

冀西北后沟地区钾交代的泵压 致裂与自组织扩展*

Microfractures Induced by K-Metasomatic Pumping Pressures and Self-Governed Propagation of K-Metasomatism in Hougou Area, Northwestern Hebei Province, China

徐兴旺 蔡新平 张宝林 梁光河 王 杰

(中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029)

Xu Xingwang, Cai Xinping, Zhang Baolin, Liang Guanghe and Wang Jie

(Institute of Geology and Geophysics, CAS, P.O. BOX 9825, Beijing 100029, China)

摘 要 钾交代是地壳中一种重要交代作用, 和许多矿床的成矿作用关系密切。文中以河北后沟地区钾交代为例, 分析了后沟地区钾交代前后岩石、物理化学方面的变化, 认为微破裂的形成与交代所引起的体积膨胀面产生的泵压有关。

关键词 钾交代 微破裂构造 自组织扩展 河北后沟地区

钾交代是地壳中一种重要的交代作用, 其与许多矿床(如金矿、铀矿等)的成矿作用关系密切。钾化蚀变岩不仅是一些矿床的找矿标志, 也是一些矿床的含矿围岩并构成钾化蚀变岩型矿床。例如, 钾化蚀变岩型金矿是重要的金矿床类型(寸硅, 1992; 邹光华, 1996; 聂凤军等, 1997), 可形成大型和超大型金矿床(如美国的克里普克里克金矿、巴布亚新几内亚的波格尔金矿、我国冀西北地区东坪金矿、后沟金矿和黄土梁金矿等)。前人对钾交代作用的地球化学过程及与之相关矿床的地质特征和成矿条件等做了大量的工作(Rice 等, 1985; Ahmad 等, 1990; Richards 等, 1993; Richards, 1995), 而对钾交代对成矿(如金矿成矿)的控制机制研究较少, 特别是富钾流体与控矿构造的成因联系很少有人探讨。一般地认为, 富钾流体是成矿元素(如 Au、Ag)迁移的载体(Boyle, 1979)。但为什么在钾交代之后发生的金矿化作用仍选择性地于钾交代作用较强的钾交代岩内进行? 这一直是矿床地质学家所关注的问题。

另一方面, 流体与围岩相互作用引发岩石矿物破裂的构造动力学是当今流体地质学和构造地质学研究的前沿课题之一(Fyfe and Kerrich 1985; Newton 1990; Yu 1997)。由流体的运动及其温度压力等物理状态变化所产生的构造作用和动力学过程, 已引起许多地质学家的关注和重视(Hubbert and Rubey 1959; Zheng et al. 1988; Meissner and Wever 1992; Xu et al. 1999)。近年来, 一些地质学家开始研究流体与岩石之间发生的化学反应对岩石矿物变形的影响(Kerrich et al. 1981; Atkinson and Meredith 1981; Sun and Shen 1985; Newton 1990; Sun et al. 1998), 并开始注意和研究矿物替换过程体积变化引起应力集中和导致岩石矿物破裂(Austrheim et al., 1999)。但是, 与流体-岩石化学反应有关的破裂的特征及其形成机制仍不清楚。

最近, 我们在冀西北后沟地区钾化蚀变岩中发现一套奇特的微破裂构造。这些微破裂构造的组构、几何学和动力学特征显示其成因与钾交代作用和交代过程圈闭的残余流体有关。通过分析后沟地区钾交代前后岩石物理化学方面的变化特征, 我们认为这些微破裂的形成与钾交代所引起的体积膨胀而产生的泵压有关, 钾交代作用和微破裂具自组织脉动扩展与繁殖的特征。这些微破裂既是成矿流体迁移的通道, 也是成矿元素富集于沉淀成矿的有利空间。

* 本文受自然科学基金(编号: 49802021)资助项目。

第一作者简介 徐兴旺, 男, 1967 年生, 博士, 长期从事构造地质研究。

1 地质背景

后沟钾化蚀变岩位于华北地台北缘赤城-崇礼东西向深大断裂的南侧、水泉沟一大南山碱性杂岩体带东段后沟一带。蚀变岩的原岩为侵位于太古宙桑干群变质岩和海西期超基性岩(小张家口岩体)中的细粒碱性花岗岩。区内后沟金矿、北沟金矿、西水沟金矿、陶家沟金矿和石垛口金矿都产于钾化蚀变岩中,矿床类型为沿微破裂构造充填和分布的含金黄铁矿细脉和含金黄铁石英脉,成矿年龄为 157~182 Ma(王正宽等, 1992; 魏菊英和苏琪, 1994)。

2 钾化蚀变岩与超细矿物集合体

钾交代作用形成了颗粒较大的钾微斜长石, 颗粒粒径一般为 1 mm, 最大可达 10 mm。强蚀变带内的岩石主要由钾交代成因的钾微斜长石组成, 并被称为“钾长石岩”, 形成年龄为 (176.7 ± 0.6) Ma 至 $202.6 \pm$ Ma(徐兴旺等, 2001)。交代流体为富 K、F、S 的流体, 流体的温度为 300~500℃, 压力为 300~400 MPa。

根据交代岩中交代成因钾长石的含量和钾交代的序次, 钾交代岩可分为 3 种类型: ① 单世代弱钾化蚀变岩(WMKMR), 岩石中钾长石的含量介于 10%至 85%之间, 岩石中记录的钾交代只有一次; ② 单世代强钾化蚀变岩(IMKMR), 岩石中钾长石的含量大于 85%, 岩石中记录的钾交代只有一次; ③ 多序次蚀变岩(PKMR), 岩石中钾长石的含量可大于 90%, 岩石中记录了两次以上钾交代作用。这 3 种不同类型的蚀变岩在空间上呈不规则同心环状分布。其中规模最大的钾化蚀变岩呈耳状分布于小张家口逆冲断层的上侧, “耳状”蚀变岩的开口与断层相连, 这可能意味着该断裂是含钾流体迁移的重要通道。钾长石含量较高的单世代强钾化蚀变岩和多序次蚀变岩被统称为“钾长石岩”。

钾化蚀变岩中发育一些奇特的、形态呈囊状、透镜状或条带状的超细粒矿物集合体(UFMA)。集合体由石英、绢云母、绿泥石、方解石、石盐、赤铁矿和磁铁矿及不规则气孔组成, 矿物颗粒极细、一般小于 5 μm , 有的呈絮状; 集合体具悬浮结构。他们较孤立地分布于交代成因钾长石颗粒的粒间和粒内, 其含量和矿物组成与蚀变岩类型有关。其在三种蚀变岩中的含量分别为小于 5%、介于 5%与 10%之间和约 5%; 同种蚀变岩中超细矿物集合体的类型和含量相似。弱钾化蚀变岩中的超细矿物集合体分布于钾长石晶体的粒内, 为粒内矿物集合体。这些超细矿物集合体与其相邻钾长石巨晶之间截然的接触关系及钾长石表面干净无蚀变的特征说明超细矿物集合体不是母矿物钾长石的蚀变矿物。这些超细矿物集合体是交代作用过程形成的已固化的残留流体。

3 钾化蚀变岩中微破裂构造的特征及其动力学成因机制

钾化蚀变岩中微破裂构造中都有矿物集合体充填, 多呈“V”字形, 开口端与规模相对大一些的矿物集合体囊或透镜体相连, 为液压成因的张性破裂或张剪性破裂。从其展布情况看, 有发育于钾长石矿物粒内的粒内破裂, 和穿过钾长石矿物颗粒的穿粒破裂。从其形成的时空关系来看, 破裂构造又可分为同生破裂构造和后生破裂构造, 同生破裂与破裂的载体(钾长石)系同一交代作用的产物, 而形成后生破裂构造的交代作用晚于其破裂载体(钾长石)形成的交代作用。同生破裂又有高序次和低序次之分。同生破裂相对于同期形成和固化的钾长石巨晶而言, 多为粒内破裂。但对于巨粒钾长石之间的细粒钾长石而言, 破裂构造可穿切多个矿物颗粒而表现出穿粒的特征。同生破裂构造的分布和组合型式主要有“x”共轭破裂构造系、树枝状破裂构造系和肋排状近平行分布的破裂构造系。

微破裂的分布和组构特征与钾化程度、钾交代过程形成的残留流体的形态、大小及分布特征等密切相关。

在钾化较弱的蚀变岩中, 交代成因钾长石呈不规则椭球状分布于细粒石英和钠长石之中。岩石中超细矿物集合体呈细条带和“X”共轭状分布于这些椭球形钾长石巨晶内。这些条带的尖端都发育有长度不同、无流体矿物充填的次级破裂, 并显示液压破裂的特征, 即条带状超细矿物集合体本身就是一种破裂。破裂系的共轭锐角为 60°, 其平分线与椭圆状钾长石巨晶的长轴方向一致, 对应的钝角平分线垂直于钾长石的延长方向。沿破裂面的位错特征显示形成破裂系的主压应力轴平行于钝角平分线, 这意味着钾长石在破裂形成时具塑性特征(Paterson, 1959; Heard, 1960)并受到以垂直于其长轴方向为主压应力方向应力的挤压而拉长。破裂中有矿物脉充填和钾长石中交代残余矿物被破裂切割的特征, 说明该破裂(fractures)不是矿物自身所具有的劈理构造(cleavage)。椭球状钾长石在岩石中随机分布、和破裂系方位仅与其钾长石母体有关的特征意味钾长石椭球状形态的形成及其内部“X”共轭状破裂隙的发育是一种与钾长石自身有关的局部作用的产物。

强钾化蚀变岩中微破裂相对密集,有放射状、树枝状和环状破裂。放射状和树枝状破裂中的充填脉体通常与一个粒内或粒间超细矿物集合体相连。有的放射状微破裂延伸较远,穿切颗粒较小矿物时表现出穿粒的特征;有的“V”形破裂较浅,呈锯齿状;破裂中充填脉的结构与组成和其相连的矿物集合体囊一致,矿物之间具较多的孔隙,集合体具悬浮结构。一些延伸较远的微破裂常呈“Y”、“ ψ ”等树枝状产出。典型的树枝状破裂通常由主干破裂和分支破裂组成,分支破裂与主干破裂的夹角 $30\sim 45^\circ$,分支破裂常成对和对称状出现,最多见有 4 层枝杈;分支破裂可有更低序次的破裂枝杈。这种树枝状破裂是流体充填过程尖端破裂的产物(Clemens and Mawer, 1992)。而环状破裂则呈环状分布于一些囊状矿物集合体的外围,破裂的延伸产状与矿物集合体囊的外形平行。囊状超细矿物集合体内结晶矿物悬浮的结构、集合体周周围限矿物表面大量锯齿状破裂、集合体内部脆性角砾岩及其离心逃逸构造的产出意味着囊状超细矿物集合体为爆破构造,充填脉与矿物集合体囊相连的放射状破裂的形成与流体的爆破、围岩的压裂有关。

多序次钾化蚀变岩中微破裂多为粒内破裂,其类型和分布与超细矿物集合体的分布有关。例如薄片 GPHL-2 中一钾长石颗粒内部两个不同微区破裂的组合形式与矿物周边超细矿物集合体条带的分布组合相关;I 区的微破裂呈相互平行的,相应的两个粒间矿物集合体条带平行对称地沿钾长石的长边分布,一些被超细矿物集合体充填的微破裂将这两个条带相连的特征,说明两个粒间孔隙流体共同作用形成了肋排状破裂,破裂形成于共轴挤压应力作用;II 区的破裂呈“X”形共轭状,相应的粒间矿物集合体不对称地沿钾长石的一短边分布,形成破裂的主压应力平行于破裂系的钝角平分线。值得指出的是,我们观察到絮状绢云母集合体从条带状矿物集合体向“V”形中注入和逃逸的现象,这意味着“V”形张破裂的形成是瞬间的、且与矿物集合体的结晶定位是同时的,破裂的形成也与条带状孔隙流体的膨胀与爆破有关。

4 讨论与结论

4.1 钾交代的泵压致裂

后沟地区这种微破裂在与钾化蚀变岩相邻的未蚀变岩石中缺失和仅发育钾化蚀变岩中的特征说明其不是由区域构造动力变形引起的。

如上所述,钾化蚀变岩中的微破裂的类型和分布与超细矿物集合体密切相关,为液压破裂,成因于孔隙流体的爆破。由于只有被圈闭的流体才能被圈闭和加压,所以产生这些破裂的流体应为被圈闭的残余流体。

早世代钾长石及其中的超细矿物集合体和微破裂被晚世代钾长石交代的特征表明残余流体和微破裂形成于钾交代过程,它们的成因也与钾交代有关。

超细矿物集合体中脆性石英角砾的产出显示流体爆破和岩石破裂时变形温度并不高。Norris 等(1976)提出流体热膨胀致裂机制不是研究区交代岩中残留流体加压和积聚能量的主要方式。

那么,钾交代流体是如何被圈闭和被加压并使围岩矿物致裂的呢?我们认为这与钾交代过程所伴生的岩石体积膨胀作用有关。

碱性花岗岩中的钠长石和歪长石被钾微斜长石替换、及黑云母分解形成钾长石与磁铁矿的过程是岩石体积膨胀的过程,膨胀率分别达 8.6%、7.8%和 2.2%。晶格体积膨胀的钾长石结晶过程将推挤围岩和交代流体,结果是部分流体通道被挤占、部分流体被圈闭形成残余流体。后续钾交代及其伴生的体积膨胀作用可使残余流体被挤压、加压和积聚应力,当积聚的应力大于围限岩石矿物的强度时,岩石将失稳、破裂,同时流体在瞬间减压过程爆破与结晶,并形成奇特的絮状悬浮结构。残余流体的液压是通过体积压缩而产生和积聚应力,其工作原理与气泵加压原理相似。

残余流体中可能积聚的差异应力可以根据原岩的矿物组成、钾化蚀变岩中残余流体的含量和交代过程岩石中石英在被溶蚀和带离的量等参量来估算。估算结果表明,对于后沟地区的碱性花岗岩而言,当岩石中钠长石、歪长石完全被微斜长石替换、黑云母完全分解及石英完全被溶解进入流体被带离时,岩石体积的膨胀率为 $-0.3\%\sim 7.6\%$,其中膨胀率大于 0.1%的概率大于 99%。对于以水为主的残余流体(含量约为 2.5%~5%),只要有 0.1%的岩石体积膨胀率作用于其上,就可产生 40 MPa 的应力。该值相当于研究区蚀变岩和花岗岩抗张强度的 10 倍,是花岗质岩石抗张强度的 4 倍(Etheridge et al., 1984a, 1984b; Atkinson, 1984),足以使岩石破裂、形成爆破结构。

因此,后沟地区钾化蚀变岩中微破裂为交代成因的破裂构造,成因于交代作用引发的体积膨胀作用和残余流体的加压与液压致裂作用,钾交代残余流体的圈闭、泵压和使岩石矿物的致裂过程是一种自组织的过程。

4.2 钾交代的脉动扩展与自组织繁殖

后沟地区的钾交代和金矿成矿作用具明显的脉动特征,脉动间隔约为 4 Ma (徐兴旺等, 2001)。不同世代交代成因钾长石成分变化特征显示不同世代钾交代过程岩石中的钾带入与钠带出的量是变化的,初(第一)世代钾交代作用元素的替换达 90%左右,随后世代的替换是逐步的。每一世代交代作用产生新一世代的钾长石和具特定型式的微破裂构造系。例如,在薄片 GH03 中,第一世代的钾长石(McI)及其中发育的树枝状破裂(DF1)被第二世代的钾长石交代;然后,所有的原岩矿物钠长石、粒间超细矿物集合体、第一世代和第二世代的微破裂与钾长石一起被最新世代(第三世代?)的钾长石所交代,第三世代钾长石内部伴生有一些粒内超细矿物集合体和矿物劈理。

综合研究区不同类型钾化蚀变岩及其中微破裂构造的分布和发育特征,可将钾交代作用及相关破裂和成矿作用建立如下模型。

小张家口-水泉沟逆冲断层是富钾流体往上迁移的主干通道。当富钾流体从主干通道进入相邻的次级断层进而渗入细粒碱性花岗岩中的先存裂隙和孔隙时,钾交代作用从这些孔隙和裂隙的壁开始往里扩展。在钾交代的初始阶段(stage I),流体的溶蚀作用将导致孔隙和微裂隙的扩大和相互联通。随着钾交代的持续,矿物替换将起主要的作用,更多交代成因钾长石结晶,额外空间的需求量也就更大,结果是流体将被推离钾长石、挤出孔隙和裂隙。此过程与孔隙水在结冰过程被挤出的性质是一样的(e.g. Taber, 1930; Arvidson and Morgenstern, 1977; Chen et al., 1980; Mackay, 1977)。这时对于临近和远离裂隙流体通道两个不同的构造与钾交代位置会出现两种不同的情况。在临近裂隙流体通道的微区(相当于单世代强钾化蚀变区),钾交代作用强烈,一些正在结晶生长的钾长石的外边界相互靠近和相接,形成一些粒间孔隙,孔隙中流体作为残余和滞留流体被圈闭。而在远离裂隙流体通道的微区(相当于单世代弱钾化蚀变区),新形成的钾长石呈悬浮状零星的分布于细粒碱性花岗岩中,钾长石周边的交代流体被挤出和推离钾长石。在此阶段(stage II),钾交代系统由开放系统转为封闭。与此同时,有部分钾长石的结晶作用仍在进行(滞后结晶作用),并在残余流体支持下出现新的交代和结晶作用。新的体积增长及钾长石对被圈闭的残余流体的挤压或对围岩的挤压作用,将导致强钾化蚀变岩中粒间被圈闭流体中出现应力积聚、导致弱钾化蚀变岩钾长石周边的细粒碱性花岗岩被挤压并积聚弹性应变能和围压。这种泵压作用的机理与 Sibson 等(1975)所描述的地震泵(seismic pumping)不同,其与钾交代成因的体积膨胀作用有关。

当流体和围岩中的泵压大于交代成因钾长石的抗张强度时,流体将发生爆破、形成液压微破裂构造(Hubbert and Willis, 1957; Hubbert and Rubey, 1959; Norris and Henley, 1976; Etheridge et al., 1984, 1984; Atkinson, 1984)。同时被圈闭的流体迅速扩容、降压,部分流体注入与其相连的破裂、形成逃逸和角砾构造。

至此,第一世代的钾交代作用结束,弱钾化蚀变岩和强钾化蚀变岩形成;同时大量的富钾流体进入这些新的破裂,流入第一世代钾化蚀变岩和未蚀变的花岗岩中并开始新一世代的钾交代作用。叠加于未蚀变花岗岩上的钾交代作用形成新的弱钾化蚀变岩和强钾化蚀变岩;叠加于第一世代弱钾化蚀变岩和强钾化蚀变岩的钾交代作用形成多序次钾化蚀变岩。多序次钾化蚀变岩中矿物交代、泵压和破裂的形成与单世代强钾化蚀变岩中情况是一样的,只是孔隙流体相对少一些。当第二世代钾交代作用结束时,更多的钾长石和破裂形成,不同类型的钾化蚀变岩在空上分带产出。

如果钾交代流体能持续不断供给,矿物的交代、流体的圈闭、流体的泵压和钾长石的破裂所构成的系列过程将自组织的发展与延续下去。钾交代的自动繁殖作用的结果是大规模钾化蚀变岩的形成。

4.3 强度弱化与厚壁筒结构

钾交代和矿物替换不仅引起岩石化学成分的变化,也导致岩石强度的变化。研究区不同类型钾化蚀变岩的岩石力学实验结果表明:岩石的抗张强度、抗压强度和弹性模量随着蚀变岩中钾长石含量的增加而降低。多序次钾化蚀变岩的抗压强度只有未蚀变花岗岩(原岩)的一半。面积较大、强度较高的花岗岩分布于钾化蚀变岩的外侧,构成厚壁筒结构,结果是破裂作用被限定于钾化蚀变中。这可能是钾交代之后发生的金矿化作用仍选择性地于钾交代作用较强的钾交代岩内进行的主要原因。

4.4 结论

由此可见,流体与岩石之间的化学作用也可以间接的产生破裂构造,这是一种新的构造动力。

致谢 研究过程曾得到姜能、谢奕汉、王宝学等同志的帮助,并得到裴荣富、潘元明、叶大年、张绍宗、易善峰等同志有益建议和讨论,在此向他们致以衷心地感谢。