



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110208487 A

(43)申请公布日 2019.09.06

(21)申请号 201910437099.4

(22)申请日 2019.05.24

(71)申请人 西南石油大学

地址 610500 四川省成都市新都区新都大道8号

(72)发明人 马天寿 刘阳 陈平 郭印同
王磊 常鑫

(74)专利代理机构 北京中索知识产权代理有限公司 11640

代理人 房立普

(51)Int.Cl.

G01N 33/24(2006.01)

G01N 3/06(2006.01)

G01N 23/046(2018.01)

权利要求书1页 说明书4页 附图3页

(54)发明名称

一种基于CT扫描的页岩水化损伤测试方法

(57)摘要

本发明公开一种基于CT扫描的页岩水化损伤测试方法,包括以下步骤:制备目标页岩区标准岩样,并测得岩样的应力-应变曲线;对岩样进行CT扫描,然后计算岩样的初始损伤变量 D_0 ;对岩样进行模拟水化实验,并在至少三个水化阶段对浸泡后的岩样进行CT扫描;根据上述不同水化阶段页岩的损伤变量 $D(t)$,采用非线性拟合方法得到了页岩水化损伤演化方程;建立页岩水化损伤后的本构方程,计算得到页岩在任意水化损伤时间情况下的全应力-应变曲线。本发明定量提取页岩水化过程中的细观损伤特性,并建立损伤变量与水化时间的关系,进一步建立水化损伤页岩的本构模型,并得到页岩在任意水化损伤时间情况下的全应力-应变曲线。

1. 一种基于CT扫描的页岩水化损伤测试方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤S10、制备目标页岩区标准岩样,并测得岩样的应力-应变曲线;

步骤S20、对岩样进行CT扫描,利用CT扫描机自带的图像自动获取及处理软件进行三维CT图像重构、滤波和二值化处理,并定理提取出岩样中空隙体积以及岩样总体积,然后通过下式计算岩样的初始损伤变量 D_0 ;

$$D_0 = \frac{V_{p0}}{V_t}$$

式中: V_{p0} 为岩样中的空隙体积; V_t 为岩样的总体积; D_0 为页岩岩样的初始损伤变量;

步骤S30、然后对岩样进行模拟水化实验,在至少三个水化阶段对浸泡后的岩样进行CT扫描,并利用CT扫描机自带的图像自动获取及处理软件进行三维CT图像重构,进一步对获得的三维CT图像进行滤波和二值化处理,从而获取至少三个浸泡后岩样的空隙体积,以及至少三个浸泡后岩样的损伤变量 $D(t)$;

$$D(t) = \frac{V_p(t)}{V_t}$$

式中: $V_p(t)$ 为浸泡后岩样中的空隙体积; V_t 为岩样的总体积; $D(t)$ 为浸泡后岩样的损伤变量;

步骤S40、根据上述不同水化阶段页岩的损伤变量 $D(t)$,采用非线性拟合方法得到了页岩水化损伤演化方程,并计算拟合系数 a 、 b 、 t_0 ;

$$D(t) = a + be^{-\frac{t}{t_0}}$$

式中: $D(t)$ 为损伤变量; t 为浸泡时间; a 、 b 、 t_0 均为拟合系数;

步骤S50、建立页岩水化损伤后的本构方程,并将上述得到的参数带入页岩水化损伤后的本构方程后,计算得到页岩在任意水化损伤时间情况下的全应力-应变曲线;

$$\begin{cases} \sigma = E \left(1 - a - be^{-\frac{t}{t_0}} \right) \varepsilon & (\forall t \geq 0, \varepsilon < \varepsilon_f) \\ \sigma = E \left\{ \varepsilon_f (1 - A) + \frac{A \varepsilon}{\exp[B(\varepsilon - \varepsilon_f)]} - \left(a + be^{-\frac{t}{t_0}} \right) \varepsilon \right\} & (\forall t \geq 0, \varepsilon > \varepsilon_f) \end{cases}$$

式中: σ 为轴向应力; E 为弹性模量; ε 为轴向应变; ε_f 为峰值强度时的应变变量; t 为浸泡时间; a 、 b 、 t_0 均为拟合系数; A 、 B 均为系数。

2. 根据权利要求1所述的一种基于CT扫描的页岩水化损伤测试方法,其特征在于,所述步骤S10中通过岩石单轴力学实验测得岩样的初始应力-应变曲线和岩石力学参数,并通过初始损伤情况下的应力应变曲线拟合获得弹性模量 E 和系数 A 、 B 。

3. 根据权利要求1所述的一种基于CT扫描的页岩水化损伤测试方法,其特征在于,所述步骤S40中将岩样在常温、常压环境中浸泡,其中浸泡液体为清水或现场使用的钻井液滤液。

4. 根据权利要求3所述的一种基于CT扫描的页岩水化损伤测试方法,其特征在于,所述三个水化阶段分别为浸泡5d、浸泡10d、浸泡15d。

一种基于CT扫描的页岩水化损伤测试方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于CT扫描的页岩水化损伤测试方法,属于非常规油气勘探与开发技术领域。

背景技术

[0002] 页岩气是一种以游离或吸附状态存在于页岩层或泥岩层中的非常规天然气,存在于几乎所有的盆地中,由于埋藏深度、含气饱和度等差异较大,分别具有不同的工业价值。页岩气高效开发的关键技术主要是水平井钻井技术和分段压裂改造技术。井壁失稳问题是钻井工程中经常遇到的复杂问题之一,在硬脆性页岩地层钻水平井使井壁失稳问题更加突出,容易导致卡钻、埋钻等井下复杂事故,严重时甚至导致井眼报废,造成巨大的经济损失。

[0003] 考虑泥页岩水化的井壁稳定相关研究,主要经历了纯力学研究→钻井液化学研究→力学-化学(M-C)耦合研究→热-水-力-化学(T-H-M-C)多场耦合研究等几个阶段。井壁稳定通常需要具备3个要素:合理的钻井液密度、足够的钻井液抑制性和足够的钻井液封堵能力。这3个要素的合理范围难以确定,其主要原因在于缺乏准确测量和评价钻井液性能的方法,无法建立坍塌压力与M-C耦合间的定量关系。因此,泥页岩井壁稳定研究难点仍集中于M-C耦合,页岩水化问题是关键。过去几十年已有大量针对井壁稳定M-C耦合的研究,研究重点是定量描述化学作用引起的力学效应的理论方法,目前能够用于定量计算的理论方法有两种:热弹性比拟法和水分子自由能热动力学理论法。但这两种方法仍然不能有效解决M-C耦合问题,因为建立定量描述方法的基础是先进的实验评价方法,而尽管国内外已有多种评价M-C耦合的实验方法,但并不能完全满足需求,且对硬脆性页岩地层M-C耦合井壁稳定的研究还比较少。

[0004] 岩土损伤力学基本原理为依据,深部地层中页岩的破坏也是一种累积损伤过程,通过岩石三轴实验可以对其进行评价,但并不能有效评价页岩损伤的细观过程,宏观与细观研究相结合的方法已成为岩石力学研究的重要手段。马天寿和陈平(2014)提出了一种基于CT扫描技术的页岩水化细观损伤特性定量评价方法【马天寿,陈平.基于CT扫描技术研究页岩水化细观损伤特性[J].石油勘探与开发,2014,41(2):227-233.】,他们通过开展不同水化阶段页岩样品上、中、下3个断面的CT扫描实验,分析了页岩水化细观损伤特性。但是,该方法仅仅以三个断面的CT图像为依据,对不同水化阶段CT断面图像扫描精度要求极高,如果所对比的三个断面并不在同一位置,将对测试结果产生巨大影响,非常不利于实际操作。此外,他们采用了空隙面积为基准的损伤变量,而且仅仅得到了不同水化阶段的损伤变量值,并未将宏观与细观研究结合起来,无法测试得到不同水化阶段页岩的损伤应力-应变曲线。

发明内容

[0005] 本发明主要是克服现有技术中的不足之处,提出一种基于CT扫描的页岩水化损

伤测试方法,以提升预测结果的准确性。

[0006] 本发明解决上述技术问题所提供的技术方案是:一种基于CT扫描的页岩水化损伤测试方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤S10、制备目标页岩区标准岩样,并测得岩样的应力-应变曲线;

[0008] 步骤S20、对岩样进行CT扫描,利用CT扫描机自带的图像自动获取及处理软件进行三维CT图像重构、滤波和二值化处理,并定理提取出岩样中空隙体积以及岩样总体积,然后通过下式计算岩样的初始损伤变量 D_0 ;

$$[0009] \quad D_0 = \frac{V_{p0}}{V_t}$$

[0010] 式中: V_{p0} 为岩样中的空隙体积; V_t 为岩样的总体积; D_0 为页岩岩样的初始损伤变量;

[0011] 步骤S30、然后对岩样进行模拟水化实验,在至少三个水化阶段对浸泡后的岩样进行CT扫描,并利用CT扫描机自带的图像自动获取及处理软件进行三维CT图像重构,进一步对获得的三维CT图像进行滤波和二值化处理,从而获取至少三个浸泡后岩样的空隙体积,以及至少三个浸泡后岩样的损伤变量 $D(t)$;

$$[0012] \quad D(t) = \frac{V_p(t)}{V_t}$$

[0013] 式中: $V_p(t)$ 为浸泡后(浸泡时长 t)岩样中的空隙体积; V_t 为岩样的总体积; $D(t)$ 为浸泡后(浸泡时长 t)岩样的损伤变量;

[0014] 步骤S40、根据上述不同水化阶段页岩的损伤变量 $D(t)$,采用非线性拟合方法得到了页岩水化损伤演化方程,并计算拟合系数 a 、 b 、 t_0 ;

$$[0015] \quad D(t) = a + be^{-\frac{t}{t_0}}$$

[0016] 式中: $D(t)$ 为损伤变量; t 为浸泡时间; a 、 b 、 t_0 均为拟合系数;

[0017] 步骤S50、建立页岩水化损伤后的本构方程,并将上述得到的参数带入页岩水化损伤后的本构方程后,计算得到页岩在任意水化损伤时间情况下的全应力-应变曲线;

$$[0018] \quad \begin{cases} \sigma = E \left(1 - a - be^{-\frac{t}{t_0}} \right) \varepsilon & (\forall t \geq 0, \varepsilon < \varepsilon_f) \\ \sigma = E \left\{ \varepsilon_f (1 - A) + \frac{A\varepsilon}{\exp[B(\varepsilon - \varepsilon_f)]} - \left(a + be^{-\frac{t}{t_0}} \right) \varepsilon \right\} & (\forall t \geq 0, \varepsilon > \varepsilon_f) \end{cases}$$

[0019] 式中: σ 为轴向应力; E 为弹性模量; ε 为轴向应变; ε_f 为峰值强度时的应变变量; t 为浸泡时间; a 、 b 、 t_0 均为拟合系数; A 、 B 均为系数。

[0020] 进一步的技术方案是,所述步骤S10中通过岩石单轴力学实验测得岩样的初始应力-应变曲线和岩石力学参数,并通过初始损伤情况下的应力应变曲线拟合获得弹性模量 E 和系数 A 、 B 。

[0021] 进一步的技术方案是,所述步骤S40中将岩样在常温、常压环境中浸泡,其中浸泡液体为清水或现场使用的钻井液滤液。

[0022] 进一步的技术方案是,所述三个水化阶段分别为浸泡5d、浸泡10d、浸泡15d。

[0023] 本发明的有益效果:本发明充分利用CT扫描具备的无损测试优点,通过三维CT图

像进行滤波和二值化处理等数字图像处理,充分利用三维CT图像中的信息,定量提取页岩水化过程中的细观损伤特性,并建立损伤变量与水化时间的关系,进一步建立水化损伤页岩的本构模型,并得到页岩在任意水化损伤时间情况下的全应力-应变曲线,克服了常规方法存在的不足,为定量研究页岩水化问题提供新的思路和方法。

附图说明

- [0024] 图1为实施例1的流程图;
 [0025] 图2为未浸泡页岩单轴应力-应变曲线;
 [0026] 图3为不同水化阶段损伤变量拟合结果;
 [0027] 图4为未浸泡页岩单轴应力-应变曲线拟合结果;
 [0028] 图5为不同水化阶段页岩应力-应变曲线。

具体实施方式

[0029] 下面结合实施例和附图对本发明做更进一步的说明。

[0030] 实施例1

[0031] 本发明的一种基于CT扫描的页岩水化损伤测试方法,包括以下步骤:

[0032] 步骤S10、制备目标页岩区标准岩样,岩样尺寸为 $\Phi 25 \times 50\text{mm}$,通过岩石单轴力学实验测得岩样的应力-应变曲线,其中,被测试页岩的单轴应力应变曲线如下图2所示;

[0033] 步骤S20、对岩样进行CT扫描,利用CT扫描机自带的图像自动获取及处理软件进行三维CT图像重构、滤波和二值化处理,并定理提取出岩样中空隙体积以及岩样总体积,提取得到的空隙体积和总体积分别为 1350cm^3 和 24544cm^3 ;

[0034] 步骤S30、然后通过下式计算岩样的初始损伤变量 D_0 :

$$[0035] \quad D_0 = \frac{V_{p0}}{V_t} = \frac{1350}{24544} = 0.055 \quad (5)$$

[0036] 式中: V_{p0} 为岩样中的空隙体积; V_t 为岩样的总体积; D_0 为页岩岩样的初始损伤变量;

[0037] 步骤S40、然后对岩样进行模拟水化实验,分别在岩样浸泡5d、浸泡10d、浸泡15d进行CT扫描,利用CT扫描机自带的图像自动获取及处理软件进行三维CT图像重构,进一步对获得的三维CT图像进行滤波和二值化处理,从而获得岩样浸泡5d、浸泡10d、浸泡15d的空隙体积,分别为 4312cm^3 、 5370cm^3 、 6226cm^3 ;

[0038] 步骤S50、然后根据下式、岩样的总体积以及三个浸泡时间后的空隙体积,可以计算得到三个不同水化阶段的损伤变量 $D(t)$:

$$[0039] \quad D(t=5d) = \frac{V_p(t=5d)}{V_t} = \frac{4312}{24544} = 0.176 \quad (6)$$

$$[0040] \quad D(t=10d) = \frac{V_p(t=10d)}{V_t} = \frac{5370}{24544} = 0.219 \quad (7)$$

$$[0041] \quad D(t=15d) = \frac{V_p(t=15d)}{V_t} = \frac{6226}{24544} = 0.254 \quad (8)$$

[0042] 式中: $V_p(t)$ 为浸泡后(浸泡时长 t)岩样中的空隙体积; V_t 为岩样的总体积; $D(t)$ 为

浸泡后(浸泡时长 t)岩样的损伤变量;

[0043] 步骤S60、根据页岩初始损伤变量0.055以及上述三个不同水化阶段页岩的损伤变量0.176、0.219、0.254,采用非线性拟合方法得到了页岩水化损伤演化方程,如图3所示,并计算拟合系数 a 、 b 、 t_0 ;

$$[0044] \quad D(t) = a + be^{-\frac{t}{t_0}} = 0.2102 - 0.1176e^{-\frac{t}{8.0555}} \quad (9)$$

[0045] 式中: $D(t)$ 为损伤变量; t 为浸泡时间; a 、 b 、 t_0 为拟合系数;

[0046] 步骤S70、建立页岩水化损伤后的本构方程,取 $t=0$,然后根据步骤S01获得的未浸泡页岩单轴应力-应变曲线进行拟合,拟合结果如图4所示,从而计算出参数 E 、 A 、 B ,通过计算得到的弹性模量 $E=30\text{GPa}$ 、 $A=0.78$ 、 $B=500$;

[0047]

$$\begin{cases} \sigma = E \left(1 - 0.2102 + 0.1176e^{-\frac{t}{8.0555}} \right) \varepsilon & (\forall t \geq 0, \varepsilon < \varepsilon_f) \\ \sigma = E \left\{ \varepsilon_f (1 - A) + \frac{A\varepsilon}{\exp[B(\varepsilon - \varepsilon_f)]} \left(0.2102 - 0.1176e^{-\frac{t}{8.0555}} \right) \varepsilon \right\} & (\forall t \geq 0, \varepsilon > \varepsilon_f) \end{cases} \quad (10)$$

[0048] 式中: σ 为轴向应力; E 为弹性模量; ε 为轴向应变; ε_f 为峰值强度时的应变变量; t 为浸泡时间; A 、 B 均为系数;

[0049] 步骤S80、最后将上述得到的参数带入页岩水化损伤后的本构方程,该方程如下式(11)所示,从而计算得到不同水化阶段页岩的全应力-应变曲线,可以明显看出浸泡时间对页岩应力-应变的影响规律。

[0050]

$$\begin{cases} \sigma = 30 \left(1 - 0.2102 + 0.1176e^{-\frac{t}{8.0555}} \right) \varepsilon & (\forall t \geq 0, \varepsilon < \varepsilon_f) \\ \sigma = 30 \left\{ \varepsilon_f (1 - 0.78) + \frac{0.78\varepsilon}{\exp[500(\varepsilon - \varepsilon_f)]} \left(0.2102 - 0.1176e^{-\frac{t}{8.0555}} \right) \varepsilon \right\} & (\forall t \geq 0, \varepsilon > \varepsilon_f) \end{cases} \quad (11)$$

[0051] 式中: σ 为轴向应力; ε 为轴向应变; ε_f 为峰值强度时的应变变量。

[0052] 以上所述,并非对本发明作任何形式上的限制,虽然本发明已通过上述实施例揭示,然而并非用以限定本发明,任何熟悉本专业的技术人员,在不脱离本发明技术方案范围内,当可利用上述揭示的技术内容作出些变动或修饰为等同变化的等效实施例,但凡是未脱离本发明技术方案的内容,依据本发明的技术实质对以上实施例所作的任何简单修改、等同变化与修饰,均仍属于本发明技术方案的范围。

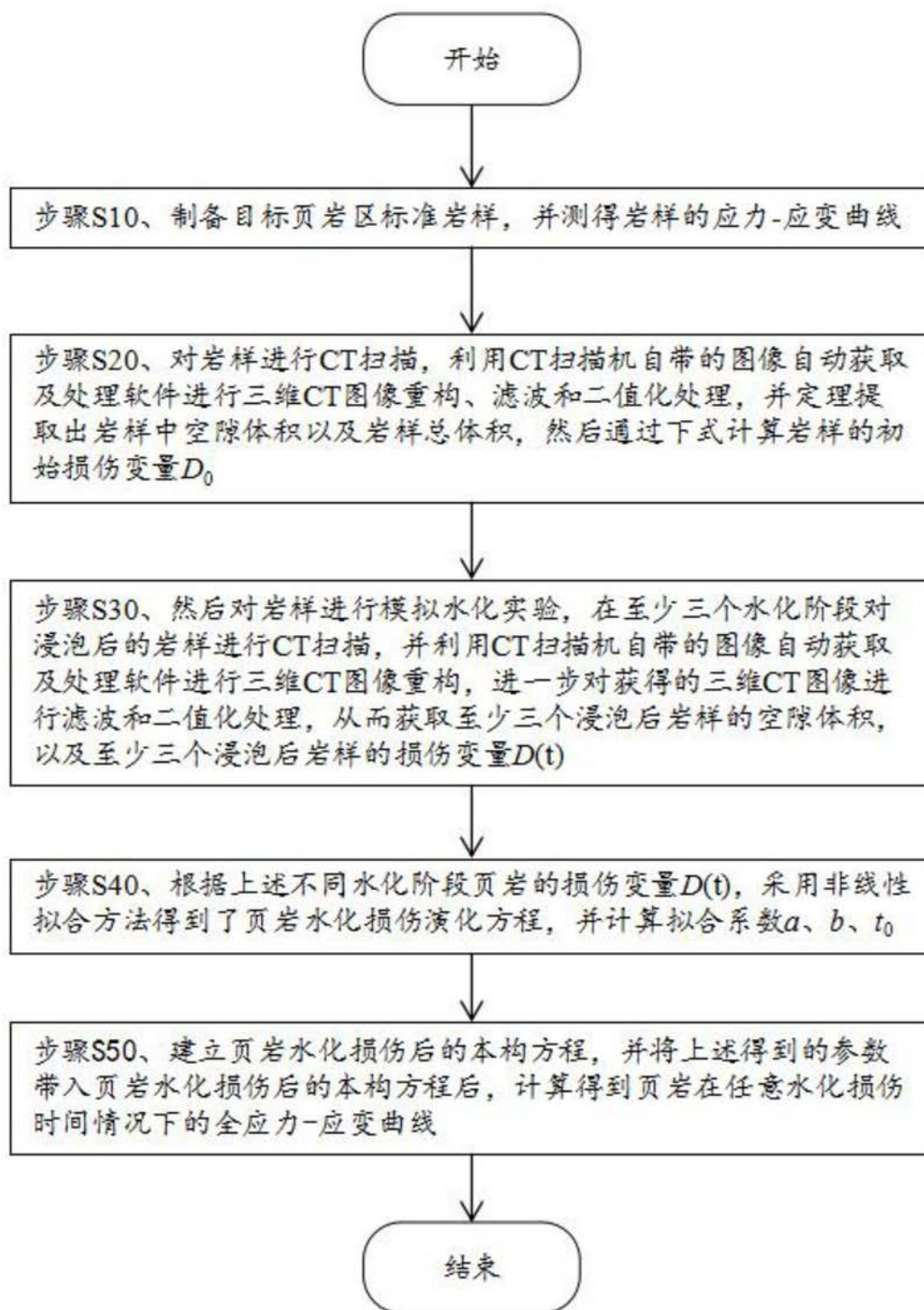


图1

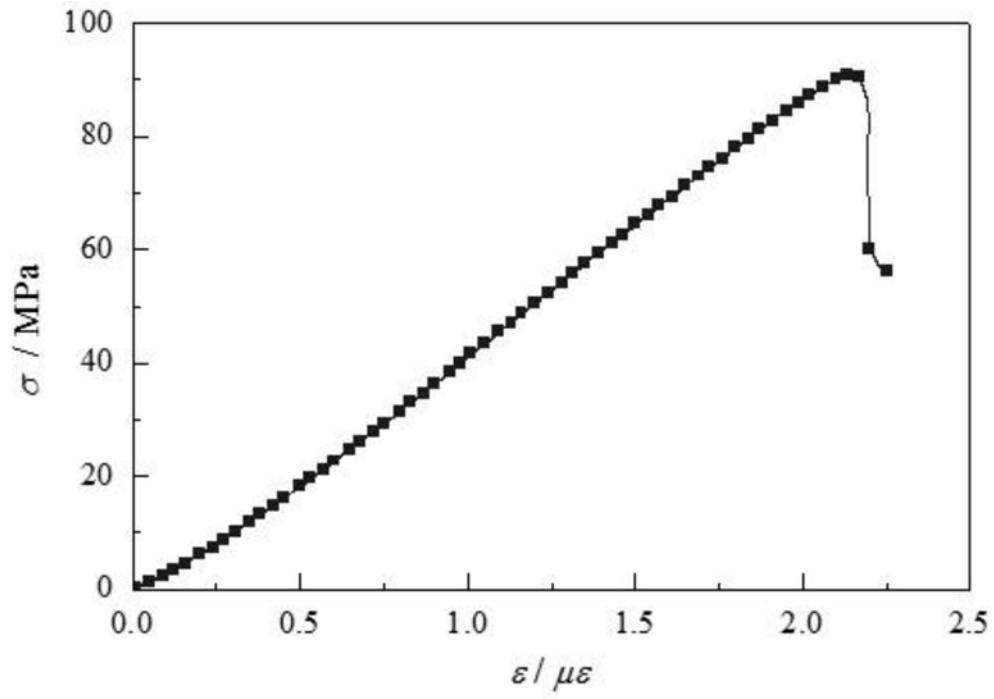


图2

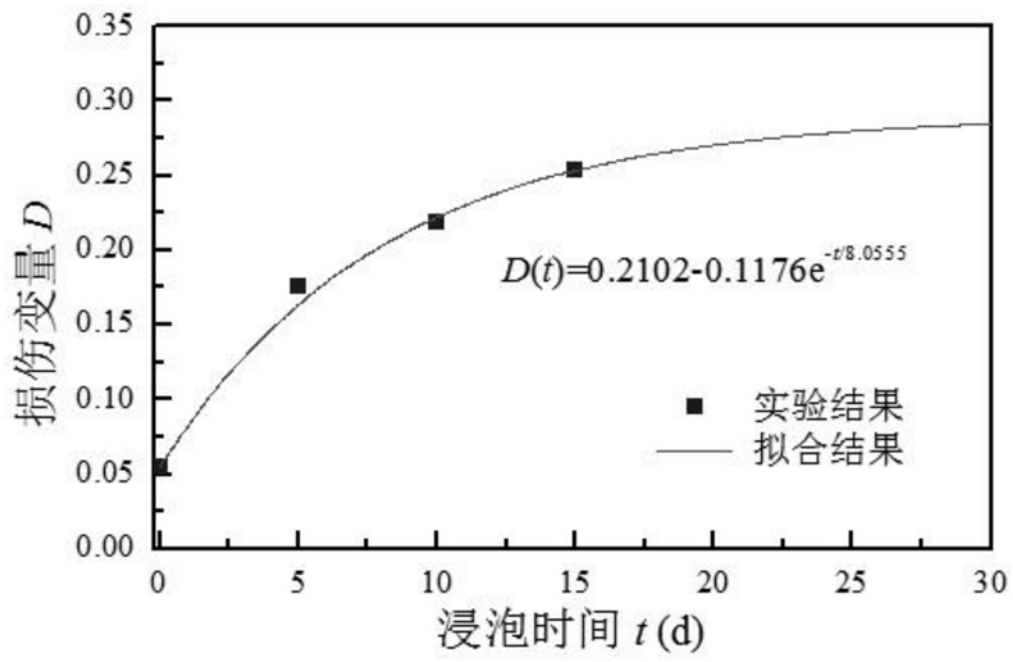


图3

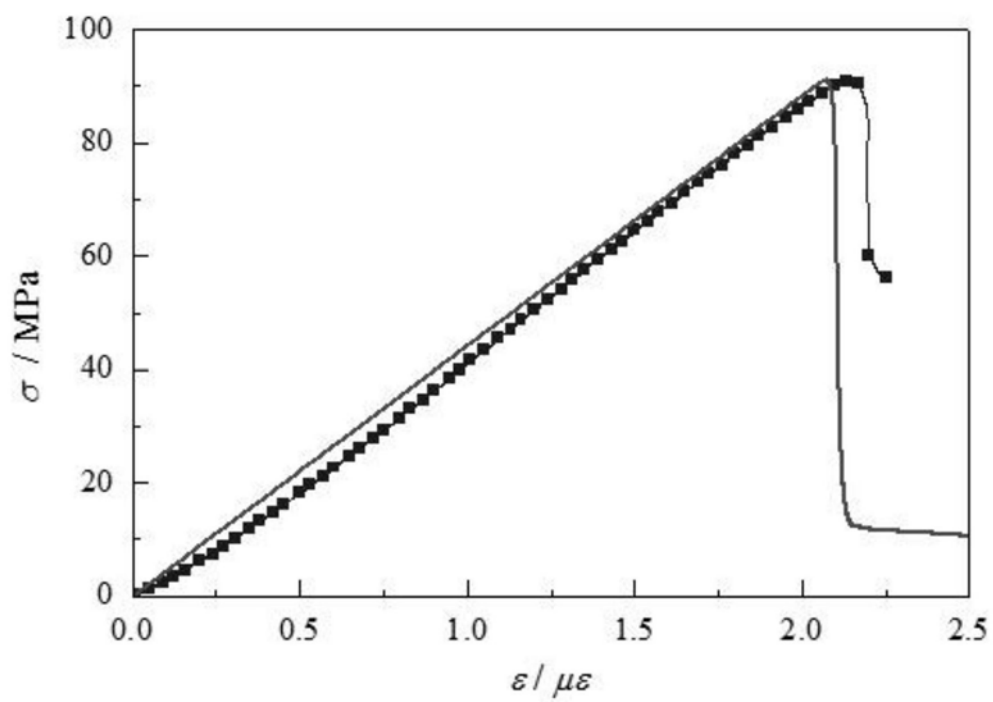


图4

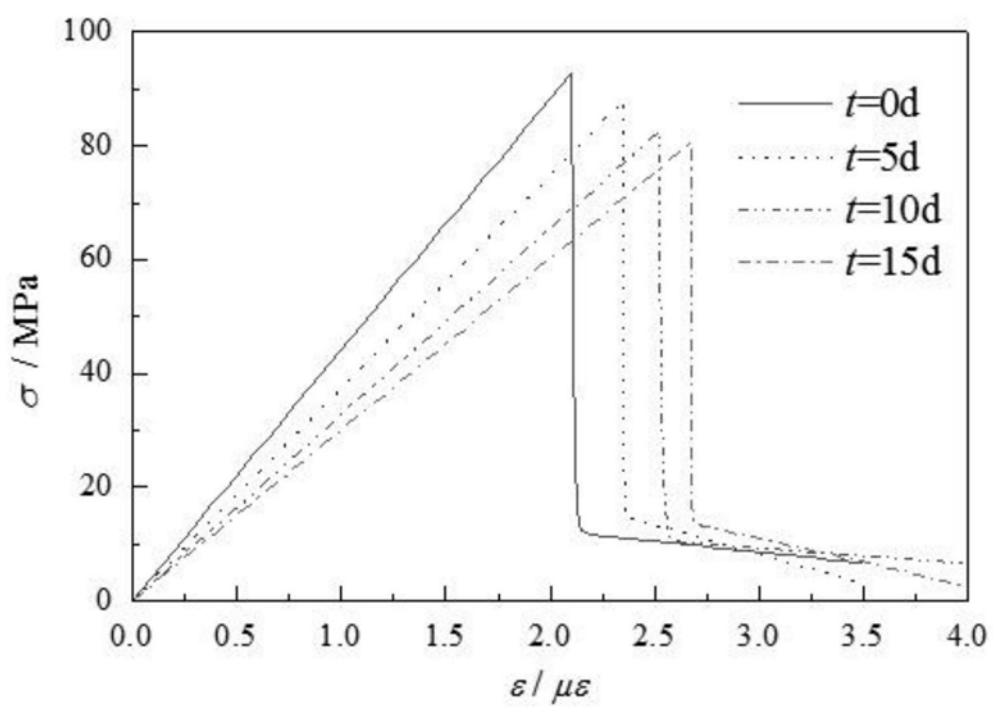


图5