

大理石尾矿碳化法制备文石晶须及其形貌分析*

罗东山^{1,2}, 彭同江^{1,2,3,4*}, 孙红娟^{1,2,4}, 丁文金^{1,2}, 耿乾^{1,2}

(1. 西南科技大学 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010; 2. 西南科技大学 矿物材料及应用研究所, 四川 绵阳 621010; 3. 西南科技大学 分析测试中心, 四川 绵阳 621010; 4. 西南科技大学 四川省非金属矿粉体改性 with 高质化利用技术工程实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要:以四川石棉县某大理石矿山的尾矿经预处理和煅烧所得生石灰为原料, 氯化镁为晶型控制剂, 采用碳化法制备文石晶须。通过 X 射线衍射、光学显微镜等分析手段对样品物相组成、微观形貌进行分析。考察了温度、MgCl₂ 浓度及生石灰用量对样品中文石晶体含量和晶须形貌的影响。结果表明: 在温度 80 ℃、MgCl₂ 浓度 0.2 mol/L、生石灰用量为 6 g/L 时, 可制备得到长度为 40 ~ 50 μm、直径为 2 ~ 3 μm、长径比为 13 ~ 18 的文石晶须。

关键词:大理石尾矿; 生石灰; 文石晶须; 碳化法; 晶型控制剂

中图分类号:X751 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0076(2019)04-0060-06

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.04.010

Preparation of Aragonite Whiskers by Carbonization from Marble Tailings and its Morphology Analysis

LUO Dongshan^{1,2}, PENG Tongjiang^{1,2,3,4*}, SUN Hongjuan^{1,2,4}, DING Wenjin^{1,2}, GENG Qian^{1,2}

(1. Key Laboratory for Solid Waste Treatment and Resource Recycle of Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 2. Institute of Mineral Materials & Application, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 3. Center of Forecasting and Analysis, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China; 4. Sichuan Engineering Lab of Nonmetallic Mineral Powder Modification & High-quality Utilization, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: Aragonite whiskers were prepared by carbonization method, lime as raw materials, which was pretreated and calcined from marble talings, and magnesium chloride as a crystal control agent. The phase composition and morphology of the samples were analyzed by X-ray diffraction and optical microscopy. The effects of temperature, MgCl₂ concentration, and lime dosage on the aragonite crystal content and the whisker morphology were studied. The results show that aragonite whiskers with a length of 40 ~ 50 μm, a diameter of 2 ~ 3 μm and a length-diameter ratio of 13 ~ 18 can be prepared when the temperature is 80 ℃, the concentration of MgCl₂ is 0.2 mol/L and the dosage of quicklime is 6 g/L.

Key words: marble tailings; lime; aragonite whiskers; carbonization; crystal control agent

* 收稿日期: 2019-04-08

作者简介: 罗东山(1993-), 女, 四川南充人, 硕士研究生, 研究方向为固体废物资源化利用, E-mail: dongshanluo@qq.com。

通信作者: 彭同江(1958-), 男, 山东青岛人, 教授, 博士生导师, 主要从事矿物晶体化学研究, E-mail: tjpeng@swust.edu.cn。

引言

大理石尾矿是白色大理岩开采过程中抛弃的尾渣。大多呈颗粒状碎块,且形状不规则、大小不一,含有少量黏土矿物和氧化铁杂质,不利于直接利用^[1]。大理石尾矿的主要矿物成分仍然是方解石,作为尾渣抛弃不仅是对资源的严重浪费,而且破坏矿山环境和影响矿山安全。因此,对大理石尾矿的资源化利用研究很有必要。

文石和方解石是碳酸钙的同质多像变体。文石晶须具有较大的长径比,结构完整,内部缺陷少,其强度和模量接近完整晶体,具有高强度、高模量特点及优良耐热与隔热性能^[2,3]。可作为增强材料广泛应用于塑料、橡胶、医药、造纸等行业^[4,5]。文石晶须的制备方法包括复分解反应法^[6,7]、尿素水解法^[8]、碳化法等^[9-12]。利用复分解反应制备得到表面较光滑、长径比较大、形貌较为均一的文石晶须,但该方法反应物浓度低,反应速度慢,产率低。尿素水解法制备碳酸钙晶须,能耗较大,且采用密闭压力反应体系,危险性较高。李纠等^[13]采用碳化法,以氯化镁作为晶型控制剂,氢氧化钙为原料,制备出高纯度文石晶须,但长度较短(12~35 μm)。马俊等^[14]研究了含氯化镁晶型控制剂滤液的回收利用,发现

随着滤液复用次数的增加,样品中文石型碳酸钙的含量逐渐降低,且当文石型碳酸钙含量低于80%时,晶须的长径比大幅下降。相对其它方法,以生石灰为原料碳化法制备文石晶须是最经济且最有可能实现工业应用的方法^[11,15]。至今,国内尚未见文石晶须工业化生产的报道。因此,对大理石尾矿经处理后制备文石晶须的工艺条件进行研究,可推进大理石尾矿的资源化利用和高值化利用。

针对大理石尾矿的矿物组成属性,经过预提纯和煅烧处理获得生石灰,以生石灰为原料,氯化镁为晶型控制剂,采用碳化法制备文石晶须。探索不同工艺技术条件对文石晶须含量和形貌的影响,为大理石尾矿资源化利用和碳化法制备高附加值的文石晶须提供试验依据。

1 试验部分

1.1 原料

大理石尾矿样品取自四川石棉县某大理石矿山尾矿堆积场,经自来水冲洗除泥和杂质,自然风干。选择表现白色、颗粒直径为10~20 mm的样品,编号为SM-M;在1 000 °C下煅烧40 min,获得生石灰样品,编号为SM-L,化学成分见表1。由表1可知,尾矿的煅烧较完全,获得的样品中CaO含量高。

表1 尾矿原样及煅烧产物生石灰的化学成分分析
Table 1 Chemical composition analysis of tailings and calcined products

编号	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	BaO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	SrO	LOI
SM-M	55.96	0.53	0.09	0.33	0.07	0.02	0.02	0.01	0.006	0.006	42.95
SM-L	94.19	0.70	0.23	0.47	0.13	-	0.04	-	0.01	0.01	4.20

注:LOI为烧失量。

试剂:六水氯化镁(MgCl₂·6H₂O),分析纯(成都市科隆化学品有限公司生产);工业气体CO₂(体积分数含量99.90%,四川美丰梅塞尔气体产品有限公司)。

装置:KSY-25-16-8X2-20-13可控硅温度控制器箱式电阻炉,HJ-6A数显恒温磁力搅拌器,SHZ-D(Ⅲ)循环水式真空泵,202-1型电热恒温干燥箱。

1.2 样品制备

结合文献^[16-18]和前期试验研究,确定碳化法制备文石晶须的主要影响因素为:温度、晶型控制剂(即MgCl₂)浓度、生石灰用量,设计试验方案如表2。

试验步骤:称取一定量煅烧后的生石灰样品SM

表2 试验方案设计

Table 2 Experimental Program

样品编号	温度/°C	MgCl ₂ 浓度 /(mol·L ⁻¹)	生石灰用量 /(g·L ⁻¹)
Ar-T-x	50,60,70, 80,90	0.1	6
Ar-Mg-y	80	0.1,0.2,0.3, 0.4,0.5	6
Ar-CaO-z	80	0.2	2,4,6, 8,16

-L,按固液比1:5加入到温度为40 °C水中,搅拌消化获得石灰乳液;与一定浓度的氯化镁溶液混合,混合溶液至500 mL;将混合液搅拌加热至一定温度;以一定速度通入CO₂气体;待溶液pH值降为6.5,即停止反应;将溶液过滤,滤饼水洗3次后置于65 °C烘箱内干燥12 h,即得样品。样品分别编号为

Ar-T-x、Ar-Mg-y、Ar-CaO-z(x、y、z 分别为对应的溶液温度、MgCl₂ 浓度和生石灰用量)。

1.3 样品测试

采用日本理学 Ultima IV 型 X 射线衍射仪对样品进行物相分析,测试条件:Cu 靶,管电压 40 kV,管电流 40 mA,功率 2.2 kW,扫描范围:3°~80°,连续扫描;采用帕纳科 Axios 型 X 射线荧光光谱仪(波长色散型)分析样品的化学成分,测试条件:陶瓷 X 射线光管(Rh 靶),最大功率 2.4 kW;采用带数码显微镜图像分析处理软件的奥特光学 BK-POLR 透反射偏光显微镜,对样品进行显微形貌测试。

按照国标 GB/T 5484-2012 测定样品的烧失量,对大理石尾矿中的化学成分含量进行归一化处理。

晶须长径比的计算方法参考摩擦材料晶须 GB/T 35471-2017 中对晶须针状体平均长度、平均直径和长径比的计算方法,即样品分散后,取 1 滴于玻璃片上,在光学显微镜下放大 200~1 000 倍观察,每次检测随机选取样品中的 20 根晶须针状体,读取长度和粗部直径的数据,取算术平均值为测定结果。

2 结果与讨论

图 1 为经提纯后的大理尾矿样品(SM-M)和煅烧产物生石灰样品(SM-L)的 XRD 图谱。可见,提纯后大理石尾矿样品仅出现方解石(Calcite)的衍射峰,主要有: $d_{104} = 3.031 \text{ \AA}$ 、 $d_{113} = 2.282 \text{ \AA}$ 、 $d_{202} = 2.092 \text{ \AA}$ 等,未发现其它杂质矿物的衍射峰。提纯大

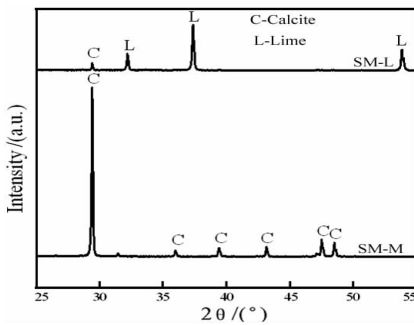


图 1 尾矿样品和煅烧产物的 XRD 谱
Figure 1 XRD pattern of tailings and calcined products

理石尾矿样品的煅烧产物主要物相为方钙石(即生石灰,Lime),其特征衍射峰有: $d_{200} = 2.405 \text{ \AA}$ 、 $d_{220} = 1.700 \text{ \AA}$ 、 $d_{111} = 2.778 \text{ \AA}$,和未分解完全的少量方解石,特征衍射峰为 $d_{104} = 3.034 \text{ \AA}$,未发现其它杂质矿物的衍射峰。

2.1 温度的影响

图 2 为不同温度获得样品 Ar-T-x(x 为温度,分别为 50、60、70、80、90 °C)的 XRD 图谱。当温度为 50 °C 时,样品中主要物相为方解石(Calcite),其特征衍射峰强度大,主要有: $d_{104} = 3.022 \text{ \AA}$ 、 $d_{113} = 2.276 \text{ \AA}$ 、 $d_{202} = 2.087 \text{ \AA}$;当温度为 60 °C 时,样品中主要物相仍然为方解石,其特征衍射峰强度较大,并出现文石(Aragonite)的特征衍射峰,主要有: $d_{111} = 3.396 \text{ \AA}$ 、 $d_{012} = 2.700 \text{ \AA}$ 、 $d_{021} = 3.274 \text{ \AA}$ 和 $d_{221} = 1.9776 \text{ \AA}$;当温度为 70 °C 时,方解石特征衍射峰强度减小,文石特征衍射峰强度增大;当温度为 80 °C 时,方解石特征衍射峰强度较大,文石特征衍射峰强度较小;当温度为 90 °C 时,文石特征衍射峰强度增大,并出现镁方解石(Calcite, magnesian)特征衍射峰,主要有: $d_{104} = 3.012 \text{ \AA}$ 、 $d_{018} = 1.882 \text{ \AA}$ 、 $d_{113} = 2.268 \text{ \AA}$ 。可见,在其它条件相同时,升高温度,有利于样品中文石晶体的生成。

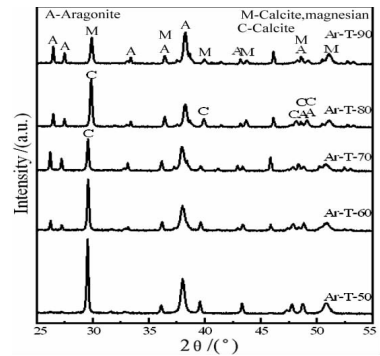
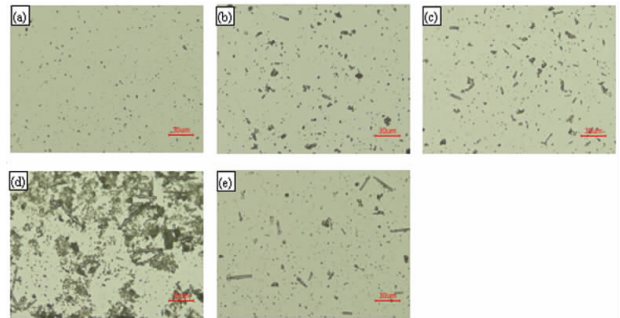


图 2 不同温度制得样品的 XRD 谱
Figure 2 XRD pattern of samples prepared with different temperature



(a) Ar-T-50; (b) Ar-T-60; (c) Ar-T-70;
(d) Ar-T-80; (e) Ar-T-90

图 3 不同温度所得样品微观形貌图
Figure 3 Microscopic topography of the sample obtained with different temperature

图 3 为不同温度获得样品的微观形貌图。可以

看出,呈细长的针状晶体为文石晶须,较小的颗粒状晶体为方解石。当温度为 50 °C 时,样品中主要为方解石颗粒,未见文石晶体;当温度为 60 °C 时,样品中仍主要为方解石颗粒,含有极少量文石晶体;当温度为 70 °C 时,样品中依然主要生成方解石颗粒,可见少量文石晶体;当温度为 80 °C 时,生成的文石晶体较多,晶须较为细长;当温度为 90 °C 时,样品中主要生成方解石颗粒,含有少量文石晶体;可见,随着温度的升高,样品中开始生成文石晶体,在温度为 80 °C 时,所得样品文石晶须较为细长。

综上所述,当温度为 90 °C 时,制备的样品文石晶体衍射峰形尖锐,结晶程度较好,但显微镜下观察晶须长度较短,长径比较小。在温度为 80 °C 时,文石晶体相对含量较高,且所得晶须细长,分布较为均匀。故在考察其它试验条件对文石晶须生长的影响时,选用 80 °C 作为后续试验温度。

2.2 MgCl₂ 浓度的影响

图 4 为不同 MgCl₂ 浓度获得样品 Ar-Mg-y (y 为 MgCl₂ 浓度,分别为 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mol/L) 的 XRD 图谱。当 MgCl₂ 浓度为 0.1 mol/L 时,样

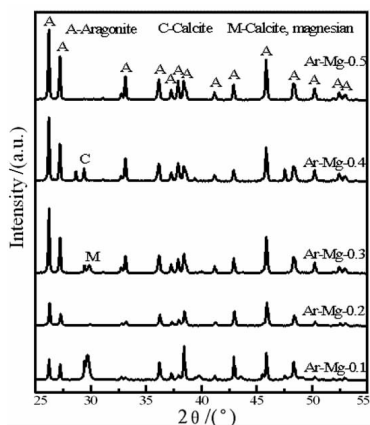


图 4 不同 MgCl₂ 浓度制得样品的 XRD 谱
Figure 4 XRD pattern of samples prepared with different MgCl₂ concentrations

品中主要物相为文石,但其特征衍射峰强度较小,主要有: $d_{111} = 3.396 \text{ \AA}$ 、 $d_{012} = 2.702 \text{ \AA}$ 、 $d_{021} = 3.273 \text{ \AA}$ 和 $d_{221} = 1.977 \text{ \AA}$;同时出现方解石: $d_{104} = 3.035 \text{ \AA}$ 和 $d_{113} = 2.284 \text{ \AA}$, 镁方解石: $d_{104} = 3.011 \text{ \AA}$ 、 $d_{018} = 1.882 \text{ \AA}$ 和 $d_{113} = 2.265 \text{ \AA}$ 等杂质物相的特征衍射峰;随着 MgCl₂ 浓度(0.2~0.4 mol/L)的增加,杂质物相方解石和镁方解石特征峰强度减小,含量降低^[19],而文石特征峰强度增大,峰形尖锐,含量增

加;当 MgCl₂ 浓度继续增大为 0.5 mol/L 时,样品中只有单一物相文石的衍射峰,其它杂质物相消失。可见,在其它条件相同时,随着 MgCl₂ 浓度的升高,产物样品中文石含量升高,杂质物相含量降低,当 MgCl₂ 浓度达到 0.5 mol/L 时,形成的产物为纯的文石,这与赵丽娜等^[20]的研究结果一致。

利用公式: $y = 1 - \frac{1}{1 + 3.9I_a/I_c} \times 100\%$ (其中, I_a, I_c 分别为文石、方解石最强特征峰的积分强度) 计算样品中文石和方解石的相对含量^[14, 20-23], 结果如图 5 所示。当 MgCl₂ 浓度为 0.1 mol/L 时,样品中文石含量为 81.2%;当 MgCl₂ 浓度分别为 0.2、0.3、0.4 mol/L 时,样品中文石的含量分别为 98.7%、96.5% 和 95.3%;当 MgCl₂ 浓度为 0.5 mol/L 时,样品中文石含量最高,达 100%。总体说来,随着 MgCl₂ 浓度的增加,样品中文石晶须含量与结晶程度在逐步升高,当 MgCl₂ 浓度大于 0.2 mol/L 时,样品中文石的含量均在 95% 以上。

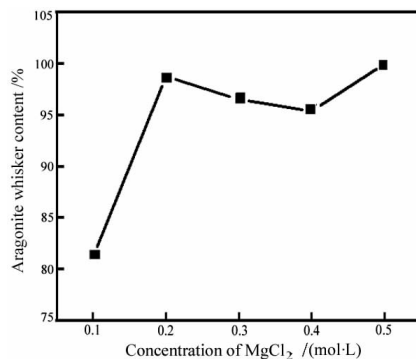
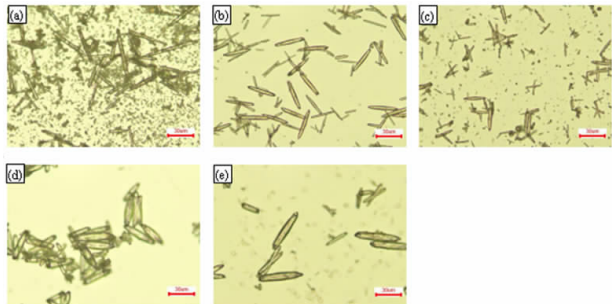


图 5 MgCl₂ 浓度对样品文石晶须含量影响
Figure 5 Effect of different MgCl₂ concentration on the content of aragonite whisker

图 6 为不同 MgCl₂ 浓度下获得样品的微观形貌图。可以看出,呈细长的针状晶体为文石晶须,较小的颗粒状晶体为方解石。当 MgCl₂ 浓度为 0.1 mol/L 时,样品中方解石颗粒较多,文石晶须较少;当 MgCl₂ 浓度为 0.2 mol/L 时,样品中未见方解石颗粒,文石晶须细长,长度为 30~35 μm,直径为 2~3 μm,分布均匀且表面光滑;当 MgCl₂ 浓度为 0.3 mol/L 时,样品中仍含有少量方解石颗粒,文石晶须较为短小,长度为 20~25 μm,直径为 1~2 μm,分布较为均匀,表面较为光滑;当 MgCl₂ 浓度为 0.4 mol/L 时,样品中有少量解石颗粒,文石晶须短粗,长度为 45~50 μm,直径为 6~8 μm,分布均

匀,表面光滑;当 $MgCl_2$ 浓度为 0.5 mol/L 时,样品中有极少量方解石颗粒,文石晶须较为细长,长度为 $50 \sim 55 \mu\text{m}$,直径为 $5 \sim 6 \mu\text{m}$,分布均匀,表面光滑。



(a) Ar - Mg - 0.1; (b) Ar - Mg - 0.2; (c) Ar - Mg - 0.3; (d) Ar - Mg - 0.4; (e) Ar - Mg - 0.5

图 6 不同 $MgCl_2$ 浓度所得样品微观形貌图

Figure 6 Microscopic topography of the sample obtained with different $MgCl_2$ concentrations

综上所述,当 $MgCl_2$ 浓度为 0.2 mol/L 时,所制备的样品不仅文石晶须含量高,而且晶须的长径比大,分布均匀,在考察其它试验条件对文石晶须生长的影响时,选用 0.2 mol/L 作为 $MgCl_2$ 浓度的后续试验条件。

2.3 生石灰用量的影响

图 7 为不同生石灰用量获得样品 Ar - CaO - z (z 为生石灰用量,分别为 $2, 4, 6, 8, 16 \text{ g/L}$) 的 XRD 谱。可见,当生石灰用量为 2 g/L 时,样品仅出现文石的衍射峰;当生石灰用量为 4 g/L 时,文石衍射峰进一步变强;当生石灰用量为 6 g/L 时,样品中的主要物相仍为文石,但出现了方解石的特征衍射峰;当生石灰用量分别为 8 g/L 和 6 g/L 时,样品中文石的衍射峰降低,方解石衍射峰逐渐增强,表明样品中文石晶体含量降低,方解石含量升高。

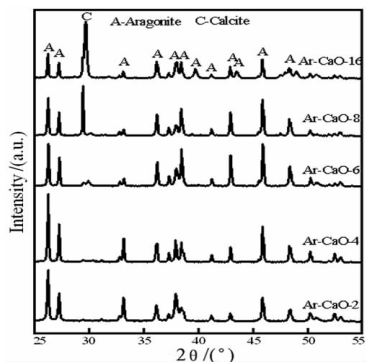


图 7 不同生石灰用量制得样品的 XRD 谱
Figure 7 XRD pattern of samples prepared with different amounts of lime

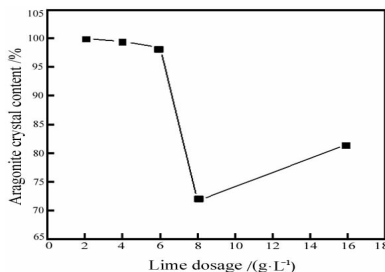
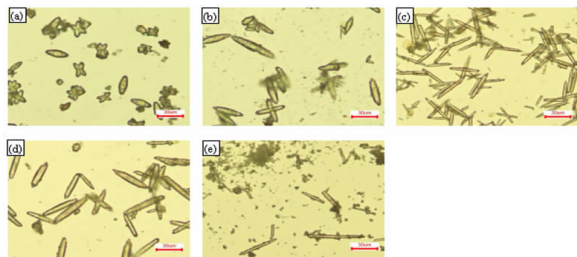


图 8 生石灰用量对文石晶须含量的影响
Figure 8 Effect of different lime dosage on the content of aragonite crystals

图 8 为生石灰用量与所获得的样品中文石含量的关系图。当石灰用量分别为 $2, 4, 6, 8, 16 \text{ g/L}$ 时,样品中文石含量分别为 $100\%、99.5\%、98.4\%、71.6\%$ 和 81.6% 。表明在生石灰用量低于 6 g/L 的情况下,样品中文石晶须含量较高,在 98% 以上;当石灰用量增大到 8 g/L 及以上时,样品中文石晶须含量下降至 82% 以下。

图 9 为不同生石灰用量获得样品的微观形貌图。当生石灰用量为 2 g/L 时,样品中主要是纺锤形和簇形文石晶体,晶体短粗,粗部直径较大,长径比为 $2 \sim 4$,不满足晶须对长径比的要求^[2];当生石灰用量为 4 g/L 时,样品中文石晶体较为短粗,呈梭形,长径比为 $5 \sim 7$,仍不满足晶须对长径比的要求;当生石灰用量为 6 g/L 时,样品中文石晶体呈针状、长柱状,晶须长度为 $40 \sim 50 \mu\text{m}$,直径为 $2 \sim 3 \mu\text{m}$,长径比为 $13 \sim 18$,且晶须分布均匀,表面光滑;当生石灰用量为 8 g/L 时,样品中文石晶须较为粗大,晶须长度为 $50 \sim 55 \mu\text{m}$,直径为 $5 \sim 8 \mu\text{m}$;当生石灰用量为 16 g/L 时,样品中文石晶须较为细长,晶须长度为 $20 \sim 50 \mu\text{m}$,直径为 $2 \sim 3 \mu\text{m}$,晶须长短不一,分布不均匀,且含有较多方解石颗粒。



(a) Ar - CaO - 2; (b) Ar - CaO - 4; (c) Ar - CaO - 6; (d) Ar - CaO - 8; (e) Ar - CaO - 16

图 9 不同生石灰用量所得样品微观形貌图
Figure 9 Microscopic topography of the sample obtained with different lime dosages

综上所述,较低的生石灰用量有利于反应生成

文石相,用量较大时,会降低样品中文石晶体的含量,促进方解石晶体的生成。当生石灰用量为6 g/L时,所获得文石晶须不仅纯度高,长径比大,而且晶须大小均匀,表面光滑。因此,选用6 g/L作为生石灰的最佳使用量。

3 结论

以四川石棉县某大理石矿山的尾矿经预处理和煅烧所得生石灰为原料,在温度为80 ℃、MgCl₂浓度为0.2 mol/L、生石灰用量为6 g/L时,采用碳化法可制备长度为40~50 μm、直径为2~3 μm、长径比为13~18的文石晶须。

参考文献:

[1] 孟跃辉,倪文,张玉燕. 我国尾矿综合利用发展现状及前景[J]. 中国矿山工程, 2010, 39(5): 4-9.

[2] 陈艳萍,严云,胡志华. 碳酸钙晶须的制备及含硫化合物对碳酸钙晶须影响的研究[J]. 人工晶体学报, 2015, 44(5): 1347-1353.

[3] Ren M, Dong C, An C. Large-scale growth of tubular aragonite whiskers through a MgCl₂-assisted hydrothermal process[J]. Materials, 2011, 4(8): 1375-1383.

[4] 曹有名. 碳酸钙晶须合成及其应用[J]. 化工新型材料, 1998(10): 23-24.

[5] Zhao L N, Chen L, Wang Y. Influence of control agent on preparation of aragonite type of calcium carbonate whisker[J]. Journal of Jishou university, 2013, 34(2): 64-67.

[6] 刘飞,袁铭鸿,曹建新. 利用电石渣制备碳酸钙晶须的初步研究[J]. 贵州大学学报(自然科学版), 2010, 27(2): 126-128.

[7] 张刚. 均一文石相碳酸钙晶须的制备与生长机理研究[D]. 成都: 四川大学, 2002.

[8] 许兢,陈庆华,钱庆荣. 尿素水解法制备晶须碳酸钙[J]. 结构化学, 2003(2): 233-237.

[9] Liu Qingfeng, Shang Wenyu, Liu Bin, et al. Preparation of aragonite by carbonation process[C]. Electrical Insulating Materials, 1998. Proceedings of 1998 International Symposium on, 1998.

[10] Ota Y, Inui S, Iwashita T, et al. Preparation of Aragonite Whisker[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1995, 78(7): 1983-1984.

[11] 孙红娟,常有军. 鼓泡法制备文石型碳酸钙晶须的实验研究[J]. 中国矿业, 2005(2): 79-81.

[12] Hu Z S, Shao M H, Li H Y, et al. Mg²⁺ content control of aragonite whisker synthesised from calcium hydroxide and carbon dioxide in presence of magnesium chloride[J]. Materials science and technology, 2008, 24(12): 1438-1443.

[13] 李纠,陈华雄. 以氯化镁为晶型控制剂制备碳酸钙晶须[J]. 硅酸盐学报, 2005(9): 1153-1156.

[14] 马俊,刘华彦,陈银飞. 针状碳酸钙制备中氯化镁晶型导向剂的套用研究[J]. 无机材料学报, 2011, 26(11): 1199-1204.

[15] 刘茜,刘庆峰,陈寿田. 碳酸化工工艺参数对碳酸钙结晶习性的影响[J]. 无机材料学报, 2002(1): 163-166.

[16] Michael B. Toffolo E B. Nucleation of aragonite upon carbonation of calcium oxide and calcium hydroxide at ambient temperatures and pressures; a new indicator of fire-related human activities[J]. Journal of archaeological science, 2014, 9(49): 237-248.

[17] Hu Z, Shao M, Cai Q, et al. Synthesis of needle-like aragonite from limestone in the presence of magnesium chloride[J]. Journal of materials processing tech, 2009, 209(3): 1607-1611.

[18] Mccallum R W, Yan J Q, Rustan G E, et al. Synthesis of needle-like aragonite crystals in the presence of magnesium chloride and their application in papermaking[J]. Advanced composite materials, 2009, 18(4): 315-326.

[19] 张利,张昭,郭红丹,等. 均一文石晶须的制备及机理探讨[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2002(3): 46-49.

[20] 赵丽娜,刘欢,冯少强,等. 文石型碳酸钙晶须的制备及其力学性能研究[J]. 化学通报, 2013, 76(12): 1141-1144.

[21] 陈华雄,宋永才. 文石晶须制备中氯化镁的影响[J]. 硅酸盐学报, 2003(10): 940-944.

[22] Pan Y, Zhao X, Sheng Y, et al. Biomimetic synthesis of dendrite-shaped aragonite particles with single-crystal feature by polyacrylic acid[J]. Colloids and surfaces A: physicochemical and engineering aspects, 2007, 297(1-3): 198-202.

[23] 马俊,刘华彦,梁锦,等. 两种重要形貌的碳酸钙的可控合成及生长机理探讨[J]. 材料科学与工程学报, 2011, 29(2): 227-232.

引用格式: 罗东山,彭同江,孙红娟,等. 大理石尾矿碳化法制备文石晶须及其形貌分析[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(4): 60-65.

LUO Dongshan, PENG Tongjiang, SUN Hongjuan, et al. Preparation of aragonite whiskers by carbonization from marble tailings and its morphology analysis[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(4): 60-65.