

# 深层煤岩力学特性在变温条件下的演化机制实验研究



李鑫<sup>1,2</sup>, 张杰<sup>1,2,\*</sup>, 高东华<sup>3</sup>, 商宏伟<sup>3</sup>, 孙瑞涛<sup>1,2</sup>, 李荣鑫<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>西南石油大学油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川成都 610500

<sup>2</sup>西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川成都 610500

<sup>3</sup>中国石油华北油田分公司应急抢险站, 内蒙古二连浩特 026000

**摘要:** 井筒内的钻井液在钻井作业的过程中会处于不断循环流动的状态, 其会通过对流换热及热传导的方式与井壁处的岩石发生复合换热, 造成岩石的力学特性随自身温度的改变而不断变化。为研究温度变化对深层煤层气井井眼形变的影响机制, 进一步丰富深层煤层气井井壁稳定理论并有效保障深层煤层气井在钻井作业过程中的井壁稳定性, 通过使用高温高压岩石三轴力学测试系统对深层煤岩的各项力学特性在不同实验温度条件下 (40 ℃ -10 ℃) 的演化规律进行测试。结果表明, 实验温度越高, 深层煤岩在发生破坏时的应力值越低, 且在达到峰值强度的过程中, 其塑性变形在整个形变阶段的占比越高; 深层煤岩的抗压强度、弹性模量和主裂纹长度会随实验温度的升高而减小, 而泊松比和主破裂角则会随实验温度的升高而增大。

**关键词:** 深层煤岩; 力学特性; 实验温度; 演化规律; 测试

**DOI:** 10.57237/j.jest.2022.01.001

## Experimental Investigation on the Evolution Mechanism of Deep Coal-rock Mechanical Properties Under Varying Temperature Conditions

Li Xin<sup>1,2</sup>, Zhang Jie<sup>1,2,\*</sup>, Donghua Gao<sup>3</sup>, Hongwei Shang<sup>3</sup>, Ruitao Sun<sup>1,2</sup>, Rongxin Li<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

<sup>2</sup>Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China

<sup>3</sup>Emergency Rescue Station, CNPC Haubei Oilfield Company, Erenhot 026000, China

**Abstract:** The drilling fluid in the wellbore would be in a state of continuous circulating flow during the drilling operation, and will undergo the compound heat exchange with the wellbore rock through the convection heat transfer and the heat conduction, causing the mechanical properties of the rock to change with the changing of its own temperature. To study the influence of the temperature changing on the borehole deformation, further enrich the theory of the wellbore stability guarantee and effectively ensure the wellbore stability of the deep coalbed methane (CBM) wells, a high-temperature, high-pressure rock triaxial mechanics testing system was used to test the evolution characteristics of

\*通信作者: 张杰, swpivip@163.com

various mechanical properties of deep coal-rock under different experimental temperature conditions (40 °C-100 °C). The results show that the higher the experimental temperature, the lower the stress value of the deep coal-rock when it fails. In the process of reaching peak strength, the higher the experimental temperature, the higher the proportion of plastic deformation of the deep coal-rock in its entire deformation stage. The compressive strength, elastic modulus, and main crack length of the deep coal-rock will decrease with the experimental temperature. The Poisson's ratio and the central fracture angle will increase with the experimental temperature.

**Keywords:** Deep Coal-Rock; Mechanical Properties; Experimental Temperature; Evolution, Test

## 1 引言

目前,我国煤层气资源的勘探开发深度正逐渐向埋深大于 1000 m 的储层发展[1-3]。随着煤层气井的井深不断增加,如何避免煤层气井在建井过程中出现缩径、垮塌和卡钻等井下复杂工况,如何保障煤层气井建井的安全性及高效性正日益成为深层煤层气资源勘探开发过程中的一个重要问题[4-6]。引发煤层气井井壁失稳的原因繁多且复杂,而围岩的温度变化是众多原因中一项重要且易被忽略的因素。在钻井作业的过程中,环空内的钻井液处于循环流动的状态,其不断通过热传导和对流换热与围岩进行热量交换[7-9],使得围岩的温度处于动态变化的状态。受热胀冷缩效应的影响,井眼的形态及相关力学特性也会随着围岩温度的改变而发生相应的变化,从而对煤层气井的井壁稳定性造成一定的影响。

针对温度变化引发煤岩物理性质发生改变这一问题所开展的研究工作目前已取得了一定的研究成果。姜波等[10]发现温度的改变会因煤级的不同而对煤岩的形变产生不同程度的影响。程瑞端等[11]发现煤岩渗透率在不同温度条件下的变化规律会因其所受有效应力的大小而不同。马占国等[12]发现煤岩的抗压强度、弹性模量和应变在不同的温度区间内呈现不同的变化趋势。许江等[13]发现温度对煤岩渗透率的影响规律会因其所受有效应力和瓦斯压力的大小而发生不同趋势的变化。于永江等[14]发现随着温度的升高,煤岩颗粒的体积发生膨胀,孔隙空间缩小,从而导致渗透率降低。冯雨实等[15]运用有限元软件对煤层气井井周应力分布和井眼形变情况进行了模拟,发现在考虑了热流固耦合作用后的模拟结果与实际的情况更加吻合。杨玉良等[16]建立了温度-压力耦合作用下的煤岩黏弹塑性本构模型,实验验证结果反映出该模型可较好地描述煤岩在温度-压力耦合作用下的蠕变过程。

从以上研究现状中可以看到,当前研究工作的重

点仍在于温度变化对煤岩渗透率的影响,而针对温度变化引发煤岩力学特性改变这一问题还未开展系统的研究工作。为此,本项研究工作从实验探究着手,使用高温高压岩石三轴力学测试系统对煤岩的力学特性在不同温度条件下的演化规律进行了系统的测试,从而为实际煤层气井建井过程中的井壁稳定性保障提供一定的理论依据。

## 2 实验方法及流程

### 2.1 实验材料

本次实验所选用的煤岩试样取自四川省宜宾市筠连煤层气矿区。在实验开始前,将准备好的煤岩试样加工成直径约为 25 mm,高度约为 50 mm 的圆柱体,以满足实验设备所能容纳样品的体积要求。加工精度满足两端面不平行度误差小于 2 mm 且不平整度误差小于 1 mm。

### 2.2 实验设备

本次实验所使用的主要设备为 RTR-1000 型高温高压岩石三轴力学测试系统。该测试系统能产生最大轴向压力为 1000 kN;最大围压为 140 MPa;孔隙压力为 140 MPa;动态频率为 10 Hz;温度为 150 °C。实验控制精度为压力 0.01 MPa;液体体积 0.01 g/cm<sup>3</sup>;形变量 0.001 mm。

### 2.3 实验方法

本次实验所模拟的煤层气储层的埋藏深度为 2500 m,地表温度设定为 25 °C,地温梯度设定为 0.03 °C/m。因此,煤层气储层井眼周围的最高初始温度约为 100 °C。为了能够对煤岩力学特性随温度的变化规律进行系统的测试,本次实验共设计了 5 组测试,每组测试共进行 3 次,同组煤岩试样所处的温度及压力环境相同,

以减小同组测试间的误差，不同组煤岩试样对应着不同的温度条件，并使用相同的加载压力进行加压测试。实验所设置的温度条件分别为 40 ℃、55 ℃、70 ℃、85 ℃ 和 100 ℃。实验时所设置的温度及压力参数如表 1 所示。

表 1 实验时的温度及压力参数

组号	温度 / (℃)	轴压卸载速率 / (mm s <sup>-1</sup> )	起始轴压 / (MPa)	起始围压 / (MPa)	煤层气压 / (MPa)
1	40.0	0.01	30.0	30.0	3.0
2	55.0				
3	70.0				
4	85.0				
5	100.0				

本次实验的具体流程如图 1 所示：

#### 1. 安装煤岩试样

- (1) 在煤岩试样的侧面均匀地涂抹上硅胶，并将其置于实验室通风口处进行干燥处理；
- (2) 待煤岩试样干燥后，使用彩色笔在硅胶涂抹处写上煤岩试样的对应编号；
- (3) 将干燥后的煤岩试样装入直径为 65 mm，高度为 160 mm 的热缩管中；
- (4) 将热缩管安装至三轴压力室中；
- (5) 使用热风枪对热缩管进行加热，保证热缩管能够紧贴在煤岩试样的表面；
- (6) 将热缩管的两端用金属环固定好；
- (7) 在煤岩试样的中间安装环向引伸计，并调节引伸计初始示数至恰当值。

#### 2. 安装三轴压力室

- (1) 将三轴压力室的下底座与上底座对齐；
- (2) 将煤层气进气管与加压活塞杆上端的进气孔相连接；
- (3) 设备启动后，将三轴压力室的上底座缓慢放下，直至与下底座完全接触；
- (4) 接通下底座的出气通路；
- (5) 关闭进油阀和回油阀，打开三轴压力室与外界的连接开关；
- (6) 以恒定的速率向增压缸充油；
- (7) 打开进油阀向三轴压力室充油；
- (8) 完成充油后，关闭三轴压力室与外界的连接开关；

#### 3. 煤层气吸附

- (1) 将围压及轴压加载至 30 MPa；
- (2) 打开煤层气进气阀，使压力示数达到预定值，

与此同时关闭出气阀，使煤层气充分吸附；

(3) 当进气压力与出气压力相等时，表明煤岩试样已达到吸附平衡状态，此时即可进行后续操作。

#### 4. 进行加载

(1) 将围压及轴压加载至 30 MPa 后稳定 5 min；

(2) 将安装好的煤岩试样在预先设定的温度条件下进行加载，实验过程中注意观察每个示数的变化；

(3) 当煤岩试样发生破坏时，关闭进气阀，打开出气阀，停止实验，对实验相关数据进行收集整理。

#### 5. 实验后处理

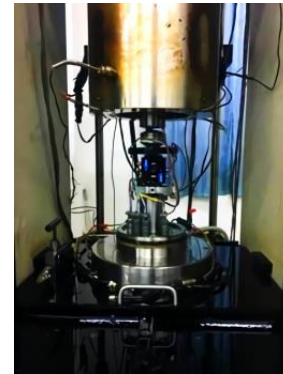
实验完成后，取出煤岩试样，并对煤岩试样发生破坏后的形态进行观察。



(a) 安装煤岩试样



(b) 安装三轴压力室



(c) 煤层气吸附



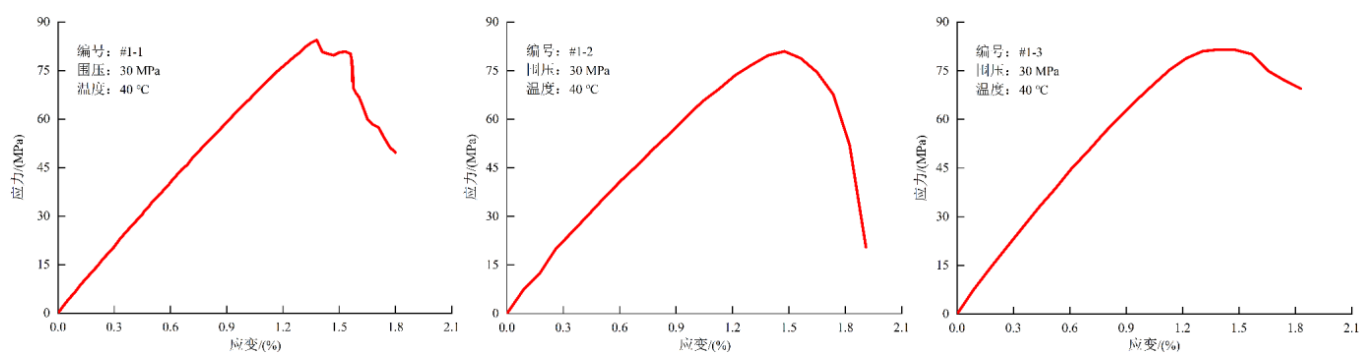
(d) 进行加载

图 1 实验流程

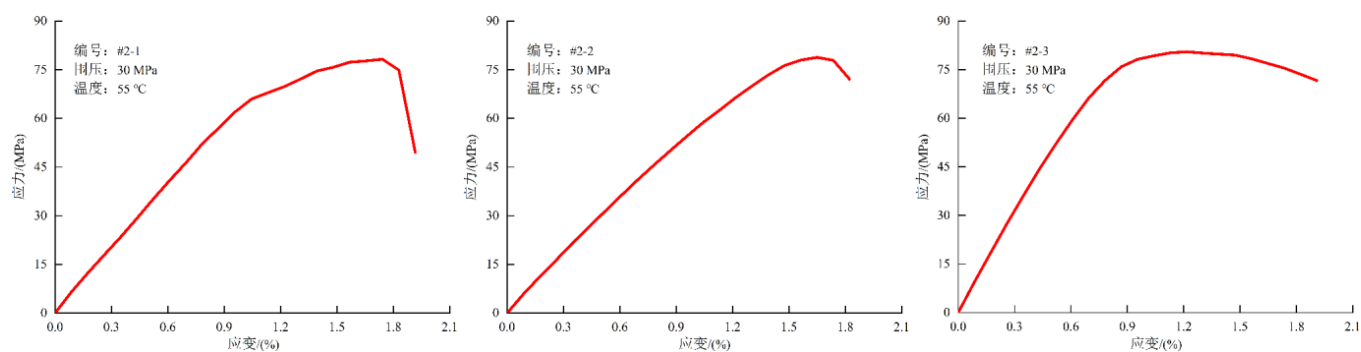
## 3 结果分析与讨论

### 3.1 应力-应变曲线测试结果

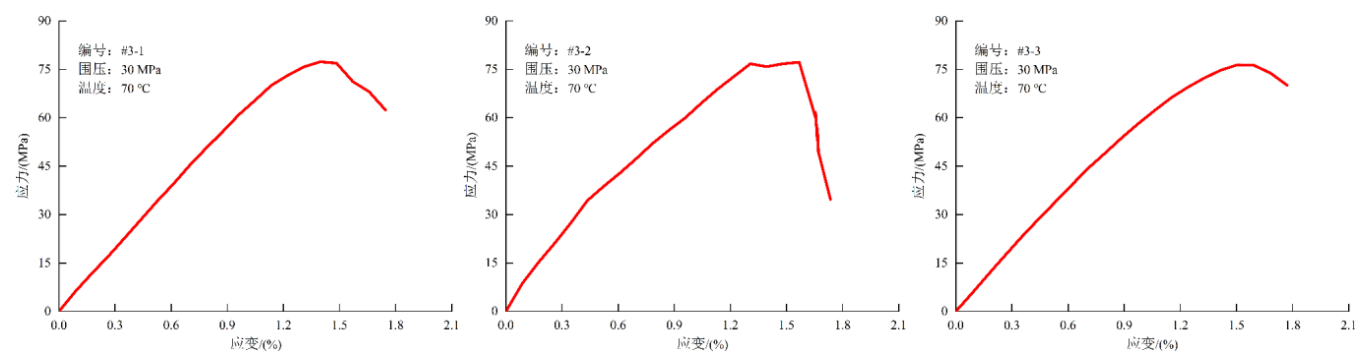
在本次实验过程中，每组煤岩试样所对应的实验温度条件不同，不同组煤岩试样在不同温度条件下的应力-应变曲线如图 2 所示，煤岩试样发生破坏时的应力及应变测试结果如表 2 所示。



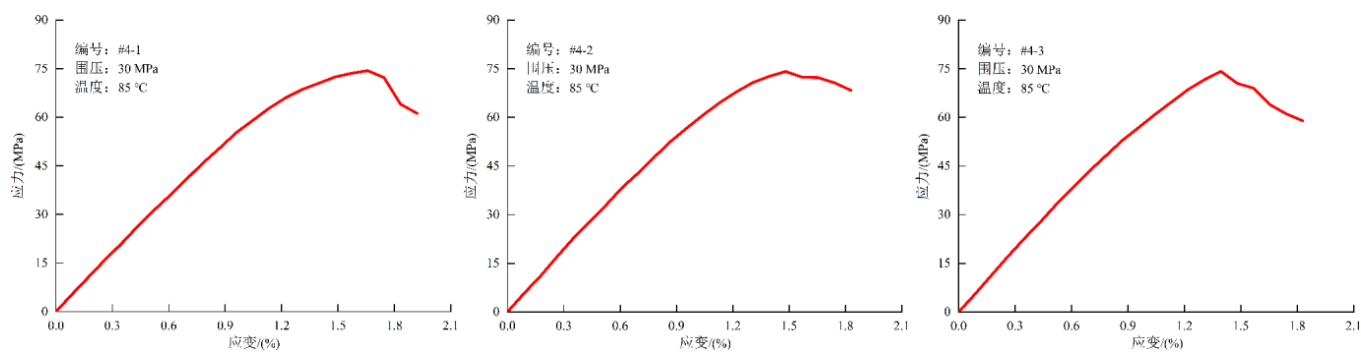
(a) 第1组煤岩试样在 40 °C 条件下的应力-应变曲线



(b) 第2组煤岩试样在 55 °C 条件下的应力-应变曲线

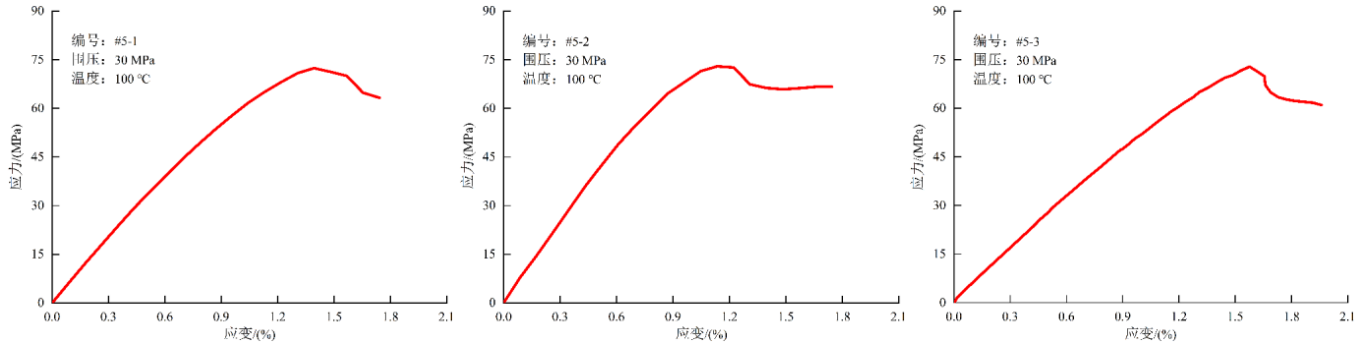


(c) 第3组煤岩试样在 70 °C 条件下的应力-应变曲线



(d) 第4组煤岩试样在 85 °C 条件下的应力-应变曲线





(e) 第 5 组煤岩试样在 100 °C 条件下的应力-应变曲线

图 2 煤岩试样在不同温度条件下的应力-应变曲线

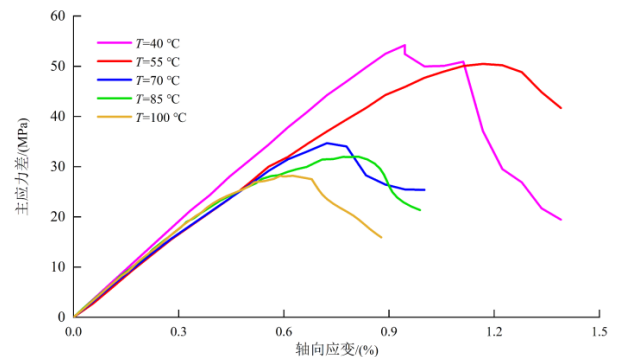
表 2 煤岩试样发生破坏时的应力及应变测试结果

组号	试样编号	应力/(MPa)	应力平均值/(MPa)	应变/(%)	应变平均值/(%)
1	#1-1	80.81	81.09	1.52	1.46
	#1-2	80.95		1.47	
	#1-3	81.52		1.39	
2	#2-1	78.23	78.44	1.74	1.68
	#2-2	78.78		1.74	
	#2-3	78.30		1.56	
3	#3-1	76.94	76.69	1.48	1.43
	#3-2	76.73		1.31	
	#3-3	76.41		1.50	
4	#4-1	74.36	74.21	1.66	1.51
	#4-2	74.11		1.48	
	#4-3	74.17		1.39	
5	#5-1	72.38	72.71	1.39	1.36
	#5-2	72.92		1.13	
	#5-3	72.82		1.57	

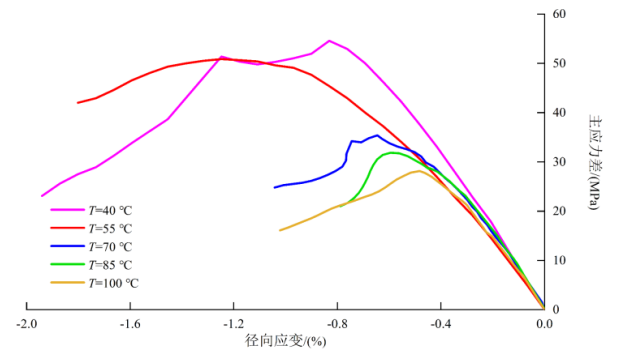
从图 2 和表 2 所示结果中可以看到, 实验测试时所加载的温度越高, 则煤岩试样发生破坏时的应力值就越低。这说明, 在进行钻井作业的过程中, 若煤层气井的井底压力保持恒定, 则围岩的温度越高, 井眼发生破坏时的应力值越低, 越易造成缩径、垮塌和卡钻等井下复杂工况的发生。

### 3.2 轴向、径向与体积应变测试结果

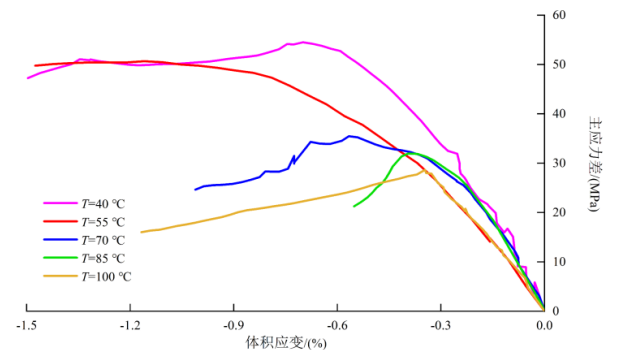
在实验过程中, 煤岩试样在不同温度条件下的轴向、径向及体积应变的结果如图 3 所示, 煤岩试样在达到峰值强度时的力学测试结果如表 3 所示。



(a) 主应力差-轴向应变曲线



(b) 主应力差-径向应变曲线



(c) 主应力差-体积应变曲线

图 3 煤岩试样在不同温度条件下的应变测试结果。

表 3 煤岩试样达到峰值强度时的力学测试结果

温度 (℃)	主应力差/(MPa)	轴向应变/(%)	径向应变/(%)	体积应变/(%)	塑性变形占比/(%)	弹性变形占比 /(%)
40	54.5	0.95	-0.82	-0.56	7.8	92.2
55	50.6	1.18	-1.14	-0.68	19.3	80.7
70	34.3	0.79	-0.65	-0.26	21.1	78.9
85	32.1	0.80	-0.62	-0.27	23.2	76.8
100	28.3	0.61	-0.46	-0.29	25.7	74.3

从图 3 和表 3 所示结果中可以看到，煤岩试样在达到峰值强度时的轴向、径向和体积应变虽然会随实验加载温度的改变而发生变化，但并没有表现出明显的线性关系。另一方面，煤岩试样在达到峰值强度的过程中，若实验时所加载温度越高，则塑性变形在整个形变阶段占比越高，弹性变形占比越低。这说明，在保持井底压力恒定的条件下，煤层气井的围岩温度

越高，则井眼越易产生不可逆的形变，越易引发井下复杂工况的发生。

3.3 力学参数测试结果

在实验过程中，煤岩试样的各项力学参数与实验加载温度之间的关系曲线如图 4 所示。

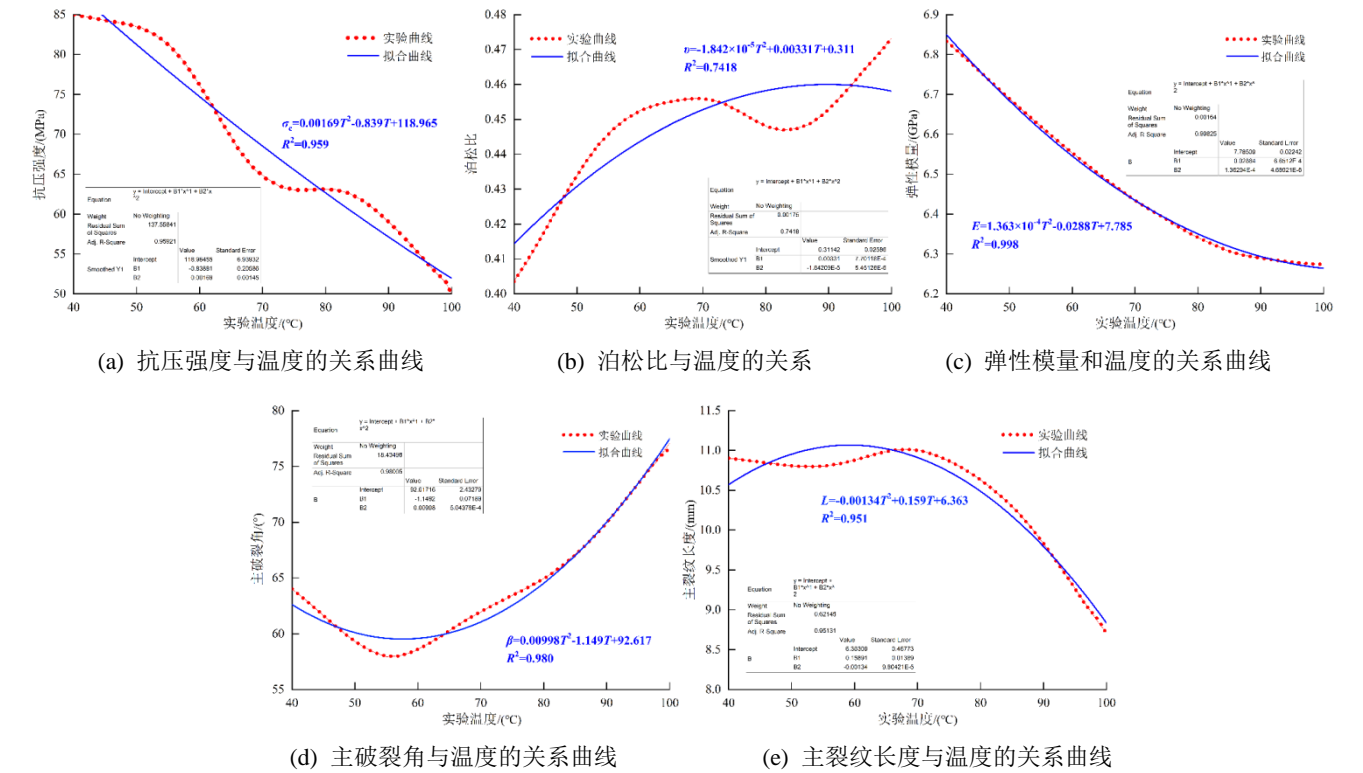


图 4 煤岩试样力学参数与温度的关系曲线

从图 4 所示结果中可以看到，通过对实验的测试结果进行数值拟合发现，煤岩试样的各项力学参数与实验加载温度之间呈一定的线性关系。从拟合趋势来看，煤岩试样的抗压强度、弹性模量和主裂纹长度会随着实验温度的升高而降低，而泊松比和主破裂角则会随着实验温度的升高而增大。

4 结论

本项研究工作以探究深层煤岩力学特性在变温条件下的演化规律为目标，以为实际煤层气井井壁稳定性的保障提供理论依据为目的，通过采用 RTR-1000 型高温高压岩石三轴力学测试系统，在不同的实验温度

条件下对深层煤岩的各项力学特性进行了系统的测试。所得到的主要结论如下:

- 1) 温度越高, 深层煤岩在发生破坏时的应力值越低, 在实际建井过程中, 越易造成缩径、垮塌和卡钻等井下复杂工况的发生。
- 2) 温度越高, 深层煤岩在达到峰值强度过程中的塑性变形在其整个形变阶段的占比越大, 弹性变形的占比越低, 在实际建井过程中, 越易造成井眼产生不可逆的形变。
- 3) 深层煤岩的各项力学参数与其所受温度之间呈一定的线性关系, 拟合结果显示, 深层煤岩的抗压强度、弹性模量和主裂纹长度会随温度的升高而减小, 而泊松比和主破裂角则会随温度的升高而增大。

## 致谢

国家重点研发计划项目“无隔水管海底泵举升双梯度钻井系统技术及工艺”(2018YFC0310200); 国家自然科学基金面上项目“环空气液两相流中气泡微观动态特征研究”(51274168); 西南石油大学研究生科研创新基金重点项目“无隔水管海底泵举升系统溢流监测与控制方法研究”(2020CXZD30)。

## 参考文献

- [1] 申鹏磊, 白建平, 李贵山, 等. 深部煤层气水平井测-定-录一体化地质导向技术 [J]. 煤炭学报, 2020, 45 (7): 2491-2499.
- [2] 刘见中, 孙海涛, 雷毅, 等. 煤矿区煤层气开发利用新技术现状及发展趋势 [J]. 煤炭学报, 2020, 45 (1): 258-267.
- [3] 徐凤银, 肖芝华, 陈东, 等. 我国煤层气开发技术现状与发展方向 [J]. 煤炭科学技术, 2019, 47 (10): 205-215.
- [4] 张丹丹, 冯雨实, 李永臣, 等. 基于有限元软件的煤层气水平井井壁稳定数值模拟研究 [J]. 煤矿安全, 2018, 49 (3): 144-147.
- [5] 张道勇, 朱杰, 赵先良, 等. 全国煤层气资源动态评价与可利用性分析 [J]. 煤炭学报, 2018, 43 (6): 1598-1604.

- [6] 李辛子, 王运海, 姜昭琛, 等. 深部煤层气勘探开发进展与研究 [J]. 煤炭学报, 2016, 41 (1): 24-31.
- [7] 杨谋, 孟英峰, 李皋, 等. 钻井全过程井筒-地层瞬态传热模型 [J]. 石油学报, 2013, 34(2): 367-371.
- [8] 杨谋, 孟英峰, 李皋, 等. 钻井液径向温度梯度与轴向导热对井筒温度分布影响 [J]. 物理学报, 2013, 62 (7): 529-538.
- [9] 刘立砖, 周劲辉, 冷炎, 等. 煤层气水平井筒加热煤层温度变化规律实验研究 [J]. 石油化工应用, 2020, 39 (3): 25-29.
- [10] 姜波, 秦勇, 金法礼, 等. 煤变形的高温高压实验研究 [J]. 煤炭学报, 1997, 22 (1): 80-83.
- [11] 程瑞端, 陈海焱, 鲜学福, 等. 温度对煤样渗透系数影响的实验研究 [J]. 矿业安全与环保, 1998, (1): 13-16.
- [12] 马占国, 茅献彪, 李玉寿, 等. 温度对煤力学特性影响的实验研究 [J]. 采矿与安全工程学报, 2005, (3): 46-48.
- [13] 许江, 张丹丹, 彭守建, 等. 三轴应力条件下温度对原煤渗流特性影响的实验研究 [J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30 (9): 1849-1854.
- [14] 于永江, 张华, 张春会, 等. 温度及压力对成型煤样渗透性的影响 [J]. 煤炭学报, 2013, 38 (6): 937-941.
- [15] 冯雨实, 梁永昌. 煤层气水平井井周围岩热流固耦合数值分析 [J]. 煤矿安全, 2018, 49 (1): 206-209.
- [16] 杨玉良, 蒋金虎, 刘闯, 等. 温度-应力耦合作用下无烟煤的蠕变特性与本构关系研究 [J]. 煤矿安全, 2020, 51 (5): 61-65.

## 作者简介

### 李鑫

1994 年生, 博士研究生, 研究方向: 深层与深海油气井安全高效建井基础理论.

E-mail: swpulexin@163.com

### 张杰

1976 年生. 教授, 博士生导师, 研究方向: 复杂油气井安全高效建井基础理论与关键技术.

E-mail: swpivip@163.com