第 48 卷第 8 期
2020 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 8
August，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190766

膨胀蛭石的化学–微波法制备及其膨胀率与柔韧性的关系

解颜岩[1,2]，孙红娟[1,2,3]，彭同江[1,2,3,4]，罗利明[1,2]，田景斐[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，四川省非金属矿粉体改性与高质化利用技术工程实验室，四川 绵阳 621000；
4. 西南科技大学分析测试中心，四川 绵阳 621010)

摘 要：以工业蛭石为原料，利用化学–微波法制备具有高膨胀倍数的柔性膨胀蛭石(FEV)，研究 FEV 的最佳制备工艺及膨胀倍数与柔韧性相关性。结果表明：利用化学–微波加热法制备的 FEV 膨胀倍数最高达 36.36 倍。FEV 样品的筛上产率与膨胀率呈负相关，剧烈的膨胀作用可提高膨胀蛭石颗粒的剥离性，进而降低 FEV 样品颗粒的柔韧性。FEV 内部疏松多孔，孔隙分布较均匀，依旧保持完整的层状结构，构成狭缝状缝隙的内壁厚度为 50~200 nm。FEV 是一种低成本制备蛭石纳米材料的前驱体，可基于其层解充分的特性进行机械剥离，制备蛭石纳米片。

关键词：草酸；双氧水；微波；膨胀蛭石；高膨胀倍数；柔韧性
中图分类号：TD985　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)08–1325–08
网络出版时间：2020–06–22



Preparation of Expanded Vermiculite *via* Chemical-Microwave Method and Correlation Between Expansion Rate and Flexibility

XIE Yanyan[1,2], *SUN Hongjuan*[1,2,3], *PENG Tongjiang*[1,2,3,4], *LUO Liming*[1,2], *TIAN Jingfei*[1,2]

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

Abstract: A flexible expanded vermiculite (FEV) with a high expansion ratio was prepared by a chemical-microwave method with industrial vermiculite as a raw material. The optional process and relationship between expansion rate and flexibility were investigated. The results show that the expansion ratio of FEV prepared by chemical-microwave heating is up to 36.36. The screen tailings yield of FEV samples is negatively correlated to the expansion rate, and the sharp expansion action can improve the exfoliation ability of expanded vermiculite particles, thereby reducing the flexibility of FEV sample particles. The interior of FEV is loose and porous, the pores are evenly distributed and the intact layered structure is still maintained. The thickness of the inner wall forming the narrow slit is 50–200 nm. The FEV is a low-cost precursor of vermiculite nanomaterial, which can be mechanically exfoliated to prepare vermiculite nanomaterial based on its lamellar dissociation characteristic.

Keywords: oxalic acid; hydrogen peroxide; microwave; expanded vermiculite; high expansion ratio; flexibility

新疆尉犁工业蛭石主要由金云母-蛭石间层矿物组成[1–2]，以金云母-蛭石 1:1 规则间层矿物和金云母-水金云母分结型间层矿物为主[3]。蛭石晶层的层间域具有可交换性水化阳离子以及水分子，高温加热时水分子逸出导致层间域膨胀和结构层分离形成膨胀蛭石[4]。

收稿日期：2019–11–26。　修订日期：2020–01–05。
基金项目：国家重点研发项 目(2018YFC1802902)；国家自然科学基金(41972042)。
第一作者：解颜岩(1994—)，男，硕士研究生。
通信作者：孙红娟(1976—)，女，博士，教授。

Received date: 2019–11–26.　**Revised date:** 2020–01–05.
First author: XIE Yanyan (1994–), male, Master candidate.
E-mail: kbj3333@qq.com
Correspondent authors: SUN Hongjuan (1976–), female, Ph.D., Professor.
E-mail: sunhongjuan@swust.edu.cn

我国工业蛭石的开发利用以膨胀蛭石及其衍生产品[5]为主，加热膨胀为整个制备环节中最重要的工序。实际生产中常采用焙烧加热法[6–9]，而微波加热法仍限于实验室研究中[10]。焙烧加热膨胀法使用的设备主要为回转炉、立式炉和电加热箱式炉等，获得的膨胀蛭石产品质量稳定、产能大，可满足大规模生产和常规轻质与保温建材的需要。焙烧加热时温度难以均匀控制。为了达到更高的膨胀倍数，通常采用更高的焙烧温度，从而导致蛭石结构层的破坏和机械强度的降低[11]，所形成的膨胀蛭石易粉化，产生较多粉尘，对环境造成危害[12]。微波的渗透深度大，升温速度快且加热效果更加均匀[13]，微波可直接作用于层间域的水分子，加热效率高、耗时少及操作简单，且微波法制备的膨胀蛭石具有柔韧性[14]。工业蛭石的热膨胀性除取决于蛭石粒度大小[15]、蛭石晶层含量、层间域中水分子含量[16]、微波时间及微波功率[17]。为提高工业蛭石的热膨胀倍数，可通过有机插层、离子交换、酸活化以及双氧水插层等预处理方式[18–20]，其中双氧水使用最为广泛。双氧水可与水分子产生交换作用进入蛭石层间域，并在结构中的 F^-以及 Fe^{2+}/Fe^{3+}的催化作用下原位分解产生气体[21]，从而加速工业蛭石层解膨胀。然而膨胀倍数越高，对膨胀蛭石颗粒的连续性结构影响越大。对土壤改良、保温材料等领域，颗粒的柔韧性降低、强度下降及易粉化等可严重影响应用效果。因此，寻求膨胀倍数与柔韧性之间的最佳平衡是制备高品质膨胀蛭石产品的关键。另一方面，工业蛭石膨胀时层解充分，颗粒剥离分散性提高，对于制备蛭石纳米片则是非常重要的。关于膨胀蛭石颗粒的柔韧性或其剥离分散性测试的研究文献较少[14]，关于这一领域的研究数据急需补充。

基于工业蛭石优异的热膨胀性能，通过化学预处理后进行微波加热膨胀，获得高膨胀倍数的、具有一定柔韧性的膨胀蛭石(FEV)，探索了工艺技术条件对物相组成、显微形貌、膨胀倍数、柔韧性(与可剥离性)及热稳定性等的影响，以及膨胀蛭石剥离分散制备蛭石纳米片的可行性。

1 实验

1.1 原料

粒径为 2~4 mm 工业蛭石原矿(样品编号 V)，采自新疆尉犁且干布拉克蛭石矿床。图 1 为样品 V 的 X 射线衍射(XRD)谱，主要为蛭石和金云母-蛭石间层矿物，含少量金云母。样品 V 的堆积密度为 1 200 kg/m^3。

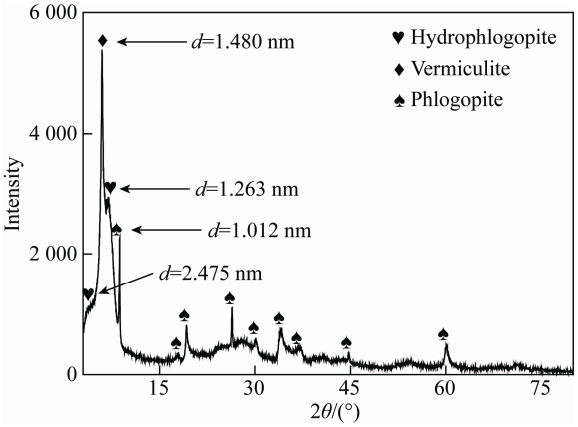


图 1 工业蛭石样品的 XRD 谱

Fig. 1 XRD pattern of vermiculite (V) sample

双氧水溶液(质量分数为 30%)，分析纯，天津市光复精细化工研究所；草酸，分析纯，成都科龙化工试剂厂；去离子水，电阻率>18.2 MΩ·cm，自制。

1.2 FEV 样品制备

将草酸与双氧水在 500 mL 烧杯中混合。称取 25 g 样品 V 倒入烧杯中室温静置一段时间。静置完毕后将样品从烧杯中取出移至微波炉中，设定微波加热功率为 700 W，加热 10 min 后获得 FEV 样品。FEV 样品根据不同的影响因素分别编号为 F-O_A-H_B、F-R_C和 F-S_D (分别对应草酸添加量、双氧水质量分数、混合溶液体积与样品 V 质量比及浸泡时间)，如表 1 所示。

1.3 FEV 样品膨胀倍数的测定

FEV 样品的膨胀倍数 K 通过堆积密度的变化来测量，即 K 值为样品 V 的堆积密度与 FEV 样品的堆积密度之比。堆积密度通过建材行业标准 JC/T 441—2009《膨胀蛭石》[22]中的方法进行检测。

1.4 FEV 样品柔韧性的测定

利用 70 目分样筛对机械搅拌后的 FEV 样品进行筛分，并以“筛上产率”来表征 FEV 样品的柔韧性。柔韧性高的样品，筛上产率高；柔韧性低的样品，筛上产率低。筛上产率 ω 的计算公式如下：

$$\omega=\frac{m_1}{m_0}\times 100\% \tag{1}$$

式中，m_0 为样品总质量，g；m_1 为筛上产物质量，g。将待测样品置于烘箱中烘干至恒重。取 10 g FEV 样品置于搅拌机(双层刀片：长度 2 cm 和 5 cm，容

表 1　柔性膨胀蛭石制备的实验方案

Table 1　Experimental scheme of preparation of flexible expanded vermiculite

Sample No.	*A* (Amount of oxalic acid added)/g	*B* (Mass fraction of H_2O_2)/%	*C* (Volume mass ratio)/mL	*D* (Immersion time)/h
Y-O_A-H15	0, 0.1, 0.5, 1.0, 2.0	15	1.2	24
Y-O_1-H_B	1.0	0, 5, 10, 15, 30	1.2	24
Y-R_C	1.0	15	0.4, 0.8, 1.2, 2.4, 3.6	24
Y-S_D	1.0	15	30	1, 3, 6, 12, 24

Volume mass ratio is the ratio between volume of oxalic acid and hydrogen peroxide mixed solution and mass of V sample; microwave heating power is 700 W; Heating time is 10 min.

积 800 mL)中以转速为 22 000 r/min 进行机械破碎 1 min，后静置 10 min 将样品取出。使用 70 目分样筛对机械破碎后的样品进行筛分，得到筛上产物并称重。

1.5　仪器与设备

采用荷兰帕纳科公司生产的 X pert MPD Pro 型 X 射线衍射仪分析 FEV 的物相。铜靶，管电压 40 kV，管电流 40 mA，扫描范围 2θ=3°~80°，连续扫描。采用德国 Carl zeissNTS GmbH 公司生产的 UItra55 型高分辨冷场发射扫描显微镜分析系统观察 FEV 样品的微观形貌。热重分析采用美国 TA 仪器公司生产的 SDT Q600 型同步热分析仪。

2　结果与讨论

2.1　FEV 的物相特征

图 2 为 FEV 的 XRD 谱。由图 2 可以看出，FEV 样品依旧保持较为尖锐的蛭石与水化金云母的 $d_{(001)}$ 特征峰，表明微波加热法膨胀对工业蛭石内部晶层结构的破坏较小，FEV 样品仍然具有水化性能。

由图 2a 可见，FEV 样品蛭石与水化金云母的 $d_{(001)}$ 特征峰随草酸添加量增加而先减弱后增强，其中 F-O_1-H_{15} 样品的 $d_{(001)}$ 特征峰最弱，F-O_0-H_{15} 与 F-O_2-H_{15} 样品 $d_{(001)}$ 特征峰较强。由图 2b 可见，蛭石与水化金云母的 $d_{(001)}$ 特征峰随双氧水质量分数的增加而明显下降。F-O_1-H_0 样品 $d_{(001)}$ 特征峰最大，F-O_1-H_{30} 样品最小，且两者差距明显。由图 2c 可见，随着体积质量比的增大，FEV 样品的蛭石与水化金云母的 $d_{(001)}$ 特征峰变化无规律，表明体积质量比不是影响 FEV 样品结构有序度的主要因素。由图 2d 可见，随着浸泡时间的延长，FEV 样品的蛭石与水化金云母的 $d_{(001)}$ 特征峰逐渐降低，直至 24 h 达到最低。

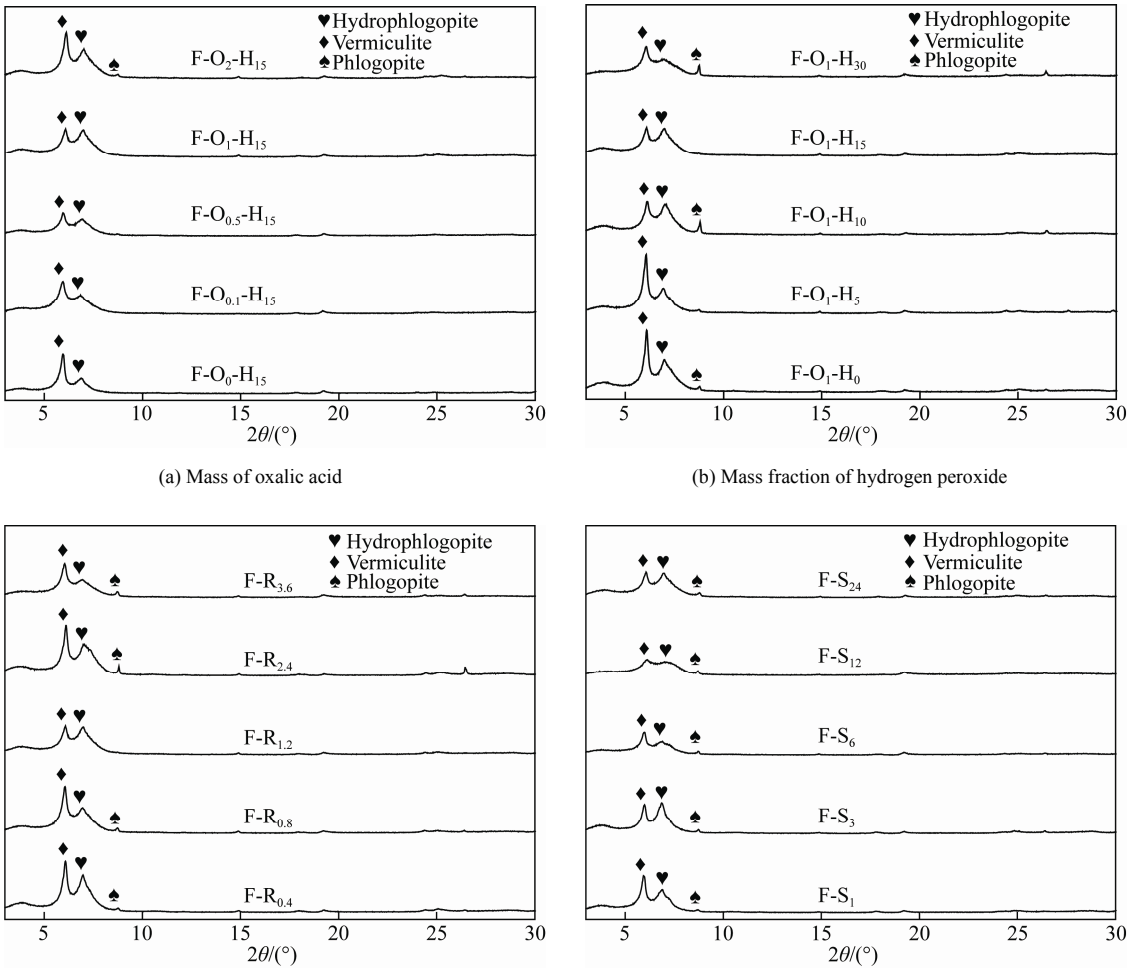
有机酸可大幅提高双氧水的分解速率[23–24]，因此过量草酸导致双氧水提前分解，未能充分渗入蛭石内部。因此 H-O_2-H_{15} 样品 d_{001} 特征峰重新升高。双氧水可渗入蛭石内部并受热分解导致工业蛭石膨胀。且双氧水质量分数越大，对蛭石结构有序度破坏程度越明显。双氧水质量分数为 30%时，分解产生气体过量导致样品在微波加热之前就已层解充分，因此 F-O_1-H_{30} 样品的特征峰最低，但膨胀率不是最高。对比图 2a 与图 2c 可知，双氧水对样品结构影响强于草酸。延长浸泡时间也可破坏样品的连续性结构，导致其结构有序度降低。金云母 $d_{(001)}$ 特征峰时有时无，并未随不同的影响因素呈现有规律的变化趋势。分析后认为新疆尉犁工业蛭石主要由金云母-蛭石混层结构组成[1–2]，属金云母到蛭石转变过程中的过渡产物，不同工业蛭石颗粒的风化程度不尽相同，金云母含量差异较大。故并未以金云母 $d_{(001)}$ 特征峰作为 FEV 样品结构有序度的评判标准之一。

2.2 FEV 的形貌特征

图 3 分别为 F-O_1-H_0 样品和 F-O_1-H_{15} 样品的照片与扫描电子显微镜照片。

由图 3a 可见，F-O_1-H_0 样品膨胀倍数小，长度约为 10 mm。其膨胀倍数较低，层解不充分，未被剥离层的厚度为 5 μm 左右，堆叠结构有序度仍较高。由图 3b 可见，长条状的 F-O_1-H_{15} 样品形态类似“水蛭”，长度超过 30 mm。其膨胀倍数高，相对更疏松多孔，孔隙分布也较均匀，构成未被剥离层的厚度为 50~200 nm。

样品 F-O_1-H_0 与样品 F-O_1-H_{15} 的内部层状结构的完整性表明微波加热没有导致结构产生断裂。但在加热过程中，渗入工业蛭石层间域中的草酸与双氧水受热分解生成大量气体，所形成的压力致使片层沿层间域方向膨胀，因此样品 F-O_1-H_{15} 膨胀倍数大幅提高；但较薄的内壁和大量的狭缝状孔隙导致在外力作用下膨胀蛭石颗粒更易断裂或破碎，因此

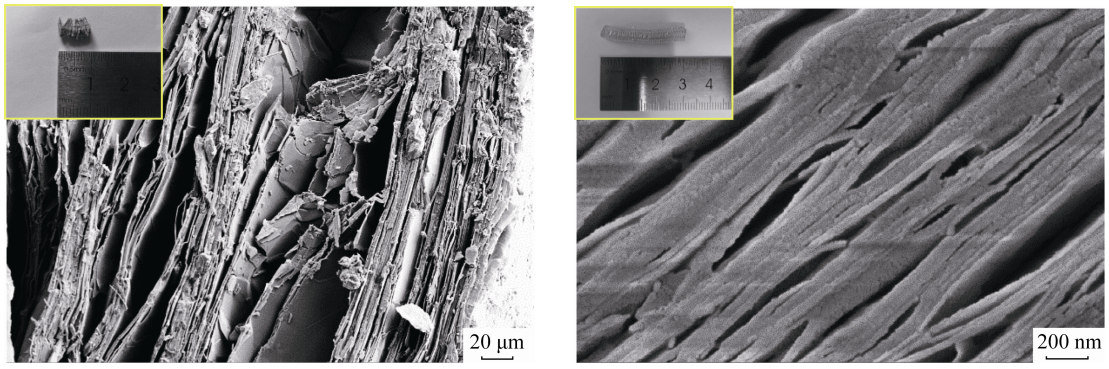


(a) Mass of oxalic acid (b) Mass fraction of hydrogen peroxide

(c) Volume mass ratio (d) Immersion time

图 2 高膨胀倍数柔性膨胀蛭石(FEV)样品的 XRD 谱

Fig. 2 XRD patterns of FEV (flexible expanded vermiculite) samples



(a) Sample F-O1-H0 (b) Sample F-O1-H15

图 3 样品 F-O1-H0、F-O1-H15 的照片及 SEM 照片

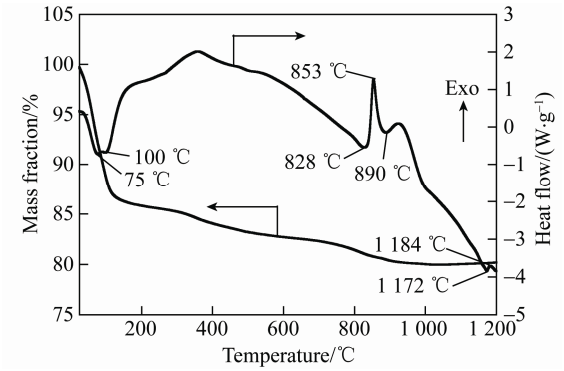
Fig. 3 Photos and SEM images of F-O1-H0 and F-O1-H15 samples

该样品柔韧性较差，更易粉化。样品 F-O1-H15 的内壁厚度为 50~200 nm，因此为提高工业蛭石的利用效率和拓宽其应用领域，可考虑对其进行机械破碎制备蛭石纳米材料。

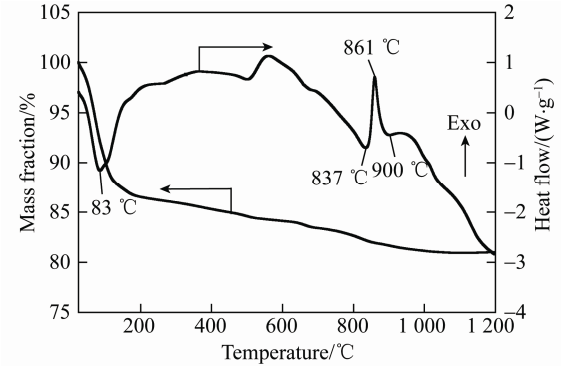
2.3 FEV 的热学性质

图 4 为样品 V 与样品 F-S24 的热重-差示扫描量热(TG-DSC)曲线。这里需要指出的是，膨胀性能虽然是样品 F-O1-H15 最好，但是样品 F-S24 和 F-O1-H15

的制备条件实际上相同，因此样品 F-S_{24} 的层解程度和柔韧性是基本一致的。只是在制备过程中会有误差，导致同一条件下制备的样品的膨胀倍数具有离散性。因此对 2 个样品进行热分析实际上结果是基本一致的。



(a) Sample V



(b) Sample F-S_{24}

图 4　样品 V 与样品 F-S_{24} 的 TG-DSC 曲线

Fig. 4　TG-DSC curves of the samples V and F-S_{24}

由图 4a 可见，样品 V 在 DSC 曲线上所产生的热效应主要发生在 3 个温度区间，分别为 75~100 ℃、800~1 000 ℃及 1 150~1 200 ℃。75~100 ℃区间的吸热谷主要为脱去样品表面吸附水和蛭石晶层的层间水所致[19, 25]；在 800~1 000℃区间的差热曲线呈 2 个“倒 S 型”。分析认为样品 V 中主要含有由金云母晶层和蛭石晶层构成的 1:1 型规则间层矿物，但同时存在上述两种晶层的分节型结构，因此两者的吸/放热效应不重合。吸热部分为脱去蛭石晶层的结构水和结构层破坏所致[20, 26]，放热部分是蛭石晶层分解产物结晶形成顽火辉石所致[27]；在 1 150~1 200 ℃区间的热效应与金云母脱去结构水及顽火辉石相的形成有关[28–29]。对应于 DSC 各区间的热效应，在 TG 曲线上对应于样品的脱水过程产生相应的失重。由图 4b 可见，500 ℃附近产生的放热峰可能为插层产物分解所致，该样品的失去吸附水、层间水及结构水所产生的热效应则与样品 V 相似，表明微波加热过程中样品 F-S_{24} 的晶体结构并未遭到破坏，晶层结构层是完整的。因此部分 FEV 样品的柔韧性变差，是由于层间域膨胀导致层解充分和易于剥离所引起的。

2.4　实验条件对样品 FEV 膨胀倍数及堆积密度的影响

图 5 为不同实验条件下样品 FEV 的膨胀率及堆积密度变化关系。由图 5a 可见，样品 FEV 膨胀倍数与草酸添加量呈正相关关系。不添加草酸时样品膨胀倍数为 21.82 倍，添加 1.0 g 草酸的样品膨胀倍数为 34.72 倍，两者差异显著。样品 FEV 的堆积密度的变化趋势与膨胀倍数刚好相反，即膨胀倍数越高，疏松多孔性越显著，堆积密度越低。由图 5b 可见，样品 FEV 膨胀倍数随双氧水质量分数增加而先增大后减小。未添加双氧水的样品膨胀倍数仅为 3.42 倍，双氧水质量分数为 15%的样品膨胀倍数达到 36.23 倍。同样证明了双氧水在工业蛭石膨胀过程中起主导作用，草酸起促进作用。由图 5c 可见，样品 FEV 膨胀倍数随体积质量比增大而先剧烈增高后缓慢降低，体积质量比为 1.2 时样品膨胀倍数最高(36.36 倍)。表明体积质量比的增加可提高工业蛭石的含水量，在微波加热过程中产生更大的蒸汽压力。然而体积质量比过大则使微波能量被过量的水分吸收，无法产生足够的蒸汽压力导致其膨胀倍数降低。由图 5d 可见，样品 FEV 膨胀倍数随浸泡时间的延长而增加，且增长速率逐渐降低，直至 24 h 的样品的膨胀倍数达到最高。

为高效制备样品 FEV，选用草酸添加量为 1.0 g、双氧水质量分数为 15%、体积质量比为 1.2、浸泡时间为 24 h 作为优化工艺条件。利用化学-微波法制备的样品 FEV 层解充分、膨胀倍数高，其最大膨胀倍数可达 36.36 倍，高于单一加热(微波加热与焙烧加热)或利用双氧水改性后加热的膨胀蛭石的膨胀倍数，因此该化学-微波法优势明显。具体对比结果如表 2 所示。

2.5　实验条件对样品 FEV 柔韧性的影响

图 6 为不同实验条件对 FEV 样品筛上产率的变化关系图。

由图 6a 可见，在添加草酸后样品 FEV 的筛上产率明显降低，当草酸添加量增加至 0.5 g 后样品 FEV 筛上产率达到 40.6%后不再明显变化。由图 6b 可见，在添加双氧水后样品 FEV 的筛上产率显著降

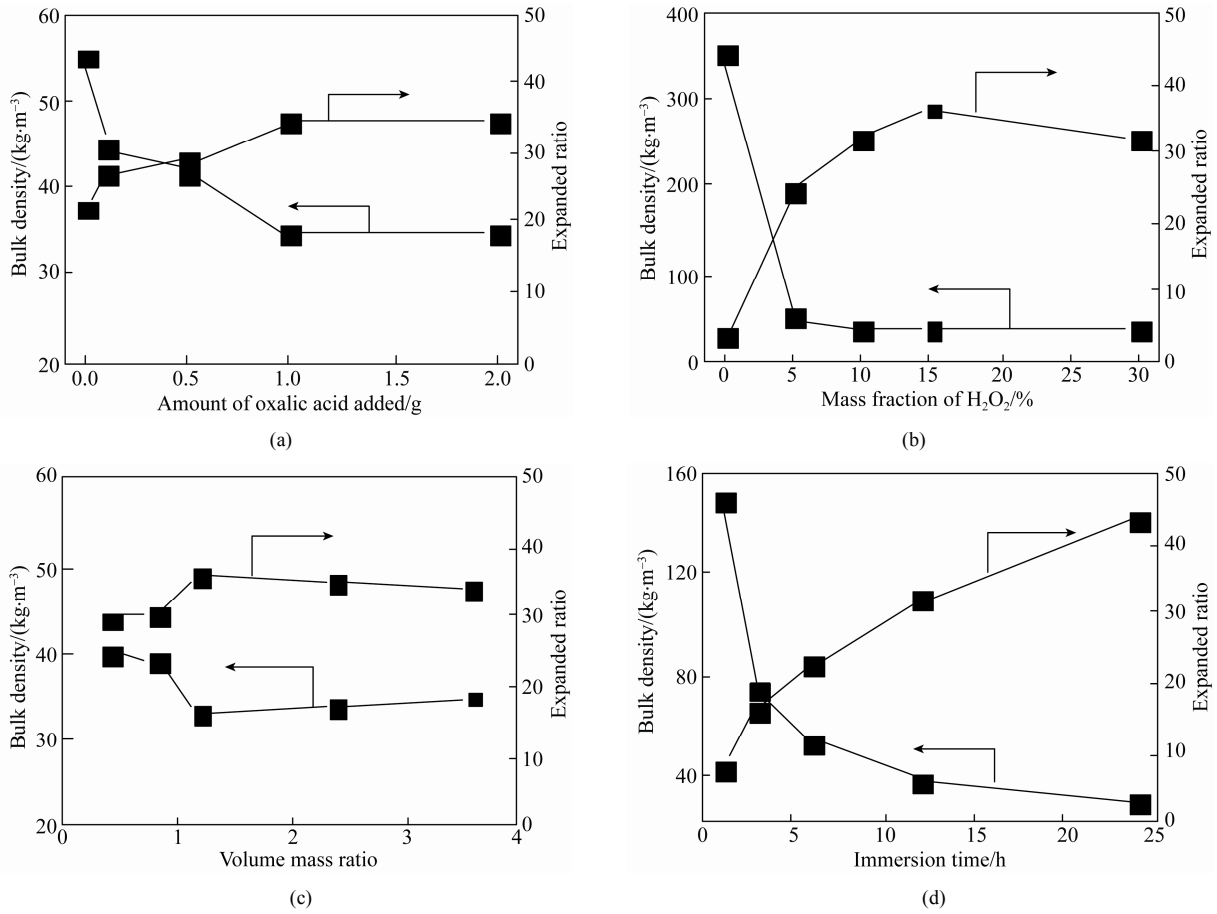


图 5 不同实验条件对 FEV 样品膨胀倍数与堆积密度的影响

Fig. 5 Effect of various experimental conditions on the expansion ratio and the bulk density of samples FEV

表 2 单一加热及其他方法制备的膨胀蛭石的膨胀倍数

Table 2 Expanded ratio of expanded vermiculite prepared by single heating and other methods

Preparation method	Expanded ratio	Reference
Roasting	4.70	[15]
Microwave heating	4.50	[17]
Hydrogen peroxide modification	4.26	[20]
Roasting	20.00	[26]
Roasting	5.70	[30]
Hydrogen peroxide modification and microwave heating	33.10	[14]

低，当双氧水质量分数达到 5%以上时，筛上产率略有降低，在 40%左右变化。由图 6c 可见，样品 FEV 的筛上产率与体积质量比呈负相关，且当体积质量比为 0.4~1.2 时，样品 FEV 的筛上产率下降明显。由图 6d 可见，浸泡时间对样品 FEV 的筛上产率影响较小，当浸泡时间达 6 h 以上时，样品的筛上产率维持在 40%左右基本衡定。

结合图 5 与图 6，各个实验条件下样品 FEV 的筛上产率与膨胀率呈负相关。且各个实验条件对样品柔韧性的影响与膨胀倍数类似，其中双氧水质量分数的影响比草酸添加量更显著。剧烈的膨胀将提高膨胀蛭石颗粒的剥离性，进而降低样品 FEV 颗粒的柔韧性，在机械破碎的过程中更容易剥离和分散，导致筛上产率不断降低。

3 结论

1) 工业蛭石的化学-微波法膨胀其本质是沿蛭石晶层的层间域产生空气隔层后形成孔隙，膨胀倍数高的样品层解更充分，未被剥离的片层厚度更薄，受外力作用下其片层更容易分离后断裂，导致其柔韧性较差。因此样品 FEV 的膨胀倍数与其柔韧性呈负相关。

2) 化学–微波加热法并未对 FEV 结构造成较大破坏，样品依旧存在结构水并保持完整的层状结构。其内部疏松多孔，孔隙分布较均匀，构成狭缝状缝隙的内壁厚度为 50~200 nm。部分膨胀倍数较高、柔韧性较低的膨胀蛭石可基于其层解充分的特性对其进行机械剥离，获得制备蛭石纳米片。

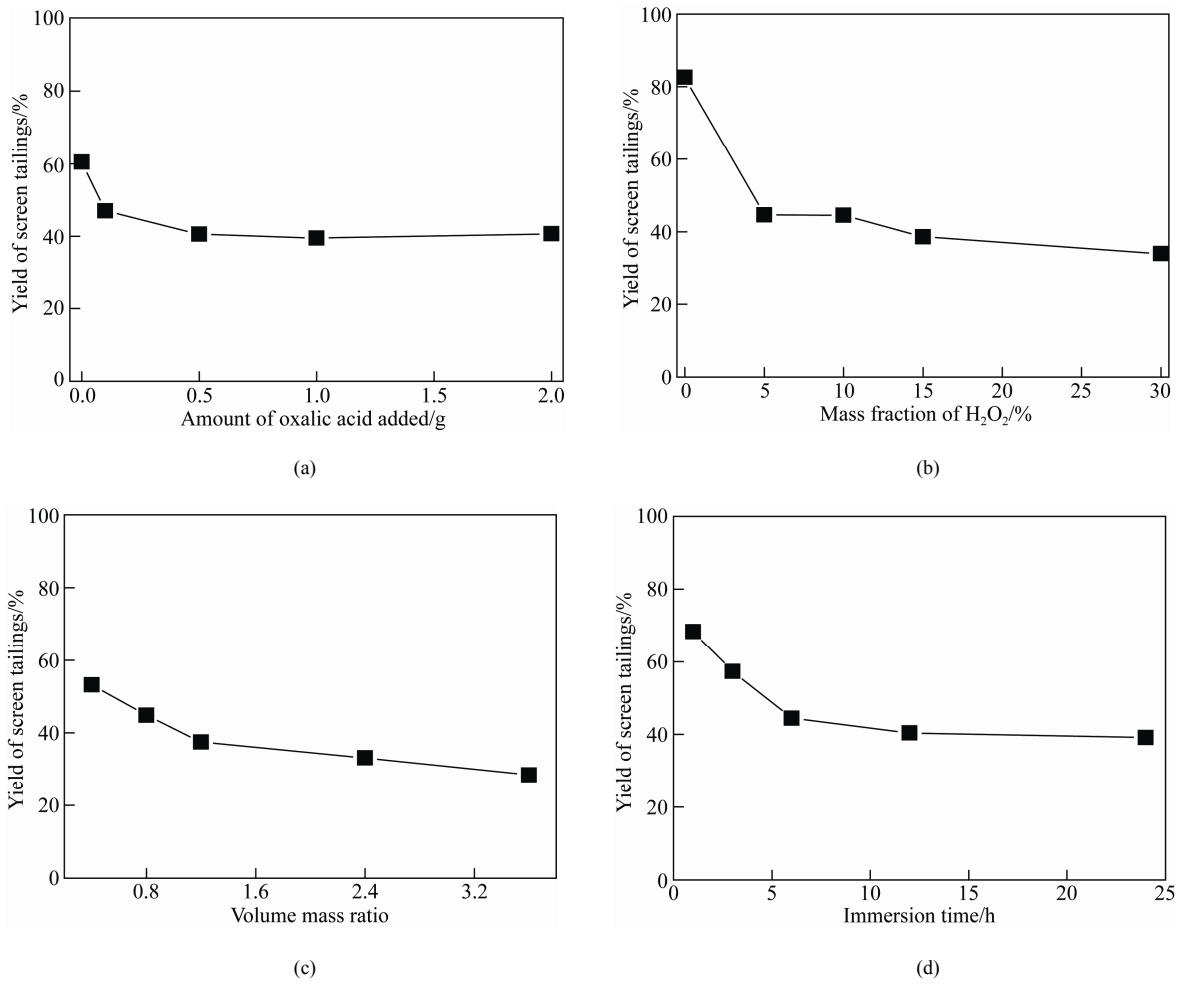


图 6　不同实验条件对样品 FEV 筛上物产率的影响

Fig. 6　Effect of various experimental conditions on screen tailings yield of samples FEV

参考文献:

[1] 许荣旗, 曹俊臣. 且干布拉克蛭石的矿物学研究[J]. 矿物学报, 1993(1): 37–45.
XU Rongqi, CAO Junchen. Acta Mineral Sin (in Chinese), 1993(1): 37–45.

[2] 彭同江, 刘福生. 蛭石的应用矿物学研究与开发利用现状[J]. 中国非金属矿工业导刊, 1997(S1): 26–29.
PENG Tongjiang, LIU Fusheng. Chin Non-metal Min Ind (in Chinese), 1997(S1): 26–29.

[3] 彭同江, 万朴, 潘兆橹, 等. 新疆尉犁蛭石矿中金云母-蛭石的间层结构研究[J]. 岩石矿物学杂志, 1996(3): 59–67.
PENG Tongjiang, WAN Pu, PAN Zhaolu, et al. Acta Petrol Mineral (in Chinese), 1996(3): 59–67.

[4] HILLIER, STEPHEN E M. MARWA, et al. On the mechanism of exfoliation of 'Vermiculite'[J]. Clay Miner, 2013, 48(4): 563–582.

[5] 张焜, 程胜高. 膨胀蛭石的性质及其应用前景[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2007, 26(s1): 584–585.
ZHANG Kun, CHENG Shenggao. Bull Mineral, Petrol Geochem (in Chinese), 2007, 26(s1): 584–585.

[6] 徐庆华. 蛭石环保发泡吸音板[P]. CN Patent, CN103790251A, 2014-05-14.
XU Qinghua. Vermiculite environmental protection foam sound absorption board (in Chinese). CN Patent, CN103790251A, 2014-05-14.

[7] 管登高, 孙遥, 徐冠立, 等. 一种负载纳米 ZnO 的膨胀蛭石吸附材料及其制备方法[P]. CN Patent, CN105327675A, 2016-02-17.
GUAN Denggao, SUN Yao, XU Guanli, et al. The invention relates to an expanded vermiculite adsorption material loaded with nanometer ZnO and its preparation method (in Chinese). CN Patent, CN105327675A, 2016-02-17.

[8] 许庆华, 焦文涛, 蒋文兰, 等. 圆柱形具有净化空气功能的蛭石轻质通孔陶粒[P]. CN Patent, CN106431283A, 2017-02-22.
XU Qinghua, JIAO Wentao, JIANG Wenlan, et al. Vermiculite lightweight porous ceramsite with the function of air purification (in Chinese). CN Patent, CN106431283A, 2017-02-22.

[9] 韩志军, 李文刚. 一种立体绿化生态基质[P]. CN Patent, CN105000971A, 2015-10-28.
HAN Zhijun, LI Wengang. A three-dimensional green ecological matrix (in Chinese). CN Patent, CN105000971A, 2015-10-28.

[10] 石书柳, 廖立兵, 王丽娟. 蛭石的微波膨胀实验[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2015(S1): 45.
SHI Shuliu, LIAO Libing, WANG Lijuan. J Jinlin U: Earth Sci Ed (in Chinese) , 2015(S1): 45.

[11] 胡光锁, 李政一, 朱永平, 等. 高膨胀率高质量蛭石粉体研制

——Ⅱ.蛭石热膨胀过程[J]. 过程工程学报, 2006, 6(5): 763–767.
HU Guangsuo, LI Zhengyi, ZHU Yongping, et al. Chin J Process Eng (in Chinese), 2006, 6(5): 763–767.

[12] LARS O H, 顾频. 大气粉尘和酸雨[J]. 世界科学, 1997(5): 27–29.
LARS O H, GU Pin. World Sci (in Chinese), 1997(5): 27–29.

[13] NAGAHATA R, TAKEUCHI K. Encouragements for the use of microwaves in industrial chemistry[J]. Chem Record, 2019, 19(1): 51–64.

[14] 苗朝. 柔性膨胀蛭石节能材料的制备与研究[D]. 西南科技大学, 2010.
MIAO Zhao. Preparation and research of flexible expanded vermiculite energy saving material (in Chinese, dissertation). Mianyang: Southwest University of Science and Technology, 2010.

[15] 霍小旭, 王丽娟, 廖立兵. 新疆尉犁蛭石高温膨胀试验研究[J]. 矿物岩石, 2011, 31(1): 1–4.
HUO Xiaoxu, WANG Lijuan, LIAO Libing. J Miner Petrol (in Chinese), 2011, 31(1): 1–4.

[16] OBUT A, GIRGIN I, YÖRÜKO'LU A. Microwave exfoliation of vermiculite and phlogopite[J]. Clays Clay Miner, 2003, 51(4): 452–456.

[17] 苗朝, 彭同江. 微波法制备膨胀蛭石的试验研究[J]. 非金属矿, 2010, 33(3): 12–15.
MIAO Zhao, PENG Tongjiang. Non-Metal Min (in Chinese), 2010, 33(3): 12–15.

[18] 郑天亮, 宇波. 蛭石改性提高蛭石膨胀度的研究[J]. 矿产综合利用, 2004(2): 3–6.
ZHENG Tianliang, YU Bo. Multipurpose Util Miner Resour (in Chinese), 2004(2): 3–6.

[19] 惠剑, 王礼君, 徐婷婷, 等. 微爆法解离蛭石的工艺可行性研究[J]. 非金属矿, 2015, 38(1): 52–54.
HUI Jian, WANG Lijun, XU Tingting, et al. Non-Metal Min (in Chinese), 2015, 38(1): 52–54.

[20] 赵双盟, 彭同江, 孙红娟. 新疆尉犁蛭石矿工业蛭石化学法膨胀的实验研究[J]. 矿物岩石, 2006, 26(2): 30–34.
ZHAO Shuangmeng, PENG Tongjiang, SUN Hongjuan. J Miner Petrol (in Chinese), 2006, 26(2): 30–34.

[21] OBUT A, GIRGIN İ. Hydrogen peroxide exfoliation of vermiculite and phlogopite[J]. Miner Eng, 2002, 15(9): 683–687.

[22] 中国国家标准化管理委员会. JC /T 441-2009 膨胀蛭石. 北京: 中国建材出版社, 2009.

[23] FERDOUSI B N, ISLAM M M, OKAJIMA T, et al. Electroreduction of peroxycitric acid coexisting with hydrogen peroxide in aqueous solution[J]. Electrochim Acta, 2008, 53(2): 968–974.

[24] NA Z, QIAN X. Influence of organic acid on thermal hazard of hydrogen peroxide[J]. Pro Eng, 2012, 45(2): 526–532.

[25] 霍小旭, 王丽娟, 廖立兵. 新疆尉犁蛭石的物相组成[J]. 硅酸盐学报, 2011, 39(9): 1517–1522.
HUO Xiaoxu, WANG Lijuan, LIAO Libing. J Chin Ceram Soc, 2011, 39(9): 1517–1522.

[26] 胡光锁, 朱永平, 李政一, 等. 高膨胀率高质量蛭石粉体研制-I. 热膨胀机理初探[J]. 过程工程学报, 2006, 6(2): 205–209.
HU Guangsuo, ZHU Yongping, LI Zhengyi, et al. Chin J Proc Eng (in Chinese), 2006, 6(2): 205–209.

[27] 董发勤. 应用矿物学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
DONG Faqin. Applied Mineralogy (in Chinese). Beijing: China Higher Education Press, 2015.

[28] 贺壹城, 钱玉鹏, 高惠民, 等. 物理法对蛭石膨胀特性及脆性的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2): 564–569.
HE Yicheng, QIAN Yupeng, GAO Huimin, et al. Bull Chin Ceram Soc (in Chinese), 2017, 36(2): 564–569.

[29] 彭同江, 万朴, 潘兆橹, 等. 新疆尉犁蛭石矿金云母-蛭石间层矿物的热分析谱研究[J]. 西南科技大学学报, 1995(4): 16–22.
PENG Tongjiang, WAN Pu, PAN Zhaolu, et al. J Southwest Univ Sci Technol (in Chinese), 1995(4): 16–22.

[30] 张红林, 南瑶, 刘平军, 等. 蛭石膨胀性能影响因素试验研究[J]. 非金属矿, 2019, 42(3): 69–71.
ZHANG Honglin, NAN Yao, LIU Pingjun, et al. Non-Metal Min (in Chinese), 2019, 42(3): 69–71.