技术 方法

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

张拴宏,周显强,田晓娟,宋友贵,杨美伶 (中国地质科学院地质力学研究所,北京 100081)

[摘 要]运用有限元数值模型,对托莫尔日特地区成矿初期及主成矿期构造应力场及流体运移势进行了二维计算机模拟。模拟结果显示 NW—NWW 向断裂构造带对本区构造应力场的控制是十分明显的。在该断裂带穿过的乌达热乎、赛坝沟成矿带及其北部、石棉沟西部地区,是强烈的应力梯度带、高剪应力带、高应变能密度带及低流体运移势分布区,反映了这些地区构造环境优越,且是流体运移的有利渗流区。

由于赛坝沟、乌达热乎是本区最好的成矿区域,而乌达热乎北部地区、赛坝沟北部地区、石棉沟西部 地区与此区有相同或相似应力场及流体运移势特征,预测这些地区找矿前景较好,但考虑到成矿热液来 源等其它控矿因素,这些地区的成矿规模可能比赛坝沟、乌达热乎成矿区小,品位也不如此区高。这与 这些地区有矿化显示,但还没有发现具规模矿床的地质事实是完全吻合的。

[关键词]构造应力场 流体运移势 数值模拟 成矿预测 金矿床 [**中图分类号**]P618.51;P54 [**文献标识码**]A [**文章编号**]0495 - 5331(2002)01 - 0040 - 06

托莫尔日特金矿位于青海省乌兰县城西南约 10 km的托莫尔日特山南北两侧,是乌兰县地质六 队于 90 年代新发现的金矿床。该矿主要包括赛坝 沟、乌达热乎两个小型金矿床,近期在矿区外围也发 现了较好的矿化显示。

1 矿区及矿床地质概况

托莫尔日特金矿区位于柴达木盆地东北缘,哇 洪山断裂北中段西侧,区内岩浆活动频繁,断裂构造 发育,具有较好的成矿地质构造背景(图1)。

矿区内出露的地层主要是滩间山群及少量第四 系。滩间山群为一套绿片岩相(局部为角闪岩相)的 变质岩,其岩性主要为变质凝灰岩、安山岩、绿片岩、 斜长角闪片岩,局部夹有大理岩、云母石英片岩等, 在矿区西部广泛分布。第四系主要分布于沟谷地 区,以冲积和洪积砂砾及风积粘土为主。在矿区外 围存在着少量下元古界达肯大坂群片麻岩。

矿区岩浆活动频繁,以加里东期及印支期为主, 岩浆岩在矿区广泛分布。加里东期侵入岩主要有蛇 纹石化橄榄岩、细粒辉长岩、粗粒辉石岩、中粗粒斜 长花岗岩、细粒石英闪长岩、中细粒英云闪长岩等, 其中中粗粒斜长花岗岩是赛坝沟地区金矿床的主要 围岩,细粒石英闪长岩和中细粒英云闪长岩在局部 地区也是较重要的赋矿围岩;华力西期侵入岩在矿 区出露很少,矿区外围出露较多,主要为中细粒花岗 闪长岩、中粗粒花岗闪长岩、中细粒黑云母二长花岗 岩、(似斑状)中粗粒黑云母二长花岗岩等;印支期侵 入岩有中细粒二长花岗岩、中粗粒二长花岗岩、中粗 粒(似斑状)钾长花岗岩等。另外区内还分布有大量 的基性 –酸性岩脉。

矿区构造以断裂为主,在矿区及其外围断裂构 造均十分发育。断裂构造中以 NW—NWW 向最为 发育,形成较早,演化复杂,该组断裂倾向 NE— NNE,倾角较大,断裂面呈舒缓波状平行分布,结构 面力学性质为压性、压剪性,区内的主要矿体、矿点 及矿化点多与该断裂带有关,并严格受其控制,是区 内最主要的控矿赋矿构造。其次为 SN 向、NE 向断 裂,形成较晚,以平移断层为主。该组断裂带内无矿 化,常对 NW—NWW 向断裂和矿体起破坏作用。 本区金矿床以石英脉型为主,构造蚀变糜棱岩型次

7

[[]收稿日期]2001-01-20;[修定日期]2001-03-01;[责任编辑]曲丽莉。

[[]基金项目]原地质矿产部定向科研项目(地科定 97 — 22)部分成果。

青海省地质矿产勘查研究院区调三室.1 5万托莫尔日特幅(J47E020010)区域地质调查说明书,1998。

[[]第一作者简介]张拴宏(1974年-),男,1997年7月毕业于西安地质学院,2000年在中国地质科学院研究生部获构造地质专业硕士学位,目前主要从事矿田构造、构造应力场及矿床地质等方面的研究工作。

之。矿体呈脉状、透镜状存在于 NW — NWW 向断 裂带内,其中产出在中粗粒斜长花岗岩体中构造蚀 变破碎带内的矿化带含矿性最好。这些构造蚀变破 碎带的共同特征是以 NW280 ~ 330 % 走向,密集 平行展布,具有一定的斜列性。矿体形态一般呈脉 状、不规则状、透镜状.沿走向及倾向有膨大、收缩、 尖灭再现及分支现象。矿体产状变化较大,总体走向呈NW~SE向,倾向以NE向为主,部分矿体由于地表重力蠕动作用,其产状在地表向SW倾斜,但向深部逐渐变为NE倾向。矿体倾角较陡,一般在60 ~80 ℃间,局部近于直立。矿体长度十几~200m不等,各矿体平均厚度亦不等。从品位上看,石英



图 1 托莫尔日特金矿区及其外围地质略图(据 1 5 万地质图及矿区地质图汇编)

Q — 第四系;N₂ y — 上第三系油砂山组;D₃ m — 上泥盆统牦牛山组;OSt — 下志留 — 上奥陶统滩间山群;Pt₁ d — 下元古界达肯大坂群片麻岩 组;T₃ W — 晚三叠世中粗粒(似斑状)钾长花岗岩;T₃ G — 晚三叠世中粗粒二长花岗岩;T₃C — 晚三叠世中细粒二长花岗岩;C₂T — 晚石炭 世似斑状中粗粒黑云母二长花岗岩;C₂H — 晚石炭世中粗粒黑云母二长花岗岩;C₂Xy — 晚石炭世中细粒黑云母二长花岗岩;C₂H — 晚石炭世 中粗粒花岗闪长岩;C₂X — 晚石炭世中细粒花岗闪长岩;S₃S — 晚志留世中细粒英云闪长岩;S₃D — 晚志留世细粒石英闪长岩;O₃ 0 — 晚奥陶 世中粗粒斜长花岗岩;O₃ — 晚奥陶世细粒辉长岩;O₃ — 晚奥陶世超铁镁质岩;1 — 地层界线及不

整合界线;2 — 韧脆性剪切带;3 — 正、逆断层;4 — 平移断层及性质不明断层;5 — 金矿床及矿化点;6 — 铜金矿点

脉型矿体较富,而构造蚀变糜棱岩型则较贫。

2 控矿构造特征简介

阶段。叠加于早期韧性剪切带之上的晚期脆性破裂带,是矿脉的主要产出位置,成矿与断裂带的韧一脆性转换密切相关。在 NW—NWW 向断裂带从韧性到脆性的变形过程中,本区最大挤压应力方位没有重大变化,以 NE—SW 为主,但差应力大小有相对变大的趋势。

3 构造应力场有限元数值模拟

利用有限元法进行构造应力场模拟,其基本思

青海省地质矿产勘查研究院区调三室.15万托莫尔日特幅(J47E020010)地质图,1998。 青海省第六地质队.青海省乌兰县赛坝沟普查区地质图(11万),1998。 周显强,张拴宏,田晓娟,等.青海乌兰县托莫尔日特金矿区及外围构造特征与找矿方向(科研报告),2000。

想是根据地质调查研究得出的各地质点的主应力方 位和相对大小,利用有限元数值模拟,通过数学、力 学求解,反演某一区域内、某一时期各点的应力状 态,从而得出该区的构造应力场特征,以研究在构造 应力场控制下矿产的分布规律。

3.1 有限元数学模型的建立

1)构造应力场模拟阶段及各阶段构造层的划 分

通过对区内控矿构造的系统分析,考虑到构造 演化与成矿的关系,对区内构造应力场的有限元数 值模拟分两个阶段进行,即成矿初期(韧性变形期) 构造应力场模拟和主成矿期(韧一脆性转化期及脆 性变形期)构造应力场模拟。

成矿初期,区内的主要构造框架主要为沿 NW ~NWW 向展布的韧性剪切带,该带从乌达热乎开 始,经赛坝沟、石棉沟一直延伸到嘎顺地区。此期分 布在本区的主要岩石单元是滩间山群,在赛坝沟、乌 达热乎地区分布有大量的花岗质岩石,因此此期的 构造层可分为 3 个:分别是滩间山群、韧性剪切带、 花岗质岩石。

主成矿期构造格局与成矿初期有所不同,此时 区内形成大量的 NW~NWW 向断层,部分叠加在 早期韧性剪切带之上。此期在嘎顺北部及赛坝沟和 乌达热乎北部出现钾长花岗岩,将部分滩间山群分 布区替代,另外在嘎顺西南角出现少量泥盆系沉积 岩。因此此期的构造层可分为以下4个:即滩间山 群、断裂带构造岩、花岗质岩石(包括了韧性变形后 期侵入的钾长花岗岩)、泥盆系沉积岩。

2) 模型建立及单元划分

以研究区范围作为边界,取地壳下单位厚度的 薄板状岩层地块为模型。计算过程中只考虑地块受 水平方向的应力作用,忽略重力和其它垂向应力的 影响,并将整个模型视为水平面线弹性体进行处理。

单元划分主要遵循 4 个原则:应力可能集中的地 区划分力求细、密,例如在断裂的交汇处,断裂与岩体 的接触带等;评价的重点地区划分的应较细、密;单元 的边界线与地质体的分界线、地质体内部的线性构造 线相重合;单元的边长力求相等,尽量避免出现钝角。 首先采用 SAP-5P程序,自动划分单元,然后根据上 述原则对断裂带和岩性分界线处单元进行人工调整。 成矿初期有限元数值模型共划分出 854 个单元,766 个结点(图 2 左),主成矿期有限元数值模型共划分出 1019 个单元,840 个结点(图 2 右)。

3) 位移边界条件及应力边界条件的确定



图 2 托莫尔日特地区构造应力场有限元模型单元划分图(a—成矿初期;b—主成矿期)

根据区内宏观地质构造特征、结构面力学性质、 构造排列组合规律、构造型式以及磁组构、岩组分析、 显微构造等反映的运动方向、方式及最大主压应力方 位,综合分析认为,成矿初期及主成矿期本区总体上 受 NE—SW 向的最大主压应力作用,故对成矿初期 及主成矿期长条状模型的北东边施加均布压应力,南 西边各点进行固定约束。成矿初期在模型 NE 边施 加的压应力量级为 70 MPa;主成矿期在模型北东边 施加的压应力量级为 100 MPa。

4) 岩石力学参数的确定

根据研究区内各构造层岩性种类,对模型所需的 岩石物性参数(弹性模量、泊松比)进行了近似估计, 如表1所示。

表 1 矿区不铜岩石单元力学参数表

	韧性 剪切带	断裂带	泥盆系 沉积岩	花岗质 岩石	滩间山群 变质岩
弹性模 <i>E</i> (MPa)	2.0 ×10 ⁴	1.0×10^{4}	5.0 ×10 ⁴	7.8 ×10 ⁴	3.0 ×10 ⁴
泊松比(µ)	0.38	0.38	0.3	0.25	0.3
备注	模型	模型	模型	模型 模型	模型 模型

注:模型 指成矿初期有限元数值模型;模型 主成矿期有限元数值模 型。

3.2 有限元模拟计算结果分析

有限元数学模型建立完成后,采用增量计算方法 编制的有限元程序,运用 SAP - 5P 软件 SSAP0H 程 序进行计算,经过反复调整,最终得出与地质实际近 似的应力分布结果,分别获得模拟区各点的最大主应 力(1)、最小主应力(3)、最大剪应力(max)、平均主
 应力(ave)及应变能(U)等数值。依此数据为基础,
 用 SUPHER 软件作出相应的等值线图。

最大主应力等值线图(图 3):成矿初期最大主应 力(1)总体上介于 30~160 MPa 之间,石棉沟西部、 乌达热乎及其北部出现明显的应力集中,是最大主应 力(1)分布的高值区,也是强的应力梯度带;主成矿 期最大主应力分布与成矿初期非常相似,主应力变化 也基本一致,此期石棉沟西部、乌达热乎北部也出现 明显的应力集中及强应力梯度带,反映了这些地区复 杂的构造条件,对矿产形成有利。

最小主应力等值线图(图 4):成矿初期最小主应

力(3)总体上介于 0~55 MPa 之间,局部出现拉应 力(3 < 0),应力梯度带分布明显受 NW~NWW 向 构造带控制,特别是在赛坝沟、乌达热乎成矿带和石 棉沟西部,表现最为明显;主成矿期最小主应力分布 与成矿初期非常相似。

最大剪应力等值线图(图 5):最大剪应力即最大 主应力和最小主应力之差的一半(即(max = (1 -3)/2),成矿初期和主成矿期最大剪应力变化范围相 似,均为0~60 MPa。剪应力高值区分布明显受 NW ~NWW 向构造带控制,乌达热乎、赛坝沟及其北部、 石棉沟西部均是剪应力高值区,反映这些地方差应力 大,是相对强烈的变形部位。

43



应变能(这里指由形状改变引起的歪变能)密度 等值线图(图 6):应变能密度计算公式取 $U_d = (1 + \mu) [(1 + 3)^2 + 3(1 - 3)^2]/(12 E),其中 \mu 为泊$ 松比, E 为弹性模量。从成矿初期及主成矿期应变能密度等值线图上可以看出,石棉沟西部地区、乌达热乎北部到赛坝沟一带在成矿初期和主成矿期均是高应变能密度分布区,是构造有利区域。

综合以上构造应力场数值模拟资料,可以看出, NW—NWW 向断裂构造带对本区构造应力场的控 制是十分明显的。在该断裂带通过的乌达热乎、赛 坝沟成矿带及其北部、石棉沟西部地区,是强烈的应 力梯度带、高剪应力带及高应变能密度带,反映了这 些地区优越的构造环境,是成矿有利地区。

由于乌达热乎、赛坝沟地区是目前本区发现的 成矿最优区域,石棉沟西部、乌达热乎及赛坝沟北 部,目前虽然未发现金矿床,但却发现了一些矿化显 示。考虑到以上地区相似的应力场特征,根据由已 知推未知的原则,认为石棉沟西部、乌达热乎及赛坝 沟北部在理论上应成为本区的有利成矿区,在今后 找矿部署工作中应予以重视。

4 流体运移势的计算机数值模拟

根据王子潮等 (1987)^[1]、刘迅等 (1998)^[2]、方 金云等 (1999)^[3] 推导的流体运移势表达式 $i = -aK / [exp(1-2)] \cdot (1+2)$,式中 a介质压缩 系数; K 为介质流通系数; 为矿液粘度系数。模 拟时取与流体运移有关的介质流通系数、压缩系数 和粘度系数均为 1 个单位,借助构造应力场数值模 拟中得到的主应力值 (1及 2),根据上式便可以求 出区内各点流体运移势的大小,探讨运移势的空间 分布规律。

由前文构造应力场数值模拟结果,本区(1+2)一般均为正值(取压应力为正,拉应力为负),由 上式可知流体运移势 *i* 为负的相对大小值,其绝对 值越高,运移势相对愈低。由于 *i* 的绝对值通常很 大,故对其取自然对数后用 SUPHER 软件作出成矿 初期及主成矿期流体运移势平面分布等值线图(图 7)。



 达热乎及石棉沟地区,都表现为低的流体运移势(其 绝对值在图上表现为高的等值线)。由于流体总是 从运移势高值区流向运移势低值区^[3,4],说明这些 地区是流体运移的主要流向区,是矿化有利地段。 这一点与这些地区矿化较好的事实是完全吻合的。

从图 7 还可以发现,乌达热乎北部地区、石棉沟 西部及北部地区也是低运移势分布区,是流体运移 的主要指向区,理论上也应为成矿有利区域。目前 这些地区已发现的一些矿点或矿化显示,就是这一 点的有力证实。虽然该区还没有发现具规模的矿 床,但由于其有利的成矿条件及矿化显示,今后找矿 工作中应予以重视。

5 主要认识及结论

根据构造应力场和流体运移势模拟结果,结合 本区地质特征,可得出如下认识及结论:

1) NW — NWW 向断裂构造带对本区构造应力 场和流体运移势分布有明显的控制作用;

2) 从成矿初期到主成矿期,赛坝沟、乌达热乎金 矿床分布区在应力场中均是强烈的应力梯度带、高 剪应力带、高应变能密度带,在流体运移势分布图上 为低流体运移势区,根据相似性理论,与此区有相似 应力场及运移势特征的乌达热乎北部地区、赛坝沟 北部地区、石棉沟西部地区在理论上应是成矿有利 区域。但考虑到成矿热液来源等其它控矿因素可 知,这些地区的成矿规模可能比赛坝沟、乌达热乎成 矿区小,品位也不如此区高。

3)由于构造应力场和流体运移势模拟预测结果 表现出较大的相似性特征,因此构造应力场和流体 运移势具有一定的耦合性,二者紧密结合并配合其 它地质资料是进行成矿预测的有效途径。

致谢:野外工作得到了青海省地勘局、第六地质 队及赛坝沟金矿等有关单位的大力协助。地质力学 所王连捷研究员无偿提供了构造应力场有限元模拟 软件,并给予了耐心指导;袁嘉音、张利容工程师在 软件的使用方面给予了极大帮助和指导。在此谨表 谢意。

[参考文献]

- [1] 王子潮,王亚南.构造变形与热液成矿[J].地质学报.1987,61
 (2):126~137.
- [2] 刘 迅. 地质力学在矿产资源勘查中的应用[M]. 地质力学的 方法与实践[第五篇(上)]. 北京:地质出版社,1998.40~42.
- [3] 方金云,姚书振,周宗桂,等.望儿山金矿床剪切带控矿作用的 数学模型与模拟[J].地球科学,1999,24(1):83~88.
- [4] 杜子图. 西秦岭地区构造体系对金矿分布规律的控制作用 [A]. 中国地质科学院研究生部博士学位论文. 北京:中国地质 科学院,1997:128~130.

NUMERICAL MODELING OF TECTONIC STRESS FIELD AND FLUID SEEPAGE POTENTIAL IN TOMORITE ORE REGION, WULAN COUNTY, QINGHAI PROVINCE

ZHANG Shuan - hong, ZHOU Xian - qiang, TIAN Xiao - juan, SONG You - gui, YANG Mei - ling (Institute of geomechanics, CAGS, Beijing 100081)

Abstract :Numerical modeling of tectonic stress field and fluid seepage potential in Tomorite ore region has been studied in the paper. The modeling results show that NW ~ NWW trend ductile - brittle shear zones have much effects on the tectonic stress field and fluid seepage potential in the area. The results also show that Saibagou , Wudarehu , northern Wudarehu , northern Saibagou and western Shimiangou are regions with high stress gradient , high shear stress , high strain density and low fluid seepage potential. So they are structural favorable regions for mineralization , and also favorable regions for fluid transportation. Saibagou and Wudarehu ore zones are the best metallogenic regions in the area at present. Northern Wudarehu , northern Saibagou and western Shimiangou have similar features of tectonic stress field and fluid seepage potential to those regions. According to the "prospect unknown area from the known area "principle , the above regions would be prospective metallogenic zones in the area and should be paid much more attention in the future. But if the sources of ore - forming materials and ore - forming fluids are considered , we would know that the metallogenic scale in those prospective regions would be smaller and ore tenor would be lower. Until now , no industrial ore bodies had were found in these regions , but some low tenor mineralization and mineralized points had been found , which corresponds to the modeling results in the area.

Key words :tectonic stress field ,fluid seepage potential ,numerical modeling ,ore prospecting ,gold deposit