文章编号：1000-5773(2011)05-0407-09

橡胶材料的动态压缩性能及其应变率相关的本构模型*

庞宝君，杨震琦，王立闻，迟润强

（哈尔滨工业大学航天学院，黑龙江哈尔滨　150080）

摘要：利用 Instron 万能试验机与 LC4 超硬铝合金分离式 Hopkinson 压杆设备，对 3 种不同波阻抗的橡胶材料——炭黑母胶(Carbon Black Rubber)、硅橡胶(Silicone Rubber)和泡沫橡胶(Foam Rubber)在较大应变率范围(0.002～15 000 s^{-1})内进行了单轴压缩实验，研究应变率对橡胶材料力学性能的影响。实验结果表明：3 种橡胶的准静态与动态应力-应变曲线具有不同的应变硬化形式，且动态加载下随着应变率的增大，硬化效应逐渐增强；在准静态及高应变率(12 000～15 000 s^{-1})压缩下，泡沫橡胶表现出多孔类材料压缩曲线的弹性、塑性崩塌及致密化 3 段特征。基于 Rivilin 应变能模型，构建了一个应变率相关的动态本构模型，模拟结果与实验结果吻合较好，可以用于描述较大应变率范围内 3 种橡胶的非线性应力-应变关系。

关键词：橡胶；分离式 Hopkinson 压杆；应变率效应；Rivlin 模型

中图分类号：O347.3；O347.4　　**文献标识码**：A

1　引　言

橡胶是一类具有可逆变形的高弹性聚合物材料，其分子量较大，线型分子呈细团状，当受到外力作用时，细团之间发生纠缠，分子链发生反弹，产生强烈的恢复倾向。当线型分子通过一些原子或原子团彼此交联形成三维网状结构时，橡胶各支链的自由活动能力减弱，材料整体的宏观强度、弹性和硬度上升，韧性下降。正是由于其独特的内部分子结构，橡胶类材料通常具有高弹性、低阻抗、低密度等特性，在汽车、航空航天、武器装甲、机械电子等工程领域中被广泛地用作减振、吸波和抗冲击材料。

目前，对橡胶类材料的力学模型研究主要集中在准静态加载条件下，比较典型的有：基于连续介质力学理论的 Rivilin 模型、Ogden 模型以及基于统计热力学的高斯统计模型、Arruda-Boyce 模型等[1-2]。但是，对于高应变率下材料的力学性能及本构关系研究仍处于起步阶段。

近年来，随着分离式 Hopkinson 压杆(Split Hopkinson Pressure Bar，SHPB)技术的改进，橡胶材料的动态力学行为及动态本构模型研究引起了工程界的广泛关注，例如：利用低阻抗金属(铝合金、镁合金)[3]或粘弹性聚合物(PMMA、Nylon)[4]作为导波杆材料，可以获取微弱的透射信号；缩小试件的长径比可以减小试件内部的应力均匀化时间[5]；使用应力计(压电陶瓷、PVDF 等)监测试件内部的应力均匀性[6-7]。根据 SHPB 实验结果，Song 等人[8]根据应变能理论，对准静态下橡胶材料的应变能本构关系进行了修正，提出了一种应变率相关的模型；王宝珍等人[9]改进了 Song 等人的模型，引入了温度软化效应；林玉亮等人[10]将 Ogden 模型与粘弹性和应变率系数相结合，得到了硅橡胶在单轴压缩下的动态本构模型。但是，由于橡胶

* **收稿日期**：2010-05-21；**修回日期**：2010-09-15

基金项目：国家空间碎片专题研究项目(KJSP06211)

作者简介：庞宝君(1963－)，男，博士，教授，主要从事空间碎片超高速撞击防护研究. E-mail：pangbj@hit.edu.cn

通讯作者：杨震琦(1981－)，男，博士，主要从事材料动态力学行为及应力波传播研究. E-mail：Z.Yang@neu.edu

类材料的动态压缩实验数据较少,目前还没有一种通用的应变率相关本构模型。

本研究利用 Instron 万能试验机和改进的 LC4 硬铝合金 SHPB 设备,研究炭黑母胶(Carbon Black Rubber,CBR)、硅橡胶(Silicone Rubber,SR)和泡沫橡胶(Foam Rubber,FR)在 0.002～15 000 s^{-1}大应变率范围内的应力-应变关系,并基于 Rivilin 应变能模型,建立一个含应变率效应的动态本构模型。

2 实验过程

2.1 橡胶材料

实验中采用的 3 种橡胶分别为炭黑母胶、硅橡胶和泡沫橡胶,其密度分别为 1.46、1.12 和 0.48 g/cm^3。炭黑母胶是由聚异戊二烯组成的天然橡胶经硫化交联及炭黑配合补强后形成的聚合物,具有机械强度高、耐碱、耐腐蚀等特点,因此常被用作轮胎、胶鞋等缓冲构件。硅橡胶为甲基乙烯基硅氧烷聚合物,具有加工性能好、耐高温等特点,常用作高温密封材料或生理功能结构。泡沫橡胶是具有孔眼结构的橡胶,由于其质量轻、吸能效应强等特点,经常用作减震、吸声等器件。

2.2 实验方法及过程

准静态实验是在 Instron 万能试验机上进行的,横梁移动速度分别为 0.5、0.75 和 1 mm/min。试件尺寸为:直径 10 mm,厚度 2.5～4 mm。

动态压缩实验是在直径为 12.7 mm 的 LC4 硬铝合金 SHPB 设备上进行的,入射杆和透射杆的长度均为 1.2 m,子弹长度为 0.2 m。图 1 为实验系统示意图。为了保证实验结果的有效性,每种材料在相同冲击速度下重复进行 5 次实验,取 5 次结果的平均值。

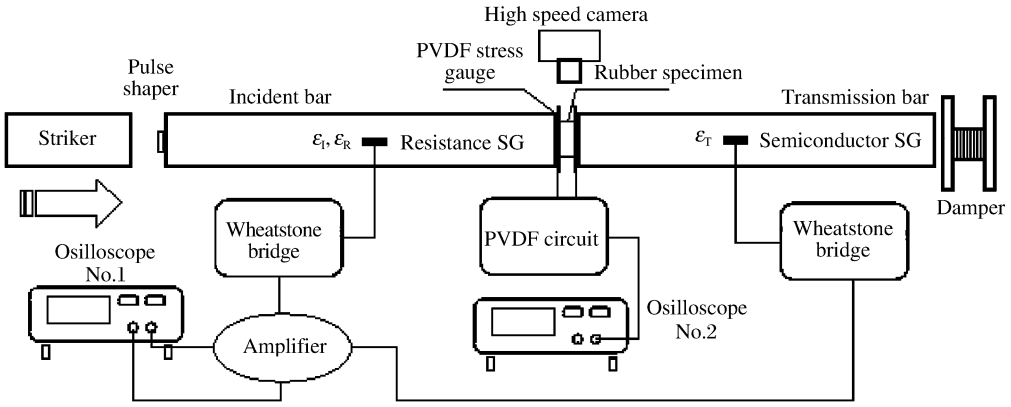


图 1 SHPB 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the SHPB experiment system

将传统 SHPB 实验进行改进,以便测量橡胶类材料的压缩性能。

(1) 使用半导体应变片获取透射波信息。半导体应变片具有高灵敏度、高信噪比等优点,适用于测量微弱的应变信号。由于橡胶较软,在低应变率加载下透射信号非常小,因此实验中用半导体应变片代替传统应变片,贴在输出杆中间位置进行透射波测量。

(2) 设计长径比小的试件。橡胶材料的波速较低,应力波在试件内部需要经过多次反射才能达到均匀状态,所需时间较长。实验中将试件加工成∅10 mm×2 mm 的短圆柱,以缩短单次应力波的传播时间,使试件很快达到应力均匀。

(3) 使用波形整形技术。利用 3 mm×3 mm×3 mm 的立方体铅垫整形器对入射波形进行控制,将矩形波整形为幂函数入射波,以延长脉冲上升沿,平滑波形,消除由弥散效应引入的高频振荡,使试件在加载过程中有足够的时间达到应力、应变均匀。此外,可以使试件在 60%以上的加载时间内保持常应变率加载,减小惯性效应的影响。

(4) 监测试件的轴向应力变化。在 SHPB 实验中,橡胶试件的轴向应力是否均匀直接决定实验结

果的有效性。利用自制的夹心式 PVDF 压电计[7],直接监测材料轴向的应力剖面变化,分析试件在压缩过程中的应力均匀性。

此外,在试件两端涂抹硅脂润滑剂,以减小试件与导波杆接触面的摩擦效应给实验结果带来的误差。利用高速摄影技术监测橡胶材料的轴向变形。图 2 为典型炭黑母胶材料在 19 m/s 的撞击速度下的原始实验波形。图 2 中包括 SHPB 实验中的入射波、反射波和透射波信号以及 PVDF 压电计测量的试件前、后表面压力的微分信号。可见,入射波与反射波的波形和振幅较为相似,半导体应变片将原本较小的透射信号进行了放大,保证了计算结果的精确度。由于 PVDF 前、后表面的信号近似重叠,为了容易辨认,将后表面信号沿横轴正向平移 250 μs。

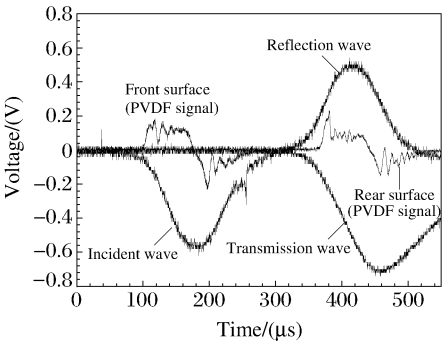


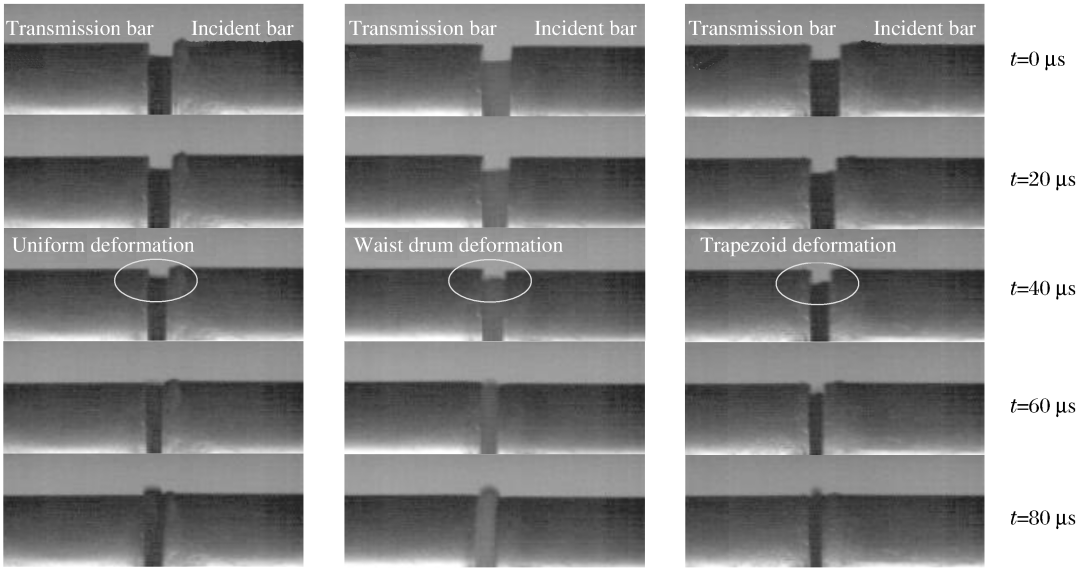
图 2 SHPB 实验的典型原始波形

Fig. 2 The typical original signal in SHPB experiment

3 实验结果与分析

3.1 宏观变形分析

图 3 为用高速相机拍摄的 3 种橡胶 SHPB 实验的变形过程,每张照片的时间间隔为 20 μs。为了便于比较,取照片的上半部分,3 次实验的应变率均约为 10 000 s^{-1}。由图 3 可知:炭黑母胶在整个压缩过程中其径向截面变形均匀,近似为平行于导波杆轴向的直线;硅橡胶在前 20 μs 的变形过程与炭黑母胶类似,径向变形近似均匀,当试件的轴向长度压缩到原始尺寸的 20% 以上时,均匀变形转变为明显的不均匀腰鼓状,80 μs 时材料已被挤出压杆截面,径向依然保持明显的腰鼓状突起;对于泡沫橡胶,在动态压缩过程中,靠近输入杆端的材料发生径向膨胀,而靠近输出杆端材料的径向膨胀明显小于前端,试件变为梯台形状,并且随着进一步压缩,梯台两端的面积比增大,60 μs 时试件的轴向变形已接近 60%,其径向膨胀仍未超过压杆截面。



(a) CBR, $\dot{\varepsilon}$=10 150 s^{-1} (b) SR, $\dot{\varepsilon}$=10 490 s^{-1} (c) FR, $\dot{\varepsilon}$=9 540 s^{-1}

图 3 SHPB 实验中试件的动态变形过程

Fig. 3 Dynamic deformation processes of specimens in SHPB experiment

造成 3 种橡胶在相同应变率下不同变形形式的原因主要有 3 点。

(1) 本实验所用的炭黑母胶是生胶经硫化交联后形成的多节点网状聚合物,牺牲了材料的部分变形能力使其增强、增硬;硅橡胶为甲基乙烯基硅氧烷聚合物,内部硫化交联程度小,与炭黑母胶相比较为柔软;泡沫橡胶内部具有孔眼结构,减小了自身的强度和刚性。也就是说,炭黑母胶、硅橡胶、泡沫橡胶的波阻抗和强度依次减小,与导波杆阻抗之比依次增大。材料越"软",摩擦效应引起的端面变形越明显,越容易引起端面处不均匀变形。

(2) 在 SHPB 实验中,试件为绝热压缩,所产生的热使橡胶试件温度升高。根据高聚物材料的热弹效应,橡胶在高温下具有收缩趋势。由于硅橡胶对温度不敏感,因此始终保持较强的弹性。而炭黑母胶受温度影响较大,压缩时易于发生收缩,使轴向应变更均匀。

(3) 炭黑母胶与硅橡胶是两种致密橡胶,在 SHPB 实验中可近似为体积不可压缩固体[2],因此在 80 μs 时出现了相同的挤出现象。而泡沫橡胶是一种多孔材料,压缩过程中靠近输入杆端的孔隙首先坍塌,并逐层向内部压缩,产生梯台状变形,且径向变形小于炭黑母胶和硅橡胶。

3.2 轴向应力均匀性

对于软材料,如橡胶、聚合物、泡沫塑料和轻质泡沫金属等,由于材料内部波速较低,因此在 SHPB 实验过程中需要考虑试件前、后表面的应力均匀性对实验结果所造成的影响。为了准确测量橡胶材料的应力均匀性,在试件两端放置 PVDF 压电计,用以测量试件前、后表面的应力变化。对 PVDF 信号进行积分,转换成应力信号,图 3 中 3 组实验所对应的应力信号见图 4。

由图 4 可知,炭黑母胶与硅橡胶在加载过程中其前、后两端面的应力信号较为一致;而泡沫橡胶在 130 μs 时其前表面应力的增加速率突然减缓,这主要是由置于前表面的 PVDF 压电计在动态压缩过程中发生局部破坏致使放电量降低而造成的,在压电计破坏之前,泡沫橡胶前、后端面的应力剖面近似一致。因此,利用长径比为 0.2 的短圆柱试件能够满足 SHPB 理论中关于试件内部应力均匀性的假设,保证了实验结果的可靠性。

进一步观察图 4(c)可知,与其它两种橡胶不同,泡沫橡胶的应力上升可分为两段,初始段应力上升较快,在入射波加载 40 μs 后,应力上升速度变缓,表现出多孔材料特征,即应变较小时,材料发生弹性变形,单元孔壁均匀变形,模量较大。随着压力的进一步增大,加载端单元不足以承受加载压力,孔壁发生屈曲并向内部传播,此时泡沫橡胶材料的承载能力减弱,模量降低。由于实验中的撞击速度较低,因而在后续过程中泡沫橡胶试样并未进入致密化阶段。

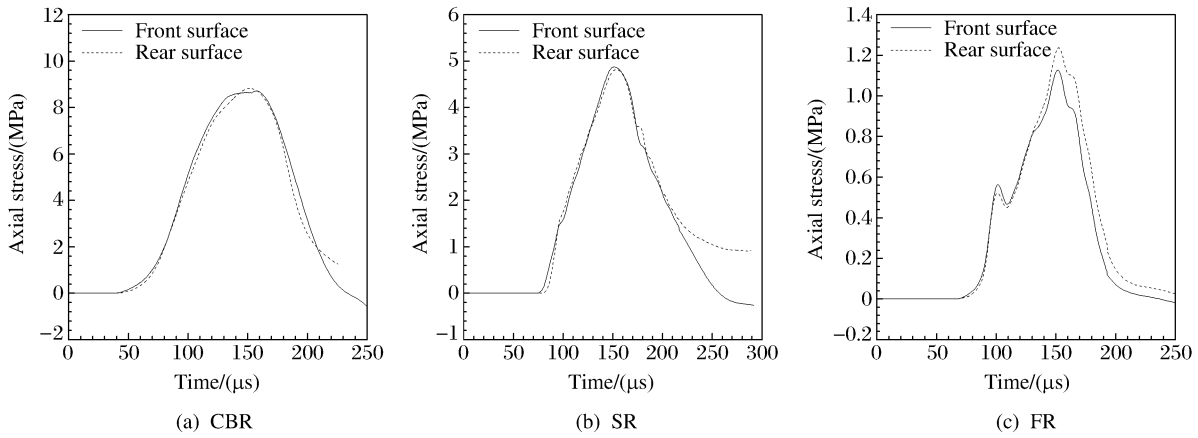


图 4 橡胶材料前、后表面的应力-时间曲线

Fig. 4 Stress-time curves of the front and rear surfaces of rubber materials

3.3 应力-应变曲线

图 5～图 7 为 Instron 准静态压缩与 SHPB 实验得到的炭黑母胶、硅橡胶和泡沫橡胶在不同应变率下的工程应力-应变曲线。可见,3 种材料的应力-应变曲线是高度非线性的,并且存在明显的应变率效应。

图 5(a)为炭黑母胶在准静态压缩下的应力-应变曲线,可以看出,炭黑母胶表现出橡胶等高聚物材料特有的上凹特征,即硬化现象,随着压缩量的增加,橡胶回弹趋势逐渐增强,表现为宏观强度增大,硬化效

应逐渐增强。图 5(b)～图 5(d)为 SHPB 实验测得的炭黑母胶的应力-应变曲线。对比图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)和图 5(d)可知:当应变率 $\dot{\varepsilon}<2\,000\ s^{-1}$ 时,应力-应变曲线呈现出上凸特征,即随着应变增大,应力逐渐增大,但硬化效应趋于平缓;当应变率范围为 2 000～10 000 s^{-1} 时,应变硬化效应逐渐增强,应力-应变曲线由上凸硬化转变为线性硬化;当 $\dot{\varepsilon}>10\,000\ s^{-1}$ 时,应力-应变曲线发生上凹,且应变率越大,上凹越明显。因此,炭黑母胶存在明显的应变率效应,并且随着应变增大,应变率强化效应逐渐增强。

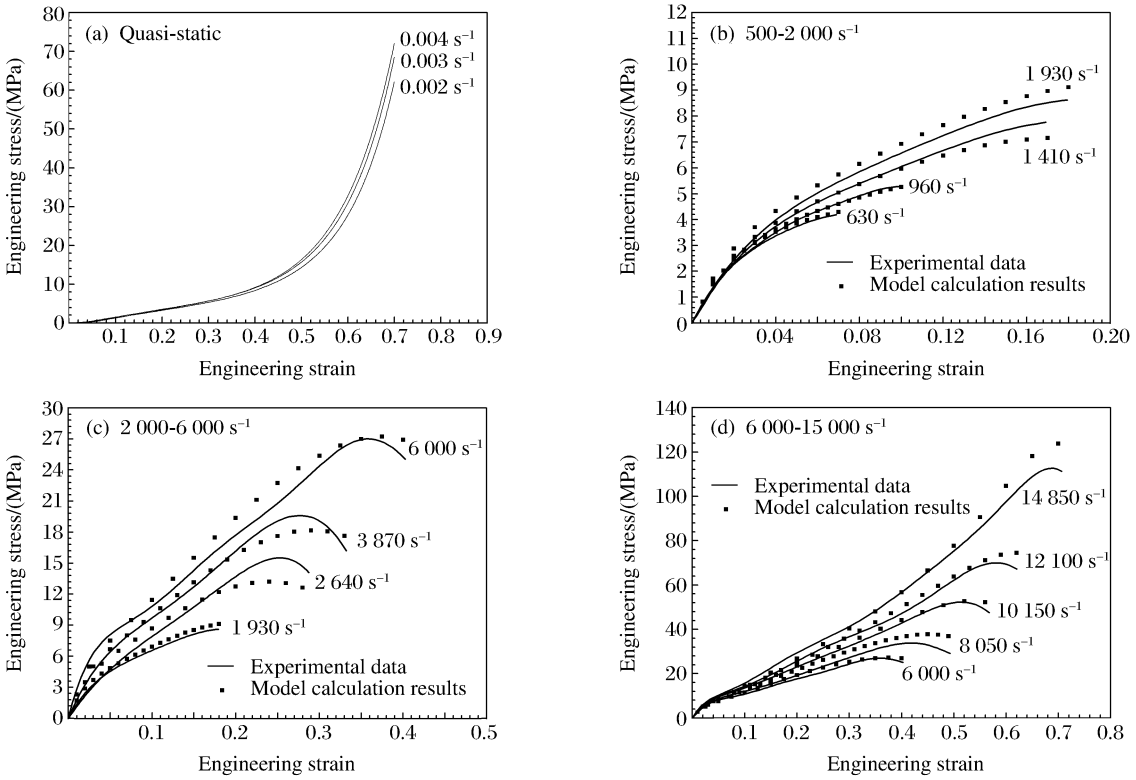


图 5　炭黑母胶在不同应变率下的应力-应变曲线

Fig. 5　Stress-strain curves of carbon black rubber under different strain rates

在 SHPB 实验中,绝热温升是造成材料在准静态与动态压缩下表现出不同硬化形式的主要原因。一方面,温度上升使材料模量等力学参数发生变化,致使材料软化;另一方面,热弹效应使橡胶在绝热温升下趋于收缩,更易于压缩。当材料压缩达到一定范围时,其内部分子链的交缠程度增大,产生的回复力对材料性能起关键作用,增强了硬化效应,说明橡胶材料并不能无限压缩。

图 6 为硅橡胶在不同应变率下的应力-应变曲线。由图 5、图 6 可知,硅橡胶和炭黑母胶具有类似的硬化规律,并且在小应变情况下硅橡胶的应变率强化效应比炭黑母胶更明显。与炭黑母胶不同的是,在高应变率(2 000～15 000 s^{-1})下,硅橡胶不存在线性应变硬化阶段,应力-应变曲线均表现为上凹形状。硅橡胶同样具有较强的应变率效应。

图 7 为泡沫橡胶在不同应变率下的应力-应变曲线。泡沫橡胶的力学性能是应变率相关的,但曲线规律却与炭黑母胶和硅橡胶两种致密橡胶明显不同。在准静态下,泡沫橡胶的力学行为更接近于多孔材料。在压缩状态下主要分为 3 个阶段:(1) 弹性阶段(应变小于 0.067),泡沫橡胶内部单元孔壁发生微小变形,但整个结构仍处于弹性状态,该阶段的弹性模量为 0.94 MPa;(2) 塑性崩塌阶段(应变范围为 0.067～0.62),随着进一步压缩,单元孔壁逐渐发生屈曲,由于材料是闭孔泡沫橡胶,因此这部分主要是气体承载,相比于弹性段的单元承载,该阶段的应力增长缓慢;(3) 致密化阶段(应变大于 0.62),单元内气体逐渐随孔壁缺陷排出,材料由多孔状转变为致密介质,随着应变的增加,应力急剧增大。不同应变率下,准静态应力-应变曲线近似重合,表明在准静态压缩下泡沫橡胶对应变率不敏感。虽然泡沫橡胶具有多孔材料的 3 阶段典型特征,但是由于其弹性段与塑性段斜率相差不大,因此应力-应变曲线可近似为上凹的硬化形式。

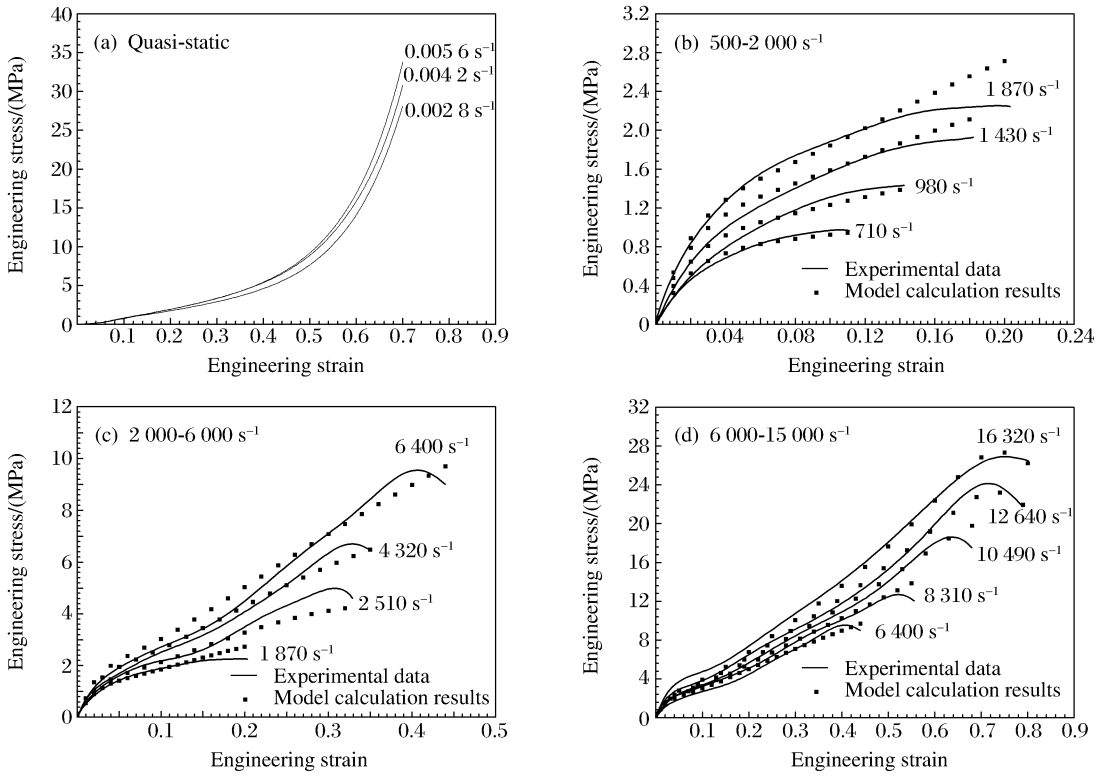


图 6 硅橡胶在不同应变率下的应力-应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of silicon rubber under different strain rates

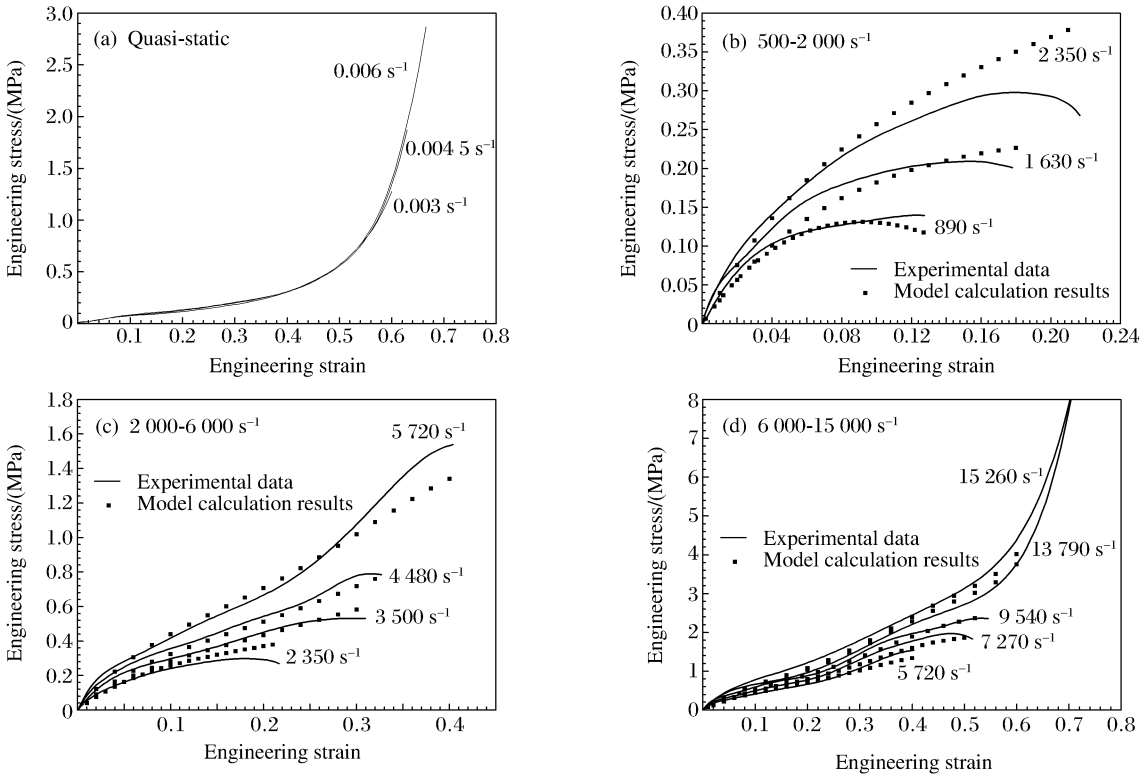


图 7 泡沫橡胶在不同应变率下的应力-应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of foam rubber under different strain rates

当应变率小于 2 000 s^{-1}时,随着应变率的增大,泡沫橡胶的弹性极限逐渐增大,弹性段与塑性段的分界逐渐模糊,没有像准静态压缩那样的明显分界点,由于尚未进入致密化阶段,曲线更类似于致密橡胶在低应变率下的响应,表现为上凸形状的应变硬化,平台段斜率随应变率的增加逐渐增大。当应变率在 2 000～10 000 s^{-1}范围内时,由于橡胶变形的粘性机制,塑性段强度随应变率的提高而增大,硬化作用越来越大,塑性段的力学行为与致密橡胶类似,硬化特征由水平直线转变为斜率逐渐增大的曲线。当应变率在于 10 000 s^{-1}时,与炭黑母胶和硅橡胶明显不同,在泡沫橡胶的应力-应变曲线中可以明显看到压实阶段。

3.4　应变率相关的本构模型

橡胶类超弹材料的力学性能一般用应变能函数进行描述。本研究选取一种常用的含应变不变量的唯象模型——Rivilin 模型来推导动态单轴压缩下橡胶的响应。应变能函数[2]为

$$W=\sum_{i+j=1}^{n}C_{ij}(I_1-3)^i(I_2-3)^j \tag{1}$$

式中:W 为应变能函数;n 为多项式的阶数;C_{ij} 为 Rivlin 系数;I_1、I_2 为应变不变量,可以用 3 个方向的主伸长率 λ_1、λ_2、λ_3 表示。单轴压缩下有

$$I_1=\lambda_1^2+\lambda_2^2+\lambda_3^2=\lambda^2+2/\lambda \tag{2}$$

$$I_2=\lambda_1^2\lambda_2^2+\lambda_2^2\lambda_3^2+\lambda_3^2\lambda_1^2=1/\lambda^2+2\lambda \tag{3}$$

取 $n=2$,则(1)式可变为

$$W=C_{10}(I_1-3)+C_{01}(I_2-3)+C_{11}(I_1-3)(I_2-3)+C_{20}(I_1-3)^2+C_{02}(I_2-3)^2 \tag{4}$$

橡胶的参考工程应力可以用应变能函数表示,即

$$\sigma_e=\mathrm{d}W/\mathrm{d}\lambda \tag{5}$$

由图 5～图 7 可知,高应变率下的应力-应变曲线在小应变条件下,应变硬化效应明显。因此,在(5)式中加入修正项 $1+M\lambda^{-N}$,用以描述加载初期的应变硬化,则(5)式变为

$$\sigma_{e1}=\sigma_e(1+M\lambda^{-N}) \tag{6}$$

式中:M、N 为修正系数。利用主伸长率的二次函数来近似描述不同应变率下应力的变化情况,(6)式最终可以扩展为

$$\sigma_{e2}=\sigma_{e1}\left(1+\frac{D}{A\lambda^2+B\lambda+C}\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)=\frac{\mathrm{d}W}{\mathrm{d}\lambda}(1+M\lambda^{-N})\left(1+\frac{D}{A\lambda^2+B\lambda+C}\ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \tag{7}$$

式中:σ_{e2} 为动态压缩下的工程应力,λ 为轴向主伸长率,A、B、C、D 为应变率敏感性系数,$\dot{\varepsilon}_0$ 为参考应变率。

采用(7)式,对 3 种橡胶在 6 种应变率(500、1 000、2 000、5 000、10 000、150 000 s^{-1})下实测的应力-应变曲线进行最小二乘法拟合,得到的模型参数列于表 1,图 5～图 7 中的实心点即为拟合结果。从图 5～图 7 可以看出,除了在较低应变率($\dot{\varepsilon}<2\,000\ s^{-1}$)下拟合结果与实验曲线存在一定偏差外,较高应变率下的拟合结果与实验得到的应力-应变曲线在线形、幅值、变化趋势等方面具有较好的一致性。但是,由于模型未考虑多孔橡胶压实后的应力陡增,因此该模型并不能反映泡沫橡胶在高应变率下的致密化阶段。

表 1　3 种橡胶材料的模拟参数

Table 1　Parameters of material model for three kinds of rubbers

Materials	C_{10}/(MPa)	C_{01}/(MPa)	C_{11}/(MPa)	C_{20}/(MPa)	C_{02}/(MPa)	M
CBR	42.44	−61.30	−27.30	25.46	7.18	1.52
SR	−0.94	5.56	0.40	1.20	−0.06	2.45
FR	−1 349.40	1 060.16	1 023.55	−1 499.48	−247.22	−0.99
Materials	N	A	B	C	D	$\dot{\varepsilon}_0$/(s^{-1})
CBR	−31.45	−1.17	−8.03	2.03	10.89	1
SR	−27.79	−0.57	−1.17	−0.81	4.86	1
FR	0.01	−0.07	−0.08	−0.33	0.69	1

3.5 模型验证

为了进一步验证修正的 Rivilin 模型的正确性，利用 LS-DYNA 显式有限元分析软件，对 SHPB 实验中橡胶材料的动态变形过程进行模拟。建立与图 3 相同工况的有限元模型，三维实体模型采用 8 节点的 Solid 164 动态显式单元进行网格划分。有限元模型各界面的接触为点面接触条件，并且假设界面之间光滑无摩擦。入射杆与透射杆材料均为硬铝合金，采用线弹性材料模型建模。利用 3.4 节中修正的 Rivilin 本构模型，将 3 种橡胶自定义输入到 LS-DYNA 显式有限元分析软件中。对于泡沫橡胶，在修正模型的基础上添加气体强化项，用以描述材料内部闭孔单元中的气体增压效应，即

$$\sigma_{\mathrm{air}} = -p_0\gamma/(1+\gamma-\varphi) \tag{8}$$

式中：p_0 为胞孔内的气体压力，γ 为体应变，φ 为多孔材料体密度与理想材料密度之比。

图 8 为模拟得到的 3 种橡胶的动态变形过程。对比图 3 可知，数值计算可以准确地模拟出炭黑母胶、硅橡胶和泡沫橡胶在动态压缩过程中的轴向变形特性。由于数值模拟中泡沫橡胶的泊松比较小，因此在 80 μs 时才挤出导波杆截面，这与实验结果吻合。进一步证明了修正的 Rivilin 模型的正确性。

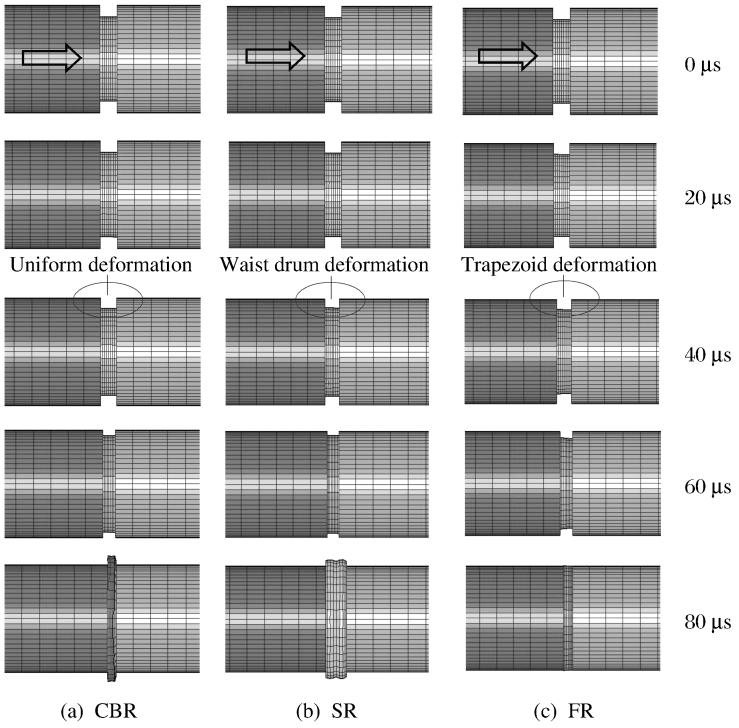


图 8 SHPB 数值模拟试件的动态变形过程

Fig. 8 Dynamic deformation processes of specimens for SHPB numerical simulation

4 结 论

在较宽的应变率范围内实验研究了炭黑母胶、硅橡胶及泡沫橡胶的压缩力学性能，并基于修正的 Rivilin 模型建立了应变率相关的本构模型，得到以下主要结论。(1) 通过改进 SHPB 实验技术并合理设计试件尺寸，能有效地保证压缩过程中大部分时间内材料内部轴向应力、应变均匀，满足 SHPB 的均匀性假设。(2) 3 种橡胶均表现出很强的应变率强化效应，并且随着应变的增大，强化效应逐渐增强。在准静态压缩与动态压缩下，材料表现出不同的硬化形式，主要是由动态绝热温升造成的。随着应变率增大，炭黑母胶的硬化效应表现为上凹硬化(准静态)－上凸硬化(500～2 000 s^{-1})－线性硬化(2 000～10 000 s^{-1})－上凹硬化(10 000 s^{-1} 以上)；硅橡胶表现为上凹硬化(准静态)－上凸硬化(500～2 000 s^{-1})－上凹硬化(2 000 s^{-1} 以上)；泡沫橡胶则表现出多孔材料的弹性、塑性崩塌及致密化 3 阶段特征。在中应变率(500～10 000 s^{-1})加载下，由于弹性段与塑性崩塌段界面不明显，泡沫橡胶的应变率强化及应变

硬化形式与致密橡胶类似。(3) 基于 Rivilin 模型,考虑小应变硬化段与应变率强化效应的影响,数值模拟了 3 种橡胶在较宽应变率范围内的应力-应变关系。模拟结果与实验数据吻合较好,但该修正模型不能预测高应变下泡沫橡胶的致密陡增现象。

References:

[1] Boyce M C, Arruda E M. Constitutive Models of Rubber Elasticity: A Review [J]. Rubber Chem Technol, 2000, 73(3): 504-523.

[2] Treloar L R G. The Physics of Rubber Elasticity [M]. Oxford: Oxford University Press, 1975: 1-208.

[3] Sarva S S, Deschanel S, Boyce M C, et al. Stress-Strain Behavior of a Polyurea and a Polyurethane from Low to High Strain Rates [J]. Polymer, 2007, 48(8): 2208-2213.

[4] Zhao H, Elnasri I, Abdennadher S. An Experimental Study on the Behaviour under Impact Loading of Metallic Cellular Materials [J]. Int J Mech Sci, 2005, 47(4-5): 757-774.

[5] Chen W, Zhang B, Forrestal M J. A Split Hopkinson Bar Technique for Low-Impedance Materials [J]. Exp Mech, 1999, 39(2): 81-85.

[6] Song B, Chen W. Dynamic Stress Equilibration in Split Hopkinson Pressure Bar Tests on Soft Materials [J]. Exp Mech, 2004, 44(3): 300-312.

[7] Pang B J, Yang Z Q, Wang L W, et al. PVDF Stress Gauges Dynamic Stress Measurement and Its Application to SHPB Experiment for Rubber Materials [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(5): 359-367. (in Chinese)
庞宝君,杨震琦,王立闻,等. PVDF 压电计的动态响应特性及其在橡胶材料 SHPB 实验中的应用 [J]. 高压物理学报, 2010, 24(5): 359-367.

[8] Song B, Chen W. One-Dimensional Dynamic Compressive Behavior of EPDM Rubber [J]. J Eng Mater Technol, 2003, 125(3): 294-301.

[9] Wang B J, Hu S S, Zhou X R. Research of Dynamic Mechanical Behavior and Constitutive Model of Rubber under Different Temperatures [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2007, 22(1): 1-6. (in Chinese)
王宝珍,胡时胜,周相荣. 不同温度下橡胶的动态力学性能及本构模型研究 [J]. 实验力学, 2007, 22(1): 1-6.

[10] Lin Y L, Lu F Y, Lu L. Constitutive Behaviors of a Silicone Rubber at High Strain Rates [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2007, 21(3): 289-294. (in Chinese)
林玉亮,卢芳云,卢　力. 高应变率下硅橡胶的本构行为研究 [J]. 高压物理学报, 2007, 21(3): 289-294.

Dynamic Compression Properties and Constitutive Model with Strain Rate Effect of Rubber Material

PANG Bao-Jun, YANG Zhen-Qi, WANG Li-Wen, CHI Run-Qiang

(*School of Astronautics, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *China*)

Abstract: This paper presents experimental study on the quasi-static and dynamic impact response for three kinds of rubbers: carbon black rubber, silicone rubber and foam rubber by using Instron machine and SHPB device. Experimental strain rate covers a wide range from 0.002 s^{-1} to 15000 s^{-1}. The strain rate effects on mechanical properties of rubber materials are discussed. The results show that the quasi-static and dynamic engineering strain-stress curves exhibite different strain hardening forms. Under dynamic loading, the significant rate sensitivities are observed i. e. with strain rate increasing the hardening effect is enhanced. With quasi-static and high strain rate (12000-15000 s^{-1}) loading, the mechanical properties of foam rubbers show typical three stages: elastic deformation, plastic deformation and collapse portion. A constitutive model with strain rate effect is presented based on Rivilin strain energy function, which shows good agreement with experimental data.

Key words: rubber; split Hopkinson pressure bar; strain rate effect; Rivlin model