



重庆大巴山超大型陶粒页岩矿产资源的发现与研究

汪 灵

成都理工大学,四川 成都 610059

中图分类号:P579 文献标志码:A

文章编号:1001-6872(2021)01-0001-14

收稿日期:2021-01-13;改回日期:2021-02-09

基金项目:国家自然科学基金项目(41972039);四川省教育厅资助科研项目(16TD0011)

第一作者简介:汪 灵,男,62岁,教授(博士,博士生导师),矿物学专业,研究方向:矿物材料学. E-mail:wangling@cdut.edu.cn

【摘要】 页岩陶粒是一种以具有自膨胀性能的页岩或板岩为唯一原料加工制备的保温隔热矿物功能材料和轻质多孔基础材料。在介绍重庆大巴山超大型陶粒页岩矿产资源地质特征基础上,采用多种现代检测技术和与国内同类原料对比方法,研究了代表性陶粒页岩和生产试验样品的矿物材料学特征,结果表明:重庆大巴山城口—巫溪是优质陶粒页岩矿产资源的集中分布区,含矿层的成矿类型属于浅水陆棚环境的沉积成因;区内新发现灰绿色页岩和黑色页岩两种陶粒页岩,分别代表新发现的两个含矿地层层位,其中灰绿色页岩矿层位于志留系新滩组(S_{1x})下部,黑色页岩矿层位于志留系龙马溪组(S_{1l})上部;根据详查工作,城口县治平乡二龙寨矿区陶粒页岩矿床的资源分布非常集中,矿层总厚度达352.6 m,矿体平均厚度124.24 m,在勘探面积0.165 km²范围查明资源量4 753万吨,预测远景资源量8亿吨,其矿床规模属超大型;城口—巫溪灰绿色页岩和黑色页岩的膨胀工艺性能优异,在焙烧温度1 150℃时的平均膨胀倍数分别为4.17和4.01,孔隙率分别为76%和75%;城口—巫溪陶粒页岩及其对比分析样品化学成分、矿物成分、结构构造等都相同或相似,即:化学成分($w(B)/\%$) SiO_2 62±, Al_2O_3 18±, TiO_2 0.9±, Fe_2O_3 7~10, MgO 3±, CaO 0.6±, K_2O 4.7±, Na_2O 1±, 矿物成分($w(B)/\%$)石英30~35、伊利石28~45、绿泥石14~18、斜长石7~11、黄铁矿0~2.5,具粉砂泥质结构和显微透镜状结构;陶粒页岩的自膨胀性能不仅与较高的助熔成分有关($K_2O + Na_2O + MgO + CaO = 9.3\% \pm$),而且与较高的总有机碳TOC($\geq 0.052\%$)和 Fe_2O_3 有关,还与岩石特殊的透镜状结构构造有关。

【关键词】 陶粒页岩;志留系;矿床类型;页岩陶粒;矿物功能材料;重庆

0 引 言

多孔材料在科学研究和实际应用中都引起

了人们的极大关注,成为材料科学研究热点之一^[1]。陶粒是以页岩、板岩、黏土岩、工业废料(粉煤灰、煤矸石等)等为原料,经焙烧膨胀而制备的轻质多孔材料和人造轻集料,其孔径范围

引用格式:汪 灵. 重庆大巴山超大型陶粒页岩矿产资源的发现与研究[J]. 矿物岩石, 2021, 41(1): 1-14.

Wang Ling. Discovery and Research of Super-Large Scale Ceramsite Shale Mineral Resources in Daba Mountain, Chongqing[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2021, 41(1): 1-14.

doi:10.19719/j.cnki.1001-6872.2021.01.01

中国知网(<https://www.cnki.net>)

>0.1 mm,属毫米多孔矿物材料。陶粒分类有多种^[2,3],本次研究根据制备工艺和产品性质不同,分为如下两大类:

造粒陶粒:又叫圆球型陶粒,是以黏土岩、普通页岩、普通板岩、工业废料(粉煤灰、煤矸石等)、淤泥等为主要原料,采用配方法(掺合少量粘结剂、添加剂等,如铁粉、重油等),先经人工造粒或成球后,再经高温快速焙烧膨胀而成,产品呈圆球形。根据原料不同,可分别称之为黏土陶粒、粉煤灰陶粒等。该产品表面一般有一层铁褐色、棕红色外壳,内部呈铅灰色、灰黑色并具有封闭式的空隙结构,形态、成分较均一,且具有一定的强度和坚固性,因而具有质轻、抗震和良好的隔绝性^[4]。

非造粒陶粒:又叫页岩陶粒,或碎石型陶粒,是以具有自膨胀性能的特殊页岩或板岩为唯一原料,经破碎加工成一定粒度后,直接高温快速焙烧膨胀而成;产品可根据需要进一步破碎、筛分成不同粒级,破碎前通常呈卵石形,破碎后呈碎石形。该产品表面没有一层铁褐色、棕红色外壳,表里均为铅灰色、灰黑色。页岩陶粒另一个名称叫人造浮石,因孔隙率高、质量轻、容重小于 1 g/cm^3 ,能浮于水面而得名^[5~7]。

与造粒陶粒相比,页岩陶粒具有更加优异的物化性质和使用效能,即不仅具有造粒陶粒的轻质、保温隔热、阻燃、防潮、防虫、防霉、不老化、不腐蚀、无污染、无放射性等性能^[4],而且具有比造粒陶粒更好的防水性和机械力学强度^[8]。因此,页岩陶粒集轻质、保温隔热、防水和高强多种优良性能于一身,成为一种重要的保温隔热及吸声隔音矿物功能材料和轻质多孔基础材料,其工业应用十分广泛,如保温隔热材料^[9]、轻质建筑材料^[10]、抗震减震材料^[11]、桥梁减重材料^[12,13]、地铁吸声隔音材料^[14,15]、过滤材料^[16,17]、环保吸附材料^[18]等,尤其是在保温隔热绿色建材及装配式建筑等领域显示出广阔的应用前景。

保温隔热是节能环保和绿色低碳的重要技术途径,属于当前国家战略性新兴产业及碳中和重点支持的领域之一。由于具自膨胀性能的

陶粒页岩组成结构的特殊性,我国陶粒页岩矿产资源分布非常有限,目前报道的仅有黑龙江宾县^[19,20]、吉林农安^[21,22]、湖北宜昌^[23]和湖南桃江^[24]等地,加之轻质多孔材料产品的辐射半径一般不大,限制了页岩陶粒的推广应用。因此,寻找具自膨胀性能的陶粒页岩矿产资源,已成为这一重要矿物功能材料推广应用的关键。

本工作采用矿物材料学原理和方法,经过多年工作,于2014年,在重庆南大巴山巫溪县大河乡等地的志留系新滩组和龙马溪组地层中,首先发现了自膨胀性能优异且资源十分丰富的陶粒页岩含矿地层层位;2016年,以新发现的灰绿色页岩和黑色页岩为原料制备粒状人造浮石(页岩陶粒)的方法,分别获国家发明专利授权^[5,6];2019年,通过资源调查,在城口县和巫溪县发现多个优质陶粒页岩矿点,确定城口—巫溪为优质陶粒页岩矿产资源的集中分布区;2020年,通过资源详查^[25],在城口县治平乡二龙寨一个矿区,在勘探面积 0.165 km^2 范围内查明资源量4753万吨,在矿权面积 0.521 km^2 范围预测资源量1.5亿吨,在矿权及周边 2.5 km^2 范围预测远景资源量8亿吨。对于具自膨胀性能的陶粒页岩来说,这是目前国内发现的矿产资源分布最集中、规模最大的超大型优质陶粒页岩矿床,其中志留系龙马溪组含矿地层及其优质陶粒页岩——黑色页岩为国内首次发现和报道,仅以查明资源量4753万吨矿石计算,其潜在经济价值超200亿元。

重庆大巴山超大型陶粒页岩矿产资源由成都理工大学首先独立发现,其资源详查工作由成都理工大学提供技术指导和技术支持。该发现对我国页岩陶粒这一重要矿物功能材料的生产与应用以及区域经济社会发展和脱贫攻坚都具有特别重要的意义。

目前,我国具自膨胀性能的陶粒页岩矿产资源研究还比较薄弱,尤其缺少这种特殊页岩的矿物材料学研究成果报道;而新发现的重庆大巴山超大型陶粒页岩矿产资源,其研究成果公开报道尚属首次。本工作在介绍该区陶粒页岩矿产资源地质特征基础上,采用与国内同类

原料对比方法,研究了该区代表性样品的矿物材料学特征,这对于陶粒页岩矿产资源的找矿与应用都是有益的。

1 矿床地质

重庆城口—巫溪优质陶粒页岩矿产资源集中分布区位于南大巴山北西向构造带,归属扬子板块北缘。区内主要出露地层为震旦系、寒

武系、奥陶系、志留系及二叠系、三叠系、侏罗系,缺失泥盆系和石炭系。目前,已发现膨胀倍数>3.5的超轻陶粒页岩矿点5处,它们是城口县的治平、庙坝和明通,巫溪县的大河和白鹿,发现膨胀倍数2~3.5的高强陶粒页岩矿点若干处,所有矿点均赋存于志留系新滩组和龙马溪组中(图1)。现根据详查^[25]和本次研究工作,以重庆市城口县治平乡二龙寨超大型优质陶粒页岩矿床为例,将该区典型矿床地质特征

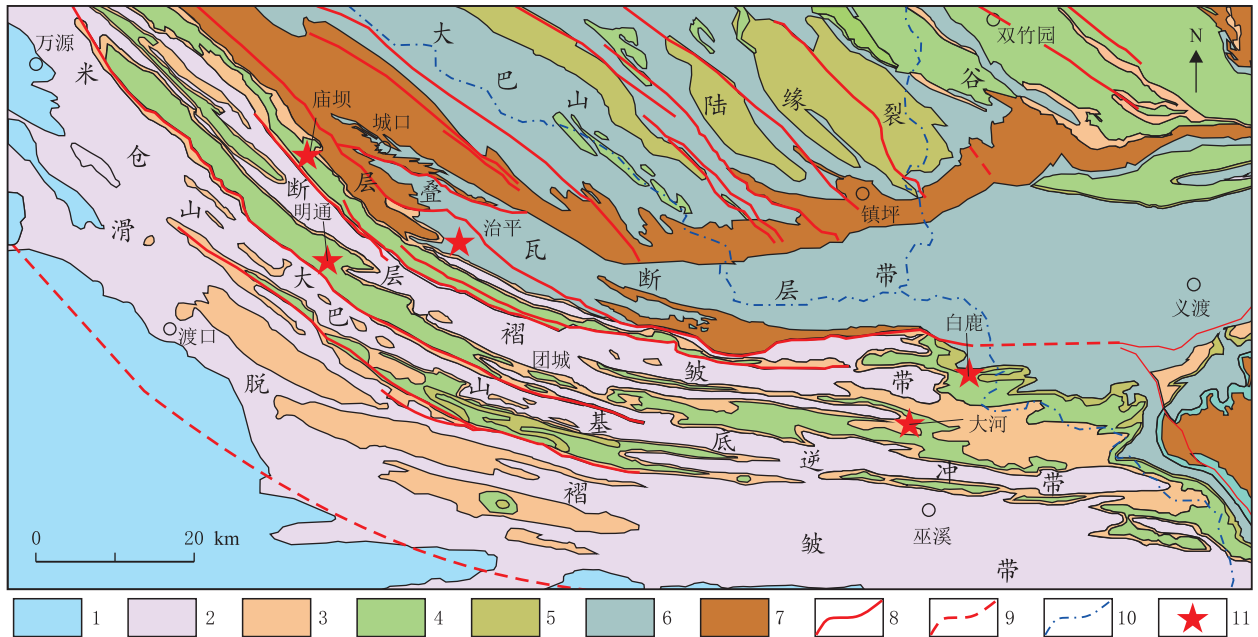


图1 重庆城口—巫溪优质陶粒页岩矿产资源集中分布区地质图(底图据熊国庆等,2019^[26])

Fig.1 Geological map of the concentrated distribution area of quality ceramsite shale mineral resources in Chengkou-Wuxi
1. 侏罗系; 2. 三叠系; 3. 二叠系; 4. 志留系; 5. 奥陶系; 6. 寒武系; 7. 震旦系; 8. 逆断层; 9. 隐伏断层; 10. 省界; 11. 矿点

介绍如下。

二龙寨陶粒页岩矿区范围出露地层为奥陶系、志留系和第四系。矿区无断层,志留系下统

新滩组(S_{1x})和志留系下统龙马溪组(S_{1l})几乎遍布整个矿区,地层分布及其岩性基本特征如表1所示。

表1 重庆市城口县治平乡二龙寨陶粒页岩矿区地层简表

Table 1 Stratigraphic profile of ceramsite shale mining area in Erlongzhai, Zhiping Township, Chengkou County, Chongqing

系	统	组	代号	厚度/m	分布与岩性
志留系	下统	新滩组	S_{1x}	>409.7	遍布矿区北西部,中、上部为灰黄绿色、黄绿色薄~纹层状泥质粉砂岩与含粉砂质泥(页)岩互层,厚大于200 m;下部为浅灰绿色、灰绿色页岩,页理发育,夹少量砂质、泥质条带,厚209.7 m
		龙马溪组	S_{1l}	164	分布于矿区东侧,上部为黑色页岩,页理发育,厚142.9 m;下部为笔石炭质页岩,炭质页岩,炭硅质页岩,富含笔石化石,厚21.1 m。与下伏奥陶系上统五峰组呈假整合接触
奥陶系	上统	五峰组	O_3w	34.5	分布于矿区东侧,黑色薄层硅质岩与炭质页岩互层
	中统	宝塔组	O_2b	>50	分布于矿区东侧,灰色、灰绿灰、紫红色中厚层状龟裂纹泥质灰岩、瘤状灰岩,底部和上部紫红色薄层状粉砂质页岩夹生物碎屑灰岩

注:数据据重庆市城口县治平乡二龙寨矿区陶粒页岩矿详查报告,2020^[25]

陶粒页岩矿层呈单斜式正常层序产出,SW—NE走向,总体产状 $301^\circ \sim 328^\circ \angle 28 \sim 56^\circ$,平

均 $313^\circ \angle 30^\circ$ 。含矿层岩系总厚度达352.6 m,由两大部分组成:一部分是志留系下统龙马溪

组(S_{1l})上部的黑色页岩,厚 142.9 m;另一部分是志留系下统新滩组(S_{1x})下部的浅灰绿色页岩和灰绿色页岩,厚 209.7 m。二者之间的界线清晰,呈整合接触关系。

矿体顶板为志留系下统新滩组(S_{1x})上部黄绿色页岩,经采样膨胀性能实验,膨胀倍数均小于 2。矿体底板为志留系下统龙马溪组(S_{1l})笔石炭质页岩,页理发育,富含笔石化石,经采样膨胀性能实验,膨胀倍数均小于 2。根据岩性特征分析,含矿层及矿床属于浅水陆棚环境的沉积成因。

根据矿体延展规模、矿体形态复杂程度、矿体厚度稳定程度、矿体内部结构复杂程度、构造复杂程度 5 个要素,确定本矿床划属为第 II 勘查类型。据此,详查工作按 130° 方位、150 m 间距平行布置 1,2,3,4,5,6 号共六条勘查线,在 1,2,3,4,5 线上布置 11 个钻孔和 9 个浅孔以及地表样对其深部和地表进行控制。在勘探面积 0.165 km^2 范围,控制矿体的走向长度 681 m,宽度 228~430 m;矿体厚度 40.72~189.25 m,平均厚 124.24 m,厚度变化系数 38.17%。矿体范围内未见夹层。矿体分布标高 1 118~1 461 m,矿体平面形态呈近长条形,矿体断面形态呈板状,空间上形态近板块状。

根据自膨胀性能检测结果以及岩石颜色、外观等特征,目前矿区出露有 5 种页岩,从上到下出露顺序是:黄绿色页岩、浅灰绿色页岩、灰绿色页岩、黑色页岩、笔石炭质页岩,其出露位置及岩性基本特征如表 2 所示。其中,陶粒页岩矿有 3 种,它们是:浅灰绿色页岩,膨胀倍数 2.0~3.5,平均膨胀倍数 2.73,为高强页岩陶粒原料;灰绿色页岩和黑色页岩,膨胀倍数 > 3.5 ,平均膨胀倍数 4.72,为超轻页岩陶粒原料。

根据详查工作^[25],该矿区资源分布非常集中,矿床规模属超大型:(1)在勘探面积 0.165 km^2 范围,按 $150 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ 的间距双工程控制探求控制资源量,单工程控制及外推探求推断资源量。据此,查明资源量 4 753 万吨,其中控制资源量 3 060 万吨,推断资源量 1 693 万吨。需要说明的是,资源量 4 753 万吨中,平均膨胀倍数 4.72 和 2.73 的矿石资源量分别为 2 851 万吨和 1 902 万吨,分别占矿石储量的 60%和 40%。据此,得到该矿床的矿石加权平均膨胀倍数为 3.92,属优质陶粒页岩。(2)在矿权面积 0.521 km^2 范围,矿层厚度按 180 m 计算预测资源量约 1.5 亿吨。(3)在矿权及周边 2.5 km^2 范围,矿层厚度按 120 m 计算预测远景资源量约 8 亿吨。

表 2 重庆市城口县治平乡二龙寨陶粒页岩矿区页岩种类与特征
Table 2 Types and characteristics of shale in ceramsite shale mining area at Erlongzhai of Zhiping

页岩名称	出露位置	视厚度/m	平均膨胀倍数	岩性基本特征
黄绿色页岩	新滩组 S_{1x} 上部	6~40	< 2	黄绿色或浅黄绿色,粉砂质结构,致密块状和页理构造,断面较粗糙,断口不规则
浅灰绿色页岩 (高强陶粒页岩)	新滩组 S_{1x} 下部	27~204	2.0~3.5	浅灰绿色,粉砂质或粉砂泥质结构,致密块状和页理构造,断面一般较粗糙,断口不规则
灰绿色页岩 (超轻陶粒页岩)	新滩组 S_{1x} 下部	23~110	3.5~6.5	灰绿色,粉砂泥质或泥质结构,致密块状和页理构造,块样边部常呈石斧状、楔形状,断面较平滑、细腻,发育 1~5 mm 且相互平行的方解石脉
黑色页岩 (超轻陶粒页岩)	龙马溪组 S_{1l} 上部	7~110	3.5~7	黑色,含粉砂泥质或泥质结构,致密块状和页理构造,块样边部常呈石斧状、楔形状,有的无笔石化石、断面细腻、平滑,有的含少量笔石化石、断面较粗糙
笔石炭质页岩	龙马溪组 S_{1l} 下部	21.1	1	黑色,含粉砂泥质或泥质结构,断面粗糙,致密块状和页理构造,富含笔石化石,含 1~5 mm 方解石脉和细粒黄铁矿颗粒或黄铁矿条带

2 矿石膨胀工艺性能

膨胀工艺性能是评价陶粒页岩质量的关键

技术指标,通常将自膨胀倍数 2 作为陶粒页岩的边界品位。重庆大巴山超大型陶粒页岩矿产资源调查和详查的陶粒页岩鉴定和膨胀工艺性能检测工作全部由成都理工大学完成。在二龙

寨陶粒页岩矿详查工作中,对 11 个钻孔和 9 个浅孔以及地表样均按相关规范要求进行了取样,共计取样 1 071 件。每件样品的膨胀工艺性能检测均不少于 2 次,检测结果取平均值,详查共检测样品 2 195 个,获得了该矿膨胀工艺性能的完整资料,为详查工作提供了技术支持。

表 3 是用于矿物材料学特征对比研究的重点实验样品,其中:又以城口治平二龙寨矿区为重点(含生产试验样品),同时采集了城口庙坝和明通,以及巫溪大河等矿点有代表性样品;为了便于对比分析,还采集了湖北宜昌和湖南桃江相关企业的生产原料样品。

表 3 重庆城口—巫溪陶粒页岩及其对比分析样品的基本信息

Table 3 Basic information of Chengkou-Wuxi ceramic shale and their comparative analysis samples

样品编号	产地	名称	备注	样品编号	产地	名称	备注
MT01	重庆城口明通	黑色页岩	地表样	XX25	重庆城口治平	灰绿色页岩	地表样
JC06	重庆巫溪大河	黑色页岩	地表样	XX26	重庆城口治平	灰绿色页岩	地表样
ZS02	重庆城口治平	黑色页岩	生产试验样	ZS05	重庆城口治平	灰绿色页岩	生产试验样
ZK202-P74	重庆城口治平	黑色页岩	-170 m 钻孔样	ZK202-P54	重庆城口治平	灰绿色页岩	-124 m 钻孔样
ZK302-P64	重庆城口治平	黑色页岩	-147 m 钻孔样	ZK302-P22	重庆城口治平	灰绿色页岩	-50.6 m 钻孔样
MB02	重庆城口庙坝	灰绿色页岩	地表样	GD01	湖北宜昌企业	灰绿色页岩	生产原料 1
JC03	重庆巫溪大河	灰绿色页岩	地表样	HT01	湖北宜昌企业	灰绿色页岩	生产原料 2
XW06	重庆城口治平	灰绿色页岩	地表样	FY01	湖南桃江企业	灰绿色板岩	生产原料

注:(1)ZS02 黑色页岩和 ZS05 灰绿色页岩为生产试验样品,二者均采自与钻孔 ZK202-P79 标高相当的矿层露头位置;(2)ZK202-P74 中,ZK202 代表钻孔编号,P74 代表钻孔岩芯编号;(3)湖北宜昌两家企业生产样品基本相同;(4)湖南桃江企业的灰绿色板岩又叫伊利石绿泥石板岩^[7]

根据国家发明专利^[5,6],确定膨胀焙烧方法是:将样品加工成 5~10 mm 粒径,烘干至恒重,然后放置在刚玉坩埚内,在实验炉中焙烧膨胀,焙烧温度 950~1 200 °C,升温速率 3~30 °C/min,保温时间 10~100 min。焙烧膨胀前

后均采用电子天平测量质量,采用排水法测量体积。

根据实验样品焙烧膨胀前后质量和体积,可计算出陶粒页岩焙烧样品的膨胀倍数、容重和孔隙率,计算结果和计算方法如表 4 所示。

表 4 重庆城口—巫溪陶粒页岩及其对比分析样品的膨胀倍数(n)、容重(d_v)和孔隙率(θ)

Table 4 Expansion multiple (n), bulk density (d_v) and porosity (θ) of Chengkou-Wuxi ceramicsite shale and their comparative analysis samples

样品编号	1 100 °C			1 125 °C			1 150 °C			1 175 °C			1 200 °C		
	n	d _v	θ	n	d _v	θ	n	d _v	θ	n	d _v	θ	n	d _v	θ
MT01	3.25	0.85	71	3.86	0.68	75	4.10	0.72	77	3.92	0.61	76	4.08	0.62	77
JC06	1.69	1.10	44	2.65	0.90	64	3.55	0.75	73	2.36	0.79	68	3.45	0.70	72
ZS02	2.86	0.92	65	4.39	0.57	78	4.37	0.57	78	4.49	0.56	78	5.90	0.43	84
黑色平均值	2.60	0.96	60	3.63	0.72	72	4.01	0.68	76	3.59	0.65	74	4.48	0.58	78
MB02	2.08	1.22	54	2.33	1.04	59	5.51	0.49	82	2.63	0.97	64	3.05	0.81	69
JC03	2.30	0.96	59	2.88	0.87	67	2.08	1.18	54	3.03	0.86	69	4.21	0.55	78
YW06	2.26	1.10	59	2.77	0.83	65	4.01	0.60	76	4.27	0.59	77	5.03	0.48	82
YX25	3.07	0.81	69	3.58	0.69	74	4.50	0.58	79	5.31	0.53	83	5.84	0.44	84
YX26	2.68	0.95	64	4.22	0.62	77	4.94	0.52	81	4.84	0.47	82	5.62	0.46	83
ZS05	2.49	0.99	63	3.53	0.74	73	4.00	0.62	76	4.68	0.53	80	5.72	0.45	83
灰绿色平均值	2.48	1.01	61	3.22	0.80	69	4.17	0.67	75	4.13	0.66	76	4.91	0.53	80
GD01	2.07	1.18	55	2.50	0.93	62	3.10	0.81	69	3.28	0.72	71	4.88	0.51	81
HT01	2.76	0.86	66	1.58	1.26	39	2.67	0.89	65	3.45	0.73	73	4.22	0.55	78
FY01	2.70	1.10	64	2.68	0.89	64	2.63	0.90	63	3.75	0.69	77	2.81	0.95	66
其他平均值	2.51	1.05	62	2.25	1.03	55	2.80	0.87	66	3.49	0.71	74	3.97	0.67	75

注:(1)n. 膨胀倍数;(2)d_v. 容重(g/cm³), d_v=m/v, m. 质量(g), v. 体积(cm³); (3)θ. 孔隙率(%), θ=(1-d_v/d)×100%, d. 煅烧前容重(g/cm³), d_v. 煅烧后容重(g/cm³); (4)黑色代表黑色页岩,灰绿色代表灰绿色页岩,其他为湖北宜昌和湖南桃江页岩陶粒生产企业原料;(5)检测单位:成都理工大学材料与化学化工学院,2020

根据表 4 数据,可绘制重庆城口治平陶粒页岩及其对比样品在不同焙烧温度下的膨胀倍数变化(图 2)。从表 4 和图 2 可以看出:膨胀工艺性能的总体特征是,在焙烧温度 1 100~1 200 °C 范围,随着温度升高,膨胀倍数由 2.5 左右逐步升高至 4.5 左右,其中:在焙烧膨胀工艺相同条件下,重庆城口一巫溪地区的灰绿色页岩和黑色页岩的膨胀工艺性能基本相同,并且二者均优于湖北宜昌灰绿色页岩和湖南桃江灰绿色板岩,而湖北宜昌灰绿色页岩则优于湖南桃江灰绿色板岩。例如,焙烧温度 1 150 °C 时,重庆城口一巫溪地区的灰绿色页岩和黑色页岩的平均膨胀倍数分别为 4.17 和 4.01,容重分别为 0.67 g/cm³ 和 0.68 g/cm³,孔隙率分别为 76% 和 75%;而湖北宜昌 GD01 和湖南桃江 FY01 的生产原料样品的膨胀倍数分别为 3.10 和 2.63,容重分别为 0.81 g/cm³ 和 0.87 g/cm³,孔隙率分别为 69% 和 66%。

根据国家发明专利^[5,6],于 2020 年 6 月 9 日在湖北宜昌相关企业的年产 10 万立方页岩陶粒生产线上开展了生产试验。该生产试验在与钻孔 ZK202-P79 标高相当的矿层露头位置,共采集矿石样品 60 吨,为黑色页岩 ZS02(图 3a 右上角)和灰绿色页岩 ZS05(图 3a)混合样。

生产试验取得一次性圆满成功。图 3 是生产试验陶粒页岩原矿及其产品外观和孔隙结构特征相片,可以看出:产品孔隙结构十分发育,为三维不规则圆形封闭孔,孔径分布范围较宽,但都是孔径>0.1 mm 的毫米孔(图 3c),其中:

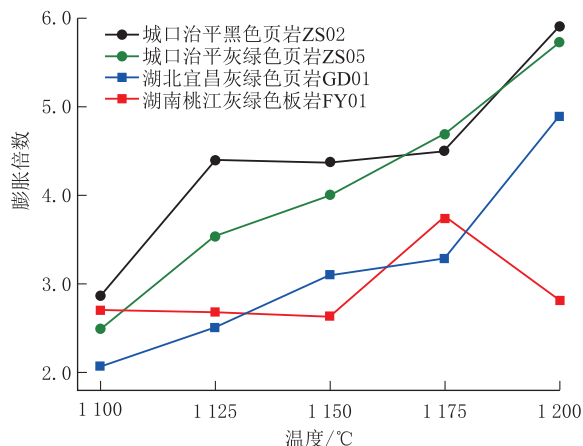


图 2 重庆城口治平陶粒页岩及其对比样品的焙烧温度与膨胀倍数关系

Fig. 2 Relationship between calcined temperature and expansion ratio of the ceramsite shale and their comparative samples from Zhiping of Chengkou County

主要是 0.1~0.5 mm(平均 0.26 mm)的毫米小孔,其次是 1~5 mm(平均 1.03 mm)的毫米中孔,也有较少>5 mm 的毫米大孔(图 3b 中)。

生产试验的页岩陶粒产品送第三方资质单位(陕西省建筑工程质量检测中心有限公司,2020)进行了检验,结论如下:(1)产品所检测项目(堆积密度、筒压强度、吸水率和软化系数)符合标准 GB/T 17431.1-2010 中密度等级 500 级人造轻集料的质量要求(表 5);(2)产品强度标号(抗压强度)为 16.7 MPa(检测仪器:JES 压力试验机),为 500 级超轻粗集料;(3)产品放射性符合 GB6566-2010 中 A 装饰装修材料的质量要求(检测仪器:BH224F 伽玛能谱仪)。

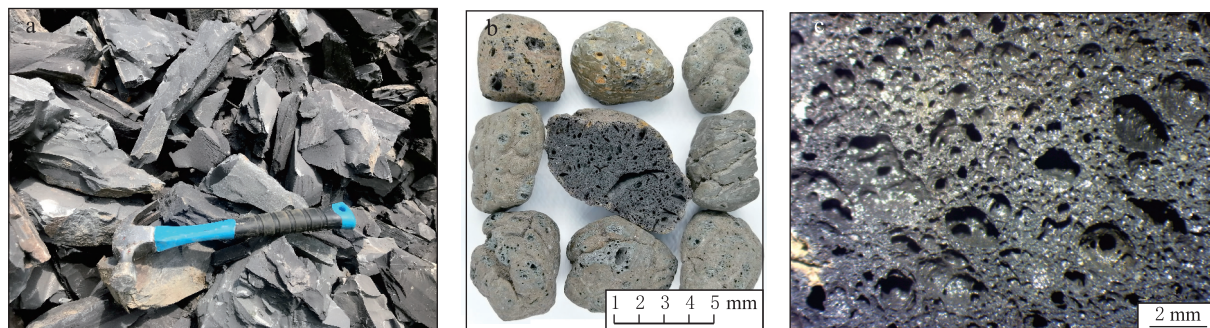


图 3 重庆城口治平陶粒页岩生产试验样品照片

Fig. 3 Pictures of production test samples of ceramsite shale from Zhiping of Chengkou County

a. 原矿,致密块状,右上角为黑色页岩 ZS02,其余主要为灰绿色页岩 ZS05; b. 未经破碎的呈卵石形页岩陶粒产品; c. 页岩陶粒的毫米孔隙结构

表5 重庆城口治平陶粒页岩生产试验产品的堆积密度、筒压强度和吸水率检测结果
Table 5 Test results of bulk density, cylinder compressive strength and water absorption of the production test products of ceramsite shale from Zhiping of Chengkou County

型号规格	检测标准				
	检验项目	堆积密度/(kg·m ⁻³)	筒压强度/MPa	吸水率(1 h,%)	软化系数
	质量要求	>400, ≤500	≥1.5	≤15	≥0.8
500级 5~10 mm	检验结果	416	2.5	8.3	0.97
	单项判定	500级	合格	合格	合格
500级 5~20 mm	检验结果	427	2.5	7.8	0.96
	单项判定	500级	合格	合格	合格
500级 10~20 mm	检验结果	441	2.8	6.9	0.97
	单项判定	500级	合格	合格	合格

注:(1)不同型号规格系采用图3b样品破碎和筛分而成;(2)检测依据:GB/T 17431.1-2010,GB/T 17431.2-2010;
(3)检测单位:陕西省建筑工程质量检测中心有限公司,2020

3 矿石组成结构

根据矿物材料学原理,矿物材料的组成与结构决定其物化性能。通过组成结构分析,有助于揭示矿石膨胀工艺性能的内因和机理。

3.1 化学成分

表6是重庆城口一巫溪陶粒页岩及其对比分析样品化学成分的X射线荧光光谱分析

(XRF)检测结果,可以看出:所有具自膨胀性能的页岩和板岩的主要化学成分含量都相同或相似,即($w(B)/\%$): SiO₂62±, Al₂O₃18±, TiO₂0.9±, Fe₂O₃7~10, MgO 3±, CaO 0.6±, K₂O4.7±, Na₂O1±, MnO和P₂O₅很少。化学成分中SiO₂+Al₂O₃达80%±,构成了页岩陶粒硅酸盐材料的主体;由于助熔成分K₂O+Na₂O+MgO+CaO达9.3%±,加之含量较高Fe₂O₃也具有助熔作用,这些成分都有利于

表6 重庆城口一巫溪陶粒页岩及其对比分析样品化学成分的XRF检测结果. $w(B)/\%$
Table 6 XRF test results of chemical composition of Chengkou-Wuxi ceramsite shale and their comparative analysis samples (in percentage)

样品号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	MnO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	Σ
MT01	61.79	18.97	7.35	0.88	1.05	3.07	0.14	4.69	1.09	0.17	0.57	99.77
JC06	61.56	18.85	8.37	0.91	0.51	3.08	0.11	4.99	0.99	0.19	0.22	99.78
ZS02	67.53	16.62	6.58	0.75	0.21	2.47	0.05	3.30	0.95	0.13	1.01	99.60
ZK202-P74	62.46	18.28	6.95	0.87	1.06	2.57	0.09	3.91	1.16	0.13	2.25	99.72
ZK302-P64	59.58	19.44	7.34	0.93	1.14	2.81	0.15	5.24	1.16	0.14	1.67	99.61
黑色页岩平均值	62.59	18.43	7.32	0.87	0.79	2.80	0.11	4.43	1.07	0.15	1.15	99.70
MB02	63.19	18.42	7.20	0.86	0.38	3.04	0.07	4.86	1.05	0.17	0.44	99.68
JC03	61.79	19.38	8.07	0.91	0.41	3.05	0.12	4.62	1.02	0.18	0.17	99.72
XW06	62.86	19.22	6.74	0.89	0.37	2.91	0.09	4.60	1.08	0.17	0.77	99.70
XX25	63.06	17.78	7.67	0.88	0.37	3.11	0.11	4.64	0.84	0.16	1.07	99.69
XX26	65.13	17.67	6.63	0.85	0.29	2.88	0.06	4.44	1.11	0.19	0.5	99.75
ZS05	62.44	18.94	7.26	0.86	0.31	3.07	0.07	4.78	0.96	0.18	0.85	99.73
ZK202-P54	62.78	19.09	7.14	0.90	0.36	2.73	0.09	4.82	1.16	0.19	0.44	99.70
ZK302-P22	62.51	19.75	6.83	0.86	0.36	2.68	0.35	5.18	0.94	0.15	0.02	99.63
灰绿色页岩平均值	62.97	18.78	7.19	0.88	0.36	2.93	0.12	4.74	1.02	0.17	0.53	99.70
GD01	62.42	18.67	7.68	0.85	0.57	3.24	0.10	4.95	0.81	0.16	0.34	99.79
HT01	59.61	17.38	10.10	1.13	1.06	3.02	0.22	5.22	1.26	0.53	0.08	99.61
FY01	62.43	18.79	8.53	0.86	0.22	3.01	0.08	4.86	0.98	0.12	0.01	99.89
对比分析样平均值	61.49	18.28	8.77	0.95	0.62	3.09	0.13	5.01	1.02	0.27	0.14	99.76

注:检测单位:成都理工大学材料与化学化工学院,2020;检测仪器:日本岛津公司XRF-1800型X射线荧光光谱仪(XRF);检测方法:粉末压片法

陶粒页岩或板岩在高温下熔融软化和膨胀。

黏土陶粒等造粒陶粒的配方中,往往通过加入一定量的重油等有机物来提高膨胀工艺性能。实验结果表明,页岩或板岩的自膨胀性能与有机碳含量存在密切的关系。表 7 是重庆城口—巫溪陶粒页岩及其对比分析样品岩石总有机碳 TOC 和硫的检测结果,可以看出:灰绿色页岩和板岩的 TOC 和硫含量相对较低,分别

为 0.08%±和 0.06%±;而黑色页岩相对较高,平均分别为 0.829%和 0.186%。这说明,TOC 含量多少是页岩颜色深浅的主要原因;由于表 7 中所有样品均具有较好自膨胀性,说明 TOC≥0.052%是页岩或板岩自膨胀性的基本条件之一。实验证明,研究区内的浅灰绿色页岩的自膨胀性不如灰绿色页岩,而黄绿色页岩则不符合膨胀性能要求。

表 7 重庆城口—巫溪陶粒页岩及其对比分析样品岩石总有机碳 TOC 和硫检测结果
Table 7 Total organic carbon (TOC) and sulfur test results of Chengkou-Wuxi ceramsite shale and their comparative analysis sample

样品编号	岩性	总有机碳 TOC/%	S/%
ZS02	城口治平黑色页岩	0.951	0.007
ZK202-P74	城口治平黑色页岩	0.707	0.364
重庆城口—巫溪黑色页岩平均值		0.829	0.186
MB02	城口庙坝灰绿色页岩	0.069	0.142
JC03	巫溪大河灰绿色页岩	0.052	0.005
ZS05	城口治平灰绿色页岩	0.071	0.054
ZK202-P54	城口治平灰绿色页岩	0.052	0.045
重庆城口—巫溪灰绿色页岩平均值		0.061	0.062
HT01	湖北宜昌灰绿色页岩	0.067	0.103
FY01	湖南桃江灰绿色板岩	0.093	0.006
湖北宜昌、湖南桃江对比样品平均值		0.080	0.055

注:检测单位:油气藏地质及开发工程国家重点实验室(成都理工大学),2020;检测仪器:美国 LECO 碳硫分析仪

3.2 矿物成分

图 4 是重庆城口—巫溪陶粒页岩及其对比分析样品的 X 射线粉晶衍射分析(XRD)谱图,可以看出:所有具自膨胀性能的页岩和板岩的矿物组合特征都相同,即:石英+绿泥石+伊利石+斜长石。由于石英的化学成分为 SiO₂,其余 3 种矿物均富含 SiO₂ 和 Al₂O₃,这是岩石 SiO₂+Al₂O₃ 达 80%±的原因所在;由于伊利石富含 K₂O,使岩石 K₂O 达 3.7%±;由于斜长石富含 Na₂O 和 CaO,使岩石 Na₂O+CaO 为 1.6%±;由于绿泥石富含 MgO 和 Fe₂O₃,这是岩石 MgO 达 3%±和 Fe₂O₃ 较高的原因;根据硫含量检测和肉眼观察结果,Fe₂O₃ 较高还与含黄铁矿有关。

根据矿石化学成分 XRF 分析和矿物相 XRD 分析结果,可对陶粒页岩的矿物成分进行半定量计算分析,结果如表 8 所示。可以看出:所有具自膨胀性能的陶粒页岩和板岩,不仅矿物成分及其组合特征都相同,而且重量百分含

量也相似,即:石英 30%~35%,绿泥石 14%~18%,伊利石 28%~45%,斜长石 7%~11%,黄铁矿 0%~2.5%。其中:重庆城口—巫溪黑色页岩和灰绿色页岩的矿物含量比较接近,二者主要区别是前者黄铁矿 1.7%,略高于后者的 0.8%;与重庆城口—巫溪样品相比,湖北宜昌、湖南桃江样品绿泥石和伊利石略高,而黄铁矿较低,这是它们 SiO₂ 略低、Al₂O₃ 略高的原因所在。

以上矿物成分对矿石膨胀工艺性能都有积极作用:石英在陶瓷制品中通常起骨架作用,在页岩陶粒制品中也有同样的作用。由于 K₂O,Na₂O 熔点较低,在陶瓷和玻璃生产中常常采用长石和伊利石等富含 K₂O 和 Na₂O 矿物原料,以降低陶瓷烧成和玻璃熔制温度。研究表明,在空气环境中,随着高温升高,黄铁矿将向磁黄铁矿、赤铁矿和磁铁矿转变,当≥1200℃时形成最终产物赤铁矿^[27]。因此,在一定温度下,当伊利石和斜长石中的 K₂O,

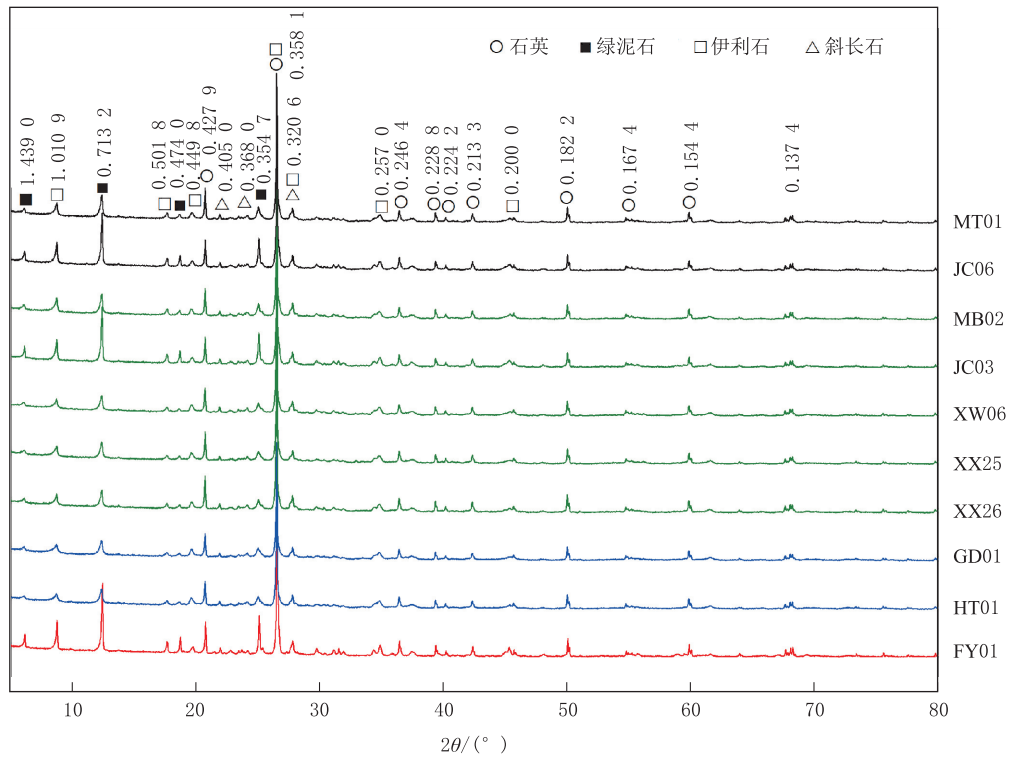


图 4 重庆城口—巫溪陶粒页岩及其对比分析样品矿物的 XRD 谱图

Fig. 4 XRD graph of Chengkou-Wuxi ceramsite shale and their comparative analysis sample minerals
 检测单位: 成都理工大学材料与化学化工学院, 2020; 检测仪器: 日本理学公司 DMX-III C 型 X 射线粉末衍射仪 (XRD); 实验条件: 粉末法, Cu 靶 K α 射线, Ni 片滤光, 管电压 40 kV, 管电流 20 mA, 扫描范围 3°~80°, 扫描速度 6(°)/min, 采样步宽 0.02°(2 θ)

表 8 重庆城口—巫溪陶粒页岩及其对比分析样品矿物成分半定量分析结果. $w(B)/\%$

Table 8 Semi-quantitative analysis results of mineral composition of Chengkou-Wuxi ceramsite shale and their comparative analysis samples (in percentage)

样品编号	石英	绿泥石	伊利石	斜长石	黄铁矿
MT01	32.9	16.9	39.8	9.2	0.9
JC06	32.1	16.9	42.3	8.4	0.3
ZS02	45.7	13.6	28.0	8.0	1.5
ZK202-P74	36.9	14.1	33.1	9.8	3.4
ZK302-P64	28.6	15.4	44.4	9.8	2.5
城口—巫溪黑色页岩平均值	35.3	15.4	37.5	9.1	1.7
MB02	34.0	16.7	41.2	8.9	0.7
JC03	33.6	16.8	39.2	8.6	0.3
XW06	34.6	16.0	39.0	9.1	1.2
XX25	35.8	17.1	39.3	7.1	1.6
8XX26	37.4	15.8	37.6	9.4	0.8
ZS05	34.0	16.9	40.5	8.1	1.3
ZK202-P54	33.5	15.0	40.9	9.8	0.7
ZK302-P22	33.2	14.7	43.9	8.0	0.0
城口—巫溪灰绿色页岩平均值	34.5	16.1	40.2	8.6	0.8
GD01	33.9	17.8	42.0	6.9	0.5
HT01	27.8	16.6	44.2	10.7	0.1
FY01	33.6	16.5	41.2	8.3	0.0
湖北宜昌、湖南桃江样品平均值	31.8	17.0	42.5	8.6	0.2

Na_2O , CaO 与绿泥石中 MgO 和 Fe_2O_3 , 以及黄铁矿产生的 Fe_2O_3 共同作用时, 更加有利于陶粒页岩在高温下软化熔融; 而有机碳等在高温下会产生 CO_2 或 CO 气体, 这有助于岩石熔融软化产物发生膨胀作用。

3.3 结构构造

图 5 是重庆城口一巫溪陶粒页岩及其对比

分析样品的偏光显微镜照相, 可以看出: 具自膨胀性能的页岩和板岩都具有相同或相似的显微结构, 即粉砂泥质结构。其基本特征是: 鳞片状黏土矿物(泥质)含量在 50% 左右, 石英颗粒(粉砂)含量 35% 左右; 石英颗粒细小, 粒径 $< 100 \mu\text{m}$, 通常粒径 $15 \sim 50 \mu\text{m}$, 呈定向排列特征, 分布比较均匀。

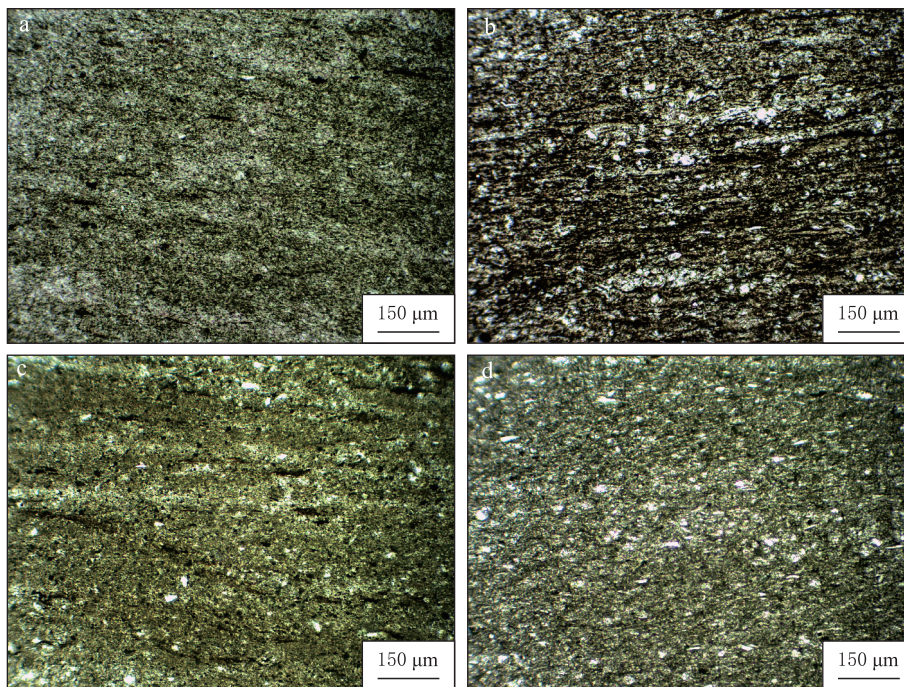


图 5 重庆城口一巫溪陶粒页岩及其对比分析样品的偏光显微镜相片(单偏光 10×10)

Fig. 5 Polarizing microscope photographs of Chengkou-Wuxi ceramsite shale and their comparative analysis samples (single polarization 10×10)

粉砂泥质结构, 并由鳞片状黏土泥质(图中绿色部分)和石英粉砂(图中白点)形成具定向排列的显微透镜状结构. a. 灰绿色页岩-重庆城口庙坝 MB02; b. 黑色页岩-重庆城口治平钻孔样 ZK202-P74; c. 灰绿色页岩-湖北宜昌生产原料 HT01; d. 灰绿色板岩-湖南桃江生产原料 FY01

图 6 是重庆城口一巫溪陶粒页岩及其对比分析样品的扫描电子显微镜分析相片(SEM), 可以看出: 具自膨胀性能的页岩和板岩中黏土矿物基本相似, 为不规则鳞片状, 片径 $< 10 \mu\text{m}$, 通常 $5 \mu\text{m}$ 左右。值得注意的是, 鳞片状黏土矿物伊利石和绿泥石具有较明显的定向排列特征, 并形成若干中间厚、边缘薄的不规则透镜状微结构; 由黏土透镜状微结构与呈定向分布的石英粉砂, 共同形成了长 $< 500 \mu\text{m}$ 、厚 $< 50 \mu\text{m}$ 的显微透镜状结构; 而这种特殊的显微透镜状结构在宏观上表现为特殊的页理构造, 即透镜状页理构造。大量观察结果表明, 优质陶粒页岩矿的块样边部常呈石斧状、楔形状, 这正

是透镜状结构构造的外观特征。需要指出的是, 重庆城口治平灰绿色页岩和黑色页岩以及湖北宜昌灰绿色页岩的透镜状微结构发育较好, 而湖南桃江板岩透镜状微结构的发育较弱。因此, 前者的透镜状页理构造发育, 而后者则相对较差。

将膨胀性能优异的灰绿色页岩和黑色页岩加工成 < 100 目的细粉, 经成型造粒后在同样温度和工艺条件下进行焙烧膨化实验, 结果发现它们都失去了原有的膨胀性能。同时, 根据肉眼观察结果, 陶粒页岩膨胀方向都垂直于页理构造方向。由于细粉加工不会改变陶粒页岩的组成, 但会破坏了透镜状结构构造, 这说明该

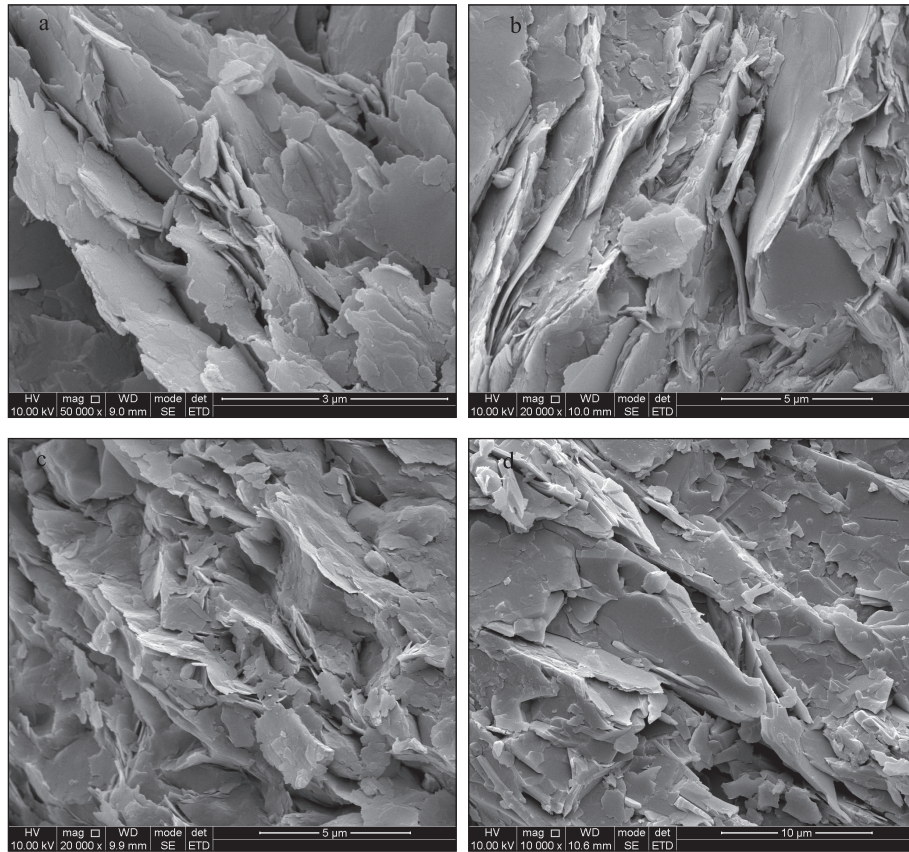


图6 陶粒页岩样品的扫描电子显微镜分析相片(SEM)

Fig. 6 SEM images of the ceramsite shale sample

黏土矿物伊利石和绿泥石呈鳞片状,片径 $5\ \mu\text{m}$ 左右,具明显地定向排列特征,并形成中间厚、边缘薄的透镜状微结构:
a. 灰绿色页岩-重庆城口治平生产试验样 ZS05; b. 黑色页岩-重庆城口治平生产试验样 ZS02; c. 灰绿色页岩-湖北宜昌生产原料 GD01; d. 灰绿色板岩-湖南桃江生产原料 FY01. 检测单位:四川威斯特分析测试有限公司,2020;检测仪器:美国 FEI 公司 Inspect F50 型扫描电镜

结构构造对陶粒页岩膨胀性能起到关键作用。其原理是,由鳞片状黏土和石英粉砂形成的具有定向排列的透镜状结构构造对高温焙烧产生的 CO_2 和 CO 等气体具有一定的圈闭作用,有利于岩石高温熔融软化产物的膨胀。

以上研究结果表明,重庆城口一巫溪陶粒页岩及其对比分析样品化学成分和矿物成分都相同或相似。那么,它们之间自膨胀性能为什么存在一定差异呢?通过微观结构分析和肉眼观察和比较,发现其主要原因是它们的结构构造存在一定差异,即:所有陶粒页岩的透镜状结构构造发育程度明显好于湖南桃江板岩。这是灰绿色页岩和黑色页岩自膨胀性能优于板岩的原因所在。同时,由于受风化作用的影响,湖北宜昌灰绿色页岩的粉化现象比较明显,对结构构造有一定的破坏;而重庆城口一巫溪灰绿色页岩和黑色页岩风化相对较弱,致密块状构造

保存比较完好,透镜状结构构造发育。这是它们的自膨胀性能略优于湖北宜昌灰绿色页岩的原因所在。

4 结 论

(1)重庆大巴山城口一巫溪为优质陶粒页岩矿产资源的集中分布区,含矿层的成矿类型属于浅水陆棚环境的沉积成因;区内新发现灰绿色页岩和黑色页岩两种陶粒页岩,分别代表新发现的两个含矿地层层位,其中灰绿色页岩矿层位于志留系新滩组(S_1x)下部,黑色页岩矿层位于志留系龙马溪组(S_1l)上部;新发现的两个含矿地层接触界限清楚,呈整合接触关系。

(2)根据详查工作,重庆市城口县治平乡二龙寨矿区陶粒页岩矿床的资源分布非常集中,矿床规模属超大型。该矿床矿层总厚度达

352.6 m,其中:浅灰绿色、灰绿色页岩矿层厚度达209.7 m,黑色页岩矿层位厚度达142.9 m,矿体平均厚度124.24 m;在勘探面积为0.165 km²范围内查明资源量4753万吨,在矿权面积0.521 km²范围预测资源量约1.5亿吨,在矿权及周边2.5 km²范围预测远景资源量8亿吨。

(3)重庆城口—巫溪灰绿色页岩和黑色页岩的膨胀工艺性能优异,二者在焙烧温度1150℃时的平均膨胀倍数分别为4.17和4.01,容重分别为0.67 g/cm³和0.68 g/cm³,孔隙率分别为76%和75%,均优于湖北宜昌灰绿色页岩和湖南桃江灰绿色板岩。

(4)重庆城口—巫溪陶粒页岩及其对比分析样品化学成分、矿物成分、结构构造等都相同或相似,其中,化学成分($w(B)/\%$):SiO₂62±,Al₂O₃18±,TiO₂0.9±,Fe₂O₃7~10,MgO 3±,CaO 0.6±,K₂O 4.7±,Na₂O 1±;矿物成分($w(B)/\%$):石英30~35,伊利石28~45,绿泥石14~18,斜长石7~11,黄铁矿0~2.5;结构构造:粉砂泥质结构,并具有特殊的显微透镜状结构,并在宏观上表现为特殊的透镜状页理构造。灰绿色页岩和黑色页岩的主要差别是,前者总有机碳TOC和黄铁矿含量都相对较低。

(5)陶粒页岩的自膨胀性能不仅与较高的助熔成分有关(K₂O+Na₂O+MgO+CaO=9.3%±),而且与较高的总有机碳TOC(≥0.052%)和Fe₂O₃(7%~10%)有关,还与特殊的显微透镜状结构有关。正是由鳞片状黏土和石英粉砂所形成的特殊结构构造创造了有利于膨胀的圈闭环境。

致谢:成都理工大学易和英、潘俊良、汤建参加了重庆大巴山陶粒页岩含矿地层层位发现工作;成都理工大学张映、林潇、黄绩大参加了城口—巫溪陶粒页岩矿产资源调查、城口治平陶粒页岩矿详查和生产试验工作,申理文部分参加了城口治平陶粒页岩矿详查工作;城口—巫溪陶粒页岩矿产资源调查、城口治平陶粒页岩矿详查和生产试验工作得到四川金诚矿业有限公司、重庆金诚新盛新型建筑材料有限公司及其主要负责人王治明、王新砚等,以及中国建筑材料工业地质勘查中心四川总队谢永祥教授级高级工程师、高显忠高级工程师等支持和帮助;另外,生产试验工作得到西安墙体材料研究院有限公司李寿德教授级高级工程师,以及宜昌朗天新型建材有限公司董事长易仁忠、总经理易举然等的帮助。在此,一并表示衷心感谢!

参考文献

- [1] Vinu A, Mori T, Ariga K. New families of mesoporous materials [J]. *Science & Technology of Advanced Materials*, 2006, 7:753-771.
- [2] 李寿德,李惠娴. 我国人造轻骨料发展现状与前景分析[J]. *砖瓦*, 2016, (12):37-41.
Li SD, Li XH. Analysis on the development status and prospect of artificial lightweight aggregate in China [J]. *Brick-Tile*, 2016, (12):37-41.
- [3] 杨洁,刘学应. 陶粒制备的研究进展[J]. *建筑节能*, 2013, 41(5):45-47.
Yang J, Liu XY. Progress on the Preparation of Ceramsite [J]. *Building Energy Efficiency*, 2013, 41(5):45-47.
- [4] 谭兴立,吴林森,符巩固. 陶粒开发应用现状及在湖南的发展前景[J]. *湖南地质*, 1997, 16(1):57-62.
Tan XL, Wu LS, Fu GG. The Present Condition of Development and Application of Ceramic Grain and its Prospect in Hunan [J]. *Hunan Geology*, 1997, 16(1):57-62.
- [5] 汪灵,易和英,杨宜坪,等. 一种以灰绿色页岩为原料制备粒状人造浮石的方法[P]. 中国专利:CN201510094043.5, 2015-03-03. (2016-09-21 授权,证书号:2245113).
Wang L, Yi HY, Yang YP, et al. Method for preparing granular artificial pumice using gray-green shale as raw material [P]. China Patent:CN201510094043.5, 2015-03-03. (2016-09-21 Authorization, certificate number:2245113).
- [6] 汪灵,潘俊良,田青越,等. 一种以黑色页岩为原料制备粒状人造浮石的方法[P]. 中国专利:CN201510093995.5, 2015-03-03. (2016-10-05 授权,证书号:2256986).
Wang L, Pan JL, Tian QY, et al. Method for preparing granular artificial pumice using black shale as raw material [P]. China Patent:CN201510093995.5, 2015-03-03. (2016-10-05 Authorization, certificate number:2256986).
- [7] 汪灵,李玉平,贺修军. 一种以伊利石绿泥石板岩为原料制备粒状人造浮石的方法[P]. 中国专利:CN201510094057.7, 2015-03-03. (2017-01-11 授权,证书号:2343589)

- Wang L, Yi HY, Yang YP, *et al.* Illite and chlorite slate kind of a method of preparing a particulate starting material of artificial pumice [P]. China Patent: CN201510094057. 7, 2015-03-03. (2017-01-11 Authorization, certificate number: 2343589).
- [8] 李琳, 王晴, 王宇. 膨胀页岩轻集料的焙烧制度和性能的研究[J]. *混凝土*, 2010, (10): 95-106.
Li L, Wang Q, Wang Y. Research on calcination system and properties of expansive shale lightweight aggregate[J]. *Concrete*, 2010, (10): 95-106.
- [9] 卢光全. 轻质陶粒混凝土在屋面保温隔热中的应用[J]. *新型建筑材料*, 2008, 52-53.
Lu GQ. Application of light weight ceramsite concrete to roof thermal insulation[J]. *New Building Materials*, 2008, 52-53.
- [10] 王军涛. 页岩陶粒轻骨料混凝土在桥梁中的应用[J]. *国防交通工程与技术*, 2009, 7(3): 61-63.
Wang JT. Application of Light-weight Ceramist-shale Aggregate Concrete to Bridges[J]. *Traffic Engineering and Technology for National Defence*, 2009, 7(3): 61-63.
- [11] 扈士凯, 李应权, 陈志纯, 等. 轻骨料混凝土行业发展报告[J]. *混凝土世界*, 2015, 4: 18-22.
Hu SK, Li YQ, Chen ZC, *et al.* Lightweight aggregate concrete industry development report[J]. *China Concrete*, 2015, 4: 18-22.
- [12] 钱慧丽, 杨宗华, 梁会忠. 轻集料的发展状况综述[J]. *商品混凝土*, 2007, 1: 5-7.
Qian HL, Yang ZH, Liang HZ. Development of Lightweight Aggregate[J]. *Ready-Mixed Concrete*, 2007, 1: 5-7.
- [13] 武明, 徐成伟, 丁建彤. 轻质混凝土桥面铺装在大库怒江大桥维修加固中的应用[A]. 第十一届全国轻骨料及轻骨料混凝土学术讨论会暨第五届海峡两岸轻骨料混凝土产制与应用技术研讨会论文集[C], 2012: 201-205.
Wu M, Xu CW, Ding JT. Application of Lightweight Concrete Deck Pavement in the Maintenance and Reinforcement of Liuku Nujian Bridge[A]. *Proceedings of the 11th National Symposium on Lightweight Aggregate and Lightweight Aggregate Concrete and the Fifth Cross-Strait Symposium on Production and Application of Lightweight Aggregate Concrete*[C], 2012: 201-205.
- [14] 刘莲香, 曾令可, 侯来广, 等. 利用陶粒制备地铁吸音材料[J]. *砖瓦*, 2005, 6: 55-57.
Liu LX, Zeng LK, Hou, *et al.* To use ceramsite in acoustic material for underground tunnel[J]. *Brick-Tile*, 2005, 6: 55-57.
- [15] 陈烈芳, 李荣, 宋淑敏. 轻骨料混凝土工程应用案例[A]. 轻骨料工业发展及工程应用—第十一届全国轻骨料及轻骨料混凝土学术讨论会暨第五届海峡两岸轻骨料混凝土产制与应用技术研讨会论文集[C], 2012: 216-234.
Chen LF, Li R, Song SM. Lightweight aggregate concrete engineering application case[A]. *Lightweight Aggregate Industry Development and Engineering Application—Proceedings of the 11th National Symposium on Lightweight Aggregate and Lightweight Aggregate Concrete and the Fifth Cross-Strait Symposium on Production and Application of Lightweight Aggregate Concrete*[C], 2012: 216-234.
- [16] 王士龙, 张虹, 谢文海, 等. 用陶粒处理含铅废水[J]. *济南大学学报(自然科学版)*, 2003, 17(3): 295-297.
Wang SL, Zhang H, Xie H, *et al.* Treatment of Lead-containing Wastewater with Ceramsite[J]. *Journal of University of Jinan(Science and Technology)*, 2003, 17(3): 295-297.
- [17] 李国昌, 王萍. 优质页岩陶粒滤料的制备与基本性能研究[J]. *环境工程学报*, 2007, 6(1): 123-129.
Li GC, Wang P. Study on preparation and performances of shale ceramsite filter[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2007, 6(1): 123-129.
- [18] Jiang C, Jia LY, Zhang B, *et al.* Comparison of quartz sand, anthracite, shale and biological ceramsite for adsorptive removal of phosphorus from aqueous solution[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2014, 26: 466-477.
- [19] 毛向军, 崔永生. 宾县永发屯陶粒板岩矿床特征及开发利用前景[J]. *非金属矿*, 2000, 23(3): 32-33.
Mao XJ, Cui YS. Characteristics of Yongfatun Ceramsite Slate Deposit in Binxian County and Its Development and Utilization Prospects[J]. *Non-Metallic Mines*, 2000, 23(3): 32-33.
- [20] 马东元. 黑龙江省宾县永发屯陶粒板岩矿床地质特征及开发应用[J]. *中国非金属矿工业导刊*, 2000, 4: 39-40.
Ma DY. Geological Characteristics and Development and Application of Yongfatun Ceramsite Slate Deposit in Bin County, Heilongjiang Province[J]. *China Non-metallic Minerals Industry*, 2000, 4: 39-40.
- [21] 徐传波, 孙立伟, 张天翼, 等. 农安—德惠一带松花江西岸陶粒页岩矿床特征及开发前景[J]. *吉林地质*, 2010, 29(4): 66-69.
Xu CB, Zhang LW, Zhang TY, *et al.* Characteristics and development prospects of ceramic shale deposit along the Songhua River west Bank, Nong'an-Dehui area[J]. *Jilin Geology*, 2010, 29(4): 66-69.
- [22] 冯曲, 刘梦奇, 刘丽婷. 吉林省农安县徐家排陶粒页岩矿床特征[J]. *吉林地质*, 2013, 32(4): 88-91.
Feng Q, Liu MQ, Liu LT. Deposit features of Xujiapai haydite shale ore in Jilin Nong'an[J]. *Jilin Geology*, 2013, 32(4): 88-91.
- [23] 湖北省煤炭地质勘查院. 秭归县长江陶粒用页岩矿资源储量核实报告[R]. 2013.
Hubei Coal Geological Survey Institute. Report on the Verification of the Reserves of the Yangtze River Ceramsite Shale Mineral Resources in Zigui County[R]. 2013.
- [24] 王志云, 李玉平, 庄鹏, 等. 湖南益阳陶粒页岩烧成制度的确定[J]. *世界科技研究与发展*, 2012, 34(5): 795-797.
Wang ZY, Li YP, Zhuang P, *et al.* Determine of Haydite Shale Firing System of Yiyang City, Hunan Province[J]. *World Sci-Tech R & D*, 2012, 34(5): 795-797.

- [25] 中国建筑材料工业地质勘查中心四川总队. 重庆市城口县治平乡二龙寨矿区陶粒页岩矿详查报告[R]. 2020.
Sichuan Branch of China National Geological Exploration Center of Building Materials Industry. Detailed Investigation Report of Ceramsite Shale Mine in Erlongzhai Mining Area, Zhiping Township, Chengkou County, Chongqing City[R]. 2020.
- [26] 熊国庆, 王 剑, 李园园, 等. 大巴山地区晚奥陶世—早志留世“宜昌上升”的沉积响应[J]. *地质论评*, 2019, 65(3): 533-550.
Xiong GQ, Wang J, Li YY, *et al.* Sedimentary response to Late Ordovician—Early Silurian Yichang uplift in Daba Mountains area[J]. *Geological Review*, 2019, 65(3): 533-550.
- [27] Wang L, Fan BW, He YT, *et al.* Characteristics of the minerals and their associations of transformation processes in pyrite at elevated temperatures: an X-ray diffraction study[J]. *Ironmaking and Steelmaking*, 2014, 41(2): 147-152.

DISCOVERY AND RESEARCH OF SUPER-LARGE SCALE CERAMSITE SHALE MINERAL RESOURCES IN DABA MOUNTAIN, CHONGQING

Wang Ling

Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China

Abstract: Shale ceramsite is a kind of thermal insulation mineral functional material and light porous basic material, which is processed and prepared by self-expanding shale or slate as the only raw material. Based on the introduction of geological characteristics of super-large scale ceramsite shale mineral resources in Daba Mountain, Chongqing, the mineralogical characteristics of representative ceramsite shale and production test samples are studied by using a variety of modern detection techniques and then comparing it with similar domestic raw materials. The results show that Chengkou-Wuxi area of Chongqing is the concentrated distribution area of quality ceramsite shale mineral resources, and the ore-forming type of ore-bearing layer belongs to the sedimentary origin of shallow water shelf environment. Two kinds of ceramsite shales, gray-green shale and black shale, are newly discovered in the area, which represent two ore-bearing layers. The gray-green shale is located in the lower part of the Silurian Xintang Formation (S_{1x}), and the black shale is located in the upper part of the Silurian Longmaxi Formation (S_{1l}). According to the detailed investigation, the resource distribution of the Erlongzhai ceramic shale deposit in Zhiping Township of Chengkou County is well concentrated, with total ore layer thickness of 352.6 m, and with average thickness of the ore body of 124.24 m. In an exploration area of 0.165 km², the determined resource amount is 4 753 million tons, and the prospective resource amount is predicted to be 800 million tons. Grey-green shale and black shale in Chengkou-Wuxi area have excellent expansion properties, and at the calcination temperature of 1 150 °C, they have the average expansion ratio of 4.17 and 4.01 and porosity of 76% and 75%, respectively. Comparative analysis of samples from Chengkou-Wuxi ceramsite shale indicates that the ceramsite shale has the same or similar chemical composition, mineral composition, texture and structures. The ceramsite shale has silty argillaceous structure and microlenticular structure and the chemical composition of ceramsite shale is as follow: SiO₂ 62% ±, Al₂O₃ 18% ±, TiO₂ 0.9% ±, Fe₂O₃ 7%—10%, MgO 3% ±, CaO 0.6% ±, K₂O 4.7% ±, Na₂O 1% ±. Mineral composition of ceramsite shale is as follow: quartz 30%—35%, illite 28%—45%, green mudstone 14%—18%, plagioclase 7%—11%, pyrite 0%—2.5%. It shows that the self-swelling property of ceramsite shale is not only related to the higher flux composition (K₂O + Na₂O + MgO + CaO = 9.3% ±), but also related to the higher total organic carbon TOC (≥ 0.052%) and Fe₂O₃, as well as related to the special lense structure of the rock.

Keywords: ceramsite shale; Silurian; deposit type; shale ceramsite; mineral functional materials; Chongqing

ISSN 1001-6872(2021)01-0001-14; CODEN:KUYAE2

Synopsis of the first author: Wang Ling, male, 62 years old, a professor of mineralogy. Now he is engaged in the research of mineral material sciences.