

蛇纹石综合利用现状与展望^{*}

彭祥玉, 刘文刚, 王本英, 刘文宝, 赵亮, 段浩

(东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 蛇纹石是一种含有多种有价成分的黏土矿物,也是一种很有市场潜力的矿物材料。研究中可根据蛇纹石的化学组成和特殊的晶体结构进行有价组分的富集或全组分的利用。本文介绍了近年来蛇纹石中有价成分的回收工艺和多种工业产品的制备进展,指出了蛇纹石全组分综合利用中存在的问题,并提出了蛇纹石进一步发展的设想。

关键词: 蛇纹石;综合利用;镁;二氧化硅;材料

中图分类号:TD972⁺.9 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2019)04-0099-05

DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2019.04.017

Current Situation and Prospect of Comprehensive Utilization of Serpentine

PENG Xiangyu, LIU Wengang, WANG Benying, LIU Wenbao, ZHAO Liang, DUAN Hao

(School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: Serpentine is not only a clay mineral containing a variety of valuable components, but also is a mineral material with great market potential. According to the chemical composition and special crystal structure of serpentine, its valuable components can be enriched or its whole components can be utilized. This paper introduced the latest advances in the recovery process of valuable components in serpentine and the preparation of various industrial products. The problems in comprehensive utilization of serpentine components were pointed out, and the further development direction of serpentine was also put forward.

Key words: serpentine; comprehensive utilization; magnesium; silica; material

1 前言

蛇纹石是一种层状硅酸盐矿物,其分子式为 $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ 或 $2SiO_2 \cdot 3MgO \cdot 2H_2O$ ^[1]。蛇纹石通常为致密块状,片状或者纤维状,并按其结构类型可分为纤蛇纹石、利蛇纹石(鳞蛇纹石)和叶蛇纹石,它们的颜色一般多呈深绿色、黑绿色、黄绿色等^[2]。蛇纹石矿物的热敏感性较差,吸水率不大,具有隔热、隔音、耐磨、耐热、抗腐蚀等性能,具有较好的工艺特性及伴生有益组分,可作为多种工业产

品及多样材料的原料,因而应用前景十分广阔。

我国蛇纹石矿资源较为丰富,且质地良好,大多数蛇纹石矿物中伴生多种其他金属。目前已探明的蛇纹石储量超过5亿t,分布甚广,以江西弋阳樟树墩、江苏省东海县山东口、辽宁省鞍山市岫岩县、河南省信阳卧虎等地较多^[3,4]。虽然我国蛇纹石资源较为丰富,但是蛇纹石的综合利用水平不高,尤其是有价组分的富集以及全组分的利用效率偏低。因此,如何实现高效、绿色地提取蛇纹石中的有价元素逐渐成为当前研究热点。另外,蛇纹石与多种矿物

* 收稿日期:2019-04-19

作者简介:彭祥玉(1992-),女,博士研究生。

通信作者:刘文刚(1981-),男,山东潍坊人,教授,博士生导师,主要研究方向为选矿药剂的研发及矿物加工过程中的环境保护,E-mail:liuwengang@mail.neu.edu.cn。

共生和伴生,全国每年排弃的蛇纹石尾矿近千万吨,这不仅增加了运输投资和堆放管理的费用,还会占用大量土地,造成严重的环境污染^[5]。因此,蛇纹石的综合利用,不仅研究蛇纹石矿石的直接利用,也要考虑蛇纹石尾矿的综合回收,既可以改善自然生态环境,还可以实现资源二次回收,为矿山企业增加新的利益和发展,这也是今后开发利用的主要方向。

2 蛇纹石的晶体结构

蛇纹石的晶体结构是多层叠加而成,其理想结构为三八面体型,与高岭土的1:1型结构层相似,由一个硅氧四面体层和一个氢氧化镁八面体层构成,晶体中少量的 Mg^{2+} 可被 Cr^{3+} 、 Fe^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Mn^{2+} 等金属离子置换,并且相邻的薄片之间有较弱的范德华力^[6,7]。其中硅氧四面体连接成网状,并且在层中都朝向一方与氢氧化镁八面体层相连;氢氧化镁八面体层,一个方向上每三个羟基中两个被硅氧四面体角顶的活性氧所替代^[8]。李学军等^[9]通过对蛇纹石化学成分、晶体结构及键性的分析,将蛇纹石的活性基团划分为5类,即不饱和和Si-O-Si键、O-Si-O键、含镁键类、羟基和氢键,使得蛇纹石具有很高的化学活性。蛇纹石晶体沿(001)面的结构图,如图1所示。

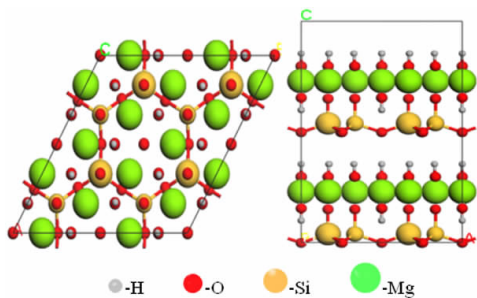


图1 蛇纹石晶体结构

Fig. 1 Crystal structure of serpentine

3 蛇纹石有价成分的富集

蛇纹石的化学成分主要由 MgO 、 SiO_2 等组成,另外蛇纹石还伴生多种其他金属元素(铁,镍,钡,钴等),其中有价成分 MgO 和 SiO_2 的含量在80%以上,可见合理、高效地提取有价元素镁硅以及其他金属元素是蛇纹石资源化利用的关键。目前,从蛇纹石中提取有价成分的方法主要分为以下三种:物理选矿、生物选矿和化学选矿。物理选矿方法一般包括机械活化(球磨等)、微波、超声波等,蛇纹石晶体

结构中的二氧化硅层可以利用物理手段除去,使镁离子可以更多的溶解,进而提高了镁的浸出率。虽然物理选矿工艺简单,耗能较低,但蛇纹石伴生矿物的种类较多,目前很难采用单一的物理选矿方法得到高品位的精矿。生物选矿是微生物吸附在固体矿物表面形成生物膜,其代谢产物进一步发生物理或化学的相互作用,发生生物催化氧化和还原反应^[10,11]。微生物选矿技术可以选择性吸附,有效分离目的矿物,提高矿石品位,并具有成本低、对环境友好等优势,但目前研究的微生物种类有限,大多仅限于实验室研究阶段,技术难以推广到工业化生产^[12]。化学选矿可以分为浸出和焙烧两种工艺,浸出可以按浸出剂的不同分为酸浸和碱浸。焙烧工艺一般有钠盐烧碱焙烧、硫酸铵焙烧、硫酸氢铵焙烧、氢氧化钠焙烧与硫酸铵-硫酸混合焙烧等工艺^[13]。

总之,众多研究者以蛇纹石为原料,按照工业的不同需求生产出各种镁硅系列化学工业产品。其中,镁系列产品有氢氧化镁、碱式碳酸镁、氧化镁、碳酸镁、金属镁等,还有具备高附加值和特殊性能的镁化合物晶须材料、纳米材料等产品;而硅系列产品则有五/六配位有机硅化合物、有机硅聚合物、碳化硅、白炭黑以及具有高效吸附性能的有机和无机环境材料,分述如下:

3.1 镁系列产品

王景峰等^[14]采用盐酸三段逆流浸提工艺,镁离子沉淀率可以达到98%以上,过滤洗涤后煅烧可以得到纯度为99.5%的氢氧化镁,此方法相具有胺循环量小、镁离子沉淀效率高、能耗低且胺损失量小等优点。曾颖等^[15]采用球磨和煅烧工艺对蛇纹石进行预处理活化,并且探讨了四种不同无机酸对 MgO 浸出率的影响,常温下 MgO 的浸出率可达到93%。杨保俊等^[16]研究了一种浸出活化剂FS-1,使氧化镁的浸出率达到98.81%。此工艺加入浸出活化剂后不仅可以缩短浸出时间,而且可以降低酸耗量。宋宁等^[17]采用活化酸浸蛇纹石制备氢氧化镁纳米粉体的工艺,超声化学沉淀后可制得粒径为20~50 nm,且分布均匀的氢氧化镁纳米粉体。此外,国外的Dutrizac等^[18]采用Magnola方法生产金属镁,可以避免传统浸出蛇纹石过程中存在的二氧化硅凝胶化问题。

3.2 硅系列产品

王克胜等^[19]采用机械化学固相法提取蛇纹石

中的硅,浸渣经水溶离心后可得到 SiO_2 粉体,其为片状颗粒,表面存在大量气孔,平均粒径约为 130 nm,比表面积最大可达到 $256.37 \text{ m}^2/\text{g}$ 。此工艺可循环利用活化剂,易于工业化,环保无污染,比酸碱浸出法具有明显优势。Fedoročkova A 等^[20]以蛇纹石为原料采用两段(酸浸和碱浸)工艺制备活性较高的二氧化硅,样品纯度高达 99.4%,同时与酸性沉淀法相比,碱性条件下合成的二氧化硅的比表面积受杂质影响较大。Wang 等^[21]采用酸浸法从纤蛇纹石中提取纳米纤维状二氧化硅,其纯度在 90% 以上,比表面积较高为 $368 \text{ m}^2/\text{g}$,吸附量为 $330 \text{ cm}^3/\text{g}$,孔体积为 $0.51 \text{ cm}^3/\text{g}$,其中单根二氧化硅纤维的直径约为 20 ~ 30 nm。Cheng 等^[22]采用浓硫酸酸浸蛇纹石工艺提取非晶态二氧化硅,并制备碳化硅,其中二氧化硅的纯度可达 97%,C/Si 摩尔比为 3.0,温度为 $1550 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,可以合成高附加值材料 $\beta\text{-SiC}$,作为工业应用的原料。

3.3 其它金属产品

周远等^[23]采用氯化焙烧法从蛇纹石尾矿中回收镍,浸出液经除杂、沉淀得到氢氧化镍产品,纯度为 80.22%,镍的总回收率为 81.71%,此方法是无酸工艺,绿色环保。Hseu 等^[24]以台湾和奥地利两种不同的蛇纹石为研究对象,探讨了三种无机酸(HCl 、 HNO_3 和 H_2SO_4)和三种有机酸(柠檬酸、乙酸和草酸)在一定浓度范围对镍浸出速率的影响。代群威等^[25]利用黑曲霉菌浸出蛇纹石尾矿中钴和镍,蛇纹石矿粉(碱性)改变了黑曲霉生长环境的 pH 值,抑制黑曲霉的正常生长,促进其代谢产物发生变化,更易于金属元素发生反应。肖景波等^[26]以蛇纹石硫酸浸出后的铁铝沉淀物为原料,采用氧化沉淀和煅烧工艺制备高纯氧化铁,最优条件下,铁回收率为 99.9%,氧化铁纯度达 99.8%,符合软磁铁氧体用氧化铁的质量要求。陈彦国^[27]探讨了蛇纹石中钡的有效萃取方法,在盐酸介质中,以二(2-乙基己基)二硫代磷酸为萃取剂,钡的提取率为 98%。

由上可知,蛇纹石中有价成分的开发利用范围逐年扩大,回收各种有价成分的工艺流程也在不断优化,并且其成分的利用率以及分离效率也在渐渐提高。例如,选别工艺可以通过球磨和煅烧两种工艺,既可以破坏蛇纹石的晶体结构,改善物理化学特性,又有利于在常温下提高镁的浸出率。联合工艺不仅

降低了经济成本,还降低了环境成本,使工艺更加具有可行性。此外,浸出工艺中加入活化剂,镁可以在较低的温度和压力下溶解,而且使用腐蚀性较低的浸出剂,明显降低浸出设备的腐蚀,研发浸出活化剂为蛇纹石的回收提供了一种可行度高、经济效益良好的方法;浸出工艺也可采用几段逆流浸出,可减少常规浸出的酸用量和成本。同时,蛇纹石不仅可以回收镁和二氧化硅,也可以综合回收其他金属成分,极大地实现经济、资源、环境效益的统一^[28]。

4 蛇纹石全组分利用

我国蛇纹石开发利用历史悠久,迄今为止,我国蛇纹石的制品已达数种,它是现代工业不可缺少的矿物原材料,可以满足各工业的基础需要。蛇纹石的制品广泛用于冶金、化工、电力、军工、机械、建筑等现代工业。例如,蛇纹石与酚醛塑料混合可以制备的电工材料;蛇纹石具有较高的表面化学活性,可以用来制备吸附有害阴离子,重金属离子以及部分有机物的环境材料;蛇纹石经蒸压处理后具有良好的胶凝性,可以制备耐火材料和胶凝材料等等。当前蛇纹石全组分利用已受到国内外学者的重视,由于蛇纹石的化学组成和特殊的晶体结构,是一种重要的多功能型原材料,其可广泛用于多种材料。

4.1 陶瓷材料

陶瓷材料是天然或人工合成的化合物,再经过成形和高温烧结制成的一种非金属材料,而蛇纹石可用作化工陶瓷和日用陶瓷的原料,这属于镁质陶瓷,釉面光滑柔和,透明度较高,并且具有成本低、白度高等特点。我国研究者早在 90 年代就已经开始研究蛇纹用于陶瓷材料,并发现随温度的升高,蛇纹石结构破坏形成新的矿物,当温度为 $600 \sim 1200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,蛇纹石转变为具有强烈反应能力的矿物相,再结晶和烧结可合成镁橄榄石-顽火辉石陶瓷^[29]。Gualtieri 等^[30]也利用蛇纹石尾矿制备传统镁质陶瓷,将含有蛇纹石的基体材料加入二氧化硅和长石中,熔化形成钙镁玻璃陶瓷。

4.2 环境材料

蛇纹石属于层状的黏土矿物,具有较大的比表面积和较好的孔道,并且表面具有大量的羟基与不饱和键,从而也具有较弱的表面活性和良好的吸附性能,因而越来越多的学者以蛇纹石为原料,研发各

种新型、经济的环境吸附材料^[31-33]。例如, Cao等^[34]以热活化蛇纹石为吸附剂,对 Cd^{2+} 在水溶液中的吸附性能进行了研究,700 °C活化的蛇纹石的比表面积最大,是原始蛇纹石的2倍。Aleksandra等^[35]分别研究了蛇纹石在单独或与石灰石混合时,除去溶液中磷(P)的能力,其中粒径0.6~3.2 mm的蛇纹石粉在0.21 mg/g的较低的磷含量的情况下除磷效率大于95%。曹春燕^[36]以天然蛇纹石为原料,制备出一系列具有不同结构和表面性质的热活化蛇纹石,对比天然及热活化蛇纹石对土壤有效态镉、铅、锌吸附含量,其结果表明热活化后蛇纹石对重金属的吸附容量都有增加,700 °C热活化蛇纹石有最大的吸附容量。孙朋成等^[37]选用蛇纹石为吸附材料,开展了蛇纹石对土壤铅、镉及氮素淋溶规律和效果、土壤有效态重金属铅、镉含量、重金属生物有效性和氮肥利用效率、土壤理化性质及其作物生长和品质影响的研究。Vieira等^[38]利用蛇纹石与LiOH在700 °C反应生成 $\text{Li}_4\text{SiO}_4/\text{MgO}$ 复合材料,所得材料成本较低,并具有较高的固碳能力。Larachi等^[39]采用模型转换的合成气反应器,探讨了蛇纹石的炭化,温度为130 °C时,蛇纹石晶体部分脱羟基,增强蛇纹石的碳酸化作用, CO_2 的吸收率增加。

4.3 农业材料

镁和硅是蛇纹石的主要成分,也是农作物生长的必需元素,近年来将蛇纹石制作肥料,已取得较好的效果。在酸蚀的土壤中,蛇纹石的氢氧化镁土层易被破坏,镁离子以交换性离子状态存在于土壤中,可被农作物吸收,剩余的二氧化硅也逐渐被农作物吸收。另外,根据使用和生产方式的不同,蛇纹石矿粉可直接或配合肥料一起施用,同时,蛇纹石也是钙镁磷肥冶炼的重要熔剂。因此蛇纹石可以作为一种有前景的长效复合矿质肥料。

HE R^[40]利用蛇纹石轻质多孔的颗粒,制备无土培养基和营养土壤,用于培育幼苗、花卉和蔬菜,其中无土培养基主要是由15%~55%的蛇纹石多孔颗粒,发泡剂等配制。由于蛇纹石轻质多孔颗粒比表面积大,容重小,吸水率高,透气性好,无臭,不含有害细菌,光强好等优点,可以有效吸收液肥中的水分和养分,提高植株的生长和成活率。Blonska^[41]利用蛇纹石作肥料,降低了钙镁交换态的摩尔比,促进了钙镁竞争引起的根系对镁的吸收,用氮、磷和钾

肥料富集蛇纹石可以刺激有机层中的脱氢酶活性。莫罩盛^[42]提出生产的钙镁磷钾肥时,配入一定比例的蛇纹石、钾长石等入炉熔炼后,可制成钙镁磷钾肥,其使用和市场效果都比较好。

4.4 其他材料

石棉摩擦材料是以蛇纹石为增强材料,高分子化合物为粘合剂,经热压成型制备的一种复合材料,作为摩擦材料中基料及增强骨架的蛇纹石,具有优良的耐热性和摩擦性;蛇纹石建筑材料可用于核电厂的防辐射混凝土以及道路基础面;蛇纹石还可以与烧结镁砂烧制耐火度高于1 820 °C的镁橄榄石耐火材料;根据新平蛇纹石具有特殊三八面体层状结构以及活性基团,蛇纹石还可用作医用材料,吸附、过滤并分解氟化合物,成为预防和治疗地氟病的重要药源^[43-46]。

目前,蛇纹石全组分的多种利用已经得到了良好效果,但是我们还应该加强生产工艺、再生利用,使蛇纹石全组分利用的更加全面和高效。例如,将蛇纹石的矿物学与纳米材料学相结合,制备高技术新纳米材料,不仅丰富蛇纹石矿物材料的研究内容,还为探索纳米材料的制备提供新的思路和方法^[32]。以蛇纹石为原料,制备负载 CuO 、 TiO_2 等复合光催化材料,可降解罗丹明B等污染物,为矿物环境材料开发一种极具应用潜力的催化剂载体;天然的蛇纹石矿物存在纯度低、粒度不均匀的特性,因而影响润滑油的摩擦性能,至今在技术推广应用方面存在较大阻碍;蛇纹石对重金属钝化、土壤修复机理还需要进一步研究,是否具有长效性和稳定性;干法碳酸化为蛇纹石固碳提供了一个较好的思路,但是需要在一定的外压条件下进行,较难实现工业化。因此,在研究蛇纹石矿石的基础理论时,如何开发出具有实用价值可大规模工业化生产的蛇纹石矿物材料也是一个有待解决的问题。

5 结论

近年来,我国对蛇纹石的综合利用中提取镁硅组分及相应产品的应用和研究取得了一系列的进展,对蛇纹石的高附加值的产品利用研究也不断深入,然而对以蛇纹石制备工业材料的研究相对较少,产业化进程较慢。因此,我们在进行蛇纹石的理论研究时,更应该高度关注各种蛇纹石工业产品的应

用研究,并且从合理、经济、正确的角度思考蛇纹石综合回收的工艺,利用新技术开展工业化试验,开发符合市场需求的合格产品,同时探索浸出工艺的关键在于如何加速可溶金属的浸出速率。而蛇纹石全组分的综合利用,则需考虑矿物的改性、优化等加工工艺,例如环境吸附材料需要着重考虑吸附后金属回收、吸附剂再生等问题。总之以实用、绿色、有效为切入点开发创新型、高能型、环保型的蛇纹石矿物材料是广大科研工作者亟需解决的实际难题。

参考文献:

- [1] 郑水林,孙志明,非金属矿物材料[M]. 北京:化学工业出版社,2016:43-44.
- [2] Evans B. W., K. Hattori, A. Baronnet. Serpentine: what, why, where[J]. Elements, 2013, 9(2): 99-106.
- [3] 杨智宽. 蛇纹石粉矿综合利用研究[J]. 环境科学进展, 1997, (2): 33-37.
- [4] 邹志毅,孙宗毅,陈焱. 蛇纹石化学处理的研究历史和现状-蛇纹石综合利用述评[J]. 矿产综合利用, 1993(5): 15-19.
- [5] 刘福来. 石棉尾矿及蛇纹石的研究开发现状. 第八届全国非金属矿加工利用技术交流会论文集: A集[C]. 宜兴:中国非金属矿工业导刊, 2004: 4.
- [6] Alexander G., Maroto Valer M. M., Gafarova Aksoy P. Evaluation of reaction variables in the dissolution of serpentine for mineral carbonation[J]. Fuel, 2007, 86: 273-281.
- [7] Alvarez Silva M., Uribe Salas A., Mirnezami M., et al. The point of zero charge of phyllosilicate minerals using the Mular-Roberts titration technique[J]. Miner. Eng, 2010, 23: 383-389.
- [8] 江绍英. 蛇纹石矿物学及性能测试[M]. 北京:地质出版社, 1987: 21.
- [9] 李学军,王丽娟,鲁安怀. 天然蛇纹石活性机理初探[J]. 岩石矿物学杂志, 2003, 22(4): 386-390.
- [10] Farahat M, Hirajima T, Sasaki K, et al. Adhesion of Escherichia coli onto quartz, hematite and corundum: Extended DLVO theory and flotation behavior[J]. Colloid and surface B: Biointerfaces, 2009, 74(1): 140-149.
- [11] Vasanthakumar B, Ravishankar H, Subramanian S. Microbially induced selective flotation of sphalerite from galena using mineral adapted strains of bacillus megaterium[J]. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces, 2013, 112: 279-286.
- [12] 王立艳,李小龙,陈吉江,等. 微生物选矿剂研究进展[J]. 中国矿业, 2016, 25(12): 112-116, 127.
- [13] 宋鹏程,彭同江,孙红娟,等. 纤蛇纹石石棉尾矿综合利用新进展[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2016(2): 14-17, 23.
- [14] 王景峰,周莹莹,胡宏,等. 蛇纹石加工新工艺基础研究[J]. 化工矿物与加工, 2013(7): 8-10.
- [15] 曾颖,朱萍,刘强,等. 活化酸浸蛇纹石提取镁的实验研究[J]. 矿冶工程, 2006(2): 57-60.
- [16] 杨保俊,于少明,单承湘. 蛇纹石硫酸浸出过程工艺条件的优化研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2002, 25(4): 501-504.
- [17] 宋宁,杜景红,陈为亮,等. 含镍蛇纹石活化酸浸制备氢氧化镁纳米粉体的方法: 101456565[P]. 2009-06-17.
- [18] Dutrizac J. E., Chen T. T. Fundamentals of serpentine leaching in hydrochloric acid media[J]. Magnesium Technology, 2000: 41-51. DOI: 10.1002/9781118808962.ch9.
- [19] 王克胜,司伟,刘淑红,等. 机械化学固相法提取蛇纹石中的硅镁[J]. 化工矿物与加工, 2010, 39(6): 17-20.
- [20] Fedorockova A, Raschman P, Sucik G, et al. Processing of serpentine tailings to pure amorphous silica[J]. Ceramics - silkaty, 2015, 59(4): 275-282.
- [21] Wang L J, Lu A H, Wang C Q, et al. Nano-fibriform production of silica from natural chrysotile[J]. Journal of colloid and interface science, 2006, 295(2): 436-439.
- [22] Cheng T W, Hsu C W. A study of silicon carbide synthesis from waste serpentine[J]. Chemosphere. 2006, 64(3): 510-514.
- [23] 周远,廖辉伟,潘雅妹,等. 蛇纹石尾矿中镁和镍的资源化利用[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(3): 120-124.
- [24] Zeng Y H, Ying C S, Franz Z, et al. Leaching potential of geogenic nickel in serpentine soils from Taiwan and Austria[J]. Journal of environmental management, 2017, 186: 151-157.
- [25] 代群威,谭媛,董发勤,等. 蛇纹石尾矿中钴和镍的微生物浸取效果[J]. 矿物学报, 2010, 30(S1): 103-104.
- [26] 肖景波,夏娇彬,陈居玲. 由蛇纹石制备高纯氧化铁的研究[J]. 无机盐工业, 2014, 46(11): 30-34.
- [27] 陈彦国. D2EHDTPA 萃取蛇纹石中钼的研究[J]. 稀有金属, 2004(2): 432-433.
- [28] 狄永浩,戴瑞,郑水林. 蛇纹石资源综合利用研究进展[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2011(2): 7-10.
- [29] 杨赞中,董灵芝,刘玉金. 石棉尾矿在陶瓷生产中的应用研究[J]. 矿产保护与利用, 1998(4): 49-50.
- [30] Gualtieri A F, Tartaglia A. Thermal decomposition of asbestos and recycling in traditional ceramics[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2000, (20): 1409-1418.
- [31] 王倩. 纤蛇纹石表面改性及对铜离子吸附性能的研究[D]. 长沙:中南大学, 2011.
- [32] 杨艳霞. 纤蛇纹石酸浸及其制备氧化硅纳米线的研究[D]. 长沙:中南大学, 2007.
- [33] 罗伟华. 煎茶岭蛇纹石矿物学及其吸附性能研究[D]. 西安:长安大学, 2008.
- [34] Chun Y C, Cheng H L, Yan Y, et al. Thermal activation of serpentine for adsorption of cadmium[J]. Journal of hazardous materials, 2017, 329: 222-229.
- [35] Aleksandra D, Christiane F, Robert P. C, et al. Phosphorus removal by electric arc furnace steel slag and serpentine[J]. Water Res, 2006, 40(8): 1547.
- [36] 曹春艳. 蛇纹石对重金属吸附机制及对土壤重金属赋存形态影响[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2017.
- [37] 孙朋成. 三种环境材料对土壤镉固化及氮肥增效机理研究[D]. 北京:中国矿业大学, 2016.
- [38] Sara S. V, Gilvan M. P, Ana P. C. Teixeira, et al. Solid state reaction of serpentine $Mg_3Si_2O_5(OH)_4$ with Li^+ to produce Li_4SiO_4/MgO composites for the efficient capture of CO_2 [J]. Journal of environmental chemical engineering, 2018, 6: 4189-4195.

有色金属,2018(9):73-74.

[8] 彭建城,熊道陵,马智敏,等. 有机抑制剂在浮选中抑制黄铁矿的研究进展[J]. 有色金属科学与工程,2012,3(2):61-65.

[9] 薛季玮,姚金,唐远等. 粒度对蓝辉铜矿与黄铁矿浮选分离特性的影响[J]. 金属矿山,2018(8):73-78.

[10] 陈建华. 浮选捕收剂的结构及其作用机理研究[J]. 矿产保护与利用,2017(4):98-106.

[11] 曹育洵,刘文礼,郝朋等. 煤系黄铁矿表面碳原子掺杂浓度对其疏水性影响的量子化学研究[J]. 矿业科学学报,2018,3(2):186-193.

[12] 王瑜,刘建,罗德强,等. 巯基乙酸和巯基乙醇对黄铁矿抑制作用的 DFT 计算[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版),2018,43(2):39-44.

[13] 陈建华,朱阳戈. 硫化矿物表面水化层结构及其对药剂作用的影响[J]. 矿产保护与利用,2018(3):1-8.

[14] 张德文. 金属离子对铜蓝和黄铁矿浮选行为的影响[J]. 有色金属(选矿部分),2018(3):92-96.

[15] 于跃先. 煤泥浮选颗粒间相互作用及对浮选影响研究[D]. 北京:中国矿业大学(北京),2018.

[16] 杨波. 闪锌矿与黄铁矿的交互作用及其对锌硫浮选分离的影响机理[D]. 昆明:昆明理工大学,2017.

[17] 邓政斌. 载铜、载锆及普通闪锌矿表面的浮选药剂吸附特性与机理研究[D]. 昆明:昆明理工大学,2015.

[18] 徐飞飞,黄建芬,黄国贤. 萤石矿低温浮选高效捕收剂的研究与选矿应用[J]. 世界有色金属,2017(18):261-263.

[19] 任阳光,熊堃. 孔雀石表面丁基黄药吸附和解吸特性研究[J]. 金属矿山,2014(12):112-115.

[20] 徐龙华,田佳,巫侯琴,等. 组合捕收剂在矿物表面的协同效应及其浮选应用综述[J]. 矿产保护与利用,2017(2):107-112.

[21] 谷艳玲. 硫化矿浮选起泡剂性能与作用研究[D]. 长沙:中南大学,2013.

[22] 刘德生,陈小榆. 温度对泡沫稳定性的影响研究[J]. 中国海洋平台,2006(4):19-22.

[23] G·布鲁特,白秀梅,肖力子. 双黄药在黄铁矿浮选中的作用:可溶性、吸附研究、Eh 和 FTIR 测定[J]. 国外金属选矿,2002(12):17-21,43.

[24] 孙振艳. 三元复合驱采出水混凝过程中 Zeta 电位研究[J]. 技术与市场,2016,23(5):93-94,96.

引用格式:刘向,李祚毕,李展,等. 黄铁矿低温浮选试验及机理分析[J]. 矿产保护与利用,2019,39(4):115-120.

LIU Xiang, LI Zuobi, LI Zhan, et al. Study and mechanism analysis on the flotation of pyrite in low temperature[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(4):115-120.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn

(上接第 103 页)

[39] Larachi F., Gravel J. P., Grandjean B. P. A., et al. Role of steam, hydrogen and pretreatment in chrysotile gas-solid carbonation: opportunities for precombustion CO₂ capture[J]. International journal of greenhouse gas control, 2012, 6: 69-76.

[40] He R, Jiang W, Jin B, et al. Serpentine light porous granules used for e. g. preparing soilless culture medium, contain serpentine, high viscosity attapulgite clay, foaming agent, expanded perlite and vermiculite, ferrous sulfate and water; 106116502-A[P]. 2016.

[41] Blonska E; Januszek K, Malek S; et al. Effects of serpentinite fertilizer on the chemical properties and enzyme activity of young spruce soils [J]. International agrophysics, 2016, 30: 401-414.

[42] 莫覃盛. 蛇纹石的综合开发利用[J]. 才智,2009,(16):269.

[43] 刘开琪. 我国耐火材料的现状与发展趋势[J]. 新材料产业, 2010(9):43-47.

[44] 朱继存. 蛇纹石的物质成分特征和利用[J]. 石材,2000(12):33-35.

[45] 石能学,李旭俊,段永莉. 云南新平药用蛇纹石矿物学及医疗机理分析[J]. 云南地质,2011,30(1):89-91.

[46] 杨博,张振忠,赵芳霞. 蛇纹石综合利用现状及发展趋势[J]. 材料导报,2010,24(S1):381-384.

引用格式:彭祥玉,刘文刚,王本英,等. 蛇纹石综合利用现状与展望[J]. 矿产保护与利用,2019,39(4):99-103,120.

PENG Xiangyu, LIU Wengang, WANG Benying, et al. Current situation and prospect of comprehensive utilization of serpentine[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2019, 39(4):99-103,120.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: kcbh@chinajournal.net.cn