

工程橡胶压缩实验和缓冲特性分析

黄舟, 贾东, 陈军红, 刘平, 李红梅, 曾飞

(中国工程物理研究院总体工程研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: **目的** 研究天然橡胶、丁基橡胶和发泡橡胶等典型工程橡胶的压缩变形行为和缓冲特性。**方法** 首先总结橡胶材料特性和工程案例, 进行三类橡胶的准静态和动态压缩试验, 获取材料的应力-应变关系和压缩特性。并以此为基础, 给出橡胶缓冲特性表征方法, 进而对比和定量分析不同橡胶的缓冲特性。**结果** 压缩实验结果显示, 不同橡胶材料的压缩变形行为基本一致。缓冲特性分析表明, 在相同应变水平下, 实心橡胶的缓冲吸能能力明显强于发泡橡胶, 而在相同应力水平下, 橡胶材料的缓冲吸能能力则与材料实际所处受力区域有关。因此, 在工程中选取橡胶缓冲材料时, 应当考虑其所处的应力环境。**结论** 根据不同橡胶材料的缓冲规律给出其对应的冲击防护适用场景, 以此形成判据, 从而为橡胶防护结构材料的选择提供参考。

关键词: 橡胶材料; 压缩实验; 缓冲特性; 冲击防护

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2018.06.005

中图分类号: TJ04

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2018)06-0021-06

Compression Experiment and Buffering Characteristic Analysis of Engineering Rubber Products

HUANG Zhou, JIA Dong, CHEN Jun-hong, LIU Ping, LI Hong-mei, ZENG Fei

(Institute of Systems Engineering, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621999, China)

ABSTRACT: **Objective** To study compression and buffering properties of engineering rubber products, including natural rubber, butyl rubber and foamed rubber. **Methods** On the basis of rubber properties and engineering projects analysis, quasi-static and dynamic compression tests were conducted on the above three kinds of rubber. On this basis, characterization method of buffering properties was give to have comparison and quantitative analysis on buffering properties of various rubber materials. **Results** The results of compression show that the deformation features of different rubber materials were similar. But the solid rubber obviously performed better in the ability of energy-absorbing compared with the foamed rubber under the same strain level. While, this ability is related to the actual stress region of the material at the same stress level. Consequently, the stress environment of the product should be taken into consideration when choosing the buffer material of rubber in engineering application. **Conclusion** Applicable scenarios of different rubber's role as shock shield could be summed up according to their properties, which could be a favorable reference for selection of rubber protective material.

KEY WORDS: rubber material; compression experiment; buffering characteristic; shock protection

橡胶材料具有高弹性、压缩变形大以及能承受重复载荷等优点^[1], 特别是其优良的缓冲减振性能^[2]具有较高的应用价值。在产品冲击防护研究领域, 不少学者倾向于以泡沫金属^[3]或泡沫塑料^[4-5]为对象开展其

缓冲性能研究。然而, 多孔材料受压缩后内部孔洞被压溃会导致无法承受重复缓冲。因此, 和多孔材料相比, 橡胶缓冲材料更便于使用和维护。橡胶材料的种类繁多, 材料特性受配方和成形工艺等多因素^[6]的影

响,材料性能具有一定分散性。橡胶具有超弹性、粘弹性,且非线性程度高^[7],其压缩与缓冲特征十分复杂。

为研究适用于产品冲击防护的橡胶材料,文中选用天然橡胶、丁基橡胶和发泡橡胶等工程中典型橡胶进行对比研究。分别进行了静态和动态压缩实验以获取压缩特性,再基于缓冲定量表征指标分析橡胶的缓冲特征,结合橡胶的工程应用案例,最后得出了橡胶缓冲材料选型应用的结论。

1 常用工程橡胶及其特点

橡胶弹性具有回弹性好、阻尼高,能承受重复载荷的作用,是比较理想的缓冲和减振材料,适宜制作减振垫及缓冲器^[8]。在受到冲击时,橡胶材料将一部分动能转换为橡胶的变形能,同时橡胶在变形时利用阻尼将动能变为热能耗散。可选用硬度(刚度)适中、弹性适中、较高阻尼的橡胶制品以达到较好的缓冲吸能效果。

橡胶按类型可分为实心橡胶和发泡橡胶。结合橡胶的工程应用情况,实心橡胶中的天然橡胶、丁基橡胶以及高密度的微孔发泡橡胶均可以作为冲击防护的缓冲材料。

1.1 天然橡胶

天然橡胶强度高、回弹性好,价格在橡胶中相对低廉。由天然橡胶制成的抗冲击橡胶缓冲器已被用于电梯制动失灵时的厢体落地冲击防护^[9]。在 JB/T 8110.2—1999 中, HX-2500 型号可吸收的冲击能量为 25 kN·m, 等效为约 1 t 重物从 2.5 m 跌落时的重力势能。天然橡胶还常被制成冲击台的缓冲垫, 可通过调整材料硬度(硬度与刚度基本对应)和厚度来延长冲击作用时间, 降低脉冲加速度峰值, 起到缓冲削峰的作用^[10], 如图 1 所示。

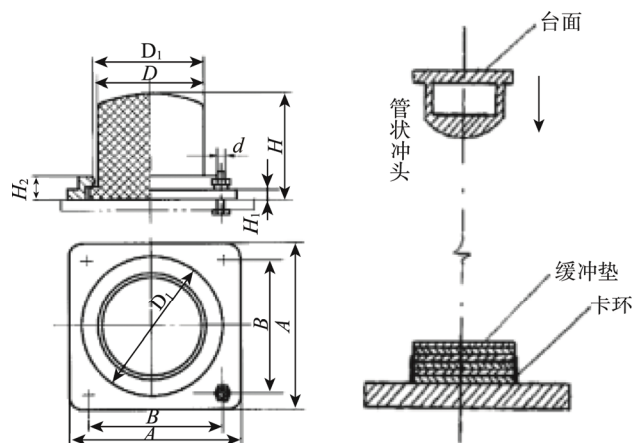


图1 天然橡胶缓冲器与缓冲垫

1.2 丁基橡胶

与天然橡胶相比,丁基橡胶强度稍低,但阻尼很

高(在通用橡胶制品中丁基橡胶的阻尼系数最大),成本更高。由于丁基橡胶特有的高阻尼特性(阻尼系数通常在 0.5~0.6),所以在变形的同时可将动能转化为热能,起到“缓冲+吸能”的效果,从而进一步衰减冲击峰值^[11]。由丁基橡胶制造的高性能减振制品在航空航天、汽车制造等领域得到了广泛的应用,有望应用于精密产品冲击防护。

1.3 发泡橡胶

发泡橡胶(又称为海绵橡胶)为均匀微孔结构的软质泡沫材料,有较好的弹性,其性能优于泡沫塑料,但价格较昂贵,尚未广泛应用^[12]。经调研可知,发泡橡胶强度偏低,在工程中常用于质量较小的脆性物品缓冲防护,对于具有较大冲击能量的产品,发泡橡胶的应用较少。

2 橡胶材料压缩实验

2.1 实验方法

橡胶试样由模压成形工艺制造,试样名义尺寸为 $\phi 40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的圆柱体。根据以上三类橡胶应用于冲击防护的常用配方选择试样材料:邵氏硬度为 45°的天然橡胶、邵氏硬度为 45°的丁基橡胶以及 0.5 g/cm³ 和 0.6 g/cm³ 的两种密度的三元乙丙发泡橡胶,如图 2 所示。每种橡胶的试样数量为 6 个,平均分为 2 组,分别用于准静态压缩试验和动态压缩试验。

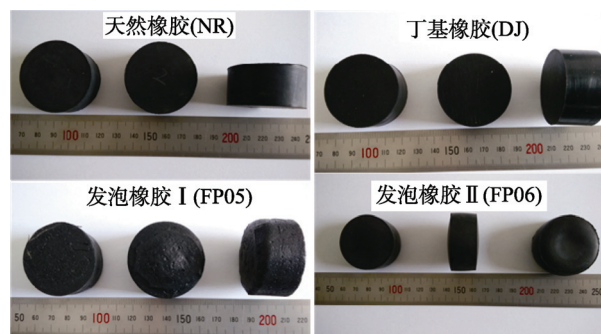


图2 橡胶材料试样

试样压缩测试采用 GB/T 7757—2009 的方法,通过橡胶圆柱试样的压缩实验可以直接测量得到材料的压缩载荷-位移曲线,并通过式(1)~(3)转换得到相应的名义应力、应变和应变率关系:

$$\sigma = \frac{4P}{\pi d^2} \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\Delta \dot{l}}{l} \quad (3)$$

式中: σ 为压缩名义应力; ε 为压缩名义应变;

$\dot{\varepsilon}$ 为压缩名义应变率； p 为压缩载荷； d 为试样初始直径； Δl 为试样高度变化； Δt 为试样高度变化； l 为试样初始高度。

2.2 实验过程

2.2.1 准静态压缩过程

准静态压缩实验采用材料试验机 AG-X-100kN 完成。实验的主要过程为：

- 1) 将橡胶试样放置于上下压盘之间，采用有机硅进行润滑。
- 2) 每个试样共进行压缩应变为 25% 的 3 次预加载，再进行卸载，并让试样回弹 5 min。如此重复压缩和放松试验 3 次，视为试验机调节。
- 3) 第 4 次压缩为正式实验，以 10 mm/min 的速度将试样压缩到至少 70% 应变，其整个压缩过程试样变形特征（以丁基橡胶为例）如图 3 所示。

2.2.2 动态压缩过程

动态压缩实验采用 Instron 高速拉压试验机完成，实验主要过程为：

- 1) 将橡胶试样直接放置于上下压盘之间，并采用有机硅进行润滑。
- 2) 使得橡胶材料的平均加载应变率控制在 10 s^{-1} ，根据式（3），控制作动缸的速度为 0.2 m/s ；
- 3) 将橡胶材料的压缩量统一预设 15 mm，待压缩至压缩量后，试验机快速卸载。

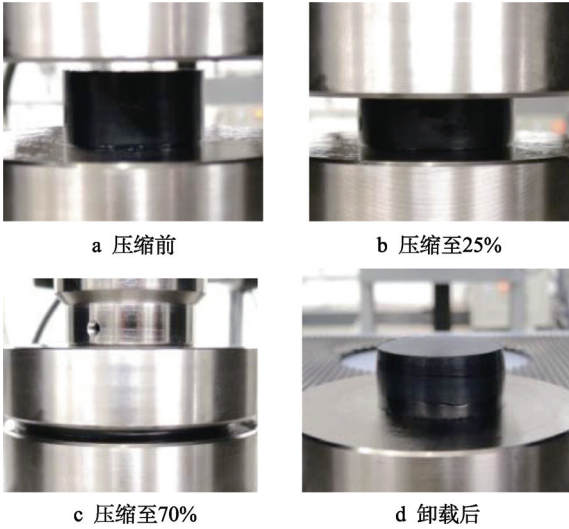


图 3 橡胶准静态压缩过程

2.3 实验结果

2.3.1 准静态压缩结果

当试样被压缩至 70% 应变时，上下端面的有机硅润滑剂被挤出，试样在端面约束效应的影响下会发生非均匀的超弹性变形，试样侧面与压头接触，整个试样呈现出饼状特征。卸载后试样基本能恢复原貌，试样表面无宏观压缩损伤，厚度略有减小。

通过单轴压缩加载，按式（1）和式（2）得到不同橡胶材料圆柱试样的应力-应变曲线，如图 4 所示。

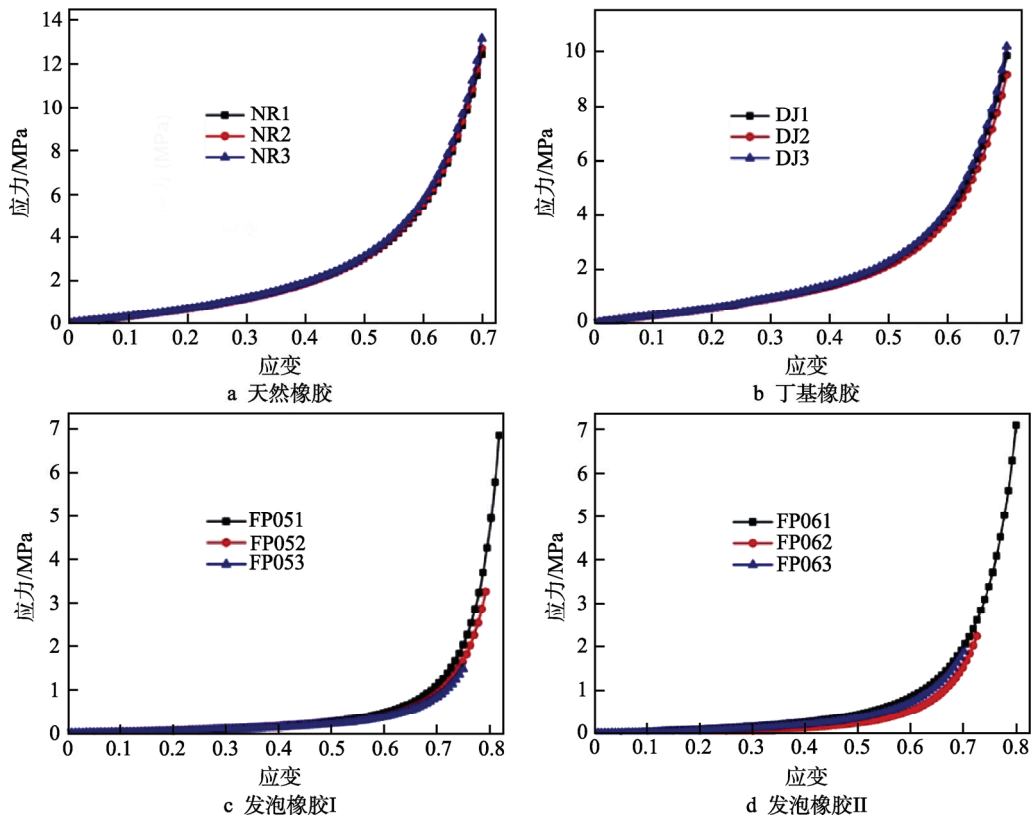


图 4 橡胶准静态压缩应力-应变曲线

对于天然橡胶、丁基橡胶和发泡橡胶,其不同试样的静态应力-应变曲线均具有很好的重合性。在上述应力-应变曲线的基础上,通过算术平均和曲线拟合外推可以得到不同橡胶材料的平均压缩应力-应变曲线,如图5所示。

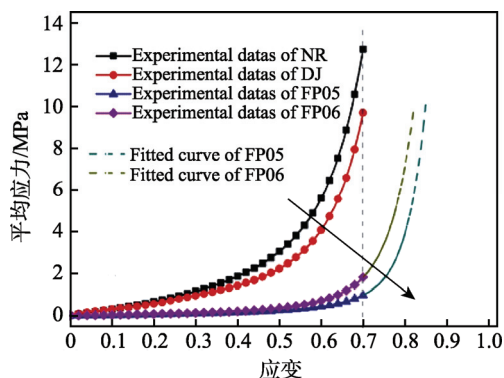


图5 橡胶准静态压缩应力-应变曲线

从图5中可以看出,在相同应变下,天然橡胶的应力大于丁基橡胶,并且两种实心橡胶材料(天然橡胶和丁基橡胶)在相同应变下的压缩应力远大于两种发泡橡胶材料(发泡橡胶I和发泡橡胶II)。发泡橡胶密度越小,相同应变下的压缩应力就越小,橡胶材料压缩应力-应变曲线随着材料不同整体呈现

出“右移”的趋势。

在小变形阶段,发泡橡胶材料中存在着孔洞/泡,材料体现出的宏观弹性模量较低。随着应变的逐渐增大,材料内的孔洞/泡被压实,使得材料变得致密,材料的弹性模量会快速增大。对于实心橡胶材料,由于不存在气泡结构,所以在小变形阶段,材料体现出的宏观弹性模量较高。随着压缩应变的增加,材料会更快进入应力快速增加阶段。

2.3.2 动态压缩结果

四种橡胶在 10 s^{-1} 应变率动态压缩应力-应变曲线如图6所示。在相同的预设压缩量下,加载结束时,四种橡胶材料的平均峰值应力:发泡橡胶I为4.17 MPa;发泡橡胶II为1.60 MPa;天然橡胶为37.50 MPa;丁基橡胶为29.26 MPa。两种实心橡胶的峰值应力高于两种发泡橡胶,其中天然橡胶峰值应力最高,发泡橡胶II峰值应力最低。

对比静态和动态压缩应力-应变曲线结果可知,由于橡胶存在黏性内阻,当加载速度增大时,材料内阻随之增大。因此在相同应变下,动态压缩应力值高于静态压缩应力,出现应变率硬化效应。在实验中,两种发泡橡胶测试结果分散性较大,尤其是发泡橡胶II,这与发泡橡胶材料分散性有关,可在后续研究中增加发泡橡胶压缩试验样本数。

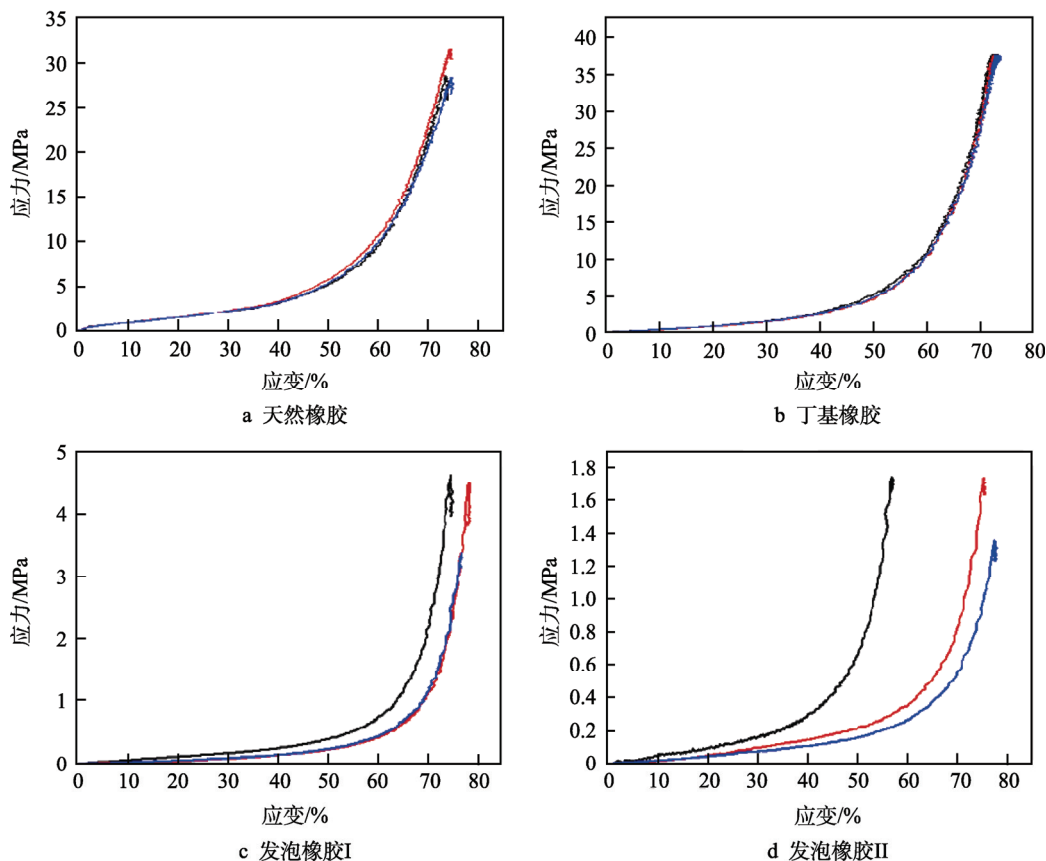


图6 橡胶动态压缩应力-应变曲线

3 橡胶缓冲特性分析

3.1 缓冲特性表征方法

通过材料压缩实验可以得到橡胶的载荷-位移曲线与应力-应变曲线等,但该曲线不能直观地将缓冲材料的缓冲特性表现出来。常用的缓冲特性表征方法包括缓冲吸能水平、缓冲系数^[13]和吸能效率^[14]等。

3.1.1 缓冲吸能水平

橡胶材料在受到外应力作用产生变形后,外力所作的功被转化为势能储存起来,或转化为热能耗散掉。在一定应力下,压缩应力-应变曲线下所包含的面积就是单位体积材料吸收的能量:

$$W = \int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon \quad (4)$$

在相同应力水平或应变水平下,通过计算不同材料的单位体积应变能或应变能密度(即材料单位体积吸收的能量),可以用于评价相应材料的缓冲吸能水平。

3.1.2 缓冲系数

缓冲系数 C 定义为:某一给定的峰值应力 σ_p 与在此应力下缓冲材料可以吸收的能量 W 的比值,即:

$$C = \frac{\sigma_p}{W} = \frac{\sigma_p}{\int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon} \quad (5)$$

通过计算缓冲结构的缓冲系数,也可以得出不同缓冲结构的缓冲特性。

3.1.3 吸能效率

对缓冲材料的吸能效率 E 定义为:缓冲材料所吸收的能量与对应应力之比,即:

$$E = \frac{W}{\sigma_p} = \frac{\int_0^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon}{\sigma_p} \quad (6)$$

对比式(5)和式(6)可知,在相同应力下,材料的缓冲系数 E 和吸能效率 W 互为倒数。与缓冲系数相比,吸能效率在表征材料的缓冲特性时与应力-应变曲线更直观对应。对比式(4)和(6)可知,在相同应力下,缓冲吸能水平和吸能效率均可描述橡胶的缓冲特性。

3.2 橡胶缓冲特性分析对比

考虑到橡胶材料静态压缩数据一致性更高,并且静动态压缩的缓冲分析方法相同,文中以静态压缩结果分析不同橡胶的缓冲特性。

利用式(4)对70%应变内不同橡胶材料的缓冲吸能特性 W 进行表征,获得材料吸能能力随压缩应变的变化规律,如图7所示。

分析图7可知,四种橡胶的吸能能力与其对应的

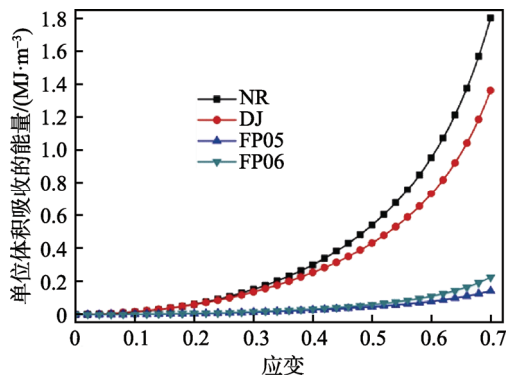


图7 橡胶吸能能力随应变的变化

应力-应变曲线关系一致。即在相同应变水平下,实心橡胶吸能能力远大于发泡橡胶,且发泡橡胶密度越小,缓冲吸能的能力越弱。

在实际工程应用中,评价材料的缓冲吸能能力时,通常需关注缓冲材料所受到的最大应力,即吸能效率 E 。按式(4)计算得到四种不同橡胶材料吸能能力随压缩应力的变化规律,如图8所示。

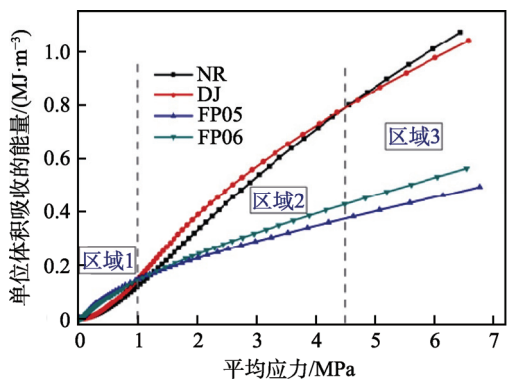


图8 橡胶吸能水平随应力的变化

由图8可知,随着压缩应力的增加,四种不同橡胶材料的吸能能力大致可以分为三个区域:在区域1中($\sigma \leq 1$ MPa),发泡橡胶材料的吸能能力大于实心橡胶材料;在区域2($1 \text{ MPa} < \sigma \leq 4.5 \text{ MPa}$)和区域3($\sigma > 4.5 \text{ MPa}$)中,发泡橡胶材料的吸能能力小于实心橡胶材料。在区域2中,四种橡胶材料的吸能能力从高到低依次为丁基橡胶、天然橡胶、发泡橡胶 II 和发泡橡胶 I。在区域3中,吸能能力从高到低依次为天然橡胶、丁基橡胶、发泡橡胶 II 和发泡橡胶 I。

3.3 缓冲防护橡胶的选择判据

在实际工程应用中,应当根据橡胶材料的真实受力状态,选择合适的橡胶作为缓冲材料。

1) 当需要缓冲的冲击能量较小,橡胶材料受到的应力较小时,发泡橡胶的吸能效率更高,该结论与发泡橡胶对轻质易脆产品防护的工程案例对应。

2) 当需要缓冲的冲击能量较大、橡胶材料受到的

应力较大时,实心橡胶与发泡橡胶相比,吸能效率更高,因此重型工程机械广泛采用天然橡胶作为缓冲材料。

3) 与天然橡胶相比,丁基橡胶的压缩吸能效率与天然橡胶接近,但丁基橡胶的阻尼更高,在变形回弹或形变周期内,其阻尼能够耗散更多的冲击能量,因此对于精密重型产品的冲击防护,可优先选择丁基橡胶作为缓冲材料。

4 结论

为研究适合产品冲击防护的橡胶材料,选择了工程中广泛应用的橡胶配方试样,基于准静态和动态压缩实验,对比工程中常用橡胶的压缩行为和缓冲特性,可得出以下结论:

1) 不同橡胶材料的压缩变形规律基本一致,橡胶材料压缩应力-应变曲线整体呈现出“右移”的趋势,即发泡密度越小,相同应变量下的压缩应力就越小,实心橡胶材料在相同应变量下的压缩应力远大于发泡橡胶材料。

2) 在相同应变水平下,实心橡胶的缓冲吸能能力明显强于发泡橡胶,而在相同应力水平下,橡胶材料的缓冲吸能能力则与材料实际所处受力区域有关。在小应力范围内($\sigma \leq 1 \text{ MPa}$),发泡橡胶的吸能能力更好,而在大应力范围内($\sigma > 1 \text{ MPa}$),实心橡胶的吸能能力更强。在工程中选取橡胶缓冲材料时,应当考虑其所处的应力环境。对于其余硬度的实心橡胶和发泡橡胶可得出类似结论,但应力区间有所不同。

3) 文中基于缓冲特性分析所得出的橡胶选择判据与橡胶的工程实例吻合,该判据可作为产品冲击防护结构中橡胶材料选择的依据,也可推广至同种橡胶在不同硬度下选择的判据。

参考文献:

- [1] 刘秀,李明,胡小玲,等. 炭黑填充橡胶材料的泊松比与体积压缩特性[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(7): 96-100.
- [2] 李晓颜,黄加才,王建月,等. 一类抗冲击载荷的新型橡胶减振器[J]. 宇航材料工艺, 2013, 43(1): 42-45.
- [3] HALL I W, GUDEN M, YU C J. Crushing of Aluminum Closed Cell Foams: Density and Strain Rate Effects[J]. Scripta Materialia, 2000, 43(6): 515-521.
- [4] 赵隆威,赵盛华,徐善才,等. EPS 缓冲材料的静、动态缓冲特性及其应用[J]. 振动与冲击, 1988(3): 59-64.
- [5] 张海波,孙金坤,谭立伟,等. 聚氨酯泡沫塑料吸能特性研究[J]. 材料科学与工程学报, 2004, 22(1): 117-120.
- [6] 赵江,宋阳,陈弦. 硅橡胶/TPU 动态硫化热塑性弹性体的配方和加工工艺的研究[J]. 塑料工业, 2014, 42(10): 60-64.
- [7] AMIN A F M S, ALAM M S, OKUI Y. Measurement of Lateral Deformation in Natural and High Damping Rubbers in Large Deformation Uniaxial Tests[J]. Journal of Testing & Evaluation, 2003, 31(6): 524-532.
- [8] 周相荣,王强,涂耿伟,等. 弯曲型橡胶缓冲器冲击试验与数值仿真[J]. 振动与冲击, 2007, 26(4): 97-100.
- [9] 郝长千,唐华平,聂拓,等. 橡胶缓冲器接触碰撞有限元分析[J]. 现代制造工程, 2009(3): 63-65.
- [10] 于治会. 小型跌落冲击台的设计原理[J]. 机械强度, 1995(4): 14-18.
- [11] 方浩,李秀地,耿振刚,等. 高阻尼橡胶填充钢制防护门动力响应数值模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(9): 173-177.
- [12] 苏远,汤伯森. 缓冲包装理论基础与应用[M]. 北京:化学工业出版社, 2006: 119-121.
- [13] 计宏伟,王怀文. 基于高速图像测量技术的缓冲材料缓冲性能的评价[J]. 振动与冲击, 2011, 30(9): 216-220.