

ARALL材料拉伸力学性能的试验研究^{*}

周元鑫 夏源明

(中国科学技术大学 合肥 230027)

摘要 利用自行研制的旋转盘式间接杆杆型冲击拉伸试验装置对 ARALL 材料以及施加预应力的 ARALL 材料进行了 3 个应变率 ($200\ 500\ 1300\text{s}^{-1}$) 的冲击拉伸试验, 得到了两种材料在不同应变率下的完整的应力应变曲线。结果表明 ARALL 材料在高速加载条件下的变形可以分为弹性变形、塑性变形和材料失稳后的残余变形三个部分, 每个部分都有不同的变形机理。结果还表明, 随着应变率的增加两种材料的屈服应力、失稳应力以及失稳应变均相应增加, 表现出明显的应变率强化和动态韧性现象。最后根据材料在不同应变率下的试验结果, 建立了 ARALL 材料计及应变率影响的三段线性本构模型。

关键词 冲击拉伸 动态韧性 混杂效应

中图法分类号 TB33

1 前言

ARALL 材料是一种由若酰胺纤维浸渍特殊树脂基体后和薄铝合金板交叠铺层再经过热压形成的层间超混杂复合材料, 它将纤维复合材料和合金铝的良好性能溶为一体, 具有高强度、低密度、抗冲击、抗疲劳、抗雷击和耐老化等优良特性, 是国际上出现的一种新型的很有发展前途的航空结构材料, 受到了广泛的重视^[1-3]。由于 ARALL 材料是由 A 树脂及 Kevlar-49 三种材料复合而成, 它们之间的热物性相差很大, 在 ARALL 材料热压成型过程中, 必然导致不同材料界面上存在热残余应力, 从而产生一系列混杂效应。为了消除热残余应力对 ARALL 材料力学性能的影响, 常常在 ARALL 材料成形过程中对纤维施加一定的预应力, 研究结果表明, 施加预应力后 ARALL 材料的拉伸^[4]、压缩、弯曲、疲劳^[5]以及蠕变^[6]性能都有不同程度的改善。随着 ARALL 材料应用的日益广泛以及研究的进一步深入, 其高应变率下的力学性能越来越受到人们的重视, 但由于试验设备的限制, 这方面的研究尚未见报导。

作者试图利用自行研制的旋转盘式间接杆杆型冲击拉伸试验装置对 ARALL 材料在冲击拉伸条件下的力学性能进行研究, 以期对其动态力学行为和变形破坏机理有一个初步的认识。

2 冲击拉伸试验

2.1 试验装置和原理

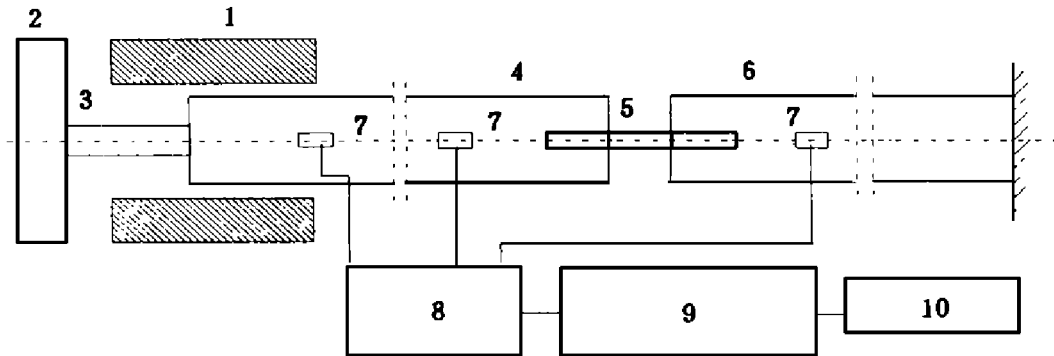
图 1 为自行研制的旋转盘式间接杆杆型冲击拉伸试验装置示意图。当安装在高速旋转盘上的双片锤头 1 打击撞块 2 时, 撞块与输入杆 4 相连的接近理想弹塑性的前置金属短杆 3 便被拉断, 从而在输入杆中产生拉应力方波脉冲。脉冲传至试件 5 并在输入杆和输出杆 6 中分别传播反射

^{*} 国家自然科学基金资助项目 (批准号 19572062)。

周元鑫: 男, 1972 年 10 月生, 博士研究生。

1997-03-12 收到原稿, 1997-05-30 收到修改稿。

波和透射波。与其它的杆杆型冲击拉伸实验装置相比,该装置产生拉伸脉冲的原理是全新的,即它的拉伸脉冲并非由锤头和撞块的撞击直接产生,而是通过撞击后由前置金属短杆的弹塑性变形直至断裂而产生。前置金属短杆的作用即相当于脉冲发生器,又相当于滤波器,滤掉了锤头打击撞块时,由于撞块自由端的存在而引起的拉伸脉冲抖动,所以该装置产生的拉伸脉冲平稳,且脉冲的幅值、宽度和上升沿十分容易控制,即只要选用不同直径和长度的前置金属短杆和不同的打击速度就可在很大范围内获得不同幅值、宽度和上升沿的平稳的拉伸方波脉冲,从而可实施不同材料在不同应变率下的冲击拉伸试验。



1 Hammer; 2 Block; 3 Short metal bar; 4 Input bar; 5 Specimen; 6 Output bar; 7 Strain gauges
8 Super dynamic strain meter; 9 Wave converter; 10 Computer

图 1 冲击拉伸试验装置及其测试原理

Fig. 1 Schematic diagram of tensile impact set-up and principle of measurement

依据一维应力波理论,试件中的应力、应变和应变率可以分别表示为

$$\sigma_s(t) = \frac{c_0}{L_0} \int_0^t [\dot{X}(f) - \dot{X}(f) - \dot{X}(f)] df \quad (2.1)$$

$$\dot{\sigma}_s(t) = \frac{c_0}{L_0} [\dot{X}(t) - \dot{X}(t) - \dot{X}(t)] \quad (2.2)$$

$$\epsilon_s(t) = \frac{EA}{2A_0} [\dot{X}(f) + \dot{X}(t) + \dot{X}(t)] \quad (2.3)$$

式中: A_0 和 L_0 为试件试验段的横截面积和长度, c_0 、 A 和 E 分别为图 1 中输入杆和输出杆的波速、横截面积和模量, $\dot{X}(t)$, $\dot{X}(t)$ 为输入杆上的应变片测得的信号, $\dot{X}(t)$ 为输出杆上的应变片测得的信号。

2.2 试件及其连接

ARA LL 材料由三层铝板 (单层厚 0.3mm) 和两层无纬布 (单层厚 0.22mm) 交叠铺层 (见图 2), 预浸料纤维含量为 60%。涂上底胶的铝板在 120°C 固化 1h, 整个铺层试件热压罐内进行 120°C 中温固化。其中铝板为 LY12cz, 预浸料为 KFRP (Kevlar Fibre Reinforced Epoxy), 纤维为 Kevlar-49。试验用 ARA LL 材料有两种: 一种为正常固化, 记为 ARA LL; 另一种在固化时对纤维施加了预应力, 记为 ARA LL(P)。冲击拉伸的试件呈扁平状、哑铃形 (见图 3), 试件与输入和输出杆之间用 SA 103 高强度耐冲击胶粘接 (见图 1)。

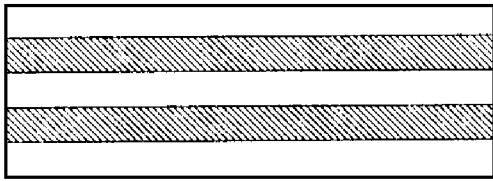


图2 试件形状图

Fig. 2 Configuration of specimen

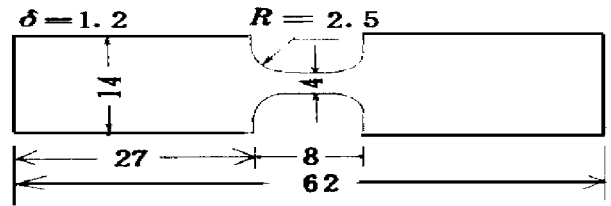


图3 试件形状图

Fig. 3 Configuration of specimen

2.3 试验结果

作者对两种 ARA LL材料进行了三个应变率 ($200\ 500\ 1300\text{s}^{-1}$)的冲击拉伸试验。图4为 ARA LL材料在三种不同应变率下的完整的应力应变曲线。可以看出,在加载的最初阶段,材料满足线弹性的形状特征;当加载至 0.7% 变形左右,材料出现屈服,屈服后的模量显著下降;随着载荷的进一步增加,当达到极限应力 (σ_s)后材料开始失稳,失稳后的材料并未立刻破坏,而是继续保持一定的残余强度后才完全破坏。这种破坏模式在准静态加载条件下是没有观察到的^[4-6]。并且还可以看出,随着应变速率的增加,ARA LL材料的屈服应力、极限应力 (σ_s)以及与其对应的失稳应变 (X_s)均相应增加,表现出明显的应变率强化和动态韧性的现象。

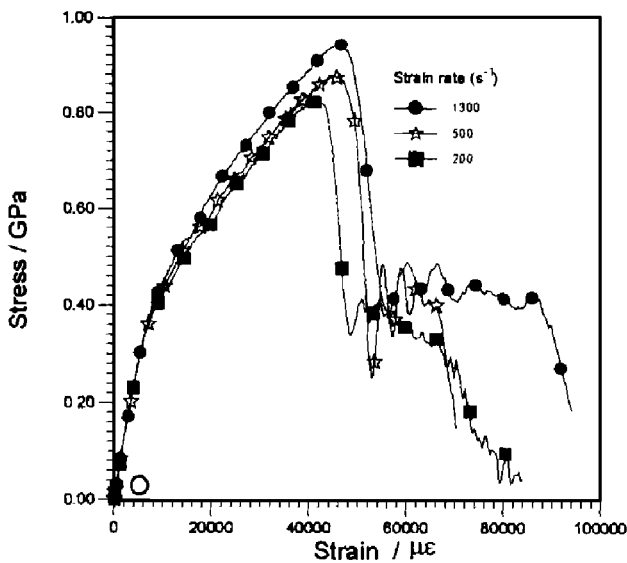


图4 ARA LL材料在不同应变率下的应力应变曲线

Fig. 4 Stress-strain curves of ARA LL under different strain rate

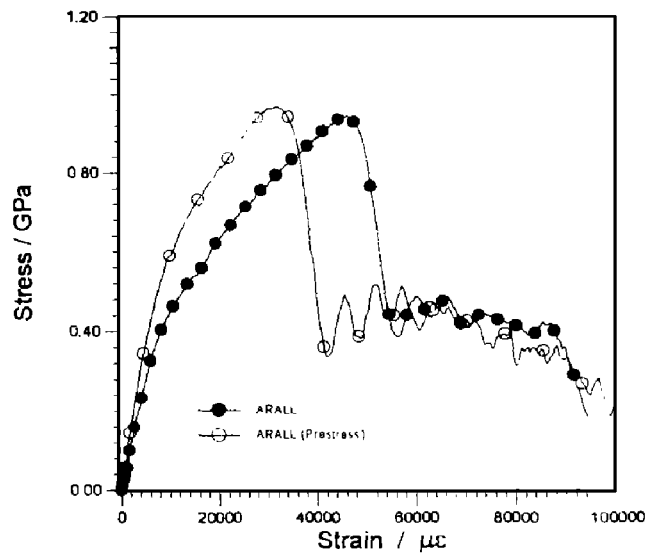


图5 两种 ARA LL材料在相同应变率下的应力应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curves of ARA LL and ARA LL(P) at strain rate 1300s^{-1}

图5为应变率等于 1300s^{-1} 时,ARA LL(P)材料与 ARA LL材料的比较,结果表明施加预应力后,由于材料内部热残余应力状态得到改善,材料的初始弹性模量有所增加,屈服应变向后延迟 (0.9% 左右),屈服应力明显提高,与极限应力 (σ_s)相应的失稳应变 (X_s)提前,但对极限应力影响不大(具体数据见表1)。并且对于施加预应力后的 ARA LL材料,其变形仍然可以分为弹性变形、塑性变形以及失稳后残余变形三个部分。

为了研究 ARA LL材料的变形机理,作者通过控制冲击拉伸脉冲长度的办法对 ARA LL材料在不同变形阶段实施了冲击拉伸加卸载试验。图6为应变率等于 500s^{-1} 时两种加卸载试验结果。第一种是加载至失稳应变前(应变为 3.3% 左右)再卸载,此时的卸载弹性模量与初始

表 1 两种 ARALL 材料在不同应变率下的性能参数

Table 1 Material parameters of ARALL and ARALL(P) at different strain rate

应变率 /s ⁻¹	材 料	E /GPa	e _s /GPa	e _b /GPa	X _f /(%)
200	ARALL	58.6	0.354	0.91	3.30
200	ARALL(P)	72.0	0.471	0.92	2.24
500	ARALL	58.6	0.357	0.85	3.98
500	ARALL(P)	72.0	0.489	0.86	2.79
1300	ARALL	58.6	0.364	0.81	4.4
1300	ARALL(P)	72.0	0.511	0.81	3.00

弹性模量相比降低了 15%，表明 ARALL 材料在塑性变形阶段已伴随有损伤发生，这是因为材料的应变已大于 Kevlar 纤维本身的破坏应变，势必造成纤维断裂、脱粘以及部分基体开裂等损伤因素的发生，但是又由于 A1 板层具有良好的塑性以及基体的剪滞作用，纤维仍然可以继续承载，所以能保持 ARALL 材料没有最终失稳。从损伤角度来看，ARALL 材料的塑性变形过程实际上是一个伴随有纤维树脂脆性损伤演化的塑性流动过程。第二种是加载材料至失稳应变后，再卸载，此时的卸载模量只有 49GPa 相当于仅有三层铝板承载，加之残余变形很大，与铝合金的变形相当，因此可以认为 ARALL 材料失稳后的残余变形实际上是纤维失去承载能力后铝板的变形。

3 计及应变率相关的力学模型

根据上述分析，依据 ARALL 材料和 AR-ALL(P)材料在不同应变率下的应力应变曲线，采用以下形式的模型来描述 ARALL 材料在高应变率下的载荷与变形关系

$$e = \begin{cases} EX & (e < e_c) \\ e_s + E_1(X - X_s) & (e_b > e > e_s) \\ e_r & (X < X_c) \end{cases}$$

式中: E 和 E₁分别为弹性模量和屈服后硬化模量, e_s、e_b和 e_r分别为材料的屈服应力、失稳应力以及失稳后的残余应力。X_f为材料最终破坏应变。其中 E、e_s、e_b和 e_r是应变率的函数,可以表述成以下形式

$$E_1 = E_{10} + A \log X, \quad e_s = e_{s0} + B \log X, \quad e_b = e_{b0} + C \log X, \quad e_r = e_{r0} + D \log X$$

通过拟合 ARALL 材料在不同应变率下的试验应力应变曲线,得到两种 ARALL 材料的特征参数(结果见表 2),拟合的结果与试验的结果吻合得很好(如图 7 所示),这表明本文提出的计及应变率强化效应的本构模型能较好地描述 ARALL 材料在高应变率下的载荷与形变关

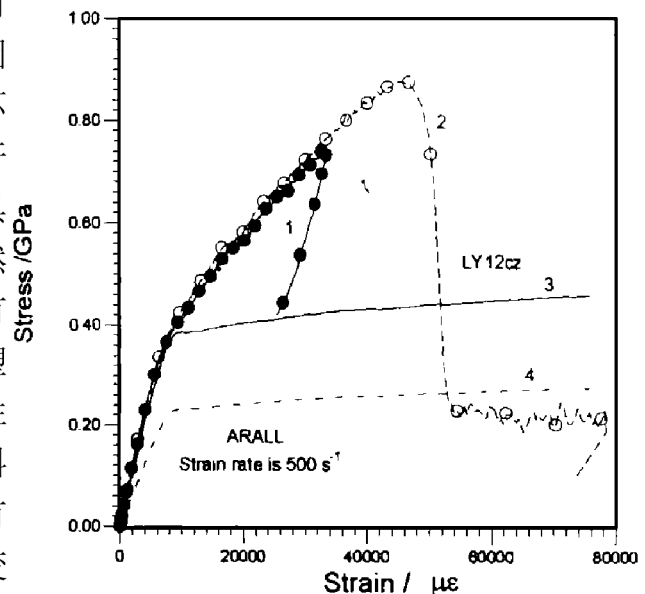


图 6 ARALL 材料的加卸载应力应变曲线
Fig 6 Stress-strain curves of ARALL under loading-unloading tensile impact

系

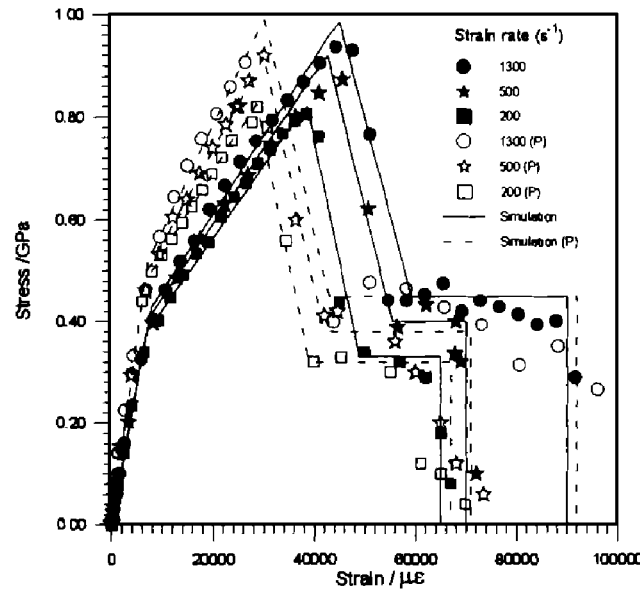


图 7 不同应变率下 ARALL 材料的试验结果的拟合

Fig 7 Experimental and calculated stress-strain curves of ARALL under different strain rates

表 2 两种材料的本构参数

Table 2 Constitutive parameters of ARALL and ARALL(P)

材 料	E /GPa	E_{10} /GPa	e_{s0} /GPa	e_{b0} /GPa	e_r /GPa	A	B	C	D
ARALL	58.6	11.2	0.258	0.469	0.139	1.22	0.053	0.146	0.091
ARALL(预应力)	72.0	20.7	0.348	0.461	0.127	0.59	0.053	0.150	0.083

4 ARALL 材料中的混杂效应

4.1 ARALL 材料的混杂效应

层间超混杂复合材料的混杂效应通常用混杂效应系数 (R) 来度量, 根据混杂效应的定义, ARALL 材料的屈服应力、失稳应力以及失稳应变的混杂效应系数可以表征为

$$R_{\sigma_s} = \frac{e_s - e_{rs}}{e_{rs}}, \quad R_{\sigma_b} = \frac{e_b - e_{rb}}{e_{rb}}, \quad R_{\epsilon} = \frac{X_b - X_{kevlar}}{X_{kevlar}}$$

式中: e_s , e_b 分别为材料实测的屈服应力和失稳应力, e_{rs} , e_{rb} 分别为 A1 的屈服应力和破坏应力, X_b 为 ARALL 材料的实测失稳应变, X_{kevlar} 为 Kevlar 纤维的破坏应变。表 3 为两种材料在不同应变率下的混杂系数。

表 3 不同应变率下两种材料的混杂系数

Table 3 Hybrid effect coefficient of ARALL and ARALL(P) at different strain rates

应变率 /s ⁻¹	材 料	R_{σ_s} /(%)	R_{σ_b} /(%)	R_{ϵ} /(%)
200	ARALL	-6.842	102	50
200	ARALL(P)	23.9	104	20
500	ARALL	-6.05	88.9	81
500	ARALL(P)	28.7	91.1	27
1300	ARALL	-4.21	80.0	100
1300	ARALL(P)	34.5	81.1	36

4.2 预应力对 ARALL 材料混杂效应的影响

ARALL 材料屈服主要是由于铝板层的屈服引起的, 对于正常的 ARALL 材料, 由于热残

余应力的影响,纤维层处于初始压应力状态,铝板层处于初始拉应力状态,只需很小的变形,在较低的应力水平下,ARALL材料就会因为铝板层的屈服而出现屈服现象。宏观上表现为ARALL材料的屈服应力要低于LY12cz铝的屈服应力, R_{σ_s} 为负值。施加预应力后,致使ARALL材料内部的热残余应力反号,纤维树脂层受拉,铝板层受压,材料的屈服向后延迟,纤维树脂层能够承受更大的拉力,所以施加预应力的ARALL材料的屈服应力显著增加, R_{σ_s} 值也由负变正。

ARALL材料的失稳主要是由纤维树脂层的失稳引起的,因为纤维树脂层的断裂应变远小于铝合金,复合材料在拉伸时首先破坏的是纤维树脂层。施加预应力后,纤维树脂层由初始压应力状态变为初始拉应力状态,破坏应变减小,致使ARALL材料的失稳应变也相应提前, R_{ϵ} 变小。

ARALL材料的失稳强度可以由混合律来预测

$$\epsilon_b^{\text{ARALL}} = V_{Al}(\epsilon_b^l - \epsilon_r^l) + V_{kfrp}(\epsilon_b^{\text{frp}} - \epsilon_r^{\text{frp}})$$

式中: V_{Al} 和 V_{kfrp} 为铝板层和纤维树脂层的体积含量, $\epsilon_b^{\text{ARALL}}$ 、 ϵ_b^l 和 ϵ_b^{frp} 分别为ARALL、铝以及KFRP的破坏应力, ϵ_r^l 和 ϵ_r^{frp} 为铝板层和纤维树脂层的热残余应力。由于ARALL材料内部的热残余应力是一个自身平衡系统,即

$$V_{Al}\epsilon_r^l + V_{kfrp}\epsilon_r^{\text{frp}} = 0$$

加之LY12cz铝合金硬化系数很小,近似于理想弹塑性,所以施加预应力对ARALL材料的强度影响不大, R_{σ_s} 只是略有增加。

4 应变率对ARALL材料混杂效应的影响

LY12cz铝合金为应变率无关的材料,KFRP对应变率也不太敏感,但是制成的ARALL材料却表现出明显的应变率强化和动态韧性现象,这本身就是一种混杂效应。在动态加载时,由于应力波效应,破坏不一定首先发生在某根纤维的最弱链处,纤维断裂后,由于卸载波的影响以及ARALL材料横向、纵向波速的差异,纤维断口处的应力集中难以向横向扩展,相反极可能沿纤维纵向形成新的断口,因为铝合金良好的变形能力以及树脂基体剪滞作用,一根纤维在出现多个断口后,仍然能够继续承载^[7],从而使材料失稳应变要大于KFRP的破坏应变, R_{ϵ} 很大。随着应变率的增加,应力波传播时的应力梯度相应变大,纤维断口数目也会随之增多,而纤维仍然可以承载,ARALL材料表现出动态韧性现象,这实际上是由于应力波传播作用、铝板层良好的塑性以及Kevlar-49纤维强度的统计分布共同作用造成的。

5 结 论

1 ARALL材料在冲击拉伸加载条件下的变形分别是由弹性变形、塑性变形以及残余变形三个部分组成,其中塑性变形实际上是一个伴随有纤维树脂脆性损伤演化的塑性流动过程,残余变形实际上是在纤维树脂层失去承载能力后,铝板层的变形。

2 由于应力波传播效应、纤维强度的统计分布以及Al板层与KFRP层的相互作用,ARALL材料在冲击拉伸加载条件下具有应变率强化和动态韧性现象。

3 通过施加预应力可以改善ARALL材料内部的热残余应力,提高材料的弹性模量和屈服应力,同时减少材料的失稳应变,但对材料的失稳强度影响不大。

参 考 文 献

- 1 Vogelesang L B, Gunnik JW. ARALL: A Material Challenger for the Next Generation of Aircraft. *Materials and Design*, 1986, 7(6): 202~ 211
- 2 Hidde J S, Herakovick C T. Notch Sensitivity of ARALL Laminate. In: Wu Yunshu, ed. *Proceedings of the Seventh International Conference on Composite Materials Guang Zhou, China* [s. n.], 1989, 435~ 440
- 3 Chen D. Damage Tolerance Aspects of ARALL Fuselage Skin Structure. In: Wu Yunshu, ed. *Proceedings of the Seventh International Conference on Composite Materials Guang-zhou, China* [s. n.], Nov. 1989, 460~ 466
- 4 胡宏军, 等. 复合材料学报, 1995, 13(1): 123~ 126
- 5 胡 魁, 等. 预拉伸对 ARALL力学特性的影响. 见: 胡连成, 主编. 第六届全国复合材料会议论文集. 北京: [s. n.], 39~ 42
- 6 Williams T O, Prindera M J. The Effect of Mechanical Prestrain on the Creep Response of ARALL-4 Laminates. *J Comp Mat*, 1991, 25(3): 303~330
- 7 饶世国, 等. 材料研究学报. 1994, 8(6): 563~ 569

EXPERIMENTAL STUDY OF ARALL UNDER TENSILE IMPACT

Zhou Yuanxin, Xia Yuanmin

*(Department of Modern Mechanics, University of Science and
Technology of China, Hefei, 230027)*

ABSTRACT In this paper, using our design of bar-bar tensile impact apparatus, we performed an experimental study of ARALL and ARALL (prestressed) in the strain rate range from 200s^{-1} to 1300s^{-1} . The complete stress-strain curves of composite under tensile impact was obtained. Result shows that the deformation of ARALL at high strain rate consists of three parts: elastic deformation, plastic deformation and remaining deformation. Result also shows that yielding stress, failure stress and failure strain are all sensitive to strain rate. On basis of our experiment of the composite under different strain rates we derive a one-dimensional constitutive equation for the composite under tensile impact.

KEY WORDS tensile impact, dynamic tenacity, hybrid effect