断裂构造控矿的数学和力学分析
——以山东新城—河西金矿区为例

雷时斌　孙　岳　　姜　伟
（黄金地质研究所　河北廊坊　065000）　（海沟黄金矿业有限责任公司　吉林延边　133611）

摘　要　以山东新城—河西金矿区为例，通过新城、河西和侯西矿床容矿断裂的形态、断裂活动、构造因素、构造应力场和变形场的数学、力学半定量及定量分析，探讨断裂构造控矿规律以及成矿的力学机理。提出了金矿成矿受主断裂面形态、次级小断裂、节理的发育强度，断裂构造的力学特征、变形强度等控制。矿体多位于波状起伏的主断裂面凸峰的下盘、凹谷的上盘。矿化强度与次级断裂、节理的发育强度正相关。断裂构造带和次级构造裂隙带是内应力低势区和体应变、剪切应变的高值区，是矿化和蚀变的有利部位，矿化强度与应力值负相关，与变形强度正相关。

关键词　金矿　构造应力场　变形场　力学机理　矿化强度　山东

近年来，由于计算机技术在地质领域的广泛应用，使构造控矿的研究方法日趋深入，一系列成熟的数学、力学理论渗透到地质构造研究领域。构造控矿的研究方法，由描述型逐渐向半定量、定量分析方法发展，并在地质构造研究的各方面取得了丰硕成果。笔者试图以新城—河西金矿区为例，利用计算机技术，通过新城、河西和侯西矿床容矿断裂的形态、断裂活动、构造因素、构造应力场和变形场的数学、力学的半定量及定量分析，探讨断裂构造控矿规律及成矿的力学机理。

1　断裂构造基本特征

新城—河西矿区位于著名的招掖金矿成矿带北部，产于焦家断裂带控制的焦家金矿田的腹地（图 1），出露岩石单一，为中生代玲珑花岗岩（$\frac{1}{5}$）和少量太古宙片麻岩、片岩残留体。区内断裂构造十分发育，以 NE 和 NEE 向为主体，主要由焦家断裂及其伴派生的侯家、望儿山、河西、F 断裂和侯西北西向构造裂隙带等不同级别，不同规模、方向的断裂构造，组成了新城—河西矿区的控矿断裂系统，控制着新城、河西、侯西三大金矿的分布（表 1），迄今已探明的金属量约 70 t。

1.1　焦家断裂

属黄弧断裂中段，是焦家金矿田规模最大的区域性断裂，总长 70 km，一般宽 100～200 m，主断裂面呈舒缓波状延伸，走向 NE 20～55°，倾向 NW，倾角 30～45°。该断裂不仅控制着焦家金矿田的总体展布，而且焦家、新城两个特大型金矿床严格产于断裂蚀变带内，矿区内河西和侯西金矿也受该断裂下盘的次级北东东向断裂和北西向构造裂隙带控

第一作者简介：雷时斌，男，35 岁，硕士，高级工程师，构造与金矿地质。
1997-05-04 收稿。李杰美编辑。
© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww

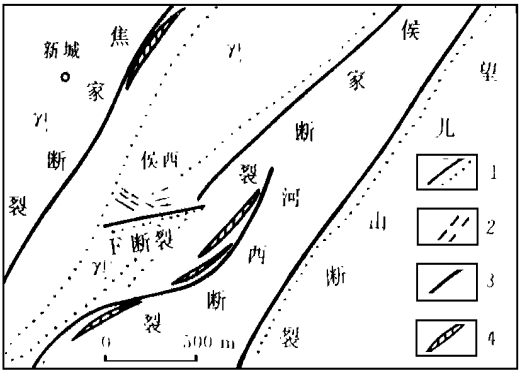

图 1 新城—河西矿区地质略图

1/3- 中生代花岗岩; 1- 破碎蚀变带; 2- 蚀变矿化裂隙带; 3- 主断裂; 4- 矿体

制。焦家断裂形成较早, 并具有明显的多期继承性活动。其次, 区内还发育了一系列北东向断裂, 规模较大的有望儿山和侯家断裂, 是焦家断裂的伴生次一级平行断裂。

1.2 河西断裂

位于矿区南部, 是焦家断裂的次级断裂中规模较大的 NEE 向断裂, 长 2.5 km, 宽 30～60 m, 平面呈开阔反 "S" 形分布, 河西金矿产于断裂蚀变带内。东段产状: 330～340°∠20～50°; 西段: 310～320°∠40～50°。该断裂可能是追踪 NE 和 NEE 向次级断裂形成, 活动历史长, 具有多期、多次继承性活动特

表 1 主要控矿断裂地质特征

名 称	长/km 宽/m	倾 向 倾 角	变形特征和构造岩	活 动 特 征	蚀变、矿化
焦家断裂 (区域性)	70 100～200	290～25° 30～40°	早期韧性变形: 糜棱岩、塑性柔皱劈理化, 晚期脆性变形: 碎粉岩、碎斑岩、碎裂岩, 角砾岩等脆性构造岩和脆裂面	主体为左行压剪性, 成矿期右行张剪性	钾长石化、硅化、绢云母化、黄铁矿化等, 局部地段矿化蚀变规模大、强度高, 形成工业矿体新城、焦家金矿
望儿山断裂	10 40～100	280～310° 40～56°	与焦家断裂相同	与焦家断裂相同	与焦家断裂相同, 控制河东、望儿山等金矿
侯家断裂	5 20～200	305～340° 35～45°	以脆性破裂为主, 碎裂岩化花岗岩	与焦家断裂相同	蚀变、矿化较弱
河西断裂	2.5 30～60	310～340° 25～45°	与焦家断裂相同	主体为左行压剪性, 成矿期右行张剪性	与焦家断裂相同, 以裂隙蚀变、矿化为主, 控制河西矿床
F 断裂	0.5 1～10	335～347° 47～57°	以脆性破裂为主, 碎裂岩、碎斑岩、断层泥砾等, 局部可见早期残留的糜棱岩	与河西断裂相同	与河西断裂相同, 控制河西 7、8 号矿体
侯西断裂 裂隙带	0.3 100～150	主体走向 NW, 为向 NW 收敛, 向 SE 撒开的帚状裂隙构造带	以脆性破裂为主, 局部小断裂带发育有碎斑岩、碎裂岩, 主体为碎裂化、节理化花岗岩	主体压剪性, 成矿期为张性、张剪性	与焦家断裂相同, 以裂隙蚀变、矿化为主, 控制侯西金矿

点。另外, 矿区内还有一条与河西断裂平行的北东东向断裂, 是笔者 1990 年首次发现并证实的容矿断裂。

1.3 侯西北西向构造裂隙带

位于焦家断裂下盘, 侯家和 F 断裂的上盘, 主体呈北西向展布, 由一系列低级别、低序次的小断裂和节理构成, 平面上为向北西方向收敛, 向南西撒开的帚状断裂。构造裂隙带长 300 余米, 宽 60～150 m, 控制着侯西矿床和矿体的产出。

2 断裂控矿的数学分析

新城—河西矿区有三个主要金矿床: 新城、河西、侯西, 由于控矿主要因素不同, 研究时采用了不同的数学分析方法。

2.1 新城、河西矿床矿体定位分析 (趋势面分析)

新城、河西两矿床严格受焦家和河西断裂控制, 矿体产于两大断裂主破碎带的上下盘, 与主破碎带形态关系密切。为了探讨断

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

裂控矿特征, 笔者用了断裂形态的数学 (趋势面) 分析方法, 即利用钻孔、坑道资料, 做主断裂面趋势分析和上下盘矿体、矿化蚀变带金总量分析, 新城金矿主断裂面一次趋势分析剩余图 (图 2)。一次趋势面的拟合度为

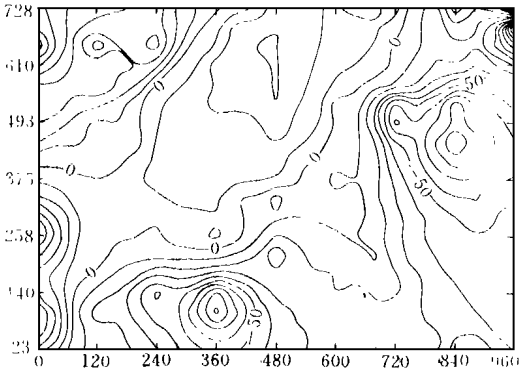

图 **2**　新城金矿 **143～207** 线主断面一次趋势剩余纵投影等值线图

99% (115 个工程控制点), 说明焦家断裂新城主断裂面基本是一个斜面, 但是有明显凸峰和凹谷。图 3 是含金总量纵投影等值线图, 与图 2 比较可以看出新城金矿矿体产在主断裂面凸峰的下盘, 在凹谷处无矿, 主断面凸峰和小波峰在空间上定位位置和侧伏方向与主矿体、分支矿定位位置和侧伏方向一致。河西主干断裂起伏较大, 一次趋势面拟合度仅为 84% (182 个工程控制点), 河西矿床河

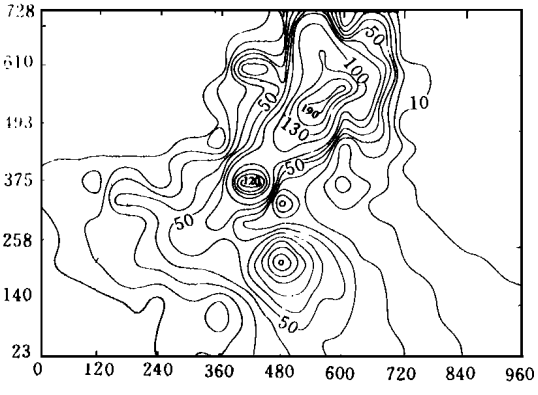

图 **3**　新城金矿 **143～207** 线金总含量纵投影等值线图

西段矿体产于河西断裂主波谷上盘, 而且范围广、矿化带宽, 矿体侧伏方向与波谷侧伏方向一致, 而红布矿段矿体则赋存于河西主断裂波峰下盘, 矿体展布方向与主要波峰一致 (图 4、5)。

综上所述, 通过断裂面形态的趋势面分析, 可知金矿的产出部位明显受主断裂面形态控制, 主断裂面波峰下盘和波谷上盘是金矿成矿的有利场所和富集空间, 矿体侧伏方向受主断裂面波峰和波谷在空间上的侧伏方向制约。

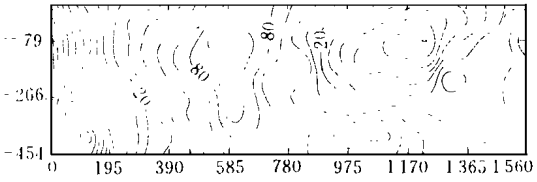

图 **4**　河西断裂 **36～140** 线一次趋势剩余纵投影等值线图

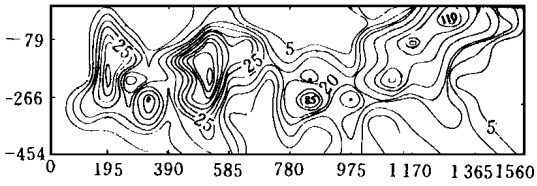

图 **5**　河西断裂 **36～140** 线含金总量纵投影等值线图

2. 2　侯西矿床断裂构造因子统计分析

侯西矿床的矿体受小断裂和节理控制, 主破碎带不发育, 为了研究矿体富集规律和矿床的空间展布规律, 做了矿化强度与构造因子的逐步回归分析。

2. 2. 1　构造因子选取和资料来源　NW 向矿体已揭露了三个中段, 其中二中段工程揭露最好, 故此以二中段所有 8 条穿脉为基础, 并选取了三中段两条穿脉 (共 10 条), 每条选择 8 个构造因子, 一个矿化强度因子: A– 断裂泥砾带宽度 (cm); B– 碎裂岩化带宽度 (m); C– 残留体厚度 (m); D– 蚀变带宽度 (m)。以上 4 个构造因子, 均是统计各穿脉的

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://ww

累积宽度。E- 小断裂的条数 (宽度大于 10 cm) ; F- 矿化节理密度与宽度的乘积 (条 · mm/m) ; G- 主要断裂的平均走向 (度) ; H - 主要断裂的平均倾角(度) 。矿化强度因子: 穿脉中金含量大于 0. 5×10^{-6}的样品金总含量, 得到 10×9 个原始数据矩阵。

2. 2. 2 *统计分析和结果* 第一步: 数据正规化处理, 目的是消除数据数量单位和数量级对计算结果的影响。第二步: 逐步回归分析。

检验变量的显著性的下临界值选取, 样品 n= 10, 在全部 8 个变量中, 估计有 4 个选入回归方程, 因此, 第一自由度为 1, 第二自由度 10- 4- 1= 5, 取置信水平= 0. 1, 查 F 分布表 F= 4. 06。

回归方程: 1= - 0. 383 7+ 0. 376 8 B+ 0. 684 7 E+ 0. 438 2 F

复相关系数 0. 98, F 统计量= 59. 528 8, ($F_{0.05}$3. 6 检验临界值= 0. 976) 。

F 统计量远远大于检验临界值, 说明回归方程高度显著。由上可知, 矿化强度同小断裂发育的条数 (E) 高度相关, 其次是节理密度与宽度的乘积 (F) 及破碎带 (碎裂岩化节理岩化带) 宽度, 结论与野外坑道地质观测结果一致。

3 断裂控矿的力学分析

新城—河西矿区断裂的形成和发展, 经历了由韧性到脆性变形的演化过程, 据构造形变、变形特征和切割关系, 分为两期四个阶段。第一期矿区处于中深层次, 以韧性变形为主, 在南北向挤压应力作用下, 形成了焦家、侯家、望儿山等北东向韧性剪切带, 同时派生一系列NEE、NW 向 (河西、F、侯西等) 次级剪切带。随着地壳抬升, 中生代太平洋板块向欧亚板块俯冲, 区域遭受 NW—SE 向挤压, 致使 NE、NNE 向韧性断层复活, 发生脆性破碎, 同时伴生一系列次级北西向小断裂和裂隙, 形成了矿区控矿构造系统, 中生代晚期, 胶东地区地壳上隆加剧, 导致构造应力场由原来的以挤压为主转为以引张作用为主[2], 致使 NE 向断裂构造和伴派生的NEE、NWW 等裂隙发生剪张、张剪和张性活动, 形成扩容空间, 为矿质富集、沉淀创造了有利空间。

为了探讨矿区断裂构造变形活动与金矿化关系, 笔者应用 SAP84 软件和编制的 SAP84—1 程序进行等差有限元法分析, 对矿区构造应力场、变形场进行计算机模拟。

通过多种方案的模拟结果对比, 选择了图 6 所示的成矿期构造应力场变形场模拟方

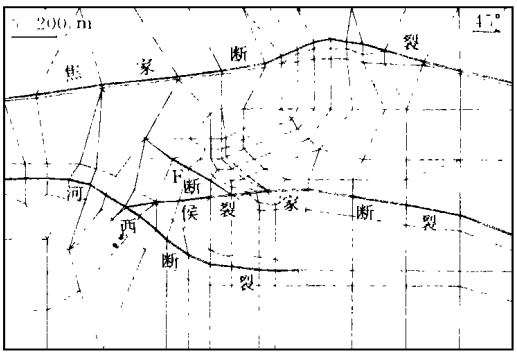

图 **6** 河西新城地区单元划分图

案, 模型为线弹性, 各有限单元的物性参数是据实测和前人实验数据有条件地选取, 使其尽量符合实际情况, 而断裂和裂隙带由于岩石固结较差, 易产生滑移变形, 因此, 其弹性模量较低, 一般低一个数量级左右, 而泊松比相对较大 (表 2) [1]。

由于模拟是半定量的, 故此, 在施加外部力时仅考虑了模型体实际受力方向, 即在

表 **2** 物性参数

岩石名称	弹性模量 kg/cm^2	泊松比
花岗岩	5. 5×10^5	0. 2
断裂破碎带	5. 5×10^4	0. 4
侯西糜棱岩、花岗岩各向异性	5. 5×10^5, 3. 5×10^5	0. 3

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

成矿期 NNE 向引张应力的作用下 (新城、侯西矿床利用 10 点配套矿化节理统计, 最大张应力方向为 175～205 ∠40～55°, 主体集中于 198～205 ∠42～45°)。模拟结果如下: 1) 北东向构造带内主应力方向发生偏转, 最小主应力偏向北—北北东。2) 构造带内正应力、偏应力均减少, 形成了一个明显的应力低值区(图7、8) 。3) 构造带内体应变、最

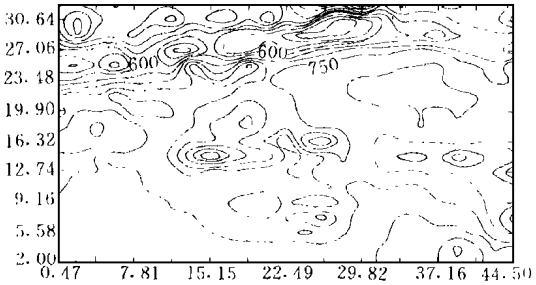

图 **7**　研究区正应力等值线示意图 ($_1$+ $_2$)

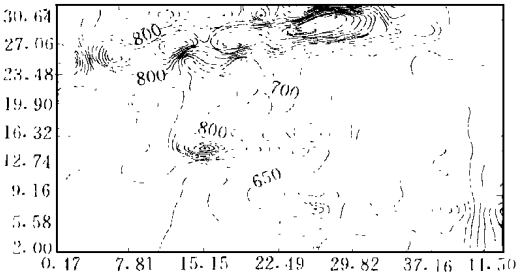

图 **8**　研究区偏应力等值线示意图 ($_1$− $_2$)

大剪切应变均显著增高, 说明构造带在成矿期引张应力场作用下是扩容区和最大剪切位移高值区 (图 9、10), 为成矿提供了有利的空间。4) 多组断裂发育地段, 如侯西地段体应变和最大剪切应变均为高值区(图9、10)。5) 同一条断裂不同地段的体应变和剪切应变的差异性是很明显的。如焦家断裂在新城地段的弧形弯曲 (由NE 向转为 NEE 向) 顶部及其右侧的体应变和剪切应变都较强, 说明该地段在成矿期为一规模较大的扩容区, 是矿质富集成矿的有利场所, 上述模拟结果与新城金矿实际赋矿部位是完全一致的, 又

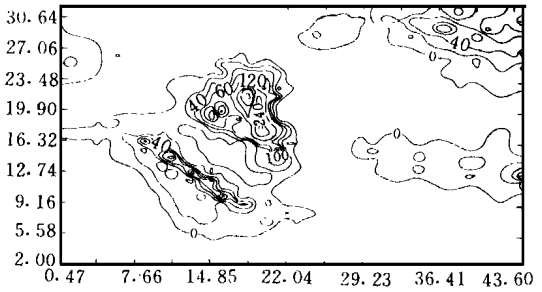

图 **9**　研究区体应变相对等值线示意图

[($_1$+ $_2$) ×10 000]

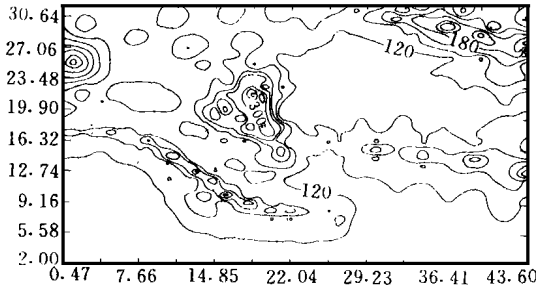

图 **10**　最大剪切应变相对等值线示意图

[($_2$− $_1$) ×10 000]

如河西断裂在河西地段体应变和最大剪切应变的规模和强度都明显大于红布地段 (图 9、10), 故此, 河西较红布地段更有利于金的富集成矿, 这也与河西断裂在河西地段形成大型金矿, 而在红布地段形成小型金矿的实际情况一致。6) 如图 9、10 所示, 侯西 NW 向矿体东侧的侯家断裂的体应变和最大剪切应变值较低, 与其成矿作用较弱的实际情况一致。7) 侯西 NW 向构造裂隙带的体应变和最大剪切应变值大于焦家断裂构造带、河西断裂构造带的体应变和最大剪切应变。说明 NW 构造裂隙带内小断裂和节理在成矿期扩容能力较强, 容易产生自由空间, 形成充填型的脉状矿体, 而焦家断裂带内的构造岩带、

雷时斌. 胶东地区侯西金矿北西向构造控矿特征成矿机理及其区域找矿远景的研究 (二、五、六章), 科研报告, 1991

(C)1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://ww

河西构造岩带中的体应变很小，最大剪切应变也较低，因此，不易产生自由空间，而主要以渗滤、扩散、交代作用为主，形成以浸染状为主的蚀变岩型矿体。

通过河西—新城矿区的主要控矿断裂的数学、力学分析，认为该矿区矿床、矿体严格受断裂构造控制。1) 在构造主破碎带发育的断裂构造中，主断裂形态与金矿床、矿体的生成定位关系密切，矿体主要产于主断裂面波峰下盘和波谷上盘，而在主破碎带不发育的侯西矿床，控制矿体生成展布的主要因素是小断裂和矿化节理，矿化带是否形成工业矿体以及矿体宽度和矿化富集程度取决于小断裂、矿化节理的密度。2) 通过有限元法计算机模拟可知：金矿成矿有利场所是构造应力低势区，是体应变 (反映扩容能力) 和最大剪切应变 (反映剪切变形能力) 的高值区。矿化类型与体应变、最大剪切应变值关系密切，值高的易形成充填型脉状矿体或张性角砾岩型矿体，而相对低的易形成破碎蚀变岩型矿体。

参考文献

1 王仁等. 固体力学基础. 北京：地质出版社，1979
2 胡家杰等. 胶东河西金矿断裂及矿体预测. 地质科学，1987，(5)

METHEMATICAL AND MECHANICAL ANALYSIS OF FAULT STRUCTURE ORE-CONTROL IN GOLD MINES OF XINCHENG- HEXI, SHANDONG

Lei Shibin Sun Yue
(*Gold G ological Institut of MMI, Langf ang, H b i*, 065000)
Jiang Wei
(*H igou Gold Min ral Limit d-Liability Corporation, Yanbian, Jilin*, 133611)

Abstr ct With the methods of the mathematical and mechanical quantitative and semiquantitative, the shape, mobility, structural factors, tectonic stress field and deformation field of hosted-ore fault in Xincheng- Hexi and Houxi gold deposits are analysed. Laws of fault structure ore-control and mineralization mechanism are discussed. It is concluded from these studies that metallization was controlled by forming of main fault section, subsidiary fracture, intensity of joint, mechanical features and deformation strength of fault. Ore-bodies mainly locate in low part of convex crest and upper part of concave trough of main curved fault. Mineralization intensity is positive correlation to the developed degree of subsidiary fracture and joint and deformation intensity, negative correlation to the stress. Fault-belt and subsidiary fracture-belt, which are the low-values region of internal stress and the high-values region of body strain and shear strain, are the preferred spaces for deposit.

K y words gold deposit, tectonic stress field, deformation field, mechanism, mineralization intensity, Shandong

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