

文章编号:1001-4888(2018)02-0183-11

石英纤维布叠层材料冲击性能研究^{*}

张鸣¹, 王道荣², 单俊芳¹, 刘永贵^{1,3}, 郑航¹, 王鹏飞¹, 徐松林¹

(1. 中国科学技术大学 中国科学院材料力学行为和设计重点实验室, 合肥 230027;

2. 国家实验物理与计算数学重点实验室, 北京 100076; 3. 河南理工大学 土木工程学院, 焦作 454000)

摘要: 基于轻气炮平板撞击实验, 研究石英纤维布的冲击性能。采用胶合叠层材料和螺栓拉紧叠层材料两种试样进行对比实验, 探讨了两种试样冲击性能的差异: 前者是一种环氧固化的复合材料, 而后者是一种具松散结构的“结构材料”。石英纤维布冲击响应实质上是结构体对扰动信号的响应。由此, 提出采用变密度粘弹性材料中波的传播方法来分析石英纤维布相关动力学特性。

关键词: 冲击动力学; 石英纤维布; 多层材料; 冲击特性; 变密度粘弹性材料

中图分类号: O347.4 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-201

0 引言

石英纤维布是由沿两个方向排列的石英纤维编织成的叠层结构。在层内, 是一种准均匀材料; 在此叠层材料的基础上, 可对不同延展方向的小块叠层进行编织, 在厚度方向编织成三维机织材料。从细观上来看, 石英纤维布属于一种具有良好的整体性和仿形性的结构材料。其静动态力学性能一般表现为: (1) 各向异性, 这与纤维材料的铺设方式有关。铺设的层间和层内具有完全不同的力学性能; 由于工艺原因, 这种不均匀性还表现为一种多尺度特性, 即单根纤维、纤维束、纤维束编织层、叠层等多种层次的力学性能差异巨大; (2) 非线性性, 主要表现为不同尺度研究对象的力学行为都是非线性的。一般而言, 编织材料具有比重小、比强度大和比模量高的优点, 在对构件韧性和延性要求高的抗震结构、抗冲击和耐疲劳工程结构中的应用比碳纤维复合材料有更大的优越性; 在物理和化学特性方面, 具有优良的化学稳定性、减摩耐磨、耐热、耐疲劳、消声、电绝缘等性能, 在一些极端工作环境具有广泛的应用前景^[1-3]。

层状编织材料力学性能研究主要集中于应变率效应和失效机制研究方面。Macander 等^[4]实验研究了树脂基多向编织复合材料的宏观动态力学性能。Ko^[5]发现三维编织复合材料的失效源于近似垂直于加载方向失效面上纤维的断裂。Majidi 等^[6]研究了三维编织和单向 FP/Al-Li 复合材料的冲击行为。Surya 等^[7]通过实验研究了三维编织碳/环氧树脂复合材料的弹性模量和强度在动态加载下与纤维体积含量以及编织角的关系。Hsiao 等^[8]报道了单向纤维复合材料压剪动态加载下的应变率效应。Groves 等^[9]、Hosur 等^[10]分别对三向纤维复合材料在低速和中速冲击下的力学性能进行研究, 讨论了其应变率行为。类似研究较多^[11-16], 这些研究表明层状编织材料为应变率敏感材料, 其动态失效机制一般与垂直于加载方向失效面上的纤维断裂有关。

层状编织材料缓冲吸能特性研究主要集中于材料内部波的传播和衰减。根据入射波能量的大小,

^{*} 收稿日期: 2017-10-10; 修回日期: 2017-11-17

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11472264, 11672286, 11602267, 11272304); 安徽省自然科学基金资助项目 (1708085MA05)

通讯作者: 徐松林 (1971-), 男, 副教授。Email: slxu99@ustc.edu.cn

可分为弹性波、低速冲击产生的应力波,以及高速冲击产生的冲击波等三类,它们在叠层材料中传播和吸能机制有较大的差异:(1)弹性波研究。Ting 等^[17]、Tedsco 等^[18]、Mukerji^[19]、Han 等^[20]研究了粘性层状介质中波的衰减和弥散,对弹性波在不同的多层弹性介质中的传播规律进行了实验和理论探索,研究结果揭示了弹性波波速对材料细观结构特征的频率相关性。(2)应力波研究。对材料应变率效应和失效方面的研究比较多,但是少有波的衰减和吸能方面的研究^[11-13]。王道荣等^[13]基于 SHPB 实验探讨了多层叠层材料对应力波的衰减和吸能规律。(3)冲击效应研究。Gupta 等^[21]、董永香等^[22]基于轻气炮平板撞击实验研究了冲击波在层状介质中的衰减和弥散。Naik 等^[23]对编织材料进行了较系统的弹道特性研究,发现在实验过程中基体材料和叠层材料的粘性效应在波传播和吸能过程中起主要作用。波在多层介质中传播时要进行多次的反射和折射,其幅值会显著地减小;同时,由于介质本身的粘性、粘塑性等复杂的材料特性,波的传播具有明显的衰减和弥散。这些研究表明,多层介质一般具有很好的吸能效果。但是冲击下层状编织材料的缓冲吸能的机制比较复杂,进行研究有相当难度。

鉴于此,本文将对多层石英纤维布进行轻气炮冲击实验研究,探讨用胶粘合试件和直接压密实试件等两种结构试样的冲击性能,研究不同试样结构对波传播与衰减的影响,分析其内在机制,拟形成较合理的多层纤维材料的冲击实验方法。

1 实验

1.1 材料和试件

石英纤维布厚度约为 0.3mm,由石英纤维编织而成,其天然密度为 $0.84 \sim 0.91 \text{g/cm}^3$,平均为 0.86g/cm^3 。为适应轻气炮平板撞击实验的需要,冲击实验中所用试件由多层石英纤维布叠合而成。由于轻气炮平板撞击实验的有效过程是在近似真空情况下进行的,因此,多层石英纤维布叠合材料需要进行一些特殊的处理,以保证真空环境下试件结构的稳定性,从而得到比较可靠的测试数据。作为探讨,本文拟采用两种试样制作方式:(1)用胶直接粘合多层石英纤维布,形成实验用叠合材料;(2)采用螺栓拉紧尼龙垫片来固定叠层的方式,形成实验用叠合材料。后者保留了石英纤维布的原始属性,前者由于胶要渗透到纤维编制结构内部并固化,因此形成的叠合材料是胶和纤维组成的一种混合体。对两种试样进行对比实验,可以得到很多有益的信息,例如松散编制材料与固化混合体力学性能的比较、胶的影响等等,对于正确认识叠层材料的冲击特性,及其对冲击波的衰减和吸收性能有很大的帮助。

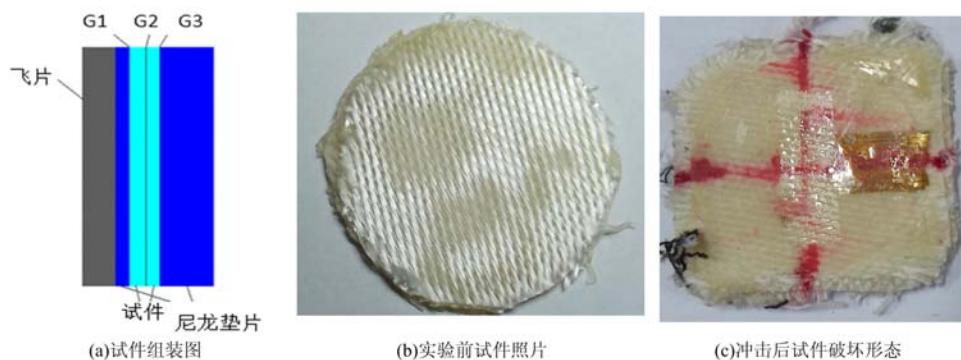


图 1 胶合试件

Fig. 1 Glued specimen

多层石英纤维布试样用 914 胶粘结,当采用三层纤维布时,得到叠合材料的密度为 $0.93 \sim 1.40 \text{g/cm}^3$,平均为 1.25g/cm^3 。其密度高于天然状态试件,同时也具有较大的分散性。这与胶的含量有关,因此控制胶的含量是关键。胶合试件构形和照片见图 1。作为对比,采用螺栓拉紧叠合材料的构形和照片见图 2。两类冲击实验的靶均由前尼龙垫片(撞击面)、两层叠层试件,以及后尼龙垫片组成。三个速度计分别埋设在前垫片与第一层试件之间、两层试件之间,以及第二层试件与后垫片之间。在螺栓拉紧叠合试件中螺栓通过前后垫片施加压力使叠合材料尽可能密实。试件中,前后垫片的直径均为 60mm,厚度分别为 3mm 和 12mm。实验中的飞片根据冲击速度的需要可采用尼龙、铝,或者是钢,其厚

度在 5~6mm,直径为 50mm。

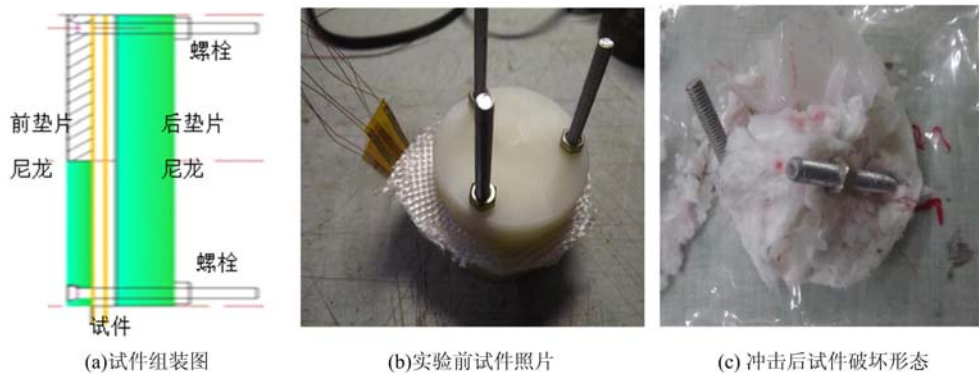


图 2 螺栓拉紧叠合材料的试件

Fig. 2 Specimen of bolt tensioning laminated material

1.2 实验设备和实验技术

平板撞击在中国科学技术大学轻气炮实验室口径为 57mm 的一级轻气炮上进行。平板撞击实验示意图见图 3。实验过程中,靶内部粒子速度的测量采用双磁场 IMPS 粒子速度测量系统。输出信号的记录采用美国 Tektronix 公司生产的高采样率四通道示波器。为保证信号的可靠,本次实验采用三个示波器同时进行记录:TDS640A(频响 500MHz,采样速率 2GS/s),TDS654C(频响 500MHz,采样速率 5GS/s)和 TDS3034B(频响 500MHz,采样速率 5GS/s)等。实验系统的实验误差约为 5%。

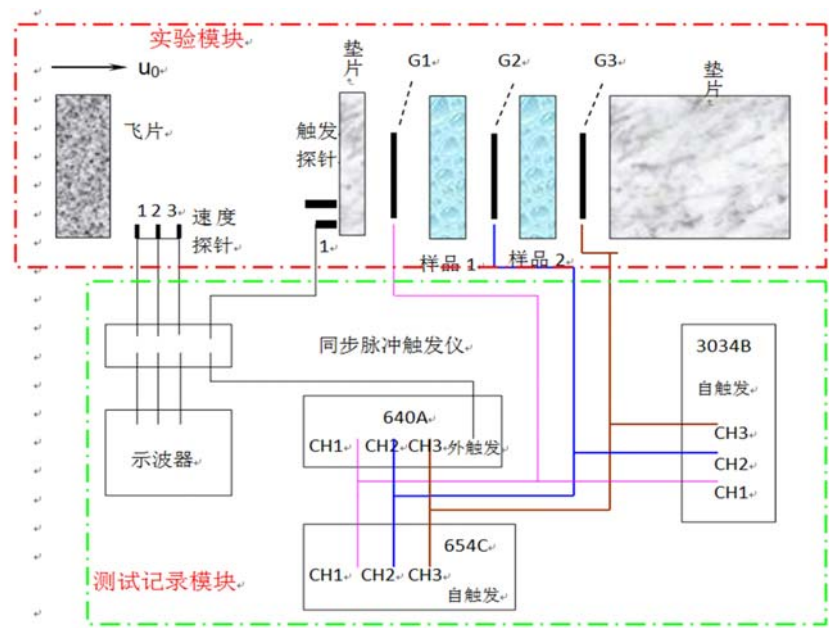


图 3 轻气炮平板撞击实验测试原理

Fig. 3 Schematic diagram of plate impact with light gas gun

采用埋设在样品内部的电磁粒子速度计测试试件内部不同位置的粒子速度。首先根据Lagrange方法分析得到相应的应力应变状态^[24],然后将该应力应变关系用于材料性质的分析。一般要求速度计要足够薄、导电性能好、具有一定的强度、尺寸符合要求,而且与样品材料粘合强度高。普通的通过手工刻制埋设制成的速度计存在引线困难、精度差且不易控制的缺点。本次采用订制的速度计,可保证量计的稳定性,且易于操作。测量计的宽度为 100μm,测量计的间距精确控制在 2mm。包括两层绝缘胶,测量计厚为 50μm。每个速度计包含五个测量计,其长度分别为 15.0mm、13.0mm、11.0mm、9.0mm 和 7.0mm,可以满足精细测量的要求^[24]。实际测试中,使用每个速度计中五个测量计的任意的两个测量计对同一深度处的粒子速度进行测量,相互校核,以保证数据的可靠性。引出导线,然后采用环氧树脂

粘结实。

2 实验结果

2.1 粒子速度波形

图 4 所示为冲击过程在胶合试件内部三个不同深度 G1、G2 和 G3 处测试得到的感应电动势波形。三个深度分别为:3.0mm、4.5mm 和 6.1mm,在每个深度处分别采用两个测量计来测试粒子速度波形,例如 G1_1、G1_2 表示第一个深度处的两个测量计。测量的基本原理为法拉第电磁感应定律^[24]:当金属丝在磁场中做切割磁力线运动时,将在金属丝内部产生感应电动势,记录感应电动势的发展,可以得到金属丝的运动速度,即为当地的粒子速度。从这个意义上来看,若材料内部存在速度不均匀性,得到的粒子速度是金属丝长度范围内粒子速度的平均。图 4(a)和(b)中的两个测量计的长度分别为 9mm 和 11mm,图 4(c)中的两个测量计的长度分别为 13mm 和 15mm,计入测量计长度的差异,三个深度处两个测量计测试得到的粒子速度的峰值基本相同,有较好的一致性,说明实验数据具有一定的可靠性。但是,在细节上,每个深度处的两个测量波形均存在一定的差异。最明显的是 G1 深度处:G1_2 的波形的峰值部分由两个台阶组成,表明在此局部有两次加速运动的过程。此现象主要源于局部胶的影响:初始时候,胶合作用限制了粒子的运动;但当载荷增加到一定程度,布层间的胶破碎,纤维布在动载荷驱动下继续运动^[15]。最大幅值处波形的振动表明局部材料由于胶破碎而处于一种相对比较松散的状态。对相应振幅(约 12m/s)和振动周期(约 0.05 μ s)进行统计分析,可以估计局部松散范围在 10 μ m 量级。这些波形差异和局部松散区域的存在说明石英纤维布叠层材料的复杂性,而胶的使用有些时候使此类问题变得尤为复杂。采用螺栓拉紧尼龙垫片形成的实验用叠合材料中得到的粒子速度波形与此相似,但波形振荡相对较小,这里不列出。

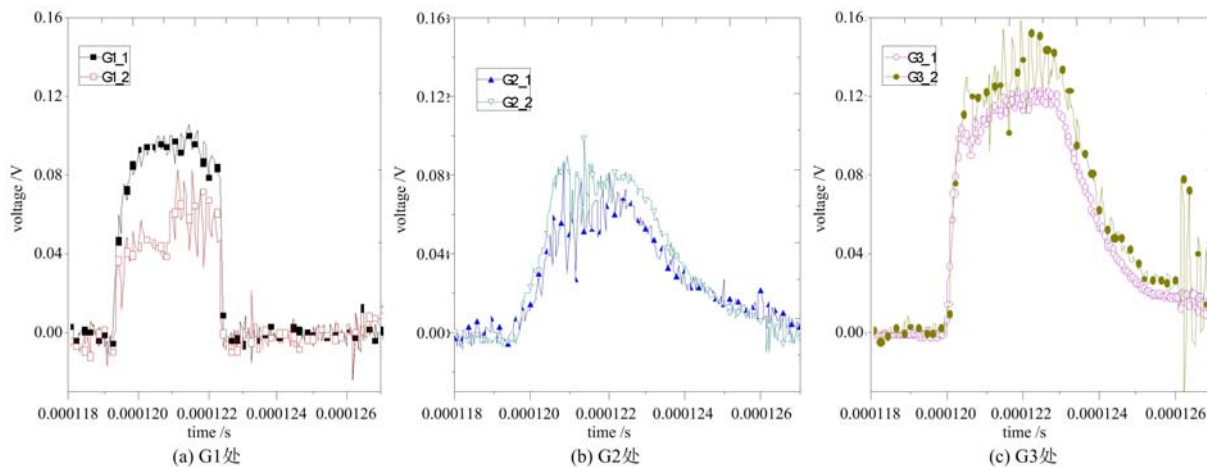


图 4 胶合试件中的测试波形(No. 01, 粒子速度 89.1m/s)

Fig. 4 Waveforms in glued specimens(No. 01, Particle Velocity 89.1m/s)

2.2 压缩过程中的应力应变关系

基于样品内部不同位置的粒子速度,应用 Lagrange 方法可以分析得到相应位置的应力应变状态^[24]。图 5 为胶合试件 No. 5 三个不同深度处的应力应变关系。三个测量计 G1、G2 和 G3 所处的深度分别为 3.0mm、5.4mm 和 7.5mm。由图可见,三个不同深度处材料的压缩过程具有明显的非线性压紧特性;同时,随着深度的增加,这种非线性程度加剧;压力峰值随着深度的增加快速减小。采用螺栓拉紧的叠合材料中得到的压缩过程应变相对较大、应力相对较低,但趋势基本一致。

作为对比,图 6 列出了未胶结的叠合材料在应变率为 8000s⁻¹时的 Hopkinson 压杆(SHPB)实验结果。两个叠层厚度 1.8mm 和 3.4mm 下,透射压力有较大的差异,相同的是两个叠层厚度的材料在冲击压缩时有比较相似的初始非线性压缩阶段。初期压实阶段的应变均达到 0.20。上述情况在平板撞击过程并不明显,其原因在于两种实验技术中试件所处的应力状态不同。

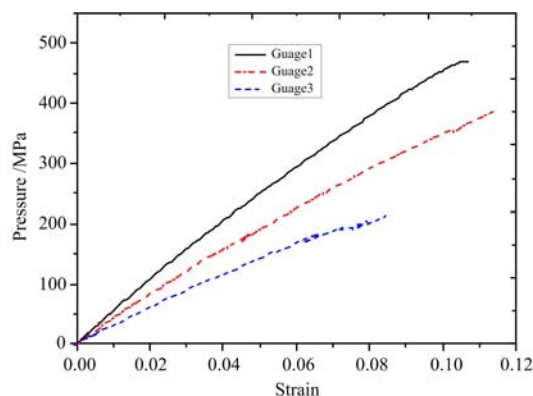


图5 胶合试件不同深度处的应力应变关系

Fig. 5 Stress-strain relationship of glued specimens at different depths

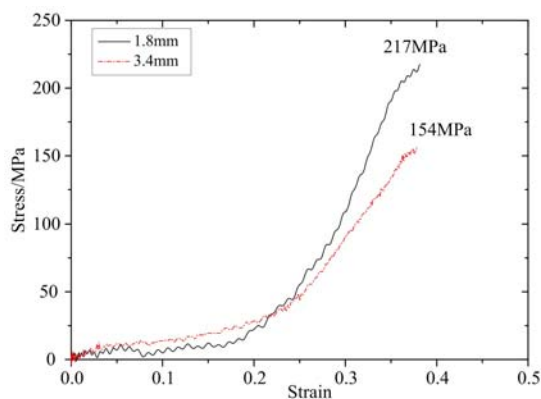


图6 叠合材料 SHPB 冲击实验结果

(No. 05, 粒子速度 200.7m/s)

Fig. 6 SHPB results of laminated materials

(No. 05, Particle Velocity 200.7m/s)

2.3 波速(D)—粒子速度(u)关系

图7所示为两种石英纤维布叠层材料的 $D-u$ 关系。图中,空心数据点为胶合试件的实验数据,实心数据点为采用螺栓拉紧的叠层材料的实验数据。由图可见,螺栓拉紧的叠层材料的实验数据相对比较集中,数据的规律性较好;而胶合试件的实验数据相对比较离散,数据规律性要差很多。而从数值上来看,胶合试件的波速比螺栓拉紧的叠层材料的波速要高很多,这主要源于914胶对石英纤维的固化作用。自然状态的石英纤维是编织材料,一般处于松散状态,即便被螺栓拉紧,仍处于一种相对松散的状态。胶合后的石英纤维在固化后形成一种新的复合材料,与石英纤维布有较大的差异。

图7中的实线和虚线为两类试件 $D-u$ 关系的趋势线。大多数材料的 $D-u$ 关系在相当宽的压力范围内呈简单的线性关系,即

$$D - u_0 = C_0 + K(u - u_0) \quad (1)$$

式中, D 、 u_0 、 u 分别为波速、初始速度和粒子速度; C_0 和 K 为材料常数, C_0 表示初压声速, K 为斜率。

对两类试件的 $D-u$ 关系分别进行线性拟合,胶合叠层材料的参数为: $C_0 = 985.2\text{m/s}$, $K = 2.673$;螺栓拉紧叠层材料的参数为: $C_0 = 112.8\text{m/s}$, $K = 2.51$ 。

由图7可见,胶合叠层材料中测试到的波速在 $1500 \sim 3200\text{m/s}$,其高值与环氧的波速比较接近;螺栓拉紧的叠层材料中测试到的波速在 $300 \sim 500\text{m/s}$,比粒子速度略高;胶合性能对石英纤维布材料力学特性具有较大程度的改变,胶合叠层材料反映的是复合材料的性质;螺栓拉紧的叠层材料中测试到的波传播信号应是纤维布层的一种“结构”响应,与传统的连续介质中的波有些差异,反映的是压紧“界面”的传播。

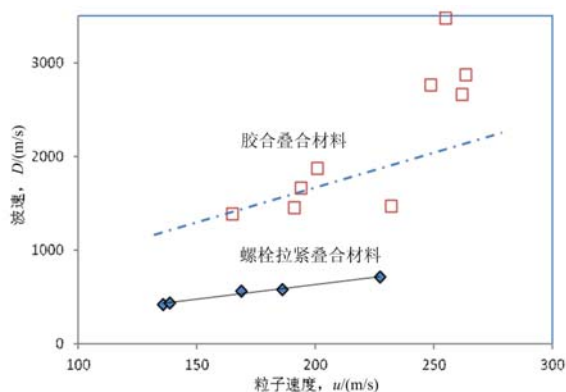
图7 石英纤维布 $D-u$ 关系

Fig. 7 $D-u$ relationships of quartz fiber cloth

3 石英纤维布叠层材料中冲击波的衰减与弥散特性

由图4所示的叠层材料的粒子速度波形可见,叠层材料具有比一般材料更明显的衰减和弥散特性^[13]。图8所示为胶合叠层材料中的冲击波特性和,其中,图8(a)为试件内部不同深度处波形上升沿时间的比较,图8(b)为试件内部不同深度处的应力峰值。螺栓拉紧叠层材料中波的上升沿时间明显增加。由图8可见,叠层材料的粒子速度波形上升沿在 $0.36 \sim 2\mu\text{s}$,随着深度的增加,上升沿的时间迅速增加(图8(a)中虚线所示趋势线),表现出明显的弥散特性;一般材料在相同的冲击速度和试件厚度等

实验条件下,没有明显的峰值应力随深度的衰减,但是,图 8(b) 中虚线所示趋势线表明峰值应力随着深度的增加迅速减小,表现出明显的衰减特性;同时,峰值应力越低,这种趋势越明显。这些均源于叠层材料是一种具有相对松散结构的“结构材料”。

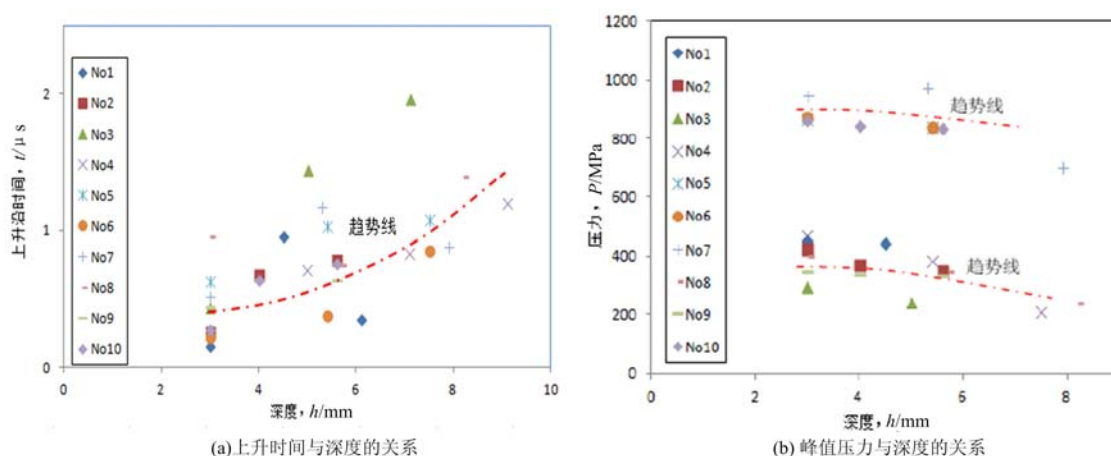


图 8 叠层材料中冲击波的弥散和衰减

Fig. 8 Dispersion and attenuation of shock waves in laminated materials

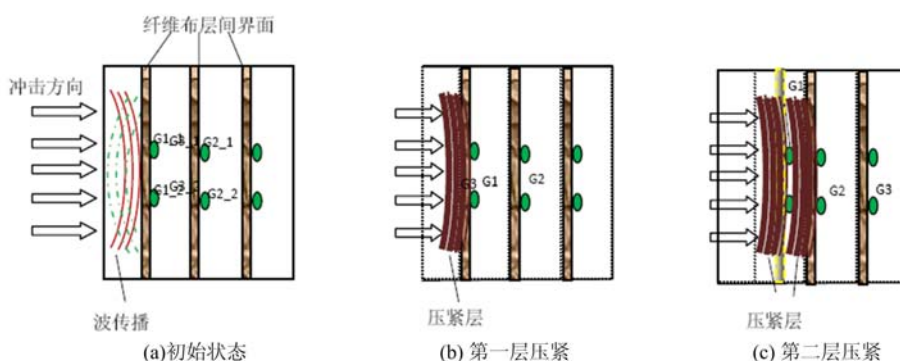


图 9 冲击下叠层材料的变形过程

Fig. 9 Schematic diagram of deformation process of laminated materials under impact

图 9 所示为冲击下叠层材料的变形过程。为清楚说明问题,图中所示有四层叠层材料、三层界面,并在三层界面处埋设了三个速度计,每个速度计中输出两个测量数据,例如速度计 G2 的测量计 G2_1 和 G2_2。在撞击的开始阶段,冲击波传入第一层叠层材料,迅速在第一层叠层材料中传播。当冲击波传到第一层和第二层叠层材料的界面处,由于界面相对比较松散,只有很少的波会透射过界面到达第二层材料,而大部分波在第一层材料中来回反射。此时,速度计 G1 处有较小的信号,而速度计 G2 和 G3 处没有信号。随着第一层叠层材料的整体压缩,第一层和第二层之间的界面逐渐压紧,冲击波逐渐透过界面传播到第二层材料,此时速度计 G2 开始有信号。然后第二层叠层材料整体压缩,第二层和第三层之间的界面逐渐压紧,冲击波透过界面传播到第三层材料,此时速度计 G3 开始有信号。从这个过程很容易看出,粒子速度计测试得到的信号很大程度上是叠层材料的整体压缩变形产生的,这与传统的波是材料内部扰动信号的传播有着较大的差异,这里传播的是一种结构的扰动,其发展过程与叠层的非线性压缩发展有关。这种特性也决定了纤维布叠层材料具有更好的消波和吸能的效果。

4 冲击下叠层材料中波的传播

4.1 一般粘弹性分析

叠层材料中波的传播分析是评估叠层材料消波吸能特性的基础,但是,基于图 9 进行冲击下叠层材料中波的传播分析是比较困难的。关于叠层材料中波传播的分析,主要有三类:(1)基于等效介质假定

的弹性波传播;(2)基于弹性波的多层材料波传播分析;(3)基于材料粘弹性本构关系的波传播分析。从图9的分析来看,层间界面的非线性压缩过程有十分重要的作用,是必须考虑的。

考虑由两种材料交互叠层组成一种周期结构特性的材料。材料1的材料参数和几何参数为:厚度 h_1 、密度 ρ_1 、拉梅常数 λ_1 和 μ_1 。材料2的材料参数和几何参数为:厚度 h_2 、密度 ρ_2 、拉梅常数 λ_2 和 μ_2 。考虑层状材料为粘弹性介质,Ting等^[17]给出了松弛函数 $G(t)$ 的Laplace变换形式 $\bar{G}(s)$ 为:

$$\cosh\left[h\sqrt{\frac{\rho}{\bar{G}(s)}}s\right] = \theta\cosh(\alpha s) - (\theta - 1)\cosh(\beta s) \quad (2)$$

式中, s 为Laplace变量,其他参数表达如下:

$$\theta = \left[1 + \sqrt{\frac{\rho_1(\lambda_1 + 2\mu_1)}{\rho_2(\lambda_2 + 2\mu_2)}}\right]^2 / \left[4\sqrt{\frac{\rho_1(\lambda_1 + 2\mu_1)}{\rho_2(\lambda_2 + 2\mu_2)}}\right], \quad \rho = \frac{h_1}{h}\rho_1 + \frac{h_2}{h}\rho_2 \quad (3)$$

$$\alpha = \sqrt{\frac{\rho_1}{\lambda_1 + \mu_1}}h_1 + \sqrt{\frac{\rho_2}{\lambda_2 + \mu_2}}h_2, \quad \beta = \sqrt{\frac{\rho_1}{\lambda_1 + \mu_1}}h_1 - \sqrt{\frac{\rho_2}{\lambda_2 + \mu_2}}h_2 \quad (4)$$

由式(4)可见,松弛函数 $G(t)$ 与叠层材料的材料参数和几何结构有关。相应各向同性的粘弹性材料的应力解为:

$$\bar{\Phi}(s) = \bar{p}(s)\exp(\sqrt{(\rho s)/\bar{G}(s)}x) \quad (5)$$

式中, $\bar{\Phi}(s)$ 为各向同性的粘弹性材料中平面纵向应力的Laplace变换; $\bar{p}(s)$ 为 $x=0$ 处初始应力条件的Laplace变换。

(1)对于叠层材料,由于界面反射产生的波的衰减,可表示为:

$$\phi = \theta^{-1}\phi_0 \quad (6)$$

式中, ϕ 和 ϕ_0 分别为透射波和入射波的强度; θ 的表达式见式(3)。

对于多层材料,当波经过 n 层材料时,由于界面反射产生的波的衰减,其表达式为:

$$\phi = \theta^{-n}\phi_0 \quad (7)$$

(2)对于粘性材料,由于材料粘性所以会产生波的衰减现象。对于松弛函数为 $G(t)$ 的粘性材料,波的衰减的表达式为:

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\gamma x) \quad (8)$$

式中, γ 为波的衰减因子, $\gamma = -\dot{G}(0)/(2c_0 G(0))$, c_0 为粘弹性介质的波速; Φ_0 为入射波强度。 $\dot{G}(0)$ 为 $t=0$ 时松弛函数 $G(t)$ 的时间导数。进一步,衰减因子可简化为: $\gamma = \ln\theta/h$ 。

图10所示为上述叠层材料及粘弹性材料分析结果的对比,其中一般弹性介质不会产生衰减。叠层材料由于层与层之间存在波阻抗的不匹配,会发生反射,波传播的幅值会产生衰减,这种衰减主要是由一种材料几何结构变

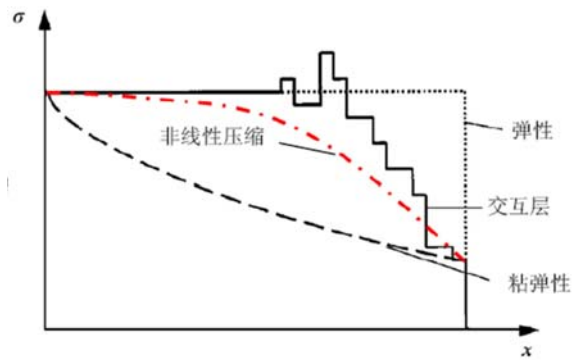


图10 不同材料中波传播产生的衰减
Fig. 10 Attenuation of wave propagation
in different materials

化(互层)产生的,因此,其发展过程为一些周期性的台阶,如图中实线台阶所示。图10中点划线表示的是考虑层与层之间非线性压缩时的结果,此时叠层要一边进行非线性压缩压紧,一边进行波的传播,其过程比较复杂。图10中长虚线所示为上述粘弹性理论分析的结果。粘弹性材料中的衰减是源于材料本身的物理性质,是一种物理衰减,其发展趋势表现为初始时迅速衰减、然后渐变衰减的过程。材料粘性造成衰减的发展规律与图6的SHPB实验结果比较相似,但是与平板撞击实验结果有差异,其原因在于叠层材料在冲击压缩过程具有较强的压缩特性,必然造成波的传播随冲击压力变化而变化。

4.2 考虑压缩过程的粘弹性分析

冲击波作用下,由于叠层材料不断压缩,叠层材料的密度具有一定的变化,因此,Ting等^[17]的理论结果不能反映出叠层材料中波的传播问题,为此需要建立在变密度粘弹性材料中波传播的分析方法。

从运动方程和连续方程出发,有:

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial v}{\partial t} \\ \frac{\partial v}{\partial x} = \frac{\partial \epsilon}{\partial t} \end{cases} \quad (9)$$

式中, σ 、 v 、 ϵ 分别为应力、粒子速度、应变。假设

$$\sigma(x, 0^-) = v(x, 0^-) = \epsilon(x, 0^-) = 0 \quad (10)$$

在 Laplace 域,有

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial x} = s\rho\bar{v} \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} = \bar{\epsilon} \\ \bar{\sigma} = s g \bar{\epsilon} \end{cases} \quad (11)$$

考虑半无限长介质,初始密度为 ρ_0 ,初始模量为 g_0 。材料密度 ρ 和模量 g 随着材料深度 x 单调变化。在 Laplace 变换域下,材料密度和模量可表示为式(12),其中: A 、 B 为变换量 s 的函数; p 表征密度和模量的变化速率; δ 为初始密度拟合时的参数。

$$\begin{cases} \rho = A(x + \delta)^p \\ g = B(x + \delta)^{p+2} \\ \rho_0 = A\delta^p \\ g_0 = B\delta^{p+2} \end{cases}, (\delta > 0) \quad (12)$$

由此,可求出变密度粘弹性材料中的应力 σ :

$$\bar{\sigma}(x, s) = C(s)(x + \delta)^{\frac{p+1 + \sqrt{(p+1)^2 + \frac{4As}{B}}}{2}} + D(s)(x + \delta)^{\frac{p+1 - \sqrt{(p+1)^2 + \frac{4As}{B}}}{2}} \quad (13)$$

由于 $t < 0$ 时试件完全静止,那么试件在 $x=0$ 端的扰动将导致试件中只有 $+x$ 方向的波传播,因而有 $C(s)=0$,于是

$$\bar{\sigma}(x, s) = D(s)(x + \delta)^{\frac{p+1 - \sqrt{(p+1)^2 + \frac{4As}{B}}}{2}} \quad (14)$$

现考虑边界条件:在 $t=0$ 时有一常值应力 $N(0, t) = \sigma_0 H(t)$ 突然施加于试件 $x=0$ 端, Laplace 域下为 $\bar{N}(0, s) = \sigma_0/s$, 为了便于计算,不妨令 $\delta=1$ 。可求得 $D(s)$:

$$\bar{\sigma}(0, s) = D(s)(0 + 1)^{\frac{p+1 - \sqrt{(p+1)^2 + \frac{4As}{B}}}{2}} = D(s) = \frac{\sigma_0}{s} \quad (15)$$

由此可得到该边界下半无限长变密度粘弹性介质中应力的表达式为:

$$\bar{\sigma}(x, s) = \frac{\sigma_0}{s}(x + 1)^{\frac{p+1 - \sqrt{(p+1)^2 + \frac{4As}{B}}}{2}} \quad (16)$$

为了验证式(16)的可靠性,现将其与 Bacon 等^[17]提出的常密度下应力形式进行具体的量化比较分析。基本参数为:突加载荷 $\sigma_0=10\text{MPa}$,初始密度 $A=1150\text{kg/m}^3$,初始模量 $B=1.3\text{GPa}$ 。现分别考虑密度不变、密度递增($P=3$)以及密度递减($P=-3$)三种材料。

首先,计算三种密度分布的材料中深度 $x=0.0025\text{m}$ 、 0.025m 、 0.25m 、 2.5m 处应力随时间的变化曲线,其结果如图 11 所示。由图可见:(1)三种密度材料中波的传播具有一定的差异,这种差异性随传播距离的增加而增大;(2)密度递减材料呈现更强的衰减效应。

其次,计算三种密度分布的材料在 $t=0.02\mu\text{s}$ 、 $0.07\mu\text{s}$ 、 $0.12\mu\text{s}$ 三个时刻应力随深度的变化,其结果如图 12 所示。由图可见:(1)三种密度材料中波的传播均具有一定的衰减特性;(2)密度递减材料呈现更强的衰减效应。在冲击压缩过程中,沿着冲击波传播方向,冲击波强度逐步降低,叠层材料压缩性和密度随之逐步降低。这也表明:密度的递减变化可以反映冲击压缩过程叠层材料的一般性能;应用密度递减粘弹性材料计算的波传播规律与实验情况比较接近。不过,上述模型应用到实际分析尚须进一步的参数研究,这将在下一步逐步完成。

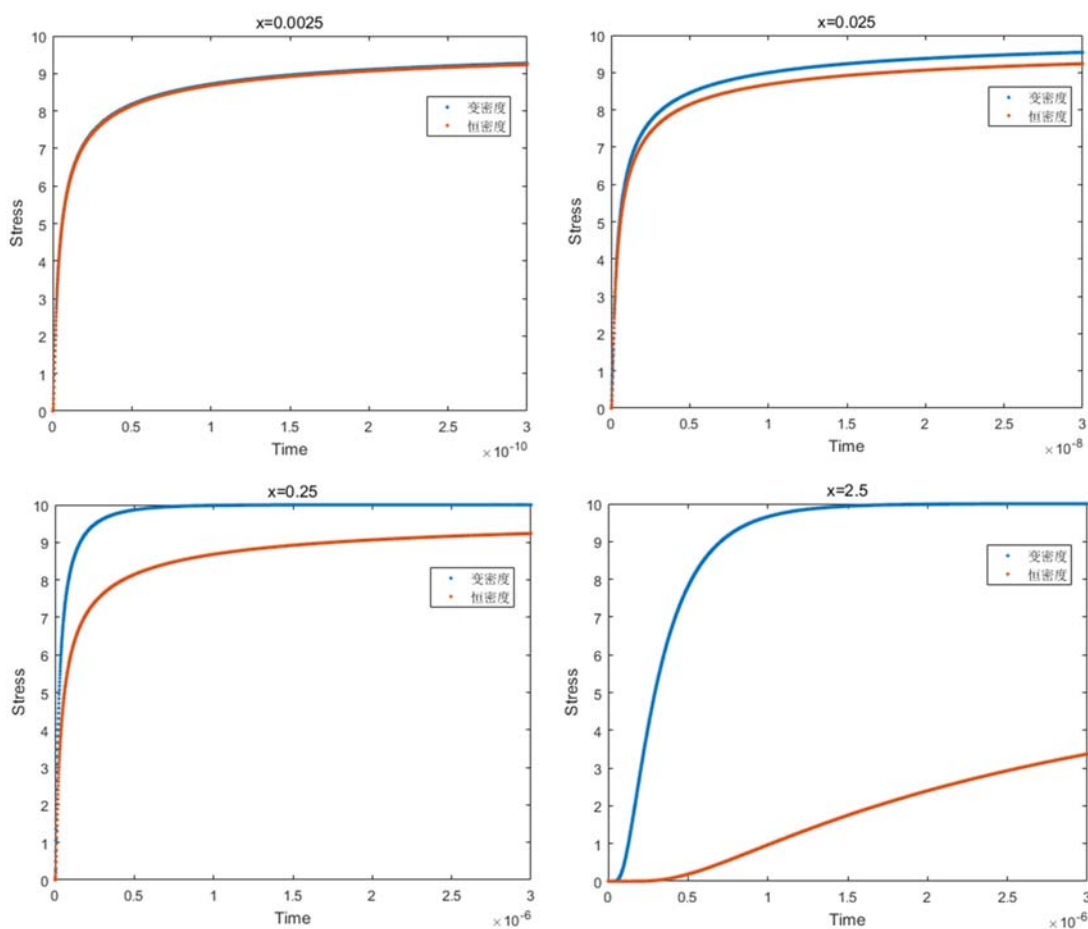


图 11 变密度与恒密度应力变化比较

Fig. 11 Comparison of stress distribution in different materials

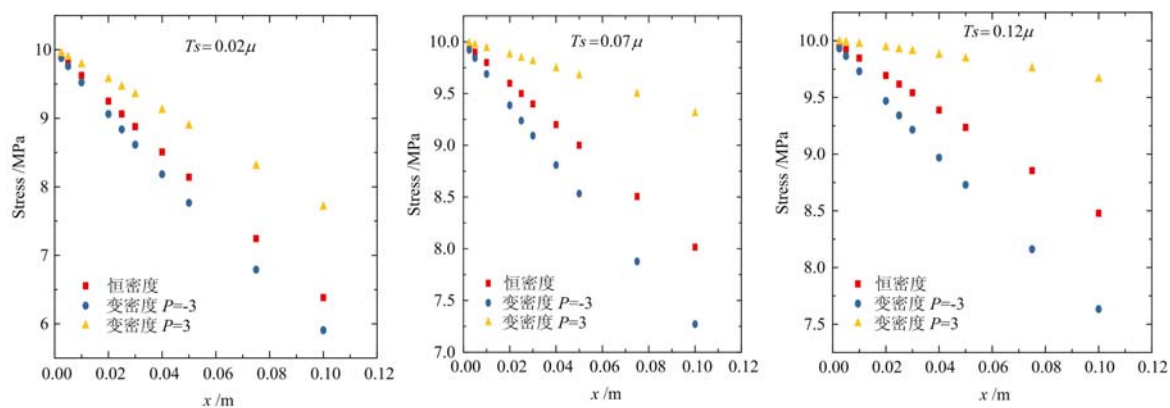


图 12 相同时刻不同位置处的应力衰减

Fig. 12 Stress attenuation at different positions

5 结论

对石英纤维布的两类试样,即胶合叠层试样和螺栓拉紧叠层试样,进行了平板撞击实验,研究了其冲击动力学特性。研究结果表明:

(1) 两类试样中的冲击波均有明显的非线性压缩特征,均具有较强的弥散和衰减特性,均可作消能吸波材料。比较而言,胶合叠层材料在结构稳定性方面较好,具有较好的可操作性;螺栓拉紧叠层试样则具有更强的消能吸波性能。

(2) 两类试样的 $D-u$ 关系曲线表明,胶合叠层材料的动力学性能的特性比较接近环氧,螺栓拉紧叠层试样的“波速”比粒子速度高,但与粒子速度在同一量级。这反映了两类材料具有不同的细观结构和不同的动力学机制。

(3) 两类试样冲击特性差异表明:石英纤维布冲击响应实质上是结构体对扰动信号的响应。

(4) 建立了变密度粘弹性材料中波的传播模型,可初步应用密度递减粘弹性材料中波的传播分析来解释石英纤维布受冲击加载后应力波在材料中的传播特性。

参考文献:

- [1] 沈玲燕,李永池,王志海,等. 三维 E 玻璃纤维复合材料压缩行为的应变率相关性实验研究[J]. 防护工程, 2010, 32(2):48—52 (SHEN Lingyan, LI Yongchi, WANG Zhihai, et al. Experimental study on strain rate correlation of compression behavior of 3D E glass fiber composites[J]. Chinese Journal of Protective engineering, 2010, 32(2):48—52 (in Chinese))
- [2] 沈玲燕,李永池,王志海,等. 三维正交机织玻璃纤维/环氧树脂复合材料动态力学性能的实验和理论研究[J]. 复合材料学报, 2012, 29(4):157—162 (SHEN Lingyan, LI Yongchi, WANG Zhihai, et al. Experimental and theoretical research on the dynamic properties of 3D orthogonal woven E-glass fiber/epoxy composites[J]. Chinese Journal of Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4):157—162 (in Chinese))
- [3] 沈玲燕. 三维正交机织玻璃纤维复合材料动态性能和抗侵彻规律研究[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2013 (SHEN Lingyan. Research on dynamic and penetration properties of the 3D orthogonal woven glass fiber composites[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2013 (in Chinese))
- [4] Macander A R, Crane R M, Camponeschi E T, et al. Fabrication and mechanical properties of multi-dimensionally (X2D) braided composite materials[C]//In: Whitney J M Ed. Composites materials: testing and design, ASTM STP 893, American Society for testing and Material, 1986:422—443.
- [5] Ko F K. Tensile strength and modulus of a three-dimensional braid composite[C]//In: Whitney J M Ed. Composites materials: testing and design, ASTM STP 893, American Society for testing and Material, 1986:392—403.
- [6] Majidi A P, Yang J M, Chou T W. Mechanical behavior of three dimensional braided metal-matrix composites [C]//In: Testing, Technology of Metal-Matrix Composites, ASTM, 1988:31—36.
- [7] Kalidindi S R, Abusafieh A. Longitudinal and transverse moduli and strengths of low angle 3-D braided composites[J]. Journal of Composite Materials, 1996, 30(8):885—905.
- [8] Hsiao H M, Danel L M, Cordes R D. Strain rate effects on the transverse compressive and shear behavior of unidirectional composites[J]. Journal of Composites Material, 1999, 33(17):1621—1642.
- [9] Groves S E, Sanchez R J, Lyon R E, et al. High strain rate effects for composites materials [C]//In: Camponeschi E T Ed. Composites materials: testing and design, ASTM STP 1206, American Society for testing and Material, 1992, 11:162—176.
- [10] Hosur M V, Abraham A, Jeelani S, et al. Studies on the influence of through-the-thickness reinforcement on low-velocity and high strain rate response of woven S2-glass/vinylester composites[J]. Journal of Composites Material, 2001, 35(12):1111—1133.
- [11] Sun B Z, Gu B H, Ding X. Compressive behavior of 3-D angle-interlock woven fabric composites at various strain rates[J]. Polymer Testing, 2005, 24(4):447—454.
- [12] Sun B Z, Gu B H. In-plane compressive behavior of 3-D textile composites at various strain rates[J]. Applied Composite Materials, 2007, 14(3):193—207.
- [13] 王道荣,刘佳琪,赵巨岩,等. 应力波在多层膜状材料中衰减特性的实验研究[J]. 实验力学, 2015, 30(3):401—406 (WANG Daorong, LIU Jiaqi, ZHAO Juyan, et al. Experimental investigation on stress wave attenuation in multilayer membrane material[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2015, 30(3):401—406 (in Chinese))
- [14] Tang G Y, Yan Y J, Chen X H. Dynamic damage and fracture mechanism of three-dimensional braided carbon fiber/epoxy resin composites[J]. Materials and Design, 2001, 22:21—25.
- [15] 徐松林,刘永贵,王道荣,等. 高孔隙率 Al_2O_3 微孔陶瓷压剪冲击动力学特性[J]. 高压物理学报, 2013, 27(5):

- 662—670 (XU Songlin, LIU Yonggui, WANG Daorong, et al. Dynamic responses of alumina microvoid ceramics with high porosity under combined pressure and shear impact loading[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2013, 27(50):662—670 (in Chinese))
- [16] 周凯, 熊杰, 杨斌, 等. 三维正交机织复合材料的动态压缩性能[J]. 复合材料学报, 2009, 26(4):171—175 (ZHOU Kai, XIONG Jie, YANG Bin, et al. Dynamic compressive properties of 3D orthogonal woven composites [J]. Chinese Journal of Acta Materiae Compositae Sinica, 2009, 26(4):171—175 (in Chinese))
- [17] Ting T C T, Mukunoki I. A theory of viscoelastic analogy for wave propagation normal to the layering of a layered medium[J]. Journal of Applied Mechanics, 1979, 46:329—336.
- [18] Tedsco J W, Landis D W. Wave propagation through layered systems[J]. Compute Structure, 1989, 26:625—638.
- [19] Mukerji T. Waves and scales in heterogeneous rocks[D]. Stanford University (PHD dissertation), 1995.
- [20] Han C, Sun C T. Attenuation of stress wave propagation in periodically layered elastic media[J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 243(4):747—761.
- [21] Gupta Y M, Ding J L. Impact load spreading in layered materials and structures: concept and quantitative measure [J]. International Journal of Impact Engineering, 2002, 27:277—291.
- [22] 董永香, 黄晨光, 段祝平. 多层介质对应力波传播特性影响分析[J]. 高压物理学报, 2005, 19(1):59—65 (DONG Yongxiang, HUANG Chenguang, DUAN Zhuping. Analysis on the influence of multi-layered media on stress wave propagation[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2005, 19(1):59—65 (in Chinese))
- [23] Naik N K, Shrirao P. Composite structures under ballistic impact[J]. Composite Structures, 2004, 66:579—590.
- [24] Tang Z P, Xu S L, Dai X Y, et al. S-wave tracing technique to investigate the damage and failure behavior of brittle materials subjected to shock loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2005, 31:1172—1191.

Investigation on impact properties of quartz fiber cloth laminated material

ZHANG Ming¹, WANG Dao-rong², SHAN Jun-fang¹,

LIU Yong-gui^{1,3}, ZHENG Hang¹, WANG Peng-fei¹, XU Song-lin¹

(1. University of Science and Technology of China, CAS Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design Of Materials, Hefei 230027, China; 2. The National Key Laboratory of Computational Mathematics & Experimental Physics, Beijing 100076, China; 3. Henan Polytechnic University, School of Civil Engineering, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: Based on plate impact experiment of light gas gun, the impact property of quartz fiber cloth is investigated in this paper. Impact property comparison experiment was carried out for two kinds of specimens made of adhesive laminated material and the bolted tensioning composite material respectively, the difference of impact properties between two specimens was discussed. The former is an epoxy-cured composite, while the latter is a “structural material” with a loose. The impact response of quartz fiber cloth is essentially the response of structure to disturbance signal. Therefore, a method of wave propagation in variable-density viscoelastic materials is proposed to analyze the dynamic characteristics of quartz fiber cloth.

Keywords: impact dynamics; quartz fiber cloth; multilayer material; impact characteristics; variable density viscoelastic material