第61卷 增刊
2015年 4月
地 质 论 评 GEOLOGICAL REVIEW
Vol. 61 Supp.
Apr., 2015

韧性变形组构叠加数值模拟研究

李丹丹，吴凌超, 方军，王语，付澜清，向必伟
安徽大学资源与环境工程学院，安徽，230601

矿物拉伸线理和面理是研究岩石韧性变形运动学的基本要素，它们发育的特征与变形岩石内流变场密切相关(Jiang and Williams, 1998; Lin et al., 1998; Teyssier and Tikoff, 1999; Tikoff and de Saint Blanquat, 1997; Tikoff and Greene, 1997)。通过研究韧性岩石中发育的拉伸线理和面理产状及其分布特征来解释导致发生岩石变形的运动学以及动力学过程，是韧性构造变形分析的基本手段之一(Ramsay and Graham, 1970; Ramsay and Huber, 1983)。当岩石中矿物拉伸线理和面理产状相对单一，优选方位明显时，我们能够比较容易理解构造变形的运动学特征，并进一步研究其动力学背景。然而，当野外观察到的拉伸线理和面理产状较为复杂时，如何来利用这些组构研究构造变形的运动学，如何来分辨这些组构是一期构造变形形成的还是由多期构造变形叠加的结果，就成为韧性变形分析的难点。

自然界中许多应变带内拉伸线理和面理产状分布往往并不单一，如何理解认识这类组构，并开展构造变形分析至今仍然备受争议。已有研究中，对产状特征复杂的拉伸线理和面理的理解存在两种不同的观点。一种观点认为，应变带内不同优先方位的面理和拉伸线理应归因于不同的构造变形事件；应变带内发育不同方位的组构，表明岩石经历了多期构造事件(Lin et al., 2005，2008)这种观点的主要依据是组构的产状与区域上可能的构造事件在运动学上的近似耦合。用多期构造事件解释复杂组构的关键问题在于，缺乏明确的证据支持变形组构的叠加关系。Williams and Jiang (2005) 的构造几何学分析表明，早期形成的拉伸线理和面理在后期变形中被完全置换可能并不需要很大应变。因此，变形组构是否能够记录多期多期变形仍然有待研究。另一观点认为，同一区域内发育的产状复杂的面理与拉伸线理并不需要多期构造变形叠加，而是一次构造变形的流变场在不同流变强度岩石内的不均匀分配（strain partitioning）造成的

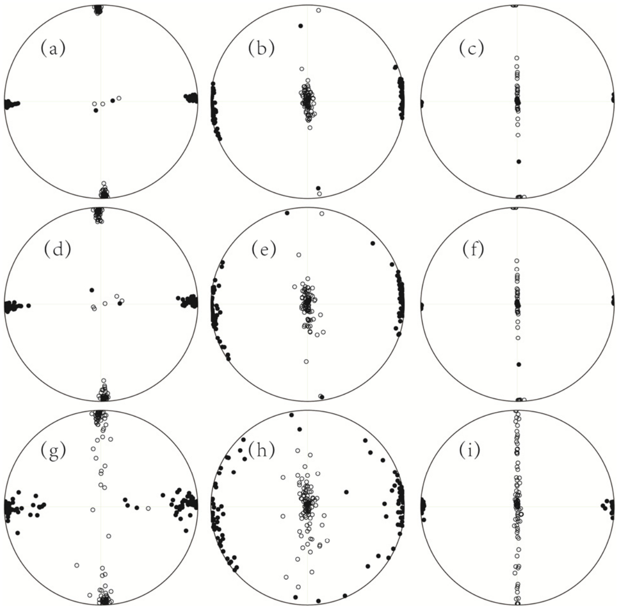

图1 模拟组构的叠加关系图；充填的圆圈表示模拟面理法线，空心圆圈表示模拟线理；(a)、(b)、(c) 是椭球体相对流变强度为0.1—0.2的模拟计算结果；(d)、(e)、(f) 是椭球体相对流变强度为0.2—0.5的模拟计算结果；(g)、(h)、(i)是椭球体相对流变强度为0.5—1的模拟计算结果；(a)、(d)、(g) 是基质流变场 $L_1=\begin{pmatrix}0 & -0.126 & 0\\ 0 & -0.2 & 0\\ 0 & 0 & 0.2\end{pmatrix}$ 模拟计算结果；(b)、(e)、(h) 是基质流变场 $L_2=\begin{pmatrix}0.2 & -0.126 & 0\\ 0 & -0.2 & 0\\ 0 & 0 & 0\end{pmatrix}$ 模拟计算结果；(c)、(f)、(i) 是先经历 L_1 变形然后经历 L_2 变形的模拟计算结果。

注：本文为国家自然科学基金资助项目（编号 41472194, 41002069）的成果。
收稿日期：2015-02-02；改回日期：2015-02-28；责任编辑：黄敏。
作者简介：向必伟，男，1977年生。博士，副教授，构造地质学专业。Email：xbw1977@163.com。

(Jiang et al., 2001; Lee et al., 2012; Michibayashi et al., 2013; Solar and Brown, 2001)。这一观点对应变带复杂的变形组构提出了新的解释方法，但并未否认复杂组构记录多期韧性变形的可能。上述争论的关键在于人们对于如何区分岩石中的组构是由一期构造变形产生还是多期构造变形的叠加还并不清楚。

本文通过数值模拟，研究岩石经历两期不同韧性变形后面理和拉伸线理的产状特征，揭示经历一期变形和两期变形所形成的面理和拉伸线理产状的差别。Eshelby (1957, 1959) 建立了均匀弹性基质与嵌入其中的均匀椭球体之间流变场的数学联系。Eshelby 公式被拓展到处理线性粘性材料（Newtonian）、非线性粘性材料（Power-law）基质与椭球嵌入体的流变场(Bilby et al., 1975; Jiang and Bentley, 2012; Lebensohn and Tomé, 1993)。我们基于 Eshelby 理论建立非线性粘性材料数值模型，将岩石整体视为基质，嵌入的椭球体视为构成岩石的元素（矿物），两者的流变强度不同。变形后，椭球体的最长轴定义模拟线理，最短轴定义面理法线。我们用不同的流变场表达不同运动学边界条件的构造变形特征。在给定的基质流变场下，椭球体发生变形并定义模拟的拉伸线理和面理。我们通过模拟计算在某一流变场作用下形成的模拟组构在另一流变场作用下的演化，探讨面理和拉伸线理经历不同构造变形后的叠加特点。模拟研究表明，先前形成的面理极易在后期流变场作用下被完全置换；由低流变强度椭球体定义的线理也很容易在后期流变场作用下被完全置换；而又高流变强度椭球体定义的线理可能会保留先前流变场的特征(图 1)。本次研究为野外甄别产状复杂的组构是否是多期变形叠加的结果提供了理论依据和新的方法。

参考文献 / References

Bilby B A, Eshelby J D, Kundu A K, 1975. The change of shape of a viscous ellipsoidal region embedded in a slowly deforming matrix having a different viscosity. Tectonophysics, 28: 265~274.

Eshelby J D, 1957. The Determination of the elastic field of an ellipsoidal inclusion, and related problems. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 241: 376~396.

Eshelby J D, 1959. The elastic feld Outside an ellipsoidal inclusion. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 252: 561~569.

Jiang D, Bentley C, 2012. A micromechanical approach for simulating multiscale fabrics in large-scale high-strain zones: Theory and application. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 117, B12201.

Jiang D, Lin S, Williams P F, 2001. Deformation path in high-strain zones, with reference to slip partitioning in transpressional plate-boundary regions. J. Structural Geology, 23: 991~1005.

Jiang D, Williams P F, 1998. High-strain zones: a unified model. J. Structural Geology, 20: 1105~1120.

Lebensohn R A, Tomé C N, 1993. A self-consistent anisotropic approach for the simulation of plastic deformation and texture development of polycrystals: Application to zirconium alloys. Acta Metallurgica et Materialia, 41: 2611~2624.

Lee P E, Jessup M J, et al. 2012. Strain partitioning in the mid-crust of a transpressional shear zone system: Insights from the Homestake and Slide Lake shear zones, central Colorado. J. Structural Geology, 39: 237~252.

Lin S, Jiang D, Williams P F, 1998. Transpression (or transtension) zones of triclinic symmetry: natural example and theoretical modelling. Geological Society, London, Special Publications, 135: 41~57.

Lin W, Faure M, Monié P, et al. 2008. Mesozoic extensional tectonics in eastern Asia: The south Liaodong Peninsula metamorphic core complex (NE China). The Journal of Geology, 116: 134~154.

Lin W, Wang Q C, Faure M, Arnaud N, 2005. Tectonic evolution of the Dabieshan orogen: in the view from polyphase deformation of the Beihuaiyang metamorphic zone. Science in China (Series D) , 48.

Michibayashi, K., Suzuki, M., Komori, N., 2013. Progressive deformation partitioning and recrystallization of olivine in the lithospheric mantle. Tectonophysics, 587: 79~88.

Ramsay J G, Graham R H, 1970. Strain variation in shear belts. Canadian Journal of Earth Sciences, 7: 786~813.

Ramsay J G, Huber M I, 1983. The Techniques of Modern Structural Geology. In: Strain Analysis, vol. 1. Academic Press, San Diego.

Solar G S, Brown M, 2001. Deformation partitioning during transpression in response to Early Devonian oblique convergence, northern Appalachian orogen, USA. Journal of Structural Geology, 23: 1043~1065.

Teyssier C, Tikoff B, 1999. Fabric stability in oblique convergence and divergence. Journal of Structural Geology, 21: 969~974.

Tikoff B, de Saint Blanquat M, 1997. Transpressional shearing and strike-slip partitioning in the Late Cretaceous Sierra Nevada magmatic arc, California. Tectonics, 16: 442~459.

Tikoff B, Greene D, 1997. Stretching lineations in transpressional shear zones: an example from the Sierra Nevada Batholith, California. Journal of Structural Geology, 19: 29~39.

Williams P F, Jiang D, 2005. An investigation of lower crustal deformation: Evidence for channel flow and its implications for tectonics and structural studies. Journal of Structural Geology, 27: 1486~1504.