

祁连山高压变质富锰硅质岩中砷硅锰矿的矿物学研究

叶诗婷¹, 宋述光¹, 陈晶²

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 造山带和地壳演化教育部重点实验室, 北京 100871; 2. 北京大学物理学院, 北京 100871)

摘要: 北祁连山缝合带是一条典型的早古生代大洋型俯冲带, 其中发育两条蓝片岩带: 含硬柱石的低级蓝片岩带和含榴辉岩的高级蓝片岩带。在清水沟地区含榴辉岩的高级蓝片岩带中的高压变质富锰硅质岩中发现稀有的砷硅锰矿, 这是国内首次发现砷硅锰矿。利用光学显微镜、扫描电镜、电子探针、拉曼光谱、透射电镜等方法对其进行了详细的矿物学研究。研究发现, 砷硅锰矿密度为 $3.69 \sim 3.75 \text{ g/cm}^3$, 硬度为 $6 \sim 7$, 与石英、红帘石、蓝闪石、多硅白云母和赤铁矿等矿物共生, 二轴晶, 正光性, (010)解理完全, 从淡黄色到金黄色, 多色性强烈; 砷硅锰矿的主要成分是 Si、Al、Mn, 富含 As, 并含有少量的 F、V、P; 在拉曼图谱上, 砷硅锰矿具有许多明显的特征峰, 且显示出砷酸根、钒酸根以及 MnO 键和 SiO₃ 基团的存在; 在晶体结构上, 砷硅锰矿为斜方晶系, 空间群为 *Pnmm*, 晶轴参数为 $a = 8.934 \text{ \AA}$, $b = 5.817 \text{ \AA}$, $c = 19.005 \text{ \AA}$ 。这些矿物学特征可以作为砷硅锰矿的鉴定和研究依据。

关键词: 砷硅锰矿; 富锰硅质岩; 高压变质; 化学成分; 晶体结构; 祁连山

中图分类号: P575

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2019)01-0090-07

Mineralogy of ardennite-(As) from HP metamorphic Mn-rich silica rocks in North Qilian Mountain

YE Shi-ting¹, SONG Shu-guang¹ and CHEN Jing²

(1. Key Laboratory of Orogenic Belts and Crustal Evolution, School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing, 100871, China; 2. School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The North Qilian Mountain suture zone is a typical early Paleozoic oceanic subduction zone, in which two blue schist zones are developed: a low-grade blue schist zone with lawsonite and a high-grade blue schist zone with eclogites. Ardennite-(As), a rare kind of silicate mineral, was found in the high-pressure metamorphic Mn-rich silica rocks in the high-grade blue schist zone containing eclogites in the North Qilian Mountain. This is the first discovery of ardennite-(As) in China. Detailed mineralogical studies were carried out by means of optical microscopy, scanning electron microscopy, electron probe microscopy, Raman spectroscopy and transmission electron microscopy. According to the results obtained, the density of ardennite-(As) is $3.69 \sim 3.75 \text{ g/cm}^3$ and the hardness is $6 \sim 7$; ardennite-(As) crystals are biaxial (+) and have perfect cleavage in (010), pleochroism is strong from pale yellow to golden yellow, usually associated with quartz, piemontite, glaucophane, phengite and hematite; the main components of ardennite-(As) are Si, Al, Mn, it is rich in As, and contains a small amount of F, V, P; in Raman spectrum; ardennite-(As) shows many characteristic peaks, probably indicating the presence of arsenate,

收稿日期: 2018-10-15; 接受日期: 2018-12-13; 编辑: 尹淑苹

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41572040, 41372060)

作者简介: 叶诗婷(1994-), 女, 硕士, 岩石学和矿物学研究方向; 通讯作者: 宋述光, E-mail: sgsong@pku.edu.cn。

vanadium, MnO and SiO₃ bonds; in the crystal structure, ardenite-(As) is orthorhombic, the space group is *Pnmm*, and the crystal axis parameters are $a = 8.934 \text{ \AA}$, $b = 5.817 \text{ \AA}$, $c = 19.005 \text{ \AA}$. These mineralogical features can be used as the basis for the identification and study of ardenite-(As).

Key words: ardenite-(As); Mn-rich quartz schist; HP metamorphism; chemical component; crystal structure; QiLian Mountain

Fund support: National Natural Science Foundation of China (41572040, 41372060)

ardenite 是一种特殊的硅酸盐矿物,其阴离子含有砷酸根或钒酸根,标准化学式为 $\text{Mn}_4\text{Al}_4(\text{AlMg})(\text{Si}_3\text{O}_{10})(\text{SiO}_4)_2(\text{AsO}_4, \text{VO}_4)(\text{OH})_6$, 主要成分有 Mn、Al、Si、As、Mg、O、H, 常见杂质成分为 Ti 和 Cu。

19 世纪后半叶, ardenite 首次发现于比利时, 当时研究者以为它是一种含有 Mn^{3+} 替代阳离子的蓝晶石 (Lasaulx, 1872a, 1872b, 1872c), 后来经过化学成分分析, 发现该矿物中含有 V, 且锰为 Mn^{2+} , 由此确定其为一种新矿物。随后, Pisani (1872, 1873) 在其中又发现 As, 这让 ardenite 成为世界上第一种被发现的含有 As 的硅酸盐矿物。后续研究 (Barresi *et al.*, 2007) 发现, ardenite 有含 As 和含 V 两个端员组分, 二者为连续固溶体。

ardenite 非常少见, 通常以副矿物产出于伟晶岩、石英脉和高氧逸度的富 Mn 和 Al 的变质沉积岩中, 比如含有锰石榴石、红帘石等富锰矿物的石英片岩和变质泥质岩, 并且常与钠长石、褐锰矿、软锰矿、赤铁矿、石英等共生。到目前为止, 全球范围内先后报道发现 ardenite 的地区只有欧洲的比利时、英国、法国、希腊、意大利、马其顿、瑞士、俄罗斯, 亚洲的印度、日本以及大洋洲的新西兰、澳大利亚等国家, 主要集中在造山带和岛弧地区 (Enami, 1986; Matsubara and Kato, 1987; Pasero and Reinecke, 1991; Coombs *et al.*, 1993; Turner, 2006; Nagashima and Armbruste, 2010; Altherr *et al.*, 2017)。

这次在北祁连山清水沟地区的高压变质富锰硅质岩中发现 ardenite-(As), 是在中国首次发现该矿物。由于之前在中国尚未有相关发现的报道, 且在正规的中文文献及常规的地质词典中, 都没有该矿物所对应的正式中文名称, 因此, 本文尝试根据该矿物的主要成分, 对其进行中文准确命名, 将 ardenite-(As) 定名为砷硅锰矿, 将 ardenite-(V) 定名为钒硅锰矿, 以便后续研究报道。

本文利用光学显微镜、扫描电镜、电子探针、拉曼光谱、透射电镜等方法对祁连山富锰硅质岩中的砷硅锰矿进行了详细的矿物学研究, 旨在为国内的

研究者对砷硅锰矿的鉴定和研究提供依据。

1 样品

北祁连山缝合带是典型的早古生代大洋型俯冲带, 清水沟剖面是典型的含榴辉岩的高级蓝片岩带, 其变质年龄约 520 ~ 440 Ma, 变质温压条件为 2.0 ~ 2.6 GPa (Song *et al.*, 2013)。富锰硅质岩在清水沟高级蓝片岩带中呈透镜状或层状的岩块, 伴生岩性有含硬柱石的榴辉岩、蓝片岩、含纤柱石的变质泥质岩、蛇纹岩和变质杂砂岩。富锰硅质岩可以细分为 3 种: 富锰的石英片岩、含铁锰结核的硅质岩和条带状富铁锰的霓石硅质岩。

本研究中的样品均来自在北祁连山清水沟地区实地采集的高压变质富锰石英片岩, 手标本颜色为棕褐色, 风化程度低, 肉眼可见石榴石和石英颗粒, 云母等片柱状矿物定向排列, 片理化变形作用明显。

将石英片岩手标本碎至 40 目, 用双目镜观察, 可分辨出砷硅锰矿晶体 (图 1)。砷硅锰矿为柱状集合体, 横切面为菱形, 半透明, 金黄色到棕黄色, 亚金刚光泽, 密度为 3.69 ~ 3.75 g/cm³ (理论密度为 3.74 g/cm³), 硬度为 6 ~ 7, 易碎, 大量与石英共生, 少量与红帘石和赤铁矿共生。

2 实验方法

利用配备有金刚石刀片的切片机对岩石手标本进行切割, 磨片并抛光后制成 0.3 mm 厚的探针光片, 运用光学显微镜在单偏光镜下观察样品的岩相学和矿物学特征, 并对砷硅锰矿的光学特征进行鉴定。

主要矿物的电子探针成分分析 (EPMA) 在北京大学造山带和地壳演化教育部重点实验室进行, 电子探针仪器为 JXA-8230, 加速电压为 15 kV, 电流为 $1.0 \times 10^{-8} \text{ A}$, 束斑大小为 2 μm , 校正方法为 PRZ, 标准样品为美国 SPI 公司的 53 种矿物。石榴子石、红帘石、多硅白云母、蓝闪石、单斜辉石等主要矿物的

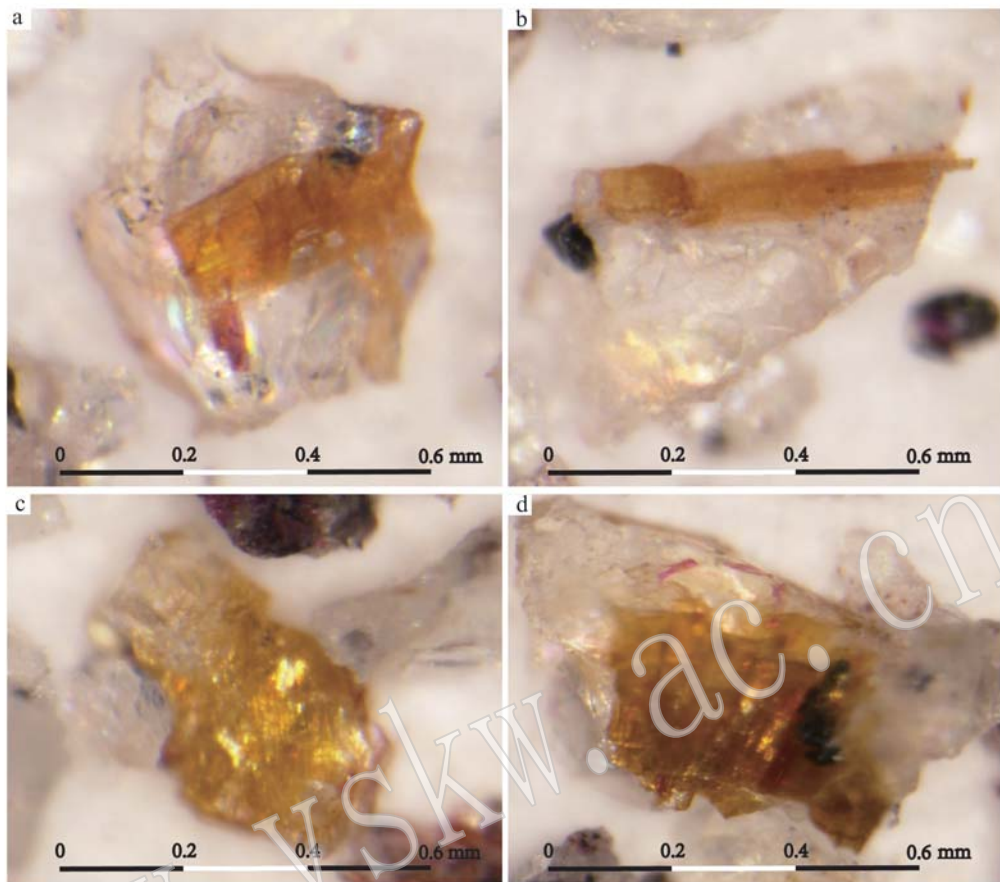


图1 砷硅锰矿晶体照片

Fig. 1 Photos of ardennite-(As) from North Qilian Mountain

分子式计算均采用了 AX 程序计算。

砷硅锰矿的电子探针分析是在桂林理工大学的广西隐伏金属矿产勘查重点实验室利用 JAX-8230 电子探针完成。测试条件为加速电压 20 kV, 电流 2.0×10^{-8} A, 束斑 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 。

拉曼光谱分析实验在北京大学地球与空间科学学院教学实验中心拉曼光谱实验室进行, 激发波长为 532 nm, 激光发射功率为 50 mW, 狭缝宽度为 $65 \mu\text{m}$, 50 倍 Leica 物镜下实验。实验采用静态光栅, 样品单次扫描时间为 30 s, 累计次数为 10 次, 束斑大小为 $1 \mu\text{m}$, 分辨率为 1 cm^{-1} , 数据获取范围为 $50 \sim 3500 \text{ cm}^{-1}$ 。

扫描电子显微镜分析和透射电子显微镜分析是在北京大学物理学院电子显微镜实验室利用 Hitachi F30 高分辨率透射电子显微镜完成。该透射显微镜配备了 X 射线能谱仪 (EDS), 该能谱仪具有超薄窗口探测器, 能够对从 B 到 U 的元素进行定性识别和测量, 扫描电镜分析的加速电压为 15 kV, 束斑大小

为 $5 \mu\text{m}$ 。透射电镜分析的加速电压为 300 kV, 根据片岩中该矿物沿片理定向排列的性质, 结合薄片在显微镜下的观察, 确定砷硅锰矿的结晶轴方向, 沿晶轴方向切片进行减薄, 通过透射电镜得到矿物晶格的衍射花样, 以确定矿物的晶体参数。

3 结果与分析

3.1 显微观察分析

显微镜下, 富锰石英片岩为变晶结构, 片状构造, 含有粒状或螺旋状的石榴石、菱形或长柱状的蓝闪石、残余状的半霓石、半硬玉质的单斜辉石、片状的多硅白云母、柱状的红帘石、不规则形状的赤铁矿等矿物, 片理明显, 基质为石英。

砷硅锰矿为副矿物, 含量不到 2%, 普遍被石英包围, 与红帘石、赤铁矿、蓝闪石、多硅白云母等矿物共生 (图 2)。砷硅锰矿呈短柱状、长条状或纤维状集合体出现, 沿 *b* 轴方向延伸, 二轴晶, 正光性。在单

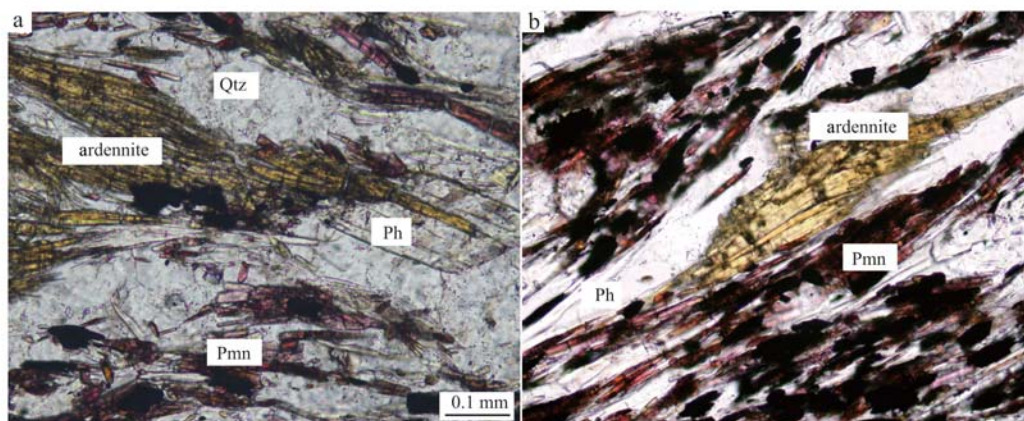


图 2 砷硅锰矿的显微照片

Fig. 2 Microscope images of ardennite-(As)

Qtz—石英；ardennite—砷硅锰矿；Ph—多硅白云母；Pmn—红帘石
 Qtz—quartz；ardennite—ardennite-(As)；Ph—phengite；Pmn—piemontite

偏光镜下为透明矿物，从淡黄色到金黄色，多色性强烈，一组解理(010)完全，正交偏光下为二级干涉色。Reinecke 等(1987)认为砷硅锰矿的多色性和吸收性的强度与其中 Mn^{3+} 的含量呈正相关，也有研究发现钒硅锰矿相比于砷硅锰矿具有更强烈的多色性和吸收性以及更高的折射率(Coombs *et al.*, 1993)，推测其与 V 的含量相关。

3.2 扫描电镜结果分析

扫描电镜图像显示，砷硅锰矿集合体实际上是由砷硅锰矿与石英、多硅白云母等无色透明矿物共生形成的集合体(图 3)。SEM 图像中灰色的短柱状矿物为砷硅锰矿，晶体粒度很小，长约 20 μm ，宽约 5 μm ，相当于粉晶。另外，浅褐色矿物为多硅白云母，深褐色矿物为石英，亮白色矿物为赤铁矿。

能谱成分分析结果表明，砷硅锰矿的主要成分为 Si、Al、Mn、As，同时还有一定量的 Ca 和 Fe，其中 As 等元素是周围矿物都没有的。

3.3 电子探针结果分析

电子探针分析结果(表 1)显示，砷硅锰矿的总量在 92.46% ~ 96.21%，主要元素有 Si、Al、Mn，其中 MnO 含量为 22.94% ~ 24.63%，并且富集 As， As_2O_5 含量为 4.88% ~ 7.94%，此外还有一定量的 Cu、P、V、F 等微量元素，烧失成分主要是 H_2O (表 1)。

3.4 拉曼光谱结果分析

北祁连山样品中的砷硅锰矿在拉曼图谱中具有非常明显的谱峰位置和相对强度(图 4)，在一定程度上反映了砷硅锰矿的化学结构和化学键振动模式。

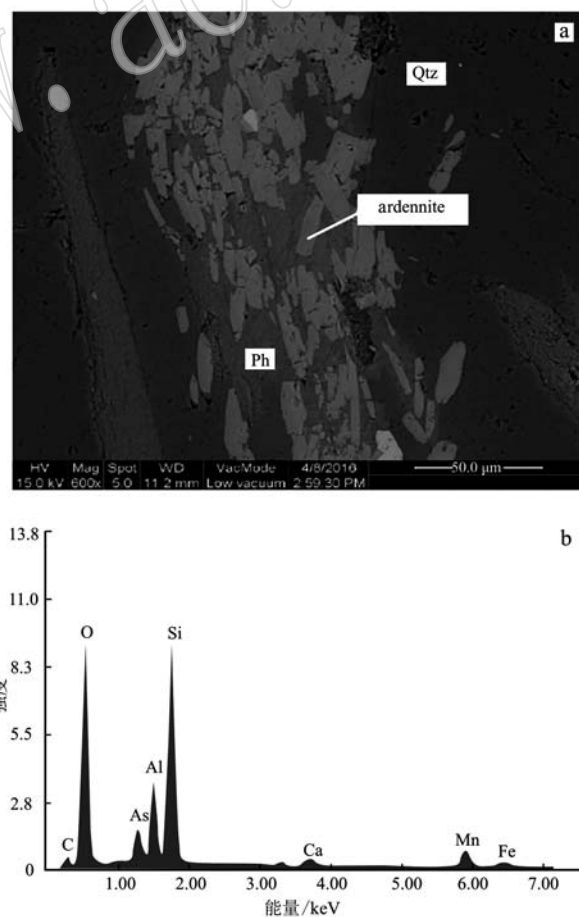


图 3 砷硅锰矿的扫描电镜图像和能谱图

Fig. 3 SEM photo and EDS spectrum of ardennite-(As)

Qtz—石英；ardennite—砷硅锰矿；Ph—多硅白云母
 Qtz—quartz；ardennite—ardennite-(As)；Ph—phengite

表1 砷硅锰矿的电子探针成分分析结果

Table 1 Representative EPMA analyses of ardennite-(As) from Qilian suture zone

样品	Q126-1.3	Q126-1.4	Q126-1.5	Q126-2.1	Q126-2.2	Q126-3.1	Q126-3.2	Q126-3.3
SiO ₂	32.40	31.74	32.05	32.30	31.55	31.35	31.86	31.48
TiO ₂	0.08	0.06	0.14	0.07	0.07	0.05	0.08	0.07
Al ₂ O ₃	21.94	22.16	21.37	22.83	21.68	21.69	22.19	21.75
Fe ₂ O ₃	1.19	1.40	1.41	1.13	1.34	1.47	1.30	1.36
MnO	22.94	23.41	24.45	24.46	24.63	24.25	23.85	24.23
NiO	0.06	0.02	0.06	0.00	0.04	0.04	0.03	0.05
MgO	3.93	4.00	3.40	4.07	4.04	3.95	4.08	4.19
CaO	3.54	3.06	2.98	2.73	2.87	3.37	3.18	2.95
Na ₂ O	0.02	0.00	0.04	0.02	0.00	0.00	0.04	0.00
As ₂ O ₅	6.72	7.94	4.88	7.12	6.75	7.28	6.74	6.69
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
P ₂ O ₅	0.39	0.26	0.40	0.19	0.22	0.32	0.26	0.35
V ₂ O ₅	0.04	0.19	0.37	0.15	0.18	0.29	0.15	0.51
CuO	0.64	0.71	0.87	0.81	0.74	0.95	0.72	0.52
F	0.00	0.56	0.09	0.57	0.20	0.60	0.00	0.08
Total	93.88	95.26	92.46	96.21	94.22	95.35	94.49	94.20

以22个氧离子和6个氢氧根为单位计算氧离子数

Si	5.61	5.46	5.67	5.50	5.50	5.43	5.51	5.47
Ti	0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al	4.47	4.48	4.44	4.58	4.45	4.42	4.51	4.44
Fe ³⁺	0.15	0.20	0.21	0.16	0.19	0.21	0.19	0.20
Mn ²⁺	3.36	3.40	3.65	3.52	3.63	3.55	3.49	3.56
Ni	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00	0.01
Mg	1.02	1.03	0.90	1.04	1.06	1.03	1.06	1.09
Ca	0.66	0.56	0.56	0.50	0.54	0.63	0.59	0.55
Na	0.01	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00
As	0.61	0.71	0.45	0.63	0.61	0.66	0.61	0.61
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
P	0.06	0.04	0.06	0.03	0.03	0.05	0.04	0.05
V	0.00	0.03	0.05	0.02	0.02	0.04	0.02	0.07
Cu	0.08	0.09	0.11	0.10	0.10	0.12	0.09	0.07
F	0.00	0.30	0.05	0.30	0.11	0.33	0.00	0.05
Total	16.06	16.02	16.16	16.10	16.16	16.14	16.14	16.11

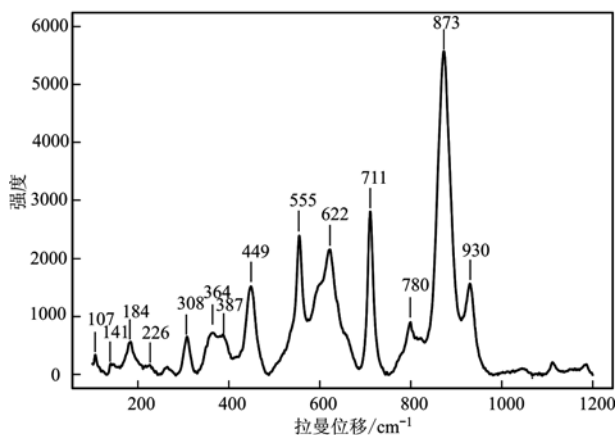


图4 砷硅锰矿的拉曼光谱图

Fig. 4 Raman spectra of ardennite-(As)

根据 RRUFF 矿物数据库的砷硅锰矿的标准矿物拉曼图谱,可以明显对应的特征峰有 141、226、364、449、555、622、711、780、873、930 cm^{-1} 。700 ~ 1 000 cm^{-1} 波段的峰可能是由于 AsO_4 的对称伸缩振动和反对称振动伸缩以及 VO_4 的对称振动伸缩模式导致的, Frost 等(2014)认为 930 cm^{-1} 是由 VO_4 的 ν_1 对称伸缩振动引起, 873 cm^{-1} 是由 AsO_4 的 ν_1 对称伸缩振动引起, 780 cm^{-1} 是由 AsO_4 的 ν_3 反对称伸缩振动引起。此外, 根据相关计算, 622 cm^{-1} 可能是由 SiO_3 的弯曲振动引起。Frost 等(2014)也认为 449 cm^{-1} 可能是由 B_{2g} 和 E_g 振动重合而引起的, 308、364、387 cm^{-1} 这些峰可能是由 MnO 的伸缩和弯曲振动引起, 而 107、141、184、226 cm^{-1} 这些峰则是源于晶带振动。

3.5 透射电镜结果分析

透射电镜的晶格衍射花样图(图5)显示,砷硅锰矿的晶体结构为斜方晶系,空间群为 $Pnmm$, 晶轴分别是 $a = 8.934 \text{ \AA}$ 、 $b = 5.817 \text{ \AA}$ 、 $c = 19.005 \text{ \AA}$ 。在 RRUFF 矿物数据库里,砷硅锰矿标准矿物的晶轴参数为 $a = 8.711(3) \text{ \AA}$ 、 $b = 5.808(2) \text{ \AA}$ 、 $c = 18.510(7) \text{ \AA}$, $Z = 2$ [[http://rruff.info/Ardennite-\(As\)](http://rruff.info/Ardennite-(As))], 本文实验

结果相比于理想参数略有误差,整体偏大一点 (a 偏大 2.56%, b 偏大 0.16%, c 偏大 2.67%), 推测是由于实验仪器的系统误差造成,也可能与高压环境下的晶格变形有关,因为北祁连山清水沟高级蓝片岩带的变质压力条件为 2.0 ~ 2.6 GPa (Song *et al.*, 2007, 2009; Zhang *et al.*, 2007; Wei *et al.*, 2008, 2009)。

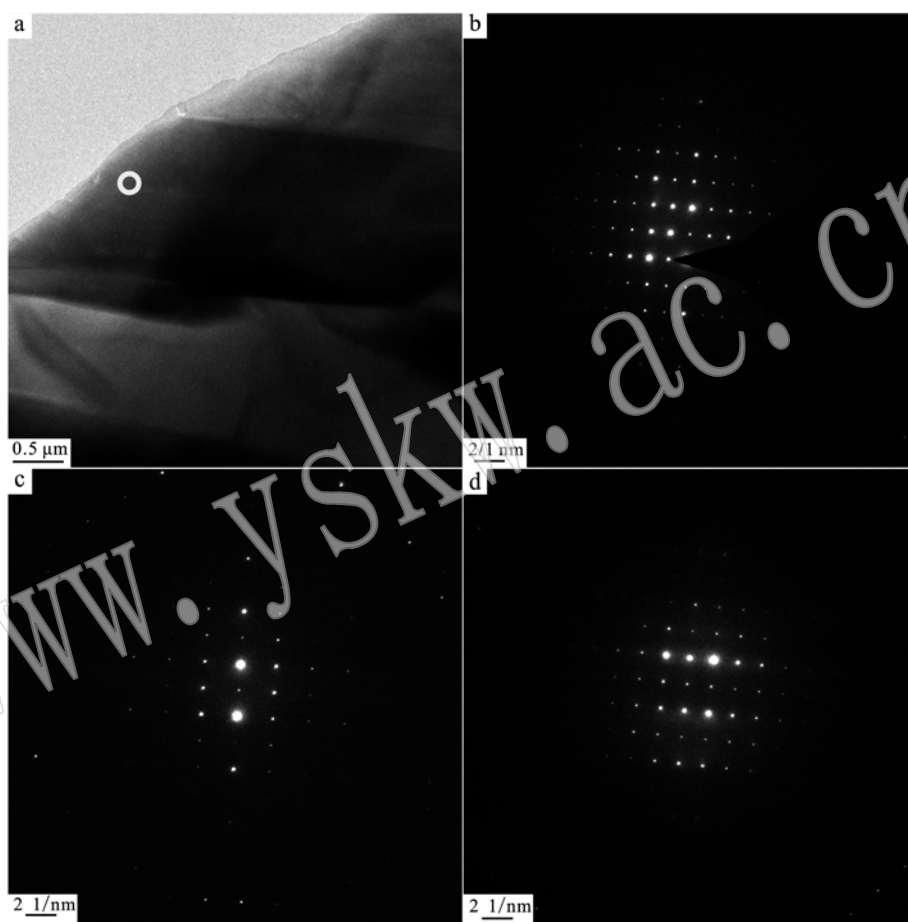


图5 砷硅锰矿的透射电镜晶格衍射花样图

Fig. 5 Lattice diffraction patterns of ardennite-(As) by transmission electron microscope

4 结论

在祁连山清水沟地区含榴辉岩的高级蓝片岩带中的高压变质富锰硅质岩中发现砷硅锰矿,这是国内发现的首例。

通过光学显微镜、扫描电镜、电子探针、拉曼光谱、透射电镜等研究发现,砷硅锰矿密度为 3.69 ~ 3.75 g/cm₃, 硬度为 6 ~ 7, 与石英、红帘石、蓝闪石、

多硅白云母和赤铁矿等矿物共生,二轴晶,正光性,(010)解理完全,从淡黄色到金黄色,多色性强烈;砷硅锰矿的主要成分是 Si、Al、Mn, 富含 As, 并含有少量的 F、V、P; 在拉曼图谱上,砷硅锰矿具有许多明显的特征峰,且显示出砷酸根、钒酸根以及 MnO 键和 SiO₃ 基团的存在;在晶体结构上,砷硅锰矿为斜方晶系,空间群为 $Pnmm$, 晶轴参数为 $a = 8.934 \text{ \AA}$ 、 $b = 5.817 \text{ \AA}$ 、 $c = 19.005 \text{ \AA}$ 。这些矿物学特征可以作为砷硅锰矿的鉴定和研究依据。

References

- Altherr R, Soder C, Meyer H P, *et al.* 2017. Ardeninite in a high-*p/t* meta-conglomerate near vitolište in the westernmost varadar zone, republic of Macedonia[J]. *European Journal of Mineralogy*, 29(3): 473 ~ 489.
- Barresi A A, Orlandi P and Pasero M. 2007. History of ardeninite and the new mineral ardeninite-(V)[J]. *European Journal of Mineralogy*, 19(4): 581 ~ 587.
- Coombs D S, Kawachi Y and Reay A. 1993. An occurrence of ardeninite in quartz veins in piedmontite schist, western Otago, new Zealand [J]. *Mineralogy and Petrology*, 48(2): 295 ~ 308.
- Enami M. 1986. Ardeninite in a quartz schist from the Asemi-gawa area in the Sanbagawa metamorphic terrain, central Shikoku, Japan [J]. *Mineralogical Journal*, 13(3): 151 ~ 160.
- Frost R L, López A, Xi Y, *et al.* 2014. A vibrational spectroscopic study of the silicate mineral ardeninite-(As)[J]. *Spectrochimica Acta Part A Molecular & Biomolecular Spectroscopy*, 118(7): 987 ~ 991.
- Matsubara S and Kato A. 1987. Ardeninite from sanbagawa in sanbagawa metamorphic terrane, kanto mountains, Japan [J]. *Bulletin of the National Science Museum*, 13: 1 ~ 11.
- Nagashima M and Armbruster T. 2010. Ardeninite, tiragalloite and mediate: Structural control of (As⁵⁺, V⁵⁺, Si⁴⁺)O₄ tetrahedra in silicates[J]. *Mineralogical Magazine*, 74(1): 55 ~ 71.
- Pasero M and Reinecke T. 1991. Crystal chemistry, hrtm analysis and polytypic behaviour of ardeninite[J]. *European Journal of Mineralogy*, 3: 819 ~ 830.
- Pisani F. 1872. Sur un nouveau silico-aluminate de manganese vanadinifère, trouvé à Salm Château, en Belgique[J]. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 75: 1 542 ~ 1 544.
- Pisani F. 1873. Analyse de la dewalquite de Salm-Château en Belgique [J]. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 77: 329 ~ 333.
- Reinecke T and Hatzipanagiotou K. 1987. Crystal chemistry and lattice parameters of ardeninites from Andros Island, Greece, and Haute-Maurienne, Western Alps[J]. *N. Jb. Miner. Abh.*, 158: 89 ~ 104.
- Song S G, Niu Y L, Zhang L F, *et al.* 2009. Tectonic evolution of early Paleozoic HP metamorphic rocks in the North Qilian Mountains, NW China: New perspectives[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 334 ~ 353.
- Song S G, Niu Y L, Su L, *et al.* 2013. Tectonics of the north Qilian orogeny, NW China[J]. *Gondwana Research*, 23(4): 1 378 ~ 1 401.
- Song S G, Zhang L F, Niu Y L, *et al.* 2007. Eclogite and carpholite-bearing metasedimentary rocks in the north qilian suture zone, NW China: Implications for early palaeozoic cold oceanic subduction and water transport into mantle[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25(5): 547 ~ 563.
- Turner R. 2006. A mechanism for the formation of the mineralized mn deposits at merehead quarry, cranmore, somerset, England[J]. *Mineralogical Magazine*, 70(6): 629 ~ 653.
- von Lasaulx A. 1872a. Vorläufige Mittheilung über ein neues Mineral [J]. *Verh. Naturh. Ver. Preuss. Rheinl. Westph.*, 9: 174.
- von Lasaulx A. 1872b. Über ein neues Mineral aus der Gegend von Ottrez [J]. *Verh. Naturh. Ver. Preuss. Rheinl. Westph.*, 29: 189 ~ 192.
- von Lasaulx A. 1872c. Ardeninit, ein neues Mineral[J]. *N. Jb. Mineral.*, 930 ~ 934.
- Wei C J and Song S G. 2008. Chloritoid-glaucophane schist in the north Qilian orogeny, NW China: Phase equilibria and *P-T* path from garnet zonation[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 26: 301 ~ 316.
- Wei C J, Yang Y, Su X L, *et al.* 2009. Metamorphic evolution of low-T eclogite from the North Qilian orogeny, NW China: Evidence from petrology and calculated phase equilibria in the system NCKFMASHO [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 27: 55 ~ 70.
- Zhang J X, Meng F C and Wan Y S. 2007. A cold Early Palaeozoic subduction zone in the North Qilian Mountains, NW China: Petrological and U-Pb geochronological constraints[J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 25: 285 ~ 304.