

是一个合理的解答,理由有下述两条:(1)与岩石圈剪切带有关的P-剪切的排列为P-剪切之间的岩桥区提供了一个相当连续的扩容带;(2)根据实验和野外观察结果,P-剪切排列组在挤压转换环境下看来是普遍的。因此,预料P-剪切排列组普遍发育在以走滑构造和挤压转换构造(图5)为特征的斜向聚敛弧的背景中。尽管弧体中的变形作用主要是韧性的,但P-破裂的产状表明,花岗岩类在弧体中的侵位是受上地壳构造作用控制的。

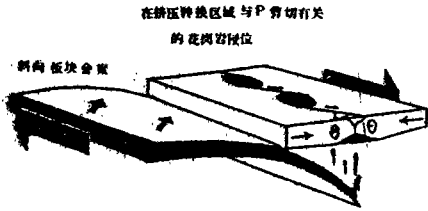


图5 挤压转换板块构造背景下雁列P剪切排列组中花岗岩侵位示意图

在内华达山东部,晚白垩世的岩浆作用(80~90Ma)可能与法拉隆(或库拉)板块和北美板块之间的斜向聚敛有关。我们认为,斜向聚敛导致在弧体内产生一组右旋剪切组分,以至发育了与弧体走向斜交的一组雁列式P-剪切,距离至少有300公里。几个同时代的岩浆系列(卡西德勒尔山侵入期)侵位于P-剪切之间的拉张岩桥区中。在此模式中,逐渐被花岗岩类系列充填的构造空腔的范围应达~70km长、15km宽。因此,提出横穿内华达山岩基的70公里最大总位移作为给花岗岩体侵位制造所必要的空间的首要近似值。如果假定卡西德勒尔山侵入期的岩体在10m·y(80~90Ma)期间侵位,则断层上的整个滑移速率应为0.7cm/yr。如果花岗岩类侵位中还包括其他的侵位机制,如顶蚀或局部的强力侵位,那么滑移速率可能降低。很明显,如果侵位是幕式的和不连续的,其瞬时滑移速率必然会增加。总的说来,必要的位移量以及滑动速率并非不现实。对我们模式的检验应是对所有卡西德勒尔山侵入期花岗岩类的多次而精确的同位素年龄测定,以证明整个内华达山岩基的同时代运动。进一步的构造研究工作将集中在证明其他花岗岩类中R方向构造“连接作用”上,而最重要的是在相邻岩体系列之间的围岩中对P方向的剪切带进行填图。

译自《Geology》,1992,Vol. 20, p. 927-930

涂绍峰 译 晓华 校

## 葡萄牙中北部的卡什塔涅拉结核状花岗岩： 球结核的成因及花岗岩的底辟活化作用

R. J. Reavy D. H. W. Hutton 等

**摘要** 葡萄牙中北部的卡什塔涅拉侵入体是一小型的(1000m×600m)海西期花岗岩体,该岩体含有异常丰富的以花岗岩为核心、黑云母为外壳的球结核。这种球结核被解释为代表花岗岩侵入体最上部富挥发份带中的原生气泡。在球结核周围的主花岗岩中,K和Rb的骤然减少表明黑云母是岩浆成因的。球结核是通过气相中的氯化亚铁络合物(Ⅱ)与硅酸盐熔体反应,然后气相再冷凝成小的花岗岩核心而形成的。气泡的运移使产生球结核的化学势梯度相对于主花岗岩处于稳定状态。化学、岩石

及构造资料表明,该侵入体是较大花岗岩体的一部分,是在同时代的横推剪切作用期间强力侵位的。顶板带普遍的电气石化以及推断存在挥发份表明岩浆是富卤素的。这可能意味着岩浆的粘度较低。

## 一、引言

葡萄牙北部海西构造带卡什塔涅拉花岗岩产有大量圆盘形富黑云母球结核状集合体。这种产有单矿物球结核状聚集体的花岗岩以前极少有报道。本文试图解释球结核的成因和变形历史,并证明这些奇妙的单矿物特征可以用来进一步阐明其主岩的构造历史和岩石成因。

卡什塔涅拉岩体是相邻较大的弗雷塔山(SdF)侵入体的外露层(图1),Reavy(1989)认为该岩体侵位于一条活动的横推剪切带中。地球化学和同位素资料指出,弗雷塔山花岗岩岩浆的形成来源于当地25~30%富杂砂岩的贝拉片岩的部分熔融。卡什塔涅拉岩体代表其中一个特殊的富球结核相。本文阐明了球结核内部结构留下的应变历史,并研究了它们形成的物理化学原因。

卡什塔涅拉岩体是相邻较大的弗雷塔山(SdF)侵入体的外露层(图1),Reavy(1989)认为该岩体侵位于一条活动的横推剪切带中。地球化学和同位素资料指出,弗雷塔山花岗岩岩浆的形成来源于当地25~30%富杂砂岩的贝拉片岩的部分熔融。卡什塔涅拉岩体代表其中一个特殊的富球结核相。本文阐明了球结核内部结构留下的应变历史,并研究了它们形成的物理化学原因。

## 二、卡什塔涅拉岩体的野外关系

卡什塔涅拉岩体出露在卡什塔涅拉村附近的弗雷塔山高地上,并由此而得名(图2)。在现今的侵蚀面上,岩体为椭圆形,长约1000米,宽约600米。其与贝拉片岩的接触带出露完好但方向不定,常向外呈缓倾斜状,说明为一穹窿形岩体。花岗岩内出现由黑云母和白云母形成的同心状颗粒形态和线状排列的组构。向外倾斜的叶理平行于缓倾的接触带。

片岩与花岗岩接触面清晰,片岩中未见花岗岩层。靠近接触带的花

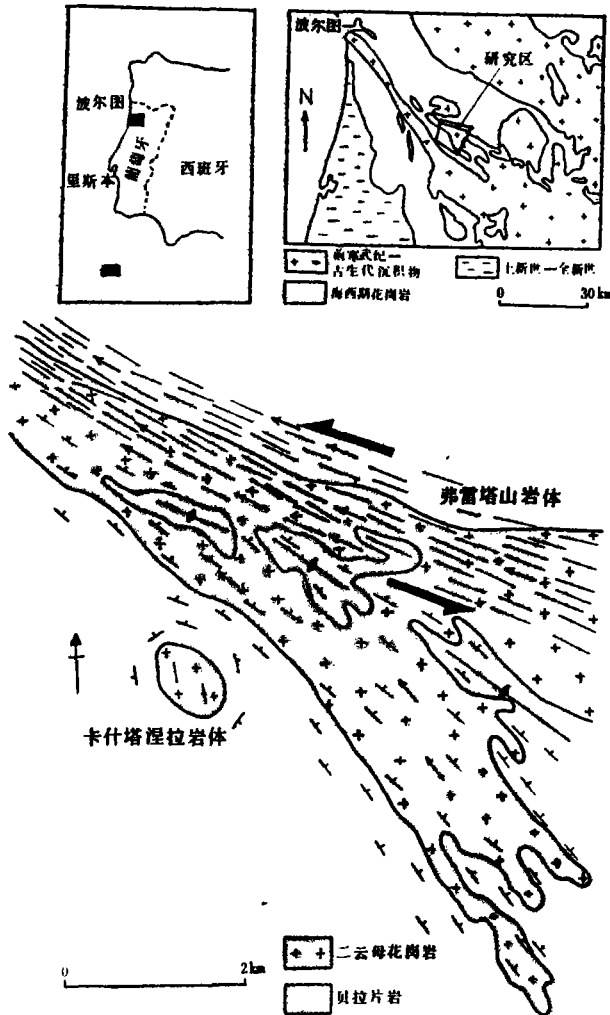


图1 弗雷塔山与构造有关的剪切带地质图

卡什塔涅拉岩体的花岗岩上方,叶理示出穹窿状,拉伸线理重新定向。接触带的倾角 $<40^\circ$ ;在左旋挤压转换剪切带(粗箭头所示)中央,透入性叶理角度陡( $>80^\circ$ ),有平缓倾斜的拉伸线理( $<20^\circ$ ),北部接触带陡倾斜;在弗雷塔山岩体轴部,花岗岩上覆盖有片岩,接触带平缓;在剪切带边缘,叶理角度不太陡( $40\sim70^\circ$ ),花岗岩与片岩之间的接触带平缓。

岗岩粒度没有明显减小。但是,在离岩体 3 米范围内,特别是在东面,围岩中出现大量石英脉并广泛发育电气石,以致可将片岩描述为电气石岩,表明这里可能是花岗岩流体聚集的顶板带。

### 三、球结核状花岗岩

球结核状花岗岩是一种由石英、正长石、钠长石、黑云母、白云母和副矿物磷灰石、电气石及锆石组成的中粒状岩石,按其实际矿物成分为正长花岗岩或二长花岗岩,岩性上与弗雷塔山主岩体难以区分。整个岩体有大量的圆盘状富黑云母球结核,并常被风化出来形成奇妙的球结核岩屑区。球结核大小不定,直径可以从 1cm 到 12cm,且沿垂向或侧向其大小都无明显的分布趋势。球结核趋向于沿赤道平面呈直线排列,大致平行于平缓的叶理。

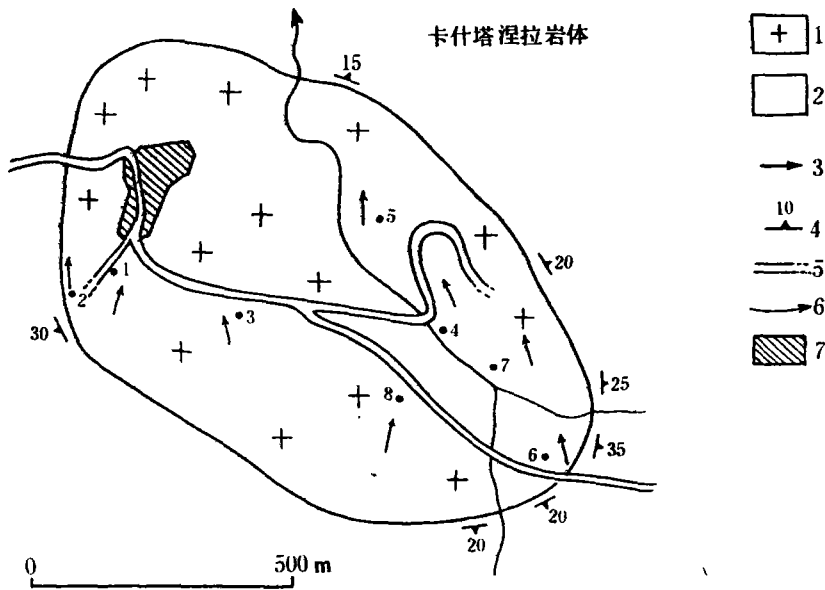


图 2 喀什塔涅拉侵入体地质图(数字表示测量应变的位置)

1. 二云母花岗岩 2. 贝拉片岩 3. 球结核的 X 轴和平缓倾斜的拉伸线理 4. 接触带方向 5. 公路 6. 河流  
7. 喀什塔涅拉村

表 1 是喀什塔涅拉花岗岩及母体弗雷塔山花岗岩的代表性全岩分析结果。除了喀什塔涅拉花岗岩中的 Ca、Na 和 Sr 富集(图 3a、b)以及 Rb 和 K 明显减少(图 4)之外,两岩体的其他主要和微量元素组分都很相似。一般来说,全岩化学上的相似性与野外观察结果一致,表明喀什塔涅拉岩体是弗雷塔山花岗岩体的一个相。因而,其 Rb 和 K 的减少是由于喀什塔涅拉岩体球结核中大量形成黑云母所引起。而 Ca、Na 和 Sr 的富集则是由于晚阶段挥发组份将这些元素搬运到顶板带所致。

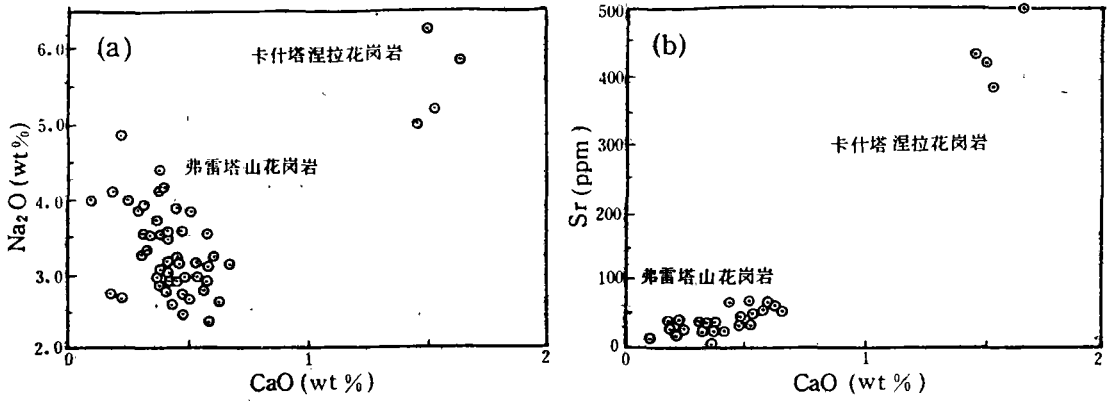


图3 表示弗雷塔山花岗岩与喀什塔涅拉花岗岩 CaO-Na<sub>2</sub>O(a)和 CaO-Sr(b)含量变异对比图

表1 弗雷塔山和喀什塔涅拉花岗岩有代表性岩石的主要元素及微量元素分析结果

样品	弗雷塔山花岗岩				喀什塔涅拉花岗岩			
	F436G	F446G	F4146G	F4148G	F313G	F457G	F552G	F523G
	主 要 元 素 (wt%)							
SiO <sub>2</sub>	72.78	73.11	72.17	71.87	74.67	72.13	74.47	72.94
TiO <sub>2</sub>	0.24	0.26	0.22	0.26	0.06	0.10	0.13	0.06
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.16	15.25	15.89	15.70	16.00	15.67	15.28	16.13
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.34	0.13	0.39	0.48	0.44	0.31	0.11	0.35
FeO	0.84	1.10	0.78	0.83	0.45	1.03	0.41	0.70
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.02	0.06	0.03
MgO	0.33	0.29	0.56	0.00	0.27	0.80	0.26	0.14
CaO	0.44	0.54	0.45	0.44	1.64	1.50	1.46	1.53
Na <sub>2</sub> O	2.90	3.15	2.94	2.59	5.80	6.24	4.95	5.16
K <sub>2</sub> O	4.95	5.15	5.20	5.58	1.04	1.14	1.72	1.37
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.40	0.38	0.38	0.38	0.08	0.24	0.20	0.15
LOI	1.80	0.20	1.40	1.60	0.40	1.20	0.80	1.80
总计	100.26	99.65	100.47	99.83	100.98	100.48	99.85	100.18
	微 量 元 素 (ppm)							
Nb	0	1	0	0	3	0	7	12
Zr	113	98	92	114	45	104	64	37
Y	8	9	9	7	7	9	7	10
Sr	46	52	50	67	497	418	431	383
Rb	282	295	316	303	19	49	65	44
Th	10	15	10	15	2	2	1	5
Pb	29	32	36	36	13	14	6	13
Zn	71	64	89	85	61	25	128	42
Cu	10	16	10	10	22	39	18	11
Ni	8	7	7	7	11	3	14	9
Cr	0	0	0	0	0	0	0	0
V	13	24	17	20	6	18	0	10
Ba	184	253	214	331	392	338	526	229
Hf	3	4	4	4	4	4	2	2
Ce	53	43	32	36	0	0	11	5
La	7	10	2	6	4	0	0	0

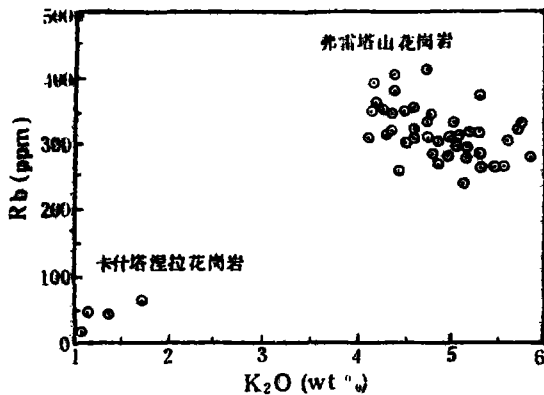


图4 表示弗雷塔山花岗岩与卡什塔涅拉花岗岩 Rb 和 K<sub>2</sub>O 的含量对比图

镜下薄片统计)表明它们极为相似(图5)。在所研究的各种情况下,核心区所受到的压扁作用都没有整个球结核那样强烈。由内向外,核心区的最外层黑云母含量明显增加,产生有复杂的连晶。最外层几乎是单矿物,由光延性上为相互交错的切向束的黑云母组成,尽管在横穿黑云母的任意方向有时可看到小的自形白云母。黑云母普遍有细褶皱。

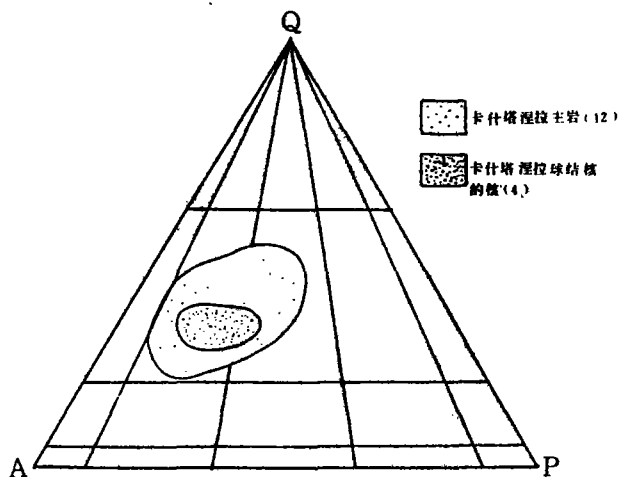


图5 卡什塔涅拉主花岗岩与球结核核心 QAP 矿物含量图解

母晶体聚集在它们表面。Van Diver 提出的两种模式都涉及到了聚集作用的物理过程,而没有考虑可供选择的其他可能性,如黑云母的形成也可以是熔体与另一种物质(捕虏体或气泡)相互化学作用的结果。如果球结核的核心是捕虏体,化学上有别于熔体,其化学过程就可能得到这样的结果。这种情况可以在关键元素或反应物种中产生化学势梯度 (Korzinski, 1968),从而形成单矿物层。假如卡什塔涅拉花岗岩是这种情况,主岩与球结核之间就应存在化学差异。如前所述,球结核与主花岗岩的矿物含量极其近似,二者结构也十分相似,因而不可能有较大的化学差。而且,这样一种球结核的形成机制难以解释两个关键的观察结果:第一,球结核在

#### 四、球结核

每个球结核都含有一个花岗岩核心。在一直径为6~7cm的球结核中,该花岗岩核心常由大小为7~8mm的石英和长石椭圆形区域组成,偶尔可大一点。由于核心的面积较小而核心内晶体相对较大,故难以获得核心区的代表性全岩分析结果。因此,要获得核心区的精确成分分析结果是不可能的。然而,核心区

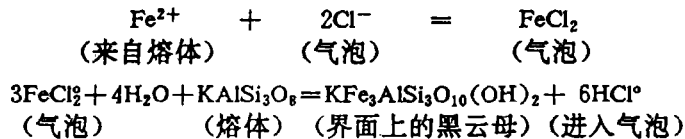
##### 1. 球结核的成因

(1)以前提出的球结核形成模式:球结核形成的准确机制是有疑问的。这些机制看来与 Van Diver (1970)根据佛蒙特“Bullseye 花岗岩”所描述的相似,该花岗岩普遍含有具一小花岗岩核心的同心状黑云母鳞片集合体。Van Diver 认为球结核的形成可能有两种机制。第一种机制包括黑云母鳞片的絮凝作用形成核团,接着由富含黑云母的层逐渐凝聚成富黑云母的外壳和富液体的核。第二种机制则涉及气泡,当这些气泡向上穿过岩浆时,由于表面张力而把黑云

岩体顶板中的富集;第二,球结核与主岩结构(和成分)上的相似性。

(2)本文提出的球结核形成模式: Van Diver(1970)的一个模式认为,球结核代表熔体中原来的气泡。这个可能性引起了我们的注意,因为球结核确实富集在顶板带。目前,球结核比其主岩更为致密(黑云母的密度为  $2.7 \sim 3.3 \text{gcm}^{-3}$ , 石英  $2.65 \text{gcm}^{-3}$ , 钾长石  $2.56 \sim 2.63 \text{gcm}^{-3}$ , Deer, Howie 和 Zussman, 1966), 表明原有的易浮组分现在已消失。此外,假如把球结核恢复到原来的球形,则核心区仅代表球结核中一小部分的原始空间。这些特征支持球结核代表熔体中原始气泡的想法。因此,球结核中的黑云母可以由主花岗岩与熔解在气泡中的挥发份之间的化学势梯度产生。在这种情况下,球结核要么代表强沸腾作用带入的硅酸盐泡沫,要么代表溶解在蒸气中并于晚期沉淀的石英和钾长石。围岩中丰富的石英脉和电气石化对涉及挥发份的模式提供了更多的支持。

Burnham(1979)曾经指出,上升的富蒸气花岗岩到达一特定深度时,就形成性质截然不同的硅酸盐相和含水相(“二次沸腾”)。此外,由实验工作获知(Webster 和 Holloway, 1988),氯被大量地分配到有关熔体的含水相中。已知氯可与许多元素形成络合物,由此我们相信当含水和含卤素的岩浆二次沸腾时,逐渐形成富卤素的水流体,其中含有许多被溶解的金属。更特别的是,铁与氯络合形成像  $\text{FeCl}_2$  这样的络合物(Webster 和 Holloway, 1988)。所以预料当二次沸腾时,一定数量的铁就被搬运到蒸气中,这与实际观察到的情况十分一致(Burnham, 1967)。假如花岗岩熔体的成分接近于钾长石,则氯化亚铁与花岗岩熔体反应产生黑云母的方程可表示如下:



虽然这个反应只表达了铁云母的形成,但蒸气(呈含水离子或氯络合物搬运)或熔体中的镁也可参与,以提供形成黑云母固溶体的成分。应该注意氯仅对该反应起催化作用。

我们研究了这种含溶解铁的富氯蒸气气泡向上通过花岗岩质熔体的情况。在气泡周围的熔体中,我们设想铁由于与气泡中的氯相互作用而具有明显的化学势梯度。如果气泡是静止的,则该体系可按上述反应式在气泡周围形成少量黑云母从而重新达到平衡,使反应停止。然而,由于气泡是漂浮的,处于动态上升状态,所以平衡将不会达到。在这种情况下,反应将继续进行直到最后大的单矿物黑云母球结核沉淀在岩体顶部。实际上,该体系的动态状态使化学势梯度相对于主岩而处于稳定状态下。这个化学势梯度通过气泡的上升而被保持,它是与我们在卡什塔涅拉的观察结果最一致的机制。

我们的模式有点类似于 Norton(1987)的“平流交代作用”,他认为主岩中的单矿物带是围绕热液脉形成的,通过这种热液脉有连续的流体流动。平流交代作用也是一个动态环境,其主岩与流体之间的化学势梯度由脉中连续的流体流来维持。以卡什塔涅拉岩体为例,气泡上升迁移代表流动,气泡本身相当于流体,岩浆代表主岩。照我们的认识来看,这是平流交代原理的一个新颖的应用。

因此,可以认为,上面提到的化学反应或类似的反应在富卤素的花岗岩岩浆中允许不定量的黑云母结晶。假如我们的模式是正确的,则富氯的蒸气气泡的动态运移可以阐明球结核

的丰度,根据野外证据,球结核确实出现在岩体顶板带。

表2 喀什塔涅拉岩体的应变数据

位置	X/Y	n	Y/Z	n	K
1	1.315	30	3.040	24	0.15
2	1.270	30	3.030	39	0.13
3	1.295	31	2.117	31	0.26
4	1.244	38	2.790	33	0.13
5	1.226	50	2.559	47	0.14
6	1.254	50	2.932	47	0.13
7	1.367	24	2.657	36	0.22
8	1.194	36	2.615	48	0.12

1-8是图2中的取样位置,X/Z和Y/Z是应变比值,n是所测样品的数目,K为Flinn图解上由a-1/b-1确定的值(a=主轴/中间轴,b=中间轴/最小轴)。

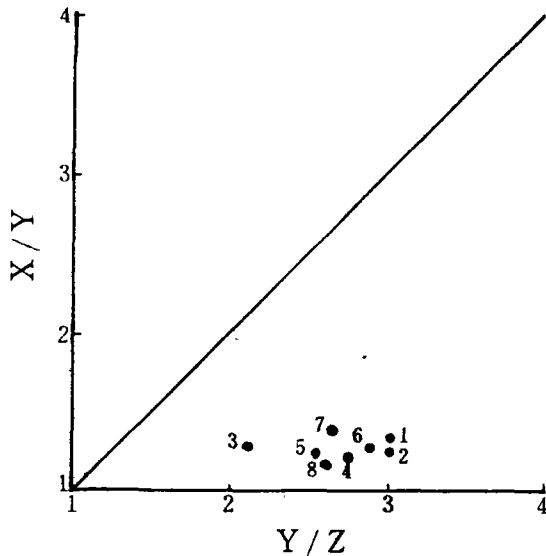


图6 球结核应变数据的Flinn投影图  
(数字表示测量应变的位置,图2)

## 2. 球结核的构造特征: 应变标志和剪切指向

球结核为拉长的圆盘形,其赤道平面与主花岗岩中颗粒形状和线状叶理大致平行(稍有偏斜)。当从东面观察时,赤道面总是稍稍逆时针旋转的主叶理,表示顶部向北的剪切指向。

在岩体的八个部位实测了椭球的三轴形态(图2),结果示于表2和图6中。其K值较低(0.12~0.26),反映被球结核记录的以压扁作用为主的应变。图6示出最大压应变位于最靠近岩体的边缘,由此表明喀什塔涅拉岩体是一个由底辟或气球膨胀引起的强力侵入体。尽管K值很小,但球结核有十分确定的X轴,该轴始终是N-S向排列(图2)。当在

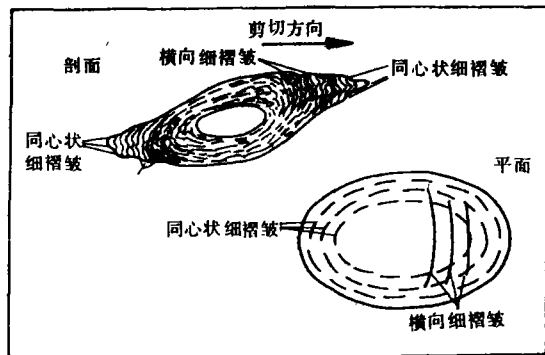


图7 表示球结核构造的同心状和横向细褶皱的平面和剖视图

XZ平面观察时,球结核形状明显是不对称的(图7),其拉长的尾部在横越核的直径时一致地发生偏移。这种不对称表明球结核相对于花岗岩基质发生了不均匀变形,在此表示具有顶部向北剪切指向意义并发生旋转的整体变形的一个组成部分。

球结核的一个明显特征是黑云母具有细褶皱,这些细褶皱是由于缩短作用造成的,通常有两组(图7)。第一组细褶皱的轴面位于球结核赤道平面20°以内,其轴迹在球结核XY平面上呈同心状。而在剖面上,这些细褶皱是压缩的且大致对称,细褶皱近于赤道平面的位置表明:它们是通过黑云母组构在赤道带的缩短作用形成的,而赤道带在整体应变的非旋转组分中正处于陡倾斜的压扁方向。细褶皱的振幅向内缩减表明,花岗岩核心的变形比黑云母外壳小。第二组细褶皱大致垂直于球结核的长轴,形态不对称。不对称发育的细褶皱与同心状细褶

皱一样,也说明振幅向核心减小。它们的形状、方向和位置显示为一个顶部朝北的逆掩剪切组分,该组分与球结核主变形期后的同心状细褶皱相似。要确定两组细褶皱的相对年代是不可能的,肯定细褶皱是由产生球结核总体形态的同一有决定作用的体系所形成也是不可能的。然而,由于细褶皱记录了两种相同类型的应变组分(压扁的非旋转应变和顶部朝北的旋转应变),所以对整个球结核形态而言,推测它们与同一应变历史和原因有关看来是合理的。

因此,球结核的形状和方向与伴随着顶部朝北逆掩剪切的压扁型变形并不矛盾。它们大多明显是由于卡什塔涅拉岩体的强力侵位引起的。就像下面所述,应变的旋转组分属于有岩体侵位的主干剪切带。

## 五、结 论

小型的卡什塔涅拉花岗岩是较大的弗雷塔山深成岩体的一个相。Reavy (1989)曾指出,该岩体同构造地侵入于一条海西期左旋主干剪切带中。在应变最大的剪切带中心,花岗岩席是陡斜的并强烈变形(图8)。向南岩席倾斜变缓,剪切带应变减小。在现代出露的水平上,卡什塔涅拉岩体看来覆盖在波状起伏的弗雷塔山岩席之上。我们认为,在二次沸腾时分离成富蒸气相的氯络合物并活化了熔体中的铁,在气泡/熔体界面上产生了化学势梯度。这个新的梯度由于上浮气泡的动态上升而处于稳定状态,允许大量黑云母通过下述反应而沉淀:

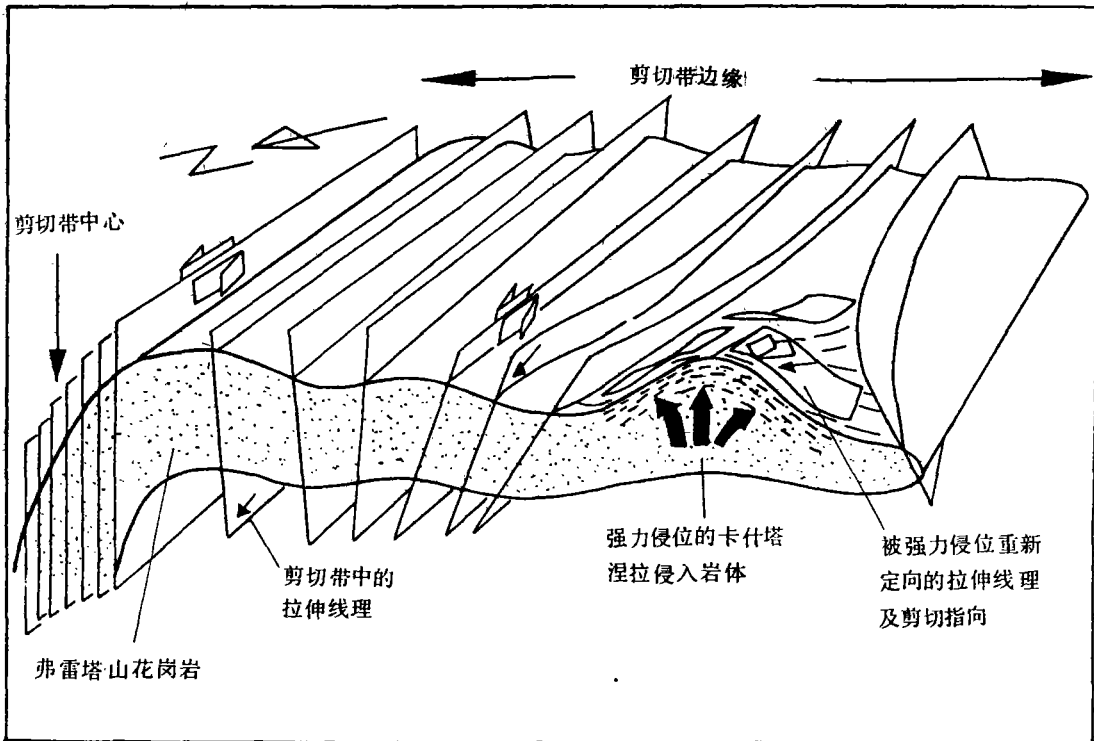
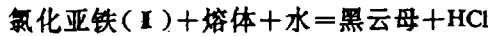


图8 弗雷塔山侵入岩体构造草图。图中示出了卡什塔涅拉岩体的侵位机制(据 Reavy, 1989)



我们关于球结核成因的结论证明卡什塔涅拉岩体是较大的弗雷塔山岩体的顶板相,这个岩相富含卤素挥发份且粘度较低。球结核的形态分析结果表明,卡什塔涅拉岩体是强力侵位的,而且它与相邻主干剪切带中的横推剪切作用是近同期产生的。因此我们认为,卡什塔涅拉岩体是下伏弗雷塔山深成岩体底辟活化的低粘度相(图 8)。

译自《Geol. Mag. 》,1993,130(2), p. 145—153

汤质华 译 涂绍雄 校

# 用单颗粒锆石碎片常规测年法研究 显生代花岗质岩石成因

Rudolf H. Steiger Ruth A. Bickel 等

**摘要** 副矿物锆石的研究已经成为岩石成因研究的一个重要手段。锆石不但抗溶蚀、抗晶体熔融,由此储存有关母岩信息,而且其中的分带现象同时记载了与地质事件有关的不连续生长。为了获得精确的年龄信息,有必要将这种锆石的生长带分离出来单独进行测年分析。我们在这里展示了从 $>125\mu\text{m}$  锆石颗粒中用机械方法分离出单个的几何上局部的锆石碎片的可行性。单颗粒锆石首先嵌入加拿大树胶中,用两块玻璃片夹住,用液态空气冷冻及裂碎。在放大 250~400 倍下监控裂碎过程并用显像仪记录。这种显像仪如换一个方向放出来,可让我们看到锆石碎片由裂碎后的状态返回到原始状态的过程。采用常规 U-Pb 同位素稀释技术,我们证实:对于显生宙单颗锆石碎片,即使重量小于  $1\mu\text{g}$ ,也可以成功地测年,并达到足够的准确度和精度。碎片给出一定展布的 U/Pb 比值,因而可用来区别不同年龄组份。我们成功地将这种方法应用于以往曾测过年的锆石群。这种测过年的锆石采自东格陵兰经多次造山运动成因的加里东造山带花岗质岩石。这些测定证实了在选定一颗锆石,裂碎后挑选几个完好的碎片作 U-Pb 分析,结合形态学研究可最终满足这种岩石演化所提供的地质事件的年龄及特征的确定。

## 一、引 言

过去 25 年中对锆石微量分析及形态学研究的进展充分证明了锆石作为岩石学成因研究示踪剂的重要性。由于熔体中元素锆的饱和性及锆石的不易溶解的动力机制加上锆石围岩中相关微量元素的缓慢固态扩散,岩石成因信息在经历地壳熔融事件后在这种矿物中得以保存下来。锆石研究者对锆石的内部分带及继承核是司空见惯的,年轻锆石中老的继承锆石核尤为明显。用单颗粒锆石测年法测定阿尔卑斯第三纪花岗质岩石年龄表明:很难找到不含继承老锆石核的颗粒。具内部分带的晶体表现出截然不同的生长阶段,因此是了解寄主岩体不连