

测试·分析

便携式橡胶回弹仪的开发及应用

杨荣浩^{1,2}, 张为健¹, 刘奕麟¹, 徐联军³, 刘莉¹, 刘光烨¹, 张保岗^{1*}

(1. 青岛科技大学 高性能聚合物及成型技术教育部工程研究中心, 山东 青岛 266042; 2. 青岛科技大学 中德工程学院, 山东 青岛 266426; 3. 青岛联强同创仪器有限公司, 山东 青岛 266011)

摘要: 开发一种便携式橡胶回弹仪并对其测试数据进行分析。结果表明: 在室温条件下, 便携式橡胶回弹仪测试的橡胶试样回弹值结果准确; 在 $-20\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内, 温度对便携式橡胶回弹仪测试的橡胶试样回弹值结果无影响, 便携式橡胶回弹仪可以在该温度范围内使用; 便携式橡胶回弹仪对于较大厚度(12.36, 24.83, 37.33 mm)和较小厚度(2.83, 6.38 mm)的橡胶试样回弹值测试结果准确, 对于最小厚度(1.83 mm)的橡胶试样回弹值测试数据失效。该仪器可用于轮胎、胶辊和胶鞋底等橡胶及弹性体制品的检测和逆向开发。

关键词: 便携式橡胶回弹仪; 回弹值; 温度; 厚度

中图分类号: TQ330.4⁺92

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2023)06-0468-06

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.06.0468



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

回弹值是橡胶制品的重要参数, 不仅直接表征轮胎的减震效果和噪声大小, 更是表征不同炭黑用量的橡胶制品生热高低的重要数据^[1-6]。对于长期在高温高压下工作的印刷胶辊等橡胶制品, 不能通过破坏取样的方式直接测得橡胶老化程度, 可以利用回弹值间接得到橡胶老化程度^[7-8]。夏季和冬季行驶的车辆(尤其是承载时间长的大型货运车辆和客运车辆)轮胎运行条件复杂, 很难通过直接观察和直接取样确定橡胶老化程度, 难于了解极端条件下轮胎的运行性能, 也需要利用回弹值判断橡胶老化程度。

目前, 根据GB/T 1681—2009和GB/T 6670—2008, 橡胶回弹值测试主要采用卢柯摆、斯科伯摆、泽比尼摆和海绵球回弹值测试仪。这些仪器巧妙运用机械构造, 利用回弹距离与冲击距离的比值表征橡胶回弹值, 测试结果准确。但是传统回弹值测试仪的摆锤需要沉重的底座和较大的加

载距离, 海绵球也需要一定的加载距离, 同时需要严格的试验条件, 且不能实现硫化橡胶制品的快速检测和对大厚度橡胶制品回弹值进行比较准确的测算。虽然航空航天领域可以采用高速摄像机观察橡胶制品表面变化计算其回弹值, 但是需要极高的成本^[9]。因此, 便携式橡胶回弹仪的开发具有重要意义^[10-12]。

本工作开发了一种便携式橡胶回弹仪, 模拟了其在实际工作环境下的橡胶回弹值测试, 并与摆锤式橡胶回弹仪的橡胶回弹值测试进行了对比, 可为其推广使用提供参考。

1 便携式橡胶回弹仪的测试原理

1.1 基本测试原理

根据ISO 4662:2017要求, 采用直线形或者圆形摆加载物(冲击体)冲击平面或者平行平面检测物(橡胶试样), 冲击体撞击前后的能量比值即为

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51972185)

作者简介: 杨荣浩(1997—), 男, 山东泰安人, 青岛科技大学在读本科生, 主要进行聚合物纳米功能材料和复合材料的学习和研究。

***通信联系人:** (zbg0302@163.com)

引用本文: 杨荣浩, 张为健, 刘奕麟, 等. 便携式橡胶回弹仪的开发及应用[J]. 橡胶工业, 2023, 70(6): 468-473.

Citation: YANG Ronghao, ZHANG Weijian, LIU Yilin, et al. Development and application of portable rubber rebound instrument[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(6): 468-473.

回弹值。

传统的橡胶回弹值测试仪以冲击体撞击前后(静止和反弹后动能为零)的重力势能比表征橡胶试样回弹值:

$$R = \frac{mgh_2}{mgh_1} \quad (1)$$

式中, R 为橡胶试样回弹值, m 为冲击体质量, g 为重力加速度, h_1 为冲击体初始加载高度, h_2 为冲击体回弹高度。

可得:

$$R = \frac{h_2}{h_1} \quad (2)$$

本工作开发的便携式橡胶回弹仪采用磁感应测量法测试撞击前后冲击体速度, 以冲击体撞击前后的动能比表征橡胶试样回弹值:

$$R = \frac{1/2mv_2^2}{1/2mv_1^2} \times 100\% \quad (3)$$

式中, v_1 为碰撞前冲击体速度, v_2 为回弹后冲击体最大速度。

即得:

$$R = \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \times 100\% \quad (4)$$

便携式橡胶回弹仪基本测试原理如图1所示。

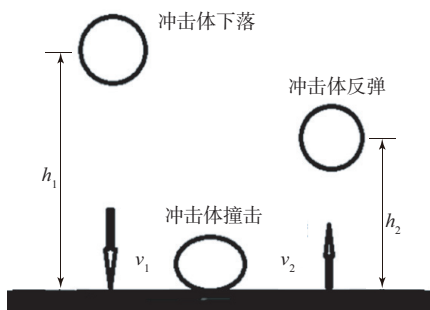


图1 便携式橡胶回弹仪基本测试原理示意
Fig. 1 Schematic diagram of basic test principle of portable rubber rebound instrument

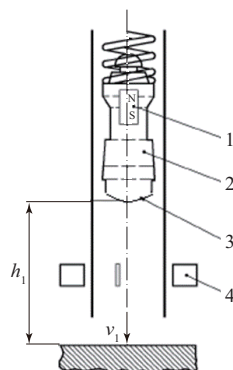
1.2 速度表征原理

便携式橡胶回弹仪冲击体中有一永磁体(见图2), 在弹簧作用下弹出, 其经过磁感应线圈时产生的电压如下:

$$V = nBv \quad (5)$$

式中, V 为磁感应线圈电压, n 为磁感应线圈匝数, B 为永磁体强度, v 为冲击体速度。

n 和 B 在短时间内不会变化, 因此磁感应线圈



1—永磁体(N为北极,S为南极); 2—冲击体; 3—冲击体顶端球面冲头; 4—磁感应线圈。

图2 回弹速度测试示意

Fig. 2 Schematic diagram of rebound speed test

电压与冲击体速度呈正比关系:

$$V = kv \quad (6)$$

式中, $k = nB$ 。

根据式(4)和(6), 橡胶试样回弹值等于磁感应线圈最低电压与最高电压比值的平方。

由于永磁体所受磁感应线圈撞击位移和回弹位移间距较短, 磁感应线圈电阻较大, 电流较小, 因此根据楞次定律, 磁感应线圈所产生的电流影响可以忽略不计。

便携式橡胶回弹仪采用高性能芯片, 可以每毫秒采集一次磁感应线圈电压数据, 根据电压与冲击体速度的正比关系, 仪器可以自动生成速度-时间曲线, 如图3所示。高密度的速度采集芯片可以让便携式橡胶回弹仪更准确地测试到冲击体速度。

2 便携式橡胶回弹仪特点及其冲击体结构

2.1 便携式橡胶回弹仪特点

本工作开发的便携式橡胶回弹仪如图4。

便携式橡胶回弹仪测试时以永磁体切割磁感应线圈产生的电压表征冲击体瞬时速度, 减小了测量回弹高度造成的仪器体积大的问题, 同时, 可以通过速度-时间曲线计算出碰撞时间。本产品具有适用试样范围广、不破坏试样、携带方便、测量准确的特点, 可以随时测试橡胶试样回弹值。

2.2 冲击体结构

便携式橡胶回弹仪侧剖面如图5所示, 其冲击

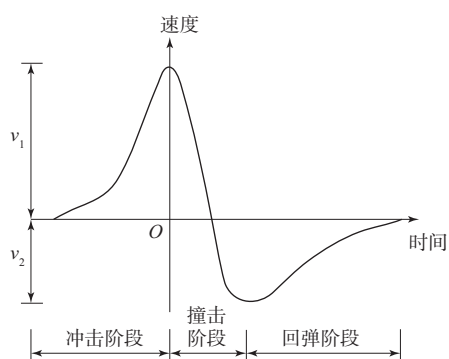


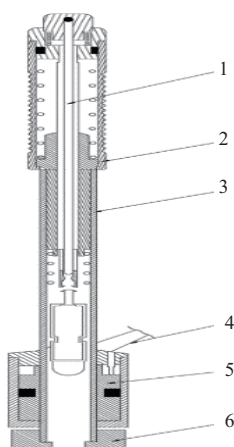
图3 速度-时间曲线
Fig. 3 Speed-time curve



图4 便携式橡胶回弹仪
Fig. 4 Portable rubber rebound instrument

体结构如图6所示。

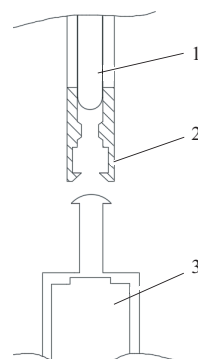
从图5和6可以看出:当冲击头被擒纵钩提起时,弹簧被压缩蓄能;当推杆打开擒纵钩后,冲击头弹出以撞击橡胶试样。冲击头弹出速度取决于



1—按动传动轴;2—手握处;3—外壳;4—信号传输线;
5—磁感应线圈;6—可拆卸固定器。

图5 便携式橡胶回弹仪侧面剖面

Fig. 5 Side section of portable rubber rebound instrument



1—推杆;2—擒纵钩;3—永磁体。

图6 冲击体结构示意图

Fig. 6 Schematic diagram of impact object structure

弹簧的弹力系数和压缩行程,该冲击头结构能够保证冲击能量的稳定,这是便携式橡胶回弹仪能够缩小体积的关键因素之一。

3 实验

3.1 原材料

采用3个配方的顺丁橡胶胶料:A配方胶料(回弹值约57%),B配方胶料(回弹值约68%),C配方胶料(回弹值约30%)。

3.2 主要设备和仪器

X(S)K-160型双辊开炼机,上海双翼橡塑机械有限公司产品;Rheomix3000OS型HAAKE转矩流变仪,德国哈克公司产品;GT-M2000-A型无转子硫化仪、GT-7016-AR型气压自动切片机、GT-XB320M型电子天平和GT-7042-REA型摆锤式橡胶回弹仪,中国台湾高铁科技股份有限公司产品;XLZ-25T型平板硫化机,青岛亚东橡胶机械有限公司产品;HD-10型橡胶厚度计,上海化工装备有限公司化工机械四厂产品;便携式橡胶回弹仪(本工作开发),青岛联强同创仪器有限公司产品;DGG-9070B型加热烘箱,上海森信实验仪器有限公司产品;EKT-2102DF型冷冻箱,晔中科技有限公司产品。

3.3 回弹值测试

进行如下3种回弹值测试。其中,按照GB/T 1681—2009要求,采用摆锤式橡胶回弹仪测试试样回弹值;按照ISO 4662:2017要求,采用便携式

橡胶回弹仪测试试样回弹值。每个试样均测试3次,取平均值。试样标准厚度为13.00 mm。

(1) 试样室温(23 ℃)回弹值测试(采用标准厚度试样)。用摆锤式橡胶回弹仪和便携式橡胶回弹仪分别测试A,B,C配方胶料试样室温回弹值,并计算其相对误差。

(2) 不同温度下试样回弹值测试(采用标准厚度试样)。采用B配方胶料试样(为了消除试样可能出现混炼不规则和胶料分散不均匀的情况,制备3组试样,分别记为B1,B2,B3),分别进行高温和低温回弹值测试,并与室温回弹值进行对比,计算回弹值相对误差。

①高温回弹值测试:根据GB/T 1681—2009要求,将试样和测试仪器放入烘箱加热,分别测试0,40,50,60和70 ℃下的试样回弹值(烘箱温度比测试温度增高0.5 ℃)。

②低温回弹值测试:根据GB/T 1681—2009要求,将试样和测试仪器放入冷冻箱降温,分别测试-20,-15,-10,-5和0 ℃下的试样回弹值(冷冻箱温度比测试温度降低0.3 ℃)。

(3) 不同厚度试样回弹值测试(在室温下进行):分别选取37.33 mm厚度(远超过大部分橡胶制品厚度)、24.83 mm厚度(2倍轮胎胎面胶厚度)、12.36 mm厚度(印刷胶辊和轮胎胎面胶厚度)、6.38 mm厚度(小厚度边界测试1,接近鞋底橡胶厚度)、2.83 mm厚度(小厚度边界测试2,接近鞋底橡胶厚度)、1.83 mm厚度(小厚度边界测试3)的B组胶料试样,采用便携式橡胶回弹仪测试其回弹值,并与标准厚度试样回弹值进行对比^[12-15]。

4 结果与讨论

4.1 试样室温回弹值对比

3个配方胶料试样室温回弹值对比如表1所示。国际上一般规定,测量相对误差绝对值小于0.05时测试结果准确。

从表1可以看出,便携式橡胶回弹仪测试的3个配方胶料试样室温回弹值相对误差绝对值均小于0.05,测试结果准确。

表1 3个配方胶料试样室温回弹值对比
Tab.1 Comparison of rebound values of three formula compound samples at room temperature

项 目	试样		
	A配方胶料	B配方胶料	C配方胶料
摆锤式橡胶回弹仪室温回弹值/%	56.83	68.50	28.33
便携式橡胶回弹仪室温回弹值/%	58.09	68.68	28.53
室温回弹值相对误差	0.022	0.003	0.007

4.2 不同温度下试样回弹值对比

4.2.1 高温下

高温下B配方胶料试样回弹值相对误差对比如表2所示。

表2 高温下B配方胶料试样回弹值相对误差对比
Tab.2 Comparison of relative errors of rebound values of B formula compound samples at high temperatures

试样	温度/℃					
	30	40	50	60	70	80
B1	0.005 8	-0.002 4	0.016 0	0.006 7	0.008 5	0.091 0
B2	0.001 2	0.015 0	0.010 0	0.014 0	0.019 0	0.115 0
B3	0.001 0	-0.008 0	-0.001 9	0.009 3	0.008 7	0.101 0

从表2可以看出:温度在30~70 ℃时,试样回弹值相对误差绝对值均小于0.05;温度超过70 ℃后,试样回弹值相对误差绝对值大于0.05,数据失效。这是因为温度高于70 ℃后,试样内能逐渐增大,导致70 ℃后试样回弹值增大至测试准确边界的80%,由于此时便携式橡胶回弹仪冲击体速度接近准确采集边界,由楞次定律产生的磁感应线圈微弱电流反作用于永磁体,试样回弹值相对误差绝对值迅速增大。

4.2.2 低温下

低温下B配方胶料试样回弹值相对误差对比如表3所示。

从表3可以看出,温度在-20~0 ℃时,试样回弹值相对误差绝对值基本小于0.05。这说明在-20~0 ℃条件下,试样回弹值测试结果准确,温度对试样

表3 低温下B配方胶料试样回弹值相对误差对比
Tab.3 Comparison of relative errors of rebound values of B formula compound samples at low temperatures

试样	温度/℃				
	0	-5	-10	-15	-20
B1	0.004 3	-0.003 4	0.004 8	0.004 1	0.005 5
B2	0.003 0	0.002 8	0.003 8	0.005 7	0.015 0
B3	0.003 3	-0.003 3	-0.003 7	0.002 5	0.008 7

回弹值测试影响不明显。

4.3 不同厚度试样回弹值对比

不同厚度试样(室温)回弹值对比如表4所示。与标准厚度试样回弹值相比,根据实际工况要求制作的相应厚度试样回弹值变化量绝对值小于5%时,该厚度试样测试结果有效。

从表4可以看出,较大厚度(12.36,24.83,37.33 mm)的试样回弹值测试结果准确,较小厚度(2.83,6.38 mm)的试样回弹值测试结果也准确,最小厚度(1.83 mm)的试样回弹值测试数据失效。因此,从3 mm左右厚度的橡胶和弹性体试样到40 mm左右厚度的橡胶和弹性体试样,本工作开

表4 不同厚度试样回弹值对比
Tab.4 Comparison of rebound values of samples with different thicknesses %

回弹值	试样厚度/mm						
	13.00 ¹⁾	37.33	24.83	12.36	6.38	2.83	1.83
平均值	68.50	65.67	66.07	68.00	68.88	67.00	57.41
变化量 ²⁾	0	-2.83	-2.43	-0.50	-0.38	-1.50	-11.09

注:1)标准试样厚度;2)各厚度试样回弹值与标准厚度试样回弹值之差。
发的便携式橡胶回弹仪均可使用。

5 结论

(1)在室温条件下,便携式橡胶回弹仪测试的橡胶试样回弹值结果准确。

(2)在-20~70℃范围内,温度对便携式橡胶回弹仪测试的橡胶试样回弹值结果无影响,便携式橡胶回弹仪可以在该温度范围内使用。

(3)便携式橡胶回弹仪对于较大厚度(12.36,24.83,37.33 mm)和较小厚度(2.83,6.38 mm)的橡胶试样回弹值测试结果准确,对于最小厚度(1.83 mm)的橡胶试样回弹值测试数据失效。从3 mm左右厚度的橡胶和弹性体试样到40 mm左右厚度的橡胶和弹性体试样,便携式橡胶回弹仪均可以测得较为准确的回弹值。

便携式橡胶回弹仪的优势在于不需要制备标准试样就可以进行橡胶回弹值测试,其对于产品质量检测和产品逆向开发具有巨大优势,在橡胶工业领域应用前景广阔。

参考文献:

[1] 潘娇静. 高压回弹性橡胶密封复合材料清洁高效生产技术研究[D]. 杭州:浙江理工大学,2020.
PAN J J. Research on clean and efficient production technology of rubber sealing composites with high compression resilience[D]. Hangzhou: Zhejiang Sci-Tech University, 2020.

[2] 符寿康,陶平,康鑫,等. 高低温循环作用下三元乙丙橡胶胶料的压缩永久变形及回弹值研究[J]. 橡胶科技,2020,18(3):138-141.
FU S K, TAO P, KANG X, et al. Compression set and resilience of EPDM under cyclic high and low temperature aging[J]. Rubber Science and Technology, 2020, 18(3):138-141.
[3] 代培,程安仁,矫阳,等. 高回弹氢化丁腈橡胶的 γ 辐射硫化与性能研究[J]. 同位素,2020,33(2):74-80.
DAI P, CHENG A R, JIAO Y, et al. Radiation vulcanization and properties of hydrogenated nitrile butadiene rubber with high recovery[J]. Journal of Isotopes, 2020, 33(2):74-80.
[4] INDRAJATI I N, SETYORINI I. Mechanical properties, set and rebound resilience characteristics of natural rubber/ethylene vinyl acetate blend on various ratios[J]. Macromolecular Symposia, 2021, 391(1):1900136. 1-1900136. 5.
[5] 曾建伟,刘显奎. 改性淀粉复合EVA弹性体鞋用材料的物理性能研究[J]. 中国皮革,2021,50(7):1-5,10.
ZENG J W, LIU X K. Physical properties of modified starch composite EVA elastomer shoe materials[J]. China Leather, 2021, 50(7):1-5, 10.
[6] 刘兆阳,房玉俊,孟平,等. 影响聚氨酯胶辊使用性能的因素研究[J]. 化学推进剂与高分子材料,2019,17(6):71-73.
LIU Z Y, FANG Y J, MENG P, et al. Study on factors affecting application performance of polyurethane rubber roller[J]. Chemical Propellants & Polymeric Materials, 2019, 17(6):71-73.
[7] 时兴波,陈学永,江浪,等. 基于加速热老化试验的橡胶活化能及寿命分析[J]. 中国新技术新产品,2021(21):18-20.
SHI X B, CHEN X Y, JIANG L, et al. Analysis of activation energy and life of rubber based on accelerated thermal aging test[J]. New Technologies and New Products of China, 2021(21):18-20.
[8] LI C J, DING Y Q, YANG Z, et al. Compressive stress-thermo

- oxidative ageing behaviour and mechanism of EPDM rubber gaskets for sealing resilience assessment[J]. *Polymer Testing*, 2020, 84 (C): 106366. 1–106366. 12.
- [9] 李秀芬,汪根来,李经纬,等. 固体发动机橡胶密封圈回弹性能测试[C]. 中国航天第三专业信息网第三十八届技术交流会暨第二届空天动力联合会议论文集——结构、强度和可靠性技术. 北京:中国航天第三专业信息网, 2017: 115–120.
- [10] 周鹏飞,李昭,樊军伟,等. 全钢载重子午线轮胎中心径向尺寸偏差的原因分析[J]. *轮胎工业*, 2021, 41 (8): 517–519.
- ZHOU P F, LI Z, FAN J W, et al. Cause analysis of center radial size deviation of truck and bus radial tire[J]. *Tire Industry*, 2021, 41 (8): 517–519.
- [11] 杜占虎,王培,赵丽影. 输送带覆盖胶回弹性的研究[J]. *中国橡胶*, 2021, 37 (10): 51–53.
- DU Z H, WANG P, ZHAO L Y. Study on the resilience of conveyor belt covering compound[J]. *China Rubber*, 2021, 37 (10): 51–53.
- [12] 林桂,刘力,张立群,等. 印刷胶辊的现状与发展趋势[J]. *特种橡胶制品*, 2001, 22 (6): 52–55.
- LIN G, LIU L, ZHANG L Q, et al. New production and development direction of printing rubber rollers[J]. *Special Purpose Rubber Products*, 2001, 22 (6): 52–55.
- [13] 唐振华,林伟,陈绍华,等. 鞋用微孔材料回弹性试验方法的研究[J]. *皮革科学与工程*, 2013, 23 (4): 71–73.
- TANG Z H, LIN W, CHEN S H, et al. Study on the test method of resilience of microporous materials for shoes[J]. *Leather Science and Engineering*, 2013, 23 (4): 71–73.
- [14] 徐美机. 鞋底回弹性测试[J]. *皮革科学与工程*, 2012, 22 (5): 57–59.
- XU M J. The test of rebound resilience for sole[J]. *Leather Science and Engineering*, 2012, 22 (5): 57–59.
- [15] 赵尧森,刘忠杰,陈桂兰,等. 聚氯乙烯改性丁腈橡胶耐油泡沫鞋底的研究[J]. *橡塑技术与装备*, 2003, 29 (3): 4–9.
- ZHAO Y S, LIU Z J, CHEN G L, et al. Research on oil-resistant foam sole of NBR modified with PVC[J]. *China Rubber/Plastics Technology and Equipment*, 2003, 29 (3): 4–9.

收稿日期: 2023-01-06

Development and Application of Portable Rubber Rebound Instrument

YANG Ronghao^{1,2}, ZHANG Weijian¹, LIU Yilin¹, XU Lianjun³, LIU Li¹,
LIU Guangye¹, ZHANG Baogang¹

(1. Engineering Research Center of Ministry of Education for High Performance Polymer and Molding Technology, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China; 2. Sino-German College of Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266426, China; 3. Qingdao Lianqiang Tongchuang Instrument Co., Ltd., Qingdao 266011, China)

Abstract: A portable rubber rebound instrument was developed and its test data were analyzed. The results showed that the rebound values of rubber samples tested by the portable rubber rebound instrument were accurate under room temperature conditions. In the range of $-20\sim 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, the test temperature had no effect on the test results, and the portable rubber rebound instrument could be used in this temperature range. The test results of the rebound values of thick rubber samples (thickness of 12.36, 24.83, 37.33 mm) and medium thick samples (thickness of 2.83, 6.38 mm) by using the portable rubber rebound instrument were accurate. However, the test results of thin rubber samples with the thickness of 1.83 mm were not accurate. The instrument could be used for the test and reverse development of various rubber products such as tires, rubber rollers and rubber shoe soles.

Key words: portable rubber rebound instrument; rebound value; temperature; thickness