

地质 矿床

阿尔金地区构造应力场及其对金属矿产分布的控制作用

陈正乐¹, 陈宣华¹, 王小凤¹, 陈柏林¹, 杨 风², 李学智²,
杨 懿², 张利容¹, 袁嘉音¹, 王 薇¹

(1. 中国地质科学院地质力学研究所, 北京 100081; 2. 新疆地质调查院, 乌鲁木齐 810001)

[摘 要]构造应力场研究可以为区域矿产预测提供依据。主要根据节理、擦痕的测试分析, 结合区域构造解析, 确定阿尔金山东西向拉配泉—红柳沟构造带经历了三期不同方向的应力作用: 印支期以前的南北向挤压作用, 印支—燕山期的北西—南东向的挤压和中生代晚期—新生代北东东—南南西向的挤压; 并利用有限元数值模拟前两期构造应力场的演变过程, 进而讨论了区域构造应力场对内生金属矿产分布规律的控制作用指出了区域寻找大型内生金属矿产的有利地段。

[关键词]阿尔金 构造应力场 金属矿产

[中图分类号]P554 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2002)05-0018-06

岩石的变质变形和构造运动都是应力作用结果, 金属矿产的形成与分布也不例外^[1]。因而, 探索地壳内应力场信息、测量应力值大小、模拟构造应力场是构造地质、矿产地质的重要研究内容, 也是构造地质、矿产地质由定性转向半定量—定量研究的重要手段^[2]。

阿尔金山脉位于青藏高原北缘, 是青藏高原的北界。该区具有长期的地质构造演化历史^[34], 阿尔金走滑断裂体系的形成演化与青藏高原的隆升、印度与亚洲大陆的碰撞及其随后的陆陆汇聚作用密切相关^[57]。阿尔金断裂带的左行走滑位移量、地表活动特征研究已有相当多的文献报道^[37], 但少有研究涉及区域构造应力场演变历史及其与矿产的关系。由于中生代晚期^[5]开始的阿尔金断裂大规模左型走滑极大地改变了该区的古构造格局, 使得恢复整个阿尔金山地区地质历史时期的古构造应力场较为困难。因而, 本文只对东西向红柳沟—拉配泉构造带进行古构造应力场分析(图 1), 采用了区域构造地质解析法、共轭剪节理法和擦痕法等来推测应力作用方向, 区分运动期次, 并用有限元数值法来模拟恢复构造应力场, 探索构造应力场与区域构造、矿产分布的关系, 为矿产预测提供切实可行的依据。

1 构造应力场分析

1.1 区域地质构造解析推断古构造应力场

从区域构造线的展布方向判断, 东西向构造带的基本格架是在受南北向的挤压应力作用下形成的(图 1)。阿尔金北缘断裂带呈舒缓波状展布, 在燕山期又曾经历过伸展作用(尹安等未发表的资料), 及东西向构造带内低级别的断裂(NWW、NEE)多期次构造岩的发育等, 表明研究区东西向构造带内存在多期次、不同方向的构造应力作用。中生代晚期开始^[5]的北东东向阿尔金断裂大规模的左行走滑指示了研究区经受北北东—南南西方向的挤压应力作用。

1.2 共轭剪节理法确定主应力方位

本次测试的对象是发育在拉配泉印支期的二长花岗岩斑岩内的共轭节理。将所测的结果运用了吴氏网进行投图, 求得共轭剪节理的锐夹角平分线和钝夹角平分线的产状(表 1)。结果表明共轭剪节理的锐夹角平分线方向基本上集中在 200°~240°区间内, 倾角一般不大; 钝夹角平分线集中在北西西—北西区间内, 倾角也不大。由于共轭剪节理的锐夹角平分线一般代表了主挤压应力作用的方向, 因而共轭剪节理反映了区域主挤压应力作用的方向为北北

[收稿日期]2001-10-31; [修订日期]2002-03-12; [责任编辑]余大良。

[基金项目]国家重点基础研究(2001CB409808)、国家“九五”攻关 305 项目(96-915-06-01B)和国家大地调项目(K1.1.2.3)联合资助。

[第一作者简介]陈正乐(1967 年-), 男, 中国地质科学院地质力学研究所研究员, 理学博士, 主要从事于矿产地质和构造地质研究工作。

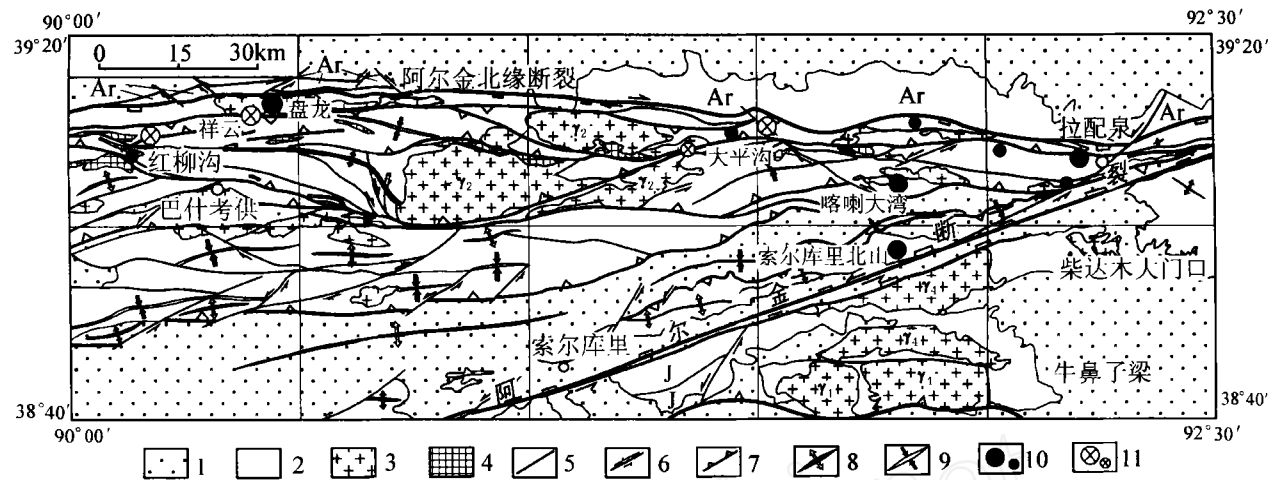


图 1 阿尔金山北缘地区地质构造与矿产分布简图
1—新生界;2—古生界—元古界;3—花岗岩类;4—基性岩;5—断层;6—正断层;7—逆断层;8—背斜;9—向斜;10—铜矿
(矿床和矿化点);11—金矿(矿床和矿化点);J—侏罗系;Ar—太古界(根据 1:20 万区调报告和野外考察结果编制)

东—南南西。另外根据印支期和燕山期花岗岩中节理走向的野外实测统计和青海区调队俄博梁幅区调报告,显示印支期花岗斑岩中节理主要以近南北向为主,北东东和北西西向次之;燕山期花岗岩中节理以北西向为主,近东西向和近南北向次之。区域上,北西向、北东向节理分布普遍,在不同时代的地质体中都有分布,北西向节理常呈现压性构造面的特征,并具有长期、多次活动的特点;北东向节理以剪节理为主,北东东向节理往往具有压扭性特征,近东西向节理往往具有张扭性特征。

表 1 拉配泉地区印支期花岗岩共轭剪节理
和吴氏网投影结果表

共轭节理产状		锐夹角 平分线产状	钝夹角 平分线产状
195 D35°	280 D55°	75 D50°	320 D19°
120 D55°	35 D60°	256 D41°	349 D4°
40 D70°	0 D60°	192 D27°	104 D16°
105 D48°	22 D80°	239 D31°	342 D22°
13 D85°	32 D78°	200 D8°	295 D20°
95 D62°	240 D42°	80 D9°	327 D68°
0 D75°	90 D85°	224 D16°	122 D5°
115 D40°	20 D40°	243 D63°	333 D0°

上述特征表明,本区北西向节理可能形成时间稍早,北东和北东东向的节理较晚,代表了两期应力作用结果,晚期的挤压应力作用方向为北北东向。

1.3 运用擦痕确定最大主应力方位和期次

擦痕是断层运动的记录。根据断层面的产状、擦痕性质、擦痕产状,可以用电算法或赤平投影法来

分析主应力方位,划分断层运动期次。本次测试我们采用了赤平投影法来分析运动期次和主应力方位(图 2)。

奥陶系拉配泉组地层中(图 2 - a,1830;图 2 - b,1608)基本记录了 3 期应力作用:一期为北西西向(275 285°)的挤压应力作用,兼具走滑性质;一期为北北东向(15 25°)的挤压应力作用;还有一期为南北向(0°)的挤压应力作用。石炭系生物碎屑灰岩(图 2 - c)也记录了三期应力作用:北北东向(15° 20°)的挤压和北西—南东向(135 140°)挤压兼具走滑,以及南北向挤压走滑应力作用。与奥陶系拉配泉组地层记录的信息十分吻合。根据擦痕的切割关系,在野外可以直接区分出侏罗系砂岩中两期擦痕,根据吴氏网投影结果判断(图 2 - d),早期的擦痕可分为两期:北西向(310 320°)挤压兼走滑和北西西—南东东向(95 100°)挤压的应力作用。晚期的擦痕集中在北北东(20 30°)方向的挤压应力作用。印支期花岗岩中(1813)的擦痕基本上反映了两期应力作用:北西向(315°)和北东向(25 30°)的挤压应力作用。在燕山期花岗岩中,1823 点(图 2 - e)大致可分出 4 组方向:近南北向(355°)的挤压、北东向(40° 45°)的挤压、北西—南东向(310 315°)走滑;1822 点(图 2 - f)主要集中在北东区间内(35 50°)的挤压兼走滑,北西和近东西向挤压也稍有显示。

综合以上各点擦痕所反映的应力作用方向和方式,概括起来可分为 4 组:北东东—北东向的挤压、北西—南东向的挤压兼走滑和近东西向的挤压,和

青海区调队. 1:20 万俄博梁幅区调报告,1982。

南北向的挤压应力作用。根据地层时代和侏罗系中擦痕的切割关系,这 4 组应力可划分为 3 期,反映了该地区经受了 3 期应力作用(表 2):在奥陶系和石炭系中擦痕所反映的南北方向的挤压走滑应力可能是最早期应力作用的结果;中期北西—南东向的挤压应力作用,导致了北西西—南东东方向和近东西

向的挤压兼右行走滑;晚期以北北东—北东方向的挤压应力作用为主。由于后两期擦痕在侏罗纪地层中和燕山期花岗岩中都有表现,因而这两期的应力作用应发生在燕山期花岗岩侵位之后,而早期的应力作用可能发生在印支期以前。

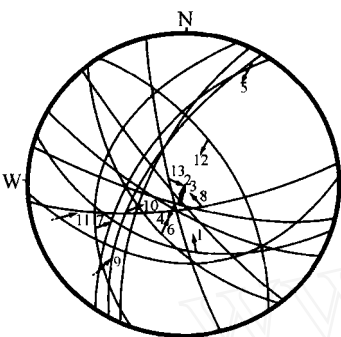


图2-a 1830奥陶系凝灰岩中擦痕

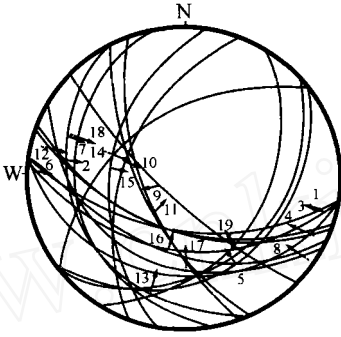


图2-b 1608奥陶系凝灰岩中擦痕

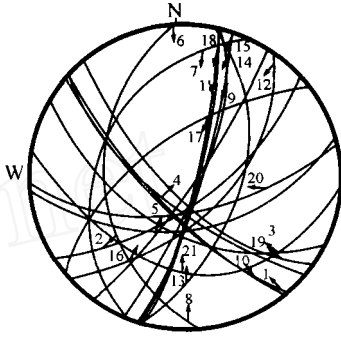


图2-c 石炭系灰岩中擦痕

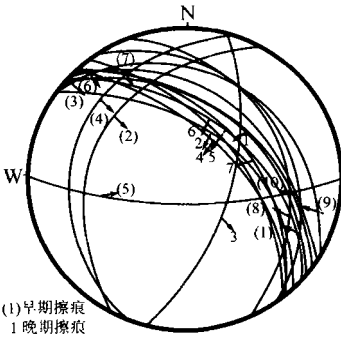


图2-d 侏罗系砾岩中擦痕

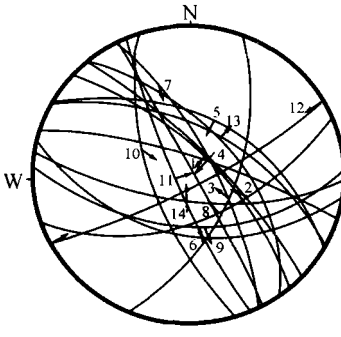


图2-e 1823燕山期花岗岩中擦痕

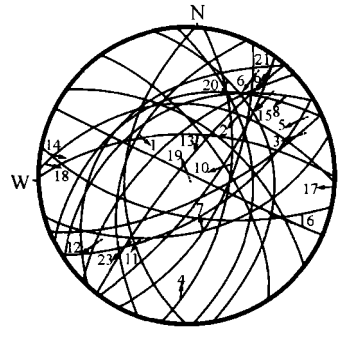


图2-f 1822燕山期花岗岩中擦痕

图 2 拉配泉地区擦痕产状的吴氏网投影图

表 2 拉配泉地区擦痕所反映的应力作用方向结果表

点 号	岩 性	时 代	擦痕所反映的应力作用方向			
			晚 期	中 期	早 期	早 期
1822	花岗岩	燕山早期	北东	北西	近东西	近南北
1823	花岗岩	燕山早期	北东	北西—南东	近东西	近南北
1829	砾岩	早侏罗纪	北北东	北西	北西西—南东东	/
1813	花岗岩	印支期	北东	北西	/	/
1829-1	灰岩	石炭纪	北北东	北西—南东	/	南北
1830、1608	凝灰岩	奥陶纪	北北东	北西—北北西	北西西	南北

2 构造应力场的有限元数值模拟

2.1 边界力作用方式的确定

岩石力学参数的确定首先根据岩石力学实验结果,并结合各构造带的地质组成特征,确定其岩石力学参数,如表 3 所示。如前所述,擦痕、节理等反映出本区自燕山期以来主要经受了两期的应力作用:

北西—南东向的挤压和北东东向的挤压,而在前印支期该区已经经历了一期南北向的挤压作用。因而,本次模拟可分 3 个时期进行。但根据现今在该区发现的矿产主要成矿时代为加里东期和燕山期^[8],中生代晚期—新生代阿尔金断裂带的左旋走滑对区域矿产的制约作用主要表现为对区域矿产的最终定位、矿产分布的大地构造背景等方面,因而本

文只讨论前两期构造应力场数值模拟的结果。研究表明,前两期应力作用的基础大体相同,因而两期的平面有限元地质模型一致(图 1 的边界即为模型的边界)(图 3),由于这两期构造应力作用时,阿尔金主断裂左旋走滑还未开始(可能还不存在),因而在有限元的地质模型中,不考虑阿尔金主断裂的存在,并取模型中阿尔金主断裂带的南东侧的块体与断裂的北西侧块体同样的力学参数。边界作用力方式也是以地质资料分析结果为基础,设定第一期为南北向挤压,第二期为北北西—南南东挤压;应力值的相对大小主要是参照声发射测试结果来确定(未发表的数据)(图 3)。

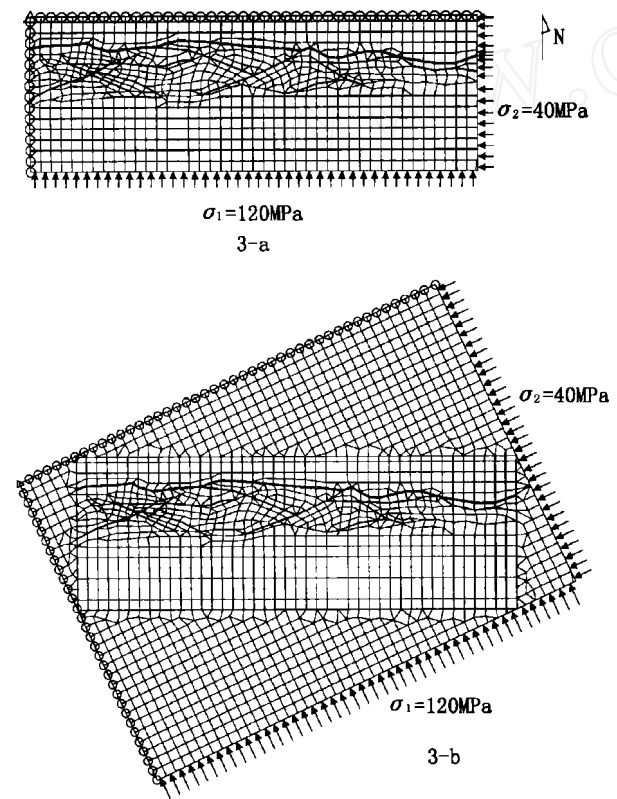


图 3 阿尔金地区两期构造应力场模拟模型的有限单元划分和边界应力作用方式示意图

表 3 阿尔金地区地质体岩石力学参数表

岩 性	弹性模量 (MPa)	泊松比 (m)
断 裂	5000	0.35
片 岩	35000	0.28
片麻岩	52500	0.26
砂砾岩	28000	0.29
花岗岩	71700	0.22
变质凝灰岩	60000	0.25
超基性岩	65000	0.23

2.2 边界约束条件

在有限元计算中,当边界力的作用方向与边界不垂直,即边界作用力并不仅仅是正应力,还有平行于边界的剪应力时,往往由于约束条件的不够合理造成一定的畸变,而使整个计算结果受到影响。为此,我们将模型适当转一个角度再将模型边界重新画成一个矩形使边界作用力恰好以正应力的方式施加于边界上。这样基本上避免了因约束不合理而造成的畸变,又能把剪切力的作用完全反映出来,计算结果十分令人满意。所以在模拟第二期应力场时,边界作用力的施加就采取了这个方法(图 3)。

2.3 结果分析

利用有限元数值模拟程序(Super Sap66),通过计算分析得到应力场有关图件,包括最大、最小和平均主应力图,最大剪应力图及其有效张应力图等。

第一期:在所有的应力场特征图件(图 4)中,应力总体上以呈东西向展布为重要特征;研究区南带和北带,断裂发育少,岩性相对较为单一、均匀,因而应力值变化小,高应力值梯度带出现在研究区的中部,这里断裂发育,岩性复杂。在断裂的末端内侧和两条断裂交汇部位最大主应力值最低,而最大剪应力值较高,应力低值区分布明显受断裂的影响(图 4 - a,图 4 - b)。最小主应力南带应力值平均较高,北部低,但高应力值集中在阿尔金北缘断裂带上(图 4 - c),在中部岩性复杂的区域,最小主应力分布明显地受断裂和花岗岩体双重控制,应力低值区一般呈北西、北东向展布。有效张应力是构造应力场的另一个力学指标,它实际上表征的是裂隙端部的张应力 sT 强度越高,越容易发生张应力,引起裂隙扩展,图 4 - d 是第一期的应力场有效张应力 sT 的分布图。图中应力高值区大多都位于断裂的末端和断裂与断裂的交汇处。这说明在这些高值区产生断裂的可能性较大,而这些断裂较发育区域可能是成矿带的有利区域。

第二期:虽然应力场总体上仍有东西向带状展布的特征,南、北两带应力值相对变化小,分布均匀,但很明显,应力场的总体展布规律较第一期复杂(图 5)。此期,东西向的阿尔金北缘断裂对应力场的控制作用明显减弱,北东、北西向断裂对应力场分布的控制作用加大。最大主应力(图 5 - a)低值区主要分布于北东东向断裂附近、北东东和北西西向断裂的交汇部位及其构造带中部花岗岩体的周缘;在局部地区,最大主应力高值区呈串珠状呈近南北向展布,与花岗岩体的边界走向关系密切;最大剪应力

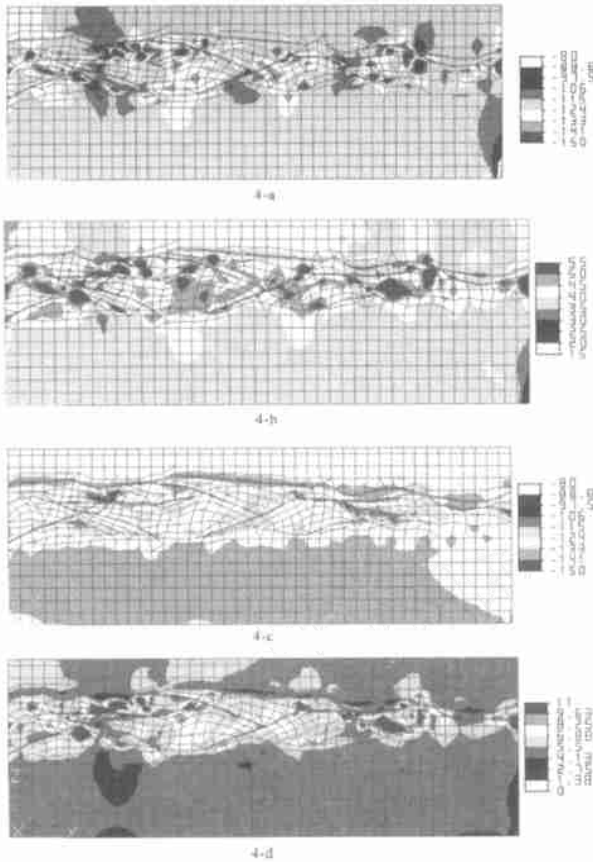


图 4 第一期构造应力场模拟结果图

a—最大主应力等值线图；b—最大剪应力等值线图；
c—最小主应力等值线图；d—有效张应力等值线图

(图 5 - b) 的最高值沿近南北向和北西向破碎带展布；最小主应力的低值明显沿北东东向断裂展布，在交汇部位为应力低值区(图 5 - c)。高应力梯度带主要出现在断裂的交汇部位附近。有效张应力(图 5 - d)的应力高值明显受北东向、北西向断裂控制，在两者的交汇部位普遍出现高应力值和高应力梯度带。另有一个明显的迹象是，在最大主应力、最小主应力、最大剪应力和有效张应力图中，在研究区的西部，从中带偏南一直呈北西向延伸至北带直到北界，位置相当于红柳沟西—巴什考供一带，有一个呈北西走向的高应力梯度带，带内有多个高应力值和低应力值区，它们相间相伴出现。总之，数值模拟结果表明了研究区的构造应力场主要受区域断裂、构造应力作用的基底物质组成等双重控制。区域物质南北向的分带特征基本上决定了本区构造应力场呈东西向带状分布的规律。近东西向、北东、北东东和北西西向断裂分别控制了不同时期的最大、最小应力的低、高应力值区域分布规律，而这些区域往往与阿尔金山地区已发现的内生金属矿产分布关系密切。

3 构造应力场对矿产分布的控制作用

后期张性、张扭性断裂叠加在早期压性、压扭性断裂之上往往有利于成矿物质的运移和聚集，形成大型的矿产。在本区，阿尔金北缘断裂及其旁侧低级别的断裂就曾经经历了类似构造性质的转变：早期受区域南北向的挤压，阿尔金北缘断裂呈压性、东西向展布，旁侧次级别的北西和北东向断裂组成两组剪切断裂系；晚期受北西、南东方向的挤压，阿尔金北缘断裂呈右旋剪切伸展，北西西向断裂出现张扭运动，北东东向断裂呈压扭性质，十分有利于成矿物质沿着阿尔金北缘断裂及其与北西西向断裂的交汇部位聚集成矿。

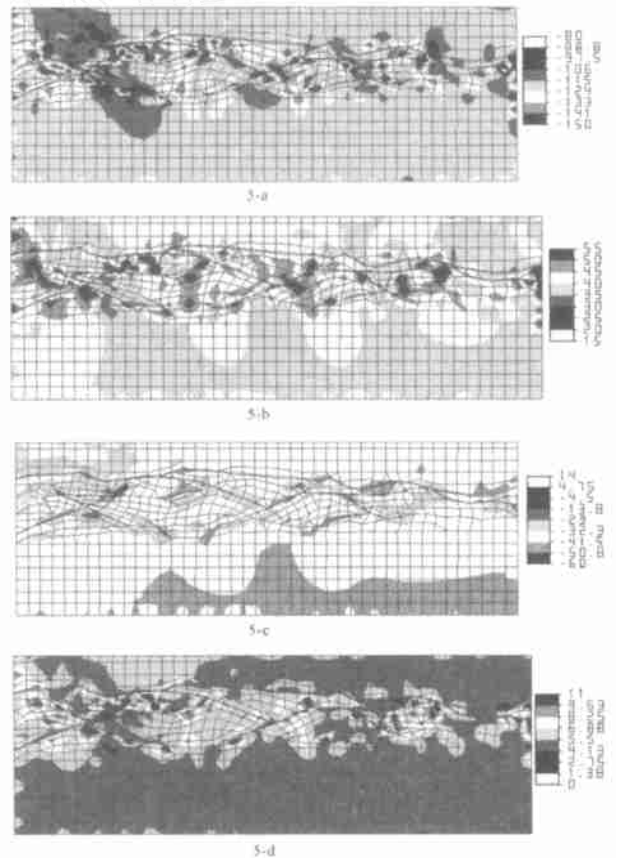


图 5 第二期构造应力场模拟结果图

a—最大主应力等值线图；b—最大剪应力等值线图；
c—最小主应力等值线图；d—有效张应力等值线图

由于阿尔金山的自然、人文和交通条件恶劣，基础、矿产地质研究程度相对较低，至 90 年代中期仍无一个较为成型的矿床。但自国家“九五”科技攻关 305 项目在该区实施以来，在该区相继发现了一批以铜、金为主的内生金属矿床、矿化点和高多金属含量点^[8]，如祥云金矿(小型)、大平沟金矿(小型)、红

柳沟金矿,拉配泉铜矿、索尔库里北山铜银矿(小型)、盘龙铜矿等(图1)。根据目前发现的这些铜、金矿化点和矿床,可以清晰地发现构造应力场对区域矿产的控制作用:(1)一级构造带控制了区域构造—成矿带的展布:在构造应力场的应力高值区、高应力梯度带主要出现在东西向的红柳沟—拉配泉构造带的中部,现已发现的大平沟、盘龙、祥云金矿和拉配泉西沟铜矿等铜、金矿床都分布在该带内;(2)低级别低序次的断裂复合控矿:在断裂的末端、不同方向的断裂交汇部位,往往出现低应力值,是成矿的良好地段,这与现今所发现的矿化点的分布十分吻合。这也说明了研究区内出现的其它一些低值点,虽然现今仍没有发现铜、金矿床,但在排除其它一些局部地质条件的前提下,应引起我们足够的重视;(3)低级别断裂多期次构造复活、断裂复合控矿:在阿尔金北缘断裂带两侧与旁侧低级别断裂带的交汇部位及其与北东东向阿尔金主断裂的交汇部位,在构造应力场图中都是应力高、低异常或高应力梯度区域,十分有利于成矿物质的运移和聚集,因而也是十分有利的成矿部位。

4 结论

1) 印支期、燕山期花岗岩中节理、擦痕及其侏罗系、石炭系、奥陶系中擦痕的测试分析,结合区域构造解析,显示阿尔金山东西向拉配泉—红柳沟构造带经历了3期不同方向的应力作用:印支期以前(可

能为海西期)南北向的挤压作用,印支—燕山期的北西—南东向的挤压和中生代晚期—新生代北东东—南南西向的挤压。

2) 以区域构造解析为基础,利用有限元数值模拟反演了东西向红柳沟—拉配泉构造带3期构造应力场的演变过程,结果表明了阿尔金山地区构造应力场主要受区域断裂、构造应力作用的基底物质组成等双重控制。

3) 根据现今阿尔金山地区已发现的铜、金矿产的分布特征,发现区域构造应力场对内生金属矿产分布规律的控制作用显著。据此,笔者推断阿尔金北缘断裂带及其与旁侧低级别断裂的交汇部位是区域寻找大型内生金属矿产的有利地段。

[参考文献]

- [1] 李四光. 地质力学概论[M]. 北京:科学出版社,1973. 92.
- [2] 张拴宏,周显强,田晓娟,等. 青海省乌兰县托莫尔日特金矿区构造应力场与流体运移势的计算机数值模拟[M]. 地质与勘探,2002,38(1):4045.
- [3] 国家地震局“阿尔金活动断裂带”课题组. 阿尔金活动断裂带[M]. 北京:地震出版社,1992.
- [4] 新疆维吾尔自治区地质矿产局. 新疆维吾尔自治区区域地质志[M]. 北京:地质出版社,1993,841.
- [5] 刘永江,叶慧文,葛肖虹,等. 阿尔金断裂变形岩激光微区 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 年龄[J]. 科学通报,2000,45(19):21012104.
- [6] 张岳桥,陈正乐,杨农. 阿尔金断裂带晚新生代走滑位移量的地质新证据[J]. 现代地质,2001,15(1):18.
- [7] 王小凤,陈宣华,陈正乐,等. 阿尔金山地区铜金矿化富集规律[J]. 地质力学学报,2001,7(3):201207.

STUDY ON THE TECTONIC STRESS FIELD OF IN THE ALTYN TAGH AREA AND ITS CONTROLLING TO THE DISTRIBUTION OF METAL DEPOSITS

CHEN Zheng-le¹, CHEN Xuan-hua¹, WANG Xiao-feng¹, CHEN Bai-lin¹, YANG Feng²,
LI Xue-zhi², YANG Yi², ZHANG Li-rong¹, YUAN Jia-yin¹, WANG Wei¹

(1. Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100081;

2. Institute of Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Urumqi 810001)

Abstract: Studies on the tectonic stress field can provide necessary evidence for prospecting of regional deposits. This contribution mainly presents analyses data from conjugate joints developed in granites, striation lineations, and regional structural interpretation to document the evolution history of regional tectonic stress field and its controlling to the distribution of metal deposits. The result showed that the EW-trending Hongliugou-Lapeiquan structural belt has experienced three stages of deformation: Pre-Indo-Sinian NS-trending, Indo-Sinian to Yanshanian NW-SE-trending and Late Mesozoic to Cenozoic NEE-trending compression deformation. Finite mathematical modeling experiment was applied to reconstruct the evolution history of the regional stress field. Furthermore, the controlling of the tectonic stress field to the distribution of inner-metal deposits in this area was discussed. Accordingly, the authors suggested that regional favorable ore-forming areas were located in conjunction areas of the north Altyn Tagh fault with its lower-grade faults.

Key words: Altyn Tagh, tectonic stress field, metal deposits