

文章编号: 1000-5773(2004)04-0328-05

# 硅橡胶的动态压缩实验和力学性能研究\*

赵习金<sup>1,2</sup>, 卢芳云<sup>1</sup>, 林玉亮<sup>1</sup>

(1. 国防科技大学理学院, 湖南长沙 410073;

2. 解放军汽车管理学院, 安徽蚌埠 233011)

**摘要:**对一种改性硅橡胶材料进行了高应变率动态压缩的实验测试。实验结果表明,这种硅橡胶材料具有很强的应变率敏感性;在室温和高应变率下,表现出典型的聚合物粘弹性特性。实验中应用了入射波整形技术保证试样中的应力平衡及常应变率加载。利用石英晶体监测了试样两端的应力平衡,并应用石英测试技术测量了微弱的透射信号。

**关键词:**硅橡胶;高应变率;整形技术;石英晶体

**中图分类号:** O347;O385

**文献标识码:** A

## 1 引言

硅橡胶是一种二有机基硅氧烷的直链状高分子聚合物,由于它具有较高的分子量,所以具有很好的弹性性能。它的分子主链由硅原子和氧原子交替组成( $-\text{Si}-\text{O}-\text{Si}-$ ),硅氧键的键能高达370 kJ/mol,比一般橡胶的C—C结合键能(240 kJ/mol)要大得多,所以硅橡胶具有良好的高热稳定性。另外硅橡胶的分子链比较柔顺,链间距大,还具有良好的耐寒性,能够在 $-100\sim 300\text{ }^\circ\text{C}$ 很宽的温度范围内使用。由于在侧链上引入了极少量的有机取代基团,这种低不饱和性的分子结构使得硅橡胶具有优良的电绝缘性能和良好的耐候、耐臭氧性能,对紫外线和臭氧的作用十分稳定。

实验的试样是一种改性硅橡胶,它是以硅橡胶为主要原材料,添加了增强填料、阻尼填料、硫化剂等制成的。具有优异的耐热、耐寒、耐候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、电缆料以及特种车辆、光电仪器仪表的减震器和缓冲器等。

为了充分认识这种硅橡胶材料在高应变率动态加载下的响应特性,在室温下,利用实验室的SHPB装置对两组硅橡胶试样进行了应变率为 $10^2\sim 10^3\text{ s}^{-1}$ 的冲击压缩实验。由于这种硅橡胶材料中的波速很低,利用传统的SHPB实验技术,试样在加载过程中应力处于不均匀状态,不能够获得真实有效的实验结果。因此实验中应用了入射波整形技术<sup>[1]</sup>,使试样在加载过程中保持变形均匀和应力平衡;并且通过适当地调整加载条件,获得常应变率加载。实验中还利用石英晶体来监测试样两端面的应力平衡情况,并应用石英测试技术测量了实验中微弱的透射信号。

## 2 实验测试

实验所测试的这种改性硅橡胶密度为 $1180\text{ kg/m}^3$ 。SHPB实验中,压杆的材料为LY12铝,压杆的直径为20 mm,输入杆和输出杆的长度分别为2000 mm和1000 mm。输入杆和输出杆上应变片距试样两端面的距离分别为1210 mm和520 mm。撞击杆的长度为300 mm。试样的直径均为14 mm,试样的厚度分别为2 mm和4 mm。对于2 mm厚度的试样,由于透射信号有5 mV以上,直接采用传统的应变片测试技术测量透射信号;而对于4 mm厚度的试样,当进行低应变率加载时透射信号非常

\* 收稿日期: 2004-01-16; 修回日期: 2004-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(10172092);NASF联合基金(10276038);国防科技重点实验室基金(51478030201-KG0103)

作者简介: 赵习金(1975—),男,硕士,主要研究方向为材料的动态力学性能。E-mail: zxjqtq@sohu.com

小,只有 2 mV 左右,所以采用石英测试技术<sup>[2]</sup>来测量微弱的透射信号。

图 1 给出了一种 4 mm 厚硅橡胶试样测试得到的原始记录,从图中可以清楚地看到,利用嵌入压电石英晶体可以得到大于 2 V 的信号,而用应变片测得的透射信号只有 2 mV 左右,信号幅值上放大了 3 个量级,从而大大提高了应力信号的信噪比。这说明利用嵌入石英压电晶体技术完全可以测试这种硅橡胶材料的动态压缩力学性能。

为了减少端面摩擦的影响,在试样的两个端面均匀地涂上少量的二硫化钼润滑剂,然后将试样夹在输入杆和输出杆之间。为了保证实验过程中试样中的应力平衡和变形均匀,对于这种硅橡胶材料,必须对入射波进行整形。而且通过前面的实验表明,对于硅橡胶这类软材料,只加单个的整形器,应力平衡的效果也不理想。所以,实验时采用了组合型的整形器,即在较大尺寸的黄铜整形器上,叠加一个很小的黄铜整形器,尺寸为  $\varnothing 2.5 \text{ mm} \times 1.5 \text{ mm}$  左右。

试样中保持应力平衡和变形均匀是 SHPB 实验方法的前提,试样中应力是否均衡,可以通过比较分离后的透射波形与入射波形和反射波形的差来判断。但对于硅橡胶这种软材料来说,由于入射波形和反射波形的幅值基本相当,所以这一方法误差很大。因此,为了更加直观地了解试样中应力的平衡状况,在压杆中嵌入石英压电晶体来监测试样两端的应力平衡情况<sup>[3]</sup>。图 2 和图 3 分别给出了 2 mm 和 4 mm 厚度试样采用组合型整形器时试样两端的应力平衡情况。图 2 和图 3 是根据示波器记录的信号计算得到的试样两端的受力时程曲线。从图中可以很直观地判断试样中应力的平衡情况。对于 2 mm 和 4 mm 厚度试样采用了组合型整形器后试样两端面的受力基本上是一致的,说明了试样中的应力是均匀的,实验结果是合理有效的。因为一般来说,如果试样两端的受力达到了平衡,即可认为试样中的应力分布均匀。

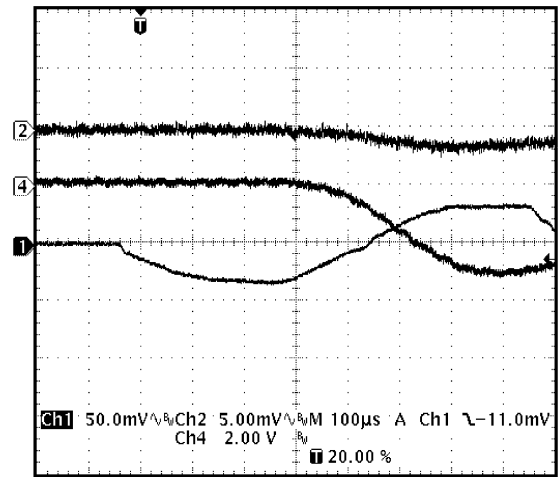


图 1 4 mm 厚硅橡胶试样的原始记录  
Fig. 1 Typical oscilloscope record from a 4 mm silicon rubber test

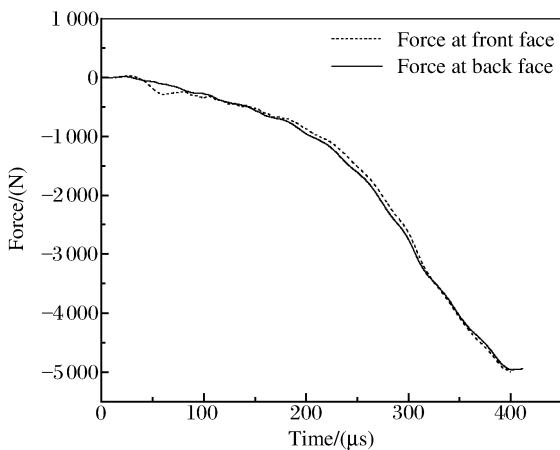


图 2 2 mm 厚度试样两端的受力曲线  
Fig. 2 Stress-time curves of the two end faces during a 2 mm specimen test

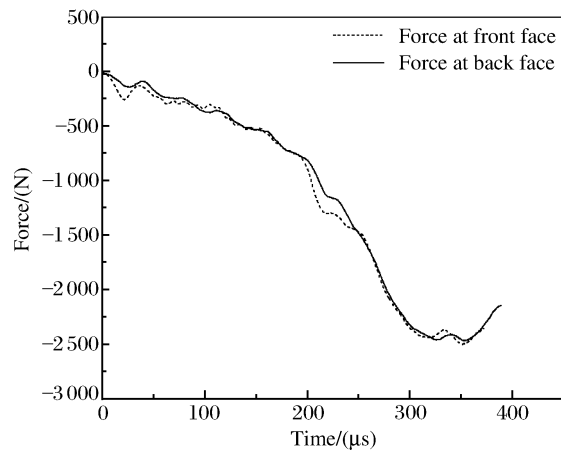


图 3 4 mm 厚度试样两端的受力曲线  
Fig. 3 Stress-time curves of the two end faces during a 4 mm specimen test

入射波经过整形以后,根据入射波形的情况,通过合理的整形器设计,可以很方便地获得常应变率加载<sup>[4]</sup>。按照 SHPB 实验中常应变率加载方式,通过调整子弹的速度和整形器的尺寸,得到了不同应变率下试样的应力应变曲线。图 4 和图 5 分别给出了 2 mm 和 4 mm 厚度试样常应变率加载的典型原

始波形。图中实线为输入杆上应变片测得的入射波  $\epsilon_i$  和反射波  $\epsilon_r$ ，图4中虚线是输出杆上应变片测得的透射波  $\epsilon_t$ ，图5中虚线是输出杆上石英片测得的透射波  $\sigma_t$ 。图中平的反射波形意味着实验中实现了常应变率加载。图4和图5所对应实验的应变率分别为  $1800 \text{ s}^{-1}$  和  $700 \text{ s}^{-1}$ 。

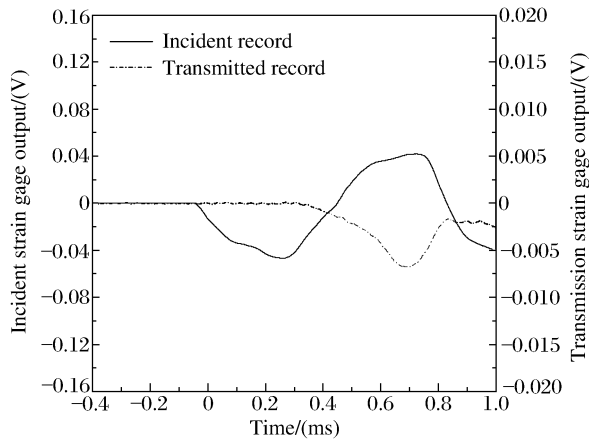


图4 2 mm 厚度试样的典型实验波形

Fig. 4 Typical waveform of 2 mm specimen

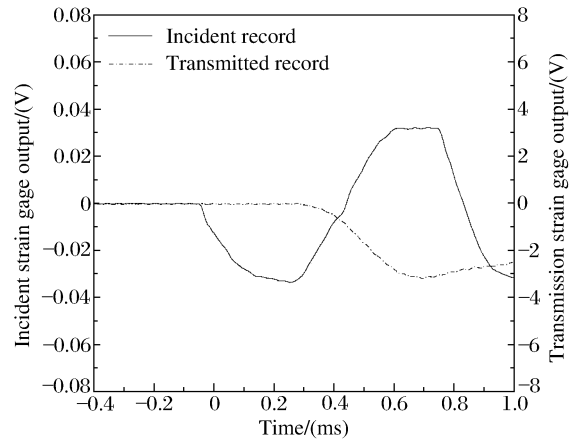


图5 4 mm 厚度试样的典型实验波形

Fig. 5 Typical waveform of 4 mm specimen

### 3 实验结果及分析

对于 2 mm 厚度的试样，分别得到了 4 种应变率下的应力应变曲线。为了验证实验结果的可靠性和准确性，同样，对于 4 mm 厚度的试样，也得到了 4 种应变率下的应力应变曲线。图 6 和图 7 分别给出了 2 mm 和 4 mm 厚度试样 4 种不同应变率下的应力应变曲线。图中的标注符号代表原始实验数据，图中的曲线是根据实验数据进行多项式拟合得到的结果。对于硅橡胶这种高聚物材料，虽然它的应力应变曲线的起始部分不是直线，仍然可以用其应力应变曲线起始部某点到原点连线的斜率来表示杨氏模量，称之为割线模量。高聚物本质上是韧性材料，而韧性材料的使用极限一般不是它的极限强度，而正是它的屈服强度。对于高聚物材料，定义其真实应力-应变曲线出现极大的位置为内在屈服点，而屈服点所对应的应力和应变则分别定义为屈服应力和屈服应变。从图中可以看出，这种硅橡胶材料具有明显的应变率敏感性。材料屈服后，随着应变增加应力反而有不大的下跌，出现了所谓的“应变软化”现象。由此可以推想，材料一旦发生屈服，就有某种内部的结构产生变化，这种结构变化允许塑性变形

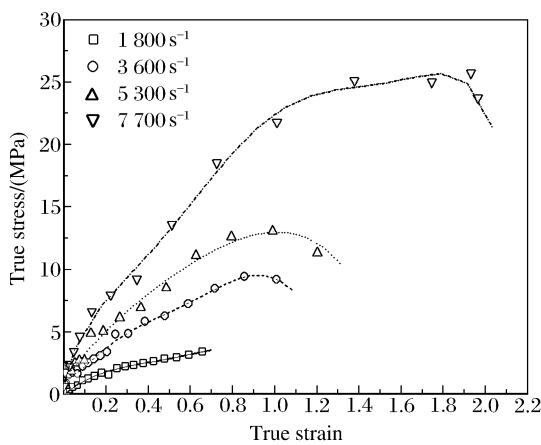


图6 2 mm 厚度试样的应力应变曲线

Fig. 6 Stress-strain curves of 2 mm specimen

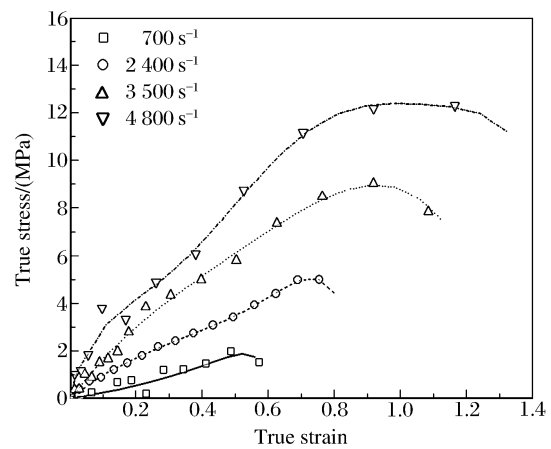


图7 4 mm 厚度试样的应力应变曲线

Fig. 7 Stress-strain curves of 4 mm specimen

能在较低的应力水平下继续进行。

为了清楚地表示上述定义的主要力学参量随应变率变化的情况,将根据图6和图7中应力应变曲线得到的结果用表格来表示。表1和表2分别列出了2 mm和4 mm厚度试样其屈服应力、屈服应变以及割线模量随应变率的变化情况。

表1 2 mm厚度试样主要力学参量随应变率变化的情况

$\dot{\epsilon}$	$\sigma_s$	$\epsilon_s$	$E$
/(s <sup>-1</sup> )	/(MPa)		/(MPa)
1 800	3.4	0.65	6.25
3 600	9.5	0.95	13.55
5 300	13.0	1.06	20.25
7 700	25.7	1.79	28.00

表2 4 mm厚度试样主要力学参量随应变率变化的情况

$\dot{\epsilon}$	$\sigma_s$	$\epsilon_s$	$E$
/(s <sup>-1</sup> )	/(MPa)		/(MPa)
700	1.9	0.52	3.25
2 400	5.0	0.75	8.65
3 500	9.0	0.93	13.00
4 800	12.4	0.98	16.60

表1和表2清楚地表明,这种硅橡胶材料表现出明显的高聚物粘弹性特征,其屈服应力对应变率非常敏感。随着加载应变率的提高,对于2 mm厚度试样,屈服应力从3.4 MPa增加到25.7 MPa;对于4 mm厚度试样,屈服应力从1.9 MPa增加到12.4 MPa。相应地,这种硅橡胶材料的屈服应变也随应变率的增加而增大。对于2 mm厚度试样,当应变率为7 700 s<sup>-1</sup>时,其屈服应变高达179%,而一般金属材料的屈服应变只有1%左右。这说明硅橡胶材料与一般的金属材料相比,具有很好的延展性。硅橡胶材料是一种典型的高聚物,高聚物力学性能的最大特点是它的高弹性和粘弹性。高聚物是由大量小分子单体以化学键的方法结合而成的大分子化合物,分子量极大,可达10<sup>4</sup>~10<sup>7</sup>数量级。极大的分子量加上高聚物主链的C—C单键(C—O单键,Si—O单键)的内旋转,使得高分子链具有很好的柔性。高分子链的柔性在力学性能上的反映,就是高聚物独有的高弹性。

同样,由于高分子链的柔性,同一个高分子链也会表现出大小不同的运动单元,使得高聚物表现出明显的粘弹性。由于高聚物的粘弹性本质,所以高聚物材料的屈服应力有很大的应变率依赖性,屈服应力随应变率的增大而增大。另外,这种硅橡胶材料的割线模量随着应变率的增加而提高,但绝对值却很小。当应变率为7 700 s<sup>-1</sup>时,割线模量的值也只有28 MPa。由于这种硅橡胶材料的模量和屈服应力较一般的高聚物材料都要小的多,所以它应该属于软而韧的高聚物。

为了确信实验结果真实地反映了材料性质,进一步考察了试样厚度对实验结果的影响。图8给出了2 mm和4 mm厚度试样同一应变率(3 500 s<sup>-1</sup>)时的应力应变曲线。图中虚线是2 mm厚度试样的应力应变曲线,实线是4 mm厚度试样的应力应变曲线,两者之间基本上是一致的。从而表明,试样的厚度对硅橡胶材料的性质确实没有影响,实验结果是准确、可靠的。

## 4 结 论

利用 SHPB 实验技术对一种改性硅橡胶材料进行了高应变率动态压缩时的实验测试。实验结果表明,这种硅橡胶材料具有很强的应变率敏感性;在室温和高应变率下,表现出典型的高聚物粘弹性特

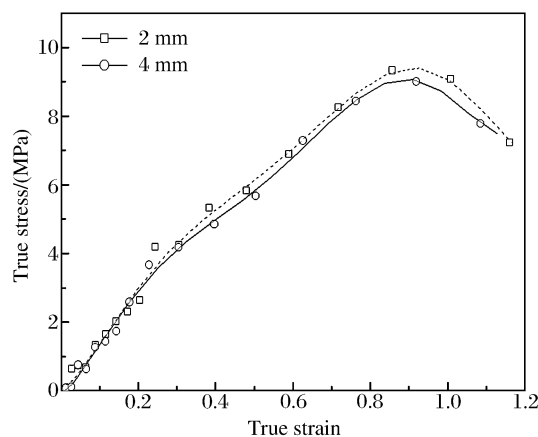


图8 3 500 s<sup>-1</sup>时的应力应变曲线比较  
Fig. 8 Comparison of stress-strain curves of the silicon rubber at 3 500 s<sup>-1</sup>

性。为了保证试样中的应力平衡以及常应变率加载,实验中应用了入射波整形技术。另外,实验中还利用了石英晶体来监测试样两端的应力平衡,并应用石英测试技术测量了微弱的透射信号。

## References:

- [1] Nemat-Nasser S, Isaacs J B, Starrett J E. Hopkinson Techniques for Dynamic Recovery Experiments [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1991, 435(A): 371—391.
- [2] Chen W, Lu F, Zhou B. A Quartz Crystal Embedded Split Hopkinson Pressure Bar for Soft Materials [J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(1): 1—6.
- [3] Chen W, Lu F, Frew D J. Dynamic Compression Testing of Soft Materials [J]. Appl Mechan, 2002, 69: 214—223.
- [4] Lu F Y, Chen W, Frew D J. A Design of SHPB Experiments for Soft Materials [J]. Explosion and Shock Waves, 2002, 22(1): 15—19. (in Chinese)  
卢芳云, Chen W, Frew D J. 软材料的 SHPB 实验设计 [J]. 爆炸与冲击, 2002, 22(1): 15—19.

## Research on Dynamic Compressive Testing and Mechanical Properties of Silicon Rubber

ZHAO Xi-Jin<sup>1,2</sup>, LU Fang-Yun<sup>1</sup>, LIN Yu-Liang<sup>1</sup>

(1. College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;  
2. Automobile Management Institute, Bengbu 233011, China)

**Abstract:** By use of split Hopkinson pressure bars (SHPB) technique, a kind of silicon rubber is investigated for understanding its dynamic constitutive behaviors at high strain rates. Experimental results show that silicon rubber is strain-rate sensitive. It shows viscoelastic characteristics at room temperature and high strain rates. Pulse shaping technique is utilized to ensure the dynamic stress equilibrium in the specimen and to obtain a constant strain rate. Quartz crystal is used to monitor the stress equilibrium and to measure the weak signal in the experiments of silicon rubber.

**Key words:** silicon rubber; high strain-rate; pulse shaping technique; quartz crystal