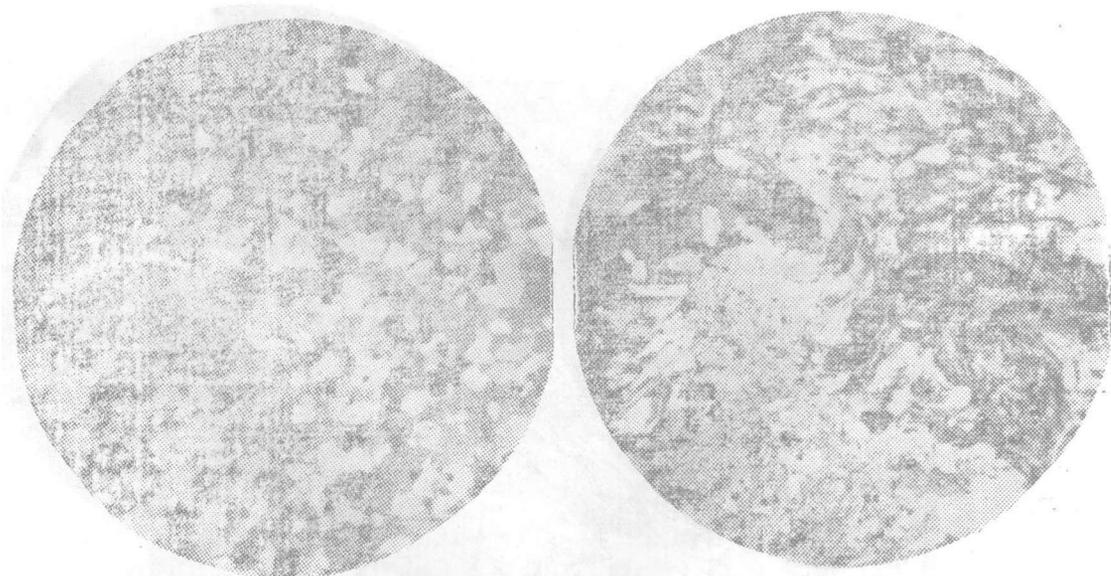


玉石沟含铬超基性岩体橄榄石 矿物应力特征及地质意义

洛长义

(地质部西安地质矿产研究所)

本岩体中橄榄石矿物特征的研究资料已有较多的记载,尤其是最近几年,又更多地描述了橄榄石晶体的方位定向性,以及该矿物的带状消光和笔者提出的 $2V$ 值异常等应力作用特征。反映了橄榄石矿物是在一定的物理化学条件中受应力作用而形成的,并且这种应力作用所形成的痕迹(系指晶体定向、带状消光和 $2V$ 值异常),在橄榄石矿物中永久地保存下来了。本文对橄榄石矿物晶体所受应力作用的机制进行了分析讨论,并结合岩体地质概况提出本岩体的最终侵位方式是冷侵位的见解。应当指出,笔者仅仅是着重从岩体侵位过程的应力特点出发,而不过多地涉及其它地质因素。由于笔者水平有限,以及超基性岩体侵位方式众说纷纭的现状下,文中分析讨论的问题,谬误难免,敬请读者指正。



照片5 角闪斜长变粒岩(富蕴县塔木别勒协尔西5公里),由更长石、石英、角闪石组成,细粒花岗镶嵌结构,块状构造 正交偏光 $23\times$

照片6 含十字兰晶—红柱矽线黑云母片岩(卡拉先格尔东北12公里),视域中红可见红柱石包裹十字石(小粒) 单偏光 $20\times$

一、岩体地质概述

本岩体是北祁连山加里东期超基性岩带中规模较大的岩体之一，含矿（铬铁矿）性，目前已知是最好的。

根据前人研究资料*〔1〕，岩体侵位于一套蓟县系一下奥陶统浅变质海底喷发的细碧-角斑质火山岩系之中（上述资料中除西安地矿所认为属蓟县系外，其它均认为属前寒武系），并且有大面积辉长岩与其相伴分布。与围岩接触带只有蛇纹石化和绿泥石化等低温接触变质作用，未发现高温接触变质现象。其岩浆岩组合是从中基性火山喷发岩到基性辉长岩以及超基性岩。因此，可以认为是一个特征的奥菲奥岩套（Ophiolite Suits）或蛇绿岩套（图1）。

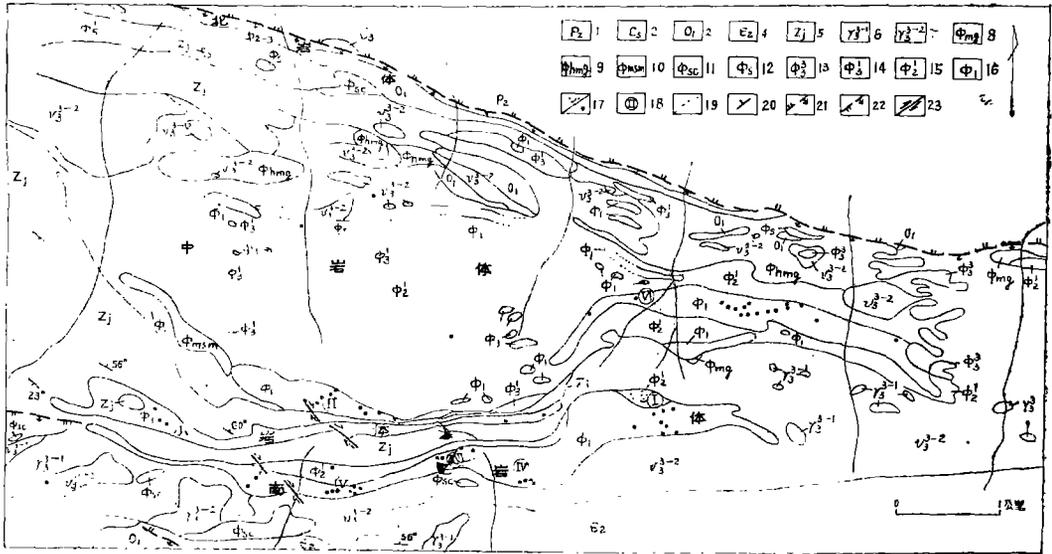


图1 青海祁连山玉石沟超基性岩体地质图

1—二叠系：砂岩；2—石炭系：砂岩、页岩及石灰岩；3—下奥陶统：结晶灰岩、板岩、变砂砾岩及千枚岩和中基性火山岩；4—中寒武统：砂板岩夹灰岩；5—蓟县系：白云岩和云母石英片岩等；6—花岗岩；7—辉长岩；8—滑石菱镁片岩；9—滑石菱镁岩；10—石棉矿；11—石英碳酸盐岩；12—蛇纹岩；13—单辉橄岩；14—斜辉橄岩；15—斜辉辉橄岩；16—纯橄岩；17—铬矿体和矿点；18—矿带编号；19—实测和推测地质界线；20—地层产状；21—逆断层；22—正断层；23—平推断层

从图1可知，本岩体包括有：南岩体、小岩体、中岩体和北岩体等。根据形态产状资料，各岩体皆为向北倾的单斜状岩体。所出现的岩石类型主要有纯橄岩、辉橄岩以及少量的

*西北地质科学研究所、青海省地质局第二地质队，玉石沟超基性岩体铬铁矿成矿部位预测研究，1977.12；西安地质矿产研究所等，北祁连山中西段（俄博—吊大坂）铬铁矿床成矿条件找矿方向研究（初稿），1980.4；温玉江、李逢玉，玉石沟超基性岩体及铬铁矿床地质，1978.4，地质与生产。

橄辉岩和橄辉岩、辉岩等分异体。

岩石组合有如下特点，由南向北可分为：南岩体的南部（下盘）纯橄岩 + 北部（上盘）斜辉辉橄岩组合；中岩体的南部（下盘）纯橄岩 + 中部斜辉辉橄岩 + 北部（上盘）斜辉橄橄岩组合；北岩体的斜辉辉橄-橄橄岩组合。其中小岩体为含斜辉辉橄岩的纯橄岩组合。岩体岩相的划分见图 2。

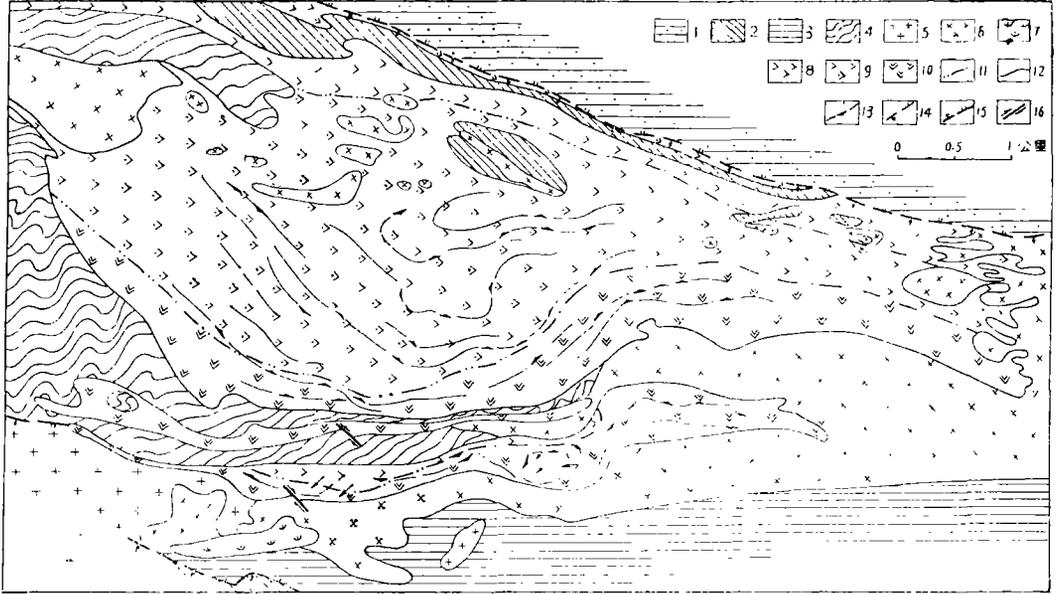


图 2 青海祁连玉石沟超基性岩体岩相地质图

1—二叠系；2—下奥陶统；3—中寒武统；4—蓟县系；5—花岗岩；6—辉长岩；7—蛇纹岩；8—斜辉橄橄岩相；9—斜辉辉橄岩相；10—纯橄岩相；11—岩相界线；12—地质界线；13—流动构造（流线和流面）；14—逆断层；15—正断层；16—平推断层

岩石化学特征见图 3，从图 3 中不难看出，各岩体中的主要同名岩石相对比，其中南岩体的比北部岩体中的 M 值偏高，S 值偏低。

综合上述岩石组合和岩石化学特点可得出：岩体的成分，无论是整个玉石沟岩体，还是其中的每个岩体本身，都具有南（下盘）基北（上盘）酸的特点。

岩体中各类岩石普遍遭受强烈蛇纹石化，绝大多数岩石已无原生造岩矿物残留，岩石主要由蛇纹石（包括绢石）及少量副矿物——铬尖晶石和磁铁矿尘点等组成。其中的中岩体 I 矿带西玉石沟脑西坡，局部见有较新鲜的纯橄岩和辉橄岩出露，部分钻孔（ZK311、ZK312、ZK318 等）深部也可见到。这类新鲜岩石，呈灰黑色，颜色均匀，块状构造，细粒、中—粗粒状和不等粒状结构，显微镜下橄橄石以半自形晶为主；顽辉石为它形—半自形晶，具一组 (010) 完好解理， $2V = 68^\circ - 81^\circ$ ， $Ng \wedge C = 0^\circ - 8^\circ$ ，在斜辉辉橄岩中含量一般为 10—15%，并常见包橄结构；纯橄岩中一般不含顽辉石，局部虽有所见及，其含量亦 $< 5\%$ ，其岩石若为含辉纯橄岩的变种，这时顽辉石粒度小且为它形晶。此外，新鲜岩石中尚含有 1% 左右的副矿物——铬尖晶石，其粒度一般在 0.5—1.0 毫米之间，大者可达 2 毫米以上，

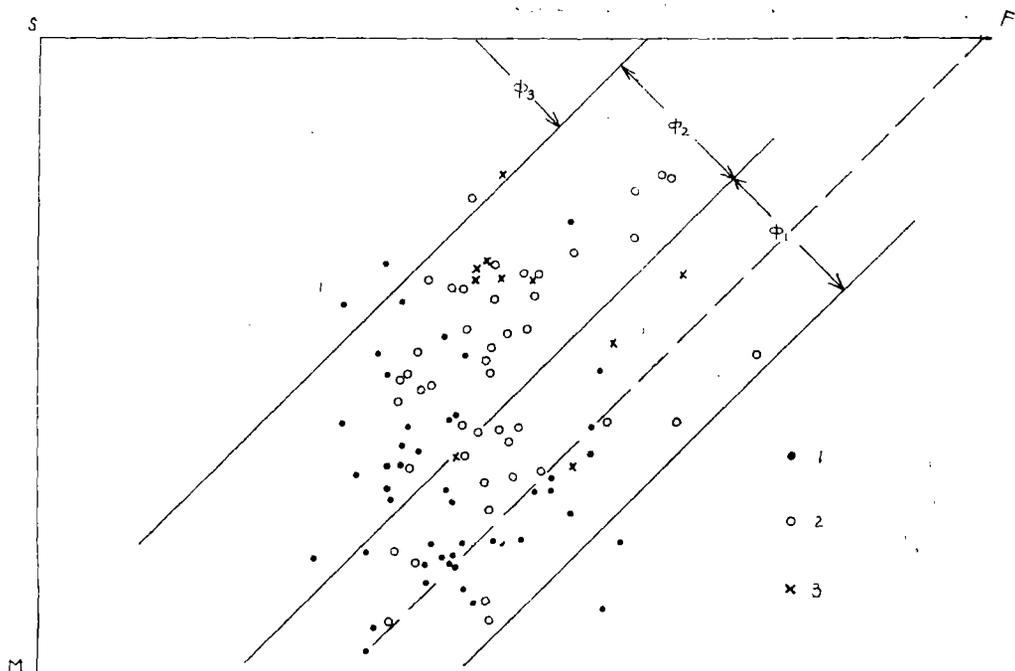


图3 青海祁连玉石沟岩体的岩石化学特征图解 (W-B法)

1—南岩体岩石化学投点；2—中岩体岩石化学投点；3—北岩体岩石化学投点；
根据地质科学院地矿所《1977·4，地质矿产研究》

半自形-自形晶，有时颗粒边缘呈浑圆状。当岩石具蛇纹石化时，纤维蛇纹石沿橄榄石矿物裂隙分布，顽辉石被绢石交代并呈其假象，同时伴随有磁铁矿尘点析出。

新鲜的和弱蛇纹石化的岩石化学成分及其数值特征如表1所示。其中成分的数值特征与所谓的阿尔卑斯型的纯橄岩和橄橄榄岩岩石化学成分数值特征(表2)相接近〔5〕。其特点是MgO高(41.62—47.29%)，铁低(FeO 4.27—9.52%，Fe₂O₃ 0.00—5.60%)，TiO₂ (<0.03%)和CaO (0.11—0.62%)则更低。岩石的M/F比值高(>77.8)，属镁质超基性岩石。

本文所研究的橄榄石矿物，即赋存于具上述特点的纯橄橄榄石和斜辉辉橄岩之中。

二、橄榄石矿物特征

橄榄石矿物在上述岩石中，以半自形晶为主，粒度一般在0.4—3.0毫米之间，通常在含矿的岩石中粒度较大，近矿者甚至达到伟晶状。橄榄石矿物化学成分，在纯橄岩中的主要氧化物含量：SiO₂ 40.21—41.22%，Fe₂O₃ 0.25—1.68%，FeO 6.28—9.89%，MgO 48.26—50.99%。矿物晶体化学式中阳离子数Mg²⁺ 1.77—1.85，Fe²⁺ 0.13—0.21，其余阳离子数量都在0.03以下。计算的橄榄石牌号为Fo 89—93，其中以Fo 90—93为主，属镁橄石(表3-2)；斜辉辉橄岩中的主要氧化物含量，SiO₂ 40.48—41.12%，Fe₂O₃ 0.60—1.25%，FeO 6.93—7.24%，MgO 49.95—50.57%。矿物晶体化学式中阳离子数Mg²⁺ 1.79—1.83，

表1 岩石化学成分及其数值特征表

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	
氧 化 物 重 量 (%)	SiO ₂	38.53	38.45	38.43	36.68	35.17	37.96	37.69	43.18	43.80	41.85	40.68
	TiO ₂	0.00	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.02	0.02	0.005
	Al ₂ O ₃	1.98	2.13	1.48	0.74	0.51	1.02	0.30	0.18	0.53	0.63	0.33
	Cr ₂ O ₃	0.51	0.83	0.64	0.70	0.59	0.77	0.50	0.50	0.46	0.38	0.36
	Fe ₂ O ₃	0.82	0.94	1.43	2.43	3.30	1.13	2.59	0.00	0.99	5.60	1.94
	FeO	9.52	8.51	9.32	7.76	4.96	9.45	4.55	7.66	7.01	4.27	6.94
	MnO	0.18	0.14	0.15	0.14	0.13	0.17	0.10	0.14	0.12	0.13	0.13
	CoO	0.020	0.022	0.021	0.018	0.016	0.017	0.015	0.019	0.015		
	MgO	47.29	45.88	49.74	44.09	43.12	41.62	45.40	46.19	45.25	45.76	49.68
	NiO	0.29	0.33	0.33	0.31	0.32	0.33	0.35	0.34	0.33	0.32	0.31
	CaO	0.22	0.27	0.23	0.11	0.22	0.17	0.30	0.62	0.61	0.45	0.28
	K ₂ O	0.00	0.00		0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.16	0.00
	Na ₂ O	0.05	0.02		0.03	0.05	0.05	0.01	0.02	0.04	0.09	0.00
	P ₂ O ₅	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01		0.01	0.01		0.02
	V ₂ O ₅	0.01		0.00	0.02	0.01	0.01					
	H ₂ O ⁺	0.78	1.60	0.86	6.49	11.36	2.68	7.22	0.44	0.84		3.34
H ₂ O ⁻	0.02	0.18	0.18	0.35	0.56	0.23	0.46	0.18	0.24		0.46	
CO ₂	0.09	0.39	0.45	0.15	0.66	0.29	0.73	0.17	0.22		0.80	
SO ₃	0.016		0.06	0.057	0.034	0.078	0.016	0.010	0.000			
合 计		99.722		100.105		95.995		99.689	100.485			
		100.236		101.341		102.030				99.66	100.975	
数 值 特 征	S	32.6	32.6	32.1	32.8	32.8	34.8	33.6	35.7	36.6	34.7	34.7
	B	66.7	66.5	67.1	66.8	66.4	64.6	65.8	62.7	62.5	63.9	64.6
	A	0.7	0.9	0.8	0.4	0.8	0.6	0.6	1.6	0.9	1.4	0.7
	M/F	7.85	8.79	7.80	7.83	9.42	8.72	11.65	10.45	10.06	8.70	9.48
	f	10.8	9.6	11.0	11.1	9.4	12.86	7.7	8.3	8.8	10.1	9.4

表2 阿卑尔型超基性岩石化学成分数值特征

岩石类型	S	B	A	M/F	f
纯 橄 岩	34.1	64.7	1.2	9.6	9.2
橄 榄 岩	36.6	61.8	1.8	9.3	9.4

Fe²⁺0.14—0.15, 其余阳离子数量一般小于0.02。计算的橄榄石牌号为Fo 90.6—92.4, 亦属镁橄榄石(表3-1)。纯橄岩中的橄榄石矿物X-光粉晶分析结果(表4)表明, 成矿

表 3-1 斜辉辉橄岩中橄榄石和斜方辉石化学成分

序号	1		2		3		4		
样品编号	75Y-118		93IA-83		93IA-72		单矿-3		
氧 化 物 重 量 (%)	SiO ₂	41.06	57.07	40.78	58.53	41.12	57.62	40.48	55.53
	TiO ₂	0.01	0.04	0.00	0.01	0.005	0.003		
	Al ₂ O ₃	0.15	1.66	0.09	1.36	0.14	1.56	0.91	1.33
	Fe ₂ O ₃	1.10	0.67	1.01	0.32	0.60	0.12	1.25	0.64
	FeO	6.93	4.71	7.22	4.51	7.05	5.14	7.24	5.03
	MnO	0.12	0.13	0.15	0.13	0.15	0.15		
	MgO	50.12	33.94	49.95	33.18	50.18	32.73	50.57	35.19
	CaO	0.08	0.93	0.00	0.87	0.00	1.11	0.014	1.16
	Na ₂ O	0.05	0.04	0.04	0.04	0.15	0.06		
	K ₂ O	0.02	0.00	0.002	0.002	0.002	0.00		
	H ₂ O ⁻	0.06	0.06	0.04	0.12	0.04	0.12		
	H ₂ O ⁺	0.22	0.42	0.06	0.38	0.04	0.38	0.07	0.19
	Cr ₂ O ₃	0.02	0.55		0.53	0.01	0.56		
	NiO	0.37	0.09	0.46	0.115	0.435	0.140		0.29
	COO	0.017	0.007	0.017	0.006	0.019	0.006		
	P ₂ O ₅	0.00	0.00	0.08	0.01	0.11	0.03		
	SO ₃								
CO ₂									
V ₂ O ₅	0.00	0.01							
总 和	100.327		99.899		100.069		100.234		
	100.318		100.113		99.729		99.360		
牌号(Fo, En)	Fo 91.4 En 86.4		Fo 91.5 En 87.0		Fo 92.4 En 85.6		Fo 90.6 En 89.7		

矿物晶体化学式:

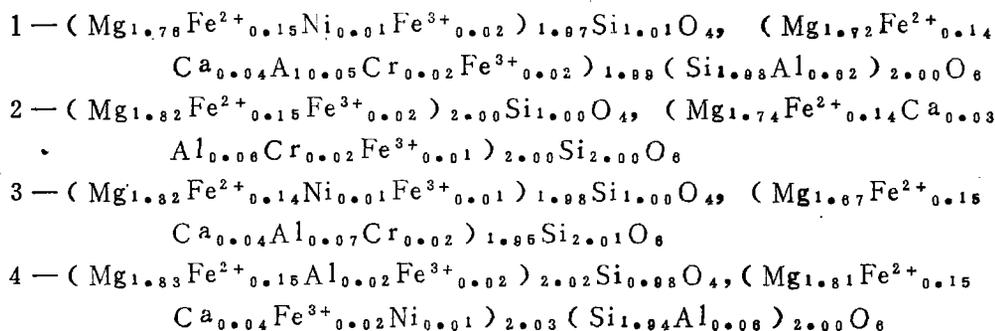


表 3-2 纯橄岩中橄榄石化学成分

序号	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
样品编号	75Y —43	单矿 —5	76玉 —166	76玉 —162	76玉 —155	76玉 —150	76玉 —116	76玉 —108	76玉 —107	76玉 —104	76玉 —17	
氧 化 物 (重 量 %)	SiO ₂	41.22	40.21	41.21	41.21	40.95	41.21	40.95	40.68	40.42	41.08	40.98
	TiO ₂	0.01	0.002	0.005	0.007	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.005	0.01
	AlO ₃	0.15	0.56	0.09	0.09	0.05	0.05	0.14	0.14	0.14	0.14	0.11
	Fe ₂ O ₃	0.82	1.21	0.95	0.52	1.68	0.88	0.83	1.42	1.20	0.70	0.25
	FeO	7.54	7.75	7.80	6.28	8.37	6.32	8.08	8.05	8.91	7.79	9.89
	MnO	0.15	0.13	0.13	0.11	0.14	0.12	0.13	0.15	0.14	0.14	0.16
	MgO	50.12	50.22	48.94	50.86	48.75	50.99	49.37	49.18	48.99	49.71	48.26
	CaO	0.17	0.19	0.27	0.09	0.27	0.18	0.18	0.18	0.14	0.27	0.23
	Na ₂ O	0.08										
	K ₂ O	0.04										
	H ₂ O	0.00										
	H ₂ O ⁺	0.08	0.20	0.34	0.12	0.12	0.26		0.18	0.18	0.22	0.14
	Cr ₂ O ₃	0.08	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	
	NiO	0.34	0.36	0.29	0.36	0.28	0.35	0.30	0.32	0.29	0.34	0.07
	COO	0.018		0.016	0.015	0.014	0.016	0.017	0.018	0.017	0.016	0.28
	P ₂ O ₅	0.00		0.04	0.01	0.05	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.021
	SO ₃	0.007										
CO ₂												
V ₂ O ₅	0.00											
总和	100.825	100.081	100.674	100.017	100.457	100.401						
		100.962	99.672	100.386	100.338	100.421						
Fo	91.0	89.7	90.5	93.0	89.4	92.5	90.5	90.0	89.6	91.0	89.0	

矿物晶体化学式:

- 5—(Mg_{1.80}Fe³⁺_{0.18}Ni_{0.01}Fe³⁺_{0.02})_{1.99}Si_{1.01}O₄;
- 6—(Mg_{1.82}Fe²⁺_{0.18}Ni_{0.01}Fe³⁺_{0.02}Ca_{0.01}Al_{0.02})_{2.00}Si_{0.98}O₄;
- 7—(Mg_{1.79}Fe²⁺_{0.18}Ni_{0.01}Ca_{0.01}Fe³⁺_{0.02})_{1.99}Si_{1.01}O₄;
- 8—(Mg_{1.85}Fe²⁺_{0.13}Ni_{0.01}Fe³⁺_{0.01})_{2.00}Si_{1.00}O₄;
- 9—(Mg_{1.77}Fe²⁺_{0.17}Ni_{0.01}Ca_{0.01}Fe³⁺_{0.03})_{1.99}Si_{1.03}O₄;
- 10—(Mg_{1.85}Fe²⁺_{0.13}Ni_{0.01}Fe³⁺_{0.02})_{2.01}Si_{1.02}O₄;
- 11—(Mg_{1.80}Fe²⁺_{0.17}Ni_{0.01}Fe³⁺_{0.02})_{2.00}Si_{1.00}O₄;
- 12—(Mg_{1.80}Fe²⁺_{0.17}Ni_{0.01}Fe³⁺_{0.03})_{2.01}Si_{0.99}O₄;
- 13—(Mg_{1.79}Fe²⁺_{0.19}Ni_{0.01}Fe³⁺_{0.02})_{2.01}Si_{0.99}O₄;
- 14—(Mg_{1.81}Fe²⁺_{0.16}Ni_{0.01}Ca_{0.01}Fe³⁺_{0.01})_{2.00}Si_{1.00}O₄;
- 15—(Mg_{1.77}Fe²⁺_{0.21}Ni_{0.01}Ca_{0.01}Fe³⁺_{0.01})_{2.01}Si_{1.01}O₄。

表 3—3Mg和Fe在共生矿物橄榄石 (Ol) 和顽辉石 (Py) 之间的分配系数 (K)

序号	样品编号	矿物	X _{Mg}	X _{Fe}	$\frac{X_{Mg}}{X_{Fe}}$	$K = \frac{(X_{Mg} : X_{Fe})_{Py}}{(X_{Mg} : X_{Fe})_{Ol}}$
1	75Y-118	Ol	91.4	8.6	10.8	1.08
		Py	92.0	8.0	11.5	
2	63IA-83	Ol	91.5	8.5	10.8	1.14
		Py	92.5	7.5	12.3	
2	63IA-72	Ol	92.5	7.5	12.3	0.98
		Py	92.3	7.7	12.0	
4	单矿—3	Ol	91.6	8.4	10.9	1.00
		Py	91.6	8.4	10.9	

注：根据实验资料，当 $t = 1473$ 和 $1500^{\circ}T$ 时， $K = 1.22 - 1.378$ [8]。

表 3 样品位置：

序号：1—3-玉石沟中岩体；4-玉石沟中岩体Ⅱ—Ⅱ'剖面；5-中岩体Ⅱ矿带；6-中岩体A-A'剖面；7-中岩体Ⅱ矿带北312孔198米；8-中岩体Ⅱ矿带北312孔72米；9-中岩体Ⅱ矿带北311孔20°方位75米处；10-中岩体西玉石沟西城；11-中岩体Ⅱ矿带Ⅳ—Ⅳ'剖面146米处；12-中岩体Ⅱ矿带Ⅲ—Ⅲ'剖面181米处；13-中岩体Ⅱ矿带；14-中岩体Ⅱ矿带Ⅲ—Ⅲ'剖面139米处；15-中岩体Ⅱ矿带北318孔197.5米

表 4 橄榄石 X—光粉晶分析

样品编号	hkl	d	a.	b.	c.	Fo%*
76玉—155	400	1.1883	4.7560	10.222	5.9920	89.0
	174	1.0222				
	004	1.4980				
76玉—150	400	1.1883	4.7532	10.217	5.9836	90.5
	174	1.0217				
	004	1.4959				

分析者：徐培苍等

*根据d174鉴定 (Jamboi min.mag, 1964, 33.)。

76玉—155 粗粒—伟晶状橄榄石；

76玉—150 细粒橄榄石；

采样位置见表 3。

纯橄岩中的橄榄石在近矿部位铁略高 (Fo 89)，可出现镁-贵橄橄榄石变种 (76玉—155)。有的研究者将这种含铁相对略高、粒度较粗的橄榄石所组成的含矿纯橄岩称之为成矿纯橄岩 (或近矿纯橄岩)，而将那种细粒橄榄石所组成的不含矿纯橄岩称之为成岩纯橄岩。

上述各种岩石，无论是那种纯橄岩，还是辉橄岩中的橄榄石都具有应力作用的特征。现

将这种特征叙述如下。

1. 橄榄石矿物的晶体方位定向

以往研究者从岩浆流动构造的观点出发,测量统计了橄榄石等矿物晶体的方位,并且绘制了纯橄岩和辉橄岩中橄榄石的晶体方位图(图4-1、图-2),岩体中所测量的副矿物铬尖晶石定向线状排列方位是 $40^\circ \angle 84^\circ$, 图4-1、图-2是纯橄岩和斜辉辉橄岩定向标本中做橄榄石晶组分析的结果(其薄片是平行铬尖晶石或辉石“流面”切制,薄片长边平行“流面”走向,在旋转台上测定,上半球投影)。从图中可以清楚看出,橄榄石各光率体主轴均有颇为明显的单方位高极密。 N_g 与 N_m (即a轴与c轴)平行投影面(即流面)排列,表明橄榄石的(010)面与岩石中铬尖晶石及辉石颗粒构成的“流面”平行一致。 N_p (即b轴)则垂直“流面”。从图4-1中可以看出橄榄石长轴方位是 $41^\circ \angle 86^\circ$,与上述岩石中铬尖晶石定向线状排列方位基本一致,其岩组方位图上各光率体主轴的排列显示了S-构造岩的组构特征,说明橄榄石矿物颗粒发生的定向排列,是由于压应力作用的结果。此外,笔者在薄片观察中见到,同一薄片中的橄榄石矿物颗粒的干涉色级序多数是相同或相近似的,也是橄榄石矿物定向排列的反映,其中只有少数自形程度相对较好,粒度小的橄榄石颗粒干涉色级序差别大,显示了这一种橄榄石颗粒不具有定向性,它们分布在前者颗粒的间隙中。

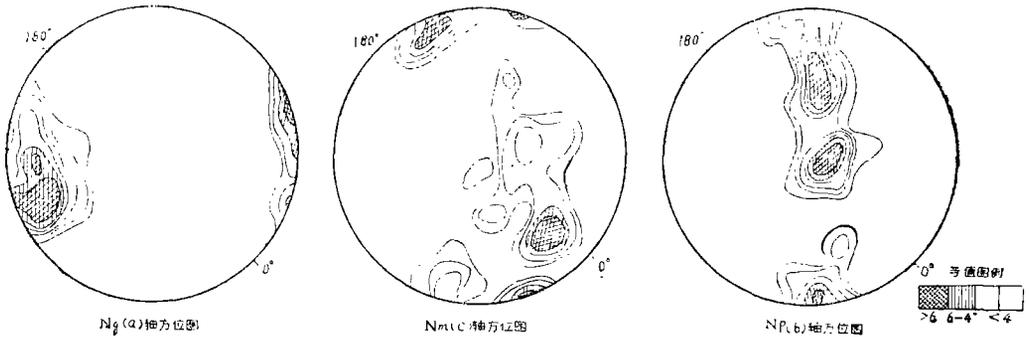


图4-1 祁连玉石沟纯橄岩中橄榄石方位图
(岩组图大圆上的角度为实际地理坐标)

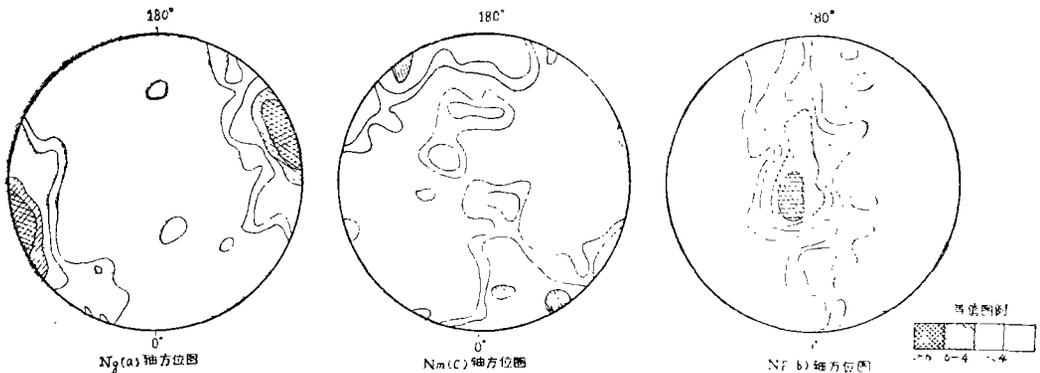
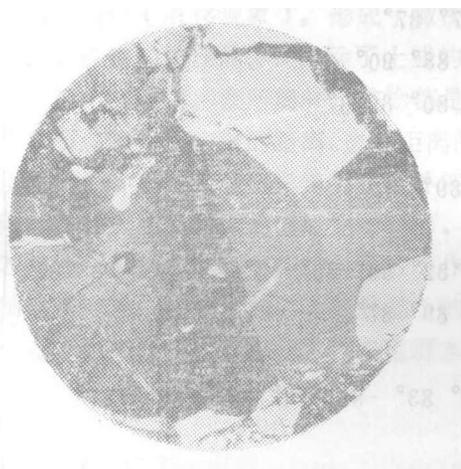


图4-2 祁连玉石沟斜辉辉橄岩中橄榄石方位图
(岩组图大圆上角度为实际地理坐标)

2. 橄榄石矿物晶体的带状消光

关于矿物的带状和波状消光,是较为普遍的现象。王嘉荫教授曾指出,塑性形变能引起矿物晶体或晶粒内部结构的相应改变。波状和带状消光是矿物的晶架发生了错动(滑移)的结果。显微镜下常见的波状消光是波形消光成连续过渡关系,转物台时,消光显示波状,并认为是扭滑移为主的结果;而带状消光,显微镜下所见特征有点类似双晶(斜长石和方解石的聚片双晶),但是不如双晶那样明显和规则,并认为是面滑移为主的结果〔2〕。玉石沟岩体中橄榄石矿物的这种带状消光现象较为发育,而波状消光现象不明显(照片1、2),说明矿物塑性形变机制是以面滑移为主。本岩体中橄榄石矿物的带状消光现象以往已有描述,并被称之为“错位双晶”纹(带)。



照片1 纯橄岩(薄片76玉-12)橄榄石矿物的带状(和波状)消光现象,白色颗粒为不具应力特征之橄榄石 正交偏光 20×



照片2 斜辉辉橄岩(薄片76玉-11)橄榄石矿物的带状消光现象,白色具发育解理者为顽辉石 正交偏光 20×

3. 橄榄石矿物晶体的2V值异常

众所周知,橄榄石矿物晶体2V值是确定橄榄石矿物成分种属的重要光性数值之一,几乎所有的经典《光性矿物学》(W·E·特吕格等)都毫不例外地列有根据橄榄石2V值鉴定橄榄石成分种属鉴定表。看来这一鉴定方法已被人们长期的沿用下来,并无人提出补充修正的意见。笔者在研究玉石沟岩体内橄榄石矿物化学成分时,得到该岩体橄榄石矿物的化学成分(表3-1、表3-2),主要是镁橄榄石(Fo_{90-93}),只在个别的近矿纯橄岩中出现有含铁略高的镁-贵橄榄石变种($Fo_{89.0}$),橄榄石单矿物粉晶分析(表4)也与化学成分研究一致。说明本岩体中橄榄石矿物成分变化不大,皆属镁橄榄石类。但是,其橄榄石矿物2V值测定结果(表5)中,出现了较大的变化范围,2V值可以从 70° 至 90° 之间变化,若按上述矿物光性鉴定表不难查出,相当于本岩体中的镁橄榄石(Fo_{90-93}),2V值应当是 88° 左右,而那些2V值偏小的数值认为是2V光性异常值。笔者于1974年在测定陕西松树沟含铬超基性岩体中橄榄石矿物的2V值时,同样也发生了2V值偏小的数值($<75^{\circ}$),与其矿物化学成分不能相应。因此,在这一类超基性岩体中,不适宜用2V值确定橄榄石矿物成分种属。

表5 橄榄石 2 V 值测定结果表

薄片号	2 V值*	序号
76玉—01	84° 86° 88° 84° 72° 88° 90° 88° -88° 89° -89.2° 89° 89° 90°	1
76玉—02	89.2° 87° 89° 89.2° 89° 89.6°	2
76玉—101	80° 80.6° 83° 86° 80° 82° 80° 81°	3
76玉—103	84° 86° 87° 88° 89° 87° 85.5° 87.4°	4
76玉—104	82° 85° 86° 86° 86° 84° 85° 87.4° 86° 86° 87° 86° 86°	5
76玉—105	86° 86°	6
76玉—106	86.8° 86° 88° 84° 86° 86° 87° 87°	7
76玉—107	80° 88° 88° 87° 89° 90° 88° 88° 90°	8
76玉—108	88° 84° 88° 80° 80° 76° 90° 80° 89.6°	9
76玉—109	-89.5° -88° -86°	10
76玉—110	82° -86° 78° 70° 90° -88° -89°	11
76玉—115	86° 87° 89°	12
76玉—116	87° 86° 86° 90° 85° 74° 76° 77° 82° 83° 86° 82° 85° 86° -88° 85°	13
76玉—150	88° 85° 76° 90° 85° 88° 90° 89° 87°	14
76玉—151	84° 84° 86° 88° 87°	15
76玉—155	-83° -88° -76° -74° -70° 87° 83° -88° 84° 85° -88° -87°	16
76玉—164	88° 89° 90°	17
76玉—166	84° 82° 75° 82° 84° -88° 89° 90° -89°	18
76玉—118	86° 86.5° 87° 80° 84° 83° 82° 87°	19
76玉—162	88° 87°	20
76玉—119	89° 88° 88° 89° 80° 80° 78° 88°	21

序号 1—18-纯橄岩；19-20含辉纯橄岩；21-斜辉辉橄岩。

*部分数据是夏林圻测定的。

三、橄榄石矿物应力特征产生的机理分析

矿物学的研究表明，镁橄榄石矿物晶体是柱状的，其中最发育的晶面是柱面（010）（图5）。在岩体侵位过程中的压应力作用下，无论是新结晶或是塑性变形重结晶的橄榄石都将服从于吉布斯（Gibbs）的热动力学理论，即最稳定的结晶方位与最大主应力垂直的平面上的化学位能减至最小值。因此在边界条件是压应力时，如果橄榄石颗粒对应力方向不合适，那么首先引起矿物晶面滚动，直到柱面（010）与边界条件一致时（包括应力小，时间长的条件）完全优选为止，即使橄榄石长轴（最大弹性模量轴）倾向于垂直挤压力轴排列，从而造成了橄榄石矿物晶体方位定向性。

关于橄榄石矿物晶体的带状和波状消光现象，被认为是岩体在侵位过程中，当定向矿物经过塑性体阶段受剪应力的作用时，橄榄石矿物晶体产生晶架错动的结果。显微镜下所见到

的是“平行”带状消光，而波状消光不明显；根据王嘉荫教授的研究成果〔2〕，认为这种形变是以面滑移为主，并且形变程度较强。具塑性特点的橄榄石矿物晶体在侵位过程中受应力作用情况可作如下分析，为叙述方便使用图6表示，图中M为岩体中具塑性特点的橄榄石矿物单晶体，当晶体M向A方向（即侵位方向）移动时，因为塑性晶体M内的各质点（1、2……）与固体壁（围岩边界）的距离（Y）不同，造成摩擦力大小不同的差异，使在垂直于移动方向上的各个质点（1、2……）间产生了速度u梯度（ $\frac{au}{ay}$ ），而形成一种剪应力（

τ ）。根据牛顿粘性定律，剪应力 $\tau = \mu \frac{au}{ay}$ （其中 μ 为粘度）。这种剪应力（ τ ）使具塑性的晶

体产生晶架错位（滑移现象），形成了橄榄石矿物晶体的带状消光现象。

橄榄石矿物的塑性晶体M，除了上述的剪应力（ τ ）作用外，还受来自固体壁（围岩）强大挤压应力的作用。众所周知，矿物都是靠化学键力结合的（即质点间的引力和斥力），这种力使其质点间保持一定的距离。这种距离的大小决定了矿物的物理性质（密度、折光率……等）及矿物的种类。同时化学键力也受外部力场的影响，造成晶体内质点间距的缩小（晶体的压缩性）和扩展（晶体的延展性）〔3〕，使矿物晶体发生形变，即所谓的同质多象现象。例如石英为一轴晶矿物，当受这种压应力作用时，可以产生光率体变形，由二轴旋转椭球体（一轴晶）变为三轴旋转球体（二轴晶）的光率体。又可以因为应力大小不同，而使其2V值大小发生相应的变化。由此，笔者推理本岩体中镁橄榄石矿物晶体的2V值异常，同样是这种压应力作用的结果。

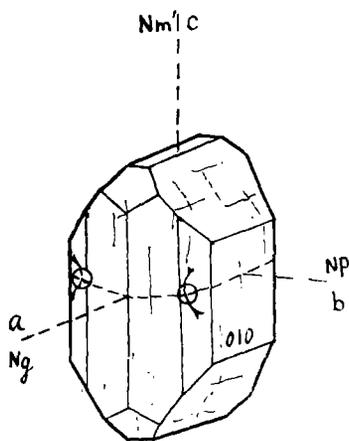


图5 镁橄榄石矿物晶体形态及光率体
主轴与结晶轴关系示意图

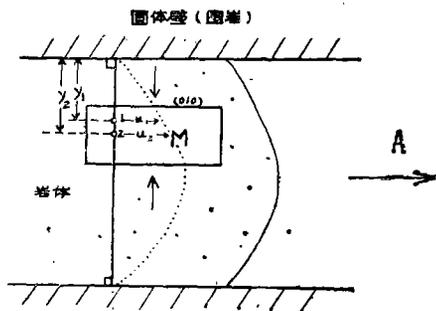


图6 岩体受单向推力向A方向侵位移时，橄榄石矿物晶体M的应力特点，及其内部质点间产生速度梯度机理示意图

Y—质点与围岩（固体壁）距离

u—质点运移速度

A—岩体运移方向

注：岩体是由具塑性特点的矿物（橄榄石）
晶体组成

王嘉荫教授曾做过这样的实验，即在石英二轴晶光轴面方向上垂直晶体Z轴（Ne）加压，当加压为1公斤/毫米²时，2V = 5°54′；当加压为6公斤/毫米²时，2E = 13°54′（E ≈ V）。

〔2〕。从这个实验结果可以得出,石英 2V 值大小与其所受应力大小成正相关关系。其产生的机理可作如下分析:石英二轴晶正光性矿物的 2V 值与光率体主轴折光率值有关系式:

$$\tan V = \frac{N^m - N^p}{\sqrt{N^g - N^m}} \dots\dots (1), \text{ 石英原来本是一轴晶矿物,光率体为二轴旋转球体}$$

体,由于柱面(1010)上受压力作用,而使石英晶体在垂直柱面(1010)方向(即No方向)上的质点间距缩小,产生了晶体的压缩性〔3〕,使晶体在该方向上的密度(D)增大。又据

$$\text{洛伦茨-洛仑兹公式: } R = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \cdot \frac{M}{D}, \text{ 导出 } \frac{RD}{M} = \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2} \quad D = \frac{M}{R} \cdot \frac{n^2 - 1}{n^2 + 2}$$

$$\dots\dots (2), \text{ 对此公式(2)进行微分得: } \Delta D = \frac{M}{R} \cdot \frac{6n}{(n^2 + 2)^2} \Delta n \dots\dots (3), \text{ 从}$$

(3)式中清楚看出,密度的变化(ΔD)与折光率的变化(Δn)为正相关关系。因此,在密度增大的方向上,就会产生一个新的折光率增大的No值——Nm,可使原二轴(No, Ne)旋转椭球体转变为三轴(Np——相当于原来的No, Nm——相当于新的折光率增大的No, Ng——相当于原来的Ne)旋转椭球体的光率体。所以当压力 P2 > P1 时,则据上述理论就应有光率体主轴折光率值中的 Nm2 > Nm1。因此,分式 $\frac{N^m_2 - N^p}{N^g - N^m_2} > \frac{N^m_1 - N^p}{N^g - N^m_1}$ 成立,利用公式(1)求2V值。不难得出,石英的2V值大小同压应力大小成正相关关系的结论。

同理可证,镁橄榄石矿物晶体的2V值异常,也是压应力作用使其光率体形变的结果。镁橄榄石的矿物晶形(图5)为柱状,其中柱面(010)最为发育,在岩体侵位过程中其晶体方位定向排列性质也毫无例外地服从于吉布斯热动力学理论。因此,挤压应力是作用在柱面(010)上(图6),即挤压应力轴垂直柱面(010)〔平行于晶体b(Np)轴〕(图5)。压应力作用的结果使镁橄榄石矿物晶体的b(Np)轴方向产生压缩性,密度增大,相应的光率体主轴Np折光率值增大。如果有压力 P2 > P1 时,则相应应有光率体主轴折光率值 Np2 > Np1。因此,分式 $\frac{N^m - N^p_2}{N^g - N^m} < \frac{N^m - N^p_1}{N^g - N^m}$ 成立,利用公式(1)求2V值,可以得出,本岩体中的镁橄榄石矿物2V值大小与压应力大小成反相关关系。所以,在实际测量中,那些应力特征明显的橄榄石矿物颗粒2V值偏小,而不具和具不明显应力特征者2V值多接近于88°左右。

四、地质意义

综上所述,镁橄榄石矿物晶体的应力特征,反映了岩体在侵位运移过程中,经受了挤压应力和剪应力的作用,橄榄石矿物的2V值异常和带状消光就是这种应力作用在矿物晶体内部的反映。因此,首先应该指出,在这类岩体中利用2V值来确定橄榄石矿物成分属时,应特别注意应力作用的影响。

根据上述分析,应力场特点是岩体受一单向力作用发生侵位运移,产生的主要应力是:围岩的挤压应力和前进中岩体内各质点间的速度梯度引起的剪应力(图6)。并且说明了橄

橄榄石塑性晶体在这种应力场中生成的应力特征机理。因此,可根据橄榄石矿物应力特征推断本岩体在达到目前侵位之前已经历过具塑性特点的固态阶段。当岩体达到目前侵位时,推动岩体前进的单向力显然已经消失,而岩体运移停止,这时岩体与围岩的关系表现为相对静止状态,其应力场特点是围岩的静压力为主。所以,这时残存在橄榄石矿物晶体间隙中的熔融体所生成的橄榄石矿物晶体不具有上述应力特征。

另外,岩体地质概述中已叙述了本岩体在成分上都是北酸南基,表现的是上盘岩石类型含硅酸较高,而下盘含硅酸较低,显示了层状或似层状岩体的岩浆垂直重力分异特点。这种岩浆分异特点与现在岩体都是向北倾的单斜产状不相适应。同样不相适应的现象,在北祁连山岩带的大小超基性岩体中几乎都存在(明显的或不明显的)。说明这种岩浆分异作用是在到达目前侵位以前已经完成并固结。又据共生矿物(橄榄石和顽辉石)对Mg和Fe的分配率(表3—3)估算出的成岩温度在 980°C — 1140°C 之间〔5〕,与目前所知的该岩体与围岩接触蚀变(蛇纹石化、绿泥石化等)温度在 500°C 以下〔4〕相比,也能说明岩体达到目前侵位时,岩浆早已凝固成岩和温度大大降低之后了。因此,结合橄榄石矿物应力特征产生机理的讨论,笔者认为,玉石沟含铬超基性岩体的侵位方式应是冷侵位。

本文主要是综合研究前人资料为基础,结合大量的岩石薄片观察和测试工作而成。在工作中得到李先梓、徐培苍等同志的帮助指导,并对文稿提出了宝贵的修改补充意见,这里仅表谢意。

参 考 资 料

- [1] 地科院矿床所,1977,祁连山中西段铬铁矿床成矿条件及找矿方向研究。地质矿产研究,第4期。
- [2] 王嘉荫,1978,应力矿物概论。地质出版社。
- [3] H·G·F·温克勒,1960,晶体构造和晶体性质。
- [4] 曹荣龙,1979,甘肃大道尔吉含铬岩体接触带和围岩捕虏体变质作用特征及初步模拟实验。成岩成矿实验。科学出版社。
- [5] КОНСТИТУЦИЯ И СВОЙСТВА МИНЕРАЛОВ,1974,8.С.138—144.

(上接56页)几乎完全受北西向主干扭压性断裂的低序次张性或张扭性断裂的控制是完全一致的”。“根据ZK14号钻孔资料:该孔抽水前水温在 44°C ,终孔125.87米时,水温为 48.5°C ,按照地热率推算,热水循环深度在1000—1500米左右”(引自郝景华工程师“刚察大寺”报告)。我们经过其它资料分析,认为这样深度的热水环循带也附合本区其它热矿泉的情况。其二,是花岗岩余热将上部含水层中的地下水转化成热水沿断裂上升而形成的。根据本区的两个温泉资料看,这类温泉温度仅达 $7-9^{\circ}\text{C}$ 。

文中参考了我队有关同志的资料,借此深表谢意。

(参 考 资 料 略)