

新疆阿尔泰喀拉通克硫化铜镍矿区 构造特征及应力场分析

黄继钧

(成都地质学院)

摘要 喀拉通克硫化铜镍矿区位于多个构造体系复合部位,为一褶皱和断裂组成的挤压破碎带,构造十分复杂、特殊。文中对其进行了详细讨论,并对构造体系进行了划分,就各构造体系生成发展过程作了较系统的研究,并采用非线性有限单元法对各期构造变形时应力场特征进行了计算。

关键词 喀拉通克硫化铜镍, 挤压破碎带, 额尔齐斯大断裂, 应力分析

喀拉通克硫化铜镍矿区位于新疆阿尔泰地区,由4个矿床组成,其中以1号矿体为主,居于我国同类矿床的第2位,其品位高、矿体大是国内外少见的。

收稿日期: 1990—12—05

4 结 论

(1) 南—西华山大型韧性剪切带在中、晚元古代曾发生两期大规模推覆剪切作用: 早期为自南东向北西的低角度顺层(片)推覆,估计与区域性挤压体制的出现有关;晚期大体为由南向北的中角度推覆,系北祁连洋壳向南侧西—兰州微板块陆壳下俯冲作用所致。

(2) 岩矿测试资料表明,该韧性剪切带形成深度约13 km—17 km,温度 $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C} - 350\text{ }^{\circ}\text{C}$,压力 $P = 3.5\text{ kbar} - 4.4\text{ kbar}$,属地壳中、深层次中、高压构造环境。

(3) 该韧性推覆剪切带的发现及研究表明,南华山—西华山—黄家洼山一线存在一条距今约1100 Ma—800 Ma左右的板块聚合带,揭示祁连山地区的板块活动史,起码可上溯至中、晚元古代。

在对南—西华山韧性剪切带的调查研究中,本队实验室牛国荃、王平同志给予密切合作,并参加了部分野外调查、提供了大量镜下鉴定资料;甘肃区调队李跃敏同志和西安地质学院胡能高老师、长春地质学院叶慧文老师给予了热情指导帮助,谨此深表谢意。

参 考 文 献

- 1 游振东、王方正. 变质岩岩石学教程. 中国地质大学出版社, 1988
- 2 郑亚东、常志忠. 岩石有限应变测量与韧性剪切带. 地质出版社, 1985
- 3 许志琴. 地壳变形与显微构造. 地质出版社, 1984

1 区域地质概况

喀拉通克硫化铜镍矿区大地构造上位于额尔齐斯大断裂及其分支构造——杰尔台断裂南侧。区域内发育有西域系、东准噶尔构造带、河西系和东西向构造带。出露地层以石炭系南明水组为主, 次为泥盆系、奥陶系。

沿额尔齐斯大断裂南侧发育有基性、超基性岩带, 岩体断续沿北西方向展布, 长约200 km, 宽10 km以上, 是找铜、镍、金、银的有利地带。该矿区位于此岩带东段。

2 矿区及矿床地质特征

矿区内出露地层主要为下石炭统南明水组(C_{1n})上、中、下段, 为一套海相浊流沉积含炭质沉凝灰岩和泥板岩, 少量中泥盆统温都哈拉组(D_{1y})和第三系红层。区内岩浆岩以基性岩为主, 岩体沿北西向展布, 分为南北两带, 明显受褶皱和断裂控制。南带由1、2、3号岩体组成, 沿南部背斜及 F_7 、 F_8 、 F_9 和 F_5 断层展布; 此带由6、7、8、9号岩体组成, 沿北部背斜及 F_{11} 断层展布。岩体均侵位于南明水组含炭质沉积凝灰岩中, 同位素年龄为295.3 Ma—302 Ma, 属华力西中—晚期(图1)。

1号岩体位于南带西端, 出露地表。上部呈透镜状, 下部呈S形或蛇曲形, 整体呈上大下小的“压扁喇叭”状, 向北东斜歪(图2)。2号岩体隐伏于地表以下120 m—200 m之间, 剖面形态为椭圆形, 沿走向延伸1500 m。3号岩体隐伏于地表下160 m—205 m间, 剖面形态近圆形, 沿走向延伸1300 m(图3)。1号矿体规模最大, 位于1号岩体内部。按成因可分为就地熔离型稀疏浸染状—海绵陨铁矿石矿体, 金属矿物为磁黄铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿等, 主要产于黑云母角闪橄苏岩中; 熔离贯入型致密块状铜镍硫化物矿石矿体, 充填于断裂破碎带中, 呈透镜状、脉状, 主要金属矿物有磁黄铁矿、磁铁矿、镍黄铁矿、黄铜矿及多种稀有贵金属矿; 充填交代型稠密浸染—细网脉状矿石矿体, 赋存于上述矿体之间岩体中, 下部, 矿体形态变化大, 呈向斜上方分支成手掌状(图2)。2、3号矿体分别赋存于2号、3号岩体下部及底部。其规模和品位远次于1号矿体(图3)。

3 矿区构造

矿区位于西域系、东准噶尔构造带、河西系和区域性东西向构造带复合部位、额尔齐斯大断裂及其分支构造——杰尔台断裂南侧的萨尔布拉克—萨色克巴斯陶乌复向斜东段两翼, 为一由断层和褶皱组成的挤压破碎带(图1)。

3.1 矿区变形场特征

3.1.1 褶皱构造: 矿区内发育有北西向和北北西向两组褶皱, 以前者为主。

北西向褶皱: 由南向北发育有南部向斜、背斜, 中部向斜, 北部背斜、向斜(图1), 均为纵弯褶皱, 褶皱翼部层间褶皱和裂隙较发育, 褶曲面可见擦痕且垂直褶曲枢纽, 正交剖面厚度 t_a 基本一致, 平行轴面厚度 T_a 不相等。北西向背斜、向斜多为同向挤压

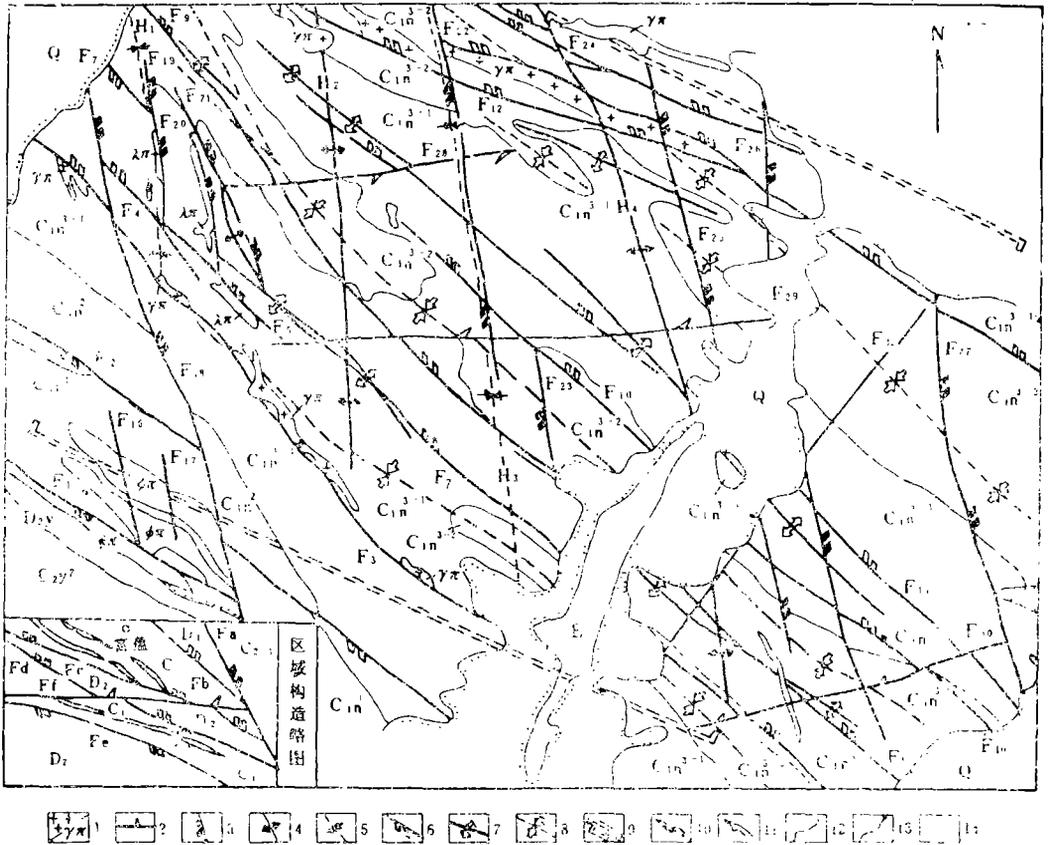


图1 喀拉通克硫化铜镍矿矿区构造体系

Q. 第四系; E. 第三系; C_{1n}. 下石炭统南明水组(C_{1n}³⁻². 第三段上层; C_{1n}³⁻¹. 第三段下层; C_{1n}². 第二段; C_{1n}¹. 第一段); D_{2y}³. 中泥盆统蕴都哈拉组上段; D_{2y}². 中泥盆统蕴都哈拉组中段; φπ. 钠长斑岩, λπ. 石英斑岩; F_a. 海子口一二台断裂; F_b. 乌恰一库尔德提断裂; F_c. 额尔齐斯大断裂; F_d. 伊德克一杰尔台断裂; F_e. 萨斯克巴斯他乌断裂; F_f. 几列克库都克一伊德克断裂; 1. 花岗岩; 构造体系带: (一)区域性东西向构造带; 2. 压性断层; (二)河西系; 3. 压扭性断层; 4. 背斜轴; 5. 向斜轴; (三)准葛尔弧形构造带; 6. 压扭性断层; 7. 背斜轴; 8. 向斜轴; (四)西域系; 9. 北西西向向斜; 10. 区域内复式背斜; 11. 区域内复式向斜; 12. 地层界线; 13. 不整合线; 14. 矿区位置

性断层破坏。南部背斜和北部背斜由于北北西向褶皱干扰, 枢纽起伏, 被分为东西两段。中部向斜西段分叉成两个次级向斜; 北部向斜中段被次级褶皱复杂化。用褶曲两翼优选产状(图4)按下列公式和赤平投影求得各褶曲要素产状如表1和图5所示。

$$\text{顶角 } \phi = 180^\circ - \arccos[\sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos(\omega_2 - \omega_1) + \cos\theta_1 \cos\theta_2]$$

$$\text{枢纽倾角 } \delta_b = \arcsin \frac{\sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin(\omega_2 - \omega_1)}{\sin\{\arccos[\sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos(\omega_2 - \omega_1) + \cos\theta_1 \cos\theta_2]\}}$$

$$\text{枢纽倾向 } \omega_b = \arctg \frac{\text{tg}\theta_1 \cos\omega_1 - \text{tg}\theta_2 \cos\omega_2}{\text{tg}\theta_2 \sin\omega_2 - \text{tg}\theta_1 \sin\omega_1}$$

$$\text{轴面倾向 } \phi_a = \arccotg \frac{\sin\theta_1 \sin\phi_1 - \sin\theta_2 \sin\phi_2}{\sin\theta_1 \cos\phi_1 - \sin\theta_2 \cos\phi_2}$$

$$\text{轴面倾角 } \theta_a = \arccos \frac{\cos\theta_1 - \cos\theta_2}{2 \cos\left\{ \frac{180^\circ - \arccos[\sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos(\phi_2 - \phi_1) + \cos\theta_1 \cos\theta_2]}{2} \right\}}$$

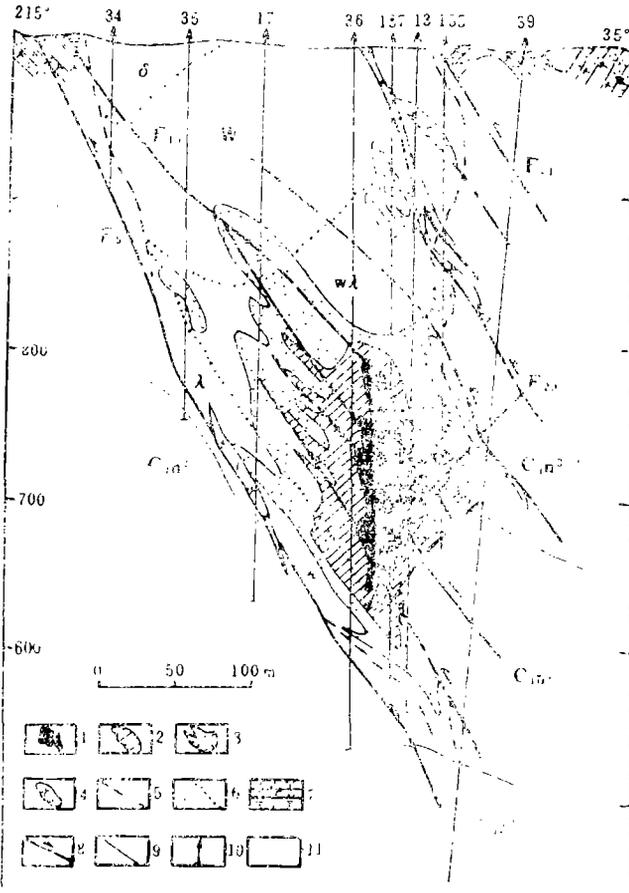


图 2 28号勘探线1号岩体剖面

C_{1n}。下石炭统南明水组；C_{1n}³⁻¹。上段下层；C_{1n}²。中段；C_{1n}¹。下段；δ。黑云角闪岩；ω。黑云角闪苏长岩；ωλ。黑云橄榄苏长岩；λ。辉长辉绿岩；1。致密块状矿石矿体；2。稠密浸染状矿石矿体；3。稀疏浸染状矿石矿体；4。石英斑岩；5。基性岩体界线；6。岩相界线；7。炭质沉凝灰岩；8。断层；9。地层界线；10。钻孔

(岩体和矿体界线据新疆地矿局四大队资料)

式中 ϕ_1 、 ϕ_2 ， θ_1 、 θ_2 分别为褶皱两翼岩层倾向、倾角。

由此可见，北北向褶皱为两翼近对称、轴面近直立，枢纽微倾伏、宽缓起伏，两翼夹角为钝角，转折端基本圆滑的过渡类型褶曲。在W.J.Rickard褶皱分类三角形投影图上落在I、II区及其交界处(图6)。

北北西向褶皱：主要包括西部向斜(H₁)、背斜(H₂)，东部向斜(H₃)、背斜(H₄) (图1)。均为宽缓褶曲，轴向340°—350°，沿走向受北北向褶皱影响，枢纽起伏。

3.1.2 断层：矿区内断层构造十分发育，按方向可分为北北向，北北西向、东西向和北东向4组，

北北向断层最发育，主要包括F₁、F₂、F₃、F₄、F₅、F₆、F₇、F₈、F₁₀、F₁₁及F₂₈，具以下共同特征：①走向北西，倾向北东或南西，以前者为主；②形成时间早，经历多次活动，具压—压扭(反)—压扭(顺)力学特征；③规模大、延深深，断层常由数条平行延伸构成一挤压破碎带；④沿断裂带基性岩体侵入，具明显的控岩作用，特别是F₅、

F₇、F₈和F₁₁控制了岩体展布形态及产状(图7)。北北西向断层主要有F₁₈、F₁₉、F₂₀、F₂₁、F₂₂、F₂₄、F₂₅和F₂₇。发育程度仅次于北北向断层，具如下共同特征：①走向340°—350°，大多倾向北东，少数倾向南西，倾角陡；②规模较大；③具带状等距分布；④形成时间早，系早期北北向断裂配套成分，后经改造而成。曾经历多次活动，力学性质复杂，具扭—压—扭特征。北东东—近东西向断裂，主要有F₂₃、F₂₉、F₃₀，数量较少，规模较大，走向北东东—近东西，倾角较大，形成早，后经多次活动，力学性质复杂，为区域性东西向构造带压性成分。北东向断层数量较少，具张性—张扭性特征。

3.1.3 节理：矿区内节理构造特别发育，按产状可分为6组，其中A、B两组最发育，力

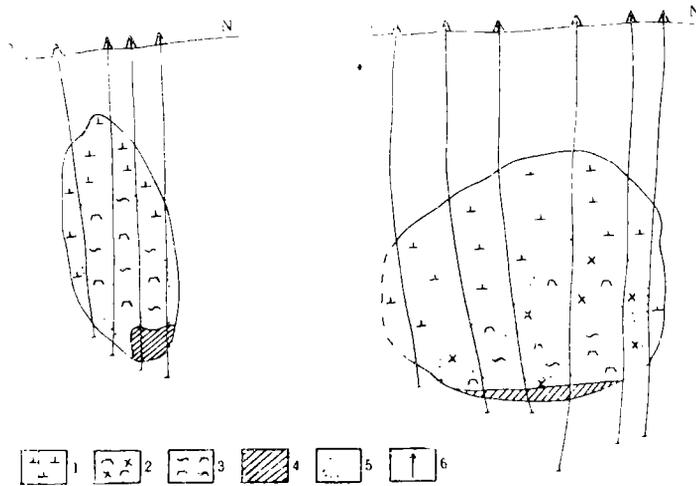


图3 31线2号岩体、71线3号岩体地质剖面

1. 闪长岩相; 2. 角闪辉长岩相; 3. 角闪苏长岩相; 4. 矿体; 5. 岩相界线; 6. 钻孔
(据新疆地矿局四大队资料)

表1 喀拉通克硫化铜镍矿区北西向褶曲特征

褶曲名称	轴向	轴面产状	两翼产状		枢纽产状		两翼夹角	形成时应力条件		
			北东翼	南西翼	倾伏方向	倾伏角		σ_1	σ_2	σ_3
南部向斜	300°—310°	近直立	220°∠40°	30°∠45°	128°	10°	100°			
南部背斜	315°	近直立	50°∠40°	211°∠40°	133°	8°	107°	45°∠1°	133°∠10°	315°∠80°
南部背斜西段	307°	近直立	30°∠37°	220°∠36°	307°	5°	111°			
南部背斜东段	312°	近直立	38°∠50°	224°∠52°	313°	5°	102°			
中部向斜	308°	218°∠89°	212°∠38°	54°∠42°	318°	15°	110°	48°∠10°	138°∠15°	315°∠78°
北部背斜	310°	48°∠89°	60°∠48°	213°∠40°	137°	12°	110°	230°∠1°	138°∠15°	318°∠75°
北部背斜西段	325°	55°∠88°	75°∠30°	212°∠37°	147°	15°	120°			
北部背斜东段	313°	近直立	50°∠40°	210°∠39°	132°	10°	105°			
北部向斜	328°	58°∠89°	219°∠40°	55°∠38°	327°	10°	100°			

学性质亦复杂,表现出多次活动的特征,节理面上常见多组擦痕。各组节理产状、力学性质及活动情况见表2。

据各组节理特征、相互交切关系、力学性质和活动情况,同时考虑岩体与围岩穿切关系

表2 喀拉通克硫化铜镍矿区节理分组及力学性质

裂隙组别			A	B	C	D	E	F	共配 节理 情况
代表产状及变化范围			走向	30°—50°	70°—80°	280°—290°	330°	355°—5°	
			倾向	120°—140°	340°—350°	200°	240°	280°	290°
			倾角	60°—80°	60°—80°	50°—70°	60°—70°	80°	40°
构造 期力 次方 及位	IV	喜山期	$\sigma_1=10^\circ$	反扭			顺扭	张性	AD
	III	印支—燕山期	$\sigma_1=70^\circ$	顺扭	张性	反扭			AC
	II	华力西中—晚期	$\sigma_1=50^\circ$	张性	反扭			顺扭	BF
	I	华力西早期	$\sigma_1=30^\circ$	张性	反扭			顺扭	BC

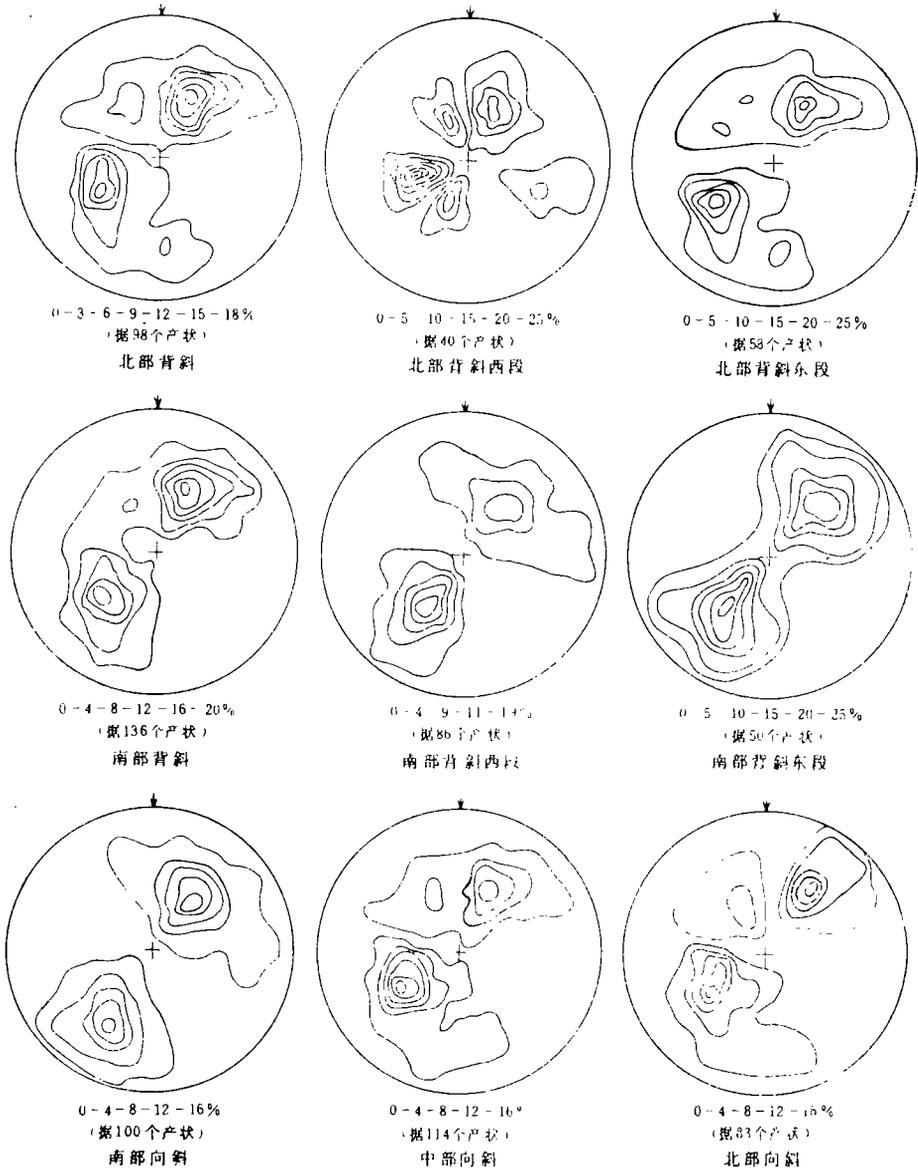


图 4 北西向褶皱两翼产状极点等密图

及区域现代应力状态，经分期配套、筛选，得知区内节理可分 4 对共轭节理，分别为不同期次构造运动产物。

3.2 构造体系（构造带）划分、复合关系及运动程式

本区自华力西早期以来经历了多次地壳运动，在区域建造、改造两方面都留下了运动的痕迹和踪迹。

根据上述分析，矿区内不同方向褶皱和断层分别归属于区域上的西域系、东准噶尔构造带、河西系和区域性东西向构造带（图 1）。其形成时间依次为西域系、准噶尔弧形构造带、

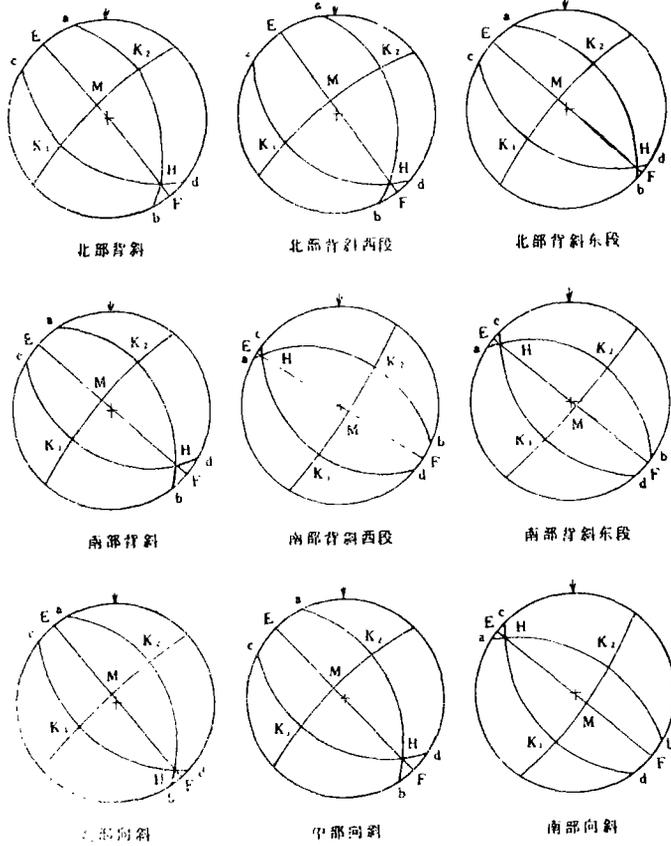


图 5 北西向褶皱要素图解

\widehat{ab} , \widehat{cd} . 两翼产状投影弧; EF. 轴面投影点; H. 枢纽投影点; K_1K_2 . 两翼夹角

河西系和区域性东西向构造。各构造体系间呈复合关系，构造成分相互干扰。北西向褶皱被北北西向褶皱斜跨复合，北西向断层、褶皱被北北西向断层切割、错移，同时，二者又被东西向压性断层切割。后期构造常常归并、利用早期构造体系、构造成分。

4 构造应力场分析

4.1 褶皱及其反映的应力方向

据褶皱两翼优选产状，利用赤平投影和下列公式可求得其形成时主应力方位：

$$\sigma_1 \text{ 倾向 } \omega_{g1} = 180^\circ + \arctg \frac{\sin \theta_1 \sin \omega_1 - \sin \theta_2 \sin \omega_2}{\sin \theta_1 \cos \omega_1 - \sin \theta_2 \cos \omega_2}$$

$$\sigma_1 \text{ 倾角 } \delta_{g1} = 90^\circ - \arccos \frac{\cos \theta_1 - \cos \theta_2}{2 \cos \left\{ \frac{180^\circ - \arccos \left[\frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos (\omega_2 - \omega_1) + \cos \theta_1 \cos \theta_2}{2} \right]}{2} \right\}}$$

$$\sigma_2 \text{ 倾向 } \omega_{g2} = \arctg \frac{\tg \theta_1 \cos \omega_1 - \tg \theta_2 \cos \omega_2}{\tg \theta_2 \sin \omega_2 - \tg \theta_1 \sin \omega_1}$$

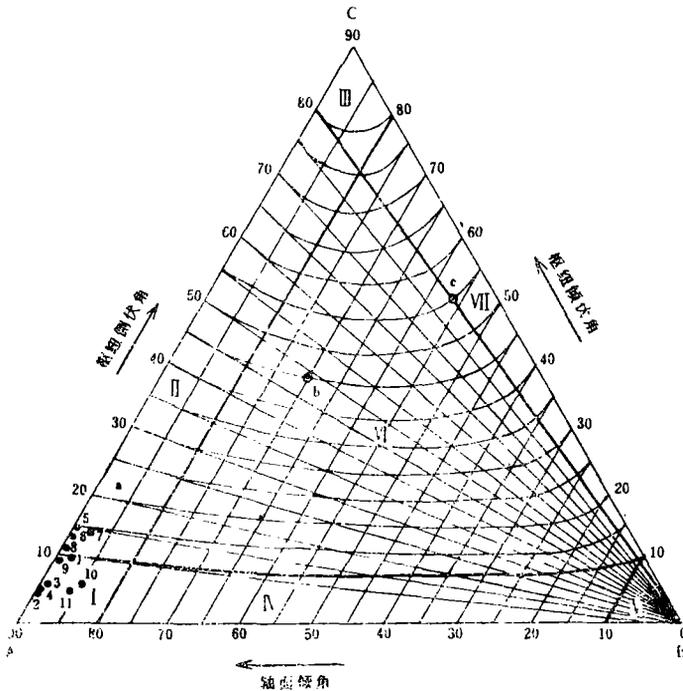


图 6 矿区褶皱类型三角投影图

(据 M. J. Rickard, 1971)

- I. 直立水平褶皱；II. 直立倾伏褶皱；III. 倾竖褶皱；IV. 斜歪水平褶皱；V. 平卧褶皱；VI. 斜歪倾伏褶皱；VII. 斜歪褶皱；北西向褶皱；1. 南部向斜；2. 南部背斜；3. 南部背斜西段；4. 南部背斜东段；5. 中部向斜；6. 北部背斜；7. 北部背斜西段；8. 北部背斜东段；9. 北部向斜；北北西向褶皱；10. 西部向斜；11. 东部背斜

$$\sigma_2 \text{ 倾角 } \delta_{g_2} = \arcsin \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2 \sin(\omega_2 - \omega_1)}{\sin \{ \arccos [\sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\omega_2 - \omega_1) + \cos \theta_1 \cos \theta_2] \}}$$

$$\sigma_3 \text{ 倾向 } \omega_{g_3} = \arctg \frac{\sin \theta_1 \sin \omega_1 + \sin \theta_2 \sin \omega_2}{\sin \theta_1 \cos \omega_1 + \sin \theta_2 \cos \omega_2}$$

$$\sigma_3 \text{ 倾角 } \delta_{g_3} = \arcsin \frac{\cos \theta_1 + \cos \theta_2}{2 \cos \left\{ \frac{180^\circ - \arccos [\sin \theta_1 \sin \theta_2 \cos(\omega_2 - \omega_1) + \cos \theta_1 \cos \theta_2]}{2} \right\}}$$

式中 ω_1 、 ω_2 、 θ_1 、 θ_2 分别为褶曲两翼岩层优选产状。

经计算及图解，区内北西向褶皱形成时主应力方位 σ_1 倾向 $45^\circ - 50^\circ$ 、倾角 $1^\circ - 10^\circ$ ， σ_2 倾向 $133^\circ - 138^\circ$ 、倾角 $10^\circ - 15^\circ$ ， σ_3 倾向 $315^\circ - 318^\circ$ 、倾角 $75^\circ - 88^\circ$ （图 8）。北北西向褶皱形成时主应力方位 σ_1 倾向 $245^\circ - 255^\circ$ 、倾角 3° ， σ_2 倾向 165° 或 337° 、倾角 5° ， σ_3 倾向 108° 或 25° 、倾角 85° （图 9）。

4.2 共轭节理及其代表的主应力方向

由前所述，根据对区内节理特征及相互切割关系的研究，得知节理可分期配套成 4 对共轭剪节理，分别为华力西早期、华力西中—晚期、印支—燕山期和喜山期构造运动产物。由各期共轭剪节理优选产状，利用赤平投影和下列公式计算得主应力方位：

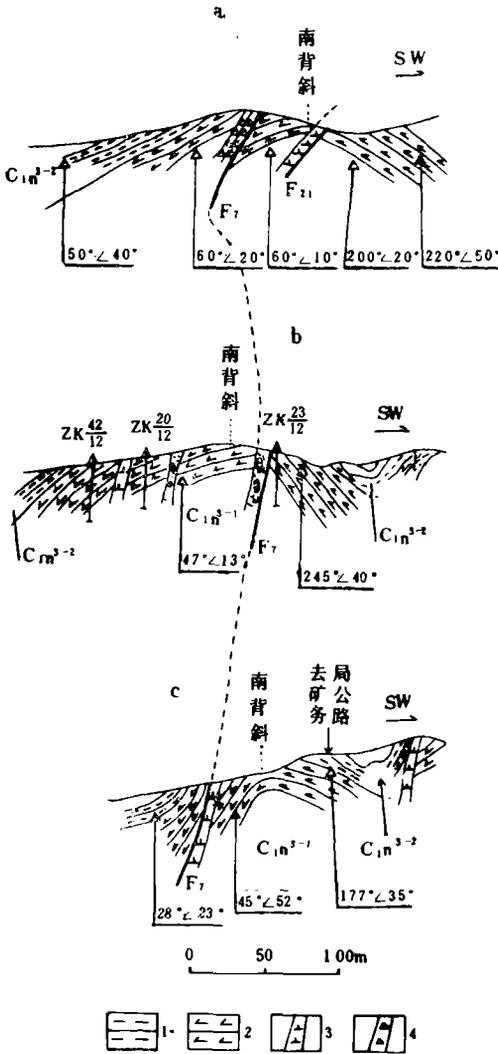


图 7 南部背斜和F₇横剖面素描图

a. 16线; b. 12线; c. 8线; C_{1n}³⁻², 下石炭统南明水组上段上层; C_{1n}³⁻¹, 下石炭统南明水组上段下层; 1. 泥板岩; 2. 含碳质硅质岩; 3. 斜闪煌岩; 4. 碳酸盐脉

σ₁ 和 σ₃ 产状

$$\text{倾向 } \phi_{1,3} = \arctan \frac{\sin\theta_1 \sin\omega_1 \mp \sin\theta_2 \sin\omega_2}{\sin\theta_1 \cos\omega_1 \mp \sin\theta_2 \cos\omega_2}$$

$$\text{倾角 } D_{1,3} = \arcsin \frac{\cos\theta_1 \mp \cos\theta_2}{2 \cos \left\{ \frac{180^\circ - \arccos \left[\frac{\sin\theta_1 \sin\theta_2 \cos(\omega_2 - \omega_1) + \cos\theta_1 \cos\theta_2}{2} \right]}{2} \right\}}$$

σ₂ 产状

$$\text{倾向 } \phi_2 = \arctan \frac{\text{tg}\theta_1 \cos\omega_1 - \text{tg}\theta_2 \cos\omega_2}{\text{tg}\theta_2 \sin\omega_2 - \text{tg}\theta_1 \sin\omega_1}$$

$$\text{倾角 } D_2 = \arcsin \frac{\sin \{ \arccos [\sin\theta_1 \sin\theta_2 \sin(\omega_2 - \omega_1) / \cos(\omega_2 - \omega_1) + \cos\theta_1 \cos\theta_2] \}}{2}$$

式中 ω₁, ω₂, θ₁, θ₂ 分别为共轭剪节理倾向、倾角。

经图解及计算, 得知矿区第一阶段(华力西早期)变形 σ₁ 方位为 30°, 第二阶段(华力西中—晚期)为 50°, 第三阶段(印支—燕山期)为 70°, 第四阶段(喜山期)为 10°。

4.3 构造应力场有限单元模拟

岩块或地块在外力作用下, 其内部最大主应力、最小主应力、最大剪应力方向和大小及应变能符合下列关系式:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_2} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\text{tg} 2\alpha = \frac{-2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y}$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\text{tg} 2\phi = \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2\tau_{xy}}$$

$$U = \frac{1}{2E} (\sigma_1^2 + \sigma_3^2 + 2\gamma\sigma_1\sigma_3)$$

式中 σ_x, σ_y 分别为 x、y 方向直应力; τ_{xy} 为扭应力; α 为 σ₁ 与 x 轴夹角; φ 为 τ_{max} 与 x 轴夹角; E 为岩石弹性模量; γ 为岩石泊松比。

为研究构造变形应力场特征, 依据前述各构造体系生成时外力条件, 采用非线性有限单元法, 用电子计算机对各期构造应力场进行计算, 结果表明: 华力西早期矿区在南北向顺时

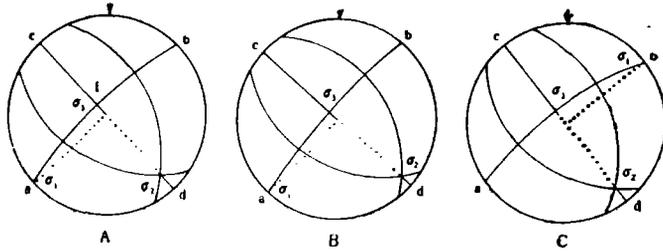


图 8 北北向褶皱形成时应力条件图解

A. 北部背斜; B. 南部背斜; C. 中部向斜

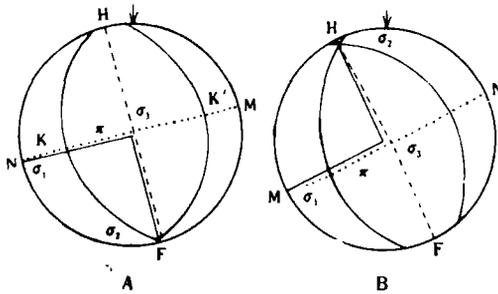
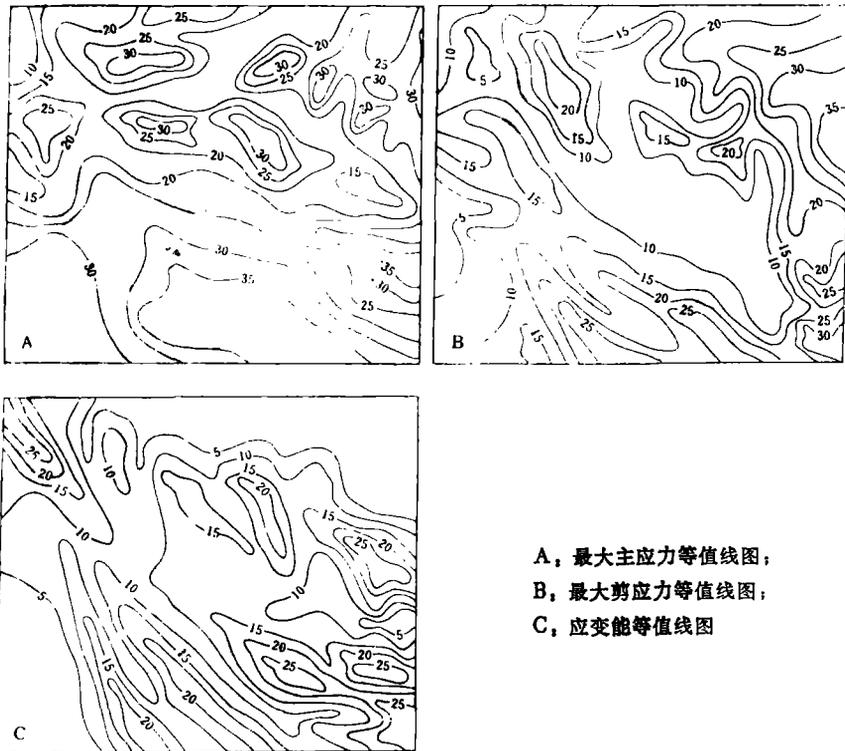


图 9 北北西向褶皱轴面、枢纽产状及应力分析

A. 北北西向向斜, 轴面 (HF) 产状, $347^\circ /$ 近直立, 枢纽产状 $165^\circ \angle 5^\circ$, $\sigma_1 = 255^\circ \angle 3^\circ$, $\sigma_2 = 165^\circ \angle 5^\circ$, $\sigma_3 = 25^\circ \angle 87^\circ$, 两翼夹角 125° ; B. 北北西向背斜, 轴面 (HF) 产状 $337^\circ / 9^\circ \angle 85^\circ$, 枢纽产状 $337^\circ \angle 5^\circ$, $\sigma_1 = 245^\circ \angle 3^\circ$, $\sigma_2 = 337^\circ \angle 5^\circ$, $\sigma_3 = 108^\circ \angle 85^\circ$ 两翼夹角 127°



A, 最大主应力等值线图;
B, 最大剪应力等值线图;
C, 应变能等值线图

图 10 矿区在南北向 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 顺扭和南北向 $58\text{kg}/\text{cm}^2$ 单向挤压联合作用下的应力场特征

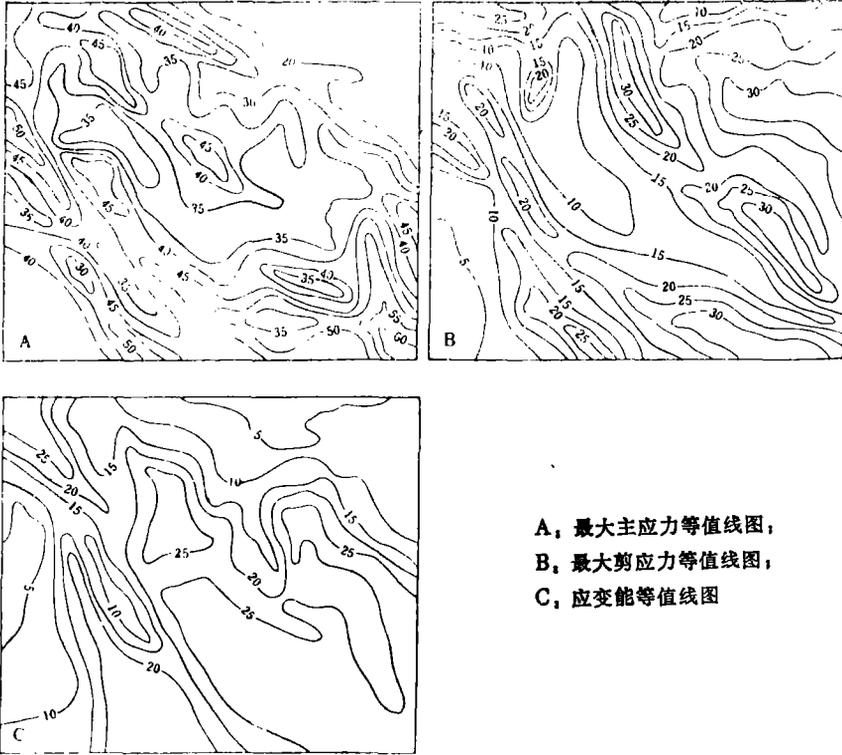


图 11 矿区在南北向 $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 顺扭和东西向 $35\text{kg}/\text{cm}^2$ 单向挤压联合作用下应力场特征

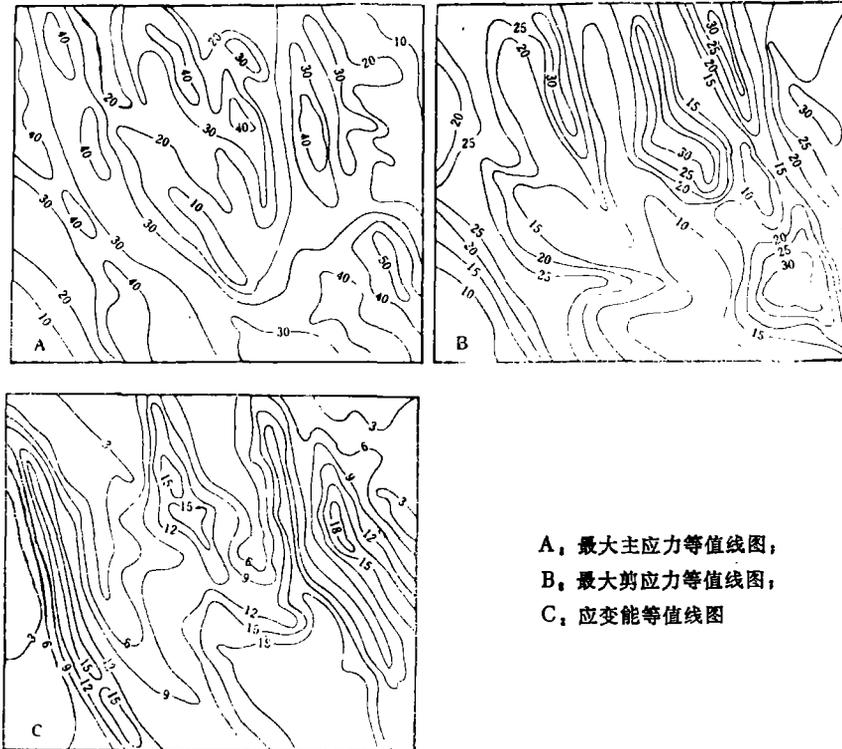
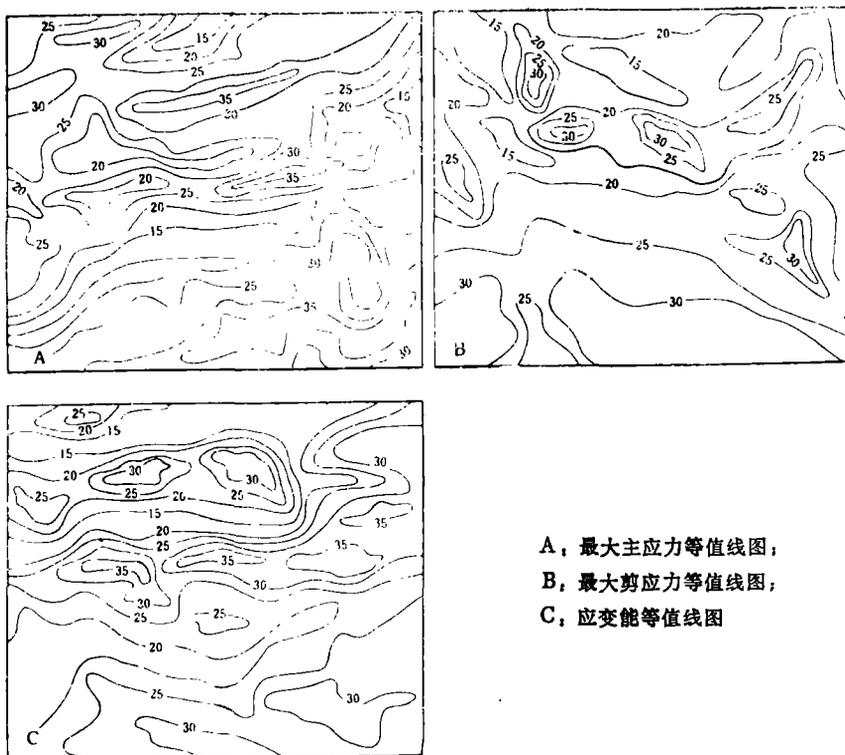


图 12 矿区在南北向 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 顺扭和东西向 $126\text{kg}/\text{cm}^2$ 挤压联合作用下应力场特征



A, 最大主应力等值线图;
B, 最大剪应力等值线图;
C, 应变能等值线图

图 13 矿区在南北向 $25\text{kg}/\text{cm}^2$ 直扭(顺)和南北向 $176\text{kg}/\text{cm}^2$ 单向挤压联合作用应力场特征

针扭动伴随微弱的南北向挤压情况下, 最大主应力(σ_1)方向为北东 30° 。最大主应力、最大剪应力和应变能高值区明显成带状、北西向展布(图 10), 与该期构造变形特征基本吻合。中、晚期构造活动中, 区内处于南北向顺时针扭动和微弱的东西向挤压条件, 最大主应力 σ_1 方向为北东 50° 。最大主应力、最大剪应力和应变能分布与华力西早期大体一致, 南部背斜和北部背斜展布范围最大主应力、最大剪应力和应变能均为高值区(图 11)。

印支—燕山期外力边界与华力西期不同, 南北向顺扭的同时伴随有较强烈的东西向挤压, 此时最大主应力 σ_1 方向为北东 70° , 其高值区尽管显得比较分散, 但总体上看仍成条带状, 沿北北西向展布。最大剪应力和应变能高值区明显成北北西向条带状延伸, 与该期构造变形十分吻合(图 12)。

喜山期外力边界处于南北向顺扭并伴随较强烈的南北向挤压作用, 最大主应力 σ_1 方向为北东 10° 左右。这一计算结果与该区现代应力测量结果 σ_1 为 8° 十分接近。最大主应力、最大剪应力和应变能高值区均成条带状, 近于东西向展布。特别是 F_{28} 、 F_{20} 、 F_{30} 展布部位 σ_1 很高(图 13)。

参 考 文 献

- 1 周济元、黄继钧. 浙江建德铜矿的构造特征及其控岩控矿作用. 中国地质科学院 562 综合队集刊第 6 号. 地质出版社, 1987
- 2 刘肇昌. 地质构造分析中的数学计算. 地质构造专辑, 1984
- 3 黄继钧. 叠加褶皱的类型及变形图象. 成都地质学院学报, 1983 (4)
- 4 黄继钧. 喀拉通克铜镍硫化物矿床的岩浆深源熔离—贯入及其形成力学机理. 矿物岩石, 1990 (4)
- 5 马宗晋、邓超东. 节理力学性质的判别及其分期配套的初步研究. 构造地质问题. 科学出版社, 1965