

信阳上天梯珍珠岩工艺矿物学研究

刘意¹,周凤¹,杨光明¹,叶光雨¹,王洪权¹,周森¹,仇秀梅²,严春杰¹

1. 中国地质大学(武汉)材料与化学学院,湖北武汉430078;
2. 湖北省地质试验测试中心,湖北武汉430034

中图分类号:TD91 文献标识码:A 文章编号:1001-0076(2022)04-0135-08
DOI:10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.04.016

摘要 对信阳上天梯珍珠岩的矿物学特征进行了较全面的基础研究。以光学显微镜、X射线荧光光谱仪、X射线衍射分析仪、扫描电镜和矿物自动分析仪等研究了珍珠岩矿的矿物学特征,并测试了其含水量及膨胀倍数等性能。研究表明,上天梯珍珠岩以珍珠结构、玻璃质结构和致密块状构造为主,玻璃质含量一般大于90%。珍珠岩的球珠边缘或微裂隙中脱玻化形成了少量微细矿物蒙脱石、斜发沸石,还存在微量高岭石、长石、铁矿物(褐铁矿)等矿物。珍珠岩矿的TFe含量平均在0.6%左右,结合水含量在4%~6%,工业膨胀倍数>15倍,属于I类珍珠岩。

关键词 上天梯;珍珠岩矿;工艺矿物学;膨胀倍数

引言

珍珠岩为火山喷发的酸性熔岩流极速冷却而形成的玻璃质岩石,因其圆弧形冷凝裂纹、状似珍珠而得名^[1-2]。珍珠岩矿床大都属于岩浆喷溢作用,在地表以熔岩流溢出,或在近地表呈岩墙、岩脉快速冷凝的产物,珍珠岩为一种专属的中酸火山玻璃,珍珠岩的分类按自然类型分为珍珠岩、脱玻化珍珠岩(珍珠岩在碱性水介质作用下产生脱玻化)和硅化珍珠岩(后期的低温热液使其产生硅化蚀变)。我国珍珠岩储量丰富,全国已探明的珍珠岩矿40余处^[3],目前,已开发的较大珍珠岩矿床有河南信阳上天梯、内蒙古宁城、黑龙江嫩江、辽宁凌源建平、浙江缙云等处^[1,3-4]。其中河南信阳上天梯珍珠岩矿储量为1.27亿t,为亚洲第一、世界第二大的珍珠岩矿床^[4]。

珍珠岩是一种特殊的非金属矿产资源,在工业(功能性矿物填料、助滤剂和去污材料、油漆、搪瓷、塑料工业等)、建筑(混凝土和灰浆的骨料、吸音、防辐射材料、保温制品等)、农业(保肥剂、土壤改良剂等)、国防工业(替代昂贵的玻璃微珠)有广泛的应用^[4-9]。开展珍珠岩的工艺矿物学研究,可为珍珠岩的研究、设计、生产提供科学的、系统的基础资料,但目前国内外相关学者在该领域发表的研究资料有限。上天梯产出的珍珠岩矿产资源在国内占有重要的产业地位,但资源利用仍存在问题,如产品以原矿和初加工产品为主、附加值低。对其进一步开展工艺矿物学研究,对提升珍珠岩开发利用、高附加值产品的开发具有实际意义。因此,本研究开展了上天梯珍珠岩矿的工艺矿物学研究,以期珍珠岩的开发提供依据,同时为国内其他矿区珍珠岩的矿物特征研究提供借鉴资料。

收稿日期:2022-06-15

基金项目:湖北省地质局科技项目(KJ2022-37);湖北省地质试验测试中心科技项目(CSZXKJ-202111);浙江省非金属矿工程技术研究中心开放课题(ZD2020K10);湖北省自然科学基金(2020CFB385)

作者简介:刘意(1989—),男,河南焦作人,博士,讲师,主要从事矿物材料与综合利用、环境矿物材料及吸附分离等研究,E-mail:yiliu@cug.edu.cn。

通信作者:严春杰(1963—),男,湖北武汉人,博士,教授,主要从事矿物材料与综合利用、工业废水处理、环境矿物材料及吸附分离,E-mail:chjyan2005@126.com。

1 试验

1.1 试验原料

研究样品的自然类型为珍珠岩:(1)小样样品。通过刻槽法取样,刻槽法采集样品规格(10 cm × 5 cm ~ 10 cm × 7 cm),视矿体层的稳定性情况,沿自下而上的方向采取每间隔 1 ~ 2 m 取一个样品(3 ~ 5 kg),按矿石空间分布顺序编号,样品采集于 H、S 矿区。(2)代表性大样。对珍珠岩有充分的代表性(50 kg),样品采集于 Q、T、J 矿区。

1.2 表征方法

选取不同矿区的代表性样品制备光薄片,利用德国蔡司(AXIOCam MRC5)分析级偏反光显微镜对光薄片透明矿物及金属矿物进行光学鉴定;将不同编号的珍珠岩破碎、四分法取样、研磨并过 0.074 mm 筛,利用德国 Broker AXS D8 - Focus X 射线粉晶衍射仪(XRD)、荷兰帕纳科 AXIOSmAX X 射线荧光光谱仪(XRF)进行物相和成分分析;采用日本日立 SU8010 型电镜对块状样品进行形貌分析;以 H 矿区(具备珍珠岩最大矿体的矿区)某代表性珍珠岩制备光片,经表面喷碳处理后采用矿物自动分析仪(AMICS,由蔡司

Sigma300 场发射扫描电镜、布鲁克 X 射线能谱仪以及 AMICS 分析软件组成)对样品的矿物组成进行分析。

2 结果与讨论

2.1 珍珠岩矿物特征

珍珠岩大多为浅灰、浅天蓝灰色,标本为半透明,致密块状,新鲜断面为玻璃光泽,玻璃质结构。矿石可见典型的珍珠结构,即由冷缩形成的弧形、圆形裂纹构成的大小不同的珍珠岩组合体(图 1)。薄片玻璃质为无色透明,洁净如水,具珍珠结构(图 1)和玻璃质结构(图 1 正交光黑色部分)。正交偏光下可见球珠边缘或微裂隙中显示微弱的不消光效应,为微区脱玻化形成的少量微细矿物,可能为蒙脱石等黏土矿物或沸石类矿物。在不同矿区产出的珍珠岩,其脱玻化程度差别不太大,玻璃质含量在 60% ~ 100% 变化,一般在 90% 以上。结合 XRD 物相分析(见表 2)及镜下观测,经块薄片观测,珍珠岩矿石的矿物相组成主要为火山玻璃,一般 > 90%,少量(≤ 10%)结晶质矿物有(图 2):蒙脱石、斜发沸石、方英石、长石、白云母、褐铁矿、蛋白石。

珍珠岩的主要结构构造特征:珍珠岩一般具玻璃质结构(由均一的玻璃质组成),火山玻璃中含大量的珍珠状裂纹,发育珍珠构造(图 1)。

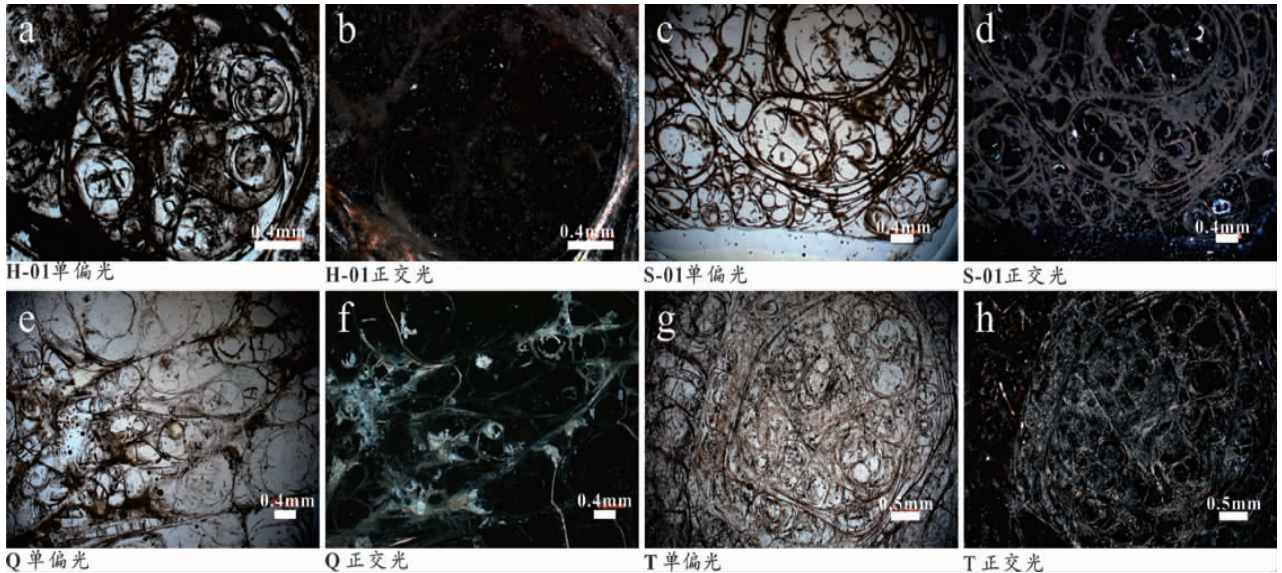


图 1 不同矿区珍珠岩薄片显微镜珍珠结构照片

Fig. 1 Microphotographs of polished perlite slice obtained from different mining field

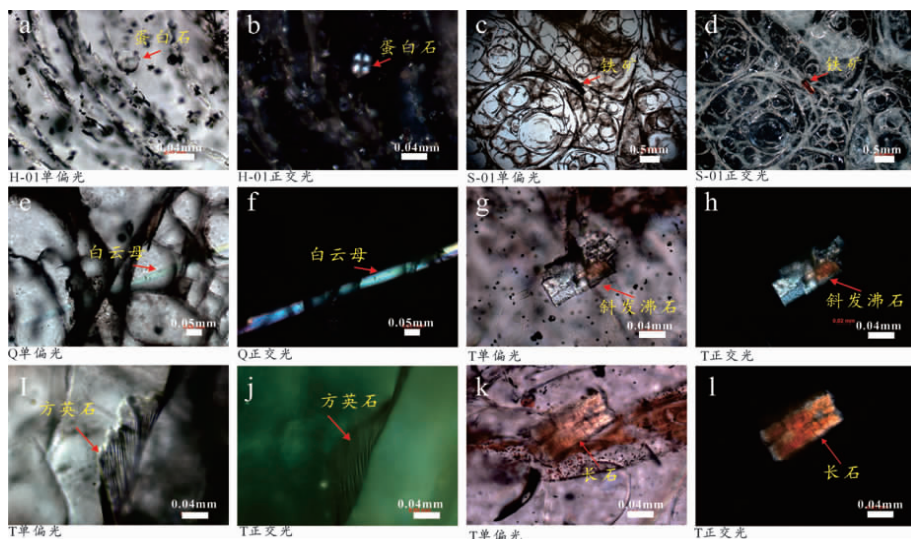


图2 珍珠岩薄片显微镜照片:(a-b)蛋白石、(c-d)铁矿物(褐铁矿)、(e-f)白云母、(g-h)斜发沸石、(i-j)方石英、(k-l)长石

Fig. 2 Microphotographs of polished perlite slice:(a-b) opal, (c-d) limonite, (e-f) muscovite, (g-h) clinoptilolite, (i-j) cristobalite, (k-l) feldspar

2.2 化学成分分析

表1 是不同矿区珍珠岩主要元素成分,从表中可知,矿石中有益成分 SiO_2 与 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量较稳定。 SiO_2 含量变化范围为 71.86% ~ 72.80%, Al_2O_3 含量变化范围为 12.48% ~ 12.91%, $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量变化范围为 7.10% ~ 8.28% ($\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O}$)。玻璃质岩石灼烧膨胀与其化学成分 ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值) 具有一定关系,当 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} > 1$ 时,其膨胀倍数 $K_0 > 20$,当 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} < 0.5$ 时,其膨胀倍数 $K_0 < 10$ 。根据 XRF 测试结果可知,该珍珠岩矿石的 $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$ 比值范围为 0.58 ~ 0.82,且由于珍珠岩矿石玻璃质含量一般 $> 90\%$,因

此矿石的 XRF 数据可作为珍珠岩膨胀倍数的参考依据,即上天梯珍珠岩的膨胀倍数为 10 ~ 20。目前,一般认为当 SiO_2 含量在 70%、 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量 5% ~ 8%、TFe 含量 $< 1\%$ 等指标时珍珠岩的膨胀性能较好^[10]。珍珠岩膨胀与其化学成分有一定关系,但与膨胀有关的是有效水分含量,化学成分可作为参考数据。

矿石中的有害组分为 TFe, TFe 可降低珍珠岩的膨胀效果并影响制品颜色,根据《矿产资源工业要求手册(2014 年修订版本)》,TFE 的含量 $< 1\%$ 为佳,TFE 的含量 $\geq 1\%$ 为劣质珍珠岩,信阳上天梯珍珠岩矿石中 TFe 含量一般为 0.6%,不超标。各矿区珍珠岩烧失量在 4.71% ~ 6.43%。H、S、Q、T、J、C 矿区珍珠岩化学成分

表1 上天梯珍珠岩主要元素含量

Table 1 XRF analysis results of perlite ore obtained from Shangtianti

矿区	编号	SiO_2	Al_2O_3	TFe	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	MnO	TiO_2	P_2O_5	LOI	合计
H 区	H-01	72.19	12.76	0.63	0.16	0.69	3.00	4.64	0.05	0.08	0.01	5.76	99.97
	H-0102	72.03	12.60	0.65	0.25	0.77	2.80	4.30	0.05	0.08	0.01	6.43	99.97
	H-0103	72.32	12.63	0.60	0.14	0.70	3.02	4.62	0.05	0.07	0.01	5.80	99.96
	H-0104	72.23	12.70	0.63	0.15	0.68	3.01	4.68	0.05	0.08	0.01	5.75	99.97
	H-0105	72.34	12.59	0.65	0.13	0.70	3.05	4.81	0.05	0.08	0.01	5.57	99.98
	S 区	S-01	72.40	12.73	0.64	0.17	0.78	3.04	4.66	0.05	0.08	0.01	5.40
S-0101		72.79	12.62	0.65	0.08	0.69	3.24	5.04	0.05	0.08	0.01	4.71	99.96
S-0102		72.42	12.55	0.67	0.22	0.83	2.98	4.79	0.05	0.09	0.01	5.36	99.97
S-0103		72.27	12.81	0.65	0.27	0.79	2.86	4.79	0.05	0.08	0.01	5.39	99.97
S-0104		72.29	12.91	0.64	0.26	0.76	2.98	4.85	0.05	0.09	0.01	5.12	99.96
S-0105		72.33	12.80	0.67	0.24	0.75	2.92	4.84	0.07	0.08	0.01	5.26	99.97
Q 区	Q	72.80	12.78	0.67	0.16	0.69	3.49	4.48	0.05	0.08	0.01	4.76	99.97
T 区	T	72.40	12.85	0.64	0.15	0.69	2.87	4.94	0.06	0.08	0.01	5.29	99.98
J 区	J	72.45	12.71	0.67	0.10	0.91	3.50	4.46	0.06	0.07	0.01	5.04	99.98

差别不大。

2.3 物相分析

图 3 为上天梯矿区部分代表性样品的 XRD 图谱。珍珠岩的 XRD 图在 15° ~ 35° 之间有一个巨大的驼峰,表明珍珠岩是典型的非晶态结构。图中 2θ 约为 22.15° 所对应的衍射强度较大的峰是 SiO₂ 的衍射峰,表明其主要成分是 SiO₂。珍珠岩只有玻璃质具有膨胀性能,其中的杂质膨胀性少或不膨胀,杂质含量多则会大大降低珍珠岩的膨胀性能。H-01 及 T 样品除了非晶态的峰外,还出现了蒙脱石的峰,证实珍珠岩脱玻化形成了蒙脱石矿物,其 $d(001) = 15.2184 \text{ \AA}$ ($1 \text{ \AA} = 0.1 \text{ nm}$),可知脱玻化形成的蒙脱石为钙基蒙脱石。经显微镜观测到的杂质矿物如斜发沸石、方英石、长石等并没有在 XRD 图谱中显示出对应的衍射峰,表明其含量低。

上天梯珍珠岩的 XRD 矿物相组成分析见表 2,其中 XRD 中非晶质的定量分析依据刘新波^[11]的含非晶质混合物相的 X 射线衍射定量分析方法。根据结果可知,珍珠岩脱玻化形成的少量微细矿物主要为蒙脱石(含量 < 7%),玻璃质的含量一般大于 90%,与薄片显微镜观测结果一致。

2.4 扫描电镜/能谱分析

图 4 为典型的珍珠岩(颗粒, H-01)样品的 SEM 图像,图 4a、b 分别为珍珠岩不同放大倍数时的电镜图像,图 4b 可观察到珍珠岩具贝壳状断口。由于珍珠岩玻璃质含量一般在 90% 以上,其他矿物含量较少,可进一步结合矿物自动分析仪观测其在球珠边缘或微裂隙中脱玻化形成的少量的微细矿物(见图 6)。

表 2 上天梯珍珠岩矿物相组成 /%
Table 2 XRD analysis results of perlite ore obtained from Shang-tianti

矿区名称	编号	蒙脱石	斜发沸石	玻璃质
H 矿区	H-01	4.7	-	95.3
	H-0102	5.2	0.8	94.0
	H-0103	1.8	-	98.2
	H-0104	2.9	-	97.1
	H-0105	1.6	-	98.5
	S 矿区	S-01	-	-
S-0101		-	-	100.0
S-0102		7.0	-	93.1
S-0103		6.2	-	93.8
S-0104		6.6	-	93.4
S-0105		-	-	100.0
Q 矿区	Q	-	-	100.0
T 矿区	T	4.4	-	95.6
J 矿区	J	-	-	100.0

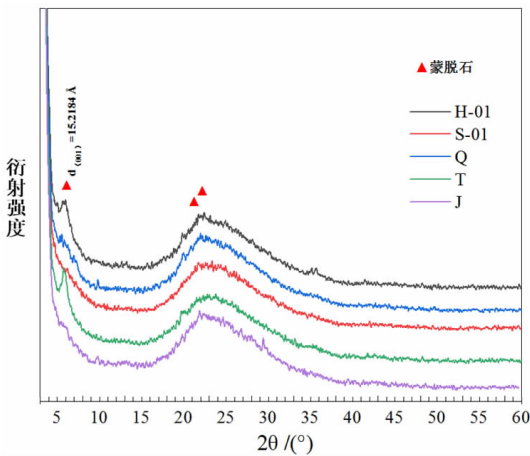


图 3 上天梯珍珠岩矿 XRD 衍射图谱
Fig. 3 XRD patterns of perlite ore obtained from Shangtianti

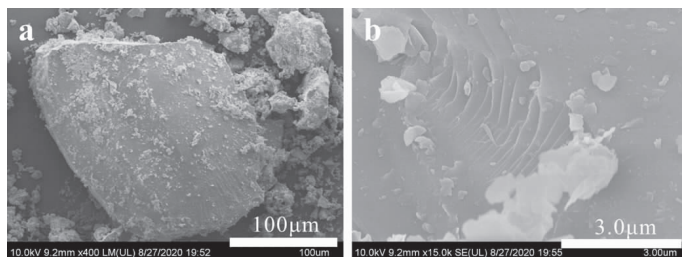


图 4 H 矿区珍珠岩 SEM 图像: a 放大倍数 400, b 放大倍数 15 k
Fig. 4 SEM images of perlite obtained from H mining field; a magnification of × 400, b magnification of × 15 k

珍珠岩玻璃质背散射图及玻璃质能谱图见图 5,能谱数据(表 3)显示珍珠岩玻璃质的 Si 元素归一化后平均含量 35.79%, Al 元素平均含量 8.43%, 同时 K、

Na 元素含量较高,分别为 5.41% 及 2.44%, Fe (0.53%) 元素及 Ca(0.48%) 元素含量较低。

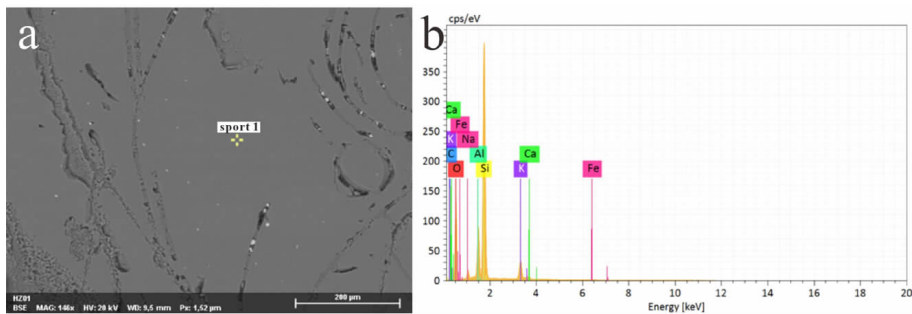


图5 H矿区珍珠岩玻璃质背散射图(a)及玻璃质能谱图(b)

Fig. 5 BSE images (a) and EDS spectrum (b) of perlite obtained from H mining field

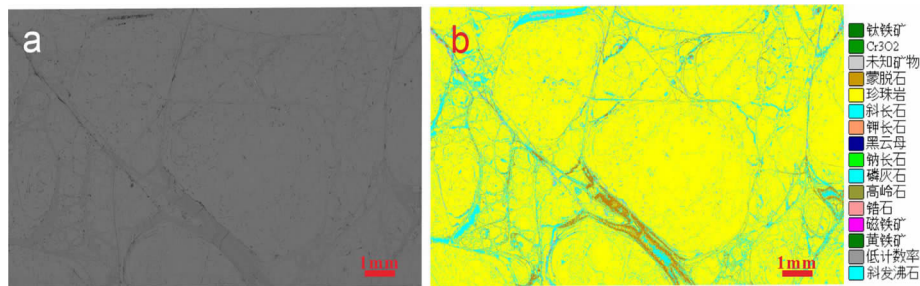


图6 H矿区珍珠岩 AMICS 分析图:(a)珍珠岩背散射电子图;(b)珍珠岩样品表面矿物分析

Fig. 6 AMICS analysis of perlite ore obtained from H mining ore: (a) BES images, (b) composition of minerals in perlite ore

表3 H矿区珍珠岩玻璃质化学成分 /%

Table 3 Chemical composition analysis of perlite glassy structure obtained from H mining field

元素	Si	Al	K	Na	Ca	Fe	O
Spot 1	35.04	8.31	5.00	2.26	0.45	0.54	48.40
Spot 2	35.79	8.39	5.73	2.38	0.54	0.53	46.65
Spot 3	36.36	8.54	5.69	2.39	0.49	0.55	45.97
Spot 4	36.71	8.66	5.24	2.60	0.47	0.51	45.82
Spot 5	35.55	8.39	5.36	2.35	0.46	0.43	47.46
Spot 6	34.96	8.32	5.32	2.75	0.49	0.51	47.65
Spot 7	36.19	8.43	5.81	2.65	0.54	0.55	45.82
Spot 8	36.50	8.55	5.48	2.29	0.47	0.57	46.15
Spot 9	35.91	8.48	5.06	2.17	0.44	0.56	47.39
Spot 10	34.87	8.25	5.43	2.62	0.45	0.55	47.84
平均	35.79	8.43	5.41	2.44	0.48	0.53	46.91

表4 H矿区珍珠岩矿物组成 /%

Table 4 Mineral composition analysis of perlite obtained from H mining ore

矿物名称	质量分数	面积比
玻璃质	85.38	82.80
斜发沸石	9.74	11.67
蒙脱石	3.13	3.39
Cr ₂ O ₃ *	0.08	0.04
高岭石	0.02	0.02
磁铁矿	0.01	0.01
斜长石	0.01	<0.01
钠长石	0.01	<0.01
磷灰石	<0.01	<0.01
钾长石	<0.01	<0.01
锆石	<0.01	<0.01
黄铁矿	<0.01	<0.01
黑云母	<0.01	<0.01
未知矿物	1.46	1.86
低计数率	0.16	0.21
合计	100.00	100.00

* Cr₂O₃ 来源于磨片使用抛光粉的残留物。

2.5 矿物自动分析仪分析

AMICS 技术完成的矿物定量识别和鉴定可弥补光学显微镜等常规的岩矿鉴定手段的不足。图6为H矿区珍珠岩 AMICS 分析图,珍珠岩的矿物组成见表4。图6b 可看出样品主要由珍珠岩(黄色)组成,珍珠岩玻璃质含量 85.38% (表4),与 XRD 分析结果基本一致。矿石球珠边缘或微裂隙中存在蒙脱石、高岭石、斜发沸

石、长石(斜长石、钾长石、钠长石)以及少量黑云母、磷灰石、锆石、钛铁矿、磁铁矿、黄铁矿等矿物(图6b)。由表4可知矿石中主要组成矿物为火山玻璃,并含较多的斜发沸石(9.74%)及少量蒙脱石(3.13%),其余矿物含量均较少。金属矿物为磁铁矿,含量仅占0.01%。

2.6 珍珠岩含水量

当珍珠岩进行焙烧时,因突然受热达到软化程度,玻璃质中结合水汽化产生很大压力,体积迅速膨胀。在玻璃质冷却至软化温度以下时,便凝成空腔结构,形成多孔的膨胀珍珠岩,因此水是引起珍珠岩膨胀的内因。与珍珠岩直接膨胀有关的是有效水分(即玻璃质在玻璃软化温度时所残余的水,是在加热 200 ~ 400 °C 左右时测定的水分),但只有含水量合适才能获得较高膨胀倍数。

表 5 为珍珠岩的结合水含量测试结果,从表 5 可知结合水含量在 4% ~ 6% 之间。岩石中的结合水过多或过少均不适宜制备膨胀珍珠岩。一般以 2% ~ 4% 为宜,结合水量大时会使产品炸裂粉化,含量小时则没有足够的压力膨胀不充分。因此珍珠岩在膨胀前需要采用预热的办法控制矿砂的有效含水量。

2.7 珍珠岩膨胀倍数

膨胀珍珠岩的质量可通过测试珍珠岩矿砂的膨胀性能进行评价。工业生产中珍珠岩进入膨胀炉为连续动态进料,其在工业膨胀炉中的受热方式与在实验室高温马弗炉中的受热方式也不相同^[12],所以膨胀倍数相差较大。实验室测定的膨胀倍数(K)与工业生产的膨胀倍数(K_0)可根据经验公式(1)换算^[2]:

$$K_0 = 5.2(K - 0.8) \quad (1)$$

珍珠岩膨胀倍数与粒径有一定关联^[2],本次测试选用的珍珠岩样品粒径是 20 ~ 40 目(0.83 ~ 0.38 mm),将 1 mL 待测样品在 350 °C 预烧 5 min,使样品的含水率在 2% ~ 3%。再将样品在 1 200 °C 焙烧 10 s,使样品充分膨胀,冷却后倒入量筒中,读取示数直至体积不再变化,记为 V ,计算其实验室膨胀倍数。实验室测试珍珠岩膨胀倍数及根据经验公式换算的工业生产的膨胀倍数见表 5。根据实验室测得的倍数换算为工业生产的膨胀倍数可知,各矿区珍珠岩膨胀倍数均 > 15 倍。

根据《矿产资源工业要求手册(2014 年修订版本)》,珍珠岩按用途可划分为 I、II、III 三类,依据实验室膨胀倍数(≥ 3.5)以及 XRF 测试结果($\text{TFe} < 1.0\%$)可知,信阳上天梯珍珠岩为 I 类珍珠岩。珍珠岩的开发应用还需结合国家标准或行业标准,如《JCT 809—2012 膨胀珍珠岩用矿砂》《JCT 849—2012 珍珠岩助滤剂》《GB 31634—2014 食品安全国家标准食品添加剂珍珠岩》《GB/T 10303—2015 膨胀珍珠岩绝热制品》《JC/T 430—2012 膨胀珍珠岩装饰吸声板》等,

进一步检测其产品品质。

表 5 珍珠岩结合水含量与膨胀倍数

Table 5 The amount of bound water content in perlite ore and its expansion ratio

矿区名称	样品名称	结合水含量/%	实验室测定	换算工业生产的
			膨胀倍数(K)	膨胀倍数(K_0)
H 矿区	H-01	5.61	4.4	18.7
	H-0102	5.61	4.0	16.6
	H-0103	5.41	4.4	18.7
	H-0104	5.51	5.0	21.8
	H-0105	5.21	4.4	18.7
	S-01	5.20	4.2	17.6
S 矿区	S-0101	4.59	4.4	18.7
	S-0102	5.20	5.2	22.9
	S-0103	5.10	5.0	21.8
	S-0104	5.00	5.4	23.9
Q 矿区	Q	4.59	4.6	19.7
T 矿区	T	5.10	5.6	24.9
J 矿区	J	4.90	5.0	21.8

3 结论

(1) 信阳珍珠岩以珍珠结构、玻璃质结构和致密块状构造为主。 SiO_2 含量一般在 72% 左右。 $\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O}$ 含量介于 4% ~ 8% 之间, Al_2O_3 含量一般为 12% ~ 13%, TFe 含量较低,平均在 0.6% 左右,结合水含量范围在 4% ~ 6%,物相组成主要由玻璃质组成,玻璃质含量一般大于 90%。符合膨胀性能较好的珍珠岩的指标。

(2) 光学显微镜观测、XRD 和 AMICS 等鉴定结果表明,珍珠岩的球珠边缘或微裂隙中脱玻化形成了少量微细矿物蒙脱石、斜发沸石,另外还存在微量高岭石、长石、云母、磷灰石、锆石、铁矿物等。

(3) 试验表明,上天梯珍珠岩工业膨胀倍数 > 15 倍,矿区珍珠岩均为 I 类珍珠岩,适宜作为保温材料。但珍珠岩开发应用还需根据行业标准进一步检测其产品品质。

参考文献:

- [1] 杜鹏. 我国珍珠岩资源概况及开发利用现状[C]//2018 年中国非金属矿科技与市场交流大会. 大同, 2018.
DU P. Present situation of exploitation and utilization of perlite resources in China [C]//Industry Mineral China in 2018, Datong, Shanxi, China, 2018.
- [2] 刘鹏, 刘红燕. 信阳上天梯珍珠岩膨胀性能影响因素研究[J]. 非金属矿, 2008, 31(5): 23-25.

- LIU P, LIU H Y. Study on influencing factors to expanding performance of perlite from shangtianti in Xinyang[J]. Non - Metallic Mines, 2008, 31(5): 23 - 25.
- [3] 杜鹏. 我国珍珠岩资源概况及开发利用现状[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2016(4): 6 - 8.
- DU P. Present Situation of exploitation and utilization of perlite resources in China [J]. China Non - metallic Minerals Industry, 2016(4): 6 - 8.
- [4] 于永生, 葛灵, 武珂, 等. 我国珍珠岩矿产综合利用及其发展战略[J]. 矿产保护与利用, 2019, 39(6): 159 - 163.
- YU Y S, GE L, WU K, et al. Comprehensive utilization and development strategy of perlite mineral resources in China [J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2019, 39(6): 159 - 163.
- [5] 钟方兴, 陈世富. 珍珠岩助滤剂的技术性能及市场分析[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 1994, 7(3): 302 - 304.
- ZHONG F X, CHEN S F. Properties and market development of perlite filter [J]. Journal of Xinyang Teachers College (Natural Science Edition), 1994, 7(3): 302 - 304.
- [6] 余晟. 珍珠岩微粉的综合应用综述[J]. 科技信息(学术研究), 2007(27): 86 - 87.
- YU S. A review on comprehensive application of perlite powder[J]. Science & Technology Information (Academic Research), 2007(27): 86 - 87.
- [7] 耿旗辉. 膨胀珍珠岩基超高性能混凝土制备与性能研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2021.
- GENG Q H. Study on The design and properties evaluation of sustainable UHPC including expanded perlite [D]. Qingdao: Qingdao University of Technology, 2021.
- [8] 王浩杰. 高强度膨胀珍珠岩保温材料的制备研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- WANG H J. Study on the preparation of high strength expanded perlite insulation material [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2021.
- [9] 于志龙, 李晓兰, 郑文敬, 等. 珍珠岩的加工工艺及若干深加工产品研究[J]. 冶金与材料, 2021, 41(1): 37 - 38.
- YU Z L, LI X L, ZHENG W J, et al. Processing technology of perlite and research on several deep - processing products [J]. Metallurgy and materials, 2021, 41(1): 37 - 38.
- [10] 邓峰, 王朝晖, 周世全. 信阳上天梯一带珍珠岩矿地质特征[J]. 中国非金属矿工业导刊, 2013(4): 56 - 59.
- DENG F, WANG C H, ZHOU S Q. Geological characteristics of perlite in Shangtianti Area of Xinyang [J]. China Non - metallic Minerals Industry, 2013(4): 56 - 59.
- [11] 刘新波. 含非晶质混合物相的 X 射线衍射定量分析方法研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1996(2): 111 - 118.
- LIU X B. Quantitative X - ray diffraction analysis amorphous integrating multi - points intensity method [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1996(2): 111 - 118.
- [12] 周秀清. 珍珠岩膨胀倍数的测定[J]. 当代化工, 2008(2): 122 - 124 + 129.
- ZHOU X Q. Study on dispersion behavior of abio - brine in residue [J]. Contemporary Chemical Industry, 2008(2): 122 - 124 + 129.