

空心玻璃微球增强硅橡胶涂层的高应变率响应实验

史爱娟 路向辉 刘 晨 杨士山*

(西安近代化学研究所,西安 710065)

摘 要 为研究空心玻璃微球(HGMs)对硅橡胶涂层动态性能的影响,采用分离式霍普金森压杆实验装置,对添加不同含量 HGMs 的硅橡胶进行了应变率范围为 $3000\sim 5000\text{s}^{-1}$ 的动态加载,获得了屈服应力及其对应的应变、变形功密度和绝热压缩过程的材料温升。结果表明,添加不同含量 HGMs 的硅橡胶具有明显的应变率效应,且随着 HGMs 含量的增加,变形功密度及其绝热温升均增加,但温升不超过 10K。

关键词 动态响应,霍普金森压杆,空心玻璃微球,硅橡胶

High strain rate response experiment of Si rubber coating reinforced by HGMs

Shi Aijuan Lu Xianghui Liu Chen Yang Shishan

(Xi'an Modern Chemistry Research Institute, Xi'an 710065)

Abstract In order to study the effect of hollow glass microspheres (HGMs) on the dynamic performance of silicone rubber coating, the strain rate range of $3000\sim 5000\text{s}^{-1}$ of the silicone rubber with different content of HGMs was dynamically loaded by the experimental device of split Hopkinson pressure bar (SHPB). The yield stress and strain, the density of deformation work and the rise of material temperature in the process of adiabatic compression were obtained. The results showed that the silicone rubber with different content of HGMs had an obvious strain rate effect. With the increase of HGMs content, the density of deformation work and adiabatic temperature increased uniformly, but the temperature rise did not exceed 10K.

Key words dynamic response, split Hopkinson pressure bar (SHPB), hollow glass microsphere, silicone rubber

缓冲涂层是战斗部中的重要组成部分,其在生产、运输等过程中发挥着隔绝炸药/金属壳体内壁间的摩擦等作用,在使用过程中还可发挥隔热作用。硅橡胶具有良好的耐热性、耐老化性能及抗溶剂迁移能力,与炸药具有良好的相容性,成为目前常用的缓冲材料之一。但战斗部在侵彻多层目标靶时,缓冲涂层需承受较高的动态载荷作用,可能导致涂层出现微裂纹,甚至撕裂,失去隔热/防止摩擦的作用,最终导致炸药装药着火,战斗部失效。因此,迫切需要研究缓冲涂层在高应变率加载条件下的动态性能。

空心玻璃微球(HGMs)内部含有惰性气体,导热系数低,抗压强度高,分散性、流动性和稳定性好。因此,利用 HGMs 增强硅橡胶涂层,可有效提升涂层的隔热效果^[1]。

目前,针对硅橡胶的动态力学实验主要有两种,

分别是动态热机械实验(DMA)和霍普金森压杆实验(SHPB)。DMA 主要通过改变升温速率及其频率来测试样品的动态力学性能,如王艳艳等^[2-5]采用 DMA 研究了硅橡胶类材料的阻尼温度、玻璃化温度、动态弹性模量、力学损耗因子、储能模量等动态参量的变化规律;SHPB 主要通过改变应变率来测试样品的动态力学性能,如赵习金等^[6-8]研究了开放体系(不加围压)下高聚物材料的粘弹性特性、应变率敏感性、应力-应变曲线特性。针对 HGMs 增强硅橡胶材料的动态实验较少,如谢志坚等^[9]用 DMA 研究了动态损耗等参量,与实际使用时所需的应力、应变、应变率等动态参量还有一定距离。上述文献中的试样加载状态仅为频率或无约束下的高应变率,而战斗部实际使用时,缓冲涂层处于周向约束及高应变率加载状态,文献加载状态与实际应用存在差距。

作者简介:史爱娟(1974-),女,高级工程师,主要从事固体火箭推进剂包覆层以及战斗部缓冲涂层研究

联系人:杨士山(1977-),男,博士,研究员,主要从事固体火箭推进剂装药包覆及战斗部缓冲涂层研究。

本研究采用 SHPB 对添加不同含量 HGMs 的硅橡胶进行高应变率加载,设计并加工围压装置对试样进行周向约束,研究 HGMs 增强硅橡胶涂层的应力-应变特性,以为战斗部缓冲材料的遴选提供技术支持。

1 实验部分

1.1 原料及仪器

硅橡胶(双组分加成型),东莞国创硅胶有限公司,其中 A 组分主要成分为乙烯基硅油、白炭黑和促进剂等,B 组分主要成分为乙烯基硅油、含氢硅油、白炭黑和抑制剂等;HGMs(型号 D-1210,粒度为 $10\sim 125\mu\text{m}$),山东淄博德润机电设备制造有限公司空心玻璃微珠研究所。

采用分离式 SHPB 进行围压实验。SHPB 压杆构成如图 1 所示。

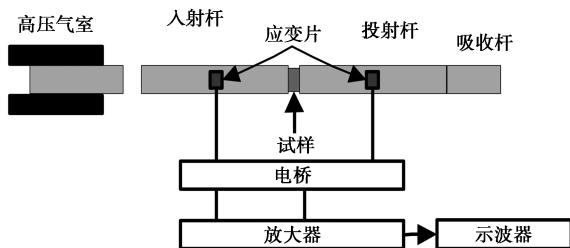


图 1 分离式 SHPB 压杆实验原理图

1.2 试样制备

将 HGMs 以 0%、2%、6%、10% 的质量分数分别加入到硅橡胶 A 组分中,然后和硅橡胶 B 组分以一定配比搅拌均匀;在真空度优于 -0.095MPa 的条件下真空排气 5min 后倒入模具中,固化 24h 后取出,制成样品。原料配比及试样尺寸见表 1。

表 1 原料配比及试样尺寸

试样编号	硅橡胶 A/%	硅橡胶 B/%	HGMs/%	试样尺寸
1#	50	50	0	$\Phi 10\text{mm}\times 4\text{mm}$
2#	49	49	2	
3#	47	47	6	
4#	45	45	10	

2 结果与讨论

2.1 应力平衡实验

在 SHPB 实验中,认为数据是真实有效的前提是试样保持应力平衡并且变形均匀。判断应力平衡的方法较多,但常用的是通过比较试样两端的受力是否相当,即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进行。

由一维应力波理论,试样左侧所受到的力(F_1)及右侧所受到的力(F_2)分别由公式(1)和公式(2)计算得到。

$$F_1 = EA(\epsilon_i + \epsilon_r) \quad (1)$$

$$F_2 = EA\epsilon_t \quad (2)$$

式中, F_1 为左侧所受到的力,N; F_2 为右侧所受到的力,N; E 为杆子的弹性模量,MPa; A 为杆子的截面积, m^2 ; ϵ_i 、 ϵ_r 、 ϵ_t 分别为入射应变、反射应变和透射应变。

将测得的入射应变、反射应变及透射应变数值分别带入公式(1)和公式(2),经计算可得试样两侧的受力关系,如图 2 所示。

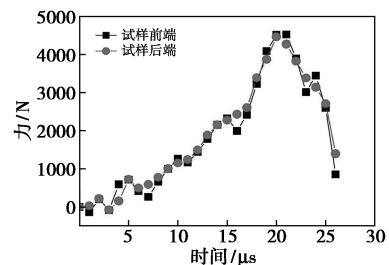


图 2 试样两侧的受力关系图

通过图 2 试样两侧的受力比较可知,在加载过程中,左侧的受力基本与右侧相等,说明试样两端的受力基本相当,应力达到平衡,说明试验数据可靠。

经受力平衡验证后的数据,采用公式(3)~(5)计算试样上的应力、应变和应变率。

$$\sigma = E\left(\frac{A}{A_s}\right)\epsilon_t \quad (3)$$

$$\epsilon = -\frac{2c_0}{l_s} \int_0^t \epsilon_r \text{d}\tau \quad (4)$$

$$\dot{\epsilon} = \frac{2c_0}{l_s} \epsilon_r \quad (5)$$

式中: σ 为试样受到的应力,MPa; ϵ 为试样发生的应变; $\dot{\epsilon}$ 为试样的应变率, s^{-1} ; l_s 为试样初始长度,m; c_0 为杆中弹性波的波速,m/s; A_s 为试样的横截面积, m^2 。

2.2 轴向应力-应变曲线特性分析

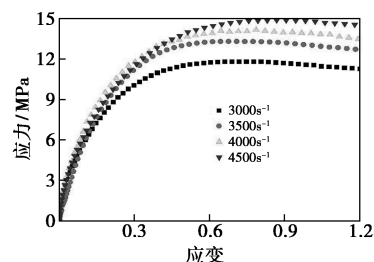


图 3 4# 试样在不同应变率动态加载下的轴向应力-应变曲线图

因采用不同配方制备的试样在不同应变率下的应力-应变曲线变化趋势类似,此处以 4[#] 试样为例进行说明。对采用 4[#] 配方制备的试样进行加载,获得的不同应变率下的轴向应力-应变曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出,添加 HGMs 的硅橡胶涂层,具有明显的应变率效应,且随着应变率的增加,屈服应力及其所对应的应变均增大。在固定应变率为 4500s⁻¹ 的情况下,将不同配方的材料的应力-应变曲线列入图 4 中,将其屈服应力及其应变列入表 2 中。

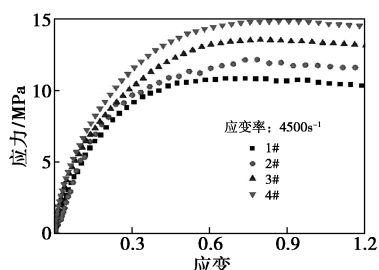


图 4 不同配方材料在 4500s⁻¹ 应变率加载下的轴向应力-应变曲线

表 2 不同配方的材料在 4500s⁻¹ 应变率动态加载下的屈服强度及应变

样品	1 [#]	2 [#]	3 [#]	4 [#]
σ /MPa	10.91	12.19	13.59	14.89
ϵ	0.74	0.78	0.80	0.91
W /(MJ·m ⁻³)	6.46	7.35	8.94	10.77

从图 4 和表 2 可以看出,在相同的应变率条件下,添加 HGMs 的硅橡胶材料,随着 HGMs 含量的增加,轴向应力及其对应的应变均增大。

2.3 HGMs 含量对动态参数的影响分析

材料在高应变率加载条件下,通过变形来吸收能量,吸收能量的大小可用变形过程总的形变功密度(W)进行表征,见公式(6)。

$$W = \int_0^{\epsilon_m} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (6)$$

式中, W 为形变功密度, MJ/m³; ϵ_m 为最大应力所对应的应变。

当材料变形为 ϵ_m 时,其单位体积吸收的能量可用应力-应变曲线上的积分面积进行表示。因此,计算应变 0~ ϵ_m 区间曲线下方的面积即可得到形变功密度,计算值列入表 2 中。将 HGMs 的含量[以 $m(\text{HGMs})/m(\text{total})$ 表示]与形变功密度作图,如图 5 所示。

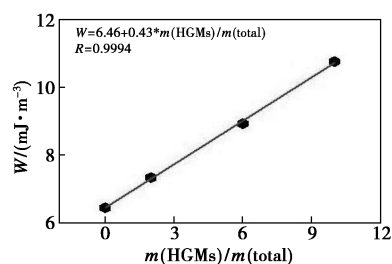


图 5 形变功密度与 HGMs 含量的关系曲线

由图 5 和表 2 可以看出,表观上形变功密度的数值随着 HGMs 质量含量的增加而线性增大,其线性系数为 0.9994。原因可能为:HGMs 颗粒属于惰性填料,对硅橡胶基体无法形成体型链接结构,所以补强效果仅与其质量分数有关,故形变功密度随着 HGMs 的质量分数线性增加。

低速冲击加载时,试样变形较小且变形时间较长,试样变形所产生的温升与消耗抵消,相当于试样处于动态平衡状态(等温状态);而高速冲击时,试样的变形较大且变形时间很短,试样的塑性功转化产生大量的热量,因时间太短(此加载过程认为是绝热状态)来不及与外界进行交换(消耗),热量的累积使得试样温度升高,这个温升称为绝热温升(ΔT),其计算公式见公式(7)。

$$\Delta T = \frac{\kappa}{\rho \cdot C_v} \int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon \quad (7)$$

式中, ΔT 为绝热温升, K; κ 为塑性功转换成热的转换系数,取值 0.97; $\int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$ 为冲击吸收功, J/cm²。

对应力-应变曲线进行积分,获得冲击吸收功 $\int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon$, 通过公式(7)计算可得应变率为 4500s⁻¹ 下硅橡胶试样的温升,数据列于表 3。

表 3 试样在 4500s⁻¹ 应变率加载下的绝热温升

$m(\text{HGMs})/m(\text{total})/\%$	κ	$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$C_v/[\text{J} \cdot (\text{g} \cdot \text{K})^{-1}]$	$\int_0^{\epsilon} \sigma d\epsilon/(\text{J} \cdot \text{cm}^{-2})$	$\Delta T/\text{K}$
0	0.97	1.12	1.37	6.46	4.08
2		1.06		7.35	4.91
6		0.98		8.94	6.46
10		0.85		10.77	8.97

由表 3 可见,随着 HGMs 含量的增加,试样的绝热温升逐渐增大。在实验加载条件下,试样的绝热温升不超过 10K,且数据表观上显示绝热温升的幅度随着 HGMs 含量的增加而逐渐增大。

(下转第 151 页)