

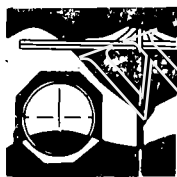
控矿断层几何学和运动学及其控矿规律研究

吴树仁

(中国地质大学·武汉)

本文利用现代构造几何学和运动学的理论和方法,解析控矿断层带的几何学、运动学特征及其控矿规律。在重点论述控矿断层几何结构及其局部矿化富集规律的基础上,提出了将统计分析、趋势性和自相似性分析融为一体的累集性几何解析方法,并阐明了这种方法是确定波曲状控矿断层的波长和波幅,进而进行空间定位找矿预测的重要途径之一。

关键词 控矿断层 几何结构 找矿预测



地质·勘探

断层带的几何学和运动学,一直是构造地质学研究的中心课题之一,取得了大量专题研究成果(Ramsay, 1980; Cobbold等, 1987; Choukrouhe 等, 1987;

Petit, 1987; 贾维民, 1989; 吴树仁, 1992)。然而,关于控矿断层几何学和运动学及其局部富集成矿规律的研究,虽然有所涉及和积累(曾庆丰, 1980; 翟裕生等, 1981, 1984; 林新多等, 1981),但其专题研究报道很少见。显然,这是控矿构造需要进一步深入探讨的领域之一。

目前,地质找矿的重点和热点是深部预测找矿,这一方面意味着其难度增大,另一方面也意味着控矿构造研究急需深入。因此,本文试图运用现代构造观和方法论,以断层几何学理论为基础,结合大量的实际资料,从平面、剖面和三维空间解析控矿断层带的几何结构和运动学特征及其局部富集成矿规律,以便为深部找矿预测探讨出新的途径。

平面分析

控矿断层带在平面上的几何轮廓主要是由一条主断面或多条主断面的弧形弯曲及其派生的分支断裂所组成。其运动学特征投影到平面上则只有左旋和右旋扭动之分(包括扭性、压扭性和张扭性断层)。因此,这里以几何学上的单断面和双断面结构为主体分别论述。

1. 单断面结构

断层带的单个主断面几何结构是其最常见、最简单的平面几何形式之一,以其沿走向的波曲状变化和折线状弯曲延伸为主要特征(图1)。

(1) 几何分类:根据单条断面几何结构的规律性变化特征,可将其分为3种类型:

A型结构:断面呈波曲状变化,以一系列弧形弯曲线的切线代表其走向,不存在控制断层总体走向的直线段(图1A)。这种结构是由于断层扩展变形过程中,①P、R断裂或P、T断裂的均匀扩展及其联合交切代替了主断面的扩展变形(图2A);②岩桥断裂的扩展贯通(图2B),从而形成近似正弦

曲线状的断层平面几何结构 (图 1A), 其波曲的波长 L_s 和波幅 H_s 大致相同, 即具有等距性的规律 (图 1A 和图 2)。如果是 P 、 R 断裂组合扩展, 则弯曲弧顶两翼近似对称 (图 2A); 如果是 P 、 T 断裂组合扩展或是岩桥构造的扩展贯通, 则弧顶两翼不对称 (图 2A 中 def 段, 图 2B)。 A 型结构是矿区

常见的控矿断裂平面几何形态之一 (图 3A)。

B 型结构: 断层走向以波曲状延伸为主, 局部分布有控制其总体走向的直线段 (图 1B);

C 型结构: 断层以控制总体走向的似直线段为主, 局部发生波曲和转折 (图 1C)。

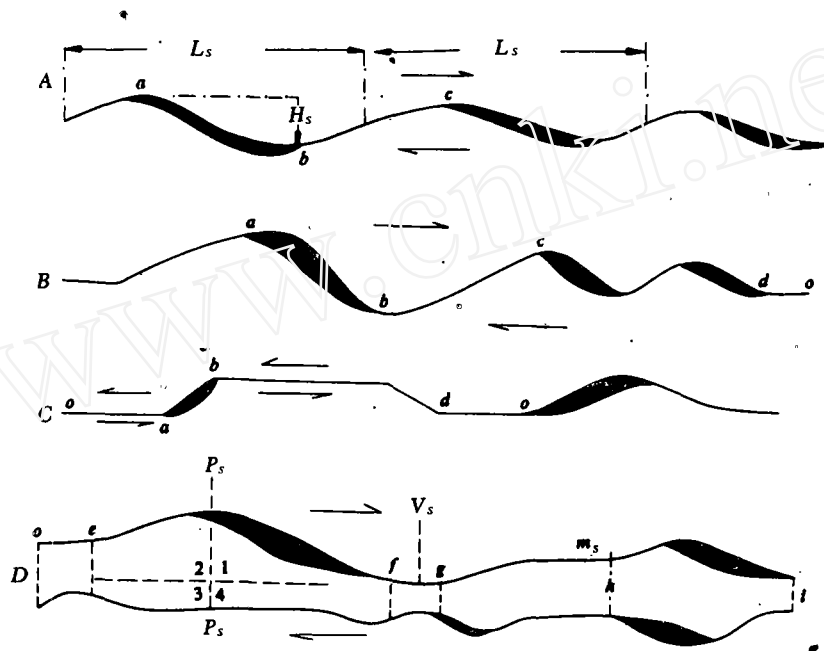


图 1 控矿断层平面几何结构图解

A、B、C、D 分别是 A 型、B 型、C 型和 D 型几何结构图解 (说明见正文)

L_s —走向波长; H_s —走向波幅; ab 段—有利于成矿的敛散型扭断层; bc 段—敛集型扭断层; do 段—平行型扭断层; P_s —走向波峰; V_s —走向波谷; m_s —平均走向段

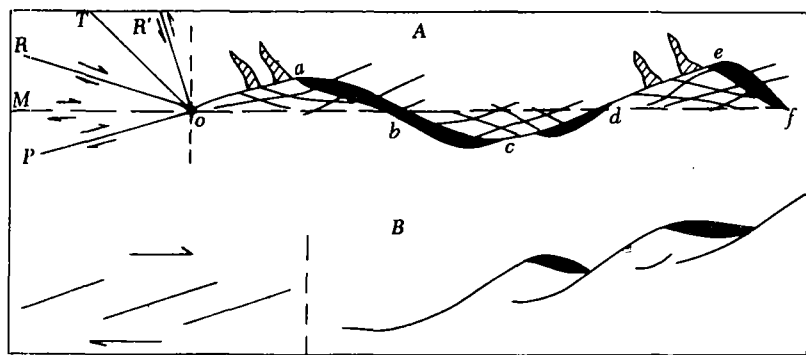


图 2 波曲断层形成过程图解

A—由 P 、 R 、 T 断裂的联合扩展交切形成的波曲断层; B—由岩桥断层扩展联合形成的波曲断层

B型和C型结构是由于岩性不均产生的折射和应力分布不均或P、R断裂的不均匀扩展而形成的局部弯曲断层。其波长变化范围从分米级到千米级，以渐变为主（图1B），也可能突变（如重大岩性界面的折射）。与A型结构的重要区别是分布有与总体走向一致的主断面。

(2) 运动学分类：走滑断层根据其相对运动方式可分为3类：即平行型、聚敛型和离散型扭断层(Lowell,1985)。平行型扭断层是指断层一盘相对于另一盘作平等扭动（图1C中oa段）；聚敛型扭断层是指断层在扭动过程中还受到挤压分量的作用（图1A中的bc段）；离散型扭断层是指断层扭动过程中还受到拉张应力分量的作用（图1中的ab段），这种扭断层最有利于矿脉局部富集。

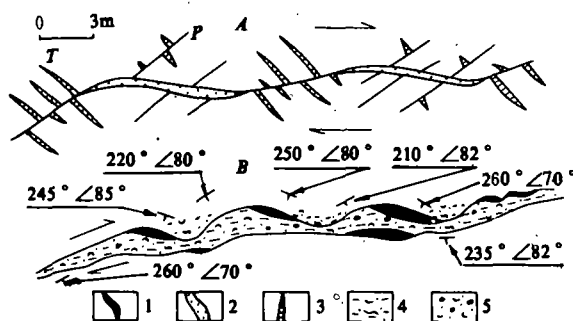


图3 控矿断层平面控矿规律素描图

A—单断面A型结构控矿规律素描图（据B·车尔尼雪夫）；B—宜昌石板溪金矿区V号矿脉平面素描图；P—剪裂隙；T—张裂隙；1—矿体；2—成矿有利地段；3—矿脉；4—绢英岩和绢英片岩；5—绢英岩化角砾岩

(3) 矿化富集规律：从几何特征分析，平面上控矿断层沿走向发生弯曲的部位有利于矿化富集。结合运动学分析，则是弧形弯曲的一翼即离散型扭断层（局部引张部位）有利于矿化富集，而聚敛型扭断层（局部挤压部位），则不利于富集成矿（图1、图2）。根据A型结构的似等距性和B型结构波长、波幅的趋势性变化规律，可以预测沿

走向未知矿体的位置和规模。

2. 复断面结构

控矿断层带的平面多断面结构以近似平行的两条主断面最为常见，它可以是上述3种单断面之间任两者的组合。这种双断面结构是由于断层带多个扩展变形中心，或是主断面形成后其从属P、R断裂联合扩展变形的结果。如图2A所示，在主断面M形成后，其P、R、T断裂的联合扩展交切形成一个新的波曲断面，与扩展变形的断面一起组合成双断面结构（图1D）。这种情况下，单断面的局部几何形态变化是次要的，而其组合形式则是主要的，因此本文将其基本形式概括为D型结构（图1D）。其重要特征是两个主断面都可能发生弯曲，但并不一定同步。如果将断层带变宽的弧顶称为走向上的波峰（用 P_s 表示），而把断层带变窄的弧顶称为波谷（用 V_s 表示，图1D）；则在两断面分别向外扩展的波峰处，最有利于富集成矿（图1D，hi段）；而在单断面的弧形扩展波峰处也有利于成矿富集（图1D，ef段），用波峰脊线和断层带平均宽度等分线（图1D， $P_s-P'_s$ 和其互垂线），将此扩展域分成4个象限，则第1象限最有利于矿化富集，2、3、4象限依序次之。在两断面扩展的双波谷地段（图1D，fg段），则最不利于矿化富集，即使断层带矿化均匀分布，在此位置往往也无明显矿化富集现象（图3B）；而在单断面波谷处（图1D，oe段），也不利于矿化富集，这种变形结构的矿化富集规律在宜昌石板溪金矿区十分明显（图3B）。

3. 主从结构

所谓主从结构是指主干控矿断层带及其所派生的从属断裂(P、R、T、R')的组合样式，包括“入”字型构造及其由P、R断裂组成的棱形结网状构造组合（图2A）。关于前者，地质力学作了较精辟的论述（李东旭等，1986），对于后者是韧性剪切带和脆—

韧性剪切带的弱应变域中常见的控矿构造形式和矿化富集部位。其中以 T 断裂最有利于矿化富集, R 、 P 相应次之。但 P 断裂往往规模最大。需要注意的是: 由 P 、 R 裂隙组成的棱形结网与挤压产生的两组共轭节理组成的结网状构造在运动学上有较大差别。前者两相对应的棱形边界的扭动方向一致, 即或者都是右旋 (图 2A), 或者都是左旋; 而后者则是相反的, 即一个左旋, 另一个右旋。

上面以走滑平移断层为基础所进行的关于平面几何结构的讨论, 对于压扭性、张扭性断层也同样适用, 只要将运动学分类作相应的调整, 则同样可以归纳出局部富集成矿规律。

剖面分析

断层剖面形态变化, 最著名的是断坪断坡说, 其原理已在控矿构造研究中得到应用 (翟裕生, 1984)。但是, 剖面资料比平面资料更难获取, 深部找矿比地表找矿更难预测, 因此将断层剖面形态变化和运动学特征及其矿化富集规律研究相结合, 进行深部找矿预测, 仍是目前控矿构造面临的难题之一, 需要不断深入探讨。根据断层剖面几何结构和运动学的组合控矿规律分析, 可将其剖面控矿结构概括为 3 类 8 种形式的组合 (图 4)。

I 类: 逆断层类, 是指剖面上断层上盘位移分量向上的各种断层。在断面产状由陡变缓的缓倾角处形成局部引张, 易于成矿。根据双断面结构的产状组合, 又可分为 3 种形式:

I_a 型: 只有上断面发生波状变化, 在其缓倾角处易于富集成矿 (图 4 I_a), 下断面无波曲变化;

I_b 型: 在下断面产状变缓处, 局部富集成矿 (图 4 I_b), 上断面无波曲状变化;

I_c 型: 上、下断面都发生波状变化,

其缓倾角地段有利于富集成矿 (图 4 I_c)。

II 类: 正断层类, 是指上盘位移分量相对向下的各种断层。在断面由缓变陡的陡倾角部位 (断坡) 形成局部扩张空间, 易于富集成矿。同逆断层一样也可分为 II_a 、 II_b 、 II_c 3 种类型 (图 4 II_a 、 II_b 、 II_c)。

III 类: 复合断层类, 主要指断面局部出现反倾向的变化, 形成正、逆复合断层。根据运动学特征又可分为两种类型:

III_a 型: 主体表现为逆断层, 局部是正断层, 在其产状由陡变缓的部位形成局部引张, 易于局部富集成矿 (图 4 III_a);

III_b 型: 主体表现为正断层, 局部是逆断层, 在其产状发生反向陡倾的部位有利于富集成矿 (图 4 III_b)。

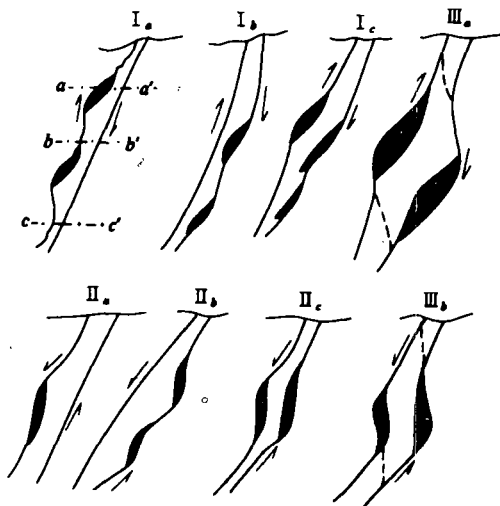


图 4 控矿断层剖面几何结构类型

这 8 种类型的控矿断层剖面结构是常见的剖面控矿形式 (图 5)。其双断面结构有时是指矿脉的上、下脉壁, 有时则相互交切组合 (图 4 III_a 、 III_b 中的虚线所示) 成单断面结构。单断面结构则同样遵循上述规律 (图 5a)。对于一条大型控矿断层带来说, 是上断面波状控矿 (I_a 和 II_a) 还是下断面波状控矿 (图 I_b 和 II_b), 是指导深部探矿工程空间定位找矿的重要依据之一, 因此 a 型和 b 型之分也是必要的, 对于金矿等富矿

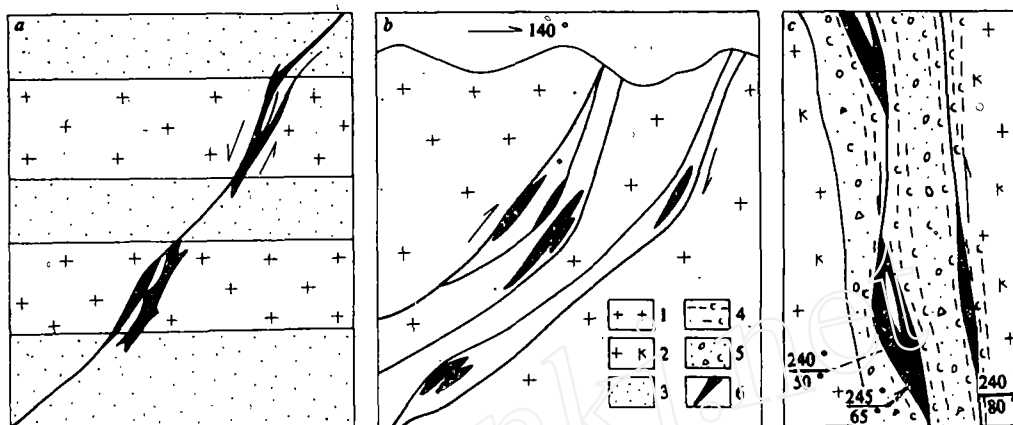


图5 控矿断层剖面控矿规律素描图

a—断层切穿不同强度岩石所引起的断面折射控矿(据 C.C.斯米尔诺夫); b—铀矿体的赋存部位剖面图(据 3010 资料修编); c—宜昌石板溪金矿 V 号矿脉剖面图; 1—花岗岩或石英砂岩; 2—钾化花岗岩; 3—泥岩; 4—绢英岩; 5—绢英岩化角闪岩; 6—矿体

石的矿体体积相对较小的矿种来说尤其如此(图 5c)。

探讨波曲状断面控矿规律至关重要的另一个问题是其剖面上波长的确定。对于层状岩石则可根据其不同岩性层的厚度确定断面发生折射的波长(图 5a); 对于均质性岩石则需要进行分析统计和自相似性分析来确定其波长: 即对不同高程断层剖面的几何形态进行仔细观测、统计, 寻找其趋势性变化规律和自相似性规律。如图 4.1_a 所示, 在其 a-a' 露头剖面上, 分布有微波曲到主波曲的渐变关系, 而在 b-b' 平硐剖面只见到其微波曲段, 根据两剖面上微波曲的相似性, 则可预测 b-b' 剖面下部很快会出现主波曲。一旦这种预测得到证实, 则在 c-c' 剖面的微波曲段下部也应有主波曲出现。然后可根据这个剖面的预测结果和统计波长, 预测另一剖面的深部含矿性。这种集统计分析、趋势性和自相似性分析为一体的、累集式几何解析原理, 是深部预测找矿的重要途径之一。同样的道理, 也可将平面的波长、波幅变化规律有条件地用于剖面预测。这里只举最简单的一例, 实际解析过程中, 需要对断

面产状、形态、擦痕、阶步、矿体的侧伏向、侧伏角及其尖灭侧现、尖灭再现等诸多几何要素进行统计性、趋势性和自相似性分析。如果具有自相似性的几何要素越多, 其预测精度也越高。

空间解析

矿体是三维实体, 要讨论其形态和富集规律必然涉及到剖面的组合分析。为了叙述方便, 本文将波曲断层在走向上的波峰(断层变宽处)、波谷(断层带变窄处)及其未变化的总体走向分别用 P_s 、 V_s 和 m_s 表示(图 1D), 相应地在倾向上的波峰、波谷及其平均倾向段分别用 P_d 、 V_d 、 m_d 表示(图 6), 则在空间上它们之间存在下列 4 种主要组合方式:

a: 走向波峰 P_s +倾向波峰 P_d , 形成空间上最有利的富集成矿部位(图 6a)。 P_s 和 P_d 既可是横跨迭加, 也可是斜跨迭加, 前者控制断层面上的倾竖矿柱(图 6); 后者则控制其侧伏矿柱, 且比前者更普遍。这种组合方式多控制圆柱状或椭球状矿体;

b: P_s+m_d 或 P_d+m_s , 形成空间上相对

有利的富集成矿部位 (图 6b), 多控制扁圆柱状矿体;

c: P_s+V_d 或 P_d+V_s , 即走向波峰与倾向波谷迭加或倾向波峰与走向波谷迭加, 形成空间上相对较差的矿化富集地段 (图 6c), 多控制薄饼状或“舌”状 (不连续) 矿柱。两者之间的相对比较, 取决于其波幅的大小。如果走向波幅比倾向波幅大, 即 $P_s>P_d$, 则 P_s+V_d 相对有利于富集成矿, 反之亦然;

d: V_s+V_d , 即走向波谷迭加倾向波谷, 这是空间上最不利的矿化富集地段 (图 6d)。在整个断层带普遍矿化的情况下, 此地段也不会出现矿化富集, 而是形成一些挤压片理。

矿体的空间定位预测是个复杂的过程, 但从几何学和运动学上分析, 基本上服从上述规律 (图 6)。要正确认识控矿断层的这种控矿规律, 首先要准确理解、提炼、测量控矿断层在平、剖面上的几何要素和运动学要素。如擦痕、阶步、波长、波幅、断坪与断坡之比、侧列、逆冲、斜冲、左旋和右旋等。其次是要对这些要素进行不同尺度的统计分析, 探讨自相似性和发展变化规律。最后依靠空间几何运算便可进行定位预测。显然最基本、最关键的工作是几何要素的准确观测, 这既需要良好的露头和大量的实际资料, 也需要构造几何学知识和经验的积累。

认识和讨论

1. 矿体空间定位预测一直是国内外研究的热点、难点课题之一。本文系统地总结了利用控矿断层几何学和运动学特征进行矿体空间定位预测的基本方法和原理。根据作者的研究体会, 这种方法是深部定位找矿预测及远景评价的重要途径之一。

2. 本文提出的控矿断层几何学的统计分析、趋势性和自相似性分析相结合的累集性几何解析方法, 是揭示构造控矿规律及预

测找矿研究的核心问题之一。正确地运用这种方法, 可以达到事半功倍的效果。而准确识别、提炼和测量控矿断层的各种几何要素是进行这种几何解析的基础, 也是本文论述的重点。

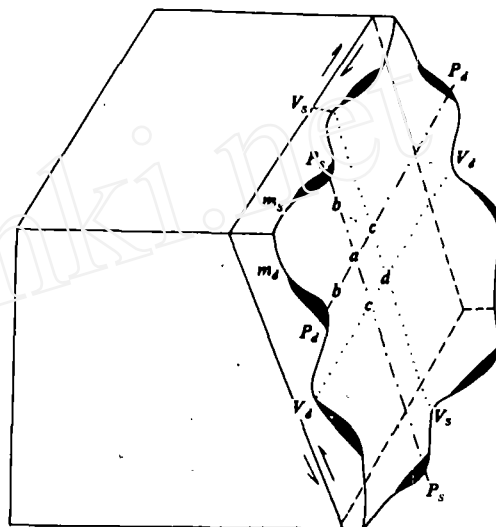


图 6 波曲状断层空间控矿规律图解

3. 本文只从统计分析和趋势性分析的角度讨论波曲断层的波长、波幅的变化规律, 而不少协作研究单位和学者 (尤其是地质队) 希望作者结合理论计算来推断破裂面的波长、波幅变化规律。这涉及到地质体的复杂动力学分析 (包括固体力学, 弹—塑性力学, 流体力学等), 不是短期所能达到的。也可以说, 本文是进行这种系统性研究的第一步, 因为断层的几何学和运动学分析是进行其动力学分析的基础。

参考文献

- [1] Ramsay, J.G., J. Struct. Geol., 1980, No. 2, pp. 83-99.
- [2] Cobbald, P. R. et al., J. Struct. Geol., 1987, No. 9, pp. 531-523.
- [3] 贾维民, 现代地质, 1989, 第 4 期, 473~484 页。
- [4] 吴树仁, 地质科技情报, 1992, 第 1 期, 21~27 页。
- [5] 曾庆丰, 地质科学, 1980, 第 1 期。
- [6] 翟裕生等, 《矿田构造与成矿》, 地质出版社, 1981 年。
- [7] 翟裕生, 《矿田构造学概论》, 冶金工业出版社, 1984 年。