

# 碳酸盐岩石变形显微构造与 宏观构造关系研究<sup>①</sup>

刘文灿 李东旭 张 达  
(中国地质大学,北京) (中国地质科学院地质力学研究所)

**摘 要** 碳酸盐岩石变形组构及其优选方位的实验研究得到比较完善的发展,但应用于解释自然界复杂的地质构造变形还存在许多困难。本文将碳酸盐岩微观构造分析与宏观构造研究紧密结合,重点研究了浅层次(铜陵地区)和中—深层次(北淮阳地区)构造环境中碳酸盐岩的显微构造特征、变形行为及所揭示的宏观构造信息,为一系列地质问题的分析提供了充分的微观依据。

**关键词** 碳酸盐岩 显微构造 变形分析

## 0 引言

碳酸盐岩石是广泛存在于地壳中的岩石类型之一,也是最早最常用于进行变形实验研究的天然地质材料。50—60年代,许多地质学家对方解石及其岩石进行过大量实验研究<sup>[1-6]</sup>,70年代对变形岩石优选方位的发展进行探索,同时注意到不同变形条件下的变形行为<sup>[7-13]</sup>。特别是位错理论被应用于岩石变形微观研究,推动了构造研究的定量性发展<sup>[14-17]</sup>。近期研究注意到自然界大多数岩石变形属于非共轴的简单剪切变形,甚至更为复杂<sup>[18-20]</sup>。韧性剪切带糜棱岩组构发展、流变学特征及其地质意义的研究受到重视<sup>[21-32]</sup>,表明变形岩石显微组构分析开始从实验室走向应用于解决实际构造问题。

本文将微观与宏观构造研究相结合,选择处于浅层次(铜陵地区)和中—深层次(北淮阳地区)构造环境中碳酸盐岩的变形特征进行研究,重点探讨微观构造与宏观构造的密切关系及其所揭示的构造信息。

## 1 铜陵地区碳酸盐岩变形显微构造分析

铜陵地区位于长江中下游,区内地层除缺失下、中泥盆统外,从志留系—第四系均较发育,其中碳酸盐地层累计厚度达1500 m,分布十分广泛。碳酸盐地层除近燕山期花岗岩体发生接触变质外,未发生明显的区域变质作用,构造变形主要表现为脆性断裂和等厚褶皱作用,属于浅层次变形域。笔者研究了断裂构造和花岗岩体接触带碳酸盐岩的变形特征,特别分析了其显

<sup>①</sup> 地质力学开放研究实验室资助项目。

微构造所反映的宏观构造意义。

### 1.1 灰岩的脆性断裂构造变形

野外调查表明,区内灰岩中断裂构造发育。张性(或张剪性)断层表现为陡立的、较宽的构造角砾岩带(以NW向为主),角砾大小混杂,棱角明显,由方解石或钙质胶结。角砾内部除有微细的不规则裂隙发育外,几乎没有变形。断层破碎带与未变形地层有两种主要变化关系:一是渐变关系,由角砾岩带到未变形地层连续变化,破碎由强到弱,角砾由小变大;另一种是断层边界被后期剪切滑动面复合,界面平直并有白色方解石脉分隔,方解石的生长垂直于脉壁。张性破碎带的形成反映岩层的局部拉张和体积横向扩展。

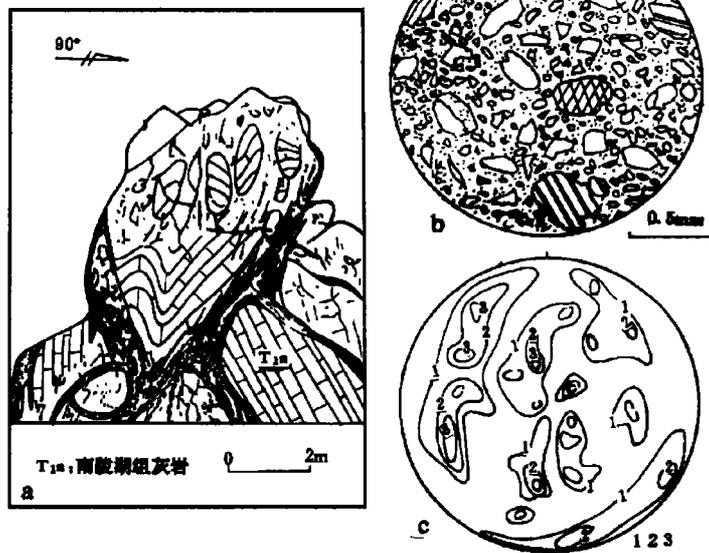


图1 压剪性断层特征

Fig.1 Compresso-shear fault zone

- a. 灰岩中SN向压剪性断层带;b. 断层中碎裂岩结构特征;
- c. 碎裂岩方解石 $[10\bar{1}4]$ 极图

剪切断层多表现为一个剪切镜面,少数发育较薄的细粒灰黑色断层岩(或断层泥),发育叶理。压剪性断层常表现为由巨大构造透镜体组成的挤压剪切破碎带(图1a),构造透镜体边部或相间部位为灰黑色碎粒岩、碎粉岩(图1b)或断层泥,挤压叶理发育。构造透镜体和断裂带边部发育多层方解石脉,厚约1—5 cm,脉壁平直,并有擦痕发育。方解石生长平行于脉壁,并有破碎,机械双晶极为发育,是同构造变形分解作用的产物。包体测温证明其形成温度约200—270℃。碎粒岩中方解石 $[10\bar{1}4]$ 极图不具优选方位(图1c)。

以上表明,浅层次环境中碳酸盐岩的构造变形以机械破碎为特征,构造岩中方解石无明显优选方位。虽然温度较低,但变形后期仍可发生变形分解

作用。方解石极为发育的机械双晶证明在岩石脆性变形域内,方解石晶内变形机制为双晶滑移。

### 1.2 大理岩的韧性变形

岩石构造变形行为是温、压和应力-应变状态(包括时间)的函数,因此构造层次所反映的不仅仅是深度,而是综合的构造变形环境。在浅层次构造域中,由于局部温压条件的增强,岩石可以表现为塑性特征。作者通过对本区燕山期花岗岩体接触带碳酸盐岩韧性变形行为的研究,分析探讨了构造变形与花岗岩体侵位的内在联系。

(1)狮子山SN向挤压片理带,分布在铜陵西部狮子山矿田内辉石二长闪长岩体两侧三叠系大理岩中,宽度约50 m,片理密集,完全置换层理,产状 $272^\circ \angle 80^\circ$ ,线理不发育。大理岩化是

岩体接触变质作用的结果,片理带平行于岩体边界(近 SN 向),远离岩体大理岩化及片理均趋减弱直至消失。因此,挤压片理带的形成与受控于区域构造应力场的岩体侵位引起的侧向膨胀有关(图 2)。片理带内为钙质构造片岩,由方解石、白云母、磁铁矿等组成(图 3a)。垂直片理和水平面切片中方解石呈长条状、透镜状,定向排列,粒径 0.03—0.01mm,具条带状消光,少量扭折及双晶(片理带之外,方解石双晶发育),无碎裂化现象(图 3 b)。利用长短轴法求得垂直片理走向和水平面切片中方解石应变椭圆轴率为 3,相关系数 0.85。图 3c 为上述切片中方解石 X 射线分析 $[11\bar{2}0]$ 极图,为一大圆环带,与片理一致,反映近 EW 向韧性压扁变形,属纯剪切变形,与区域构造应力场和岩体侵位热动力作用有关。从方解石 e 双晶不发育,呈长圆状或椭圆形态及其组构特征分析,方解石主导变形机制可能是高温条件下的颗粒边界迁移重结晶作用<sup>[20]</sup>。据 TEM 观察,方解石中位错构造比较稀疏、均匀,说明有较强的恢复。

(2) 凤凰山花岗岩体围岩的韧性剪切变形。该岩体位于铜陵凤凰山 NE 向复式向斜核部,平面形态呈椭圆形,面积约 10km<sup>2</sup>。围岩以三叠系碳酸盐岩为主,接触变质作用强烈,形成 0.5—2.5km 的热变质带,其中的碳酸盐岩发生塑性变形,且越近岩体愈强,围绕岩体边界形成韧性剪切带,由流变褶皱、流劈理、糜棱岩带组成(图 2)。宏观构造观察表明,流变褶皱长短翼

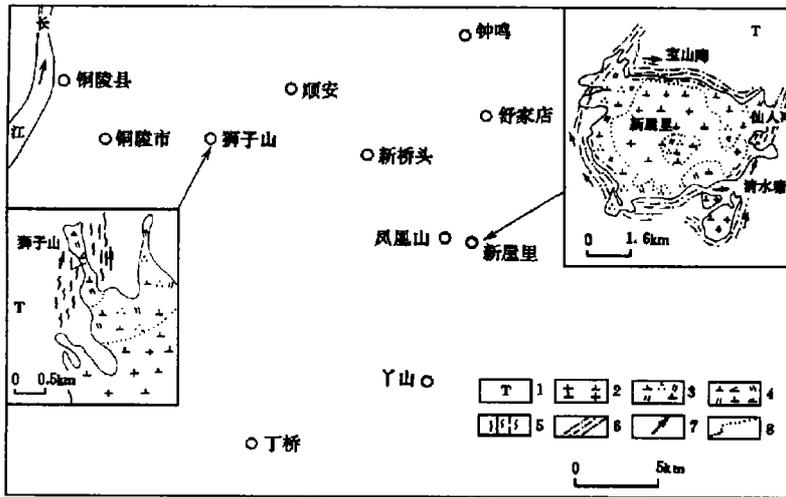


图 2 研究区位置及地质简图

Fig. 2 Location and geological map of research area

1. 三叠系; 2. 花岗闪长岩; 3. 石英二长闪长岩; 4. 辉石二长闪长岩; 5. 片理带; 6. 韧性剪切带; 7. 流变褶皱; 8. 岩相界线

不对称,轴面多与岩体接触界线一致,枢纽大多数陡立。野外判断,围岩受到了左旋剪切变形。流劈理也多与岩体接触带平行,仅在岩体东西两边的朱家山和仙人冲一带,向 NNE 向继续延伸一段距离。流劈理置换岩层层理,面上可见不强烈的线理,也为左旋剪切变形。

镜下可见韧性剪切带中方解石被强烈压扁拉长,极具定向性,长轴方位与流劈理近于一致,发育 e 双晶。在垂直于流劈理水平切片(大致平行于线理)中,方解石平均粒径为 0.1—0.5mm,强烈剪切部位,粒径更小,可见星点状黄铁矿弥漫其中,呈带状分布,也具定向性,说明接触变质、矿化与变形几乎同期发生。长短轴之比为 2—4。剪切指向仍为左旋,与宏观判断一致。在宝山陶、清水塘两处的钙质糜棱岩中方解石 $[11\bar{2}0]$ 极图(图略)为单斜对称,由一个大圆环带和位于其中的中心点极密组成,大圆环带与流劈理有较小夹角(10—20°),反映出明显

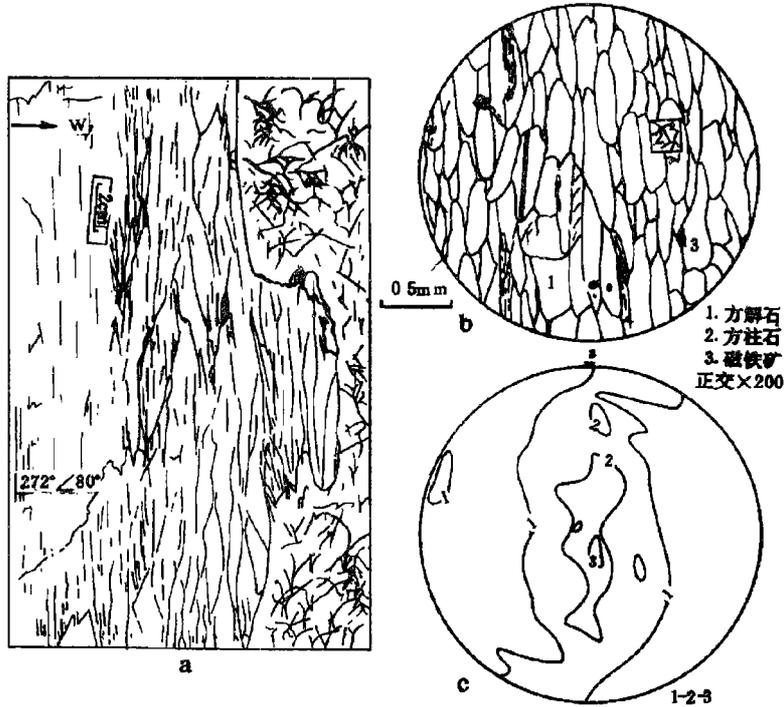


图3 簸箕山构造片理带

Fig. 3 Schistosity zone in Beijishan

a. SN 向片理带; b. 片理带中方解石变形; c. 片理带中方解石 $[11\bar{2}0]$ 极图

的左旋剪切特征,与单剪变形实验结果相似,相当于流变域 I 内的变形<sup>[33]</sup>。该变形域以 e 双晶滑动为主导变形机制,与镜下观测结果一致。可能与花岗岩体的形成温度较低(约 700°C)和强烈的剪切作用有关。通过该花岗岩体接触带围岩宏、微观构造的研究,揭示了岩体侵位的运动学和动力学信息,结合岩体内流动变形构造及其岩石磁性组构的测定,合理地解释了岩体的侵位机制——即左旋螺旋状上升气球膨胀侵位机制。

## 2 北淮阳地区梅山群中韧性剪切带

北淮阳地区分布有被称为梅山群的中—浅变质岩系,变质程度可达绿帘角闪岩相—角闪岩相。上覆地层为佛子岭群,下伏地层为石炭系。其中、上部为以碳酸盐岩为主的变质岩组合,叠加韧性剪切变形使其糜棱岩化,表现为大型韧性剪切带。在剪切带的研究中,碳酸盐岩显微构造分析为解决一些重要的地质问题起到了关键的作用。

### 2.1 梅山群的解体及其与佛子岭群的关系

梅山群自建立以来就存在许多矛盾现象,如有的地方变质很浅,有的地方变质变形极为强烈。在浅变质的地方可以采到植物化石,其它多数地方没有发现化石。因此,梅山群的分布、性质、时代及区域对比等问题还未解决,这影响到整个北淮阳地区的地层层序和演化历史的分析。研究表明,在原梅山群中包含着含植物化石的石炭系和不含化石的前石炭纪变质地层,两者为逆掩断层接触,前者多呈构造窗的型式分布在较低的位置。如在沙河店东侧可见两者的接

触关系(图 4),逆掩断层之上为梅山群之钙质糜棱岩和长英质糜棱岩,下盘为石炭系砂岩、粉砂岩。由于糜棱岩化作用,上盘变质岩的矿物粒度减小,颜色变深,不易辨认,以前与下盘地层划为一体。镜下观察表明,钙质糜棱岩中方解石变形强烈,矿物颗粒被剪切拉长,定向排列,并夹有长英质变形条带,动态重结晶作用明显,少数方解石具 e 双晶,颗粒很细,局部可见不对称长英质旋转碎斑构造,据此判断剪切方向为近水平的右旋。上述显微变形结构与下盘砂岩的砂状结构分属不同的构造环境,因此梅山群应予解体。

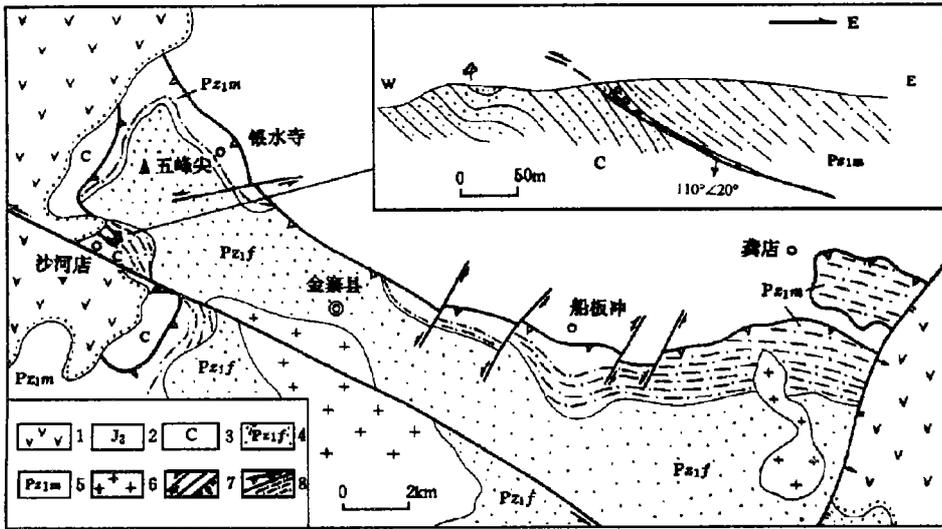


图 4 金寨地区地质构造简图

Fig. 4 Geological structural map of Jinzhai area

1. 上侏罗统一下白垩统火山岩; 2. 中侏罗统红层; 3. 石炭系; 4-5. 下古生界佛子岭群、梅山群;
6. 中生代花岗岩体; 7. 平移断层/正断层; 8. 逆掩断层/韧性剪切带

梅山群与上覆佛子岭群接触关系也未有定论,不仅有上、下之辩,也有整合、不整合或构造接触之争。通过剖面上显微构造研究,证明两者之间为一强烈构造滑脱带,以发育钙质构造片岩、变余糜棱岩为特征,并夹有灰黑色的石墨片岩,其中S状叶理极为发育,与剪切面组成宏观小尺度的S-C组构。薄片中也具相同的结构,其剪切指向与上述一致。钙质构造片岩中含有较多的长英质碎斑和条带,表明在以碳酸盐岩为主的梅山群和石英岩、石英片岩为主的佛子岭群之间发生了构造混合作用。佛子岭群下部石英岩、石英片岩与梅山群的碳酸盐岩之间存在岩性差异,因此梅山群中韧性剪切带仅限于石英岩之下,几乎所有部位均是碳酸盐岩糜棱岩与之接触。这表明两者的上、下层序不可能倒置,但其间存在大型的深层近水平韧性拆离滑脱带。

## 2.2 关于“含砾大理岩”的成因问题

梅山群上部钙质糜棱岩中常含有肉眼可见的构造假砾(5—20%),前人认为是沉积成因的含砾灰岩。观察表明,所谓“砾石”为长英质和炭质碎斑,长英质碎斑是长英质脉体受剪切变形而形成的,大小不一,边界圆滑,呈扁豆状定向排列,大小随机分布,无粒序显示,属构造残斑无疑。炭质成分也非沉积碎屑,而是碳酸盐岩在强烈挤压剪切作用下形成的含炭泥质很高的构造岩,在糜棱岩化过程中被混杂在钙质糜棱岩中。碎斑小者仅有0.2cm,大者可达10cm以上。在炭质碎斑中叶理极为发育,剥开后其中又夹有灰岩构造透镜体。

在大理岩糜棱岩类型中,石墨常作为暗色条带出现,而在超糜棱岩类型中,石墨表现为方解石颗粒表面的细粒覆盖物<sup>[29]</sup>。本区钙质糜棱岩中的所谓炭质角砾中方解石与炭质、泥质混为一体。Valley 和 O'Neil(1981)发现在各时代大多数变质岩中方解石与石墨共存,与有机的碳质相比,石墨的  $\delta^{13}\text{C}$  值相对较高( $> -10.0$ ),而  $\Delta(\text{Cc}-\text{Cr})$  相对较小( $0.0-10.0$ ),表明石墨的组成是非生物成因的,可能是变质作用时同位素交换的结果<sup>[34]</sup>。这种交换在  $300^\circ\text{C}$  的低温条件下就可发生,但仅仅当峰变质温度高于  $500-600^\circ\text{C}$  时才能达到正常的平衡,即相当于高绿片岩相以上。梅山群的变质作用完全具备这一条件。

为便于对比,作者对含碎斑和不含碎斑的钙质糜棱岩分别进行岩石化学、稀土和微量元素分析,结果表明含碎斑的钙质糜棱岩  $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  略高于不含碎斑的钙质糜棱岩, $\text{CaO}$  略低,其余均无明显的差别。化学成分的变化与长英质的加入有关。而稀土、微量元素的含量几乎看不出差异,表明原岩的性质是相同的,并非一类为含砾灰岩(大理岩),另一类为灰岩(大理岩)。

### 3 几点认识

上述两个地区不同构造环境中的碳酸盐岩变形显微构造分析及其与宏观构造关系的研究,可得出下几点认识:

(1)在浅层次(铜陵地区)变形条件下,灰岩中脆性断裂构造比较发育。张性断层表现为较宽的构造角砾岩带,但角砾内部几乎未变形;在压剪性断层中,以发育巨大的构造透镜体为特征,边部或其间见碎裂岩,方解石机械双晶发育,但未形成明显的优选方位。

(2)由于花岗岩体的侵位而发生接触变质变形作用,岩体的碳酸盐岩围岩表现为塑性变形行为,形成片理带和韧性剪切带。方解石表现出不同的变形特征及其组构的对称性反映不同的变形方式,据此可以推断岩体的侵位动力学机制。

(3)在造山带(北淮阳地区)的构造演化中,强烈的多期次的构造变形使不同时代的地体相互叠置在一起,为地层层序的建立造成困难。碳酸盐岩显微构造分析为这类地层的解体和重新置位提供了充分的依据。

(4)中—深层次(北淮阳地区)条件下,碳酸盐岩的变形显微构造的保存与其恢复作用的程度有密切的关系。方解石是极易恢复的矿物,但在北淮阳韧性剪切带中表现出丰富的显微构造,说明韧性剪切带的变形是在区域变质作用之后发生的,这一结论与宏观分析吻合。

(5)微观构造研究只有紧密结合宏观地质构造问题的分析才具有重要意义。碳酸盐岩的变形机制与宏观构造环境有密切关系,只有全面了解宏观构造特征才能正确认识微观变形机制所反映的地质意义。

### 参 考 文 献

- 1 Turner F J, Nature and dynamic interpretation of deformation in calcite of three marbles. *Am J. Sci.* 1953, 251: 276-298.
- 2 Turner F J, Griggs D T & Heard H. Experimental deformation of calcite crystals. *Bull. eol. Soc. Am.* 1954, 65: 883-934.
- 3 Turner F J, Griggs D T, Clark R H & Dixon R H. Deformation of Yule marble, part VI: development of oriented fabrics at  $300^\circ\text{C}-400^\circ\text{C}$ . *Bull. geol. Soc. Am.* 1956, 67: 1259-1294.
- 4 Griggs D T, Parterson M S, Heard H C & Turner F J. Annealing recrystallization in calcite crystals and aggregates. *Mem. eol. Soc. Am.* 1960, 79: 21-37.

- 5 Heard H C. Effects of large changes in strain rate in the experimental deformation of Yule marble. *J. Geol.* 1963,71;162—195.
- 6 Turner F J and Heard H C. Deformation of calcite crystals at different strain rates. *Geol. Sci. Publ. Univ. of California. Los Angeles.* 1965,46;103—126.
- 7 Rutter E H & Rusbridge M. The effects of non-coaxial strain paths on crystallographic preferred orientation development in the experimental deformation of a marble. *Tectonophysics.* 1977,39;73—86.
- 8 Wenk H -R, Venkatasubramanian C S, Baker D W & Turner F J. Preferred orientation in experimentally deformed limestone. *Contr. Miner. Petrol.* 1973,38;81—114.
- 9 Schmid S M, Boland J N & Paterson M S. Superplastic flow in fine grained limestone. *Tectonophysics.* 1977,43;257—291.
- 10 Rutter E H. The influence of temperature, strainstate and interstitial water in the experimental deformation of calcite rocks. *Tectonophysics.* 1974,22;311—334.
- 11 Rutter E H & Schmid S M. An experimental study of unconfined flow of Solnhofen limestone. *Bull. geol. Soc. Am.* 1975, 86;145—152.
- 12 Spang J H. Numerical method for dynamic analysis of calcite twin lamellae. *Bull. geol. Soc. Am.* 1972,83;467—472.
- 13 Heard H C & Raleigh C B. Steady-state flow in marble at 500—800°C. *Bull. geol. Soc. Am.* 1972,83;935—956.
- 14 Twiss R J. Theory and applicabilty of a recrystallized grain size paleopiezometer. *Pure Appl. Geophys.* 1977,115;227—224.
- 15 Goetze C & Kohlstedt D L. The dislocation structure of experimentally deformed marble. *Contr. Miner. Petrol.* 1977,59; 293—306.
- 16 Wickham J S. An estimate of strain increments in a naturally deformed carbonate rock. *Am. J. Sci.* 1973,273;23—47.
- 17 Briegel U and Goetze C. Estimate of differential stress recorded in the dislocation structure of Locuseiten limestone (Switzerland). *Tectonophysics.* 1978,98;61—76.
- 18 Wenk H -R, Takeshita T, Bechler E, Erskine B G & Matthies S. Pure shear and simple shear calcite textures. comparison of experimental, theoretical and natural data. *J. Stuct Geol.* 1987,9;731—745.
- 19 Schmid S M, Panozzo R & Bauer S. Simple shear experiments on calcite rocks; rheology and microfabric. *J. Struct. Geol.* 1987,9;747—778.
- 20 Borradaile G J and Mearthur J. Experimental calcite fabrics in a synthetic weaker aggregate by coaxial and non-coxial deformation. *J. Struct. Geol.* 1990,12;351—363.
- 21 Kern H and Wenk H-R. Calcite texture development in experimentally induced ductile shear zones. *Contri. Miner Petrol.* 1983,83;231—236.
- 22 Behrmann J H. Microstructure and fabric transtions in calcite tectonites from the Sierra Alhamilla (Spain). *Geol. Rdsch.* 1983,72;602—618.
- 23 Dietrich D and Song H. Calcite fabrics in a natural shear environment the Helvetic nappes of western Swizerland. *J. Struct. Geol.* 1984,6;19—32.
- 24 Heitzmann P. Calcite mylonites in the Central Alpine “root zone”. *Tectonophysics.* 1987,135;207—215.
- 25 Schmid S M. Laboratory experiments on rheology and deformation mechanisms in calcite and their application to studies in the field. *Mitt. Geol. Inst. ETH Univ. Zurich.* 1982,241;1—105.
- 26 Schmid S M, Paterson M S & Boland J N. High temperature flow and dynamic recrystallization in Carrara marble. *Tectonophysics.* 1980,65;245—280.
- 27 Ratschbacher L. Wenk H-R and Sintubin M. Calcite textures; examples from nappes with strain-path partitioning. *J. Struct. Geol.* 1991,13;369—384.
- 28 Carlson K A. van der Pluijm B A and Hanmer S. Marble mylonites of the Bancroft shear zone; evidence for extension in the Canadian Grenville. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1990, 102;174—181.
- 29 van der Pluijm B A. Marble mylonites in the Baneroft Shear zone, Ontario, Canada; microstructure nad deformation mechanisms. *J. struct. Geol.* 1991,13;1125—1135.
- 30 Rutter E H. Cassey M and Burlini L. Prefered crystallographic oriortation development during the plastic and superplas-

- tic flow of calcite rocks. *J. Struct. Geol.* 1994, 16: 1431—1446.
- 31 Erskine B G, Heidelbach F and Wenk H-R. Lattice preferred orientations and microstructures of deformed Cordilleran marbles; correlation of shear indicators and determination of strain path. *J. Struct. Geol.* 1993, 15: 1189—1205.
- 32 Busch J P. and van der Pluijm B A. Calcite textures, microstructures and rheological properties of marble mylonites in the Bancroft zone, Ontario, Canada. *J. Struct. Geol.* 1995, 17: 677—688.
- 33 周翊. 方解石岩石(大理岩)的剪切变形实验: 显微构造、组构特征及流变学意义. *中国大陆构造论文集*, 1992, 96—105.
- 34 Valley J W and O'Neil J R.  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  exchange between calcite and graphite; a possible thermometer in Grenville marbles. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1981, 45: 411—419.

## RESEARCH ON RELATION BETWEEN MICROSTRUCTURES AND MACROSTRUCTURES OF DEFORMED CARBONATE ROCKS

Liu Wencan    Li Dongxu  
(*China University of Geosciences, Beijing*)

Zhang Da  
(*Institute of Geomechanics, CAGS*)

**Abstract** Although experimental researches on microfabrics of deformed carbonate rocks and their preferred orientations have been well developed, there still are difficulties in their application to the explanation of the complicated natural structural deformations. The principal aims of this study are: (1) to compare deformation behaviour and microfabric characteristics of the deformed carbonate rocks at shallow (Tongling area) and intermediate-deep levels (Bei Huaiyang area); (2) to improve our knowledge of the microstructures of deformed carbonate rocks by relating to the results of microfabric studies. Based on the microstructures of the marbles in the contact zone of granitic intrusives, two types of emplacement mechanism of granites are identified in the Tongling area, Anhui. A study of the calcite mylonites in the ductile shear zone of Bei Huaiyang of north Da Bieshan mountain was also made.

**Key words** deformation of carbonate rocks, microfabrics

### 第一作者简介

刘文灿,男,34岁,副教授,博士。主要从事地质力学、构造地质学和矿田构造学研究。通讯地址:北京市海淀区学院路29号中国地质大学区调所。邮政编码:100083。