

焙烧温度对纤维水镁石矿物学特征的影响研究

刘芳芳,牛继南

(中国矿业大学 材料与物理学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 纤维水镁石是一种独特的天然氢氧化物矿物纤维,具有增强增韧和耐高温阻燃等特点,被广泛应用于建筑、阻燃和造纸等领域,将纤维水镁石应用于高附加值产品中具有重要的经济意义,而纤维水镁石的应用与其矿物学特征密切相关。陕西汉中黑木林纤维水镁石矿是目前全球范围内储量最大的纤维水镁石矿床,目前对该地区纤维水镁石矿物学特征的研究较少。本文采用X射线衍射(XRD)、X射线荧光分析(XRF)、场发射扫描电子显微镜(SEM)、氮气吸脱附和热重分析(TGA)等测试方法,对黑木林纤维水镁石进行了矿物学特征测试分析与研究,同时也对热处理后纤维水镁石矿物学特征的变化规律进行了研究,为纤维水镁石的应用提供理论基础,为将其应用于高附加值产品中提供科学依据,从而进一步提高其经济价值。

关键词: 黑木林; 纤维水镁石; 矿物学特征; 焙烧

中图分类号: P578.4⁺95; P579

文献标识码: A

文章编号:1000-6524(2024)01-0089-11

Study of the effect of roasting on the mineralogical characteristics of fibrous brucite

LIU Fang-fang and NIU Ji-nan

(School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: Fiber brucite is a unique natural hydroxide mineral fiber with the characteristics of strengthening, toughening, high-temperature resistance, and flame retardancy. It is widely used in fields such as construction, flame retardancy, and papermaking. The application of fiber brucite in high value-added products has important economic significance, and the application of fiber brucite is closely related to its mineralogical characteristics. The Heimulin fiber brucite deposit in Hanzhong, Shaanxi is currently the largest fiber brucite deposit in the world, and there is currently limited research on the mineralogical characteristics of fiber brucite in the region. By means of X-ray diffraction (XRD), X-ray fluorescence analysis (XRF), scanning electron microscopy (SEM), nitrogen adsorption desorption, and thermogravimetric analysis (TGA), this article studies the mineralogical characteristics and the changes in mineralogical characteristics of Heimulin fibrous brucite after heat treatment, providing a theoretical basis and scientific proof for the application of fibrous brucite, thereby further enhancing their economic value.

Key words: Heimulin; fibrous brucite; mineralogical characteristics; roasting

Fund support: Fundamental Research Funds for the Central Universities (2019XKQYMS76); Central University Basic Research Business Fund (2023QN1038)

收稿日期: 2023-05-05; 接受日期: 2023-11-10; 编辑: 郝艳丽

基金项目: 中央高校基本科研业务费面上项目(2019XKQYMS76); 中央高校基本科研业务费专项资金(2023QN1038)

作者简介: 刘芳芳(1995-), 女, 汉族, 博士, 副教授, 新型储能矿物材料, liuff4069@163.com; 通讯作者: 牛继南, 男, 副教授, 矿物材料专业, E-mail: jinan.niu@cumt.edu.cn。

水镁石的化学组成为 $Mg(OH)_2$, 自然界中常见的形态为块状和层状, 而纤维状较为少见, 其纤维状形貌特征使其成为一种良好的合成中空炭材料的模板选择, 以其为矿物模板合成的多孔炭呈现中空管状结构, 表现出优异的电化学性能(刘芳芳等, 2021; Liu et al., 2022, 2023)。除了作为模板之外, 其纤维状特性还具有出色的增强增韧性, 广泛应用于沥青(蒋雷鸣等, 2019; 张顶, 2021; 胡志博等, 2021)、水泥(邢煌, 2018; Yang et al., 2019; 陈玉宏等, 2020; Li et al., 2020; Zhu et al., 2021; Peng et al., 2021)、混凝土(张磊蕾等, 2015; 秦先涛等, 2017; 朱振禄, 2018)、砂浆(温久然等, 2014; 李明等, 2015; 柴倩等, 2018)等路用(陈玉宏等, 2020)及建筑材料中(Zhu et al., 2021)。此外, 纤维水镁石因其化学成分及形貌等物理化学性质还被广泛应用于阻燃(赵秀峰等, 2007; 董发勤等, 2009; 李建军等, 2010; Peng et al., 2021; Liu et al., 2022)及造纸(祝叶等, 2010; 刘淑鹏等, 2014)等领域。常用的石棉纤维具有致癌性(陈杨, 2016; 黄柳雯等, 2019), 纤维状水镁石具有和石棉类似的形貌和较高的抗拉强度, 同时无致癌性, 因此是取代石棉的理想原料。陕南黑木林纤维水镁石矿是全球范围内已知的最大的纤维水镁石矿, 总资源储量高达 786 万吨(陈玉宏等, 2020), 是我国的宝贵资源(朴海涛等, 2013)。

目前, 研究者已对陕南黑木林纤维水镁石矿开展了大量工作, 崔义发(2011)对该地区纤维水镁石矿床地质特征及矿床成因进行了深入研究, 矿床围岩主要为橄榄岩严重蚀变形成的蛇纹岩, 其矿床成因属于热液交代性。而在矿物学特征方面, 董发勤等(2009)首次开展了应用矿物学研究, 考察了该地区纤维水镁石的成分、结晶方位等一系列物理化学性质。纤维水镁石因其较高的抗拉强度(892.4~1 283.7 MPa)、弹性模量(13.6~18.5 GPa)、硬度(68~249)及长径比(~90), 被广泛应用于水泥混凝土/沥青等路用材料中(熊锐等, 2016; 邢煌, 2018; 盛燕萍等, 2018)。矿产资源的高附加值的应用与其矿物学特征密切相关, 细致深入的矿物学特征研究可以为其应用提供理论依据, 因此对纤维水镁石矿物学特性展开深入研究, 是提升纤维水镁石附加值、改善纤维水镁石加工工艺的重要基础。但目前为止, 未发现针对焙烧前后陕南黑木林纤维水镁石的组分、孔结构和形貌等矿物学特征变化的

研究。

本文采用 X 射线衍射(XRD)、X 射线荧光分析(XRF)、场发射扫描电子显微镜(SEM)、氮气吸脱附和热重分析(TGA)等手段, 研究了焙烧前后黑木林纤维水镁石的矿物学特征。该地区不同温度焙烧前后纤维水镁石的物质组成、微观形貌和孔结构特征的深入分析, 为纤维水镁石的应用提供理论基础, 为将其应用于高附加值产品中提供科学依据, 从而进一步提高其经济价值。

1 实验仪器与原料

1.1 原料

纤维水镁石采自陕西汉中黑木林。根据 X 射线荧光分析结果, 原矿(FB)的主要成分($w_{\text{B}}/\%$)为 MgO (37.57%)、 SiO_2 (22.67%) 和 Fe_2O_3 (16.29%), 其次含有少量的 ZnO (0.89%)、 Al_2O_3 (0.86%)、 NiO (0.74%)、 CaO (0.67%)、 MnO (0.55%), 烧失量为 19.76%, 总量为 100.00%。

1.2 实验方法

称取 2.0 g 纤维水镁石原矿(FB)多组, 在自动控温马弗炉中进行焙烧, 温度分别设定为 300、400、500、600、700 与 800℃, 升温速率为 5℃/min, 升温至相应温度后保温 4 h, 后取出并放置至室温, 密封保存, 样品分别标记为 FB-300、FB-400、FB-500、FB-600、FB-700 和 FB-800。焙烧前后纤维水镁石的质量见表 1。

表 1 焙烧前后纤维水镁石的质量变化

Table 1 Quality changes of fibrous brucite before and after roasting

样号	焙烧前质量/g	焙烧后质量/g	质量保持率/%
FB-300	2.00	1.98	99.00
FB-400	2.00	1.80	90.00
FB-500	2.00	1.76	88.00
FB-600	2.00	1.68	84.00
FB-700	2.00	1.62	81.00
FB-800	2.00	1.62	81.00

1.3 测试方法

采用日本理学公司的 RigakuD/max2400X 射线衍射仪分析物相, 入射光为 $CuK\alpha$ ($\lambda=0.15406 \text{ nm}$), 钝电流 100 mA, 钝电压 40 kV, 步长 0.02, 扫描速度为 6°/min, 扫描范围为 5°~80°。利用日本日立公司

的 SU8220 场发射扫描电子显微镜观察样品微观形貌, 加速电压 10 kV。通过美国 Micrometer 公司的 ASAP2010 氮气吸附-脱附测试仪测试样品的氮气吸附, 测试前在 120℃ 脱气 12 h, 测试温度为 -196℃, 比表面积用多点式 BET 法测定, 孔径分布利用非定域密度泛函理论测定(张伟娜等, 2016)。采用美国 TA 的 Q600 SDT 热重差热同步测定仪对样品进行热重分析, 升温速率 10℃/min, 最终温度 800℃, 氮气气氛。利用瑞士公司 ADVANTXP+顺序式 X 射线荧光光谱仪定量分析样品的成分, 电压为 40 kV, 电流为 60 mA。

2 结果与讨论

2.1 物相分析

为了确定不同温度焙烧 4 h 后样品的物相组成, 对样品进行了 XRD 分析。图 1 为纤维水镁石原矿及不同温度焙烧后纤维水镁石样品的 XRD 图。FB 在 2θ 角 18.8°、38.1°、51.0° 和 68.4° 附近出现衍射峰(图 1a), 这些峰均属于水镁石的特征峰(JCPDS

No. 07-0239), 分别对应其(001)、(101)、(102)和(103)晶面; 在 2θ 角 12.3° 和 24.5° 附近出现的衍射峰, 属于利蛇纹石 $(Mg, Al)_3[(Si, Fe)_2O_5](OH)_4$ 的特征峰(JCPDS No. 50-1625), 分别对应(001)和(002)晶面, 表明该样品除了纤维水镁石主要矿物外, 还有少量利蛇纹石, 这也与 XRF 的测试结果相吻合。当焙烧温度为 300℃ 时(FB-300), 物相未发生变化, 仍存在水镁石和利蛇纹石的特征衍射峰, 在 2θ 角 18.6°、38.0°、50.9° 和 68.3° 附近出现衍射峰(图 1b), 分别对应水镁石的(001)、(101)、(102)和(103)晶面, 在 2θ 角 12.1° 和 24.3° 附近出现的特征衍射峰分别对应利蛇纹石的(001)和(002)晶面; 当温度升高至 400℃ 时(FB-400), 水镁石(001)、(101)、(102) 和(103)晶面对应的特征衍射峰消失, 在 2θ 角 36.9°、42.9°、62.3° 和 78.6° 附近出现新的特征衍射峰(图 1c), 这些峰均属于方镁石的特征峰(JCPDS No. 45-0946), 分别对应其(111)、(200)、(220)和(222)晶面, 在 2θ 角 12.2°、19.2°、24.5°、35.9°、60.1° 和 72.0° 附近仍然存在利蛇纹石的特征衍射峰, 分别对应(001)、(100)、(002)、(111)、(300)

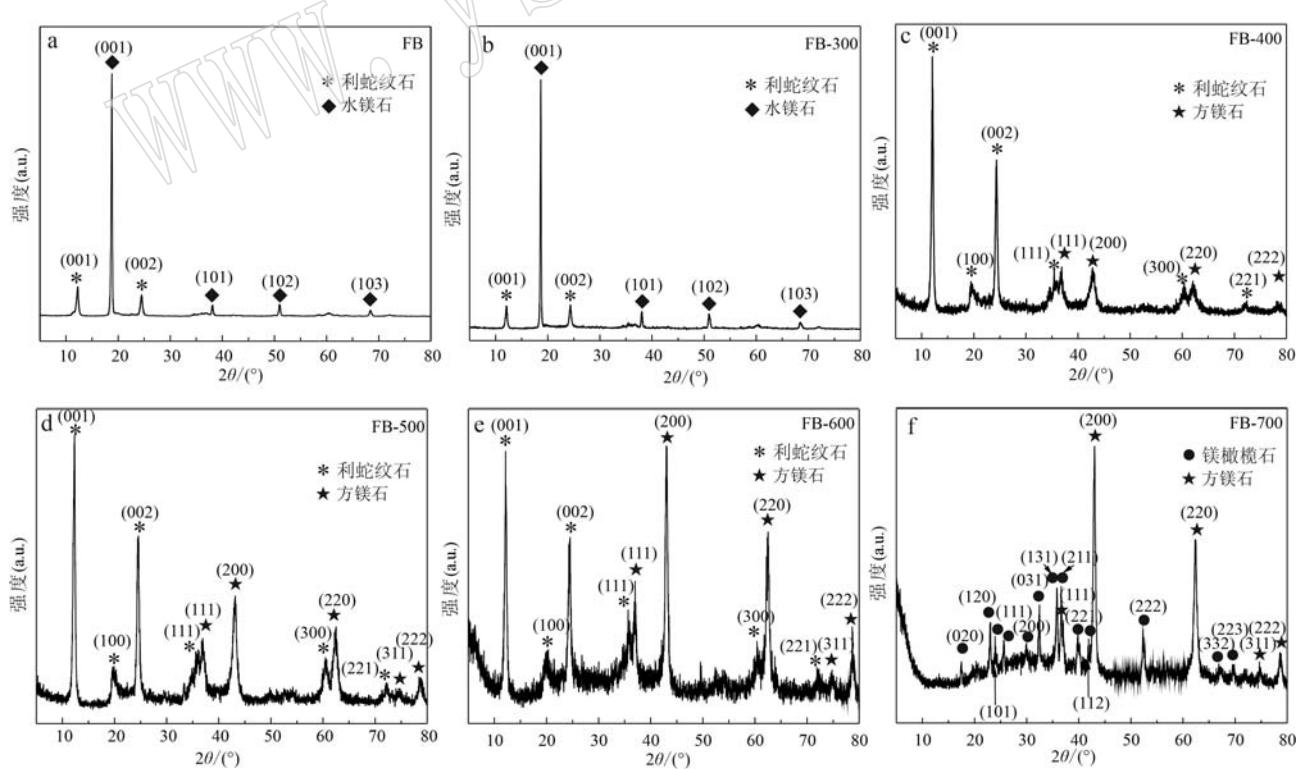


图 1 焙烧前后纤维水镁石的 XRD 图

Fig. 1 The XRD spectra of fibrous brucite before and after roasting

和(221)晶面;随着温度进一步升高至500和600℃时,FB-500和FB-600出现的物相与FB-400一致,但在 2θ 角74.7°附近出现了方镁石(311)晶面特征衍射峰;当温度升高至700℃时,方镁石的特征衍射峰未发生变化,但利蛇纹石特征衍射峰消失,在 2θ 角17.4°、22.9°、23.9°、25.5°、29.8°、32.3°、35.7°、36.5°、39.7°、41.8°、52.3°、67.1°和69.5°附近出现新的特征衍射峰,这些峰均属于镁橄榄石(Mg_2SiO_4)的特征峰(JCPDS No. 34-0189),分别对应其(020)、(120)、(101)、(111)、(200)、(031)、(131)、(211)、(221)、(112)、(222)、(332)和(223)晶面。

X射线衍射图谱结果表明,该地区纤维水镁石原矿中含有水镁石和利蛇纹石的特征衍射峰,焙烧温度为300℃时,水镁石和利蛇纹石的特征衍射峰未发生变化;而焙烧温度为400~600℃时,利蛇纹石的特征衍射峰未发生变化,而水镁石的特征衍射峰消失,出现方镁石的特征衍射峰,这可能是由于水镁石发生分解造成的;当焙烧温度进一步升高至700℃时,利蛇纹石的特征衍射峰消失,出现镁橄榄石,这可能是由于利蛇纹石脱去结构水导致的。

2.2 热重分析

图2为纤维水镁石原矿的热重曲线,根据热重分析(TG)可以确定样品的相变温度,热重曲线主要分为3个阶段:第1个阶段为304.59℃以前,样品失重率为2.15%,这可能主要是由于纤维水镁石中吸附水的溢出导致的;第2个阶段为304.59~409.57℃,失重率突然增大,样品失重率为9.56%,这时纤维水镁石吸热分解,由 $Mg(OH)_2$ 相向 MgO 相转变,反应方程式见式(1),与XRD图谱结果相一

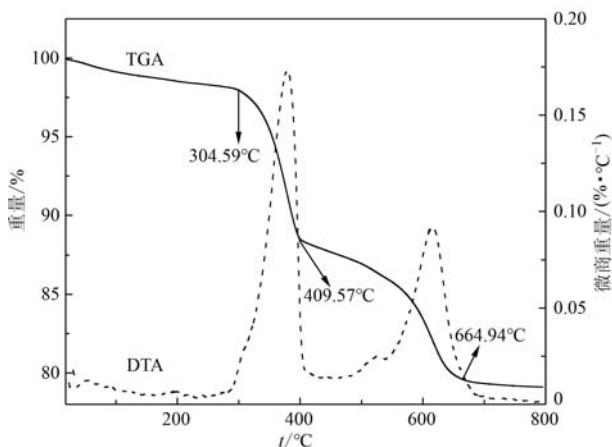
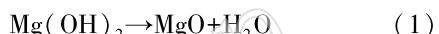


图2 纤维水镁石原矿TGA-DTA曲线

Fig. 2 TGA-DTA curves of fibrous brucite

致,即400℃焙烧后,样品XRD图谱中水镁石[化学成分 $Mg(OH)_2$]衍射峰消失,而出现了方镁石(化学成分 MgO)新矿物相](张顶,2021;胡志博等,2021);第3个阶段为409.57~664.94℃,样品失重率为4.86%,这一阶段的失重主要是由于纤维水镁石矿中含有的利蛇纹石脱去结构水导致的,这也与XRD图谱结果相一致,即700℃焙烧后,样品XRD图谱中利蛇纹石($Mg_3[(OH)_4Si_2O_5]$)衍射峰消失,而出现了镁橄榄石(Mg_2SiO_4)新矿物相。从热失重结果可以看出,黑木林矿石中水镁石相稳定存在的温度在大约300℃以下,这为该纤维水镁石矿的实际利用温度提供了参考。



2.3 形貌分析

通过扫描电镜观察焙烧前后纤维水镁石的形貌特征。图3a和3b为纤维水镁石原矿的扫描电镜图片,其呈现一维纤维相互堆叠的网络状结构,可以清晰地看出纤维之间未发生粘连,且纤维表面光滑(图3b),通过对扫描电镜照片中样品中一维纤维的直径进行统计(统计的样本数均大于50),得到纤维平均直径为50.5 nm,直径范围在26.0~86.0 nm之间,FB中纤维的直径的高斯分布结果如图4a所示。经过300~700℃焙烧后产物的扫描电镜图片分别如图3c~3l所示,300℃焙烧后产物(FB-300)形貌未被破坏,仍保持清晰的一维纤维状结构且纤维表面较为光滑(图3c、3d),经统计,纤维平均直径为48.8 nm,直径范围在30.0~85.0 nm之间(图4b)。当焙烧温度为400℃时,FB-400形貌发生显著变化,仍存在一维纤维结构,统计得到平均直径为55.2 nm,直径范围在32.3~101.9 nm之间(图4c),但出现了少量片状结构,但仍以纤维状结构为主(图3e、3f),结合XRD结果,可推测其为纤维水镁石脱水过程中,崩裂所产生的方镁石,统计得到片状结构的平均粒径为162.0 nm,粒径范围为70.2~344.1 nm。温度进一步升高到500℃时,FB-500中出现了大量的二维片状结构,一维纤维状和二维片状结构同时存在,但纤维长径比显著减小,这两种形貌均为方镁石,其中除了升温过程中水镁石崩裂产生的部分片状方镁石外,大部分水镁石在脱水后仍保留了高的长径比,但在高温下原子扩散加剧,同时体系有自发降低表面能的需求,因此纤维长度变短变粗成为柱状,且在局部区域发生了合并(图3g、3h),据统计,纤维平均直径为70.7 nm,直径范围为49.5~110.4 nm(图4d),

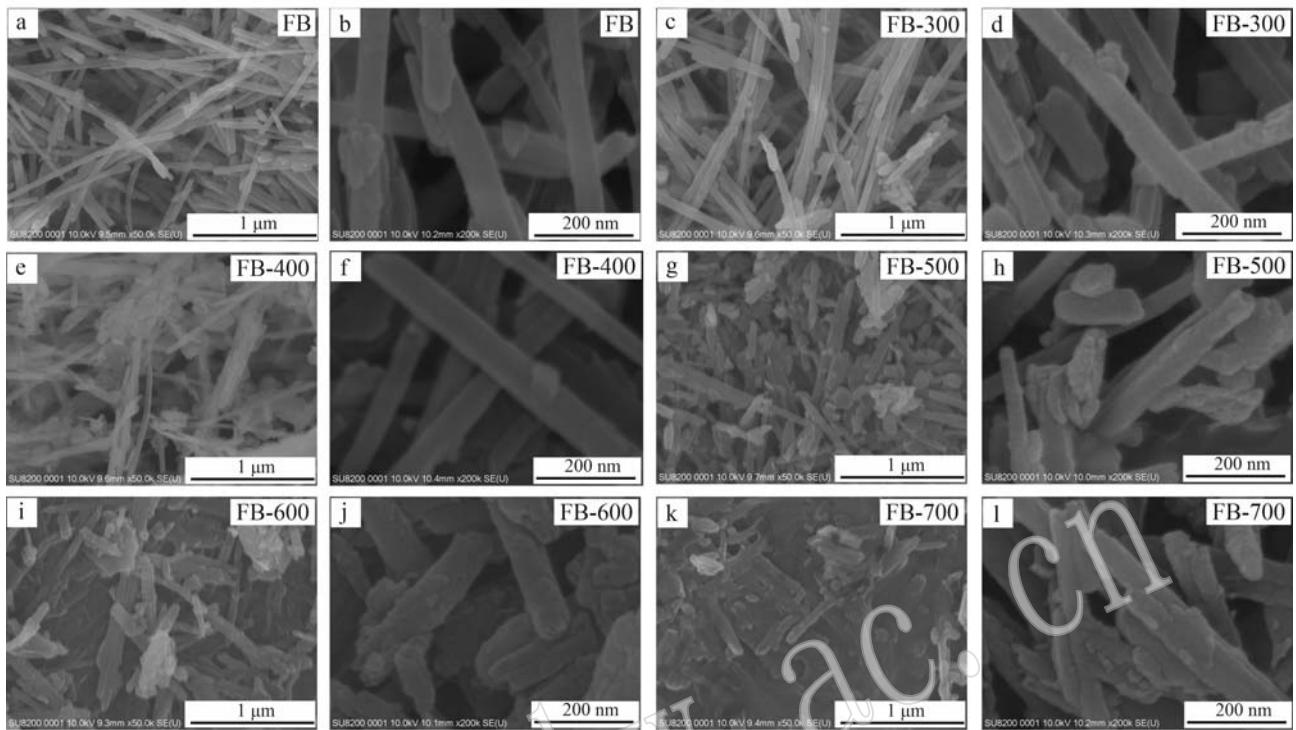


图3 不同温度焙烧前后纤维水镁石的SEM照片

Fig. 3 SEM images of fibrous brucite before and after roasting at different temperatures

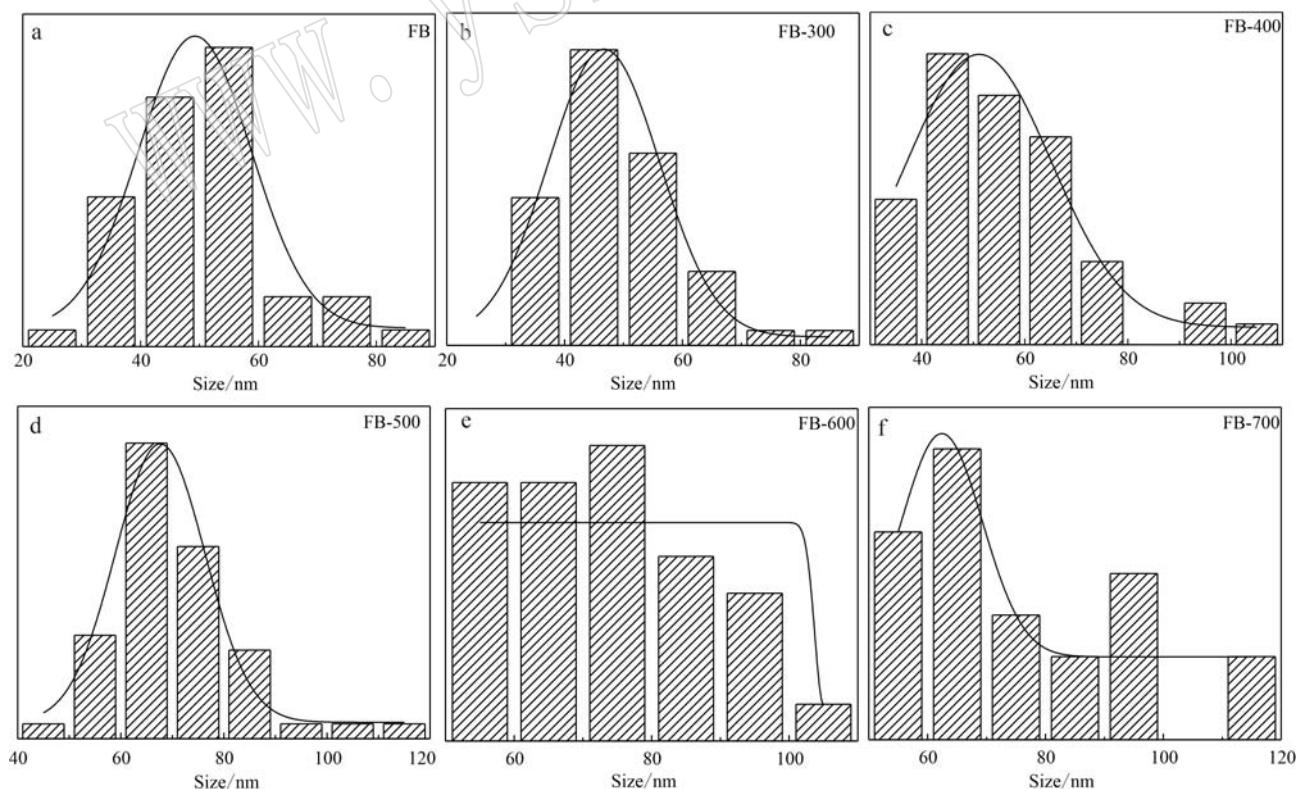
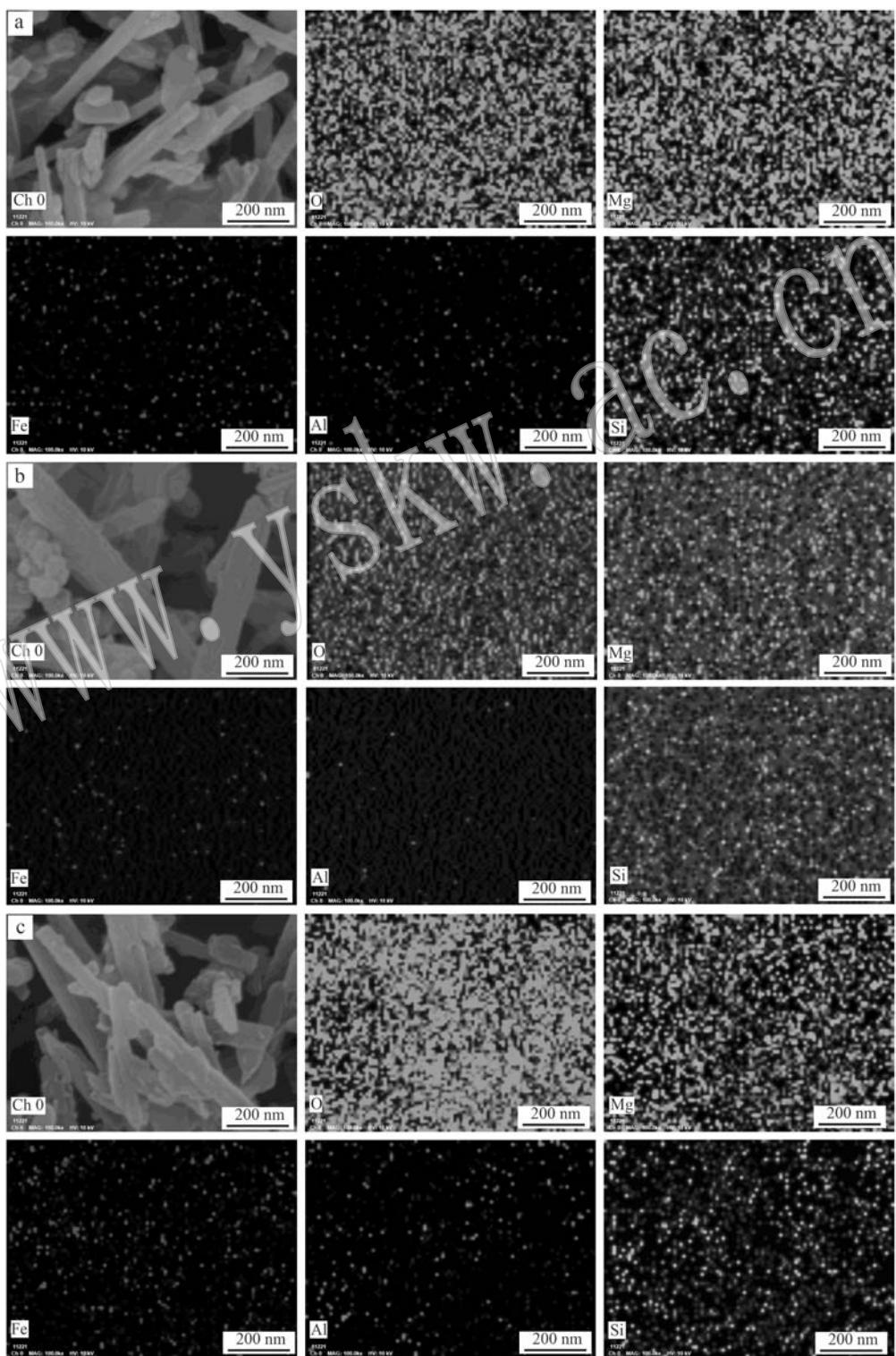


图4 不同温度焙烧前后纤维水镁石样品中一维纤维直径统计高斯分布图

Fig. 4 Gaussian distribution of one-dimensional fiber diameter statistics in fibrous brucite samples before and after roasting at different temperatures

片状平均粒径为 123.9 nm, 粒径范围在 58.9~177.7 nm 之间。焙烧温度为 600℃ 时, FB-600 中一维柱与柱之间粘连更加明显, 纤维长径比也较小, 此外纤维表面较为粗糙(图 3i、3j), 统计得到柱状平均直径为 74.2 nm, 直径范围在 2.7~105.6 nm 之间(图 4e); 温度继续升高到 700℃ 时, FB-700 中出现严重的粘

连, 仅在局部才能观察到孤立一维柱状结构, 且纤维表面十分粗糙, 分布有团块状结构(图 3k、3l), 柱的平均直径为 74.4 nm, 直径范围在 52.0~118.3 nm 之间(图 4f)。焙烧前后纤维水镁石中各元素分布都较为均匀(图 5a~5f), 根据元素分布情况, 可以看出, Fe 和 Al 元素含量较低, 其次是 Si 和 Mg, O 元素



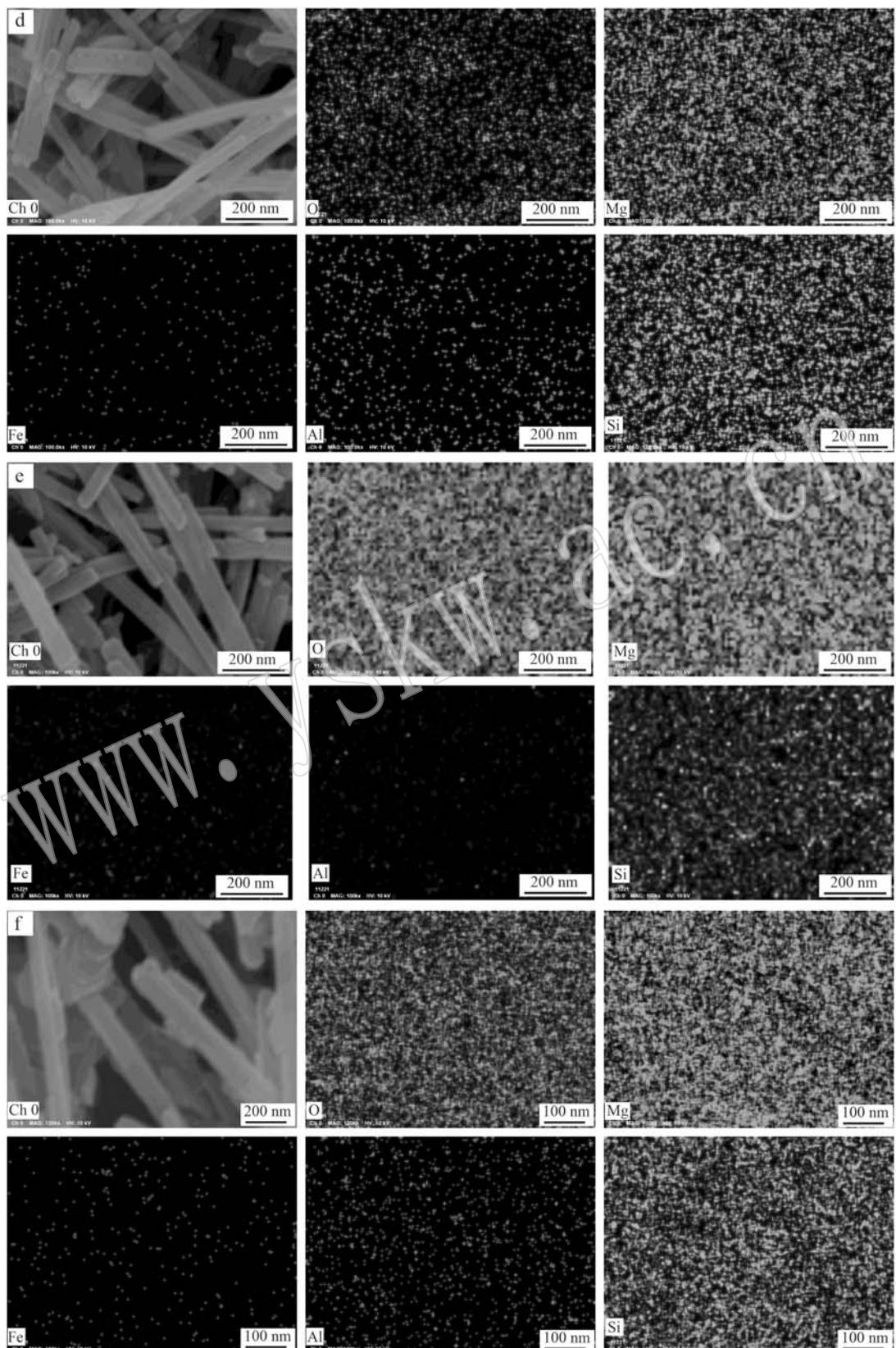


图 5 不同温度焙烧前后纤维水镁石的元素分布照片

Fig. 5 Elemental mapping images of fibrous brucite before and after roasting
a—FB; b—FB-300; c—FB-400; d—FB-500; e—FB-600; f—FB-700

含量最高。

2.4 孔结构分析

利用氮气吸附法测试焙烧前后纤维水镁石的比表面积和孔径分布的变化。图6a为FB、FB-300、FB-400、FB-500、FB-600和FB-700的氮气吸附-脱附等温线,对应的DFT孔径分布图为图6b。6个样品的氮气吸脱附等温线均属于IV型吸附等温线,说明焙烧前后纤维水镁石样品中含有较多的中孔和大孔。在相对压力较小时,吸附量较小且吸附等温线上升缓慢,表明有少量微孔存在。焙烧前后纤维水镁石的比表面积、孔容等孔结构信息如表2所示。可以看出FB-300和FB的比表面积相差很小,说明300℃的低温煅烧不显著改变样品的比表面积,这主要是因为低温焙烧仅仅脱除样品中的吸附水而不改变样品物相。FB-400比表面积最大达到 $73.5\text{ m}^2/\text{g}$,主要是由于水镁石发生了分解反应,生成方镁石和水,水以水蒸气的形式溢出,其溢出时会产生丰富的孔

道结构,从而造成比表面积的显著增加。此外,当焙烧温度为400℃时纤维水镁石会分解生成比表面积较大的片状氧化镁小颗粒,也会导致比表面积的增大;但随着温度进一步升高,虽然片状颗粒增多,但颗粒间粘连程度增加,这将造成总比表面积逐渐减小。此外,当焙烧温度达到700℃时,利蛇纹石中结构水的脱去,可能会造成利蛇纹石内部孔道结构的坍塌,从而使得比表面积显著降低。

3 结论

(1) 黑木林纤维水镁石主要矿物组成为水镁石、利蛇纹石以及赤铁矿,主要有用矿物为纤维状水镁石,其次为利蛇纹石,赤铁矿为杂质。主要化学成分为 Mg(OH)_2 、 $(\text{Mg}, \text{Al})_3[(\text{Si}, \text{Fe})_2\text{O}_5](\text{OH})_4$ 和 Fe_2O_3 。可以采用磁选和浮选相结合的方式对原矿进行提纯处理,以得到纤维水镁石纯矿。

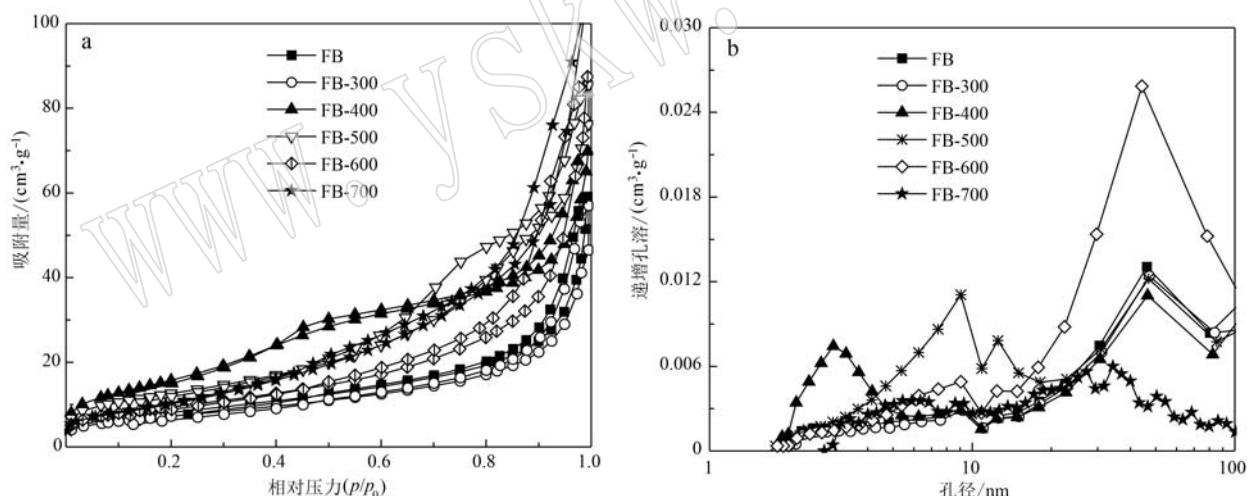


图6 焙烧前后纤维水镁石的氮气吸附-脱附等温线(a)和对应DFT孔径分布图(b)

Fig. 6 N_2 adsorption-desorption isotherms (a) and the DFT pore size distributions (b) of the fibrous brucite before and after roasting

表2 焙烧前后纤维水镁石比表面积和孔结构信息
Table 2 Specific surface areas and pore texture of the fibrous brucite before and after roasting

样品名称	平均半径/nm	比表面积/ $(\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1})$	孔容/ $(\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1})$
FB	8.2	32.8	0.093
FB-300	8.4	28.2	0.073
FB-400	5.8	73.5	0.112
FB-500	8.9	55.1	0.119
FB-600	11.4	39.8	0.136
FB-700	10.9	25.7	0.162

(2) 纤维水镁石为一维纤维状结构,300℃焙烧后,仍能很好地保持其纤维状结构,且物相不会发生变化;当焙烧温度为400~600℃时,形貌和物相均发生较大变化,在物相方面,结合TGA曲线推断,水镁石分解脱出水,水镁石相消失,产生新的方镁石物相,在形貌方面,除了一维纤维状结构外,还出现了大量的二维片状结构,呈现一维纤维状和二维片状共存的结构特征;当温度继续升高到700℃时,方镁

石相仍然存在,但利蛇纹石相消失,出现新的镁橄榄石相,除了物相上的变化之外,形貌上一维纤维状几乎消失,发生严重粘连。焙烧温度为400或500℃时,均出现了一维纤维状和二维片状两种形貌共存的结构特征,可以为高性能一维/二维二元复合多孔碳的合成提供模板,为高性能二元复合多孔碳短流程低成本制备提供新思路。

(3) 结合不同温度焙烧后样品的TGA和XRD结果,纤维水镁石在400℃左右会发生分解反应,生成氧化镁和水蒸气,一方面可以大大提高纤维水镁石的比表面积,且生成的氧化镁是目前常用的二氧化碳捕集固体吸附剂,为其在CO₂捕集中的应用提供依据,另一方面为其在阻燃剂中应用时的机理解释提供借鉴。

(4) 结合不同温度焙烧后的形貌和物相变化,可以为纤维水镁石基高安全性锂离子电池隔膜的制备提供理论基础,纤维水镁石其纤维状形貌表现出较高的抗拉强度和韧性,从而提供优异的力学性能,有效抑制锂枝晶的刺穿及电池组装过程中的挤压变形,且其热稳定性远高于聚烯烃类隔膜(熔点130~170℃),可避免安全事故的发生。

致谢 中国矿业大学材料与物理学院李晨硕士在纤维直径统计高斯分布分析中给予了大量帮助,审稿专家对本文提出了建设性修改意见,在此一并表示谢意。

References

- Chai Qian and Zhang Yaojun. 2018. Preparation and toughening mechanism of bottom ash-based geopolymer reinforced by brucite fiber[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 37(11): 3 392~3 397 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yang. 2016. Comparative study of four kinds of fiber reinforced asphalt's microstructure and mechanical properties[J]. Highway Engineering, 41(5): 273~276 (in Chinese with English abstract).
- Chen Yuhong, Deng Chenji, Sun Ping, et al. 2020. Application of brucite fiber cement stabilized recycled coarse aggregate in the Hefei-Anqing expressway[J]. Highway, 65(8): 47~52 (in Chinese with English abstract).
- Cui Yifa. 2011. Geological characteristics and analysis of applicable prospect of nemalite deposit in heimulin of southern Shaanxi province [J]. Geology of Chemical Minerals, 33(3): 155~160, 88 (in Chinese with English abstract).
- Dong Faqin, Zhang Baoshu, Wang Weiqing, et al. 2009. Study on composite performances of natural fibrous brucite flame retardant [J]. Non-Metallic Mines, 32(6): 33~36 (in Chinese with English abstract).
- Hu Zhibo, Hu Chunhua and Chen Jinlong. 2021. Experimental research on basalt/brucite fiber modified asphalt mixture[J]. Journal of Hubei University of Technology, 36(1): 110~113 (in Chinese with English abstract).
- Huang Liuwen, Cui Yan, Zha Yuxin, et al. 2019. Toxic effects of chrysotile asbestos and ceramic fibers on inflammation and oxidative stress in rats[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 38(6): 834~842 (in Chinese with English abstract).
- Jiang Leiming and Hu Jun'an. 2019. Study on road performance of brucite fiber asphalt mixture[J]. Guangdong Chemical Industry, 46(22): 9~10, 13 (in Chinese with English abstract).
- Li Jianjun, Liu Xiaowei, Cheng Youfa, et al. 2010. Brucite, a new type imitation of larderite (Shoushan Stone) [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 29(Z1): 100~108 (in Chinese with English abstract).
- Li M, Mu Q W, Yan P, et al. 2020. Brucite fibers on performance improvement and mechanism of high-temperature slag cementing slurries [J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 34(1): 1~12.
- Li Ming, Yang Yujia, Jin Jianzhou, et al. 2015. Reinforced mechanical properties and mechanism of well-cementing stones by brucite fiber [J]. Natural Gas Industry, 35(6): 82~86 (in Chinese with English abstract).
- Liu F F, Chuan X Y, Li B, et al. 2022. One-step carbonization synthesis of in-situ nitrogen-doped carbon tubes using fibrous brucite as the template for supercapacitors[J]. Materials Chemistry and Physics, 281: 125811.
- Liu Fangfang, Chuan Xiuyun, Yang Yang, et al. 2021. Influence of N/S co-doping on electrochemical property of brucite template carbon nanotubes[J]. Journal of Inorganic Materials, 36(7): 711~720 (in Chinese with English abstract).
- Liu F F, Chuan X Y and Zhao Y P. 2023. Hierarchical hollow tubular fibrous brucite-templated carbons obtained by KOH activation for supercapacitors[J]. RSC Advances, 13(10): 6 606~6 618.
- Liu Shupeng, Wei Fang and Zhang Xiaowei. 2014. The environmental effect of non-metallic mineral fiber for papermaking[J]. China Non-metallic Mining Industry Journal, 2: 5~7 (in Chinese with English abstract).
- Peng H, Zhao W and Wang Y L. 2021. Aluminum phosphate modified brucite and its flame retardant and smoke suppression performance on ethylene-vinyl acetate resin[J]. Polymers for Advanced Technolo-

- gies, 32(1): 142~152.
- Piao Haitao, Yin Lin, Yang Yuzhen, et al. 2013. Experiment studies of glushinskite sediments from ozonation of phenolic wastewater in the presence of brucite [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 32(6): 952~956 (in Chinese with English abstract).
- Qin Xiantao, Zhu Siyue, Cheng Yingwei, et al. 2017. Reinforcing effect and microscopic mechanism of fiber-reinforced cement emulsified asphalt mixture [J]. *Highway*, 62(12): 234~240 (in Chinese with English abstract).
- Sheng Yanping, Li Liangliang, Guan Bowen, et al. 2018. Study on the performance of gravel road stabilized by early strength agent and brucite fibers in alpine regions [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 40(2): 355~361 (in Chinese with English abstract).
- Wen Jiuran, Liu Kaiping, Zhang Danni, et al. 2014. Development of hydromagnesite fiber insulation mortar [J]. *China Concrete and Cement Products*, 8: 66~70 (in Chinese with English abstract).
- Xing Huang. 2018. Effect of brucite fiber on road performance of cement concrete [J]. *Transportation Science & Technology*, 4: 163~167 (in Chinese with English abstract).
- Xiong Rui, Yang Xiaokai, Yang Fa, et al. 2016. Laboratory investigation of performance of coal gangue powder/brucite fiber modified asphalt mortar [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 38(2): 11~16 (in Chinese with English abstract).
- Yang Y Y, Zhou Q, Li X K, et al. 2019. Uniaxial compression mechanical property and fracture behavior of hybrid inorganic short mineral fibers reinforced cement-based material [J]. *Cement & Concrete Composites*, 104(104): 103338.
- Zhang Ding. 2021. Study on the performance of brucite fiber asphalt mortar [J]. *Qinghai Transportation Technology*, 33(4): 78~83, 88 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Leilei, Wu Chunli, Wang Aijun, et al. 2015. The impact of additives on the performance of recycled building waste foam concrete [J]. *Building Blocks and Block Construction*, 4: 41~43 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Weina, Zhu Zhixin, Wu Zhen, et al. 2016. Study on the optimum preparation conditions of silica aerogels reinforced with fiber [J]. *Journal of Jilin Normal University (Natural Science Edition)*, 37(1): 90~93 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Xiufeng and Liu Kaiping. 2007. Development of brucite fiber fire-proof corrugated paper for roofing Tiles [J]. *Hubei Papermaking*, 3: 11~13 (in Chinese with English abstract).
- Zhu S Y, Xu Z R, Qin X T, et al. 2021. Fiber-reinforcing effect in the mechanical and road performance of cement-emulsified asphalt mixtures [J]. *Materials*, 14(11): 2 779.
- Zhu Ye and Xia Xinxing. 2010. Application of fibrous non-metallic minerals in the papermaking industry [J]. *China Non-metallic Mineral Industry Guide*, 4: 5~7 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Zhenlu. 2018. Research on brucite fiber concrete pavement material and structural design [J]. *Smart Cities*, 4(19): 36~37 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 柴倩, 张耀君. 2018. 水镁石纤维增韧炉底渣基地质聚合物的制备和增韧机理 [J]. 硅酸盐通报, 37(11): 3 392~3 397.
- 陈杨. 2016. 四种纤维增强沥青的微观及力学特性比较研究 [J]. 公路工程, 41(5): 273~276.
- 陈玉宏, 邓陈记, 孙平, 等. 2020. 水镁石纤维水泥稳定再生粗集料在合安高速中的应用研究 [J]. 公路, 65(8): 47~52.
- 崔义发. 2011. 陕南黑木林纤维水镁石矿地质特征及应用前景浅析 [J]. 化工矿产地质, 33(3): 155~160, 88.
- 董发勤, 张宝述, 王维清, 等. 2009. 天然纤维水镁石阻燃剂的复合性能研究 [J]. 非金属矿, 32(6): 33~36.
- 胡志博, 胡春华, 陈金龙. 2021. 玄武岩/水镁石纤维改性沥青混合料试验研究 [J]. 湖北工业大学学报, 36(1): 110~113.
- 黄柳雯, 崔琰, 查雨欣, 等. 2019. 温石棉和陶瓷纤维致大鼠炎症及氧化应激的毒性效应 [J]. 岩石矿物学杂志, 38(6): 834~842.
- 蒋雷鸣, 胡军安. 2019. 水镁石纤维沥青混合料路用性能研究 [J]. 广东化工, 46(22): 9~10, 13.
- 李建军, 刘晓伟, 程佑法, 等. 2010. 水镁石-寿山石的一种新型仿制品 [J]. 岩石矿物学杂志, 29(Z1): 100~108.
- 李明, 杨雨佳, 靳建洲, 等. 2015. 水镁石纤维对固井水泥石力学性能的增强效果及机理 [J]. 天然气工业, 35(6): 82~86.
- 刘芳芳, 传秀云, 杨扬, 等. 2021. 氮/硫共掺杂对纤水镁石模板碳纳米管电化学性能的影响 [J]. 无机材料学报, 36(7): 711~720.
- 刘淑鹏, 魏芳, 张小伟. 2014. 非金属矿物纤维在造纸工业应用中的环境效应 [J]. 中国非金属矿工业导刊, 2: 5~7.
- 朴海涛, 尹琳, 杨玉珍, 等. 2013. 臭氧化含苯酚污水投加水镁石沉淀出草酸镁的实验研究 [J]. 岩石矿物学杂志, 32(6): 952~956.
- 秦先涛, 祝斯月, 程英伟, 等. 2017. 纤维水泥乳化沥青混凝土的增强效应及微观机理 [J]. 公路, 62(12): 234~240.
- 盛燕萍, 李亮亮, 关博文, 等. 2018. 高寒地区水镁石纤维早强型水泥稳定碎石的路用性能研究 [J]. 冰川冻土, 40(2): 355~361.
- 温久然, 刘开平, 张丹妮, 等. 2014. 水镁石纤维保温砂浆研制 [J]. 混凝土与水泥制品, 8: 66~70.
- 邢煌. 2018. 水镁石纤维对水泥混凝土路用性能影响 [J]. 交通科

- 技,4: 163~167.
- 熊锐,杨晓凯,杨发,等. 2016. 煤矸石粉/水镁石纤维复合改性沥青胶浆性能试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 38(2): 11~16.
- 张顶. 2021. 水镁石纤维沥青胶浆性能研究[J]. 青海交通科技, 33(4): 78~83,88.
- 张磊蕾,吴春丽,王爱军,等. 2015. 外加剂对建筑废弃物再生原料发泡混凝土性能的影响[J]. 建筑砌块与砌块建筑, 4: 41~43.
- 张伟娜,朱志新,吴贞,等. 2016. 纤维增强型二氧化硅气凝胶的制备条件优化研究[J]. 吉林师范大学学报(自然科学版), 37(1): 90~93.
- 赵秀峰,刘开平. 2007. 纤维水镁石阻燃瓦楞原纸的研制[J]. 湖北造纸, 3: 11~13.
- 祝叶,夏新兴. 2010. 纤维状非金属矿物在造纸工业的应用[J]. 中国非金属矿工业导刊, 4: 5~7.
- 朱振禄. 2018. 水镁石纤维混凝土路面材料及结构设计研究[J]. 智能城市, 4(19): 36~37.

《岩石矿物学杂志》再次入选地质学类中文核心期刊

《岩石矿物学杂志》再次入选《中文核心期刊要目总览》(2023年版)地质学类核心期刊。《中文核心期刊要目总览》第一版于1992年由北京大学出版社出版,以后每3~4年更新研究和编制出版一次,在图书情报部门馆藏优化和读者导读方面发挥了重要作用。《中文核心期刊要目总览》(2023年版)从2021年10月开始由北京大学图书馆主持研究,共32个单位的148位专家和工作人员参加了研究工作,全国各地9473位学科专家参加了核心期刊表的评审工作。经过定量筛选和专家定性评审,从我国正在出版的中文期刊中评选出1987种核心期刊。《岩石矿物学杂志》已连续10次入选地质学类中文核心期刊,感谢所有关心与支持《岩石矿物学杂志》的读者、作者、审稿专家、主编、编委!感谢主管、主办单位的大力扶持!我们将继续努力,争取更大的进步。

