

秦岭造山带西段八方山—二里河 Pb-Zn 矿区硅质岩的微组构分析及其意义

李红中^{1,2,3}, 杨志军^{1,2,3}, 周永章^{1,2,3}, 古志宏^{1,2,3}, 马占武¹,
吕文超^{1,2,3}, 何俊国^{1,2,3}, 安燕飞^{1,2,3}, 李文^{1,2}, 王强¹

1. 中山大学地球科学系, 广东广州 510275

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 中山大学地球环境与地球资源研究中心, 广东广州 510275

摘要: 硅质岩是造山带内广泛发育的一类岩石, 该岩石的组成以 SiO₂ 为主, 具有较高的稳定性. 对于经历过造山作用、成矿作用和重结晶作用等影响的硅质岩, 其宏观组构和微观组构特征可以很好地反映它所遭受到的改造. 秦岭造山带西段八方山—二里河 Pb-Zn 矿的宏观及微观组构特征分析表明: 该区硅质岩具有明显的热液沉积特征. 由于受到压扭性和张性两种性质的应力作用, 矿区在宏观上形成了东西向压扭性断裂和北北东、北北西两组张性断裂, 微观上形成了微裂隙、微褶皱和压扁拉长的石英颗粒. 矿区岩石发生了明显的变质作用, 除应力作用造成的动力变质作用外, 还发生了其他类型的变质作用和重结晶作用. 硅质岩中微量碳酸盐矿物的存在以及应力作用对矿床的形成具有重要的意义, 特别是其可以为金属硫化物热液提供运移的通道和沉淀成矿的空间.

关键词: 西秦岭; Pb-Zn 矿; 组构分析; 成矿作用; 热液沉积.

中图分类号: P588.2

文章编号: 1000-2383(2009)02-0299-08

收稿日期: 2008-12-06

Microfabric Characteristics of Cherts of Bafangshan-Erlihe Pb-Zn Ore Field in the Western Qinling Orogen

LI Hong-zhong^{1,2,3}, YANG Zhi-jun^{1,2,3}, ZHOU Yong-zhang^{1,2,3}, GU Zhi-hong^{1,2,3}, MA Zhan-wu¹,
LÜ Wen-chao^{1,2,3}, HE Jun-guo^{1,2,3}, AN Yan-fei^{1,2,3}, LI Wen^{1,2}, WANG Qiang¹

1. Department of Earth Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Research Center for Earth Environment & Resources, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China

Abstract: With high stability, chert is widely distributed in the orogens, whose major composition is SiO₂. Affected by the orogeny, metallogenesis and recrystallization, the metamorphic processes can be well revealed by the megatectonics and micro-fabric characteristics. The study of the megatectonics and microfabric characteristics of the cherts of Bafangshan-Erlihe Pb-Zn ore field in the western Qinling orogen reveals that there are obvious hydrothermal sedimentary characteristics in the cherts. Because of the stresses, two types of which are extensional and compresso-shear, there are megatectonics of compresso-shear faults with EW direction and gapping faults with NNE and NNW directions. What's more, there are microfabric characteristics of microcracks and microcorrugations and stretched-out grains of quartzs. In the rocks of this ore deposit field, the dynamic metamorphism, metamorphic recrystallization and other kinds of metamorphisms are clearly revealed. The trace carbonate minerals and the stress are both important to the metallogenesis of this ore deposit, which provide the pathway and space for the metallic sulphide fluids to travel and deposit.

Key words: western Qinling; Pb-Zn ore; fabric analysis; metallogenesis; hydrothermal sedimentation.

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(No. 2006CB4035008); 国家自然科学基金项目(No. 40573019); 地质过程与矿产资源国家重点实验室课题; 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费资助.

作者简介: 李红中(1982-), 男, 博士研究生, 研究领域为矿物材料和造山带演化与成矿. E-mail: lihongzhong01@yahoo.com.cn

硅质岩是在造山带内广泛发育的一类岩石,该岩石的组成以 SiO_2 为主,并具有较高的稳定性 (Murray, 1994). 对于经历过造山作用、成矿作用和重结晶作用等影响的硅质岩,其宏观、微观组构特征可以很好地保存和反映它所遭受到的各种改造作用. 陕西省凤太(凤县—太白县)地区位于秦岭造山带的西段,是我国重要的金属成矿集中区之一,区内迄今已发现多处超大型、大型、中型矿床(王俊发等, 1991; 王集磊等, 1996; 薛春纪, 1997; 李强等, 2007). 八方山—二里河多金属矿床位于凤太铅锌(铜)矿田西北部,属于典型的以硅质岩为赋矿岩石的层控矿床(王集磊等, 1996). 该矿床主要受短轴次级背斜鞍部控制,并被断裂分隔为东、西两个矿区,即二里河矿区和八方山矿区. 其中八方山矿区位于古岔河—殷家坝复式向斜北翼的八方山—尖端山紧闭背斜中;二里河矿区位于河口—孔棺复向斜西向仰起端,该处亦为八方山—二里河短轴次级背斜与八方山—长沟 NE 向隆起带的交汇处. 该矿区硅质岩的地球化学特征研究表明(薛春纪, 1997; 方维萱等, 2000), 八方山—二里河矿床属于热水沉积成因,并在一定程度上受陆源物质影响.

尽管前人对凤太矿区硅质岩进行了一定程度的研究,但多运用全岩地球化学方法探究岩石的成岩作用和成因信息,很难提取到岩石微观层次的信息(杨志军等, 2003; 周永章等, 2006; 李红中等, 2007). 对于受构造活动影响剧烈的秦岭地区,传统的方法往往会表现出更多的局限性,为此有必要从微观矿物学的角度出发进行研究,结合野外宏观组构和全岩地球化学综合分析,运用以微区、微束为特色的现

代测试技术对样品的矿物物相、微形貌、微结构及微区成分等进行精细表征. 本文以八方山—二里河矿区的硅质岩为主要研究对象,采用微组构分析技术,试图为凤太矿田及秦岭地区造山带的演化与成矿作用提供科学线索.

1 矿区地质概况

矿区出露地层主要为中泥盆统古道岭组 and 上泥盆统星红铺组,两者呈整合接触关系(陕西省地质矿产局, 1989).

野外观察表明,上泥盆统星红铺组(D_3x)主要为一套以粉砂岩、砂页岩为主的浊积岩系,属钙质细碎屑岩夹薄层灰岩. 中泥盆统古道岭组(D_2g_2)仅见于八方山矿区,多呈不规则椭圆状(图 1),地层向东延伸潜伏至二里河铅锌矿区下部,构成背斜的核部地层. 在中泥盆统古道岭组与上泥盆统星红铺组的过渡部位,分布着一套深水—半深水滞流还原盆地相沉积岩,这也是铅锌矿床的赋矿层位. 该沉积岩以硅质岩—硅质铁白云岩—硅化灰岩以及结晶灰岩为主,共生岩石有炭质灰岩、炭质泥灰岩、含炭生物碎屑灰岩、生物灰岩、铁白云石细碎屑岩、炭质泥岩等. 顶部为矿床的含矿层位,矿体与顶底板岩层整合接触. 矿体形态呈似层状、透镜状,主要产在厚约 1~30 m 的硅质岩中,也有部分矿体产于灰岩中,含矿层内常见粒径数厘米的椭球状硅质岩或石英—铁白云石集合体.

八方山—二里河地区构造(图 1)包括褶皱和断裂(陕西省地质矿产局, 1989; 田民等, 2004). 其

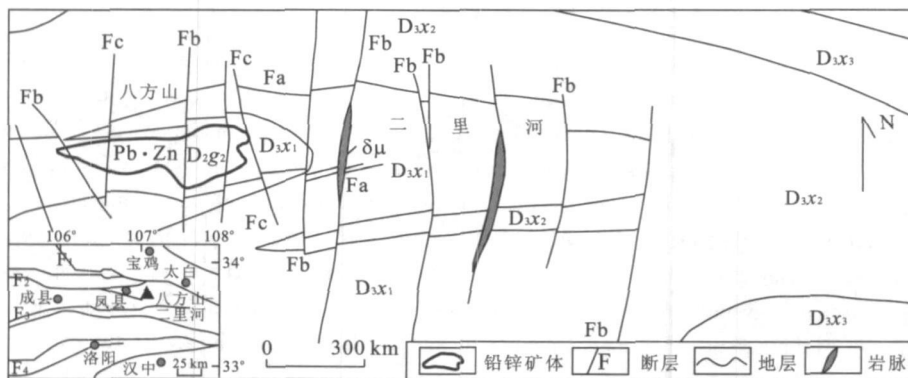


图 1 八方山—二里河 Pb-Zn 矿床地质图(底图据田民等, 2004 修改)

Fig. 1 Geological map of the Bafangshan-Erlihe Pb-Zn deposit

F1: 商州—丹凤断裂; F2: 礼县—山阳断裂; F3: 临潼—镇安断裂; F4: 略阳—玛曲断裂; Fa: 压扭性断层; Fb: 张性横断层; Fc: 张性纵断层; D_3x_3 : 砂质千枚岩; D_3x_2 : 绿泥石千枚岩; D_3x_1 : 铁白云石—炭质千枚岩; D_2g_2 : 灰岩; $\delta\mu$: 闪长玢岩

中,八方山—二里河背斜是矿区重要的控矿构造,该背斜的东段为二里河矿区,中西段为八方山矿区。由于秦岭造山带的形成主要受近南北向的挤压,该挤压势必造成东西向的伸展拉张,因而矿区内的压扭性断层(Fa)近东西走向分布在背斜两翼,倾角约为 $48^{\circ}\sim 73^{\circ}$ 。压扭性应力作用也体现在岩石的微组构中,主要表现为微裂隙(图2a)、微褶皱(图2b)等。张性断层在整个八方山—二里河地区均较为发育,包括 NNE-SSW(Fb)、NNW-SSE(Fc)向两组,倾角约为 70° 。张性断裂往往形成于成矿期后,常常错断矿体。

八方山—二里河铅锌矿床具有较为典型的背斜控矿特征。由于背斜顶部被剥蚀,八方山矿区地表矿化带绕背斜核部灰岩呈不规则的环状分布,向东延伸至二里河矿区,随背斜的倾伏方向潜伏于地下。在其纵剖面上,目前探明的矿体主要分布于背斜的鞍部(图1)。矿体赋存于矿化带内,与围岩总体上呈整合接触。主矿体长约2300多米,宽约100~300m(田民等,2004)。矿体由西向东逐渐变窄并向下倾伏延伸,形态与背斜构造相吻合。该矿床,在水平和垂直方向上均具明显的矿化分带特征(吕仁生和魏合明,1990;田民等,2004)。水平方向上,八方山矿床整体沿东西向展布延伸,根据矿化的不同沿其走向可将其分为东段、中段和西段。东段表现为铜铅锌矿化段,铜铅锌的矿化在该段内较为明显,主要以黄铜矿、闪锌矿、方铅矿的形式产出;中段则以铅锌矿化为主,在该段内硫化物主要为方铅矿、闪锌矿,黄铜矿的含量极少;西段表现为铜矿化段,硫化物以黄铜矿为主,方铅矿、闪锌矿含量极低。各段之间相互无明显的界线,呈渐变过渡关系。垂直方向上,东、中、西三个矿段矿床的品位与深度均呈现出反相关关系,矿石品位随着深度增加而降低,铜、铅、锌均分

布于矿床的上部(浅部)。

2 样品与实验

实验样品的预处理在中山大学地球科学系实验中心完成。选取新鲜矿石和围岩样品,包括硅质岩、硅化灰岩、脉石英、千枚岩、灰岩和铁白云岩。研究区硅质岩有沉积成因和交代成因两大类,本文仅讨论沉积成因的硅质岩。该硅质岩主要为灰黑色(图3),致密坚硬,块状、薄层状;椭球状灰白色硅质结核具有黄褐色条带,赋矿硅质岩中方铅矿和闪锌矿颗粒清晰可见。将样品均分为两份,一份经粉碎后分离出纯矿石和纯硅质岩,清洁干燥后分别磨碎至200目以上;另一份用以磨制光薄片(直径 $d\leq 0.03\text{ mm}$),磨片过程在中科院广州地化所磨片室完成。

Raman 光谱测定在中国地质大学国家重点实验室完成,仪器为 Renishaw RM-1000 型显微共焦拉曼光谱仪,采用 514.5 nm 的 Ar^+ 激发线作为激发光源。该仪器狭缝宽度为 $25\text{ }\mu\text{m}$,光谱扫描范围为 $200\sim 2\,000\text{ cm}^{-1}$ 。测试过程中的叠加次数为1~3次,曝光时间为30s。

环扫描电镜分析在中国地质大学国家重点实验室完成,仪器型号为 Quanta 200F 的环境扫描电镜—能谱—电子背散射衍射系统(SEM-EDS-EBSD),电镜的分辨率为 3.5 nm ,放大倍数:7~1 000 000倍。

X射线粉晶衍射(XRD)分析在型号为理学电机 D/Max-2200 vpc X 衍射仪上进行。实验条件为: Cu 靶, $\text{K}\alpha$ 射线,工作电压 40 kV ,电流 30 mA 。扫描速度为 0.12 s/步 ,步长为 0.02° ,扫描角度范围为 $5.0^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 。X衍射的数据处理由 JADE5.0 软件完成。对多种矿物的混合物样品,数据分析时采取八强峰对应的模式,即以 $I(\nu)$ 参数最大的八条线相

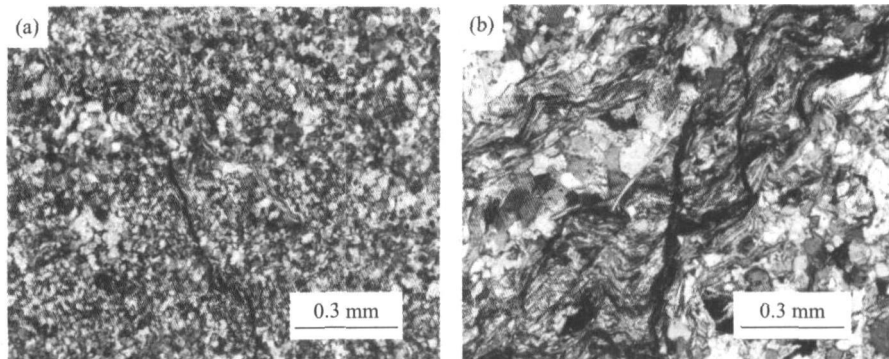


图2 显微镜下硅质岩的微裂隙(a)和微褶皱(b)

Fig. 2 Micrographs of the fissure (a) and cataclase crystal (b) in cherts_x10

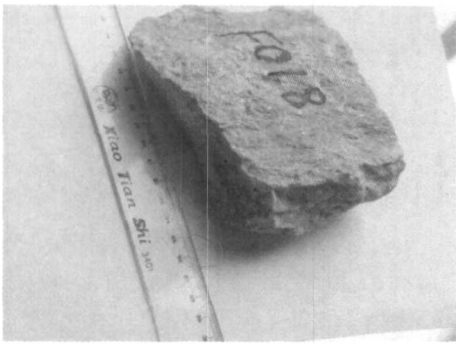


图 3 灰黑色块状硅质岩

Fig. 3 Massive chert of carbon black

对应的矿物为最大可能性,并进一步结合主量元素及薄片鉴定结果加以确定。

3 实验结果与讨论

3.1 Raman 光谱表征

图 4 为一件由细—微晶石英和少量的碳酸盐矿物组成的含矿硅质岩的 Raman 光谱测试点位及显微 Raman 光谱图。该硅质岩整体被微裂隙所破坏,石英颗粒存在被压扁(拉长)甚至压碎的痕迹(图 2)。光谱测定采取沿拉长和被碳酸盐包围的石英矿物直线逐点测试(图 4),图中黑色斜线方向代表石英颗粒的长轴方向。

从图 4 中 A→J 点的 Raman 谱图中可以看出,除 α -石英的本征拉曼位移 464.8 cm^{-1} 和

1112.4 cm^{-1} 外(Yoshikawa *et al.*, 1997; 柯以侃和董慧茹, 1998; Ostroumov *et al.*, 2002; Ji *et al.*, 2003),还存在较弱的 Si-O-R 的对称伸缩振动峰(840.6 cm^{-1})和反对称伸缩振动峰(1186.0 cm^{-1})。另外,在 1091.6 cm^{-1} 处存在着一个极其明显尖锐的散射峰,该峰位介于 Si-O 的反对称伸缩振动峰($1010 \sim 1125 \text{ cm}^{-1}$)和 CO_3^{2-} 的 V_1 带(晶态 $V_{ym}^s \Sigma^+$)R 振动峰($1050 \sim 1090 \text{ cm}^{-1}$)重叠的范围。结合 722.2 cm^{-1} 处弱的 CO_3^{2-} 的 V_4 带 R 振动峰,可以将该峰归属为 CO_3^{2-} 的 V_1 带(晶态 $V_{ym}^s \Sigma^+$)R 振动峰。Lynne 等研究显示(Lynne *et al.*, 2005),硅质岩中方解石的特征拉曼峰值为 1085 cm^{-1} ,但 1091.6 cm^{-1} 较 1085 cm^{-1} 有所偏移,与铁白云石的峰较为相似(Sylvain *et al.*, 2007)。尽管如此,很难据此准确地判断该矿物一定是白云石。 840.6 cm^{-1} 和 1186.0 cm^{-1} 两个极弱的峰归属于 Si-O-R 结构的对称和不对称伸缩振动峰,由于含量低峰弱因而无法准确识别该物质。除上述峰位外,图中还有 1608.2 cm^{-1} 和 280.0 cm^{-1} 处的两个峰。其中, 1608.2 cm^{-1} 处的峰归属于有机树胶的拉曼峰位,而 280.0 cm^{-1} 处的峰位一般为硅酸盐矿物的散射峰(徐培苍等, 1996)。此外,图 4 中还显示从 A→G 中每个点位都有石英和碳酸盐的双重特征峰位,这说明石英颗粒在遭受压缩拉长过程中还发生碳酸盐碎块被机械地挤压进入石英颗粒的裂隙和孔隙中的渗入作用。

为了进一步研究应力对岩石的影响,分别沿与石英的拉长方向平行(A→E)、斜交(D→H)和自碳酸盐矿物边缘向中心(H→J)进行三组定向分析(图 4)。表 1 中列出了各点位上石英(464.8 cm^{-1})和碳酸盐(1091.6 cm^{-1})矿物的特征峰位强度。尽管不同测试点位峰的强度会因测试条件差异而影响含量的可比性,但同一曲线上不同成分特征峰强度的比值 E (相对强度 $E = I_s / I_c$; S 代表 SiO_2 , C 代表碳酸盐)可以消除测试条件差异带来的影响(Yang *et al.*, 2008)。图 5 显示了相对强度随点位的变化,其中曲线 I 是与石英的拉长方向斜交(D→H)的变化曲线,从曲线中可以看出碳酸盐成分颗粒自边缘向中心的渗入程度逐渐减弱,两边呈对称分布;曲线 II 代表的测试点位与石英的拉长方向平行, E 值总体相差不大,说明沿石英的拉长方向碳酸盐的渗入程度近乎一致。位于哑铃收缩部位的 B、E 两点 E 值较 A 点略高,这与哑铃收缩部位应力集中相吻合;

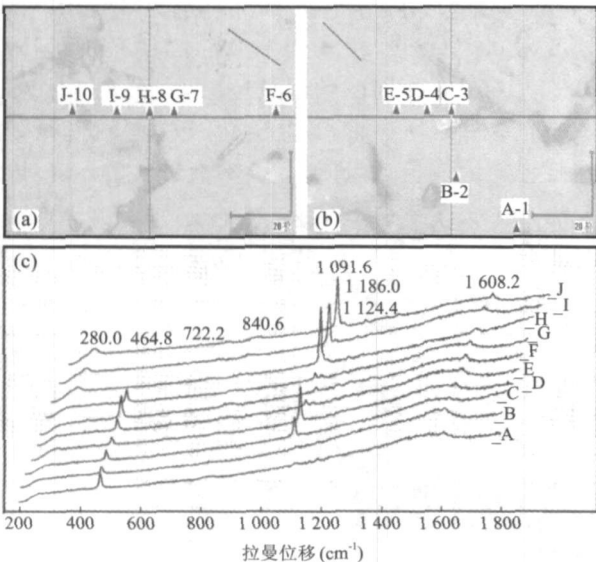


图 4 含矿岩石的显微图片及拉曼定向分析结果(A→J)

Fig. 4 Micrographs and Raman shift for mine-bearing rocks

表 1 曲线上不同点位特征拉曼峰强度比值

Table 1 Ratio values of the characteristic peak intensity

测试组	II 组					I 组					III 组		
	点位	A	B	E	C	D	E	F	G	H	H	I	J
I_s	464.8	3 012.6	2 148.6	1 972.1	1 939	2 741	1 972.1	3 429.9	2 786.4	1 556	1 556	1 697.9	1 597.7
I_c	1091.6	3 724.2	3 900.6	3 283.6	6 422.9	6 532.5	3 283.6	3 684.4	4 455.5	9 312.8	9 312.8	8 424.3	8 824
E	0.809	0.551	0.601	0.302	0.420	0.601	0.931	0.625	0.167	0.167	0.202	0.181	

注: $E=I_s/I_c$.

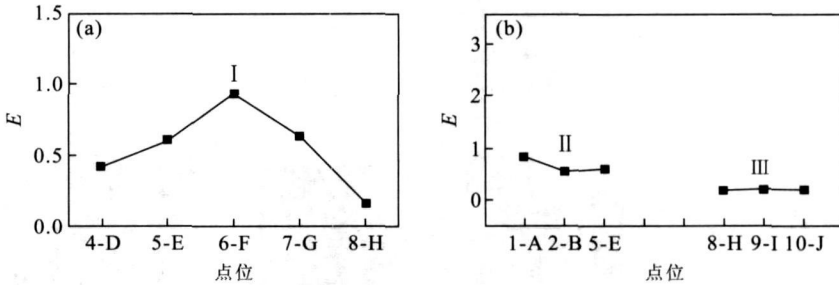


图 5 石英的定向分析曲线(曲线 I、II、III 与表 1 中 I、II、III 组相对应)

Fig. 5 Orientation analysis for quartz

曲线 III 反映了碳酸盐成分含量自边缘向中心的变化规律, H、I、J 三点成分含量并无变化, 这与图 4 中 H、I、J 三个点位仅出现了碳酸盐的特征峰位而无石英相吻合. 石英无解理且硬度比碳酸岩矿物大, 在应力作用下碳酸盐矿物远比石英更易发生碎裂并机械地渗入到石英裂隙或孔隙中. 因此, H、I、J 三个点位仅出现了碳酸盐的特征峰位而无石英. 碳酸盐矿物越碎裂、比表面积越大, 越易于与其他物质(热液等)接触, 因而更易发生变质作用. 因此, 碳酸岩矿物中的测试点 H、I、J 中均出现了对应于硅酸盐矿物的 280.0 cm^{-1} 峰位. Si-O-R 结构 (840.6 cm^{-1} 和 1186.0 cm^{-1}) 既不属于石英也不属于碳酸盐矿物, 且该结构仅出现的点位 D→J 均存在碳酸盐成分, 这说明该结构的出现与碳酸盐有着密切的关系, 推测可能是碳酸岩变质形成的产物.

3.2 XRD 表征

含矿硅质岩的 XRD 分析结果(图 6)表明, 研究区硅质岩存在多种晶型的石英、铁白云石和方解石等矿物.

石英是硅质岩中的主要矿物, 其主要表现为 3 种类型: 空间群(space group)分别为 $P3_121(152)$ 、 $P3_221(154)$ 和 $P312(149)$, 前两者的晶胞参数相同 $a=b=4.913$, $c=5.405$, $Z=3$, 属于典型的 α -石英; 而空间群为 $P312(149)$ 的石英晶胞参数 $a=b=4.903$, $c=5.393$, $Z=3$ 的石英, 晶轴较前者短. 正常情况下同时沉积形成的石英, 其晶轴应该基本一致,

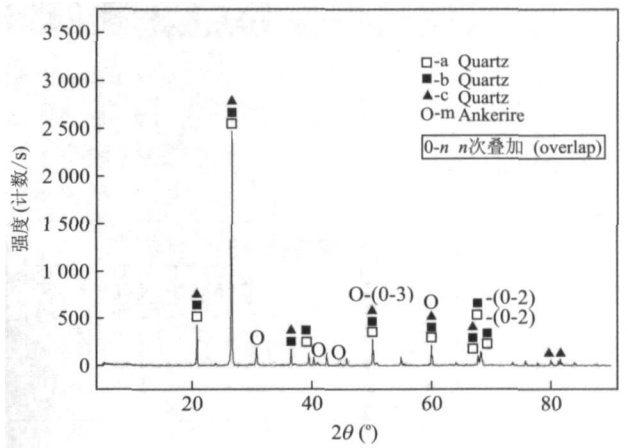


图 6 块状硅质岩(F022)样品的 X 衍射图

Fig. 6 XRD of the massive chert sample F022

研究结果中短晶轴的石英可能是受造山作用过程中温度和压力等作用的结果.

根据八强峰原则, 另一类主要矿物最大可能性为铁白云石, 结合主量元素地球化学特征和激光拉曼的结果, 基本可以确定该矿物为碳酸盐矿物——铁白云石. 此外, 从图 6 中还可以看到其他矿物的特征峰值, 结合地球化学特征及后文的能谱结果可以判断还存在金属硫化物及硅酸盐等矿物, 但含量均较低.

3.3 SEM 及 EDS 表征

从硅质岩的背散射 SEM 图像(图 7)可以看出, 该硅质岩主要表现为三种物相, 灰色且平整度好的

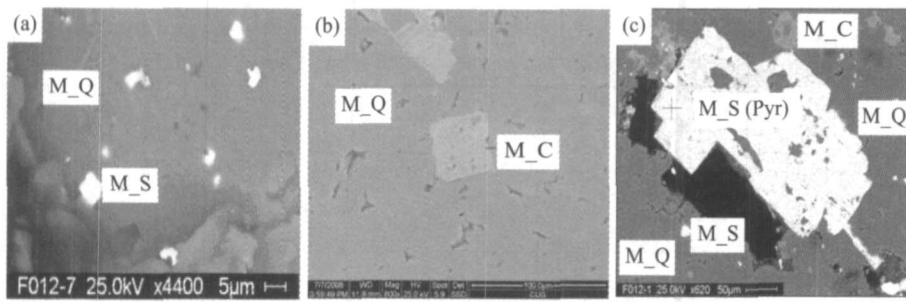


图 7 硅质岩的 SEM 图像

Fig. 7 SEM of metallic and carbonate minerals in cherts
M_C. 碳酸盐; M_Q. 石英; M_S. 硫化物; M_S(Pyrr). 黄铁矿

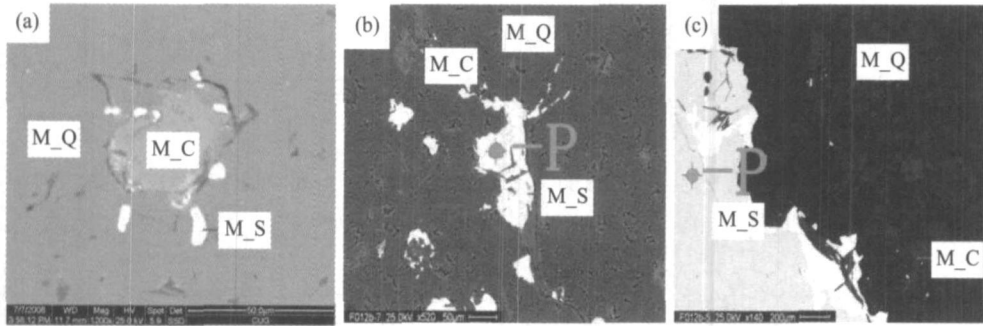


图 8 硅质岩中碳酸盐矿物颗粒附近的金属硫化物分布形式

Fig. 8 Distribution of the metallic sulphide near the carbonate minerals in cherts
a. 环状分布; b. 零星状和裂隙充填分布; c. 裂隙充填分布; P. 能谱测试点位

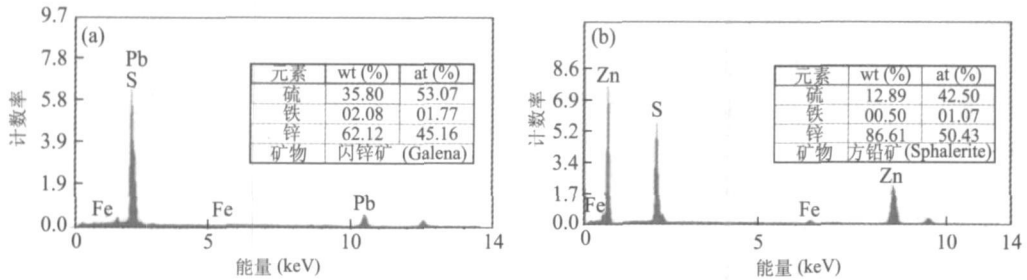


图 9 裂隙中金属硫化物的能谱(EDS)分析结果

Fig. 9 EDS of metallic sulphide in the crack

为石英,灰白色为碳酸盐矿物,白色为金属矿物.其中,石英颗粒表现为棱角尖锐的细晶—微晶特征,这与热水沉积成因硅质岩相似(图 7).在细晶—微晶石英颗粒之间,常充填有金属硫化物(方铅矿、闪锌矿和黄铁矿)和碳酸盐(方解石或铁白云石)等矿物颗粒.其中,部分碳酸盐矿物(图 7b)和黄铁矿(图 7c)表现出较好的自形程度,应该属于同沉积成因.

另外,碳酸盐矿物颗粒存在的部位较易形成孔隙和裂隙(图 8),这就为硫化物(方铅矿和闪锌矿)的运移和赋存提供了空间,如图 8 所示.

裂隙中硫化物的能谱分析结果见图 9,该结果

中的 a 和 b 分别对应了图 8 中 b 和 c 的测试点.金属矿物的能谱(EDS)测试结果(图 9)显示,其中除 Pb、Zn、S 元素外还含有一定量的 Fe 元素.金属元素表现出 Pb-Fe、Zn-Fe 和 Pb-Zn-Fe 三种组合方式,无论 Pb、Zn 是否发生分离几乎均有 Fe 的存在,这说明成矿热液与 Fe 的关系非常密切.

4 结论

八方山—二里河矿区宏观和微观的组构研究表明:(1)研究区硅质岩属于热水成因.扫描电镜下棱

角尖锐的细晶—微晶石英颗粒反映了热水条件下快速沉积的特征。(2)八方山—二里河矿区受压扭性和张性两种性质的应力作用。压扭性应力可以通过宏观上野外的东西向压扭性断裂和微观下薄片中的微裂隙、微褶皱和压扁致长的哑铃状石英颗粒加以揭示;而张应力则可以通过野外宏观 NNE-SSW、NNW-SSE 两组张性断裂加以反映。(3)八方山—二里河矿区赋矿岩石硅质岩发生了明显的变质作用。构造应力作用破坏了岩石的整体性,并致使石英颗粒发生压缩拉长以及碳酸盐矿物被压碎。 280.0 cm^{-1} 的 Raman 峰位、Si-O-R 结构和短轴的石英颗粒均暗示硅质岩发生了变质和重结晶等作用并有新物质生成。(4)硅质岩中微量的碳酸盐矿物颗粒和应力作用对矿床的形成有着重要意义。在应力作用下,石英和碳酸盐矿物的力学性质差异导致岩石在应力作用下产生裂隙和孔隙,这为硫化物热液提供了运移通道和沉淀成矿场所。

感谢:中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室的何谋春和张素新两位老师在实验中给予了热心的帮助,谢淑云老师对本文提出了宝贵意见,在此一并深表感谢!

References

Fang, W. X., Liu, F. J., Hu, R. Z., et al., 2000. The characteristics and diagenetic-metallogenic pattern for cherts and siliceous ferrodolomites from Fengtai apart-pull basin, Qinling orogen. *Acta Petrologica Sinica*, 16(4): 700—710 (in Chinese with English abstract).

Institute of Regional Geological & Mineral of Shaanxi Province, 1989. Regional geology of Shaanxi Province. Geological Publishing House, Beijing, 1—698 (in Chinese).

Ji, S. F., Xiao, T. C., Li, S. B., et al., 2003. Surface WO_4 tetrahedron: The essence of the oxidative coupling of methane over M-W-Mn/SiO₂ catalysts. *Journal of Catalysis*, 220: 47—56.

Ke, Y. K., Dong, H. R., 1998. Analysis chemistry (3): Spectrum analysis. Chemical Industry Press, Beijing (in Chinese).

Li, H. Z., Yang, Z. J., Zhou, Y. Z., et al., 2007. The characteristics of chert of Qinling area and its prospect. *Acta Mineralogica Sinica*, (Suppl.): 441—443 (in Chinese with English abstract).

Li, Q., Xue, C. J., Liu, S. W., et al., 2007. Research on the paragenesis (coexist) relationship of lead-zinc and gold mineralization in the Bafangshan-Baguamiao deposit, Fengxian County, southern Qinling Mountains. *Geolog-*

ical Review, 53(1): 65—74 (in Chinese with English abstract).

Lü, R. S., Wei, H. M., 1990. The geological characteristics and genetic investigation of Bafangshan stratabound polymetallic ores in Shaanxi Province. *Journal of Xi'an College of Geology*, 12(4): 10—17 (in Chinese with English abstract).

Lynne, B. Y., Campbell, K. A., Moore, J. N., et al., 2005. Diagenesis of 1900-year-old siliceous sinter (opal-A to quartz) at Opal Mound, Roosevelt Hot Springs, Utah, U.S.A. *Sedimentary Geology*, 179(3—4): 249—278.

Murray, R. W., 1994. Chemical criteria to identify the depositional environment of chert: General principles and applications. *Sedimentary Geology*, 90(3—4): 213—232.

Ostroumov, M., Faulques, E., Lounejeva, E., 2002. Raman spectroscopy of natural silica in Chicxulub impactite, Mexico. *C. R. Geosciences*, 334(1): 21—26.

Sylvain, B., Karim, B., Olivier, B., et al., 2007. Exceptional preservation of fossil plant spores in high-pressure metamorphic rocks. *Earth and Planetary Science Letters*, 262(1—2): 257—272.

Tian, M. M., Yuan, X. D., Zhang, Y. R., et al., 2004. Discussion of geological prospecting in Erlihe Pb-Zn deposit, Fengxian. *Mineral Resources and Geology*, 18(102): 134—138 (in Chinese with English abstract).

Wang, J. F., Zhang, F. X., Yan, J. C., et al., 1991. Devonian stratabound metalliferous deposit in Qinling. Shaanxi Science and Technology Press, Xi'an, 1—71 (in Chinese).

Wang, J. L., He, B. C., Li, J. Z., et al., 1996. Qinling-type lead-zinc deposits in China. Geological Publishing House, Beijing, 1—126 (in Chinese).

Xu, P. C., Li, R. B., Wang, Y. Q., et al., 1996. Raman spectroscopy to the earth science. Shaanxi Science and Technology Press, Xi'an, 1—176 (in Chinese).

Xue, C. J., 1997. Devonian hydrothermal sedimentation in Qinling. Xi'an Cartographic Publishing House, Xi'an, 1—134 (in Chinese).

Yang, Z. J., Li, H. Z., Peng, M. S., et al., 2008. Study on the HPHT synthetic diamond crystal from Fe-C(H) system and its significance. *Chinese Science Bulletin*, 53(1): 139—146.

Yang, Z. J., Zhou, Y. Z., Zhang, C. B., et al., 2003. The research of fabric information in the siliceous rock and its significance. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 22(3): 255—258 (in Chinese with English abstract).

Yoshikawa, M., Lwagami, K., Morita, N., et al., 1997.

Characterization of fluorine-doped silicon dioxide film by Raman spectroscopy. *Thin Solid Films*, 310(1-2): 167-170.

Zhou, Y. Z., Fu, W., Yang, Z. J., et al., 2006. Microfabrics of chert from Yarlung Zangbo suture zone and southern Tibet and its geological implications. *Acta Petrologica Sinica*, 22(3): 742-750 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

方维萱, 刘方杰, 胡瑞忠, 等, 2000. 凤太泥盆纪拉分盆地中硅质铁白云岩—硅质岩特征及成岩成矿方式. *岩石学报*, 16(4): 700-710.

柯以侃, 董慧茹, 1998. 分析化学手册(3): 光谱分析. 北京: 化学工业出版社.

李红中, 杨志军, 周永章, 等, 2007. 秦岭地区硅质岩的地质地球化学特征及研究展望. *矿物学报*, (增刊): 441-443.

李强, 薛春纪, 刘淑文, 等, 2007. 南秦岭凤县八方山—八卦庙 Pb-Zn 与 Au 矿化的共生/共存关系研究. *地质评论*, 53(1): 65-74.

吕仁生, 隗合明, 1990. 八方山层控多金属矿床地质特征及成因探讨. *西安地质学院学报*, 12(4): 10-17.

陕西省地质矿产局, 1989. 陕西省区域地质志. 北京: 地质出版社, 1-698.

田民民, 袁旭东, 张永让, 等, 2004. 凤县二里河铅锌矿床后续地质找矿探讨. *矿产与地质*, 18(102): 134-138.

王俊发, 张复新, 炎金才, 等, 1991. 秦岭泥盆系层控金属矿床. 西安: 陕西科学技术出版社, 1-71.

王集磊, 何伯墀, 李健中, 等, 1996. 中国秦岭型铅锌矿床. 北京: 地质出版社, 1-126.

徐培苍, 李如璧, 王永强, 等, 1996. 地学中的拉曼光谱. 西安: 陕西科学技术出版社, 1-176.

薛春纪, 1997. 秦岭泥盆纪热水沉积. 西安: 西安地图出版社, 1-134.

杨志军, 周永章, 张澄博, 等, 2003. 硅质岩组构信息研究及其意义. *矿物岩石地球化学通报*, 22(3): 255-258.

周永章, 付伟, 杨志军, 等, 2006. 雅鲁藏布江缝合带及藏南地区硅质岩微组构特征及其地质意义. *岩石学报*, 22(3): 742-750.