

高温高压作用下致密砂岩三轴压缩试验

邓辉^{1,2}, 张咪¹, 邓通海¹, 张茜¹

(1. 成都理工大学 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学
环境与土木工程学院, 四川 成都 610059)

摘要:为探究温度和围压对四川盆地新场气田须家河组二段致密石英砂岩力学性质和破坏方式的影响,利用MTS815电液伺服控制刚性试验机还原其地下深部高温高压的地质环境进行常规三轴压缩试验。结果表明,温度一定时,试样的三轴抗压强度和弹性模量平均值均随围压增大而增大;围压一定时,随试验温度升高,60℃之前,致密石英砂岩试样的粘聚力呈二次非线性减小,内摩擦角、三轴抗压强度及弹性模量呈非线性增加;60℃之后,各参数变化趋势则与之前相反。60℃是温度-围压共同作用条件下试样力学性质变化的温度节点。在0~100 MPa围压范围、15~150℃温度范围内,致密砂岩试样变形破坏类型取决于温度和围压,围压对岩石强度的影响程度大于温度。按试样破坏过程和破坏方式,可将应力-应变曲线大致分为5种类型,破坏方式包含拉张破坏、剪切破坏、剪胀破坏和拉张-剪切破坏。

关键词:围压;变形破坏类型;常规三轴压缩试验;致密石英砂岩;新场气田;四川盆地

中图分类号:TE135

文献标识码:A

A triaxial compression test of tight quartz sandstone under high temperature and high confining pressure

Deng Hui^{1,2}, Zhang Mi¹, Deng Tonghai¹, Zhang Qian¹

(1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention & Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China)

Abstract: The impact of temperature and confining pressure upon mechanic characteristics and failure modes of the tight quartz sandstone in the second member of the Xuejiahe Formation (T_3x^2) in Xinchang gas field of Sichuan Basin, was studied through a conventional triaxial compression test by using a MTS 815 servo-controlled testing machine to simulate subsurface environment of high temperature and high confining pressure. The results show that, when the temperature remains constant, the average values of compressive strength and elastic modulus of quartz sandstone samples increase with growing confining pressure. And when under a constant confining pressure, the value changes in a two-stage way below and over the temperature of 60℃. Before the temperature reaches 60℃, the samples have a quadratic nonlinear decrease in terms of cohesion and a nonlinear increase for their internal friction angle, triaxial compression strength, and elastic modulus. When the temperature is higher than 60℃, the above-mentioned parameters vary in a totally reverse direction. The temperature of 60℃ is then the critical point for the mechanical properties of the samples to reverse under joint control of temperature and confining pressure. Within the ranges of pressure from 0 to 100 MPa and temperature from 15 to 150℃, the deformation or failure modes of the samples depends on temperature and confining pressure, with the latter having stronger impact than that of the former. Based on deformation process and failure modes, we roughly categorize the stress-strain curves into five types, which in turn loosely correspond to failure modes of tensile, shear, shear dilatancy, and tensile-shear, respectively.

Key words: confining pressure, failure mode, conventional triaxial compression test, tight quartz sandstone, Xinchang gas field, Sichuan Basin

收稿日期:2016-05-23;修订日期:2017-11-07。

第一作者简介:邓辉(1969—),男,博士,教授,岩土体稳定性。E-mail:330744407@qq.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41272332)。

致密石英砂岩气作为中国目前最现实的天然气战略储备^[1-3],从 1971 年起,先后在四川、鄂尔多斯、塔里木、吐哈、松辽等 10 多个盆地相继被大规模开发^[4-9]。川西坳陷地区的新场须家河组致密砂岩气藏,包括须(须家河组)二段—须五段共 4 段^[10],为源、储紧邻,呈“三明治”生—储—盖结构^[11]。新场须家河组二段顶埋深大于 4 600 m,基质物性差,孔隙度在 2%~5%,为致密—超致密层。在前期储量勘查、高产裂缝预测以及后期的开挖施工过程中,都不可避免地会遇到与该区特殊的岩石力学性质相关的问题,因而模拟还原其地下深部高温高压环境、探究其岩石力学性质是十分必要的。本文对须二段致密石英砂岩在设定的围压和温度下,利用 MTS815 型多功能电液伺服控制刚性试验机进行常规三轴压缩试验,结合高温高压环境下岩石力学性质已有的很多理论上和试验上的研究成果^[12-17]综合比较分析,得到了在不同温度和围压下须二段致密石英砂岩各力学参数的变化原因及规律。

1 试验研究

1.1 试样基本物理性质

据岩石薄片鉴定统计(表 1),须二段砂岩碎屑物以石英为主,含量 60%~80%,平均 70.4%;长石含量 8.6%;岩屑含量 10%~30%,平均 21%。岩屑成分包括凝灰岩、石英岩、花岗岩、板岩、泥岩、灰岩岩屑等,以沉积岩岩屑为主,千枚岩和石英岩等变质岩岩屑次之,火山岩岩屑含量相对较低。胶结以硅质压结式胶结为主。

统计表明^[18],研究区须家河组储层基质物性较差,孔隙度一般小于 7%,少数孔隙度大于 10%;基质渗透率也很低,多数小于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$;但如果储层中有裂缝发育时,渗透率将急剧增加。须二段储层物性总体差,砂体基质物性致密,平均孔隙度仅 3%左右,基质渗透率在 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 左右。总体而言,研究区须家河

组储层物性差,属低孔隙率致密—超致密储层。

1.2 试样制备及设备

试验所采用的岩石试样为取自四川德阳绵竹须家河组二段的致密石英砂岩。从制备的试样中选取外观没有损伤、无节理裂隙的岩石以备试验。按国际岩石力学学会的要求,试样规格为直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体,共制试样 50 个。

试验设备是由成都理工大学“地质灾害防治与环境保护国家重点实验室”引进的专门用于岩石及混凝土实验的 MTS815 型多功能电液伺服控制刚性试验机,可在高温作用下进行岩石、混凝土等材料的单轴压缩、三轴压缩、三轴卸荷等实验,具有多种控制模式,并可在实验过程中进行多种控制模式间的任意转换,属当前最先进的室内岩石试验设备。

1.3 试验方法

须家河组二段地层的分布深度大约为 4 600~5 100 m,地层温度大约为 123~136 ℃,地层的压力大约为 73~86 MPa。本着还原和模拟岩石原地质环境的原则,设置试验温度为室温 15 ℃(A 组)、40 ℃(B 组)、60 ℃(C 组)、90 ℃(D 组)、130 ℃(E 组)和 150 ℃(F 组)6 个设定温度,试验围压为无围压(1 组)、20 MPa(2 组)、40 MPa(3 组)、60 MPa(4 组)、80 MPa(5 组)和 100 MPa(6 组)6 种状态。不同温度和围压相互组合,共计 36 次试验,如 40 ℃,40 MPa 实验条件下的试样编号则为 B3。试验过程分以下 3 个步骤。

1) 加热

通过三轴室上 3 个环向电阻丝圆盘对三轴室内的液压油加热,进而液压油将温度传递给岩石试验,当达到所需试验温度时,保持恒温 2 h。试验达到 1.5 h 以后,温度达到平衡,温差引起的热应变在温度达到平衡后趋于稳定。因此,本次试验设计恒温时间为 2 h,能

表 1 须家河组二段碎屑物及胶结物含量统计

Table 1 Debris and cement contents of T₃x²

井号	碎屑含量/%			胶结物含量/%			泥质含量/%	分选	磨圆度	胶结类型
	石英	长石	岩屑	方解石	白云石	硅质				
CX93	76.50	3.80	19.70		少量	1.40	少量	好	次棱角状	孔隙—压结式为主
X851	74.00	4.50	21.50	少量	少量	1.50	少量	好	次棱角状	压结式为主
L150	71.60	8.00	20.40		少量	2.40	3.60	中等	次棱角状	压结式为主
X853	75.60	4.80	19.60	1.88	0.46	0.58	少量	好	次棱角状	压结式为主
CX560	79.60	3.07	26.00	偶见	2.00	1.50	少量	好	次棱角状	孔隙—压结式为主
CX565	75.00	7.50	18.50		1.00	1.00		好	次棱角状	孔隙—压结式为主
X856	74.20	4.50	20.70	少量	少量	1.50	少量	好	次棱角状	孔隙—压结式为主
平均	73.90	5.80	21.10	少量	1.00	1.37	1.05	好	次棱角状	压结式为主

够保证在试验加载前试样充分受到温度的作用,并完成温度作用所导致的热应变,以此来模拟地下深部的温度环境。

2) 施加围压

以 0.5 MPa/s 恒定的围压加载速率施加围压,直至达到预定围压值,停止加压。

3) 轴向加压至破坏

以 0.1 mm/min 的恒定应变速率对试件施加轴向

压力,直至试件破坏。达到岩石峰值强度后,不要停止试验,继续记录试件破坏后的应力和变形,以测定岩石全过程的应力-应变曲线。

2 试样变形破坏过程及类型分析

图 1 为在围压一定时,致密石英砂岩试样经历了 15、40、60、90、130 和 150 °C 共 6 个设定温度后的三轴

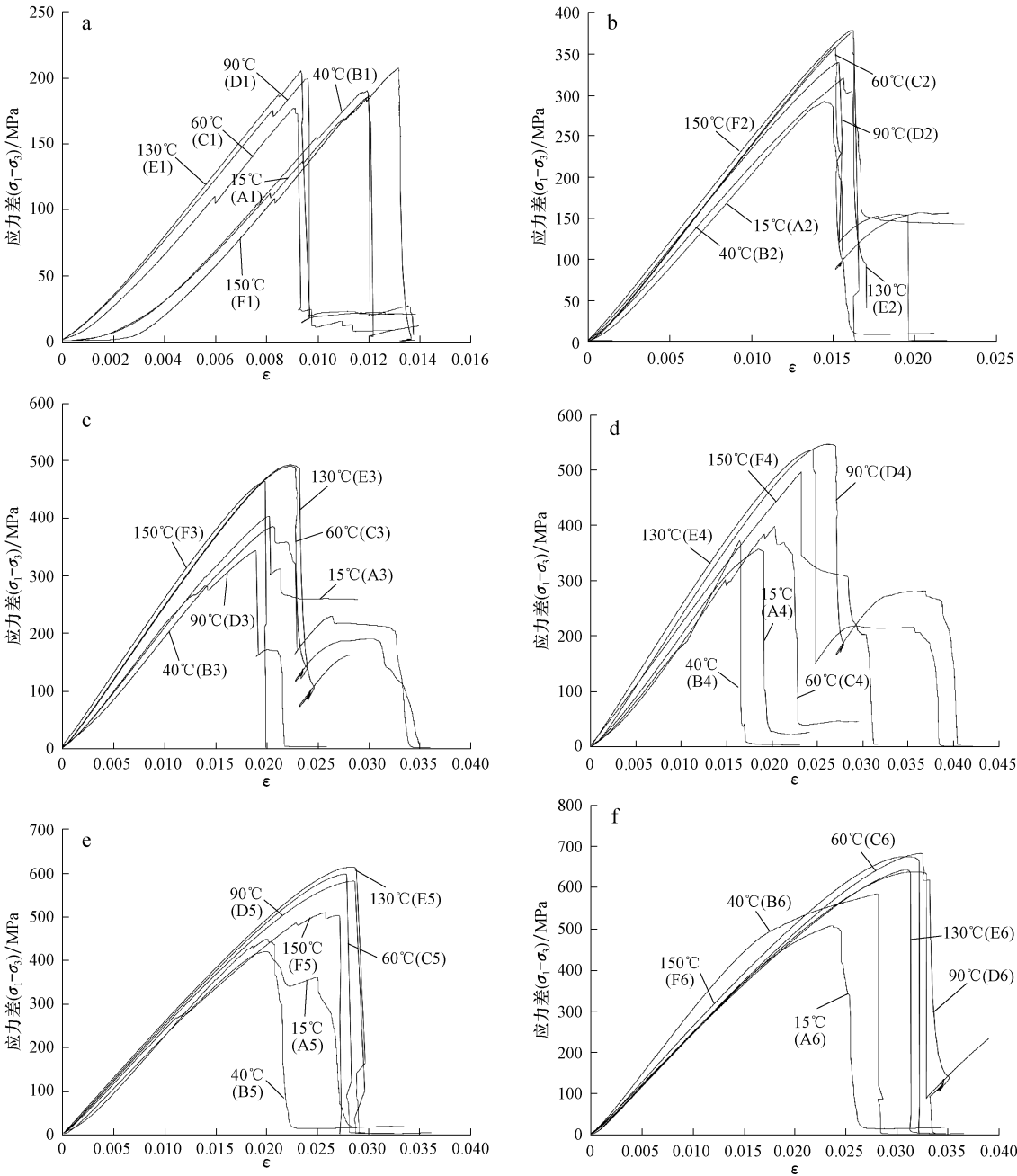


图 1 围压 (σ_3) 一定时高温后致密石英砂岩试样三轴压缩全应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$) - 应变 (ϵ) 曲线

Fig. 1 Complete stress-strain curves of tight quartz sandstone samples in conventional triaxial compression test at high temperatures and fixed confining pressure (σ_3)

a. 围压 $\sigma_3 = 0$ MPa; b. 围压 $\sigma_3 = 20$ MPa; c. 围压 $\sigma_3 = 40$ MPa; d. 围压 $\sigma_3 = 60$ MPa; e. 围压 $\sigma_3 = 80$ MPa; f. 围压 $\sigma_3 = 100$ MPa

压缩全应力-应变曲线。从图1中可以观察到,致密石英砂岩在温度-围压共同作用下的应力-应变曲线(包括围压为0 MPa的单轴压缩试验)是一个渐进性逐步发展的过程,具有明显的阶段性。

通过对以上6组36个岩石试样的应力-应变曲线及试样破坏方式的归纳总结,可以将15~150℃, 0~100 MPa围压下的致密石英砂岩变形破坏划分为5大类(图2)。

1) 类型Ⅰ——岩石的应力-应变曲线的峰前段主要有2个阶段:孔隙裂隙压密阶段(Oa 段)和弹性变形阶段(ab 段)。该类型岩石在弹性阶段就达到峰值强度。温度越高,孔隙裂隙压密阶段的曲线斜率变化越小。此类型的岩石试样有A1, B1, C1, D1, E1和F1,即单轴压缩情况下的试样。该类型试样为拉张破坏,发育有多条竖向裂纹,多条贯穿整个试样,破坏面新鲜、无擦痕(图3a)。

2) 类型Ⅱ——岩石的应力-应变曲线的峰前段主要有3个阶段:孔隙裂隙压密阶段(Oa 段)、弹性变形阶段(ab 段)和微裂纹演化至加速发展阶段(bc 段)。该类型岩石的屈服阶段(bc 段)较短。此类型的岩石试样有A2, A3, B2, B3, C2, C3, C4, D2和D3,即在15~90℃及20~40 MPa围压条件。该类型试样以剪切破坏为主,剪切破坏面较为平整,可见擦痕及少量灰

白色岩粉(图3b)。

3) 类型Ⅲ——岩石的应力-应变曲线的峰前段主要有2个阶段:弹性变形阶段(Ob 段)和微裂纹演化至加速发展阶段(bc 段)。该类型岩石的应力-应变曲线没有孔隙裂隙压密阶段,并且屈服阶段(bc 段)较短。此类型的岩石试样有E2, E3, F2和F3,即在130~150℃及20~40 MPa围压条件。该类型试样以剪切破坏为主,剪切破坏面相对不平整,局部可见剪切擦痕,或发育有其他拉张裂隙,但未贯通(图3e)。

4) 类型Ⅳ——岩石的应力-应变曲线的峰前段同样有3个阶段:孔隙裂隙压密阶段(Oa 段)、弹性变形阶段(ab 段)和微裂纹演化至加速发展阶段(bc 段)。该类型曲线与类型Ⅱ类似,区别在于类型Ⅳ岩石的应力-应变曲线的屈服阶段(bc 段)比较长,且较为平缓。该类型的岩石试样有A4, A5, A6, B4, B5和B6,即在15~40℃及60~100 MPa围压条件。该类型以剪胀破坏为主,主破坏面不平整,有明显的凹凸块体,擦痕明显,岩粉很多(图3d)。

5) 类型Ⅴ——岩石的应力-应变曲线的峰前段主要有2个阶段:弹性变形阶段(Ob 段)和微裂纹演化至加速发展阶段(bc 段)。类型Ⅴ与类型Ⅲ类似,没有孔隙裂隙压密阶段,因为试验温度及围压较高,在温度及围压作用下,岩石内部本身的微裂纹在试验开始前

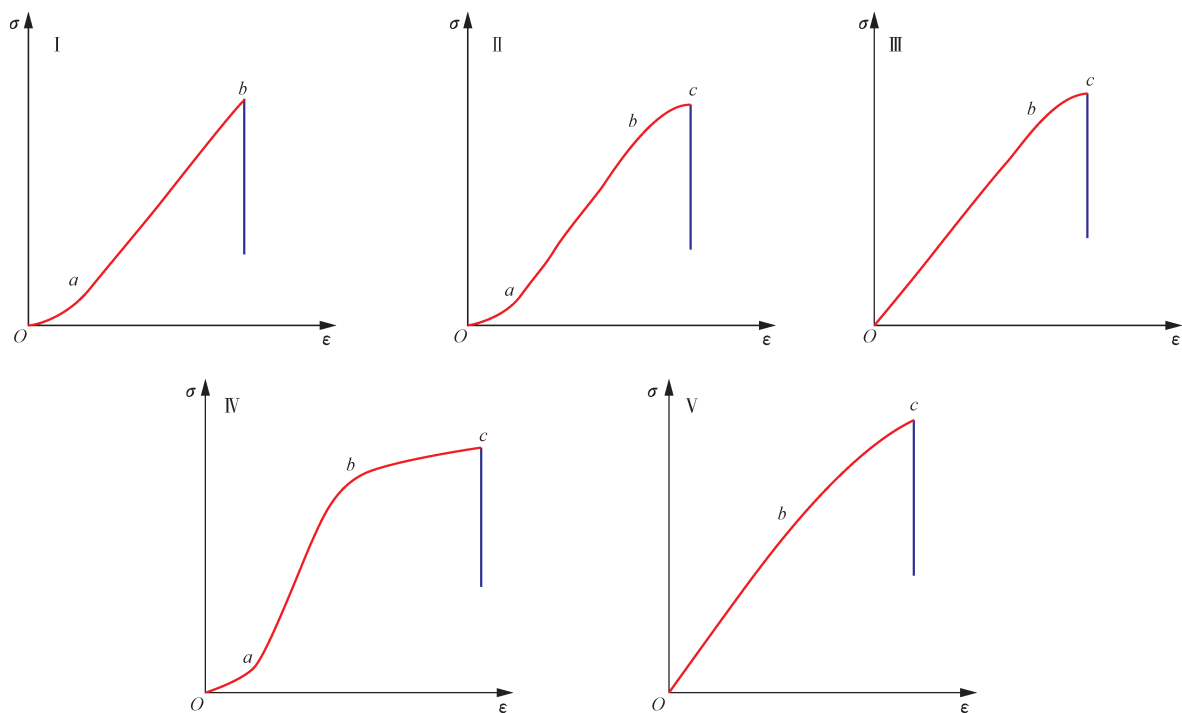


图2 温度-应力作用下致密石英砂岩应力(σ)-应变(ε)曲线类型

Fig. 2 Types of stress-strain curves of tight quartz sandstone samples under combined action of temperature and confining pressure



图 3 典型试样破裂面
Fig. 3 Typical fracture surface of the samples

a 类型 I ,拉张破坏;b 类型 II ,剪切破坏;c 类型 V ,剪切破坏;d 类型 IV ,剪胀破坏;e 类型 III ,剪切破坏

就已被压密,因而试验曲线从弹性变形开始。此类型的岩石试样有 C5,C6,D4,D5,D6,E4,E5,E6,F4,F5 和 F6,即在 60 ~ 150 ℃ 及 60 ~ 100 MPa 围压条件,屈服阶段曲线段较长。该类型以剪切破坏为主,也有部分剪胀破坏,高围压作用下,试验剪切破坏后较破碎,主破坏面较为平整、光滑,擦痕、岩屑、岩粉都很明显(图 3c)。

3 致密石英砂岩力学性质与围压关系

从图 4 可以观察到,在 15 ~ 150 ℃ 范围内,相同试验温度条件下,致密石英砂岩试样的三轴抗压强度呈现出随围压增大而增大的特征。在 6 个设定温度 15, 40,60,90,130 和 150 ℃ 条件下,围压为 0,20,40,60, 80 和 100 MPa 时,对应的三轴抗压强度平均值分别为 194. 04, 364. 61, 469. 62, 512. 26, 608. 39 和 720. 61 MPa。围压由 0 MPa 增至 100 MPa 时,试样的三轴抗压强度平均值相对于 0 MPa 时,分别增加了 87. 90% (20 MPa), 142. 025% (40 MPa), 164. 00% (60 MPa), 213. 54% (80 MPa) 和 271. 32% (100 MPa)。由图 2 可

知,在不同试验温度下,致密石英砂岩试样的三轴抗压强度与围压的关系是非线性的,可表示为
$$\sigma_s = 0.010\ 8\sigma_3^2 + 1.923\ 4\sigma_3 + 293.24 (R^2 = 0.894\ 4)$$

(1)

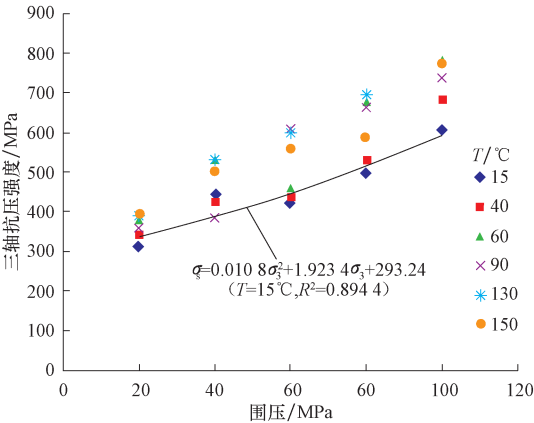


图 4 高温作用下致密石英砂岩试样三轴抗压强度(σ_s)与围压(σ₃)关系

Fig. 4 Relationship between triaxial compression strength (σ_s) of tight quartz sandstone samples and confining pressure(σ₃) under high temperatures

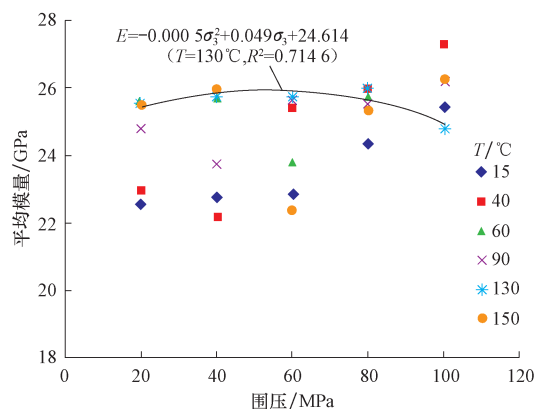


图5 高温作用下致密石英砂岩试样弹性模量 (E) 与围压 (σ_3) 关系

Fig. 5 Relationship between elastic modulus (E) of tight quartz sandstone samples and confining pressure (σ_3) under high temperatures

图5显示,致密石英砂岩试样在6个设定温度下,围压0,20,40,60,80和100 MPa对应的弹性模量平均值分别为22.10,24.49,24.34,24.30,25.49和26.05 GPa。随围压增大,试样的弹性模量平均值相对围压为0 MPa(单轴压缩)时分别增长了10.85%,10.19%,9.98%,15.34%和17.89%。除围压为60 MPa时,因试样个体差异,弹性模量的平均值有所下降外,总体上呈现出随围压增大而增大的规律。由于100 MPa还未达到致密石英砂岩的应力损伤围压,故其力学参数未出现明显下降。

4 致密石英砂岩力学性质与温度关系

温度对致密石英砂岩试样的影响主要表现为两个方面:热膨胀和热破裂。岩石内部矿物受热膨胀,使岩石试样内部原本具有的微裂纹被压密,岩石孔隙减小,使岩石强度强化。同时,组成岩石的矿物有多种,不同岩石矿物的热膨胀系数不同,因而矿物晶体颗粒之间产生相互挤压或拉伸,岩石内部各部分之间的变形受到相互牵制,引起岩石内部的热应力,导致岩石内部裂纹扩展、颗粒接触边界出现裂纹或者矿物颗粒的破裂,从而产生新的微裂纹,使岩石力学性质劣化。

致密石英砂岩在高温作用下,由常规三轴压缩试验结果分析处理可以得到致密石英砂岩试样粘聚力、内摩擦角与温度的关系(图6,图7)。进一步分析可获得在围压一定时,6个设定温度下致密石英砂岩试样的三轴抗压强度、弹性模量与温度的关系(图8,图9)。由图4—图7可以观察分析得到:由于试样个体差异,围压一定时,致密石英砂岩试样的粘聚力、内摩擦角、

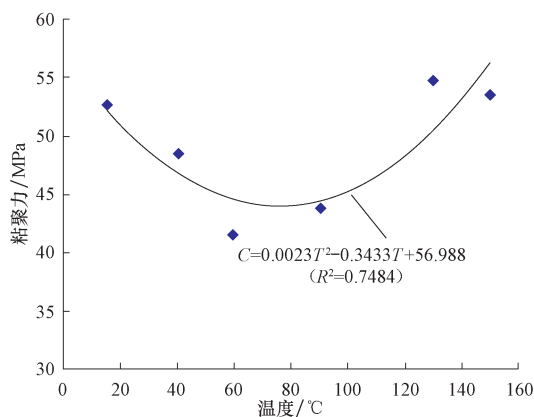


图6 致密石英砂岩试样粘聚力 (C) 与温度 (T) 关系

Fig. 6 Relationship between cohesion (C) of tight quartz sandstone samples and temperature (T)

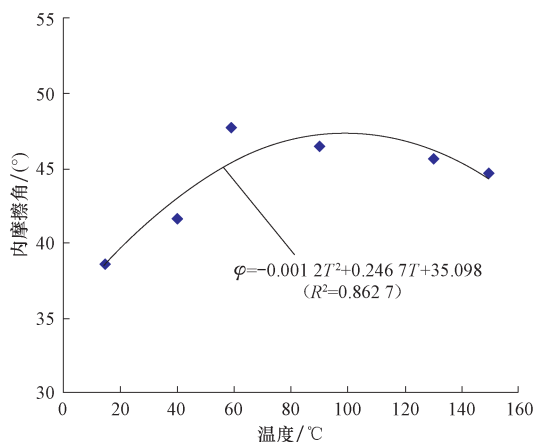


图7 致密石英砂岩试样内摩擦角 (φ) 与温度 (T) 关系

Fig. 7 Relationship between internal friction angle (φ) of tight quartz sandstone samples and temperature (T)

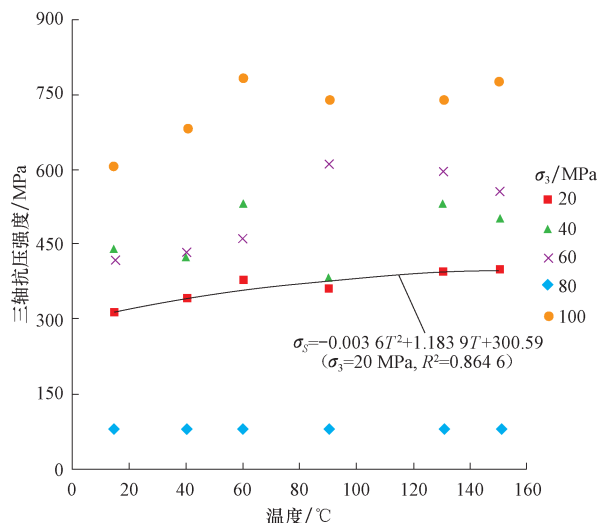


图8 致密石英砂岩试样三轴抗压强度 (σ_s) 与温度 (T) 关系

Fig. 8 Relationship between triaxial compression strength (σ_s) of tight quartz sandstone samples and temperature (T)

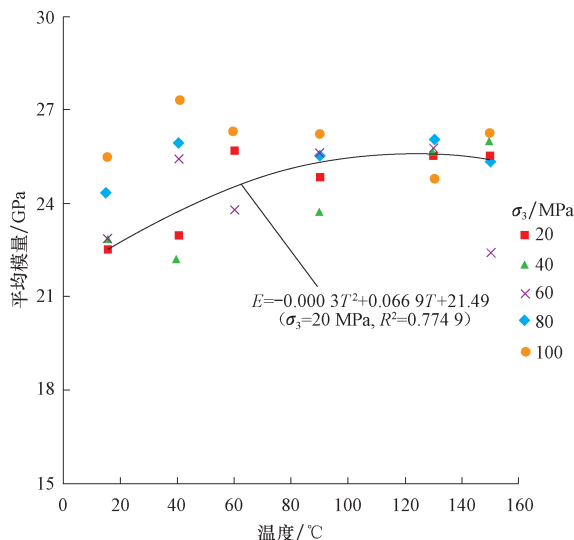


图9 致密石英砂岩试样弹性模量(E)与温度(T)关系

Fig.9 Relationship between elastic modulus(E) of tight quartz sandstone samples and temperature(T)

三轴抗压强度及弹性模量试验结果存在一定的离散性,但整体规律也比较明显。常规三轴压缩条件下,不同试验温度作用下,随试验温度升高,60℃之前,致密石英砂岩试样的粘聚力呈二次非线性减小,内摩擦角、三轴抗压强度及弹性模量呈非线性增加;60℃之后,试样的粘聚力呈二次非线性增加,而内摩擦角、三轴抗压强度及弹性模量则呈二次非线性减小。试验说明,60℃附近是温度-应力共同作用条件下岩石力学性质变化的温度节点。

致密石英砂岩试样的内摩擦角、三轴抗压强度平均值和弹性模量平均值分别由15℃的38.65°,411.08 MPa和23.01 GPa增加到60℃时的47.59°,500.72 MPa和24.83 GPa,增幅分别为23.13%,21.81%和7.90%;而粘聚力则由52.64 MPa下降到41.54 MPa,下降了21.08%。当试验温度升至150℃时,相对于室温(15℃)试样的内摩擦角、粘聚力、三轴抗压强度平均值和弹性模量平均值分别增加至44.70°,53.56 MPa,505.16 MPa和24.59 GPa,增幅分别为15.68%,1.74%,22.89%和6.85%。

5 结论

1) 围压一定时,致密石英砂岩试样在不同温度作用下,常规三轴压缩应力-应变曲线大致经历了压密、弹性、屈服和破坏4个阶段。

2) 在15~150℃范围内,常规三轴压缩试验在试验温度相同的条件下,致密石英砂岩试样的三轴抗压强度在总体趋势上呈现出随围压增大而增大的特征。

除围压为60 MPa时,因试样个体差异,弹性模量的平均值有所下降外,总体上呈现出随围压增大而增大的规律。由于100 MPa还未达到致密石英砂岩的应力损伤围压,故其力学参数未出现明显下降。

3) 围压一定时,试验得到的致密石英砂岩试样的粘聚力、内摩擦角、三轴抗压强度及弹性模量具有较大的离散性,但整体仍具有一定的规律性。常规三轴压缩条件下,不同试验温度作用下,随试验温度升高,60℃之前,致密石英砂岩试样的粘聚力呈二次非线性减小,内摩擦角、三轴抗压强度及弹性模量呈非线性增加;60℃之后,试样的粘聚力呈二次非线性增加,而内摩擦角、三轴抗压强度及弹性模量则呈二次非线性减小。60℃附近是温度-应力共同作用条件下岩石力学性质变化的温度节点。

4) 在0~100 MPa围压范围,15~150℃温度范围内,致密砂岩试样变形破坏类型取决于温度和围压,围压对岩石强度的影响程度大于温度,可大致分为5种类型。随着围压的增大,岩石从拉张破坏向剪切破坏转变。围压较低时,岩石为拉张破坏,竖向节理裂隙较多,并伴有一定数量的横向裂隙,主破坏面上有许多微小的次生裂纹,岩石试样被裂隙切割分成多个条块状岩块。围压较高时,主破坏面为斜向剪切面,围压越高,剪切面越平整,剪切面上挤压摩擦强烈,擦痕清晰可见,并有很多灰白色的岩石矿物形成的岩粉,有滑腻感,主控裂隙面上的次生裂纹比较少,但主控裂隙面在试样表面的出露迹线的两端有次生分支裂纹。试样内有水平层理时,在低温高围压条件下变形破坏时,会产生较大的塑性变形。

参 考 文 献

- [1] 贾承造,郑民,张永峰. 中国非常规油气资源与勘探开发前景[J]. 石油勘探与开发,2012,39(2):129-136.
Jia Chengzao, Zheng Min, Zhang Yongfeng. Unconventional hydrocarbon resources in China and the prospect of exploration and development[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(2): 129-136.
- [2] 赵靖舟,李军,白玉彬,等. 论致密大油气田成藏模式[J]. 石油与天然气地质,2013,34(5):573-583.
Zhao Jingzhou, Li Jun, Bai Yubin, et al. Hydrocarbon accumulation patterns of large tight oil and gas fields[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(5): 573-583.
- [3] 戴金星,倪云燕,吴小奇. 中国致密砂岩气及在勘探开发上的重要意义[J]. 石油勘探与开发,2012,39(3):257-264.
Dai Jinxing, Ni Yunyan, Wu Xiaoqi. Tight gas in China and its significance in exploration and exploitation[J]. Petroleum Exploration and Development, 2012, 39(3): 257-264.
- [4] 李建忠,郭彬程,郑民,等. 中国致密砂岩气主要类型、地质特征

- 与资源潜力[J]. 天然气地球科学, 2012, 23(4): 607-615.
- Li Jianzhong, Guo Bincheng, Zheng Min, et al. Main types, geological features and resource potential of tight sandstone gas in China[J]. Natural Gas Geoscience, 2012, 23(4): 607-615.
- [5] 郭迎春, 庞雄奇, 陈冬霞, 等. 致密砂岩气成藏研究进展及值得关注的几个问题[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(6): 717-724.
- Guo Yingchun, Pang Xiongqi, Chen Dongxia, et al. Progress of research on hydrocarbon accumulation of tight sand gas and several issues for concerns[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(6): 717-724.
- [6] 王伟明, 赵旭, 孙计文, 等. 致密砂岩气资源潜力关键参数确定方法——以吐哈盆地为例[J]. 石油与天然气地质, 2014, 35(2): 258-265.
- Wang Weiming, Zhao Xu, Sun Jiwen, et al. Key parameter selection for tight gas resource potential: A case from Turfan-Hami Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2014, 35(2): 258-265.
- [7] 张雷, 张学娟, 卢双舫, 等. 松辽盆地北部古龙-常家围子地区登娄库组深盆气藏形成的可能性[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 441-449.
- Zhang Lei, Zhang Xuejuan, Lu Shuangfang, et al. Possibility of formation of deep basin gas reservoirs in the Denglouku Formation of Gulong Changjiaweizi region, northern Songliao Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 441-449.
- [8] 侯瑞云, 刘忠群. 鄂尔多斯盆地大牛地气田致密低渗储层评价与开发对策[J]. 石油与天然气地质, 2012, 33(1): 118-128.
- Hou Ruiyun, Liu Zhongqun. Reservoir evaluation and development strategies of Daniudi tight sand gas field in the Ordos Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2012, 33(1): 118-128.
- [9] 吴小奇, 廖凤蓉, 黄士鹏. 塔里木盆地煤成气勘探潜力分析[J]. 天然气地球科学, 2011, 22(6): 975-981.
- Wu Xiaoqi, Liao Fengrong, Huang Shipeng. Exploration potential of coal-derived gas in Tarim Basin[J]. Natural Gas Geoscience, 2011, 22(6): 975-981.
- [10] 孟万斌, 吕正祥, 刘家铎, 等. 川西坳陷孝泉-新场地区须家河组四段储层控制因素及预测地质模型[J]. 石油与天然气地质, 2013, 34(4): 483-490.
- Meng Wanbin, Lü Zhengxiang, Liu Jiaduo, et al. Reservoir controlling factors and geological prediction models of the 4th member of the Xujiahe Formation in Xiaquan-Xinchang area, the western Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2013, 34(4): 483-490.
- [11] 蔡希源. 深层致密砂岩气藏天然气富集规律与勘探关键技术——以四川盆地川西坳陷须家河组天然气勘探为例[J]. 石油与天然气地质, 2010, 31(6): 707-714.
- Cai Xiyuan. Gas accumulation patterns and key exploration techniques of deep gas reservoirs in tight sandstone: An example from gas exploration in the Xujiahe Formation of the western Sichuan Depression, the Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2010, 31(6): 707-714.
- [12] 王绳祖. 高温高压岩石力学——历史、现状、展望[J]. 地球物理学进展, 1995, 10(4): 1-31.
- Wang Shengzu. High-temperature/high-pressure rock mechanics: History, state-of-art and prospect[J]. Progress in Geophysics, 1995, 10(4): 1-31.
- [13] Al-Shayea N A, Khan K, Abduljawad S N. Effects of confining pressure and temperature on mixed mode(I - II) fracture toughness of a lime-stone rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2000, 37(4): 629-643.
- [14] 刘泉声, 许锡昌. 温度作用下脆性岩石的损伤分析[J]. 岩石力学工程学报, 2000, 19(4): 408-411.
- Liu Quansheng, Xu Xichang. Damage analysis of brittle rock at high temperature[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 408-411.
- [15] Araújo R G S, Sousa J L A, Bloch M. Experimental investigation on the influence of temperature on the mechanical properties of reservoir rocks[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(3-4): 298.
- [16] 徐小丽, 高峰, 沈晓明, 等. 高温后花岗岩力学性质及微孔隙结构特征研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(6): 1752-1758.
- Xu Xiaoli, Gao Feng, Shen Xiaoming, et al. Research on mechanical characteristics and micropore structure of granite under high-temperature[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(6): 1752-1758.
- [17] 张旭东, 薛承瑾, 张烨. 塔河油田托甫台地区岩石力学参数和地应力试验研究及其应用[J]. 石油天然气学报, 2011, 33(6): 132-138.
- Zhang Xudong, Xue Chengjin, Zhang Ye. Research and application of rock mechanical parameters and in-situ stress in Tuofutai area of Tahe oilfield[J]. Journal of Oil and Gas Technology, 2011, 33(6): 132-138.
- [18] 张熙. 川西地区新场构造岩石物理特征及应用研究[D]. 四川成都: 成都理工大学, 2011.
- Zhang Xi. Petrophysical property study and its applied research on Xinchang Structure of western Sichuan Depression[D]. Chengdu, China: Chengdu University of Technology, 2011.

(编辑 李军)