

树脂基纤维增强复合材料高应变率下力学性能的研究进展

王绪财 曲英章 彭 刚 冯家臣 刘原栋

(中国兵器工业集团第五三研究所, 济南 250031)

摘要 综述了国内外在树脂基纤维增强复合材料的动态力学性能测试的实验技术、高应变率下力学性能和本构模型方面所开展工作的研究进展,指出了研究中应注意的问题。

关键词 树脂基纤维增强复合材料 动力学 高应变率 本构模型

树脂基纤维增强复合材料具有密度低、比强度高、比模量高和抗冲击性能好等优异的性能,在装甲防护、飞机、舰船和汽车等的防撞击结构部件等动态领域的应用越来越广泛。树脂基纤维增强复合材料在这些领域的应用中会经受冲击载荷作用,所以研究其高应变率下的动态响应行为,有利于为其结构设计提供可靠的依据。

树脂基纤维增强复合材料为两相或者多相复合材料,与金属材料相比,在冲击载荷下的损伤和破坏机制要复杂得多,如基体破碎、纤维脱粘、分层、断裂等,因此对树脂基纤维增强复合材料高应变率下的力学性能进行表征是一项相当复杂困难的工作,需要有比表征金属材料更加全面的试验设计和测试手段。

笔者主要综述了国内外在实现树脂基纤维增强复合材料高应变率下的实验技术及力学性能和本构模型方面所做的研究工作。

1 树脂基纤维增强复合材料动态力学性能测试的实验技术

研究树脂基纤维增强复合材料在高应变率下的动态响应行为的相关实验技术在不断发展和改进,如 Charpy-Izod 法、落重法、膨胀环法、分离式霍普金森杆法(SHB)、平板冲击法等,每个方法都有各自的应变率适用范围。

Charpy-Izod 法^[1-2]最早应用于研究复合材料冲击行为,但该方法中试样尺寸会对材料力学性能产生影响,难以评定高应变率下树脂基纤维增强复合材料的抗冲击行为。落重法^[3]可以实现树脂基纤维增强复合材料在中等应变率($\geq 10^2 \text{ s}^{-1}$)下的压缩性能研究。在高应变率($10^2 \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$)下,SHB 法是目前研究树脂基纤维增强复合材料动态响应行为最为常用的实验技术。虽然膨胀环法^[4]和平板冲击法^[3]可以实现更高的应变率($> 10^4 \text{ s}^{-1}$),但是仍然存在一些技术问题需要解决,如膨胀环法中位移的精确测量,平板冲击法中发射机构的设计,板自由飞行过程中的定向问题等,因此应用比较少。

目前 SHB 法有压缩式(SHPB)、拉伸式(SHTB)和剪切式(SHSB)测试系统,可以分别对复合材料高应变率下的压缩、拉伸和剪切性能进行试验研究。图 1 为其装置简图。

理想的 SHB 法实验要满足两个基本假设^[5]: (1) 冲击波在弹性杆中应是一维应力波传播; (2) 试样中应力均匀化。要满足冲击波在杆中是一维应力波传播,加载杆的横向

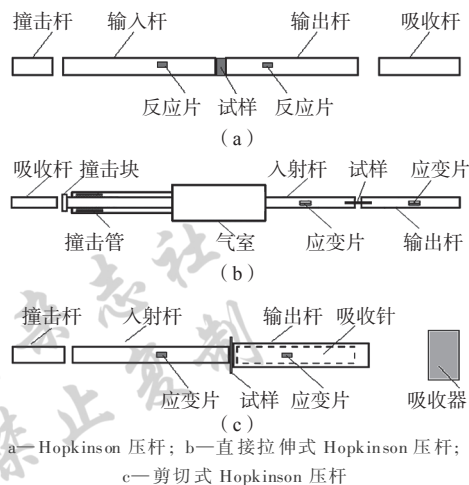


图 1 压杆装置

尺寸应远小于波长;试样中应力均匀化则取决于应力波在试样中透射-反射的次数及试样与压杆之间的波阻抗比。Meng H 等^[6]指出应力不均匀是由惯性效应和摩擦效应引起的。文献[5-9]对 SHB 法中影响试样应力均匀化的因素进行了大量研究,并提出了一些改进措施,如合理设计试样尺寸调整入射脉冲波形使用整形器和润滑剂等,可以有效改善试样中的应力均匀化。

冲击过程中,应变测量的准确性对实验结果的客观性至关重要。应变片法应用较多,但常规的应变片法难以测量较大应变和断裂应变。同时,在拉伸式 SHB 法中,试样与杆连接的好坏对应变的测量准确性有较大的影响。Li Yulong 等^[10]将激光探测系统(LORD)引入到 SHB 系统中来测量应变。通过与贴应变片法比较得出,LORD 系统可靠性好,并且可以准确测量 SHB 拉伸实验中试样的拉伸应变和断裂应变,具有快捷、方便等优点。

在研究材料的本构关系时,需要恒定的应变率,而实际的 SHB 法中应变率是变化的,计算过程中采用的是其平均应变率,因此对于应变率敏感度高的材料来说,误差的影响会比较大,这对材料本构关系的研究是不利的。因此,为研究材料本构关系,SHPB 实验中的恒应变率加载技术是一个重要的发展方向,S. Ellwood 等^[11-14]进行了相关的技术

研究工作。

2 高应变率下树脂基纤维增强复合材料的力学性能

2.1 压缩性能

对于纤维增强复合材料动态压缩性能研究,加载方式有沿厚度方向和面内方向两种,不同的加载方式下表现出不同的力学性能及不同的应变率相关性。曹茂盛等^[15]通过对新型碳纤维增强改性环氧树脂复合材料在厚度方向和平面内纵向的动态压缩性能进行研究比较,发现在高应变率条件下层合板厚度方向的动态压缩强度及失效应变明显大于平面内加载方向。这主要是因为不同方向加载时,其破坏模式不同。

许沐华等^[16]研究发现,高应变率下,沿厚度方向加载时,试件呈45°剪切破坏并产生脱层、层间滑移和纤维断裂等破坏。而沿面内方向加载时,纤维屈曲和轴向劈开为主要失效模式^[17]。蒋邦海等^[18]比较分析了碳纤维二维正交平纹机织布增强树脂基复合材料三个主方向(垂直于碳布方向、碳布经向、碳布纬向)的动态压缩响应特点,发现垂直于碳布方向的力学性能及其与应变率的相关性主要由树脂基体所控制;碳布经向和纬向的力学性能主要由碳纤维所控制,并且和纤维初始微屈曲相关。

2.2 拉伸性能

树脂基纤维增强复合材料的动态拉伸性能研究中,载荷的加载方式也分为沿面内方向和厚度方向两种。

沿面内方向拉伸时,树脂基体破碎、纤维拉脱、纤维断裂是主要的损伤和断裂模式。L. M. Welsh等^[19]研究了碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维增强复合材料的高应变率性能。研究发现,断裂强度和断裂形貌都具有应变率相关性。K. Saka等^[20]研究了混杂型复合材料的动态拉伸响应。研究发现,碳纤维增强复合材料断裂时,树脂基体破碎,而纤维拉脱很少。而玻璃纤维复合材料中会有扩展的破坏区域,没有明显的断裂面,存在大量的纤维拉脱。韩小平等^[21]研究了碳纤维增强塑料(CFRP)和玻璃纤维增强塑料(GFRP)两种正交复合材料的动态拉伸性能。研究得出,随着应变率的提高,CFRP和GFRP的断裂应变增大,拉伸弹性模量明显减小,GFRP的拉伸强度明显增大,但CFRP的拉伸强度几乎不受加载速率的影响。彭刚等^[22]用爆炸自由膨胀环技术研究超高应变率下树脂基纤维增强复合材料的拉伸性能,发现不同纤维(碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维)增强树脂基增强复合材料的拉伸性能随应变率的变化呈现出不同的变化规律。说明,碳纤维、玻璃纤维、芳纶纤维增强的复合材料都存在应变率效应,但由于不同纤维本身性能不同,其增强的复合材料的拉伸性能和破坏模式也存在一定的差别。

由于分层是复合材料的重要吸能机制,因此研究沿厚度方向加载时树脂基纤维增强复合材料的层间性能有重要意义。蒋邦海等^[23]研究了碳纤维织物增强复合材料的层间冲击、拉伸性能,发现层间拉伸弹性模量和拉伸强度都具有一定的应变率强化效应,但是层间拉伸破坏应变几乎不存在应

变率效应。J. L. Medina等^[24]也对碳纤维正交铺层、碳纤维平面织物、玻璃纤维平面织物增强环氧基3种复合材料进行了准静态和动态层间拉伸实验。结果表明,3种复合材料的层间拉伸强度和拉伸破坏应变都存在一定的应变率强化效应,但它们的层间拉伸弹性模量和泊松比对应变率并不敏感。

可以看出,树脂基纤维增强复合材料层间性能也存在一定的应变率效应,但不如面内方向加载时的应变率效应明显。这与其破坏模式的差异有关,沿面内方向拉伸时,基体破碎、纤维拉脱及纤维拉断都会发生,基体、纤维及界面的应变率效应综合影响材料的整体性能,而沿厚度方向拉伸时,层间拉伸破坏主要发生在相邻纤维铺层的层间界面处,界面的应变率效应起主要作用,与基体、纤维及界面三者的综合效应相比要小得多。

2.3 剪切性能

在实际工程应用中纤维增强复合材料常处于复杂的应力状态下,同时受到法向应力和剪切应力的复合加载,如在穿甲、破甲等侵彻过程中,很大程度是由于剪切作用造成的。因此,理解高应变率下剪切作用对纤维增强复合材料的破坏所起的作用十分关键。

材料剪切破坏的方式有扭转剪切和压缩剪切两种。Hopkinson扭杆是高应变率剪切实验中一个常规方法,但Hopkinson扭杆实验中试样形状比较复杂,对于复合材料来说加工比较困难。同时由于该方法提供的剪切数据属于扭转剪切,与实际中常见的复合压剪的状况存在差异,因此利用Hopkinson扭杆对复合材料高应变率剪切性能的研究较少。研究纤维增强复合材料剪切性能较多的是通过改进Hopkinson杆的杆系结构的方法^[25]。

纤维增强复合材料的层间剪切性能与横向剪切性能明显不同。B. Bouette等^[26]在应变率 $10^{-3} \sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ 范围研究了环氧树脂/碳纤维层合板的层间剪切性能。研究发现应变率对该材料的层间性能几乎没有影响,对断裂表面有较小的影响。S. M. Werner等^[27]研究了环氧树脂/编织石墨纤维层合板在 $6000 \sim 18000 \text{ s}^{-1}$ 应变率下的层间剪切和横向剪切。研究结果显示,层间剪切的应变率效应不明显,断裂主要发生在纤维与基体的界面处。但是,横向剪切时应变率效应主要是变形过程中基体所起的作用。所以,应变率对横向剪切性能的影响要比层间剪切性能明显。

另外,层合板与三维编织复合材料应变率效应的控制相不同。S. M. Werner等^[27,28]发现剪切过程中基体的应变率效应起重要作用。而Sun Baozhong等^[29]研究了三维编织复合材料的剪切行为,认为纤维的应变率效应对材料的抗冲剪性能有重要影响。

由以上分析可以看出,应变率对树脂基纤维增强复合材料力学性能的影响较为复杂,与增强纤维和基体的性能、复合材料的结构及载荷的作用形式都密切相关。因此在研究树脂基纤维增强复合材料的高应变率下力学性能时应综合

考虑这些因素的影响。

3 应变率相关的动态本构模型

由于复合材料的各向异性和非线性,所以要建立其应变率相关的本构模型比较困难。最早将应变率引入到纤维增强复合材料模型中的是 K. J. Yoon 等^[30],他们是在 C. T. Sun 等^[31]的单参数塑性模型的基础上,建立了单参数过应力粘塑性模型来描述热塑性基复合材料的应变率相关非线性拉伸应力-应变行为。后来 S. V. Thirupukuzhi 等^[32-33]建立了一个三参数的 3-D 粘塑性模型来描述纤维复合材料的应变率相关拉伸行为。J. Tsai 等^[34-35]提出了一个非线性应变率相关粘塑性模型来描述压缩应力-应变关系,他们还考虑了应变率效应和剪切应力对压缩强度的影响,提出了可以描述复合材料的非线性弹性率和相关的动态微弯曲模型。O. Bing 等^[8]基于对单向环氧树脂/碳纤维复合材料低应变率下的偏轴测试数据,建立了应变率相关的非线性本构模型和动态压缩强度模型(纤维微弯曲模型)。

复合材料在冲击载荷下会发生基体开裂、裂纹发展、层间分层和滑移、纤维拉脱和拉断等损伤,这些损伤会对材料的力学性能产生重要影响。但上述模型都未考虑动态载荷下损伤对材料性能的影响。为描述损伤对材料动态性能的影响,有的学者从宏观角度出发,引入损伤量来刻画复合材料内部损伤行为的总体效果。D. Nandlall 等^[36]提出了含损伤量的本构模型,引入内变量损伤量 D 来描述一维应力应变关系:

$$\sigma = E(1 - D) \varepsilon \quad (1)$$

式中: σ ——应力;

E ——拉伸弹性模量;

ε ——应变率。

损伤量 D 是将基体开裂、脱层、纤维断裂等诸多破坏因素综合考虑在内的内变量。损伤演化方程为 Weibull 分布函数:

$$D = 1 - \exp\left[-\frac{1}{ne}\left(\frac{E\varepsilon}{Y}\right)^n\right] \quad (2)$$

式中: n ——影响曲线形状的参数;

e ——自然对数底数;

Y ——屈服强度。

但 Nandlall 并未给出 n 的具体表达式,也没有对它的物理意义作出解释。许沐华等^[16]认为, n 应该是一个与应变率有关的参数,它反映了应变率在材料损伤过程中的作用,因此应变率与 n 之间存在一定的关系。为此,在(1)式的基础上,同时考虑应变率对损伤和强度的影响,提出如下形式的本构关系:

$$\sigma = E\varepsilon(1 - D)\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^m \quad (3)$$

式中: ε_0 ——参考应变率;

m ——应变率系数。

损伤量 D 依然是 Weibull 分布函数。通过本构模型(2)、(3)式所得的应力-应变曲线与实验曲线比较得出:

在高应变率下(1563.5、1986.8 s⁻¹)模型所得的曲线与实验曲线较好地吻合;在应变率较低时(683.7、782.5 s⁻¹)由本构模型所得曲线的软化部分比实验曲线要陡,因此该本构模型适用于描述较高应变率下材料的本构关系。

可以看出,将应变率效应及损伤弱化引入到动态本构模型中可以更好地描述树脂基纤维增强复合材料的本构关系,但所建立的本构模型仍有一定的局限性,如应变率适用范围窄,因此,对于树脂基纤维增强复合材料动态本构模型还需要进一步的深入研究。

4 结语

通过对国内外在树脂基纤维增强复合材料的动态实验技术、高应变率下力学性能和本构模型方面所开展的研究工作进行分析回顾可以看出:

(1) 保证试样中应力均匀化及应变的准确测量是纤维增强复合材料高应变率下力学性能测试的关键问题。另外,恒应变率加载技术是 SHB 法的一个重要发展方向。

(2) 应综合考虑应变率、纤维和基体的性能、复合材料的结构以及加载方式对树脂基纤维增强复合材料高应变率下力学性能的影响。

(3) 将应变率效应及损伤弱化引入到动态本构模型中可以更好地描述树脂基纤维增强复合材料的本构关系,但仍存在一定的局限性,如应变率适用范围窄,还需要进一步的深入研究。

参考文献

- [1] Adams D F, et al. Mat J Sci Eng, 1975, 19: 245 - 251.
- [2] Adams D F, et al. Fibre Sci Techn, 1975, 8: 275 - 283.
- [3] Sierakowski R L. High strain rate testing of composites [C]. Wright - Patterson Air Force Base, 1988.
- [4] 彭刚,等.实验力学,2004,19(2):136 - 143.
- [5] 袁秦鲁,等.爆炸与冲击,2007,27(6):541 - 545.
- [6] Meng H, et al. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28: 537 - 555.
- [7] Yang L M, et al. Composites Science and Technology, 2005, 31: 129 - 150.
- [8] Bing Qida, et al. Composites Science and Technology, 2005, 65: 2481 - 2491.
- [9] Ninan L, et al. Int J Impact Eng, 2001, 25: 291 - 313.
- [10] Li Yulong, et al. Int J Impact Eng, 2007, 34: 784 - 798.
- [11] Ellwood S, et al. Journal of Physics E: Science Instrument, 1982, 15: 280 - 282.
- [12] 陶俊林,等.爆炸与冲击,2004,24(5):413 - 418.
- [13] 宋力,等.霍普金森压杆实验的恒应变率加载设计[C].第四届全国爆炸力学实验技术学术会议,2006:28 - 32.
- [14] 宋力,等.爆炸与冲击,2005,25(3):207 - 216.
- [15] 曹茂盛,等.材料工程,2008(4):15 - 18.
- [16] 许沐华,等.实验力学,2001,16(1):26 - 33.
- [17] Kilo A, et al. Polymer Testing, 2003, 22: 883 - 887.
- [18] 蒋邦海,等.复合材料学报,2005,22(2):109 - 115.

[19] Welsh L M, et al. DYMAT 85[C] . J de Physique, 1985:520.

[20] Saka K, et al. Proceedings of the IUTAM Colloquium on Macro – and micro – mechanics of high velocity deformation and fracture [C] . Tokyo: Springer – Verlag, Berlin, 1985:97.

[21] 韩小平,等. 西北大学学报,2006,24(3) :330 – 333.

[22] 彭刚,等. 热固性脂,2006,21(4) :37 – 40,53.

[23] 蒋邦海,等. 复合材料学报,2005,22(5) :107 – 112.

[24] Medina J L, et al. Journal De Physique IV, 2000:275 – 280.

[25] 崔云霄,等. Hopkinson 杆动态剪切实验技术综述[C] . 第四届全国爆炸力学实验技术学术会议论文集,2006:1 – 10.

[26] Bouette B, et al. Compos Sci Technol, 1992,45:313 – 321.

[27] Wemer S M, et al. Journal of Composite Materials, 1986,20(4) :365 – 374.

[28] Roemdeau S, et al. Journal of Composite Materials, 1996,30(13) :1494 – 1512.

[29] Sun Baozhong, et al. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2006,25(17) :1833 – 1845.

[30] Yoon K J, et al. J Compos Mater, 1991,25:1277 – 1296.

[31] Sun C T, et al. J Compos Mater, 1989,23:1009 – 1020.

[32] Thiruppukuzhi S V, et al. Composites: Part B, 1998,29B:535 – 546.

[33] Thiruppukuzhi S V, et al. Compos Sci Technol, 2001,61:1 – 12.

[34] Tsai J, et al. Compos Sci Technol, 2002,62:1289 – 1297.

[35] Tsai J, et al. Int J Solids Struct, 2004,41(11 – 12) :3211 – 3224.

[36] Nandall D, et al. Composites Science and Technology, 1998,58:1463 – 1469.

REVIEW OF MECHANICAL PERFORMANCE OF FRP AT HIGH STRAIN RATE

Wang Xucai, Qu Yingzhang, Peng Gang, Feng Jiachen, Liu Yuandong
(CNGC Institute 53, Jinan 250031, China)

ABSTRACT The research progresses of dynamic experimental technology, mechanical performance and constitutive model of fibre reinforced polymer(FRP) under high strain rate at home and abroad were reviewed, and the problems must be noticed were pointed out.

KEYWORDS fibre reinforced polymer, dynamic mechanics, high strain rate, constitutive model

家电下乡拉动聚氨酯硬泡消费

2009 年对于国内聚氨酯硬泡需求市场影响最大的,无疑是家电下乡政策。

冰箱、冰柜仍是聚氨酯硬泡应用的最大下游行业,其消费量占聚氨酯硬泡总消费量的 70% 以上。“冰箱下乡”在全国的大力推广,不仅使国内冰箱企业受益,同时带动其上游原料聚氨酯硬泡需求增长。

同时,家电下乡政策中的“太阳能下乡”的顺利推广,使得具有绿色环保功能的聚氨酯硬泡材料更多地应用于太阳能生产中。

家电下乡作为我国促进内需消费的重要政策之一,对家电企业提升业绩起到了很大的作用,同时对整个聚氨酯硬泡市场也产生了重要的影响,在 2009 国际聚氨酯高峰论坛上,中国家用电器协会将通过相关数据,解析了家电下乡政策对行业的影响力。(慧聪)

日本通产省基因重组技术造塑料

日本通产省开始进行“生物技术工厂”的技术开发,运用基因重组技术,利用微生物制造塑料等工业原料。利用微生物的生物工厂在生产塑料等方面,比利用石油消耗的能源少,因此,通产省确定的目标是,到 2010 年以后,化学制品的 30% 生产过程都要在生物工厂中进。

生物工厂生产塑料的过程是,从酶及细菌等微生物中清除多余成分,只留下微生物维持生存所必要的最低限度基因,提取制造工业原料所必要的微生物,它被称作“宿主”。把这种“宿主”与制造特殊酶的基因重组,使其分泌或积蓄

制造“生物聚酯”等的物质,这种“生物聚酯”就是化学工业制品的原料。

生物工厂可以在常温下制造化学制品,消耗的能源很少。通产省认为,如果化学制品的制造过程 30% 使用生物技术,其国内的能源消耗量可以减少 1%。(慧聪)

塑料行业第四季度增幅可期

10 月中旬,在内蒙古包头市举办的首届中国塑料产业论坛上,与会专家表示,尽管受到了金融危机的严重冲击,但各种迹象表明,我国塑料工业发展前景依然广阔,尤其是西部地区发展潜力巨大。

据介绍,全球金融危机的暴发,使塑料制品的外需市场严重萎缩,出口受阻,但是国内需求依然旺盛。今年以来,我国塑料薄膜、塑料管及附件、塑料丝绳等主要塑料制品的产量、产值及消费都在平稳增长,行业总体形势较好。预计在国家不断促进经济增长的大环境下,塑料行业第四季度将继续保持平稳增长态势,增幅可达两位数。

特别值得提及的是西部地区塑料制品产业发展迅猛。统计数据显示,今年前 8 个月,西部省份的塑料制品产量均在大幅度增长,如内蒙古同比增长 49%、青海增长 55%、甘肃增长 29%、陕西增长 22%。可见,西部地区塑料行业正在崛起。

与会专家表示,为了实现塑料产业的健康可持续发展,必须积极实施产业结构调整,加快淘汰落后产能,加快企业间的兼并重组,加快推动技术改造和技术创新,加快实施“走出去、请进来”的发展战略。(慧聪)