



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 103163057 B

(45) 授权公告日 2014. 06. 11

(21) 申请号 201310085675. 6

(22) 申请日 2013. 03. 18

(73) 专利权人 河海大学

地址 210098 江苏省南京市鼓楼区西康路 1 号

(72) 发明人 王环玲 徐卫亚 邵建富 王欣 左婧

(74) 专利代理机构 南京苏高专利商标事务所 (普通合伙) 32204

代理人 缪友菊

(51) Int. Cl.

G01N 15/08(2006. 01)

G01N 7/10(2006. 01)

审查员 杨莉莎

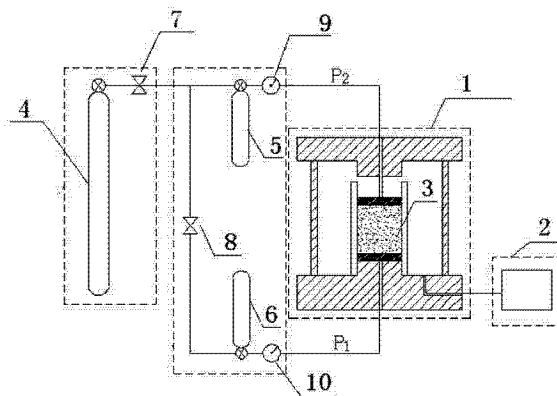
权利要求书1页 说明书5页 附图2页

(54) 发明名称

一种致密岩石材料气体渗透率测试装置及测算方法

(57) 摘要

本发明公开一种致密岩石材料气体渗透率测试装置及测算方法,在控制岩样两端气体压力相同的条件下,通过气体压力控制面板对岩样下表面施加一个气体压力脉冲,当气体在该脉冲压力的作用下穿过岩样进入已知压力储气罐,通过记录脉冲压力随时间的变化,推求岩石试样材料的气体渗透率,适用于地下石油和天然气储存、CO₂ 储存、核废料处置以及页岩气储存等低渗透介质渗透性的测量以及其他致密岩石介质渗透率的测量与计算,介质的渗透率在 10⁻²⁴m²左右的材料都可以通过该装置系统进行测量和计算。



1. 一种致密岩石材料气体渗透率的测算方法,其特征在于,包括如下步骤:

- (1) 选取天然致密岩石,将岩样加工为圆柱形,测量并记录岩样的直径和高度;
- (2) 将岩样用高性能橡胶套装好后,放入压力室中,调整岩样位置使之平衡,避免由于放置不平导致围压不能充分作用;
- (3) 施加围压至预定值,关闭围压泵阀门,使围压稳定在预定值;
- (4) 通过上、下气体压力储气罐施加某一气压,检查导管各连接点的气密性;
- (5) 在气体无泄漏的条件下,增加导管内气压至 P_0 ;
- (6) 待导管内气压稳定后,通过上压力储气罐在试样上表面施加一个脉冲压力 ΔP ,脉冲压力小于围压;
- (7) 测量脉冲压力随时间的变化, P_1 和 P_2 分别为脉冲试验过程中 t 时刻岩样上下两端压力值;
- (8) 测量岩样两端压力稳定后的平均压力 P_f ;
- (9) 重复步骤 (3)-(8),分别进行各种不同围压条件下的脉冲试验,记录试验数据;
- (10) 通过下列公式计算岩石试样在不同围压下的渗透率:

$$k = \frac{c\mu LV_1V_2}{AP_f(V_1+V_2)},$$

式中, k 为岩样气体渗透率, μ 为气体的粘滞系数, L 为岩样高度, V_1

和 V_2 分别为岩样上导管与上压力储气罐及下导管与下压力储气罐的体积, A 为岩样的横截面积, P_f 为压力稳定后试样两端的平均压力, c 为压力变化参数,在试验过程中随岩样两端气压的变化而变化,

$$P_f \text{ 的计算公式为: } P_f = P_0 + \frac{V_1\Delta P}{V_1+V_2},$$

其中, P_0 为试验开始时试样两端的气压, ΔP 为脉冲

压力;

c 随试样两端气压的变化而变化,其值由表达式 $P_1 - P_2 = \Delta P \exp(-ct)$ 来确定,其中, P_1 和 P_2 分别为脉冲试验过程中 t 时刻岩样上下两端压力值。

一种致密岩石材料气体渗透率测试装置及测算方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种致密岩石材料气体渗透率测试装置及测算方法,适用于地下石油和天然气储存、CO₂ 储存、核废料处置以及页岩气储存等低渗透介质渗透性的测量以及其他致密岩石介质渗透率的测量与计算,介质的渗透率在 10^{-24}m^2 左右的材料都可以通过该装置系统进行测量和计算。

背景技术

[0002] 致密岩石是进行地下石油和天然气储存、CO₂ 储存、页岩气储存、核废料处置的主要介质和地质环境,也是水利水电、矿山和隧道等工程建设中常见的一种复杂介质。致密岩石由于其结构致密,导致流体流动速率小,流量难以计量和测定,制约了其渗流规律的研究。致密岩石介质的渗透特性目前已成为能源储备、环境保护、资源开发等重大工程中迫切需要加强研究的对象。

[0003] 目前,标准常规的测试岩石渗透率的方法有液体测量法和气体测量法,两种方法都是基于 Darcy 定律,采用稳流技术,适用范围一般为渗透率大于 $10^{-3} \mu \text{m}^2$ 的岩石,测试结果较为准确。但对于渗透率低于 $10^{-3} \mu \text{m}^2$ 的岩石,由于流体流动速率很小,通过岩样微小流量一般难以直接测定。为了寻求低渗透岩石渗透率测定的有效方法,20 世纪 80 年代,国外发展了一种测量低渗透岩石渗透率的瞬时脉冲技术。西南石油学院也首次在国内研究和开发了这种技术,并建立了一套瞬时脉冲实验装置。但这些方法的测试精度、测试结果与真实值之间的误差较大。

[0004] 致密岩石由于其良好的蠕变性能以及低渗透性而被认为是地下油气储存的理想介质,西方发达国家如德国、法国和美国等都已建起了大量的地下盐岩和页岩地下储气储油库,并建立了相关的技术指标和规范。目前,我国石油储备体系建设提上议事日程后,将在全国范围内有计划的建立大型石油储备基地和储备油库。尽管多数地下洞库均由我国承担施工,但大多设计均由国外公司负责,其核心技术标准均对我国保密。因而,许多关于致密岩石力学性能的研究我们才刚刚起步,其中,致密岩石的渗透性能是最基本和最重要的研究对象,关系到工程的成败与安全。

[0005] 对于致密岩石,由于通过其液体的流动速率极低,使得通过岩样的微小流量难以直接测定,以液体作为渗透介质试验难度较大并且测量的误差也很大。以气体作为渗透介质,渗透速度快,试验时间较短,从而增加了测量精度,减少了试验误差,同时可直接用 Darcy 定律来计算其流量。因而发展适用、可靠的实验装置和测试计算方法是十分必要的。

发明内容

[0006] 发明目的:本发明的目的在于提供一种测试致密岩石材料气体渗透率的装置以及以惰性气体作为渗透介质的致密岩石材料渗透率的测算方法。

[0007] 技术方案:本发明所述的一种致密岩石材料气体渗透率测试装置,包括压力室、气压加载系统及围压加载系统;所述压力室内放置有待测致密岩石,所述待测致密岩石的四

周通过围压加载系统加载有围压,所述待测致密岩石的两端面通过气压加载系统加载有气压。

[0008] 进一步完善上述技术方案,所述气压加载系统包括惰性气体气源、上压力储气罐、下压力储气罐和气压控制装置,所述惰性气体气源通过连接管路与上、下压力储气罐连接,为压力储气罐输送惰性气体;所述气压控制装置分别与上、下压力储气罐连接,用于控制上、下压力储气罐的输出气压;

[0009] 所述连接管路包括连接主管和上连接次管、下连接次管,所述连接主管上设有主阀门,下连接次管上设有次阀门;

[0010] 所述上压力储气罐通过导管及第一压力表与压力室的上进气口连接,下压力储气罐通过导管与第二压力表与压力室的下进气口连接。

[0011] 一种致密岩石材料气体渗透率的测算方法,包括如下步骤:

[0012] (1) 选取天然致密岩石,将岩样加工为圆柱形,测量并记录试样的直径和高度;

[0013] (2) 将岩样用高性能橡胶套装好后,放入压力室中,调整岩样位置使之平衡,避免由于放置不平导致围压不能充分作用;

[0014] (3) 施加围压至预定值,关闭围压泵阀门,使围压稳定在预定值;

[0015] (4) 通过上、下气体压力储气罐施加某一较小气压,检查导管各连接点的气密性;

[0016] (5) 在气体无泄漏的条件下,增加导管内气压至 P_0 ;

[0017] (6) 待导管内气压稳定后,通过上压力储气罐在试样上表面施加一个脉冲压力 ΔP ,脉冲压力小于围压;

[0018] (7) 测量脉冲压力随时间的变化, P_1 和 P_2 分别为脉冲试验过程中 t 时刻岩样上下两端压力值;

[0019] (8) 测量岩样两端压力稳定后的平均压力 P_f ;

[0020] (9) 重复步骤 (3)-(8), 分别进行各种不同围压条件下的脉冲试验,记录试验数据。

[0021] (10) 通过下列公式计算岩石试样在不同围压下的渗透率:

[0022]
$$k = \frac{c\mu LV_1V_2}{AP_f(V_1+V_2)}$$
, 式中, k 为岩样气体渗透率 (m^2), μ 为气体的粘滞系数 ($Pa \cdot s$),

L 为岩样高度 (m), V_1 和 V_2 分别为岩样上导管与上压力储气罐及下导管与下压力储气罐的体积 (m^3), A 为岩样的横截面积 (m^2), P_f 为压力稳定后试样两端的平均压力 (Mpa), c 为压力变化参数,在试验过程中随岩样两端气压的变化而变化,

[0023] P_f 的计算公式为: $P_f = P_0 + \frac{V_1 \Delta P}{V_1 + V_2}$, 其中, P_0 为试验开始时试样两端的气压 (Mpa),

ΔP 为脉冲压力 (Mpa);

[0024] c 随试样两端气压的变化而变化,其值由表达式 $P_1 - P_2 = \Delta P \exp(-ct)$ 来确定,其中, P_1 和 P_2 分别为脉冲试验过程中 t 时刻岩样上下两端压力值 (Mpa)。

[0025] 以上的计算方法简单明了,在每次进行气体渗透试验时,只需要测量出岩样的基本参数(高度、横截面积),然后记录出每一级围压作用下,岩样上下端脉冲压力的压力变化就可以求出其气体渗透率。

[0026] 本发明与现有技术相比,其有益效果是:本发明所述的测试装置操作简单,测量的围压范围广,渗透率的测试精度高,试验周期短,用该装置测量的气体渗透率的计算方法亦简单,精确,克服了以往测量围压范围小,试验周期长,测试精度差,测量结果不可靠等缺点。

附图说明

[0027] 图 1 为本发明所述致密岩石材料气体渗透率测试装置的结构示意图。

[0028] 图 2 是本发明压力脉冲试验工作原理图。

[0029] 图 3 是实施例 1 二长花岗岩不同围压下的气体渗透率图。

[0030] 图 4 是实施例 2 花岗片麻岩不同围压下的气体渗透率图。

具体实施方式

[0031] 下面对本发明技术方案进行详细说明,但是本发明的保护范围不局限于所述实施例。

[0032] 实施例 1:如图 1 所示,一种致密岩石材料气体渗透率测试装置,包括压力室 1、气压加载系统及围压加载系统 2;所述压力室 1 内放置有待测致密岩石 3,所述待测致密岩石 3 的四周通过围压加载系统 2 加载有围压,所述待测致密岩石 3 的两端面通过气压加载系统加载有气压。

[0033] 所述气压加载系统包括惰性气体气源 4、上压力储气罐 5、下压力储气罐 6 和气压控制装置,所述惰性气体气源 4 通过连接管路与上、下压力储气罐连接 5、6,为上、下压力储气罐 5、6 输送惰性气体;所述气压控制装置分别与上、下压力储气罐 5、6 连接,用于控制上、下压力储气罐 5、6 的输出气压;

[0034] 所述连接管路包括连接主管和上连接次管、下连接次管,所述连接主管上设有主阀门 7,下连接次管上设有次阀门 8;

[0035] 所述上压力储气罐通过导管及第一压力表 9 与压力室 1 的上进气口连接,下压力储气罐通过导管与第二压力表 10 与压力室 1 的下进气口连接。

[0036] 利用上述装置对早白垩世二长花岗岩进行气体渗透率测量的步骤如下:

[0037] (1) 选取早白垩世二长花岗岩,将岩样加工为圆柱形(具体参数详见表 1),测量并记录试样的直径和高度;

[0038] (2) 将岩样用高性能橡胶套装好后,放入压力室中,岩样的两端设置多孔金属垫板,调整岩样位置使之平衡,避免由于放置不平导致围压不能充分作用;

[0039] (3) 施加围压 P_c 至预定值,关闭围压泵阀门,使围压稳定在预定值;

[0040] (4) 通过上、下气体压力储气罐施加某一较小气压,检查导管各连接点的气密性;

[0041] (5) 在气体无泄漏的条件下,增加导管内气压至 $P_0=1.0 \text{ Mpa}$;

[0042] (6) 待导管内气压稳定后,通过上压力储气罐在试样上表面施加一个脉冲压力 $\Delta P=0.5 \text{ Mpa}$,脉冲压力小于围压;

[0043] (7) 测量脉冲压力随时间的变化, P_1 和 P_2 分别为脉冲试验过程中 t 时刻岩样上下两端压力值;

[0044] (8) 测量岩样两端压力稳定后的平均压力 P_f ;

[0045] (9)重复步骤(3)-(8),分别进行围压为 2、3、4、5、7、8Mpa 的条件下的脉冲试验,记录试验数据。

[0046] (10)通过下列公式计算岩石试样在不同围压下的渗透率(详见表 2):

[0047] $k = \frac{c\mu LV_1V_2}{AP_f(V_1+V_2)}$, 式中, k 为岩样气体渗透率 (m^2), μ 为气体的粘滞系数 ($Pa \cdot s$),

L 为岩样高度 (m), V_1 和 V_2 分别为岩样上导管与上压力储气罐及下导管与下压力储气罐的体积 (m^3), A 为岩样的横截面积 (m^2), P_f 为压力稳定后试样两端的平均压力 (Mpa), c 为压力变化参数,在试验过程中随岩样两端气压的变化而变化,

[0048] P_f 的计算公式为: $P_f = P_0 + \frac{V_1 \Delta P}{V_1 + V_2}$, 其中, P_0 为试验开始时试样两端的气压 (Mpa),

ΔP 为脉冲压力 (Mpa);

[0049] c 随试样两端气压的变化而变化,其值由表达式 $P_1 - P_2 = \Delta P \exp(-ct)$ 来确定,其中, P_1 和 P_2 分别为脉冲试验过程中 t 时刻岩样上下两端压力值 (Mpa)。

[0050] 表 1 岩样物理参数

[0051]

| 岩样名称 | 直径/mm | 高度/mm | 质量/g | 体积/cm ³ | 密度/g/cm ³ | 孔隙度/% |
|-------|-------|-------|--------|--------------------|----------------------|-------|
| 二长花岗岩 | 49.89 | 50.73 | 258.35 | 99.12 | 2.61 | 1.61 |

[0052] 表 2 不同围压下的气体渗透率

[0053]

| 围压/Mpa | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 8 |
|--------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 渗透率/m ² | 1.98×10^{-20} | 1.17×10^{-20} | 0.49×10^{-20} | 0.33×10^{-20} | 0.14×10^{-20} | 0.12×10^{-20} |

[0054] 实施例 2:步骤同实施例 1,不同点在于:步骤 1 选取不同的岩样;步骤 6 施加不同的脉冲压力;步骤 4 施加更大的围压。

[0055] (1)选取晚元古界花岗片麻岩,将岩样加工为圆柱形(具体参数详见表 3),测量并记录试样的直径和高度;

[0056] (2)将岩样用高性能橡胶套装好后,放入压力室中,岩样的两端设置多孔金属垫板,调整岩样位置使之平衡,避免由于放置不平导致围压不能充分作用;

[0057] (3)施加围压 P_c 至预定值,关闭围压泵阀门,使围压稳定在预定值;

[0058] (4)通过上、下气体压力储气罐施加某一较小气压,检查导管各连接点的气密性;

[0059] (5)在气体无泄漏的条件下,增加导管内气压至 $P_0=1.0 Mpa$;

[0060] (6)待导管内气压稳定后,通过上压力储气罐在试样上表面施加一个脉冲压力 $\Delta P=2.0Mpa$,脉冲压力小于围压;

[0061] (7)测量脉冲压力随时间的变化, P_1 和 P_2 分别为脉冲试验过程中 t 时刻岩样上下两端压力值;

[0062] (8)测量岩样两端压力稳定后的平均压力 P_f ;

[0063] (9)重复步骤(3)-(8),分别进行围压为 9、11、15、17、19、21、23、25、27Mpa 的条件下的脉冲试验,记录试验数据。

[0064] (10)通过下列公式计算岩石试样在不同围压下的渗透率(详见表 4):

[0065] $k = \frac{c\mu LV_1V_2}{AP_f(V_1+V_2)}$, 式中, k 为岩样气体渗透率 (m^2), μ 为气体的粘滞系数 ($Pa \cdot s$),

L 为岩样高度 (m), V_1 和 V_2 分别为岩样上导管与上压力储气罐及下导管与下压力储气罐的体积 (m^3), A 为岩样的横截面积 (m^2), P_f 为压力稳定后试样两端的平均压力 (Mpa), c 为压力变化参数, 在试验过程中随岩样两端气压的变化而变化,

[0066] P_f 的计算公式为: $P_f = P_0 + \frac{V_1 \Delta P}{V_1 + V_2}$, 其中, P_0 为试验开始时试样两端的气压 (Mpa),

ΔP 为脉冲压力 (Mpa);

[0067] c 随试样两端气压的变化而变化, 其值由表达式 $P_1 - P_2 = \Delta P \exp(-ct)$ 来确定, 其中, P_1 和 P_2 分别为脉冲试验过程中 t 时刻岩样上下两端压力值 (Mpa)。

[0068] 表 3 岩样物理参数

[0069]

| 岩样名称 | 直径/mm | 高度/mm | 质量/g | 体积/cm ³ | 密度/g/cm ³ | 孔隙度/% |
|-------|-------|-------|--------|--------------------|----------------------|-------|
| 花岗片麻岩 | 49.93 | 51.18 | 248.43 | 100.16 | 2.48 | 7.05 |

[0070] 表 4 不同围压下的气体渗透率

[0071]

| 围压/Mpa | 9 | 11 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|-----|-------|------|
| 渗透率/ $\times 10^{-17} m^2$ | 0.74 | 0.69 | 0.63 | 0.59 | 0.56 | 0.53 | 0.5 | 0.483 | 0.48 |

[0072] 本发明所使用的岩样围压可增至 60Mpa, 所测气体渗透率的精度可达到 $10^{-24} m^2$ 。

[0073] 如上所述, 尽管参照特定的优选实施例已经表示和表述了本发明, 但其不得解释为对本发明自身的限制。在不脱离所附权利要求定义的本发明的精神和范围前提下, 可对其在形式上和细节上作出各种变化。

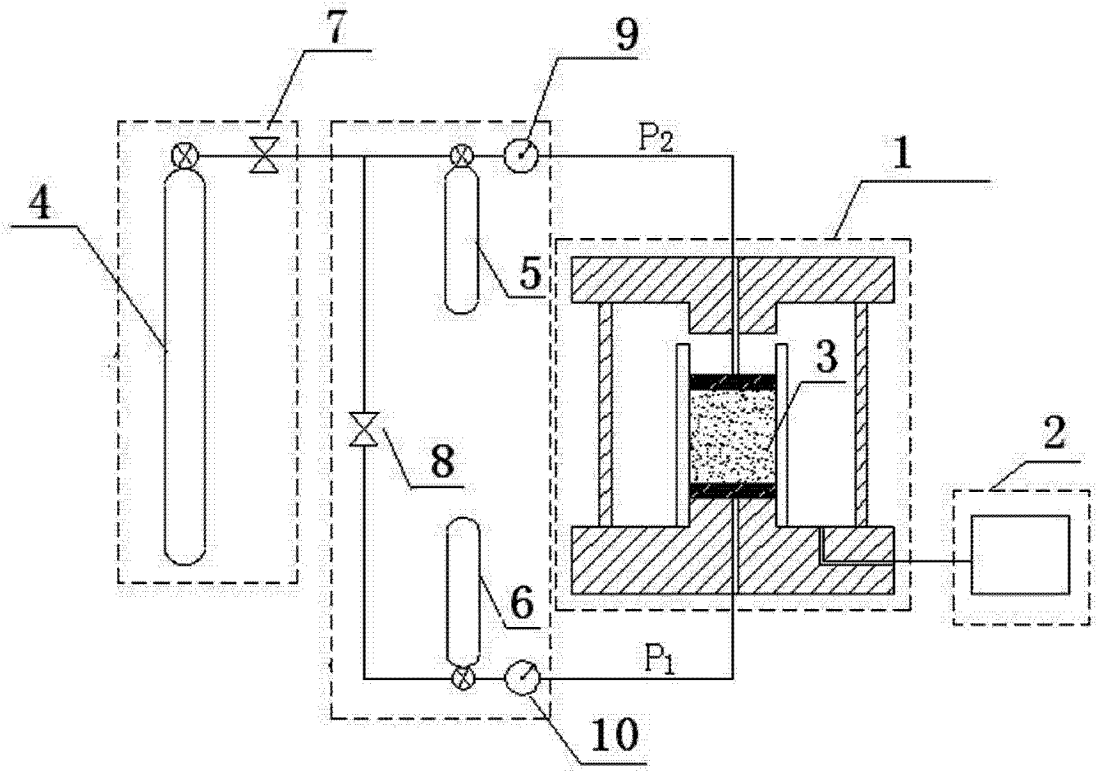


图 1

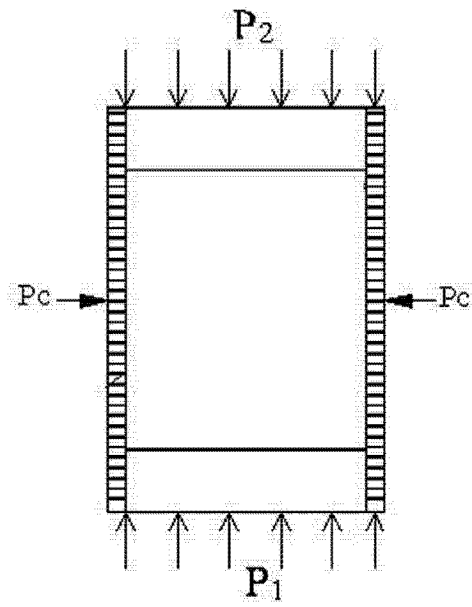


图 2

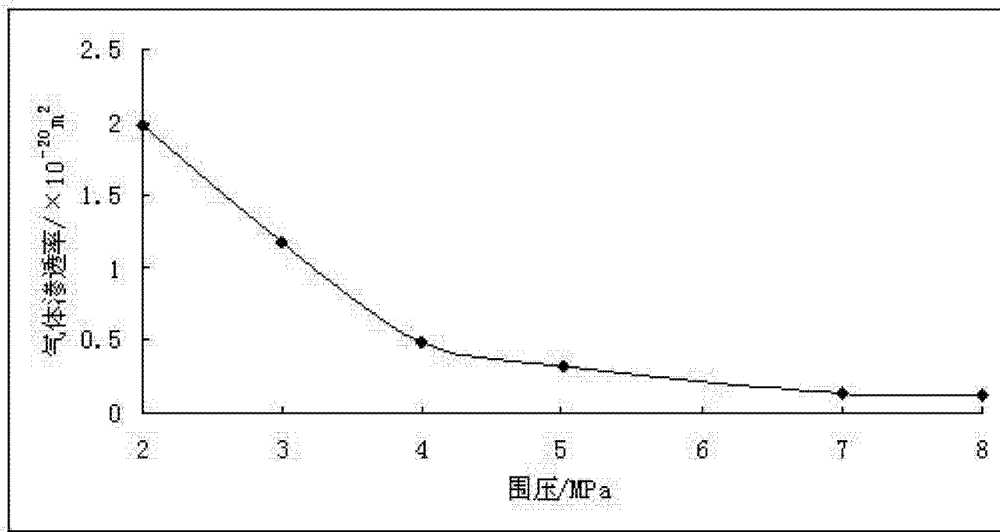


图 3

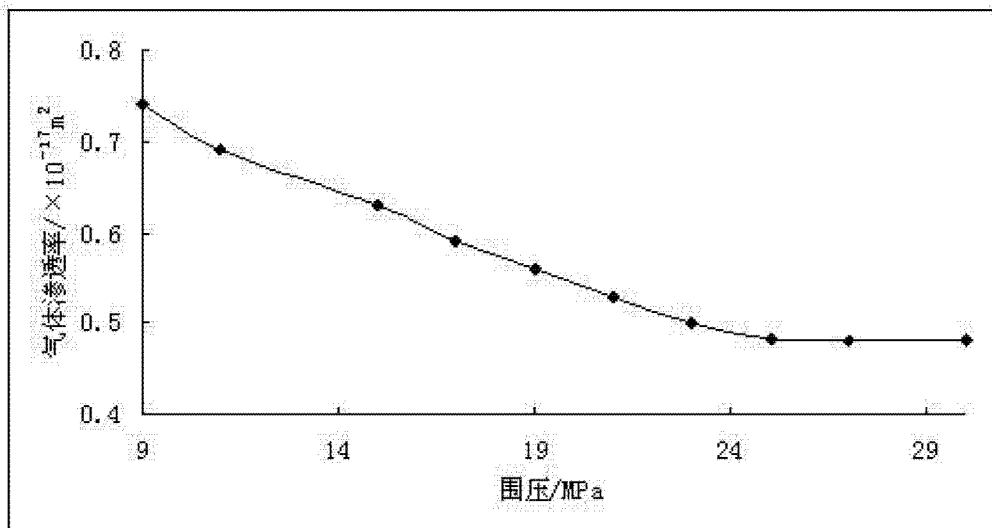


图 4