

## 知识介绍

# 国内外 PVB 材性研究

戎文杰<sup>1</sup>, 陈素文<sup>1,2</sup>

(1. 同济大学 土木工程学院建筑工程系, 上海 200092;

2. 同济大学 土木工程防灾国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:**主要介绍了国内外研究 PVB(聚乙烯醇缩丁醛)材性的现状。国内外研究表明, PVB 是应变率及温度敏感材料。应变率增加, 弹性模量变大; 温度升高, 弹性模量和剪切模量均下降。同时, 国内外进行了少量的实验, 研究 PVB 的本构模型。总结发现, PVB 的本构模型可描述为线弹性、弹塑性、线性粘弹性和非线性粘弹性四种, 但本质上 PVB 是非线性粘弹性材料, 不同的环境条件与计算要求可选择不同的本构模型。目前, 国内外学者比较认可的是用超弹性考虑其非线性, 用 Maxwell 模型考虑其粘弹性。

**关键词:** PVB; 应变率相关; 温度敏感; 实验研究; 本构模型

## 引言

近年来, 各种玻璃幕墙在建筑围护结构中得到广泛应用, 较好地满足了建筑物透光性好、美观大方、环保节能的要求。但是, 在爆炸冲击波荷载作用下玻璃作为低强度脆性材料非常容易发生脆性断裂破坏, 破裂生成的碎片由于获得非常大的动能容易对人体造成伤害。

夹胶玻璃作为一种安全玻璃, 被广泛应用于幕墙结构, 其中的 PVB(聚乙烯醇缩丁醛)夹胶作为一种高分子聚合物具有很好的透光性和粘结性。如果发生爆炸时, 所有建筑物的玻璃即使发生破碎, 也能粘附在 PVB 上, 那么将极大地减少飞溅的玻璃碎片, 从而减少人员伤亡和经济损失。所以, 研究夹胶玻璃幕墙在爆炸冲击波作用下的破坏机理, 对优化夹胶玻璃幕墙的抗爆设计和提高玻璃幕墙的安全性能进而保护人身安全和财产安全具有重要意义。为此, 需要研究 PVB 在静载和冲击荷载作用下的材性, 并分析采用不同 PVB 本构模型对玻璃幕墙抗爆性能的影响。国内外有关 PVB 的材性研究并不是很多, 特别是在冲击荷载作用下的材性研究更是少之又少; 本文在大量阅读中外文献及现有工作的基础上, 介绍了国内外研究 PVB 材性的进展以及主要的实验方法和分析方法。

## 1 PVB 的基本特征

PVB 是由乙烯缩丁醛、乙烯醇、醋酸乙烯酯随机地、无组织地聚合形成的一种高分子聚合物, 它的化学名称是聚乙烯醇缩丁醛。化学分子式如图 1 所示。

PVB 具有很好的透光性和粘结性, 因此被广泛应用到建筑夹胶玻璃与汽车挡风玻璃中<sup>[1]</sup>, 选用厚度一般在 0.38mm~2.28mm 之间。

## 2 力学性能指标

目前, 国内外有关 PVB 材性的实验研究工作并不多, 所以可查阅到的数据也很少。表 1<sup>[2]</sup> 给出了

收稿: 2011-10-09; 修回: 2011-11-03;

基金项目: 土木工程防灾国家重点实验室自主课题(SLDRCE 10-B-10);

作者简介: 戎文杰(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为玻璃幕墙抗爆, Tel: 15201918409, E-mail: rongwenjie\_1987@126.com;  
E-mail: swchen@tongji.edu.cn.

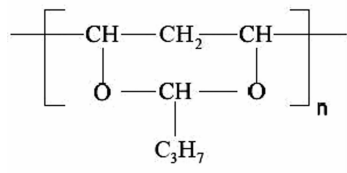


图 1 PVB 化学分子式

Figure 1 Chemical formula for PVB

PVB 的一些基本材料参数,可以看出:PVB 的抗拉强度、抗压强度、抗剪强度均较低,同时泊松比接近 0.5,几乎可以认为是不可压缩体,PVB 具有很好的延性,伸长率可以达到 200% 以上。PVB 在不同温度下的弹性模量并不相同<sup>[3]</sup>,表 1 中给出的是常温下的弹性模量值<sup>[4]</sup>。

表 1 PVB 材料参数

Table 1 Material parameter of PVB

| 项目       | 参数值   |
|----------|-------|
| 比重       | 1.07  |
| 弹性模量/MPa | 50    |
| 抗拉强度/MPa | 24    |
| 抗压强度/MPa | 34    |
| 抗剪强度/MPa | 18    |
| 泊松比      | 0.49  |
| 伸长率      | >200% |

3 应变率相关且温度敏感性

PVB 是一种非线性粘弹性材料<sup>[5]</sup>,在常温静载条件下基本是遵循虎克定律的弹性体。由于 PVB 的粘性特性,其弹性模量、剪切模量受温度的影响较大<sup>[6]</sup>,随着温度升高,弹性模量下降(如图 2 所示<sup>[3]</sup>),剪切模量下降(如图 3<sup>[7]</sup>、4<sup>[8]</sup>所示)。

PVB 的弹性模量受应变率的影响也很大,随着应变率的增加,弹性模量会有所提高(图 2 所示<sup>[3]</sup>);PVB 的剪切模量随时间推移会一直减小(如图 4 所示<sup>[8]</sup>),并且低温剪切模量显著高于高温剪切模量;很多研究者认为,随着时间推移,几乎可以忽略 PVB 的抗剪作用,目前的做法其实偏于保守<sup>[9]</sup>。动力作用下,PVB 剪切模量的变化有待研究。

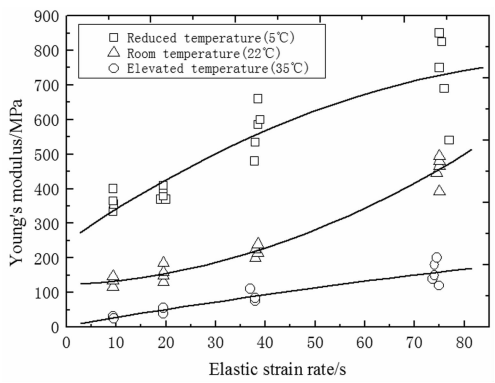


图 2 PVB 弹性模量随应变率及温度的变化关系

Figure 2 Elastic modulus changes with strain rate and temperature

4 实验研究

1980 年,Ferry<sup>[10]</sup>进行了高分子聚合物不同频率的振动实验;1997 年,TPS(丰田生产系统)利用水袋

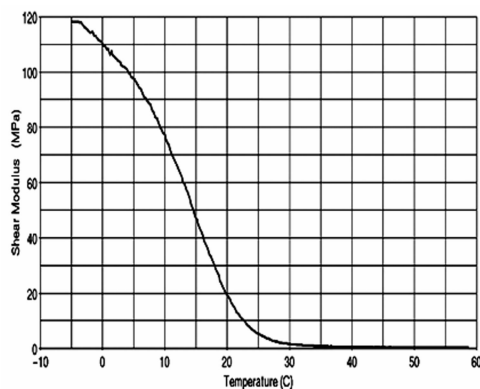


图 3 剪切模量随温度的变化关系

Figure 3 Shear modulus changes with temperature

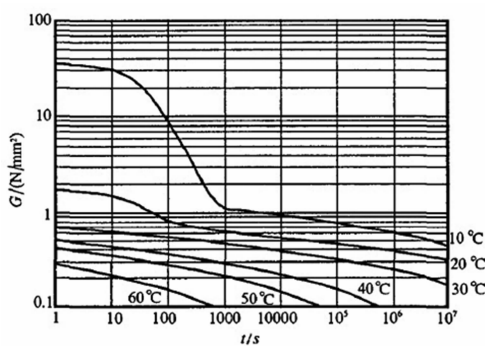


图 4 剪切模量随时间和温度的变化关系

Figure 4 Shear modulus changes with time and temperature

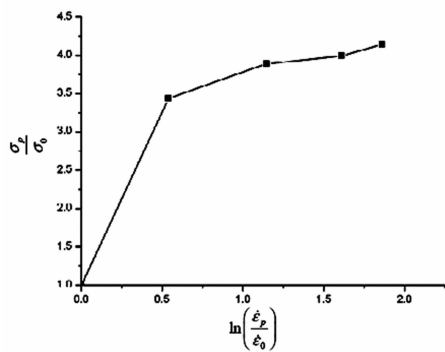


图 5 破坏应力比 VS 应变率比

Figure 5 Dimensionless strain rate versus failure stress ratio

法进行了夹层玻璃平板冲击实验,外推低应变率下的 PVB 材性,并且根据大量的爆炸实验结果和文献 [11] 中的易损曲线进行了校准;Morison<sup>[12]</sup> 开展了低应变率下开裂后夹层玻璃的实验,并从 2003 年开始准备高应变率下的 PVB 拉力实验;从 2004 年开始,Permasteelisa 在 TPS 的帮助下开始研究 PVB 在高应变率下的材性<sup>[3]</sup>;2009 年,清华大学的许骏<sup>[13]</sup> 利用霍普金森压杆(如图 6 所示)完成了冲击压力荷载作用下 PVB 的动力实验,一共进行了 5 种不同应变率的实验:700/s、1200/s、2200/s、3500/s、4500/s,但他没有进行冲击拉力作用下的动力实验;然后分别利用 Maxwell 模型和 Kelvin-Voigt basic 模型对考虑粘性与不考虑粘性情况进行了比较。他的研究认为 PVB 是应变率相关材料(如图 5 示),强度强化因子可达 4;但几乎没有粘弹性,分析时可以忽略粘性。

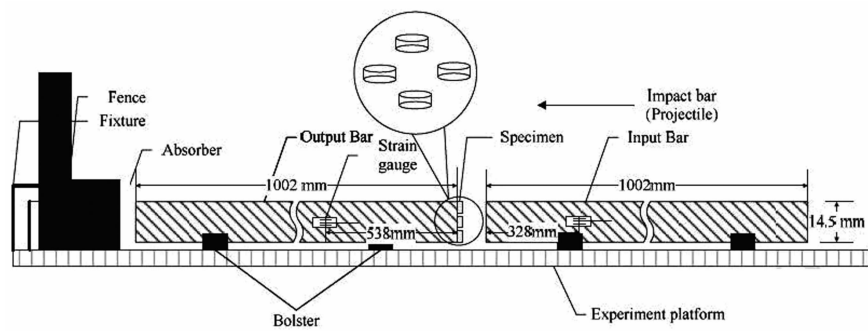


图6 SHPB装置

Figure 6 Device of split Hopkinson pressure bar

## 5 本构模型

### 5.1 线弹性

在美国, WINGARD<sup>[14]</sup>使用弹性模型模拟 PVB, 这一模型只能考虑小变形。

### 5.2 弹塑性

1997年, TPS使用了弹塑性组合膜模型来模拟开裂后夹层玻璃中的PVB, 分析爆炸荷载作用下夹层玻璃系统的反应。Morison<sup>[12]</sup>基于他们所做的低应变下开裂后夹层玻璃的实验, 一直鼓励使用弹塑性TPS模型来模拟PVB。由于分析破碎后夹层玻璃的抗力都不是基于高应变率下的PVB材性, 为了纠正误差, Morison从2003年开始准备高应变率下的PVB拉力实验。Morison的实验发现PVB不同温度下的最大变形量相差超过32%, 他认为这种温度敏感性正暗示了PVB的粘弹性特征, 所以设计时应考虑其粘性; 他的实验表明PVB是应变率相关的(如图7所示)。

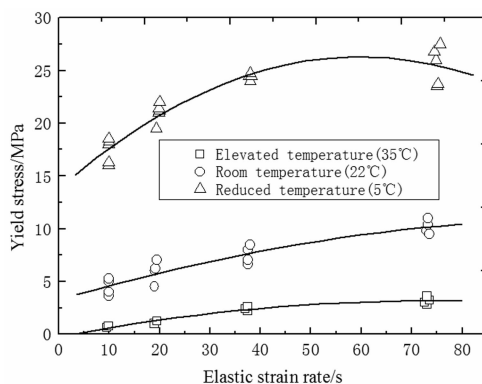


图7 不同应变率下的屈服应力

Figure 7 Yield stress at different elastic strain rate

### 5.3 线性粘弹性

Ferry基于不同频率的振动实验, 采用线性粘弹性<sup>[10]</sup>来描述小应变和小应变率下的聚合物性能, 并且采用广义的麦克斯韦系列参数进行了模拟。

$$\sigma_{ij}(\tau) = \int_0^\tau 2G(\tau - \tau') \frac{de_{ij}}{d\tau'} d\tau' + \delta_{ij} \int_0^\tau K(\tau - \tau') \frac{d\epsilon_{kk}}{d\tau'} d\tau' \quad (1)$$

在等温条件下进行计算, 其中,  $\sigma_{ij}$  为  $\tau$  时刻的现时应力;  $e_{ij} = \epsilon_{ij} - \delta_{ij}\epsilon_{kk}/3$  为偏应变;  $\epsilon_{kk}$  为体积应变;  $G(t)$  为剪切松弛模量;  $K(t)$  为体积松弛模量;  $\tau = t/a_T$ ,  $t$  为实际时间,  $a_T$  由时温等效方程(2)<sup>[10]</sup>确定:

$$\log_{10}(a_T) = -\frac{C_1(T - T_0)}{C_2 + T - T_0} \quad (2)$$

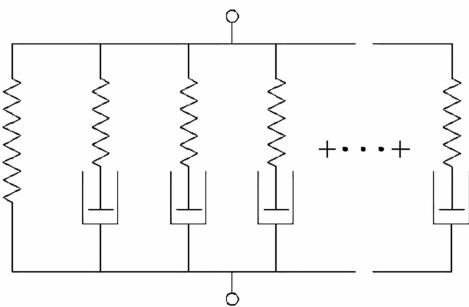


图 8 广义 Maxwell 模型

Figure 8 Generalised Maxwell series

其中  $C_1$ ,  $C_2$  为材料常量,  $T$  为温度,  $T_0$  为参考温度。

剪切松弛模量  $G(t)$  由式(3)<sup>[10]</sup>给出:

$$G(t) = G_{\infty} + \sum_{i=1}^n G_i e^{-t/\tau_i} \quad (3)$$

其中  $G_{\infty}$  为长期剪切模量,  $G_i$  为瞬时剪切模量,  $\tau_i$  为对应的松弛时间;  $G_i$ ,  $\tau_i$  按表 2<sup>[10]</sup>取值。

表 2 广义麦克斯韦系列剪切松弛模量

Table 2 Terms in generalised Maxwell series description of shear relaxation modulus

| 指数 i | $G_i/G_0$ | $\tau_i$                 |
|------|-----------|--------------------------|
| 1    | 0.1606000 | $3.2557 \times 10^{-11}$ |
| 2    | 0.0787770 | $4.9491 \times 10^{-9}$  |
| 3    | 0.2912000 | $7.2427 \times 10^{-8}$  |
| 4    | 0.0711550 | $9.8635 \times 10^{-6}$  |
| 5    | 0.2688000 | $2.8059 \times 10^{-3}$  |
| 6    | 0.0895860 | $1.6441 \times 10^{-1}$  |
| 7    | 0.0301830 | $2.2648 \times 10^0$     |
| 8    | 0.0076056 | $3.5364 \times 10^1$     |
| 9    | 0.0009634 | $9.3675 \times 10^3$     |
| 10   | 0.0004059 | $6.4141 \times 10^5$     |
| 11   | 0.0006143 | $4.1347 \times 10^7$     |

注:短期剪切模量  $G_0=0.471\text{GPa}$ , 以  $20^\circ\text{C}$  为参考温度, Williams-Landell-Ferry(WLF)参数分别为  $C_1=20.7$ ;  $C_2=91.1$

Bennison 等<sup>[15]</sup>假定 PVB 为线性粘弹性模型,分析了双向弯曲作用下夹胶玻璃的破裂情况; Duser 等<sup>[16]</sup>利用这一模型分析了低应变率下的夹层玻璃从开始变形直至破坏的全过程; Wei 等<sup>[17]</sup>利用这一模型分析了爆炸荷载下未开裂夹层玻璃的反应。

#### 5.4 非线性粘弹性

Du Bois<sup>[18,19]</sup>、Müllerschön<sup>[20]</sup>、Spingler 等<sup>[21]</sup>提出了更加复杂的非线性粘弹性模型;由于在高应变率下, PVB 会极大地表现出其粘性,目前对如何把非线性与粘弹性结合起来模拟 PVB 性能,还没有达成一致意见。

文献[20]中提到用 Ogden 超弹性模型考虑非线性,用广义 Maxwell 模型(如图 8 示)考虑粘弹性。Ogden 超弹性模型是用来描述大变形、大位移材料的最佳模型;广义 Maxwell 模型由多个 Maxwell 单元并联在一起,每个 Maxwell 单元包括一个弹性模量为  $\mu_j$  的弹性应变弹簧和一个对应粘度为  $\eta_j$  的粘性应变阻尼器。

Ogden 材料模型<sup>[20]</sup>:

$$W = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^n \frac{\mu_j}{\alpha_j} (\lambda_i^{\alpha_j} - 1) + K(J - 1 - \ln J) \quad (4)$$

这里,  $\alpha_j$ ,  $\mu_j$  均为材料常数,  $J = \lambda_1 \lambda_2 \lambda_3$ ,  $\lambda_i^* = \lambda_i J^{-1/3}$ , 假定  $\frac{\partial J}{\partial \lambda_i} = \lambda_j \lambda_k$ ; 式中  $K$  为体积弹性模量;  $\lambda_i$

为主伸展率; PVB 可以近似看成不可压缩材料, 有  $J = 1$ ,  $\lambda_i^* = \lambda_i$ 。

由式(4), 对  $\lambda_i$  求偏导数有:

$$\frac{\partial W}{\partial \lambda_i} = \tau_i = \sum_{j=1}^n \mu_j \left[ \frac{\lambda_i^{*a_j}}{\lambda_i} - \frac{1}{3} \frac{\lambda_i^{*a_j}}{\lambda_i} - \frac{1}{3} \frac{\lambda_j^{*a_j}}{\lambda_i} - \frac{1}{3} \frac{\lambda_k^{*a_j}}{\lambda_i} \right] + \frac{K(J-1)}{J} \lambda_j \lambda_k \quad (5)$$

由式(5)可以求出柯西应力为:

$$\sigma_i = \frac{1}{\lambda_j \lambda_k} \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} = \sum_{j=1}^n \frac{\mu_j}{J} \left[ \lambda_i^{*a_j} - \sum_{k=1}^3 \frac{\lambda_k^{*a_j}}{3} \right] + \frac{K(J-1)}{J} \quad (6)$$

用 Prony 级数表示 Maxwell 单元<sup>[20]</sup>:

$$g(t) = \sum_{m=1}^N G_m e^{-\beta_m t} \quad (N = 1, \dots, 6) \quad (7)$$

$$\sigma_{ij} = \int_0^t g_{ijkl}(t-\tau) \frac{\partial \epsilon_{kl}}{\partial \tau} d\tau \quad (8)$$

式中,  $G_m$  为剪切模量;  $\beta_m = \frac{1}{\tau_m}$ ,  $\tau_m$  为 Prony 级数松弛时间分量;  $N$  为 Maxwell 单元个数;  $t$  为实际时间;  $\tau$  为松弛时间。

由于当前可用的非线性粘弹性模型并不能够综合地模拟 PVB 的非线性和粘弹性; Morison 等变换了思路: 首先假设一些参数, 利用这些参数和多个简单可行的材料模型近似拟合出 PVB 轴向拉伸实验的结果, 然后计算出不同温度和应变率下假设参数的值, 得到材料模型。

## 6 结论

PVB 的材性研究经过了一个漫长的过程: 线弹性、弹塑性、线性粘弹性、非线性粘弹性。这四种模型其实都可以用来描述 PVB 的特性, 具体用哪个模型进行分析, 需要根据具体的环境条件和计算要求决定。在小变形、温度不变、静力荷载作用的情况下, 可以选择线弹性和弹塑性模型描述 PVB; 在小变形、温度变化或者动力荷载情况下, 可以选择线性粘弹性模型描述 PVB; 在大变形、温度变化或者动力荷载作用下, 可以选择非线性粘弹性来描述 PVB; 但 PVB 本质上是非线性粘弹性材料。

## 参考文献:

- [1] 许骏, 刘博涵, 葛东云, 李一兵. 第九届全国冲击动力学学术会议论文集(河南焦作), 2009. pp: 683~687.
- [2] 高晓明, 张念泰. 塑料加工, 2001, 30(1): 42~43.
- [3] Morison C, Zobec M, Franceschet A. The measurement of PVB properties at high strain rates, and their application in the design of laminated glass under bomb blast. Croydon, UK, 2010.
- [4] Mukherjee S, Chawla A, Mahajan P, Mohan D, Mane N S, Singh M, Sakurai M, Tamura Y. IRCOB, Montpellier, France, 2000. pp: 323~334.
- [5] Zatloukal M. J NON-NEWTON FLUID, 2003, 113(2~3): 209~227.
- [6] Lu Y C, Shinozaki D M. Experimental Mechanics, 2010, 50(1): 71~77.
- [7] Haene P D. Experimental data of PVB. Belgium, Solutia Europe SA/NV, 2002.
- [8] Gräf H, Albrecht G, Sackmann V, Schuler C, Bucak Ö. Structural Engineering International, 2004, 14(2): 129~133(5).
- [9] 石永久, 马赢, 王元清. 计算力学学报, 2007, 24(5): 664~668.
- [10] Ferry J D. Viscoelastic Properties of Polymers. 3<sup>rd</sup> Edition. New York: Wiley, 1980.
- [11] Morison C. Response of glazed facades to blast loading. London: University of Westminster, 1999.
- [12] Morison C. 11th International Symposium on the Interaction of the Effects of Munitions with Structures. Manheim, Germany, May 2003.
- [13] Xu J, Li Y B, Ge D Y, Liu B H, Zhu M G. Int J Impact Eng, 2011, 38: 106~114.
- [14] Applied Research Associates Inc. US Washington DC, ARA-TR-05-16462-2. July 2005.
- [15] Benneson S J, Jacota A, Smith C A. J Am Ceram Soc, 1999, 82(7): 1761~70.
- [16] Duser A V, Jagota A, Bennison S J. J Eng Mech, April 1999: 435~442.

- [17] Wei J, Shetty M S, Dharani L R. Comput Struct, 2006, 84: 699~707.
- [18] Du Bois P A, Kolling S, Fassnacht W. Comp Mater Sci, 2003, 28: 675~683.
- [19] Du Bois P A, Kolling S, Koesters M, Frank T. Int J Impact Eng, 2006, 32: 725~740.
- [20] Müllerschön H, Dangel A, Karjan N, Hummel A, Wüst A. LS-DYNA Anwenderforum, Bamberg, 2004.
- [21] Spingler G. Numerical modeling of polymer materials for crash applications. East Kilbride: NAFEMS Benchmark, January/April 2006.

## Research on Material Properties of PVB at Home and Abroad

RONG Wen-jie<sup>1</sup>, CHEN Su-wen<sup>1, 2</sup>

(1. Department of Building Engineering in Civil Engineering institute, Tongji University, Shanghai, 200092, China

2. State Key Laboratory for Disaster Prevention in Civil Engineering, Tongji University, Shanghai, 200092, China)

**Abstract:** This paper mainly introduces the status quo of researching on PVB (Polyvinyl Butyral) material properties at home and abroad. It shows that PVB is strain rate dependence and temperature sensitivity material. While strain rate increasing, elastic modulus will larger; While temperature increasing, elastic modulus and shear modulus decreased. Meanwhile, there are few experiments at home and abroad researching on the constitutive model of PVB. In general, PVB can be described as four constitutive models: linear elastic, elastic-plastic, linear viscoelastic and non-linear viscoelastic, but essentially PVB is non-linear viscoelastic materials. Different environmental conditions and computing requirements should choose different constitutive model. At present, scholars both domestic and oversea recognize using hyperelastic to consider the nonlinear, and considering the viscoelastic by a Generalised Maxwell Series.

**Key words:** Polyvinyl Butyral (PVB); Strain rate dependence; Temperature sensitivity; Experimental research; Constitutive model