝粉煤灰主要矿相为莫来石和刚玉相,还有以 SiO₂ 为主的玻璃相。相比原始高铝粉煤灰,酸处理粉煤灰的铝硅比从 1.28 降低到 1.16;酸处理后的粉煤灰中钙、钛、铁杂质均不同程度降低,说明酸处理具有明显的除杂效果,可有效减少粉煤灰原料中杂质对制备的材料性能的影响。

由图 1 可知,酸处理粉煤灰保留了原有的莫来

石和刚玉相,Zhang 等^[10]认为酸处理主要破坏了粉煤灰中部分活性铝硅酸盐,使部分活性铝浸出到液相,导致粉煤灰的铝硅比降低。酸-碱处理粉煤灰铝硅比提高到 2.60,说明碱脱硅效果显著;其 XRD 谱图中代表玻璃相的鼓包消失,莫来石和刚玉相峰变化不大,脱硅过程主要破坏了粉煤灰的玻璃相。

2.1.2 原料的粒径分布和微观形态

原料的粒径分布如图 2 所示,粉煤灰、酸处理粉煤灰和酸-碱处理粉煤灰微观形态如图 3 所示。

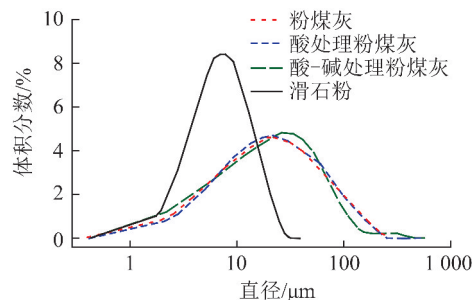
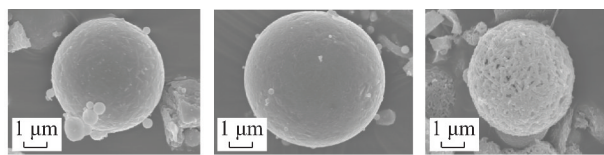


图 2 原料的粒径分布

Fig. 2 Particle size distributions of raw materials

由图 2 可知,粉煤灰、酸处理粉煤灰、酸-碱处



(a) 粉煤灰 (b) 酸处理粉煤灰 (c) 酸-碱处理粉煤灰

图3 粉煤灰、酸处理粉煤灰和酸-碱处理粉煤灰微观形态

Fig. 3 Micromorphology of CFA, acid treated CFA and acid-alkali treated CFA

理粉煤灰中值粒径 d_{50} 分别为 17.59、18.04、16.93，其粒径分布整体相似，说明预处理过程没有显著改变粉煤灰的粒径和分布。由图3可知，酸处理后粉煤灰颗粒形状和表面形貌变化不大，保持了原有的球形和光滑表面；酸-碱处理粉煤灰颗粒保持了原有颗粒形状，但颗粒表面变得粗糙，出现了大量孔道，暴露了颗粒中晶相，可能是嵌入到晶体间的玻璃相被碱大量溶解的缘故。

2.2 影响因素

2.2.1 原料配比

研究了 $T=1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t=2\text{ h}$ 时，原料配比对烧成样品的体积密度、显气孔率和常温抗折强度的影响，结果如图4所示。由图4可知，随着堇青石与莫来石理论质量比的增加，烧成样品的体积密度从 2.25 g/cm^3 下降到 1.81 g/cm^3 ；显气孔率呈上升趋势，从 27.94% 上升到 32.13%；常温抗折强度从 76.03 MPa 下降到 48.91 MPa。

$T=1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $t=2\text{ h}$ 时，原料配比对烧成样品矿相组成的影响如图5所示。由图5可知，堇青石与莫来石理论质量比为 10:90 时，烧成样品为莫来石相，没有形成堇青石晶相，推测镁主要以玻璃相形式存在；随着堇青石与莫来石理论质量比的提高，在峰宽基本不变的情况下，堇青石晶相峰的强度逐渐增大，莫来石晶相峰的强度减小；原料中堇青石与莫来石理论含量比为 90:10 时，烧成样品的晶相为堇青石，莫来石晶相峰消失。结果表明原料中堇青石与莫来石理论质量比为 30:70~70:30 时，可制备出堇青石-莫来石复合材料；逐步提高原料中堇青石与莫来石理论质量比，有助于提高烧成材料中堇青石含量，降低莫来石含量。

根据文献[20-21]报道，堇青石材料体积密度和常温抗折强度均低于莫来石，显气孔率高于莫来石。随着堇青石-莫来石复合材料中堇青石含量的增加和莫来石含量的降低，其体积密度、显气孔率和常温抗折强度分别向堇青石体积密度、显气孔率和

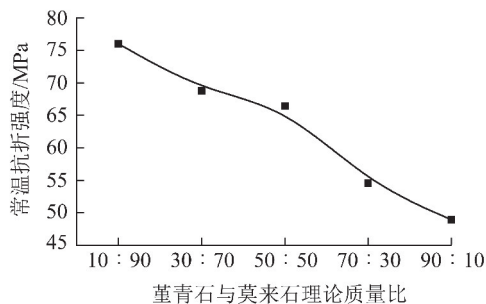
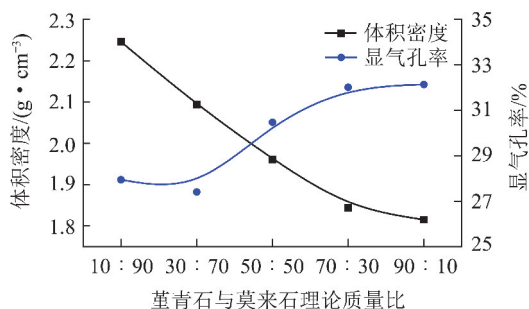


图4 原料配比对烧成样品的体积密度、显气孔率和常温抗折强度影响

Fig. 4 Effects of combinations of raw materials on bulk density, apparent porosity and bending strengths of calcination products

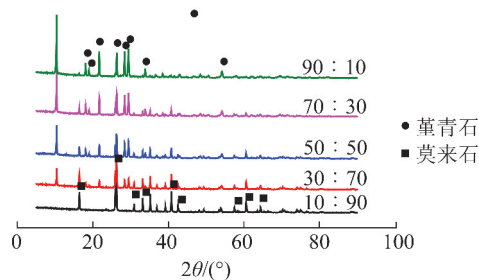


图5 原料配比对烧成样品矿相组成的影响

Fig. 5 Effects of combinations of raw materials on the mineral compositions of calcination products

常温抗折强度大小方向变化，即出现了体积密度减小、显气孔率增加、常温抗折强度减小的趋势。材料的矿相组成影响性质，性质又影响其用途。通过改变原料配比可灵活制备具有不同堇青石和莫来石含量的复合材料，增加了产品的应用范围。

2.2.2 烧成时间

$T=1370\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $C:M=50:50$ 时，烧成时间对烧成样品体积密度、显气孔率和常温抗折强度的影响如图6所示。可知，烧成时间为 1~4 h 时，体积密度、显气孔率和常温抗折强度分别维持在 1.98 g/cm^3 、32.00%、65.00 MPa 左右，且随着烧成时间的增加分别呈现略增大、略减小、略增大的趋势。

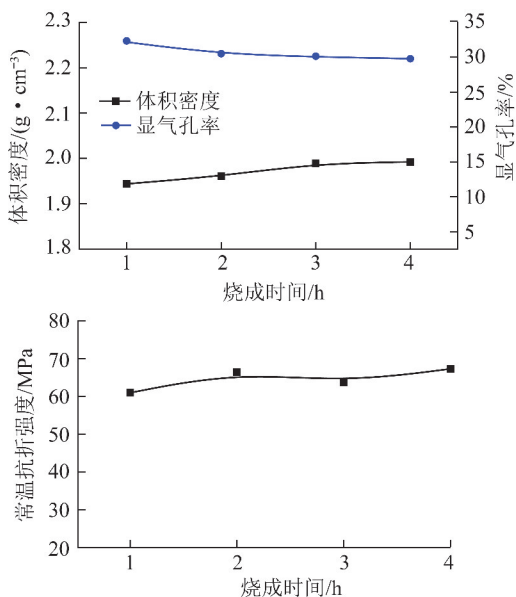


图6 烧成时间对烧成样品的体积密度、显气孔率和常温抗折强度的影响

Fig. 6 Effects of calcination time on bulk density, apparent porosity and bending strengths of calcination products

$T=1\ 370\ ^\circ\text{C}$ 、 $C:M=50:50$ 时,研究烧成时间对烧成样品矿相组成的影响,结果如图7所示。由图7可知,烧成时间为1~4 h时,烧成样品矿相组成无明显变化,晶相均为堇青石和莫来石。说明烧成时间为1 h时,烧成反应基本完成,生成了晶相组成为堇青石和莫来石的复合材料;随着烧成时间的增加,烧成反应更加充分,堇青石和莫来石晶体间隙更加致密,呈现出体积密度增加、显气孔率减小、抗折强度增加的趋势。

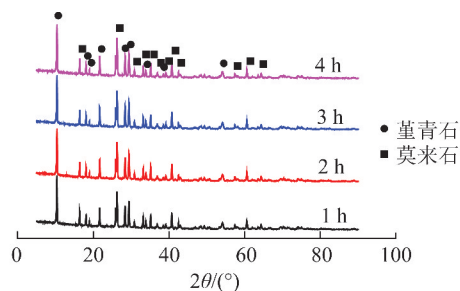


图7 烧成时间对烧成样品矿相的影响

Fig. 7 Effects of calcination time on the mineral compositions of calcination products

2.2.3 烧成温度

$t=2\ \text{h}$ 、 $C:M=50:50$ 时,研究烧成温度对烧成样品的体积密度、显气孔率和常温抗折强度的影响,结果如图8所示。由图8可知,烧成温度从1 170 $^\circ\text{C}$ 升高到1 320 $^\circ\text{C}$ 时,烧成样品的体积密度和显气

孔率无明显变化,分别维持在1.90 g/cm^3 和35.50%左右;常温抗折强度从39.84 MPa增大到59.31 MPa。烧成温度超过1 320 $^\circ\text{C}$ 时,指标发生明显变化,当烧成温度达到1 420 $^\circ\text{C}$ 时,体积密度增大到2.62 g/cm^3 ,显气孔率减小到0.21%,常温抗折强度增大到119.34 MPa。

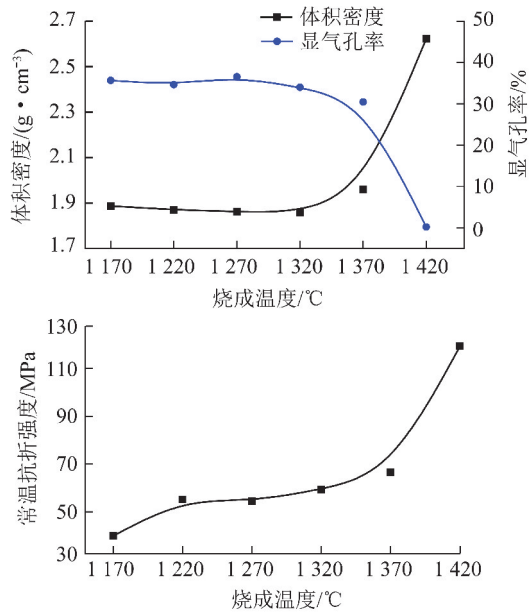


图8 烧成温度对烧成样品的体积密度、显气孔率和常温抗折强度的影响

Fig. 8 Effects of calcination temperature on bulk density, apparent porosity and bending strengths of calcination products

烧成温度对烧成样品矿相的影响如图9所示。由图9可知,烧成温度为1 170 $^\circ\text{C}$ 和1 220 $^\circ\text{C}$ 时,烧成样品的晶相为堇青石、莫来石和少量的氧化铝;随着烧成温度的升高,烧成样品中堇青石晶体峰强度逐渐增强,氧化铝晶体峰强度逐渐减弱,并在烧成温度1 270 $^\circ\text{C}$ 时消失,说明提高烧成温度可促进氧化铝向堇青石转化。烧成温度为1 270~1 420 $^\circ\text{C}$ 时,烧成样品中仅含有堇青石和莫来石晶体,且XRD谱图无明显变化,说明此时生成了仅含堇青石和莫来石晶体的堇青石-莫来石复合材料。

$T=1\ 370\ ^\circ\text{C}$ 、 $t=2\ \text{h}$ 、 $C:M=50:50$ 时,烧成样品的微观形貌如图10所示。由图10可知,1 370 $^\circ\text{C}$ 下生成的堇青石-莫来石复合材料主要含有棒状、短柱状的晶体,晶体颗粒之间掺杂一定量的玻璃相。

烧成温度的提高促进了烧成过程固-固反应的进行,有利于堇青石晶体和莫来石晶体的生成和长大,使晶体结构更加致密化,因此提高烧成温度导致

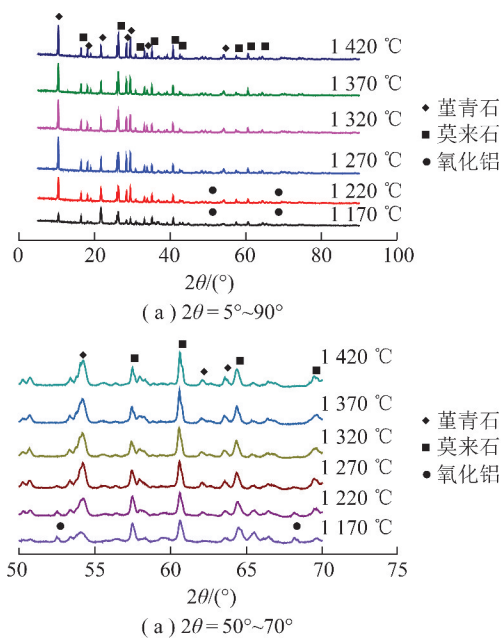


图9 烧成温度对烧成样品矿相的影响

Fig. 9 Effects of calcination temperature on the mineral compositions of calcination products

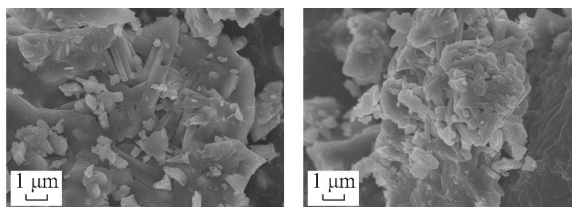


图10 烧成样品的微观形貌

Fig. 10 Micromorphology of calcination products

烧成样品的体积密度增大,显气孔率减小,常温抗折强度增大。上述结果与文献[16,22-23]报道的堇青石-莫来石复合材料性能指标值和变化趋势基本一致。YB/T 4549—2016《堇青石-莫来石窑具》对堇青石-莫来石窑具的指标要求为:体积密度 1.85 g/cm^3 ,显气孔率 $(26 \pm 4)\%$,常温抗折强度 10 MPa ,烧结温度为 $1370 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,烧成样品的体积密度 1.96 g/cm^3 ,显气孔率 30.47% ,常温抗折强度 66.44 MPa ,满足标准要求。

3 结 论

1)酸处理可有效去除粉煤灰中部分活性铝、钙、钛、铁等杂质;碱脱硅过程有效去除粉煤灰的玻璃相,粉煤灰铝硅比提高至2.60。酸、碱预处理过程有效降低了原料杂质含量、提高了原料铝硅比。

2)原料中堇青石和莫来石理论质量比为30:70~70:30、烧成温度为 $1370 \text{ }^\circ\text{C}$ 、烧成时间为2 h

时,可制备不同堇青石和莫来石含量的复合材料。该方法实现了以粉煤灰为主要原料灵活制备具有不同堇青石和莫来石配比的复合材料。

3)当烧成温度为 $1370 \text{ }^\circ\text{C}$ 、烧成时间为2 h、堇青石和莫来石理论配比为50:50时,可制备堇青石-莫来石复合材料,其体积密度为 1.96 g/cm^3 、显气孔率为 30.47% 、常温抗折强度为 66.44 MPa ,均达到YB/T 4549—2016《堇青石-莫来石窑具》相应指标要求。

参考文献 (References):

- [1] 李会泉,张建波,王晨晔,等.高铝粉煤灰伴生资源清洁循环利用技术的构建与研究进展[J].洁净煤技术,2018,24(2):1-8. LI Huiquan, ZHANG Jianbo, WANG Chenye, et al. Construct and research advance in clean and cycle utilization of associated resources in high-alumina coal fly ash[J]. Clean Coal Technology, 2018, 24(2):1-8.
- [2] SIAD H, LACHEMI M, SAHMARAN M, et al. Use of recycled glass powder to improve the performance properties of high volume fly ash-engineered cementitious composites[J]. Construction and Building Materials, 2017, 163:53-62.
- [3] KURDA R, BRITO J D, SILVESTRE J D, et al. Combined influence of recycled concrete aggregates and high contents of fly ash on concrete properties[J]. Construction and Building Materials, 2017, 157:554-572.
- [4] DAI Shifeng, ZHAO Lei, PENG Suping, et al. Abundances and distribution of minerals and elements in high-alumina coal fly ash from the Jungar Power Plant, Inner Mongolia, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2010, 81(4):320-332.
- [5] GONG Bengen, TIAN Chong, XIONG Zhuo, et al. Mineral changes and trace element releases during extraction of alumina from high aluminum fly ash in Inner Mongolia, China[J]. International Journal of Coal Geology, 2016, 166:96-107.
- [6] LI Huiquan, HUI Junbo, WANG Chenye, et al. Extraction of alumina from coal fly ash by mixed-alkaline hydrothermal method[J]. Hydrometallurgy, 2014, 147/148:183-187.
- [7] XU Dehua, LI Huiquan, BAO Weijun, et al. A new process of extracting alumina from high-alumina coal fly ash in $\text{NH}_4\text{HSO}_4 + \text{H}_2\text{SO}_4$ mixed solution[J]. Hydrometallurgy, 2016, 165:336-344.
- [8] SUN Zhenhua, BAO Weijun, LI Huiquan, et al. Mineral phase change of high-alumina fly ash during desilication and extraction of Al_2O_3 by alkali dissolution process[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2013, 13(3):403-408.
- [9] ZHANG Jianbo, LI Shaopeng, LI Huiquan, et al. Acid activation for pre-desilicated high-alumina fly ash[J]. Fuel Processing Technology, 2016, 151:64-71.
- [10] ZHANG Jianbo, LI Huiquan, LI Shaopeng, et al. Mechanism of mechanical-chemical synergistic activation for preparation of mullite ceramics from high-alumina coal fly ash[J]. Ceramics

- International, 2017, 44(4):3884-3892.
- [11] ZHANG Jianbo, LI Shaopeng, LI Huiquan, et al. Preparation of Al-Si composite from high-alumina coal fly ash by mechanical-chemical synergistic activation[J]. Ceramics International, 2017, 43(8):6532-6541.
- [12] LUO Yang, ZHENG Shili, MA Shuhua, et al. Ceramic tiles derived from coal fly ash; Preparation and mechanical characterization[J]. Ceramics International, 2017, 43(15):11953-11966.
- [13] LUO Yang, MA Shuhua, ZHAO Zhenqing, et al. Preparation and characterization of whisker-reinforced ceramics from coal fly ash[J]. Ceramics International, 2017, 43(1):1-11.
- [14] 陈宁, 丁颖颖, 李素平. 堇青石-莫来石材料的研究进展及应用前景[J]. 中国陶瓷, 2016, 52(6):6-9.
CHEN Ning, DING Yingying, LI Suping. Research progress and application prospect of Cordierite-mullite Materials[J]. China Ceramics, 2016, 52(6):6-9.
- [15] KHATTAB R M, EL-RAFEI A M, ZAWRAH M F. In situ formation of sintered cordierite-mullite nano-micro composites by utilizing of waste silica fume[J]. Materials Research Bulletin, 2012, 47(9):2662-2667.
- [16] RAMEZANI A, EMAMI S M, NEMAT S. Reuse of spent FCC catalyst, waste serpentine and kiln rollers waste for synthesis of cordierite and cordierite-mullite ceramics[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 338:177-185.
- [17] 孙俊民, 程照斌, 李玉琼, 等. 利用粉煤灰与工业氧化铝合成莫来石的研究[J]. 中国矿业大学学报, 1999, 28(3):247-250.
SUN Junmin, CHENG Zhaobin, LI Yuqiong, et al. Research on synthesizing mullite with fly ash and alumina[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 1999, 28(3):247-250.
- [18] LI Jinhong, MA Hongwen, HUANG Wenhui. Effect of V_2O_5 on the properties of mullite ceramics synthesized from high-aluminum fly ash and bauxite[J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 166(2):1535-1539.
- [19] 陈江峰, 邵龙义, 魏思民. 利用高铝粉煤灰合成莫来石的实验研究[J]. 矿物学报, 2008, 28(2):191-195.
CHEN Jiangfeng, SHAO Longyi, WEI Simin. Experimental study of synthesizing mullite from high-alumina fly coal ash[J]. Acta Mineralogica Sinica, 2008, 28(2):191-195.
- [20] LIN Bin, LI Shaopeng, HOU Xinjuan, et al. Preparation of high performance mullite ceramics from high-aluminum fly ash by an effective method[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2015, 623:359-3561.
- [21] 马立建, 杨潘, 薛群虎, 等. 利用高铝粉煤灰合成堇青石陶瓷材料的微观结构研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(1):141-144.
MA Lijian, YANG Pan, XUE Qunhu, et al. Study on the microstructures of cordierite ceramics using high-alumina fly ash[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology (Natural Science Edition), 2017, 49(1):141-144.
- [22] 徐晓虹, 马雄华, 吴建锋, 等. 太阳能热发电用堇青石-莫来石复相陶瓷的制备及抗热震性[J]. 武汉理工大学学报, 2012, 34(1):1-6.
XU Xiaohong, MA Xionghua, WU Jianfeng, et al. Preparation and thermal shock resistance of cordierite-mullite composite ceramic for solar thermal power[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2012, 34(1):1-6.
- [23] LI Fengfeng, DU Jiao, ZHANG Mingxi, et al. Preparation of cordierite-mullite composite crucibles and structure characterization[J]. Advanced Materials Research, 2012, 430/431/432:521-524.