

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

浙东新生代玄武岩柱状节理面旋回条纹 (cyclic stria) 的发现及其意义

徐松年

(杭州大学地理系)

玄武岩柱状节理面旋回条纹¹⁾是玄武岩复杂的原生破裂变形的岩石记录。它是随着冷却玄武岩体中周期性应力的积聚与解除,在逐渐增长着的裂隙的前进期形成的一种原生构造。美国学者 Ryan和 Sammis(1978)曾根据保留在夏威夷 Boiling Pots 等地玄武岩柱状节理面上的这种天然条纹与由 Mc Millan 和 Pelloux (1967)、Forsyth和Ryder (1960)以及 Feltner (1967)等在实验中产生的条纹之间的形态相似性,探讨了冷却玄武岩热应力负荷周期与条纹形成之间的对应关系和节理柱柱面宽度与条纹宽度之间的相关性。同时,他们还应用 Sommer (1969)断裂力学模拟实验的结果,提出了玄武岩原生裂隙形成机制的新模式,从而修正了传统冷却收缩说关于柱状节理单一引张成因的观点^[1]。在我国,至今还未见有关这种玄武岩原生构造形迹的公开报导。

近年来,笔者曾对玄武岩柱状节理的形态特征、分类及其形成机理等问题做过若干研究^[2-5],发现在浙东一些典型玄武岩柱状节理面上,也保留有清晰、完好的旋回条纹。本文拟就浙东玄武岩柱状节理面旋回条纹的形态特征及其形成机理、旋回条纹的野外鉴定及其地质意义等问题作一初步研究报导。

一、旋回条纹的形态特征

玄武岩原生裂隙的形成是一个不连续过程,常具有间歇性停顿的特点,它的延伸具有一定的方向性。一个垂直于冷凝基面、自下而上延伸的裂隙,一旦进入温度较高、较柔性的

物质中(接近未固结的熔融岩体界面),该裂隙暂时停止生长,于是就在垂直于柱轴的方向上形成一条粗糙带(rough zone)。以后随着温度降低,岩浆固结,该裂隙继续往上延伸。当再次进入温度较高、较柔性的熔浆中,裂隙再次停止生长,于是又产生一条粗糙带。两条粗糙带之间的裂隙面即为平坦带(Smooth zone)。保留在柱面上这种垂直于柱轴定向、呈水平状互相间隔排列的水平条带,称为条纹。由于粗糙带与平坦带顺着下部柱列裂隙的延伸方向,自下而上地、有规律地呈旋回性重复出现,且有一定的序列,因此它们又被称为旋回条纹。

一个完整的条纹由一条平坦带和一条粗糙带组成。前者宽度较大,后者宽度较小。较窄的粗糙带在柱面上表现为一条向上突起的脊,高出相邻平坦带约1—5mm,它是在裂隙延伸处于暂时停止期,裂隙尖端变形的产物。在较宽的平坦带上,有时包含着一系列呈微突起的斜向线状构造(lineations),它是裂隙面曾经

1) 在文献[1]中, Ryan和Sammis在分析玄武岩柱状节理面条纹的形态特征和玄武岩下部柱列裂隙面随时间推移而呈现的旋回性发展特征时,只提出与应用“条纹”(stria)和“旋回裂隙”(cyclic fracture)这两个术语,没有应用“旋回条纹”这一术语。笔者考虑到Ryan和Sammis对玄武岩原生纵裂隙旋回性发展特征的分析,主要是建立在裂隙面条纹平坦带与条纹粗糙带的间隔排列与旋回性重复这一构造形迹的鉴定基础之上,因此,为了把这种为玄武岩所特有的条纹与其他性质的条纹(例如断层擦痕)区别开来,在本文写作中,笔者提出了“旋回条纹”这一术语。该构造形迹,英语可译成“Cyclic stria”,以与“Cyclic fracture”相对应。

发生过非平面剪切变形所保留下来的构造形迹 (图版, 照片1—7)。

我们曾对浙东宁海县的毛屿山、上埠头、龙尾山村、茶院北和茶院西南以及新昌县下董

等地的新生代玄武岩柱状节理面旋回条纹做过比较系统的野外测量与鉴定。各地柱状节理面旋回条纹形态特征的基本数据 (表1)。

一般说来, 旋回条纹垂直于柱轴定向, 呈

表 1 浙东若干典型玄武岩柱状节理面旋回条纹的形态特征比较

出露地点		含条纹节理面 在柱状剖面中 所处的位置	柱面宽度 (cm)	出露条纹 总宽度 (cm)	单个条纹 宽 度 (cm)	其 中		条纹比率*	条纹频率**
						平坦带宽度 (cm)	粗糙带宽度 (cm)		
宁 海 县	毛 屿 山	下部柱列	20	23	1.10	1	0.10	0.10	21
	下 埠 头	下部柱列	40	31	0.70	0.50	0.20	0.40	44
	龙 尾 村	下部柱列	60	50	2.20	2	0.20	0.10	23
	茶 院 北	下部柱列	60	100	10	8	2	0.25	10
	茶院西南	下部柱列	70	100	8	7	1	0.14	12.50
新昌县下董下部		下部柱列	100	250	3	2.50	0.50	0.20	83

* 在条纹节理面上, 粗糙带宽度与平坦条宽度之比。
* 一定宽度单个条纹在柱面上的计算数目。

水平状排列。但有时由于在柱面两侧, 裂隙的延伸速度不一, 使条纹呈倾斜状排列 (图1, 图版, 照片 2)。Ryan 和 Sammis 在新泽西州 First Watchung 玄武岩柱状节理面上, 也发现过类似的实例^[1]。

二、浙东旋回条纹剖面与美国夏威夷 Boiling Pots 等条纹剖面的对比

1. 关于柱面宽度与条纹宽度的相关性

Ryan 和 Sammis 对夏威夷 Boiling Pots 等三个地区不同地段玄武岩下部柱列裂隙面的条纹宽度与柱面宽度之间的关系做了分析 (图2), 认为两者之间存在着正相关, 凡柱面宽度大, 则柱面上发育的条纹宽度就大; 反之, 就小。三个地区中, 以夏威夷古 Makaopuhi 熔岩湖柱列剖面中的柱面宽度为最大, 相应地, 该地区条纹宽度也为最大; 新泽西州 First Watchung 次之; 夏威夷 Boiling Pots 最小。但是, Ryan 和 Sammis 并没有从理论上阐明这些相关性^[1]。

根据我们对浙东宁海县茶院玄武岩流各地段柱状节理面条纹宽度与柱面宽度的比较, 发现实际情况并非如此。如图2所示, 浙东茶院玄武岩流各地段柱面宽度小于 Makaopuhi 熔岩湖和 First Watchung 玄武岩柱面宽度, 大于 Boiling Pots 玄武岩柱面宽度, 但该岩流各地段柱面出露的条纹总宽度不仅大于夏威夷 Boiling Pots, 而且还大于 Makaopuhi 熔岩湖和 First Watchung 玄武岩柱面上出露的条纹宽

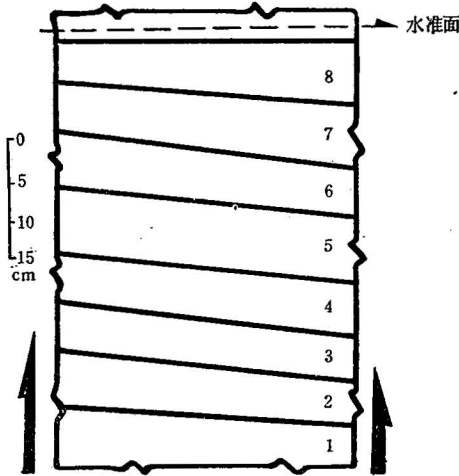


图 1 浙江宁海茶院西南玄武岩下部柱列节理面 (局部)。其上发育 8 个完整的条纹。平坦带上未见裂隙孑的发育。柱面左侧裂隙延伸速度大于右侧, 条纹呈倾斜状排列。至第 8 旋回处, 柱面两侧裂隙的延伸速度趋于均等, 条纹才呈水平状排列

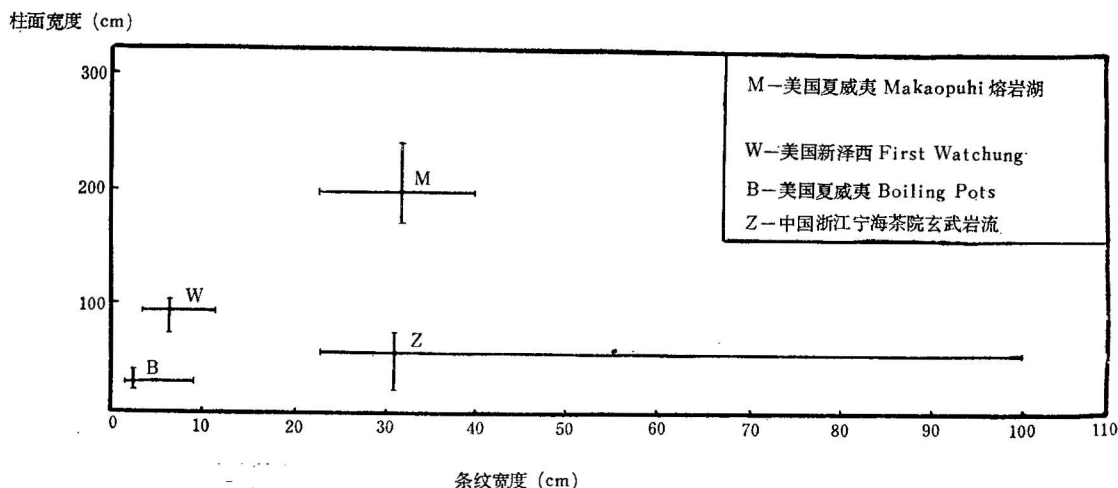


图 2 玄武岩下部柱列柱面宽度与条纹宽度比较, 线条代表各地段观察到的宽度值的总的变化范围

(据Ryan和Sammis补充)

度。此外, 从图 2 中, 还可以看出浙东茶院玄武岩流各地段柱面条纹总宽度的变化范围远较美国三个地区为大, 而柱面宽度的变化范围, 相对来说则较小。因此, Ryan和Sammis关于条纹宽度与柱面宽度之间存在着正相关的结论, 还有待今后收集更多的野外实际资料予以证实。

2. 关于条纹宽度与条纹频率 (Stria frequency) 的比较

条纹频率是指一定宽度单个条纹 (Single stria) 在柱面上的计算数目。条纹频率大小反映了裂隙在延伸过程中发生间歇性停顿的频繁程度, 它对分析玄武岩复杂原生破裂变形在纵向上随着时间推移而呈现的旋回性变化特征有一定意义。一个地段节理面条纹频率大小不仅决定于出露的条纹总宽度的大小, 而且还与单个条纹 (包括一个平坦带和一个粗糙带) 的宽度大小有关。如图 3 所示, 浙东宁海茶院两个剖面出露的条纹总宽度为 100cm 左右, 单个条纹宽度较大, 为 8—10cm, 条纹频率为 10—12.5; 而下埠头剖面出露的条纹总宽度虽然仅为 31cm, 但是由于单个条纹宽度远比茶院剖面要小, 仅为 0.70cm, 因此, 它的频率反而高达 44。总的说来, 浙东柱状节理面条纹频率比美国三个地区要大, 这说明浙东玄武岩原

生裂隙在变形过程中出现间歇性停顿的频繁程度较美国三个地区大。

3. 关于条纹剖面特征分析与条纹比率 (stria ratio) 计算

条纹比率指在含条纹的节理面上, 粗糙带宽度与平坦带宽度之比。Ryan和Sammis曾对 First Watchung和Boiling Pots 两地玄武岩条纹剖面的形态特征及其分类做过分析、比较 (图 4)。

Boiling Pots剖面粗糙带和平坦带的宽度均较小, 二者之比在 0.16 (旋回 No. 4) 到 0.56 (旋回 No. 7) 之间, 平均比率为 0.31。在 First Watchung条纹剖面 (旋回 No. 2、No. 3 和 No. 4) 中, 可以看到类似阶梯的凹槽 (Steplike recessions) 或“壁阶” (offsets) 的发育。该剖面粗糙带和平坦带宽度虽然分别较 Boiling Pots剖面为大, 但条纹比率的变化范围在 0.17 (旋回 No. 2) 到 0.49 (旋回 No. 5) 之间, 平均比率为 0.31。这说明尽管两个条纹剖面的形态各异, 粗糙带和平坦带的宽度大小也各不相同, 但是它们的条纹比率基本相同, 即粗糙带宽度与平坦带宽度大致保持在 1:3 比例关系。浙东各地段已发现的条纹剖面中, 均未见“壁阶”的发育, 因此我们把浙东条纹剖面的形态类型归属为“Boiling Pots”型, 而不属“First Wa-

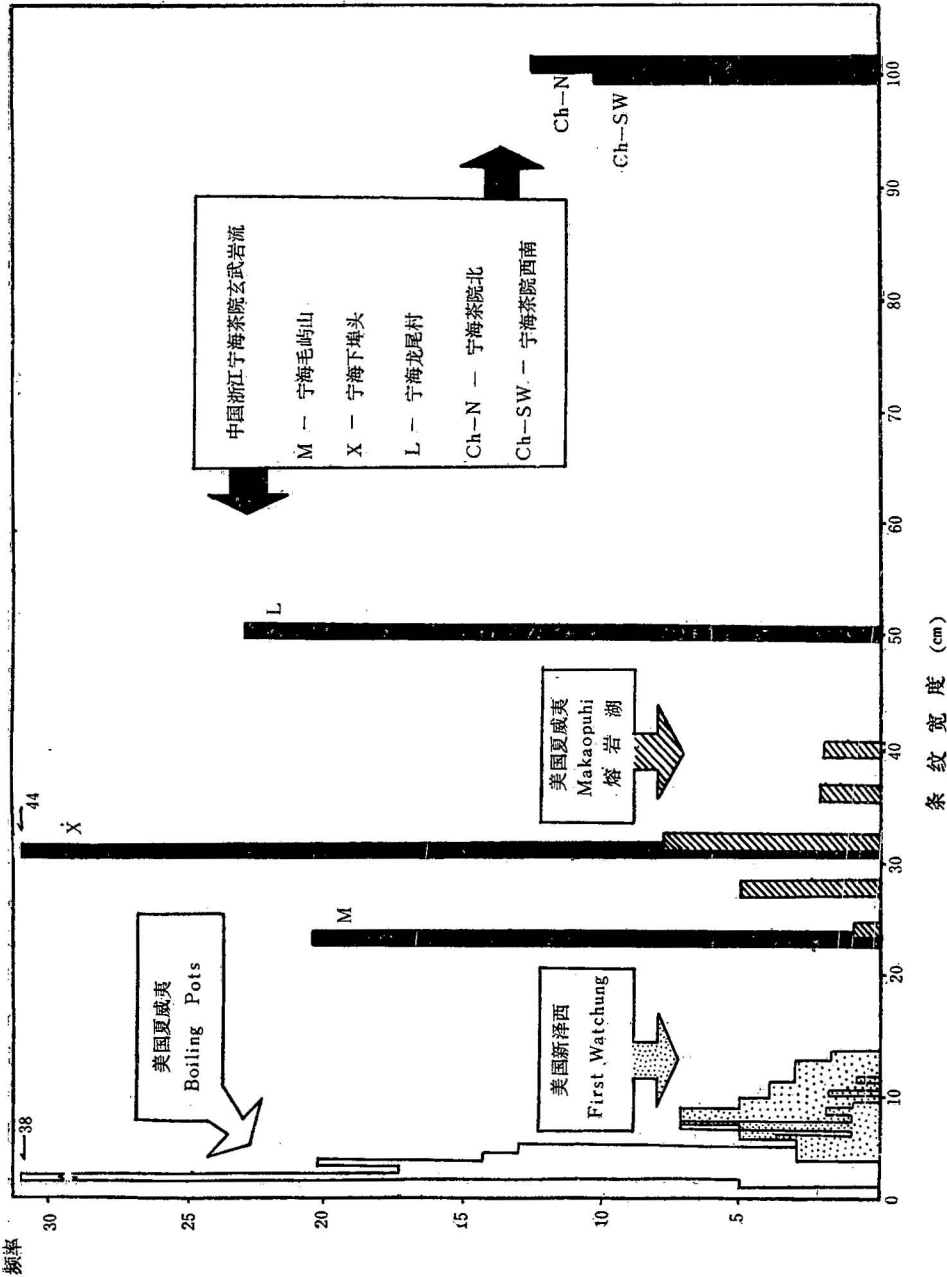


图 3 玄武岩柱状节理面条纹宽度与条纹频率比较
(据Ryam和Sammis补充)

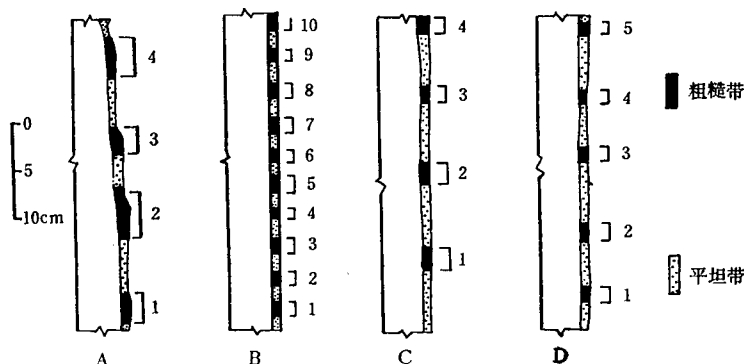


图4 玄武岩下部柱列条纹剖面比较

A—美国新泽西州First Watchung玄武岩；B—美国夏威夷州Boiling Pots玄武岩；C—中国浙江省宁海县茶院北玄武岩；D—中国浙江省宁海县茶院西南玄武岩

tchung”型。最大的条纹比率为0.40,最小为0.10,平均比率为0.25,它们较美国三个地区条纹剖面比率要小,即粗糙带与平坦带的宽度大致保持在1:4的比例关系(图4,表1)。

三、旋回条纹的形成机理

要阐明旋回条纹的形成机理,关键在于对条纹平坦带结构特征的分析及其力学性质的鉴定。

1. 浙东玄武岩柱状节理面旋回条纹平坦带“裂隙矛”(fracture lances)的结构特征及其力学性质的鉴定

Ryan 和 Sammis 在夏威夷 Boiling Pots 玄武岩下部柱列裂隙面条纹平坦带上,发现一系列微突起的斜向线状构造(lineations),从一个粗糙带延伸到另一个粗糙带,斜向切割平坦带裂隙面,其结构与呈脊状突起的粗糙带结构明显有别。这种线状构造是由一系列按一定顺序排列与粗糙带呈一定交角的微薄的板(plates)或片(flakes)组成。这些板、片的棱在柱面上起伏约1.0—3.0mm。棱与棱的间隔距离是不均一的,约在5.0—25mm之间^[1]。Sommer (1969)曾通过断裂力学模拟试验,在实验室中产生了这种破裂板(fracture plates)或破裂片(fracture flakes),因其形状类似于中世纪的矛,故形象地称之为“裂隙矛”(fracture lances)^[6]。Ryan 在以后的研究中引用

了“裂隙矛”这个术语^[1]。

我们对浙东宁海茶院玄武岩流各地段下部柱列裂隙面进行了仔细的野外测量与鉴定,发现在一部分裂隙面条纹平坦带上也明显地存在着“裂隙矛”。如图5,图版照片5,6和表2,3所示,在茶院北下部柱列的两个节理面(局部)条纹平坦带上,分别发育斜向的裂隙矛。图5—A表示在柱状节理面上,发育着6个完整的水平条纹。当裂隙自下而上延伸时,各段裂隙面平坦带从序列1至6,分别以粗糙带为间隔,按一定顺序作顺时针→顺时针→逆时针→逆时针→顺时针→顺时针扭转;相应地,各段裂隙面分别按一定顺序向右→右→左→左→右→右倾斜。这样,在各段平坦带上就形成了与条纹粗糙带成一定夹角的裂隙矛。经测量,该夹角在45°—57°之间(表2)。图5—B表示在柱状节理面也发育着6个完整的水平条纹。当裂隙自下而上延伸时,各段裂隙面平坦带从序列1至6,分别以粗糙带为间隔,按一定顺序作顺时针→逆时针→逆时针→逆时针→顺时针→顺时针扭转;相应地,各段裂隙面分别按一定顺序向右→左→左→左→右→右倾斜。这样,在各段平坦带上就形成了与条纹粗糙带成一定夹角的裂隙矛。经测量该夹角在40°—68°之夷间(表3)。Ryan 和 Sammis 所测得的夏威夷Boiling Pots玄武岩柱状节理面条纹与裂隙矛之间的夹角为42°—57°之间,一般为50°^[1],这个数值与我们测得的数值基本一致。

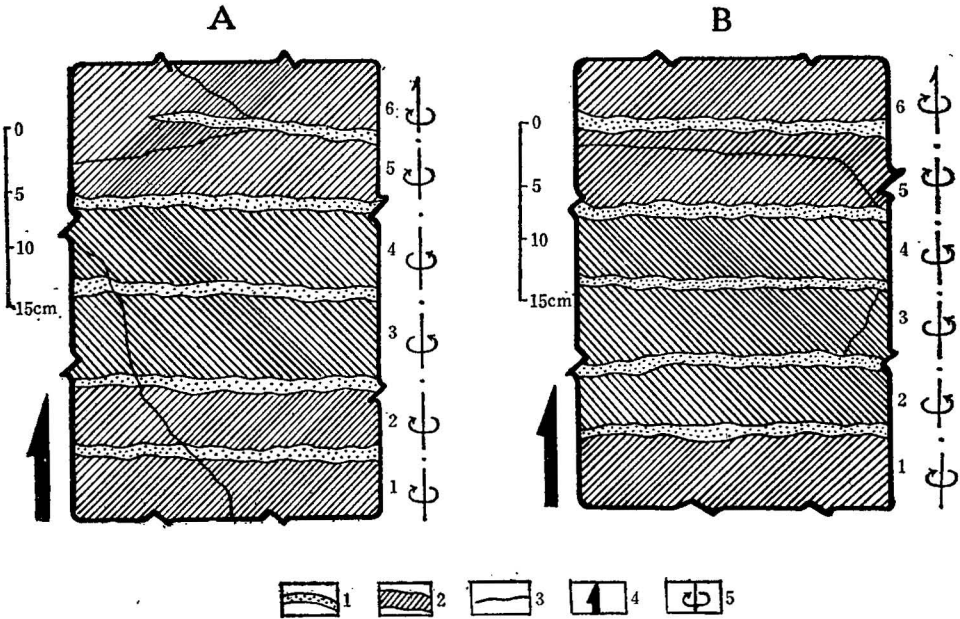


图 5 浙江宁海茶院北玄武岩下部柱列局部节理面上发育的旋回条纹与裂隙带。在 A、B 节理面上可以分别看到 6 个完整的条纹。注意两个节理面上裂隙带与各段平坦带裂隙面扭动特征的差异性

1—条纹粗糙带；2—条纹平坦带，其上发育裂隙带；3—后期构造裂隙；4—裂隙的延伸方向；5—裂隙面的扭转方向（顺时针或逆时针）

注：平坦带上的斜线条仅表示裂隙带的定向（ ϕ 角可以实例），但不表示裂隙带的实际形状。裂隙带的形状请看照片 5、6

表 2 浙江宁海茶院北玄武岩柱状节理面 A 旋回条纹与裂隙带的产状及其成因分析

含条纹节理面 在柱列剖面中 所处的部位	裂隙延伸 前进方向	旋回条纹 的序列编号	裂隙带的 倾斜方向	ϕ	裂隙面 旋转方向	柱体扭转的 相对方向	裂隙变形类型
下 部 柱 列	上 ↓ 下	6	右	57°	CW	CW	I + III
		5	右	52°	CW	CW	I + III
		4	左	50°	CCW	CCW	I + III
		3	左	48°	CCW	CCW	I + III
		2	右	50°	CW	CW	I + III
		1	右	45°	CW	CW	I + III

CW—顺时针；CCW—逆时针； ϕ —条纹与裂隙带之间的夹角；I—一张裂变形；III—非平面的剪切变形

条纹平坦带上存在着裂隙带这一事实表明，在玄武岩原生纵裂隙延伸、发展过程中，裂隙面变形方式，除了主要表现为引张变形外，还包含着非平面的剪切（扭转）变形。裂隙带正是这种复杂变形的产物。

2. Ryan 和 Sammis 关于柱状节理面裂隙带形成的力学模式

Ryan 和 Sammis 认为弹性固体的裂隙扩展 (crack extension) 和裂隙尖端变形 (crack-tip deformation) 总是受两个对应裂隙面的相对运动的方向所支配的。已被确认的三种类型裂隙面的相对运动和相应的三种变形类型是：第 I 类变形，两个相邻接的裂隙面在垂直于柱轴方向上直接分离，即是属于单纯引张型

表 3 浙江宁海茶院北玄武岩柱状节理面(A) 旋回条纹与裂隙矛的产状及其成因分析

含条纹节理面 在柱系剖面中 所处的部位	裂隙延伸 前进方向	旋回条纹 的 顺 序	裂隙矛的 倾斜方向	φ	裂隙面 旋转方向	柱体扭转的 相对方向	裂隙变形类型
下 部 柱 列	上 ↑ 下	6	右	68°	CW	CW	I + III
		5	右	63°	CW	CW	I + III
		4	左	50°	CCW	CCW	I + III
		3	左	40°	CCW	CCW	I + III
		2	左	45°	CCW	CCW	I + III
		1	右	60°	CW	CW	I + III

CW—顺时针; CCW—逆时针; φ —一条纹与裂隙矛之间夹角; I—一张裂变形; III—非平面的剪切变形

的裂开运动, 此张应力由平行于冷凝面方向上的收缩作用所诱导; 第II类变形, 柱体裂隙面内部一个面相对于另一个相邻接的裂隙面的滑动, 又称为面内剪切 (in-plane shear), 它类似于晶棱位错 (crystallographic edge dislocation); 第III类变形, 非平面的剪切变形 (antiplane shear), 该裂隙面的运动方向类似于晶体螺旋位错 (crystallographic screw dislocation)。一般说来, 玄武岩原生裂隙变形以第I类型为主, 当第I与第III类型变形相结合时, 就导致裂隙变形的复杂化。Ryan和Sammis认为玄武岩裂隙面旋回条纹和裂隙矛的产生就是第I和第III两种变形结合的结果^[1]。

为了阐明玄武岩原生裂隙这种复杂变形的形成机理, Ryan和Sammis引用了Lawn和Wilshaw (1975)的观点^[7], 图6表示一个沿着Z轴自左向右延伸的裂隙面前缘的二种转动方式。图中自左至右延伸的裂隙面相当于下部柱列中一个向上延伸的裂隙面¹⁾。图6—A表示裂隙面环绕X轴转动, 横过裂隙面宽, 裂隙面是连续的, 因而 a 和 δa 是连接的。图6—B表示裂隙面环绕Z轴转动, 横过裂隙面宽, 裂隙面因被扭断而不连续, a 和 δa 是不连接的。图6—C表示裂隙面也是环绕Z轴转动, 但裂隙面前缘不是连续调整 (continuous adjustment), 而是通过分段扭转作分段调整 (piecewise adjustment)。横过裂隙面宽, 裂隙面被分段扭断, 这样就形成了裂隙矛^[1]。

以上分析说明, 只有在第二种转动方式的

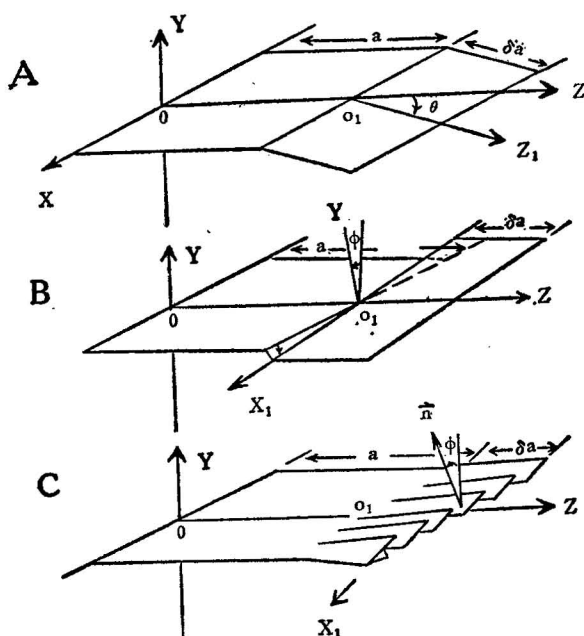


图 6 裂隙沿着 z 轴自左至右向前延伸时, 裂隙面前缘的二种转动方式

(据Ryan & Sammis根据Lawn & Wilshaw修改)

A—裂隙面环绕 x 轴转动, 横过裂隙面, 裂隙面到处是连续的; B—裂隙面环绕 Z 轴转动, 横过裂隙面, 裂隙面因扭转发生错断; C—裂隙面环绕 Z 轴作分段转动, 横过裂隙面, 裂隙面被分段扭断, 形成裂隙矛
 a —裂隙面转动前的裂隙延伸增量; θ —裂隙面环绕 x 轴的转动角; δa —裂隙面转动后的裂隙延伸增量;
 ϕ —裂隙面环绕 z 轴的转动角

后一种分段扭转情况下, 才使裂隙矛的产生成为可能。于是Ryan和Sammis就根据上述设想,

1) 图6中, Lawn等把下部柱列裂隙面自下而上的延伸方向 (z 轴方向) 画成自左至右的水平方向, 据笔者看来, 主要是为了作图表示的方便。该者对照阅读图6和图7时, 请注意从成因上搞清 z 轴定向的一致性。

提出了柱状节理面“裂隙矛”形成的力学模式。图 7 表示一个完整的单个条纹，它由一个平坦带（其上包含着裂隙矛）与一靠近裂隙尖端的粗糙带（图中用细条状水平长轴表示）组成。下部柱列裂隙面是在 $X-Z$ 轴平面内，沿着 Z 轴方向延伸、生长的。裂隙矛向右倾。裂隙与条

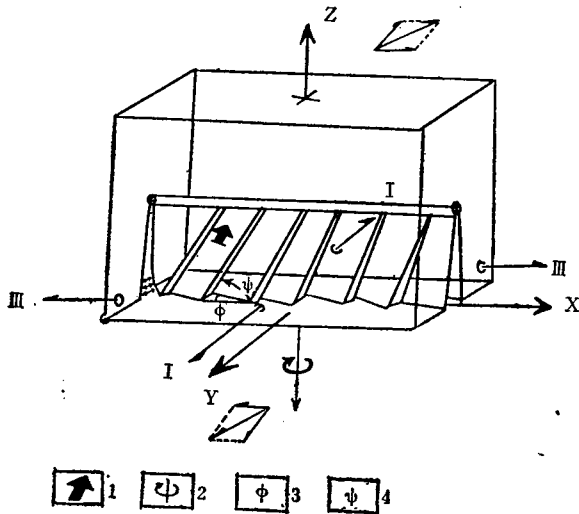


图 7 柱状节理面裂隙矛形成力学模式图示
(据 Ryan & Sammis)

1—裂隙矛的倾斜方向；2—裂隙面作顺时针扭转；3—裂隙面围绕 z 轴的旋转角；4—条纹与裂隙矛之间的夹角

I—引张力，Ⅲ—非平面的剪切力（裂隙在 $x-z$ 平面内，沿着 z 轴方向，自下而上延伸）

纹平坦带底线的夹角为 50° 。立体模型处于变形 I 和变形Ⅲ相结合的应力负荷之下，即裂隙面既受到引张变形，又受到非平面的剪切变形。在两种变形的共同作用下，使裂隙产生扭转 (torque)。面朝观察者的那个裂隙面的扭转方向是顺时针的，相邻接的对应面的扭转方向是逆时针的。

四、结 语

过去，人们对玄武岩柱状节理的形态特征及其形成机理的探讨，偏重于在与熔岩流相平行的冷凝面方向上，研究熔岩结构的均质程度与冷却收缩中心的分布、排列格局对柱体横断面几何形状的控制作用，因而把与冷凝面相垂

直的柱状节理面看作仅仅由冷却收缩作用导致的单纯的张性裂隙面。

本文应用 Ryan 和 Sammis 关于玄武岩柱状节理面旋回条纹形成的力学模式，对浙东新生代玄武岩若干典型下部柱列节理面旋回条纹剖面进行了系统的野外测量、鉴定。研究结果表明，旋回条纹是玄武岩复杂的原生破裂变形的岩石记录。玄武岩原生裂隙在纵向延伸和切割玄武岩体的形变过程中，具有旋回性发展特征。从力学性质鉴定，含有旋回条纹的柱状节理面是一复杂的张性兼扭性结构面。

从一定意义上来说，在我国，浙东新生代玄武岩旋回条纹这一原生构造形迹的首次发现与鉴定，为人们以 Ryan 和 Sammis 模式进一步解释玄武岩柱状节理的成因，并修正传统冷却收缩说关于玄武岩柱状节理单纯引张成因的观点，提供了一个新的例证。

Ryan 和 Sammis 模式的提出，开阔了人们研究玄武岩柱状节理形成机理的思路，对此应予肯定评价。但是，该模式还存在某些不完善之处。因限于篇幅，这个问题，笔者将另行文作专题讨论。吴贤祚同志协助清绘图件，特致谢意。

参 考 文 献

- [1] Ryan, M.P., and Sammis, C.G., 1978, Cyclic fracture mechanisms in cooling basalt. *Geol. Soc. America Bull.* Vol. 89, No. 9, P. 1295-1308.
- [2] 徐松年, 1978, 浙江三门湾“嵊县玄武岩”柱状节理的形态类型和发育特征, 杭州大学学报 (自然科学版), 第 3 期。
- [3] 徐松年, 1980, 玄武岩双层柱状节理的形态特征及其形成机理的探讨. *地质论评*, 第 26 卷, 第 6 期
- [4] 徐松年, 1982, 试论玄武岩柱状节理的形态分类与成因分类, 杭州大学学报 (自然科学版), 第 9 卷, 第 4 期。
- [5] 徐松年, 1983, 评玄武岩柱状节理形成机理的一种新假说——双扩散对流作用说. 杭州大学学报 (自然科学版), 第 10 卷, 第 3 期。
- [6] Somner, E., 1969, Formation of fracture "lances" in glass. *Eng. Fract. Mech.*, V. 1, P. 539-546.
- [7] Lawn, B.R., and Wilshaw, T. R., 1975, *Fracture of brittle solids*. Cambridge Univ. Press, P. 204.

图 版 说 明

- 照片 1 浙江宁海、茶院西南玄武岩下部柱列剖面。节理面上发育明显的水平条纹。局部节理面放大见照片 2 和照片 3。
- 照片 2 浙江宁海、茶院西南玄武岩下部柱列的局部节理面。其上发育着 8 个完整的条纹。条纹平坦带上未见裂隙矛的发育。因柱面左侧裂隙延伸速度大于右侧，条纹呈倾斜状排列。至第 8 旋回处，柱面两侧裂隙的延伸速度趋于均等，条纹才呈水平状排列。（请与图 1 对照阅读）
- 照片 3 浙江宁海、茶院西南玄武岩下部柱列的局部节理。

其上发育 4 个完整的条纹，平坦带上未见裂隙矛的发育。

- 照片 4 浙江宁海、茶院北玄武岩双层柱列剖面。在下部柱列的节理面上发育明显的水平条纹。局部节理面放大见照片 5 和照片 6。
- 照片 5、6 浙江宁海、茶院北玄武岩下部柱列局部节理面上发育的旋回条纹与裂隙矛。A、B 节理面上，可以分别看到 6 个完整的条纹。请注意两个节理面上裂隙矛的定向与各段平坦带扭动特征的差异性（与图 5、表 2、3 对照阅读）。
- 照片 7 浙江宁海茶院玄武岩流毛屿山下部柱列剖面。局部节理面上可以看到水平条纹；大部分节理面上，条纹显示不清楚。

DISCOVERY OF CYCLIC STRIA ON THE SURFACE OF COLUMNAR JOINTS IN CENOZOIC BASALTS IN EASTERN ZHEJIANG AND ITS SIGNIFICANCE

Xu Songnian

(Department of Geography, Hangzhou University)

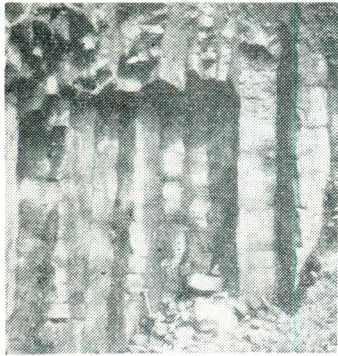
Abstract

Through a study of the fracture surface of some typical colonnades in eastern Zhejiang and in comparison with those in the Boiling Pots (Hawaii), the prehistoric Madaopuhi lava lake (Hawaii) and the First Watchung Basalt (New Jersey) in the U. S., problems concerning the morphological features of the cyclic stria on the surface of columnar joints of Cenozoic basalts in eastern Zhejiang and their formative mechanism are discussed in the paper in the light of the model for the cyclic fracture mechanisms in cooling basalts suggested by Ryan and Sammis (1978).

The cyclic stria retained on the joint surface are the rock record of the complex primary rupture deformation of basalts. They were formed with build-up and release of cyclic stresses in a cooling basalt body during the progressive stage of propagating fractures.

A complete stria consists of a smooth zone (containing fracture lances) and a rough zone. The existence of fracture lances on the smooth zone indicates that extensional deformation in a basalt body is frequently coupled with non-plane shear deformation during the fracture propagation.

The first discovery of cyclic fractures in Cenozoic basalts in eastern Zhejiang provides a new example for the model of Ryan and Sammis to further explain the origin of basalt columnar joints and revise the traditional hypothesis of contraction due to cooling that the columnar joints of basalts are purely of extensional origin.

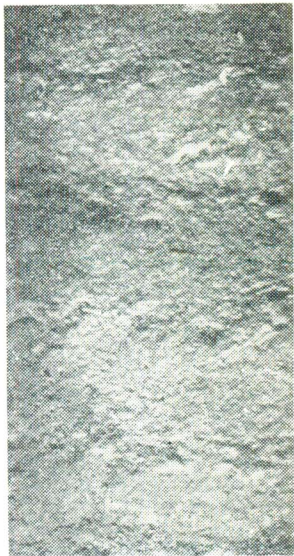


1



0
5
10
15
cm

2

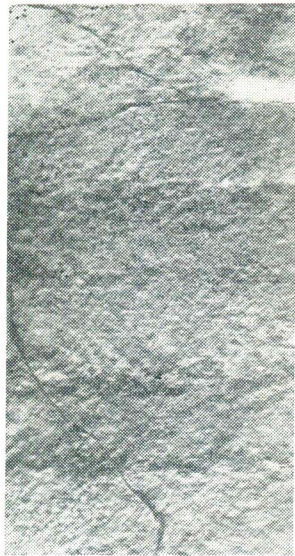


0
5
10
15
cm

3



4



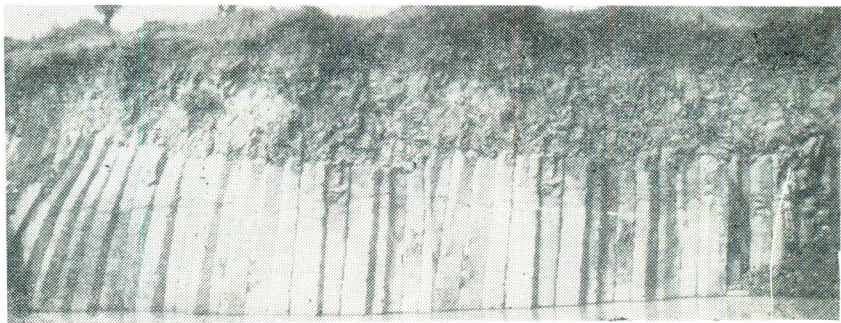
0
5
10
15
cm

5



0
5
10
15
cm

6



7