

辽宁歪头山铁矿构造研究 及构造控矿模式初探

李东林

(天津地质研究院, 天津 300061)

摘 要: 歪头山铁矿属鞍山式沉积变质铁矿, 褶皱、韧性剪切带、断裂是矿区的主要构造形迹。通过构造解析, 将矿区鞍山运动中的构造变形划分为3幕。利用共轭节理和断层擦痕反演, 对矿区构造应力场进行了定向、定时研究, 确定了各期构造应力场。最后, 提出了歪头山铁矿“褶皱+ 韧性剪切带”控矿模式, 新模式对矿区的采矿平面设计及寻找可能的漏矿具有指导作用。

关键词: 构造解析; 构造应力场; 控矿模式; 歪头山铁矿; 辽宁省

中图分类号: P613; P618. 31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2003) 02-0088-07

1 矿区构造概述

歪头山铁矿地处辽宁省本溪市境内。该矿床位于歪头山—北台 NW 向铁矿带的北端, 矿区主要出露太古代中鞍山群山城子组变质岩, 并属于歪头山—北台太古代花岗绿岩带下部的变质基性火山岩建造。

铁矿床属鞍山式沉积变质铁矿, 含矿岩系主要由一套斜长角闪岩、磁铁石英岩、阳起石英片岩、阳起石英岩、石榴黑云阳起片岩、橄榄透闪岩、白云石大理岩等组成, 由磁铁石英岩构成的铁矿体及其变质围岩呈向斜构造产出, 铁矿大致可分为3层(图1)。

矿区地层从太古代至今经历了漫长的地质年代, 不同地质时期、不同型式的构造形迹的叠加造成了复杂的矿区构造。褶皱、韧性剪切带、断裂是矿区的主要构造形迹。

(1) 褶皱构造。经勘探及开采证实, 矿区为一个向东倒转的大型向斜构造, 走向近 SN, 倾向 NW, 倾角中等。该向斜构造形成于晚太古代的鞍山运动, 前后经历了3幕褶皱变形, 为一复杂的叠加褶皱。前两幕为近 SN 向的以早期褶皱构造为主的共轴干扰褶皱, 并遭受了韧性剪切带构造的强烈改造; 第三幕为近 EW 向的宽缓褶皱, 影响较小。褶皱构造是矿区主

要的控矿构造。

(2) 韧性剪切带。从东到西, 矿区发育3条相互平行的韧性剪切带。其中 DF₁ 的规模最大, 穿越南北采区, 走向 NNE-SSW, 宽 20~30 m, 长约 1 000 m。DF₂ 和 DF₃ 规模较小, 都位于北采区, 长约百米, 宽为数米。

鞍山运动末期, 由于构造抬升作用, 韧性剪切带性质转化为走向断层, 断层面向 W 倾, 倾角 30°~50°; 正断层性质。断距为 30~70 m, 200~400 m 不等。

(3) 横断层。横断层形成较晚, 为中生代构造变形。主要有4条, 大致平行, 呈等间距排列。断层走向 40°~70°, 倾向 NW, 倾角 70°~80°。断距从几米到几十米不等。

横断层内有辉绿岩脉、煌斑岩脉侵入。岩脉破碎现象普遍, 说明横断层具多次活动特征。

2 矿区前寒武纪构造解析

根据构造形迹组合及构造序列研究, 并结合变质岩岩石、矿物组合的综合分析, 可将矿区在鞍山运动中的构造变形划分为三幕。

2.1 第一幕变形作用

第一幕变形作用(D₁) 是矿区变质岩在原岩成岩

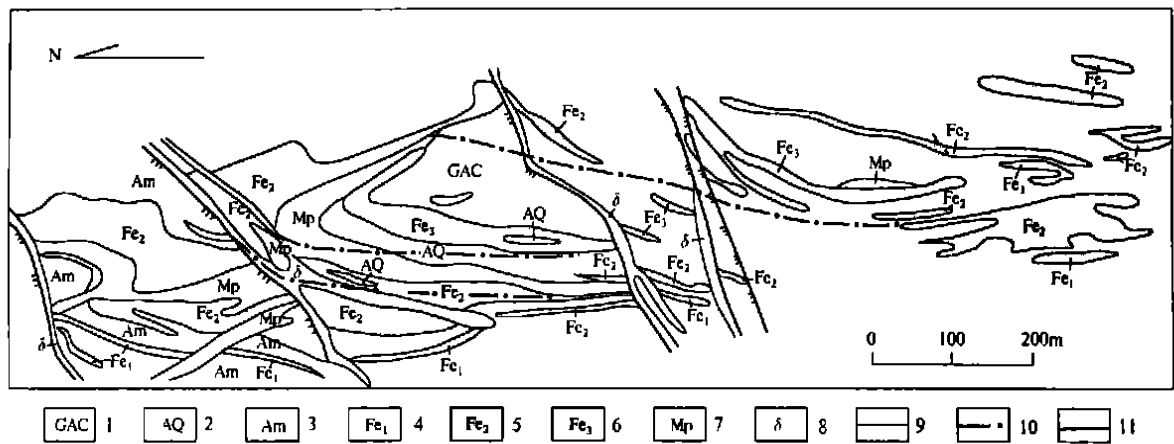


图 1 歪头山铁矿平面图

Fig. 1 Plane map of Waitoushan Fe deposit

1. 石榴阳起石片岩 2. 阳起石英岩 3. 斜长角闪岩 4. 第1层铁 5. 第2层铁 6. 第3层铁 7. 片麻状花岗岩
8. 辉绿岩 9. 地质界线 10. 韧性剪切带 11. 横断层

后发生的时间最早、影响面最广泛的一次变形作用, 它波及矿区各部分。其构造形迹组合是面构造(S_1)、褶皱(F_1)及线理、窗棂构造(L_1), 以塑性弯曲压扁作用为主要变形机制。

S_1 是均匀分布于各种岩石中但发育程度有差异的一组透入性面状构造, 其发育程度受岩性控制。在片岩类片、柱状硅酸盐矿物含量高的变质岩中, S_1 较发育; 在由粒状矿物为主的单矿岩(石英岩, 大理岩)中, S_1 发育较弱, 主要以拉长、压扁的粒状矿物的连续排列显示, 或仅仅表现为粒状矿物的趋势定向。

S_1 走向近 SN, 向 W 倾, 倾角较陡。局部可见 S_1 切割 S_0 面理, 大部分地区则完全置换 S_0 , 并成为后期褶皱的变形面。在 S_1 面理组构投影图解上(图 2), 低值线区有拉长现象, 反映后期构造变形的影响。

F_1 褶皱呈不同尺度在矿区内发育, 大者如整个矿区的向斜构造, 小者多为一系列紧闭同斜褶皱。 F_1 轴向近 SN, 枢纽向 SSE 倾伏。 F_1 褶皱基本上确定了矿区构造的格架。

D_1 变形幕的线状构造 L_1 较为发育, 表现为平行于 F_1 褶皱的小型窗棂构造及皱纹线理。线理近 SN 向, 优选方位为 $8^\circ \sim 10^\circ$ (图 3)。

D_1 变形幕是在区域变质作用达到角闪岩相环境中出现的, 这种较高温的变形环境影响着岩石的变形机制。因此, 第一幕变形作用代表了地壳中部层次的一次变形过程。

2.2 第二幕变形作用

第二幕变形作用(D_2)是在退变质作用达到绿片岩相的环境中发生的。变形环境的改变, 特别是温

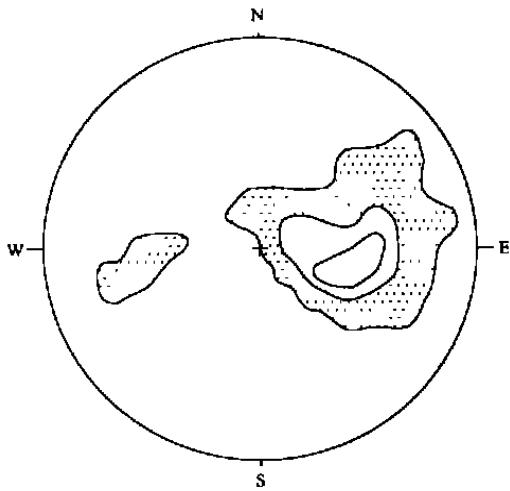


图 2 S_1 面理投影图解

Fig. 2 S_1 projection plot

等值线 13.3% ~ 6.9% ~ 2.2% (90 个点, S_1)

度, 压力的降低, 决定了变形构造具有特殊性。第二幕变形作用是地壳中浅部层次的一次变形过程, 变形岩石处于韧性-脆性转变状态, 表现为岩石虽主要处于塑性状态, 但在某些构造部位显示出脆性特点。因此, D_2 变形构造是一套既包含有塑性组合, 又有脆性构造的复杂构造组合(但以前者占主导地位)。其变形机制主要以塑性弯曲及深层次剪切作用为主, 在晚期局部有脆性变形。

F_2 褶皱为近共轴叠加褶皱(图 4), 多为中小规模(3 ~ 5 m 范围内)的紧闭-中等开阔褶皱。大部分地区 F_2 受控于 F_1 , 局部可见 F_2 改造 F_1 的现象。 F_2 轴向近 SN, 轴面倾向 W。

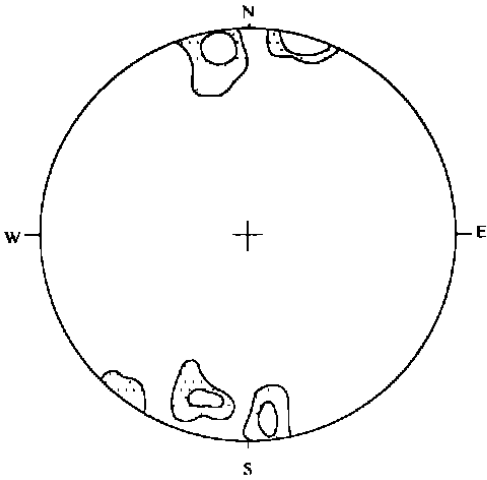


图 3 L_1 线理组构投影图解

Fig. 3 L_1 lineation fabric projection plot
等值线 10.7% ~ 3.6% (20 个点, L_1)

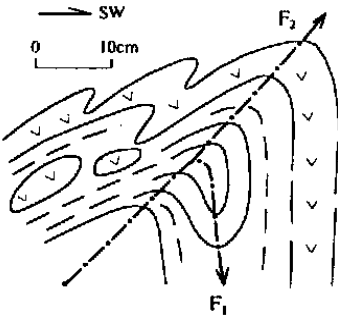


图 4 F_1 及 F_2 褶皱叠加现象

Fig. 4 Superimposition of F_2 on F_1

S_2 面理不甚发育, 在 F_2 褶皱转折端有时可见到。 L_2 线理主要为粗大的窗棂构造。

韧性剪切带发育在 D_2 变形幕中。韧性剪切带内岩石变形强烈, 呈密集板状、条带状和构造透透镜体出现。塑性强的岩石内可见早期 S_1 面理发生 S 型弯曲, 构成糜棱面理 sm , 形成糜棱岩和糜棱岩化岩。根据韧性剪切带内岩石及矿体的变形特点, 可知韧性剪切带总体上是由南西往东北沿 S_1 面理斜冲运动的。

2.3 第三幕变形作用

第三幕变形作用(D_3) 是矿区内鞍山运动的最后一次构造变形。由于接近造山运动的晚期, 构造应力已明显减弱, 受前两期构造格架的影响, 第三幕变形作用主要以叠加变形方式, 对前两期构造进行改造。

D_3 变形幕是在低温、低压环境中, 在岩石呈韧性

-脆性过渡状态偏重于脆性条件下发生的。其变形机制早期以塑性挠曲为主, 中晚期则以 EW 向水平拉张机制为主。

F_3 褶皱主要为中小尺度的直立水平褶皱, 属平行式类型。中等规模者, 以平缓直立水平褶皱为主; 小尺度褶皱则以开阔直立水平褶皱为主。褶皱的枢纽为近 EW 向, 显示受 SN 向挤压的特点。

形成于 D_2 变形幕的韧性剪切带在 D_3 变形幕晚期性质发生转化, 在 EW 向水平拉张变形机制下, 形成走向 SN, 倾向 W 的低角度伸展断层。

从上述对矿区变质岩系构造变形特征、构造组合特征及构造序列等方面的研究, 可以认为矿区的构造变形发展完全符合变质岩区构造演化的基本规律。从第一幕变形作用到第三幕变形作用的演化过程中伴随着地壳的抬升作用, 因而伴有变质温度、压力的不断降低, 使变质作用类型、变形强度、变形机制等出现相应的渐变过程。

中生代起, 矿区开始进入新的构造变形阶段。变质岩石以脆性变形为主, 形成一系列断裂构造, 并造成太古宙形成的断层再次活动。

3 断裂构造应力场研究

任何构造现象都是一个复杂的历史产物。一定空间的构造应力场必然包括了复杂的历史叠加现象。因此, 我们要研究的构造应力场必然包含确定的时间、确定的应力方位、半定量的应力大小的空间应力场。即构造应力场的研究包括三方面的内容: 定向研究、定时研究和定量研究。本文只论及前两部分。

3.1 构造应力场的定向研究

3.1.1 定向研究的共轭节理反演法

共轭节理反演法是一种最常用的方法。在矿区外围共测量了 21 组共轭节理的产状, 通过赤平投影方法求出其主应力方位(表 1)。

从表 1 可以看出, 最大主压应力大致可分为 3 组:

(1) 近 SN 向挤压, 变化范围为 $350 \sim 15^\circ$; 频度最高方位为 5° 。

(2) NW-SE 向挤压, 变化范围为 $290 \sim 330^\circ$; 频度最高方位为 320° 。

(3) NE-SW 向挤压, 变化范围为 $55 \sim 75^\circ$; 频度

最高方位为 70°。

表 1 共轭节理产状及主应力方位

Table 1 Conjugate joint occurrence and main stress orientation

编号	共 轭 节 理				主 应 力 方 位				共轭角 (2°)
	左	行	右	行	1	2	3		
1	160°	85°	270°	20°	3°	48°	249°	18°	144° 34° 88°
2	270°	20°	160°	54°	141°	18°	238°	16°	3° 64° 84°
3	95°	64°	41°	40°	143°	22°	29°	40°	256° 41° 48°
4	95°	64°	0°	68°	321°	2°	52°	57°	228° 32° 84°
5	126°	47°	224°	62°	2°	46°	163°	42°	256° 2° 102°
6	191°	81°	126°	47°	238°	25°	113°	48°	344° 30° 65°
7	12°	36°	175°	85°	333°	64°	87°	11°	183° 22° 61°
8	192°	76°	76°	25°	212°	27°	118°	22°	346° 52° 88°
9	26°	50°	152°	80°	286°	47°	74°	39°	178° 14° 70°
10	32°	80°	122°	72°	253°	18°	96°	70°	345° 8° 103°
11	40°	30°	307°	72°	281°	25°	25°	33°	160° 46° 77°
12	161°	44°	34°	64°	10°	14°	118°	30°	266° 58° 95°
13	20°	86°	140°	55°	259°	44°	117°	41°	5° 16° 54°
14	358°	58°	170°	45°	218°	84°	87°	4°	357° 6° 74°
15	156°	41°	18°	50°	359°	3°	92°	19°	263° 80° 86°
16	335°	82°	113°	62°	218°	42°	58°	57°	318° 22° 54°
17	304°	70°	54°	32°	168°	52°	25°	28°	284° 22° 98°
18	222°	20°	128°	76°	109°	34°	214°	20°	327° 47° 78°
19	7°	46°	285°	60°	247°	12°	343°	44°	137° 52° 64°
20	175°	70°	310°	76°	65°	38°	239°	51°	333° 3° 54°
21	154°	54°	264°	28°	7°	62°	228°	23°	131° 14° 112°

表 2 横断层擦痕及主应力方位

Table 2 The transverse fault striation and the main stress orientation

编号	断层产状		擦痕产状		断层性质	主应力方位		
	倾向	倾角	侧伏向	侧伏角		1	2	3
1	184°	56°	270°	40°	左行逆冲	233° 14°	130° 40°	340° 48°
2	134°	44°	224°	62°	左行斜落	162° 14°	68° 20°	291° 66°
3	265°	78°	175°	0°	左行水平逆冲	150° 5°	280° 78°	59° 8°
4	162°	82°	70°	0°	左行水平逆冲	47° 4°	162° 82°	314° 7°
5	330°	38°	60°	15°	左行水平逆冲	220° 12°	314° 36°	102° 60°
6	290°	32°	20°	20°	左行水平逆冲	176° 11°	271° 30°	58° 62°
7	340°	76°	70°	14°	左行水平逆冲	46° 4°	298° 71°	37° 18°
8	268°	62°	178°	24°	左行逆冲	163° 30°	311° 55°	64° 14°
9	268°	62°	178°	4°	左行逆冲	158° 42°	275° 62°	61° 23°
10	280°	82°	190°	50°	左行逆冲	161° 46°	3° 46°	268° 11°
11	320°	78°	50°	8°	左行水平正断层	25° 2°	287° 76°	115° 17°
12	275°	78°	185°	14°	左行	161° 46°	321° 73°	70° 3°
13	248°	65°	158°	30°	左行	142° 34°	302° 54°	46° 8°
14	300°	78°	210°	24°	左行	188° 26°	4° 64°	98° 0°
15	277°	72°	7°	6°	左行	30° 11°	262° 72°	123° 13°
16	267°	62°	177°	30°	左行	163° 35°	318° 51°	65° 11°

3.1.2 定向研究的断层擦痕反演法

断层擦痕也常用来确定主应力方位。Etchecopar (1981) 提出统计断层擦痕, 再用电算技术来确定 3 个主应力的方位。

矿区断层擦痕较为发育。同一期擦痕(指一次断层运动形成的一群擦痕)在一条断面的不同露头, 甚至同一露头, 其产状都可能存在偏差, 再加之不同期次的擦痕又可能相互干扰, 给野外测量带来了一定的困难。在野外测量中, 我们力求使测量的每一组数据都能代表在露头范围内由一次断层运动所形成的同一期擦痕。

矿区断层主要为横断层和走向断层, 两者都具有多期活动性。横断层擦痕比走向断层擦痕更为发育, 将两者擦痕分别加以统计, 用赤平投影方法确定主应力方位。

野外共测量了 16 组横断层擦痕, 其反演结果见表 2。

从表 2 可以看出, 最大主压应力方位大致可分为 2 组:

(1)NW-SE 向挤压, 变化范围为 320°~350°; 频度最高方位为 340°。

(2)NE-SW 向挤压, 变化范围为 30°~60°; 频度最高方位为 50°。

走向断层擦痕产状共测量了 8 组, 其反演结果见表 3。

表 3 走向断层擦痕产状及主应力方位
Table 3 The strike fault striation and the main stress orientation

编号	断层产状		擦痕产状		断层性质	主应力方位		
	倾向	倾角	侧伏向	侧伏角		1	2	3
1	265°	32°	355°	17°	右行正断层	357° 30°	248° 30°	122° 44°
2	270°	22°	180°	30°	左行正断层	200° 33°	303° 20°	50° 38°
3	220°	26°	130°	10°	左行正断层	127° 24°	231° 26°	358° 52°
4	220°	26°	316°	66°	右行正断层	254° 50°	54° 8°	152° 38°
5	278°	37°	188°	32°	左行正断层	197° 38°	316° 32°	72° 34°
6	227°	36°	330°	71°	右行正断层	261° 59°	152° 10°	59° 28°
7	227°	36°	120°	50°	左行正断层	115° 48°	223° 23°	347° 31°
8	170°	5°	260°	23°	右行正断层	259° 23°	165° 6°	63° 64°

从表 3 可以看出,最大主压应力方位大致可以分为 3 组:

- (1) 近 SN 向挤压,变化范围为 355 ~ 15°
- (2) NW-SE 向挤压,变化范围为 300 ~ 310°;频度最高方位为 310°
- (3) NE-SW 向挤压,变化范围为 70 ~ 90°;频度最高方位为 75°

3.2 构造应力场的定时研究

在构造应力场的定时研究中,首先抓住构造作用的相对先后次序,即构造应力场的分期(次)问题。然后再通过对比的方法,逐步确定各期构造应力场的形成时间。这是目前最常使用的方法。

矿区地层仅见中鞍山群山城子组,缺失太古宙以上的地层,因而无法直接厘定太古宙之后的构造应力场的地质时代,只能先确定其相对先后次序,然后与较大区域(如华北地台),甚至中国东部各地质时期构造应力场的作用情况相互对比,以确定其大致作用时间。

并考虑到中国东部中生代构造应力场作用情况,将矿区构造应力场分为如下 3 期:

- (1) 太古宙末期构造应力场。太古宙末期构造应力场以近 SN 向挤压为特征,在 SN 向挤压机制下,形成矿区 EW 向 F₃ 褶皱。F₃ 褶皱后,早期的韧性剪切带再次活动,并变为脆性性质的断层。
- (2) 燕山主期构造应力场。燕山主期构造应力场以 NW-SE 向挤压为主,其最大频度方位为 320 左右。在 NW-SE 向挤压机制下,形成 NE 向横断层。横断层(期)主要表现为左行逆冲性质,切断矿体,把矿体分为 SN 两段,并造成南区矿体向北东向错开。
- (3) 燕山晚期构造应力场。燕山晚期构造应力场以 NE-SW 向挤压为特征,其最大频度方位为 60° 左右。

4 构造控矿模式初探

4.1 褶皱及韧性剪切带构造控矿模式

经过研究认为,歪头山铁矿床构造控矿模式为“褶皱+ 韧性剪切带”。第一幕褶皱使得层状矿体形成轴向 SN、枢纽向 S 倾伏的大型褶皱矿体,从而使矿体厚度在一定空间内加厚聚集,形成一定规模的矿体。第二幕褶皱共轴叠加又使得早期褶皱矿体进一步变形,造成局部地段再加厚聚集,有些地段形成透镜化矿体等。两期褶皱的叠加部位,使得单层矿体在一定范围内重复形成矿体富集。因此,第一幕褶皱控制了矿体的分布及规模,第二幕褶皱控制了矿体的局部富集。至于韧性剪切带对矿体的控制则较为复杂,首先它使得矿体向浅部运移富集,同时又拉断、拉薄矿体,具体如下:

平面图上(图 1)可见歪头山铁矿在北端形成巨厚矿体。平面上矿体出露面积很大,深部矿体变薄,

表 4 构造应力场期次及特点 Table 4 Stages of tectonic stages and the features			
应力场期次	作用时间	作用方式	构造-岩浆事件
期	太古宙末期	近 SN 向挤压	走向断层 期 EW 向 F ₃ 褶皱
期	燕山主期	NW-SE 向挤压	走向断层 期,横断层 期, 辉绿岩脉侵入
期	燕山晚期	NE-SW 向挤压	走向断层 期,横断层 期, 正长斑岩脉侵入

在构造应力场的定向研究中,得出了矿区 3 期构造应力场的作用方式,再根据各期构造应力场所形成构造形迹的相对先后关系,结合岩浆侵入情况,

横向、纵向厚度差别很大。同时,根据F₁褶皱枢纽向S倾伏的特点,应该在向斜的倾伏端有大规模的矿体富集;而实际上则是在翘起端矿体厚度很大,而愈往深部(倾伏端)矿体愈薄(图5)。根据一般的褶皱规律这是无法解释的。我们认为这主要是受一条NNE向韧性剪切带的影响。由于该褶皱矿体处于韧性剪切带的上盘,剪切作用造成水平方向由南西向东北,垂向上由深至浅的逆冲,使得褶皱矿体整体由深向浅部运移,因此造成大面积出露。同时由各剖面图可以看出,韧性剪切带上盘的矿体褶皱不是处于正常

状态,3层铁矿(Fe₃)弯曲圆滑,2层铁矿(Fe₂)形成尖棱,同时被拉断、拉薄。两翼变形差别很大,往往造成一翼正常而另一翼形成矿体片,这主要是受韧性剪切带作用为主。从南北采区对比情况来看,北采区各矿层矿体出露齐全,褶皱形态完整;而南采区则比较复杂,大部分为一系列条带状区、透镜状矿体。这主要是由于北采区处于韧性剪切带上盘,以整体上升为主,局部拉断,而南采区则绝大部分处于韧性剪切带内,以拉薄、拉断为主,形成矿体片。

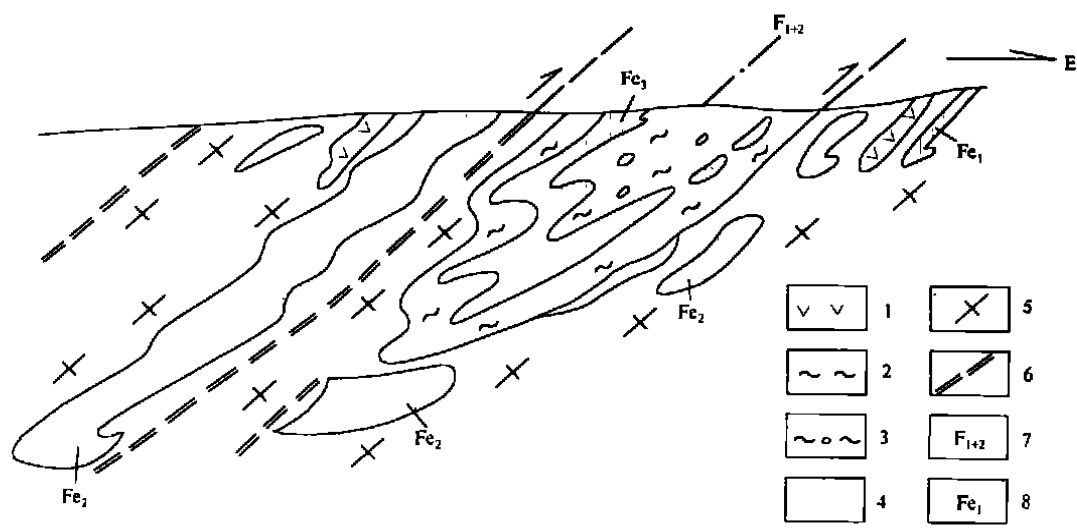


图5 歪头山铁矿“褶皱+韧性剪切带”控矿模式图

Fig.5 Folding and brittle shear zone model of ore-control in Waitoushan Fe deposit

1. 斜长角闪岩 2. 阳起石英岩 3. 石榴黑云母片岩 4. 铁矿体 5. 片麻状花岗岩 6. 剪切带 7. 两期共轴褶皱带 8. 铁矿层编号

利用探采对比的研究有助于我们对矿区控矿构造认识的深化。探采对比是将根据地质勘探得出的矿石储量与实际开采出来的矿石量进行对比,根据两者的吻合程度以检验现有的对矿区地质构造的认识是否与实际符合。据此原理,我们对矿区第3层铁(176~164台阶)进行了探采对比研究(表5)。

从表中可以看出,实际开采过程中,Fe₃的储量达10 850 t,与过去按单斜构造、简单向斜构造认识所圈定的储量相比有较大的差别。因此,过去对矿区控矿构造模式的认识(单斜构造、简单向斜构造)有待修正,而“褶皱+韧性剪切带”控矿模式则可能与实际比较符合。

表5 3种控矿构造模式与Fe₃储量对比
Table 5 Comparison of Fe ore reserves controlled by monocline, simple syncline and folding and brittle shearing zone models

控矿构造模式	Fe ₃ 储量(t)	储量变化
单斜构造	6 150	
简单向斜构造	7 650	+ 24.4%
褶皱+ 韧性剪切带	10 850	+ 41.8%

“褶皱+韧性剪切带”控矿构造模式的建立对于矿区的采矿平面设计及寻找可能的漏矿有一定的指导作用。过去由于按简单向斜控矿构造模式设计开采平面,结果在实际开采过程中由于矿体形态变化较大,而造成开采效果不理想。另外在采矿过程中,常发现Fe₂矿体转折端较尖,而另一部分矿体又不知去向。用本模式则可较好地解决这个问题,由于韧性剪切带的作用,造成Fe₂矿体转折端部位被拉断,因而变得较尖,而另一部分矿体则沿剪切带发生了位移,在剪切带的下盘可能发现这部分漏矿。

4. 2 断裂构造控矿因素

断裂构造对矿体的影响也较大。走向断层在韧性剪切带的基础上多次活动,表现为低角度正断层,使北东盘的矿体向西滑落。横断层形成较晚,为燕山期产物,主要表现为左行逆冲性质。横断层切割矿体,将矿区分为南、北两采区;造成南采区矿体向北东运移,北采区矿体向南西运移,南、北采区间矿体错距达数十米至百米。

参考文献:

[1] 周世泰. 鞍本地区条带状铁矿地质概述[M]. 北京: 地质出版

社, 1994.
[2] 王守伦. 鞍本地区太古代变基性火山岩与金矿化[J]. 地质找矿论丛, 1994, (4): 22-26.
[3] 赵宗溥. 中朝准地台前寒武纪地壳演化[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
[4] 万天丰. 古构造应力场[M]. 北京: 地质出版社, 1988.
[5] 万天丰. 中国东部中、新生代板内变形构造应力场及其应用[M]. 北京: 地质出版社, 1993.
[5] 白瑾. 华北地台北缘前寒武纪地质及铅锌成矿作用[M]. 北京: 地质出版社, 1993.

PRIMARY DISCUSSION ON THE STRUCTURAL GEOLOGY
AND ORE-CONTROLLING MODELS IN WAITOUSHAN
Fe DEPOSIT, LIAONING PROVINCE
LI Dong-lin
(Tianjin Geological Academy, Tianjin 300061, China)

Abstract: Waitoushan Fe deposit is of the Anshan style sedimentary-metamorphic deposit. Fold, brittle shearing zone and fractures are the main structural features. Structural analysis reveals 3 episodes of deformation in Anshan movement. Inversion of the conjugate joints and striation is used to study orientation and timing of the tectonic stress field and define the stages of the field. Then a new ore-controlling model of folding and brittle shear zone is drawn. The model may be helpful to locate the missed ore bodies.

Key words: structural analysis; tectonic stress field; ore-controlling model; Waitoushan Fe deposit; Liaoning province