



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 107764441 B

(45) 授权公告日 2021.03.26

(21) 申请号 201710816205.0

CN 106289570 A, 2017.01.04

(22) 申请日 2017.09.12

CN 105987784 A, 2016.10.05

(65) 同一申请的已公布的文献号

CN 106289570 A, 2017.01.04

申请公布号 CN 107764441 A

CN 205037998 U, 2016.02.17

(43) 申请公布日 2018.03.06

WO 2005086671 A2, 2005.09.22

(73) 专利权人 天津大学

US 2011190640 A1, 2011.08.04

地址 300072 天津市南开区卫津路92号

US 5301001 A, 1994.04.05

(72) 发明人 王双 江俊峰 刘铁根 王雪

吴振海、刘铁根、江俊峰等. 热应力和残余气压对光纤法布里-珀罗压力传感器温度性能的影响.《光学学报》.2015,第35卷(第3期),第1-7页.

刘琨 肖梦楠 巨冬冬

Jinde Yin, Tiegeng Liu, Kun Liu, et al.

(74) 专利代理机构 天津市北洋有限责任专利代理事务所 12201

Self-Referenced Residual Pressure Measurement Method for Fiber-Optic Pressure Sensor Chip.

代理人 李素兰

《IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS》.2014,第26卷(第10期),第957-960页.

(51) Int. Cl.

审查员 于陶然

G01L 1/24 (2006.01)

(56) 对比文件

权利要求书1页 说明书5页 附图2页

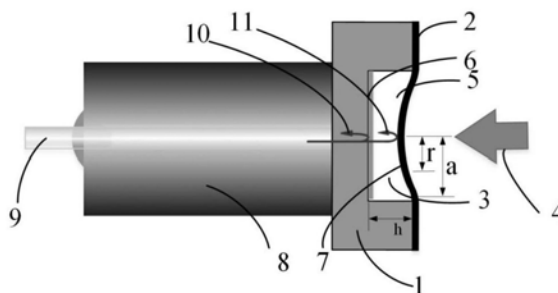
CN 103616124 A, 2014.03.05

(54) 发明名称

光纤MEMS压力传感器F-P腔内残余压力测量系统及方法

(57) 摘要

本发明公开了一种光纤MEMS压力传感器F-P腔内残余压力测量系统及方法,该系统包括低相干光源、3dB耦合器、MEMS压力传感器、空气压力舱、恒温箱、压力控制系统、腔长解调仪、数据采集卡和计算机,该方法包括步骤:在两个不同的温度下,通过气压控制系统,利用反射光进行腔长测量,分别对待测光纤MEMS压力传感器进行标定,建立单色频率绝对相位与外界压力的对应关系;对这两组测量数据进行线性拟合,找到所有腔长相等时对应的外界压力值,代入所述理论公式进行计算即可得到膜片平坦状态时的残余气压。与现有技术相比,本发明通过对传感器整体结构不做改动的测量手段,在传感器级别达成可靠的F-P腔内部残余压力测量目的,可用于评估传感器键合质量。



CN 107764441 B

1. 一种光纤MEMS压力传感器F-P腔内残余压力的测量方法,利用包括低相干光源(13)、3dB耦合器(14)、MEMS压力传感器(16)、空气压力舱(17)、恒温箱(15)、压力控制系统、腔长解调仪(24)、数据采集卡(23)和计算机(22)的测量系统实现测量;其中,所述压力传感器(16)置于空气压力舱(17)内,并将空气压力舱(17)密封;所述空气压力舱(17)中的压力通过压力控制系统控制压力的变化,使得外界压力(4)进行压力变化扫描,所述压力控制系统由压力控制仪(21)、真空泵(19)和空气压缩机(20)构成,所述压力控制系统和所述空气压力舱(17)之间、以及所述压力控制系统的各部件之间通过气管(18)联接;所述MEMS压力传感器(16)包括基底(1)与膜片(2)构成的一个F-P腔(3),残余压力(5)密封在F-P腔(3)之中;低相干光源(13)经过光纤(9)输出的一部分光在镀在基底(1)上的半透半反射膜(6)发生第一次反射,形成反射参考光(10);其余部分光传播到膜片(2)内表面(7)上发生第二次反射,形成反射传感光(11);反射参考光(10)与反射传感光(11)形成干涉,干涉信号中包含光程差信息;密闭在F-P腔(3)中的气体受温度影响膨胀或收缩,与加在膜片(2)外部的气压(4)共同作用,影响膜片(2)的弹性形变;反射光参考光(10)和反射传感光(11)经过3dB耦合器(14)后,进入腔长解调仪(24),腔长解调结果通过数据采集卡(23)输入到计算机(22)进行进一步数据处理;其特征在于,该方法包括以下步骤:

第一步,在温度 $T_1$ 下,进行压力标定实验:通过压力控制系统对膜片2的外界压力进行扫描,扫描压力记为 $P_{E1}$ ,并进行解调,得到 $T_1$ 下腔长信息和外界压力的对应关系;

第二步,在温度 $T_2$ 下,进行压力标定实验:通过压力控制系统对膜片2的外界压力进行扫描,扫描压力记为 $P_{E2}$ ,并进行解调,得到 $T_2$ 下腔长信息和外界压力的对应关系;

第三步,对第一步和第二步得到的数据进行线性拟合,腔长信息在扫描压力范围内连续变化,每一个腔长信息的值都对应着两个温度下的外界气压值 $P_{E1}$ 和 $P_{E2}$ ;

第四步,将连续的每一组 $P_{E1}$ 和 $P_{E2}$ 代入到表达式 $P_{R1} = (P_{E2} - P_{E1}) \frac{T_1}{T_2 - T_1}$ 中,画出温度 $T_1$ 下的残余气压 $P_{R1}$ 随外界气压 $P_{E1}$ 的变化曲线,并画出曲线 $P_{R1} = P_{E1}$ ,得到两条曲线的交点横坐标 $27$ ;

第五步,将交点横坐标的值再减去基底1材料受温度膨胀引起的误差 $\Delta P_{R1}$ ,结果就代表温度 $T_1$ 下膜片平坦状态12时的残余压力5;其中: $\Delta P_{R1} = \frac{h\alpha_g T_1}{S_2}$ , $h$ 表示F-P腔深度, $\alpha_g$ 表示基底热膨胀系数, $S_2$ 表示第二步中标定得到的压力的灵敏度。

## 光纤MEMS压力传感器F-P腔内残余压力测量系统及方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及于光纤传感领域,特别是涉及一种具有F-P腔结构的MEMS压力传感器的残余压力测量系统及测量方法。

### 背景技术

[0002] 光纤MEMS压力传感器具有体积小、响应范围、灵敏度可调且可批量制作等优点而受到了国内外越来越多的科研人员的关注。这些传感器通常是在真空环境下将硅晶圆片和带微腔结构的玻璃晶圆片进行键合从而构成了F-P腔结构。然而,键合过程中产生的气体和传感器芯片本身的气密性泄露都会导致其真空度降低,在其内部产生残余压力。这些残余压力将会影响传感器的温度特性和长期稳定性,产生较大的温度交差灵敏度。

[0003] 针对微腔内部残余压力,国内外科科研人员提出了一些测量方法。如1993年,Michael A.Huff等人的(M.A.Huff,A.D.Nikolich and M.A.Schmidt,“Designofsealedcavity microstructuresformedbysiliconwaferbonding.”J.Microelectromech.Syst.2,74(1993).)一文提出利用实验测量到的膜片形变量与理论边缘受限弹性膜片的形变量通过理想气体状态方程联系起来,计算出硅键合形成的微腔内的残余压力,但是这种方法的计算精度非常容易受一些参数的测量误差的影响,比如微腔直径、弹性膜片厚度、测量点相对于中心位置的偏差以及各向异性材料的杨氏弹性模量。在1998年,H.Kapels等提出的(H.Kapels,T.Scheiter,C.Hierold,R.AignerandJ.Binder,“Cavity pressure determination and leakage testing for sealed surface micromachined membranes:a novel on-wafer test method.”Proc.EleventhAnnu.Int.Workshop Micro Electro MechanicalSyst.550(1998).)一文中,记载了密闭微腔芯片和钻孔漏气后的微腔芯片的谐振频率的测量结果随外部扫描压力的变化量,将钻孔后的微腔实验结果作为参考,得到两组测量结果的交点,此时对应的外部扫描压力即为待测微腔内部压力值。但是,上述方法对微腔具有破坏性,一旦破坏就不能再次使用。该方法只能用于对一批芯片微腔进行抽样检测来对评估整体传感器芯片的性能,可靠性较低。2015年,江俊峰等提出的发明专利《一种MEMS芯片微腔内部残余压力测量系统及方法》(CN103616124A)中记载了一种MEMS芯片微腔内部残余压力测量系统及方法,对同一待测MEMS芯片的两个不同测量位置进行腔长测量,两位置的腔长测量数据互为参考,拟合直线的交点即为残余压力。这种方法需要制作一个特殊装置把芯片与两根光纤进行固定,不容易拆装,不能对已经封装好光纤MEMS压力传感器进行测量。

### 发明内容

[0004] 针对现有技术存在的不足,本发明提出了一种光纤MEMS压力传感器F-P腔内残余压力测量系统及方法,通过不改变传感器整体结构的测量手段,达成可靠的、可逐个测量传感器F-P腔内部残余压力的目的。

[0005] 本发明提供的一种光纤MEMS压力传感器F-P腔内残余压力测量系统,该系统包括

低相干光源(13)、3dB耦合器(14)、MEMS压力传感器(16)、空气压力舱(17)、恒温箱(15)、压力控制系统、腔长解调仪(24)、数据采集卡(23)和计算机(22)；

[0006] 其中,所述压力传感器(16)置于空气压力舱(17)内,并将空气压力舱(17)密封;所述空气压力舱(17)中的压力通过压力控制系统控制压力的变化,使得外界压力(4)进行压力变化扫描,所述压力控制系统由压力控制仪(21)、真空泵(19)和空气压缩机(20)构成,所述压力控制系统和所述空气压力舱(17)之间、以及所述压力控制系统的各部件之间通过气管(18)联接;所述MEMS压力传感器(16)包括基底(1)与膜片(2)构成的一个F-P腔(3),残余压力(5)密封在F-P腔(3)之中;低相干光源(13)经过光纤(9)输出的一部分光在镀在基底(1)上的半透半反射膜(6)发生第一次反射,形成反射参考光(10);其余部分光传播到膜片(2)内表面(7)上发生第二次反射,形成反射传感光(11);反射参考光(10)与反射传感光(11)形成干涉,干涉信号中包含光程差信息;密闭在F-P腔(3)中的气体受温度影响膨胀或收缩,与加在膜片(2)外部的气压(4)共同作用,影响膜片(2)的弹性形变;反射光参考光(10)和反射传感光(11)经过3dB耦合器(14)后,进入腔长解调仪(24),腔长解调结果通过数据采集卡(23)输入到计算机(22)进行进一步数据处理。

[0007] 本发明提供一种光纤MEMS压力传感器F-P腔内残余压力测量方法,该方法包括以下步骤:

[0008] 第一步,在温度 $T_1$ 下,进行压力标定实验:通过压力控制系统对膜片2的外界压力进行扫描,扫描压力记为 $P_{E1}$ ,并进行解调,得到 $T_1$ 下腔长信息和外界压力的对应关系;

[0009] 第二步,在温度 $T_2$ 下,进行压力标定实验:通过压力控制系统对膜片2的外界压力进行扫描,扫描压力记为 $P_{E2}$ ,并进行解调,得到 $T_2$ 下腔长信息和外界压力的对应关系;

[0010] 第三步,对第一步和第二步得到的数据进行线性拟合,腔长信息在扫描压力范围内连续变化,每一个腔长信息的值都对应着两个温度下的外界气压值 $P_{E1}$ 和 $P_{E2}$ ;

[0011] 第四步,将连续的每一组 $P_{E1}$ 和 $P_{E2}$ 代入到表达式 $P_{R1} = (P_{E2} - P_{E1}) \frac{T_1}{T_2 - T_1}$ 中,画出 $P_{R1}$ 随外界气压 $P_{E1}$ 的变化曲线,并画出曲线 $P_{R1} = P_{E1}$ ,得到两条曲线的交点横坐标27;第五步,将交点横坐标的值再减去基底1材料受温度膨胀引起的误差 $VP_{R1}$ ,结果就代表温度 $T_1$ 下膜片平坦

状态12时的残余压力5;其中: $VP_{R1} = \frac{h\alpha_g T_1}{S_2}$ , $h$ 表示F-P腔深度, $\alpha_g$ 表示基底热膨胀系数, $S_2$ 表

示第二步中标定得到的压力的灵敏度。

[0012] 本发明具有以下积极效果:

[0013] 1、在保持传感器本身结构不改动的前提下对其内部残余压力进行测量,可以对已经封装好的光纤MEMS压力传感器进行测量,不需要特殊装置,是一种传感器级别的测量;

[0014] 2、利用光纤压力传感器的温度特性测量并计算出F-P腔内部残余压力,由于非破坏性的特点,使得测量完之后的传感器能够再继续使用,从而可以对所有传感器进行全检;并且可以长期测量传感器的漏气情况,评估传感器的键合质量;

[0015] 3、利用光纤压力传感器本身的单根光纤传输的信息进行测量,因此不仅适用于测量基于MEMS的光纤压力传感器的残余气压,而且可以用于其他结构和制作方法的膜片型非本征式的光纤压力传感器F-P腔内部气压的测量。

## 附图说明

[0016] 图1为光纤MEMS压力传感器结构示意图；

[0017] 图2为光纤MEMS压力传感器处于内外压力平衡状态的示意图；

[0018] 图3为本发明的光纤MEMS压力传感器F-P腔内残余压力的测量系统结构示意图；

[0019] 图4为本发明的光纤MEMS压力传感器F-P腔内残余压力的测量方法的实验结果分析图,其中(a)为光纤MEMS压力传感器两个温度下腔长测量数据结果;(b)为该传感器残余气压计算过程及结果示意图；

[0020] 图5为基于本发明方测量的50次残余压力值示意图

[0021] 图中:1、基底,2、膜片,3、F-P腔,4、外界压力,5、残余压力,6、半透半反射膜,7、膜片内表面,8、玻璃插芯,9、光纤,10、反射参考光,11、反射传感光,12、内外压力平衡状态,13、低相干光源,14、3dB耦合器,15、恒温箱,16、光纤MEMS压力传感器,17、空气压力舱,18、气管,19、真空泵,20、空气压缩机,21、压力控制仪,22、计算机,23、数据采集卡,24、腔长解调仪,25、测量数据交点区域,26、膜片平坦位置,27、交点横坐标。

## 具体实施方式

[0022] 下面将结合附图对本发明的实施方式作进一步的详细描述。

[0023] 实施例

[0024] 如图1所示,MEMS压力传感器包括由设置于玻璃插芯8上的基底1与膜片2构成的一个F-P腔3,残余压力5密封在F-P腔3之中;光纤9插入于玻璃插芯8内。经光纤9输出的光一部分在半透半反射膜6上发生第一次反射,形成反射参考光10;其余部分传播到膜片内表面7上发生第二次反射,形成反射传感光11。反射参考光10与反射传感光11形成干涉,干涉信号中包含光程差信息,该光程差是对应腔长的2倍。密闭在F-P腔中的气体受温度影响膨胀或收缩,与加在膜片2外部的的气压4共同作用,影响膜片2的弹性形变。此外,基底1与膜片2键合界面产生的热应力、不同温度下膜片2材料弹性力学参数不同等因素同样影响膜片形变。膜片2为边缘受限的圆形膜片,在结合热应力的作用下,将其形变量表示为:

$$[0025] \quad \omega = \frac{(a^2 - r^2)^2 (P_E - P_R)}{64D(1 + \xi)} \quad (1)$$

[0026] 其中,a表示F-P腔半径;r表示沿F-P腔半径方向上与中心位置间距离,D表示膜片抗弯刚度,受温度影响; $\xi$ 表示热应力引起的形变补偿系数,与温度相关; $P_E$ 表示外界气压, $P_R$ 表示残余气压。

[0027] 结合理想气体状态方程如公式(2)所示:

$$[0028] \quad P_R V = nRT \quad (2)$$

[0029] n表示气体物质的量,T表示气体的热力学温度,R为理想气体常数。

[0030] 当温度 $T_1$ 、 $T_2$ 下膜片形变量相等 $\omega_1 = \omega_2$ 且等于0时,F-P腔体积V也相等。推导得出:

$$[0031] \quad P_{R1} = (P_{E2} - P_{E1}) \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (3)$$

[0032]  $P_{R1}$ 为温度 $T_1$ 下的残余气压, $P_{E1}$ 和 $P_{E2}$ 分别为 $T_1$ 和 $T_2$ 温度下膜片形变量相等时对应的

外界气压值。

[0033] 公式 (3) 成立的条件是：

$$[0034] \quad P_{R1} = P_{E1} \quad (4)$$

[0035] 因此当膜片形变量为0,即处于如图2所示的平坦状态12,内外压力达到平衡,残余压力5与D和 $\xi$ 无关。此外由于计算公式中 (3)、(4) 忽略了基底1材料受热膨胀对F-P腔长的影响,因此计算时还需减去误差  $\Delta P_{R1}$

$$[0036] \quad VP_{R1} = V(P_{E2} - P_{E1}) \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{Vh}{S_2} \frac{T_1}{T_2 - T_1} = \frac{h\alpha_g T_1}{S_2} \quad (5)$$

[0037] 其中,h表示F-P腔3的深度, $\alpha_g$ 表示基底1的热膨胀系数, $S_2$ 表示压力传感器在 $T_2$ 下测量出的压力灵敏度。

[0038] 如图2所示,当膜片2处于内外压力平衡状态12,膜片平坦,形变量为0,此时残余压力5可由式 (3)、(4)、(5) 计算得出。如图3所示,为本发明的光纤MEMS压力传感器F-P腔内残余压力的测量系统。该系统包括低相干光源 (13)、3dB耦合器 (14)、MEMS压力传感器 (16)、空气压力舱 (17)、恒温箱 (15)、压力控制系统、腔长解调仪 (24)、数据采集卡 (23) 和计算机 (22) ;

[0039] 其中,所述压力传感器16置于空气压力舱17,并将空气压力舱17密封。空气压力舱17中的压力通过压力控制系统控制压力的变化,使得外界压力4进行压力变化扫描。压力控制系统由压力控制仪21,真空泵19和空气压缩机20构成,各部件之间通过气管18联接。整个系统通过计算机22操作。

[0040] 通过实验测量出腔长与外界气压的对应关系,对传感器进行标定,找出两个温度 $T_1$ 、 $T_2$ 下,使膜片形变量相等且为0时的外界气压 $P_{E1}$ 和 $P_{E2}$ ,即可算出 $T_1$ 下此时的残余气压 $P_{R1}$ 。具体实现步骤为:

[0041] 第一步,温度 $T_1$ 下进行压力标定实验,设定恒温箱15温度 $T_1$ 为273K,等待2个小时使空气压力舱17中的温度稳定;压力控制仪21控制空气压力舱17内的压力从10kPa到50kPa范围内扫描,扫描间隔为1.0kPa,压强改变时间间隔为2分钟,同时对腔长进行解调。腔长解调基于低相干干涉的原理;低相干光源13发出的光耦合到光纤9,经过一个3dB耦合器14后,入射到待测传感器16;光纤输入的反射光信号包含待测传感器对应的腔长信息,并重新耦合回光纤9;反射光经过3dB耦合器14后,进入腔长解调仪24,腔长解调结果通过数据采集卡23输入到计算机22进行进一步数据处理,建立待测温度下单色频率绝对相位和外界压力 $P_{E1}$ 的一一对应关系,如图4 (a) 圆圈所代表的的数据。

[0042] 第二步,进行温度 $T_2$ 下压力标定实验,设定恒温箱15温度 $T_2$ 为323K,等待2个小时使压力舱17中的温度稳定;压力控制仪21控制空气压力舱17内的压力从10kPa到50kPa范围内扫描,扫描间隔为1.0kPa,压强改变时间间隔为2分钟,同时对腔长进行解调,建立待测温度下单色频率绝对相位和外界压力 $P_{E2}$ 的一一对应关系,如图4 (a) 方块所代表的的数据;

[0043] 第三步,对第一步和第二步得到的数据进行线性拟合,如图4 (a) 所示。拟合线性度均为0.99996。线性拟合后10kPa到50kPa压力范围内绝对相位连续变化,每一个绝对相位的值都对对应着一组外界气压值 $P_{E1}$ 和 $P_{E2}$ ;

[0044] 第四步,将连续的每一组 $P_{E1}$ 和 $P_{E2}$ 代入到公式 (3)  $P_{R1} = (P_{E2} - P_{E1}) \frac{T_1}{T_2 - T_1}$  中,画出 $P_{R1}$

随外界气压 $P_{E1}$ 的变化曲线,并画出公式(4)  $P_{R1}=P_{E1}$ 曲线,得到两条曲线的交点25,表示膜片平坦位置26,的横坐标27为30.063kPa,如图4(b)所示。

[0045] 第五步,计算基底1材料受温度膨胀引起的误差 $VP_{R1}$ ,微腔深度 $h=26\mu\text{m}$ ,323K下MEMS传感器压力灵敏度 $S_2=28.578\text{nm/kPa}$ ,基底1热膨胀系数 $\alpha_g=3.23\times 10^{-6}/\text{K}$ ,计算得到

$VP_{R1} = \frac{h\alpha_g T_1}{S_2} = 0.802\text{kPa}$ ; 第四步得到的交点横坐标27为30.063kPa减去0.802kPa为

29.261kPa,即为273K下膜片平坦状态12时的残余压力5。

[0046] 温度的选定方法为: $T_1$ 表示最终计算出残余压力的温度, $T_2$ 表示参考温度,并且 $T_1$ 、 $T_2$ 的选取应尽量使温差较大,单位是K;外界压力4的扫描范围的选取方法是:在估测被测光纤MEMS压力传感器残余气压附近选取,进行小间隔精细扫描;第4步所述的补偿压力计算公式为

$VP_{R1} = \frac{h\alpha_g T_1}{S_2}$ , $h$ 是F-P腔深度, $\alpha_g$ 是基底热膨胀系数, $S_2$ 是第二步所述标定得到的传感器

压力灵敏度。

[0047] 为了进一步验证本发明提出的测量系统的稳定性,在上述实施例各个扫描压力点连续采集了50帧干涉信号,分别得出了50个残余压力计算数据,详见图5。50次测量结果的平均值为29.278kPa,标准差为0.046kPa,说明了本方法提出的测量系统具有很高的稳定性。





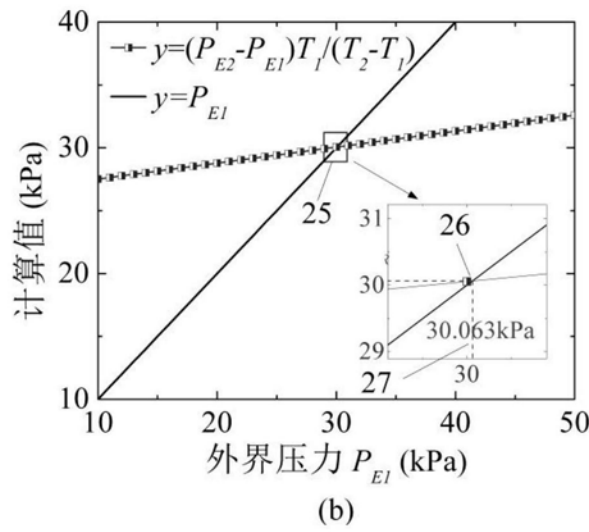
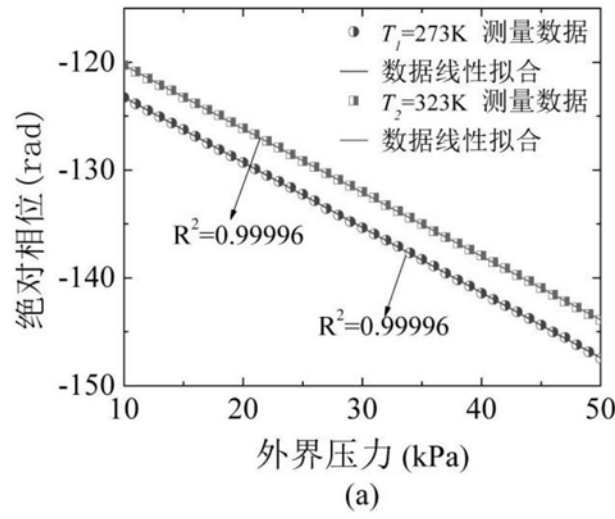


图4

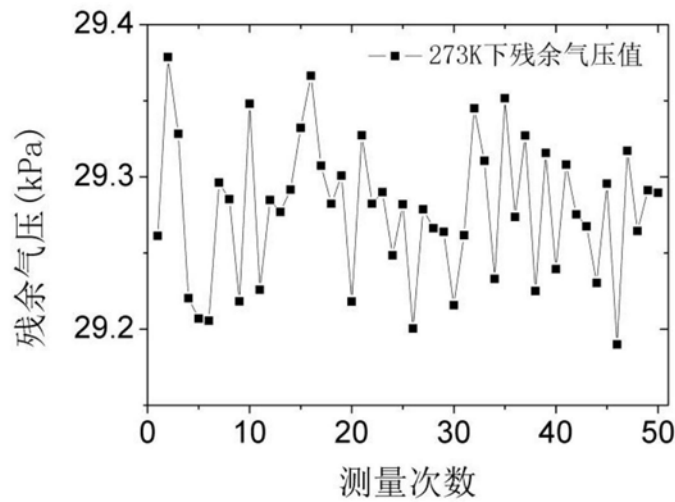


图5