

文章编号:1004-7220(2018)03-0262-05

弹道明胶力学性能测试

薛本源¹, 温垚珂¹, 徐诚¹, 宋焦²

(1. 南京理工大学机械工程学院, 南京 210094; 2. 内蒙古北方重工集团有限公司南京分公司, 南京 210014)

摘要:目的 研究弹道明胶力学性能,进而建立动态本构模型,为采用数值计算方法开展创伤弹道学相关研究奠定基础。**方法** 首先制备出10℃下20%弹道明胶试件,随后采用万能材料试验机和铝制霍普金森杆测试弹道明胶的准静态和动态压缩力学性能。**结果** 获得10℃下20%弹道明胶准静态和动态压缩应力-应变曲线;当应变为0.45时,7组应变率(10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} 、5 800、7 900、10 400、13 000 s^{-1})下的真实应力分别为0.041、0.083、0.194、14.515、31.496、55.597、96.678 MPa。当应变率为13 000 s^{-1} 、应变从0.4增加到0.5时,应力从53.558 MPa迅速上升到164.417 MPa,增大了3.07倍。**结论** 弹道明胶在低应变率和高应变率范围内都有着明显的应变率效应;基于试验数据,建立形如 $\sigma = k\dot{\epsilon}^m \epsilon^n$ 的含应变率本构模型,并给出20%弹道明胶的材料常数。

关键词:弹道明胶; 应力-应变曲线; 高应变率; 本构模型

中图分类号: R 318.01 文献标志码: A

DOI: 10.16156/j.1004-7220.2018.03.012

Testing of Mechanical Properties of Ballistic Gelatin

XUE Benyuan¹, WEN Yaoke¹, XU Cheng¹, SONG Jiao²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
2. Nanjing Branch, Inner Mongolia North Heavy Industries Group Co., Ltd., Nanjing 210014, China)

Abstract: Objective To study the mechanical properties of ballistic gelatin and establish a dynamic constitutive model by a numerical method to lay the foundation for the related research on wound ballistics. **Methods** First, 20% ballistic gelatin samples at 10°C were prepared, and then, the quasi static and dynamic compressive mechanical properties of the ballistic gelatin were tested using a universal material testing machine and an aluminum Hopkinson bar, respectively. **Results** The quasi-static and dynamic compressive stress-strain curves of 20% ballistic gelatin at 10°C were obtained. When the strain was 0.45, the true stress was 0.041, 0.083, 0.194, 14.515, 31.496, 55.597, and 96.678 MPa at a strain rate of 10^{-3} , 10^{-2} , 10^{-1} , 5 800, 7 900, 10 400, and 13 000 s^{-1} , respectively. When the strain rate was 13 000 s^{-1} and the strain increased from 0.4 to 0.5, the stress increased rapidly from 53.558 MPa to 164.417 MPa, equivalent to an increase by over 3.07 times. **Conclusions** The ballistic gelatin had a remarkable strain rate effect in the range of both low and high strain rates. The constitutive model with strain rate was established based on the experimental results with the form of $\sigma = k\dot{\epsilon}^m \epsilon^n$, and the material constants of 20% ballistic gelatin were obtained.

Key words: ballistic gelatin; stress-strain curve; high strain rate; constitutive model

收稿日期:2017-08-30; 修回日期:2017-10-26

基金项目:国家自然科学基金项目(11502119),国防重点实验室基金(61426060201162009)

通信作者:温垚珂,硕士研究生导师,E-mail: wenyk2011@163.com

弹道明胶 (ballistic gelatin) 是一种淡黄色的透明固体,其物理响应与生物体的肌肉响应相似,故在国内外轻武器终点效应试验研究中被广泛应用。常用的弹道明胶有两种类型,分别为质量分数 10%、使用温度 4 °C 的明胶 (Fackler gelatin) 和质量分数 20%、使用温度 10 °C 的明胶 (NATO gelatin)^[1]。虽然弹道明胶在创伤弹道试验领域已经应用了 70 多年,但想要采用数值方法模拟其在高速冲击下的物理响应却并不容易,主要是缺少弹道明胶在高应变率下的材料力学数据和合适的本构模型。弹道明胶是一种波阻抗很低的软材料,用传统的钢制霍普金森杆难以测出其动态力学性能,主要是由于波阻抗不匹配导致透射信号微弱且应力均匀难以达到^[2-3]。Sulisbury 等^[4]曾用丙烯酸塑料杆代替传统的金属杆,对波在聚合物杆中的弥散效应予以修正,测出 20% 弹道明胶在应变率 1 000 ~ 4 000 s⁻¹ 范围的动态压缩力学性能。Richler 等^[5]利用薄膜力传感器直接测出弹道明胶试件两端所受的力,不需要对透射信号进行测量,从而巧妙获得 4 °C 下质量分数为 10%、20% 和 30% 的 3 种明胶在应变率范围 1 800 ~ 5 200 s⁻¹ 的应力-应变曲线。本文采用万能材料试验机和铝制霍普金森杆设备分别获得 10 °C 下 20% 弹道明胶的准静态和动态 (5 800 ~ 13 000 s⁻¹) 压缩应力-应变曲线,并给出动态本构模型及其材料常数。

1 试样制备

明胶是从动物皮肤、结缔组织和骨头中提取的一种胶原蛋白^[6]。将明胶与水按一定的比例混合后,经特定的工艺即可制成用于轻武器终点效应试验的弹道明胶^[7]。20% 弹道明胶试样的制备工艺如下:① 称取 20 g 明胶粉末,再加入 80 g 常温下的纯净水使明胶粉溶解于水中,形成 20% 配比的明胶溶液。② 将明胶溶液置于 60 °C 的恒温水浴炉中 2 h,并每隔 15 min 搅拌 1 次,使明胶在水中充分溶解。在水浴加热时用保鲜膜将盛放明胶溶液的容器口封住,每次搅拌前将保鲜膜上的水弹入容器中,避免因水分蒸发而造成明胶溶液浓度增大。③ 在模具上预先喷涂脱模剂,防止脱模时对试件损坏。④ 采用注射器将明胶溶液注入模具中,再放入 10 °C 恒温箱中保存 2 h,使其冷却凝固。⑤ 试验准

备工作就绪后再取出试件,并尽快进行试验,以减小温度对试件力学性能的影响。

2 准静态测试

2.1 试验过程

准静态压缩试验在万能材料试验机上进行,试验机最大量程为 500 N。试样为圆柱体,名义直径 16 mm,名义高度 9 mm,实际尺寸用游标卡尺测量 3 次,取平均值获得。为减小端面摩擦,在与试样接触的两个金属加载圆盘表面涂上一层薄薄的凡士林作为润滑剂。采用 3 种不同加载速率,从而获得弹道明胶在应变率 10⁻¹、10⁻² 和 10⁻³ s⁻¹ 下的应力-应变曲线。每种加载速度下进行 5 组有效试验。

2.2 准静态试验结果

如图 1 所示,10 °C、20% 弹道明胶在低应变率范围内产生较为明显的应变率效应。 $\epsilon = 0.45$ 时,3 种不同应变率 (10⁻³、10⁻² 和 10⁻¹ s⁻¹) 下的应力分别为 41、83 和 194 kPa。在应变率 10⁻² s⁻¹ 和 10⁻³ s⁻¹ 下,当 $\epsilon < 0.4$ 时弹道明胶的力学响应近似为线弹性,此时的弹性模量近似为 157.9、73.3 kPa。在应变率 10⁻¹ s⁻¹ 下,当 $\epsilon < 0.3$ 时弹道明胶的力学响应近似为线弹性,此时的弹性模量约为 315.2 kPa;随着应变进一步增加,弹道明胶出现明显的应变增强效应。

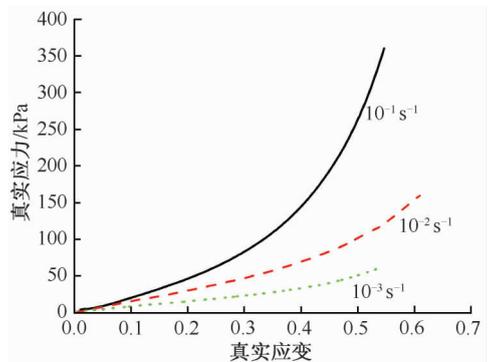


图 1 弹道明胶不同应变率下的准静态真实应力-应变曲线
Fig. 1 Quasi-static true stress-strain curves of ballistic gelatin at different strain rates

3 动态压缩测试

3.1 试验过程

采用直径 14.5 mm 的铝制分离式霍普金森压杆 (split Hopkinson pressure bar, SHPB) 测量弹道明

胶的动态力学特性。霍普金森杆设备入射杆长 1.5 m、透射杆长 1.5 m、吸收杆长 1.0 m, 撞击杆长 0.4 m。试验装置如图 2 所示, 试验前调整撞击杆、入射杆和透射杆位置, 确保 3 杆在一条水平直线上, 减小试验误差。弹道明胶试件为直径 8 mm、厚度 1 mm 的薄圆片, 与试件表面接触两杆端面涂有凡士林, 减小摩擦对实验结果的影响^[8,9]。

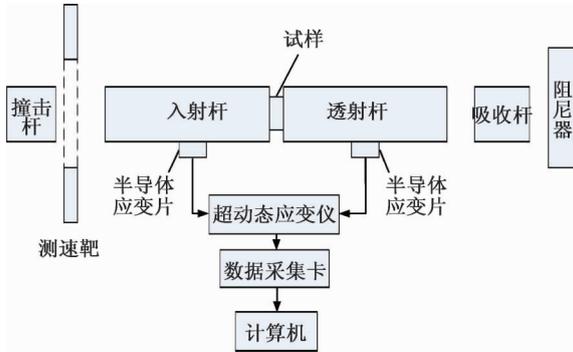


图 2 分离式霍普金森压杆试验简图
Fig. 2 Schematic of split Hopkinson pressure bar test

当撞击杆以一定的速度撞击入射杆时, 将在入射杆中产生入射脉冲, 并沿着入射杆、试件和透射杆向前传播。由于试样和铝杆的波阻抗不同, 在界面处将发生反射和透射。试件在该脉冲的作用下发生高速变形, 反射波由入射杆上的应变片记录, 透射波由透射杆上的应变片记录。由于弹道明胶的波阻抗与铝杆相差 9 倍, 入射波的能量大部分反射回入射杆中, 由此造成透射信号非常微弱, 采用普通电阻应变片很难采集到该透射信号。本试验中使用高灵敏度的半导体应变片 (型号 SB3. 8-120-P-2) 采集透射信号, 半导体应变片的灵敏度约为普通应变片的 55 倍。通过调整撞击杆的发射压力可以得到不同的撞击速度, 从而获得不同的应变率。

SHPB 实验是建立在两个基本的假设基础上的^[10]: ① 杆中一维波假定; ② 试件中应力、应变均匀性假定。

由一维应力波理论可知^[11]:

$$u_1 = C_0 \int_0^{t_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_r) dt, \quad P_1 = EA(\varepsilon_i + \varepsilon_r) \quad (1)$$

$$u_2 = C_0 \int_0^{t_0} \varepsilon_t dt, \quad P_2 = EA\varepsilon_t \quad (2)$$

式中: u_1 、 u_2 分别为入射杆、透射杆与试件相接触的端面的位移; C_0 、 E 和 A 分别为杆中的波速、弹性模

量以及杆的横截面积; P_1 、 P_2 分别为作用在试件两端的力。

由式(1)和式(2)可以推导试件上的应变、应变率和应力分别为:

$$\varepsilon_s = \frac{u_1 - u_2}{l_s} = \frac{C_0}{l_s} \int_0^{t_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) dt \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon_s}{dt} = \frac{C_0}{l_s} (\varepsilon_i - \varepsilon_r - \varepsilon_t) \quad (4)$$

$$\sigma_s = \frac{P_1 + P_2}{2A_s} = \frac{EA}{2A_s} (\varepsilon_i + \varepsilon_r + \varepsilon_t) \quad (5)$$

式中: l_s 为试件长度; A_s 为试件横截面积。

如果假设试件两端应力相等即满足应力应变均匀性假定, 可得

$$\varepsilon_i + \varepsilon_r = \varepsilon_t \quad (6)$$

将式(6)代入式(3)~(5), 可得

$$\varepsilon_s = \frac{2C_0}{l_s} \int_0^{t_0} (\varepsilon_i - \varepsilon_t) dt = -\frac{2C_0}{l_s} \int_0^{t_0} \varepsilon_r dt \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{2C_0}{l_s} (\varepsilon_i - \varepsilon_t) = -\frac{2C_0}{l_s} \varepsilon_r \quad (8)$$

$$\sigma_s = \frac{EA}{A_s} (\varepsilon_i + \varepsilon_r) = \frac{EA}{A_s} \varepsilon_t \quad (9)$$

3.2 动态测试结果

图 3 所示为数据采集系统获得的应变率为 10 400 s⁻¹ 时的应变信号波形。由图可见, 入射波波形较好、噪声较低; 反射波前期波动较大, 随后趋于平缓, 从 0.36 ms 开始下降; 透射波起始段信号较微弱, 随后缓慢增加到 -1.61 V。通过对透射信号和反射信号所包围的区域积分可得, 透射信号与反射信号的能量比约为 1:9.08, 同试件和杆件的波阻抗比一致。

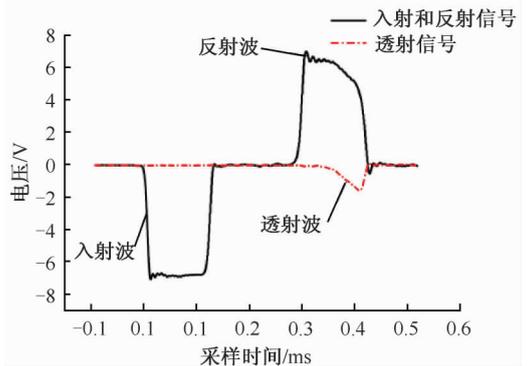


图 3 原始信号波形

Fig. 3 Original signal wave form

图4所示为本文与 Sulisbury 等^[6]的试验结果对比,后者的应变率测量范围为 $1\ 200 \sim 4\ 000\ \text{s}^{-1}$,本文应变率测量范围为 $5\ 000 \sim 13\ 000\ \text{s}^{-1}$ 。从图中可以看到,弹道明胶有明显的应变率效应,随着应变率的增大,弹道明胶的应变增强效应越发显著。在 $\varepsilon = 0.45$ 时,4组应变率下的真实应力从低到高依次为 $14.515, 31.496, 55.597, 96.678\ \text{MPa}$ 。当应变率为 $13\ 000\ \text{s}^{-1}$ 、应变从 0.4 增加到 0.5 时,应力从 $53.558\ \text{MPa}$ 迅速上升到 $164.417\ \text{MPa}$,增大了 3.07 倍。

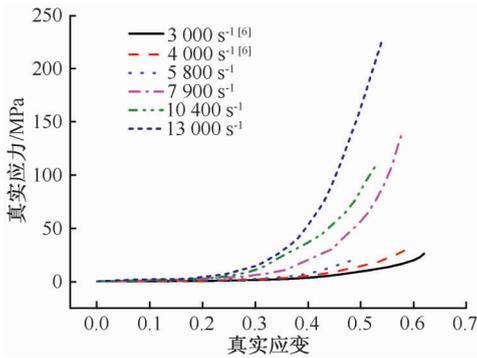


图4 弹道明胶高应变率下的真实应力-应变曲线

Fig.4 True stress-strain curves of ballistic gelatin at high strain rate

4 弹道明胶本构模型

由图4可知,当应变率为常数时,弹道明胶的应力-应变关系近乎指数函数,即 $\sigma = a\varepsilon^m$ 。应变率为 $4\ 000, 7\ 900\ \text{s}^{-1}$ 时,以最小二乘法为评价准则的拟合结果如图5所示。拟合曲线的决定系数 (R^2) 分别达到了 0.995 和 0.997 ,具有较高的拟合度。对各组应变率下的曲线分别进行拟合,得到不同应变率下的 a, m 值(见表1)。判断拟合优度的决定系数 $R^2 > 0.99$,表明拟合效果很好。

表1 不同应变率的拟合结果

Tab.1 Fitting results of different strain rates

应变率/(s^{-1})	a	m	R^2
$3\ 200^{[6]}$	227	4.67	0.992 58
$4\ 000^{[6]}$	372	4.70	0.995 33
5 800	750	5.00	0.997 34
7 900	3 791	6.06	0.997 00
10 400	1608	4.20	0.997 16
13 000	4344	4.76	0.998 73

由表1可知,参数 a 随应变率增加而显著增加,

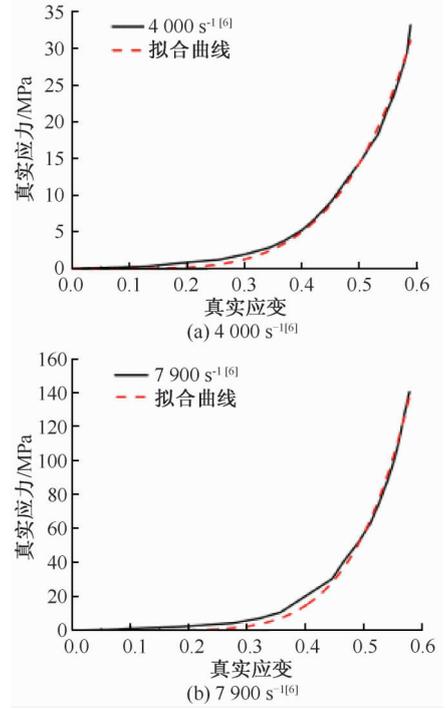


图5 两种不同应变率下真实应力-应变曲线与拟合结果比较

Fig.5 Comparison of the true stress-strain curves and the fitting results at two different strain rates

(a) $4\ 000\ \text{s}^{-1[6]}$, (b) $7\ 900\ \text{s}^{-1[6]}$

但 m 值对应变率的变化不敏感。为了简化经验公式,将参数 m 定为常数。当 $m = 5$ 时,对应 a, R^2 值如表2所示。参数 a 随着应变率的增大单调增加,决定系数 R^2 均大于 0.98 。

表2 参数 $m = 5$ 时拟合结果

Tab.2 fitting results when parameter $m = 5$

应变率/(s^{-1})	a	R^2
3 200	270	0.991 96
4 000	444	0.994 23
5 800	750	0.997 34
7 900	2 032	0.989 86
10 400	2 789	0.982 88
13 000	5 102	0.997 97

画出应变率 $\dot{\varepsilon}$ 和参数 a 的对应曲线并采用指数函数进行拟合(见图6),拟合曲线的决定系数为 $0.983\ 58$ 。将 $a = 6.94 \times 10^{-6} \cdot \dot{\varepsilon}^{2.15}$ 、 $m = 5$ 代入 $\sigma = a\varepsilon^m$ 可得到 $10\ ^\circ\text{C}$ 时 20% 弹道明胶的含应变率本构方程: $\sigma = 6.94 \times \dot{\varepsilon}^{2.15} \varepsilon^5$ (Pa)。该本构方程可写成 $\sigma = k\dot{\varepsilon}^m \varepsilon^n$ 的形式,其中 k, m, n 为 $10\ ^\circ\text{C}$ 、 20% 弹道明胶的材料常数。

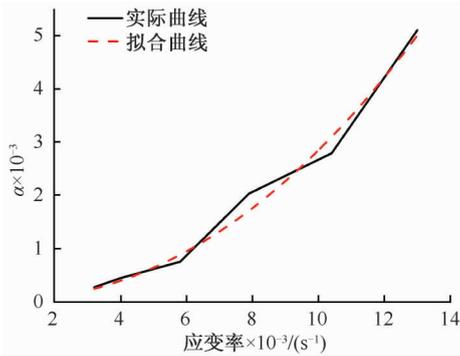


图6 参数 a -应变率曲线与拟合结果比较

Fig. 6 Comparison of parameters a - strain rate curves with the fitting results

5 结论

本文首先给出了弹道明胶的制备方法,随后采用万能材料试验机和和铝制霍普金森杆分别获得 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下 20% 弹道明胶的准静态和动态 ($5\ 800 \sim 13\ 000\ \text{s}^{-1}$) 压缩应力-应变曲线。试验结果表明,弹道明胶在低应变率和高应变率的范围内都有着明显的应变率效应;当应变一定时,应力随应变率增加显著增大。基于测试结果,建立形如 $\sigma = k\varepsilon^m \dot{\varepsilon}^n$ 的含应变率的本构模型,并给出 20% 弹道明胶的材料常数。本文采用的弹道明胶动态力学测试方法可以为低阻抗材料(生物软组织、泡沫等)动态力学测试提供借鉴,建立的弹道明胶动态本构模型可为

创伤弹道学数值计算奠定基础。

参考文献:

- [1] NICHOLAS NC, WELSCH JR. Institute for non-lethal defense technologies report: Ballistic gelatin [R]. USA: The Pennsylvania State University, 2004.
- [2] 王宝珍, 胡时胜. 肌肉类粘弹性超软材料 SHPB 实验的应力应变均匀性分析 [J]. 实验力学, 2011, 26(4): 377-382.
- [3] 王宝珍, 胡时胜. 猪后腿肌肉的冲击压缩特性实验 [J]. 爆炸与冲击, 2010, 30(1): 33-38.
- [4] SALISBURY CP, CRONIN DS. Mechanical properties of ballistic gelatin at high deformation rates [J]. Exp Mech, 2009, 49(6): 829-840.
- [5] RICHLER D, RITTEL D. On the testing of the dynamic mechanical properties of soft gelatins [J]. Exp Mech, 2014, 54(5): 805-815.
- [6] 刘荫秋, 王正国, 马玉媛. 创伤弹道学 [M]. 北京: 人民军医出版社, 1991.
- [7] SELLIER KG, KNEUBUEHL BP. Wound ballistics and the scientific background [M]. Amsterdam: Elsevier, 1994.
- [8] SATO Y, YAMASHITA M, HATTORI T, *et al.* Standardization of split hopkinson pressure bar compression system without frictional effects for metal plate specimens [J]. J Solid Mech Mater Eng, 2009, 3(3): 584-595.
- [9] 王晓燕, 卢芳云, 林玉亮. SHPB 实验中端面摩擦效应研究 [J]. 爆炸与冲击, 2006, 26(2): 134-139.
- [10] 陶俊林. SHPB 系统实验技术研究 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [11] 卢芳云. 霍普金森杆实验技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.