

流体包裹体爆裂法 在山东焦家金矿深部找矿中的潜在应用

程 伟 沈 昆 于学峰 王 强 于雷亨 瞿友兰

(山东省地质科学实验研究院, 山东 济南 250013)

摘要:流体包裹体爆裂法作为一种辅助找矿手段,于 20 世纪 70—80 年代曾被前苏联和中国的地质工作者用于找矿勘探实践中,并取得了一定成效。以往许多爆裂法研究表明,矿体所在部位的爆裂强度(频次)较高,而随着远离矿体进入围岩,爆裂频次逐渐降低。一般认为这是由于围绕矿体热液活动强烈和流体包裹体丰度较高所致,因而在矿床(体)及其周围形成蒸发晕正异常。通过对胶西北地区焦家蚀变岩型金矿 112 线和 144 线 8 个钻孔的系统采样和爆裂法测试分析发现,焦家金矿床的花岗岩围岩爆裂曲线具有高的爆裂频次、明显的爆裂峰和高的相变峰,随着围岩蚀变增强,爆裂频次、爆裂峰和相变峰从钾化带经过黄铁绢英岩化带、硅化带到金矿石呈有规律降低,在矿体(化)中心,爆裂频次很低,不显示爆裂峰和相变峰,从而围绕矿体构成蒸发晕负异常。这些爆裂特征,特别是围绕矿体的蒸发晕负异常,对于胶北地区深部金矿找矿勘探具有潜在的应用价值。

关键词:焦家金矿;流体包裹体;爆裂法;蒸发晕;负异常

中图分类号:P618.51 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2012)01-0205-13

1 引言

大多数金矿的形成都与热液活动有关,矿床中流体包裹体的丰度和空间分布则可反映热液活动的强度和热液流动方向,这对于寻找隐伏盲矿床具有重要的指示作用^[1]。流体包裹体爆裂法作为一种辅助找矿手段,于 20 世纪 70—80 年代曾被原苏联和中国的地质工作者广泛用于找矿勘探实践中,并取得了一定成效^[2-8]。利用流体包裹体方法,可以发现金矿和周围蚀变带存在的“蒸发晕”和/或“热晕”,从而为寻找已知金矿外围和深部的盲矿体提供资料依据,因此选择流体包裹体,可以配合地质、地球物理和地球化学方法,作为进行深部找矿的一种有效手段^[9-12]。

随着近地表矿床陆续被发现和开采,找矿难度不断加大,人们自然而然将目光转向寻找深部矿床。近年来,在胶西北地区的焦家金矿带、三山岛金矿带

深部及外围先后发现了新的大型、特大型金矿床,包括焦家金矿深部、三山岛金矿深部、寺庄金矿深部和新立金矿等,累计查明资源储量 500 余 t^[13],给地质工作者以极大的鼓舞,也为我们指出了新的找矿方向。这些新矿床的发现是采用综合找矿手段,特别是各种地球物理勘探方法(大功率激电中梯测量、大地电磁测量)和地球化学方法应用的结果^[13]。鉴于流体包裹体爆裂法测温具有直观、快速的优点,笔者试图通过胶东金矿及其围岩中流体包裹体爆裂曲线特征和规律的研究,与其他常规找矿手段相结合,为蚀变岩型金矿的深部(-1 000 m 以下)找矿提供依据。同时也是对该方法从研究阶段向找矿应用转化进行验证,使其得到完善和提高。

2 地质背景

胶西北地区是中国金矿的主要产地,分布有众多金矿床,金的储量和产量均占全国的四分之一。焦

收稿日期:2011-04-22;改回日期:2011-08-18

基金项目:国土资源部公益性行业科研专项(200911043-03)和山东省地质勘查科研项目(鲁勘字[2006]15 号)联合资助。

作者简介:程伟,女,1978 年生,工程师,主要从事地质矿产工作;E-mail:weiwei0208@sohu.com。

家金矿床的大地构造位置处于胶北断隆的北部边缘,属于华北板块东延部分滨太平洋构造-岩浆岩带的内侧,是胶辽台隆的一部分。区内广泛发育前寒武纪变质岩系和中生代侵入岩体,还有少量中、新生代地层出露。断裂构造十分发育^[13-14](图1)。

焦家金矿床位于焦家断裂蚀变带的下盘,在平面上矿体主要产于断裂分枝复合、膨胀转折等部位,在剖面上则主要产于断裂倾角由陡变缓的转折点下部(图2)。焦家断裂在剖面上显示为“铲式”断裂特点,在焦家矿区最大勘探深度-1 400 m以上,其产状表现有2处明显的转折:一是地表至-400 m,断裂倾角由近70°渐变为30°左右,主矿体厚大部位出现于-100 m以下产状明显变缓处,构成浅部金矿体;二是-600~-1 000 m,断裂倾角由30°左右渐变为16°,主矿体厚大部位出现于-850 m以下产状明

显变缓处,构成深部金矿体^[15]。

与玲珑石英脉型金矿不同,焦家蚀变岩型金矿的围岩蚀变十分发育,蚀变分带明显。从外围花岗岩到矿体可以分出5个蚀变带:(1)钾化(红化)带,钾化表现为钾长石交代斜长石,形成以钾长石+石英为主要组成矿物的蚀变岩石。与此同时,由于高温下热液的氧逸度较高,斜长石晶格中弥散的二价铁被氧化为三价铁(赤铁矿微粒),斜长石也变为肉红色,原岩的色调变为红色,俗称“红化”蚀变。在焦家成矿带的许多大型和特大型金矿床中都能见到这样的钾化(红化)蚀变带,最宽可达300余米,愈靠近矿体或是成矿断裂主断面,蚀变愈强烈,但是钾化带往往遭受到后期其他蚀变的改造。(2)黄铁绢英岩化蚀变带,主要表现为热液对长石、黑云母等矿物进行交代,使之变为绢云母和石英,原岩不同程度地变为绢英岩

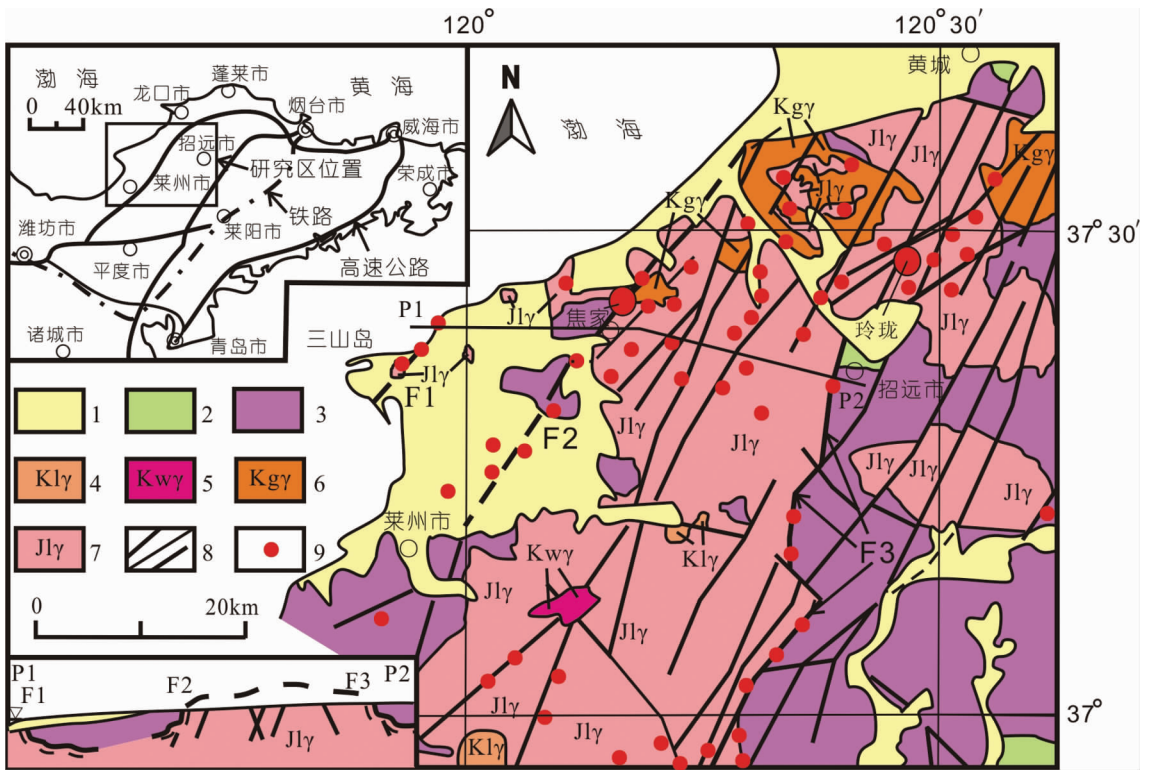


图1 胶西北地区地质和金矿分布简图(据宋明春等^[15])

- 1—第四系;2—白垩系沉积盖层;3—早前寒武纪变质杂岩;4—白垩纪崂山花岗岩;5—白垩纪伟德山花岗岩;
- 6—白垩纪郭家岭花岗岩;7—侏罗纪玲珑花岗岩;8—出露/隐伏断裂;9—矿床(点);F1—三山岛断裂;
- F2—焦家断裂;F3—招平断裂;P1, P2—剖面位置

Fig.1 Simplified geological map showing distribution of gold deposits in northwest Shandong Peninsula (after Song Minchun et al.^[15])

- 1 -Quaternary; 2 -Cretaceous cover rock; 3 -early Precambrian metamorphic complex rock; 4 -Cretaceous Laoshan granite; 5 -Cretaceous Weideshan granite; 6 -Cretaceous Guojialing granodiorite; 7 -Jurassic Linglong granite; 8 -Exposed/concealed fault; 9 -Ore deposit (ore spot); F1—Sanshandao fault; F2—Jiaojia fault; F3—Zhaoping fault; P1 and P2—Profile location

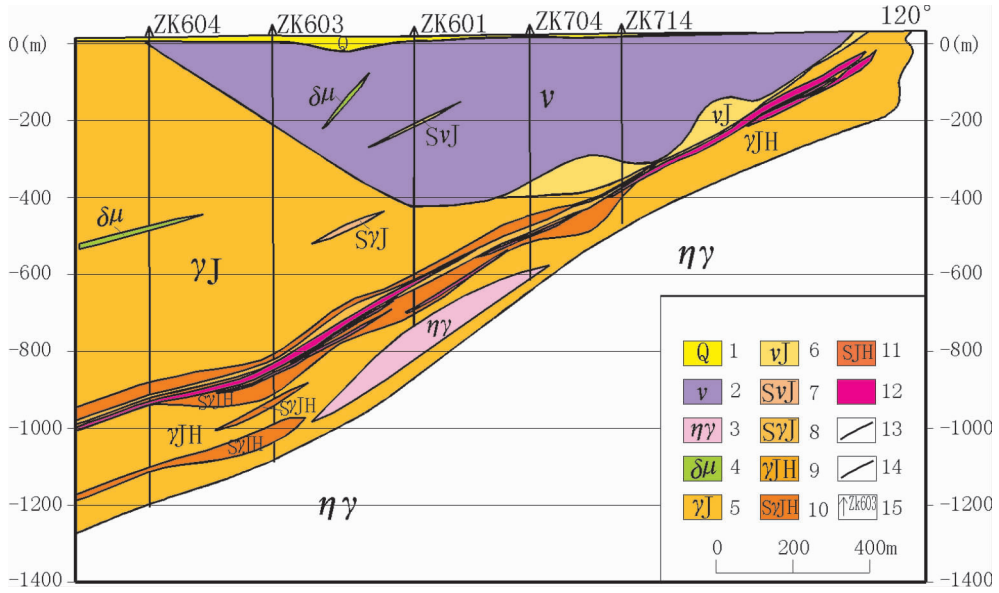


图 2 焦家金矿 112 勘探线剖面图(据李士先等^[14]修改)

1—第四系砂质粘土;2—变辉长岩;3—二长花岗岩;4—闪长玢岩;5—绢英岩化花岗岩;6—绢英岩化变辉长岩;7—绢英岩化变辉长岩质碎裂岩;8—绢英岩化碎裂岩;9—黄铁绢英岩化花岗岩;10—黄铁绢英岩化花岗质碎裂岩;11—黄铁绢英岩化碎裂岩;12—矿体;13—主裂面;14—地质界线;15—钻孔及编号

Fig.2 Geological section along No. 112 exploration line of Jiaojia gold deposit (modified after Li Shixian et al.^[14])

1—Sandy clay; 2—Metagabbro; 3—Monzonitic granite; 4—Diorite porphyrite; 5—Phyllic alteration granite; 6—Phyllic alteration metagabbro; 7— Phyllic alteration metagabbro cataclasite; 8— Phyllic alteration cataclasite; 9— Pyritic—phyllic alteration granite; 10—Pyritic phyllic alteration granitic cataclasite; 11— Pyritic—phyllic alteration cataclasite; 12— Ore body; 13—Principal fault plane; 14—Geological boundary; 15—Drill hole and its serial number

化岩石和绢英岩;新生石英具微粒(变晶)结构,呈半浑圆,球粒状及团块状;绢云母多呈鳞片状集合体;与此同时,还有少量黄铁矿生成,黄铁矿多为较粗大的自形-半自形晶体,呈散点状或细脉状分布在绢英岩中。(3)黄铁硅化作用及其蚀变带,随着温度和压力降低,成矿热液中 SiO₂ 和铁的浓度增高,而溶解度明显降低,从而沉淀出石英和黄铁矿。与绢英岩化阶段形成的乳白色中粗粒石英和黄铁矿不同,本阶段主要形成灰色细粒石英和黄铁矿。通常硅化作用叠加在绢英岩化的内带,即绢英岩亚带之上。硅化带中心部位约 90%的矿物为石英,其次为黄铁矿。(4)黄铁矿化-多金属硫化物矿化(金矿体)带,主要叠加到前期黄铁硅化蚀变带中,构成蚀变-矿化中心。黄铁矿-多金属硫化物矿化带和矿体大部分位于主断面的下盘,并被黄铁硅化带所包围。(5)碳酸盐化带,包括方解石化、白云石化、菱铁矿化等,多呈脉状充填叠加于早期各蚀变带中,有时也与多金属硫化物矿化相伴随。

矿石中主要金属硫化物为黄铁矿,其次为黄铜矿、方铅矿和闪锌矿,以及少量磁黄铁矿、毒砂和多种硫盐矿物;氧化物有磁铁矿和赤铁矿(镜铁矿);碳酸盐以菱铁矿和方解石为主;金银矿物以银金矿为主,其次为金银矿和自然金,以及少量自然银、碲银矿等。可大致分为 4 个成矿阶段:(1)黄铁矿-石英阶段,由粗粒黄铁矿和白色石英组成;(2)石英-黄铁矿阶段,石英为灰白-灰色,载金黄铁矿为碎块状、裂纹发育的他形粒状黄铁矿;(3)石英-金多金属硫化物阶段,含黄铁矿和铜铅锌硫化物,为主要金矿化阶段,金矿物呈包体金、晶隙金分布于黄铁矿中或呈裂隙金产出,尤其是在破碎黄铁矿的裂隙中。(4)石英-碳酸盐阶段,由石英、碳酸盐和少量黄铁矿组成^[14]。

3 研究方法

选择了焦家金矿 112 勘探线主剖面的 ZK601 (样品采集标高-44~-753 m,共采集 26 件,爆裂测试 26 件)、ZK603 (标高-297~-1 104 m,共采集 37

件,爆裂测试 37 件)、ZK604(标高-139~-1216 m,共采集 26 件,爆裂测试 26 件)、ZK704 (标高-341~-633 m,共采集 40 件,爆裂测试 40 件)、ZK714 (标高-75.53~-494.5 m,共采集 44 件,爆裂测试 38 件)和 114 线的 ZK606(标高-741~-1071 m,共采集 27 件,爆裂测试 27 件)、ZK608(标高-90~-1112.2 m,共采集 56 件,爆裂测试 47 件)和 ZK615(样品采集标高-30~-1130 m,采集样品 100 件,爆裂测试样品 100 件)等 8 个钻孔,按照不同的岩性采集样品。对所采样品在鄂式破碎机中破碎,并用 40 目和 80 目筛网过筛,然后进行矿物分离,在双目镜下挑选粒径 0.20~0.425 mm 的石英作为爆裂测试样品。测试工作是在中国科学院谢弈汉研制的 SDT-5 型矿物包裹体爆裂测温仪上进行,测试前对仪器用谢弈汉提供的石英标样和已知熔点温度的化学试剂进行温度标定和校准;通过记录仪将测试结果绘制成爆裂曲线图。纵坐标为爆裂频次测量范围,横坐标为温度。测量温度精度可达 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。与此同时,还选取代表性样品磨制双面抛光片进行流体包裹体岩相学观察和部分显微测温,以便与爆裂法测试结果对比和进行解释。

4 焦家金矿石英中流体包裹体及其爆裂曲线特征

焦家金矿为蚀变岩型金矿,其围岩主要是中粗粒二长花岗岩,其次有少量中细粒花岗岩和斜长角闪岩。另外还有煌斑岩穿插金矿体。由于煌斑岩不含石英,而斜长角闪岩的石英主要源于其中的石英脉或石英条带,其爆裂曲线形态与花岗岩或石英大脉相似,因此笔者将重点讨论花岗岩及其蚀变产物的爆裂曲线形态特征。

4.1 花岗岩和蚀变带中石英的成因分类

由于研究采用爆裂法测试的矿物样品是石英,因此石英的成因及其在蚀变带内的分布决定了爆裂曲线的特征。从蚀变带外围的花岗岩,到钾化带,直至中心部分的矿体,依次产出有花岗岩原岩(成岩)石英和黄铁绢英岩化带、硅化带、金-多金属硫化物带的热液石英。在各蚀变矿化阶段形成的石英中捕获了不同期次(世代)的流体包裹体。因此原岩石英和热液石英爆裂曲线特征主要取决于它们所含流体包裹体的特征。

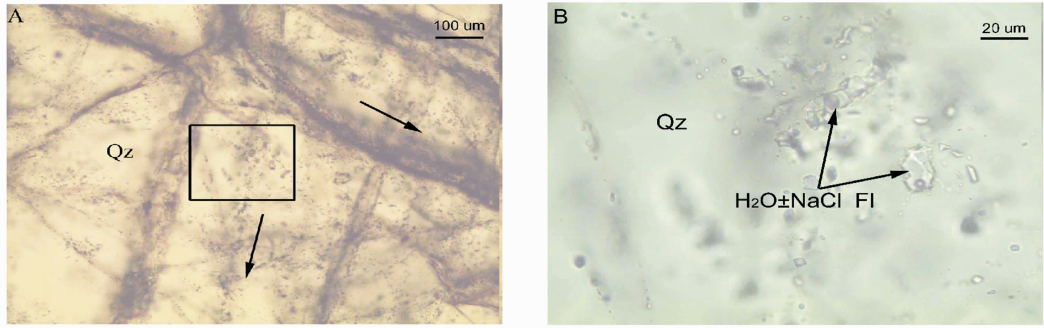
4.2 花岗岩石英和蚀变矿化带热液石英中流体包裹体特征

岩相学观察表明,虽然花岗岩围岩、蚀变岩石和矿石中的包裹体都主要含 $\text{H}_2\text{O}\pm\text{NaCl}$ 和 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 两大类包裹体。但它们的大小、形态、相比(气相百分比或 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 相对含量)和丰度不尽相同,由此决定其爆裂频次和爆裂曲线形态有明显差别。

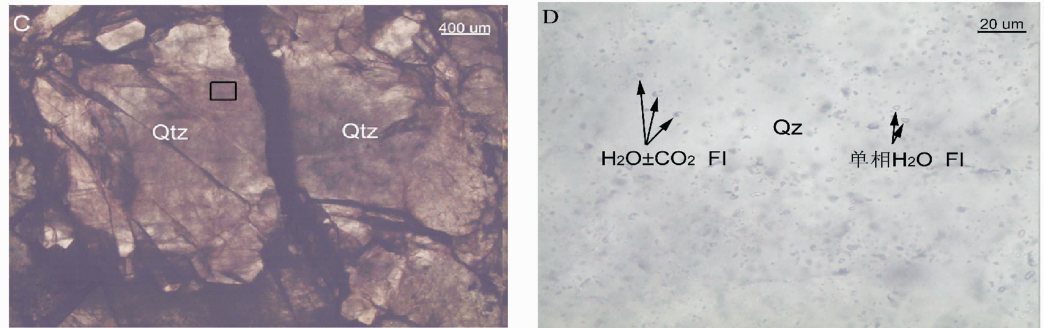
焦家金矿花岗岩成岩石英较透明,其中主要含 $\text{H}_2\text{O}\pm\text{NaCl}$ 包裹体,并且主要是沿裂隙分布的次生包裹体(图 3-A 和 3-B),其大小一般在 $5\sim 20\mu\text{m}$,较大者可达 $30\mu\text{m}$ 以上,形态多为浑圆状、树枝—不规则状,部分呈管状和负晶形;其次含少量 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体,形态为浑圆—负晶形。包裹体丰度从中等到高。而在钾化花岗岩、黄铁绢英岩、硅化岩石和金多金属硫化物矿石中,随蚀变矿化程度增强,热液石英的含量不断增加,并逐渐取代原岩石英。通常在蚀变岩石中含早期混浊石英、半透明石英和晚期透明石英。在早期混浊石英中含有大量 $\leq 1\sim 5\mu\text{m}$ 的 $\text{H}_2\text{O}\pm\text{NaCl}$ 包裹体,丰度很高(图 3-C 和 3-D)。在半透明石英中往往具有不规则网状裂隙,含大量两相 $\text{H}_2\text{O}\pm\text{NaCl}\pm\text{CO}_2$ 包裹体,偶尔可见三相 ($\text{L}_{\text{H}_2\text{O}}+\text{L}_{\text{CO}_2}+\text{V}$) $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体,均沿裂隙分布;大小从 $< 1\mu\text{m}$ 直至 $10\mu\text{m}$ 以上,而多在 $3\sim 6\mu\text{m}$,形态浑圆—椭圆形、透镜状,到不规则形状, $\text{CO}_2/\text{CO}_2+\text{H}_2\text{O}$ 相比比例变化很大,从 $\leq 10\%\sim 20\%$ 到 $80\%\sim 90\%$ 均有,而以 $20\%\sim 60\%$ 居多(图 3-E, 3-F)。透明石英仅含少量两相 $\text{H}_2\text{O}\pm\text{CO}_2$ 包裹体,大小 $1\sim 12\mu\text{m}$ 不等,多为椭圆—透镜状,气相百分比为 $25\%\sim 50\%$ 。有时黄铁矿边缘的透明石英只含很少量单液相 H_2O 包裹体和两相 $\text{H}_2\text{O}\pm\text{CO}_2$ 小包裹体(图 3-G, 3-H)。

4.3 花岗岩围岩和蚀变矿化带流体包裹体爆裂曲线特征

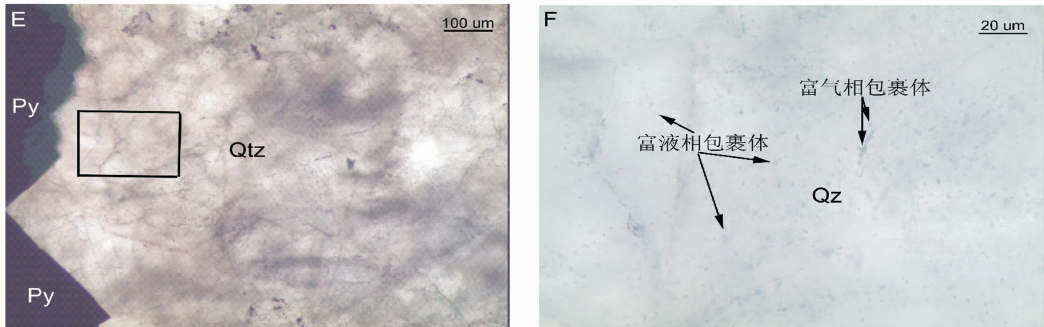
蚀变带的地质界线并不总是很清楚的,大多呈过渡关系,并且有些带中还保留有早期(阶段)残留石英,后期蚀变带又局部穿过早期蚀变带,因此在所采样品中往往有两种甚至三种石英相伴产出,它们各自含有不同性质的流体包裹体,所获得的爆裂曲线是不同石英中(还不包括某些样品中混有成矿后的脉石英)包裹体爆裂的合成曲线。尽管如此,终究在每一个带中以某种成因的石英占优势,因此从蚀变带外围到中心,爆裂曲线型式还是有一定的变化规律。



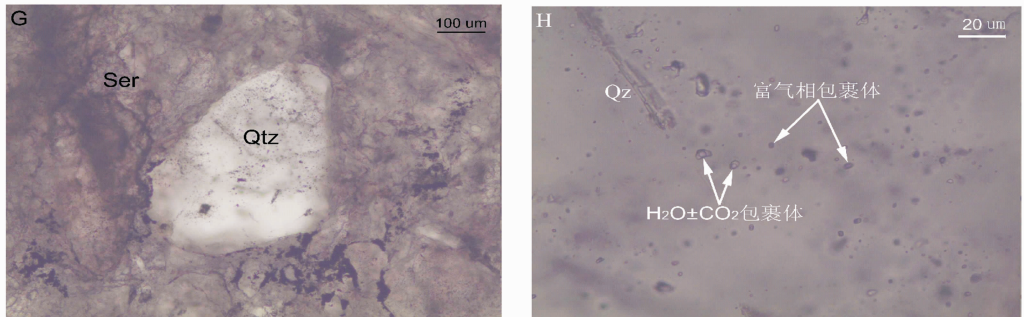
A-花岗岩石英发育大量不同方向裂隙(箭头所指),其中主要含 $H_2O \pm NaCl$ 包裹体,大小从数微米至 $30 \mu m$ 以上,多为不规则形态;B-A 图中方框部分的放大(ZK603-27);



C-绢英岩混浊石英含有大量单相 $H_2O \pm NaCl$ 包裹体和气液两相 $H_2O \pm CO_2$ 包裹体,大小多在 $1 \sim 5 \mu m$;D-C 图中方框部分的放大(ZK608-33),可见流体包裹体密集分布;



E-黄铁矿绢英岩半透明石英具网状裂隙,其中含有大量两相和三相(富气相或富液相) $H_2O - CO_2$ 包裹体,大小多在 $1 \sim 5 \mu m$,注意 E 图右边透明石英小区域中不含流体包裹体(ZK603-12); F-E 图中靠近黄铁矿的半透明石英局部放大



G-绢英岩中的半透明-透明石英,其中含有少量裂隙,沿裂隙分布有富气相、富液相 $H_2O \pm CO_2$ 包裹体和单相 H_2O 包裹体,大小多在 $1 \sim 5 \mu m$ (ZK608-33);H-G 图中心透明石英的局部放大

图 3 焦家金矿花岗岩和黄铁绢英岩石英中流体包裹体显微照片

Fig.3 Photomicrographs showing modes of occurrence of fluid inclusions in quartz of granite and pyrite-phyllic alteration rocks

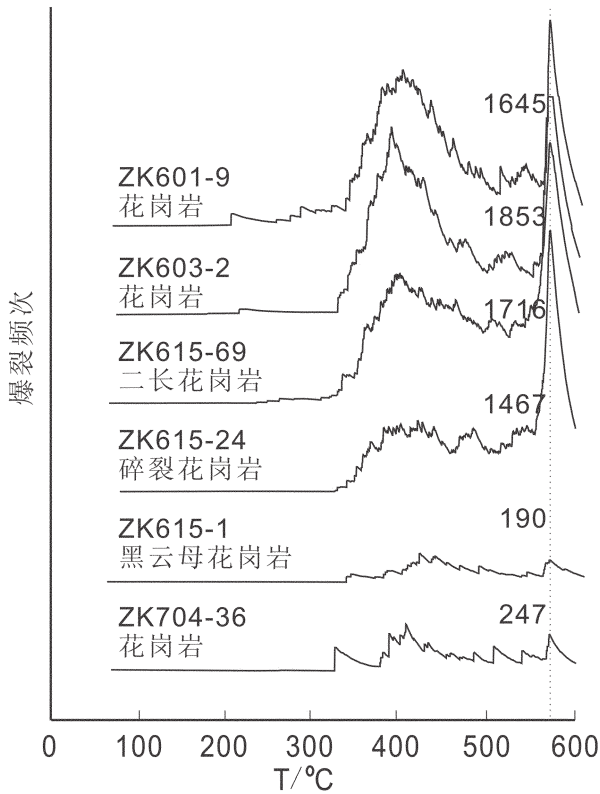


图4 焦家金矿花岗岩中石英的爆裂曲线图

Fig.4 Decrepigrams (decrepitation curves) of fluid inclusions from quartz of granite in the Jiaojia gold deposit

4.3.1 花岗岩中石英的爆裂曲线特征

中粗粒花岗岩中的石英为高温石英，其爆裂曲线具有以下特点：(1) 在 α/β -石英相转变温度 573°C 具有明显而尖锐的爆裂峰(以下简称相变峰)，从特高到高；(2)在 $320\sim 460^{\circ}\text{C}$ 区间具有明显宽大的爆裂单峰；(3)爆裂频次较高，常在 1 000 左右或以上(图 4)。

笔者也注意到，矿化带下盘的花岗岩中石英的爆裂曲线往往具有较低的相变峰，爆裂峰也不如上盘花岗岩的明显(如图 4 中 ZK615-1 和 ZK704-36 均为矿体下盘的花岗岩样品)，推断是受后期热液影响的结果。据研究， α/β -石英相变峰的产生是大量细小包裹体在 573°C 左右爆裂造成的，而不是石英相变本身造成，因为它不可逆^[16-17]。而构造-热液活动使原岩石英受到改造，其中的很多包裹体已破坏，自然就不能在 α/β 石英相变温度产生爆裂峰。

另外，当花岗岩受到碎裂岩化作用后，其爆裂峰往往呈锯齿状，如 ZK615-24 号样品。

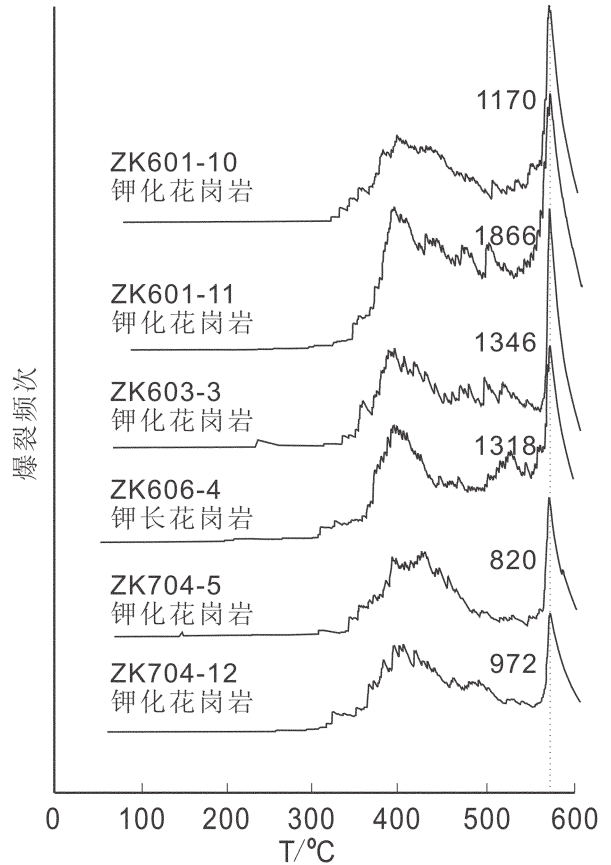


图5 焦家金矿钾化花岗岩中石英的爆裂曲线图

Fig.5 Decrepigrams (decrepitation curves) of quartz in granite of potassic alteration in the Jiaojia gold deposit

4.3.2 钾化带内石英的爆裂曲线特征

钾化带内的石英主要是二长花岗岩中的高温石英，因此其爆裂曲线与二长花岗岩中石英的爆裂曲线有相似之处。但受钾化和流体作用的影响，在花岗岩石英中会捕获次生包裹体，或原有的包裹体受到次生改造，因此会在爆裂峰上出现一些变化，产生叠加小峰或起爆温度降低(图 5)。当流体作用较强时，则相变峰会略低一些，但仍为高到很高。总的爆裂频次在 1 000 左右。

4.3.3 (黄铁)绢英岩带内石英的爆裂曲线特征

绢英岩(化)带石英的爆裂曲线随花岗岩原岩受到绢英岩化和随后的黄铁矿化、硅化程度而变化(图 6)。总的趋势是随原岩绢英岩化的增强，总爆裂频次减少，相变峰降低，直至消失；爆裂峰逐渐减弱，并从单峰变为多峰。

具有弱绢英岩化的花岗岩，仅在花岗岩的爆裂峰(包络峰)区左翼有部分叠加，出现双峰或斜坡，仍

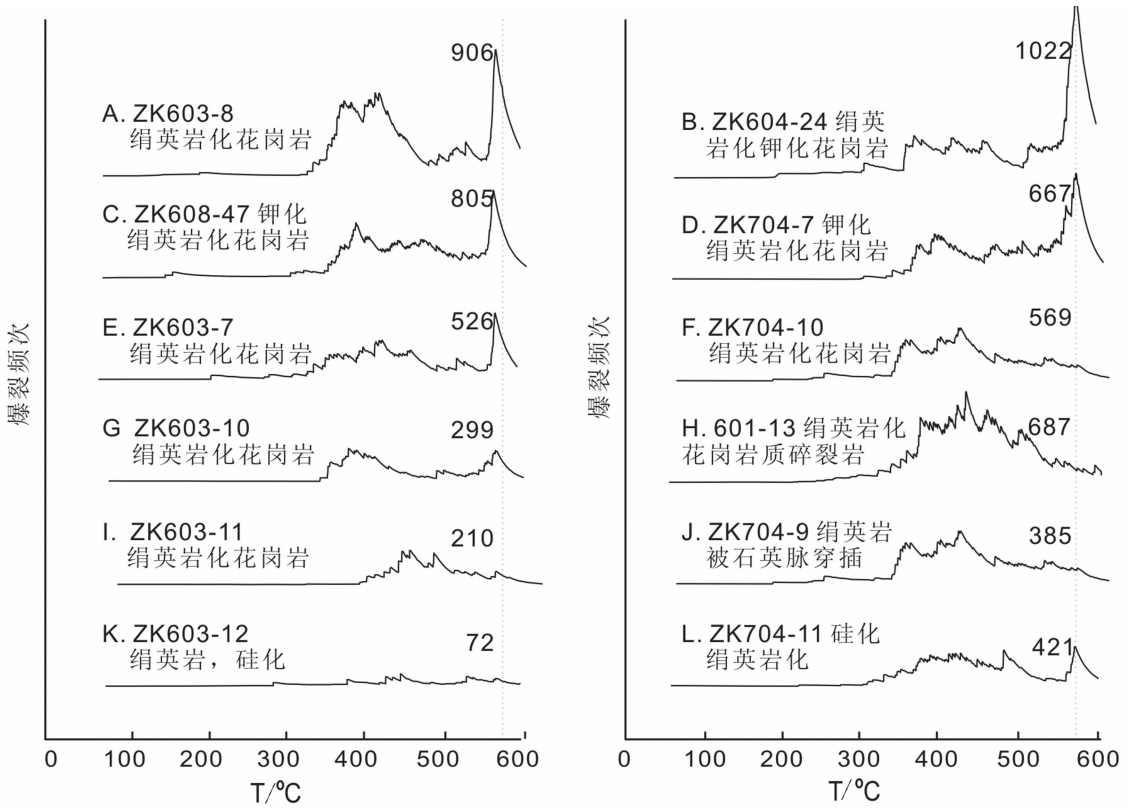


图 6 焦家金矿绢英岩化带中石英的爆裂曲线

Fig.6 Decrepigrams (decrapitation curves) from quartz of sericite-quartz alteration zone in Jiaojia gold deposit

显示清楚的相变峰(图 6-A)。当花岗岩或钾化花岗岩有明显绢英岩化叠加时,爆裂峰不同程度降低,并在其左翼出现叠加峰区,形成双峰或多峰(图 6-B, C 和 D)。较强绢英岩化花岗岩的爆裂峰(图 6-E, F),进一步降低,且相变峰也大大降低。图 6-G 显示比较典型的绢英岩石英的爆裂曲线特征,原花岗岩的包络峰变小,相变峰降低。绢英岩化花岗质碎裂岩,可出现特征的锯齿状爆裂峰,且相变峰减弱或消失(图 6-H)。当花岗岩受到强烈绢英岩化后,长石被分解为绢云母和新生石英,早期石英受到热液石英交代,花岗岩被改造成绢英岩,因而具有热液石英的爆裂曲线特征:表现为无或只有微弱的相变峰,只有微弱到中等爆裂峰(图 6-I)。当靠近硅化(矿化)带或绢英岩被石英细脉穿插时,爆裂曲线显示多峰或峰区变小,有时相变峰消失(图 6-J)。当绢英岩受到明显硅化时,或是不具有爆裂峰和相变峰,或显示较低的爆裂峰和相变峰(图 6-K, L)。

图 6-A、B、C 和 D 表明绢英岩化是叠加在(钾化)花岗岩之上,应具有相变峰。随着绢英岩化的增

强,相变峰减弱。虽然绢英岩化带内石英的爆裂曲线与钾化带内石英的爆裂曲线有相似之处,但有 3 点不同:一是绢英岩化带的相变峰较低;二是爆裂峰变小;三是爆裂峰区向低温方向移动。这些可能是与热液石英形成温度较低,或流体包裹体微小有关,小包裹体有较高的爆裂温度,在 $\leq 600^{\circ}\text{C}$ 时未爆裂。

绢英岩化带石英的爆裂频次变化较大,可从 1000 左右到 100 以下。

4.3.4 硅化带内石英的爆裂曲线特征

硅化带内石英的爆裂曲线除个别具有平缓的爆裂峰外,多数呈一条近于水平直线或波浪线(锯齿线),且与花岗岩相比,起爆温度降低。通过对几个钻孔中叠加有硅化蚀变岩石的对比(图 7)可以得到以下认识:

(1) 硅化较弱,还残存有(钾化)花岗岩石英,故爆裂曲线上可出现清楚的爆裂峰和相变峰,如硅化钾化花岗岩样品 ZK601-17 的爆裂曲线显示在残存花岗岩爆裂峰的 $300\sim 400^{\circ}\text{C}$ 有一个叠加小峰,并且与脉石英(如 KZ601-19)的小爆裂峰相对应。当硅化

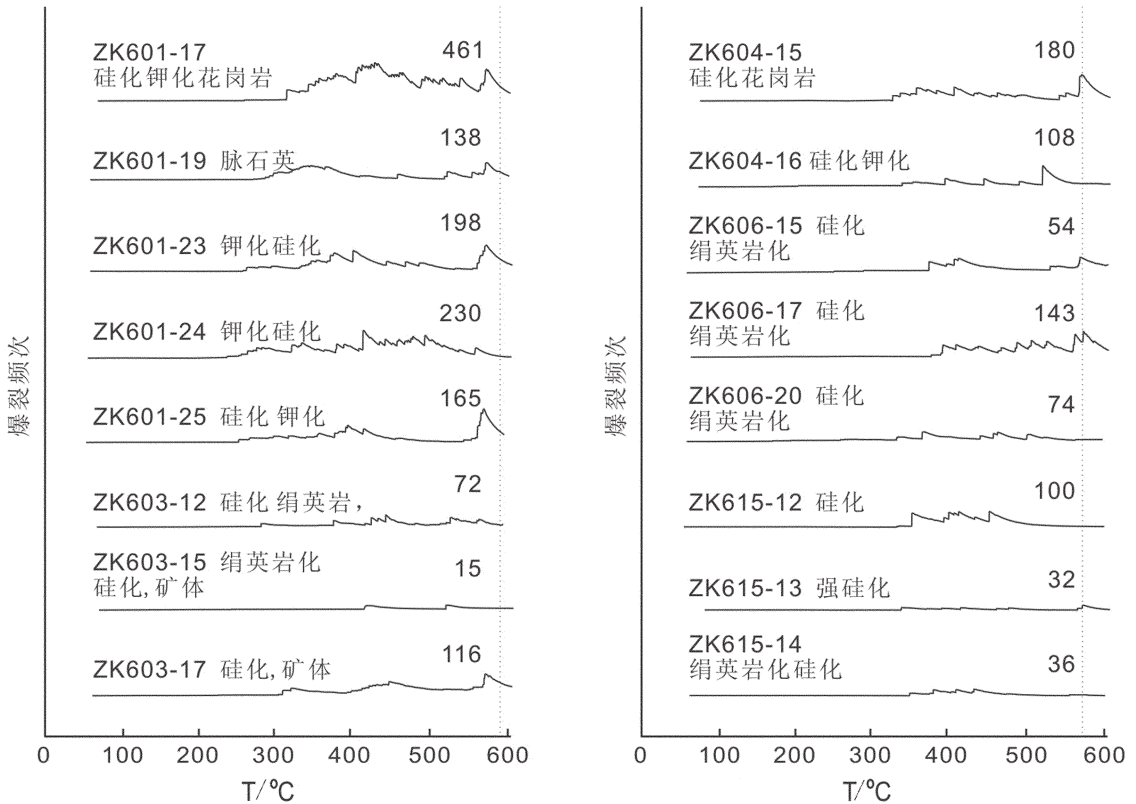


图7 焦家金矿硅化带中石英的爆裂曲线图

Fig.7 Decrepigrams (decrapitation curves) of quartz of silicified zone in the Jiaojia gold deposit

进一步加强时,爆裂曲线逐渐过渡为平缓的波浪线(KZ601-23、-24、-25和ZK604-15、-16),通常爆裂频次在100~200,个别可达400以上。另外,硅化较弱时,也可显示绢英岩化和/或钾化石英的爆裂特征,并且有弱的相变峰。

(2)硅化较强,但还残存有绢英岩石英,故爆裂曲线上可出现微弱爆裂峰,微弱相变峰(603-17、606-15和606-17),或无相变峰(603-12和615-14)。通常爆裂频次在100以内。

(3)硅化最强烈的部位,爆裂曲线基本上为水平直线(ZK603-15和ZK615-13)。因为硅化作用对原岩进行了强烈改造,形成的中低温石英或呈混浊状,含有的包裹体数量虽多,但极微小($\leq 1\mu\text{m}$ ~数微米),即使升温到600°C以上也很难记录到爆裂声;或为晚期透明石英,基本不含流体包裹体。通常爆裂频次在30以内。

4.3.5 黄铁矿化带-矿体内石英的爆裂曲线特征

焦家金矿带内黄铁矿多呈浸染状或细脉状分布于绢英岩(化)和硅化岩石中,因此黄铁矿化带往往

与硅化带重叠;而金-多金属硫化物矿体也主要叠加在硅化黄铁矿化带上。显微镜观察表明,与黄铁矿同时形成的石英常为透明石英,含流体包裹体较少—很少;而与金-多金属硫化物沉淀有关的石英则为乳浊状(milky)细粒石英。石英呈乳浊状是由于其中含有成千上万极其微小($<< 1\mu\text{m}$)的流体包裹体,引起光线漫反射所致。这些包裹体爆裂的内压力极高($> 30 \times 10^8\text{ Pa}$ 或3000 MPa),即使升温到600°C也很难爆裂。因此金-多金属硫化物矿体一般无爆裂显示。

从已做测试的样品来看,黄铁矿化带和矿体的爆裂曲线多与硅化带的相似(图8)。由于部分矿体也可发育在绢英岩化带或钾化带,这时将使钾化和绢英岩化花岗岩中石英的爆裂曲线受到明显的改造。

4.3.6 从外围花岗岩到蚀变带再到矿体中心石英爆裂曲线的变化趋势

通过以上分析可知,从外围花岗岩到蚀变带再到矿体中心样品,石英的爆裂曲线呈现有规律的变化。表现在:(1)总爆裂频次逐渐降低;(2)相变峰从

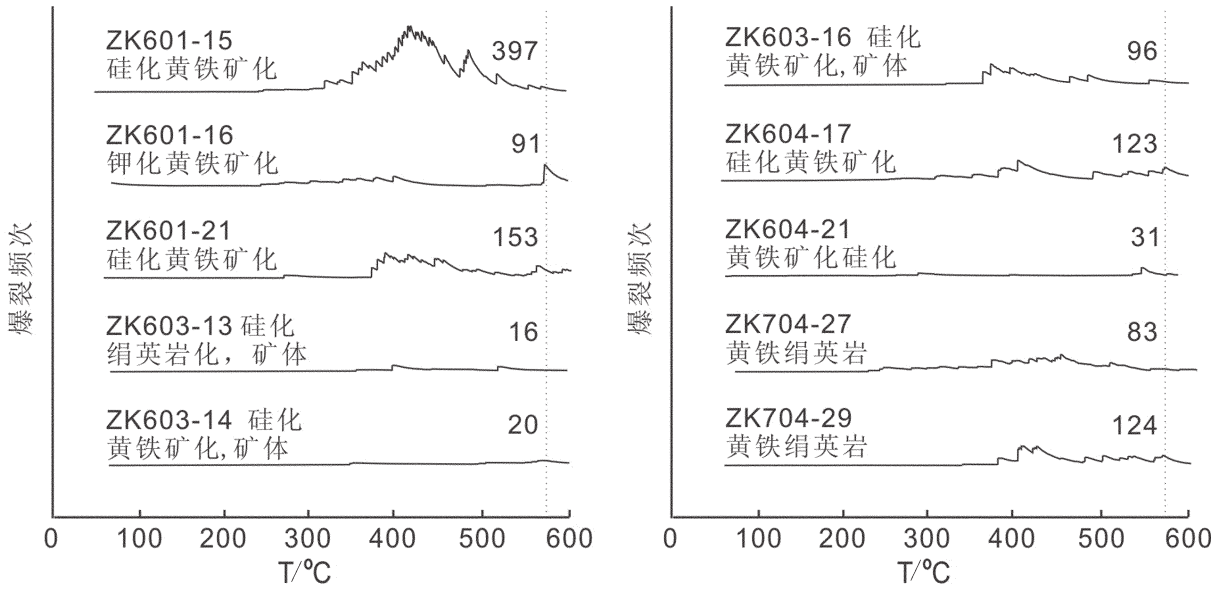


图 8 焦家金矿黄铁矿化带中石英的爆裂曲线图

Fig.8 Decrepigrams (decrapitation curves) of quartz of pyritized zone in the Jiaojia gold deposit

很高到逐渐变小,直到微弱或无相变峰存在;(3)主爆裂峰由大变小,直到硅化带无爆裂峰(或只有极微弱的峰)存在;(4)叠加的小峰有从高温向低温转移之趋势,从主爆裂峰右翼(高温区)出现锯齿状小峰(钾化带)到主峰左翼(低温区)出现多个小峰(绢英岩化带)。而到了矿体下盘,爆裂频次又有所增加。这在 ZK603、ZK714 和 ZK615 钻孔中表现得最明显(图 9)。

新鲜花岗岩的爆裂曲线特征是具有较高的爆裂频次,起爆温度一般在 300°C 或更高,有明显的包络峰和明显的相变峰;受到钾化、硅化和黄铁绢英岩化影响的蚀变花岗岩(或碎裂岩化花岗岩)的爆裂频次降低,降低程度与蚀变强度有关;包络峰也逐渐变得低缓,相变峰降低(变弱)。在矿化带出现很低的爆裂频次和低平的爆裂曲线,一般不具有相变峰。以上特征可以与其他找矿标志相结合应用于本区深部找矿。

需要说明的是:(1)由于局部地区后期蚀变作用叠加到早期蚀变带,以及蚀变带位置发生改变,可能会使这种规律性受到干扰,特别是在地质现象复杂地段;(2)爆裂曲线显示的是样品的综合或固有特性,反映了岩石所经受的多次地质(流体)作用影响,比肉眼鉴定能揭示更多的内涵,肉眼的岩性鉴定会有偏差,导致表观岩性与其爆裂曲线特征不完全相符;(3)对于个别具有反常情况的爆裂曲线,可能会

提供一些找矿线索。

5 结果解释和讨论

5.1 花岗岩围岩和蚀变矿化带流体包裹体爆裂曲线反常的解释

岩(矿)石中流体包裹体爆裂曲线形态特征取决于其所含流体包裹体的大小、形态、组成(种类)和丰度等多种因素。以往的研究表明,石英中包裹体爆裂所需要的内压力主要与包裹体的大小有关^[18-20],即较大的包裹体在较低的内压力下爆裂,而较小的包裹体爆裂所需要的内压力较高。Bodnar et al.^[17]通过人工合成流体包裹体实验数据回归,得到引起石英中包裹体爆裂所需要的内压力(内外压力差)与体积关系的方程式为:

$$\text{内压力}(100\text{MPa})=3.89V^{-0.141}$$

$$\text{或内压力}(100\text{MPa})=4.26D^{-0.423}$$

式中: V 为包裹体的体积(μm^3); D 为包裹体的直径(μm)。

由此表明,包裹体发生爆裂所需内压力随包裹体体积或直径的减小而增加。对于石英中一个 $10\mu\text{m}$ 大小的球形包裹体,所需爆裂的内压力为 160 MPa;而对于 $1\mu\text{m}$ 大小的球形包裹体来说,这个压力可达 426 MPa。当包裹体直径减小到 $0.1\mu\text{m}$ 和

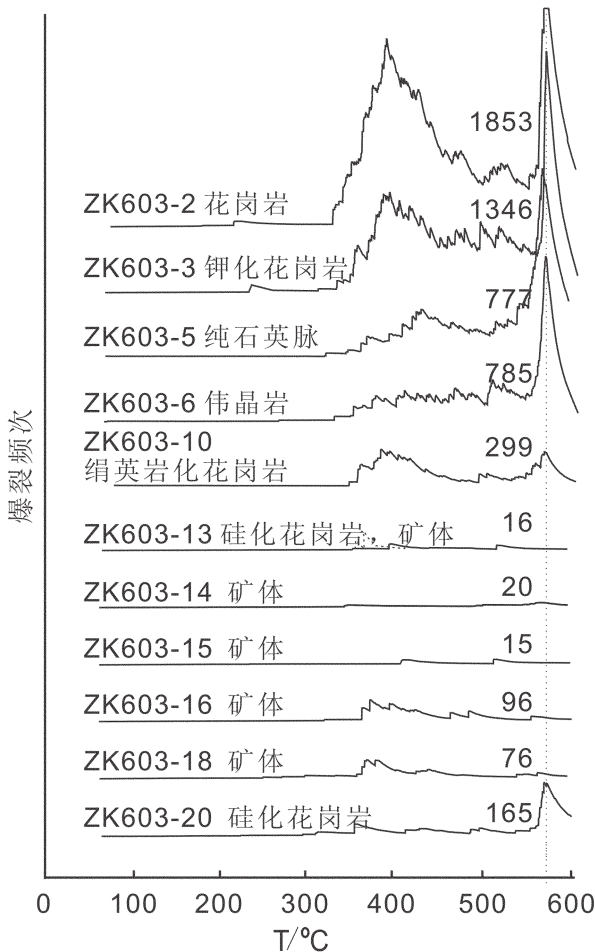


图9 焦家金矿 ZK603 钻孔从外围花岗岩经过钾化带、绢英岩化带再到矿体(硅化带)石英爆裂曲线的变化趋势

Fig.9 Variation trend of decapitation curves of quartz from peripheral granite through potassic alteration zone, sericite-quartz alteration zone to ore body (silicified zone) in drill hole ZK603 of the Jiaojia gold deposit

0.01 μm 时,所需爆裂的内压力将分别高达 1 128 MPa 和 2 988 MPa。

影响包裹体爆裂的另一个主要因素是包裹体流体的组成。Тугаринов 和 Наумов^[20]研究包裹体中 CO_2 含量与爆裂温度的关系时指出,石英、黑钨矿、萤石和辉钨矿等矿物中的包裹体在 CO_2 浓度增加时,爆裂温度有降低的趋势。Burlinson^[9,11]曾经以含 H_2O 和 CO_2 流体等容线的 P-T 图来说明 H_2O 包裹体和 CO_2 包裹体不同的爆裂特性。他认为石英中包裹体的内外压差大致达到 60 MPa 时就可能爆裂,从 P-T 图上看多数 CO_2 包裹体在 200~250°C 区间发生爆裂,而 H_2O 包裹体(均一温度 < 300°C)的起爆温度接近 300°C。另外,包裹体的爆裂温度与其

在主矿物中的位置也有一定关系,即位于矿物颗粒中心的包裹体比颗粒边缘的包裹体在更高的温度下爆裂。笔者在冷热台上加热样品时还观察到,沿裂隙集中分布的包裹体比远离裂隙分布的包裹体更容易爆裂。

以往许多爆裂法研究表明,矿体所在部位的爆裂强度(频次)较高,而随着远离矿体进入围岩,爆裂频次逐渐降低,一般认为这是由于围绕矿体热液活动强烈和流体包裹体丰度较高所致。从而在矿床(体)及其周围形成蒸发晕正异常。然而,焦家金矿花岗岩围岩的爆裂曲线具有高的爆裂频次、明显的爆裂峰和高的相变峰,随着围岩蚀变增强,爆裂频次、爆裂峰和相变峰呈有规律降低,在矿体(化)中心,爆裂频次很低,不显示爆裂峰和相变峰,从而围绕矿体构成蒸发晕“负异常”。这主要是由焦家金矿床花岗岩围岩、蚀变岩石和矿石中流体包裹体特征所决定的。根据 4.2 节的叙述,花岗岩主要含 $\text{H}_2\text{O} \pm \text{NaCl}$ 包裹体和少量 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体虽然其丰度仅为中等—高,但包裹体一般较大,在升温到 $\leq 300^\circ\text{C}$ 左右就开始起爆;而黄铁绢英岩和金矿石中虽然含有大量 $\text{H}_2\text{O} \pm \text{NaCl}$ 和/或 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体,但都十分微小(特别是硅化带和黄铁矿化带乳浊石英中含有千万 $\ll 1 \mu\text{m}$ 的包裹体),使它们爆裂所需要的内压力很高,以至于在 $\leq 600^\circ\text{C}$ 范围内未能爆裂;或者即使爆裂,所产生的爆裂声也很小,不能被记录仪记录下来。

5.2 爆裂曲线和蒸发晕特征在焦家蚀变岩型金矿深部钻探中的应用

焦家蚀变岩型金矿通常赋存于主断裂带下盘,从花岗岩围岩→钾化花岗岩→绢英岩化和硅化蚀变岩→矿体,热液蚀变强度存在规律性变化,从而决定了这些岩石的爆裂曲线特征也有规律性变化,表现为爆裂频次、起爆温度、爆裂峰和相变峰高度呈逐渐降低的趋势,爆裂峰从单峰渐变为双峰和多峰,直至在矿体部位的爆裂频次降到 200~50 以下,爆裂曲线成为低平的波状曲线或直线,在平面和剖面上显示蒸发晕“负异常”。因此可以将这些变化规律,像其他地球物理和地球化学异常一样,用于找矿勘查实践。

(1)根据钻孔岩心爆裂曲线的变化,结合其他找矿标志,来确定蚀变类型和蚀变强度,以判断是否接近矿体;当爆裂曲线呈低平曲线或直线时,特别是当有蒸发晕“负异常”出现时,表明为强绢英岩化—硅

化带,有金矿体存在的可能。

(2)当蒸发晕“负异常”与根据岩心金分析结果圈定的金矿体不一致时,可以考虑是否仍有潜在金矿体存在的可能。因为蒸发晕“负异常”代表了成矿热液活动最强烈部位,它比较稳定,而矿体中金品位的变化往往较大,钻孔不一定恰好通过达到工业品位的矿体。因此,当出现样品蒸发晕“负异常”(爆裂频次低于 200,尤其是低于 50),而钻孔岩心金分析结果达不到边界品位时,仍不排除存在矿体的可能性。

(3)当黄铁绢英岩的爆裂曲线呈多峰型,特别是在 $\leq 200\sim 250^{\circ}\text{C}$ 出现明显的次要爆裂峰,显微镜下见有大量相比变化大的 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体共存时,则预示有较好的含矿性。

(4)当钻孔穿过主断裂和主矿层后,是否需要继续钻进,除了地质判断外,还可以根据矿体下盘围岩的爆裂曲线特征来判断。如果这些围岩仍显示有强烈蚀变岩石的爆裂曲线特征(有时单从肉眼并不能觉察),特别是在 $\leq 200\sim 250^{\circ}\text{C}$ 出现明显的次要爆裂峰,反映有较多 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体存在时,则可以考虑继续钻进。

这些特征,特别是围绕矿体的蒸发晕“负异常”,对于胶北地区深部金矿找矿勘探,具有潜在的应用价值。

6 结论

(1)流体包裹体研究表明,山东焦家蚀变岩型金矿及其围岩主要含 $\text{H}_2\text{O}\pm\text{NaCl}$ 和 $\text{H}_2\text{O}-\text{CO}_2$ 包裹体,但是在花岗岩成岩石英、蚀变岩石(钾化花岗岩、黄铁绢英岩、硅化岩石)和金矿石不同世代的热液石英中这两类包裹体的大小、形态、组成($\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 相对含量)和丰度有明显差别,由此决定了它们不同的爆裂特征。

(2)花岗岩石英的爆裂特征表现为具有高的爆裂频次($>1\ 500$),在 α/β -石英相转变温度 573°C 具有明显而尖锐的爆裂峰(相变峰),在 $320\sim 460^{\circ}\text{C}$ 具有明显宽的爆裂单峰。

(3)钾化花岗岩的爆裂特征与花岗岩的相似,总的爆裂频次在 1 000 左右。因原有的包裹体受到改造,爆裂峰会有一些变化,产生叠加小峰或起爆温度降低。

(4)随着围岩蚀变作用的增强和热液石英的生成,黄铁绢英岩和黄铁硅化岩的爆裂频次逐渐减少,

直至矿体部位的爆裂频次降到 200~50 以下,起爆温度、相变峰和爆裂峰降低,从简单单峰变为双峰或多峰,直到不显示爆裂峰,爆裂曲线成为低平的波状曲线或直线。

(5)从花岗岩围岩,经过钾化花岗岩、黄铁绢英岩化和硅化蚀变岩,直到矿体,爆裂特征的规律性变化,表现在平面和剖面上显示蒸发晕“负异常”。这些变化规律可以像其他地球物理和地球化学异常一样,用于该区深部金矿找矿勘查实践。

致谢:采样过程中山东省地质矿产勘查开发局第六地质勘查院总工程师崔书学、高级工程师姜洪利等,山东黄金集团总地质师王昭坤高级工程师,山东焦家金矿高级工程师郑小礼给予了大力支持。样品测试中中国科学院地质与地球物理研究所谢奕汉、范宏瑞研究员研制了 SDT-5 型矿物包裹体爆裂仪,并在测试方法上给予技术指导;成文过程中北京大学徐九华教授和中国地质科学院矿产资源研究所徐文艺研究员提出许多宝贵意见,在此深表谢意。

参考文献(References):

- [1] 卢焕章,范宏瑞,倪培,等. 流体包裹体 [M]. 北京: 科学出版社, 2004:186-195.
Lu Huanzhang, Fan Hongrui, Ni Pei, et al. Fluid Inclusions [M]. Beijing: Science Press, 2004:186-195(in Chinese).
- [2] Yermakov P P. Use of gas-liquid inclusions in prospecting and exploration for post-magmatic ore deposits and blind ore bodies [J]. Int. Geol. Rev., 1967, (9):947-956 (listed as PP Ermakov), translated from Sovetsk. Geol., 1966, (9):77-90 (in Russian).
- [3] 喻铁阶,李克生,叶欣. 蒸发晕找矿法试验研究 [J]. 科学通报, 1978, 23(9):550-553.
Yu Tiejie, Li Kesheng, Ye Xin. Preliminary study of using steam aureoles for mineral exploration [J]. Chinese Science Bulletin, 1978, 23(9): 550-553(in Chinese).
- [4] 李裕祖,范启灏,莫金尤. 矿物包裹体研究在锡矿山矿田地质上的应用[C]//矿物中包裹体研究(二):全国矿物中包裹体成分及爆裂法会议论文选集. 北京:地质出版社, 1983:183-189.
Li Yuzu, Fan Qihao, Mo Jinyou. Application of the study of inclusions in minerals to the mine field geology in the Xikuangshan antimony deposit [C]//Fluid Inclusion Researches II—Selected Papers of National Conference on Studies of Analytical and Decrepitation Methods of Fluid Inclusions in Minerals. Beijing: Geological Publishing House, 1983: 183-189 (in Chinese).
- [5] 叶欣. 爆裂法在研究矿床成因及划分成矿阶段方面的应用[C]//矿物中包裹体研究(二):全国矿物中包裹体成分及爆裂法会议论文选集. 北京:地质出版社, 1983:150-153.
Ye Xin. Application of decrepitation method to the study of ore

- genesis and to dividing mineralization stages [C]//Fluid Inclusion Researches II—Selected Papers of National Conference on Studies of Analytical and Decrepitation Methods of Fluid Inclusions in Minerals. Beijing: Geological Publishing House, 1983:150–153 (in Chinese).
- [6] 魏家秀. 白象山铁矿流体包裹体热晕及矿床成因的研究 [J]. 中国地质科学院矿床地质研究所刊, 第 2 号 (总第 20 号), 1987: 111–128.
- Wei Jiaxiu. Study of thermal aureoles of fluid inclusions and metallogenesis of the Baixiangshan iron deposit, China[J]. Bulletin of the Institute of Ore Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, (2). 1987:111–128(in Chinese).
- [7] 谢奕汉, 李秉伦. 造岩矿物中气液包裹体热爆测温的可靠性[C]//中国科学院地质研究所. 岩石学研究 (第二辑). 北京: 地质出版社, 1983:117–126.
- Xie Yihan, Li Binglun. Reliability of thermal decrepitation measurements for gas–liquid inclusions in rock–forming minerals[C]//Proceedings of Petrological Research No.2. Beijing: Geological Publishing House, 1983:117–126 (in Chinese).
- [8] 谢奕汉, 王英兰. 小秦岭含金石英脉中包裹体的热爆曲线特征及其找矿意义[J]. 岩石学报, 1989, 5(4):15–21.
- Xie Yihan, Wang Yinglan. Characteristics of thermal decrepitation curves of fluid inclusions in Xiaoqinling (Mt. Little Qinling) auriferous quartz veins and its significance in mineral exploration[J]. Acta Petrologica Sinica, 1989, 5(4):15–21 (in Chinese with English abstract).
- [9] Burlinson K. Exploration for gold at Pine creek and Tennant, N.T. and at Halls creek, W.A., using the fluid inclusion decrepitation technique[C]. Aus. I.M.M. Conference, Darwin, N.T. August 1984. (abstract only).
- [10] Burlinson K. An instrument for fluid inclusion decrepitemetry and examples of its application [J]. Bull. Mineral., 1988, 111:267–278.
- [11] Burlinson K. Acoustic decrepitation as a means of rapidly determining CO₂ (and other gas) contents in fluid inclusions and its use in exploration, with examples from gold mines in the Shandong and Hebei provinces, China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23 (1): 65–71.
- [12] Rankin A H. Fluid inclusion anomalies as exploration guides for granite–hosted Sn–W mineralization:prospects for the future? [J]. Acta Petrologica Sinica, 2007, 23(1):3–14.
- [13] 宋明春, 崔书学, 伊丕厚, 等. 胶西北金矿集中区深部大型–超大型金矿找矿与成矿模式[M]. 北京:地质出版社, 2010:1–339.
- Song Mingchun, Yi Peihou, Xu Junxiang, et al. Prospecting and Mineralization Models of Deep –seated Large – to Giant Gold Deposits in the Northwestern Shandong Peninsula, China [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2010:1–339 (in Chinese).
- [14] 李士先, 刘长春, 安郁宏, 等. 胶东金矿地质[M]. 北京:地质出版社, 2007:423.
- Li Shixian, Liu Changchun, An Yuhong, et al. Geology of Gold Deposits in Jiaodong, Shandong Province [M]. Beijing:Geological Publishing House, 2007: 102–164 (in Chinese).
- [15] 宋明春, 伊丕厚, 徐军祥, 等. 胶西北金矿阶梯式成矿模式[J]. 中国科学(D), 2012(出版中).
- Song Mingchun, Yi Peihou, Xu Junxiang, et al. A step metallogenetic model for gold deposits in the northwest area of Shandong peninsula, Shandong Province, China [J]. Science in China (D), 2012(in press).
- [16] 赵人芳, 张来春. 对矿物包裹体爆裂法测温石英标样的几点意见[C]//矿物中包裹体研究(二):全国矿物中包裹体成分及爆裂法会议论文选集. 北京:地质出版社, 1983:121–123.
- Zhao Renfang, Zhang Laichun. Opinions on the quartz standards used in decrepitation method for inclusions in minerals[C]//Fluid Inclusion Researches II—Selected Papers of National Conference on studies of Analytical and Decrepitation Methods of Fluid Inclusions in Minerals. Beijing: Geological Publishing House, 1983:121–123 (in Chinese).
- [17] Bodnar R J, Binns P R, Hall D L. Synthetic fluid inclusions—VI. Quantitative evaluation of the decrepitation behavior of fluid inclusions in quartz at one atmosphere confining pressure [J]. J. Metamorphic Geology, 1989, 7:229–242.
- [18] Наумов В Б, Бал ицкий В С, Хегчиков Л Н.О Соотношении Температур образования, гомогенизации и декрепитации газовой–жидких включений [J], “Доклады АН СССР”, Т171, No.1, 146–148.
- [19] Leroy J. Contribution à l’étalonnage de la pression interne des inclusions fluides lors de leur décrépitation [J]. Bulletin Minéralogy, 1979, 102:584–593.
- [20] Swanenberg H E C. Fluid inclusions in high–grade metamorphic rocks from S.W. Norway [M]. Geologica Ultraictina, Univ. Utrecht., 1980, (25):147.
- [21] Тугаринов А И, Наумов В Б. Зависимость температур декрепитации от составагазово –жидких включений и от прочности и минералов [J], “Доклады АН СССР”, Т195, 1970, (1): 10–12.

The potential application of the decrepitation method of fluid inclusions to the exploration of deep-seated gold deposits in the Jiaojia gold belt, Shandong Province

CHENG Wei, SHEN Kun, YU Xue-feng, WANG Qiang, YU Lei-heng, QU You-lan

(Shandong Institute and Laboratory of Geological Sciences, Ji'nan 250013, Shandong, China)

Abstract: The decrepitation method of fluid inclusions was used in former Soviet Union and China in the 1970's and 1980's to help mineral exploration. This method can be used in combination with other measurements in mineral exploration. Previous studies of the decrepitation method have shown that the decrepitation intensity (frequency) near the ore body is high and will decrease gradually with the increasing distance from the ore body, which is believed to be caused by strong hydrothermal activity and relatively high abundance of fluid inclusions around the ore body. Hence, positive anomalies are likely to occur in/around the ore body. Samples were collected from 8 drill holes along No. 112 and 144 exploratory lines in the Jiaojia gold deposit in northwestern Shandong Peninsula, and quartz separates from the samples were analyzed by DT-4 acoustic decrepitemeter developed by Prof. Xie Yihan of the Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences in Beijing. The results show that the unaltered granites in the Jiaojia gold deposit exhibit high decrepitation frequencies and their decrepigrams (decrepitation curves) have a pronounced peak with normal distribution in the temperature interval of ca.360~450°C and a sharp peak at 573°C which is the phase transition temperature of α/β -quartz. With the increase in alteration intensity, the decrepitation frequencies decrease from the K-feldspathization zone through the pyrite-phyllitic alteration zone to the gold ore. The decrepigrams of gold ores in the mineralization center become weak-waved curves or nearly horizontal lines with very low decrepitation frequencies, and negative steam aureoles occur around the gold ore body. Hence the unique decrepigrams and negative steam anomalies can be applied to gold exploration in northwestern Shandong peninsula.

Key words: Jiaojia gold deposit; fluid inclusion; decrepitation method; steam aureole; negative anomaly

About the first author: CHENG Wei, female, born in 1978, engineer, engages in the study of geology and mineral resources; E-mail: weiwei0208@sohu.com.