

热液矿床空间定位的构造模式

刘永滨 贾德裕

(湖南省地质研究所)

内容提要: 本文是通过对中国三百多个热液矿床的实地考察后,根据控矿构造空间展布的组合同型式,从构造地貌反映的景观特征,提出热液矿床空间定位的构造控制模式有如同“A”、“K”、“X”字样的三种类型。根据这三种模式进行普查找矿和矿产预测,均显示出令人满意的效果。文中介绍了三种控矿构造模式类型的特征、判定模式的存在及其类型的方法和实际应用效果,从应力集中的原理方面分析了模式的形成机理。

关键词: 热液矿床 空间定位 构造模式

随着地质工作的不断深入,寻找隐伏和半隐伏矿床已经成为当前地质工作亟待解决的问题。对于热液矿床(包括不同成因的、具有运移成矿物质而最终能堆积成矿的热液所形成的矿床)来说,其重要的成矿条件之一就是构造的控制作用。已经证实的规律是,在构造的交叉部位,是这类矿床空间定位的部位,也就是主要的聚积富矿体的地段。因此,确定这些构造交叉的部位,就可以提高地质找矿工作的效率,而且在理论研究方面,将会丰富矿床学的研究内容。为此,各国不同学派的地质学专家都在这方面进行着积极的探索。

十多年来,作者带着上述问题对三百多个不同规模的热液矿床的控矿条件进行了实地考察,发现这类矿床的控矿构造在空间展布上具有一定的形态组合规律,并且在构造地貌景观上有其相应的、不同程度的反映。无疑这些构造地貌所表现出来的控矿构造的组合同型式,正是地壳构造运动中地应力在不同介质或不同边界条件下相对集中的结果。在成岩、成矿物质(包括含矿热液和矿化剂)来源充分的情况下,这里是成岩或成矿最有利的部位。作者将这些具有标型特征的控矿构造的组合同型式称之为热液矿床的控矿构造模式。根据这些模式,从宏观上即能迅速而又较准确地圈定热液矿床的空间定位部位。

本文仅就控矿构造模式的类型、组构特征、判定方法、找矿效果及其形成的基本原理作一简要介绍。

一、控矿构造模式的类型及其特征

形成热液矿床主要有两个条件:一是要有成矿的物质来源,即有足以形成矿床的成矿热液与矿化剂等物质条件;二是要有利于成矿物质聚积的容矿空间,两者缺一不可,而后者决定着矿床的空间定位。已经查明,热液矿床的赋矿部位(容矿空间)的构造较为复杂,通常表现为地层具有较陡的倾角,断裂构造发育,岩石相对破碎。从理论上分析,这里是构造运动中地应力相对集中的部位。以往在成矿规律研究中将其称之为“构造交叉部位、构造复合部位”等。作者根据对该部位的构造组合所表现的形态特征的研究,将控矿构造在平面上表现的组合形态,归纳为“X”、“K”、“A”三种类型。这些类型因具有普遍的指导意义而堪称模式,故称其为控矿构造模式。

(一)“X”型控矿构造模式及其特征 该模式表现为各种构造线(如岩层的走向线、褶皱轴线、断裂面走向线等)在平面上的排列组合呈“X”字母样(图1),故称之为“X”型模式。如图1所示,在顶部,岩层褶皱相对紧闭,倾角相对变陡,纵向、横向断层相对发育,断距较大,因而岩石亦较为破碎,表明这里正是“X”型模式中地应力相对集中的有利成矿部位。在翼部,岩层褶皱较为宽展,倾角相对平缓,断层相对不发育。端部构造发育程度与翼部相似,它与顶部相接部位往往有横向断裂(f)出现。在两翼之间,通常有规模较大的走向断层存在。

根据顶部构造相对紧密程度,可分为紧闭型和疏散型两个亚类,并按顶部构造线展现的几何形态又可划分为尖顶型、弧顶型和平顶型三个次亚类。由于各种地质体的性质不同,或因同一地质体内部组分和结构

的不均一,抑或地质体受力的大小、方式及所处边界条件的差异,都可能导致地质体受力不平衡而出现构造形态分布的不对称。所以,“X”型模式的两翼在多数情况下是不对称的,表现为两翼构造形态和规模虽然相同,但在空间上分布的位置不对称;或者是与上述情况截然相反,甚至在形态、规模、位置上都不对称。

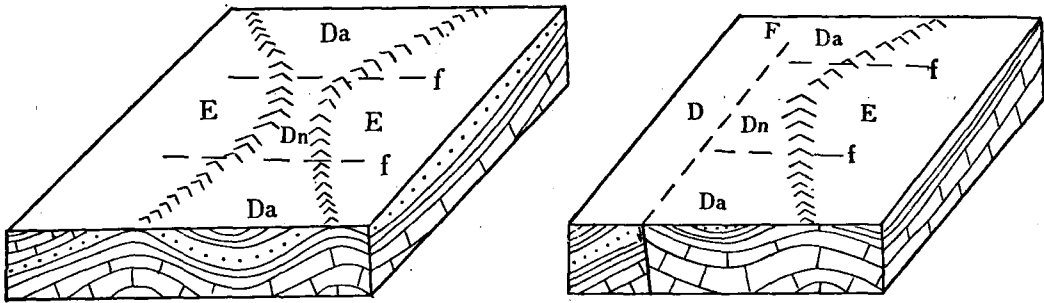


图 1 “X”型控矿构造模式示意图(左图)

Da—端部; Dn—顶部; E—翼部; f—横向断层

Fig. 1. Schematic model for “X”-type ore-controlling structure (left).

Da—End; Dn—Top; E—Limb; f—Cross fault.

图 2 “K”型控矿构造模式示意图(右图)

D—砥部; F—纵向断层; 其他同图 1

Fig. 2. Schematic model for “K”-type ore-controlling structure (right).

D—whet; F—Longitudinal fault; other symbols as for Fig. 1.

(二) “K”型控矿构造模式及其特征 构造线在平面上排列组合呈“K”字样,由“顶部”、“砥部”、“翼部”和“端部”构成(图2)。主要特征是砥部与顶部相对应而存在,两者之间往往存在着贯穿整个矿区的走向断层或断裂带。砥部可由褶皱岩层或呈岩基、岩株状产出的侵入体构成,此处矿化微弱或不具矿化。顶部、翼部和端部的特征与“X”型之对应部分一致。

与“X”型模式一样,“K”型模式也可以划分为紧闭型和疏散型两个亚类,以及尖顶型、弧顶型及平顶型三个次亚类。因此,从形态上观之,“K”型模式相当于“X”型模式由顶部沿走向平分的一半。

(三) “A”型控矿构造模式及其特征 构造线在平面上排列组合呈“A”字样,它标志着在其分布的地区内有两个或两个以上的应力集中部位。它由翼部、端部及“横梁”组成。其特征是一端之构造线趋于收敛,另一端则反向撒开(图3)。收敛方向褶皱趋于紧闭,岩层倾角变陡,断层亦趋发育;撒开方向褶皱趋于平缓,断层不甚发育。因而,在“A”型模式中,收敛端较之撒开端更具找矿意义。在其翼部受到局部应力集中时的挤压,受力地段的岩层走向发生急剧转折,褶皱强烈,断层发育,断距增大,岩石破碎程度明显增高,有时甚至使岩层发生平错而出现岩层走向与翼部岩层的走向斜交的调向现象,这就是“A”型模式所特有的横梁部位,也就是这类模式的重要标型特征和有利的控矿部位。

“A”型模式也因两翼的构造形态、规模、局部应力集中部位的多少等差异,亦可表现出各种不对称的类型。

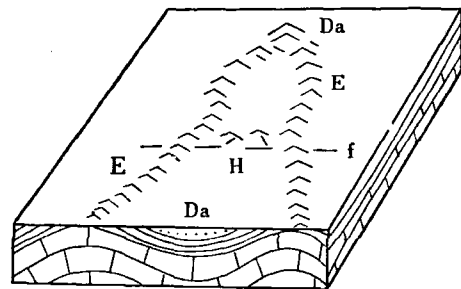


图 3 “A”型控矿构造模式示意图

H—横梁部位; 其他同图1

Fig. 3. Schematic model for “A”-type ore-controlling structure.

H—Cross beam; other symbols as for Fig. 1.

二、控矿构造模式的应用

模式的发现、总结归纳和综合研究的过程,是从已知到未知的过程,也是不断地检验和应用的过程。任何事物的发生和发展都是在一定的条件下进行的,因此,各种事物都有其各自的生成、演化规律和反映这一规律的表征。循此思路,作者从总结已知的热液矿床控矿构造在空间上的组合型式入手,抓住它们在构造地貌景观上的表征,逐步理出了三种型式,并在实践中逐步得以验证。验证的方式是,有意识事先不收集所要考察的矿区任何地质资料,到达考察的矿区后,完全由作者根据野外构造地貌景观的观察,按照该矿区控矿构造所呈现的模式类型确定主要的赋矿地段(即矿床的主要空间定位地段)。然后再进行现场核对,以证实用模式找矿的准确性。经过成百个矿区如此考察和检验,几乎无一失误。

同时,作者还十分重视在地质队已经或即将作为找矿的靶区内,应用模式判定其找矿远景或在有成矿远景的靶区内圈定最有利的找矿部位,供布署找矿参考,同时也作为对应用模式指导找矿的效果的检验。经九个矿区(点)的试验,除一个矿区因中途停止钻探施工未作出定论外,其余八个矿区有七个矿区见矿,有效率为87.7%。在七个矿区(点)内,用控矿构造模式圈定的成矿有利区内,施工15个钻孔有8个见到矿体,见矿率为53.3%。在确定的成矿不利的地段内施工30多个钻孔,无一个见矿。现仅举两例说明之。

例1:湘中白云铺铅锌矿区是某地质队曾选为普查评价的矿区。区内主要出露有中泥盆统跳马涧(D_2t)组和棋梓桥组(D_2q)地层。构造上处于轴向北东并以震旦系江口组(Zaj)和南沱组(Zan)构成核部的穹窿构造之南端(图4),断裂较为发育。 F_{15} 断层纵贯全区,其走向为 $NE20^\circ$,倾向NW,倾角 40° ,为具有压剪性的平推断层。走向NEE的断层 F_{25} 是具剪张性的正平推断层,倾向NNW,倾角变化大。介于 F_{15} 与 F_{25} 之间的有NW向的张剪性断层和走向近EW的张性断层(如 F_1),这些断层规模较小,但与矿

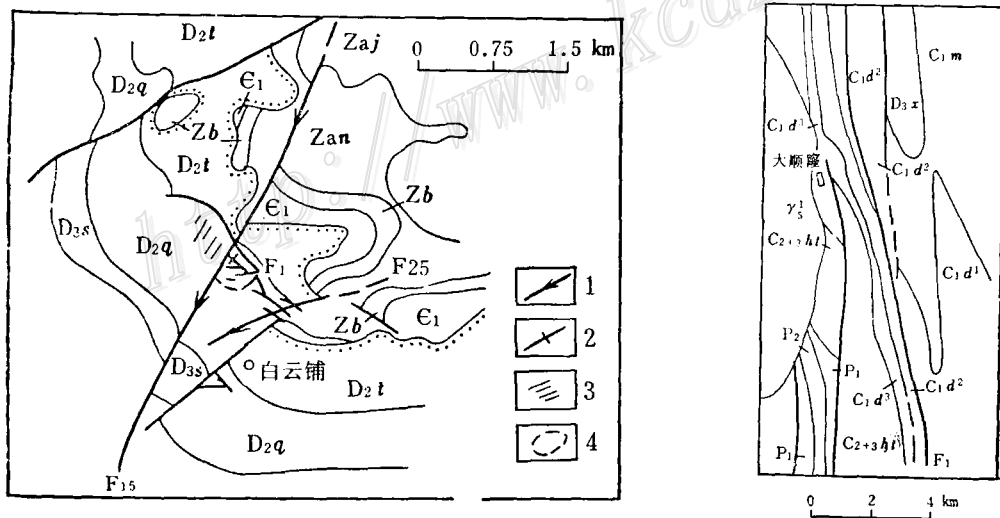


图4 白云铺矿区地质图(左图)

(据468队资料)

1—翼部断裂构造; 2—横梁部断裂构造; 3—原设计工作区; 4—建议工作区

Fig. 4. Geological map of the Baiyunpu ore district(left).

1. Fractural structure on the limb; 2. Fractural structure on the cross beam; 3. Originally designed working area; 4 proposed working area.

图5 大顺隆矿区地质略图(右图)

Fig. 5. Diagrammatic map of the Dashunlong ore district(right).

化关系十分密切,矿体即赋存于其间的棋梓桥组灰岩及白云质灰岩中。该地质队原来将工作区选在七子山地段,该段露头较好,但不是成矿最有利的地段。经过一段时间初步普查工作后,没有发现工业矿体,拟撤离矿区。我们根据该区构造地貌所反映的特征,判定矿区是由 F_{15} 和 F_{25} 组成的“A”型模式控制,最有利的赋矿部位应在由 F_1 和 NW 向断裂所组成的“横梁”部位。因此,就建议在此部位施工,建议得到采纳。该地段为第四系所覆盖,先开展了物探工作,发现异常较好,即进行施工。开始打了两个钻孔没有见矿,第三个钻孔见到40多米的矿体,后证明为一个中型铅锌矿床。

例2: 湖南大顺隆矿区位于大义山岩体南东侧,矿化产于中生代花岗岩与上古生代地层之接触带中。主要出露地层为下石炭统的石碇子组(C_1d^1)、测水组(C_1d^2)、梓门组(C_1d^3)、孟公坳组(C_1m),除测水组为砂岩及砂质页岩外,余为碳酸盐类岩石。沿岩体(γ_5')接触带有大理岩化。由图5可见,区域构造线方向大体呈南北向,走向断层发育。在岩体东侧,岩层的走向略有变化,即在大顺隆北端有向NNW方向撒开,在其南端有向南撒开之趋势,而又都向大顺隆处收敛,显然这是以 F_1 为砥的反“K”型模式。某队曾在此处南部撒开端设计了三排线共6个钻孔。我们建议这6个孔不要施工,把钻探工程放在顶部靠北端向翼部的转折处(这里正是第四系覆盖地段)。起初,该队仍按原计划在端部打了三排钻孔,结果只是见到一些矿化。之后,在我们建议的部位施工,头两个钻孔都打到了矿体,证实了我们的预测是正确的。

三、判定控矿构造模式的方法

研究并应用控矿构造模式的意义就在于它能够直观地反映出最有利的赋矿地段,迅速地圈定热液矿床空间定位的确切部位。因此,识别并判定模式的存在及其类型则是普查找矿和矿床预测的先决条件。

(一) 判定控矿构造模式的基本要点 无论是在野外实地观察,还是在室内根据地质图件或卫片、航片确定模式,主要依据两个要点:

1. 确定区内构造线的延展方向。构造线的延展方向反映了各种构造形态在空间上展布的特征和规律,同时也揭示了形成这些构造时地壳运动的性质、地应力作用的方向和方式。从总体上看,同一构造层内的岩层在受到同一次构造运动作用发生褶皱回返之后,其构造线的展布方向是一致的。从区域上了解某一构造层分布区内构造线的展布方向,才能分析和判定在局部地段内岩层构造线发生转折而呈现的地应力相对集中的部位。这是确定是否有模式存在的主要依据。

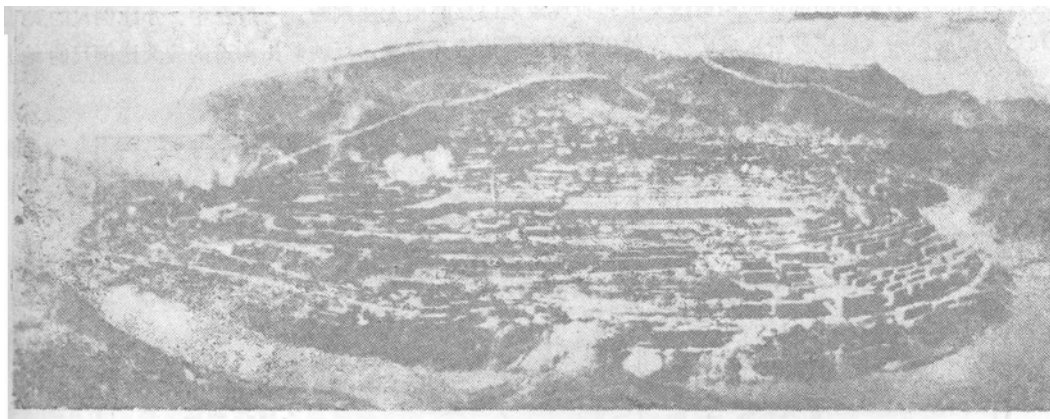
2. 确定构造形态在平面上相互组合的收敛和撒开方向。如前所述,各类模式的两端之构造线在平面上都有相对收敛和撒开的特征,它们分别标志着地应力相对集中和分散。因此,确定构造形态在平面上相互组合的收敛和撒开方向,对于判定模式的类型具有决定性的作用。

(二) 判定控矿构造模式的方法 判定模式的方法是先区域,后局部。即先从区域构造分析入手,然后逐次研究局部构造线发生转折的部位。现以不同研究手段举例说明之。

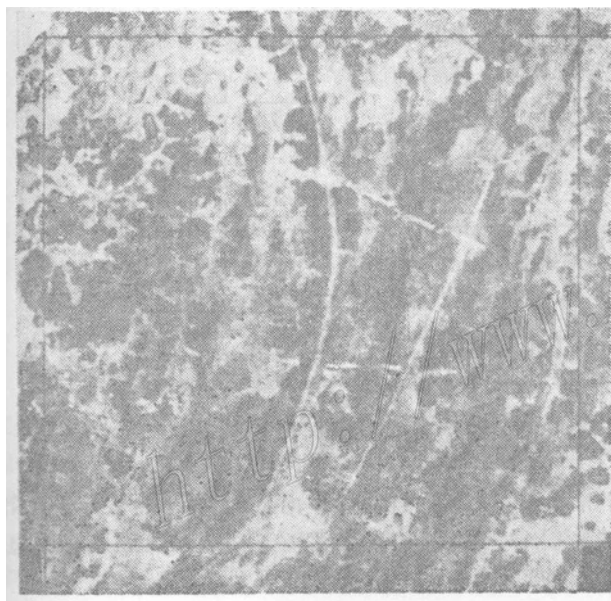
1. 野外直接观察: 在野外直接观察并判定模式往往是从构造地貌的观察和分析入手。在选定的通视条件较好的制高点上,纵观视域内的构造地貌,先确定区域构造线的延展方向,然后观察局部发生转折部位的构造线呈现的相对收敛和撒开方向即可迅速作出判断。

照片1是攀枝花铁矿全景。矿区内出露地层主要为三叠系,成矿与辉长岩有关,矿体即产在辉长岩岩体内。显然,成矿最有利的空间部位也即是岩体的侵入定位部位。从照片中展示的构造地貌不难看出,主要由三叠系褶皱形成的山脉,其走向与褶皱轴向基本一致,且与区域构造线方向(约呈 $NE60^\circ$ 左右)相吻合,说明区内地层发生褶皱时所受主压应力的方向应是 NW-SE 向。地貌景观还反映出靠近大片建筑物的低山,山脉分别呈 SSW (南西端) 和 NEE (北东端) 延展,在中间负地形处发生转折。在相临的较高的一排山脉处,其总体走向在上述负地形处亦发生了明显的转折,即在北端走向为 N-NNW,在南端为 SWW 向。按其组合特征观之,这两排山脉的走向分别向 NE 和 SW 方向撒开,而分别向其相反的方向收敛并交汇于负地形处。由此,很快就能判定本区的控矿构造模式属不对称的“X”型,构造地貌所反映的山脉交汇处

(即照片上出现的山脉中间的负地形处)就是“X”型模式的顶部,这里存在着NW-SE向的横断裂,是构造交叉的部位,亦即是岩体侵入或成矿的最有利部位。事实证明,该矿区内的主要矿体都集中在这里。



照片 1 攀枝花铁矿全貌



照片 2 黄沙坪矿缩影

2. 利用航(卫)片解译:航片和卫片都能直观地再现地球表面的地形、地貌及其可表现出来的地质构造特征,并且,由于某些遥感技术方法具有一定的透视能力而在照片上提供了深部构造的某些信息,给模式的解译带来了许多有利的条件。照片2是黄沙坪矿之航空照片缩影。该矿区内出露地层为石灰系下统大塘阶组,印支运动使其与整个上古生代地层一并褶皱形成走向近于南北向的山脉。照片中有一似月牙形色调较深的部位(两组白线所标之断层线交叉的中心),在其西侧的北端,山脉的走向(亦即地层的走向)由NNW向经此而转向NNE向,且呈一弧形弯转。在其东侧,山脉走向呈较平直的NNE向,构造地貌反映出在其东西两侧均有走向断

层存在,其南北两端存在着横向断层。这些构造组合从地貌上不难看出,地层走向由于两侧的弧形弯转而出现向北端明显趋于撒开,由此可以判定该矿区属弧顶型不对称的反“K”型模式控制,其顶部就在月牙形部位。该矿区主要矿体均产于此。

3. 根据地质图件判定:地质图是反映地质构造形态及其组合特征的基础图件。不同地质时代的岩层其构造线的展布特征一目了然,以其判定模式也就十分简便。

图6是海南石碌铁矿地质略图。从图面上不难看出,矿区构造线的方向在图区北部近于EW向,而在南部则呈NW向,其组合特征表现出地层向东趋于撒开而向西趋于收敛的平卧“A”型模式。在收敛端因地应力相对集中,构造线较为密集。在翼部,沿地层走向可以发现因应力局部集中而使之发生若干弯转,在这些部位多见有横向断层。主要矿体就集中在趋于收敛端的这些构造交叉部位,往撒开端矿化明显减弱。

应该指出的是,应用地质图判定模式进行成矿预测时,根据预测的精度要求选择适当的比例尺的地质图件极为重要。比例尺过大的图件,常因模式的各组构部位在图上反映不全而无法判断;比例尺过小的图件,又会因局部应力集中的部位的构造线发生转折现象难以反映而无法判断。一般在中、小比例尺的地质图上判定控制成矿带(成矿亚带)、成矿区、矿田的构造模式较为理想。反映矿田构造的较大比例尺的地质图用来判定矿床的控矿构造模式较易奏效。

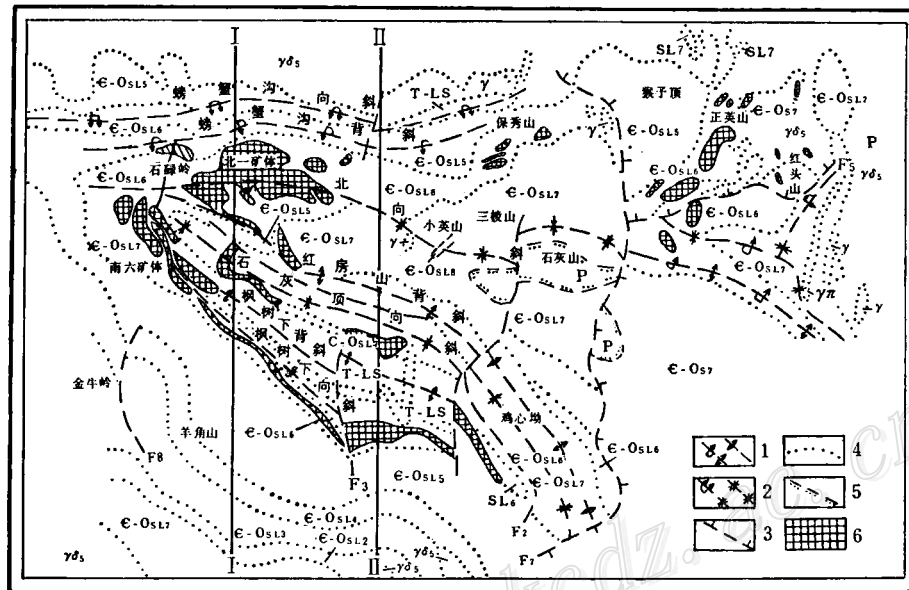


图6 海南矿区地质图(据934队资料)

1—背斜、倒转背斜; 2—向斜、倒转向斜; 3—推测正断层; 4—地质界线; 5—推测岩层不整合; 6—铁矿体

Fig. 6. Geological map of the Hainan ore district.

1. Anticline and reversed anticline; 2. Syncline and reversed syncline; 3. Inferred normal fault; 4. Geological boundary; 5. Inferred unconformity; 6. Iron orebody.

四、形成控矿构造模式的基本原理

从各类模式的基本特征中不难看出,模式的形成是基于地应力在地质体内某一部位出现应力集中后所造成的。根据材料力学的计算研究,物质内部的缺陷(如孔洞、缺口、微裂隙等)所在部位,都会引起局部的应力集中。例如,在单轴应力作用下,物体内部圆孔状缺陷边缘的最大压应力为

$$\sigma_{\max} = \sigma_1 + \sigma_2 \dots \dots \dots (1)$$

式中: $\sigma_{\max}$ 为最大压应力; $\sigma_1 = N_0/n = \sigma \cdot c/n$; $\sigma_2 = Mo/2ea(1 - 2e/n)$, (其中 σ 为主压应力; c 为包括缺陷在内的圆柱体切面的半径; n 为圆切面半径与缺陷半径 a 之差; Mo 为弯曲力偶; e 为中性轴与截面形心间的距离)。

根据理论计算,过缺陷中心垂直于压应力的截面上的任意一点,其正应力为

$$\sigma_r = p/2 \cdot (2 + a^2/r^2 + 3a^4/r^4) \dots \dots \dots (2)$$

式中 p 为作用于物体的压应力; r 为缺陷中心至任意点的距离; a 为缺陷内切圆之半径。由式(2),当 $a = r$ 时,则缺陷边缘最大主压应力 $\sigma_{\max} = 3p$ 。即在物体内部有圆孔状缺陷存在时,缺陷边缘所造成的应力集中达到物体所受压应力的3倍。

当缺陷为椭圆时,根据材料力学计算,垂直主应力方向椭圆轴两端处应力集中最大值为:

$$\sigma_{\max} = \sigma(1 + 2a/b) \dots \dots \dots (3)$$

式中 a 为椭圆之长半径; b 为椭圆之短半径。与此同时, 在椭圆另一轴的两端可获切向张应力为 $\sigma \cdot a/b$ 。显然, 当椭圆长轴垂直于主压应力方向时, 由 (3) 式可知, 长轴两端的应力值将大于 3σ , 切向张应力亦大于 σ 。反之, 当椭圆短轴垂直于主压应力方向时, 则两端的应力值为: $3\sigma > \sigma_{\max} > \sigma$, 长轴两端切应力亦小于 σ 。因此, 当 b 值越趋于减小时, a/b 值越趋于增大, 在缺陷处的应力集中越趋增大。在受力物体处于塑性状态时, 在压应力作用下, 缺陷部分最终出现沿压性切应力方向收缩而向切向张应力方向拉伸的塑性变形, 导致物体的受力状态的改变而失去平衡。在受力的界面上产生对应于缺陷部位的弯曲, 使作用于界面的均衡的应力发生力的分解, 并且合力的方向都又集中于弯曲部位的顶端, 以致应力更加集中, 界面曲率不断增大, 最终出现线性裂纹或破裂。

自然界的岩石, 由于其自身组成的矿物不同及矿物含量的多少和结构构造的差异, 乃至其所处的物理、化学环境不同而造成某些力学性质的差异, 造成岩石内部的某些“缺陷”, 或是由于地壳组成物质的不均一而导致在一次构造运动中某一区域乃至同一区域中不同地质体内地应力作用的不均衡, 这些都是地壳内出现应力集中的因素。

根据应变椭球原理, 地质体在水平挤压力的作用下, 处于弹、塑性阶段的变形地质体, 就其构造变形之间的几何关系来看, 其最大应变轴方向与最小应力轴方向平行, 这一方向一般是垂直于水平方向。变形结果形成褶皱构造。随着地应力对地质体挤压作用的延续和加强, 或是地质体内某些部位存在“缺陷”造成局部应力集中, 地质体内部的结合力遭到破坏, 即发生断裂变形。在平面上, 这些断裂都交汇于应力集中部位。其组合的形态从应变椭球体分析, 可以有包含剪裂面的“X”型、“K”型 (相当于“X”型沿走向的中线平分之半) 和“A”型 (相当于“X”型垂直走向的中线平分之半) 的三种类型。作者根据这些原理分别作了相应的模拟试验, 都得到了验证。

应该指出的是, 一个地区内地质构造形态的组合通常是多次构造运动的产物。因此, 控矿构造模式的形成可能是一次或多次构造运动造成的, 但是使其基本定型的构造运动只有一次。正因如此, 对三类模式形成机理作定性的探讨时, 将其置于一次受力的条件进行分析和模拟是可行的。限于篇幅, 这一部分内容, 作者将另文予以阐述。

五、结 语

控矿构造模式的总结和研究, 虽然已得到众多矿区实际资料的支持, 证实它在地质找矿工作中具有较有效的作用。但是, 作为探索地质找矿的新理论和新方法, 我们的研究工作还仅仅是开始, 今后还有待在理论上和实践中不断地深化, 特别是在模式的形成及其在不同构造运动时期的演化过程中各组构部分的力学性质及其形态的改变等问题, 都还需要从宏观和微观两个方面作深入的研究工作。

在此, 对热情接待和支持过我们工作的数以百计的矿山和地质队以及本文撰写过程中给予指导和帮助的张宏良总工程师表示深切的谢意!

主 要 参 考 文 献

- [1] S. 铁摩辛柯 1979 《材料力学》 科学出版社
- [2] Ю. Н. 拉包德诺夫 1956 《材料力学》 高等教育出版社
- [3] А. М. 约翰逊 1983 《地质学中的物理过程》 科学出版社
- [4] М. Р. 毕令斯 1973 《构造地质学》 地质出版社
- [5] Бгацкий В. В. И др., 1979, Иерархия геологических структур как Фактор прогноза рудоносности. «Геол. Руд. Меж.» Том XI №. 1.

STRUCTURAL MODELS FOR SPATIAL LOCALIZATION OF HYDROTHERMAL ORE DEPOSITS

Liu Yongbin and Jia Deyu

(Institute of Geology, Bureau of Geology and Mineral Resources of Hunan Province, Changsha, Hunan)

Abstract

The spatial combination patterns of ore-controlling structures and their structural and geomorphological expressions have been acquired through field investigation in more than three hundred hydrothermal deposits. Based on an analysis of these data on the principle of strain ellipsoid, the authors have proposed three types of structural models (respectively named A, K and X) for spatial localization of hydrothermal ore deposits which include deposits formed by hydrothermal fluids with different geneses and having the ability of transporting metallogenic materials to form ore deposits.

This paper describes briefly characteristics of these three ore-controlling models and the methods for ascertaining the existence and the type of a model. It is indicated that the locations of relative concentration of stress (i. e., top or cross-beam) favorable for the accumulation of metallogenic substances exist in all three sorts of models. According to the extension of structural lines reflected by the structural topography in the field or through an indoor analysis of the combination forms and the convergent and divergent positions of the structural lines shown by satellite photographs, aerophotographs and geological maps, one can determine rapidly whether there exists an ore-controlling structure in the studied area and what its type is, thus readily delineating the section favorable for metallization. As demonstrated by some examples given in this paper, satisfactory results can be obtained in the application of these models to the ore prospecting and ore prediction in respect to the localization of ore deposits. In addition, the basic principles and the possibility of formulating these models are discussed by applying the theory of stress concentration in mechanics of materials and the method of stress analysis in structural geology.