2 Chopin C. Coesite and pure pyrope in high_grade blueschist of the western Alps: record and some consequences. Contrib Mineral Petrol, 1984, 86: 107~ 108
3 Schreyer W. Metamorphism of crustal rocks at mantle depth: high_pressure minerals and mineral assemblages in metapellites. Fortschr Minner, 1985, 63: 227~ 261
4 Schreyer W. Experimental studies on metamorphism of crustal rocks under mental pressure. Mineral Magazine, 1988, 51: 1~ 26
5 刘雅琴. 华中陆壳高压变质岩类白片岩的岩石矿物特特征. 地质论评. 1991, 37: 384~ 354
6 徐树桐, 江来利, 刘贻灿, 等, 大别山(安徽部分)的构造格局和演化过程. 地质学报, 1992, 66: 1~ 14
7 Li S, Xiao Y, Liou D, et al. Collision of the north China and Yangtze Block and formation of coesite_bearing eclogite: timing and processes. Chemical Geology, 1993, 109: 89~ 111
8 Cong B, Wang Q, Zhai M, et al. Ultra_high pressure metamorphic rocks in the Dabie_Su_Lu region, China: their formation and exhumation. The Island Arc, 1994, 3: 135~ 150
9 Cong B, Zhai M, Carswell D A, et al. Petrogenesis of ultrahigh_pressure rocks and their country rocks in Shuanghe of Dabie Mountains, central China. Eur J Mineral, 1995, 7: 119~ 138
10 Xu S, Okay A I, Ji S, et al. Diamond from the Dabie Shan metamorphic rocks and its implication for tectonic setting. Science, 1992, 256: 80~ 82
11 Okay A I. Petrology of a diamond and coesite_bearing metamorphic terrain: Dabie Shan, China. Eur J Mineral, 1993, 5: 659~ 673
12 Wang X, Liou L G, Maruyama S. Coesite_bearing eclogites from the Dabie Moubntains, central China: petrology and *P_T* path, and implications for regional tectonics. Journal of Geology, 1992, 100: 235~ 50
13 Compagnnoni R, Hirajima T, Chopin C. Ultra_high_pressure metamorphic rocks in the western Alps. In: Coleman G, Wang X, eds. Ultrahigh Pressure Metamorphism. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 206~ 243
14 Holland T J B. The experimental determination of thermodynamic data for part of the system Na_2O_Al_2O_3_SiO_2_H_2O, with applications to eclogites and blueschists. Contrib Mineral Petrol, 1979, 68: 293~ 301

(1997-06-12 收稿, 1997-09-18 收修改稿)

我国西部柴北缘地区发现榴辉岩

杨经绥 许志琴 李海兵 吴才来 崔军文 张建新 陈 文
(中国地质科学院地质研究所, 北京 100037)

摘要 柴达木盆地北缘的榴辉岩呈透镜体产在中-上元古代的片麻岩中. 岩石主要由石榴石、绿辉石、多硅白云母和金红石等矿物组成. 石榴石包含 44%~ 62% 的铁铝榴石、15%~ 33% 的钙铝榴石和 12%~ 30% 镁铝榴石分子, 绿辉石则含有 40%~ 46% 的硬玉分子. 石榴石-单斜辉石温度计算和根据硬玉分子的地质压力计的估算表明, 榴辉岩相的变质作用发生在温度(722 ±123) ℃和压力高达 2 200 MPa 的环境.

关键词 **榴辉岩 高压变质作用 大柴旦 柴北缘 青藏高原**

自 1987 年以来, 我国东部大别山和苏鲁地区的含柯石英榴辉岩及超高压变质作用引起了国内外地学界高度的重视[1, 2]. 最近在我国西部阿尔金山和西南天山又陆续新发现榴辉岩[3, 4], 使不少人在重新探讨中国的大地构造格架时产生了新的思考. 几年前, 有人说在柴北缘地区找到了榴辉岩, 但时至今日, 未见一篇文章报道. 柴北缘地区究竟有无榴辉岩? 中法合

作阿尔金-祁连山科学考察队中方成员在 1996 年 9~ 10 月的野外地质调查期间, 在柴北缘大柴旦地区首次发现典型的榴辉岩. 根据矿物的电子探针成分判断, 该榴辉岩的存在已确定无疑. 本文将其特征初步描述如下, 详细的室内测试工作仍在进行之中.

1 野外产出特征

榴辉岩呈透镜状产在大柴旦镇北西方向约 40 km 的黑云斜长片麻岩中, 根据 1∶20 万大柴旦幅及周边几幅地质图, 该地层属达肯大坂群下亚群, 时代为中-晚元古代[1~3] (图 1). 榴辉岩的同位素定年工作尚在进行中.

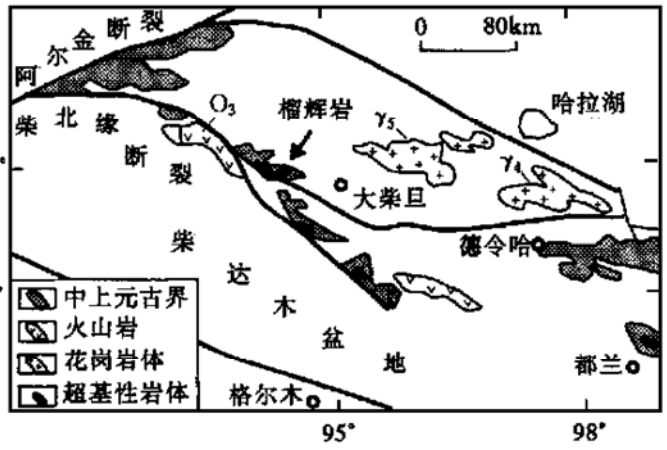


图 1　柴北缘地区榴辉岩产出位置和地质简图(据青藏高原及邻区 1∶150 万地质图[5]修改)

在所观察的 3 km 的片麻岩剖面中, 发现有 14 个榴辉岩的透镜体, 其规模变化较大, 最大一个在 20 m × 40 m 之间, 但大多数小于 10 m × 20 m. 一些透镜体排列方向性较好, 平行于片麻岩的片麻理方向和区域构造线的方向, 片麻理倾向为 NE20°, 倾角平均为 60°. 榴辉岩为灰绿色, 岩石致密坚硬, 产在浅色片麻岩中, 在露头上十分醒目且凸起地表(图 2(a)). 片麻岩中产有一些石榴角闪岩的透镜体, 它们可能是榴辉岩退变作用的产物. 另外, 片麻岩中还能见到一些辉绿岩和辉石岩透镜体, 其产出特征与榴辉岩相似, 推测它们可能为同一时代的产物.

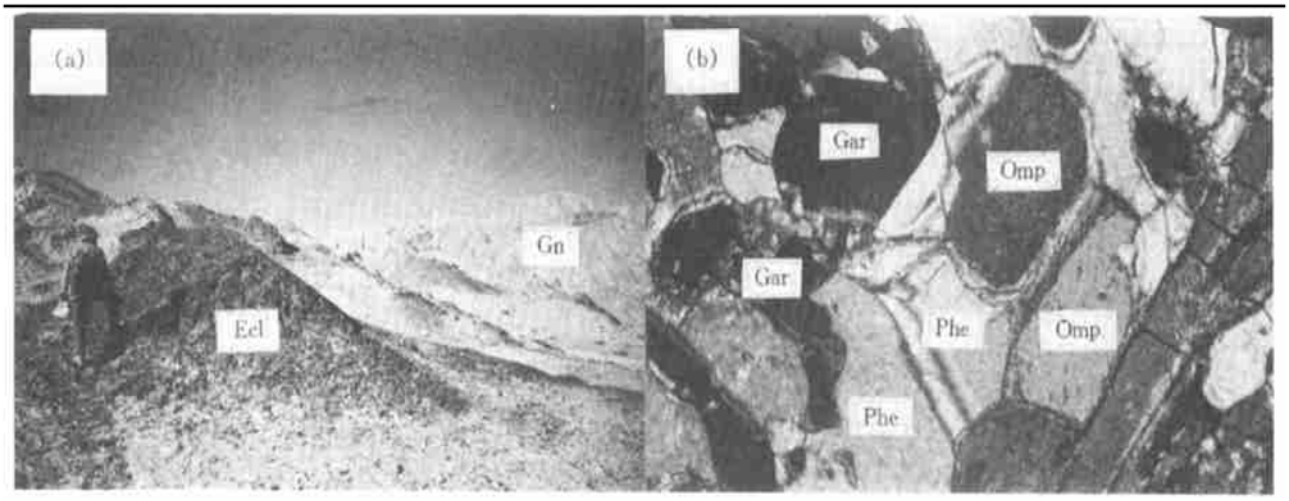


图 2　暗色、坚硬榴辉岩透镜体凸起在浅色片麻岩中(a)和榴辉岩的等粒结构(b)
(正交偏光, 2 × 1.2 mm)
Ecl——榴辉岩, Gn——片麻岩, Omp——绿辉石, Gar——石榴石, Phe——多硅白云母

2 岩石特征

榴辉岩为灰绿色, 中-细粒等粒结构, 块状构造. 镜下显示一些新鲜榴辉岩由石榴石

1) 中华人民共和国区域地质调查报告. 大柴旦幅(1∶200 000), 青海省地质局, 1980
2) 中华人民共和国区域地质调查报告. 马海幅(1∶200 000), 青海省地质局, 1980
3) 中华人民共和国区域地质调查报告. 鱼卡幅(1∶200 000), 青海省地质局, 1985

(40%~ 50 %)、绿辉石(40%~ 50%)及少量角闪石、多硅白云母、石英、榍石和金红石组成(图 2(b)).

石榴石为均匀粒状, 粒度多为 1~ 2 mm, 自形晶. 有些石榴石受晚期构造作用挤压变形成蝌蚪状或小鱼状, 长宽之比达 10∶1, 此时绿辉石则已被角闪石所取代. 石榴石中多少有些包裹体, 有些甚至含量很高, 使矿物成筛状. 包裹体主要为石英, 少量为绿辉石及云母. 电子探针成分分析结果(表 1)显示石榴石中以铁铝榴石(alm)分子为主, 达 44%~ 62%, 其次为钙铝榴石(gr)和镁铝榴石(pyr), 端元分子含量分别为 15%~ 33 % 和 12%~ 30%(表 1). 在石榴石端元分子的图解中[6](图 3(a)), 它们落在 B 类和 C 类榴辉岩区, 不同于西南天山的与蓝闪石片岩伴生的榴辉岩[4], 而与产在阿尔金山南段片麻岩中的榴辉岩成分相接近[3].

绿辉石主要为短柱状、粒状, 粒度多< 1 mm, 少数呈宽板状, 粒度可达 2 mm 以上. 一些岩石中绿辉石显弱定向排列, 与石榴石呈嵌晶, 说明两者形成时间相近. 有些绿辉石边缘有角闪石形成, 它们可能与退变作用有关. 电子探针分析表明绿辉石中硬玉分子(Jd)含量 37%~ 46%, 属典型的绿辉石(Omp)(图 3(b)). 结合石榴石的成分特点, 大柴旦的榴辉岩可能在一个较高压的环境下形成.

岩石中角闪石的含量少于石榴石和绿辉石, 一般为 5%~ 10%. 一些中细粒自型晶的角闪石以平直的边界与石榴石和绿辉石相交, 它们以及呈包体分布在石榴石中的角闪石很可能形成于绿辉石和石榴石的结晶阶段, 但不排除其中有些为绿辉石退变所形成. 成分分析表明它们属钠钙闪石亚族. 此外, 岩石中还出现一些大颗粒板柱状角闪石呈它形或半自形围绕或包裹石榴石或绿辉石等矿物, 以及产在这些矿物缝隙中的角闪石, 说明在这些岩石演化的不同阶段, 可以有不同世代的角闪石产生.

云母类矿物较普遍存在, 但含量一般< 5%. 主要呈小板条状(0.2~ 1 mm)均匀分布, 结构上与绿辉石和石榴石平衡, 可能属同阶段形成的矿物, 这期矿物还包括产在石榴石中的细颗粒白云母包体. 另外少量大片状白云母, 粒状可达 2~ 5 mm, 其形成可能要相对晚些. 云母有较高的SiO_2(48%~ 51%)和Al_2O_3(20%~ 29%). 根据22个氧原子计算, 云母中含量变化

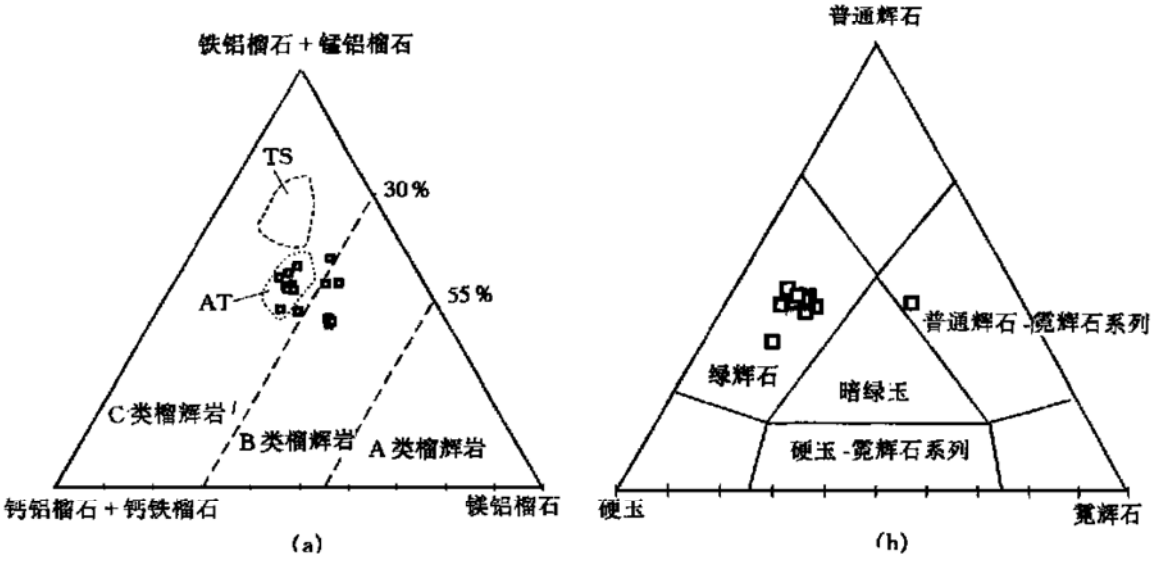


图 3 榴辉岩中石榴石(a)及绿辉石(b)成分图解

TS ——西南天山榴辉岩[4], AT ——阿尔金山榴辉岩[3]

表1 柴北缘大柴旦地区榴辉岩中代表性矿物分析[a)]

	石榴石						绿辉石					多硅白云母		金红石	
SiO_2	37.71	38.81	38.69	39.46	37.76		56.37	55.90	55.93	54.85	54.98	51.16	51.35	0.05	0.08
TiO_2	0.43	0.08	0.07	0.03	0.10		0.03	0.13	0.18	0.30	0.34	0.70	0.76	99.39	99.24
Al_2O_3	21.22	21.56	21.85	22.13	21.49		10.63	10.41	11.17	9.93	10.20	26.78	25.80	0.00	0.03
Cr_2O_3	0.00	0.07	0.03	0.06	0.00		0.00	0.00	0.01	0.04	0.02	0.05	0.04	0.04	0.00
Fe_2O_3	0.29	0.43	0.41	0.29	0.29		1.30	0.00	0.48	1.77	2.72				
MgO	3.70	5.25	6.81	8.03	4.16		8.42	8.67	7.60	8.12	7.11	3.57	3.93	0.00	0.00
CaO	9.06	6.24	6.68	9.24	10.83		13.25	14.35	12.88	13.47	12.32	0.01	0.02	0.06	0.17
MnO	0.64	0.49	0.41	0.32	0.33		0.00	0.05	0.03	0.02	0.00	0.02	0.05	0.00	0.00
FeO	27.04	29.12	26.25	20.88	25.13		3.77	4.20	5.09	4.32	4.76	1.91	2.11	0.29	0.34
NiO	0.06	0.03	0.04	0.00	0.00		0.12	0.00	0.02	0.04	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00
Na_2O	0.23	0.03	0.03	0.02	0.00		6.80	6.14	6.87	6.42	7.07	0.58	0.40	0.00	0.04
K_2O	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00		0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	10.27	10.14	0.01	0.00
H_2O												4.49	4.47		
总量	100.43	101.47	101.26	100.45	100.08		100.70	99.85	100.25	99.27	99.58	99.54	99.06	99.84	99.90
Si	5.93	5.93	5.94	5.99	5.92		1.99	1.99	1.99	1.98	1.98	6.83	6.89	0.00	0.00
Ti	0.05	0.01	0.01	0.00	0.01		0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.07	0.08	1.00	1.00
Al	3.93	3.95	3.95	3.96	3.97		0.44	0.44	0.47	0.42	0.43	4.21	4.08	0.00	0.00
Cr	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Fe	0.03	0.05	0.05	0.03	0.03		0.03	0.00	0.01	0.05	0.07				
Mg	0.87	1.22	1.56	1.82	0.97		0.44	0.46	0.40	0.44	0.38	0.71	0.78	0.00	0.00
Ca	1.53	1.04	1.10	1.50	1.82		0.50	0.55	0.49	0.52	0.48	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.09	0.06	0.05	0.04	0.04		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
Fe	3.56	3.78	3.37	2.65	3.30		0.11	0.13	0.15	0.13	0.14	0.21	0.24	0.00	0.00
Ni	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.07	0.01	0.01	0.01	0.00		0.47	0.42	0.47	0.45	0.49	0.15	0.10	0.00	0.00
K	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.75	1.73	0.00	0.00
and	1.61	1.37	1.28	0.88	1.01	XAug	0.53	0.57	0.52	0.54	0.50				
gro	23.29	15.35	26.64	23.91	28.58	XAc	0.03	0.00	0.01	0.05	0.07				
pyr	14.46	19.95	25.64	30.25	15.87	XJd	0.44	0.43	0.46	0.40	0.42				
spe	1.43	1.05	0.89	0.69	0.71										
alm	59.21	62.07	55.47	44.10	53.83										

a)电子探针测试由中国科学院地质所完成；and——钙铁榴石，gro——钙铝榴石，pyr——镁铝榴石，spe——锰铝榴石，alm——铁铝榴石，aug——普通辉石，ac——霓辉石，jd——硬玉

于 Si 6.6~ 6.9, Mg 0.6~ 0.8, Fe 0.21~ 0.25, 属多硅白云母类, 也是一种典型的高压矿物.

根据绿辉石和石榴石矿物对的计算[7]及对绿辉石中的硬玉分子压力估算[8], 其形成温度为(700 ±123) ℃(表 2), 压力可以高至 2 200 MPa. 总之, 从榴辉岩的矿物组合和矿物成分来看, 大柴旦的榴辉岩很可能形成在一个较高压环境.

表 2 石榴石单斜辉石温度计算结果a)

样品		3-3a	3-3b	1-1d	1-1c	1-1b	1-1a
	Fe	0.09	0.1	0.05	0.05	0.05	0.03
石榴石	Mg	1.41	1.05	0.74	1.56	1.22	0.87
	Ca	1.28	1.73	1.81	1.1	1.04	1.53
	Fe	0.031 2	0.052 3	0.048 2	0.034 7	0.053 5	0.057 2
绿辉石	Mg	0.450 3	0.443 7	0.444 5	0.443 7	0.464 6	0.433 6
	Ca	0.518 8	0.519 9	0.497 8	0.501 9	0.521 1	0.498 4
K_D		8.545	12.24	22.17	8.613	13.888	17.336
T/ ℃		792	700	544	769	661	615
样品		4-4d	4-4c	4-4b	4-4a	2-2a	2-2b
	Fe	0.03	0.06	0.09	0.05	0.02	0.05
石榴石	Mg	0.97	0.98	0.91	0.83	1.09	1.74
	Ca	1.82	1.71	1.8	1.66	2.02	1.47
	Fe	0.062 3	0.031 5	0.073 9	0.048 2	0	0.012 9
绿辉石	Mg	0.443	0.448 5	0.382 4	0.436 8	0.461	0.403 2
	Ca	0.506 2	0.513 8	0.476 3	0.521 3	0.548 3	0.491 3
K_D		14.594	11.255	9.634	13.827	9.961	4.144
T/ ℃		648	717	753	657	743	1 063

a) 根据 Krogh[7]石榴石辉石温度计计算

3 发现榴辉岩的意义

至今, 对柴北缘地区的构造格架的研究程度较低. 例如, 产在该区的镁铁-超镁铁岩是否属蛇绿岩及其形成时代, 目前仍不清楚. 柴北缘东段都兰以北出露的变质橄榄岩[9]在西段有无出露, 及与在大柴旦地区发现的一套石榴二辉橄榄岩[10]如何对比? 本地区石榴二辉榄岩与新发现的榴辉岩产在同一地区的同一片麻岩地层中, 仅是一个巧合, 还是出现类似大别-苏鲁地区的情况, 即两者可能存在成因上的联系? 此外, 尚存在柴北缘地区的榴辉岩与阿尔金山、祁连山榴辉岩的成因对比及时代讨论等问题.

总之, 柴北缘地区榴辉岩的发现对研究该地区乃至整个西部地区的构造格局、地质演化史, 以及对中国东、西部榴辉岩带的对比, 都具有重要意义.

参 考 文 献

1 Xu Zhiqin. Etude tectonique et microtectonique de la Chine paleozoique et triasique des Qinglings (Chine). These, Universite des Sciences et Techniques du Lanquedoc. France: Montpellier, 1987

2 Liou J G, Wang Q, Zhai, M, et al. Ultrahigh_P metamorphic rocks and their associated lithologies from the Dabie Mountains, central China: a field trip guide to the 3rd international eclogite field symposium. Chinese Science Bulletin, 1995, 40 (suppl): 1~ 71

3 刘 良, 车自成, 罗金海, 等. 阿尔金山西段榴辉岩的确定及其地质意义. 科学通报, 1996, 41(16): 1 485~ 1 488

4 高 俊, 西南天山榴辉岩的发现及其大地构造意义. 科学通报, 1997, 42(7): 737~ 740

5 中国地质科学院成都地质矿产研究所. 青藏高原及邻区地质图(1∶150 万). 北京: 地质出版社, 1988
6 Deer W A, Howie R A, Zussman J. An Introduction to the Rock Forming Minerals, 2 nd Ed. Hong Kong: Longman Scientific & Technical, 1992. 31~ 46
7 Krogh E J. The garnet_clinopyroxene Fe_Mg geothermometer——a reinterpretation of existing experimental data. Contribution to Mineralogy and Petrology, 1988, 99: 44~ 48
8 Carswell D A, Harley S L. Mineral barometry and thermometry. In: Carswell D A. ed. Eclogite Facies Rocks, New York: Chapman and Hall, 1990. 83~ 110
9 Yang J S, Robinson P T, Jiang C F, et al. Ophiolites of the Kunlun Mountains, China and their tectonic implications. Tectonophysics, 1996, 258: 215~ 231
10 杨建军, 朱 红, 邓晋福, 等. 柴达木北缘石榴石橄榄岩的发现及其意义. 岩石矿物学杂志, 1994, 13(2): 97~ 104

(1997-06-10 收稿, 1997-12-11 收修改稿)

高砷煤中砷赋存状态的扩展 X 射线吸收精细结构谱研究

赵峰华 任德贻 郑宝山④ 胡天斗㈣ 刘 涛㈣
(中国矿业大学(北京校区)资源开发工程系, 北京 100083; ④中国科学院地球化学研究所, 贵阳 550002;
㈣中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘要 测定贵州兴仁、兴义晚二叠世 6 个高砷无烟煤样品中 As 含量为 94.1 μg•g^{-1}~ 3.2%, Sb 含量为 8.1~ 120 μg•g^{-1}. 对样品的矿物学研究表明, 未发现任何含 As 或 As 的独立矿物, As 是赋存在煤有机组分中. 应用同步辐射 X 射线吸收精细结构仪测定样品中 As 的结构发现, 赋存在高砷煤有机组分中的 As 与 O 配位, 除在 1 个样品中 As 与 3 个 O 配位外, 在其余样品中 As 均与 4 个 O 配位. 因此, 高砷煤中的 As 不是赋存在硫化物矿物中, 而是赋存在砷酸盐或亚砷酸盐相中, 且主要是砷酸盐相.

关键词 **高砷煤 赋存状态 同步辐射 扩展 X 射线吸收精细结构**

由于煤中微量元素的浓度很低, 因此研究其赋存状态极其困难, 目前还没有成熟的研究方法. 近 20 年来, 由于同步辐射 X 射线技术的发展, X 射线吸收精细结构(X_ray absorption fine structure, 简称 XAFS) 在多种学科的研究中日益发挥着更大的作用. 近年来, Huffman 等人[1~3]运用同步辐射 X 射线吸收精细结构谱方法开创性地研究了煤、煤制产品及煤灰中某些元素的赋存状态, 他们于 1992 年研究了煤和煤产品中 S 的分子结构、褐煤中 K 和 Ca 的赋存状态及其在热解、气化过程的变化; 在 1994 年报道了对煤及燃煤产物中 As 及 Cr 的赋存状态的研究结果; 在 1996 年总结了应用 XAFS 研究煤中微量元素赋存状态的研究方法及对煤中 As, Cr, Zn, Ni, Cl, Br, V, Mn, Ti, Cr 和 Se 等的研究结果. 这些文献表明, 如果使用固态多元素锗探测器, 运用同步辐射 XAFS 可以测定煤中含量低达 10~ 100 μg•g^{-1}的元素的赋存状态, 目前在美国同步辐射光源上, 正在研究 100 个元素的锗探测器, 它的灵敏度将大幅度提高, 可以测定含量为 0.1~ 1.0 μg•g^{-1}的元素的赋存状态[2].