江西临川地区相山铀矿田构造应力场分析

陈正乐[1],杨 农[1],王平安[1],宫红良[1],韩凤彬[1],周永贵[1],
邵 飞[2],唐湘生[2],徐金山[2],喻建发[3]

CHEN Zheng-le[1], YANG Nong[1], WANG Ping-an[1],
GONG Hong-liang[1], HAN Feng-bin[1], ZHOU Yong-gui[1],
SHAO Fei[2], TANG Xiang-sheng[2], XU Jin-shan[2], YU Jian-fa[3]

1. 中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081;
2. 核工业 270 研究所,江西 南昌 330200;
3. 中核抚州金安铀业有限公司,江西 乐安 344300

1. *Institute of Geomechinacs, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing* 100081, *China*;
2. *Research Institute No.*270, *CNNC, Nanchang* 330200, *Jiangxi*, *China*;
3. *Fuzhou Jin'an Uranium Limited Company, CNNC, Le'an* 344300, *Jiangxi*, *China*

摘要:相山铀矿田是中国最大的、与火成岩有关的中低温热液型矿床,断裂构造控矿特征明显。目前该矿床的后备资源出现危机,因此开展矿田构造研究,为深部及其外围找矿提供科学指导迫在眉睫。在野外观测分析和节理、擦痕实地测量的基础上,利用构造解析法、共轭剪节理分析法、断层擦痕反演模拟法及 X 光岩组法等,通过吴氏网投图分析和计算机的反演计算,确定了相山铀矿田多期次构造活动的变形特征及其主应力方向;并根据构造变形叠加关系及其成岩时代的确定,推断了应力作用的期次和时代。为此,将相山铀矿田的构造应力场划分为 3 期 6 个阶段,包括:成矿前的基底变形和早期火山活动阶段,早期矿化蚀变和第一、第二主成矿阶段,及其成矿期后阶段,矿体局部被错断;并深入分析了不同阶段构造活动及其铀成矿特征,探讨了区域构造应力场的演变与铀成矿作用关系,认为两者具有一致性特征,进而指出了区域富大矿体产出的有利构造部位。

关键词:相山铀矿田;构造应力场;构造控矿

中图分类号:P619.14; P542 **文献标志码**:A **文章编号**:1671-2552(2011)04-0514-18

Chen Z L, Yang N, Wang P A, Gong H L, Han F B, Zhou Y G, Shao F, Tang X S, Xu J S, Yu J F. Analysis of the tectonic stress field in the Xiangshan uranium ore field, Linchuan area, Jiangxi, China. ***Geological Bulletin of China,*** **2011,30(4):514–531**

Abstract: The Xiangshan uranium ore-field is the largest volcanic-related meso-epithermal deposit in China and the uranium-mineralization is tightly controlled by fault activities. As exploited and doveloped for many years, the ore-reserve resource of the deposit is in current crisis, although the potential reservoir is probably great. Therefore, the study in ore-field structures is imminent to provide scientific guidance for ore-prospecting in the deep and surrounding areas. This paper mainly presents field measurement results of joints and fault scratches to identify features of tectonic activities and the principal stress direction, using traditional and modern methods in tectonic stress field research. Stages and times of the tectonic stress field are also determined based on successively superimposed deformation relations and diagenesis ages of volcanic rocks. The result showed that the tectonic stress field in the Xiangshan ore field can be divided into three stages and six periods. Basement deformation and two phases of volcanic activities occurred before the metallogensis, and main mineralization stages could be divided into three periods, and uranium ore bodies were locally dislocated by fault activities after the formation

收稿日期:2010-11-05;**修订日期**:2011-02-16

资助项目:全国危机矿山接替资源找矿项目《华北陆块铁矿成矿规律总结研究》(编号:20089950)和《江西省乐安县山南铀矿接替资源勘查》(编号:200436009)

作者简介:陈正乐(1967-),男,博士,研究员,博士生导师,从事矿田构造、矿床学和区域构造研究。E-mail:chenzhengle@263.net

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

of ore-deposits. Characteristics of different phases of tectonic activities and its relationship to the uranium mineralization were additionally discussed, suggesting that the uranium mineralization was consistent with the evolution of the regional tectonic stress field. Favorable structural ore-forming areas for grade-rich ore-bodies in the Xiangshan uranium ore-field were further pointed out.

Key words: Xiangshan uranium ore-field; tectonic stress field; fault-controlling deposit

构造应力场是指在一个空间范围内构造应力的分布，构造应力场研究是指在确定各地的点应力状态(应力方向和大小)的基础上,研究在一定区域范围内各个构造活动时期的构造应力分布[1],它是矿田构造研究的重要方面[2-3],也是区域地质找矿预测的基础。构造应力场研究中最主要的是确定 3 个方面的内容,即定时、定向和定量。定时就是研究各地质时期构造形变的相对次序，确定各构造应力状态的形成时代。定向就是用各种构造形迹来确定某一时期内构造应力的方位，即 3 个主应力轴的方位，通常最重要的是确定最大主压应力轴(σ_1)的方位。定量就是确定主应力的大小。构造应力场研究最基本的方法是在查明构造形变的空间分布及其运动特征的基础上进行的,即利用岩石中已存在的构造形迹和形变特征来反推形变作用发生前后的构造应力状态。随着现代地质测试技术的发展，构造应力场的研究手段和研究方法日趋丰富。在确定主应力方向上,除了可用传统的节理、小褶皱、羽列、岩石组构等方法外,还可运用光轴 C-C 法、微破裂法、方解石机械双晶法、断层擦痕的计算机模拟分析方法等;对确定主应力大小可以运用常见矿物(如石英、辉石、橄榄石等)的显微构造法、动态重结晶粒度法、亚颗粒粒度法和晶格位错密度法，也可以应用全岩岩石声发射(AE)法[1-4]。总之,构造应力场的研究已从定性向半定量和定量方向发展，并能模拟和再现出越来越接近地质实际的应力场状态。

相山铀矿田由多个矿区组成，包括山南矿区的横涧矿区和岗上英矿区、沙洲矿区、邹家山矿区、居隆庵矿区、云际矿区等,是中国最大的硬岩型铀矿之一,为与火成岩有关的中、低温热液型矿床[5-6]。对于该矿床的岩石学、成矿地质条件及其矿化蚀变特征,前人已有大量深入的分析和研究[5-18],然而矿田构造研究仍然相当薄弱[19]。此外,经长期的生产和勘探开发,目前该矿床后备资源出现危机,但矿床深部和外围仍有巨大的找矿潜力[17]。因此,开展矿田构造研究,分析控矿构造特征及其力学性质演变规律,恢复构造应力场演化过程,探索构造控矿规律,进而预测铀矿化富集的有利部位，为相山铀矿田下一步勘探工作选区提供依据迫在眉睫。

本文在危机矿山接替资源找矿项目的资助下,利用传统和现代的构造应力场研究手段和方法,系统分析了相山铀矿田构造应力作用的方向和期次,进行了构造应力场期次的划分，初步探讨了区域构造应力场演化与铀成矿作用之间的关系，并指出了区域富矿体的有利成矿构造部位，为矿区的新一轮找矿提供指导。遗憾的是,由于缺乏理想的可测试对象,没有开展主应力值大小的测定。

1　相山铀矿田区域地质背景与矿床特征

相山铀矿田位于扬子准地台与华南褶皱系的过渡部位[20-21],处在 NE 向赣杭火山岩成矿带与 NNE 向大王山-于山花岗岩成矿带交会部位的相山大型塌陷式火山盆地中(图 1)。该区地质发展历史复杂,构造运动和岩浆活动频繁,尤以中生代强烈的火山活动最为显著[20-22]。晚侏罗世大规模的火山活动形成了赣杭火山岩带，白垩纪火山活动减弱并向东迁移,发生了高强度、大规模、短时限的铀成矿作用，形成了以相山火山盆地铀矿床为代表的数十个铀矿床[17,21-22]。

1.1　相山铀矿田地质背景

相山火山塌陷盆地为 2 层结构[11,16](图 1),基底震旦系为浅变质岩,岩性以千枚岩、片岩为主,其内有加里东期花岗岩侵位,部分为下石炭统、上三叠统碎屑岩系,仅在火山盆地的东侧出露;盖层为一套上侏罗统火山岩系及出露于火山盆地西侧的白垩纪红层。火山岩系由酸性、中酸性火山熔岩、火山碎屑岩及少量正常沉积夹层构成,总厚度大于 2000m,分为打鼓顶组(J_3d)和鹅湖岭组(J_3e),每组的特点总体是由沉积到爆发再到喷溢式侵出，由此构成一个大的火山喷发旋回[9]。下部打鼓顶组由砂砾岩、砂岩、熔结凝灰岩、流纹英安岩等组成,上部鹅湖岭组由砂砾岩、晶玻屑凝灰岩和巨厚层碎斑熔岩组成。大规模火山活动期后次火山岩侵入，以不规则的弧形和半环形围绕盆缘的北、东、南部出露,岩性主要为花岗斑岩和似斑状花岗岩。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

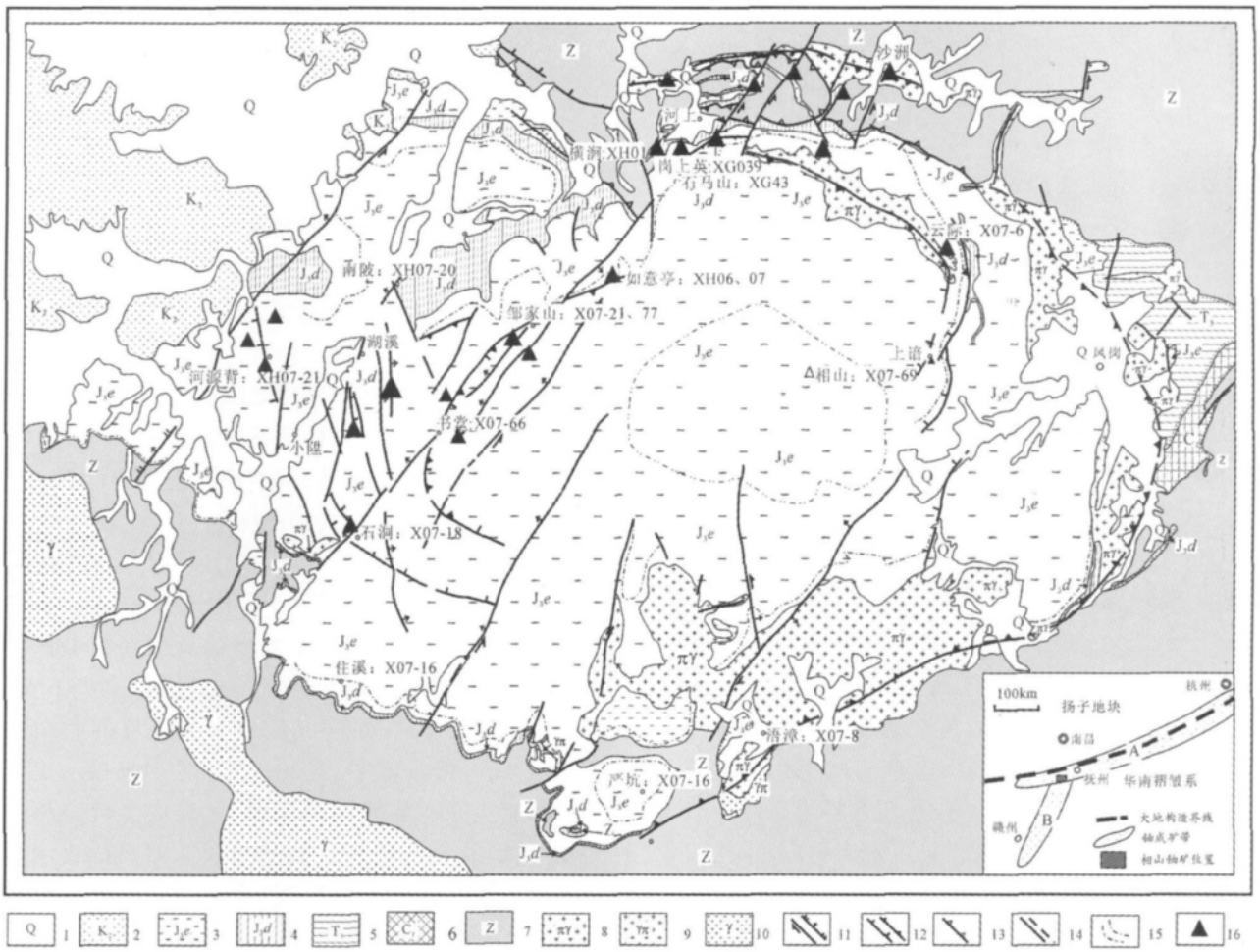


图 1 相山铀矿田地质构造简图及其大地构造位置图(据参考文献[6]修改)

Fig. 1 Simplified geological map of the Xiangshan uranium ore-field and its tectonic location

1—第四系;2—上白垩统;3—上侏罗统鹅湖岭组;4—上侏罗统打鼓顶组;5—三叠系;6—石炭系;7—震旦系;8—似斑状花岗岩;9—花岗斑岩;10—加里东期花岗岩;11—正断层和走滑断层;12—火山塌陷构造;13—逆断层;14—火山岩性界线;15—推测性质未明断层;16—铀矿床。图中标出了部分野外观测点的位置(如河源背:XH07-21 等)

相山铀矿田基底构造主要由 EW、NE 及 SN 向 3 组构造组成，也存在 NW 向构造，主构造线呈 EW 向[23,25]。盖层构造以 NE 向断裂构造为主导，NW 向次之，与火山构造(包括火山塌陷构造)一同组成环状交织的构造格局[7,26]。线性断裂构造多是基底断裂的继承和发展，火山作用过程中岩浆活动、重力等作用下产生的火山塌陷构造也往往利用、迁就了基底构造。

1.2 相山铀矿田矿床和矿化特征

相山盆地铀矿床主要以 2 条矿集带的形式产出[11,15]：一条呈 EW 向产于矿田的北部，矿床多定位于 NE 向与 EW 向构造、环状火山塌陷构造的复合部位(图 1)，往往赋存于花岗斑岩、似斑状花岗岩及其内外接触带中(图 2)，包括沙洲、巴泉、红卫等矿区，习惯上称为次火山岩型铀矿床；另一条呈 NE 向展布于矿田的西部(图 1)，矿床往往受 NE 向构造与 EW、NW、近 SN 向构造及火山塌陷构造的复合控制，矿体形态以脉状为主，次为透镜状或似层状(图 3)，以邹家山矿床、居隆庵矿床为代表，往往被称为火山岩型铀矿床[6-7]。事实上，相山铀矿床内的矿体产出主要受断裂构造及其裂隙的控制，矿化体直接发育于主断裂或紧靠主断裂的破碎带内及其旁侧的次级裂隙构造中(图 2~图 4)，矿体对岩性没有选择性[16]，只与断裂破碎带的发育程度有关(图 2)，

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

为中—低温热液型铀矿床[6]。主断裂中常形成大脉型矿体(图 4),在数量大、间距小、发育密集的裂隙带中形成脉群状矿带和矿体[5-6,16](图 2、图 3)。

相山铀矿田围岩蚀变具多阶段和空间叠加的特点[16,18,27]。成矿前蚀变可分为碱性蚀变[8]和酸性蚀变 2 种,前者以钠长石化为代表,发育于矿田的北部和

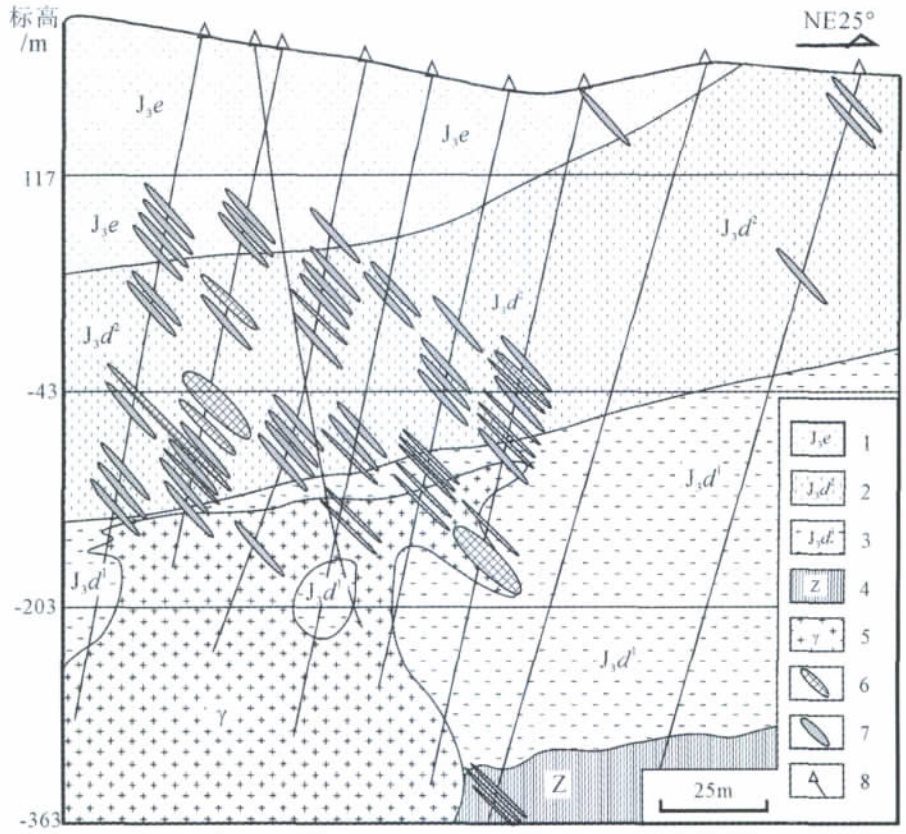


图 2　岗上英矿区 71 号勘探剖面简化图(据参考文献[15]修改)

Fig. 2　Simplified profile of prospecting line No. 71 in Gangshangyin deposit, Xiangshan uranium ore-field

1—鹅湖岭组;2—打鼓顶组二段;3—打鼓顶组一段;4—震旦系;5—似斑状花岗岩;6—矿体;7—矿化体;8—钻孔位置。矿体和矿化体也为裂隙带发育的位置,并局部放大

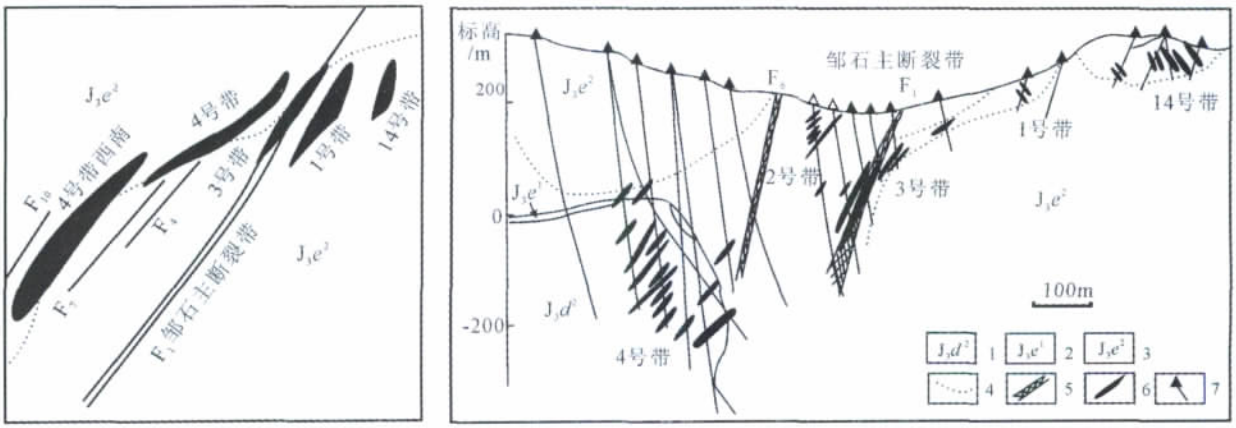


图 3　邹家山矿区矿体分布位置与主断裂关系示意图(据参考文献[10]修改)

Fig. 3　Sketch map showing the relation between the distribution of ore bodies with the main fault

1—打鼓顶组二段;2—鹅湖岭组一段;3—鹅湖岭组二段;4—灰色蚀变界线;5—断裂破碎带;6—矿体;7—钻孔位置

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

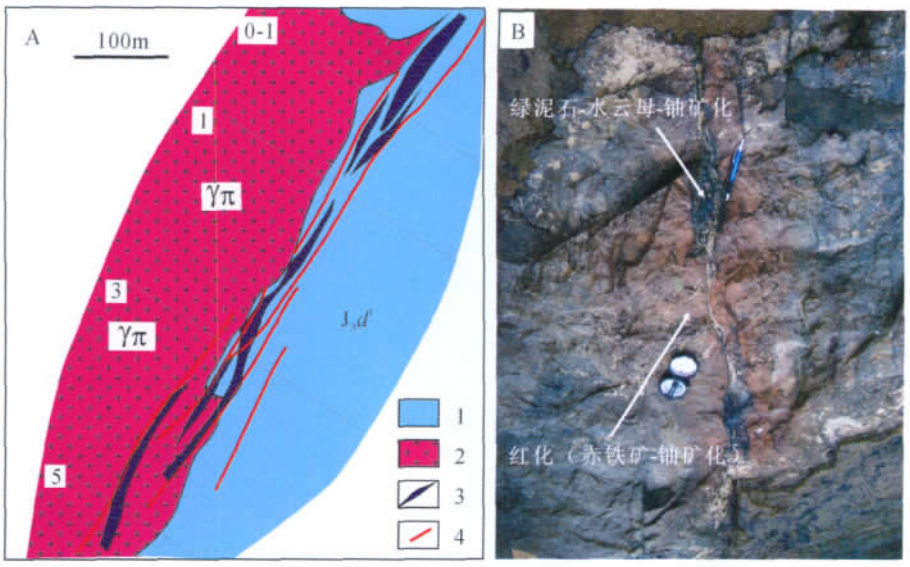


图 4 主断裂旁侧的分支断裂和断裂弯曲控矿示意图

Fig. 4 Sketch map of ore-bodies controlled by branch faults near the main fault and the fault bending

A—横洞矿床 117m 中段，主断裂呈舒缓波状，矿化发育于分支断裂与主断裂复合处(1—打鼓顶组；2—花岗斑岩；3—矿体；4—断裂带；0-1 等为勘探线编号)；B—石马山碎斑熔岩沿裂隙发育 2 期矿化（早期赤铁矿化，晚期绿泥石-铀矿化），晚期铀矿化发育在断裂弯曲-膨大处

东部，花岗斑岩钠长石化极为强烈；后者以水云母化为代表[12]，主要发育于矿田西部，沿火山塌陷构造、断裂构造可形成宽达几十米至数百米的蚀变带。成矿期蚀变可分为早、晚 2 个阶段，早期阶段以赤铁矿化为主，并伴随有钠长石化、绿泥石化、水云母化和碳酸盐化；晚阶段以萤石化、水云母化、绿泥石化为主，并伴随有碳酸盐化、黄铁矿化。矿后期蚀变主要为碳酸盐化、硅化、萤石化等，呈脉状充填于裂隙之中。铀主要以沥青铀矿、钛铀矿、铀钍石、铀石等矿物形式存在于矿石中，其中沥青铀矿多呈斑点状、发丝状、肾状和半圆形胶状体充填在矿石内，常见有黄铁矿、辉钼矿、方铅矿、闪锌矿、黄铜矿等金属矿物与铀矿物相伴生[16]。

邵飞等[17]统计了相山铀矿田不同矿床铀矿石的 U-Pb 同位素测年资料[28]，发现铀-赤铁矿型矿石同位素年龄主要介于 120~140Ma 之间，铀-绿泥石型矿石同位素年龄集中于 105~125Ma 之间，铀-萤石型矿石的成矿年龄为 90~110Ma。

2 构造应力方向的确定

2.1 区域构造分析法

相山火山盆地区域的基底构造前人研究较多[17,19,21,23,25-26,29-30]，主要表现为近 EW 向的复式褶皱构造及其断裂带、变质线理，同时发育有 NE 向的压扭性断裂构造，反映出近似 NS 向的主压应力作用，形成的时代应为前燕山期(印支期)。

根据邱爱金等[20,29]的研究，相山铀矿田第一旋回的火山岩浆活动受德兴-遂川断裂右旋走滑拉分作用的控制，第二旋回的喷发与德兴-遂川断裂的左旋走滑拉分作用相关，推测相山铀矿田在第一旋回喷发期间为近 EW 向的挤压，第二旋回喷发期间为近 NS 向的挤压。

2.2 矿田构造解析法

在相山横洞和岗上英矿区内主要发育一系列 NNE 和 EW—NWW 向的断裂破碎带[15]。根据其力学性质的变化，EW—NWW 向断裂以压性为特征，早期为右旋，晚期为左旋，NNE 向断裂早期为右旋压扭，晚期为左旋张扭，最晚期为张扭正断，大致可以推测该地区经历了 3~4 期的应力作用：最早期为近 EW 向的挤压，中期为 NNW 方向的挤压，最后一期为近 NS 向的主压应力作用。

在邹家山矿区，发育的主要为 NE 向邹石断裂及其派生的次级断裂。根据笔者的野外观测分析和前人的资料推测[7,31]，邹石断裂成矿期至少经历了 3

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

个期次的构造变形:早期为压性碎裂,中期为张性正断,晚期为左旋走滑。根据断裂的走向和力学性质的变形,不难推测区域的应力作用方向:早期应为NNW向的挤压,中期为近EW向的拉张,晚期为近似NS向的挤压,导致了NNE向断裂的左旋走滑。

沙洲矿区内主要的区域性构造为近EW向的大断裂,控矿构造为NWW向裂隙和NNE向断裂[7]。控矿构造的力学性质分析表明NWW向断裂主要经历了2期的构造活动:早期为压扭,晚期为张性正断;NNE向断裂也是2期:早期压扭,晚期为左旋正断。区域上,根据前人的资料推测[7],区域上近东西向的芜头-沙洲断裂总体上早期为压性构造,晚期为张性,导致了似斑状花岗岩顺断裂带侵位。因此,根据断裂的走向和活动特征,沙洲矿区也显示出至少3~4期的区域构造变形:早期为近南北向的挤压,形成近东西向的压性断裂,中期为NNW向挤压,导致NWW向断裂呈现压扭性质和NNE向断裂的压性变形,第三期为近NS向的拉张,表现为NWW向断裂的拉张变形,最晚期为近似NS向的挤压,导致NNE向断裂的左旋张性正断。

综合上述区域构造和相山不同矿区控矿断裂构造力学性质的变化,显示出相山矿田从印支期至今至少经历了6期应力作用(表1)。

2.3 节理分析法

在相山花岗斑岩、鹅湖岭组碎斑熔岩内节理十分发育,倾角较陡,表现为张性或张扭性质,但局部也有一些压性节理(破劈理)发育,为确定应力作用方向良好的测试对象。本次野外研究,共计测量地表点12个,遍及整个矿区,包括岗上英井下-43m中段1个点,每个点统计的节理数目一般不少于25条,以保证统计结果的可靠性。根据统计结果,利用吴氏网进行投图分析(上半球投影),得到节理走向玫瑰花图,同时利用节理的法线投图,得到节理法线极密图(图5)。

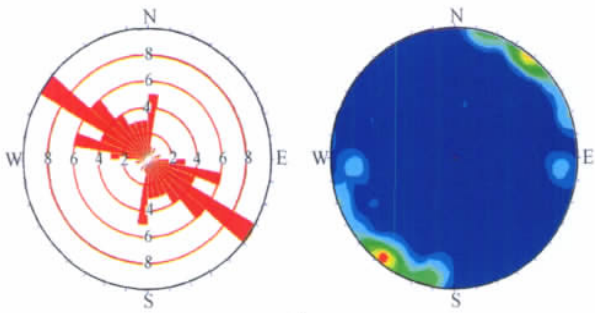
从图5不难发现,在山南矿区内发育的节理主要集中在2个区间内:走向近N5°~NE40°和走向NW300~310°,主要表现为张性—张扭性;但在岗上英-43m中段井下4支巷144号矿体周围的节理玫瑰花图中(图5-E,XG31观测点),除上述的NNE和NW300~310°外,还出现了NW340~350°和NWW270~290°方向的优选集中区间,根据井下进一步观测,发现其中NWW270~290°方向的节理大都呈现压扭性特征,NW方向的节理以张性为特征。野外观测发现,严坑村北碎斑熔岩中发育的节理主要为压扭性节理(图5-X07-11,图版Ⅰ-A),在节理面上局部还可以见到一些擦痕,节理走向集中在NE30~50°,另外一组方向集中在NW300~310°之间,因此该点的节理统计分析表明区域的主压应力方向为近NS向;住溪村东的观测点(图5-H,X07-16)靠近邹石断裂带(图1),因此节理走向主要集中在NE10~20°之间,次级集中在NW290~300°和NE30~40°两个集中区,同样表明了区域上近NS向的挤压应力作用;石洞村西小沟观测点(图5-I,X07-18)十分接近邹石断裂带(图1、图版Ⅰ-B),节理有2个集中区:NW310~320°和NE10~20°之间,NW向的密集区与该区大量发育的NW向断裂走向一致,NE走向的节理与邹石断裂带平行,反映出该区的节理主要受2个方向的断裂控制;南陂采石场(X07-20)节理集中在NNE10~20°之间,与该点主要受控于NNE走向的断裂方向一致(图1),推测区域经受NS向的挤压;书堂村NE小沟邹石断裂带旁侧的节理(图5-J,X07-66)(图1)集中在NW310~320°之间,次级集中区为NE50~60°,推测也受控于近NS向的挤压应力作用;相山山顶(图5-K,X07-69)节理走向集中在NNE0~10和NWW280~290°之间,推测挤压应力方向为NW

表1 矿田构造解析推测的主应力作用方向

Table 1 Principal stress direction inferred from the analyses of ore-field structures

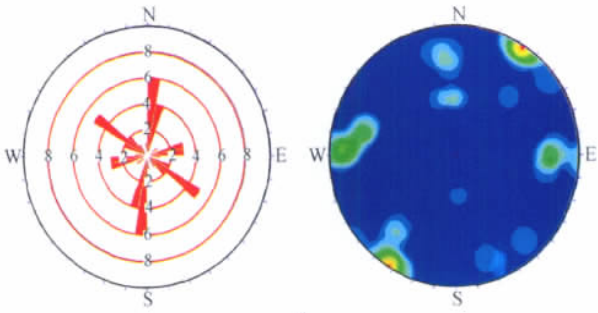
序　号	1	2	3	4	5	6
时　期	前燕山期(印支期)	燕山期	燕山期	燕山中期	燕山晚期	喜马拉雅期
构造形迹	EW向压性构造	NS向压性构造	EW-NWW向左旋压扭、NNE右旋压扭	近EW向右旋压扭	NNE向左旋张扭	NNE向张扭正断
推测主压应力方向	近NS向	近EW转变为近NS向	NNW向	近EW向	近NS-NNE向	近NS-NNE向

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



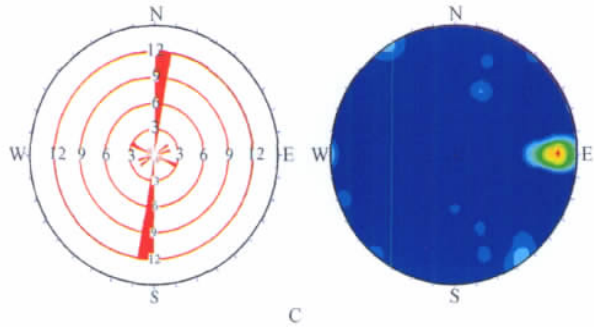
A

XH015 河上村水坝(15 条)



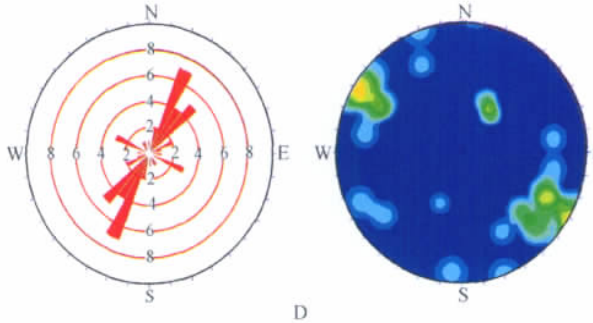
B

XH018 岗上英山顶鞍部(31 条)



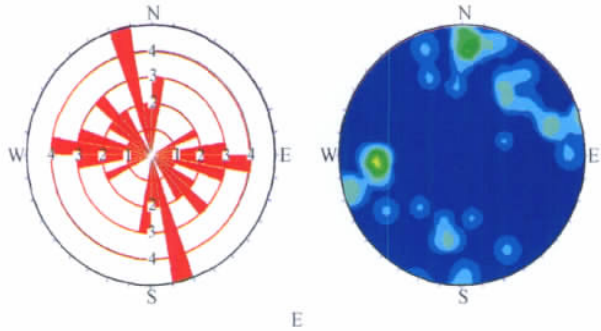
C

XH019 岗上英山顶山梁(24 条)



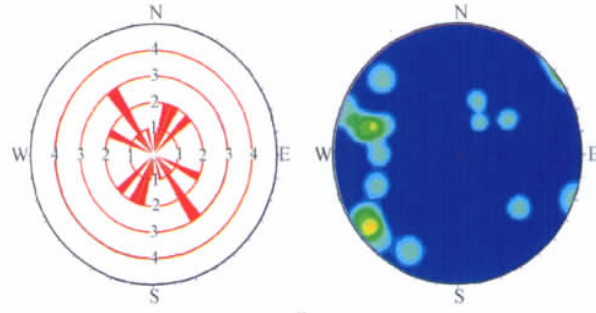
D

XG43 石马山(30 条)



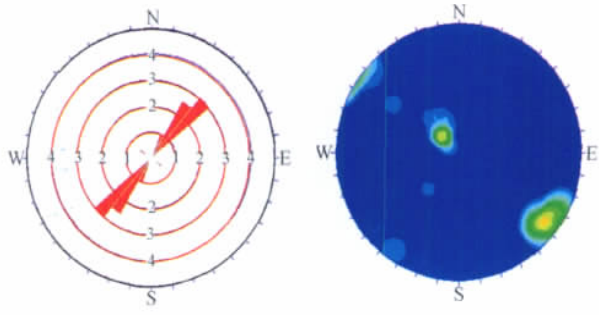
E

XG31 岗上英井下-43m 中段(32 条)



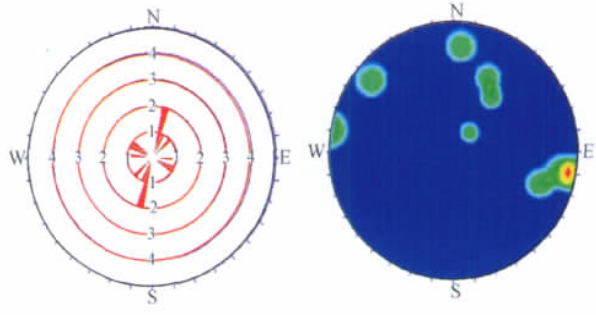
F

XH07 如意亭(15 条)



G

X07-11 严坑(26 条)



H

X07-16 住溪村东(8 条)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

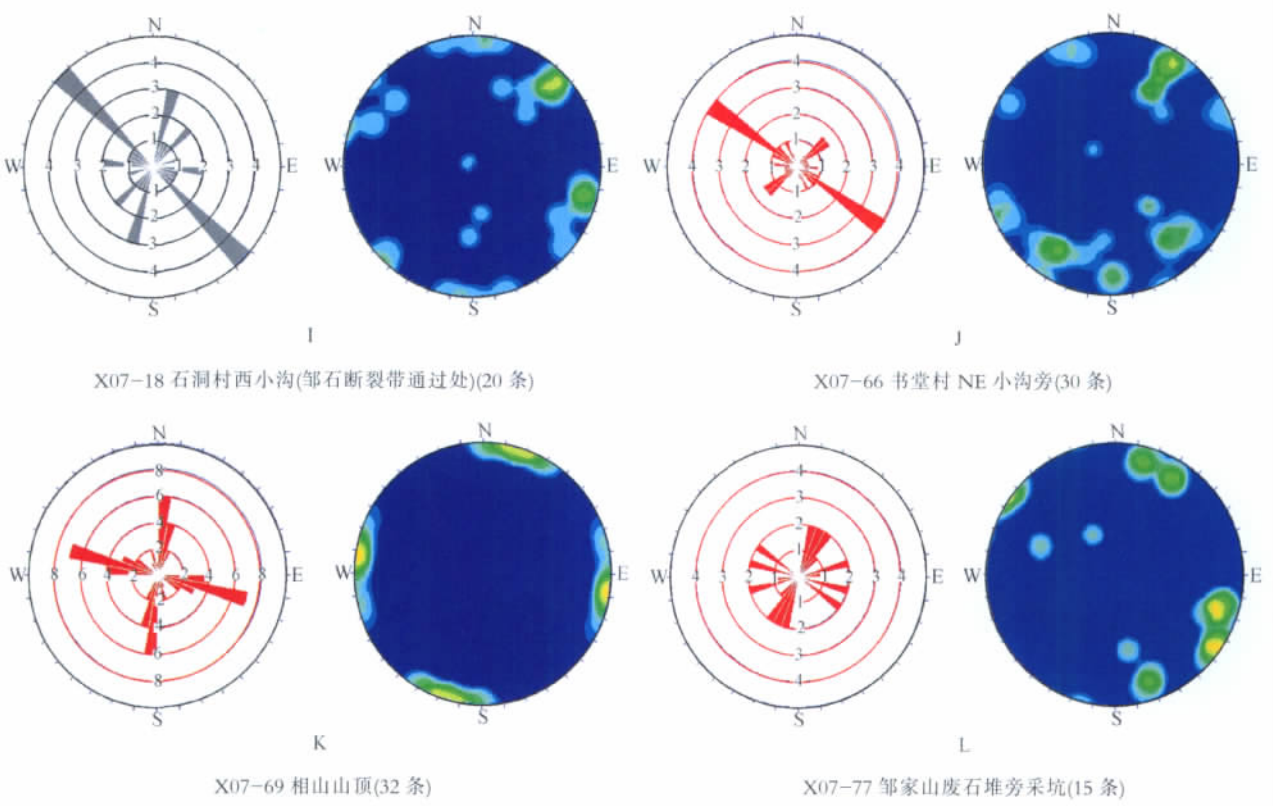


图 5　相山铀矿田节理走向玫瑰花图和节理法线极点图

Fig. 5　Rose-diagram of the strike and polar-diagram of the normal line of joints in the Xiangshan uranium ore-field

向;邹家山废石堆旁侧采坑中观测点(图 5-L,X07-77)位于邹石断裂带的东侧,节理走向集中在 NS 向,表明挤压应力方向为NNW—近 NS 向或者近东西向的拉张。

在节理法线极密图上(图版 Ⅰ),节理法线主要发育点极密。观测点 XH007:295°∠15°和 235°∠5°;XH015:35°∠0°和 275°∠5°;XH018:35°∠0°和 95°∠5°;XH019:90°∠15°、325°∠0°;XG043:300°∠0°和 25°∠55°;岗上英井下:265°∠25°、245°∠5°、5°∠15°和 35°∠30°;X07-11:128°∠10°;X07-16:100°∠10°;X07-18:45°∠5°;X07-20:280°∠30°;X07-66:35°∠10°;X07-69:110°280°∠0°和 15~195°∠0°。X07-7 呈现一个不完全的大圆环带。不难发现,点极密大都位于大圆环带附近,表明其节理的产状都较陡,σ_1 和 σ_3 方向都为近水平,而 σ_2 方向为近直立,这与区域构造分析结果基本一致。

根据节理的集中优势方位、节理法线的点极密发育情况,可以推测相山铀矿田区域上可能主要有 3 个方向的主压应力作用(不同期次):NW335~345°方向的主压应力(σ_1 方向 XH007:345°、XH015:335°、XH018:335°和岗上英井下:335°)、NNE15~25°方向的主压应力(σ_1 方向 XH019:25°、XG43:15~20°)和近 NS 向的挤压应力。

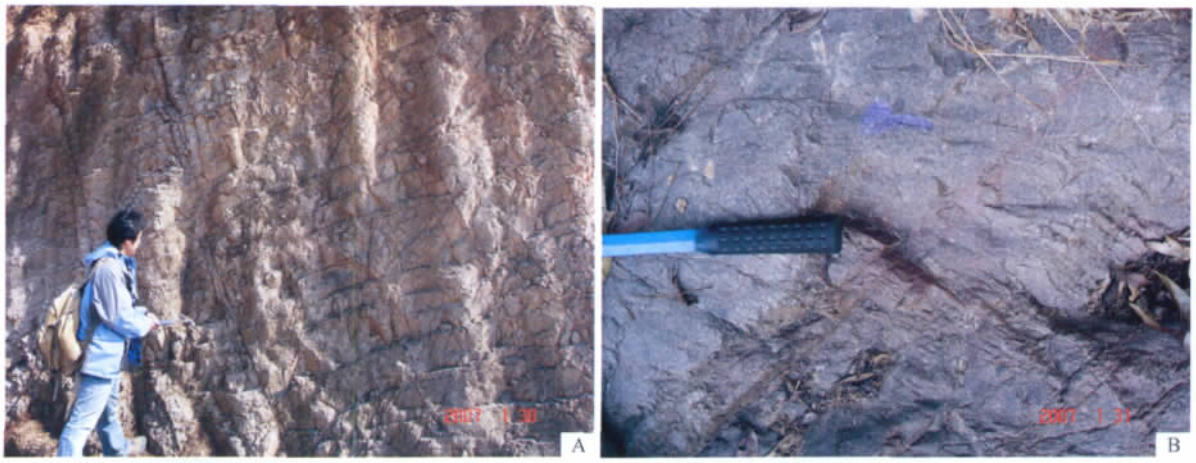
2.4　共轭剪节理法

共轭剪节理是指在一定应力作用下,沿 2 组最大剪切面发育的节理。共轭剪节理具有成对出现、互相切割或成节理叉、折尾及菱形结环、2 组相对运动方向相反等特点。2 组剪节理的发育程度一般相似,但有时特别是当先出现低序次的张扭性或扭性羽列而另一组为扭张性羽列时,2 组的发育程度可有明显的差异。2 组剪节理夹角被 σ_1 和 σ_3 平分,交线为 σ_2 轴的方位。据此,在野外根据剪节理的发育特点进行分期、配套的基础上,可以分析点应力状态,确定主应力方向和进行构造应力场分析。

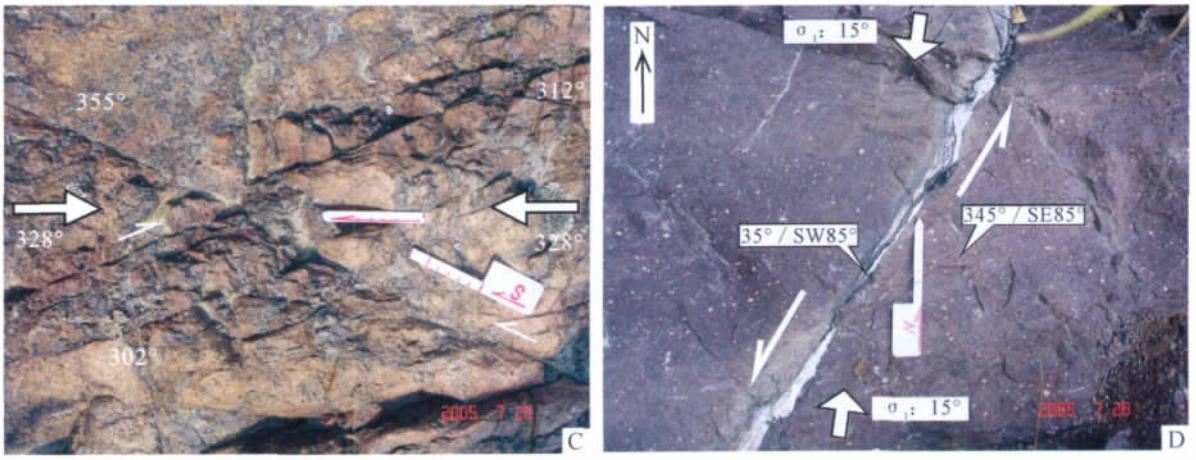
相山铀矿田主要为脆性变形,岩石中共轭剪节理比较发育。如图版 Ⅰ-C 所示,鹅湖岭组碎斑熔岩中发育的 2 组共轭节理产状为 355°/SW75°和 302°/NE85°,在 NW302°走向的节理旁侧还发育有次级

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

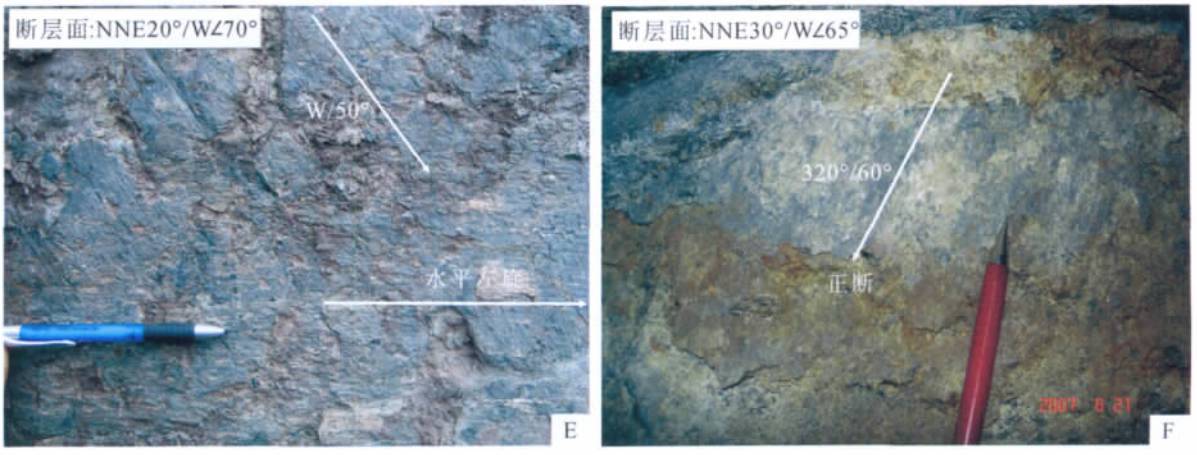
图版 I Plate I



严坑村北碎斑熔岩中的密集压扭性节理带(A);石洞村旁侧碎斑熔岩中的张节理(B)



河上村小水溪中鹅湖岭组碎斑熔岩中发育的共轭剪节理(C)和如意亭丁垄采石场打鼓顶组流纹英安岩中的张扭节理(充填方解石脉)及其旁侧的羽状张节理(D)



横洞采坑 NNE 端和邹家山井下-170m 中段 NNE 向断层面上发育的多期次擦痕,早期水平左旋被晚期 W 倾正断的擦痕切割(E),最晚期发育沿倾向正断的擦痕(发育于断层泥之上)(F)

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 2　相山铀矿田共轭剪节理及其确定的主应力方向

Table 2　Principal stress direction inferred from conjugated shear joints in the Xiangshan uranium ore-field

序号	观测点号	位　置	岩　性	共轭剪节理产状		σ_1方向
				节理(1)	节理(2)	
1	XH07	如意亭剖面	打鼓顶组流纹英安岩	43°/NW80°	340°/SW70°	12°
2	XH015	河上村小水溪	鹅湖岭组碎斑熔岩	352°左旋	306°右旋	329°
3	XH015-1	河上村小水溪	鹅湖岭组碎斑熔岩	355°/SW75°左旋	302°/NE85°右旋	328°
4	XH015-2	河上村小水溪	鹅湖岭组碎斑熔岩	351°/SW78°左旋	298°/SW83°右旋	324°
5	XH018	岗上英山顶鞍部	鹅湖岭组碎斑熔岩	0°/W84°左旋	312°/NE62°右旋	336°
6	XH019	岗上英山顶	鹅湖岭组碎斑熔岩	331°/NE82°左旋	287°/NE81°右旋	309°
7	XH021	邹家山村小桥底	鹅湖岭组碎斑熔岩	306°/NE80°左旋	355°/SW52°右旋	331°
8	X07-18	石洞村西小沟	鹅湖岭组碎斑熔岩	290°/NE65°右旋	23°/NW80°左旋	335°

张裂隙(NW312°走向)。据此判断:NW302°方向裂隙为右旋张扭,NNW355°方向的节理错移了NW302°方向的节理,呈现为左旋张扭,σ_1方向为近NW328°走向,σ_2则近于直立,σ_3方向为NE58°。

在相山铀矿田范围内共测得8对共轭剪节理(表2),根据野外判断的运动方向和相互切割关系,可求得主应力方向主要可分为2组:NW320~330°之间和NE12°,代表了2期的应力作用。

2.5　雁行状(羽状)排列张节理分析法

在区域应力作用下,在剪节理旁侧往往会发育呈雁行状排列或斜列的羽状张节理。羽状张节理往往是低序次的张裂,有时单组出现,有时共轭2组同时出现,是判断剪节理运动学指向的有效标志。因此可以根据羽列中张节理的斜列方式、张节理单体的产状、轴线的产状判断主剪节理的活动方向,进而确定研究点的应力作用方向。如在如意亭剖面丁垄采石场内,可以在打鼓顶组流纹英安岩中见到一组充填有方解石脉的张扭性节理,方解石脉宽可达6~8cm,发生热液蚀变,出现褪色现象(图版Ⅰ-B);在其旁侧发育了一系列羽状张节理,部分节理内也充填有密而细的方解石脉:主节理产状35~40°/SW85°,旁侧羽状张节理NW345~NNE10°/NE-SE85~90°,根据羽状节理产状和主节理产状,可以推断NE35~40°走向(该方向的走向与石马山节理的优选集中方位相同)的节理为左旋张扭,因此可以推测区域的主压应力方向为NNE15~25°。

2.6　断层擦痕分析法

断层两侧的岩石相对运动、磨擦,在断层面上留下擦痕、阶步等反映运动方向的痕迹。断层擦痕法是一种确定主应力方向比较有效的的统计方法[32]。断层擦痕法的前提条件是:①断层擦痕方向与该面上的最大剪切应力方向平行,即最大剪应力方向就是擦痕方向。根据这一假设,擦痕的方向是应力张量配置的函数。②在研究的区域内存在着一个均匀的应力场,介质是均匀各向同性的。③断层不影响应力场的均匀性,断层面不发生转动。根据上述的前提条件,可以推断断层面上的剪应力方向与擦痕方向是一致的。这样若已知某一地区断层擦痕的资料,就可以反演该区的构造应力场。

根据对区域资料的分析,可以认为相山铀矿田总体上是相对均匀各向同性的,基本上能满足擦痕法的假设前提,因而矿区内各处测得的断层擦痕可作为一个整个均匀块体内各处的断层运动痕迹,能反映块体内统一的构造应力状态。在野外实地测量时,如果一个断面上发育多组方向的擦痕,则根据擦痕的相互切割关系,野外对擦痕进行活动期次的划分,分别测量不同活动时期擦痕的产状,分别处理。如果无法区分,则根据室内利用吴氏网投图分析,如果能区分出明显不同期次活动的迹象,则重新对数据分组处理(如观测点XH006、XG039-2),如果无法明显区分,则都按一期次断层活动的结果处理(XG038点)。其次,在测量时尽可能多地测量一个点的数据,以保证统计结果的可靠性。但有时由于擦痕发育不理想,或者由于其他条件的限制,只在局部范围内对擦痕的方向进行统计,或者只测量少数几条有代表性的擦痕产状。

本次擦痕的室内计算利用了法国M. J. Mercier实验室提供的擦痕计算机模拟程序(Version 4.0 E.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3　断层擦痕法计算结果和吴氏网投图推断结果

Table 3　Principal stress direction inferred both from computer-modeling calculation and analyses by Wulff projection net of fault scratches in the Xiangshan uranium ore-field

序号	点号	位　置	岩性或构造部位	主应力方向			相对时间或备注
				σ_1	σ_2	σ_3	
1	XH01	N27°36'09.8" E115°55'22.5"	横涧露天采石场南端	NWW NNW			早期 晚期
2	XH02	N27°36'23" E115°55'20.7"	横涧露天采石场花岗斑岩 NNE 向断裂带	145°/48° 212°/3°	236°/1° 122°/1°	328°/42° 10°/86°	早期 晚期
3	XH03	N27°36'07.9" E115°55'24.6"	横涧露天采石场采坑东壁花岗斑岩	早期擦面：263° / 62°，擦线：NW32°正断 晚期擦面：263° / 62°，擦线：右旋 5°			
4	XH04	N27°37'12.3" E115°55'08.1"	采石场片岩	NNW			水平擦痕
5	XH06	N27°35'07.7" E115°54'27.9"	如意亭丁龙采石场打鼓顶组流纹英安岩	306° / 6° 326° / 15°	91° / 82° 63° / 26°	215° / 4° 208° / 59°	
6	XH06-1	N27°35'07.7" E115°54'27.9"	如意亭丁龙采石场打鼓顶组流纹英安岩	130° / 2°	220° / 6°	17° / 84°	
7	XH07	N27°34'54.1" E115°54'42.3"	如意亭剖面打鼓顶组流纹英安岩	NE			擦面：45° / 直立 擦线：26°逆冲
8	XH013		横涧废火药库大门口	NNW			
9	XG035		岗上英-3m 中段 906 矿体	近 EW 198° / 33°	161° / 30°	61° / 18° NWW	右旋水平擦痕 擦痕沿倾向正断
10	XG038	N27°36'16.5" E115°55'25.7"	横涧露天采坑 NE 端花岗斑岩	209° / 17°	312° / 38°	100° / 47°	擦痕面沿早期节理面发育
11	XG039-1	N27°36'15.4" E115°55'45.1"	岗上英 NE 向沟东侧	31° / 18°	243° / 69°	124° / 11°	
12	XG039-2	N27°36'15.4" E115°55'45.1"	岗上英 NE 向沟东侧	69° / 9° 217° / 16°	303° / 74° 357° / 69°	161° / 13° 123° / 13°	早期 晚期
3	XG042	N27°36'09" E115°55'21"	横涧露天采坑南端小采坑花岗斑岩	99° / 35° 340° / 42°	278° / 55° 250° / 3°	9° / 0° 160° / 48°	早期 晚期
14	X07-02	N27°34'10.1" E115°54'03.7"	邹家山露天采场	NNW350°	近直立		
15	X07-06	N27°34'57.0" E115°59'53.2"	云　际	NNW350°			
16	X07-08	N27°29'02.1" E115°56'12.0"	浯璋采石场	NNW350°			
17	X07-18	N27°31'25.3" E115°51'03.1"	石洞村西邹石断裂带西侧	10° / 0° 350° / 0°			早期 晚期
18	X07-19	N27°34'08.9" E115°51'45.2"	南山下—书堂小路 NW 向断裂旁侧	10° / 0° 350° / 0°			早期 晚期
19	X07-20	N27°34'57.3" E115°51'23.3"	南陂采石场	东西向的拉张 NNW 355° 方向的挤压			早期 晚期
20	X07-21	N27°34'09.4" E115°49'36.7"	河元背北	东西向的拉张			
21	X07-50	N27°34'02.1" E115°53'49.5"	邹家山引水渠邹石断裂带旁侧	310° 方向的挤压 NNW350° 的挤压			早期 晚期
22	X07-53		山南井下-83m 中段	NNW345° 方向的挤压			
23	X07-77	N27°36'08.3" E115°55'58.0"	邹家山北采石场	NNW350° 方向的挤压			
24	X07-91		沙洲井下-58m 中段	NE 向断裂带上左旋正断擦痕，晚期擦面：120° / 78°，擦线：右侧伏 12°			

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

C.G-Geoldynsoft-1987),该程序要求每期次(组)擦痕至少有 4 条。因此,本次模拟时每组少于 4 条时,主要根据吴氏网进行分析。野外共测得 24 个点,其中地表 21 个点,岗上英井下 2 个点,沙洲井下 1 个点,合计 211 个断层擦痕,并判别每个擦痕的相对运动方向,分别利用计算机计算结果和吴氏网投图分析结果,如表 3、图 6(20 个测点)所示。根据分析结果,发现矿区的应力作用方向主要集中在 4 个区间内:NNW330~340°、NEE70~80°、NNE10~20°方向的挤压和 SEE90~100°方向的拉张。

擦痕的切割关系可以判断擦痕运动的先后关系,进而可以确定区域应力作用的先后关系。如横涧露天采坑南端小采坑中的 XG042 点(图 6-I),可以观测到 2 组方向的擦痕,擦痕都近水平,早期为右旋,晚期为左旋,经计算得到早期的 σ_1 为 99°∠35°,晚期的 σ_1 为 340°∠42°。在该处还可以观测到 NNE 走向近直立的节理带沿早期花岗斑岩的节理发育,切割了早期 EW—NWW 走向的破碎带,因此推断该区 NWW 方向的主压应力作用最早,NNW 方向时代次之,NNE 方向的节理发育的时间最晚。又如,在横涧露天采坑西侧 NNE20°走向的小型破碎带内(XH002 点)也观测到 2 期擦痕,早期的擦痕左旋水平,晚期正断擦痕产状为 W∠50°,切割了早期擦痕(图版 Ⅰ-E),在邹家山矿区井下-170m 中段,发现了沿 NNE 向断层面发育的最晚期的正断擦痕,擦痕产状 320°∠60°(图版 Ⅰ-F)。

根据擦痕的运动方向及其相互切割关系,可以判定相山铀矿田应该存在至少 4 期次的应力作用:早期为 NNW330~340°方向的挤压,中期为 NEE 向挤压应力,晚期为 NNE10~20°方向的挤压,最晚期为 NWW-SEE 方向的拉张(表 4)。

2.7　X 光岩石组构分析法

岩石组构是组成岩石的矿物在岩石中分布的各向异性,或者说是岩石结构要素的规律性,构造变形是引起岩石组构的重要原因。岩石组构的研究测定方法很多,X 光衍射测定法是目前应用广泛的岩组分析方法之一[1,4]。X 光岩组分析就是运用 X 光衍射技术测定岩石中矿物分布的各向异性(即岩石结构要素的规律性)。矿物内部晶体结构有许多面网,如石英(100)、(1120)等面网,方解石(1012)、(0001)等面网,绢云母(110)面网等,每种矿物的每个面网对于 X 射线都有特定的衍射现象,且它们之间是可以区别的。根据需要,可以用 X 光衍射技术来确定岩石中某种主要矿物的某个面网分布的规律性,进而确定该矿物分布的规律性,并达到分析岩石组构的目的。测试样品要求为直径 30mm、厚约 2mm 的磨光岩片。由于 X 光岩石组构测定是采取全面积衍射统计,因此要求样品中拟测对象矿物有一定的含量(一般大于 25%),粒度不能太粗(一般小于 1mm),否则颗粒太大而粒数太少,难有统计意义。

依据相山铀矿田内各类岩石所经历的构造变形历史和构造变形形迹特征,本次野外采集了不同方向断裂破碎带构造岩的定向样品,也采集了与矿化关系密切的花岗斑岩和鹅湖岭组流纹英安岩定向样品,切制成水平岩片,进行 X 光组构测试,测试矿物选为石英。测试工作由中国地质科学院地质力学研究所 X 光组构实验室完成,其部分 X 光岩组图如图 7 所示。

从所有的测试图件发现,本区所有的构造岩和花岗斑岩、流纹岩的 X 光岩组图都呈现为球对称,不存在极密或环带(图中稍许的极密可能也是岩石中石英粗大斑晶 X 光衍射的结果),因此推测本区岩石的变形都为脆性变形,变形的温度和压力都较低,属于浅层次的表壳构造。但是由于为球对称,岩石的微观组构没有发生明显的变化,因而难以具体判断主应力作用的方向。

3　构造应力场时代的确定

构造应力场定时研究是构造应力场及其演化研究中不可缺少的内容。确定构造应力场的时代可以依据地质方法,也可以依据构造年代学方法。

3.1　确定构造应力场时代的证据

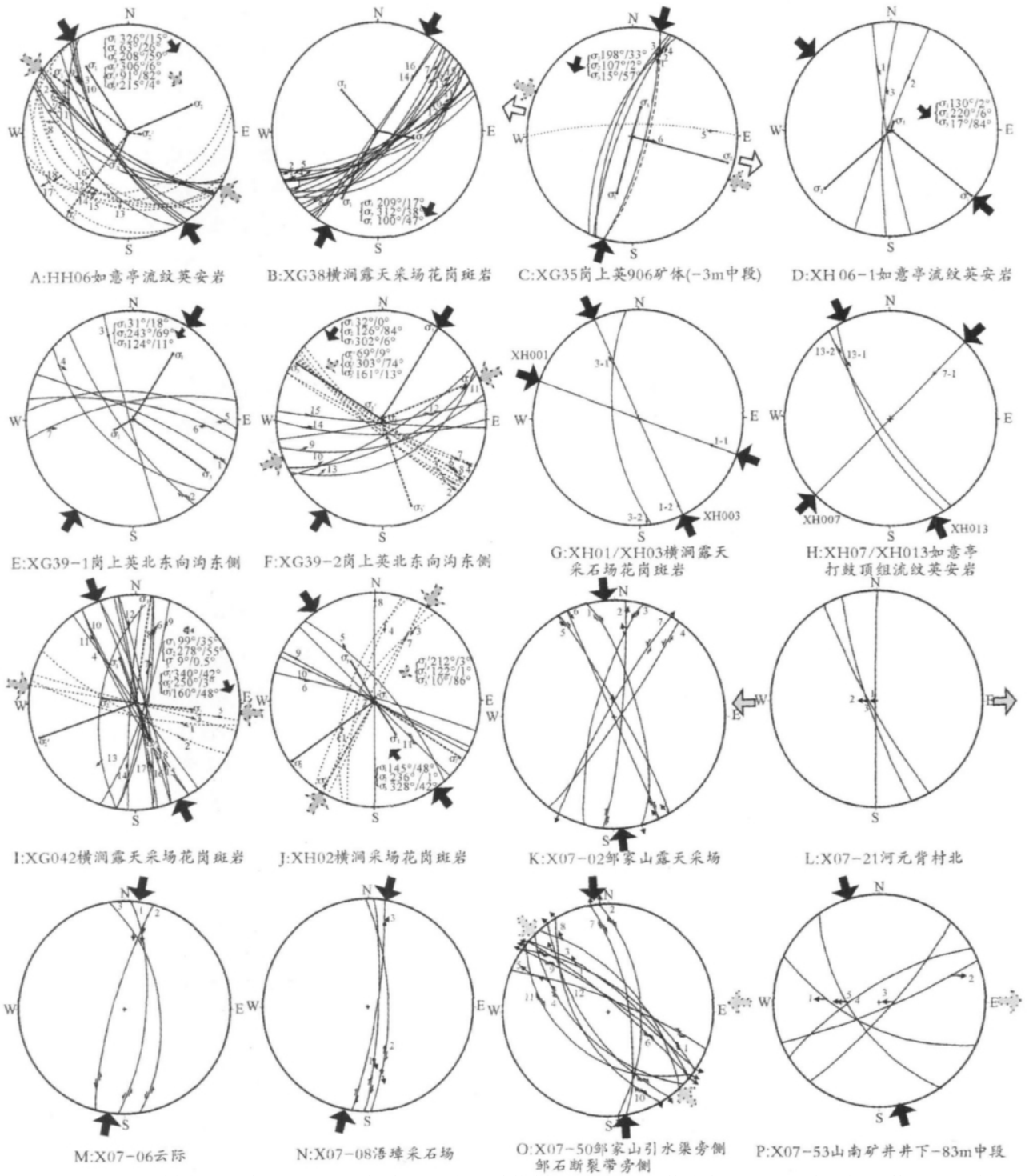
(1)不整合证据:区域构造分析是确定区域应力作用方向最为有效的一种方法。前已叙及,相山铀矿田近EW 向褶皱和大型的断裂构造主要为基底构造,被晚侏罗世火山岩不整合覆盖,因此在前燕山期(印支期)该区的应力场为南北向的挤压应力。上侏罗统火山-沉积岩系在相山总体上为一个复式向斜构造,向斜轴近 EW 走向,向斜构造又被白垩系红层不整合覆盖,表明在晚侏罗世—早白垩世期间发生了一期显著的构造运动。研究表明,该期也为中国东部大陆构造的大转折时期[21-22,30],主压应力从侏罗纪晚期的近 NS 向转变为白垩纪早期的近 EW 向。

(2)岩浆活动证据:岩浆活动为区域构造应力场

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

活动期次的划分提供了较为准确的定年数据。相山铀矿田晚侏罗世—早白垩世岩浆活动频繁[14,33]。根据笔者所获得的锆石 U-Pb SHRIMP 年龄(未发表的数据),相山铀矿田第一旋回火山喷发顶部打鼓顶组流纹岩的年龄为 142Ma, 第二旋回碎斑熔岩的结晶年龄为 135Ma,晚期超浅成岩(花岗斑岩)的结晶年龄为 133Ma, 表明相山火山喷发期近 NS 向的挤压发生于侏罗纪晚期—白垩纪早期。

(3)断层和擦痕切错关系证据:一般地说,较晚期的构造切错早期的构造, 但要注意早期断裂的重新活动和构造序次配套的关系。在相山铀矿田的 ETM 遥感图片上[24]可以清晰地观察到,区域上



© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

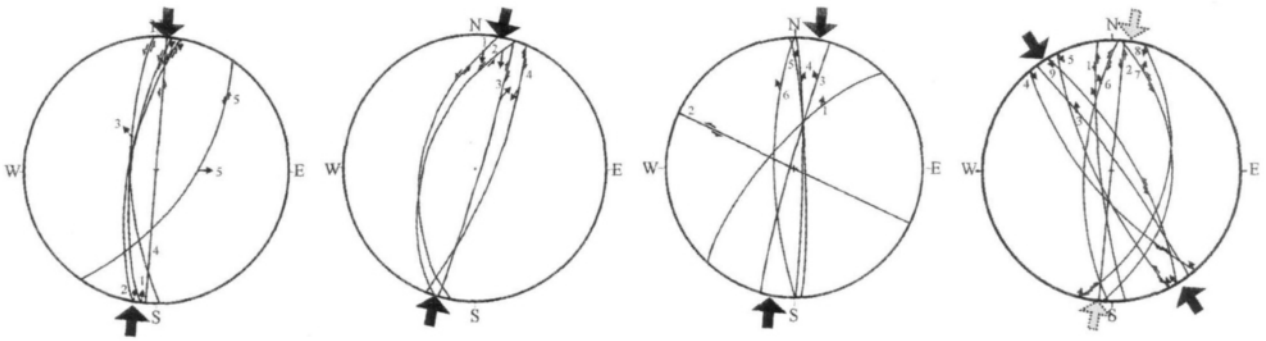


图 6　相山铀矿田擦痕吴氏网投图分析和计算机模拟计算结果

Fig. 6　Analyses results both by Wullf-net projection and computer-modeling calculation of fault scratches in the Xiangshan uranium ore-field

每个吴氏网图中罗马数字 1、2 等代表所测量的擦痕编号,实心小箭头代表每条擦痕的运动学指向;实线充填黑色、虚线充填灰色和空心箭头都代表根据擦痕运动方向所推测的不同期次的主压应力方向;σ_1、σ_2、σ_3和σ_1'、σ_2'、σ_3'为根据擦痕分组、利用计算机模拟计算结果得到的不同期次的 3 个主应力方向

表 4　擦痕法推测的区域应力场的期次和方向

Table 4　Stages and principal stress direction of the tectonic stress field inferred by fault scratches in the Xiangshan uranium ore-field

期次	主应力方向 σ_1	σ_2	σ_3	备注
第一期	330~340°，倾角较小	倾角小	倾角大	先后关
第二期	270~280°，倾角近水平	倾角大—直立	倾角近水平	系不明
第三期	10~20°，倾角近水平	倾角近水平	倾角陡立	
第四期			90~100°	

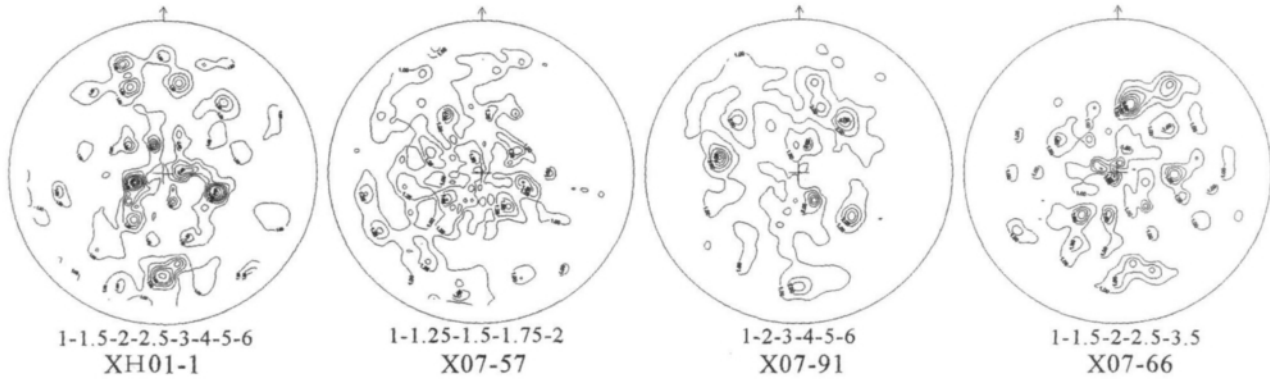


图 7　相山铀矿田部分岩石和构造岩石英$(11\bar{2}0)$X 光组构图

Fig. 7　X-ray fabric diagram of the $(11\bar{2}0)$ face of the quartz from the Xiangshan uranium ore-field

NE—NNE 方向的线性构造切割了早期 EW—EWW 向的线性构造，晚期 NNE—近 NS 向的线性构造切割了 NE—NNE 向的线性构造，说明 EW—NWW 向构造最早，NE—NNE 向构造次

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

之,NNE—近 NS 向构造最晚。如果断层面上保存有多期次的擦痕,则可以通过擦痕的切割关系,确定擦痕发育的先后顺序,可为构造活动的先后顺序提供很好的证据。

(4)地层时代证据:只发育在时代老的岩石中的构造,其形成时代较老,只发育在时代较新的岩石中的构造时代较新,同时发育于新老岩石中的构造一般较新,但它们都晚于地层的时代。如鹅湖岭组碎斑熔岩中发育的共轭剪节理和大量张—张扭性节理,其形成时代应小于 135Ma;在花岗斑岩内也发育了3 组方向的原生节理,其形成时代也应小于 133Ma。

3.2 相山铀矿田构造应力场的时代

根据构造应力场先后关系的原则,可以确定本区构造应力场的先后秩序和时代,即主压应力 σ_1 方向的变化顺序是:第一期为近 NS→第二期早期 EW 向转变为近 SN 向→第三期为 NNW330~340°→第四期为 NWW—EW280~300°→第五期为 NNE10~20°→第六期为近 NS 向(NWW—SEE 向的拉张),大致可以对应于前燕山期—燕山早期—燕山中期(包括第三和第四 2 期)—燕山中晚期—喜马拉雅期。根据断裂破碎带的发育程度及其含矿性分析,其中前 2 期应该属于成矿前构造,3~5 期为成矿期构造,最后一期为成矿后构造。

4 构造应力场演化

综上所述,结合铀矿成矿作用特征及其成矿时代的确定[14,17,28],相山铀矿田的构造应力场可以划分为 3 期 6 个阶段(表 5)。

4.1 成矿前期

(1)基底变形阶段:褶皱基底变形为前燕山期,可能属于加里东—印支期的构造,变形性质为韧脆性褶皱变形,最大主压应力(σ_1)呈近 SN 向,形成的主要构造形迹是近 EW(NWW)向的褶皱-断裂构造带及一系列 NE 走向的断裂、坳陷构造,属于成矿前构造。

(2)燕山早期岩浆侵位阶段:时代应该为侏罗纪晚期—白垩纪早期(?142~133Ma),主要的构造活动为岩浆侵位和相山火山喷发作用。根据火山喷发特征,火山喷发活动可以划分为 2 个旋回,第一旋回期最大主应力(σ_1)方向为近 EW 向,第二旋回为近 NS 向。在火山岩和次火山岩内发育了大量的原生节理。

4.2 成矿期

(3)早期成矿阶段:时代大约为燕山中期(133~120Ma),变形性质为脆性断裂破碎,最大主压应力(σ_1)方向为 NNW330~340°,形成的主要构造形迹是沿早期花岗斑岩和碎斑熔岩的早期节理面、不同岩性接触带发育的破碎带,在山南、沙洲矿区形成 EW—NWW 向右旋压扭性的断裂破碎带,在整个相山铀矿田内形成 NNE 向左旋压扭性破碎带,而 NW—NWW 向、近 SN 向的裂隙带呈张—张扭性特征,并伴随有早期的矿化,主要集中在矿区的北部和东部。

(4)中期成矿阶段:时代大约为燕山中期(120~110Ma),变形性质为脆性断裂破碎,最大主应力(σ_1)为近 EW 向,导致了相山铀矿田内早期形成的 EW—NWW 向断裂呈现左旋张扭走滑,NNE 向断裂破碎带为右旋压扭,同时形成了部分 NEE 走向的张扭性断裂破碎带。此期 EW—NWW 向断裂的力学性质为张—张扭性质,对成矿十分有利,是以山南岗上英和沙洲矿区为代表的北部成矿带内 EW—NWW 向破碎带成矿的主要时期;邹家山矿区内 NNE 向的主断裂及其派生的次级别、低序次的断裂同样对成矿有利,其它方向,如 NEE 向断裂也发生了矿化作用。

(5)晚期成矿阶段:时代为燕山晚期(110~90Ma),变形性质仍属脆性断裂破碎,最大主应力(σ_1)方向为 NNE10~20°。此时,山南和沙洲矿区内的 EW—NWW 向断裂破碎带继续活动,但表现为压性构造,对成矿不利;而横涧、邹家山矿区内近 NS、NNE 和 NE 向断裂破碎带表现为张—张扭性,十分有利于成矿,是区域上又一主成矿期。

4.3 成矿后期

(6)成矿后阶段:时代应为喜马拉雅期,变形仍为脆性断裂破碎,最大主应力方向为近 NS 向,各类含矿构造重新活动,发育断层泥。由于 NEE 向破碎带呈现张性正断,并具有左旋扭动性质,因此在山南矿区、沙洲矿区小规模地错移了一些矿体,对早期的矿体具有一定程度的破坏。

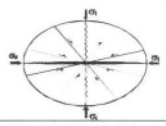
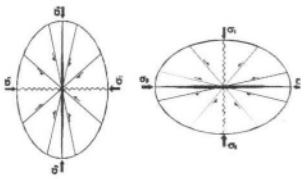
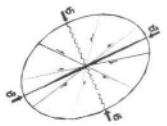
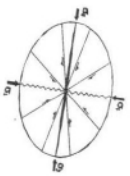
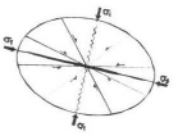
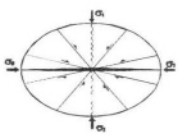
5 讨 论

(1)相山铀矿田的铀矿床为与火成岩有关的中—低温热液型矿床[6-7],矿化作用主要受控于断裂

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

表 5　相山铀矿田构造应力场演化特征

Table 5　Schematic table showing the evolution of the tectonic stress field in the Xiangshan uranium ore-field

构造期	构造阶段	主应力方向	方向依据	变形特征	推测时代	时代依据	应力椭圆
	基底变形	近 NS 向挤压	EW 向褶皱—断裂、NE 向断裂构造	韧脆性褶皱、断裂	前燕山期(印支期)	相山火山盆地的基底地层时代及其变形特征	
成矿前	火山活动	近 EW 向转变为近 NS 向	2 期火山喷发旋回特征及控制因素	地壳 EW 向挤压、局部拉张环境、区域火山活动，花岗斑岩体内发育原生节理	燕山早期(?142~133Ma)	锆石 SHRIMP 测年结果：打鼓顶组顶部流纹岩时代 142Ma，鹅湖岭组碎斑熔岩为 135Ma，花岗斑岩和斑状花岗岩年龄为 133Ma	
成矿期	早期矿化阶段	NNW 330~340°	擦痕和节理	在花岗斑岩、碎斑熔岩内原生节理脆性变形；EW—NWW 向断裂破碎带右旋压扭、NNE 向破碎带左旋压扭	燕山中期(130~120Ma)	次火山岩发生矿化，铀赤铁矿化型成矿年龄	
	第一主成矿阶段	NWW 270~280°	擦痕和节理	脆性断裂破碎：EW—NWW 向破碎带左旋走滑变形，NNE 向破碎带压性，形成 NEE 向张扭性破碎带，伴随成矿作用	燕山中期(120~110Ma)	铀绿泥石型矿化	
	第二主成矿阶段	NNE 15~20°	擦痕和节理	脆性断裂破碎、EW—NWW 向破碎带左旋压性，NNE 向破碎带左旋张扭，伴随区域成矿作用	燕山中—晚期(110~90Ma)	铀绿泥石型矿化	
成矿后	成矿后阶段	近 SN 向 350～10°(NWW—SEE 拉张)	擦痕和断裂破碎带变形特征	含矿构造局部矿石破碎，断层泥发育，NNE 向断层左旋正断，小规模错移矿体	喜马拉雅期	地质分析：白垩纪之后区域的挤压构造环境	

构造，矿体直接赋存于主断裂或紧靠主断裂的破碎带内及其旁侧的次级裂隙构造中[6]。因此,断裂构造的力学性质及其演变过程就控制了铀的成矿作用[3,34]。

一般而言，张—张扭性断裂有利于成矿物质的运移和富集，特别是早期压扭—压性变形晚期叠加有张—张扭性破碎的断裂破碎带，对热液型矿床的成矿最为有利[2],因为压—压扭性构造往往连续性

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

好,规模往往较大,如果后期叠加了张性构造,早期的压性空间就转化为张性的开放性空间,十分有利于热液成矿流体沿断裂带大规模地流动、运移,并在相应的有利的构造位置沉淀成矿。因此,这些断裂不仅是良好的导矿(运矿)构造,也是很好的容矿构造。

区域构造应力场分析表明,相山铀矿区的EW—NWW、NNE向断裂早期都为压—压扭性,晚期出现了张—张扭性变形,因而是矿区内最为有利的控矿和含矿构造,特别是主断裂与旁侧分支断裂的复合部位(图3),或不同方向的断裂交会部位和断裂弯转、膨胀处等是成矿最为有利的构造部位,而且往往容易形成富矿[6,12,20](图4、图5-A)。如相山北部的沙洲矿区,铀矿化主要赋存于花岗斑岩中EW—NWW向的断裂破碎带内,EW—NWW向断裂与NNE向断裂交会部位发育富大矿体;邹家山矿区的铀矿化主要产于NNE向的主断裂内,NNE向断裂与NS向构造、NW向构造交会处为富大矿体的产出部位;在横涧矿区,NNE向主断裂出现舒缓波状延伸并出现分支复合现象,形成了富大的铀矿体(图5-A)。

(2)在成矿期的第一阶段,区域上受NNW330~340°方向的应力作用,矿区北东部的云际矿区主控矿和含矿的近NS向断裂呈现张性特征,而此时沙洲、岗上英等矿区的EW—NWW向主含矿断裂呈现压性,相对不利于成矿作用的发生;在早期成矿阶段(120~110Ma),区域主应力方向由NNW向转变为近EW向,相山北部的沙洲、岗上英矿床由于主要控矿构造EW—NWW向断裂从压—压扭性转变为张性,因而发生大规模的铀成矿作用,为主要的成矿期,而此时邹家山矿区的NNE向含矿构造为压—压扭性质,只有初步的矿化;在晚期成矿阶段,以邹家山矿区为代表的矿床,由于主控矿构造NNE向断裂的力学性质从压扭性转变为张性,从而大规模成矿,而此期沙洲、岗上英NWW向断裂转变为压扭性,成矿作用不强;因此,在成矿时间上分析,根据含矿断裂构造的力学性质变化,推断邹家山等西部矿床的主要成矿期要晚于北部的沙洲和岗上英矿区,后者又晚于云际等东部的矿床。

上述特征显示,区域构造应力场的演变与相山铀矿田不同区段成矿作用发生的时代具有一致性,与前期的测年结果所显示的相山铀矿田成矿作用往西逐渐迁移的时代相吻合[6,10,17],与相山铀矿田围岩和矿化蚀变的迁移也具有可比性[15,18]。

(3)多期次活动叠加和成矿作用的断裂往往有利于形成富大的矿床。相山铀矿田东北部的云际矿区,主成矿期断裂呈张扭性质,而后期断裂主要为压扭性,不利与成矿,推测可能只有一期成矿,没有晚期成矿的叠加,矿化可能不富[6,10],但是矿体延伸往往比较稳定;而沙洲、横涧、岗上英和邹家山等矿区则存在多期次的构造和成矿作用的叠加,因而其矿床规模可能较大[6,10,16]。

(4)相山铀矿田主要含矿构造为群脉型裂隙[6,11,16-17],只有云际和邹家山部分矿段属于主断裂透镜体控矿(图4、图5)。由于群脉型裂隙和矿脉一般规模都不大,如果含矿裂隙间距过大、分布稀疏,就不能形成具有工业价值的铀矿体,只能作为找矿线索(图3、图4)。只有在矿化裂隙数最多、间距小、密集发育的情况下,才能形成有工业价值的矿体和矿床。对于群脉型矿床,掌握含矿裂隙的空间排列、矿体的富集规律具有重要的实际找矿意义[6,10,12,20]。因此,相山铀矿田富大矿体的主攻找矿部位应是:导矿主断裂构造上盘的分枝断裂、羽状裂隙和低序次派生的羽状裂隙群,不同方向裂隙、主断裂与派生断裂的交会部位,导矿(控矿)主断裂弯曲膨胀、分枝复合的部位,不同岩性接触的部位(其实质也是裂隙构造容易发生的部位,如次火山岩体内外接触带、顶部、爆发角砾岩筒内、火山岩熔岩层顶部等)(图4、图5)。

6 结 论

(1)区域构造-矿田构造解析结果指示了区域6期次的应力作用。根据节理的集中优势方位、法线的点极密发育情况和共轭剪节理的发育情况,推测相山铀矿田发育有3期次不同方向的主压应力作用。断层擦痕法分析推断,相山铀矿田中生代以来存在至少4期次的应力作用。X光岩组分析和野外观测表明,相山铀矿田中新生代主要为脆性变形。

(2)根据区域不整合面的发育、成岩和成矿时代及其断裂和擦痕的先后切割关系,相山铀矿田构造应力场演化可划分为3期6个阶段:成矿前期为近NS向的挤压;燕山早期区域上的走滑拉分作用,导致了相山铀矿田发育了2期次的火山喷发旋回;燕山中期NNW向的挤压应力作用,导致相山东部地区发育早期的矿化,稍后区域主压应力转变为近

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

EW 向,导致矿田北部的沙洲、岗上英等矿区发育了大规模的第一期矿化;燕山晚期,区域主压应力方向变为 NNE 向,相山西部的横涧、邹家山等矿区发生了第二期大规模的成矿作用;成矿期后,相山铀矿田主要经受近 NS 向的挤压, 不同方向的断裂皆有一定程度的复活,往往错断了早期的铀矿体。

(3)相山铀矿田的构造应力场演化与铀成矿作用具有一致性的特征, 断裂的多期次活动有利于形成富大的矿体,主断裂与派生断裂、不同方向断裂的交会处等为寻找富矿体的有利构造部位。

致谢: 本项目野外工作期间得到中核抚州金安铀业公司有关领导的支持和山南、邹家山、沙洲矿区有关地质科技人员的协助,再此一并表示感谢。谨以此文纪念杨农同志。

参考文献

[1]万天丰.构造应力场研究的新进展[J].地学前缘, 1995,2(1/2): 226-235.

[2]刘迅.地质力学在矿田构造研究中的应用与进展[J]. 地质力学学报,1996,2(1): 25-33.

[3]翟裕生,林新多.矿田构造学[M].北京: 地质出版社,1993:1-100.

[4]臧文栓,陈柏林,吴淦国,等.阿尔泰富蕴—青河一带东段变形岩石 X 光组构分析[J].地质通报, 2007,26(9): 1189-1197.

[5]陈肇博,谢佑新,万国良,等.华东南中生代火山岩中的铀矿床[J].地质学报, 1982,(3): 235-243.

[6]余达淦,吴仁贵,陈培荣.铀资源地质学[M].哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005: 117-189.

[7]陈肇博,谢佑新,王灿林,等. 1220 破火山口铀矿田的构造特征及其成矿构造条件分析[J].放射性地质, 1982, (1): 1-10.

[8]杜乐天. 碱交代作用地球化学原理[J]. 中国科学(B 辑), 1986, (7): 81-90.

[9]夏林圻,夏祖春,张诚,等.相山中生代含铀火山杂岩岩石地球化学[M].北京: 地质出版社,1992:1-56.

[10]沈锋,陈然志.华南相山铀矿田成矿条件及发展前景[J].铀矿地质, 1995,11(5): 257-265.

[11]陈贵华,陈名佐.相山铀矿田成矿条件分析[J].铀矿地质,1999, 15(6): 329-338.

[12]温志坚,杜乐天,刘正义.相山铀矿田热液水云母化及其与铀矿化关系研究[J].矿床地质,2000,19(3):257-273.

[13]范洪海,凌洪飞,王德滋,等.相山铀矿田成矿机理研究[J].铀矿地质, 2003,19(4):208-214.

[14]范洪海,王德滋,沈渭洲,等.江西相山火山-侵入杂岩及中基性脉岩形成时代研究[J].地质论评, 2005,51(1): 86-92.

[15]张鸿.横涧-岗上英矿床多期次热液活动与铀成矿关系的探讨[J].世界核地质科学, 2008,25(2): 68-72.

[16]邵飞,邹茂卿,何晓梅等.相山矿田斑岩型铀矿成矿作用及深入找矿[J].铀矿地质, 2008,24(6):321-326.

[17]邵飞,陈晓明,徐恒力,等.江西省相山铀矿田成矿模式探讨[J].地质力学学报, 2008,14(1): 65-73.

[18]黄锡强,陈正乐,王平安,等.江西相山铀矿田沙洲矿床流体包裹体研究[J].地质力学学报, 2008, 14(4): 176-185.

[19]陈跃辉,李建红.相山铀矿田西部成矿构造应力场及与铀矿化关系[J].矿床地质, 1995,14(3): 243-250.

[20]邱爱金,郭令智,郑大瑜,等.江西相山地区中、新生代构造演化对富大铀矿形成的制约[J].高校地质学报, 1999,5(4): 418-425.

[21]胡瑞忠,毕献武,苏文超,等.华南白垩—第三纪地壳拉张与铀成矿的关系[J].地学前缘, 2004,11(1): 153-161.

[22]毛景文,谢桂青,李晓峰,等.华南地区中生代大规模成矿作用与岩石圈多阶段伸展[J].地学前缘, 2004, 11(1):45-55.

[23]邱爱金.江西相山铀矿田东西向隐伏构造的发现及其地质意义[J].地质论评, 2001,47(6): 637-641.

[24]龙期华,刘庆成.相山盆地基底形态及其与铀矿化的关系探讨[J].华东地质学院学报, 2002, 25(3): 228-232.

[25]付湘.江西省 5 大铀矿田深部构造环境定位分析[J].铀矿地质, 2002,18(1): 56-62.

[26]张万良,刘德长,李子颖,等.江西相山铀矿田遥感影像呈现的新构造运动及其意义[J].国土资源遥感, 2005, (3):52-56.

[27]史维浚,周文斌,袁晓庆.铀中和还原成矿作用的基本原理和找矿标志[J].华东地质学院学报, 1992, 16(3):257-263.

[28]林祥铿.赣杭构造带若干铀矿床同位素年龄研究及铀源初探[J].铀矿地质, 1990, 6(5):257-274.

[29]邱爱金,郭令智,舒良树,等.走滑拉分作用与相山产铀火山盆地的就位[J].铀矿地质, 2001, 17(5): 266-272.

[30]韦昌山,蔡明海,蔡锦辉,等.华南地区中生代构造控矿规律探讨[J].地质力学学报, 2004, 10(2):113-121.

[31]魏详荣,林舸,龙期华,等.江西相山邹家山-石洞断裂带及其控矿作用[J].铀矿地质, 2006, 22(5): 281-289.

[32]单业华,林舸,孙洪斌,等.多期断层擦痕的硬划分:一种目标函数算法[J].地学前缘, 2003, 10(1):81-87.

[33]陈小明,陆建军,刘昌实,等.桐庐、相山火山-侵入杂岩单颗粒锆石 U-Pb 年龄[J]. 岩石学报, 1999, (2): 272-278.

[34]梁良.铀矿田与矿床构造[M].北京:原子能出版社,1993:4, 35-116,158.

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net