

CCSD 主孔 3 000 m 岩心构造产状特征及其地质意义

唐哲民, 陈方远

中国地质科学院地质研究所, 国土资源部大陆动力学重点实验室, 北京 100037

摘要: 对 CCSD 主孔 3 000 m 岩心叶理、具断层擦痕的微断层及断层擦痕产状特征进行了统计分析, 并分析了脆、韧性剪切带的运动学特征, 研究表明: (1) 榴辉岩类叶理产状明显较片麻岩类陡, 可能与其岩石能干性较强有关, 因而在挤压褶皱变形过程中表现出不同的变形行为, 韧性变形主体表现为顺层剪切, 含断层擦痕的微断层最主要的一组产状与叶理面一致或接近一致, 部分伴随与之呈共轭关系的另一组微断层. (2) 脆、韧性变形以 SEE-NWW 向剪切为主, 部分为近 SN 向, 脆性、韧性变形域断层运动方向基本一致, 但现在所保留下来的构造变形中韧性变形以 SEE 向 NWW 的逆冲型剪切为主, 部分为近 SN 向韧性剪切作用; 而脆性变形以 NWW 向 SEE 的正滑作用为主. (3) 主孔构造应力场初步可划分为 4 期, 现在所保留的主期构造为 SEE-NWW 向挤压构造应力场所致.

关键词: CCSD 主孔; 叶理; 韧性剪切带; 断层擦痕; 构造应力场.

中图分类号: P553 **文章编号:** 1000—2383(2006)04—0527—06 **收稿日期:** 2006—05—11

Attitude Characteristics of Structure and Geological Meaning in 3 000 m Core of the CCSD Main Hole

TANG Zhe-min, CHEN Fang-yuan

Key Laboratory for Continental Dynamics of MLR, Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

Abstract: This article analyzes attitude characteristics of foliation, miniature faults with striation and striation of miniature faults, and kinematic characters of brittle and ductile shear zone. The results indicate that: (1) The dip angles of eclogite-type foliations are obviously steeper than the angles of gneiss-type foliations, because the strength of the former is higher than the latter, so deformation of both is different in compressional process; the main part of ductile deformation is shearing along foliation; attitude of the main part of miniature faults with striation is identical with foliation, part of it is accompanied by other miniature faults which are conjugate with the former. (2) The main part of brittle and ductile deformation shears in an ESE-WNW direction, with a small part shearing in a near S-N direction. The movement direction of faults in brittle and ductile deformation is the same, but in structures conserved now, the main part of the ductile deformation is dominated by the ESE - WNW thrust shear sense, part of it is ductile shearing of SN direction; the main part of brittle deformations is dominated by the WNW-ESE normal shear sense. (3) The tectonic stress field of main hole is divided initially into four periods, the main structure reserved now was coming from compressional tectonic stress field in an ESE-WNW direction.

Key words: Chinese Continental Scientific Drilling (CCSD) main hole; foliation; ductile shear zone; striation of fault; tectonic stress field.

中国大陆科学钻探工程(CCSD)主孔位于苏鲁 主孔 3 000 m 岩心柱可划分为四大岩性段, 其中超高压变质带内的江苏东海县毛北村境内. CCSD 100~1 012 m 及 1 596~2 038 m 以榴辉岩、退变榴

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

基金项目: 科技部“973”项目(No. 2003CB716500); 中国地质调查局地质大调查项目(No. 121201056606); 中国大陆科学钻探工程项目.
作者简介: 唐哲民(1966—), 男, 副研究员, 主要从事变形构造研究、区调填图及岩心构造编录等工作. E-mail: tzm@ccsd.cn

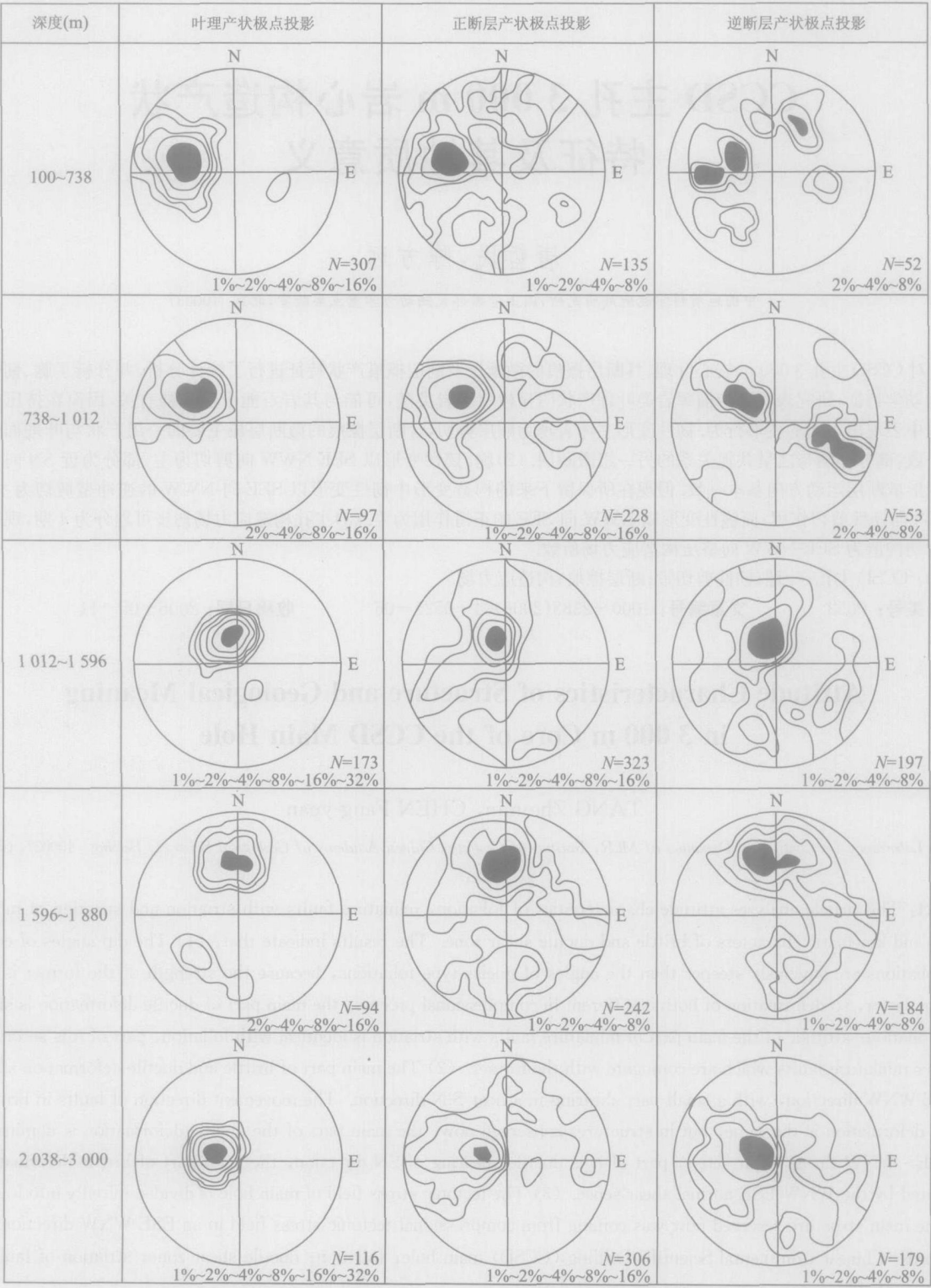


图 1 CCSD 主孔 3 000 m 岩心叶理及微断层产状极点投影等值线图(吴氏网下半球投影)
Fig. 1 Projection diagram of the foliation pole and miniature faults in 3 000 m core of the CCSD main hole

辉岩类为主,另 2 个岩性段以片麻岩为主(唐哲民等,2005);片麻岩分为副片麻岩和花岗质片麻岩,后者有多种类型,大部分属角闪黑云斜长片麻岩,于 180 Ma 选择性部分熔融的产物(游振东等,2004).有关 CCSD 主孔构造变形的研究主要集中在韧性剪切变形及面理产状变化上(许志琴等,2004;唐哲民,

2005),部分文献研究了微断层产状特征(崔军文等,2004;唐哲民等,2005)及构造应力场特征(崔军文等,2004).本文通过对 CCSD 主孔 3 000 m 岩心面理及含断层擦痕的微断层产状作极点投影等值线图,更加清晰地反映了不同岩性段岩石面理及微断层产状变化规律;首次对主孔 3 000 m 岩心微断层擦痕产状作极点投影等值线图,反映了主孔脆性变形运动学特征的总体规律;初步分析了主孔 3 000 m 岩心韧性变形的一般规律及构造应力场特征;讨论了岩石面理产状形成机制.

1 地质背景

苏鲁高压—超高压变质带的总体折返面理轨迹为 NE-SW 走向,朝 SE 和 SEE 缓倾,其基本构造单元为“剪切构造岩片”,剪切构造岩片之间的界限为强变形带组成的韧性剪切带,若干剪切构造岩片又组成“剪切构造叠覆岩片”,自 SE 向 NW 分为如下单元:南苏鲁高压低温变质岩剪切构造叠覆岩片(I)、南苏鲁高压中温变质岩剪切构造叠覆岩片(II)、北苏鲁超高压变质表壳岩剪切构造叠覆岩片(III)和北苏鲁超高压花岗质变质岩剪切构造叠覆岩片(IV)(许志琴等,2003);并具 NWW-SEE 向剪切矢量及 SEE 向 NWW 的剪切指向(许志琴等,2003;Faure *et al.*, 2003);CCSD 主孔位于北苏鲁超高压变质表壳岩剪切构造叠覆岩片内.根据成分特征,苏鲁超高压变质岩总体上可划分为五大类:以橄榄岩为代表的超基性岩类;以榴辉岩为代表的基性岩类;以片麻岩(和片岩)为代表的中酸性岩类;以石英岩为代表的硅质岩类和以大理岩为代表的碳酸盐岩类(张泽明等,2002);苏鲁地体由榴辉岩及其围岩的原岩所组成的巨量陆壳物质曾普遍发生深俯冲,并经历了超高压变质作用(刘福来等,2004).

2 几何学特征

CCSD 主孔 100~1 012 m 及 1 596~2 038 m 两大段榴辉岩类叶理产状明显较 1 012~1 596 m 及 2 038~3 000 m 片麻岩类叶理产状陡(图 1);前者榴辉岩类叶理总体向 SEE 或 S 倾,倾角总体 55°,部分为 L>S 组构类型;后者片麻岩类叶理总体向 SSE 或 SEE 倾,倾角总体 32°~33°(图 1),片麻岩内的榴

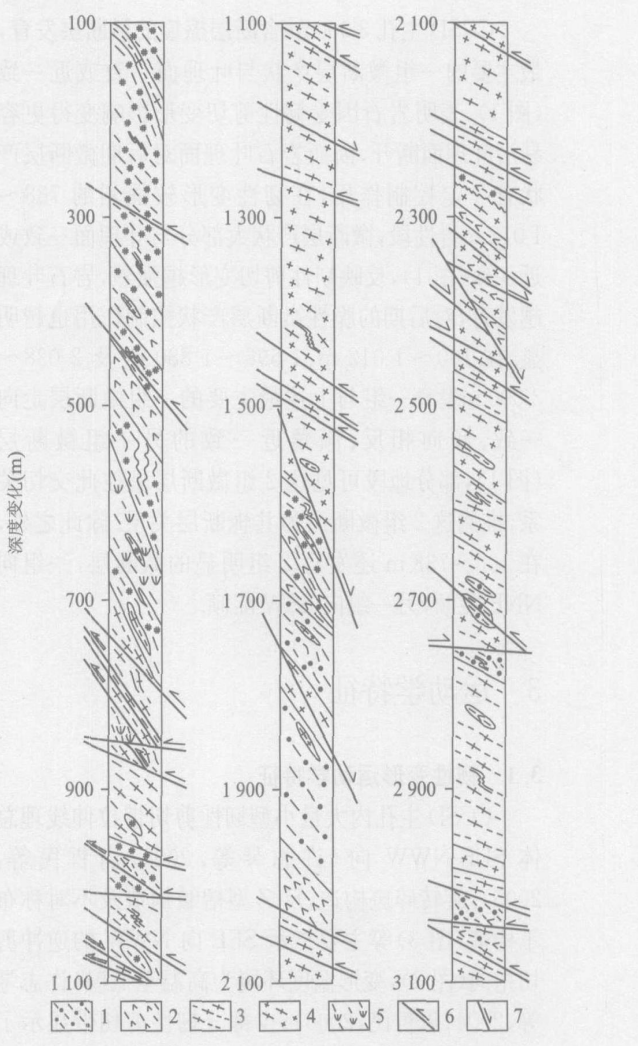


图 2 CCSD 主孔 100~3 100 m 岩心构造柱状图(许志琴等,2004 有变化)

Fig. 2 Columnar section of structure in 100—3 100 m core of the CCSD main hole

1. 榴辉岩类;2. 角闪岩类;3. 副片麻岩;4. 花岗质片麻岩;5. 超基性岩;6. 韧性或脆性剪切带及主要剪切指向;7. 脆性正断层

辉岩夹层(米级及以下)叶理产状一般与围岩片麻岩叶理产状一致,当榴辉岩体达到一定规模时(十米级及以上),其叶理产状明显较围岩片麻岩叶理产状陡.

CCSD 主孔韧性变形由许多小型韧性剪切带(主要为米级、十厘米级,部分为十米级)以平行排列方式或网结状结构样式组合而成,主体部分表现为顺层剪切(图 2),即韧性剪切带平行叶理面展布,而在 100~1 012 m 榴辉岩段及榴辉岩类与片麻岩类接触部位部分韧性剪切带产状比榴辉岩类叶理面产状平缓(图 2),因而也较该岩性段内顺层展布的韧性剪切带产状平缓(图 2),而与片麻岩段叶理面产状近一致.

CCSD 主孔 3 000 m 含断层擦痕的微断层发育,最主要的一组微断层产状与叶理面一致或近一致(图 1),表明岩石因受韧性剪切变形影响变得更容易沿叶理面断开,因而岩石叶理面对后期微断层产状有一定控制作用,在韧性变形较强烈的 738~1 012 m 岩性段,微断层产状大部分与叶理面一致或近一致(图 1),反映韧性剪切变形越强烈,岩石叶理越发育,对后期的脆性微断层产状控制作用也越明显.在 100~1 012 m、1 596~1 880 m 及 2 038~3 000 m 发育一组与上述最主要的一组微断层走向一致、倾向相反、倾角近一致的另一组微断层(图 1),部分地段可见这 2 组微断层呈彼此交切关系,推测这 2 组微断层为共轭断层关系.除此之外,在 100~738 m 还发育 2 组明显的微断层,一组向 NNE 陡倾,另一组向 SSW 陡倾.

3 运动学特征

3.1 韧性变形运动学特征

CCSD 主孔内大量小型韧性剪切带拉伸线理总体 SEE-NWW 向(许志琴等, 2004; 唐哲民等, 2005),旋转碎斑构造、反 Z 型褶皱构造及不对称布丁构造(图 3)等主要指示 SEE 向 NWW 的逆冲剪切指向(图 2),变形温度环境为高温至低温(许志琴等, 2004; 唐哲民, 2005);少部分韧性剪切带显示了后期 NWW 向 SEE 的正滑剪切指向(图 2),主孔 3 000 m 多处可见的 Z 型褶皱构造(图 2)即为该期变形的产物,变形温度环境为低温(许志琴等, 2004; 唐哲民, 2005). SEE-NWW 向韧性剪切作用主要发育于较软弱的(黑云)斜长角闪片岩夹层内,其次为副片麻岩,很少在花岗质片麻岩、榴辉岩及超基性岩内发育.此外,100~738 m 榴辉岩岩性段部分岩石发育近 SN 向拉伸线理,表现为绿辉石等矿物沿叶理面强烈拉长定向,石英组构模型显示自 N 向 S 的剪切指向,变形环境为高温至中温,以前者为主,该期应变为简单剪切机制(许志琴等, 2004),反映了折返早期榴辉岩等在超高压榴辉岩相条件下受到了强烈的 SN 向剪切变形,而在后期角闪岩相—绿片岩相条件下的 SEE-NWW 向韧性剪切变形中,榴辉岩及超基性岩处于弱变形域,并呈透镜状、团块状分布于围岩之中,而较大的榴辉岩透镜体与围岩接触带往往发育后期韧性剪切变形,榴辉岩透镜体从核心到接触带岩石类型从新鲜榴辉岩(有时缺)一角闪石

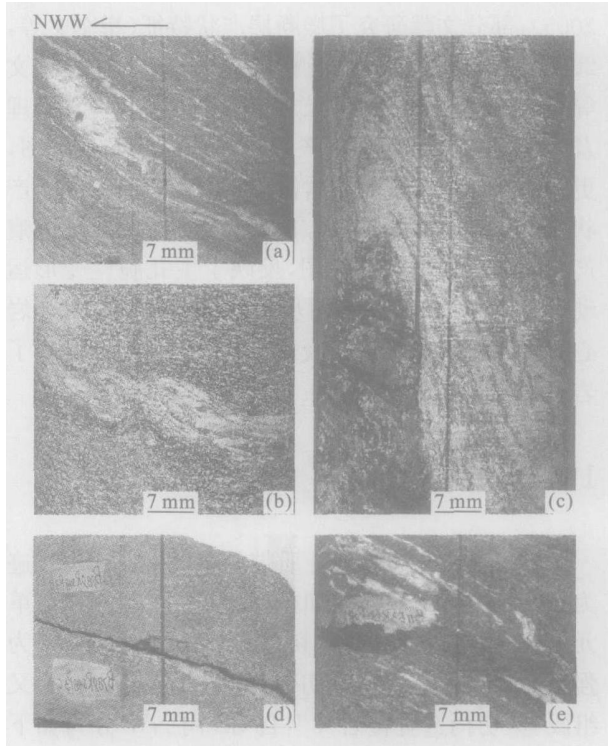


图 3 CCSD 主孔韧性剪切带剪切指向标志
Fig. 3 Shear sense markers of ductile shear zones from the CCSD main hole

- a. B1534R6P40a, 3 016.5 m, 旋转碎斑体系示逆冲型剪切指向;
- b. B558R401P3aA, 1 012 m, 反 Z 型褶皱示逆冲型剪切指向;
- c. B359R286P1f, 695 m, 反 Z 型褶皱示逆冲型剪切指向;
- d. B789R548P3c, 1 312 m, 长英质脉不对称布丁构造示逆冲型剪切指向;
- e. B1153R60P28b, 2 262 m, 长英质脉不对称布丁构造示逆冲型剪切指向

化榴辉岩一角闪岩.因此,早期 SN 向韧性剪切变形比后期 SEE-NWW 向韧性剪切变形更强烈、构造变形层次更深.

3.2 脆性变形运动学特征

主孔 3 000 m 脆性微断层的擦痕统计分析表明,正断层擦痕总体为 SEE 向(图 4d),其次为 NE-SW 向、近 SN 向;逆断层擦痕也以 SEE 向为主(图 4c),部分为 SE-NW 向,其次为近 SN 向、NE-SW 向,说明正、逆断层运动方向均以 SEE-NWW 向为主,但正断层条数远大于逆断层条数,且主孔断层构造岩主要表现为张性或张扭性,因此,主孔脆性变形以 NWW 向 SEE 正滑的伸展变形为主.100~738 m 榴辉岩岩性段逆断层擦痕以近 SN 向为主(图 4a),与该岩性段韧性变形的拉伸线理方位基本一致,反映韧、脆性变形运动方位的一致性.韧性变形较强的 738~1 012 m 岩性段逆断层擦痕显示较

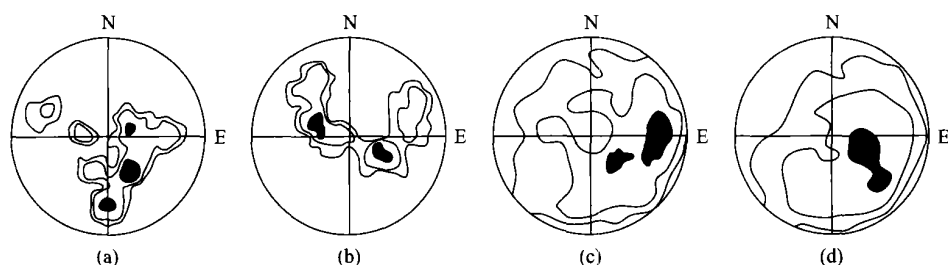


图4 CCSD主孔3 000 m岩心微断层擦痕产状投影等值线图(吴氏网下半球投影)

Fig. 4 Projection diagram of striation attitude of miniature faults in 100–2 950 m core of the CCSD main hole

a. 100~738 m 逆断层擦痕投影图, $N=52, 2\% \sim 4\% \sim 8\%$; b. 738~1 012 m 逆断层擦痕投影图, $N=52, 2\% \sim 4\% \sim 8\%$; c. 3 000 m 逆断层擦痕投影图, $N=697, 1\% \sim 2\% \sim 4\%$; d. 3 000 m 正断层擦痕投影图, $N=1\,259, 1\% \sim 2\% \sim 4\%$

强的SEE-NWW向优选方位(图4b),可能反映早期较强的SEE-NWW向韧性剪切作用在脆性变形域运动方向不变。

综上所述,主孔3 000 m岩心在脆性、韧性变形域断层运动方向基本一致,但现在所保留下来的构造变形中,韧性变形以SEE向NWW的逆冲型剪切为主,部分为近SN向韧性剪切作用;而脆性变形以NWW向SEE的正滑作用为主,可能反映早期的脆性逆冲变形大部分已被剥蚀掉,而晚期的韧性正滑变形的主体部分尚未出露于地表或近地表。

4 构造应力场探讨

主孔挤压变形中韧、脆性变形均显示以SEE向NWW的逆冲剪切指向为主,并具走向NNE-SSW、倾向SEE或NWW的共轭断层,表明SEE-NWW向主压应力场的作用;在3 958 m、3 992 m以及4 093 m等处发育裂缝,裂缝产状 $190^\circ \angle 80^\circ$ 左右,裂缝内发育垂直脉壁生长的石英晶芽,反映了NNE-SSW向拉张作用,可能属SEE-NWW向挤压作用的伴生构造,该期构造应力场为孔区的主期构造应力场。主孔挤压变形的另一期构造作用为近SN向挤压,100~738 m榴辉岩岩性段韧、脆性变形均表现为SN向的逆冲作用, σ_1 方位为近SN向。还有一期挤压变形为NE-SW向挤压(崔军文等,2004),该期变形相对较弱,并与运用钻孔崩落法地应力测量获得的现今构造应力场一致, σ_1 方位为NE-SW向。主孔伸展变形中,脆、韧性变形均显示NWW向SEE的正滑为主,反映的构造应力场为 σ_1 近直立, σ_2 方位为NWW-SEE向。本文所划分的4期构造应力场与崔军文等(2004)依据CCSD主孔100~500 m脆性破裂所划分的4期构造应力场基本

一致,其先后顺序还有待进一步研究。

5 讨论

CCSD主孔榴辉岩类叶理产状明显较片麻岩类叶理产状陡,江苏东海碱场榴辉岩体叶理产状也明显较围岩叶理产状陡(索书田等,2003),因此这种产状特征在榴辉岩体达到一定规模(十米级及以上)时有一定的区域代表性,反映榴辉岩类与围岩不同的变形行为;区域上,榴辉岩和超基性岩呈大小不一的透镜状、团块状夹在大面积分布的围岩—变质表壳岩和花岗质片麻岩中(许志琴等,2003),因此前者的岩石能干性可能比后者高,岩石的透镜状、团块状分布可能是强烈石香肠化作用的结果。当夹于弱基质中的强硬层发生褶皱时,强硬层比软弱层形成更加明显、更加紧闭的褶皱;褶皱的强硬层之外的软弱层从强硬层附近到远离强硬层,从相对较弱的褶皱到以均匀加厚来调节总体的顺层压缩(Ramsay and Huber, 1987)。因此,CCSD主孔榴辉岩类叶理产状明显较片麻岩类叶理产状陡的原因可能与其岩石能干性较强有关,因而在折返挤压变形过程中,形成更加明显、更加紧闭的褶皱构造;当进一步挤压变形时,褶皱的榴辉岩类岩石石香肠化进而形成透镜状、团块状岩石。韧性剪切变形主要沿软弱层层分布,并与弱变形域中的透镜状、团块状榴辉岩及超基性岩构成网结状构造样式。

6 结论

(1)CCSD主孔榴辉岩类叶理产状明显较片麻岩类陡,可能与前者岩石能干性较后者强,因而在挤压褶皱变形过程中表现出不同的变形行为有关。(2)

脆、韧性变形以 SEE-NWW 向剪切为主, 部分为近 SN 向, 脆、韧性变形域断层运动方向基本一致. 但现在所保留下来的构造变形中, 韧性变形以 SEE 向 NWW 的逆冲型剪切为主, 部分为近 SN 向韧性剪切作用; 而脆性变形以 NWW 向 SEE 的正滑作用为主. (3) 主孔构造应力场初步可划分为 4 期, 现在所保留的主期构造为 SEE-NWW 向挤压构造应力场所致.

致谢: 本文在成文过程中得到了许志琴院士的指导, 所用原始资料为 CCSD 岩石构造编录室及测井室有关成员的集体劳动成果, 在此一并致以诚挚谢意!

References

- Cui, J. W., Wang, L. J., Li, P. W., et al., 2004. Tectonic stress field of brittle deformation within 2 000 m of the main borehole of Chinese Continental Scientific Drilling. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 75–82 (in Chinese with English abstract).
- Faure, M., Wei, L., Monie, P., et al., 2003. Exhumation tectonics of the ultrahigh-pressure metamorphic rocks in the Qinling orogen in East China: New petrological-structural-radiometric insights from the Shandong Peninsula. *Tectonics*, 22(3): 1–22.
- Liu, F. L., Xu, Z. Q., Yang, J. S., et al., 2004. Geochemical characteristics and UHP metamorphism of granite gneisses in the main drilling hole of Chinese Continental Scientific Drilling Project and its adjacent area. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 9–26 (in Chinese with English abstract).
- Ramsay, J. G., Huber, M. I., 1987. The techniques of modern structural geology, volume 2: Folds and fracture. Translated by Xu, S. T., Geological Publishing House, Beijing, 78–176 (in Chinese).
- Suo, S. T., Yang, Q. J., Zhong, Z. Q., et al., 2003. Early deformation of coesite-bearing ultra-high-pressure eclogites: An example from Jianchang, Donghai County, northern Jiangshu Province, China. *Geological Science and Technology Information*, 22(4): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Z. M., 2005. Attitude characteristics of foliation and miniature fault within eclogite type and gneiss type from the 100–2 950 m core of the CCSD main hole. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 24(5): 438–442 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Z. M., Chai, Y. C., Chen, S. Z., et al., 2005. Deformational characteristics of the granitic gneiss unit from the 1 113–1 600 m core of the CCSD main hole. *Geology in China*, 32(2): 265–275 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Zhang, Z. M., Liu, F. L., et al., 2003. Exhumation structure and mechanism of the Sulu ultrahigh-pressure metamorphic belt, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 433–450 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. Q., Zhang, Z. M., Liu, F. L., et al., 2004. The structure profile of 0–2 000 m in the main borehole, Chinese Continental Scientific Drilling and its preliminary deformation analysis. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 53–72 (in Chinese with English abstract).
- You, Z. D., Su, S. G., Liang, F. H., et al., 2004. Petrography and metamorphic deformational history of the ultrahigh pressure metamorphic rocks from the 100–2 000 m core of Chinese Continental Scientific Drilling, China. *Acta Petrologica Sinica*, 20(1): 43–52 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Z. M., Xu, Z. Q., Liu, F. L., et al., 2002. Composition and metamorphism of the root of the southern Sulu orogen. *Geological Bulletin of China*, 21(8): 610–616 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 崔军文, 王连捷, 李朋武, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 2 000 m 以上脆性变形构造应力场. *岩石学报*, 20(1): 75–82.
- 刘福来, 许志琴, 杨经绥, 等, 2004. 中国大陆科学钻探工程主孔及周边地区花岗质片麻岩的地球化学性质和超高压变质作用标志的识别. *岩石学报*, 20(1): 9–26.
- Ramsay, J. G., Huber, M. I., 1987. 现代构造地质学方法, 第二卷: 褶皱和断裂. 徐树桐译. 北京: 地质出版社, 78–176.
- 索书田, 杨启军, 钟增球, 等, 2003. 含柯石英超高压榴辉岩的早期变形——以苏北东海碱场榴辉岩体为例. *地质科技情报*, 22(4): 1–8.
- 唐哲民, 2005. CCSD 主孔 100~2 950 m 榴辉岩类和片麻岩类叶理及微断层产状特征. *岩石矿物学杂志*, 24(5): 438–442.
- 唐哲民, 柴耀楚, 陈世忠, 等, 2005. CCSD 主孔 1 113~1 600 m 花岗质片麻岩单元的变形构造特征. *中国地质*, 32(2): 265–275.
- 许志琴, 张泽民, 刘福来, 等, 2003. 苏鲁高压—超高压变质带的折返构造及折返机制. *地质学报*, 77(4): 433–450.
- 许志琴, 张泽民, 刘福来, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 1 200 m 构造柱及变形构造初步解析. *岩石学报*, 20(1): 53–72.
- 游振东, 苏尚国, 梁风华, 等, 2004. 中国大陆科学钻探主孔 100~2 000 m 超高压变质岩岩相学特征与变质变形史. *岩石学报*, 20(1): 43–52.
- 张泽民, 许志琴, 刘福来, 等, 2002. 南苏鲁造山带根部的物质组成及变质作用. *地质通报*, 21(8): 610–616.