

湖南锡矿山锑矿田成矿期应力值估算

吉 让 寿

(地质矿产部石油地质中心实验室)

本文据锡矿山区古构造特征,运用相应的岩石破裂理论,对该区成矿期构造应力场进行数学力学的计算,其结果与该区古构造特征吻合得较好,并与国内外其它方法估算的古应力值可以对比。

一、前 言

采用地质方法和数值模拟的方法研究区域古构造应力场已经有了一套完整的理论和较为成熟的工作方法,并在实践中已经取得了较好的效果^[1]。现代构造应力场的研究可以通过实际测量应力值和应力方向而取得定量的效果;古构造应力值的估算,国际上通常采用三种方法〔7—9〕;1)通过超微构造在高压(200—1000kv)透射电子显微镜(放大数万倍)下观察少数几种矿物如橄榄石、石英在稳态流下由于构造应力作用而产生的晶格位错密度估算古应力值;2)利用动态重结晶粒度和亚晶粒度估算古应力值;3)利用方解石等变形双晶估算古应力值。上述方法的应用,无疑将构造应力场研究向定量方向推进了一大步。但是无可忌讳,上述三种方法是通过有关实验移植到古构造应力场研究上来的,除人为的约束条件和整个地质环境的误差很难消除外,还存在着以下几个方面的困难:1)位错密度、重结晶粒度和亚晶粒度,都不能筛选出地质历史演化过程中不同构造期相应的古应力值,其估算的结果一般为所研究的构造点最终应力值;2)用上述方法尤其前二法多限于韧性变形区,根据目前报道,多用于韧性剪切带的古应力估算上,而对深5Km以上的地表脆性研究,则显得无能为力;3)这些研究由于其约束条件和耗资较大,目前只限于某些点的构造应力值估算。基于上述原因,本文根据锡矿山地区发育的古构造特征,运用相应的岩石破裂理论,对锡矿山地区成矿期构造应力场进行数学力学计算,将其结果与矿区内该期发育的构造特征进行对比,它们吻合得较好。本研究认为,使用这一方法,同样可以使构造应力场研究向定量方向迈进,并有其它方法所不及的优点。

二、地质依据和基本理论

锡矿山矿区,经研究成矿期除了发育了北北东向的复式短轴背斜,西部大断层F₇,和

北西向断层 $F_{2,1}$ 等以外，还发育了多种类型的小构造，特别是矿区内分布的下石炭统和上泥盆统的灰岩中广泛发育了由方解石充填的雁行脉。作者在矿区20多平方公里范围内，观察并测量了成矿期雁行脉露头点32个。上述诸类构造构成了一幅生动的成矿期构造应力场图象^[2]。而研究区内雁行脉，不仅成为探讨该区构造演化历史的重要材料，而且这种特征的构造型式，也是本文运用数学力学方法计算成矿期应力值的地质依据，对它的特征和形成机理作一扼要的探讨如下：

地壳上广泛发育的雁行脉作为一类构造型式已被公认，而雁行脉形成的力学性质和机理，特别是雁行脉与应力之间的关系，还存在有不同的认识。一般都认为，雁行脉是沿先存的剪切带受简单剪切作用而在带内形成的二序次雁行脉，Lajtai (1969) 用石膏粉做剪切试验后指出，二序次雁行脉与断层伴生；G. Wilson (1961) 则把雁列角较大的一类雁行脉划归为沿吕德尔线发育的一组剪切雁行脉；Hancock (1972) 认为在剪切带中重新排列或次生应力场作用而形成不同力学性质的二序次雁行脉等等。这些二序次雁行脉如宋鸿林 (1983) 指出，它们以带为边界，并有一定的位移，离开带绝无同期雁行小脉存在。二序次雁行脉是次生应力场作用的结果，其单个张性小脉只与局部应力场最大压力方向平行；且共轭雁行脉呈“扇形”排列。

实际上，地壳上发育的同一构造型式不一定具有完全相同的地质背景和所处的应力状态，雁行脉这一类构造型式便是如此。研究锡矿山矿区的雁行脉表明^[3]，除了初始张裂隙脉呈雁行排列组成“带”以外，并无任何破裂面作为它们先存的边界，“带”与围岩没有任何位移的痕迹，且在“带”的临近围岩中不时可见分散的不呈雁行排列的同期小脉；共轭雁行脉列中的小脉，相邻露头上同期同名（指左行或右行）脉列中的小脉相互平行，在共轭剪切裂隙发育的露头上，同期雁行小脉平行它们的共轭角平分线，即平行区域构造应力场最大压应力方向，所以它们是区或应力场作用下形成的初序次雁行张裂隙脉。

近期的岩石破裂实验研究揭示了岩石破坏的微观机制。实验和理论计算发现，岩石在宏观破坏之前，产生强烈的应力—应变集中带，该带与主应力方向成一夹角^[4]。在该强烈应力—应变集中带内，用扫描电子显微镜观察到许多呈雁行排列的微裂缝，大多数是张性而非剪性的，这些呈雁行排列的张裂缝中单个裂缝，与最大压应力方向近于平行，称为轴向张裂缝¹⁾。此外，对实验的岩石通过测量声发射频率、弹性波的变化证实，在宏观破坏之前，存在着扩容现象，即存在着张性破裂²⁾。岩石的微观破裂首先表现为呈雁行排列的张裂缝也为现代活动地震所证实，如小出仁等指出：“从宏观上看，地震破坏是压应力下的剪切，从微观上看都是雁行张力裂缝”。因此锡矿山发育的雁行脉与最近岩石破裂试验等所获得的结果是吻合的。

诚然，岩石破裂理论是一个相当复杂的问题，它不仅与岩石本身的物理性质和所处的地质环境有关，而且与受力的状态有关。人们通过实验，对各类岩石破裂的极限曲线进行拟合。在 $\sigma\tau$ 坐标系中，对于不同的岩石破裂和所受的应力状态，一般用三种曲线拟合：1) 直线型极限曲线，即库仑—纳维叶断裂准则；2) 抛物线型极限曲线；3) 摆线拟

1) 王其允，1980，岩石的脆性破坏与断层的某些特征 美国加州大学柏克莱分校，北京大学地质系印。

2) M. S. Paterson, 1981, 澳大利亚佩特森教授在华学术报告专辑，关锦拔整理，中国科学院武汉岩体土力学研究所情报室。

合极限曲线。考虑到区内发育雁行脉的地质特征即岩石破裂性质为脆性-半脆性和发育雁行脉的应力状态^[6],拟用抛物线型极限曲线估算区内成矿期雁行脉的应力值可能更接近实际些。

三、成矿期古应力值估算

如上述,根据锡矿山成矿期雁行脉的地质特征及野外所得的地质参数和物性参数,采用抛物线型断裂极限曲线研究该期雁行脉的应力状态。据公式^[9]:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \sigma_1 - \frac{k^2}{4\sigma_1} \pm \frac{k^2}{2\sigma_1} \left(\frac{1}{\cos\theta} \pm \frac{1}{2\cos^2\theta} \right) \quad (1)$$

式中 θ ——共轭剪切断裂共轭角

考虑到区内发育的初始雁行张裂隙脉的特征,其雁列角等于同期共轭剪切裂隙的剪切角,即:

$$\theta = 2\beta \quad (2)$$

将(2)式代入(1)式得:

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_3} = \sigma_1 - \frac{k^2}{4\sigma_1} \pm \frac{k^2}{2\sigma_1} \left(\frac{1}{\cos 2\beta} \pm \frac{1}{2\cos^2 2\beta} \right) \quad (3)$$

又据

$$\tau = \frac{1}{2} (\sigma_1 - \sigma_3) \quad (4)$$

式中 σ_1 、 σ_3 ——分别为最大和最小主应力,压为负,张为正;

τ ——各观测点最大剪应力,顺时针为正,逆时针为负;

k ——岩石的抗剪极限强度;

σ_1 ——岩石的一个强度参量 = $\frac{k^2}{\sigma_c - 2k}$ ^[9], σ_c ——岩石的抗压极限强度;

β ——初始雁行张裂隙脉的雁列角。

根据兔子塘灰岩的物性参数¹⁾得 $\sigma_1 = 23.4 \text{ kg/cm}^2$, $k = 122.4 \text{ kg/cm}^2$,计算了成矿期32个雁行脉发育点的古应力值,(见表1)。

将剪应力值取绝对值,标在图1相应的位置上,并制成成矿期剪应力值等值线图(图1)。

计算表明,区内最大剪应力值为 1844.549 kg/cm^2 ,最小剪应力值为 417.888 kg/cm^2 ,与近年来国内外发表的古应力计算数值(见表2)可以对比,它们同在一个数量级上。

从图1可以看出,剪应力等值线总体上呈北北东向展布,且在矿区的偏北部有一次级的剪应力等值线呈北西向延伸,其次在剪应力等值线总体呈北北东向展布的背景上,还有大体同方向的剪应力等值线的次级圈闭;再者剪应力等值线分布趋势为:矿区周边剪应力等值线低于区内剪应力等值线,其比值大约为1:4。根据以上特点并与恢复的成矿期构造图^[2]对比可以看出:一、剪应力等值线分布总趋势与区内北北东向的复式背

1)锡矿山矿务局、长沙矿山冶金研究院,1980,河床矿柱试验区岩石力学性质试验报告。

表1 锡矿山成矿期古应力值计算表

测点号	雁角列	物性参数		古应力值		
		$\bar{\sigma}_1(\text{kg/cm}^2)$	$k(\text{kg/cm}^2)$	$\bar{\sigma}_1(\text{kg/cm}^2)$	$\bar{\sigma}_3(\text{kg/cm}^2)$	$\tau(\text{kg/cm}^2)$
2	38°	23.4	122.4	-1549.40	-4196.07	1323.74
5	35°	"	"	-569.24	-2441.14	936.00
6	40°	"	"	-3602.47	-7288.40	1842.97
8	37°	"	"	-1082.52	-3405.63	1161.56
9	36°	"	"	-776.71	-2848.66	1036.00
11	39°	"	"	-2301.98	-5381.54	1539.78
13	-21°	"	"	4.26	-857.31	430.79
14	-28°	"	"	-76.06	-1224.00	572.47
15	38°	"	"	-1549.40	-4196.07	1323.74
16	-29°	"	"	-102.47	-1310.48	604.01
17	33°	"	"	-317.24	-1891.46	767.11
18	21°	"	"	4.26	-857.31	430.79
19	-21°	"	"	4.26	-857.31	430.79
21	-40°	"	"	-3602.47	-7288.40	1842.97
22	-40°	"	"	-3602.47	-7288.40	1842.97
23	20°	"	"	8.47	-827.67	418.07
24	31°	"	"	-180.96	-1544.81	681.83
25	32°	"	"	-239.26	-1699.65	730.20
26	32°	"	"	-239.26	-1699.65	730.20
28	-35°	"	"	-569.24	-2441.14	936.00
30	-34°	"	"	-422.75	-2131.87	854.56
31	23°	"	"	-7.49	-929.12	460.82
32	38°	"	"	-1549.40	-4196.07	1323.74
33	-32°	"	"	-239.26	-1699.65	730.20
35	-34°	"	"	-422.75	-2131.87	854.56
36	-29°	"	"	-102.47	-1310.48	604.01
37	-24°	"	"	-15.75	-972.59	478.42
38	25°	"	"	-26.03	-1022.05	498.01
39	36°	"	"	-776.71	-2848.66	1036.00
N ₂	33°	"	"	-317.24	-1891.46	767.11
N ₇	-25°	"	"	-260.03	-1022.05	498.01
N ₈	-36°	"	"	-776.71	-2848.66	1036.00

斜和 $F_{7,6}$ 断层等较相对应，而北西向的次级剪应力等值线与区内发育的北西向断层如 $F_{2,10}$ 等相吻合；二、矿区内次级剪应力等值线圈闭是否意味着与区内单个短轴褶皱相呼应？从分布地域范围看，它们有相当的吻合度。如是，剪应力等值线分布的总趋势和剪应力等值线的次级圈闭不仅控制了成矿期本区构造的发育和发展，而且控制着矿田、矿床甚至矿体的分布范围；三、矿区周边剪应力等值线低于矿区内部，这与在矿区周边勘探、开采矿体尖灭的事实吻合。因此，可以说，根据区域发育特定的构造型式，并运用相应的岩石破裂极限曲线，进行古应力值数学力学方法估算是有实际应用价值的。

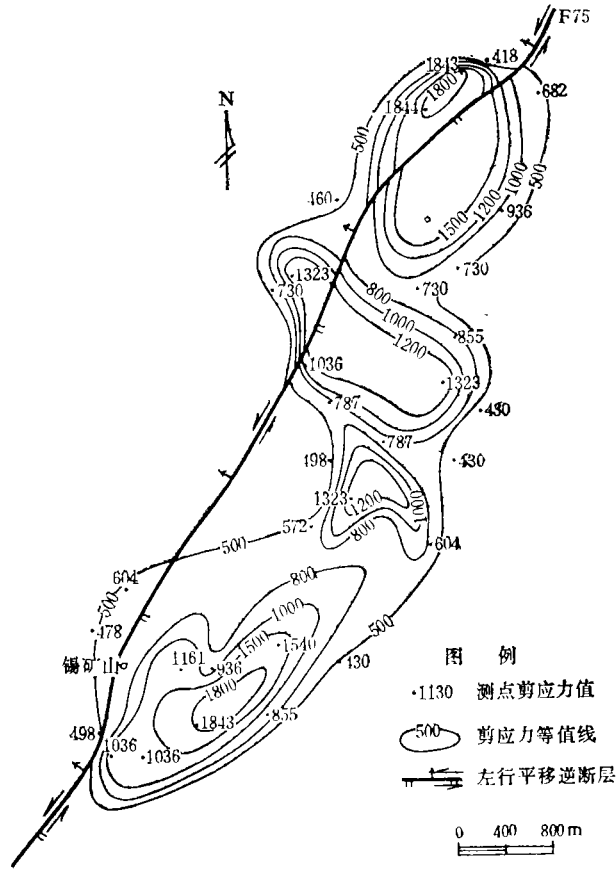


图1 湖南锡矿山梯矿田成矿期构造应力场数学力学计算的剪应力等值线图(单位: kg/cm²)

表2 不同方法估算的古差异应力实例

地 点	岩 性	古 应 力 差 异 应 力 计算类型※(MPa)	来 源	
北京怀柔大水峪韧性断裂带	糜 棱 岩	Ⅲ	88—186	北京大学冯孙齐等(1985)
湖南锡矿山	灰 岩	Ⅳ	80—360	本 文
San Gabriel山, 加州美国	石英—长石糜棱岩	I	130	Twiss(1977)
Arltunga推覆体, 澳大利亚	石英糜棱岩	I	30—130	Twiss(1977)
Moine冲断层, 苏 格 兰	石 英 岩	I	50—130	Twiss(1977)
Moine冲断层, 苏 格 兰	石 英 岩	I	85—110	Weathers等(1979)
Woodruffe冲断层, 澳大利亚	石英糜棱岩	I	30—130	Twiss(1979)
Woodruffe断层, 澳大利亚	糜棱岩化片麻岩	I	60—150	Etheridge和Wilkie(1979)
Lachlan褶皱带中剪切带澳大利亚	糜棱岩化花岗岩	I	60—150	Etheridge和Wilkie(1979)
Davenport冲断带, 澳大利亚	糜棱岩化片麻岩	I	60—150	Etheridge和Wilkie(1979)
中央地块剪切带, 法 国	花岗闪长岩	Ⅱ	25—150	Burg和Laurent(1978)
Ikertog 剪切带, 格林兰	花岗闪长岩质片麻岩	I	20—40	Kohlstedt等(1979)
Gdaho Springs—Ralston剪切带, 柯罗拉多, 美 国	石 英 岩	I	95	Kohlstedt等(1980)
Gdaho Springs—Ralston剪切带 柯罗拉多, 美 国	石 英 岩	Ⅱ	90	Kohlstedt等(1980)

※古应力计算类型: I 为动态重结晶石英粒度; Ⅱ 为石英亚晶粒度; Ⅲ 为位错密度 Ⅳ 为本文力学计算方法

四、几点讨论

1. 应用不同方法估算古构造应力值是研究地球动力学的重要组成部分，因而目前国内外构造地质学家都以极大的注意力并应用不同的方法和耗费较大的资金进行这一工作，并有蓬勃发展的趋势。本文运用数学力学方法估算古应力值是初次尝试，它与国内外构造地质学家们运用的其它方法估算的古应力值可以对比，并且对锡矿山成矿期发育的构造和矿床分布规律的机制讨论有一定启示；

2. 以表2中可以看出，本文估算的最大差异应力值是国内外同行用其它方法估算的最大差异应力值的二倍。这一差异的原因是因其他方法多用于韧性变形带如韧性剪切带内，本文用于脆性—半脆性变形区内。根据J.G.Ramsay (1984)的意见，韧性变形在大于10km深的范围内发生；而韧性—半脆性在5—10km深的范围内发生。估算锡矿山约在4km深的范围内发生的构造形迹。又据庄培仁等(1985)模拟华北盆地地壳剖面应力值分布趋势，离地表5公里左右的剪应力值要比其下的大得多，且越往深处(110km)剪应力值是5公里深处的1/8—10倍。

3. 按计算公式要求，本文需取得每一观测点上的物性参数，才能满足定量计算的要求。由于明显的原因，虽然所测雁行脉均发育在灰岩中，但仅以单一的兔子塘灰岩的物性参数作计算参数，显然会产生一定的误差。此外，从计算中可以看出，所测地质参数应尽量避免人为误差，因为地质参数误差比物性参数误差所造成应力值误差，在一定范围内要大得多。

本文曾得到庄培仁、万天丰、王维襄等指教，在此表示感谢。

(收稿日期：1986年4月18日)

参 考 文 献

- (1) 庄培仁等 华北盆地新生代构造应场及盆地形成发展机制分析——《石油实验地质》，第7卷，第3期，1985。
- (2) 吉让寿 湖南锡矿山锑矿田控矿构造特征及其机制——《地球科学》，第11卷，第5期，1986。
- (3) 吉让寿 湖南锡矿山初始雁行张裂隙脉的研究——《地质论评》，第31卷，第1期，1985。
- (4) 王连捷 雁行断裂等距性形成的一种机制——《地质力学论丛》，第六号。
- (5) 小出仁等 活断层力学 ——《地震地质译丛》，3卷，3期，1981。
- (6) 王维襄等 棋盘格式构造的力学分析——《地质力学论丛》，第4号，1977。
- (7) Kolhs'tedt, D., Weathers, M., Deformation—induced microstructures, Paleopiezometer and differential Stresses in deeply eroded fault zones J. Geophys Res, N. 85, V. B. 11 PP. 6267—6285, 1980.
- (8) Twiss, R. J., Theory and application of a recrystallized grain—Size Paleopiezometer, Pure Appl. Geophys V. 115, pp. 227—244, 1977.
- (9) Christie, J. M. and A. Ode. Flow Stress from Microstructures of Mylonites. Example and current Assessment, Journal of Geophysical Research, 85, B. 11. 1980.

AN ESTIMATION OF THE STRESS VALUES DURING MINERALIZATION FOR THE ANTIMONY OREFIELD IN XIKUANGSHAN, HUNAN PROVINCE

Ji Rangshou

(Central Laboratory of Petroleum Geology,
Ministry of Geology and Mineral Resources)

Abstract

Based on the certain structural style developed in Xikuangshan Area, Hunan Province, the stress values of mineralization are preliminarily estimated by mathematic mechanics in this paper. It reveals that the estimation of the stress values can be correlated to that of Paleo-stress values by other structure geologists using other methods. Therefore, it would be helpful for the discussions both on the various structures and the distributive mechanism of the ore deposits developed during mineralization in Xikuangshan Area.