江西金山金矿流体作用中的物质迁移及岩石体积变化*

Mass Balance, Volume Change and Fluid Flow in the Jinshan Glod Deposit, Jiangxi Province

李晓峰[1] 毛景文[1] 华仁民[2]

（1 中国地质科学院矿产资源研究所，北京 100037；2 南京大学地球科学系，江苏 南京 210093）

Li Xiaofeng[1], Mao Jingwen[1] and Hua Renmin[2]

（1 Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Science, Beijing 100037, China;
2 Earth Science Department, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

摘 要 金山金矿位于赣东北德兴矿集区内，赋存于金山韧性剪切带中。本文对金山金矿流体作用过程中蚀变变形岩石物质组分的变化和岩石的应变特征以及流体的作用方式进行了研究。结果表明，在糜棱岩带，Al_2O_3、TiO_2、CaO、K_2O、LOI 为带入组分，TFe、MgO、Na_2O、MnO 为带出组分；在超糜棱岩带，CaO、Na_2O、MnO 为带入组分，Al_2O_3、TFe、TiO_2、MgO、K_2O、LOI 为带出组分。组分的带入和迁出反映了岩石的蚀变类型和种类。流体作用过程中糜棱岩带、超糜棱岩带岩石的体积分别增加了 31%和 46%，水/岩比分别为 216 和 354，时间积分流体通量分别为 $3.71\times10^4\ cm^3/cm^2$ 和 $1.25\times10^5\ cm^3/cm^2$，岩石体积应变分别为 0.31 和 0.42。本文认为金山金矿岩石体积的增加与剪切带内大量的流体通过以及大量富水矿物的形成有关。蚀变变形过程中，由不含水矿物组成的岩石蚀变成为大量富水矿物（如绢云母、伊利石、绿泥石等）组成的岩石，而大量富水矿物的存在，是导致岩石密度降低和体积增加的主要原因。

关键词 韧性剪切带 流体作用 质量平衡计算 岩石应变 金山金矿

金山金矿所在的赣东北德兴矿集区位于江南造山带东段，北西是扬子板块，南西是华南褶皱系，东面则是同属江南造山带的江（山）绍（兴）地区（华仁民等，2000）。金山金矿位于赣东北深大断裂中，该断裂带是九岭地体与怀玉地体的碰撞拼合带（朱训等，1983；汪新等，1989；舒良树等，1995）。由于其重要的经济和独特的科学研究价值，前人对金山金矿的矿床地质特征、矿床成因以及金山韧性剪切带的特征及其对金山金矿的控制作用等方面做了专题研究，取得了重要成果。近年来，韧性剪切带内化学成分的变化以及流体与岩石的相互作用，成为韧性剪切带研究的前沿领域。在前人研究工作（季峻峰等，1994a，1994b；韦星林，1995；王秀璋等，1999）的基础上，通过质量平衡计算，本文探讨了在流体作用过程中，金山金矿蚀变变形岩石物质的迁移规律以及岩石的应变。

1 矿床地质特征

金山金矿床赋存于金山韧性剪切带。其主体构造由江光—富家坞及八十源—铜厂 2 条北东向走滑剪

* 国家重点基础研究规划项目（G199p043209）
第一作者简介 李晓峰，男，1971 年生，博士后，岩石学、矿物学、矿床学专业。

切带构成。矿区地层主要由中元古界双桥山群组成，其岩性为板岩、千枚岩、变质晶屑凝灰岩及变质杂砂岩夹多层变余安山玄武岩。区内岩浆活动比较发育，除晋宁期中基性浅成喷发岩外，还有海西期中基性侵入岩和燕山期中酸性侵入岩和火山-次火山岩。

金矿体产于韧性剪切带应变中心的糜棱岩-超糜棱岩中。金矿化类型主要有蚀变糜棱岩型和含金石英脉型两类。蚀变糜棱岩型金矿体产于下部黑色含碳千枚岩和中部凝灰质粉砂质千枚岩之间的韧性剪切带强变形部位。矿体成层状、似层状、透镜状产出，产状平缓，倾角 10～35°，与片理产状基本一致。剖面上具舒缓波状。矿石品位较稳定，平均 7×10^{-6}～30×10^{-6}。该矿化类型规模大，占矿床储量的 95%以上。含金石英脉型金矿体主要产在蚀变糜棱岩型金矿体上部或穿插其中，成脉状、透镜状产出，沿走向、倾向常尖灭再现，金品位较高，平均 20.75×10^{-6}，该类型矿石规模小，且极不稳定。

金山韧性剪切带具有变形、蚀变作用的双重性，从剪切带边部向中心部位，随着剪切作用的增强，热液流体的渗滤交代愈加强烈，所产出的蚀变类型、蚀变强度、矿物的共生组合以及金矿化的强度具有时空的依存关系，从而形成构造岩-蚀变-金矿化三位一体的分带现象（韦星林，1995）。金山金矿发育有多种类型的围岩蚀变，主要有硅化、钠长石化、碳酸盐化、绢云母化、绿泥石化、黄铁矿化和水云母（伊利石）化等。根据岩石的变形变质作用、矿物的共生组合关系，金山金矿的围岩蚀变可以分为糜棱岩带和超糜棱岩带。

矿石的组成矿物比较简单。主要的金属矿物为黄铁矿，其次为闪锌矿、黄铜矿及方铅矿等。脉石矿物主要为石英，其次为绢云母、钠长石、铁白云石、绿泥石等。

2　蚀变变形过程中物质的迁移规律

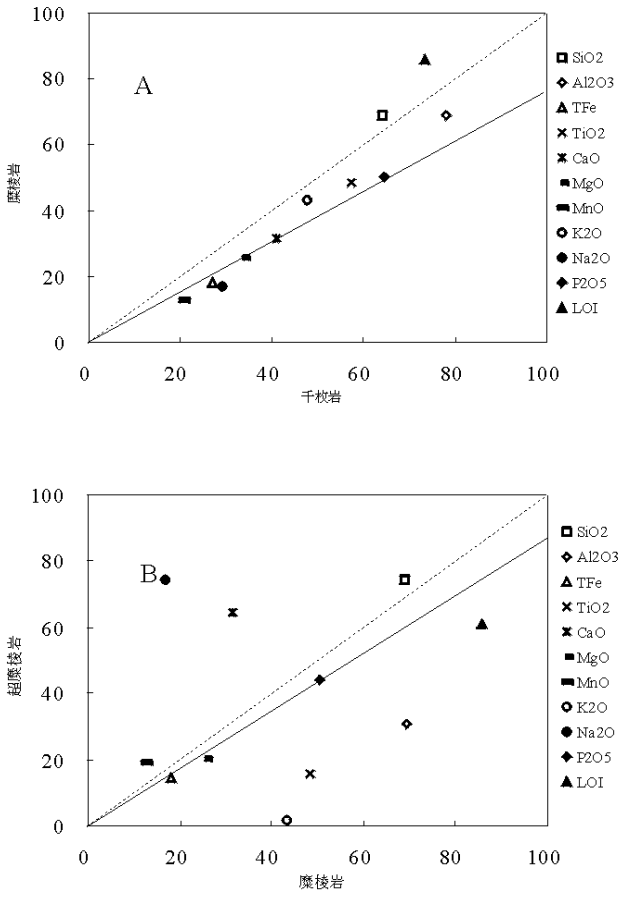
2.1　岩石的体积变化

常量元素的活动性主要受 3 个因素的控制：一是未蚀变岩石中矿物的组分及其稳定性；二是蚀变产物的组分及其稳定性；三是流体的温度、组分及其通量。在有关前人确定不活动组分研究的基础上，应用 O'Hara（1988）归纳的方法，作岩石化学等比线图（图 1）。根据确定不活动组分的原则，LOI 做为挥发组分应首先排除。由于金山金矿有较普遍的硅化、绢云母化、绿泥石化、钠长石化等围岩蚀变，因此，在不活动组分确定时，也应排除新生蚀变矿物中的主要组分（李晓峰等，2000）。因此，MgO、CaO、TFe、Al_2O_3、Na_2O 也不能作为不活动组分。因此，根据岩石化学等比线图，在糜棱岩带选择 P_2O_5、MnO 为不活动组分，在超糜棱岩带选择 P_2O_5 和 MnO 作为不活动组分。

根据体积亏损公式 ：

$C_i^A/C_i^o=1/(1-\triangle V)$　(O'Hara,1988)

式中：C_i^A，C_i^o 分别代表 i 组分在岩石蚀变变形前后的浓度，$\triangle V$ 代表岩石蚀变变形前后体积的变化。



A-由千枚岩→糜棱岩；B-由糜棱岩→超糜棱岩

图 1　江西金山金矿流体作用过程中岩石化学成分等比线图

根据上述公式，求出糜棱岩带、超糜棱岩带岩石的体积分别增加了 31%、46%、57%。这些岩石体积的增加与剪切带内大量的流体通过以及大量富水矿物的形成有关。因为在金山金矿的形成过程中，地壳缓慢上隆。成矿环境处于由挤压环境向伸展环境转换过程中。韧性剪切带内大量流体的存在，使水-岩反应十分广泛。在蚀变变形过程中，岩石由不含水的矿物形成大量富水矿物（如绢云母、伊利石、绿泥石等），而大量富水矿物的存在，将导致岩石密度的降低和体积的增加。

2.2 物质的迁移

根据 Gresens(1984)提出的公式，可算出水-岩作用过程中岩石各组分（i）的得失率(X_i)。已测得千枚岩、糜棱岩、超糜棱岩密度分别为 2.8 g/cm^3、2.75 g/cm^3、2.75 g/cm^3 和 2.6 g/cm^3。以原岩 100 g 为参考值，可得如下质量平衡计算方程：

由千枚岩→糜棱岩，岩石体积增加了 31%。

100g 千枚岩＋25.9gSiO_2＋2.50gAl_2O_3－8.0gTFe－0.10gTiO_2＋0.01gCaO－0.01gMgO－0.03gMnO＋0.59gK_2O－0.23gNa_2O＋2.04gLOI＝130.08g 糜棱岩。

由糜棱岩→超糜棱岩，岩石体积增加了 15%。

100g 糜棱岩＋20.90gSiO_2－6.54gAl_2O_3－0.17gTFe－0.50gTiO_2＋1.13gCaO－0.12gMgO＋0.07gMnO－2.67gK_2O＋2.39gNa_2O－0.7gLOI＝113.79g 超糜棱岩

在金山剪切带中，除 SiO_2 为带入组分外，其它组分在不同的蚀变变形带表现出不同的性状。在糜棱岩带，Al_2O_3、TiO_2、CaO、K_2O、LOI 为带入组分，TFe、MgO、Na_2O、MnO 为带出组分；在超糜棱岩带，CaO、Na_2O、MnO 为带入组分，Al_2O_3、TFe、TiO_2、MgO、K_2O、LOI 为带出组分。这与超糜棱岩带蚀变矿物以钠长石和铁白云石为特征、糜棱岩带蚀变矿物以绢云母和白云石为特征是一致的。

2.3 水/岩比

根据岩石蚀变、变形变质过程中成分随流体的带出、带入量可以计算流体/岩石的比率，即水/岩比。

$$N=L_{SiO_2}/C_{Si}^{f}(1-S)$$

式中，N 为流体/岩石的比率，L_{SiO_2} 为岩石蚀变变形变质过程中的 SiO_2 带入量，C_{Si}^{f} 为 SiO_2 在流体中的溶解度，S 为 SiO_2 在流体中的饱和程度。

由 Gresens 方程获得了各蚀变变形带流体作用过程中 SiO_2 的带入量。根据金山韧性剪切带内岩石的变形岩石学和流体包裹体研究，金山剪切带的形成压力为 71 MPa，形成温度为 250℃左右。在这种条件下，SiO_2 的溶解度为 3 g/kg（Fournier et al, 1982）。因为参与水岩反应的流体为不完全饱和的非平衡流体相，本文认为金山剪切带流体中 SiO_2 的饱和度为 60%。据此计算金山金矿各蚀变变形带的水/岩比为：

$$N_{糜棱岩带}=216 \qquad N_{超糜棱岩带}=354$$

2.4 流体的通量

剪切带内岩石成分的变异和体积的亏损（或增加）在很大程度上取决于流体-岩石的相互作用方式和流体的通量。虽然水-岩比可以反映出流体的作用方式，但还有很大的局限性。Ferry & Dipple（1991）提出的流体的时间积分通量模式，使人们有了一个全新的理论和方法来研究流体和岩石的相互作用。该模式表述如下：

$$q=(n_{SiO_2}-x_{SiO_2}\Sigma n_i)/[(\mathrm{d}x_{SiO_2}/\mathrm{d}t)(\mathrm{d}t/\mathrm{d}Z)+(\mathrm{d}x_{SiO_2}/\mathrm{d}p)(\mathrm{d}p/\mathrm{d}Z)]$$

式中，q 是按时间积分的流体通量，单位是 cm^3/cm^2，n_{SiO_2} 是岩石蚀变变形过程中获得的 SiO_2 摩尔数，x_{SiO_2} 是流体中 SiO_2 的摩尔分数。$\mathrm{d}x_{SiO_2}/\mathrm{d}T$（$1.7\times10^{-7}$/℃）和 $\mathrm{d}x_{SiO_2}/\mathrm{d}p$（$2.6\times10^{-9}$/bar）采用 Fournier 和 Potter（1982）的数据。金山韧性剪切带内 $\mathrm{d}t/\mathrm{d}Z$ 和 $\mathrm{d}p/\mathrm{d}Z$ 分别为 30℃/km 和 222×10^5 Pa/km（李晓峰，2001）。将有关参数代入上式，求得金山金矿蚀变变形带水-岩反应过程中，流体的通量分别为：

$$q_{糜棱岩带}=3.71\times10^4\ \mathrm{cm^3/cm^2} \qquad q_{超糜棱岩带}=1.25\times10^5\ \mathrm{cm^3/cm^2}$$

3　结论

（1）金山金矿蚀变变形带糜棱岩带、超糜棱岩带、石英脉中岩石的体积分别增加了 31%和 46%，水/岩比分别为 216 和 354。时间积分流体通量分别为 7.59×10^4 cm^3/cm^2 和 1.25×10^5 cm^3/cm^2。糜棱岩带和超糜棱岩带岩石的体积应变分别为 0.31 和 0.42。

（2）岩石体积的增加与剪切带内大量的流体通过以及大量富水矿物的形成有关。蚀变变形过程中，岩石由不含水的矿物形成大量富水矿物（如绢云母、伊利石、绿泥石等），而大量富水矿物的存在，将导致岩石密度的降低和体积的增加。

（3）糜棱岩带，Al_2O_3、TiO_2、CaO、K_2O、LOI 为带入组分，TFe、MgO、Na_2O、MnO 为带出组分；在超糜棱岩带，CaO、Na_2O、MnO 为带入组分，Al_2O_3、TFe、TiO_2、MgO、K_2O、LOI 为带出组分。组分的带入和迁出反映了岩石的蚀变类型和种类。

参　考　文　献

华仁民,李晓峰,陆建军,等. 2000. 德兴大型铜金矿集区的构造环境与成矿流体研究[J]. 地球科学进展,15(4):525～533.

季俊峰,刘英俊,孙承辕等. 1994. 江西金山剪切带型金矿床两类矿石的地球化学特征——兼论两阶段成矿机制[J]. 地球化学,(3),226～232.

季俊峰,孙承辕.郑晴. 1994. 江西金山剪切带型金矿床中含金石英脉的成矿特征[J]. 地质论评,40(4),361～367.

李晓峰,华仁民. 2000. 韧性剪切带内的流体作用[J]. 岩石矿物学杂志,19(4):333～340.

舒良树,施央申,郭令智,等. 1995. 江南中段板块-地体构造与碰撞造山运动学[M]. 南京:南京大学出版社,94～120.

汪新,马瑞士. 1989. 怀玉山蛇绿混杂岩及古碰撞缝合线的确定[J]. 南京大学学报(地球科学版),(1-2):72～81.

王秀璋,单强,梁华英,等. 1999. 金山金矿床成矿时代及矿床成因[J]. 地球化学,28(1):10～17.

韦星林. 1995. 金山金矿田地质特征及成矿地质作用. 矿产与地质,9(6):471～480.

朱训,黄崇轲,芮宗瑶,等. 1983. 德兴斑岩铜矿[M]. 北京:地质出版社,336.

Ferry J M, Dipple G M. 1991. Fluid flow, mineral reactions, and metasomatism[J]. Geology, 19,211～214.

Gresens R L, 1984.Composition-volume relationship of metasomatism[J]. Chemical Geology, 2:47～55.

O'Hara K D. 1988. Fluid flow and volume loss during mylonitization: An origin for phyllonite in an overthrust setting, North Carolina[A].U.S.A. Tectonophysics, 156,21～36.