

# 豫西双龙韧性剪切带的显微构造特征 及变质变形环境分析

靳立杰<sup>1,2</sup>, 王继林<sup>3</sup>, 周汉文<sup>4</sup>, 田明阳<sup>1</sup>, 李春稼<sup>1</sup>, 王子圣<sup>1</sup>, 韩姗<sup>1\*</sup>

(1. 山东省第一地质矿产勘查院, 山东 济南 250100; 2. 山东省富铁矿勘查技术开发工程实验室, 山东 济南 250100; 3. 中国冶金地质总局山东局测试中心, 山东 济南 250100; 4. 中国地质大学(武汉), 湖北 武汉 430074)

**摘要:**豫西双龙韧性剪切带是位于秦岭造山带核部的一条韧性剪切带,由两侧到中心依次发育了初糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩及假玄武玻璃一系列动力变质岩。该韧性剪切带是东秦岭造山带核部网结状走滑韧性剪切带中的一条,对其开展显微构造研究,对了解东秦岭造山带的变质变形环境及构造演化具有一定地质意义。本文在野外地质工作的基础上,通过对韧性剪切带进行岩石学和矿物显微构造特征分析,对韧性剪切带的性质及温度、古差应力、应变速率等变质变形环境进行了分析讨论。研究表明,双龙韧性剪切带运动学性质为左行剪切,变质变形温度约为400~500℃,古差应值约为51~61 MPa。

**关键词:**韧性剪切带;显微构造特征;变质变形环境;豫西双龙

**中图分类号:**P542<sup>+.3</sup>      **文献标识码:**A      doi:10.12128/j.issn.1672-6979.2021.08.002

**引文格式:**靳立杰,王继林,周汉文,等.豫西双龙韧性剪切带的显微构造特征及变质变形环境分析[J].山东国土资源,2021,37(8):15-20.JIN Lijie, WANG Jilin, ZHOU Hanwen, et al. Analysis on Microstructural Characteristics and Metamorphic Deformation Environment of Shuanglong Ductile Shear Zone in Western Henan Province[J]. Shandong Land and Resources, 2021, 37(8): 15-20.

## 0 引言

韧性剪切带是岩石在塑性状态下发生连续变形形成的狭窄高剪切应变带<sup>[1]</sup>。韧性剪切带中的岩石在造山带缩短和岩石圈拉张、伸展过程中保存了大量的深部变形特征,是重建大陆变形过程中构造变形温压环境、变形几何学、运动学和动力学的重要研究对象,也是造山带研究的重要组成部分<sup>[2-4]</sup>。东秦岭造山带核部的网结状走滑韧性剪切带系统为一系列NWW向的韧性剪切带<sup>[5]</sup>,双龙韧性剪切带属于其剪切带阵列中的一条,发育规模相对较大,对研究东秦岭网结状走滑韧性剪切带的性质及变质变形环境具有一定的代表性。本文在野外地质调查的基础上,对韧性剪切带的岩石组成、剪切带性质及变质变

形环境进行了分析探讨,为东秦岭造山带的构造演化提供变质变形环境方面的约束。

## 1 区域地质概况

秦岭是华北板块和扬子板块的结合域,由不同成因、不同构造背景、不同年龄的岩层组成,是经历了长期多次不同造山作用而形成的复合型大陆造山带,在中国大陆的形成与演化中占有重要地位,长期以来受到广泛的关注。东秦岭造山带历经元古代的形成阶段和加里东—印支期的韧性、脆性再造阶段,在其边缘及内部发育了一系列的韧性、脆韧性剪切带。东秦岭造山带剪切带阵列包括3个韧性剪切系统:秦岭造山带核部北缘军马河-马蹄湾韧性推覆剪切系统、内部的网结状走滑性韧性剪切系统、弱应变

收稿日期:2021-05-07;修订日期:2021-06-10;编辑:陶卫卫

基金项目:国家重点基础研究发展计划“973”(2007CB411307);国家自然科学基金重点项目(90081004)

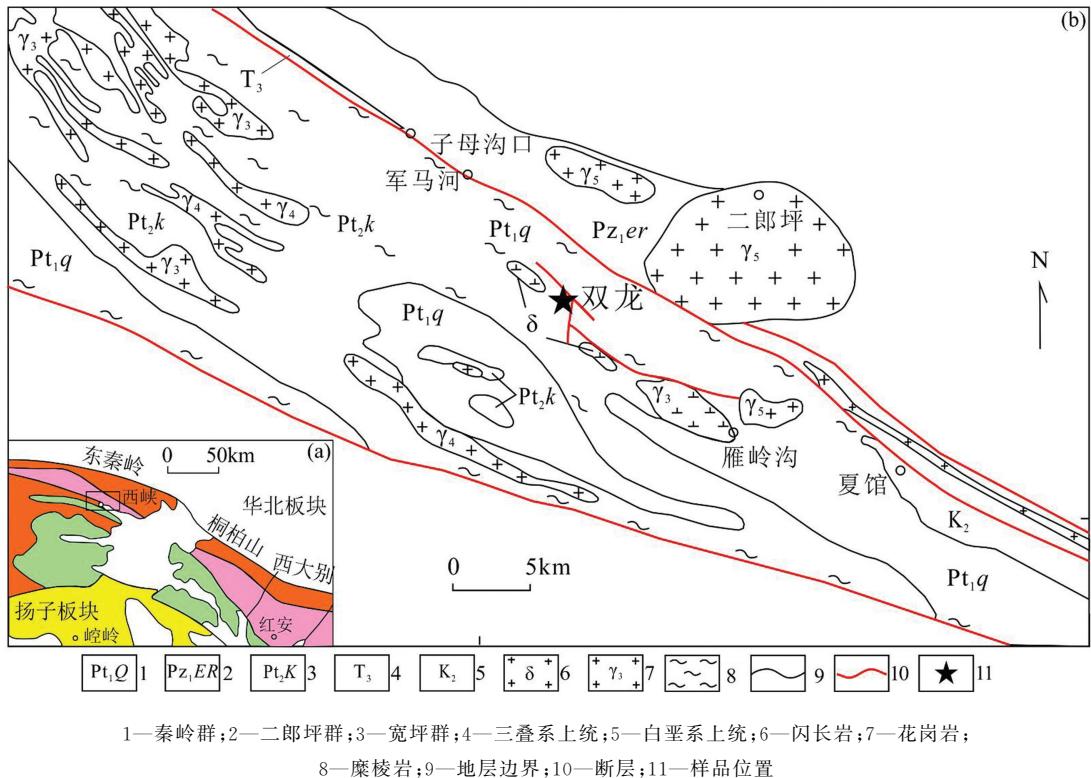
作者简介:靳立杰(1987—),男,河北宁晋人,工程师,主要从事岩石学、矿物学、矿床学工作;E-mail:jinlijie1987@163.com

\*通讯作者:韩姗(1980—),女,山东滨州人,工程师,主要从事地质勘查工作;E-mail:280530173@qq.com

域中保留的近水平韧性剪切系统<sup>[3-7]</sup>。

双龙韧性剪切带地处河南省西峡县双龙镇, 构造位置上位于东秦岭造山带的核部、商丹断裂带和勉略断裂带之间, 即扬子板块和华北板块两大构造

单元结合带的核心部位(图 1)。双龙韧性剪切带是发育在东秦岭造山带核部一系列 NWW 向网结状韧性剪切带阵列中的一条。



1—秦岭群;2—二郎坪群;3—宽坪群;4—三叠系上统;5—白垩系上统;6—闪长岩;7—花岗岩;  
8—麻棱岩;9—地层边界;10—断层;11—样品位置

图 1 双龙地区地质简图<sup>[8]</sup>

## 2 岩石学特征

双龙韧性剪切带原岩为秦岭群黑云斜长片麻岩, 主要矿物为石英、长石及黑云母。剪切带整体呈 NWW 向展布, 出露宽度约 100 m。韧性剪切带内岩石在动力变质作用的改造下发生了强烈的变质变形, 由两侧到中心依次形成了初麻棱岩、麻棱岩、超

麻棱岩、假玄武玻璃一系列动力变质岩(图 2)。韧性剪切带内越靠近中心麻棱岩的流动构造越趋于明显, 碎斑的含量逐渐变少、粒度也逐渐变小, S-C 面理的夹角也相应减小, 甚至在超麻棱岩中出现了黑云母和石英的成分层。此外, 在剪切带的中心部位平行麻棱岩面理形成了一层厚约 1 cm 的假玄武玻璃。



图 2 韧性剪切带中初麻棱岩(a)、麻棱岩(b)和超麻棱岩(c)镜下特征

剪切带中麻棱岩面理较为发育, 总体产状为  $64^{\circ} \angle 76^{\circ}$ , 并且在初麻棱岩、麻棱岩、超麻棱岩中存

在大量旋转碎斑及云母鱼、S-C 组构、动态重结晶石英等显微构造。通过对这些构造特征进行研究,

认为该韧性剪切带为左行走滑剪切。

### 3 分析方法

本次研究对韧性剪切带进行系统的野外调查及定向样品采集,对其中具有代表性的样品进行了显微构造和石英的 EBSD 结构分析。其中石英、长石的显微构造统计分析是通过显微镜进行;EBSD 结构是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室进行,EBSD 的型号为 HKL 公司的 Channel 5.0 & Nordlys II Detesctor,工作条件:加速电压-20 kV;工作距离-21.2 mm;样品倾斜 70°;有效束流-5 nA。

## 4 讨论

### 4.1 显微构造特征

在动力变质作用的影响下,韧性剪切带发育从初糜棱岩到超糜棱岩一系列动力变质岩。这些动力变质岩中石英、长石及云母等矿物也发生了显微构造变形,显微构造现象十分丰富,主要有显微裂隙(图 3a、图 3b)、变形纹(图 3c、图 3d)、变形带(图 3e)、波状消光(图 3f)、鼓胀式重结晶(图 3g)、石英亚颗粒(图 3h)、颗粒旋转重结晶(图 3i)、云母鱼(图 3j)、S-C 组构(图 3k)和旋转碎斑(图 3l)。其中定向样品中的云母鱼、S-C 组构、旋转碎斑及动态重结晶石英颗粒均指示该韧性剪切带为左行剪切。

### 4.2 变质变形温度

#### 4.2.1 显微构造特征判断

温度和压力是影响岩石和矿物变形的重要因素,受到不同的变形机制控制,会显示不同的变形行为和变形现象,因此可以根据矿物特定的变形现象来大体推断其变形时的温压条件<sup>[9]</sup>。在韧性剪切带中,由于糜棱岩化过程相对短暂、新生矿物大多无法达到共生平衡、且新生矿物的生长受原岩成分控制等原因,目前被广泛使用的地质温度计中很难找到适合于计算糜棱岩变形温度的计算方法。而韧性剪切变形过程中,岩石中长石和石英的变形现象与温度有很好的相关性,且在实际应用中取得了很好的效果<sup>[10]</sup>。

研究表明,长石矿物在 300℃ 时完全表现为脆性变形,出现显微破裂的现象;在 500℃ 时则以塑性变形为主,出现塑性拉长现象;而脆—塑性变形的转

换温度为 400℃<sup>[11]</sup>。在 300~700℃ 的温度下重结晶形式会呈现晶粒鼓胀式重结晶(BLG)、亚颗粒旋转重结晶(SGR)、颗粒边界迁移重结晶(GBM)3 个过程。石英重结晶由 BLG 向 SGR 转变的温度区间为 380~420℃;在 420~480℃ 以 SGR 存在;当温度高于 480℃ 时,SGR 向 GBM 转变;GBM 独立存在的温度区间为 530~630℃,此时石英残斑几乎消失<sup>[10,12]</sup>。

双龙韧性剪切带中石英变形现象以波状消光、变形带、变形纹等塑性变形为主,并发育少量的显微裂隙等脆性变形现象。长石重结晶现象不明显,有强烈的超细粒化现象;变形现象以显微裂隙等脆性变形为主,局部可见塑性拉长、变形纹等塑性变形现象。

此外,双龙韧性剪切带中石英重结晶方式主要为颗粒边界迁移重结晶,并伴有鼓胀式重结晶,含量略有差异;具体表现为从初糜棱岩、糜棱岩到超糜棱岩石英的颗粒边界迁移重结晶比例逐渐增多,鼓胀式重结晶比例逐渐减少,指示剪切带由两侧到中心变质温度有升高趋势。

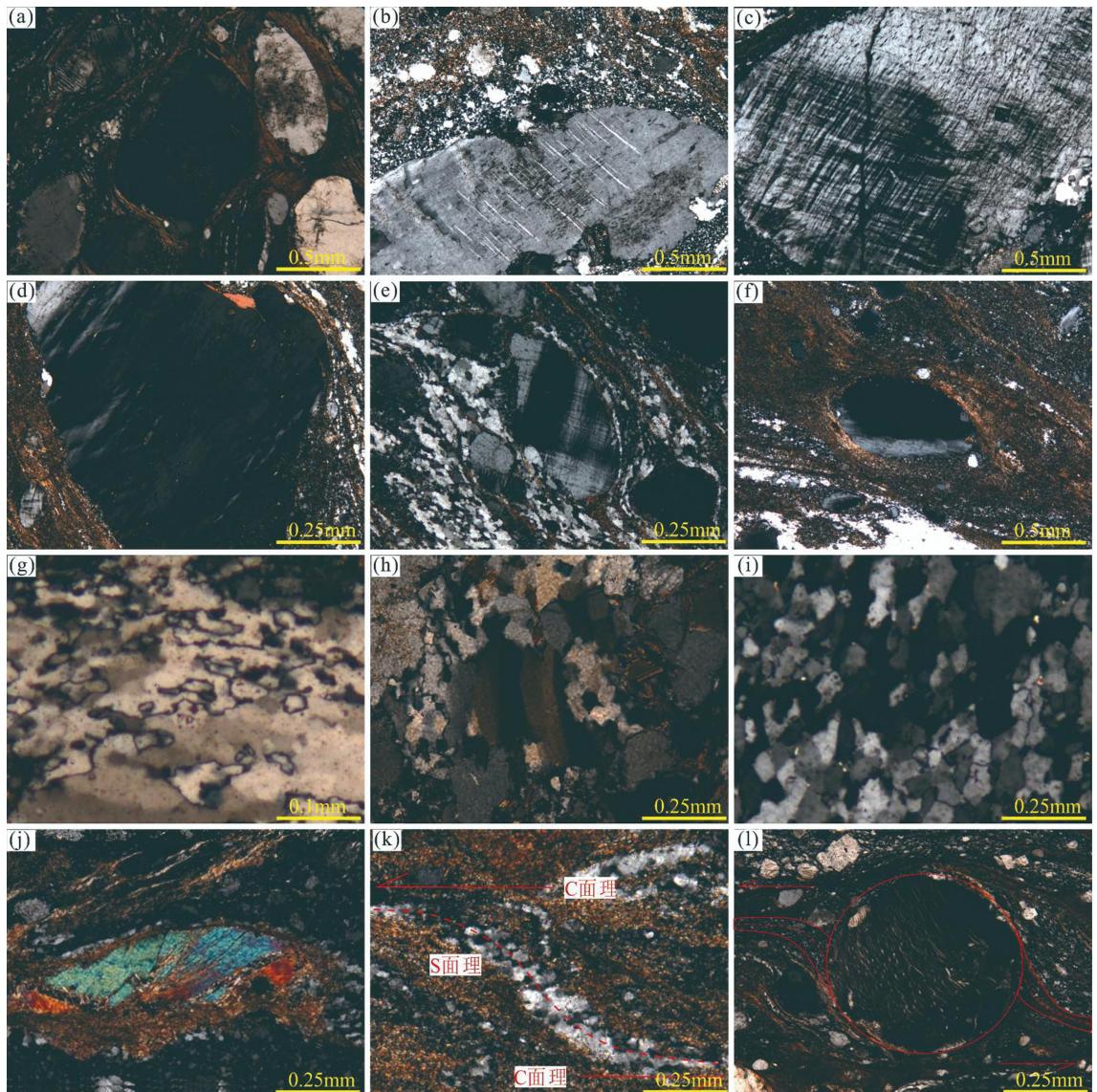
结合前人的研究成果及岩石中矿物的变性特征推测变质变形温度在 400~480℃ 之间。

#### 4.2.2 石英的 EBSD 组构特征判断

温度是众多控制石英滑移系的因素中最重要的一个。研究表明,在  $T < 400^\circ\text{C}$  时,主要表现为底面  $(0001) < a >$  滑动<sup>[13]</sup>,石英 C 轴图组构表现为周缘点极密。当  $T$  在 400~650℃ 时,各种滑移系同时发生活动,以底面滑移、菱面滑移和 a 柱面占主导地位<sup>[14]</sup>,石英的 C 轴组构图表现为周缘点极密、小圆环带、大圆环带及其组合;随着温度的升高,a 柱面滑移将占据主导地位<sup>[10]</sup>。当  $T > 650^\circ\text{C}$  时,C 柱面滑移占主导地位,此时石英 C 轴组构图为单一柱面滑移形成的中央点极。因此,通过对剪切带中石英 C 轴的分布特征进行分析,可以用来分析石英的滑移晶系,进而对剪切带的剪切指向、剪切温度以及变形机制进行研究<sup>[15-16]</sup>。

图 4a、图 4b 显示:双龙韧性剪切带糜棱岩中石英 C 轴组构特相似,石英 C 轴组构图表现为周缘点极密和小圆环带结合,无明显的大圆环带。点极密分布于边缘位置,部分点极密分布在圆周上,指示剪切作用变形过程中石英以底面滑移为主,存在少量的菱面滑移,不存在或存在极少量的柱面滑移。根

据以往的研究成果,可以推测双龙韧性剪切带的变形温度在 400~500℃。



a—石英显微裂隙;b—长石显微裂隙;c—长石变形纹;d—石英变形纹;e—变形带;f—波状消光;g—石英鼓胀式重结晶;  
h—石英亚颗粒;i—石英颗粒旋转重结晶;j—云母鱼;k—S-C 结构;l—旋转碎斑

图 3 双龙韧性剪切带中的显微构造特征

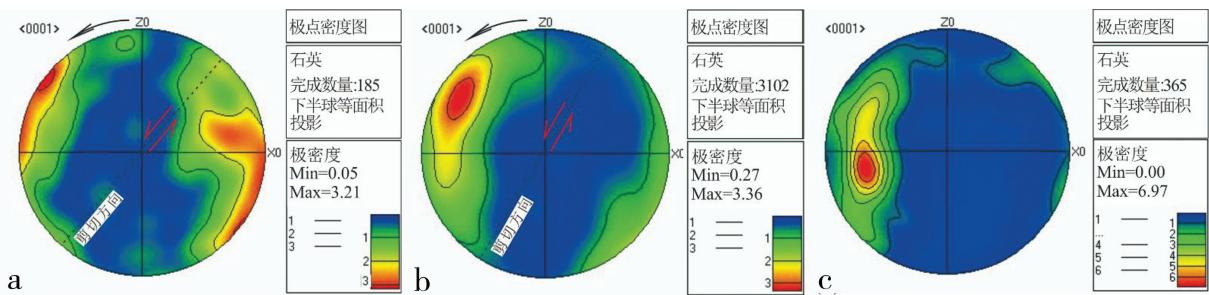


图 4 纯长石中石英 C 轴组构图

图 4c 显示:石英 C 轴的特征与图 4a、图 4b 相似,故反应的温度也在 400~500℃;另外,可能受到

局部应力作用的影响,C 轴的组构图与图 4a、图 4b 略有差别,对剪切带的运行学性质指示不明显。

综合以上矿物的显微构造特征及石英的 EBSD 组构特征,综合认为双龙韧性剪切带的变形温度在 400~500℃ 之间,且剪切带运动性质为左行剪切。

#### 4.3 古差应力

矿物在较高的温度或较强的应力条件下发生位错蠕变时常伴有动态重结晶,形成动态重结晶颗粒。金属和矿物的实验研究表明,动态重结晶颗粒的大小与变形达到稳定态时的应力大小有关:应力越大,颗粒越细。动态重结晶颗粒大小与差异应力的关系为: $\sigma_1 - \sigma_3 = AD^{-m}$ <sup>[17]</sup>,A 与 m 常数,D 为动态重结晶颗粒粒径。其中 A=6.1,m=0.68。

在双龙韧性剪切带岩石中含有很多动态重结晶的石英,所以可以采用动态重结晶颗粒大小法对古应力进行计算。通过对糜棱岩中动态重结晶石英颗粒的粒度进行统计,应用差应力计算公式  $\sigma_1 - \sigma_3 = 6.1D^{-0.68}$  计算剪切带的差应力。

统计显示:动态重结晶石英的平均粒度在 0.034~0.044 mm 之间;经差应力公式计算得到双龙韧性剪切带古差应力值在 51~61 MPa 之间。

#### 4.4 韧性剪切带的演化过程

野外观察及研究表明,双龙韧性剪切带的变质变形温度约 400~500℃,按照 30℃/km 的地温梯度计算,初步推测双龙韧性剪切带的形成深度约 13~17 km。在 51~61 MPa 古差应力的作用下,岩石经塑性变形由两侧到中心依次形成了初糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩一系列动力变质岩。随着变形的不断加强,糜棱岩中矿物不断细粒化,形成构造薄弱带。当应力超过岩石的屈服强度之后发生断裂,使断层两盘快速滑动形成假玄武玻璃。假玄武玻璃的出现也说明秦岭群曾经历高应变速率的古地震事件。后经长时间的地壳抬升和剥蚀作用使该韧性剪切带出露地表。

在华北板块和扬子板块碰撞过程的侧向滑动—走滑作用下,在秦岭造山带核部形成了一系列的韧性剪切带。双龙韧性剪切带是发育在东秦岭造山带核部一系列 NWW 向网结状韧性剪切带阵列中的一条。由此推测,这一系列网结状韧性剪切带与双龙韧性剪切带可能具有相似的变质变形环境。

### 5 结论

(1) 双龙韧性剪切带为发育在秦岭造山带核部

的一条 NWW 向展布的韧性剪切带,由两侧到中心依次发育了初糜棱岩、糜棱岩、超糜棱岩以及假玄武玻璃一系列动力变质岩。动力变质岩中发育显微裂隙、变形纹、波状消光、云母鱼等多种显微构造现象。

(2) 显微构造特征及石英的 EBSD 组构特征显示,韧性剪切带的运动学性质为左行剪切,且变质变形温度约为 400~500℃。

(3) 石英动态重结晶颗粒粒度的统计分析显示,得到其平均粒度在 0.034~0.044 mm,由动态重结晶颗粒法计算得到剪切带的古差应力值在 51~61 MPa。

### 参考文献:

- [1] 刘贵.韧性剪切带内的流体与岩石相互作用研究进展[J].地质力学学报,2020,26(2):175~186.
- [2] 陈虹,胡健民,武国利,等.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.
- [3] 游振东,索书田,韩郁菁,等.造山带核部杂岩变质过程与构造解析:以东秦岭为例[M].武汉:中国地质大学出版社,1991:1~202.
- [4] 袁枫杰.苏北连云港地区韧性剪切带显微构造特征及变形温度限制[D].北京:中国地质大学(北京),2017:1~12.
- [5] 钟增球,游振东,索书田,等.豫西秦岭造山带核部韧性剪切带岩石学研究[J].地质学报,1990,64(2):130~212.
- [6] 孙丽静.石英显微构造特征研究[D].北京:中国地质大学(北京),2020:1~2.
- [7] 游振东.秦岭群变质变形史及古构造模式[D].武汉:中国地质大学,2000:1~4.
- [8] 靳立杰,周汉文,王继林,等.豫西双龙韧性剪切带假玄武玻璃的成因及地质意义[J].地质科技情报,2014,33(1):49~54.
- [9] 胡玲.显微构造地质学概论[M].北京:地质出版社,1998:1~158
- [10] 向必伟,朱光,王勇生,等.糜棱岩化过程中矿物变形温度计[J].地球科学进展,2007,22(2):126~135.
- [11] Tullis J, Yund R A. Diffusion creep in feldspar aggregates: Experimental evidence[J]. Journal of Structural Geology, 1991, 13: 987~1000.
- [12] Stipp M, Stuënitz H, Heilbronner R, et al. The eastern Tonale fault zone: a 'natural laboratory' for crystal plastic deformation of quartz over a temperature range from 250 to 700℃ [J]. Journal of structural geology, 2002, 24(12): 1861~1884.
- [13] Schofield D I, D'Lemos R S. Relationships between syn-tectonic granite fabrics and regional PTtd paths: an example from the Gander-Avalon boundary of NE Newfoundland[J]. Journal of Structural Geology, 1998, 20(4): 459~471.
- [14] Passchier C W, Trouw R A J. Microtectonics[M]. Springer

Science & Business Media, 2005; 40 - 44.

- [15] 刘俊来,曹淑云,雒运鑫.岩石点在背散射衍射(EBSD)组织分析及应用[J].地质通报,2008,27(10):1638-1645.

- [16] 李长城,朱光,谢成龙,等.郯庐断裂带南段糜棱岩中石英C

结构研究[C].北京:中国地质学会,2005;3.

- [17] Twiss R J.Theory and applications of recrystallized grain size paleopiezometer[J].Pure Appl Geophys,1977,115:227-244.

## Analysis on Microstructural Characteristics and Metamorphic Deformation Environment of Shuanglong Ductile Shear Zone in Western Henan Province

JIN Lijie<sup>1,2</sup>, WANG Jilin<sup>3</sup>, ZHOU Hanwen<sup>4</sup>, TIAN Mingyang<sup>1</sup>, LI Chunjia<sup>1</sup>, WANG Zisheng<sup>1</sup>, HAN Shan<sup>1</sup>

(1. No.1 Exploration Institute of Geology and Mineral Resource, Shandong Jinan 250014, China; 2. Shandong Engineering Laboratory for Exploration of Rich Iron Deposit, Shandong Jinan 250014, China. 3. Shandong Testing Center of China Metallurgical Geology Bureau, Shandong Jinan 250014, China. 4. China University of Geosciences, Hubei Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Shuanglong ductile shear zone in Henan province lies in the core of Qinling orogenic belt. From outside to inside, a series of dynamic metamorphic rocks developed, such as protomylonite, mylonite, ultramylonite and pseudotachylite developed in sequence. This ductile shear zone is one of the reticulate strike slip ductile shear zone in the core of eastern Qinling orogenic belt. Study on microstructures have been carried out. It has a certain geological significance for studying metamorphic deformation environment of eastern Qinling orogenic belt. On the basis of field geological work, through analysis on petrology and characteristics of microstructures of ductile shear zone, metamorphic deformation environment, such as properties, temperature, ancient stress and strain rate of ductile shear zone have been analyzed and studied. It is showed that kinematic properties of Shuanglong ductile shear zone are sinistral shear, metamorphic deformation temperature is about 400°C~500°C, and the paleo stress value is about 51~61MPa.

**Key words:** Ductile shear zone; microtectonics; metamorphic environment; Shuanglong in southern Henan province