

东昆仑东段东昆中构造带韧性剪切作用及其地质意义

李小兵¹ 裴先治^{1,2} 刘成军¹ 陈有炘¹ 李瑞保¹
李佐臣¹ 陈国超¹ 魏刚锋¹

(1.长安大学地球科学与资源学院,陕西西安710054;
2.长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室,陕西西安710054)

摘要:东昆仑东段东昆中构造带经历了多期(次)构造事件,现今保留了复杂多样的构造样式。哈图沟、清水泉—塔妥和沟里等地区构造变形十分强烈,且发育有呈NW-SEE展布的韧性剪切带。通过野外调研及显微构造研究,对东昆中构造带几何学、运动学及动力学等进行了分析,并通过费氏台和EBSD技术对其进行石英C轴组构分析后认为该剪切带为一压-扭性构造界面,且早期为左旋逆冲,晚期为右旋走滑,变形温度为400~550℃。对剪切带内的石英亚颗粒及动态重结晶粒度测量计算出研究区内韧性剪切带古应力值约为153.791 MPa。哈图沟牦牛山组变形砾岩(4个测点)有限应变测量结果显示,越靠近东昆中断裂带砾石Flinn指数、应变程度、罗德系数(绝对值)越大,且Flinn指数均大于1,属拉伸变形。结合区域地质资料,认为东昆仑东段东昆中韧性剪切带形成于晚海西—印支期。

关键词:韧性剪切带;石英C轴岩组;有限应变测量;Flinn指数;东昆中构造带

中图分类号:P548;P534 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2014)02-0419-18

韧性剪切带可以形成于各种构造环境,如造山前的隆-滑构造^[1]、造山期的逆冲推覆韧性剪切带^[2]、造山后的伸展型韧性剪切带以及许多走滑型韧性剪切带。大量研究表明,不同构造环境、不同构造层次的剪切带具有不同的构造特征。根据变形特征及变形环境,剪切带可以分为脆性剪切带、韧性剪切带、半脆性剪切带和脆-韧性剪切带4种类型。其中,形成于韧性环境中的剪切带即为韧性剪切带,一般发育于中部至下部地壳中,许多大的地质体边界都存在大型韧性剪切带^[3]。因此,韧性剪切带已经成为地壳运动规律和大陆造山带以及岩石圈变形构造动力学研究的重要内容。

东昆中断裂带是一条长达1000 km的巨型构造带,在其两侧发育断续分布的韧性剪切带,近年来

关于东昆中构造带内蛇绿岩及两侧的岩浆岩报道较多^[4-13],但对构造带内韧性剪切作用鲜有报道。笔者对研究区内哈图沟—得福胜—清水泉一线的韧性剪切带详细研究后,确认了多种典型的宏观和微观韧性剪切构造,发现东昆中构造带内存在倾伏角变化较大的两组拉伸线理及不同性质的韧性剪切构造样式,并且在得福胜地区有晚海西期的哈拉尕吐花岗岩体卷入韧性剪切带内,通过解析哈图沟—得福胜—清水地区韧性剪切带内的构造特征,了解东昆中构造带在晚海西期—印支期的构造演化史具有非常重要的地质意义。

1 地质概况

东昆中断裂带是分割东昆北构造带与东昆南

收稿日期:2013-05-30;改回日期:2013-12-31

基金项目:国家自然科学基金项目(41172186、40972136);中央高校基本科研业务费专项资金项目(CHD2011TD020、2013G1271091)、青海省国土资源厅-中国铝业公司公益性区域地质矿产调查基金项目(中铝基金200801)联合资助。

作者简介:李小兵,男,1986年生,博士,构造地质学专业;E-mail:644780161@qq.com。

通讯作者:裴先治,男,1963年生,博士,教授,从事构造地质学和区域地质学研究;E-mail:peixzh@263.net。

构造带的一条区域性巨型构造变形带(图1),因沿该断裂带断续出露有较多的蛇绿岩(塔妥、清水泉、乌妥、可日、巴隆等蛇绿岩带),所以常常称之为东昆中缝合带或东昆中蛇绿混杂岩带。古凤宝^[5]和解玉月^[6]综合有关年龄资料和蛇绿岩的分布特点提出沿东昆中缝合带存在新元古代、早古生代和早二叠世3期蛇绿岩。东昆中缝合带在航磁图上表现为条带状、串珠状和线状强异常带,并且东昆中缝合带通过处存在明显的异常磁力梯级带^[14],为此人们一般将之作为一个重要的构造单元分界线^[15]。东昆中缝合带北侧发育有加里东期和海西—印支期两期侵入岩,包括辉长岩、闪长岩、花岗闪长岩、二长花岗岩和钾长花岗岩等,其中以晚海西—印支期岩体为主

体;断裂带南侧出露大面积前寒武纪基底变质岩系和不同期次的侵入岩,对于东昆中缝合带南北两侧地质体的研究已有大量报道^[16-22]。殷鸿福等^[23,24]认为东昆中缝合带具有多旋回碰撞造山作用过程。王国灿等^[8]通过1:25万“冬给措纳湖幅”区域地质调查研究,对东昆中缝合带及南北两侧区域进行了较详细的物质组成研究和构造分析,认为东昆中缝合带并非一简单的单旋回碰撞缝合带,而是一多旋回复合的碰撞缝合带。

2 研究区内韧性剪切带构造特征

2.1 韧性剪切带宏观构造几何学特征

区内韧性剪切带沿东昆中缝合带出露,空间上

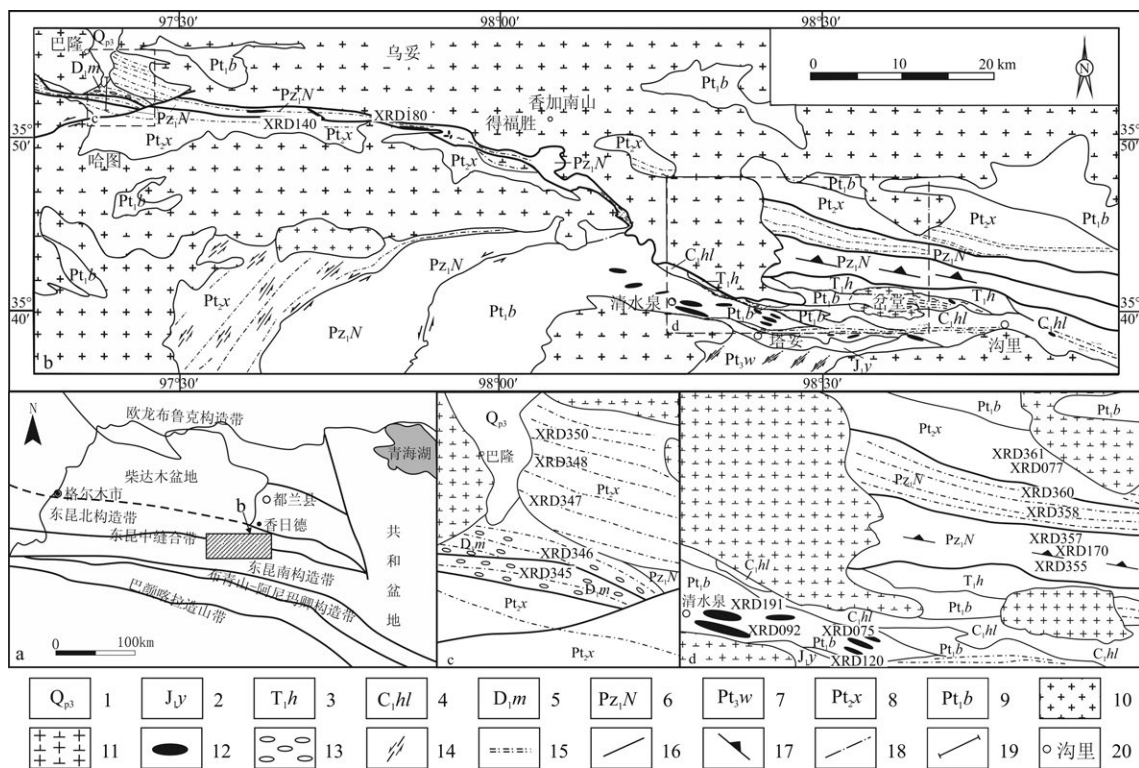


图1 东昆仑东段香日德地区地质略图(据①修改)

1—第四系;2—下侏罗统羊曲组;3—下三叠统洪水川组;4—下石炭统哈拉鄂勒组;5—下泥盆统牦牛山组;6—下古生界纳赤台岩群;7—新元古界万宝沟岩群;8—中元古界小庙岩组;9—古元古界白沙河岩组;10—花岗岩;11—花岗闪长岩、闪长岩;12—蛇绿岩岩块;13—变形砾岩;14—走滑运动;15—韧性剪切变形带;16—东昆中缝合带主干断裂;17—俯冲运动及方向;18—剪切界面;19—剖面线;20—地名

Fig. 1 Geological sketch map of Xiangride area in the eastern segment of Central Kunlun(modified after ①)

1—Quaternary; 2—Lower Jurassic Yangqu Formation; 3—Lower Triassic Hongshuichuan Formation; 4—Lower carboniferous Halaguole Formation; 5—Lower Triassic Maoniushan Formation; 6—Lower Palaeozoic Najital Group; 7—Neoproterozoic Wanbaogou Group; 8—Mesoproterozoic Xiaomiao Formation; 9—Paleoproterozoic Baishahe Formation; 10—Granite; 11—Granodiorite, diorite; 12—Ophiolitic rock; 13—Deformation of conglomerate; 14—Strike-slip movement; 15—Ductile shear zone; 16—Backbone fracture of fault zone in east Kunlun; 17—Underthrust movement and its orientation; 18—Shear interface; 19—Section line; 20—Geographic name

①中国地质大学(武汉)地质调查研究院. 1:250000冬给措纳湖幅区域地质调查报告, 2003.

呈NW-SE向断续展布,各个地区延伸长度累计大于40 km,其中哈图沟与沟里两地的韧性剪切带出露最宽,达10 km以上,一般宽度为2 km。卷入韧性剪切带的岩石多发生糜棱岩化,且糜棱面理总体北倾,优势产状为 $17^{\circ}\angle 78^{\circ}$ 。哈图沟、乌妥、得福胜、清水泉—塔妥煤矿、沟里等地韧性剪切作用发育较好。哈图沟内卷入韧性剪切带的地层主要为分布于东昆中断裂带两侧的前寒武纪变质岩及泥盆纪地层,其中前寒武纪地层内发育不对称褶皱及拉伸线理等,泥盆系牦牛山组内发育有强变形砾岩、拉伸线理及不对称褶皱等;清水泉—塔妥煤矿一带韧性剪切变形发育在前寒武纪地层内,可见近水平的拉伸线理及不对称褶皱;沟里地区主要发育有陡倾及近水平的拉伸线理、不对称褶皱(呈S型或Z型)、S-C面理、旋转的碎斑及构造透镜体等;另外在得福胜地区晚海西—印支期花岗闪长岩体也卷入了韧性剪切带,出露有透入性面理及暗色包体的透镜体化及旋转。区内韧性剪切带北侧变形岩石主要被后期香加南山岩体所“吞噬”,南侧主体上由于变形减弱而消失,局部被后期岩体“吞噬”。研究区内剪切带总体由线状强变形带和夹持于其间的弱应变域相间平行排列而成,宏观上构成平行线式阵列。

2.2 韧性剪切带宏观构造运动学特征

2.2.1 旋转碎斑系

旋转碎斑(Rotated porphyroblast)是韧性剪切带中较常见的构造组合,包括两部分:代表原岩的刚性残碎斑晶和指示旋转的细粒杂基^[3]。根据二者的组合形态特征,可以划分为“ σ ”型和“ δ ”型两大类^[25]。尽管指示韧性剪切带剪切方向的标志很多,但是由于韧性剪切带变形过程的复杂性,实际工作中往往很难准确地限定剪切方向,甚至常常会发现同一条韧性剪切带中发育指向相反的剪切标志。在变形岩石中,不对称旋转碎斑系被认为是判断韧性剪切带剪切方向的可靠标志^[26]。

研究区内旋转碎斑成分主要为长石残斑和石榴子石等,发育于哈图沟及清泉沟的眼球状二长花岗质糜棱岩和眼球状花岗闪长质糜棱岩中,碎斑主要为长石残斑,露头上观察长石碎斑粒径一般小于3 cm,根据碎斑拖尾指示其分别经历左旋及右旋剪切作用,其类型可分为“ δ ”与“ σ ”型碎斑,但多数呈“ σ ”型。野外观察,靠近东昆中断裂带处“ δ ”型碎斑增多

(图2-a),而相对远离东昆中断裂带的地方长石残斑则几乎全部为“ σ ”型(图2-b),这是因为越靠近东昆中断裂带岩石所受到的剪切作用越强,进而导致碎斑类型的不均匀分布。在平面上旋转碎斑分别指示了左旋和右旋两个不同期(次)构造变形,而剖面上则统一表现为逆冲构造变形的运动学特征。

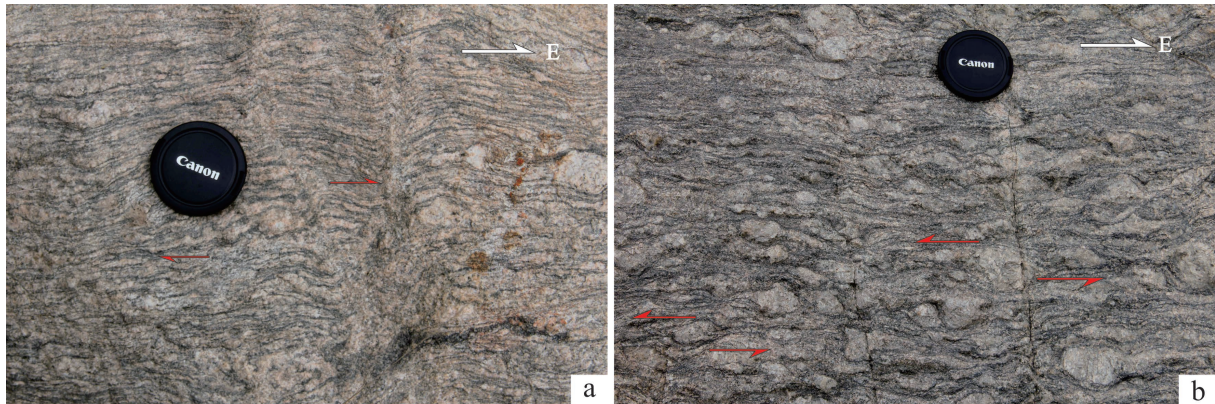
2.2.2 构造透镜体

构造透镜体(Structural lenticle)主要分布于哈图沟泥盆系牦牛山组、沟里地区的石炭系哈拉郭勒组及三叠系洪水川组中,另外在乌妥沟内也有发育。沟里地区发育有构造透镜体的地层特征为暗红黑色黑云石英片岩夹少量白—黄白色大理岩,黑云石英片岩中发育大量大理岩的透镜体,大理岩透镜体可分为白色大理岩、白云质大理岩(发育刀砍纹)、紫红色大理岩等,据不对称旋转透镜体拖尾指示其受左旋剪切作用控制;哈图沟地区泥盆系牦牛山组为一套磨拉石建造,其内部砾石成分复杂,主要有大理岩、基性岩、花岗岩、石英岩等透镜体,大小变化甚巨,小者仅为1~2 cm,大者可达20 cm以上,平面上同样显示受左旋及右旋两期(次)剪切作用的控制,剖面上则为逆冲作用;科科儿塔地区绿片岩内发育有显示逆冲作用的石英透镜体,因其位于断裂带中,局部石英透镜体被拉成长条状(图2-c);得福胜地区印支期花岗闪长质片麻岩内暗色闪长质包体强烈透镜化,并发生旋转,平面上指示左旋及右旋剪切,剖面上则显示由北往南的逆冲,由于后期构造作用影响,使得福胜花岗闪长岩质片麻岩局部地段面理向南陡倾从而显示滑脱构造假象。

2.2.3 拉伸线理

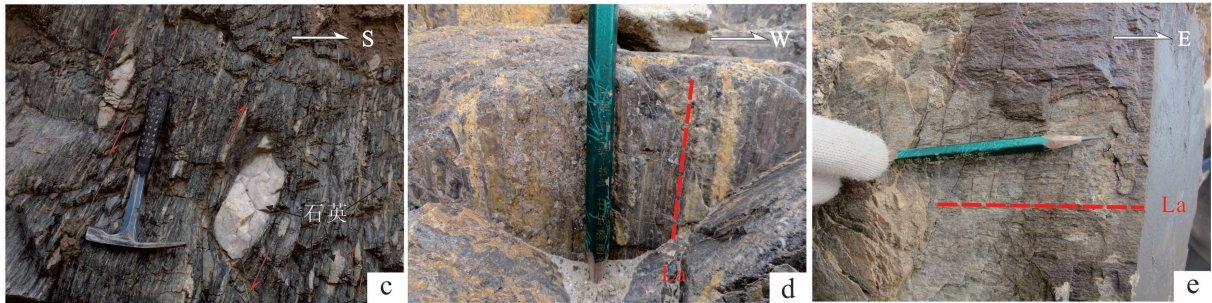
拉伸线理(Stretching lineation)是指岩体中反复的或透入性线状构造,往往伴随着变形和变质作用的发生而出现^[27]。传统上假定拉伸线理(La)指示“运动”方向,因此具有类似韧性滑动擦痕(Lc)的运动学意义^[28,29]。

东昆中构造带韧性剪切带内拉伸线理主要表现为拉长的长英质集合体和暗色矿物定向生长条带。拉伸线理可分为两组:其中一组陡倾,在哈图沟牦牛山组变复成分砾岩、粉砂岩(图2-d)、小庙岩组的云英质片岩及乌妥沟小庙岩组云英质片岩中较为发育,另外在沟里小庙岩组内的绿片岩也可见到,拉伸线理倾伏角一般大于 50° ,北西、南东向倾



a-眼球状花岗质糜棱岩内 δ 型的旋转碎斑指示右旋剪切作用

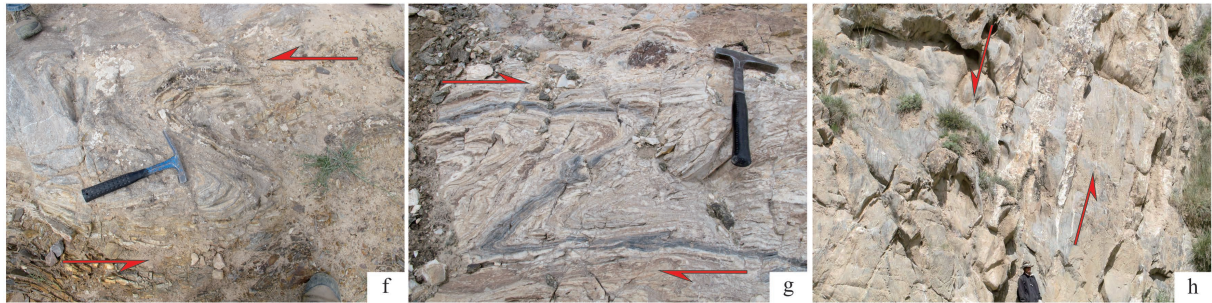
b-眼球状花岗质糜棱岩内 σ 型的旋转碎斑指示左旋剪切作用



c- σ 型的旋转透镜体指示逆冲剪切作用

d-钙质变砂岩内发育陡倾拉伸线理

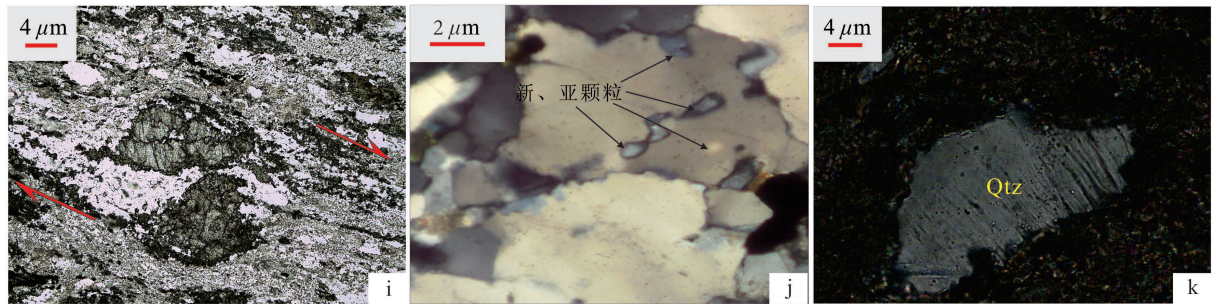
e-石英片岩内发育近水平拉伸线理



f-指示左旋剪切作用的长英质片岩夹大理岩的不对称褶皱

g-指示右旋剪切作用的条带状灰岩不对称褶皱

h-花岗闪长质片麻岩内显示滑脱假象的长英质脉体不对称褶皱



i-指示右旋剪切作用的碳酸盐岩 σ 型的旋转碎斑 偏光 (-)

j-同一石英颗粒内的新、亚颗粒 偏光 (-)

k-呈针状的石英变形纹偏光 (+)

图2 东昆仑东段东昆中韧性剪切构造特征

Fig.2 Ductile shear structural features in the eastern segment of Central Kunlun

伏,优势产状为 $127^{\circ}\angle 50^{\circ}$ 和 $343^{\circ}\angle 64^{\circ}$,其与面理倾向的夹角变化较大;另一组则缓倾,发育于科科尔塔白沙河岩组陡倾的云英质片岩及沟里小庙岩组陡倾的石英片岩中(图2-e),倾伏角一般小于 40° ,近东、西向倾伏,优势产状为 $260^{\circ}\angle 25^{\circ}$ 和 $102^{\circ}\angle 9^{\circ}$ (图3)。野外观测发现,近陡倾拉伸线理倾伏向与所在片理面倾向并不平行,根据北倾面理上发育的向东侧伏的拉伸线理,南倾面理上发育的向西侧伏的拉伸线理,结合区域地质构造背景,笔者认为,东昆南陆块与东昆北陆块间为斜向俯冲碰撞(左旋俯冲),北倾面理上发育的向东侧伏的拉伸线理与南倾面理上发育的向西侧伏的拉伸线理应为逆冲阶段形成的剪切褶皱的两翼(图4)。

2.2.4 不对称褶皱

不对称褶皱(asymmetrical fold)是指两翼不等长褶皱的中面与轴面互相不垂直,以轴面为标志面褶皱两翼不呈镜像对称的褶皱。在一般情况下,褶皱一旦形成,总是不对称地发展,这种褶皱的不对称性可用以推断剪切作用的方向。

东昆中韧性剪切带内不对称褶皱主要表现为早期片理和片麻理的褶皱变形,褶皱枢纽同线理一样分为两组,即枢纽陡倾与缓倾(图3)。与拉伸线理相比,两组枢纽发育更为广泛。在哈图沟昆中断裂带两侧地层内均发育有不对称褶皱,主要为南段的花岗质糜棱岩,中部的泥盆系牦牛山组变钙质石英砂岩、变砂岩、变复成分砾岩,北部小庙岩组的云

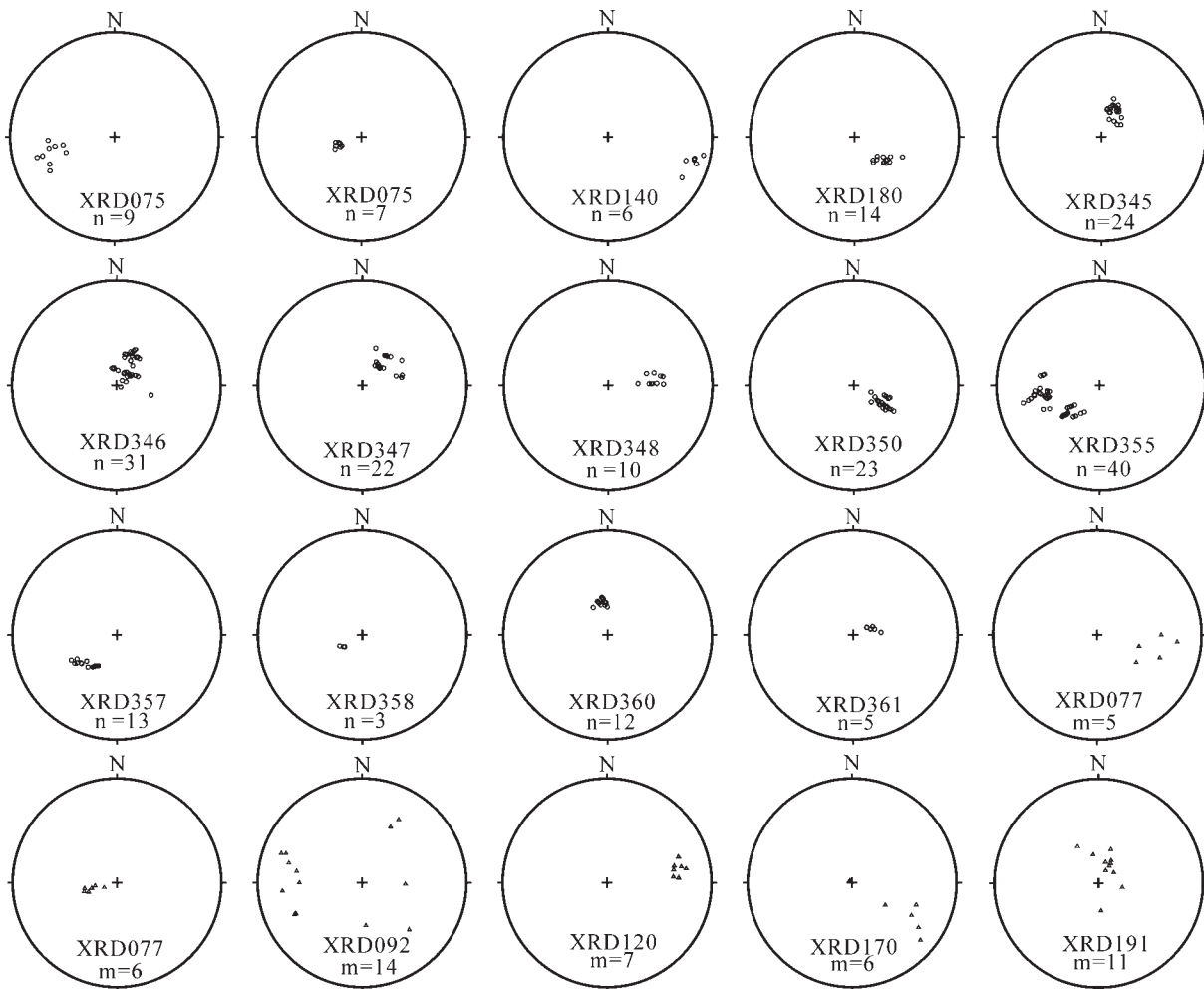


图3 东昆仑东段东昆中构造带线理产状投影图

n—拉伸线理测量数量; m—褶皱枢纽测量数量

Fig.3 Lination projection diagram of the eastern segment of Central Kunlun tectonic belt

n—Measurement quantity of stretching lineation; m—Measurement quantity of hinge of fold

英质片岩等,平面上主体显示左旋剪切作用(图2-f),局部地段可见右旋剪切作用。剖面上则统一显示为由北向南的逆冲;清水泉—塔妥一带白沙河岩组内大理岩、云英质片岩及绿片岩等均发育有不对称褶皱,平面上主体表现为左旋剪切,剖面上显示逆冲;沟里地区不对称褶皱主要发育于白沙河岩组大理岩、小庙岩组云英质片岩及绿片岩中,平面上主体指示左旋剪切,剖面上为逆冲;在巴隆地区清泉沟绿片岩内可见到平面上主体显示右旋剪切的不对称褶皱(图2-g),清水泉白沙河岩组大理岩中也发育右旋剪切的不对称褶皱。据枢纽产状可将其分为两组,其中陡倾枢纽的优势产状为 $110^{\circ}\angle 46^{\circ}$ 与 $255^{\circ}\angle 70^{\circ}$,缓倾枢纽优势产状为 $84^{\circ}\angle 23^{\circ}$ 和 $291^{\circ}\angle 16^{\circ}$ 。根据不对称褶皱的剪切指示可以判断出缓倾枢纽是由东昆南陆块向东昆北陆块的俯冲所产生,但未见到明显的鞘褶皱;而陡倾枢纽则是由于后期两陆块碰撞后近东西走向滑作用造成的。另外,在得福胜地区的花岗闪长质片麻岩内可见到朝南陡倾的片麻理内发育有显示滑脱构造的假象,结合区域地质背景分析,笔者认为这是由于后期构造作用

使片麻理倾向发生“颠倒”变化,使早期显示逆冲的北倾片麻理南倾,从而显示出出现今朝南倾的片麻理面上发育有滑脱构造的假象(图2-h)。

2.3 韧性剪切带内显微构造特征

岩石薄片下可见到的显微构造现象主要有:旋转碎斑、亚颗粒、构造重结晶、变形纹、应力双晶等。

旋转碎斑:主要发育在哈图沟、清水泉及沟里等地区的片麻状花岗岩及长英质片岩中,碎斑主要为长石及少量的石英、石榴子石等。哈图沟所采样品在镜下可见绿泥石旋转碎斑并发育由动态重结晶物质组成的具单斜对称的结晶尾(图2-i,垂直片理顺走向切片),指示右旋剪切,同一薄片下还可见到与之相反指向的旋转碎斑;哈图沟泥盆系牦牛山组变形砾岩在镜下可看到旋转的二次石英碎斑,应属多期次构造变形产物,但拖尾指示右旋剪切;清水泉地区的浅灰绿色绢云绿泥石英片岩内发育有绿泥石旋转碎斑分别指示左旋及右旋剪切,以右旋碎斑为主体,碎斑主要呈“ σ ”型(垂直片理顺走向切片)。

亚颗粒:在研究区所采样品内较为发育,石英及长石矿物中均可见到,但绝大多数出现在石英颗粒中,长石内偶尔可见。亚颗粒经后期构造改造作用,部分已形成新的颗粒(图2-j),经测量,区内亚颗粒平均粒径约为 $1.2\mu\text{m}$ 。

构造重结晶:区内只有在哈图沟一带所采样品可看到明显的构造重结晶,石英颗粒多为静态重结晶,在细小颗粒中可见部分动态重结晶现象,另外在哈图沟变钙质石英砂岩薄片内发育有两组粒度截然不同的石英颗粒,二者定向方位基本一致,应属于同一构造作用下不同变形域的产物。

机械双晶:主要发育在沟里及清水泉等地区,沟里地区早古生代纳赤台岩群内斜长角闪岩发育有斜长石的应力双晶,双晶平滑密集分布于颗粒内部,由于后期构造作用发生扭折现象;清水泉地区镜下可见到后期的碳酸盐岩脉体中发育一组双晶,双晶纹平滑且较粗,少部分发生弯曲,另外,斜长石中也发育一组双晶,双晶纹较为细密,也有弯曲,表现断续,分布具有局部化,常发生尖灭或宽度与长度有所改变,各条纹厚度差异较大。

变形纹:区域内各个地方都较常见,主要发育在石英及长石颗粒内部,且不切穿颗粒,细密狭窄,部分由于后期构造作用发生弯曲,另外在清水泉石

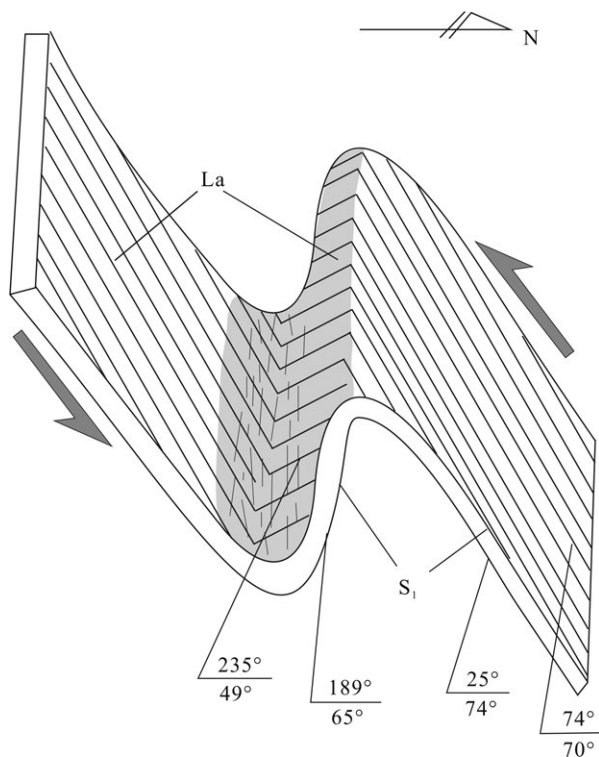


图4 东昆仑东段东昆中韧性剪切带内线理与面理产状示意图
Fig.4 Sketch map showing lineation and foliation in the eastern segment of Central Kunlun

英片岩中的石英颗粒内单条变形纹在矿物颗粒内部表现为似针状的头大尖细的现象(图2-k)。

压力影:区内较少见,只有个别样品发育有黄铁矿的压力影,“核部”为黄铁矿,“影部”为石英,影区未见明显旋转,不易确定剪切方向,此外在哈图沟变钙质砂岩内还可见到暗色矿物四个角都发育有似石英的动态重结晶影区,代表了两期不同剪切指向的构造作用产物。

通过镜下对定向薄片(平行走向,垂直面理切片)观察,发现研究区内岩石显微构造与宏观构造现象所指示的运动学特征相似,即平面上受到左旋及右旋两期剪切作用的影响;除此之外,构造岩石及应力矿物中发育大量的亚颗粒、构造重结晶、机械双晶、变形纹等显微构造特征反映了区内岩石以塑性变形为主。

3 石英C轴组构分析及古应力值估算

3.1 石英C轴组构分析

石英的滑移系主要为底面滑移、菱面滑移、柱面滑移^[30],岩石在不同的温度环境下由不同的滑移系起主导作用,而不同的石英滑移系在剪切作用下会产生不同的石英晶格优选方位,导致不同的石英光轴定向排列,产生不同的石英C轴组构特征。以底面滑移为主导时石英C轴组构中光轴优选方位(LPO)形成的点极密主要位于极图边缘位置,滑移驱动温度低于400℃,以柱面滑移为主时点极密主要位于极图中心位置,滑移驱动温度在550℃以上,以菱面滑移为主时则极密位于极图边缘与中心的中间位置,滑移温度则大于400℃小于550℃。通过测量石英C轴组构中LPO的分布情况,可以获得石英滑移系的活动情况,进而推测岩石的变形温度和剪切指向。

利用费氏台对韧性剪切带内6个样品进行石英C轴组构分析,所测样品石英颗粒100~200个,最大极密(图5-a~f)分别为6.53%、10.71%、6.91%、10.28%、7.29%、8.61%。滑移系以底面<a>与菱面<a>滑移为主,部分石英颗粒为柱面<a>滑移,表明剪切带形成过程中的变形温度一般为400~550℃。石英C轴组构的点极密分布形式主要表现为斜方对称,只有1个样品(图5-b)表现为单斜对称。斜方对称一般产生于纯剪切作用下,单斜

对称产生于简单剪切作用中。因而,石英C轴组构图中斜方对称占优势的现象是岩石受到垂直于片理面压应力作用造成的,而单斜对称的样品中,点极密分布相对于XY面的偏转方向指示了岩石受到左旋剪切作用的影响,另外(图5-a、c~f)最强极密均显示为右旋剪切作用。图5-a~c样品线理产状近水平,说明剪切带平面上受到不同期(次)的左旋和右旋剪切作用影响,但主要以右旋剪切作用为主,图5-d~f样品线理产状陡倾,说明东昆中构造带剖面上表现为逆冲作用,这与野外观察的运动学特征一致。

另外,在中国地质大学(北京)地质过程与矿产资源国家重点实验室,利用EBSD(电子背散射衍射分析)技术对研究区内3个样品的石英C轴优选方位进行测试,制样要求及实验参数、过程参见《岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用》^[31],所测石英颗粒(图5-a1、c1、d1)分别为209、214、207个,最大极密为3.52%、2.74%、2.21%,且最大极密主要分布于大圆环带中间位置,从组构图中可以看出石英的滑移系为底面<a>、菱面<a>、柱面<a>滑移共同作用,变形温度为450~550℃,石英C轴组构的点极密分布形式主要表现为单斜对称,但极密主要集中于XY面附近,这是由垂直于片理面的压应力造成的。3个样品均显示为右旋剪切作用,其中图5-a1与图5-c1线理产状近水平,表示平面上的右旋走滑作用,5-d1线理产状陡倾,表示剖面上逆冲作用,可以看出EBSD与费氏台所测的石英C轴组构具有相似的剪切性质(图5-a与5-a1、5-c与5-c1、5-d与5-d1分别为同一个样)。

通过对比费氏台与EBSD测量的岩石石英C轴组构图,可以看出二者所测的石英C轴组构图均显示东昆中断裂带为一压-扭性构造带,且该构造带在剖面上以早期逆冲推覆为主,而平面上则表现为右旋剪切作用。两种方法测试结果的区别,可能是由于费氏台为人工测试,所测颗粒粒度较大,EBSD测量较细小的石英颗粒,从而显示EBSD测量的石英C轴组构图变形温度较费氏台测量的高。

3.2 古应力值估算

估算古应力值的方法有自由位错密度法、亚颗粒法、动态重结晶和变形双晶法。本文采用亚颗粒(4个)和动态重结晶(2个)法来估算古应力值,计算

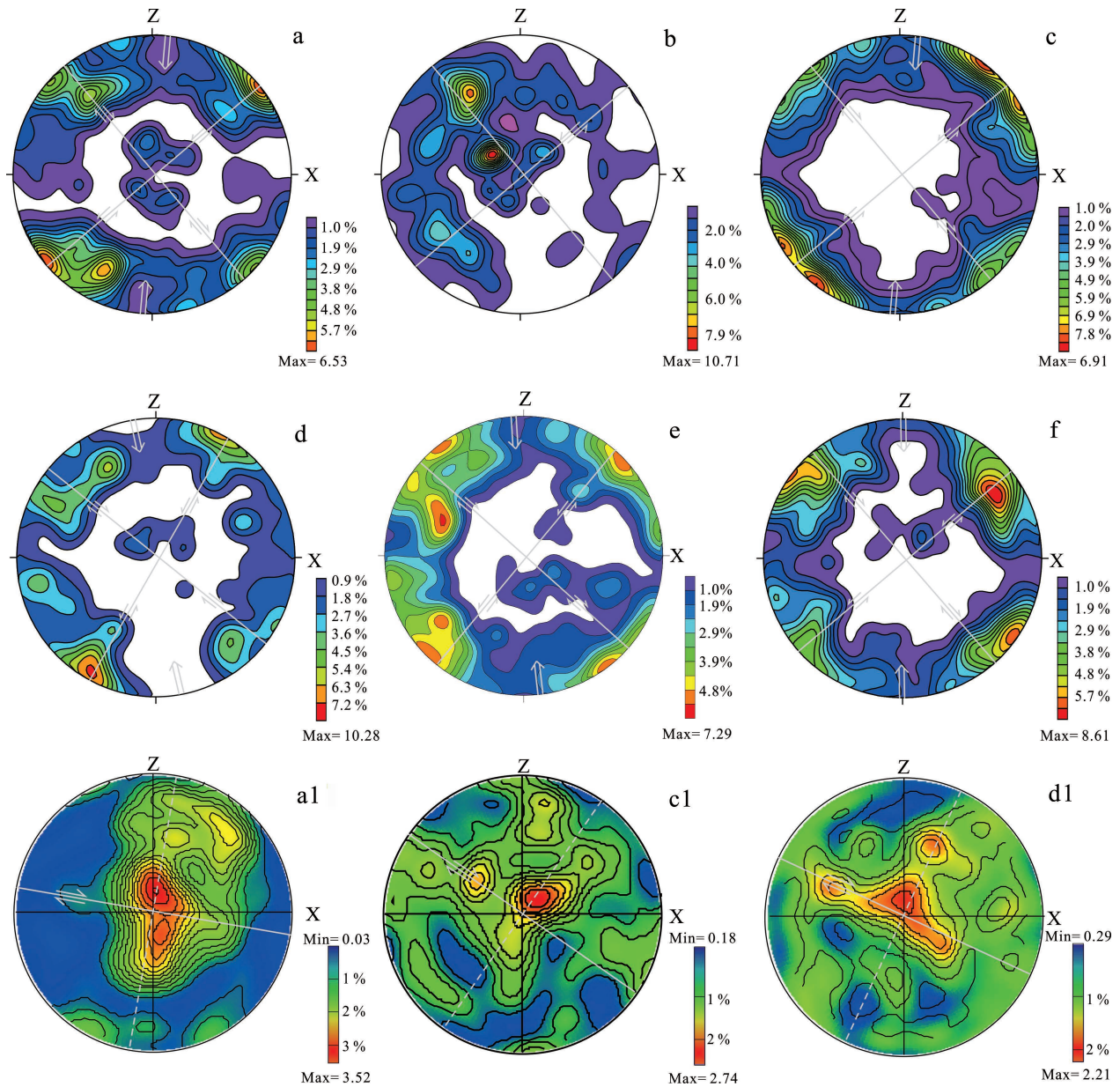


图5 东昆仑东段东昆中韧性剪切带石英C轴组构图
 采用等面积网下半球投影,X为线理方向,Z为垂直面理方向,
 a、b、c、d、e、f为费氏台测试结果,a1、c1和d1为EBSD测试结果

Fig.5 C-axis fabric stereograms of quartz in the eastern segment of Central Kunlun ductile shear zone
 Offline hemisphere projection area is adopted, X for the lineation direction, Z direction for the vertical plane,
 a, b, c, d, e, f for the Fedorov test results; a1, c1 and d1 for the EBSD test results

结果见表1。

利用石英亚颗粒大小来估算稳态流动过程中的差异应力值,二者满足 $\sigma_1 - \sigma_3 = 180 d^{-1}$, d 为亚颗粒粒径(单位 μm), d 前的系数为无量纲系数,差异应力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 单位为Mpa(据Twiss^[32])。本次研究对区

域内样品测量其亚颗粒大小,对所测数据进行算术平均值,然后利用算术平均值来估算古应力值的大小。

利用动态重结晶颗粒粒度(D)来计算岩石古应力值,采用Twiss^[32]经验公式:

表1 东昆仑东段东昆中韧性剪切带古应力值估算

Table 1 Stress value estimation table for the eastern segment of Central Kunlun ductile shear zone

样品编号	采样位置	岩石名称	测定矿物	计算方法	统计颗粒	颗粒大小/ μm	$\Delta\sigma/\text{MPa}$	平均 $\Delta\sigma/\text{MPa}$
XRD120-3	塔妥煤矿	石英片岩	石英	亚颗粒	50	0.852	211.268	153.791
XRD149-1	哈图沟	黑云斜长片麻岩	石英	亚颗粒	50	1.182	152.284	
XRD163-5	哈图沟	绿帘、绿泥石石英片岩	石英	亚颗粒	50	1.462	123.119	
XRD189-1	乌妥沟	长石石英岩	石英	亚颗粒	50	0.964	186.722	
XRD163-2	哈图沟	钙质石英细砂岩	石英	动态重结晶颗粒	200	0.012	112.520	
XRD169-2	哈图沟	黑云石英片岩	石英	动态重结晶颗粒	200	0.009	136.833	

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = 5.56D^{-0.68}$$

在测量动态重结晶颗粒粒度时,可以在照片中画一些随机线来测量,对于球形颗粒来说,每个颗粒被随机直线所截的平均距离(l)与平均粒径(D)的关系为:

$$D = 1.5l = 1.5L/n$$

式中的 L 为各随机直线的总长度, n 为被随机直线所截的颗粒数,另外在测量时最好选镜下糜棱岩化强烈、石英颗粒粒度细小且除石英外基本没有其他矿物的区段,这样计算结果就能够较准确反映韧性剪切带的变形古应力值。

古应力值基本代表了韧性剪切带最强一期构造变形的应力值,由表1可以看出不同地区或者同一地区不同位置的古应力值变化较大,可能是由于在同一韧性剪切带内发育不同的变形域,而各个变形域的构造应力值自然不同。本文采用不同地区、不同位置、不同方法估算的6个样品的平均值(153.791 MPa)作为研究区内韧性剪切带最强一期变形的古应力值。

4 韧性剪切带有限应变分析

野外选择巴隆地区哈图沟东昆中构造带北侧的牦牛山组(D_1m)变形砾石进行了有限应变分析。牦牛山组主要分布于东昆中断裂带北侧,下部为灰白色、紫红色、灰绿色砾岩和砂砾岩组成的磨拉石建造,砾石成分主要为火山岩、花岗岩、石英岩及灰岩,胶结物为泥砂质;上部由火山岩、火山碎屑岩组成,角度不整合于早古生代地层之上,现已发生强烈韧性剪切变形而被改造。格尔木一带牦牛山组底部流纹岩和上部英安岩的SHRIMP锆石U-Pb年龄为400~423 Ma^[33],表明东昆仑地区的牦牛山组形

成于晚志留世—早泥盆世。因其砾岩变形强烈,且处于东昆中断裂带附近,对其进行有限应变测量以便于了解东昆中构造带早泥盆世以后的构造变形特征。

测量有限应变的方法较多,如长短轴法、Elliott法、 θ 曲线法、 R/ρ 法、心对心法及Fry法。相比之下,“长短轴法”最简单、快捷,野外易于操作,这是Cloos^[34]和Ramsay^[35]曾先后提出的一种方法,这种方法利用原始球形或近球形标志体测量应变。

本次选择哈图沟牦牛山组(D_1m)变形砾岩的4个位置进行有限应变测量(图6,表2)。根据构造透镜体主轴、片理面及拉伸线理的关系确定XZ、XY面,直接测量变形砾岩的长短轴长度,首先采用Ramsay^[35]的长短轴法进行二维应变测算,然后再进行三维应变分析,Flinn参数($K1$)、对数Flinn参数($K2$)、应变程度(r)、自然应变系数($\bar{\epsilon}_s$)及罗德系数(v)及岩石拉伸(缩短)量(λ),结果见表2。

利用算数平均值法,即有

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Ri \quad (Ri = \frac{X}{Z} \text{ 或 } \frac{X}{Y});$$

利用 \bar{R} 计算出X:Y:Z;各系数计算过程参考郑亚东等^[36]《岩石有限应变测量及韧性剪切带》。

4.1 有限应变测量成果分析

根据算数平均法获得的应变程度 r 值X/Z比值,可以看出靠近昆中断裂带 r 值与X/Z值都高(分别为6.22和7.27),而远离断裂带时则明显降低,表明应变强度在剪切带内外呈渐变性的变化规律(图7)。

根据 K 值大小及变形特征不同将Flinn图解分成几个不同的类型:①当 $0 < K < 1$,代表压变型应变;②当 $K=1$,代表平面应变;③当 $1 < K < \infty$,代表拉

表2 哈图沟变形砾岩应变测量统计

Table 2 Statistical results of strain measurements of the deformed conglomerate in Hatu

A组 序号	X	Z	X	Y	X/Z	X/Y	X:Y:Z 三轴及 XY面产状	B组 序号	X	Z	X	Y	X/Z	X/Y	X:Y:Z 三轴及 XY面产状
1	8.00	0.90	6.50	1.00	8.89	6.50		1	8.00	2.00	21.00	5.00	4.00	4.20	
2	5.50	1.30	4.50	1.00	4.23	4.50		2	14.00	3.00	9.00	3.00	4.67	3.00	
3	1.50	0.60	12.00	1.00	2.50	12.00		3	40.00	7.00	6.00	3.50	5.71	1.71	
4	9.20	1.80	16.00	2.20	5.11	7.27		4	6.00	4.00	5.00	2.00	1.50	2.50	
5	5.50	0.50	2.40	0.60	11.00	4.00		5	13.00	6.00	32.00	6.00	2.17	5.33	
6	2.10	0.30	7.50	2.30	7.00	3.26		6	9.00	2.00	24.00	6.00	4.50	4.00	
7	5.00	0.70	5.50	0.70	7.14	7.86		7	10.00	2.00	17.00	2.00	5.00	8.50	
8	4.00	0.50	3.50	0.40	8.00	8.75		8	25.00	1.00	6.50	1.50	25.00	4.33	
9	6.50	0.40	13.00	1.80	16.25	7.22		9	23.00	4.00	10.50	2.50	5.75	4.20	
10	2.00	0.30	9.00	0.80	6.67	11.25		10	15.00	3.00	1.50	0.50	5.00	3.00	
11	2.40	0.20	18.00	3.00	12.00	6.00		11	28.00	10.00	8.50	2.00	2.80	4.25	
12	7.00	0.30	18.50	3.00	23.33	6.17		12	8.00	2.50	5.00	1.00	3.20	5.00	
13	4.80	0.80	3.60	0.50	6.00	7.20		13	17.00	4.00	5.00	1.70	4.25	2.94	
14	3.00	0.40	3.00	0.50	7.50	6.00		14	7.00	2.00	6.00	1.90	3.50	3.16	
15	4.00	0.50	3.50	1.00	8.00	3.50		15	15.00	2.00	4.70	1.50	7.50	3.13	
16	5.00	0.60	1.50	0.50	8.33	3.00		16	14.00	4.00	3.00	1.00	3.50	3.00	
17	1.80	0.60	1.50	0.30	3.00	5.00		17	22.00	7.00	3.00	0.90	3.14	3.33	
18	2.20	0.50	4.00	2.20	4.40	1.82		18	12.00	3.00	7.50	2.50	4.00	3.00	
19	3.50	0.60	4.30	0.30	5.83	14.33	7.27:1.21:1	19	11.00	2.00	4.00	1.70	5.50	2.35	5.35:1.51:1
20	3.00	0.60	10.00	2.40	5.00	4.17	X: 12°∠57°	20	19.00	5.00	4.70	1.60	3.80	2.94	X: 10°∠50°
21	3.50	0.80	2.50	0.50	4.38	5.00	Y: 104°∠1°	21	18.00	5.00	3.50	1.50	3.60	2.33	Y: 278°∠1°
22	4.50	0.80	2.50	0.80	5.63	3.13	Z: 195°∠26°	22	14.00	2.00	3.00	1.00	7.00	3.00	Z: 188°∠31°
23	2.50	0.60	5.00	0.70	4.17	7.14	XY面: 15°∠64°	23	7.00	1.00	4.00	0.90	7.00	4.44	XY面: 19°∠59°
24	1.50	0.30	6.00	1.30	5.00	4.62		24	12.00	3.00	4.50	1.00	4.00	4.50	
25	3.00	0.40	4.50	1.50	7.50	3.00		25	10.00	1.50	3.00	1.50	6.67	2.00	
26	3.50	0.60	9.00	0.80	5.83	11.25		26	14.00	2.00	1.60	0.50	7.00	3.20	
27	6.00	1.10	13.00	8.50	5.45	1.53		27	7.00	1.00	1.20	0.30	7.00	4.00	
28	8.50	1.10	7.20	1.00	7.73	7.20		28	6.00	1.00	2.00	1.10	6.00	1.82	
29	4.30	1.10	6.20	1.10	3.91	5.64		29	4.00	1.00	6.30	0.70	4.00	9.00	
30	5.80	0.80	4.50	0.80	7.25	5.63		30	3.00	0.50	7.50	1.50	6.00	5.00	
31	4.00	0.60	3.20	0.70	6.67	4.57		31	7.00	1.50	4.00	3.50	4.67	1.14	
32	11.50	1.80	7.50	2.00	6.39	3.75		32	14.00	1.00	7.00	4.00	14.00	1.75	
33	5.50	0.40	9.50	5.00	13.75	1.90		33	10.00	1.50	5.00	2.60	6.67	1.92	
34	4.30	1.00	12.50	2.00	4.30	6.25		34	5.00	1.50	5.30	2.50	3.33	2.12	
35	10.30	0.90	11.00	1.00	11.44	11.00		35	8.00	1.50	3.50	2.50	5.33	1.40	
36	7.50	1.50	11.00	1.50	5.00	7.33		36	11.00	1.50	15.00	3.00	7.33	5.00	
37	5.60	0.70	5.00	1.10	8.00	4.55		37	17.00	4.00	7.00	1.50	4.25	4.67	
38	8.40	1.10	5.00	1.00	7.64	5.00		38	12.00	5.00	11.00	2.50	2.40	4.40	
39	8.40	1.50	18.00	2.20	5.60	8.18		39	6.00	4.00	6.00	2.00	1.50	3.00	
40	6.20	1.20	13.50	3.50	5.17	3.86		40	3.50	2.00	7.00	2.00	1.75	3.50	

续表2

C组	X	Z	X	Y	X/Z	X/Y	X:Y:Z 三轴及 XY面产状	D组	X	Z	X	Y	X/Z	X/Y	X:Y:Z 三轴及 XY面产状
序号	/cm							序号	/cm						
1	11.00	2.50	4.00	1.00	4.40	4.00		1	11.60	0.60	11.90	2.20	19.33	5.41	
2	8.00	2.00	12.00	5.00	4.00	2.40		2	4.80	1.00	4.00	1.20	4.80	3.33	
3	8.00	1.00	17.00	4.00	8.00	4.25		3	3.50	0.50	3.50	0.80	7.00	4.38	
4	17.00	3.00	11.00	2.00	5.67	5.50		4	7.00	1.20	2.00	0.80	5.83	2.50	
5	11.50	2.00	9.00	2.00	5.75	4.50		5	12.00	2.00	6.00	2.00	6.00	3.00	
6	10.50	2.00	2.50	1.00	5.25	2.50		6	13.00	4.00	15.00	1.00	3.25	15.00	
7	7.00	1.50	3.00	1.00	4.67	3.00		7	3.50	1.70	4.00	1.50	2.06	2.67	
8	12.50	3.00	5.00	1.00	4.17	5.00		8	3.50	1.00	2.00	0.80	3.50	2.50	
9	4.00	1.50	8.50	3.00	2.67	2.83		9	7.00	0.80	4.00	1.80	8.75	2.22	
10	12.00	1.00	11.50	3.50	12.00	3.29		10	11.00	2.00	3.00	1.00	5.50	3.00	
11	14.00	5.00	4.00	1.50	2.80	2.67		11	4.50	2.50	4.50	1.80	1.80	2.50	
12	12.00	1.00	4.50	1.00	12.00	4.50		12	11.00	10.00	2.50	1.00	1.10	2.50	
13	14.00	5.00	2.00	1.00	2.80	2.00		13	6.50	1.30	3.50	1.20	5.00	2.92	
14	9.50	2.50	2.00	0.50	3.80	4.00		14	6.50	1.00	2.50	0.80	6.50	3.13	
15	5.00	3.00	4.00	1.00	1.67	4.00		15	4.00	1.50	1.50	0.50	2.67	3.00	
16	10.50	1.00	4.00	2.00	10.50	2.00		16	6.00	1.20	3.00	1.20	5.00	2.50	
17	8.00	1.00	10.00	2.00	8.00	5.00		17	13.00	3.00	2.20	0.80	4.33	2.75	
18	3.00	1.00	7.00	2.00	3.00	3.50		18	7.00	4.00	1.50	0.70	1.75	2.14	
19	5.00	0.50	6.50	2.00	10.00	3.25	6.42 : 1.76 : 1	19	2.50	1.00	7.00	1.50	2.50	4.67	5.46 : 1.26 : 1
20	4.00	0.50	9.00	3.00	8.00	3.00	X: 13°∠58°	20	3.00	1.20	3.00	0.80	2.50	3.75	X: 23°∠60°
21	3.00	0.50	5.00	1.50	6.00	3.33	Y: 110°∠5°	21	7.00	0.70	3.00	1.10	10.00	2.73	Y: 278°∠8°
22	10.00	1.00	4.00	1.00	10.00	4.00	Z: 194°∠30°	22	6.00	1.40	3.50	1.10	4.29	3.18	Z: 185°∠22°
23	7.00	1.50	16.00	3.00	4.67	5.33	XY面: 14°∠60°	23	4.00	0.70	3.00	0.70	5.71	4.29	XY面: 29°∠68°
24	4.00	0.50	5.00	1.00	8.00	5.00		24	6.00	1.70	16.00	3.00	3.53	5.33	
25	3.00	1.00	8.00	2.00	3.00	4.00		25	5.00	0.70	3.50	0.70	7.14	5.00	
26	2.50	0.50	3.50	2.00	5.00	1.75		26	12.00	2.50	8.00	1.00	4.80	8.00	
27	5.00	1.50	4.50	1.50	3.33	3.00		27	10.00	0.90	4.00	0.70	11.11	5.71	
28	8.00	1.00	5.00	1.50	8.00	3.33		28	6.50	1.70	4.00	0.60	3.82	6.67	
29	25.00	5.00	9.50	4.00	5.00	2.38		29	4.00	1.20	6.00	1.00	3.33	6.00	
30	20.00	3.00	11.00	2.50	6.67	4.40		30	2.50	0.40	4.00	0.60	6.25	6.67	
31	24.00	3.00	10.00	4.00	8.00	2.50		31	4.00	0.40	5.00	0.70	10.00	7.14	
32	6.00	1.00	28.00	9.00	6.00	3.11									
33	3.00	0.50	3.50	0.50	6.00	7.00									
34	6.00	1.00	5.00	1.50	6.00	3.33									
35	5.50	1.00	16.00	3.50	5.50	4.57									
36	16.00	3.00	7.00	2.50	5.33	2.80									
37	5.00	0.50	32.00	6.00	10.00	5.33									
38	3.50	0.50	2.50	1.50	7.00	1.67									
39	8.00	0.50	16.00	3.50	16.00	4.57									
40	8.00	1.00	31.00	11.00	8.00	2.82									

注:原始半径 $R = \frac{1}{2}(X*Y*Z)^{\frac{1}{3}}$; Flinn 指数 $K1 = \frac{a-1}{b-1}$; 对数 Flinn 指数 $K2 = \frac{\bar{\epsilon}_1 - \bar{\epsilon}_2}{\bar{\epsilon}_2 - \bar{\epsilon}_3} = \frac{\ln a}{\ln b}$; 罗德系数 $\nu = \frac{2\bar{\epsilon}_2 - \bar{\epsilon}_1 - \bar{\epsilon}_3}{\bar{\epsilon}_1 - \bar{\epsilon}_3}$; 应变

强度 $r = a + b - 1$; 自然应变系数 $\bar{\epsilon}_i = \frac{\sqrt{3}}{2}\gamma_0$; 拉伸(压缩)量 $\lambda = \frac{X}{2} - R$ 。

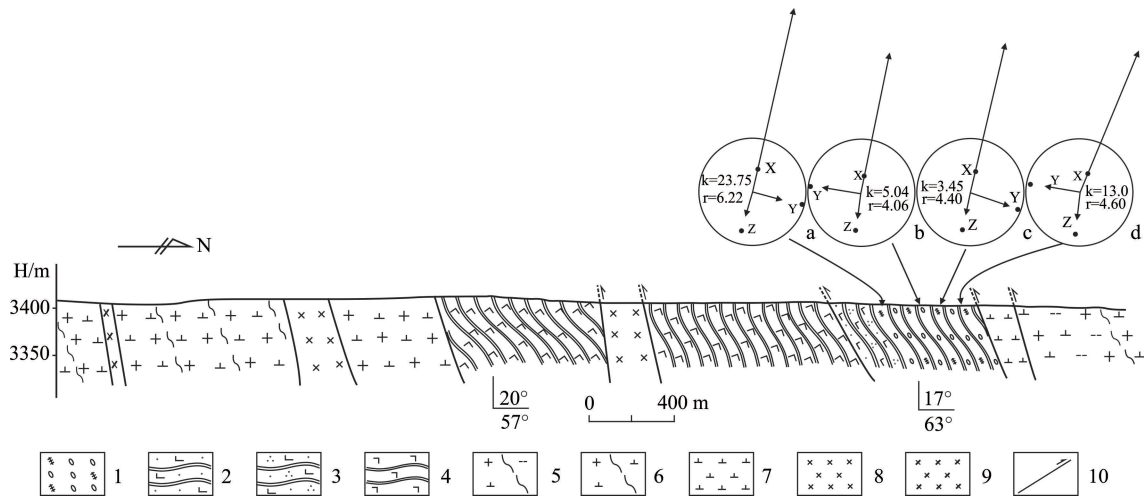


图6 哈图沟牦牛山组构造剖面示意图

1—复成分砾岩;2—变钙质砂岩;3—变钙质石英砂岩;4—变玄武岩;5—片麻状黑云母花岗闪长岩;6—片麻状花岗闪长岩;7—细粒闪长岩;8—细粒辉长岩;9—辉绿岩脉;10—断层

Fig.6 Structural sketch section of the Maoni Mountain in Hatu area

1—Polymictic conglomerate; 2—Calcium meta-sandstone; 3—Calcium meta-quartzitic sandstone; 4—Meta-basalt; 5—Gneissic biotite granodiorite; 6—Gneissose granodiorite; 7—Fine-grained diorite; 8—Fine-grained gabbro; 9—Diabase dyke; 10—Fault

长型应变。测点A、B、C、D均属于拉长型应变(表2,图7-a),在Nadia-Hossack及对数变形Flinn图解上(图7-b,c),可以看出A点($K/\gamma/\epsilon$)与 r 值均比B、C、D点高,说明A点的岩石变形更加强烈,在横向分布上,越靠近东昆中断裂带,其 K 值越大,应变程度 r 值也越大(图6),且变形体形态更细长。另外D点 K 值较B、C大,应变强度也稍大于B、C点,可能是由于韧性带内不同的变形域导致剪切作用在局部会造成一定的变形差异。

在应变分析的Wood图解(图7-d)及表3中,A点变形砾岩沿X轴拉伸达260%,沿Y轴缩短43%,沿Z轴缩短53%;B点变形砾岩沿X轴拉伸167%,沿Y轴缩短25%,沿Z轴缩短50%;C点变形砾岩沿X轴拉伸209%,沿Y轴缩短24%,沿Z轴缩短62%;D点变形砾岩沿X轴拉伸178%,沿Y轴缩短32%,沿Z轴缩短45%;各点岩石沿X轴拉伸强烈,且Z轴比Y轴方向上缩短量大,这是由于东昆中断裂带在该处主要以逆冲、挤压形式存在。野外露头观察Y轴方向存在右旋走滑特征(剪切作用不强),由于该处的拉伸量太大造成Y轴方向上相对压缩,这种情况类似于拉橡皮筋两端,其中间虽未直接受力但同样会变细。

巴隆地区哈图沟牦牛山组南北宽为672 m,片

理平均倾角为 64° ,经计算其现在真实厚度为604 m,再由4个测点的Z轴缩短量平均值(53%),计算得出牦牛山组原始厚度为1139 m,经构造压缩后实际缩短了535 m。

5 构造意义讨论

东昆仑造山带作为多旋回复合造山作用的大陆造山带^[23],也是一个多期次构造叠加的复杂变形带^[37-41]。早石炭世东昆仑开始进入伸展状态,形成下石炭统哈拉郭勒组(C₁hl)富含生物化石的浅水相对稳定环境的碎屑岩—碳酸盐岩沉积组合;晚石炭世—中二叠世,东昆仑南侧的布青山—阿尼玛卿古特提斯洋盆的洋中脊继续扩张,在相对浅水的地方形成玄武质熔岩基底与碳酸盐岩组合的海山结构;而在晚二叠世—早中三叠世,随着南缘的布青山—阿尼玛卿古特提斯洋向北俯冲造山和印支晚期的全面碰撞^[39],之后东昆仑转入陆内造山阶段。

得福胜地区晚二叠世哈拉尕吐花岗岩体与其北侧的得福胜闪长质片麻岩体呈渐变过渡接触关系,哈拉尕吐花岗岩体在靠近韧性剪切带一侧发育透入性面理,并不同程度地与得福胜闪长质片麻岩体一同卷入到韧性剪切带中,二者透入性面理走向一致,且哈拉尕吐花岗岩体中暗色闪长质包体发生

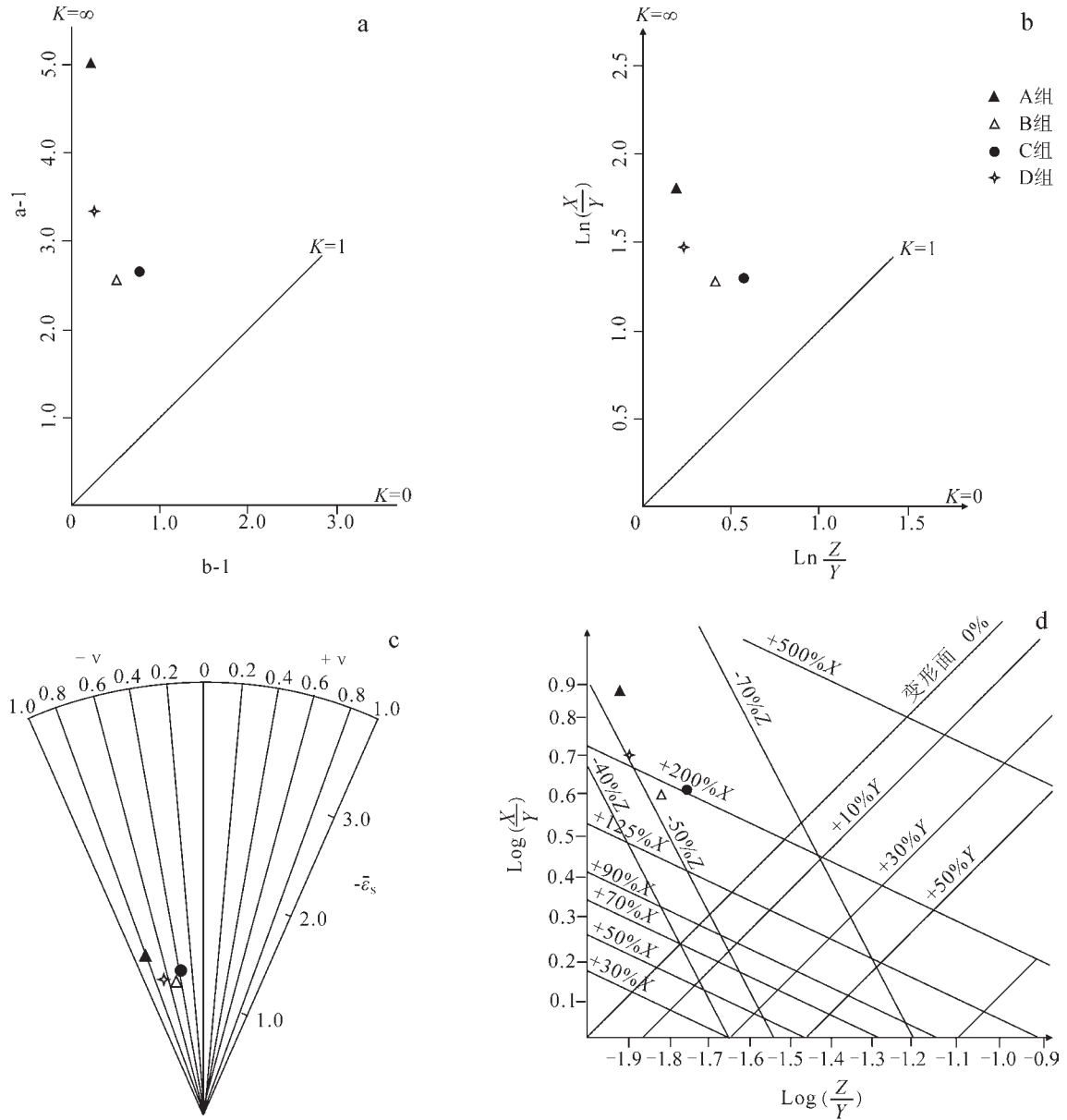


图7 哈图沟牦牛山组变形砾岩有限应变测量图解

a—Flinn图解;b—对数变形Flinn图解;c—Nadai-Hossack图解;d—应变椭球体主轴比的对数图(Wood图解)

Fig.7 Diagram of finite strain measurement about deformed conglomerate of the Maoni Mountain in Hatu area
a—Flinn diagram; b—Logarithmic deformation Flinn diagram; c—Nadai-Hossack diagram; d—Logarithmic diagram of principal axis ratio of strain ellipsoid

表3 哈图沟牦牛山组有限应变测量结果一览

Table 3 Data of finite strain measurements of the Maoni Mountain in Hatu area

测点	数量	原始半径 R /cm	Flinn 指数 (K1)	对数 Flinn 指数 (K2)	应变程度 (r)	自然应变系数 (ε)	罗德系数 (ν)	拉伸(压缩)量 (λ)		
								X	Y	Z
A	40	1.03	23.75	9.37	6.22	1.55	-0.81	2.60	-0.43	-0.53
B	40	1.00	5.04	3.10	4.06	1.24	-0.51	1.67	-0.25	-0.50
C	40	1.12	3.45	2.27	4.40	1.35	-0.39	2.09	-0.24	-0.62
D	31	0.95	13.00	6.42	4.60	1.30	-0.73	1.78	-0.32	-0.45

透镜化并旋转拖尾。孙雨等^[42]获得哈拉尕吐花岗岩体中未变形的花岗闪长岩的 SHRIMP 锆石 U-Pb 年龄为 $(255.3 \pm 3.6) \text{Ma}$, 岩石地球化学特征表明其形成于活动大陆边缘消减带的大地构造环境。裴先治等(未刊资料)获得得福胜片麻状闪长岩体的 LA-ICP-MS 锆石 U-Pb 年龄为 $(255.9 \pm 2.3) \text{Ma}$ 。由此可知, 哈拉尕吐花岗岩体和得福胜片麻状闪长岩体均是在晚二叠世由于布青山—阿尼玛卿洋向北俯冲产生, 得福胜片麻状闪长岩体透入性面理形成于早期陆块逆冲变形过程, 后在早—中三叠世受到近东西向的右旋走滑作用影响, 使得片麻理面近直立, 局部地段可见倾向相反的片麻理。

区内卷入韧性剪切带中的地层主要为分布于东昆中断裂带两侧的古元古界白沙河岩组、中元古界小庙岩组、下古生界纳赤台岩群、泥盆系牦牛山组、石炭系哈拉郭勒组。虽然前寒武纪地层经历了多期的变形变质作用, 且变质程度达低角闪岩相—角闪岩相^[43], 但与早古生代、晚古生代、中生代早期地层及晚二叠世—早中三叠世花岗闪长岩体具有相似的剪切变形特征。晚二叠世布青山—阿尼玛卿洋向北俯冲, 使得东昆南陆块向东昆北陆块斜向俯冲挤压, 在此阶段形成总体北倾的片理及片麻理等面理, 从 EBSD 测试结果显示靠近片理面(XY 面)的石英 C 轴组构极密以及费氏台测试结果显示石英 C 轴组构极密呈斜方对称的结果都说明了韧性剪切带早期受到垂直于片理面非常强烈的压应力作用; 而后随着俯冲作用的进行, 在以早期形成的片理及片麻理的基础上, 继而变形, 剖面上形成指示逆冲现象的旋转碎斑、旋转透镜体、不对称褶皱、显示逆冲性质的石英 C 轴组构及与片理面倾向斜交的拉伸线理等, 平面上则形成显示左旋的不对称褶皱、旋转碎斑、旋转透镜体及 S-C 组构等; 随着俯冲的继续, 在中三叠世两陆块全面碰撞拼合后, 东昆中构造带两侧岩石发生近东西向的右旋走滑, 在右旋走滑过程中使早期总体朝北缓倾的面理近直立, 局部则朝南倾, 并且产生与之对应近水平的拉伸线理, 平面上显示右旋剪切作用的褶皱、旋转碎斑、旋转透镜体及石英 C 轴组构等构造特征。

由于巴隆地区哈图沟牦牛山组复成分砾岩卷入了韧性剪切带, 其内部砾石变形强烈, 几乎全部透镜体化, 透镜体拖尾指示岩石在平面上受左旋及

右旋两期剪切作用的控制, 并且在片理面上发育有陡倾的拉伸线理。陆露等^[33]对东昆仑水泥厂地区牦牛山组底砾岩之上的流纹岩进行锆石 U-Pb 精确测年, 结果为 $400 \sim 423 \text{Ma}$, 表明其形成于晚志留世—早泥盆世。李荣社^[44]和许志琴^[45]认为牦牛山磨拉石建造为东昆仑早古生代造山作用结束的标志, 因此可将牦牛山组变形砾岩的变形时间确定为晚海西—印支期的俯冲碰撞阶段。对变形砾岩有限应变测量后发现, 变形砾石的 Flinn 指数均大于 1, 属拉长型应变, 表明变形砾岩的主变形期应属于碰撞之前的逆冲阶段。靠近东昆中断裂的地方其 $K/\gamma/\epsilon$ 与 r 值均高于远离断裂带的变形砾岩, 即越靠近东昆中断裂带构造变形越强, 由此可以看出东昆中断裂带应是晚海西—印支期韧性剪切带的中心部位, 且韧性剪切带早期经历了大规模的逆冲, 这与区域上晚海西—印支期的俯冲碰撞构造背景相吻合。总之, 东昆中构造带韧性剪切作用, 早期以逆冲为主, 伴有左旋剪切作用, 晚期则为右旋剪切占主导地位。

6 结 论

(1) 研究区内宏观及显微构造显示东昆中断裂带至少经历两期剪切作用, 早期受控于晚二叠世—早三叠世东昆北陆块向东昆南陆块的左旋逆冲作用; 晚期受控于中三叠世近东西向上的陆内右旋走滑作用。

(2) 利用费氏台及 EBSD 测试技术对区内变形岩石的石英 C 轴组构分析研究后, 认为研究区内韧性剪切带属于以压—扭性为主的构造界面, 且岩石变形温度一般在 $400 \sim 550 \text{ } ^\circ\text{C}$ 。

(3) 通过计算剪切带内 6 个样品岩石石英亚颗粒大小及石英动态重结晶粒度得出韧性剪切带古应力值约 153.791 MPa 。

(4) 哈图沟牦牛山组 (D_1m) 变形砾岩特征有: ① Flinn 指数 ($K1$) 与对数 Flinn 指数 ($K2$) 均大于 1, 表明其以拉伸变形为特征, 因此, 哈图沟泥盆系牦牛山组拉伸砾石是逆冲推覆构造存在的重要标志; ② 牦牛山组变形砾岩测点 A 的变形砾岩 $K/\gamma/\epsilon$ 与 r 值较 B、C、D 点都高, 与测点 A 靠近东昆中主断裂带有直接原因, D 点的 $K/\gamma/\epsilon$ 值较 A 低, 但比 B、C 点略高, 可能是由于韧性剪切带内不均匀变形的结果; ③ 哈图沟牦牛山组变形砾岩沿 X 轴方向拉伸量为 $167\% \sim$

260%, Y轴方向缩短24%~43%, Z轴方向缩短45%~62%, 该地层沿Z轴缩短535 m。

致谢:野外工作和论文写作过程中受到魏博、杨杰、胡楠和徐通等师弟的大力协助, 在EBSD测试过程中得到中国地质大学(北京)裴磊硕士的帮助, 在此表示衷心的感谢。同时感谢编辑部老师及两位评审专家提出的宝贵意见。

参考文献(references):

- [1] 杨振升, 李三忠, 刘永江. 大陆造山带中的隆-滑构造——一种前造山期的伸展构造形式[J]. 长春地质学院学报, 1995, 25(4): 361-367.
Yang Zhensheng, Li Sanzhong, Liu Yongjiang. Uplift bedding-delamination structure in continental orogen——A new model of preorogenic extensional tectonics[J]. Journal of Jilin University Earth Science Edition, 1995, 25(4): 361-367(in Chinese with English abstract).
- [2] 许志琴, 张建新, 徐慧芬, 等. 中国主要大陆山链韧性剪切带及动力学[M]. 北京: 地质出版社, 1997: 1-293.
Xu Zhiqin, Zhang Jianxin, Xu Hui fen, et al. Ductile Shear Zone and Dynamics about Main Continental Mountain Chains in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997(in Chinese).
- [3] Davis G H, Reynolds S J. Structural Geology of Rocks and Regions New York[M]: John Wiley & Sons Inc, 1996, 1-776.
- [4] 高延林, 吴向农, 左国朝. 东昆仑山清水泉蛇绿岩特征及其大地构造意义[J]. 中国地质科学院西安地质矿产研究所所刊, 1998, (21): 17-28.
Gao Yanlin, Wu Xiangnong, Zuo Guochao. The characters and tectonic significance of ophiolite first discovered in the east Kunlun area[J]. Xi'an Institute of Geology and Mineral Resources of Chinese Academy of Geological Sciences, 1998, (21): 17-28(in Chinese with English abstract).
- [5] 古风宝. 东昆仑地质特征及晚古生代—中生代构造演化[J]. 青海地质, 1994, (4): 4-13.
Gu Fengbao. Geological characteristics of east KunLun and tectonic evolution in late Palaeozoic—Mesozoic era[J]. Qinghai Geology, 1994, (4): 4-13(in Chinese with English abstract).
- [6] 解玉月. 昆中断裂东段不同时代蛇绿岩特征及形成环境[J]. 青海地质, 1998, (1): 27-35.
Jie Yuyue. Features of ophiolite with different period in the eastern sector of Middle Kunlun Fault and its original environment[J]. Qinghai Geology, 1998, (1): 27-35(in Chinese with English abstract).
- [7] 郑健康. 东昆仑区域构造的发展演化[J]. 青海地质, 1992, (1): 15-25.
Zheng Jiankang. Regional tectonic evolution of east Kunlun[J]. Qinghai Geology, 1992, (1): 15-25(in Chinese with English abstract).
- [8] 王国灿, 张天平, 梁斌, 等. 东昆仑造山带东段昆中复合蛇绿混杂岩带及“东昆中断裂带”地质涵义[J]. 地球科学—中国地质大学学报, 1999, 24(2): 129-133.
Wang Guocan, Zhang Tianping, Liang Bin, et al. Composite ophiolitic melange zone in central part of eastern section of eastern Kunlun orogenic zone and geological significance of "fault belt in central part of eastern section of eastern Kunlun orogenic zone"[J]. Earth Science—Journal of China University of Geosciences, 1999, 24(2): 129-133(in Chinese with English abstract).
- [9] 陈能松, 孙敏, 王勤燕, 等. 东昆仑造山带中带的锆石U-Pb定年与构造演化启示[J]. 中国科学(D辑), 2008, 38(6): 657-666.
Chen Nengsong, Sun Min, Wang Qinyan, et al. Zircon U-Pb dating and tectonic evolutionary implications in East Kunlun orogenic belt[J]. Science in China(Series D), 2008, 38(6): 657-666(in Chinese with English abstract).
- [10] 姜寒冰, 李文渊, 董福辰, 等. 昆中断裂带南北陆块基底盖层沉积岩岩浆岩对比研究—昆中断裂带构造意义的讨论[J]. 中国地质, 2012, 39(3): 581-594.
Jiang Hanbing, Li Wen yuan, Dong Fuchen, et al. A comparative study of the basement, the sedimentary blanket and the magmatic rocks of the south and north landmasses in the middle Kunlun fault belt: The tectonic significance of the middle Kunlun fault belt[J]. Geology in China, 2012, 39(3): 581-594(in Chinese with English abstract).
- [11] 李丽, 董福辰, 杨永强, 等. 昆中蛇绿岩岩石学和地球化学[J]. 新疆地质, 2012, 30(1): 19-25.
Li Li, Dong Fuchen, Yang Yongqiang, et al. The petrology and geochemistry of ophiolites from Central Kunlun[J]. Xinjiang Geology, 2012, 30(1): 19-25(in Chinese with English abstract).
- [12] 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑洪水川地区科科鄂阿龙岩体锆石U-Pb年代学、地球化学及其地质意义[J]. 地质学报, 2013, 87(2): 178-196.
Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Zircon U-Pb geochronology, geochemical characteristics and geological significance of Cocoe A'Long quartz diorites body from the Hongshuichuan area in East Kunlun[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 87(2): 178-196(in Chinese with English abstract).
- [13] Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuo chen, et al. Regional tectonic transformation in East Kunlun orogenic belt in early Paleozoic: Constraints from the geochronology and geochemistry of

- Helegangnaren alkali-feldspar granite[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2013, 87(2): 333-345.
- [14] 刘成东. 东昆仑造山带东段花岗岩浆混合作用[M]. 北京: 地质出版社, 2008.
- Liu Chengdong. Granitoid Magma in Eastern Part of the East Kunlun Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2008(in Chinese).
- [15] 王国灿, 张克信, 梁斌, 等. 东昆仑造山带结构及构造岩片组合[J]. *地球科学——中国地质大学学报*, 1997, 23(4): 352-356.
- Wang Guocan, Zhang Kexin, Liang Bin, et al. Texture and tectonic slices of the eastern Kunlun orogenic belt[J]. *Earth Science——Journal of China University of Geosciences*, 1997, 23(4): 352-356(in Chinese with English abstract).
- [16] 阿成业, 王毅智, 任晋祁, 等. 东昆仑地区万宝沟群的解体及早寒武世地层的新发现[J]. *中国地质*, 2003, 30(2): 199-206.
- A Chengye, Wang Yizhi, Ren Jinqi, et al. Disintegration of the Wanbaogou Group and discovery of Early Cambrian strata in the East Kunlun area[J]. *Geology in China*, 2003, 30(2): 199-206(in Chinese with English abstract).
- [17] 谌宏伟, 罗照华, 莫宣学, 等. 东昆仑造山带三叠纪岩浆混合成因花岗岩的岩浆底侵作用机制[J]. *中国地质*, 2005, 32(3): 386-395.
- Chen Hongwei, Luo Zhaohua, Mo Xuanxue, et al. Underplating mechanism of Triassic granite of magma mixing origin in the East Kunlun orogenic belt[J]. *Geology in China*, 2005, 32(3): 386-395 (in Chinese with English abstract).
- [18] 冯建赞, 裴先治, 于书伦, 等. 东昆仑都兰可可沙地区镁铁-超镁铁质杂岩的发现及其LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄[J]. *中国地质*, 2010, 37(1): 28-38.
- Feng Jianyun, Pei Xianzhi, Yu Shulun, et al. The discovery of the mafic-ultramafic melange in Kekesha area of Dulan County, East Kunlun region, and its LA-ICP-MS zircon U-Pb age[J]. *Geology in China*, 2010, 37(1): 28-38(in Chinese with English abstract).
- [19] 陈有炘, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑造山带东段元古界小庙岩组的锆石U-Pb年龄[J]. *现代地质*, 2011, 25(3): 510-521.
- Chen Youxin, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Zircon U-Pb Age of Xiaomiao Formation of Proterozoic in the eastern Section of the East Kunlun Orogenic Belt[J]. *Geoscience*, 2011, 25(3): 510-521 (in Chinese with English abstract).
- [20] 刘战庆, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑南缘布青山构造混杂岩带早古生代白日切特中酸性岩浆活动: 来自锆石U-Pb测年及岩石地球化学证据[J]. *中国地质*, 2011, 38(5): 1150-1167.
- Liu Zhanqing, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Early Paleozoic intermediate-acid magmatic activity in Bairiqiete area along the Buqingshan tectonic melange belt on the southern margin of East Kunlun: Constraints from zircon U-Pb dating and geochemistry[J]. *Geology in China*, 2011, 38(5): 1150-1167(in Chinese with English abstract).
- [21] 陈国超, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑造山带晚三叠世岩浆混合作用: 以和勒冈希里克特花岗闪长岩体为例[J]. *中国地质*, 2013, 40(4): 1044-1065.
- Chen Guochao, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Late Triassic magma mixing in the East Kunlun orogenic belt: A case study of Helegang Xilikete granodiorites[J]. *Geology in China*, 2013, 40(4): 1044-1065(in Chinese with English abstract).
- [22] 陈有炘, 裴先治, 李瑞保, 等. 东昆仑东段纳赤台岩群变火山岩锆石U-Pb年龄、地球化学特征及其构造意义[J]. *地学前缘*, 2013, 20(6): 240-254.
- Chen Youxin, Pei Xianzhi, Li Ruibao, et al. Zircon U-Pb Age, geochemistry characteristics and tectonic significance of meta-volcanic rocks from Naij Tal Group, East section of East Kunlun[J]. *Earth Science Frontiers*, 2013, 20(6): 240-254(in Chinese with English abstract).
- [23] 殷鸿福, 张克信. 东昆仑造山带的一些特点[J]. *地球科学*, 1997, 22(4): 339-342.
- Yin Hongfu, Zhang Kexin. Characteristics of the eastern Kunlun orogenic belt[J]. *Earth Science*, 1997, 22(4): 339-342(in Chinese with English abstract).
- [24] 殷鸿福, 张克信, 王国灿, 等. 非威尔逊旋回与非史密斯方法——中国造山带研究的理论与方法[J]. *中国区域地质*, 1998, (增刊): 1-9.
- Yin Hongfu, Zhang Kexin, Wang Guocan, et al. The Wilson cycle and non Smith method—Theory and approaches to the study of China orogenic belt [J]. *Regional Geology of China*, 1998, (supplement): 1-9(in Chinese with English abstract).
- [25] Passchier C W, Simpson C. Porphyroclasts systems as kinematic indicators[J]. *Journal of Structural Geology*, 1986, 8: 831-843.
- [26] 陈虹, 胡健民, 武国利. 韧性剪切带糜棱岩中不对称旋转碎斑系剪切指向模拟实验研究现状及其问题[J]. *地质通报*, 2009, 28(4): 439-455.
- Chen Hong, Hu Jianmin, Wu Guoli. Current situation of research on the simulating experiments for the shear direction of asymmetry rotated porphyroclast in the ductile shear zone of mylonites[J]. *Geological Bulletin of China*, 2009, 28(4): 439-455 (in Chinese with English abstract).
- [27] Hancock P L, Skinner B J. *The Oxford companion to the Earth*[M]. Oxford University Press, 2000: 1-1184.
- [28] Ramsay J G, Graham R H. Strain in shear belts[J]. *Canadian*

- Journal of Earth Sciences, 1970, 7: 786–813.
- [29] Ramsay J G. Shear zone geometry: A review[J]. Journal of Structural Geology, 1980, 2: 83–89.
- [30] Passchier C W, Trouw R A J. Microtectonics[M]. Berlin: Springer, 2005.
- [31] 刘俊来, 曹淑云, 邹运鑫, 等. 岩石电子背散射衍射(EBSD)组构分析及应用[J]. 地质通报, 2008, 27(10): 1638–1645.
Liu Junlai, Cao Shuyun, Zou Yunxin, et al. EBSD analysis of rock fabrics and its application[J]. Geological Bulletin of China, 2008, 27(10): 1638–1645(in Chinese with English abstract).
- [32] Twiss R J. Theory and application of a recrystallized grain—size Paleopiezometer[J]. Pure Appl. Geophys., 1977, 115: 227–244.
- [33] 陆露, 吴珍汉, 胡道功, 等. 东昆仑牦牛山组流纹岩锆石 U–Pb 年龄及构造意义[J]. 岩石学报, 2010, 26(4): 1150–1158.
Lu Lu, Wu Zhenhan, Hu Daogong, et al. Zircon U–Pb age for rhyolite of the Maoniushan Formation and its tectonic significance in the East Kunlun Mountains[J]. Acta Petrologica Sinica, 2010, 26(4): 1150–1158(in Chinese with English abstract).
- [34] Cloos, E. Oolite deformation in South Mountain Fold, Maryland[J]. Bull. Soc. Am vol. 1947, 58: 893–918.
- [35] Ramsay J G. Folding and Fracturing of Rocks[M]. New York: Mc Graw Hill, 1967, 1–568.
- [36] 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.
Zhen Yadong, Chang Zhizhong. Finite Strain Measurement & Ductile Shear Zones[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1985(in Chinese).
- [37] 李瑞保, 裴先治, 李佐臣, 等. 东昆仑东段晚古生代—中生代若干不整合面特征及其对重大构造事件的响应[J]. 地学前缘, 2012, 19(5): 1–11.
Li Ruibao, Pei Xianzhi, Li Zuochen, et al. Geological characteristics of Late Palaeozoic–Mesozoic unconformities and their response to some significant tectonic events in eastern part of Eastern Kunlun[J]. Earth Science Frontiers, 2012, 30(1): 19–25 (in Chinese with English abstract).
- [38] 梁斌, 王国灿, 张克信. 东昆仑中部构造混杂岩带右行走滑韧性剪切变形特征[J]. 中国区域地质, 2001, 20(1): 46–57.
Liang Bin, Wang Guocan, Zhang Kexing. Characteristics of the right–lateral strike–slip ductile deformation of the central East Kunlun tectonic melange belt[J]. Regional Geology of China, 2001, 20(1): 46–57(in Chinese with English abstract).
- [39] 梁斌, 王国灿, 张克信. 东昆仑造山带东段昆中构造混杂岩带左旋斜冲韧性变形特征[J]. 矿物岩石, 2001, 21(2): 89–93.
Liang Bin, Wang Guocan, Zhang Kexing. Characteristics of the sinistral oblique thrust ductile deformation of the central eastern kunlun tectonic melange belt in the eastern Kunlun orogenic zone[J]. Journal of Mineralogy and Petrology, 2001, 21(2): 89–93 (in Chinese with English abstract).
- [40] 陈能松, 何蕾, 孙敏, 等. 东昆仑造山带早古生代变质峰期和逆冲构造变形年代的精确限定[J]. 科学通报, 2002, 47(8): 628–631.
Chen Nengsong, He Lei, Sun Min, et al. Metamorphic peak and thrust tectonic deformation's precision limited in palaeozoic in East Kunlun orogenic belt[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47 (8): 628–631(in Chinese).
- [41] Wang Guocan, Chen Nengsong, Zhu Yunhai, et al. Caledonian ductile thrusting deformation in the central East Kunlun belt, Qinghai, China and its significance: Evidence from geochronology[J]. Acta Geologica Sinica, 2013, 77(3): 311–319.
- [42] 孙雨, 裴先治, 丁仁平, 等. 东昆仑哈拉杂吐岩浆混合花岗岩: 来自锆石 U–Pb 年代学的证据[J]. 地质学报, 2009, 83(7): 1000–1010.
Sun Yu, Pei Xianzhi, Ding Sanping, et al. Halagatu magma mixing granite in the East Kunlun Mountains—Evidence from zircon U–Pb dating[J]. Acta Geologica Sinica, 2009, 83(7): 1000–1010(in Chinese with English abstract).
- [43] 陈有炳. 东昆仑东段中元古代—早古生代变质岩系地质特征及其构造属性研究[D]. 西安: 长安大学, 2012.
Chen Youxin. Research on the Geological Characteristic and Tectonic Attribute of the Mesoproterozoic to Early Paleozoic Metamorphic Rock, East Segment of East Kunlun Orogen[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012(in Chinese with English abstract).
- [44] 李荣社, 计文化, 赵振明, 等. 昆仑早古生代造山带研究进展[J]. 地质通报, 2007, 26(4): 373–381.
Li Rongshe, Ji Wenhua, Zhao Zhenming, et al. Progress in the study of the Early Paleozoic Kunlun orogenic belt[J]. Geological Bulletin of China, 2007, 26(4): 373–381(in Chinese with English abstract).
- [45] 许志琴, 杨经绥, 李海兵, 等. 造山的高原—青藏高原地体的拼合、碰撞造山及隆升机制[M]. 北京: 地质出版社: 2007: 1–458.
Xu Zhiqin, Yang Jingsui, Li Haibing, et al. Orogenic Plateau—The Qinghai–Tibet Plateau Terrain, Collisional Orogenesis, and Mechanisms for the Rise of the Plateau[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2007: 1–458(in Chinese).

Ductile shearing in the eastern segment of Central Kunlun tectonic belt and its geological significance

LI Xiao-bing¹, PEI Xian-zhi^{1,2}, LIU Cheng-jun¹, CHEN You-xin¹, LI Rui-bao¹,
LI Zuo-chen¹, CHEN Guo-chao¹, WEI Gang-feng¹

(1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Key Laboratory of Western China's Mineral Resources and Geological Engineering of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Multi-stage structural events occurred in central East Kunlun tectonic belt, resulting in complex structural styles which have been preserved up till now. Very intense structural deformation and ductile shear zone exist in Hatugou, Qingshuiquan-Tatuo and Gouli areas, and there is the NWW-SEE ductile shear zone. The authors analyzed the geometry, kinematics and kinetics of the tectonic belt based on field investigation and analysis of microstructure. A quartz C-axis petrofabric analysis on Fedorov and EBSD stage indicates that the shear zone is a pressure-shear structure interface, characterized by left-handed thrust at the early stage, dextral strike-slip at the late stage, and 400~550 °C for the deformation temperature. The measurements of sub-grains of quartz and granularity of dynamic recrystallization indicate that the paleostress value is 153.79 MPa for the ductile shear zone in the study area. Furthermore, the closer to the central part of East Kunlun tectonic belt, the higher the Flinn index (>1), the extent of the strain and Lode parameter (absolute value) of gravel, as evidenced by the finite strain measurement of conglomerate (4 points) from Maoniushan Formation in Hatugou, which suggests a tensile deformation. Combined with regional geological data, the authors hold that the eastern segment of central Kunlun ductile shear zone was formed in Late Hercynian and Indosinian.

Key words: ductile shear zone; quartz C-axis rock group; finite strain measurement; Flinn index; structural belt in the eastern segment of central Kunlun

About the first author: LI Xiao-bing, male, born in 1986, doctor, majors in structural geology; E-mail: 644780161@qq.com.

About the corresponding author: PEI Xian-zhi, male, born in 1963, doctor, professor, engages in the study of structural geology and regional geology; E-mail: peixzh@263.net.