

桂北元宝山花岗岩体中电英岩包体的应变测量和分析

周守余^{1,2} 张桂林² 于凯朋³ 尹 诚⁴ 郑小东⁴

(1. 桂林理工大学, 广西 桂林 541004; 2. 中国有色桂林矿产地质研究院有限公司, 广西 桂林 541004; 3. 广东有色工程勘查设计院, 广东 广州 510080; 4. 广西壮族自治区二七一地质队, 广西 临桂 541100)

摘要: 在系统的野外地质调查基础上, 通过对元宝山花岗岩体地质特征的分析, 运用岩石有限应变测量、应变分析方法, 着重分析了元宝山花岗岩体中电英岩包体的应变特征, 确定了电英岩包体的变形时代和原因。系统地开展了元宝山花岗岩体中电英岩包体的三维有限应变测量和应变分析。结果表明: 电英岩包体的应变型式可分为 3 种: 平面型应变 ($K=1$)、压扁型应变 ($0 < K < 1$) 和收缩型应变 ($1 < K < \infty$), 且以平面型应变为主, 有少量的压扁型应变和收缩型应变。

关键词: 应变测量; 应变分析; 电英岩包体; 花岗岩; 元宝山; 桂北

中图分类号: P584 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3657(2012)05-1236-11

20 世纪 60 年代以来, 定量测定岩石的应变已有很大进展, 并成为构造地质学的基本分析技术, 但这些应变测定和研究多限于沉积岩和变质沉积岩。而岩浆岩, 特别是花岗岩类岩石因缺乏天然应变标志体和测量参考面等问题而受阻。直到 70 年代中后期开始, 随着计算机处理数据能力的提高, 花岗岩的应变测量和应变分析才成为研究花岗岩构造的基本技术和方法, 并建立了一套适合花岗岩类岩石的应变测量方法(如 Rf/ϕ 法等)^[1-5]。近年来, 有限应变测量和应变分析已被广泛地用来表征岩体的变形, 并取得了令人满意的效果^[6-9]。

元宝山是桂北地区重要的锡多金属成矿区, 长期以来备受地质工作者的青睐, 研究程度较高, 岩体中发育大量的电英岩包体。笔者通过对岩体中电英岩包体系统的应变测量, 获得了较为丰富的应变参数和图式, 为最终确定包体变形机制、揭示包体变形过程提供了可靠的依据。

1 地质概况

元宝山花岗岩体位于广西北部融水苗族自治县内, 属于新元古代侵入体, 大地构造位置属“江南古岛弧”的南缘。SHRIMP 单颗粒锆石 U-Pb 测年获得元宝山花岗岩体的年龄 $(824 \pm 4) \text{Ma}$ ^[10], 岩体形成于雪峰期。

研究区最老的地层为中元古代四堡群, 广泛发育新元古代、中元古代地层(图 1)。震旦系(Z)在元宝山南东部分布, 由一套轻变质的含砾砂泥岩、砂岩、泥岩等组成。丹洲群(Pt_3)分布于元宝山花岗岩体周围四堡群的外围, 由一套变质砂泥岩及少量碳酸盐岩组成。四堡群(Pt_2)分布于元宝山两侧, 由浅变质砂岩、变质粉砂岩、千枚岩、科马提岩、基性熔岩、凝灰岩组成^[11], 与上覆丹洲群呈角度不整合接触, 总厚度大于 5 700 m。

元宝山花岗岩体呈长轴为近南北向的椭圆状,

收稿日期: 2011-10-28; 改回日期: 2012-03-20

基金项目: 广西自然科学基金项目“桂北元古代九万大山体叠加伸展构造及其与锡多金属成矿关系”[桂财教(2006)40-180]和广西隐伏金属矿产勘查重点实验室(桂林理工大学)共同资助。

作者简介: 周守余, 男, 1981 年生, 硕士生, 主要从事矿产地质勘查工作; E-mail: shouyuzhou@163.com。

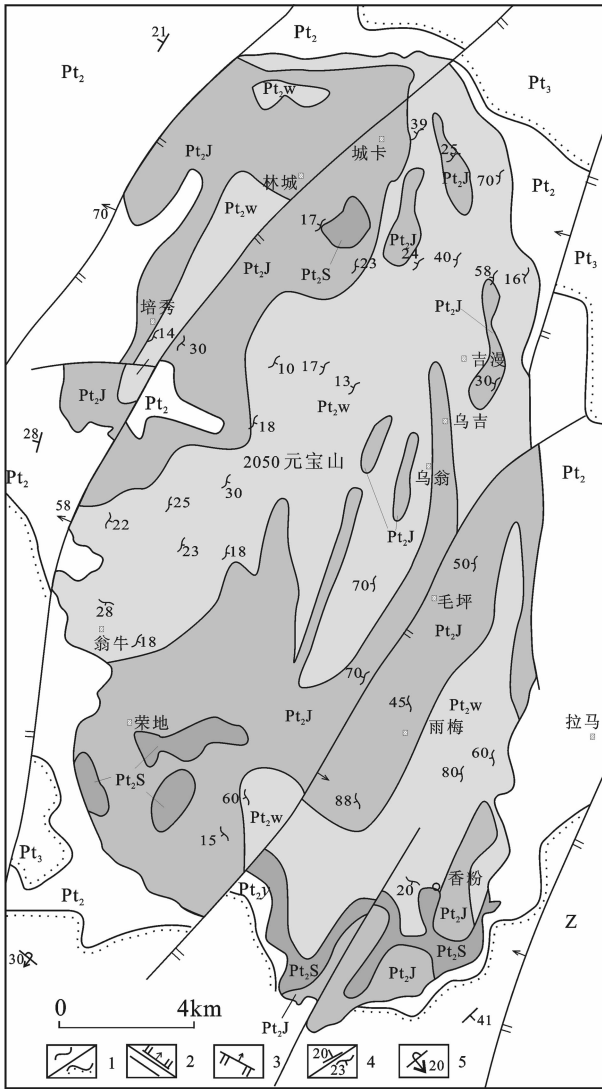


图 1 元宝山花岗岩体地质简图

1—地质界线/角度不整合地质界线;2—正断层/性质不明断层;3—逆冲断层;4—地层产状/片麻理产状;5—倒转地层产状;Z—震旦系;Pt₃—新元古界;Pt₂—中元古界;Pt₂W—汪洞单元;Pt₂J—吉羊单元;Pt₂S—三防单元。岩性说明见正文
 Fig.1 Geological sketch map of Yuanbaoshan pluton
 1—Geological boundary/ unconformity; 2— Normal fault/ unknown fault; 3— Reverse fault; 4—Strike and dip of bedding/ strike and dip of gneissosity; 5— Strike and dip of reverse bedding; Z—Sinian; Pt₃—Proterozoic; Pt₂—Middle Proterozoic; Pt₂W—Wangdong unit; Pt₂J—Jiyang unit; Pt₂S—Sanfang unit

长约 28 km,宽约 13 km,出露面积近 400 km²。广西 1:50 万数字地质图^[11]把元宝山花岗岩体纳入摩天岭超单元,并划分为 3 个单元(图 1),由新到老分别为:①汪洞单元(Pt₂W),主要出露于元宝山花岗岩体中部,构成岩体的核部,侵入体平面形状不规则,该单元片麻理极为发育,东侧片麻理产状:265~330°

∠40~58°,西侧:110~135°∠23~30°。汪洞单元脉动侵入于吉羊单元,其形成时代晚于吉羊单元,锆石 U-Pb 测试,年龄值为 (859±29)Ma。②吉羊单元(Pt₂J),主要出露于元宝山花岗岩体的中南部和北西部,平面上呈半环带分布,侵入体多呈不规则形状,该单元侵入体侵入四堡群,岩石片麻状构造很发育,产状为:265~330°∠45~73°。锆石 U-Pb 年龄值为 (858±50) Ma。③三防单元(Pt₂S),主要出露于元宝山花岗岩体的边部。侵入体多呈不规则状,该单元片麻理普遍发育,但岩体西侧和元宝山边部片麻理发育较弱,其产状:123~155°∠24~40°。锆石 U-Pb 年龄值为(822±30) Ma。除结构和侵入先后差异外,各单元岩性基本都是斑状黑云母二长花岗岩^[12]。

元宝山花岗岩体的东北部和西部广泛发育片麻状构造,20 世纪 60 年代的区调工作认为它是岩浆同构造挤压形成的^[13-14]。80 年代,有些学者认为该片麻状构造是岩体形成后,受到褶皱造山运动时产生的压碎和重结晶作用,在应力较集中的地方形成^[15]。张桂林^[16]认为元宝山花岗岩体中片麻状构造为一大型韧性剪切带。

对于片麻理的成因前人亦进行过探讨,广西壮族自治区地质局资料认为其是岩浆在逐渐冷凝过程中遭受同构造压力作用而逐渐形成的,与雪峰运动的构造应力场有关,它所示方向在一定程度上反映了原来岩浆活动的方向,其产状的变化则可能反映了岩体一定形态或受岩体形态控制^[13-14]。张桂林^[16]对元宝山花岗岩体片麻理(更确切的说是糜棱面理)的形成进行了研究,认为在元宝山花岗岩体原有片麻理的基础上叠加了一大型韧性剪切带。元宝山韧性剪切带内糜棱岩中新生云母类矿物的 ⁴⁰Ar/³⁹Ar 法坪年龄分别为 (404.3±6.2) Ma、(425.67±0.9) Ma、(324.82±0.58) Ma,为加里东晚造山期—后造山阶段^[13,14,16]。

元宝山韧性剪切带为一大型韧性剪切带,宽 8~10 km,延伸 25~30 km,总体走向为 NNE 向,但倾向有两组不同的方向:一组 SEE,主要分布在元宝山花岗岩体的西部;另一组倾向 NWW,主要分布在元宝山花岗岩体的中、东部。元宝山韧性剪切带产状具有“西部东倾,东部西倾”的特点。根据野外测量和室内赤平投影图也可看出,元宝山韧性剪切带内糜棱面理产状大致可分为两组。一组向 SEE 倾斜,且倾角较缓,一般小于 30°;另一组向 NWW 倾斜,且倾角较陡,一般大于 50°(图 2)。元宝山韧性剪切带

中拉伸线理的产状也分为两组,一组向 SEE 倾伏,且倾角较缓,一般小于 20° ,在野外观察该组拉伸线理发育在向 SEE 缓倾斜的糜棱面理上,一般向 N 侧伏,侧伏角 $50\sim 85^{\circ}$;另一组向 NWW 倾伏,且倾角较陡,一般大于 50° ,在野外观察该组拉伸线理发育在向 NWW 陡倾斜的糜棱面理上,一般向 N 侧伏,侧伏角 $50\sim 70^{\circ}$ (图 3)。总体来说,两组拉伸线理的倾伏向一般都与糜棱面理的倾向接近,说明剪切运动方向是倾滑型。

2 有限应变测量和数据处理

2.1 应变标志体的选择及测量

根据野外实践和研究,认为作为应变标志体应满足以下几方面基本要求:①应变标志体的变形能够代表所在岩石的变形,也就是说应变标志体和所在岩石之间的韧性差相等或基本相等——即同一性原则;②应变标志体的变形能够体现所在岩石的总体变形特征——即代表性原则;③应变标志体的变形要与所研究和探知的地质经历相统一——即对应性原则^[9]。

基于上述原则,本次研究所选择的应变标志体为岩体中所发育的电英岩包体(图 4-A)、钾长石斑晶(图 4-B)和石英斑晶(图 4-C)。

(1)电英岩包体:为同源包体,在岩体中广泛分

布,显微镜下鉴定其主要矿物成分为:电气石(25%~45%)、石英(23%~48%)、钾长石(5%~30%)和少量的黑云母。根据电气石多色性,鉴定包体中的电气石以铁电气石为主,占电气石总量的 80%。包体多呈椭圆形(图 4-A),大小不一,小至几厘米,大至几十厘米,以 $5\sim 10\text{ cm}$ 者为普遍。且包体与寄主岩遭受了几乎同样的热力和应力作用,并有大量的野外证据表明,包体在进入寄主岩后曾表现出明显的塑性状态。它们的形态常常是一个椭球,但在应变弱的花岗岩类中,它们的初始形态常常是球形的。因此,这些包体是非常理想的应变标志体。

(2)钾长石斑晶或称钾长石巨晶:众多的研究表明钾长石斑晶在岩浆呈液态流动状态时就已形成(或部分形成),但那时钾长石斑晶的粘度较周围介质高得多,即在岩浆液态流动状态下表现为刚性体,仅显示出优选方位而不产生晶内变形,随着岩浆进入塑性流动状态,钾长石斑晶周围介质粘度逐渐提高直到两者相近,它们才会发生塑性变形(如双晶、膝折等)。因此,只有发生过塑性变形的钾长石斑晶才能做为应变标志体。从岩浆形成到固态变形是连续过渡的,而在野外露头所见到的钾长石斑晶一般都经历过这种变形的全过程。所以,在实际工作中只要能够确定出哪些呈定向排列的钾长石斑晶是岩浆

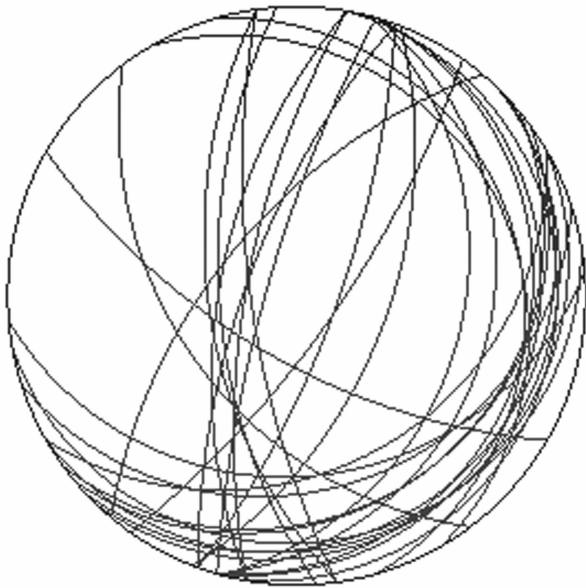


图 2 元宝山花岗岩体韧性剪切带糜棱面理赤平投影图
($n=29$)^[16]

Fig.2 Stereographic projection of foliation of ductile shear zone of Yuanbaoshan granitic pluton

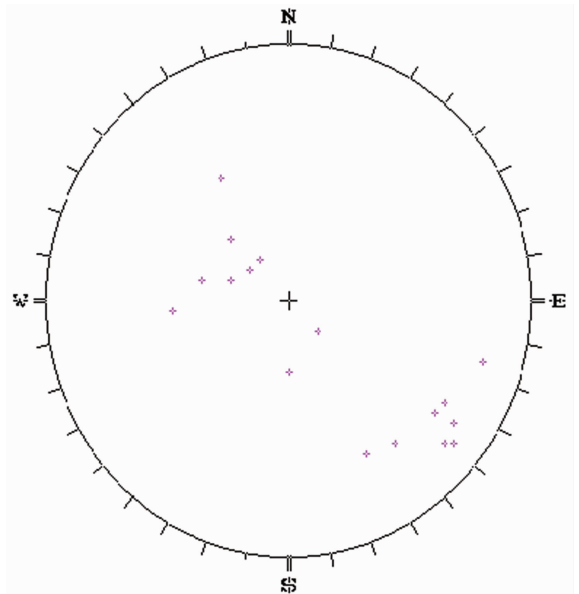


图 3 元宝山花岗岩体韧性剪切带拉伸线理赤平投影图
($n=17$)^[16]

Fig.3 Stereographic projection of lineation of ductile shear zone of Yuanbaoshan granitic pluton

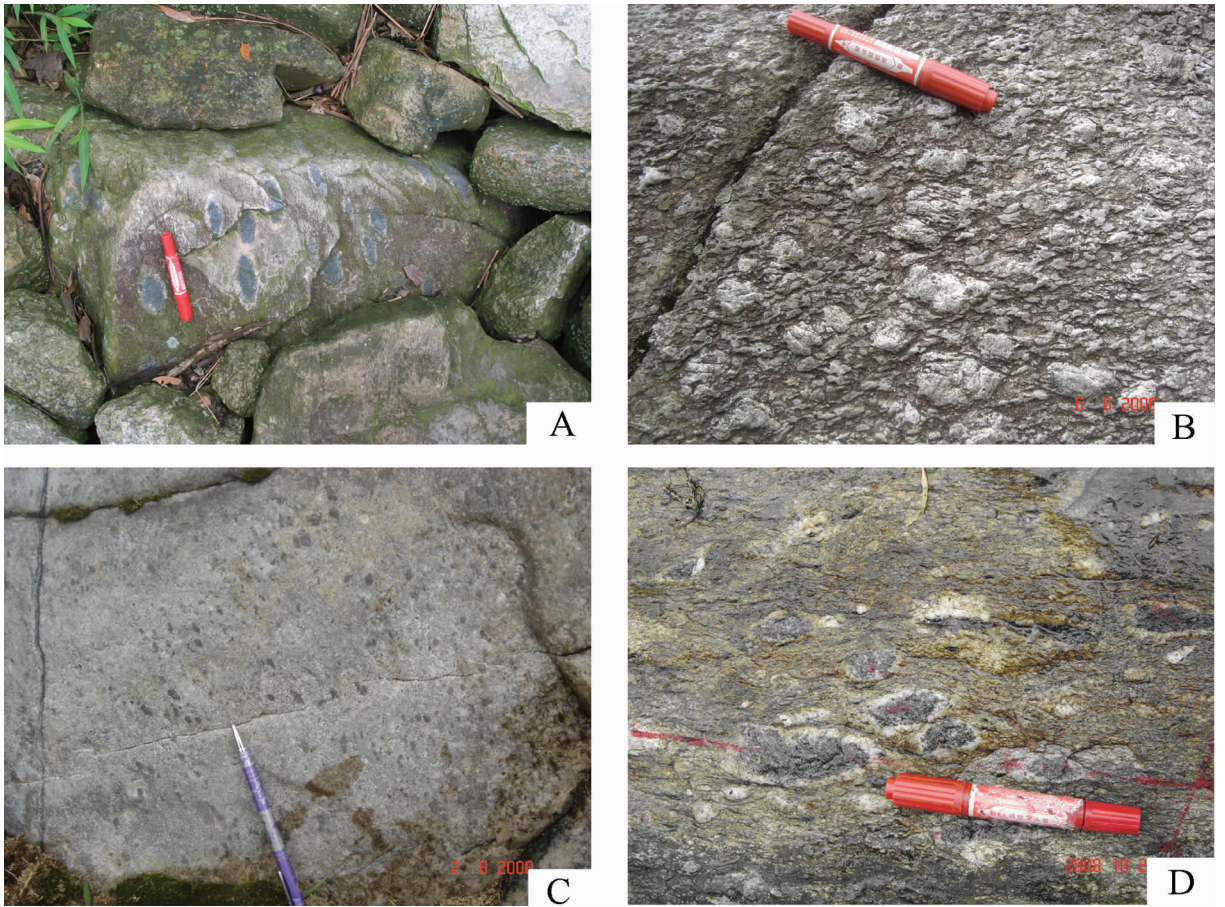


图 4 元宝山岩体中定向排列的电英岩包体、钾长石及石英斑晶

A—元宝山岩体中定向排列的电英岩包体(地点:融水县香粉乡雨梅);B—定向排列的钾长石斑晶(地点:融水县安太乡培秀);C—定向排列的石英斑晶(地点:融水县香粉乡)D—沿片麻理方向定向的电英岩包体(融水县香粉乡)

Fig.4 Shape-preferred orientation of tourmalite enclaves, K-feldspar and quartz crystals in Yuanbaoshan pluton
A—Shape-preferred orientation of tourmalite-quartz enclaves (locaton: Yumei of Xiangfen Township, Rongshui County);
B—Shape-preferred orientation of K-feldspar porphyritic crystal (locaton: Peixiu of Antai Township, Rongshui County);
C—Shape-preferred orientation of quartz porphyritic crystal (locaton: Xiangfen Township, Rongshui County); D—Along the gneissosity shape-preferred orientation of tourmalite-quartz enclaves (locaton: Xiangfen Township, Rongshui County)

液态流动作用形成,哪些是在岩体侵位之后由后期叠加应力作用形成的,问题便会得到满意的解决。一般来讲,由岩浆液态流动作用和岩体侵位之后叠加应力作用所形成的钾长石斑晶定向构造都具有一定的局限性,它们都不符合作为应变标志体的代表性原则;后者更不符合对应性的原则,应予排除。出于同样的原因,笔者还谨慎地避开了较大型的断裂(如断层、大型节理等),因为在其两侧一定范围内也可形成钾长石斑晶的固态流动定向构造。

(3)石英:通常呈集合体出现,因石英的压溶系数较小,所以它是一种对应力反应敏感的矿物,较易发生应变,同时也是一种较为理想的应变标志体,但作为一种矿物也存在与钾长石斑晶类似的情形,在

野外主要是根据石英或其集合体的形态进行判断:若石英集合体呈椭圆形或透镜状并呈定向性,则可以认为是侵位过程中岩浆塑性流动作用形成的,可以作为岩石的应变标志体;若石英颗粒呈明显的等轴状、六方双锥体,无变形痕迹,则认为是形体定向,是岩浆液态流动阶段形成的,不能作为岩石的应变标志体。

岩石有限应变测量就是对岩石内应变标志体进行形态和方位的测量,主要采用 Ramsay 的 R_f/ϕ 法^[1]进行应变标志体的测量,其工作程序和测量内容包括:

(1)露头的选择,露头上应发育三个互不平行的面,且每个面上应有达到测量精度要求的应变标志

体(一般 30~50 个)。

(2)原始测量数据内容,对每个测量面,应测量其产状、标志线的方位(侧伏向、侧伏角)应变标志体的长、短轴的长度、长轴与参考线的夹角、应变标志体的测量个数、应变标志体的类型、测量面积及其他有关构造标志等。

本次研究每个测量面一般测量 20~40 个应变标志体,全部研究工作共测量三维有限应变测量点 12 个,约 1000 个应变标志体。

2.2 原始测量数据的处理

首先采用 Rf/ϕ 法^[6]对二维应变测量数据进行计算机处理,得到应变椭圆轴率(R_s)及应变椭圆长轴与参考方向的夹角(F_I)等参数。在此基础上,用求椭球形状矩阵及解特征值的方法进行三维应变处理,最终得到所需要的应变主轴相对大小及方位、付林指数(k)、应变程度(r)、压缩率(Δv)、剪应变程度(γ_0)等应变参数^[2,6]。对二维和三维应变处理采用汤经武等^[7]和 Kutty^[18]编制的有关程序在计算机上处理完成。其中三维有限应变计算结果见表 1,主要平均应变参数见表 2。

2.3 岩体的应变分析

2.3.1 付林指数(k)

元宝山花岗岩体内共有三维应变测量点 12 个,其中 1、2、3、4、9、11 点为近平面型应变点^[20],由于包体的变形主要与岩体发育的韧性剪切带相关,而韧

性剪切带的运动方式主要为倾滑型的简单剪切,因此形成包体的应变形式以近平面型应变为主。5、8、10、12 点为压扁型应变点,上述应变点不是位于岩体的边界就是位于各个单元的接触界限处,其遭受的应力主要是晚期岩浆上侵时不断增大的横向压力,因此以压扁型应变为主。6、7 点为拉长型应变点;6、7 点位于岩体的中部吉羊单元内,其遭受的主要是岩浆上侵时的横向压力和和浮力(表 1,图 4)。

2.3.2 Nadai-Hossack 图解

Nadai-Hossack 图解^[17,20]与付林图解相似,也是表示岩石应变类型的图解(图 6),该图解用表示应变椭球体形状的罗德系数 ν 和表示应变程度的形变自然应变系数 ϵ_s 来表示岩石应变状态。其中:

$$\nu = (2\epsilon_2 - \epsilon_1 - \epsilon_3) / (\epsilon_1 - \epsilon_3)$$

$$\epsilon_s = \frac{\sqrt{3}}{2} \gamma_0$$

$$\text{而 } \gamma_0 = \frac{2}{3} \sqrt{(\epsilon_1 - \epsilon_2)^2 + (\epsilon_2 - \epsilon_3)^2 + (\epsilon_3 - \epsilon_1)^2}$$

式中 ν 、 ϵ_s 、 γ_0 、 ϵ_i ($i=1,2,3$)分别为罗德系数、自然应变系数、剪应变强度和长、中、短轴的自然应变。

根据三维有限应变测量结果,作岩体的 Nadai-Hossack 图解(图 6)。结果显示元宝山花岗岩体的投影点主要落在 0-0 线附近,而且元宝山花岗岩体的 ϵ_s 绝大多数投影点均落于 1 附近,只有 7、9、11 点的 ϵ_s 值较大,分别为 1.26、1.68 和 1.57,表明元宝山花岗岩体以平面型应变为主,岩体遭受到的应变强度只有在 7、9、11 点较大,这与野外调查一致。

从整体上看,元宝山花岗岩体应变点的罗德数变化不大(-0.33~0.46),岩体以平面型应变为主。自

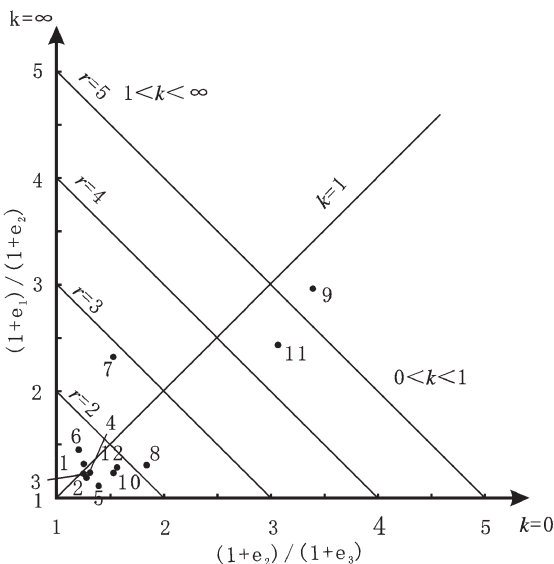


图 5 元宝山岩体付林图解($n=12$)

Fig.5 Flinn diagram of Yuanbaoshan granitic pluton($n=12$)

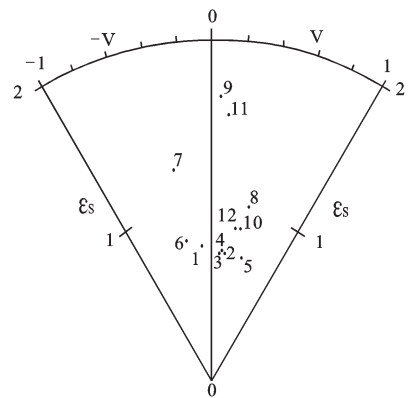


图 6 元宝山花岗岩体 Nadai-Hossack 图解($n=12$)

Fig.6 Nadai-Hossack diagram of Yuanbaoshan granitic pluton ($n=12$)

表 1 元宝山花岗岩体中电英岩包体主要应变参数
Table 1 Main strain parameters of tourmalite-quartz enclaves in Yuanbaoshan pluton

岩体 点号	I+ex			I+ey			I+ez			应变椭球			付林 指数 <i>k</i>	应变 程度 <i>r</i>	Lode (<i>v</i>)	自然应 变系数 ϵ_s	剪应变 强度 γ_0	X轴		Z轴	
	方位/ $^{\circ}$	相对 长度	方位/ $^{\circ}$	相对长度	方位/ $^{\circ}$	相对长度	平均直径	压缩 率/% ΔV	<i>Rd</i>	罗德 系数	平面 投影	平面 投影									
1	165 \angle 27	1.58	270 \angle 27	1.19	37 \angle 50	0.95	1.21	21	1.32	1.58	-0.13	0.79	0.41	1.41	0.61						
2	194 \angle 40	1.57	98 \angle 7	1.31	359 \angle 49	1	1.27	21	0.65	1.51	0.2	0.75	0.37	1.20	0.66						
3	149 \angle 45	1.53	25 \angle 30	1.26	275 \angle 31	0.97	1.23	21	0.76	1.51	0.13	0.75	0.37	1.08	0.83						
4	192 \angle 43	1.53	304 \angle 22	1.26	54 \angle 39	0.96	1.23	22	0.71	1.53	0.16	0.76	0.39	1.12	0.75						
5	194 \angle 45	1.54	291 \angle 7	1.37	28 \angle 44	0.99	1.28	22	0.32	1.50	0.46	0.74	0.37	1.09	0.71						
6	176 \angle 17	1.54	280 \angle 39	1.06	67 \angle 46	0.88	1.13	22	2.2	1.65	-0.33	0.83	0.46	1.47	0.61						
7	213 \angle 7	2.28	122 \angle 10	0.98	357 \angle 78	0.64	1.13	43	2.44	2.86	-0.33	1.26	1.06	2.26	0.13						
8	260 \angle 44	1.65	13 \angle 23	1.27	122 \angle 38	0.69	1.13	39	0.35	2.15	0.4	1.05	0.74	1.19	0.54						
9	233 \angle 22	9.84	132 \angle 25	3.33	0 \angle 55	0.98	3.18	69	0.82	5.34	0.06	1.68	1.88	9.12	0.56						
10	188 \angle 10	1.25	97 \angle 7	1	330 \angle 78	0.65	0.93	31	0.43	1.8	0.35	0.91	0.55	1.23	0.14						
11	268 \angle 24	7.49	359 \angle 3	3.08	97 \angle 66	1	2.84	65	0.69	4.52	0.12	1.57	1.65	6.84	0.41						
12	213 \angle 41	1.38	319 \angle 18	1.07	67 \angle 43	0.7	1.01	31	0.56	1.81	0.25	0.91	0.55	1.04	0.51						

元
宝
山
岩
体

表2 元宝山花岗岩体中电英岩包体主要平均应变参数

Table 2 Average strain parameters of tourmalite-quartz enclaves in Yuanbaoshan pluton

岩体	点数	k			γ		Δv		γ ₀	
		k<1	k=1	k>1	γ _{min} ~γ _{max}	$\bar{\gamma}$	Δv _{min} ~Δv _{max}	$\bar{\Delta v}$	γ _{0min} ~γ _{0max}	$\bar{\gamma}_0$
元宝山	12	10	0	2	1.5~5.34	2.31	21~69	33.92	0.37~1.88	0.75

然应变系数变化较大,为 0.74~1.68。

2.3.3 应变程度(r)

元宝山花岗岩体内 12 个测量点的应变程度变化范围较大 1.50~5.34,9 点的应变程度最大 5.34,11 点的应变程度次之,为 4.52,5 点的应变程度最小 1.50,表明应变程度的强弱与韧性剪切带发育强度相协调。岩体整体上北部的应变程度大于南部的应变程度。

2.3.4 压缩率(ΔV)

对 12 个岩体三维应变测量点的压缩量统计结果显示(表 1~2),其变化范围较大 21%~69%,其中 1 点~6 点的压缩率为 21%~22%,从统计结果(表 1)中还可以看出,岩体北西部的压缩率大于南东部的压缩率,这与岩体北西部韧性剪切带发育强度大于南东部相对应。中部的压缩率小于边部的,这与岩体侵位时中部所遭受的横向压力小于边部相对应。

3 应变型式

3.1 应变椭球平面型式图

应变型式是指一定区域范围内的应变图式,尽管国内外在理论上对岩石变形和应变的研究做了不少工作,但对应变型式的研究还存在许多尚待解决的问题,这方面能借鉴的实例较少^[9,21-24]。本文所采用的应变椭圆平面型式图是将应变椭球长、短轴即 X 轴和 Z 轴投影到水平面上绘制成椭圆(或圆),按长轴优势方位落到平面图的对应该位置上,形成应变椭球平面形式图(图 7)。结果显示:

在片麻理发育的北西部位,应变椭球长轴的展布方向与片麻理相协调;在岩体的边部且片麻理不发育的部位,应变椭球长轴的展布方向与岩体的边界线相协调。

3.2 应变椭球赤平型式图

采用将三维应变测量点的主应变轴赤平投影分布图(下半球投影)落到各测量点的相应位置上,得到元宝山花岗岩体赤平应变型式图(图 8)。结果显示:

对于位于岩体北西部的 9、10、11 点,其最小主

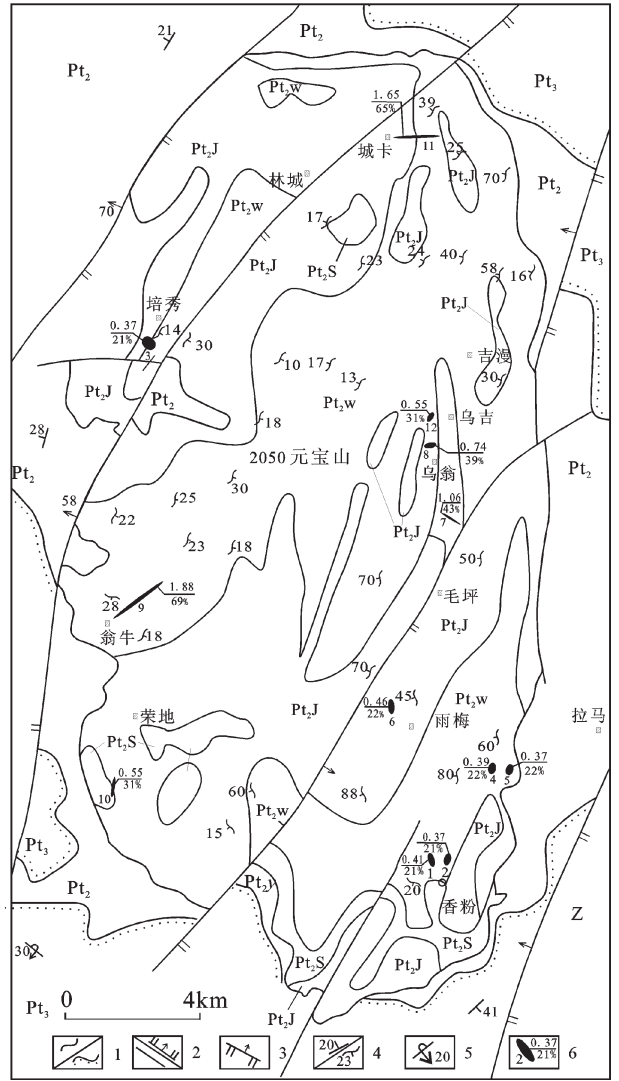


图7 元宝山岩体应变椭球平面型式图
图例 1~5 及代号同图 1;6—平面应变椭圆及点号,剪应变强度/压缩率

Fig.7 Strain pattern of Yuanbaoshan pluton
Legends 1 to 5 and symbols as for Fig. 1;6—Horizontal finite strain ellipse and serial number,intensity of shearing strain (γ₀)/compressibility(Δv)

应力轴(压应力轴)的倾角较陡,岩体北西部片麻理的倾角较缓,最小主应力轴倾角与片麻理面倾角互为余角相协调。

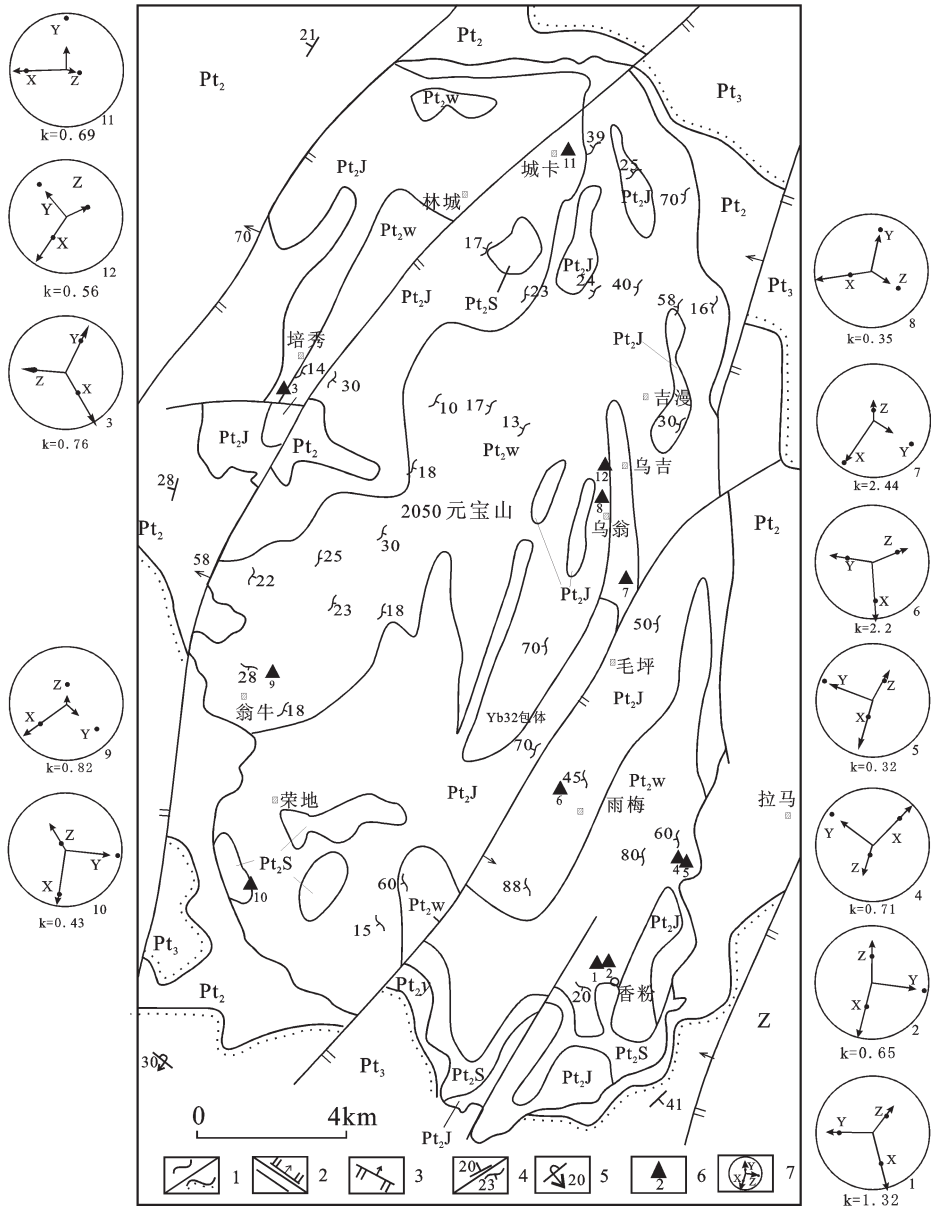


图 8 元宝山岩体应变椭球赤平型式图

图例 1~5 及代号同图 1;6-应变测量点及点号;7-应变主轴赤平投影图,其中:X:拉应力轴, Y:中间应力轴,Z:压缩应力轴,线段长短代表主应变轴的相对长度,箭头为倾向,圆点表示倾角

Fig.8 Map showing stereonets of principal strain axes of Yuanbaoshan pluton
Legends 1 to 5 and symbols as for Fig.1; 6-Locations of strain measurement and serial number; 7- Stereonets of principal strain axes: X:Tensional stress,Y:Intermediate stress,Z:Compressional stress,lengths representing relative principal axis lengths,arrow showing strike,circle point standing for dip

4 讨论与结论

笔者通过大量的野外调查,根据测量点片麻理(糜棱面理)的发育程度,将电英岩包体的变形原因分为两种:第一种,测量点片麻理发育,包体的变形与岩体发育的片麻理相关;第二种,测量点片麻理不发育,包体的变形与岩体的侵位相关。

(1)首先讨论与片麻理相关的变形机制,1、3、4、7、8、9、11点采样部位片麻理发育,包体的变形与片麻理密切相关(表3,图4-D)。

元宝山花岗岩体应变椭球体 X 主应变轴的倾伏向与糜棱面理 XY 面上的线理的倾伏向符合线性关系,相关系数为 0.9407,线性相关方程为 $y=0.8186x+37.183$ (图 9);但是应变椭球体 X 主应变轴

表 3 元宝山岩体应变测量点线理产状与 X 主应变轴方位比较
Table 3 Comparison between strain measuring point lineation altitude and X main strain axis direction of Yuanbaoshan pluton

测量点	片麻理产状/°	线理侧伏角/°	线理产状/°	X 轴方位/°	倾伏向差值/°	倾伏角差值/°
1	193∠20	68NE	160∠17	165∠27	5	10
3	130∠14	86SE	130∠14	149∠45	19	31
4	260∠63	54NE	200∠45	192∠43	8	2
7	295∠67	30SW	219∠27	213∠7	6	20
8	303∠73	54NE	245∠51	260∠44	15	7
9	190∠28	30NE	252∠14	233∠22	19	7
11	305∠39	71NE	284∠37	268∠24	16	13

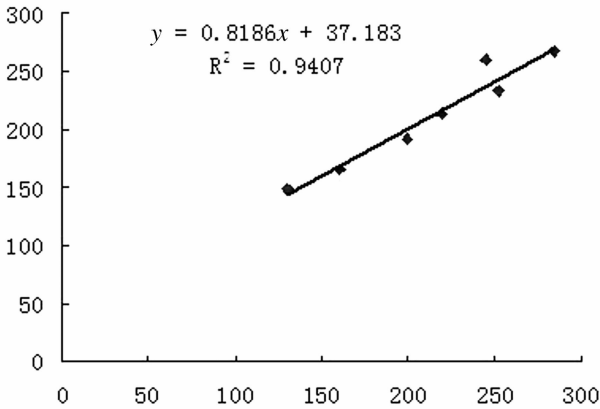


图 9 元宝山花岗岩体线理倾伏向与 X 主应变轴倾伏向相关性图

Fig.9 Correlation between pitching tend of lineation and X main strain axis of Yuanbaoshan granitic pluton

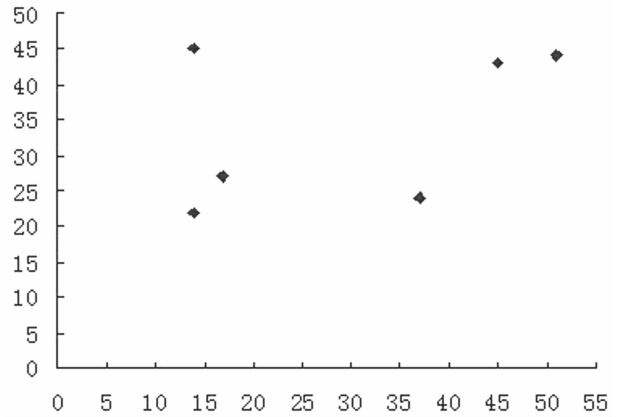


图 10 元宝山花岗岩体线理倾伏角与 X 主应变轴倾伏角相关性图

Fig.10 Correlation between pitching angle of lineation and X main strain axis of Yuanbaoshan granitic pluton

的倾伏角与糜棱面理 XY 面上线理的倾伏角关系比较复杂(图 10)。分析其原因是因为元宝山花岗岩体的构造样式比较复杂^[25],其片麻状构造有两种成因机制,一种认为是岩浆在逐渐冷凝过程中遭受同构造压力作用而逐渐形成的,与雪峰运动的构造应力场有关,它所示方向在一定程度上反映了原来岩浆活动的方向;另一种认为在元宝山花岗岩体原有片麻理的基础上叠加了一大型韧性剪切带,与加里东晚造山期-后造山阶段的应力场有关。

(2)2、5、6、10、12 点采样部位片麻理不发育,应变标志体的变形与岩体的侵位相关。2、10 和 12 点位于单元的界限处,2 点为近平面型应变,10 和 12 点为压扁型应变;6 点位于岩体的中部,为拉长型应变;5 点位于岩体的西侧边缘,为压扁型应变。形成岩体中部以拉长型应变为主,边部及各单元界限处

以压扁型应变为主的应变格局。主要由于在各单元多次上侵就位的过程中,早期单元内部主要遭受的是由晚期单元上侵而形成的横向压力,横向压力来自于岩浆上侵时的膨胀作用,随着岩浆不断上侵其横向膨胀作用不断增强,因此造成岩体中部的压缩率小于边部的压缩率。而岩体和各单元的边部则伴随着平行于接触界面的简单剪切作用,从而造成上述应变格局。

参考文献 (References):

[1] Ramsay J G, 刘瑞珣, 常志忠. 现代构造地质学方法[M]. 北京:地质出版社, 1983:217-239.
Ramsay J G. translated by Liu Ruixun, Chang Zhizhong. Modern Structural Geology Method [M]. Beijing:Geological Publishing House, 1983:217-239(in Chinese).
[2] 郑亚东, 常志忠. 岩石有限应变测量及韧性剪切带 [M]. 北京:地

- 质出版社, 1985:89-102.
- Zheng Yadong, Chang Zhizhong. Finite Strain Measurement and Ductile Shear Zones [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985:89-102(in Chinese).
- [3] Pitcher W S. 花岗岩和花岗岩四十年 [J]. 地质论坛, 1987, 76(2): 51-79.
- Pitcher W S. Granites and yet more granites forty years on [J]. Geology Forum, 1987, 76(2):51-79.
- [4] Vernon R H, Johnson S E, Melis E A. 墨西哥加利福尼亚半岛圣何塞石英闪长岩体边缘变形的显微结构与侵位的关系 [J]. 构造地质学杂志, 2004, 26:1876-1884.
- Vernon R H, Johnson S E, Melis E A. Emplacement-related microstructure in the margin of a deformed tonalite pluton: the San José pluton, Baja California, México [J]. Journal of structural Geology, 2004, 26:1876-1884.
- [5] 王涛. 花岗岩研究与大陆动力学 [J]. 地学前缘, 2007, (增刊):137-146.
- Wang Tao. Granite research and continent dynamics [J]. Earth Science Frontiers, 2007, (Supp.):137-146(in Chinese with English abstract).
- [6] 兰塞姆 J G. 岩石的褶皱和断裂 [M]. 纽约: 麦格劳希耳出版集团, 1967:132-235.
- Ramsay J G. Folding and Fracturing of Rocks [J]. New York: McGraw-hill, 1967:132-235.
- [7] 王涛, 李伍平. 中国中部秦岭造山带灰池子花岗岩体多种侵位机制的评价 [J]. 构造地质学杂志, 2000, 22:505-518.
- Wang Tao, Li Wuping. Evaluation of multiple emplacement mechanisms: the Huichizi granite pluton Qinling orogenic belt central China [J]. Journal of Structural Geology, 2000, 22:505-518 (in Chinese with English abstract).
- [8] 邓继新, 刘瑞珣, 史谓, 等. 广西圆石山花岗岩体构造与侵位机制初探 [J]. 北京大学学报(自然科学版)2002, 38(2):260-267.
- Deng Jixin, Liu Ruishi, Shi Ge, et al. A research for emplacement mechanism and structure of Yuanshishan granitoid [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (Natural Science) 2002, 38(2):260-267(in Chinese with English abstract).
- [9] 冯佐海, 梁金城, 王春曾, 等. 南岭中生代姑婆山-花山花岗岩基及其热接触变质围岩的应变特征和应变分析 [J]. 地质学报, 2009, 83(4):528-541.
- Feng Zuohai, Liang Jincheng, Wang Chunzeng, et al. Mesozoic Guposhan-Huashan granitic batholith in Western Nanling and strain characteristics of its thermal contact metaporphic country rocks [J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83 (4):528-541 (in Chinese with English abstract).
- [10] 李献华. 广西北部新元古代花岗岩锆石 U-Pb 年代学及其构造意义 [J]. 地球化学, 1999, 28(1):1-9.
- Li Xianhua. U-Pb zircon ages of granites from northern Guangxi and their tectonic significance [J]. Geochimica. 1999, 28(1):1-9(in Chinese with English abstract).
- [11] 广西壮族自治区区域地质研究院. 广西壮族自治区 1:50 万数字地质图说明书 [M]. 2008:1-137.
- Guangxi Zhuang Autonomous Region Regional Geological Research Institute. The 1:500000 Digital Geology Map Specification of Guangxi Zhuang Autonomous Region [M]. 2008:1-137.
- [12] 广西壮族自治区第七地质队区调分队. 1:5 万滚贝、大平东、三防、为才东幅区域地质调查报告 [R]. 1995:1-211
- Regional Geological Survey Branch Team of The Seventh Geological Team of Guangxi Zhuang Autonomous Region 1:50 000 GunBei, DaPingdong, SanFang, WeiCai Regional Geological Survey Report. [R]. 1995:1-211.
- [13] 广西壮族自治区地质局. 罗城幅 1:20 万区域地质测量报告书 [R]. 1968:1-108.
- Guangxi Bureau of Geology and Mineral Prospecting and Exploration. 1:200000 LuoCheng Regional Geological Survey Report. [R]. 1968:1-108.
- [14] 广西壮族自治区地质局. 融安幅 1:20 万区域地质测量报告书 [R]. 1967:1-72.
- Guangxi Bureau of Geology and Mineral Prospecting and Exploration. 1:200000 Rong'an Regional Geological Survey Report. [R]. 1967:1-72.
- [15] 汪绍年. 广西及其邻区片麻状花岗岩岩石成因初议 [J]. 广西地质, 1988, 1(1):55-63.
- Wang Shaonian. Preliminary discussion on the origin of the gneissic granites in Guangxi and neighbouring Regions [J]. Guangxi Geology, 1988, 1(1):55-63(in Chinese with English abstract).
- [16] 张桂林. 扬子陆块南缘(桂北地区)前泥盆纪构造演化的运动学和动力学研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2004: 40-46.
- Zhang Guilin. Kinematics and Dynamics of Pre-Devonian Tectonic Evolution at South Margin of Yangze Block in North Guangxi [D]. Center South University, 2004:40-46 (in Chinese with English abstract).
- [17] 汤经武, 杨学敏. 微型计算机在地质构造解析中的应用 [M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1989:117-149.
- Tang Jingwu, Yang Xuemin. The Application of Micro Computer in the Geological Structural Analysis [M]. WuHan: China University of Geosciences Press, 1989:117-149(in Chinese).
- [18] Kutty T S, Joy S. Turboc 系列软件中 Rf/φ 图解法的二维应变分析 [J]. 计算机和地质学, 1994, 20(2):247-263.
- Kutty T S, Joy S. RFPHI—a program in turboc for the Rf/φ diagram method of 2D strain analysis [J]. Computers & Geosciences, 1994, 20(2):247-263.
- [19] 邵济安. 京西灰峪向斜应变型式的初步分析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 1985, (4):92-95.
- Shao Ji'an. A preliminary analysis of the strain pattern in Huiyu syncline, West Suburb of Beijing [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (Natural Science), 1985 (4):92-95 (in Chinese with English abstract).
- [20] Hossack J R. 挪威南部 Bygdin 地区砾石变形和贯入 [J]. 构造物理学, 1968, 5:315-339.
- Hossack J R. Pebble deformation and thrusting in the Bygdin area

- (Southern Norway) [J]. *Tectonophysics*. 1968, 5:315-339.
- [21] 肖庆辉, 周玉泉, 李晓波, 等. 国外花岗岩体构造研究的新进展 [C]//肖庆辉. 国外花岗岩体构造研究.北京:地质矿产部情报研究所, 1988:1-25.
- Xiao Qinghui, Zhou Yuquan, Li Xiaobo et al. New development in research of foreign granite structure [C]//Xiao Qinghui. Research on Structure of Foreign Granite. Beijing:Ministry of Geology and Mineral Resources Intelligence Research Institute. 1988:1-25(in Chinese).
- [22] 袁奎荣. 姑婆山里松花岗岩体原始形态的恢复及其形成机制的探讨[J]. 桂林冶金地质学院学报, 1981, 1(1):1-13.
- Yuan Kuirong. Discussion on Guposhan Lisong granite primitive morphological and formation mechanism [J]. *Acta Scientiarum Metallurgy Geological Institute*, 1981, 1(1):1-13(in Chinese with English abstract).
- [23] 冯佐海. 广西姑婆山-花山花岗岩体侵位过程及构造解析 [D]. 长沙:中南大学地学与环境工程学院, 2003:50-60.
- Feng Zuohai. Emplacement Process and Structural Analysis of Guposhan -Huashan Granitic Pluton, Guangxi [D]. Changsha: School Geology Science and Environment Engineering of Center South University, 2003:56-60(in Chinese with English abstract).
- [24] 郭俊刚. 南岭西段永和-太保花岗岩的构造环境及侵位机制研究 [D]. 桂林:桂林工学院, 2007:38-60.
- Guo Jungang. The Research of Tectonic Environment and Emplacement Mechanism of Yonghe -Taibao Granitic Pluton, West Nanling[D]. Guilin:Guilin University of Techonology, 2007: 38-60(in Chinese with English abstract).
- [25] 成永生. 九万大山地区断裂构造分形特征及其地质意义[J]. 中国地质, 2010, 37(1):127-132.
- Cheng Yongsheng. Fractal characteristics of fractures in Juiwandashan area and their geological significance [J]. *Geology in China*, 2010, 37(1):127-132(in Chinese with English abstract).

Strain measurement and analysis of tourmalite-quartz enclaves in Yuanbaoshan pluton, northern Guangxi

ZHOU Shou-yu^{1,2}, ZHANG Gui-lin², YU Kai-peng³, YIN Cheng⁴, ZHENG Xiao-dong⁴

(1. *Guilin University of Technology, Guilin 541004, Guangxi, China*; 2. *China Nonferrous Metal (Guilin) Geology and Mining Co., Ltd., Guilin 541004, Guangxi, China*; 3. *Guangdong Nonferrous Metals Engineering Investigation Design Institute, Guozhou 510080, Guangdong, China*; 4. *No. 271 Geological Party of Guangxi, Lingui 541100, Guangxi, China*)

Abstract: On the basis of the achievements obtained in geological systemic investigation and analyzing geological characteristics, the authors mainly studied the strain characteristics, genesis and the age of deformation of tourmalite-quartz enclaves. Three-dimensional finite strain measurement and strain analysis of tourmalite-quartz enclaves in Yuanbaoshan pluton were carried out successively. The results show that the three strain patterns of tourmalite-quartz enclaves are plane strain ($K=1$), flattening strain ($0 < K < 1$) and contraction strain ($1 < K < \infty$). The pattern of strain of tourmalite-quartz enclaves in Yuanbaoshan pluton is mainly plane strain, with minor flattening strain and contraction strain.

Key words: strain measurement; strain analysis; tourmalite-quartz enclaves; granite; Yuanbaoshan pluton; Guibei

About the first author: ZHOU Shou-yu, male, born in 1981, master, mainly engages in geological exploration; E-mail: shouyuzhou@163.com.