

战略性非金属矿产

# 工业蛭石的矿物学属性及在“双碳”战略中的作用

彭同江<sup>1,2,3</sup>, 孙红娟<sup>2,3</sup>, 罗利明<sup>2,3,4</sup>, 张宝述<sup>2</sup>

1. 西南科技大学 分析测试中心, 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 固体废物处理与资源化教育部重点实验室, 四川 绵阳 621010;
4. 西南科技大学 核废物与环境安全国防重点学科实验室, 四川 绵阳 621010

中图分类号: TD91; TD985 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2021)06-0001-08  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2021.06.001

**摘要** 基于工业蛭石的化学成分、矿物组成及热学与阳离子交换性等矿物学属性,重点讨论了灼烧膨胀法、插层膨胀法和插层-微波膨胀法对国内不同产地膨胀蛭石膨胀率的影响。结果表明,工业蛭石的矿物组成以金(黑)云母-蛭石间层矿物为主,含少量蛭石或金云母;工业蛭石由于结构中含有蛭石晶层而具有良好的加热或插层膨胀性与阳离子交换性;相对于灼烧加热膨胀法,采用微波膨胀法、插层膨胀法和插层-微波膨胀法可制备结构层不被破坏的高强度柔韧性膨胀蛭石。采用复合插层-微波膨胀法制备的高膨胀率膨胀蛭石为长条蠕虫状多孔轻质材料,膨胀倍数高达36倍,堆积密度仅为 $0.033\text{ g/cm}^3$ ,具有优异的轻质、保温和绝热性能。工业蛭石矿产具备战略性新兴产业的许多特征,具有节能降耗和控制能耗强度并助力碳减排碳达峰的功能,在“双碳”战略和环保节能领域具有重要的作用。

**关键词** 工业蛭石;阳离子交换容量;膨胀性能;膨胀蛭石;节能降碳;双碳

## 1 引言

工业蛭石的产地主要在美国、南非、中国和俄罗斯等<sup>[1]</sup>,其中美国约2/3的蛭石产于蒙大拿州利比(Libby)蛭石矿,南非的主要产地位于德兰士瓦省东北部的帕拉博拉(Palabora)蛭石矿。

工业蛭石矿产被认为是中国有较好资源远景和潜在优势的非金属矿产之一,主要分布在新疆、内蒙古、陕西、河南、河北、湖北、辽宁、山西、山东等地,已发现蛭石矿床、矿点100余处。新疆尉犁且干布拉克蛭石矿床是目前中国发现的最大蛭石矿床,其储量为世界第二。较大的蛭石矿床还有河北灵寿、河南灵宝蛭石矿床等<sup>[2]</sup>。

工业蛭石具有良好的加热膨胀性、阳离子交换性和吸附性;加热膨胀后的膨胀蛭石具有松散密度低<sup>[3]</sup>、化学性质稳定、保温、隔热、隔音、抗菌、耐冻等优良性能<sup>[4-5]</sup>。目前,国内外对于工业蛭石的应用主要有3个领域:(1)将蛭石直接用于农业和园艺领域,主要用于土壤改良、储水保肥、育种育秧、无土栽培等方面,主要利用蛭石良好的阳离子交换性、吸附性、吸水性、微碱性及富含K、Mg、Fe等矿物质元素;(2)利用膨胀蛭

石的轻质、多孔和保温隔热性能,主要用于轻质建材、保温隔热材料、隔音吸声材料、土壤透气性改良等方面<sup>[6]</sup>;(3)在环保领域方面,利用蛭石的阳离子交换性能和吸附性能处理含重金属和有机物废水、废液等<sup>[7-8]</sup>,也可用于回收重金属离子和贵金属离子等。因此,工业蛭石在建筑、电力、石油、化工、冶金、农业、环保、催化剂及造船等领域具有重要和广泛的用途。

本文从工业蛭石的矿物学属性出发,基于工业蛭石的成分、结构和理化性能特点,着重讨论工业蛭石的阳离子交换性和加热膨胀性,以及高膨胀率膨胀蛭石的制备技术,并对工业蛭石作为战略性新兴产业的特征进行了讨论,以为工业蛭石的矿物学研究、高新材料研发和应用,以及将其划归为战略非金属矿产提供依据。

## 2 工业蛭石的矿物特征

矿物学意义上的蛭石作为一个矿物族是指结构层为2:1型、层间域具有水分子和可交换性阳离子的三八面体或二八面体铝硅酸盐,单位化学式的层电荷 $x = 0.6 \sim 0.9$ ,单位晶层的厚度为 $\pm 1.45\text{ nm}$ 。

工业上通常所指的蛭石是一组灼烧时能产生剧烈体积膨胀的类云母层状硅酸盐矿物,包括矿物学意义的蛭石,以及由金云母、黑云母和绿泥石晶层与蛭石晶层形成的规则或不规则间层矿物,它们的共同特征是在结构中均含有蛭石晶层。由金云母、黑云母和绿泥石晶层与蛭石晶层形成的1:1规则间层矿物分别称为水金云母<sup>[9]</sup>、水黑云母和高电荷柯绿泥石<sup>[10]</sup>。其中,蛭石晶层的层间物为水化阳离子层,金云母和黑云母晶层的层间物为阳离子层,而绿泥石晶层的层间物为氢氧化物层。

## 2.1 化学成分

蛭石的晶体化学式为  $A_x \cdot nH_2O \{ (Mg, Fe)_2 [ (Si, Al)_4 O_{10} ] (OH)_2 \}$ , 其中:A 为层间可交换性阳离子,常

见的有  $Ca^{2+}$ 、 $Na^+$ 、 $Mg^{2+}$ 、 $K^+$  等; $x$  为层电荷数。

工业蛭石通常是由母岩中的金云母(或黑云母)蚀变而成的,在化学组成上具有显著的继承性。由表1可以看出,不同产地的工业蛭石样品的化学成分有较大的差别。新疆尉犁的工业蛭石样品(Wvg-1和Wvg-2)的MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O含量较高,而Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和CaO的含量较低;河北灵寿工业蛭石样品(HL-1和HL-2)的MgO、Na<sub>2</sub>O、K<sub>2</sub>O含量较低,而Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和CaO的含量较高;内蒙古文圪气工业蛭石样品(NM-1)除SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>最低、TiO<sub>2</sub>最高外,其他部分成分与新疆尉犁的样品相近(如K<sub>2</sub>O),部分成分与河北灵寿的样品相近(如TFe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO、MnO和Na<sub>2</sub>O)。化学成分的差异与产地和工业蛭石中水化产物的物相特征相关。

表1 不同产地工业蛭石样品不考虑烧失量归一后的化学成分分析结果

/%

Table 1 The chemical composition analysis results of industrial vermiculite samples from different origins without considering the loss on ignition after normalization

样品	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	MnO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	总和
Wvg-1	43.84	1.23	13.45	5.40	0.51	27.15	0.02	1.11	7.28	99.99
Wvg-2	42.57	1.39	13.67	5.92	0.57	27.37	0.04	1.54	6.93	100.00
Wv-14	42.63	1.57	13.82	6.41	1.52	26.89	0.05	0.58	6.14	99.61
NM-1	41.51	1.93	12.61	12.46	2.08	21.88	0.14	0.16	7.25	100.02
HL-1	44.26	1.15	15.54	14.68	2.91	16.17	0.14	0.56	4.59	100.00
HL-2	42.47	1.16	16.80	13.03	3.57	20.12	0.10	0.12	2.63	100.00

对新疆尉犁蛭石矿产出的系列金云母-蛭石间层矿物与多个金云母样品的化学成分进行比较,发现金云母样品的SiO<sub>2</sub>、K<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、TiO<sub>2</sub>含量较高,而MgO、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O含量较低。表明金云母蚀变成金云母-蛭石间层矿物的过程是一个析出K<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、FeO、TiO<sub>2</sub>而使SiO<sub>2</sub>、CaO、Na<sub>2</sub>O、MgO富集的过程,并且这个过程是在富H<sub>2</sub>O的氧化条件下发生的<sup>[11-12]</sup>。

## 2.2 物相组成

图1为新疆尉犁(Wvg-1)、内蒙古文圪气(NM-1)和河北灵寿(HL-1、HL-2)工业蛭石样品的XRD图。

由图1a可以看出,新疆Wvg-1样品的主要矿物组成有金云母,特征衍射峰 $d/\text{Å}$ 为10.1509、3.3797、2.5343、2.0745、1.6835等和水金云母的衍射峰 $d/\text{Å}$ 为12.2238、8.5643、4.9904、3.5310、3.1553和2.0715等都很强,表明Wvg-1是由金云母和金云母-蛭石间层矿物组成的。

由图1b可以看出,内蒙古NM-1样品的主要矿

物组成有蛭石,特征衍射峰 $d/\text{Å}$ 为14.4291和4.9403;金云母,特征衍射峰 $d/\text{Å}$ 为10.0944、3.3682、2.5214、2.0210和1.6832等和金云母-蛭石间层矿物,特征衍射峰 $d/\text{Å}$ 为12.0314、8.4272和3.1012等。

由图1c和图1d可知,河北HL-1样品的主要组成矿物是金云母,特征衍射峰 $d/\text{Å}$ 为10.0470、3.3595、2.5213、2.0187和1.6822等;含蛭石,特征衍射峰 $d/\text{Å}$ 为14.8791、4.9845和3.7381等;含少量金云母-蛭石间层矿物,特征衍射峰 $d/\text{Å}$ 为12.8142、8.3949和3.5377等。而HL-2样品中矿物组成种类相同,但蛭石的含量较金云母含量高得多。

由以上分析可知,三地蛭石样品中,蛭石含量从高到低依次为河北、内蒙古、新疆,金云母-蛭石间层矿物含量从高到低依次为新疆、内蒙古、河北。由于金云母晶层结构的热稳定性高于蛭石晶层<sup>[13]</sup>,因此,在灼烧过程中获得的膨胀蛭石,新疆的强度最高,粉化率最低;而河北的强度最低,粉化率最高;内蒙古的介于二者之间。

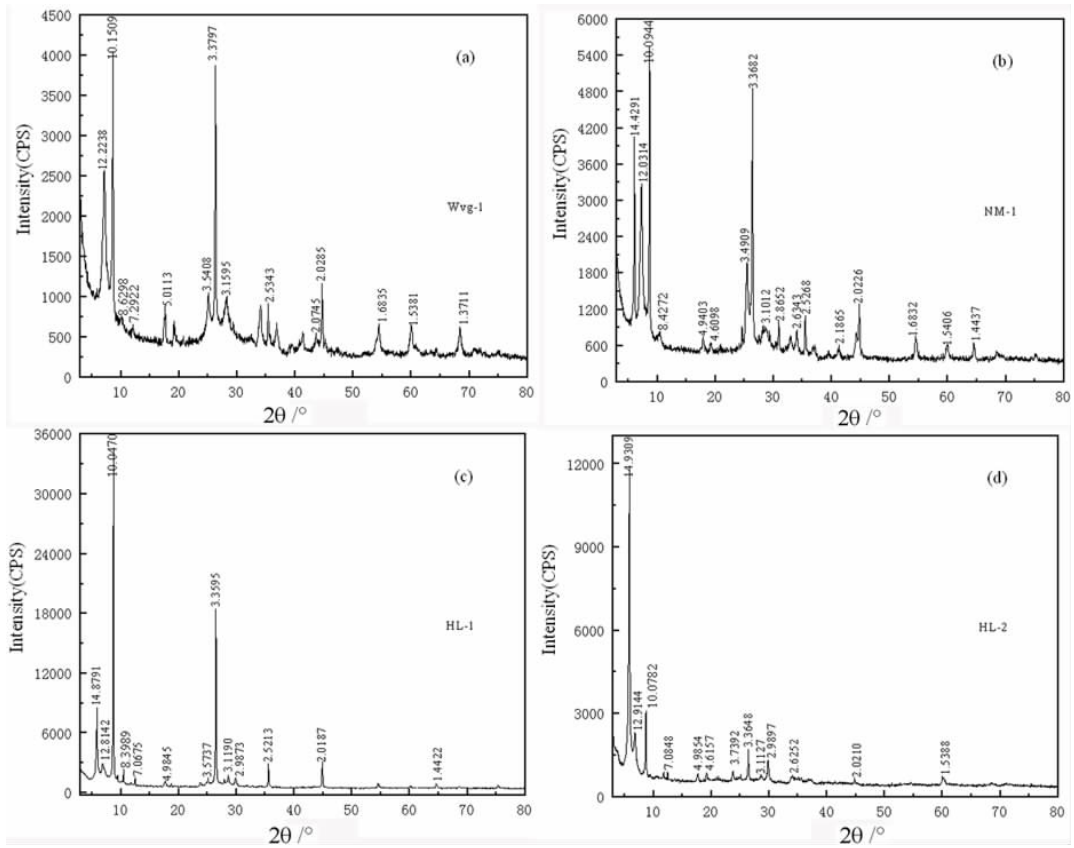


图 1 不同产地工业蛭石样品的 XRD 图  
 Fig. 1 XRD patterns of industrial vermiculite samples from different origins

2.3 热学性能

表 2 和表 3 是新疆尉犁工业蛭石 (Wvg - 1 和 Wv - 14) 样品的差热 (DTA) 和热失重 (TG) 分析数据。由表 2 和表 3 可以看出,工业蛭石结构中水化阳离子类型不同,其失去层间水的温度也不同。Na 含量高的蛭石 (Wvg - 1) 样品层间水失去温度低,两个失去层间水的吸热谷分别在 80.1 °C 和 122.9 °C ;Ca 含量高的蛭石 (Wv - 14) 样品层间水失去的温度高,两个失去层间水的吸热谷分别在 109.8 °C 和 213.9 °C。第一个吸热谷是由于脱去吸附水和不与水化阳离子接触的水分子而引起的,第二个吸热谷是脱去与水化阳离子直接接触的水分子而引起的<sup>[13]</sup>。而样品失去结构水和结晶为顽火辉石热效应的温度相近,其中吸热谷分别在 856 °C 和 853 °C ,放热峰分别在 881 °C 和 879.8 °C ,表明结构层的破坏温度受层间水化阳离子类型的影响较

小。两个样品失去结构水的失重率相近,分别为 3.5% 和 4.2% ,但总失重率两个样品相差较大,分别为 10.3% 和 16.3% ,表明 Ca 含量高的蛭石 (Wv - 14) 样品较 Na 含量高的蛭石 (Wvg - 1) 样品含有更多的层间水。失去层间水的吸热谷温度和失水率的数据表明, Ca<sup>2+</sup> 比 Na<sup>+</sup> 具有更高的水合能力。

表 2 新疆尉犁工业蛭石样品差热 (DTA) 分析的主要热效应及对应温度  
 Table 2 The main thermal effects and corresponding temperatures of differential thermal (DTA) analysis of industrial vermiculite samples from Yuli, Xinjiang

样品	热效应及其对应的温度/°C			
	吸热谷	吸热谷	吸热谷	放热峰
Wvg - 1	80.1	122.9	856.0	881.0
Wv - 14	109.8	213.9	853.0	879.8

表 3 新疆尉犁工业蛭石样品热失重 (TG) 率

Table 3 Thermal weight loss (TG) rate of industrial vermiculite samples from Yuli, Xinjiang

样品	室温 ~ 70 °C	70 ~ 100 °C	100 ~ 200 °C	200 ~ 300 °C	300 ~ 555 °C	555 ~ 1 000 °C	室温 ~ 1 000 °C
Wvg - 1	1.6	1.9	2.4	0.3	0.6	3.5	10.3
Wv - 14	1.8	3.3	5.0	1.4	0.6	4.2	16.3

工业蛭石最重要的热学性能是灼烧时在垂直于层

的方向上产生急剧膨胀。表 2 和表 3 的热分析数据与

前期研究成果<sup>[14]</sup>表明,当工业蛭石的灼烧温度低于 800 ~ 850 ℃ 时,膨胀后的膨胀蛭石结构层不会破坏,并保持结构层的强度,形成韧性强的膨胀蛭石。采用微波法<sup>[3]</sup>或微波化学法<sup>[15]</sup>膨胀时热处理温度一般低于 300 ℃,可制备膨胀率高且韧性强的膨胀蛭石。膨胀蛭石具有松散密度低、化学性质稳定、保温、隔热、隔音、抗菌、耐冻等优良性能,在建筑、电力、石油、化工、冶金和造船等行业具有广阔的用途。

### 2.4 阳离子交换性能

表 4 为新疆尉犁蛭石样品(Wvg-1 和 Wv-14)的主要可交换性阳离子及阳离子交换容量(CEC)。可以看出,样品中的可交换阳离子主要是 Na<sup>+</sup> 和 Ca<sup>2+</sup>,其次是 Mg<sup>2+</sup> 和 K<sup>+</sup>,阳离子交换总量分别是 69.08 mmol/100 g 和 80.04 mmol/100 g。前期的系统研究表明<sup>[16-17]</sup>,阳离子交换容量的大小与结构中蛭石晶层的含量有关。金云母晶层(或金云母)含量高的样品,阳离子交换容量低;反之,样品的阳离子交换容量高。对于主要含金云母-蛭石间层矿物的工业蛭石样品,其阳离子交换容量只相当于矿物学意义上“蛭石”(140 ~ 240 mmol/100 g)的 1/2 左右;工业蛭石样品的阳离子交换容量大小随蛭石晶层的层电荷数的增大而增大,并与样品中 K<sub>2</sub>O 和 Na<sub>2</sub>O + CaO 含量之间具有很好的线性关系,其中与 K<sub>2</sub>O 含量呈负相关关系,与 (Na<sub>2</sub>O + CaO) 含量呈正相关关系。

表 4 新疆尉犁蛭石样品(Wvg-1 和 Wv-14)的阳离子交换容量 / (mmol · 100 g<sup>-1</sup>)

Table 4 The cation exchange capacity of vermiculite samples (Wvg-1 and Wv-14) from Yuli, Xinjiang

样品	K	Na	Ca	Mg	CEC
Wvg-1	2.420	39.690	20.614	6.353	69.08
Wv-14	1.890	9.421	60.983	7.743	80.04

注:Ca<sup>2+</sup>、Mg<sup>2+</sup> 的阳离子交换分量折算为一价阳离子。

工业蛭石相对于蒙脱石不仅层电荷数高,相对的阳离子交换容量大,而且对交换吸附的重金属阳离子固定和阻滞作用强,吸附后的蛭石粉末较蒙脱石更易脱水和回收。这些属性可用于废水处理、土壤修复、饲料除霉和环境净化等领域。

### 3 高膨胀率膨胀蛭石的加工技术

图 2 为新疆尉犁工业蛭石样品(V)采用箱式电炉灼烧加热后膨胀倍数与加热温度和时间的关系。可以看出,随加热时间的增加,膨胀倍数逐渐增加,至 70 s 时膨胀倍数达到最大值;随瞬时加热温度的增加,膨胀倍数也逐渐增加,至 800 ℃ 和 900 ℃ 时增加幅度明显,最大膨胀倍数达到 4.54 倍,对应膨胀蛭石的堆积密度为 0.150 g/cm<sup>3</sup>。

图 3 为新疆尉犁工业蛭石样品(V)微波炉加热后膨胀倍数与微波功率和时间的关系。可以看出,随加热时间的增加,膨胀倍数逐渐增加,多在 90 s 左右时膨胀倍数达到最大值;随微波功率的增加,膨胀倍数也逐渐增加,微波功率高于 320 W 时增加幅度显著,最大膨胀倍数达到 4.54 倍,对应膨胀蛭石的堆积密度为 0.150 g/cm<sup>3</sup>。

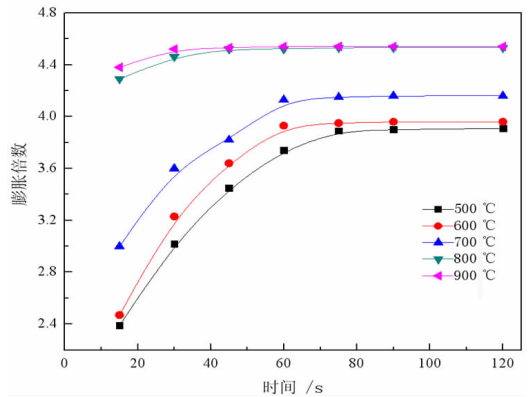


图 2 灼烧加热法膨胀倍数与加热温度和时间的关系  
Fig. 2 The relationship between the expansion multiple of the burning heating method with the heating temperature and time

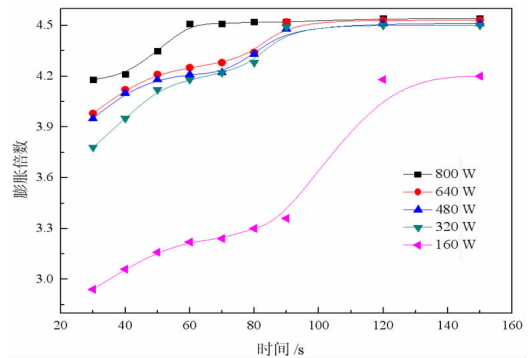


图 3 微波加热法膨胀倍数与微波功率和时间的关系  
Fig. 3 The relationship between expansion multiple of microwave heating method with microwave power and time

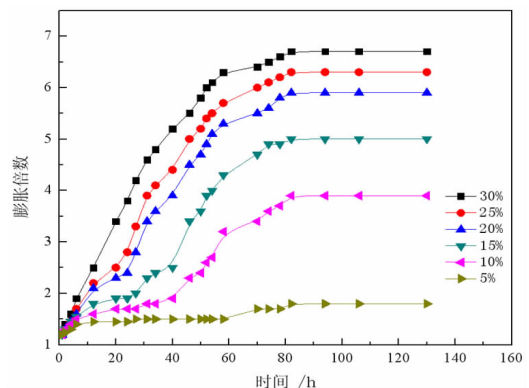


图 4 插层法膨胀倍数与双氧水质量浓度和时间的关系  
Fig. 4 The relationship between the expansion multiple of the intercalation method with the mass concentration and time of hydrogen peroxide

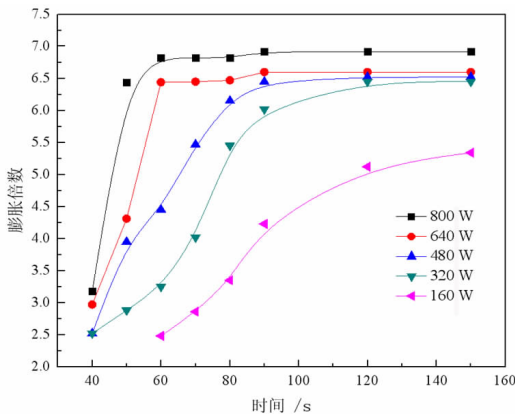


图 5 插层微波法膨胀倍数与双氧水作用时间和微波功率的关系

Fig. 5 The relationship between the expansion multiple of intercalation microwave method with the action time of hydrogen peroxide and microwave power

图 4 为新疆尉犁工业蛭石样品(V)采用静态插层膨胀法的膨胀倍数与双氧水质量浓度和时间的关系。可以看出,随插层膨胀时间的增加,膨胀倍数逐渐增加,至 90 s 左右时膨胀倍数达到最大值;随双氧水质量浓度的增加,膨胀倍数也逐渐增加,最大膨胀倍数达到 6.7 倍,对应膨胀蛭石的堆积密度为 0.112 g/cm<sup>3</sup>。

图 5 为新疆尉犁工业蛭石样品(V)采用双氧水(质量浓度 30%)插层微波膨胀法的膨胀倍数与双氧水质量浓度和时间的关系。可以看出,随微波时间的增加,膨胀倍数逐渐增加,至 90 s 左右时膨胀倍数基本达到最大值;随微波功率增加,膨胀倍数逐渐增加,最大膨胀倍数达到 6.92 倍,对应膨胀蛭石的堆积密度为 0.105 g/cm<sup>3</sup>。

表 5 是依照国家建材行业标准 JC/T 441—2009 测定的不同片径工业蛭石采用不同膨胀方法获得的膨胀蛭石的导热系数。可以看出,采用不同的膨胀方法,片径的变化与膨胀蛭石的导热系数的变化趋势是一致的。对于不同的膨胀方法,插层微波法膨胀蛭石的膨胀倍数最高,容重最小,因而导热系数最低。

表 5 不同片径工业蛭石不同膨胀方法获得的膨胀蛭石样品的导热系数

Table 5 Thermal conductivity of expanded vermiculite samples obtained by different expansion methods of industrial vermiculite with different sheet diameters

片径/mm	不同膨胀方法的膨胀蛭石样品的导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )			
	灼烧加热法	微波法	插层法	插层微波法
0.3~1	0.115	0.112	0.087	0.090
1~2	-	0.092	-	0.054
2~4	0.096	0.089	0.076	0.063
4~8	0.091	0.085	0.074	0.061

图 6 和图 7 为采用复合插层剂插层法和插层微波法时有机酸(草酸)和双氧水添加量对样品膨胀倍数

的影响。由图 6 可见,工业蛭石样品经相同质量浓度的双氧水与不同添加量草酸组成的复合插层剂插层作用后获得的 P-O 系列样品(编号中 O 后面的数字是草酸添加量,H 后面的数字是双氧水添加量,单位:g),它们的膨胀率随有机酸用量的增加而逐渐增大,最大膨胀倍数达到 15.38 倍;在有机酸添加量大于 0.5 g 后 P-O 样品的膨胀率基本不变。由图 7 可知,工业蛭石样品经相同浓度的草酸与不同添加量的双氧水组成的复合插层剂插层作用后获得的 P-O 系列样品,它们的膨胀率随双氧水用量的增加逐渐增大且效果显著,用量最大时的膨胀倍数达到 24.0 倍。显然,与单一插层剂双氧水的膨胀倍数(6.7 倍)相比(图 4),复合插层剂的膨胀效果非常显著。由图 6 和图 7 还可看出,对 P-O 系列复合插层剂插层处理后的样品再经微波处理后获得的 H-O 系列样品(编号中 O 后面的数字是草酸添加量,H 后面的数字是双氧水添加量,单位:g),它们的膨胀倍数相对于对应的 P-O 系列的膨胀率有显著的提升,最大膨胀率分别达到 34.72 倍(图 6)和 36.23 倍(图 7),堆积密度分别为 0.035 g/cm<sup>3</sup> 和 0.033 g/cm<sup>3</sup>,较单一插层剂的插层微波法(图 5)的膨胀倍数(6.7 倍)增加了约 30 倍。

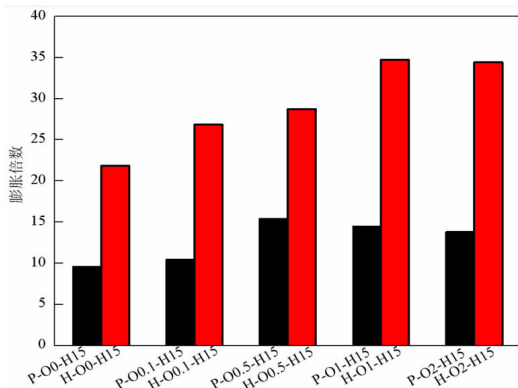


图 6 有机酸添加量对样品膨胀率的影响  
Fig. 6 The influence of the amount of organic acid added on the expansion multiple of the sample

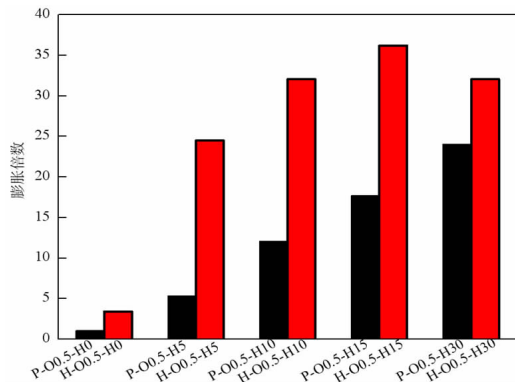


图 7 双氧水质量浓度对样品膨胀率的影响  
Fig. 7 The influence of the concentration of hydrogen peroxide on the expansion multiple of the sample

图8和图9分别为采用复合插层—微波膨胀法获得的高膨胀率膨胀蛭石的外观形貌和扫描电镜照片。可以看出,工业蛭石原片厚度在0.5~1.0 mm,经复合插层和微波膨胀处理后的膨胀蛭石呈长条蠕虫状多孔材料,长度多在20~40 mm;扫描电镜下,可见膨胀蛭石沿层间域膨胀或剥离,显示出膨胀、鼓大和剥离与疏松多孔的特征。



图8 高膨胀率膨胀蛭石的照片  
Fig. 8 Photo of high expansion multiple expanded vermiculite Fig

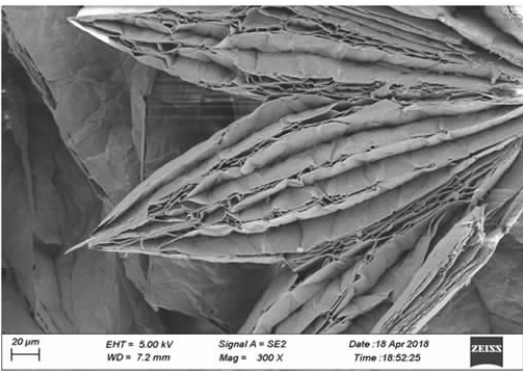


图9 高膨胀率膨胀蛭石的SEM照片  
Fig. 9 SEM photo of expanded vermiculite with high expansion multiple

#### 4 工业蛭石矿产的重要性及在“双碳”战略和节能降耗中的作用

工业蛭石精片可以不经热处理加工而直接应用,也可以经膨胀<sup>[5, 15]</sup>、插层改性<sup>[18-19]</sup>、复合<sup>[20]</sup>和纳米剥离<sup>[21]</sup>后加以利用。

膨胀蛭石所具有的细小隔层空间或空洞使其导热系数和松散密度均大大减小,并具有良好的保温、隔热、绝缘、阻燃性能等,同时膨胀蛭石化学性质稳定,具有抗菌和耐冷性能等。因此,膨胀蛭石可广泛用作工业和民用保温隔热和防火材料等。

我国建筑节能和工业节能问题十分突出,如建筑能耗是西方发达国家的2~3倍。尽管近年来在建筑保温材料中使用了外墙保温材料,但主要是有机保温材料,在价格、防火与耐久性等方面仍存在较大的局限

性。

在工业和民用建筑设施中都涉及保温与节能。在工业节能中只有使用耐较高温度的无机保温材料才能达到要求,在民用供暖设施中也需要耐高温和耐久性好的无机保温材料。在非金属矿产中只有工业蛭石和珍珠岩经加热膨胀后可用作耐较高温度的无机保温材料,但生产膨胀珍珠岩的温度高达1 200℃,远高于生产膨胀蛭石的温度。同时,其他无机保温材料如矿棉、玻璃纤维、泡沫玻璃等,仍需要高温生产过程,能耗高,碳排放量大。

节能降耗是《国家中长期科学和技术发展规划纲要》(2006—2020年)中涉及若干重点领域及其优先主题的共性问题之一,在建筑节能与绿色建筑这一重点领域和优先主题中强调,要重点研究开发节能建材与绿色建材及建筑节能技术标准。坚持节能优先,降低能耗。

除在工业和民用设施作保温材料外,在浇铸钢锭时也用膨胀蛭石对钢水液面保温,使钢材合格率提高,钢材总成本减少。由于膨胀蛭石能起到使钢水缓慢冷却和除去杂质的作用,因而能显著改善钢的显微结构,并使优质钢产量增加。

高膨胀率膨胀蛭石作为高性能无机非金属保温材料不仅在生产中节能降耗和减少碳排放,而且作为无机保温材料广泛使用可大大减少工业和民用设施的能量耗散,进而达到节能和降碳的目的。大力推广应用高膨胀率膨胀蛭石,不仅对于我国建筑节能和工业节能具有重要的意义,而且对于助力碳减排和碳达峰具有重要的意义。

战略性矿产是指对国家经济、国防和战略性新兴产业发展至关重要的矿产资源<sup>[22]</sup>。工业蛭石矿产具备了战略性新兴产业矿产的许多特征,涉及新材料、节能环保等新兴产业<sup>[14]</sup>。工业蛭石所具有的优异加热膨胀性和阳离子交换性等,符合《中国制造2025》重点领域技术路线图提出的“先进基础材料是指具有优异性能、量大面广且‘一材多用’的新材料”的特征,对于“先进建筑材料”“环境友好性非金属矿物功能材料”和“重大工程用先进基础材料”领域具有重要作用。工业蛭石加工为膨胀蛭石及制品后,可广泛用作工业和民用设施的保温隔热材料,具有节能降耗、控制能耗强度并助力碳减排碳达峰的功能,对于构建绿色建筑与节能降碳工程,促进国家碳达峰、碳中和的重大战略决策的实施具有重要的意义。因此,工业蛭石对发展国家战略性新兴产业和实现国家碳达峰、碳中和的重大战略的实施具有重要的支撑作用,可被看作为战略性非金属矿产。

#### 5 结论

(1)不同产地的工业蛭石的矿物组成可包括水化

金(黑)云母、蛭石或柯绿泥石和蛭石,常以金(黑)云母-蛭石间层矿物为主,并非矿物学意义上蛭石的含量占主导地位。

(2)工业蛭石由于结构中含有蛭石晶层而具有良好的加热或插层膨胀性与阳离子交换性,这是制备节能保温材料和环保吸附材料的矿物学依据。

(3)相对于灼烧加热膨胀法,采用微波膨胀法、插层膨胀法和插层-微波膨胀法可制备结构层不被破坏的高强度柔韧性膨胀蛭石,当采用单一插层剂-微波法时,膨胀倍数高达6.92倍,堆积密度仅为 $0.105\text{ g/cm}^3$ ,导热系数为 $0.054\text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ ,而采用复合插层-微波膨胀法可制备高膨胀率膨胀蛭石,可获得呈长条蠕虫状多孔轻质材料,膨胀倍数高达36倍,堆积密度仅为 $0.033\text{ g/cm}^3$ ,具有更加优异的轻质、保温和绝热性能。

(4)工业蛭石矿产具备战略性新兴产业的许多特征,具有节能降耗和控制能耗强度并助力碳减排碳达峰的功能,在“双碳”战略和环保节能具有重要的作用。

#### 参考文献:

- [1] 田煦,周开灿,文化川. 非金属矿产地质学[M]. 武汉:武汉工业大学出版社,1989.
- [2] 胡兆扬,于延棠,徐立铨. 非金属矿工业手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1992.
- [3] 王丽娟. 蛭石结构改性,有机插层及微波膨胀研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2014.
- [4] 王正洲,杨婷. 膨胀蛭石包覆聚苯乙烯发泡颗粒/水泥复合泡沫材料的制备及性能[J]. 高等学校化学学报,2018,39(5):268-274.
- [5] 刘福生,彭同江,张宝述. 膨胀蛭石的利用及其新进展[J]. 非金属矿,2001,24(4):5-7.
- [6] RASHAD, ALAA M. Vermiculite as a construction material - A short guide for Civil Engineer[J]. Construction & Building Materials, 2016, 125: 53-62.
- [7] FREITAS E, ALMEIDA H, VIEIRA M. Binary adsorption of zinc and copper on expanded vermiculite using a fixed bed column[J]. Applied Clay Science, 2017,146: 503-509.
- [8] STAWINSKI W, WEGRZYŃ A, Mordarski G, et al. Sustainable adsorbents formed from by-product of acid activation of vermiculite and leached-vermiculite-LDH hybrids for removal of industrial dyes and metal cations[J]. Applied Clay Science, 2018,161: 6-14.
- [9] 彭同江,万朴,潘兆楷等. 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,1996,15(3):250-258.
- [10] 刘福生,张建洪. 河南灵宝高电荷柯绿泥石的发现与研究[J]. 岩石矿物学杂志,1997(S1):23-27.
- [11] 彭同江,黄中熙. 新疆尉犁金云母和金云母-蛭石的成分特征[J]. 地质实验室,1973,13(2):112-117.
- [12] 彭同江. 新疆蛭石化学成分研究[J]. 四川建材学院学报,1992,7(3):24-30.
- [13] 彭同江,万朴,潘兆楷,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]. 西南工学院学报,1995,10(4):16-22.
- [14] 王登红. 战略性关键矿产相关问题探讨[J]. 化工矿产地质,2019,41(2):65-72.
- [15] 解颜岩,孙红娟,彭同江,等. 膨胀蛭石的化学-微波法制备及其膨胀率与柔韧性的关系[J]. 硅酸盐学报,2020,48(8):1325-1332.
- [16] 彭同江,刘福生,John huang,等. 含蛭石晶层间层矿物的可交换性阳离子及交换容量研究[J]. 岩石矿物学杂志,2003,22(4):391-396.
- [17] 彭同江,孙红娟,孙金梅,等. 金云母-蛭石间层矿物阳离子交换容量的影响因素研究[J]. 矿物岩石,2009,29(1):14-19.
- [18] 罗利明,彭同江,古朝建. CTA<sup>+</sup>/蛭石插层复合物在乙醇水溶液中一维结构的变化研究[J]. 矿物学报,2013,33(6):433-439.
- [19] 习永广,彭同江. 膨胀蛭石/石膏复合保温材料的制备与表征[J]. 复合材料学报,2011,28(5):156-161.
- [20] 钱玉鹏,江学峰,贺壹城,等. 复合法制备高膨胀率膨胀蛭石[J]. 硅酸盐通报,2017,36(9):6-10.
- [21] XIE Y Y, SUN H J, LUO L M, et al. Preparation of highdiameter-thickness ratio thin-layer phlogopite-vermiculite nano-functional material by liquid phase exfoliation[J]. Applied clay science, 2020, 191(15): 105612.
- [22] 汪灵. 战略性非金属矿产的思考[J]. 矿产保护与利用,2019,39(6):1-7.

# The Mineralogical Properties of Industrial Vermiculite and Its Role in the Strategy of Saving Energy and Reducing CO<sub>2</sub> Emission

PENG Tongjiang<sup>1, 2, 3</sup>, SUN Hongjuan<sup>2, 3</sup>, LUO Liming<sup>2, 3, 4</sup>, ZHANG Baoshu<sup>2</sup>

1. Analysis and Testing Center of 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. Key Laboratory of Solid Waste Treatment and Resource Reuse, Ministry of Education, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China;

4. Nuclear Wastes and Environmental Safety Laboratory, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, Sichuan, China

**Abstract:** Based on the chemical composition, mineral composition and mineralogical properties of industrial vermiculite, such as thermal and cation exchange properties, the effects of the burning expansion method, intercalation expansion method and intercalation – microwave expansion method on the expansion rate of expanded vermiculite are discussed. The results show that the mineral composition of industrial vermiculite is mainly phlogopite – vermiculite or biotite – vermiculite interlayer minerals, with a small amount of vermiculite or phlogopite. The Industrial vermiculite has good heating or intercalation expansion and cation exchange due to the vermiculite crystal layer in the structure. Compared with the burning heating expansion method, the microwave expansion method, the intercalation expansion method and the intercalation – microwave expansion method can be used to prepare high – strength flexible expanded vermiculite without damage to the structural layer. The high expansion rate expanded vermiculite prepared by the intercalation – microwave expansion method is a long worm – like porous lightweight material with an expansion ratio of 36 times and a bulk density of only 0.033 g/cm<sup>3</sup>. The expanded Vermiculite has excellent light weight, heat preservation and heat insulation properties. Industrial vermiculite minerals have many characteristics of strategic emerging minerals, and have the functions of energy saving and consumption reduction, energy intensity control and carbon emission reduction, and they play an important role in the strategy of Saving energy and reducing CO<sub>2</sub> emission.

**Key words:** industrial vermiculite; cation exchange capacity; expansion performance; expanded vermiculite; saving energy and reducing CO<sub>2</sub> emission; carbon peak; carbon neutral

引用格式: 彭同江, 孙红娟, 罗利明, 张宝述. 工业蛭石的矿物学属性及在“双碳”战略中的作用[J]. 矿产保护与利用, 2021, 41(6): 1–8.

PENG Tongjiang, SUN Hongjuan, LUO Liming, ZHANG Baoshu. The mineralogical properties of industrial vermiculite and its role in the strategy of Saving energy and reducing CO<sub>2</sub> emission[J]. Conservation and utilization of mineral resources, 2021, 41(6): 1–8.

投稿网址: <http://kcbh.cbpt.cnki.net>

E – mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)