文章编号：1000-5773(2007)03-0289-06

高应变率下硅橡胶的本构行为研究*

林玉亮，卢芳云，卢 力

（国防科技大学理学院技术物理研究所，湖南长沙 410073）

摘要：硅橡胶是一种高分子聚合物，可以承受大变形，用途广泛。利用改进的分离式霍普金森压杆(SHPB)实验技术，对硅橡胶试样进行了不同应变率下的冲击压缩实验，基于实验数据，利用应变能函数构建了考虑应变率效应的材料本构形式。同时，实验过程中发现，在高应变率加载条件下，材料在压缩变形后出现了损伤线区，线区直径与加载应变率及试样尺寸之间存在一定的定量关系。

关键词：硅橡胶；分离式霍普金森压杆(SHPB)；本构关系；高应变率；应变能函数

中图分类号：O347.3 **文献标识码**：A

1 引 言

硅橡胶是一种高分子聚合物，其分子是由 Si—O(硅—氧)键连成的链状结构，主要组成是高摩尔质量的线型聚硅氧烷。由于 Si—O—Si 键是其构成的基本键型，硅原子主要连接甲基，侧链上引入极少量不饱和基团，分子间作用力小，分子呈螺旋状结构，甲基朝外排列并可自由旋转，使得硅橡胶比其它普通橡胶具有更好的耐热性、电绝缘性和化学稳定性等。典型的硅橡胶即聚二甲醛硅氧烷，具有一种螺旋形分子构型，其分子间力较小，因而具有良好的回弹性，同时指向螺旋外的甲醛基可以自由旋转，因而使硅橡胶具有独特的表面性能，如憎水性及表面防粘性。另外，由于硅橡胶具有生理惰性、无毒，与其它材料无粘着能力，并能经受多次蒸煮消毒的特点，广泛用于医疗卫生和食品工业方面。

本工作测试的材料是由兵器工业集团公司提供的代号为 WSXJ-208 的改性硅橡胶，密度为 1 180 kg/m^3。它以硅橡胶为主要原料，添加了增强填料、阻尼填料、硫化剂等，具有优异的耐热、耐寒以及电绝缘和阻尼等性能，已经广泛应用于垫圈、密封件、高温电线、电缆原料以及特种车辆、光电仪器仪表的减震器和缓冲器等。

本工作利用改进的分离式霍普金森压杆(SHPB)实验技术，研究硅橡胶材料在高应变率下的力学响应，建立材料本构模型，分析在冲击加载条件下破坏模式与加载应变率之间的关系。

2 实验简介

实验是在国防科技大学理学院轻气炮实验室的 SHPB 实验装置上进行的，压杆材料为 LC4 超硬铝合金，压杆直径为 20 mm，入射杆和透射杆长度分别为 1 980 mm 和 1 000 mm，子弹长 300 mm。

由于所测试的硅橡胶材料是一种波阻抗很低的软材料，实验中考虑了软材料在 SHPB 实验中的试样尺寸设计[1]，将试样加工成直径为 14 mm，厚度分别为 2 mm 和 4 mm 的圆柱体。同时，应用入射波整形技术[2-3]，使得试样在加载过程中保持应力平衡和实现常应变率加载；并应用石英晶体测试技术[4-5]监测试样两端的应力平衡、测量弱透射信号。另外，在实验过程中，在试样两端面及压杆端面均匀地涂抹二硫化钼润滑剂，尽量消除端面摩擦的影响。

* **收稿日期**：2006-08-16；**修回日期**：2007-01-12

基金项目：国家自然科学基金项目(10672177)；国防科技大学预研项目(JC07-02-06)

作者简介：林玉亮(1978—)，男，博士，讲师. 主要从事材料动态性能测试研究. E-mail：ansen_liang@163.com

图 1 是 2 mm 和 4 mm 厚试样在应变率分别为 3 600 s^{-1}和 3 500 s^{-1}时得到的真实应力-应变曲线，从图中可以看出，两曲线基本是一致的。这表明，在保证试样受力平衡的前提下，采取足够的端面润滑措施，消除了二维效应，2 mm 与 4 mm 的试样厚度对实验结果几乎没有影响，两种厚度试样的实验结果所反映的材料性质都是可靠的。为了实现较高的应变率，本工作主要采用 2 mm 厚试样的实验结果。

图 2 给出了 4 种不同应变率下的真实应力-应变曲线。图中数据点(标注符号)为原始实验数据，曲线是对实验数据进行六次多项式拟合得到的结果。考虑到 SHPB 实验要求试样在压缩过程中侧面膨胀不能超出压杆的直径范围，因此对于此次实验，使用直径∅14.0 mm 试样与∅20.0 mm 压杆，若认为硅橡胶不可压缩，SHPB 实验测试可得到有效结果的最大工程应变为 0.51，对应的最大真实应变为 0.69。

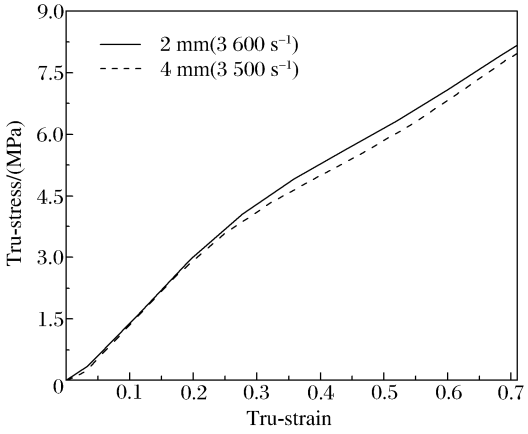


图 1 2 mm 和 4 mm 厚度试样应力-应变曲线比较

Fig. 1 Comparison of σ-ε curves between 2 mm and 4 mm thick specimen

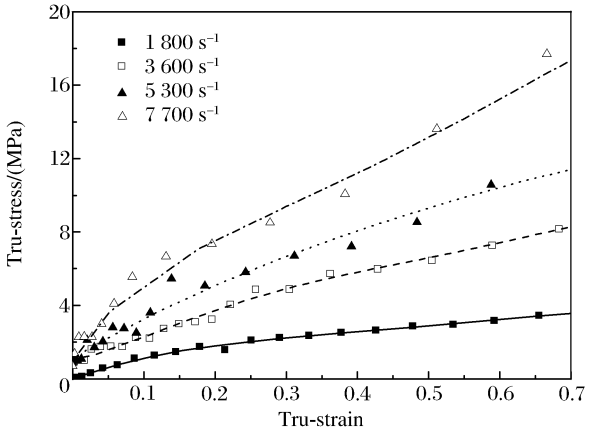


图 2 硅橡胶材料 SHPB 压缩实验应力-应变曲线

Fig. 2 True σ-ε curves of the silica rubber at a series of high strain rates

图 2 中的应力-应变曲线表明，本次实验所测试的硅橡胶材料具有明显的应变率敏感性，并表现出一定的粘弹性响应特征。同时，从图 2 中可以看到，对于硅橡胶这种高聚物材料，由于应力-应变曲线在有效测试范围内应力一直是上升的，因此很难像其它材料一样给出试样的弹性模量、屈服强度等参数。这里，以应力-应变曲线上真实应变 0.2 处对应点到原点连线的斜率来表示杨氏模量，称之为割线模量 E_g。另外，为了比较材料性质的应变率效应，这里取每条曲线真实应变 0.5 处对应的应力值作为参考值进行比较。表 1 列出了在不同加载应变率下，应力-应变曲线的割线模量 E_g 及真实应变 0.5 处所对应的应力值随应变率的变化情况(试样尺寸为∅14.0 mm×2.0 mm)。表中参数可以说明，实验所测试的硅橡胶材料模量非常低，且模量对应变率非常敏感。当应变率在 7 700 s^{-1}时，上面所说的割线模量 E_g 只有 28 MPa，如果依据线弹性理论 $c=\sqrt{E/\rho}$ 来计算材料的弹性波速，可以估算得到硅橡胶材料的弹性波速为154 m/s，而对于应变率为 700 s^{-1}的应力-应变曲线，计算得到的材料弹性波速只有 52 m/s。如此低的波速也是硅橡胶试样难以实现应力平衡的主要原因。

表 1 硅橡胶试样主要力学参量随应变率变化的情况

Table 1 Tested material parameters

$\dot{\varepsilon}$/(s^{-1})	E_g/(MPa)	$\sigma_{0.5}$/(MPa)	$\dot{\varepsilon}$/(s^{-1})	E_g/(MPa)	$\sigma_{0.5}$/(MPa)
1 800	6.25	2.89	5 300	20.25	9.28
3 600	13.55	6.59	7 700	28.00	13.17

3 本构行为分析

从应力-应变曲线图 2 可以看到，本次实验测试的硅橡胶材料表现出了明显的应变率效应，同时还

具有一定的粘弹性特性,而粘弹性力学行为的一个主要特征是应变(或应变率)历史影响当前的应力状态。对应变历史效应来说,若在时间 τ_i 添加一个应变增量 $\Delta\varepsilon_i$($i=1,2,3,\cdots$),按照叠加原理,到时间 t 总的应力为[6]

$$\sigma(t)=\sum_i \Delta\varepsilon_i G(t-\tau_i)=\int_0^{\varepsilon} G(t-\tau)\mathrm{d}\varepsilon(\tau) \tag{1}$$

习惯上,将上式改写为 τ 的函数,有

$$\sigma(t)=\int_0^t G(t-\tau)\,\frac{\mathrm{d}\varepsilon(\tau)}{\mathrm{d}\tau}\mathrm{d}\tau \tag{2}$$

式中:$G(t-\tau)$为松弛函数。另外,从(2)式可以看到,在考虑应变历史效应的过程中也同时考虑了应变率效应。如果只考虑简单的应变率影响,上述松弛函数可以写为

$$G(t)=\sum_{i=1}^{n} G_i \mathrm{e}^{-\beta_i t} \tag{3}$$

式中:G_i 为材料常数,β_i 为延迟常数,两者均可以通过对实验结果拟合得到,n 的值可由实验曲线情况决定。这里将对 $n=1,2,3$ 分别进行拟合,依据拟合情况取最小的 n 值。

在大多数情况下,Mooney-Rivlin 模型与 Ogden 模型都可用来分析橡胶材料的本构行为。但 Mooney-Rivlin 模型参数简单,很难直接或间接地添加进应变率相关系数或选项来描述材料的应变率效应。在 LS-DYNA 材料模型 Mat-Ogden-Rubber(Material Type 77)中给出的 Ogden 模型,在不可压缩假设下表示形式为[7]

$$W=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{3}\frac{\mu_j}{\alpha_j}\left(\lambda_i^{\alpha_j}-1\right) \tag{4}$$

式中:λ_i($i=1,2,3$)为主伸长率,μ_j、α_j($j=1,2,3,\cdots$)为材料常数,对实验结果拟合得到。对于不可压缩超弹性材料,在单轴应力状态下,可以得到单轴应力 σ_{11} 与主伸长率 λ_1 间的关系为

$$\sigma_{11}=\lambda_1\frac{\partial W}{\partial\lambda_1}-\lambda_2\frac{\partial W}{\partial\lambda_2}=\sum_{j=1}^{3}\frac{\mu_j}{\alpha_j}\left[\lambda_1^{\alpha_j-1}-\lambda_1^{-(\alpha_j/2)-1}\right] \tag{5}$$

下面考虑在用 Ogden 模型得到的应力计算公式(5)式的基础上,叠加上(2)式来描述硅橡胶材料的粘弹性行为与应变率效应。

单轴压缩时有

$$\lambda_1=1-\varepsilon,\quad \dot{\lambda}_1=\dot{\varepsilon} \tag{6}$$

式中:ε 为单轴压缩状态下得到的工程应变。

综合上述分析,考虑应变对应力的影响趋势,可以得到单轴冲击压缩状态下硅橡胶试样的工程应力计算公式为

$$\sigma_{11}=\sum_{j=1}^{3}\frac{\mu_j}{\alpha_j}\left[\lambda_1^{\alpha_j-1}-\lambda_1^{-(\alpha_j/2)-1}\right]+\int_0^t(1-\lambda_1)\sum_{i=1}^{n}G_i\exp\left[-\beta_i(t-\tau)\right]\dot{\lambda}_1(t)\mathrm{d}\tau \tag{7}$$

式中:时间积分域和应变率时间曲线由实测曲线确定,α_j、μ_j($j=1,2,3$)、G_i、β_i($i=1,\cdots,n$)通过对实验结果拟合得到。

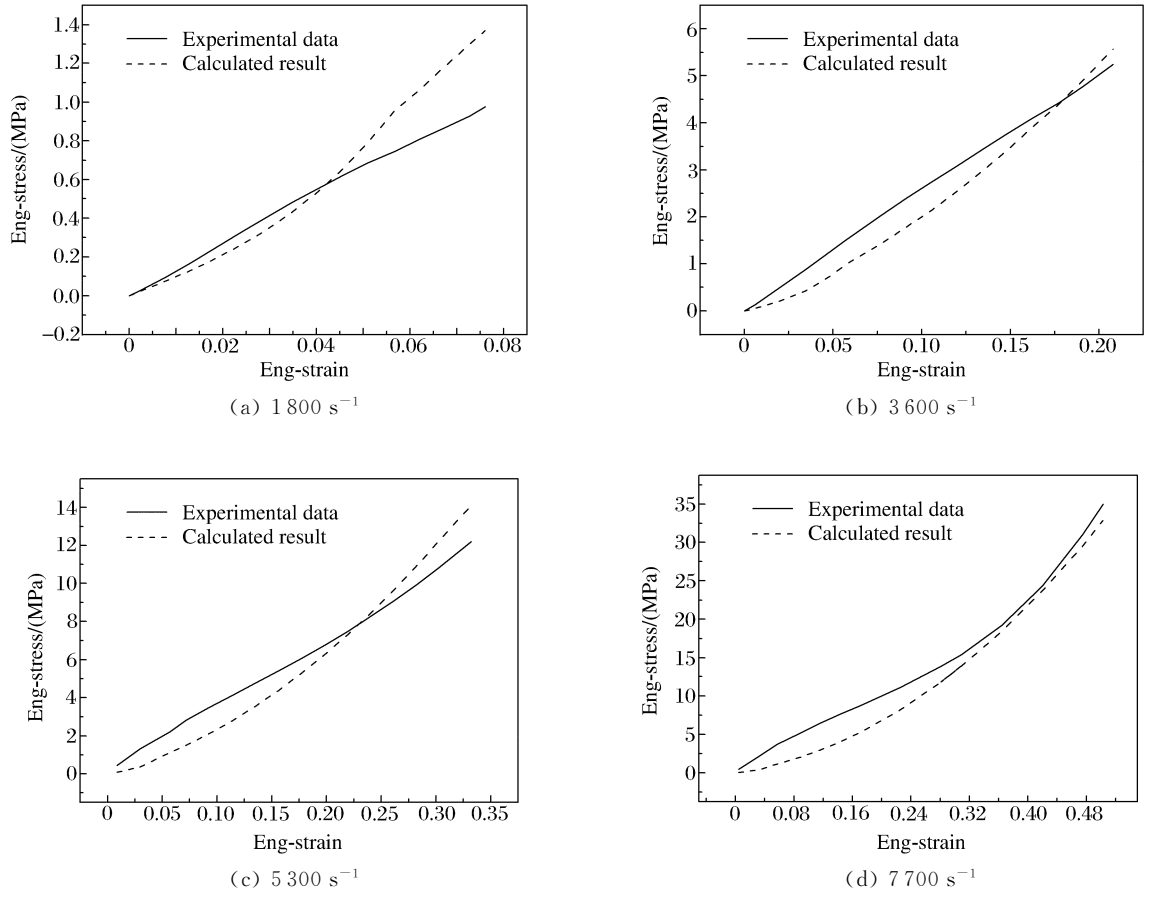
需要指出的是,(7)式中的时间积分区间对于不同的加载应变率应该取相同的范围,即材料的应变率效应与应变历史效应应结合在一起考虑。从实验结果看,当加载应变率为 7 700 s^{-1}时,试样达到工程应变 0.51 所需要的时间为 73.6 μs,下面即以 73.6 μs 为基准,考虑材料应力-应变曲线的应变率效应和应变历史效应。当加载时间 $t=73.6$ μs 时,应变率为 1 800、3 600、5 300 s^{-1}所对应的试样工程应变分别为 0.076、0.21、0.33。将图 2 中结果换算为工程应力-应变曲线,利用遗传算法拟合程序得到的本构参数如表 2 所示。

图 3 给出了模型计算结果与实验结果的对比(此处给出的为工程应力-应变曲线)。从图中可以看到,模型结果除低应变率曲线与实验结果存在一定差别外,在高应变率情况下计算结果与实验结果比较一致。因此可以认为,(7)式模型能够反映材料在动态压缩加载条件下的力学行为。

表 2 动态本构模型拟合参数

Table 2 Fitted parameters for the constitutive model

Correlation parameters of strain energy			Correlation parameters of strain rate		
j	μ_j/(MPa)	α_j	n	G_n	β_n
1	−2.30	−2.79	1	−30.98	0.002 3
2	4.43	3.69	2	−50.40	−0.004 0
3	4.22	3.21			



(a) 1 800 s^{-1} (b) 3 600 s^{-1}

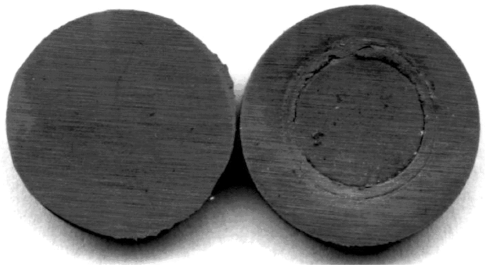
(c) 5 300 s^{-1} (d) 7 700 s^{-1}

图 3 动态压缩本构模型曲线与实验结果对比

Fig. 3 Comparisons of σ-ε curves between model prediction and experimental data

4 破坏特征分析

图 4 给出了硅橡胶试样在实验前后的对比照片。从图中可以看到,冲击压缩后,试样表面出现了一圈明显的损伤线区,线区内试样的残余厚度较小,呈现出压缩加载后的残余变形,线外部分残余厚度相对较大。该现象在相同加载条件的实验中具有很好的重复性,在不同加载条件下,损伤线区的半径和损伤程度都有区别。当冲击载荷强度较小时,不出现损伤线;随着载荷强度的增加,损伤线出现的位置由外向里收缩,在视觉上,线的颜色由浅变深,损伤



(a) Original (b) Retrieved

图 4 硅橡胶试样实验前后对比照片

Fig. 4 Comparison pictures of original specimen and shocked retrieved specimen

区的损伤程度由弱变强,最后在中心一定范围内出现材料的解体破坏,局部材料形态由整体结构变成絮状结构。

图 5 给出了损伤后试样的 SEM 分析照片,从图 5 中可以看出,图 4 中的损伤线实际上是材料局部破坏裂开的宏观表现,它贯穿了整个试样厚度。

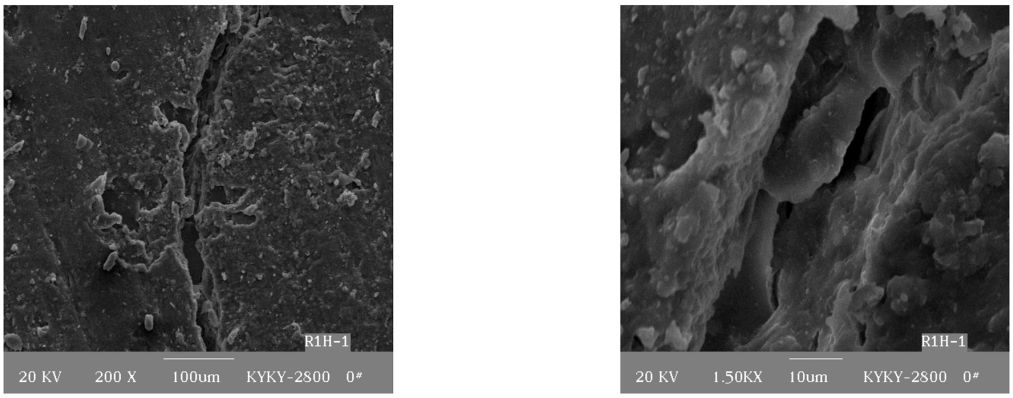


图 5　SHPB 冲击压缩加载后试样表面 SEM 照片

Fig. 5　SEM pictures of shocked retrieved specimen

进一步探求其规律发现,损伤线区直径和加载应变率与试样尺寸间有一定的定量关系。构造如下形式的经验函数

$$D_s = a^{(l_s - l_0)/l_0} D_0 [b + c \cdot \lg(\dot{\varepsilon}/\dot{\varepsilon}_0)] \qquad (8)$$

式中:D_s 为损伤线区直径,D_0、l_s 分别为试样初始直径与厚度;l_0 为基准试样厚度,这里取为 2 mm;$\dot{\varepsilon}_0$ 为基准应变率,等于 1 s^{-1},$\dot{\varepsilon}$ 为加载应变率;a、b、c 为常数,由实验结果拟合得到。通过分析可以得到 a、b、c 的值分别为 0.84、4.80、−1.14。图 6 给出了 3 种厚度试样损伤线区直径与加载应变率的预测结果与实验结果的对比,图中符号点为实验结果,直线为拟合预测结果。从图中可以看到,函数(8)式推广到 6 mm 厚试样也可得到较好的预测。

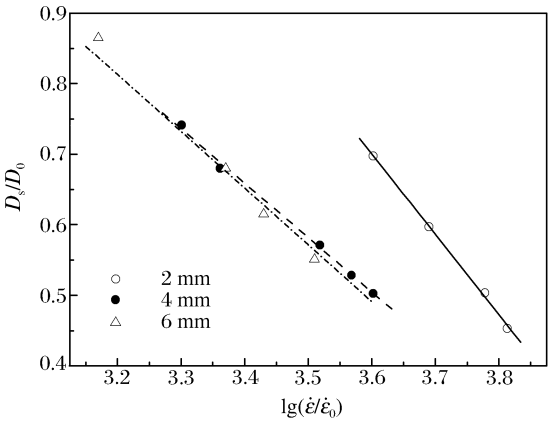


图 6　硅橡胶试样损伤线区实验结果与预测结果对比

Fig. 6　Comparison between experimental data and predicted results of damage region diameters

5　结　论

利用 SHPB 装置对一种硅橡胶材料进行了动态压缩测试,使用入射波整形技术延缓入射波上升前沿,增加入射波的脉宽,使试样在实验过程中实现了力平衡与常应变率加载状态;利用石英压电晶体对微弱的透射信号进行了测量,并对试样两端受力情况进行了监测。结果表明,本工作所测试的硅橡胶材料的动态压缩响应对应变率变化非常敏感,且表现出一定的粘弹性特征。

通过引入延迟函数,建立了考虑应变率效应的 Ogden 型模型,可以较好地描述材料在高应变率压缩加载下的力学行为;文中给出的本构参数可以直接作为有限元计算软件的模型输入参数,为仿真计算提供支持。

在实验过程中发现,在高应变率加载条件下,材料在压缩变形后出现了损伤线区,且该现象具有很好的重复性。试样损伤线区直径与加载应变率及试样尺寸之间存在一定的定量关系,得到了具有一定普适性的参数。

关于材料损伤部分的研究,还有待于从本构实质上做进一步的深入工作。

References:

[1] Lin Y L. Experimental Techniques and Constitutive Behavior Investigation of Soft Materials under High Strain Rates [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005. (in Chinese)
林玉亮. 软材料高应变率测试技术与本构关系研究 [D]. 长沙:国防科技大学研究生院,2005.

[2] Lu F Y, Chen W, Frew D J. Experimental Design of SHPB for Soft Materials [J]. Explosive and Shock, 2002, 22(1): 15-19. (in Chinese)
卢芳云, Chen W, Frew D J. 软材料 SHPB 实验设计 [J]. 爆炸与冲击,2002,22(1):15-19.

[3] Chen W, Lu F Y, Frew D J, et al. Dynamic Compression Testing of Soft Materials [J]. Trans ASME, 2002, 69: 214-223.

[4] Chen W, Lu F Y, Zhou B. A Quartz Crystal Imbedded Split Hopkinson Bar for Soft Materials [J]. Exp Mech, 2000, 40(1): 1-5.

[5] Lin Y L, Lu F Y, Lu L. The Application of Quartz Transducer Technique in SHPB [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(4): 299-304. (in Chinese)
林玉亮,卢芳云,卢 力. 石英压电晶体在霍普金森压杆实验中的应用 [J]. 高压物理学报,2005,19(4):299-304.

[6] He P Sh. Mechanical Properties of Polymers [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1997. (in Chinese)
何平笙. 高聚物的力学性能 [M]. 合肥:中国科技大学出版社,1997.

[7] Hallquist J. LS-DYNA Theoretical Manual [M]. US: Livermore Software Technology Corporation, 1998.

Constitutive Behaviors of a Silicone Rubber at High Strain Rates

LIN Yu-Liang, LU Fang-Yun, LU Li

(*Scientific College, National University of Defense Technology, Changsha* 410073, *China*)

Abstract: Silicone rubber is a macromolecule polymer, and can suffer a large deformation. The silicone rubber specimens are tested at a series of strain rates by modified Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) techniques. Based on the experimental data, a constitutive model of the silicone rubber is built up based on Ogden strain energy functions. An interesting phenomenon—localized damage cycle, so called lag circle—shows up in the tested specimen under high strain-rates loading. The diameters of the damage cycle are associated with strain-rate and specimen's size. A formulation about the relations between the diameter and the strain-rate, specimen's size is presented.

Key words: silicone rubber; Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB); high strain rate; constitutive model