

虚拟仪器 JKR 测能仪开发与测试

Development and Test of the JKR Energy Instrument Based on Virtual Instrument Technology

袁程强¹ 沈睦贤² 郭旭虹² 张建华¹

(华东理工大学信息科学与工程学院¹,上海 200237;华东理工大学化学工程联合国家重点实验室²,上海 200237)

摘要: 使用 JKR 接触理论对表面具有粘着效应的弹性材料(硅胶、水凝胶等)进行粘着性质的研究是材料科学中一个重要的研究方向。为此,需要开发 JKR 测能仪为该研究提供可靠的实验平台。基于 JKR 理论,采用虚拟仪器技术进行 JKR 测能仪软硬件系统的设计和开发,成功搭建了 JKR 实验平台,实现了 JKR 数据的采集,并对所得系统进行了测试和验证。测试结果表明,该仪器具有操作方便灵活、结构设计科学、运行精度高等优点。

关键词: JKR 理论 虚拟仪器 JKR 测能仪 能量释放曲线 VC++6.0

中图分类号: TP273+.5 **文献标志码:** A

Abstract: Researching on the adhesive properties of elastic materials (silicone, hydrogels, etc.) with surface features adhesive effect by using JKR (John, Kendall and Roberts) theory is an important section in material science. Thus, it is necessary to develop JKR energy measuring instrument to provide reliable experimental platform for such research. Based on JKR theory, by adopting virtual instrument technology, the design and development of the hardware and software system of JKR energy instrument are conducted. The JKR experimental platform is established successfully, the JKR data acquisition is implemented and the system is tested and verified. The result of test shows that this instrument possesses many advantages including ease and flexible operation, scientific structure design, and high operating accuracy, etc.

Keywords: JKR theory Virtual instrument JKR energy instrument Curve of energy release VC++6.0

0 引言

目前,弹性材料(如硅胶、水凝胶、橡胶等)被广泛用于人们的日常生活中。在不同配方和工艺下,即使是同种弹性材料,其具有的性质也会呈现较大差别。因此,对于这些材料的合成与研究是许多学者比较感兴趣的研究方向。

一般来说,对于两个弹性体在外力作用下的接触过程,可以使用 Hertz 的弹性接触理论进行分析^[1]。但是在实际情况中,有些弹性材料的表面具有粘着效应,而 Hertz 的理论并没有考虑粘着效应对材料接触过程的影响。John, Kendall 和 Roberts (JKR) 在 Hertz 理论的基础上,考虑表面力作用对固体弹性形变的影响,认为粘着能会在表面发生接触的圆形区域内产生一定的作用,据此修正 Hertz 接触理论^[2]。

虚拟仪器技术是正在兴起的一种仪器开发技术,代表了当前测试仪器的发展方向^[3]。它将计算机硬件、软

件和总线技术与测试技术、仪器技术等相结合,使得仪器既具有传统专业化的功能,又能够充分利用计算机智能^[4-6]。利用该技术可以很好地实现 JKR 测能仪的开发。

1 仪器的构成与工作原理

1.1 JKR 理论简介

在 JKR 接触过程中,弹性半球以一定压力与被测材料接触,产生相对位移以及接触半径,由此得到相应的粘着接触理论如下^[7-8]:

$$G = \frac{1}{6\pi Ka^3} \left(\frac{Ka^3}{R} - P \right)^2 \quad (1)$$

式中: G 为被测材料的粘着能释放速率; K 为等效弹性常数; P 为压力值; R 为弹性半球半径; a 为接触半径。

在接触过程中,压力与位移会形成一条封闭的粘着能释放曲线。对于 JKR 接触试验而言,只要得到接触半径 a 、压力 P 和相对位移 δ ,就可以求得该种材料的粘着能。

1.2 仪器硬件结构

JKR 测能仪需要模拟 JKR 接触过程。在此过程中需要测量的试验参数有接触半径 a 、压力 P 和相对位移 δ ,同时还需要绘制压力位移实时关系曲线。JKR 测能仪的硬件部分利用步进电机+滚珠丝杠的直线传

国家自然科学基金资助项目(编号:51273063)。

修改稿收到日期:2013-11-24。

第一作者袁程强(1989-),男,现为华东理工大学控制科学与工程专在读硕士研究生;主要从事计算机软硬件系统和自动化仪表设计与开发方面的研究。

动装置实现 JKR 粘着接触过程,使用传感器获得压力值和相对位移值。由于直接测量接触半径存在一定的困难,所以采用间接测量的方法,即通过测量显微镜拍摄的接触面照片分析接触半径。根据硬件各个功能的设计思路,JKR 测能仪物理结构如图 1 所示。

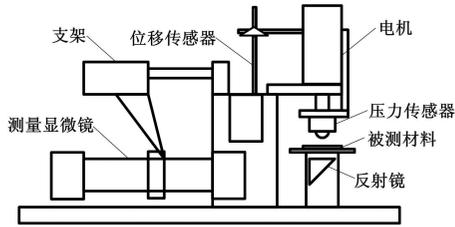


图 1 JKR 测能仪物理结构

Fig. 1 Physical device of JKR energy instrument

电机带动弹性半球与被测材料接触。被测材料放置于载玻片上,可以减小重力对材料表面形状产生的影响。同时,在电机上安装支架,与位移传感器接触,这样位移传感器便可以实时读取电机的位移值。载玻片是透明的,被测材料具有较好的通透性,将测量显微镜安置在载玻片下方,可以很好地观测和拍摄接触面。利用分光镜反射接触面,使测量显微镜横置,从而降低整台仪器的高度,避免重心过高造成仪器的不稳定。

1.3 测能仪软件系统

JKR 测能仪软件流程如图 2 所示。

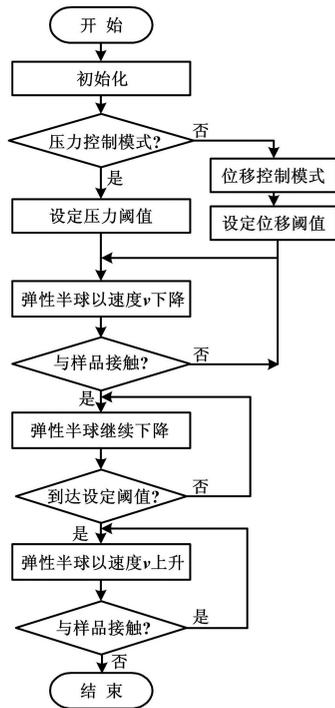


图 2 软件流程

Fig. 2 Flowchart of the software

Microsoft VC++6.0 是微软公司开发的面向对象的可视化集成编程系统。它能够自动生成程序的框架,对于类的管理方便灵活,代码编写和界面设计集成交互操作^[9],是虚拟仪器中软件开发常用的开发平台之一。所以 JKR 测能仪以 VC++6.0 作为软件开发平台,实现电机的驱动、数据的采集、数据滤波与保存、曲线绘制、接触面的拍摄等功能。

1.3.1 用户界面

使用 VC++6.0 中的控件可以很方便地实现用户操作界面的搭建。试验人员通过界面可以方便地完成初始化参数的设置、电机控制、试验结果显示、数据的保存等操作。需要设置的初始化参数有:运行模式(分为压力控制和位移控制两种)、手动运行速度、自动运行速度、循环次数、下降位移(对应位移控制模式)和最大压力(对应压力控制模式)。

1.3.2 软件滤波

通过串口对传感器进行读取可以获得试验的原始数据。空载时滤波前后压力传感器输出波形如图 3 所示。

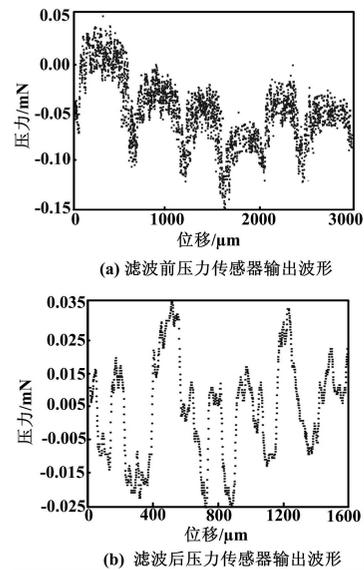


图 3 空载时滤波前后压力传感器输出波形

Fig. 3 Output waveforms of the unloaded force sensor before and after filtering

当压力传感器空载时,压力传感器数据会呈现如图 3(a)所示的扰动。这说明原始的压力值存在较大的干扰,需要经过一定的滤波处理才能正常使用。通常的滤波方法有限幅滤波、中位值滤波、叠加平均滤波和复合滤波^[10]。为了兼顾滤波效果以及数据点采集速度,在比较不同的滤波方法的滤波效果之后,采用 2 点叠加平均+12 点滑动叠加平均的复合滤波方法对原始的压力测量数据进行处理。当压力传感器空载时,原始压力信号经过复

合滤波后的波形如图 3(b)所示。可以看到扰动的幅值明显下降,说明该方法可以很好地抑制干扰。

1.3.3 数据存储方式

通过 C++调用 Excel 的动态链接库^[11],可以将测量得到的试验数据按照一定的格式保存为 Excel 文件,以方便后续对数据的研究与分析。

使用测量显微镜所提供的动态链接库,利用动态链接库中提供的函数,可以很方便地对测量显微镜进行控制。测量显微镜每 450 ms 自动拍摄一张接触面照片,并以 bmp 的格式保存。值得注意的是,若将拍摄照片的代码放入主程序的进程中,会造成循环超时问题。为了避免该问题的产生,需使用多线程技术。

1.3.4 仪器运行误差的自动校正

实际运行过程中,仪器最大压力及下降位移的运行结果与设定值之间存在一定偏差。对 JKR 测能仪而言,自动运行速度和阈值都有可能对误差大小产生影响。通过测试分析这两个参数与误差的关系,对实际运行结果进行校正。

① 压力运行误差校正

以聚丙烯酸水凝胶 Bis0.05 作为被测样品,设定最大压力分别为 1 mN 和 2 mN,自动运行速度选取为 1 μm/s,2 μm/s,⋯,9 μm/s,对于相同的初始参数重复进行 5 次试验,然后将误差的绝对值取平均。校正前后的压力误差如表 1 所示。

表 1 校正前后的压力误差

Tab.1 Pressure errors before and after correction

最大压力 /mN	速度 /(μm·s ⁻¹)	压力误差/mN	
		校正前	校正后
1	1	0.064	0.027
2	1	0.069	0.027
1	2	0.143	0.007
2	2	0.145	0.007
1	3	0.226	0.025
2	3	0.230	0.025
1	4	0.284	0.043
2	4	0.297	0.043
1	5	0.324	0.056
2	5	0.369	0.056
1	6	0.434	0.083
2	6	0.432	0.083
1	7	0.503	0.127
2	7	0.498	0.127
1	8	0.583	0.142
2	8	0.569	0.142
1	9	0.638	0.207
2	9	0.638	0.207

从表 1 可以看到,最大压力设定值的大小与误差

值基本无关;自动运行速度越大,造成的误差越大。

将自动运行速度与压力误差值进行线性拟合,得到如下关系:

$$\Delta P = 0.03987v - 0.01378 \quad (2)$$

式中:ΔP 为压力平均绝对误差;v 为自动运行速度。

经过校正,实际运行得到的压力误差明显减小。

② 位移运行误差校正

同样以聚丙烯酸水凝胶 Bis0.05 作为被测样品,设定下降位移分别为 30 μm 和 50 μm,自动运行速度为 1 μm/s,2 μm/s,⋯,9 μm/s,对于相同的初始参数重复进行 5 次试验,然后将误差的绝对值取平均。校正前后的位移误差如表 2 所示。

表 2 校正前后的位移误差

Tab.2 Displacement errors before and after correction

下降位移 /μm	速度 /(μm·s ⁻¹)	位移误差/μm	
		校正前	校正后
30	1	0.84	0.100
50	1	0.88	0.100
30	2	1.70	0.200
50	2	1.80	0.200
30	3	2.66	0.260
50	3	2.62	0.260
30	4	3.34	0.140
50	4	3.38	0.140
30	5	4.60	0.425
50	5	4.38	0.425
30	6	5.62	0.020
50	6	5.14	0.020
30	7	6.12	0.440
50	7	5.78	0.440
30	8	7.52	0.060
50	8	7.32	0.060
30	9	7.98	0.460
50	9	7.50	0.460

从表 2 可以看到,位移误差与压力误差有相类似的结论,即位移误差与下降位移设定值的大小基本无关,与自动运行速度有关,且自动运行速度越大,误差越大。

将位移误差与自动运行速度进行线性拟合,得到如下关系:

$$\Delta \delta = 0.8862v - 0.03914 \quad (3)$$

式中:Δδ 为位移平均绝对误差;v 为自动运行速度。

经过校正,实际运行得到的位移误差大幅减小。

2 仪器的试验测试结果

由于难以定量地对 JKR 测能仪的性能进行评估,因此采用定性的方法分析 JKR 测能仪的性能。

首先,对同种被测材料进行 JKR 数据采集。由 JKR 理论可知,在微接触的情况下,对于同种材料,最大压力的大小并不影响粘着能的大小。

初始参数设置如下。采用压力控制模式,自动运行速度为 $3 \mu\text{m/s}$,则对聚丙烯酸水凝胶 Bis0.2 进行测量得到的曲线如图 4 所示。

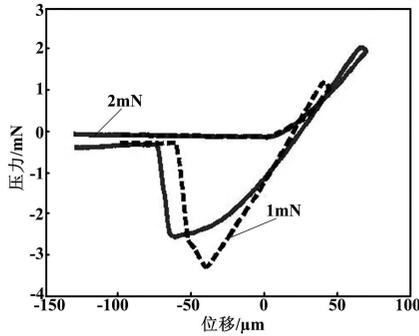


图 4 水凝胶 Bis0.2 粘着能释放曲线

Fig.4 Adhesive energy release curve of hydrogel Bis0.2

从图 4 可以看到,在最大压力分别为 1 mN 和 2 mN 的情况下,两次试验得到的测量曲线基本重合,抛物线面积和反向最大拉力基本相同,符合 JKR 理论的先验知识。

其次,对不同的被测材料进行 JKR 接触试验。对于不同的材料,由于其黏性和硬度不同,会造成其粘着能释放曲线也存在较大差异。

初始参数设置如下。采用压力控制模式,最大压力为 1 mN、自动运行速度为 $3 \mu\text{m/s}$,对水凝胶 Bis0.1、Bis0.15、Bis0.2 进行测量,得到的结果如图 5 ~ 图 7 所示。

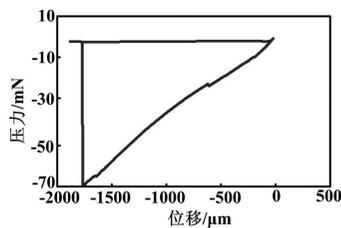


图 5 Bis0.10 粘着能释放曲线

Fig.5 Adhesive energy release curves of Bis0.10

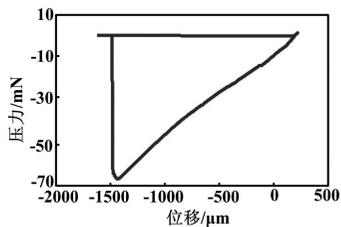


图 6 Bis0.15 粘着能释放曲线

Fig.6 Adhesive energy release curves of Bis0.15

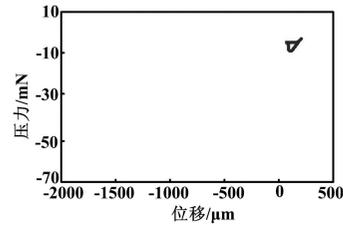


图 7 Bis0.20 粘着能释放曲线

Fig.7 Adhesive energy release curves of Bis0.20

从图 5 ~ 图 7 可以看到,随着交联剂量 (Bis) 的增加,水凝胶粘着能释放曲线的反向最大拉力和抛物线面积都在减小。这说明材料的黏性下降,符合这三种材料的实际性质。

3 结束语

本文采用虚拟仪器技术设计和开发了 JKR 测能仪软硬件系统;通过各个传感器的总成搭建了测能仪硬件系统;通过 VC++6.0 编写了测能仪软件系统,由测能仪的软件系统控制硬件系统,完成 JKR 试验以及试验数据的采集。

测试结果表明,JKR 测能仪可以很好地对被测材料的粘着能释放情况进行测量。该仪器操作简单,运行精度高,初始参数可以灵活地人为设定,并能实时保存被测材料的测量数据,为研究物质的粘着效应提供了一个便捷可靠的实验平台。

参考文献

- [1] Johnson K L. 接触力学[M]. 北京:高等教育出版社,1992.
- [2] Johnson K L, Kendall K, Roberts A D. Surface energy and the contact of elastic solids[C]//Proceedings of the Royal Society of London, Series A,1971;301-313.
- [3] 薛文琪,翟正军. 基于虚拟仪器的电源测试系统设计与实现[J]. 计算机工程与设计,2010,31(6):1330-1334.
- [4] 秦树人. 虚拟仪器—测试仪器从硬件到软件[J]. 振动、测试与诊断,2000,20(1):1-6.
- [5] 李国厚,冯启高. 虚拟仪器技术及其开发与应用[J]. 自动化仪表,2002,23(7):4-6.
- [6] 卢奕采. 虚拟仪器技术的发展及现状[J]. 自动化仪表,2001,22(11):1-3.
- [7] Nunalee F N, Shull K R. Contact mechanics studies with quartz crystal microbalance; origins of the contrast factor for polymer gels and solutions[J]. Langmuir,2004(20):7803-7089.
- [8] 郭百巍,孟秀云,陈大融. 微粗糙表面接触的仿真研究[J]. 计算机仿真,2005(z1):500-503.
- [9] 徐晓刚,高兆法,王秀娟. Visual C++6.0 入门与提高[M]. 北京:清华大学出版社,1999.
- [10] 向红军,雷彬. 基于单片机系统的数字滤波方法的研究[J]. 电测与仪表,2005,42(9):53-55.
- [11] 杜诗雨,王子源. Visual C++操作 Excel 的应用研究[J]. 计算机与现代化,2011(8):201-206.