

# 黑龙江金厂金矿钾长石的结构状态与温度及其成矿意义

李山坡<sup>1,2</sup>, 许虹<sup>2</sup>, 高迪<sup>3</sup>, 陈俊魁<sup>1,2</sup>

1. 河南省地质调查院, 郑州 450007; 2. 中国地质大学(北京), 北京 100083;  
3. 河南理工大学, 河南 焦作 454000

**摘要:**钾长石有序度及结构温度可以为探明矿床形成的物化条件、成矿历史等问题提供重要的依据。为阐明本区钾长石及其与矿化的关系, 本文分别采用红外光谱和 X 射线粉晶衍射两种方法对金厂金矿 18<sup>#</sup> 矿体的钾长石进行了有序度等相关参数的测定, X 粉晶衍射测得有序度及三斜度为: 0.42~0.64, 0.00~0.125; 红外光谱测得有序度: 0.60~1.40; 结构参数为 0.143~0.991; 最终结构温度为 370~450℃。结果发现, X 射线单斜有序度 Sm 与红外光谱有序度  $\theta$  反映出的钾长石有序度的变化规律是一致的, 且有序度随着蚀变程度增强而增大; 本区钾长石为热液蚀变的产物, 其形成过程与金矿的沉淀富集有密切关系, 可作为矿床的有利找矿标志。

**关键词:**金厂金矿; 钾长石; 有序度; 结构温度

**中图分类号:** P611 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2802(2012)01-0031-07

## Structure and Forming Temperature of K-feldspar and their Metallogenic Significance in the Jinchang Gold Deposit, Heilongjiang

LI Shan-po<sup>1,2</sup>, XU Hong<sup>2</sup>, GAO Di<sup>3</sup>, CHEN Jun-kui<sup>1,2</sup>

1. Henan Institute of Geological Survey, Zhengzhou 450007, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China;  
3. Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China

**Abstract:** The study of order degree and structure temperature of K-feldspar can provide important information about the forming physicochemical conditions of deposit and mineralization history. In order to study the relationship between K-feldspar and mineralization in this area, infrared spectroscopy and X powder diffraction were used to test the order degree and other related parameters of K-feldspar in the altered rock-type gold deposit of No. 18 orebody in the Jinchang deposit. The results were list as follows; the order degree and the triclinity measured by X-ray powder diffraction are 0.42—0.64 and 0.00—0.125, respectively; the order degree tested by infrared spectrum is 0.60—1.40; the structural parameter is 0.143—0.991; the structure temperature of K-feldspar is in the range of 370—450℃. By means of comrarative analyses, we found that the change regularity of K-feldspar order degree are accordance with the X-ray powder diffraction (sm) and infrared spectroscopy ( $\theta$ ), and the order degree increases with the alteration degree strengthen. It was further confirmed that the K-feldspar is a product of hydrothermal alteration, its formation process is closely related to precipitation and concentration of the gold deposit, and that the K-feldspar could be used as a favorable prospecting indicator.

**Key words:** Jinchang gold deposit; K-feldspar; order degree; structural parameter

收稿日期: 2010-12-24 收到, 2011-03-11 改回

基金项目: 国土资源部公益性行业科技专项(200811011)

第一作者简介: 李山坡(1982—), 男, 助理工程师, 硕士, 研究方向: 矿物学、岩石学、矿床学. E-mail: lsp533@163.com.

长石是各类岩石重要组成矿物之一,尤其是钾长石,历来受到矿物学家和矿床学家的密切关注。钾长石的结构态问题更是长石研究中极其引人注目并具挑战性的课题<sup>[1]</sup>。利用钾长石的有序度及结构温度可以恢复地质体形成时的热状态和热历史以及后期热事件的干扰,这对确定地质体的成因、划分变质相带以及成矿预测等都具有重要的意义<sup>[2]</sup>,同时也是判断钾长石成因的重要依据。

目前,测定钾长石结构态的方法主要有红外光谱法和 X 射线粉晶衍射法,前人对两种方法有过系统的研究,但对两种方法测定的钾长石结构参数与岩石的蚀变关系及如何进行成矿预测没有做过系统的研究。本文运用红外光谱和 X 射线粉晶衍射法,对金厂金矿钾长石的 Al-Si 有序度、Al 在不同四面体位置上的占位率以及钾长石保持最终结构状态的平衡温度(也简称平衡温度)作了系统的研究,探讨了平衡温度与钾长石成因之间的联系及有序度和金矿化二者之间的密切关系。

## 1 金厂金矿床地质简介

金厂金矿床为超大型金矿床,位于黑龙江省东宁县,迄今为止,所提交的资源量已达 80 t,许多学者曾对该矿床的地质特征、成矿流体和矿床类型等方面进行了研究<sup>[3~5]</sup>。金厂金矿处于华北地台北侧兴凯地块、佳木斯南部,位于北方造山带东部的松嫩地块之内。次级构造单元位于老黑山断陷与张广才岭-太平岭边缘隆起带之太平岭隆起的结合部位。矿区内地层出露很少,大面积出露印支期-燕山期中-酸性侵入岩。矿区及外围出露的地层为中-上侏罗统屯田营组( $J_{2-3}t$ )火山岩系,据区域地质发展史可知,在三叠世之前,该区处于北方造山带俯冲-碰撞的发展阶段,三叠世之后,受太平洋板块运动的影响,开始并入滨太平洋大陆边缘活动带,NE-NNE 向的褶皱和断裂构造较为发育,太平岭复背斜和绥阳深大断裂是本区规模较大构造,控制着本区的岩浆活动。

金厂矿区构造-岩浆活动较为发育,受太平岭复背斜轴部和绥阳深大断裂的影响,矿区构造较为复杂,NE、NNE、NW、SN、及 EW 向断裂构成的“米”字型格局,并在其中发育爆破-隐爆角砾岩筒。根据前人研究,本区的岩浆活动分为五期<sup>[3]</sup>。(1)印支期( $\delta_5^{1-1}$ ):分布于金厂乡及邢家沟-八号洞-半截沟一带,主要为英云闪长岩、似斑状石英闪长岩,矿物成分主要为:斜长石、石英、黑云母、角闪石,含少量辉石。次要矿物为:磁铁矿、磷灰石、锆石;斑岩斑

晶主要为斜长石,呈自形板状,生长环带发育;其次为黑云母、角闪石,呈它形。(2)印支晚期-燕山早期( $\gamma O_5^{2-2}$ ):主要在八号洞-金厂南山-松树砬子-小东沟一带出露,岩性主要为花岗闪长岩、粗粒文象花岗岩、斜长花岗岩、黑云母花岗岩、钾长花岗岩。该岩体存在相变关系,中心相为粗粒文象花岗岩,边缘相为中粒黑云母花岗岩,中心相和边缘相之间存在着一定的过度关系,过渡相岩性主要为花岗闪长岩、斜长花岗岩、钾长花岗岩等,岩性变化较大。文象花岗岩在矿区出露面积最大,主要矿物为斜长石、钾长石、石英、黑云母等。其中斜长石普遍发育出熔蠕虫状石英。(3)燕山期早期( $\gamma_5^{2-3}$ ):分布于金厂矿区南部东沟-八号洞一带,在金厂南山-黑瞎子沟一带也有零星分布,主要为中粗粒黑云母花岗岩和细粒斑状花岗岩,在二者之间存在一定的相变,中心相为中粗粒黑云母花岗岩,边缘相为细粒斑状花岗岩。粗粒黑云母花岗岩锆石 U-Pb 年龄为 190~200 Ma<sup>[6]</sup>。(4)燕山中期( $\gamma \pi_5^{3-1}$ ):主要岩性为正长花岗岩、花岗斑岩、花岗闪长岩、石英闪长(玢)岩、细粒含角闪正长花岗岩,与金厂金矿成矿有密切关系的为石英闪长玢岩、花岗斑岩,呈小岩株或岩枝分布于八号洞-高丽沟的南部地区及狍子沟一带。在 18<sup>#</sup>矿体中可见到花岗斑岩侵入石英闪长岩之中,在钻孔中可见大量微粒镁铁质基性包体,反映花岗斑岩与此期的石英闪长岩存在混合作用。(5)燕山晚期( $\delta \mu_5^{3-2}$ ):本次岩浆活动形成火山岩和次火山岩。火山岩在矿区出露较少,主要分布于金厂南山、石门、狍子沟及邢家沟一带,其岩性主要为安山玢岩及凝灰岩、安山玄武岩、安山岩。

金厂矿区主要有三种矿化类型:隐爆角砾岩型、环状放射状裂隙充填型、岩浆穹隆型。其中以隐爆角砾岩为主,占 41%;其次为环状裂隙充填型,占 39%;穹隆型占 20%。隐爆角砾岩型矿体 6 个,规模较大的裂隙充填型矿体 26 条左右,岩浆穹隆型主要是 18<sup>#</sup>矿体,矿体的分布在空间上具有明显的规律。

## 2 钾长石的产状

本次以金厂矿区的 18<sup>#</sup>矿体为研究对象,钾长石化是一种高温面型交代蚀变作用的产物,在 18<sup>#</sup>矿体赋矿围岩花岗岩及花岗闪长岩中非常发育,强钾长石化的花岗岩、花岗闪长岩为鲜红-肉红色,多沿着断裂及裂隙呈带状分布。显微镜下,可见钾长石晶体内常残留有未被完全交代的不规则斜长石;有些钾长石晶体中包含有斜长石及黑云母晶体。通过观察,本区钾长石主要有两种,一种为岩浆期(正

常)的钾长石(图 1);另一种为热液期钾长石(图 2);前者常呈云雾边交代斜长石;后者钾长石常呈镶边状对称分布于含矿石英脉的两侧,有时则呈细脉浸染状分布,或具有次生加大边,如钾长石脉、石英钾长石脉、钾长石-黑云母脉等,也有呈团块状交代基质。热液期的钾长石为肉红色鲜红-肉红色,鲜红色部位硬度大于 5.5。笔者所采样品均为热液期的钾长石,根据钾长石从弱蚀变到强蚀变的特征,系统地采取了蚀变岩石(图 3、表 1)。

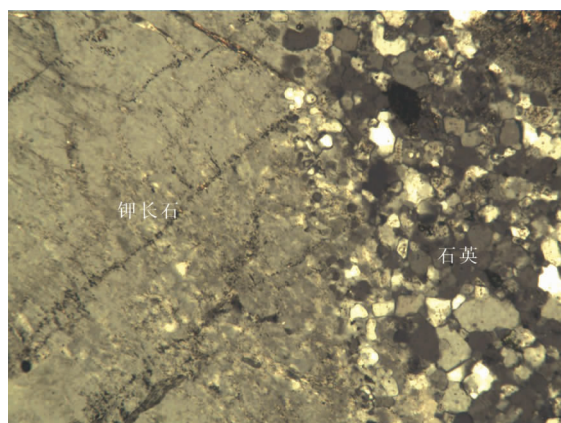


图 1 岩浆期的钾长石

Fig. 1 K-feldspar in the magmatic phase

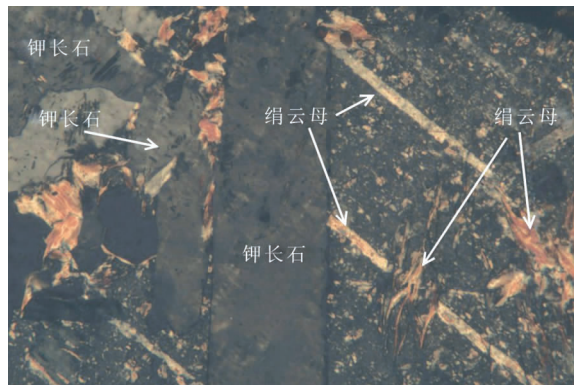


图 2 热液期的钾长石

Fig. 2 K-Feldspar in the hydrothermal phase

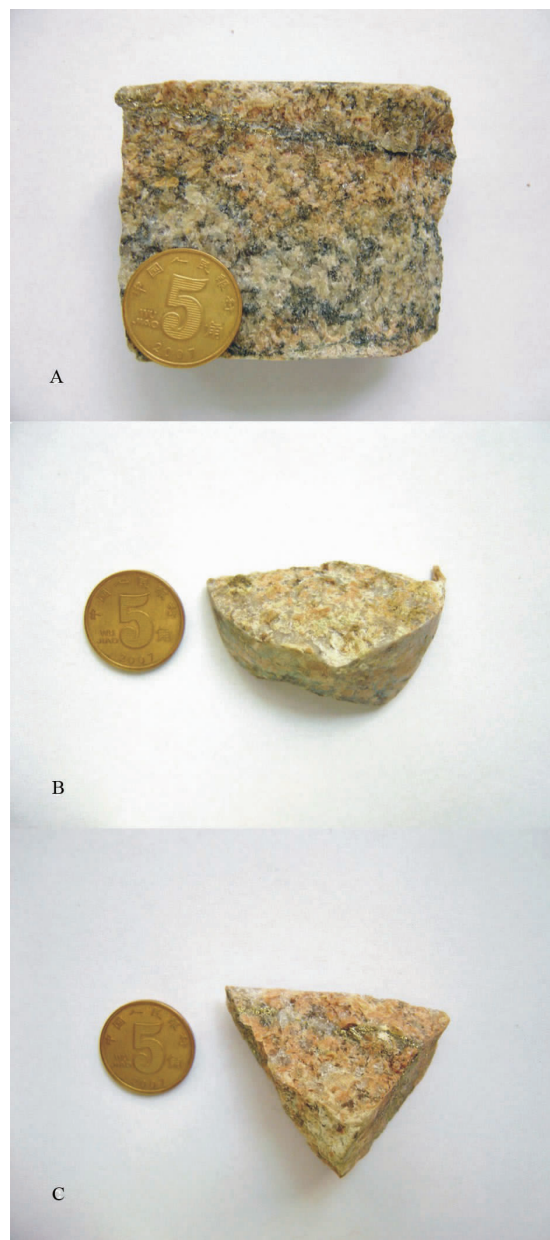


图 3 蚀变花岗岩中的钾化

Fig. 3 The potassic in the altered granite

表 1 岩石蚀变强度一览表

Table 1 Schedule of the rock alteration strength

样号	取样位置	岩石类型	蚀变程度	矿物名称
QY4-34 a	ZK1131 442 m	蚀变花岗岩(图 3A)	岩石蚀变强度依次增强 ↓	微斜长石
QY4-4	ZK1131 66.8 m	蚀变花岗岩		微斜长石
QY6-31	ZK0015 371 m	蚀变花岗岩(图 3B)		微斜长石
QY6-49	ZK0015 589 m	蚀变花岗岩		微斜长石
QY4-25	ZK1131 385.5 m	蚀变花岗岩		微斜长石
QY6-16	ZK0015 182 m	蚀变花岗岩(图 3C)		微斜长石

### 3 钾长石有序度测定

钾长石的有序度是指  $\text{Si}^{4+}$ 、 $\text{Al}^{3+}$  的占位率,分为完全有序和无序两种状态。

样品先在双目镜下手选,再经碎样-磁选(除铁)-浮选(剔除斜长石、石英等)流程处理。红外光谱分析采用 PE983G 型傅里叶变换红外分光光度计,仪器工作条件为:室温  $22^{\circ}\text{C}$ 、湿度 52 RH、电压  $220\sim 240\text{ V}$ 、频率  $50\sim 60\text{ HZ}$ 、扫描范围  $4000\sim 180\text{ c/m}$ 、分辨率 4;X 射线粉晶衍射采集是在 Bruker D8 Advance Diffractometer 型衍射仪上实现的,其测试条件为:  $\text{CuK}\alpha$  辐射,管压 40 kV,管流 40 mA;狭缝:  $D_s = S_{s1} = 1\text{ mm}$ ,  $R_s = 0.10\text{ mm}$ ;采样间隔  $0.02^{\circ}$ ,扫描范围速度:  $3^{\circ}/\text{min}$ ,扫面方式:连续扫面。

红外吸收光谱是测定钾长石有序度最灵敏的方法<sup>[7]</sup>,它可以区别钾长石有序度方面的任何变化而不受其对称性的影响<sup>[8]</sup>。其计算公式为  $\theta = 0.05(\Delta\nu - 90)$ ,  $\theta$  为钾长石的有序度,  $\Delta\nu$  为在  $500\sim 550$  和  $600\sim 650\text{ c/m}$  范围内两个最大吸收谱带的波数值之差,可直接在红外光谱上读出。根据上述公式计算的钾长石有序度见表 2,由表 2 可见,  $\theta = 0.20\sim 1.40$ 。表中个别样品的  $\theta > 1$ ,这可能与  $\theta = 0.05(\Delta\nu - 90)$  有关,该公式是在以透长石和最大微斜长石为无序和有序两个极端点,即  $\theta$  从  $0\sim 1$  的前提下推导出来的<sup>[9]</sup>,从钾长石红外光谱图中可以看出,钾长石中含有一定数量的钠长石成分,钠长石的含量对钾长石红外有序度有一定的影响,而且对不同的钾长石影响也不一样。一般情况下,  $\theta$  值随斜长石含量的增高而增大,微斜长石的  $\theta$  值最大可达 1.20,而微斜长石-条纹长石的  $\theta$  值则大于 1.20<sup>[2]</sup>。

利用 X 射线粉末衍射法测定钾长石有序度的方法较多,晶体内部的  $2\theta_{204}$ 、 $2\theta_{060}$  决定于碱性长石

表 2 钾长石红外有序度

Table 2 the degree of order of K-feldspar measured by infrared spectroscope

样号	$\nu_1/\text{c}\cdot\text{m}^{-1}$	$\nu_2/\text{c}\cdot\text{m}^{-1}$	$\theta$
QY4-34a	642.0	540.0	0.6
QY4-4	643.0	533.0	1.0
QY6-31	643.0	535.0	0.9
QY6-49	644.0	535.0	1.0
QY4-25	644.0	533.0	1.1
QY6-16	646.0	529.0	1.4

分析者:北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室

的单斜有序度  $S_m$ <sup>[7]</sup>,对本区上述样品进行 X 射线粉晶衍射,根据 Wright<sup>[11]</sup>提出的“三峰法”在衍射图上读出  $2\theta_{201}$ 、 $2\theta_{204}$ 、 $2\theta_{060}$ 、 $d_{131}$ 、 $d_{1\bar{3}1}$  等数据,根据有关的公式计算钾长石的有序度及有关参数<sup>[10,11]</sup>(表 3)。

利用 X 射线粉末法表征钾长石有序度的参数较多,这些参数之间大都可以相互换算,本文只讨论利用 X 射线单斜有序度  $S_m$ ,与红外光谱计算的有序度  $\theta$  之间的对应关系。从表 2、表 3 可以看出,同一样品的红外光谱有序度  $\theta$  明显高出其 X 射线单斜有序度  $S_m$ 。在统计学意义上,用 X 粉晶衍射射线与红外光谱分别测定钾长石有序度的变化规律基本一致,两者呈线性关系(图 4)。

钾长石的有序度等参数和岩石的蚀变强度存在着一定关系,从图 5 钾长石的有序度、三斜度、构造参数来看,随着岩石蚀变强度的变化均呈正相关性变化,其原因可能为 Al、Si 在  $T_1$  上的占位率有所变化。

### 4 结构温度

正路彻也<sup>[12]</sup>提出,用构造参数( $\eta$ )可以度量钾长石有序-无序,并认为钾长石的构造参数与他们的构造无关而与钾长石的成分有关。其数学表达式为:

表 3 钾长石 X 射线粉晶衍射及有关参数

Table 3 the X-ray diffraction results and related parameters of K-feldspa

样号	$2\theta_{060}$	$2\theta_{204}$	$S_m$	$d_{131}$	$d_{1\bar{3}1}$	三斜度	结构参数	Al 的占位率	
						$\Delta p$	$\eta$	$T_1(o) + T_1(m)$	$T_2(o) + T_2(m)$
QY4-34a	41.66	50.716	0.42	2.991	2.991	0	0.143 76	0.528 292	0.471 708
QY4-4	41.684	50.714	0.47	2.998	2.998	0	0.318 96	0.546 478	0.453 522
QY6-31	41.643	50.666	0.49	2.993	2.986	0.087 5	0.402 2	0.557 212	0.442 788
QY6-49	41.695	50.689	0.54	2.990	2.984	0.075	0.578 44	0.574 393	0.425 607
QY4-25	41.668	50.663	0.54	2.992	2.986	0.075	0.591 52	0.576 901	0.423 099
QY6-16	41.641	50.585	0.64	2.994	2.984	0.125	0.991 48	0.621 685	0.378 315

分析者:中国地质科学院资源研究所国土资源部成矿作用与资源评价重点实验室

注:有序度:  $(S_m) = \frac{14.267 + (2\theta_{060} - 1.098 \times 2\theta_{204})}{0.57}$ ; 三斜度:  $(\Delta p) = 12.5 \times [d_{(131)} - d_{(1\bar{3}1)}]$ ;

结构参数:  $(\eta) = 6.68 \times 2\theta_{060} - 7.44 \times 2\theta_{204} + 99.182$ ; 钾长石数:  $(or) = 2031.77 - 92.19 \times 2\theta_{201}$

Al 占位率:  $T_1(o) + T_1(m) = 13.015 + 0.69 \times 2\theta_{060} - 0.813 \times 2\theta_{204}$

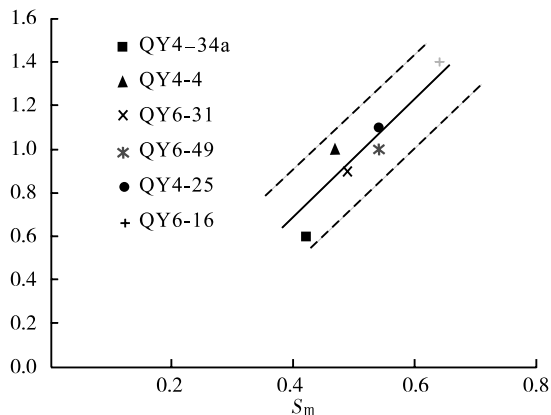


图4 钾长石红外有序度  $\theta$  对 X 射线有序度  $S_m$  图解  
Fig. 4 K-feldspar degree of order  $\theta$  in infrared spectroscopy and degree of order  $S_m$  in X-ray diagram

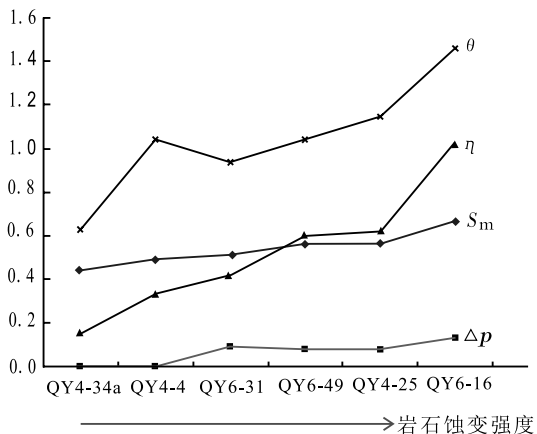


图5 钾长石 X 射线粉晶衍射及有关参数  
Fig. 5 The X-ray diffraction results and related parameters of K-feldspar

$$\eta = 6.68 \times 2\theta_{060} - 7.44 \times 2\theta_{204} + 99.182。$$

不同性质的钾长石,其构造参数也有差别,最大微斜长石-低铝钠长石的  $\eta=2.5\sim 2.6$ ,高温透长石-高温钠长石系列的  $\eta = -1.3\sim 1.6$ ,正长石的  $\eta = 0.1\sim 0.2$ ,其他过渡的钾长石的  $\eta$  介于三者之间<sup>[12]</sup>。金厂金矿 6 件含矿花岗岩中的钾长石的构造参数位于 0.14376~0.99148 之间。钾长石的有序度,即 Si/Al 在单位晶胞中的四组四面体中的分配位置,当无序时,Al 和 Si 的占位率为 1/4 和 1/4;当钾长石完全有序时,Al 的占位率占  $t_1(0) = 1$ ,Si 占据其余的位置。钾长石的有序和无序决定了其构造参数的取值范围,而生成温度、热流体的作用强度、碱质的有效浓度、形成深度和冷却速度等因素最终决定了钾长石的构造参数<sup>[13]</sup>。将金厂金矿 6 件样品投点到构造参数与他们的生成温度的关系图上,可以得到钾长石的生成温度为 370~450℃(图 6)。这个温度不能代表钾长石结晶的温度,只是钾

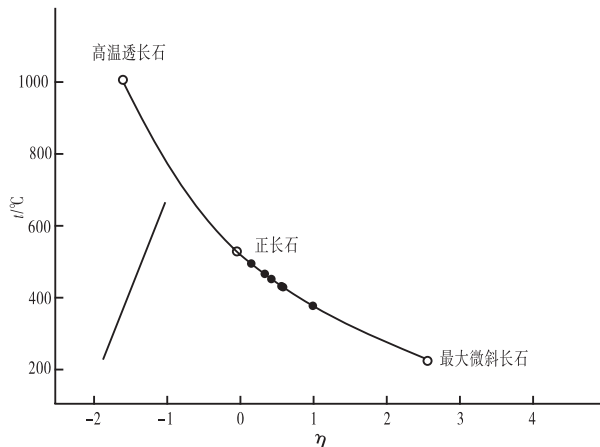


图6 碱性长石结构参数与保留结构状态的温度之关系<sup>[12]</sup>  
Fig. 6 the relationship between structural parameters of alkali feldspar and the retention temperature of structural state<sup>[12]</sup>

长石保留这个结构状态时的温度。

## 5 讨论与结论

(1)钾长石主要有三个同质多像变体:①高温条件下形成的透长石(单斜晶系),其形成温度主要为 800~1100℃<sup>[14,15]</sup>;②低温条件下形成的正长石,可以在 750℃以下的任何温度结晶<sup>[15~18]</sup>;③微斜长石形成温度小于 500℃<sup>[19]</sup>。因此,三斜微斜长石与单斜正长石之间是否可以转变是决定结构温度的重要因素。若这种转变是可逆的,由结构状态测定的温度应为钾长石形成的最低温度,因钾长石结晶时的结构温度可能更高,目前测得的结构温度也可能是由高温结构随温度的下降转变而来,因此钾长石形成时的温度可能更高<sup>[10]</sup>,但若三斜微斜长石与单斜正长石之间的转变是不可逆的,即加热可使微斜长石转为正长石,反之,冷却不能使正长石转为微斜长石,那么在这种情况下,所测得微斜长石的结构温度应为钾长石形成时的最高温度,钾长石形成后若受到更高温的地质环境影响,会使原低温结构转变为更高温的结构而被保存下来,因此,微斜长石所测得的结构温度应为钾长石形成时的最高温度<sup>[20]</sup>。陈文明<sup>[20]</sup>等从热力学原理、人工合成钾长石等方面进行了研究,提出三斜微斜长石与单斜正长石之间的转变是不可逆的,因此本区测定的结构温度应为钾长石形成的最高温度。金厂钾长石的最终结构温度为 370~450℃,在水压为  $(2\sim 6) \times 10^8$  Pa 条件下,花岗岩的固相线温度为 620~670℃<sup>[21]</sup>,故该钾长石不是由岩浆成因的高温单斜钾长石冷却或经后期热流体改造转变而来,也不是在岩浆中正常结晶的钾

长石,而应该是热液作用的产物。

(2)一般情况下,未遭受热液流体作用的火山岩、次火山岩,其钾长石有序度较低,一旦有流体的蚀变作用,其有序度也将增高<sup>[13]</sup>。金厂矿区蚀变花岗岩中钾长石的有序度与岩石的蚀变强度成正比,蚀变越强,其有序度也就越大,而岩石蚀变程度和热液流体的活动性有密切的关系,热液流体活动性增强,其岩石蚀变强度也增强。热液蚀变作用是水岩反应的过程,也是金及其成矿元素活化—迁移—富集,由还原—氧化—还原转变的一次重要的金富集的旋回过程<sup>[22]</sup>。通过对金厂矿区各类蚀变花岗岩微量元素的定量分析可以看出(表4,图7),Ag、Au在钾化花岗岩中的含量低于未蚀变的花岗岩,而在黄铁绢英岩中的含量远高于未蚀变花岗岩和钾化花

岗岩。因此从未蚀变的花岗岩→钾化花岗岩→黄铁绢英岩,随着热液流体的增高,蚀变程度的增加,富含H<sub>2</sub>O、Cl、S、CO<sub>2</sub>、F等挥发组分及K、Na等碱金属热液流体萃取围岩中的Au、Ag等成矿物质,并使之迁移,金与Cl、S及HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>等组成配阴离子团进入流体迁移<sup>[9]</sup>,从而导致钾化花岗岩中金的含量偏低,随着岩石蚀变程度的增加,即在钾化花岗岩基础上进一步蚀变,出现黄铁绢英岩,这时由于氧逸度的下降,是金由氧化到还原的开始,其介质处于还原环境,因此金在黄铁绢英岩蚀变带迁入并沉淀析出,形成矿化。金厂矿区钾长石化以微斜长石化作用为主,系碱质交代的产物,随着钾长石有序度的增高,也就是金元素由分散还原态(Au)→氧化态(Au<sup>+</sup>、Au<sup>3+</sup>)→还原态(Au)多旋回反复作用的结果。

表4 未蚀变岩石与热液蚀变岩石微量元素含量

Table 4 The trace elements contents of unaltered and hydrothermal altered rocks

w<sub>B</sub>/10<sup>-6</sup>

序号	样号	岩性	Au	Ag	Cu	Zn	Pb
1	QY4-30	花岗岩	0.0021	0.281	3.35	47.6	13.2
2	QY7-14	花岗岩	0.0031	0.322	5.43	33.5	12.9
3	QY4-27	钾化花岗岩	0.0020	0.283	1.66	46.7	18.2
4	QY7-6	钾化花岗岩	0.0024	0.272	5.38	29.4	6.25
5	QY9-29	黄铁绢英岩	0.0228	0.516	4.06	28.9	88.9
6	QY4-32	黄铁绢英岩	0.0256	1.23	57.4	1622	1188

分析者:核工业北京地质研究院分析测试研究中心

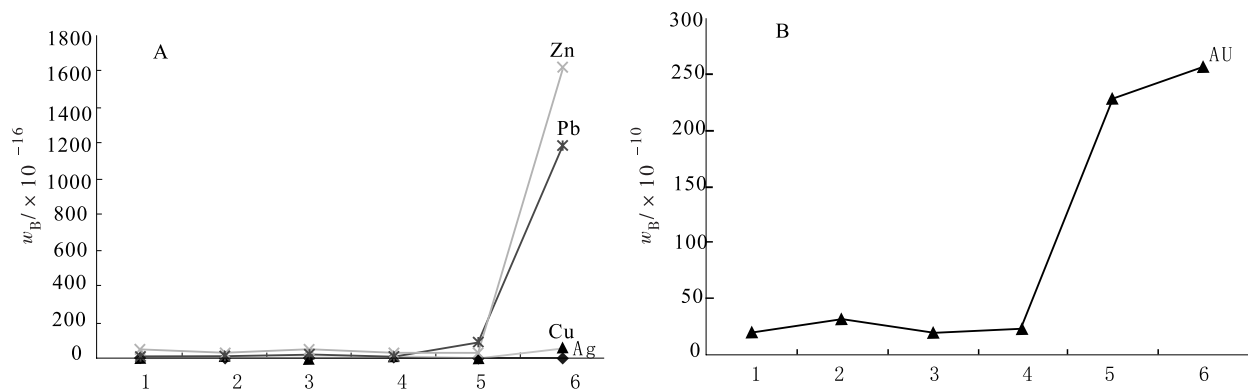


图7 未蚀变岩石与热液蚀变岩石微量元素含量变化图

Fig. 7 Chart showing the change of trace elements contents in unaltered and hydrothermal altered rocks

(3)温度是影响钾长石有序度的重要因素,温度升高可使钾长石有序度降低,反之,则钾长石有序度升高,金在高温时溶解迁移,在低温时沉淀富集,即金是在温度下降的过程中聚集的。金厂矿区成矿流体的温度一般为400~500℃,金厂矿区热液期的钾长石平衡温度与含金成矿流体之间有一个温度上的重叠区间,因此早期高温阶段的含金溶液受到钾长石调整结构所释放能量的影响而活化,有利于金的迁移。随着温度的下降和钾长石有序度的增高,金

逐渐富集和沉淀。对金厂金矿18<sup>#</sup>矿体-构造蚀变型金矿而言,在早期钾交代阶段,金从围岩中被活化,大量浸出,在温度下降时进入成矿热液并富集于构造带中,进而在有利的部位沉淀形成金矿。

(4)结合野外观察,本区的花岗岩类岩石钾化广泛发育,局部较为强烈,黄铁绢英岩带相对较为狭窄,大量的金被活化但未分散,构造较为发育,尤其是岩浆穹窿型矿体——18<sup>#</sup>矿体构造特别发育,故在有利部分能形成品位较高的矿体。结合其他一些

主要岩金矿床(小秦岭、夹皮沟、多宝山及胶东等地区)普遍存在钾化蚀变特征,更说明了钾化与金矿化的内在联系,因此钾化是金矿床十分重要的直观找矿标志。

综上所述,金厂矿区蚀变花岗岩中的钾长石是热液蚀变的产物。钾长石的有序度与岩石的蚀变强度存在密切的联系,而金的富集成矿过程则是钾长石有序度增高的过程,随着岩石蚀变程度的增加,金的含量也越来越高。如能对本区钾长石的有序度作大量测定,则可绘制整个矿区的钾长石等值线图,获得本矿区热液作用范围和作用强度,从而可以在本矿区及外围进行成矿预测。

**致 谢:**衷心感谢中国地质大学(北京)李胜荣教授、孙岱生教授、于洪军硕士和祥光矿业股份有限公司戴倩倩工程师指导,感谢核工业北京地质研究院分析测试研究中心测试、中国地质科学院矿产资源研究所韩景仪老师、北京大学赵印香老师在测试方面的鼎力相助;感谢黑龙江省牡丹江市武警黄金部队在野外工作中的大力支持和帮助;感谢审稿人提出的宝贵意见。

#### 参考文献 (References):

- [1] 薛纪越,蔡元峰,赵晓宁,周玲棣,郭九皋,李丽云. 碱性长石 Al-Si 有序化进程中微结构和 $\sim(29)\text{Si}$  NMR 谱的表现[J]. 矿物学报, 1998, 18(3): 261—267.  
Xue Jiyue, Cai Yuanfeng, Zhao Xiaoning, Zhou Lingdi, Guo Jiugao, Li Liyun. Microstructures and  $\sim(29)\text{Si}$  NMR spectra of alkaline feldspars in Al-Si ordering[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1998, 18(3): 261—267. (in Chinese with English abstract)
- [2] 贾建业,谢先德,吴大清,王建成,王燕. 驾鹿金矿钾长石的结构态与平衡温度及其成矿意义[J]. 岩石矿物学杂志, 2000, 19(2): 168—172.  
Jia Jianye, Xie Xiande, Wu Daqing, Wang Jiancheng, Wang Yan. Structural state and equilibrium temperature of K-feldspar from the Jialu gold deposit in Xiaoqinling[J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2000, 19(2): 168—172. (in Chinese with English abstract)
- [3] 贾国志,陈锦荣,杨兆光,边红业,王艳忠,梁海军,金同和,李振辉. 金厂特大型金矿床的地质特征与成因研究[J]. 地质学报, 2005, 79(5): 661—670.  
Jia Guozhi, Chen Jinrong, Yang Zhaoguang, Bian Hongye, Wang Yanzhong, Liang Haijun, Jin Tonghe, Li Zhenhui. Geology and genesis of the superlarge Jinchang gold deposit[J]. Acta Geologica Sinica, 2005, 79(5): 661—670. (in Chinese with English abstract)
- [4] 朱成伟,陈锦荣,李体刚,崔彬,金宝义,王克强. 黑龙江金厂金矿床地质特征及成因讨论[J]. 矿床地质, 2003, 22(1): 57—64.  
Zhu Chengwei, Chen Jinrong, Li Tigang, Cui Bin, Jin Baoyi, Wang Keqiang. Geology and ore genesis of Jinchang gold deposit, Heilongjiang Province[J]. Mineral Deposits, 2003, 22(1): 57—64. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李真真,李胜荣,张华锋. 黑龙江东宁县金厂金矿围岩蚀变和成矿年代学特征[J]. 矿床地质, 2009, 28(1): 83—92.  
Li Zhenzhen, Li Shengrong, Zhang Huafeng. Wall rock alteration and metallogenic chronology of Jinchang gold deposit in Dongning county, Heilongjiang Province[J]. Mineral Deposits, 2009, 28(1): 83—92. (in Chinese with English abstract)
- [6] 张华锋. 黑龙江省东宁县金厂金矿的围岩蚀变特征与成矿时代、类型研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2007.  
Zhang Huafeng. Wall-rock alteration, mineralization time and deposit type of the Jinchang gold deposit from Dongning, Heilongjiang Province[D]. Beijing: China University of Geosciences(Beijing), 2007. (in Chinese with English abstract)
- [7] 马鸿文. 钾长石 X 射线与红外有序度的对比及与 Al 占位和平衡温度的关系[J]. 矿物学报, 1988, 8(2): 143—150.  
Ma Hongwen. Comparison of K-feldspar ordering by X-ray powder diffraction and infrared spectroscopy and its relations to Al occupancy and equilibrium temperature[J]. Acta Mineralogica Sinica, 1988, 8(2): 143—150. (in Chinese)
- [8] 洪大卫. 钾长石的有序-无序及其地质意义[J]. 国外地质参考资料, 1978, 16: 90—109.  
Hong Dawei. The order-disorder of K-feldspar and its geological significance[J]. Foreign Geological Reference, 1978, 16: 90—109. (in Chinese)
- [9] 边秋娟,张汉凯. 乌拉山金矿钾长石的标型性及其与金矿化关系[J]. 黄金地质, 1997, 3(3): 8—15.  
Bian Qiujuan, Zhang Hankai. Studies on typomorphism of K-feldspar from Wulashan gold deposit and its relationship with gold mineralization[J]. Gold Geology, 1997, 3(3): 8—15. (in Chinese with English abstract)
- [10] 叶大年,金成伟. X 射线粉末法及其在岩石学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1984: 1—370.  
Ye Danian, Jin Chengwei. The method of X powder diffraction and its application in lithology[M]. Beijing: Science Press, 1984: 1—370. (in Chinese)
- [11] Wright T L. X-ray and optical study of alkali feldspar II: An X-ray method of determining the composition and structural state from measurement of 2 values for three reflections[J]. American Mineralogist, 1968, 53: 88—104.
- [12] 正路彻也(日). 根据 X 射线粉末法确定碱性长石的成分和构造(Al/Si)有序-无序[J]. 矿物学杂志, 1972, 10(5): 413—425.  
Zheng Lucheye(Japan). The composition and (Al/Si) structure-order and disorder of Alkali feldspar can be determined by X-rays powder method[J]. Mineralogy Journal, 1972, 10(5): 413—425. (in Chinese with English abstract)