

# 川西须家河组致密砂岩高温后的物理力学特征参数试验研究

于鑫<sup>1,2</sup>, 李皋<sup>1</sup>, 陈泽<sup>1</sup>, 张毅<sup>1</sup>

YU Xin<sup>1,2</sup>, LI Gao<sup>1</sup>, CHEN Ze<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1</sup>

1. 西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点试验室, 四川 成都 610500;

2. 中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057

1. State Key Laboratory of Oil & Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu 610500, Sichuan, China;

2. Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation Limited, Zhanjiang 524057, Guangdong, China

YU X, LI G, CHEN Z, et al., 2021. Experimental study on physical and mechanical characteristics of tight sandstones in the Xujiahe Formation in western Sichuan after high-temperature exposure [J]. Journal of Geomechanics, 27 (1): 1-9. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.001

**Abstract:** This study aims to boost the seepage capacity in the near-well area by the downhole heating so as to improve the production efficiency of low-permeability reservoir while ensuring the sidewall stability. Taking the second member of the Xujiahe Formation in Longchang as the subject, the effect of high temperature on the microstructure, mechanical property and permeability of tight sandstones were studied. The samples underwent thermogravimetric analysis, scanning electron microscopy (SEM), acoustic wave test, physical parameter measurement, uniaxial compression test and permeability test after high-temperature exposure in the range of 26 °C to 1000 °C, and temperature's relevance to the composition, microstructure, mechanical parameter and permeability were analyzed. The test results showed that the internal moisture of the samples was removed continuously with the increase of temperature, and the content of clay minerals decreased by stages in the range of 26 °C to 1000 °C, which led to the decrease of sample mass and apparent density. There was a threshold temperature at about 400 °C for the performance of tight sandstone. When the temperature was higher than 400 °C, the compressive strength and deformation resistance of the samples decreased sharply. With the increase of temperature, more internal fractures emerged and the network size was enlarged, leading to the continuous growing increase of permeability. Therefore, it is considered that keeping the downhole heating temperature above 400 °C and expanding the heating range as well are conducive to improving the productivity of single well. The findings of this study are of value for evaluating the wellbore stability and stimulation effect of single well while applying the electric heating technology in tight sandstone reservoirs.

**Key words:** high-temperature heating; tight sandstone; wave velocity; permeability; mechanical properties

**摘要:** 为了在井下加热改善近井区域渗流能力以提高低渗透油气藏开采效率的同时保证井壁稳定, 研究了高温对四川隆昌须家河组须二段致密砂岩微观结构、力学性质及渗透性的影响, 对 26~1000 °C 高温处理后的试样进行了热重分析、电镜扫描分析 (SEM)、声波测试、物理参数测定、单轴压缩试验及渗透率测试, 分析高温后试样的组分、微观结构、力学参数及渗透率与温度的相关性。结果表明: 在 26~1000 °C 范围内, 致密砂岩试样随温度升高不断脱去内部水分, 粘土矿物含量分阶段减少, 进而造成试样质量减小、视密度降低; 致密砂岩岩石性能在 400 °C 左右存在一个阈值温度, 当致密砂岩高于 400 °C 时, 其抗压

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (51674217)

**第一作者简介:** 于鑫 (1996-), 男, 硕士, 主要从事油气井工程中岩石热处理等相关研究。E-mail: 954373095@qq.com

**通讯作者:** 李皋 (1976-), 男, 博士, 研究员, 主要从事油气井储层保护、欠平衡钻井等相关研究。E-mail: ligmichael@263.net

**收稿日期:** 2019-11-01; **修回日期:** 2020-04-21; **责任编辑:** 吴芳

**引用格式:** 于鑫, 李皋, 陈泽, 等. 2021. 川西须家河组致密砂岩高温后的物理力学特征参数试验研究 [J]. 地质力学学报, 27 (1): 1-9. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2021.27.01.001

强度及抗变形能力急剧降低；内部裂缝网络随着温度的增高，裂缝数量不断增多，裂缝网络规模不断增大，导致高温后岩样渗透率不断增加，且增速随温度不断增大，表明将油气井加热温度控制在 400 °C 以上并增大加热范围有利于提高单井产能。研究结果可为致密砂岩气藏中实施电加热增产技术时判断井筒安全性及单井产能增产效果提供一定参考。

**关键词：**高温加热；致密砂岩；波速；渗透率；力学性质

**中图分类号：**TU45；TE31 **文献标识码：**A

## 0 引言

近年来，随着稠油热采、页岩加热开采技术的普遍应用以及研究的不断深入（Fitch and Minter, 1976；薛瑞新, 2008；王益维等, 2019），高温对岩石矿物力学性质及渗透性等的影响已经成为油气开采领域一个新的研究热点（Babadagli et al., 2010；丁正云等, 2019；Meng et al., 2019；曾治平等, 2019）。

高温后岩石的力学参数以及微观结构是判断加热处理后地层、井周稳定性的重要依据，一些研究者发现花岗岩、大理岩等不同的岩石高温后力学参数变化差异，且岩石组份改变以及相变是导致高温参数突变的重要原因（桑祖南等, 2001；徐小丽等, 2008；苏承东等, 2008；秦本东等, 2009；Liu and Xu, 2013）。Ding 等（2016）对高温后砂岩进行试验研究发现，温度从 400 °C 升高到 800 °C，砂岩峰值应变增加 75.2%，杨氏模量和峰值强度分别降低 62.5% 和 35.8%。吴刚等（2007）和杨礼宁等（2016）发现当热处理温度高于某一温度值后，岩石的力学性能受温度影响变化更大。岩石中矿物颗粒的配比对其力学特征有着明显的影响（叶功勤等, 2019），而高温处理后岩石的力学性质变化是岩石内部组分、微观结构发生改变的宏观体现。一些研究者认为花岗岩、灰岩、大理岩等岩石在高温作用后，其岩石内部孔隙及裂纹都发生了明显的变化，连通性得到提高（李力等, 1990；Géraud et al., 1992；张渊等, 2007）。谌伦建等（2005a, 2005b）和张渊等（2005）发现岩石在加热过程中强度急剧降低的温度与岩石内部裂隙形成和晶体形态变化的温度基本一致。Sirdesai 等（2017）采用显微镜技术对印度砂岩的岩石矿物变化和孔裂隙结构进行研究，确定了 500 °C 为此岩石孔隙变化的阈值温度。已有不少学者发现对岩石进行高温处理能极大地增加其渗透性

（Homand-Etienne and Houpert, 1989；Jamaluddin et al., 2000）。刘均荣等对取自储层的 3 种岩芯在 100~800 °C 范围内进行加热处理，发现岩石会逐渐形成一个发育良好的裂缝连通网络，在宏观上导致岩石渗透率的增加（刘均荣等, 2001；刘均荣和吴晓东, 2003, 2008）。李皋等（2007, 2017）研究认为井下加热对地层的致裂作用有助于改善近井区域渗流能力乃至解除地层所收到的水锁损害，提高低渗透油气藏的开采效率。

上述学者主要对花岗岩、大理岩、煤层中砂岩以及粗砂岩等岩石在高温后的微观结构及宏观力学参数的变化进行了研究，但各参数间的相关性研究较少，且鲜有学者深入分析高温后致密砂岩微观结构变化对渗透率的影响，因此对致密砂岩高温后的组分、微观结构、物理参数、渗透率及力学性质等参量及这些参数间的相互性分析还有待进一步开展。鉴于岩石组分及其占比的不同均会导致岩石在高温后的力学性质变化的差异，文章以川西须家河组须二段致密砂岩作为研究对象，对经历 1000 °C 范围内高温后的致密砂岩试样进行热重分析、X 射线衍射、电镜扫描分析（SEM）、声波测试、物理参数测定、及单轴压缩试验和渗透率测试，研究高温对致密砂岩的矿物成分、微观结构、宏观力学和渗透性的影响机制。研究结果对于致密砂岩气藏中实施电加热增产技术时近井壁处岩石结构变化、井筒安全性及单井产能增产效果等的确定具有一定参考价值。

## 1 试验方法

### 1.1 试验设备

#### 1.1.1 加热装置

致密砂岩试样由 SX2-4-10/NP 型箱式电阻炉进行加热处理，电阻炉主要参数如下：空炉升温至目标温度最小时间 < 60 min；工作室尺寸为 120 mm×200 mm×300 mm（H×D×W）；温度控制精度为：±1 °C，加热速率可控，加热过程升温速度

设置为 10 °C/min。

### 1.1.2 微结构试验仪器

采用 X'Pert Pro 型 X 射线衍射仪对高温后试样的组分变化进行检测, 并通过 Quanta 450 型环境扫描电子显微镜测试试样表面形貌, 放大倍数 6~100000 倍。

### 1.1.3 单轴压缩试验仪器

单轴压缩试验在 RTR-1000 型岩石力学试验机上进行, 轴向最大载荷为 1000 kN, 试验采用位移控制方式, 压头压进速率设置为 0.3 mm/min。

### 1.1.4 波速测试仪器

采用成都皓瀚完井岩电科技有限公司声波测试装置, 通过将高温后试样夹持于仪器中发射并接收声波信号以得到横/纵波速度等数据, 试样夹持轴压为 5 MPa。

### 1.1.5 气体渗透率测试仪器

采用 SCMS-E 型高温高压岩心多参数测量系统气体孔渗测量仪对试样渗透率进行测定, 测量过程按照《岩心分析方法》的规定, 对所选试样再次进行端面磨平及烘干炉中 65 °C 条件下烘干 48 h 处理, 后准确测量试样长度、直径和干重, 再将试样装入气体孔渗测量仪中, 设置对应试样参数后进行试样的孔隙度和渗透率测量试验。测试条件为: 温度 26 °C; 围压 3.5 MPa。

## 1.2 样品选择与制备

试验所用致密砂岩取自四川隆昌须家河组须二段, 矿物组成为斜长石 (52.6%)、石英 (16.6%)、钾长石 (15.9%)、粘土 (14.9%)。将岩石试件分别加工成规格为  $\phi 25 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  试样 60 块, 后于烘干炉中 65 °C 条件下烘干 48 h。通过声波测试选择纵波波速相近的试样进行后续试验, 波速范围为 3.1~3.3 km/s。

## 1.3 高温处理

已有学者通过试验证明岩心在目标温度保温 2 h 能够使试样中心温度和试样表面温度仅相差 3% 左右, 满足试验要求 (马阳升, 2018), 且试验发现此致密砂岩在热处理温度 1100 °C 及以上时塑性明显增大, 不利于油气井安全生产。因此采用 SX2-4-10/NP 型箱式电阻炉对致密砂岩进行高温处理, 温度设置为 11 级, 分别为 26 °C (室温), 100 °C, 200 °C, 300 °C, 400 °C, 500 °C, 600 °C, 700 °C, 800 °C, 900 °C, 1000 °C, 升温速度设置为 10 °C/min, 当温度达到设置温度再恒温 2 h 后关闭加热炉, 使试样在炉内自然冷却至 26 °C。

高温处理后岩样外观形态如图 1 所示, 致密砂岩试样高温后外观颜色发生明显改变: 26 °C 时为浅灰色, 在 300 °C 之前灰色逐渐加深, 在 400~1000 °C 高温后先由灰色向土黄色转变, 最终变为红黄色。



图 1 经历不同温度后试样外观颜色变化

Fig. 1 Colors of the samples after exposing to high temperatures

## 2 试验结果分析

### 2.1 试样组分变化

高温后岩样 X 射线衍射试验分析结果如图 2 所示。由图可知, 高温后致密砂岩的粘土矿物含量在试验温度范围内分阶段下降, 下降段分别为 26~100 °C, 400~500 °C, 700~900 °C, 对应于岩石在高温作用下发生束缚水、结合水脱去现象, 粘土总量占比在 900 °C 后低于 1%。高温后砂岩中钾长石、石英及斜长石含量在 26~1000 °C 皆在一定范围内上下波动, 这是因为砂岩内矿物晶胞在温度作用下发生膨胀导致矿物的衍射角、衍射强度乃至相态有所变化, 进而使得 X 射线衍射实验测得的矿物含量发生一定程度的波动。致密砂岩在高温作用后所发生的粘土矿物失水、石英等岩石矿物含量的变化均会导致砂岩的宏观性质的改变。

### 2.2 试样微观结构变化

使用 Labsys EVO 型同步热分析仪对试样进行热重分析, 结果如图 3 所示。由试验结果可知, 岩样在试验温度范围内持续发生热失重, 其中热失重相继发生在 48~100 °C, 422~598 °C 以及 700~760 °C, 且 422~598 °C 阶段失重最剧烈, 整个加热过程总失重约 2.49%。这一现象主要是岩石组分脱水及矿物结构变化导致的, 岩样发生热失重现象与岩样粘土含量减少时的温度段分阶段对应。

此外, 使用 Quanta 450 型号环境扫描电子显微



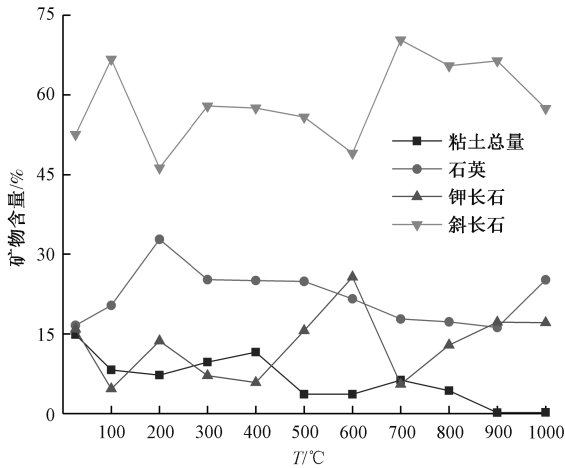


图2 高温后岩样矿物含量变化图

Fig. 2 Variation diagram of mineral contents after exposing to high temperatures

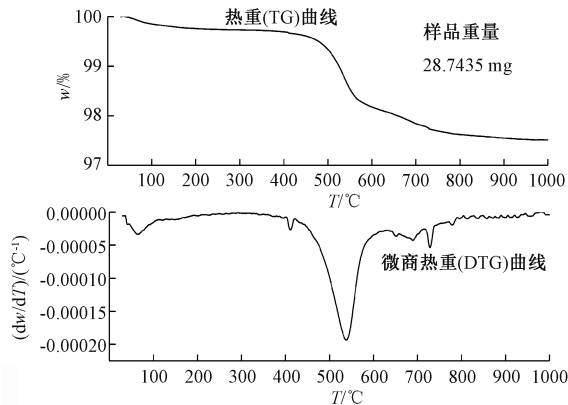


图3 岩样热重分析结果

Fig. 3 Thermogravimetric analysis results for the samples

镜对高温后试样进行微观形貌结构分析,扫描结果见图4。未经高温处理的致密砂岩内部有极少原生微裂缝,但接触相对紧密(图4a),200℃时试样相较于原始试样,虽有少量微裂缝生成,但裂缝宽度和长度均较小(图4b)。400℃,600℃,800℃,1000℃高温后试样已有明显的裂缝发育,随着温度的增高,岩石内部次生裂缝不断增多,且从600℃后试样内部已经形成了一定范围的裂缝网络,裂缝规模随温度增高不断扩大(图4c—4f),这是因为岩石矿物在高温作用下不断发生热膨胀乃至热破裂,最终导致岩石内部产生微裂缝。

### 2.3 试样物理参数变化

选取5块 $\phi 25\text{ mm}\times 50\text{ mm}$ 致密砂岩试样通过精度为0.0001 g的电子天平进行质量称量,设置11级目标温度,分别为26℃,100℃,200℃,300℃,400℃,500℃,600℃,700℃,800℃,

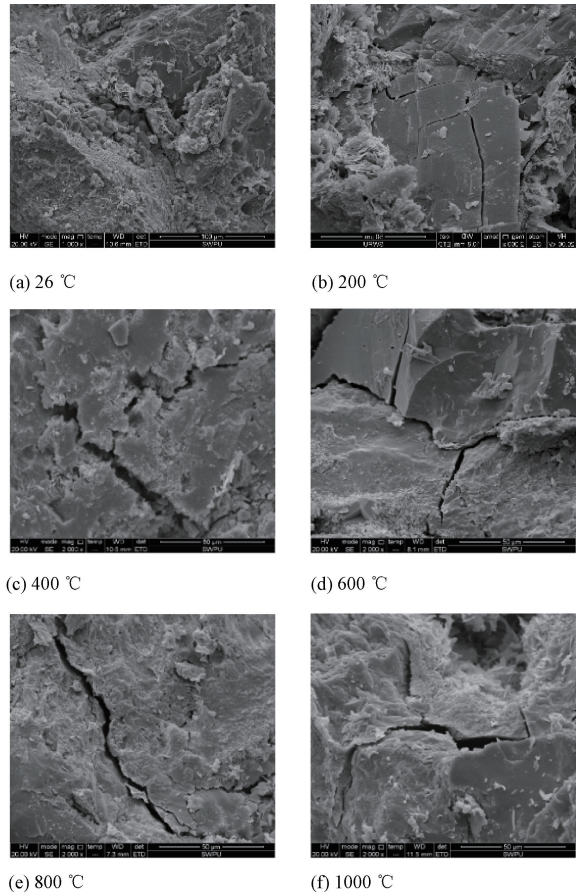


图4 高温后致密砂岩微观结构特征

Fig. 4 Microstructure characteristics of tight sandstones after exposing to high temperatures

900℃,1000℃,对这5块试样从低到高重复加热至目标温度并恒温2 h后再自然冷却至常温后测定其质量及体积。

不同温度处理后砂岩试样的质量测定结果如图5所示。从图中可以看出,随着温度的升高,试样质量逐渐降低,在26~100℃及400~800℃温度段降低明显,这与岩样粘土矿物脱水现象及热重试验结果相呼应。当试样从常温加热至1000℃,5块试样质量减少范围为1.083~1.189 g,占总质量的1.84%~2.01%。

采用量积法对所选的5块砂岩试样体积、视密度进行测定,结果如图6、图7所示。从图中可以看出试样体积、视密度随温度的升高分阶段变化。在26~400℃阶段,试样体积及视密度变化不明显,这是因为砂岩内部矿物在温度较低时体积变化较小。在400~1000℃阶段,试样体积随温度升高不断增大,说明试样中石英等矿物发生了不同程度的体积膨胀,而试样视密度随温度升高呈现出不断降低的趋势。砂岩试样密度的降低源于高

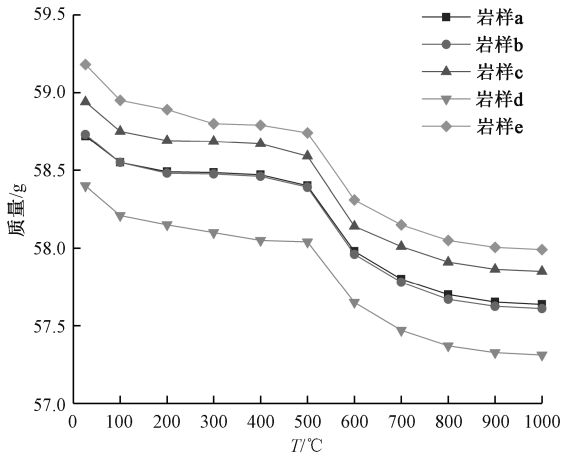


图 5 试样质量与温度的关系

Fig. 5 Effect of temperature on sample quality

温作用使其内部水分蒸发以及岩石矿物如石英等发生体积膨胀 (邵继喜, 2018)。

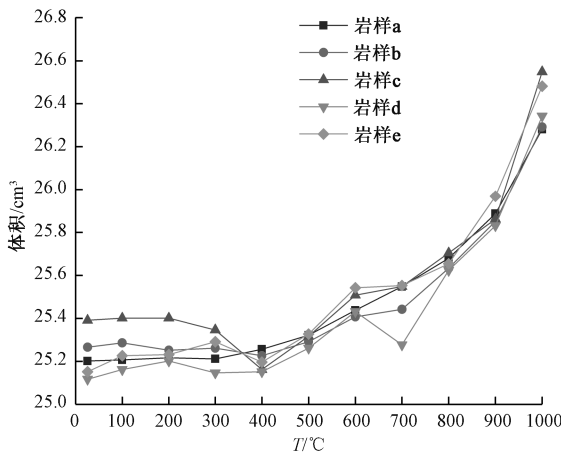


图 6 试样体积与温度的关系

Fig. 6 Effect of temperature on sample volume

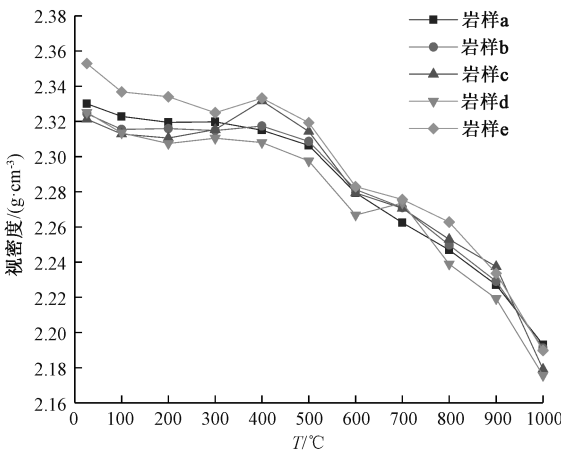


图 7 试样视密度与温度的关系

Fig. 7 Effect of temperature on apparent density

## 2.4 试样力学性质变化

### 2.4.1 试样纵波波速

根据不同温度处理后致密砂岩的纵波波速随温度的变化情况 (图 8), 每个温度点测试 3 块试样的纵波波速, 测试轴压为 5 MPa, 图中黑色圆点为砂岩的波速散点, 红色圆点及曲线为各温度点时波速测试平均值。根据砂岩波速的变化趋势, 可将 26~1000 °C 温度范围分为三个阶段: ①26~300 °C, 波速在此阶段变化较小, 波速均值大致在 3.2~3.3 km/s 内, 这是因为在 300 °C 温度范围内, 虽然附着水随高温作用汽化逸出, 但是试样内部基质、矿物产生热膨胀, 因而试样内部次生裂缝未见明显发育, 导致波速变化不大; ②300~800 °C, 在此阶段, 试样波速随温度升高不断降低, 且波速下降斜率不断增大, 试样平均波速由 300 °C 时的 3.2 km/s 降至 800 °C 时的 1.9 km/s, 降幅达 40.5%, 这是由于 800 °C 前试样内部相继脱出结合水及结晶水, 且次生裂缝不断发育进而形成裂缝网络造成的; ③800~1000 °C 阶段, 试样波速降低趋势变缓, 这主要是由于试样内水分脱出已在 800 °C 前基本完成, 仅有少数裂缝在高温作用下继续发育, 因此波速降低趋势变缓。

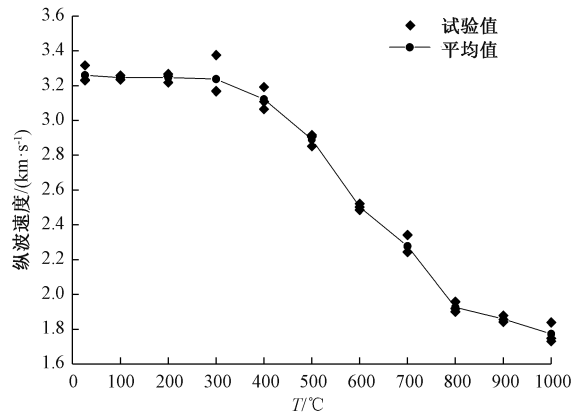


图 8 试样波速与温度的关系

Fig. 8 Effect of temperature on wave velocity

### 2.4.2 应力-应变曲线

高温后致密砂岩单轴压缩测试共进行 11 组试验, 每组 3 块试样, 分别得到 1000 °C 内高温后试样的单轴应力下力学性能变化特征。考虑到各温度点岩石试样的应力-应变曲线分散性较好, 且图件曲线过多易影响分析, 故选取每温度点典型试样的全应力-应变曲线 (图 9)。26 °C 及高温后砂岩的全应力-应变曲线基本上可分为三个阶段: ①压实阶段, 砂岩在受到轴向初始压力后, 内部

原生裂纹及孔隙在轴向压力作用下逐渐收缩减小甚至闭合,在此阶段压力增加较小,而应变增速较快,斜率缓慢上升;②弹性阶段,在压实阶段后,峰值应力与试样应变呈近似线性的关系,弹性模量基本保持不变;③破裂阶段,当载荷持续增加达到一定值后,岩石内部开始生成新裂纹并在压力作用下逐渐扩散发育,随着载荷进一步增加,裂纹发育至一定规模,试样发生宏观破裂,应力迅速减小。从图9可以看出,致密砂岩在26~1000℃温度作用后,其全应力-应变曲线峰值应力整体上表现为:在200℃前,致密砂岩的峰值应力随温度增高逐渐增加,压实阶段逐渐延长;200~400℃间峰值应力随温度增加有所波动;400℃后,随着温度的升高,致密砂岩的全应力-应变曲线渐渐趋于平缓,且趋于向右下方移动,表明砂岩的脆性逐渐减弱。压实阶段作用段延长,而弹性阶段缩短,这表明致密砂岩的力学性能逐渐劣化。

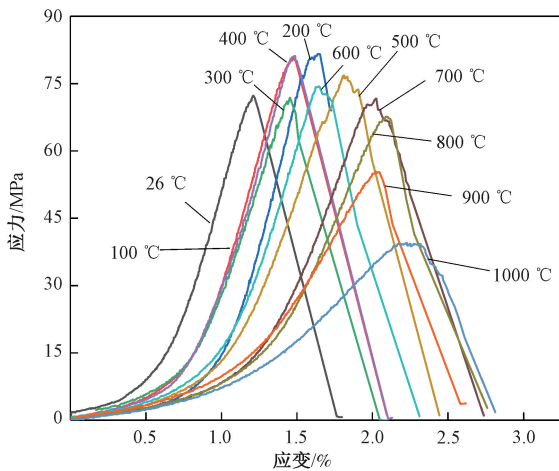


图9 高温后试样单轴应力-应变关系曲线

Fig.9 Diagram showing the uniaxial stress-strain curves of the samples after exposing to high temperatures

#### 2.4.3 单轴抗压强度及弹性模量

由26~1200℃高温处理后砂岩试样单轴抗压强度、弹性模量随温度的变化关系图可知(图10、图11),试样单轴抗压强度、弹性模量随温度升高在整体上呈下降趋势,且两者变化趋势相近。

①在26~200℃内,因岩石内附着水汽化逸出,矿物发生一定程度热膨胀对其内部孔隙进行一定填充的同时未产生次生裂缝,因此在此阶段岩石抗压、抗变形能力随温度升高有所增强;②200~400℃段,200℃后岩石内部矿物在高温作用下发生热膨胀,热应力作用下试样内部不断产生内部

裂纹的同时也会对岩石内部孔隙有所填充,因此岩石物性在此阶段上下波动,其力学性质变化较小;③400~1000℃段,自400℃后,试样单轴抗压强度、弹性模量随温度升高不断降低,且斜率不断增大,结合SEM结果发现,这是因为岩石内部在热应力的作用下原生裂缝得到发育,且有次生裂缝不断生成,最终发育成裂缝网络。内部裂纹的不断增多对岩石力学性能产生主要影响并起到弱化作用,因此试样单轴抗压强度、弹性模量加速降低。

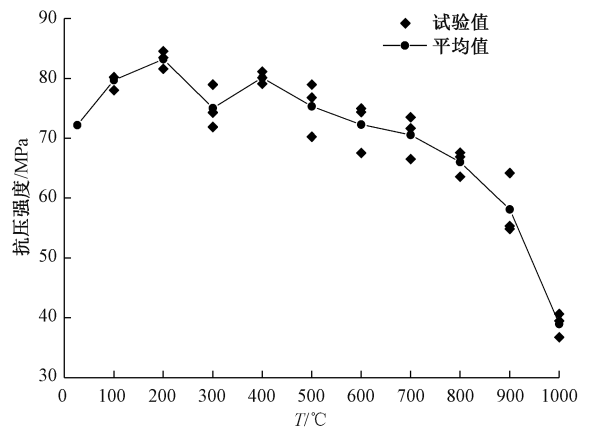


图10 试样单轴抗压强度与温度的关系

Fig.10 Effect of temperature on uniaxial compressive strength

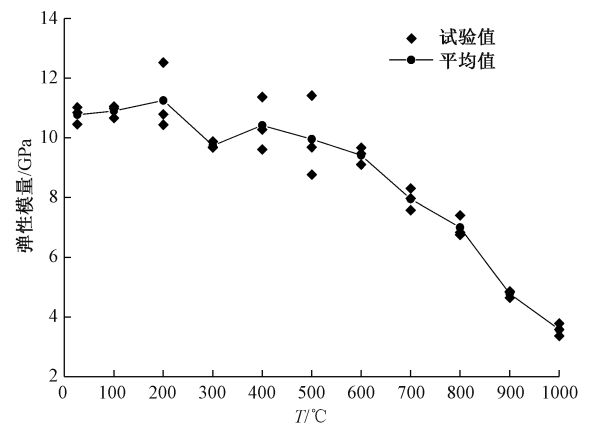


图11 试样弹性模量与温度的关系

Fig.11 Effect of temperature on elastic modulus

#### 2.5 试样渗透性变化

选取各温度点波速为中间值的致密砂岩试样进行气体渗透率测试,高温后致密砂岩试样渗透率随温度变化规律如图12所示。当岩样加热温度在300℃以下时,其渗透率未发生明显变化,温度高于400℃后,岩样渗透率随温度升高不断增加,且斜率明显增大。



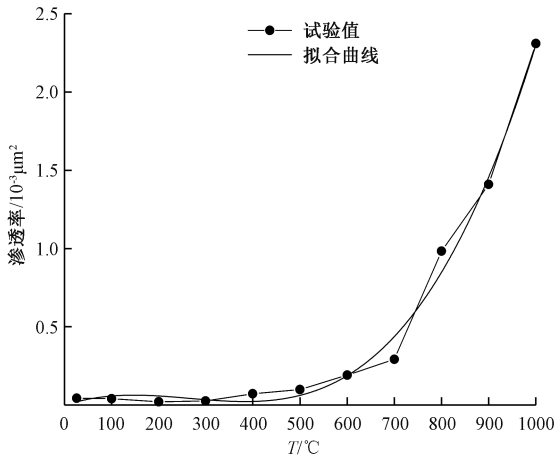


图 12 高温后致密砂岩渗透率变化曲线

Fig. 12 Diagram showing the permeability curves of the tight sandstones after exposing to high temperatures

在 26~1000 °C 范围内, 致密砂岩渗透率随温度变化的规律拟合曲线符合三次方程, 如公式 (1) 所示:

$$K = 0.001 \times T - 4.92 \times 10^{-6} \times T^2 + 6.18 \times 10^{-9} \times T^3 - 0.00389 R^2 = 0.99162 \quad (1)$$

公式中:  $K$ —气体渗透率, mD;  $T$ —加热温度, °C;  $R^2$ —拟合优度, 无量纲。

1000 °C 高温后试样渗透率从初始  $0.044 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$  增至  $2.31 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ , 渗透性增大近 52 倍。结合高温后致密砂岩微组结构的试验结果进行分析: 在温度处于 26~400 °C 阶段, 虽然试样内部岩石矿物在温度作用下发生热膨胀导致少量微裂缝生成, 但对岩样渗透率影响较小, 因此 400 °C 以下岩样渗透性未发生明显改变; 当温度处于 400~1000 °C 阶段, 由于岩石矿物热膨胀程度增加导致岩石内部不断发生热破裂, 因此高温后试样次生裂缝得以发育, 且内部裂缝网络随着温度的增高, 裂缝数量不断增多, 裂缝网络规模不断增大, 导致高温后岩样渗透率不断增加, 且斜率随温度增大。

## 2.6 讨论

关于高温作用对岩石微观结构及力学性能等参数造成的影响已有相关研究报告, 杨礼宁等 (2016) 研究发现 400 °C 前后, 临沂市莒南县砂岩的峰值强度随温度的升高出现分阶段变化的规律, 在 400 °C 后, 砂岩的峰值强度迅速下降。梁冰等 (2005) 试验发现岩石渗透率在热处理温度低于一定温度时增速较小, 当热处理温度高于某一温度值, 渗透率增速显著增加, 此温度值为该岩石渗透率随温度变化的阈值。虽然不同岩石的力学

参数在高温后的变化有所不同, 但对特定岩石大多存在一个阈值温度, 当热处理温度高于该阈值温度后, 岩石内部结构变化将愈加剧烈, 进而导致岩石宏观力学参数的明显改变, 研究结果表明致密砂岩的阈值温度为 400 °C 左右, 该结论与已有研究结果相符。

## 3 结论

(1) 当热处理温度在 1000 °C 范围内, 四川隆昌须家河组须二段致密砂岩随温度升高不断脱去内部水分, 粘土矿物含量分阶段减少, 进而造成试样质量减小、视密度降低。致密砂岩在高温作用后组分的变化将对岩石的宏观物理参数产生影响。

(2) 热处理温度在 26~1000 °C 内时, 高温后致密砂岩试样纵波波速在 300 °C 后随温度升高不断降低, 微裂缝随温度升高不断发育成网络; 26~300 °C 范围内试样单轴抗压强度、弹性模量在一定范围内波动、整体上有所增加, 而在 400~1000 °C 范围内急剧降低, 说明 400 °C 左右存在一个致密砂岩强弱转化的阈值温度。因此在油气井中根据岩石力学性能的变化规律, 控制好近井筒处及地层内各处岩石的温度有利于提高井壁稳定性。

(3) 当热处理温度低于 400 °C 时, 试样内部在温度作用下所生成的微裂缝较少, 因此 400 °C 内岩样渗透性未发生明显改变。当热处理温度高于 400 °C, 试样内部裂缝网络随着温度的增高, 裂缝数量不断增多, 裂缝网络规模不断增大, 导致高温后岩样渗透率不断增加, 且增速随温度不断增大。400 °C 左右是致密砂岩渗透性随温度变化的一个阈值温度, 因此油气井将加热温度控制在 400 °C 以上并增大加热范围有利于提高单井产能。

## References

- BABADAGLI T, ER V, NADERI K, et al., 2010. Use of biodiesel as an additive in thermal recovery of heavy oil and bitumen [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 49 (11): 43-48.
- CHEN L J, WU Z, QIN B D, et al., 2005a. Mechanical characteristics and cracking mechanism of coal roof sandstone under high temperature [J]. *Journal of Chongqing University*, 28 (5): 123-126. (in Chinese with English abstract)
- CHEN L J, ZHAO H B, GU H T, et al., 2005b. Study on microstructure of coal roof sandstone under high temperature [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 34 (4): 443-

446. (in Chinese with English abstract)
- DING Q L, JU F, MAO X B, et al., 2016. Experimental investigation of the mechanical behavior in unloading conditions of sandstone after high-temperature treatment [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49 (7): 2641-2653.
- DING Z Y, CAO D Y, WANG L, et al., 2019. Study on occurrence regularity of coal-based graphite in kekeng mining area in Zhangping, Fujian province [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (2): 198-205. (in Chinese with English abstract)
- FITCH J P, MINTER R B, 1976. Chemical diversion of heat will improve thermal oil recovery [C] //SPE annual fall technical conference and exhibition. New Orleans, Louisiana: Society of Petroleum Engineers; 10.
- GÉRAUD Y, MAZEROLLE F, RAYNAUD S, 1992. Comparison between connected and overall porosity of thermally stressed granites [J]. *Journal of Structural Geology*, 14 (8-9): 981-990.
- HOMAND-ETIENNE F, HOUPERT R, 1989. Thermally induced microcracking in granites: characterization and analysis [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 26 (2): 125-134.
- JAMALUDDIN A K M, BENNION D B, THOMAS F B, et al., 2000. Application of heat treatment to enhance permeability in tight gas reservoirs [J]. *Journal of Canadian Petroleum Technology*, 39 (11): 19-24.
- LI G, CHEN Z, CHEN Y J, et al., 2017. Study on the method of relieving water-lock damage in tight sandstone gas reservoir by high-temperature heating [C] //IFEDC 2017. 2155-2161. (in Chinese)
- LI G, MENG Y F, DONG Z X, et al., 2007. Mechanisms and significance of microfractures generated by microwave heating in sandstone reservoirs [J]. *Petroleum Exploration and Development*, 34 (1): 93-97. (in Chinese with English abstract)
- LI L, LIN M Z, LIU K M, et al., 1990. Microscopic study on the strength, deformation and fracture characteristics of rocks after heated [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 11 (4): 51-61. (in Chinese with English abstract)
- LIANG B, GAO H M, LAN Y W, 2005. Theoretical analysis and experimental study on relation between rock permeability and temperature [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 24 (12): 2009-2012. (in Chinese with English abstract)
- LIU J R, QIN J S, WU X D, 2001. Experimental study on relation between temperature and rocky permeability [J]. *Journal of the University of Petroleum, China*, 25 (4): 51-53. (in Chinese with English abstract)
- LIU J R, WU X D, 2003. Discussion of the permeability increasing mechanism of thermal treated rock [J]. *Oil Drilling & Production Technology*, 25 (5): 43-47. (in Chinese with English abstract)
- LIU J R, WU X D, 2008. Microscopic experiment of thermal treated rock [J]. *Journal of Southwest Petroleum University (Science & Technology Edition)*, 30 (4): 15-18. (in Chinese with English abstract)
- LIU S, XU J Y, 2013. Study on dynamic characteristics of marble under impact loading and high temperature [J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 62: 51-58.
- MA Y S, 2018. Experimental study on rock mechanical properties under real-time high temperature [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology. (in Chinese with English abstract)
- MENG T, LIU R C, MENG X X, et al., 2019. Evolution of the permeability and pore structure of transversely isotropic calcareous sediments subjected to triaxial pressure and high temperature [J]. *Engineering Geology*, 253: 27-35.
- QIN B D, HE J, CHEN L J, 2009. Experimental research on mechanical properties of limestone and sandstone under high temperature [J]. *Journal of Geomechanics*, 15 (3): 253-261. (in Chinese with English abstract)
- SANG Z N, ZHOU Y S, HE C R, et al., 2001. An experimental study on the brittle-plastic transition in gabbro [J]. *Journal of Geomechanics*, 7 (2): 130-138. (in Chinese with English abstract)
- SHAO J X, 2018. Experimental study on the damage evolution of sandstone under thermos-mechanical coupling [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology. (in Chinese)
- SIRDESAI N N, SINGH T N, PATHEGAMA GAMAGE R, 2017. Thermal alterations in the poro-mechanical characteristic of an Indian sandstone-a comparative study [J]. *Engineering Geology*, 226: 208-220.
- SU C D, GUO W B, LI X S, 2008. Experimental research on mechanical properties of coarse sandstone after high temperatures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 27 (6): 1162-1170. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y W, WANG Y P, MENG X L, et al., 2019. Organic matter pyrolysis kinetics and formation permeability variation during upgrading process of low-maturity shale oil [J]. *Oil & Gas Geology*, 40 (3): 678-684. (in Chinese with English abstract)
- WU G, XIE A G, ZHANG L, 2007. Mechanical characteristics of sandstone after high temperatures [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 26 (10): 2110-2116. (in Chinese with English abstract)
- XU X L, GAO F, GAO Y N, et al., 2008. Effect of high temperatures on the mechanical characteristics and crystal structure of Granite [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 37 (3): 402-406. (in Chinese with English abstract)
- XUE R X, 2008. Development trends of heavy oil extraction technology at home and abroad [J]. *Science and Technology Innovation Herald* (27): 25. (in Chinese)
- YANG L N, JIANG Z Q, ZHANG W Q, et al., 2016. Mechanical properties of sandstone after high temperature [J]. *China Earthquake Engineering Journal*, 38 (2): 299-302. (in Chinese with English abstract)
- YE G Q, CAO H, GAO Q, et al., 2019. Numerical simulation study on the influence of particle proportion on rock mechanics characteristics [J]. *Journal of Geomechanics*, 25 (6): 1129-1137. (in Chinese with English abstract)
- ZENG Z P, WANG Q J, LI J, et al., 2019. Study on seepage characteristics of tight reservoirs under multi-field coupling [J].



Journal of Geomechanics, 25 (6): 1068-1074. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y, WAN Z J, ZHAO Y S, 2007. Meso-experiment of fine sandstone thermal crack laws [J]. Journal of Liaoning Technical University, 26 (4): 529-531. (in Chinese with English abstract)

ZHANG Y, ZHANG X, ZHAO Y S, et al., 2005. Process of sandstone thermal cracking [J]. Chinese Journal of Geophysics, 48 (3): 656-659. (in Chinese with English abstract)

## 附中文参考文献

丁正云, 曹代勇, 王路, 等, 2019. 福建漳平可坑矿区煤系石墨赋存规律研究 [J]. 地质力学学报, 25 (2): 198-205.

谌伦建, 吴忠, 秦本东, 等, 2005a. 煤层顶板砂岩在高温下的力学特性及破坏机理 [J]. 重庆大学学报, 28 (5): 123-126.

谌伦建, 赵洪宝, 顾海涛, 等, 2005b. 煤层顶板砂岩在高温下微观结构变化的研究 [J]. 中国矿业大学学报, 34 (4): 443-446.

李皋, 孟英峰, 董兆雄, 等, 2007. 砂岩储集层微波加热产生微裂缝的机理及意义 [J]. 石油勘探与开发, 34 (1): 93-97.

李皋, 陈泽, 陈一健, 等, 2017. 地层高温加热解除致密砂岩气藏水锁损害方法研究 [C] //2017 油气田勘探与开发国际会议 (IFEDC 2017) 论文集. 2155-2161.

李力, 林睦曾, 刘康敏, 等, 1990. 岩石受热后的强度、变形破坏特性的微观研究 [J]. 岩土力学, 11 (4): 51-61.

梁冰, 高红梅, 兰永伟, 2005. 岩石渗透率与温度关系的理论分析和试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 24 (12): 2009-2012.

刘均荣, 秦积舜, 吴晓东, 2001. 温度对岩石渗透率影响的实验研究 [J]. 石油大学学报 (自然科学版), 25 (4): 51-53.

刘均荣, 吴晓东, 2003. 岩石热增渗机理初探 [J]. 石油钻采工艺, 25 (5): 43-47.

刘均荣, 吴晓东, 2008. 热处理岩石微观实验研究 [J]. 西南石油大学学报 (自然科学版), 30 (4): 15-18.

马阳升, 2018. 实时高温作用下岩石力学特性实验研究 [D]. 徐州: 中国矿业大学.

秦本东, 何军, 谌伦建, 2009. 石灰岩和砂岩高温力学特性的试验研究 [J]. 地质力学学报, 15 (3): 253-261.

桑祖南, 周永胜, 何昌荣, 等, 2001. 辉长岩脆-塑性转化及其影响因素的高温高压实验研究 [J]. 地质力学学报, 7 (2): 130-138.

邵继喜, 2018. 热-力作用下砂岩损伤破裂演化规律实验研究 [D]. 太原: 太原理工大学.

苏承东, 郭文兵, 李小双, 2008. 粗砂岩高温作用后力学效应的试验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 27 (6): 1162-1170.

王益维, 汪友平, 孟祥龙, 等, 2019. 低成熟度页岩油加热改质热解动力学及地层渗透性 [J]. 石油与天然气地质, 40 (3): 678-684.

吴刚, 邢爱国, 张磊, 2007. 砂岩高温后的力学特性 [J]. 岩石力学与工程学报, 26 (10): 2110-2116.

徐小丽, 高峰, 高亚楠, 等, 2008. 高温后花岗岩力学性质变化及结构效应研究 [J]. 中国矿业大学学报, 37 (3): 402-406.

薛瑞新, 2008. 国内外稠油开采技术研发趋势 [J]. 科技创新导报 (27): 25.

杨礼宁, 姜振泉, 张卫强, 等, 2016. 高温作用后砂岩力学性质研究 [J]. 地震工程学报, 38 (2): 299-302.

叶叶勤, 曹函, 高强, 等, 2019. 颗粒配比对岩石力学特征影响的数值模拟研究 [J]. 地质力学学报, 25 (6): 1129-1137.

曾治平, 王千军, 李静, 等, 2019. 多场耦合作用下致密储层渗流特性研究 [J]. 地质力学学报, 25 (6): 1068-1074.

张渊, 张贤, 赵阳升, 等, 2005. 砂岩的热破裂过程 [J]. 地球物理学报, 48 (3): 656-659.

张渊, 王志军, 赵阳升, 2007. 细砂岩热破裂规律的细观实验研究 [J]. 辽宁工程技术大学学报, 26 (4): 529-531.

## 开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):

可扫码直接下载文章电子版, 能听到作者的语音介绍及更多文章相关资讯

