

文章编号: 1001-6112(1999)03-0273-05

变形对有机质成熟度影响的实验初步研究

周建勋

(石油大学·北京 地球科学系, 北京 102200)

摘要: 对 3 种不同煤级的煤样进行了高温高压变形实验。实验样品的镜质体反射率的变化与应变量之间显示出正相关关系, 表明了变形可以促进有机质成熟度的提高。但是与时间和温度因素相比变形只是一个辅助因素, 仅是变形不能改变有机质的成熟度。在本项实验中围压对有机质成熟度起到阻碍作用。虽然目前从实验角度区分应力和变形两者分别的作用尚有困难, 但变形看来是更为关键的因素。共轴变形促进煤化作用的机理可能是与变形有利于煤化反应平衡方程向正向发展有关。

关键词: 变形实验; 有机质成熟度; 煤化作用

中图分类号: TE135

文献标识码: A

1 概述

构造变形对有机质成熟度的影响问题逐渐受到关注, 一些煤田与油气勘探的实际资料显示构造变形带通常具有相对较高有机质成熟度^[1,2]。但是, 构造变形带通常具有相对较高的地温梯度, 这种较高的有机质成熟度现象是与较高的地温梯度有关, 还是与构造变形有关, 大多情况下很难区分, 故目前尚存不同观点。

煤是重要的有机岩石, 煤镜质体反射率是衡量有机质成熟度的重要参数之一。煤的固体特性使得它便于进行变形实验。已有许多有关有机质热演化的高温高压实验模拟研究报道, 但主要是静压条件的实验, 用以研究温度、压力和时间等因素对有机质成熟度的影响问题。静压实验无法研究变形问题, 变形需要施加差异压力来实现, 需要采用高温高压变形实验装置。针对无机岩石的高温高压变形实验已得到较好开展, 但针对煤及其它有机岩石的实验还不多, 其中有关变形对有机质成熟度影响的实验工作很少。自 Bustin 等 1986 年首次报道煤的高温高压变形实验研究以来^[3], 虽然陆续见到一些进一步的成果发表^[4-11], 但主要是探讨有关煤的光性结构和煤的石墨化问题, 仅见 Mastalerz 等 (1993) 涉及了变形与有机质成熟度的关系问题^[8]。

本文根据 3 种不同煤级样品的高温高压变形实验结果, 对比分析其中温度、围压和受热时间相近、而应力与应变显著不同的样品的镜质体反射率变化情况, 结合分析 Mastalerz 等 (1993) 的实验结果^[8], 从实验角度初步探讨构造变形对有机质成熟度的影响问题。

2 实验方法

实验选择 3 种不同煤级样品, 其镜质体最大反射率($R_{o,max}$) 分别为 4.90% (L 煤样)、3.41% (X 煤样) 和 0.67% (J 煤样)。实验采用类 Griggs 高温高压岩石变形实验装置, 与 Mastalerz 等 (1993) 所采用的装置类似^[8], 围压介质为叶腊石, 等应变速率共轴变形。温度 350~700 °C, 围压 400~600 MPa。样品为直径 19mm、长 40mm 的圆柱体。实验过程中样品中产生的气体可以不断排出装置外部, 应力—应变曲线存在一些波动现象 (如图 1, 图 2, 图 3 所示)。

与 Mastalerz 等 (1993) 的实验^[8]相比, 在样品类型选择和实验装置上各有特点。Mastalerz 等 (1993) 的实验样品的 $R_{o,max}$ 分别为 5.27% 和 0.68%, 温度 200~600 °C, 围压 600 MPa。样品尺寸较小 (直径 6.3mm, 长 19mm), 并作密封处理, 使得实验过程中产生的气体被封闭在装置内部, 这样应

收稿日期: 1998-05-03; 修订日期: 1999-04-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (4927213)。

作者简介: 周建勋 (1961-), 男 (汉族), 浙江温岭人, 博士后, 石油大学 (北京) 副教授, 现从事石油盆地构造与构造物理模拟研究。

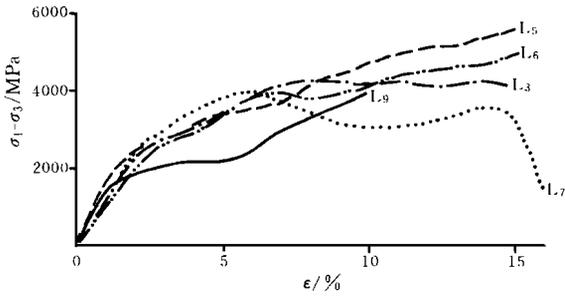


图 1 L 煤样的应力—应变曲线

Fig. 1 Stress- strain curves of coal sample L

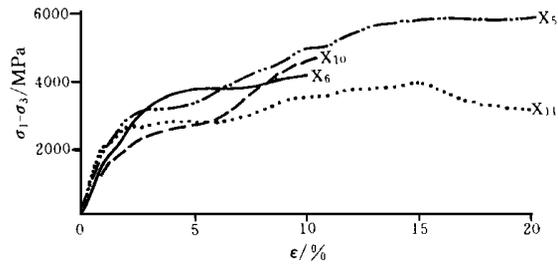


图 2 X 煤样的应力—应变曲线

Fig. 2 Stress- strain curves of coal sample X

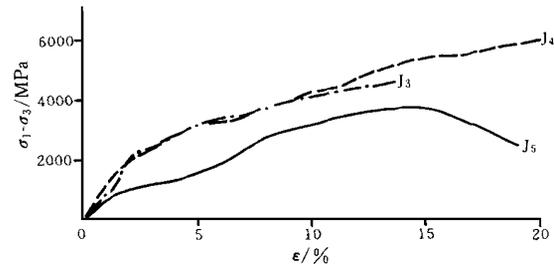


图 3 J 煤样的应力—应变曲线

Fig. 3 Stress- strain curves of coal sample J

力—应变曲线显得较为平滑一些。

由于实验样品同时用作变形显微构造和反射率光性组构分析研究,对样品磨制 3 个近于垂直的切面。每一切面测 15 至 20 个点,每点转物台 360 每隔 10 测一个数据。然后把 3 个切面上所有测点的镜质体视最大反射率(R'_{max})和视最小反射率(R'_{min})的平均值(R_{mean})作为衡量样品热演化程度指标,故该 R_{mean} 值与从粉煤光片所测得的平均反射率数值不能等同,该指标仅能反映实验样品之间有机质成熟度的相对高低。镜质体反射率测定采用了 MPV-2 显微光度计。

3 实验结果

3.1 L 煤样

实验样品(应力—应变曲线如图 1 所示) R_{mean} 值有显著增高(表 1),但围压较高样品 R_{mean} 值增幅较小。样品 L5 的围压为 600MPa,虽然受热时间较长(达 9.08h),但其 R_{mean} 值却与受热时间较短(仅为 4.32h)但围压较低(400MPa)样品 L3 相近。同样,围压为 500 MPa、受热时间为 6.57h 的 L6 样品,其 R_{mean} 值也比受热时间虽较短(4.32h)、而围压较低(400MPa)样品 L3 低。表明较高的围压不利于有机质成熟度的提高。

应变量较大样品 R_{mean} 值增幅较为明显(表 1)。样品 L7 受热时间虽较短(仅为 6.00h)但应变量较大(16.2%),其 R_{mean} 值则明显高于受热时间虽然较长(分别为 6.57 和 7.90h)、而应变量较低(分别为 15.0%和 10.4%)的样品 L6 和 L9。

表 1 L 煤样实验条件和 R_{mean} 值变化情况

Table 1 Experimental conditions and variation of R_{mean} values in coal sample L

样 品	温度 /	围压 /MPa	应变速率 /S ⁻¹	应变 /%	受热时间 /h	R_{mean} /%
L0(原始样)	-	-	-	-	-	4.08
L3	550	400	1.05×10^{-5}	15.0	4.32	4.52
L6	550	500	6.87×10^{-6}	15.0	6.57	4.17
L5	550	600	4.97×10^{-6}	15.0	9.08	4.52
L7	550	500	8.18×10^{-6}	16.2	6.00	5.31
L9	550	500	3.86×10^{-6}	10.4	7.90	4.59

3.2 X煤样

图2为X煤样的应力—应变曲线。绝大多数实验样品的 R_{mean} 值均有所提高(表2),但少数样品(如样品X6)出现反射率降低的现象,在Bastin等(1986)的实验中也有相同现象^[3]。样品X6与X10、X11与X5分别具有相同的温度、围压和应变变量,其中受热时间较长者 R_{mean} 值相对较高。

与上述L煤样类似,相同温压条件下,应变变量较大样品 R_{mean} 值增高幅度较大。应变量为20.0%的样品X5,其 R_{mean} 值明显大于受热时间相近、但应变变量较小(10.0%)的样品X10;同样,应变变量较大(20.0%)的样品X11受热时间虽然相对较短一些(3.78h),但 R_{mean} 值却明显大于受热时间较长(4.65h)、但应变变量较小(10.0%)的样品X6。

3.3 J煤样

图3为J煤样的应力—应变曲线。在350、500 MPa温压条件下,无论受热时间长短和应变量的大

小,实验样品 R_{mean} 值的变化均不显著(表3),其中少数样品也出现反射率略有降低的现象。样品J7、J3、J4尽管受热时间和应变变量存在较大差异,但其 R_{mean} 值的差别不大。样品J4与J7中,前者虽然应变变量较大、受热时间略长,但 R_{mean} 值却反而较低。

4 讨论

4.1 静压力的作用

大量研究表明有机质成熟度主要受温度、时间与压力(静压)3因素的控制。本项实验中L样品与X样品在其它条件相同(或相近)情况下,受热时间较长样品的 R_{mean} 值也显著较高,也表明受热时间是影响有机质成熟度的主要因素。但是,压力的情况相对比较复杂,一些静压煤化实验表明,视样品的类型及温压范围的不同,静压有时起促进作用,有时则起阻碍作用^[12]。在本项涉及变形的实验中,L煤样在

表2 X煤样实验条件和 R_{mean} 值变化情况

Table 2 Experimental conditions and variation of R_{mean} values in coal sample X

样 品	温度 /	围压 / MPa	应变速率 / S ⁻¹	应变 / %	受热时间 / h	R_{mean} / %
X0(原始样)	-	-	-	-	-	2.80
X6	450	500	6.29×10^{-5}	10.0	4.65	2.75
X10	450	500	3.74×10^{-6}	10.0	7.83	2.86
X5	450	500	7.80×10^{-6}	20.0	7.95	4.25
X11	450	500	1.64×10^{-5}	20.2	3.78	2.88

表3 J煤样实验条件和 R_{mean} 值变化情况

Table 3 Experimental conditions and variation of R_{mean} values in coal sample J

样 品	温度 /	围压 / MPa	应变速率 / S ⁻¹	应变 / %	受热时间 / h	R_{mean} / %
J0(原始样)	-	-	-	-	-	0.61
J7	350	500	3.62×10^{-6}	10.0	8.08	0.83
J3	350	500	7.08×10^{-6}	12.9	5.42	0.65
J4	350	500	7.61×10^{-5}	20.0	8.15	0.61

其它条件相近时围压(静压)较高者 R_{mean} 值增加幅度较小,表明静压主要起阻碍作用,其原因是否由于变形引起?还无法根据目前的实验结果给出定论。

4.2 变形的作用

L 煤样和 X 煤样在其他条件相同或相近时 R_{mean} 值与应变量之间呈正相关关系,表明变形有利于有机质成熟度的提高。这与 Mastalerz 等(1993)的实验结果^[8]类似,尽管因实验条件、样品和装置类型不甚相同而无法直接对比。但是, J 煤样在温度较低条件下无论应变大小 R_{mean} 值均无显著变化的现象,则表明在一定的温度阈限下,变形不能构成对有机质成熟度的影响,相对温度因素而言变形只是一个辅助因素。

人们有时把构造变形带具有相对较高有机质成熟度的现象归结为构造应力(或构造动力)的结果^[1],即应力作用是导致有机质成熟度提高的原因。应力只是引起变形的原因,但应力并非一定就会产生变形(例如在应力较小而岩层强度较高的情况下),故两者的作用是有区别的。但从实验角度区分两者所起的作用尚有困难,尽管 Ross 等(1997)已经开始尝试解决这一问题^[5]。因为在高温高压变形实验中,一旦确定了受热时间、温度及围压条件,那么变形与应力的关系也就确定。变形较大的样品所需的应力也较大,即无法使得样品的应力相同而变形不同、或者变形相同而应力不同,这样也就无法区分应力和变形所起的作用。然而,从能量的转换角度分析,如果受力岩层不发生变形,那么构造动力的潜在能量就无法转换成提高有机质成熟度所需之能量。此外,在 Mastalerz 等(1993)的实验中^[8],样品处于封闭状态,据笔者的经验实验过程中样品释放的气体会导致有效应力的大幅度下降,样品的变形可以在差异应力很小的情况下发生,这种情况下样品有机质成熟度的提高就主要归结为变形的作用。因此,笔者认为变形是相对较为关键的因素。

4.3 成因机理

Bustin 等(1995)的研究^[11]表明,同样条件下简单剪切变形可以通过孔隙压扁和芳环层片的机械旋转导致煤反射率的提高及石墨化的发生,但共轴变形无法产生类似效应。本项实验以及 Mastalerz 等(1993)的实验^[8]均为共轴变形,故实验样品反射率的提高并非因孔隙压扁和芳环层片的机械旋转引起,笔者推断可能是因变形有利于煤化反应平衡方程正向发展所致。这一问题尚需深入研究。

5 结论

(1) 与 Mastalerz 等(1993)的实验^[8]基本相同(尽管实验样品与装置条件有所不同),煤样的反射率提高与应变量呈正相关,进一步表明变形能够促进有机质成熟度的提高。

(2) 与时间和温度因素相比,变形仅是辅助因素,在一定的温度阈限以下单纯的变形不能引发有机质成熟度的提高。

(3) 虽然目前尚难从实验角度区分应力和变形的作用,但有迹象显示变形是促进有机质成熟度提高的更为关键因素。

(4) 共轴变形促进有机质成熟度提高的机制,可能是与变形有利于煤化反应平衡方程向正向发展所致。

致谢:研究工作得到王桂梁教授指导和何绍勋、韩德馨教授的关怀,实验工作得到邹利民同志协助,笔者谨此致谢!

参考文献:

- [1] Levine J R, Davis A. Reflectance anisotropy of Upper Carboniferous coals in the Appalachian foreland basin, Pennsylvania, U. S. A. [J]. International Journal of Coal Geology, 1989, 13: 340~373.
- [2] 邓云山,孟自芳. 构造动力在油气形成中的作用[J]. 地球科学进展, 1996, 11(4): 362~366.
- [3] Bustin R M, Ross J V, Moffat I. Vitrinite anisotropy under differential stress and high confining pressure and temperature: preliminary observations [J]. International Journal of Coal Geology, 1986, 6: 343~351.
- [4] Ross J V, Bustin R M, Rouzaud J N. Graphitization of high rank coals - the role of shear strain: experimental considerations [J]. Org. Geochem., 1991, 17(5): 585~596.
- [5] Ross J V, Bustin R M. Vitrinite anisotropy resulting from simple shear experiments at high temperature and high confining pressure [J]. International Journal of Coal Geology, 1997, 33(2): 153~168.
- [6] Wilks K R, Mastalerz M, Bustin R M, Ross J V. The role of shear strain in the graphitization of a high-volatile bituminous and an anthracitic coal [J]. International Journal of Coal Geology, 1993, 22: 247~277.
- [7] Wilks K R, Mastalerz M, Ross J V, Bustin R M. The effect of experimental deformation on the graphitization of Pennsylvania anthracite [J]. International Journal of Coal Geology, 1993, 24: 347~369.
- [8] Mastalerz M, Wilks K R, Bustin R M, Ross J V. The effect

of temperature, pressure and strain on carbonization in high-volatile bituminous and anthracitic coals [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1993, 20: 315 ~ 325.

- [9] 周建勋, 邵震杰, 王桂梁. 煤光性组构的实验变形研究[J]. *科学通报*, 1993, 38(2): 147 ~ 150.
- [10] 周建勋, 王桂梁, 邵震杰. 煤的高温高压变形实验研究[J]. *煤炭学报*, 1993, 19(3): 324 ~ 332.

[11] Bustin R M, Ross J V, Rouzaud J N. Mechanisms of graphite formation from kerogen: experimental evidence [J]. *International Journal of Coal Geology*, 1995, 28: 1 ~ 36.

[12] Goodarzi F. Optical properties of vitrinite carbonized at different pressures[J]. *Fuel*, 1985, 64: 156 ~ 161.

PRELIMINARY EXPERIMENTAL STUDY ABOUT EFFECT OF DEFORMATION ON ORGANIC MATURITY

ZHOU Jian-xun

(*Petroleum University, Beijing 102200, China*)

Abstract: Three kinds of coal samples were coaxially deformed with Griggs-type rock experiment apparatus under high temperature and confining pressure. The vitrinite reflectance of original samples is 4.90% (coal sample L), 3.41% (coal sample X) and 0.67% (coal sample J) respectively. Phyllosilicate was used as confining pressure medium. Strain rates were kept constant during each experiment. The temperature condition is 350 ~ 700 °C and the confining pressure range is 400 ~ 600MPa. The shape of samples is column with 19mm in diameter and 40mm in length. Samples were kept open to outside during experiment so that produced gas can be vented out continually. In this paper some questions about effects of structural deformation on organic maturity are discussed by analysis to the changes of vitrinite reflectance in the samples which are of different strain and stress but of same temperature and confining pressure and near deformation time. It is indicated that increase of vitrinite reflectance is of positive relationship to strain. This result is similar to that of Mastalerz's (1993) study (although there are some differences in sample and condition of apparatus between these two studies) and further proved that structural deformation can promote the level of organic maturity. Deformation, as compared with time and temperature, is a subsidiary factor to organic maturity. Deformation alone can not cause the increase of organic maturity. Although the effects of hydrostatic pressure are more complicated, it appears to impede the increase of organic maturity in this experimental study. Strain seems to be more important than stress although it is still hard to respectively distinguish their effects on organic maturity by experiment. Although mechanisms of coaxial deformation promoting coalification are not clear yet, flattening of existing pores and mechanical rotation of aromatic lamellae are not likely to be the principal mechanisms. The possible origin may be that coaxial deformation promotes balance reaction equation of coalification to its positive direction.

Key words: deformation experiment; organic maturity; coalification