

doi:10.3799/dqkx.2014.111

能谱仪 PPA 分析方法的实验研究： 以山西大同新生代玄武岩样品为例

张素新, 张毅, 何德涛

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

摘要: 以山西大同新生代玄武岩样品为例, 利用 Quanta 200 扫描电镜、GENESIS 能谱仪对能谱仪 PPA 分析方法进行了实验研究, 该方法为粒度物和物相自动分析方法。笔者首次把能谱仪 PPA 分析方法应用到地质学领域的岩石光薄片研究中, 快速得出了一系列不同物相的形态学数据及化学成分分析结果: 物相种类、每一种物相的颗粒数、每一个颗粒的平均直径、面积、周长、圆度、长宽比及化学成分等, 并得出了不同物相在该视域所占的面积百分比及每种物相颗粒的平均直径, 克服了传统光薄片粒度分析方法的所有缺点, 为矿物学、岩石学及矿床学研究提供了一套非常有意义的数据库。

关键词: 能谱仪; PPA 分析方法; 岩石光薄片; 物相; 粒度; 化学成分。

中图分类号: P588.1

文章编号: 1000-2383(2014)09-1301-08

收稿日期: 2014-02-02

Study on Particle Phase Analysis Method of Energy Disperse Spectroscopy: A Case Study of Cenozoic Basalts from Datong, Shanxi Province

Zhang Suxin, Zhang Yi, He Detao

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

Abstract: The Particle Phase Analysis (PPA) method by means of Quanta 200 scanning electron microscope (SEM), GENESIS energy disperse spectroscopy (EDS) can analyze particle size and phase automatically. A systematic experimental is carried out to verify the PPA method in this study, using samples of Cenozoic basalts from Datong. We apply the PPA method of EDS to study the thin section and polished section in the geological field for the first time, which yield a series of morphology and chemical composition data of different phases such as phase types, particle number of each phase, average diameter, area, roundness, length-width ratio, chemical composition. The proportion and average particle diameter of each phase can also be obtained as well, overcoming the shortages of traditional method in thin section and polished section. It proves that PPA guarantees significant data for the study of mineralogy, petrology and ore deposit geology.

Key words: energy disperse spectroscopy; PPA method; polished thin rock section; phase; particle; chemical composition.

扫描电镜是一台大型精密仪器, 可对固体物质进行微区形貌及表面结构分析, 它具有分辨率高、放大倍数大且放大倍数变化范围广、图像立体感强及样品制备简单等优点 (Lyman, 1990; Goldstein *et al.*, 2003). 因此, 在多个学科领域得到了广泛的应用, 尤其是在地质学领域, 得到了更加广泛的应用。能谱仪是一台作为附件配备在扫描电镜上进行微区化学成分分析的仪器, 它可检测的元素范围为

$\text{Be}^4 \sim \text{U}^{92}$, 对各类样品均可进行元素或氧化物的定性和定量分析, 可同时检测出样品中的所有元素 ($\text{Be}^4 \sim \text{U}^{92}$ 之间), 定性、定量分析几分钟可以完成, 是一种既方便、又快速的定性和定量分析方法 (廖乾初和蓝芬兰, 1990; 孔明光, 2004; 李香庭, 2006; 张大同, 2009). 本实验室拥有一台 FEI 公司生产的 Quanta 200 扫描电镜和一台 EDAX 公司生产的 GENESIS 能谱仪。在 GENESIS 能谱仪的分析功能中提供了一个粒度和物相 (Particle Phase Analysis,

基金项目: 地质过程与矿产资源国家重点实验室科技部专项经费 (No. MSFGPMR200904); 国家自然科学基金 (No. 41272025).

作者简介: 张素新 (1960—), 女, 教授, 主要从事岩石学、矿物学及现代测试技术研究。E-mail: 826106006@qq.com

以下简称 PPA) 分析方法, 它能够很快的对多种物相进行形态学数据和化学成分分析, 可得出所分析视域中不同物相的颗粒个数, 每个颗粒的平均直径、周长、面积、圆度及长宽比等, 同时还可以快速检测出每个颗粒的化学成分 (FEI Company, 2002; EDAX Inc, 2003). 并可根据不同的元素绘制三元视图以便一目了然地观察不同物相化学成分的区别。

在地质学研究领域, 传统的岩石光薄片粒度分析方法是利用光学显微镜直接测量颗粒粒径, 分组统计所测颗粒的个数, 以求得出不同粒径分组颗粒数的百分含量, 一般光学显微镜的测量范围是 $10 \sim 1\,000 \mu\text{m}$ (刘岫峰, 1982a; 杨应章和何建社, 1984; 刘小洪等, 2009). 后来, 随着计算机技术的发展, 在光学显微镜下拍摄一系列的图像, 再将这些图像摄取到计算机中, 进行二维图像的测量与统计, 由此获得相关岩石的粒度分布特征 (蒋明丽, 2009; 冉敬等, 2011). 这种方法的缺点是速度慢, 效率低, 并且也检测不到直径小于 $10 \mu\text{m}$ 的颗粒, 这可能从根本上造成测量的平均粒径偏粗 (冉敬等, 2011), 同时也不能进行物相、面积及化学成分分析。

如果把能谱仪 PPA 分析方法应用到地质学领域的岩石光薄片研究中, 就可以快速得出一系列不同物相的形态学数据及化学成分分析结果, 并能得出不同物相在该视域所占的面积百分比, 克服了传统光薄片粒度分析方法的所有缺点. 可为矿物学、岩石学及矿床学的研究提供有力的证据. 岩石光薄片粒度分析对岩浆岩、变质岩和火山岩粒度研究、岩浆粒度及层状火成岩分析、混合岩及花岗岩化识别、火山碎屑岩形成机理等均可以提供非常有价值的资料 (刘岫峰, 1982b). 火山岩在喷发过程中, 由于压力的急剧降低, 矿物无法充分结晶, 导致火山岩中矿物颗粒细小. 普通光学显微镜在这些细粒火山岩矿物鉴定、矿物含量判定以及岩石命名上面临着非常多的困难. 能谱仪 PPA 分析方法可以快速准确鉴定火山岩中微米级矿物的成分、含量等信息, 弥补了光学显微镜在这方面的不足. 根据笔者的大量检索, 把能谱仪 PPA 分析方法应用于地质学领域的报道较少, 国外有一些学者利用该方法在地质学领域有一些尝试性的研究, 例如利用该方法精确鉴定复杂的矿物组合相并确定各种矿物相所占的面积百分比 (Pownceby *et al.*, 2007)、定量分析各种矿物相提供统计学有价值的矿物学数据 (Hoal *et al.*, 2009)、分析粒度分布, 确定颗粒形状, 颗粒组成及矿物成分 (Gottlieb *et al.*, 2000), 国内尚无报道。

因此, 笔者首次应用能谱仪 PPA 分析方法, 以山西大同地区的玄武岩样品为例, 对其进行了实验研究, 获得了一套非常有意义的实验数据。

1 实验仪器与测试条件

本次实验是在中国地质大学 (武汉) 地质过程与矿产资源国家重点实验室完成, 所用实验仪器有 Quanta 200 扫描电镜、GENESIS 能谱仪和 CEA 035 真空镀膜仪. 测试条件: 能谱仪的时间常数为 51.2、计数率为 3 000 左右、死时间为 30% 左右、每点收集时间为 100 s; 扫描电镜的工作距离为 11.5 mm, 加速电压为 20 kV, 工作电流的选择是在保证能谱仪计数率在 3 000 左右、死时间在 30% 左右的前提下进行的, 一般 Spot 选在 5.5 左右即可。

2 实验样品

样品为山西大同的新生代玄武岩, 其以块状构造、显微斑状结构为主, 主要矿物成分有斜长石、橄榄石、辉石、火山玻璃等. 斜长石明显地分为 2 个世代, 第 1 世代的斜长石呈显微斑晶出现, 晶形为长柱状和板状, 有时这种长石具有环带构造; 第 2 世代为基质中的微晶斜长石, 大小为 $0.02 \sim 0.05 \text{ mm}$, 呈细小的长条状和针状产出, 由其构成的三角形空隙中, 充填了橄榄石和辉石微晶以及磁铁矿和火山玻璃. 本次实验就是对三角形空隙中的微细充填物质进行统计分析。

首先将样品制备成表面非常平整光滑的 $2 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ 大小的薄片, 然后用 CEA 035 真空镀膜仪在其表面镀上一层碳膜, 扫描电镜选择背散射电子像模式, 利用能谱仪 PPA 分析方法对该薄片进行实验研究。

3 能谱仪 PPA 分析方法的实验研究

3.1 物相分析

首先利用扫描电镜获取该样品中微细充填物质的原始背散射电子图像 (图 1), 再利用能谱仪 PPA 分析方法采集该视域的背散射电子图像, 不同的物相显示不同的灰度, 利用能谱仪 PPA 分析方法通过拖拽光标和在编辑框键入灰度值来确定灰度阈值, 不同的物相有不同的灰度阈值. 选好阈值后, 不同的物相会显示不同的颜色 (图 2). 在同一个视域中最

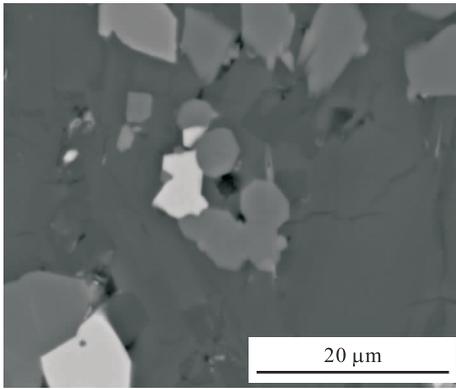


图1 原始背散射电子图像

Fig. 1 Original backscattered electron image

多可分析 8 种物相. 从图 2 可以看出, 该视域中有 3 种不同的物相, 它们的颜色分别为粉色、黄色及蓝色.

3.2 粒度分析

利用能谱仪 PPA 分析方法可对不同物相的颗粒进行粒度分析, 可分析的最小颗粒为该视域中 4 个像素点之间的大小, 这 4 个像素点之间的大小与放大倍数和分辨率有关. 图 2 中可分析的最小颗粒为 $0.1 \mu\text{m}$, 最大颗粒为 $41.1 \mu\text{m}$, 在最小和最大之间可以任意选择所要分析的颗粒范围. 电子束对样品的作用区间是 $1 \mu\text{m}$ 左右, 为了使每个颗粒的化学成分分析结果准确可靠, 本次实验分析选择的最小颗粒是 $1.5 \mu\text{m}$, 最大颗粒是 $41.1 \mu\text{m}$.

相分析后即可对该视域中所选择的所有颗粒进行粒度分析, 点击主控面板上的“Morph”键即可计算选定颗粒的形态学数据, 分析某一颗粒的形态学数据时该颗粒将变成红色(图 3). 视域中的所选颗粒分析完成后, 所有数据就会显示在一个 Excel 表中, 包括视域中颗粒总数及其所占视域的面积百分

比、每个颗粒是什么物相、每种物相的颗粒数、每个颗粒的平均直径、面积、周长、圆度、长宽比等(表 1).

通过图 3 可知, 该视域中共有 12 个颗粒, 所有颗粒的总面积占了该视域面积的 18.2%. 从表 1 可知, 该视域中也是共有 12 个颗粒, 其中粉色(物相 1)有 2 个颗粒, 黄色(物相 2)有 1 个颗粒, 蓝色(物相 3)有 9 个颗粒. 每个颗粒的平均直径、面积、周长、圆度、长宽比等在表 1 中一目了然. 把每种物相、每个颗粒的平均直径求和再平均得出, 物相 1 颗粒的平均直径为 $6.43 \mu\text{m}$, 物相 2 颗粒的平均直径为 $6.19 \mu\text{m}$, 物相 3 颗粒的平均直径为 $6.05 \mu\text{m}$. 12 个颗粒的总面积通过求和得出是 $386.49 \mu\text{m}^2$, 用每个颗粒的面积通过求和得出每种物相的总面积, 进而算出每种物相在该视域中所占的面积百分比. 通过计算得出, 物相 1 的总面积是 $65.64 \mu\text{m}^2$, 占整个视域面积的 3.1%; 物相 2 的总面积是 $29.60 \mu\text{m}^2$, 占整个视域面积的 1.4%; 物相 3 的总面积是 $291.25 \mu\text{m}^2$, 占整个视域面积的 13.7%.

3.3 化学成分分析

在物相和粒度分析时已将每个颗粒自动进行了物相分类. 在化学成分分析前, 选取不同物相的代表颗粒进行点分析, 创建各个物相的元素或氧化物列表, 再创建数据库并保存. 然后设置化学分析参数, 在“Chem”键旁的预设置编辑框, 输入准备对每个颗粒进行谱线收集的时间, 一般设置为 50 s, 在“Chem”键旁点击鼠标右键, 可以选择分析结果的类型: 如元素质量百分比、氧化物质量百分比等. 在“Chem”下方的几个扫描方式按键上, 选择分析方式, 分析方式有质心(core)式和中心(center)式 2 种, 质心式是从颗粒的一个中心点收集谱线(图 4a)

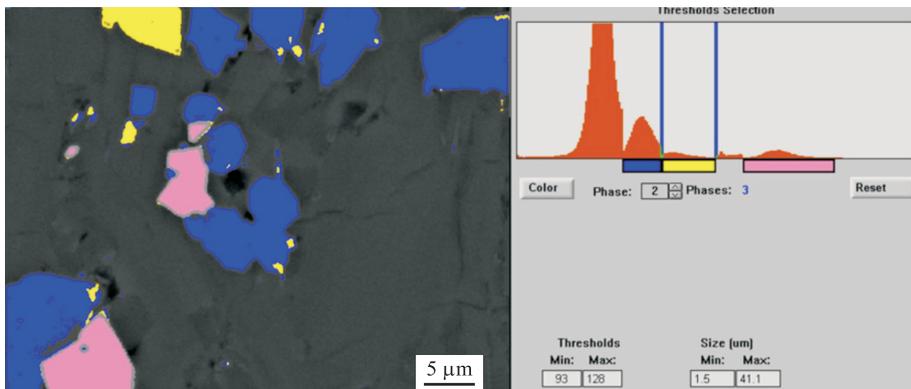


图2 不同物相显示不同颜色的背散射电子图像

Fig. 2 Backscattered electron image different phases showing different colors

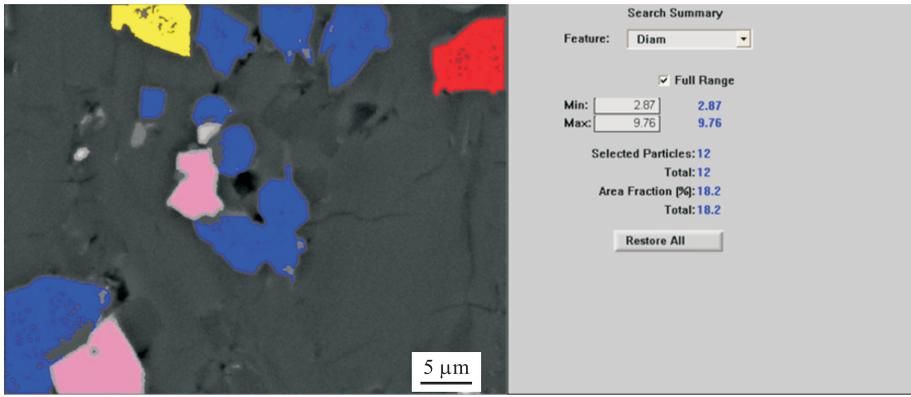


图 3 正在分析红色颗粒形态学参数的背散射电子图像

Fig. 3 Backscattered electron image analyzing red particles' morphology parameters

表 1 图 3 中所选颗粒的形态学数据

Table 1 The morphological data for the selected particles in figure 3

颗粒	物相	平均直径(μm)	面积(μm ²)	周长(μm)	圆度	长宽比	各相平均直径(μm)	面积百分比
1	1	5.35	22.11	21.18	1.61	1.68		
2	1	7.51	43.53	39.43	2.84	1.58	6.43	3.10
3	2	6.19	29.60	53.46	7.68	2.10	6.19	1.40
4	3	5.59	24.09	43.59	6.28	1.90		
5	3	5.32	21.80	39.63	5.73	2.26		
6	3	6.95	37.27	61.17	7.99	1.61		
7	3	7.60	44.57	83.64	12.49	2.06		
8	3	2.87	6.34	9.05	1.03	1.28	6.05	13.70
9	3	3.17	7.76	22.77	5.32	1.88		
10	3	4.23	13.79	24.47	3.46	1.61		
11	3	8.97	62.13	93.66	11.24	1.91		
12	3	9.76	73.50	222.80	53.74	2.03		

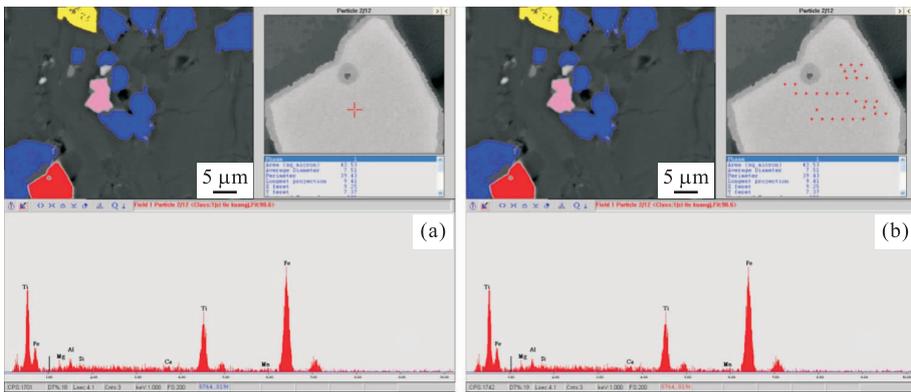


图 4 化学成分分析方式

Fig. 4 Methods of chemical composition

a. 质心式分析红色颗粒的化学成分; b. 中心式分析红色颗粒的化学成分

进行分析,中心式则是在收集时使电子束在颗粒上做光栅式扫描(图 4b)进行分析.如果选择了中心式,需选择在颗粒上做光栅式扫描的百分比,这一选择位于中心方式选择键旁的下拉对话框里.参数设置好后,点击“Chem”键系统会自动对每个颗粒进行

化学成分分析,结果会以 EXCLE 文件的形式保存在指定的文件夹里.笔者本次采用了质心式分析方法进行化学成分分析,分析结果为氧化物含量百分比(表 2).

根据表 2 可知,物相 1 中 MgO 的含量为

表 2 所选颗粒的化学成分分析结果

Table 2 The chemical composition of the selected particles analysis

颗粒	物相	MgO(%)	Al ₂ O ₃ (%)	SiO ₂ (%)	CaO(%)	TiO ₂ (%)	MnO(%)	Fe ₂ O ₃ (%)	分类	相似度(%)
1	1	2.18	2.33	2.69	1.23	20.10	1.25	70.22	1	89.80
2	1	2.52	3.01	1.77	0.99	20.39	0.95	70.37	1	90.60
3	2	23.39	2.80	35.05	0.92	0.77	0.75	36.32	2	88.90
4	3	11.84	6.86	53.86	17.73	1.40	0.42	7.89	3	92.20
5	3	12.57	3.89	50.70	19.72	2.11	0.33	10.68	3	97.50
6	3	14.14	4.60	53.20	19.82	0.65	0.60	7.00	3	91.00
7	3	10.37	8.28	55.24	16.21	1.35	0.00	8.56	3	88.50
8	3	13.39	6.25	51.98	17.31	2.27	0.73	8.07	3	93.80
9	3	12.42	5.97	49.77	19.63	1.87	0.27	10.07	3	96.70
10	3	13.43	6.92	47.91	18.95	2.79	0.00	10.01	3	93.20
11	3	12.46	4.87	49.50	19.14	2.95	0.59	10.49	3	97.00
12	3	13.50	3.04	51.35	20.78	2.19	0.64	8.50	3	94.30

2.18%~2.52%、Al₂O₃ 的含量为 2.33%~3.01%、SiO₂ 的含量为 1.77%~2.69%、CaO 的含量为 0.99%~1.23%、TiO₂ 的含量为 20.1%~20.39%、MnO 的含量为 0.95%~1.25%、Fe₂O₃ 的含量为 70.22%~70.37%，据此分析，物相 1 为磁铁矿(潘兆橐等,2004);物相 2 中 MgO 的含量为 23.39%、Al₂O₃ 的含量为 2.80%、SiO₂ 的含量为 35.05%、CaO 的含量为 0.92%、TiO₂ 的含量为 0.77%、MnO 的含量为 0.75%、Fe₂O₃ 的含量为 36.32%，据此分析，物相 2 为橄榄岩(潘兆橐等,2004);物相 3 中 MgO 的含量为 10.37%~14.14%、Al₂O₃ 的含量为 3.04%~8.28%、SiO₂ 的含量为 47.91%~55.24%、CaO 的含量为 16.21%~20.78%、TiO₂ 的含量为 0.65%~2.95%、MnO 的含量为 0%~0.73%、Fe₂O₃ 的含量为 7.00%~10.68%，据此分析，物相 3 为单斜辉石(潘兆橐等,2004)。从表 2 中还可以看出，每个颗粒的化学成分与开始创建的各个物相化学成分的相似度均在 88.5%以上。

3.4 绘制三元视图

根据化学成分分析结果，能谱仪 PPA 分析方法还可以利用不同元素或氧化物建立三元视图，以便直观地显示同一物相不同颗粒的化学成分变化和不同物相的化学成分变化。在一幅三元视图中可以显示不同物相均含有的 3 种元素(或化合物)的化学浓度，三角形的每一个角定义为一种或一组元素，其顶点则是该元素的最高浓度。当一个点移向远离顶角的方向时，表明颗粒中该元素(或化合物)含量降低，可以选择那些认为是特别重要的元素(或化合物)来建立三元视图。

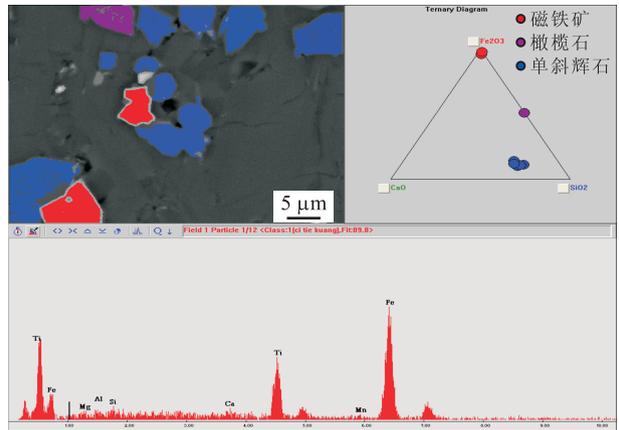


图 5 利用 Fe₂O₃、CaO、SiO₂ 绘制的三元视图
Fig. 5 Ternary view of Fe₂O₃, CaO and SiO₂

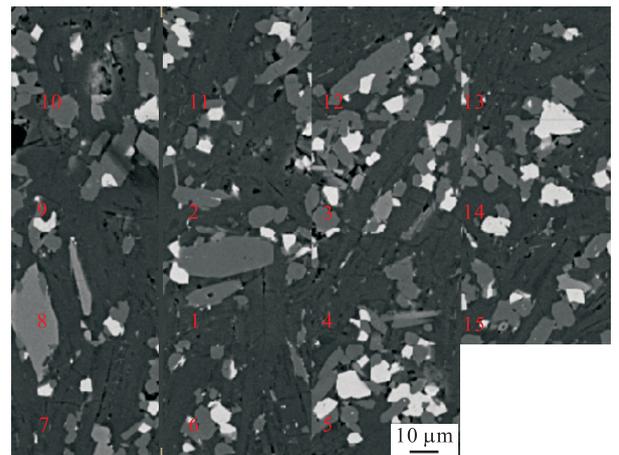


图 6 自动多视域分析拼接图
Fig. 6 Collage of automatic fields

在本次实验中，为了直观地显示 3 种物相的化学成分差异，笔者选用了 Fe₂O₃、CaO、SiO₂ 这 3 种氧化物绘制三元视图(图 5)。

表 3 自动多视域分析各种物相的颗粒个数

Table 3 Numbers of varous phases by multiple fields auto analysis

视域	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	合计
物相																
1	11	7	5	7	8	6	5	8	6	7	7	1	6	5	10	99
2	12	6	6	2	12	7	4	4	6	9	3	9	5	6	13	104
3	51	30	23	25	29	29	10	32	25	32	13	15	15	15	26	370
合计																573

从图 5 中可以看出,不同物相的每个颗粒都投影到了这个三元视图中,不同的物相投影到三元视图的不同区域,一目了然地看出了磁铁矿、橄榄岩和单斜辉石的化学成分差异。

3.5 多视域分析

对第 1 个视域进行物相、粒度、化学成分分析及三元视图绘制完成后,对该样品还可以进行自动多视域的物相、粒度和化学成分分析,以便得出的数据更加准确可靠.自动多视域分析选择视域的方法有 3 种,第 1 种是散点式,即可以随机在样品表面自动进行单视域分析;第 2 种是直线式,先确定一条直线的起点和终点,系统可以自动沿着这条直线进行分析;第 3 种是矩阵式,系统会以一定的矩阵进行分析,在矩阵中分析视域可以选择从左到右、从上到下的方式依次进行分析,也可以选择从矩阵中心开始按螺旋式的方式依次进行分析。

3.5.1 颗粒个数统计 本次实验选用了螺旋矩阵式方法进行自动多视域分析.共分析了 15 个视域(图 6),每个视域都得到了一个如表 1 和表 2 的 Excel 数据表.对 15 个 Excel 数据表进行统计,得出了 15 个视域中共分析磁铁矿(物相 1)、橄榄石(物相 2)和单斜辉石(物相 3)3 种物相的总颗粒个数(表

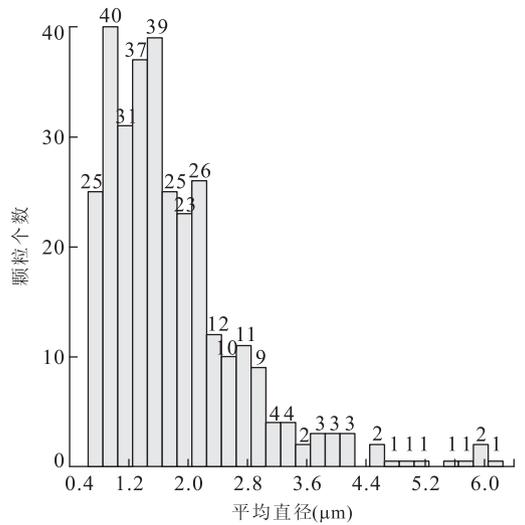


图 8 橄榄石颗粒平均直径直方图

Fig. 8 Histogram of olivine particle size distribution

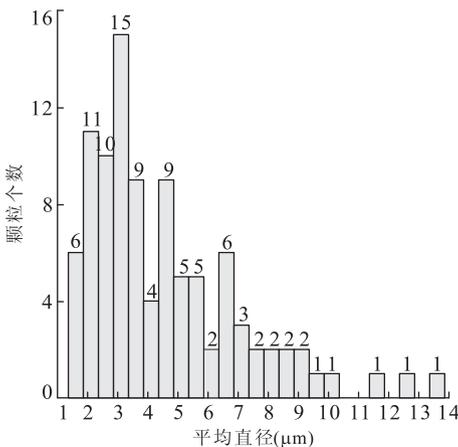


图 7 磁铁矿颗粒平均直径直方图

Fig. 7 Histogram of magnetite particle size distribution

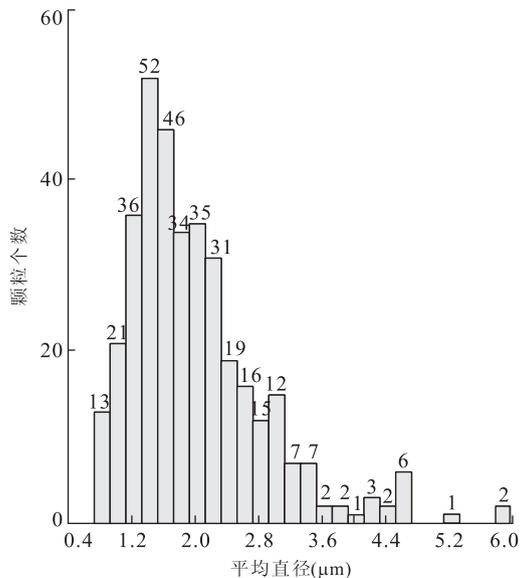


图 9 单斜辉石颗粒平均直径直方图

Fig. 9 Histogram of monoclinic pyroxene particle size distribution

3).从表 3 中可知,共分析颗粒 573 个,其中磁铁矿颗粒 99 个、橄榄石颗粒 104 个、单斜辉石颗

表4 自动多视域分析每个视域、每种物相的平均直径及所占的面积百分比

Table 4 Average diameter and area percentage of each phase in each field by multiple fields analysis

视域	物相 1(磁铁矿)粉色		物相 2(橄榄石)黄色		物相 3(单斜辉石)兰色	
	平均直径(μm)	面积百分比	平均直径(μm)	面积百分比	平均直径(μm)	面积百分比
1	5.21	8.70	2.00	1.30	2.26	8.00
2	3.42	2.28	1.31	0.28	1.83	2.91
3	5.11	3.57	1.31	0.27	2.40	3.85
4	3.09	1.80	0.86	0.04	1.96	3.29
5	3.40	2.71	1.51	0.83	1.87	3.20
6	7.76	10.81	1.60	0.54	1.92	3.19
7	4.06	3.20	1.08	0.13	1.76	0.87
8	4.30	4.55	1.32	0.20	1.74	2.67
9	5.01	4.70	1.10	0.22	1.96	2.80
10	4.10	3.61	1.42	0.68	1.90	3.79
11	2.99	1.99	1.39	0.15	2.98	4.07
12	6.45	0.10	2.23	1.25	4.10	15.31
13	3.90	2.61	1.38	0.30	2.66	5.09
14	4.06	3.07	1.50	0.36	1.87	1.42
15	6.14	13.62	1.16	0.51	2.25	3.89
平均值	4.60	4.49	1.41	0.47	2.23	4.29

粒 370 个。

3.5.2 颗粒度分析 根据 15 个 Excel 表中每种物相每个颗粒平均直径的数据,绘制了 3 种不同物相的颗粒平均直径直方图(图 7,8,9)。从图 7 可以看出,磁铁矿颗粒平均直径的最大值是 13.49 μm ,最小值是 1.36 μm ,主要分布在 1.36~6.00 μm 之间。从图 8 中可以看出,橄榄石颗粒平均直径的最大值是 6.18 μm ,最小值是 0.65 μm ,主要分布范围在 0.65~2.20 μm 。从图 9 中可以看出,单斜辉石颗粒平均直径的最大值是 12.90 μm ,最小值是 0.73 μm ,主要分布范围在 0.73~3.00 μm 。

总体来看,磁铁矿的颗粒比较大,橄榄石的颗粒比较小,单斜辉石的颗粒大小均有,小的偏多。

根据 15 个 Excel 表中的数据,对每个颗粒的平均直径采用求和再平均、面积采用求和的方法计算,得出每个视域、每种物相的平均直径和所占的面积百分比,进而算出 15 个视域中每种物相的平均直径和所占的面积百分比,这样得出的数据就更加准确可靠(表 4)。通过表 4 可知,在该样品中由长条状或针状微晶斜长石所构成的三角形空隙中,磁铁矿的平均直径是 4.60 μm ,所占的平均面积百分比是 4.49%;橄榄石的平均直径是 1.41 μm ,所占的平均面积百分比是 0.47%;单斜辉石的平均直径是 2.23 μm ,所占的平均面积百分比是 4.29%。

4 结论

(1)山西大同新生代玄武岩由长条状、针状微晶斜长石所构成的三角形空隙中充填有 3 种不同的物相。

(2)视域中 3 种物相共 12 颗,并得出每个颗粒的平均直径、面积、周长、圆度、长宽比等信息(表 1)。这些信息有助于矿物颗粒分析、岩石定名及矿床品位分析。

(3)通过化学成分分析,3 种物相分别鉴定为磁铁矿(物相 1)、橄榄岩(物相 2)及单斜辉石(物相 3)。由 Fe_2O_3 、 CaO 、 SiO_2 构成的三元视图上 3 种物相可得到明显的区分(图 5)。

(4)自动多视域分析 15 个视域,鉴定出磁铁矿(99 颗)、橄榄岩(104 颗)及单斜辉石(370 颗)共 573 个颗粒,并统计了每个物相的平均直径、所占面积百分比等信息(表 4)。多视域分析各种物相的平均直径和所占的面积百分比与单视域分析的数据相比有一定的差异,那么多视域分析的平均数据肯定更加准确可靠。

References

- EDAX Inc., 2003. Genesis Spectrum User's Manual.
 FEI Company, 2002. The Quanta 200 User's Operation Manual, 1-22.
 Goldstein, J. I., Newbury, D. E., Joy, D. C., et al., 2003. Scanning Electron Microscopy and X-Ray Microanaly-

- sis, Springer.
- Gottlieb, P., Wilkie, G., Sutherland, D., et al., 2000. Using Quantitative Electron Microscopy for Process Mineralogy Applications. *Journal of Metals*, 52(4): 24—25. doi:10.1007/s11837-000-0126-9
- Hoal, K. O., Appleby, S. K., Stammer, J. G., et al., 2009. SEM-Based Quantitative Mineralogical Analysis of Peridotite, Kimberlite, and Concentrate. *Lithos*, 112: 41—46. doi:10.1016/j.lithos.2009.06.009
- Jiang, M. L., 2009. Particle Size Analysis and Its Geological Applications. *Journal of Oil and Gas Technology*, 31(1): 161—163 (in Chinese).
- Kong, M. G., 2004. Simple Discussion of the Analytic Technology of Energy Spectrum in KeveX SIGMA™ X-Ray Energy Dispersive Spectrometer. *Modern Scientific Instruments*, (1): 58—59 (in Chinese with English abstract).
- Li, X. T., 2006. EDS Analysis Methods and Characteristics. 2006 Oxford Instruments Microanalysis Seminar Handouts, 1—40 (in Chinese).
- Liao, Q. C., Lan, F. L., 1990. SEM Principles and Application Technology. Metallurgical Industry Press, Beijing, 285—287 (in Chinese).
- Liu, X. H., Feng, M. Y., Luo, J. L., et al., 2009. Analysis of Influence Factors on Sandstone Reservoirs of the Chang 8 and Chang 6 Members in Xifeng Oil Field, Southwestern Ordos Basin. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 39(1): 102—108 (in Chinese with English abstract).
- Liu, X. F., 1982a. Particle Size Analysis Lectures (Four). *Minerals and Rocks*, (3): 96—110 (in Chinese).
- Liu, X. F., 1982b. Particle Size Analysis Lectures (Three). *Minerals and Rocks*, (2): 123—132 (in Chinese).
- Lyman, C. E., 1990. Scanning Electron Microscopy, X-Ray Microanalysis, and Analytical Electron Microscopy: A Laboratory Workbook. Springer.
- Pan, Z., L., Zhao, A. X., Pan, T. H., 2004. Crystallography and Mineralogy (Volume Two). Geological Publishing House, Beijing, 245—263 (in Chinese).
- Pownceby, M., MacRae, C., Wilson, N., 2007. Mineral Characterisation by EPMA Mapping. *Minerals Engineering*, 20(5): 444—451. doi:10.1016/j.mineng.2006.10.014
- Ran, J., Du, G., Pan, Z. X., 2011. Study on Methods for Particle Size Analysis of Sediment Samples. *Rock and Mineral Analysis*, 30(6): 669—676 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Y. Z., He, J. S., 1982. An Application of the Data Concerning Grain-Size Analysis of Thin Section in Discriminating Sedimentary Environment of the Late Precambrian in the Qinling Range. *Geology of Shaanxi*, 2(2): 95—100 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, D. T., 2009. Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive Analysis Techniques. South China University of Technology Press, Guangzhou (in Chinese).

附中文参考文献

- 蒋明丽, 2009. 粒度分析及其地质应用. 石油天然气学报, 31(1): 161—163.
- 孔明光, 2004. 浅谈 KeveX SIGMA™ X 射线能谱仪中的能谱分析技术. 现代科学仪器, (1): 58—59.
- 李香庭, 2006. EDS 的分析方法与特点. 2006 牛津仪器显微分析研讨会讲义, 1—40.
- 廖乾初, 蓝芬兰, 1990. 扫描电镜原理及应用技术. 北京: 冶金工业出版社, 285—287.
- 刘小洪, 冯明友, 罗静兰, 等, 2009. 西峰油田长 8 和长 6 储层物性影响因素分析. 西北大学学报(自然科学版), 39(1): 102—108.
- 刘岫峰, 1982a. 粒度分析讲座(四). 矿物岩石, (3): 96—110.
- 刘岫峰, 1982b. 粒度分析讲座(三). 矿物岩石, (2): 123—132.
- 潘兆棹, 赵爱醒, 潘铁虹, 2004. 结晶学及矿物学(下册). 北京: 地质出版社, 245—263.
- 冉敬, 杜谷, 潘忠习, 2011. 沉积物粒度分析方法的比较. 岩矿测试, 30(6): 669—676.
- 杨应章, 何建社, 1984. 利用薄片粒度资料判别高山河组及罗圈组岩相的探讨. 陕西地质, 2(2): 95—100.
- 张大同, 2009. 扫描电镜与能谱仪分析技术. 广州: 华南理工大学出版社.