

文章编号: 1001-1455(2004)03-0251-10

聚丙烯短微纤维增强水泥冲击特性研究*

徐松林, 唐志平, 胡晓军, 蔡建

(中国科学技术大学力学与机械工程系中国科学院材料力学行为与设计重点实验室, 安徽 合肥 230026)

摘要: 基于唐志平等提出的剪切波跟踪技术(SWT), 对聚丙烯短微纤维增强水泥(FCEM)和素水泥(CEM)进行了冲击速度76~506m/s、倾斜角为10°的斜撞击试验。研究表明, 两种材料的Hugoniot冲击绝热线均有四个明显的临界点A、B、C、D, 分别对应材料的Hugoniot弹性限、剪切卸载波(S⁻)消失、孔洞崩塌点和颗粒材料的再压缩点。其中临界点B, 在过去的研究工作中尚未被揭示, 只有采用剪切波跟踪技术对S⁻波进行跟踪测量, 才能最终确定。对剪切强度的分析结果表明, 采用剪切波, 尤其是卸载剪切波来探测脆性材料内部动态损伤非常有效。

关键词: 固体力学; 聚丙烯纤维增强水泥; 剪切波跟踪技术; 孔洞崩塌; 试验研究

中图分类号: O347.3 国标学科代码: 130°1540 文献标志码: A

1 引言

水泥基复合材料是国民经济和国防工程建设中最普遍应用的结构工程材料之一, 它由水泥基体(水泥石和标准砂)、集料或增强纤维构成, 具有典型的跨尺度非均质多组元多相复杂结构, 是一种典型的脆性材料。由于材料的复杂性, 有关其力学行为及其机理特别是破坏特性的研究, 有相当的难度。早期研究主要集中在静特性方面。自80年代起, 国内外已有对其动特性进行的研究, 主要是利用SHPB(Split Hopkinson Pressure Bar)和带围压的SHPB装置作应变率效应和动态本构研究^[1~3], 但其试验尺寸和应力状态与实际情况相去甚远。近年来已发展到利用气体炮进行冲击加载研究^[4]。在气炮加载条件下, 无论试件尺寸, 应力状态或冲击强度方面, 均在很大程度上更接近真实状态。

为探测脆性材料内部动态损伤的发展规律, 唐志平等^[5~6]在气炮加载条件下形成了一种新的实验思路和方法, 即剪切波跟踪技术(SWT), 此技术在压剪联合冲击条件下全程跟踪测量压剪冲击条件下加载剪切波S⁺波、卸载剪切波S⁻波在样品中的传播特性, 来探测破坏波(区)的形成和演化规律。为简化问题, 本文将基于此思路, 对聚丙烯短微纤维增强水泥复合材料进行压剪联合冲击加载试验, 跟踪测试压剪联合冲击过程中材料剪切性能的变化, 从而确定材料与动态损伤相关的特性。

2 试验与试样制备

2.1 试样

试验所用水泥复合材料的组分见表1, 其中水泥为巢湖牌525#矿渣水泥, 采用标准砂。纤维则采用美国杜拉公司生产的 $\varnothing 0.025\text{mm} \times 19.0\text{mm}$ 聚丙烯短微纤维。试样的浇注、成型, 以及养护按GB 175-85规范规定进行。

试验靶的设计采用纵剖、横剖和斜剖三种形式。对于纵剖靶, 先加工成厚度为30mm左右的圆柱, 然后对分为两个相同的半圆柱, 对其上下表面和中间接触面进行精细机磨, 保证上下不平行度在0.01~0.02mm, 同时保证上下表面与中间接触面完全垂直, 在中间埋设粒子速度计, 然后采用环氧树脂粘结实。对于横剖靶, 先加工成厚度为5mm左右的圆片, 对其上下表面进行精细机磨, 保证上下不平行

* 收稿日期: 2003-06-11; 修回日期: 2003-08-29

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(10202022)

作者简介: 徐松林(1971—), 男, 博士。

度在 $0.01 \sim 0.02\text{mm}$, 在片中间垫上厚度 $25\mu\text{m}$ 的保护膜, 埋设锰铜计, 然后采用环氧树脂粘结实。斜剖靶则对圆柱沿与上表面成 30° 的方向剖开, 其加工要求与埋设方法和纵剖靶基本相同。

表 1 实验材料的组分

Table 1 Summary of contents for samples

材料名称	材料简称	质量配合比/g			
		水	水泥	标准砂	纤维
纤维增强水泥	FCEM	220	500	1250	0.77
素水泥	CEM	220	500	1250	0

三种靶形中, 纵剖靶比较适宜粒子速度计实验。这主要因为采用粒子速度计结合这种靶形, 可以方便地记录样品内部任意需要研究位置的波形, 从而探测动态损伤在材料内部的发展过程。这种靶形不仅可以用于平板正撞击试验, 也可以用其进行斜撞击试验。而横剖靶则受圆片厚度的限制, 只能得到较少的某些固定位置的数据。原则上也是可以用于正撞击和斜撞击试验, 但在外部磁场的提供、消除片间滑移等方面存在较大的困难。本文中主要用于锰铜压阻应力计的实验。斜剖靶一般只能用于粒子速度计实验, 此靶形通过一定的斜角度可以减小测量计之间的距离, 以达到精确测量的目的。但当样品尺寸较小时, 为了消除边界的影响, 计的埋设必须有足够的深度, 这样, 实际上第一个计之前很大的距离内材料的响应是无法知道的。这可能能用于一些材料的测试, 对本文研究的材料作用有限。这种靶形在靶的制作, 尤其是消除片间滑移上存在较大的困难。而且受靶材尺寸的限制, 可有效应用的计的数目也有限。在本文的实验中, 以纵剖靶为主, 其余两种为辅助测试, 斜剖靶只对 FCEM06 试样进行了尝试。

2.2 剪切波跟踪技术(SWT)简介

结合轻气炮加载装置进行剪切波的测试, 最早由 Y. M. Gupta^[7]、R. J. Clifton^[8] 提出后, 得到很快发展, 并有效地应用于脆性材料动态损伤的测试, 但还没有形成系统的方法。只是在最近, 为探测脆性材料内部动态损伤的发展规律, 唐志平等在气炮加载条件下全程跟踪测量压剪冲击条件下加载剪切波 S^+ 波、卸载剪切波 S^- 波在样品中的传播特性, 来探测破坏波(区)的形成和演化规律, 形成了剪切波跟踪技术。

图 1 所示为平板斜碰撞示意图。根据应力波理论, 飞片以倾角 α , 速度 u_0 与靶发生斜碰撞, 将在试样中依次传播四道主要波阵面: 加载压缩纵波 (P^+)、加载剪切横波 (S^+)、卸载纵波 (P^-) 和卸载剪切波 (S^-), 形成四波五区。每道波的传播特性与前方区域的材料当时当地状态相关, 每道波产生的影响留给了后方区。因此, 波特特性实时地反映了材料的动特性, 并能在一定程度上体现材料的细观统计特性。其中的剪切波特别重要。加载剪切波在前方纵波压缩应力状态上增添剪切分量, 它的传播特性如波速、幅值、弥散等, 反映材料经压缩加载后的损伤程度和剩余强度。即使材料已粉化, 由于三向压力的存在, S^+ 波仍可凭借颗粒间摩擦而传播, 但其规律不同。跟在卸载纵波后的 S^- 波, 由于不存在压应力, 更能揭示材料经压缩脉冲 (P^+ 、 P^-) 作用后的实时状态, 特别是剩余剪切强度和损伤度。可以预计, 已破坏(粉化)的材料, S^- 将消失。它反映了前方破坏区的存在^[5~6]。近年来国外有对类似材料进行压剪的联合加载实验^[9], 但剪切波在判别材料破坏过程中的作用并未引起足够重视。

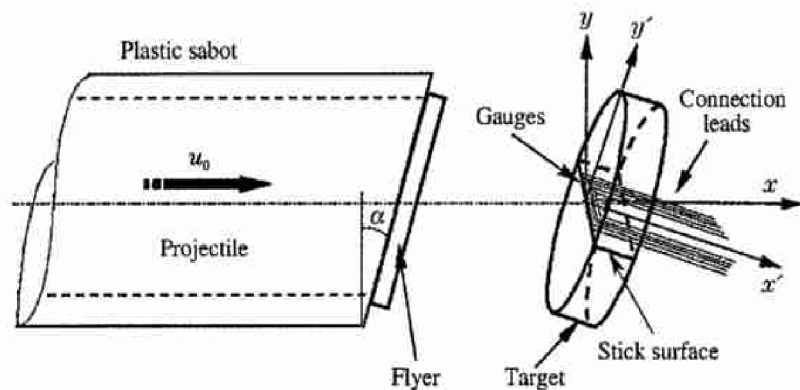


图 1 平板斜碰撞示意图

Fig. 1 Schematic diagram of an inclined plate impact

了材料的动特性, 并能在一定程度上体现材料的细观统计特性。其中的剪切波特别重要。加载剪切波在前方纵波压缩应力状态上增添剪切分量, 它的传播特性如波速、幅值、弥散等, 反映材料经压缩加载后的损伤程度和剩余强度。即使材料已粉化, 由于三向压力的存在, S^+ 波仍可凭借颗粒间摩擦而传播, 但其规律不同。跟在卸载纵波后的 S^- 波, 由于不存在压应力, 更能揭示材料经压缩脉冲 (P^+ 、 P^-) 作用后的实时状态, 特别是剩余剪切强度和损伤度。可以预计, 已破坏(粉化)的材料, S^- 将消失。它反映了前方破坏区的存在^[5~6]。近年来国外有对类似材料进行压剪的联合加载实验^[9], 但剪切波在判别材料破坏过程中的作用并未引起足够重视。

2.3 试验内容

对两种材料:纤维增强水泥(FCEM)和素水泥(CEM),进行对比研究。由于本实验室已经对FCEM和CEM进行了正撞击试验^[6],本文中将对FCEM和CEM进行冲击速度76~506m/s、倾斜角为10°的斜撞击试验。

同时,在试验过程中发现:当斜撞击的冲击速度超过250m/s时,对原始波形进行Lagrange分析过程中得到的应力和应变出现异常。因此对FCEM在此区域进行了冲击速度173~274m/s的锰铜计正撞击试验,以期对粒子速度测试结果进行修正。锰铜应力计试验示意图见图2。

粒子速度测试采用平板斜撞击实验(压剪联合冲击),主要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,部分在中物院冲击波物理和爆轰物理国防科技重点实验室完成^[6]。靶内部粒子速度的测量利用自研制的双磁场IMPS粒子速度测量系统^[10],粒子速度计采用自研制的电磁粒子速度计。整个计尺寸为:长60mm,宽21mm,包括两层绝缘胶,计厚为50 μ m。测量计尺寸为:5个计长度分别为15.44、13.44、11.44、9.44和7.44mm,计之间的间距为2mm,计宽为100 μ m。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:TDS640A(频响500MHz,采样速率2GS/S)、TDS654C(频响500MHz,采样速率5GS/S)等。

应力测试则采用平板正撞击实验。靶内应力的测试采用北京红星应变计厂生产的MBP50-6BD45型锰铜应力计,其敏感栅为直径6mm的螺旋形栅,标准电阻为50 Ω ,基底材料为缩醛胶膜,应力计的整体尺寸为60mm \times 16mm \times 0.03mm,一般测量应力的范围为0.05~20GPa。输出信号的记录采用TDS640A、TDS654C等。

本次试验的实验误差约为5%。

3 试验结果分析

3.1 测试波形

粒子速度计记录的典型波形见图3。

图3(a)所示波形表明碰撞后材料基本处于完整状态。在此波形中,纵波和横波均有较完整的加载和卸载阶段,四道主要波阵面(P^+ 、 S^+ 、 P^- 和 S^-)的波速与弹性波速比较一致。当对其压缩波和剪切波分开分析时,可以发现:其压缩波的幅值随深度的增加并无明显的变化,但剪切波的幅值会发生一定程度的衰减。但对应波形加卸载过程的幅值保持一致。

当斜碰撞的冲击速度在100~200m/s之间时,碰撞后的材料处于损伤状态。较明显的特征是:剪切卸载波 S^- 的幅值较 S^+ 有一定程度的降低,如图3(b)~(c)和3(e)~(f)。如果材料的损伤发生在试件深度比较浅的部位,还可能观测到剪切卸载波 S^- 的幅值随深度的增加,其幅值有所增加的现象,如图3(c),这与材料的损伤程度随深度降低的理论是吻合的,由此也说明粒子速度计可以跟踪探测材料内部损伤的发展情况。当斜碰撞的冲击速度约200m/s时,可以观测到一些有意义的现象。对FCEM而言,当冲击速度为197m/s时, P^+ 和 S^+ 较前面的波形基本没有变化,但 S^- 的幅值基本降为零,同时,在 P^- 和 S^- 的交界处,波形出现振荡。这表明此时的材料已经破碎为一些较大的碎块,宏观破坏已经形成,当压力消失后, S^- 波在这些张开的裂纹和碎块间传播,形成波形振荡。

其后,随着冲击速度的进一步提高,材料冲击破碎形成的颗粒越来越小, S^- 波在逐渐均匀化的颗粒介质中传播,其波形反而很光滑,但是 S^- 波的幅值为零,材料已经完全粉化。当斜碰撞的冲击速度大于243m/s时, S^- 波已经完全消失。

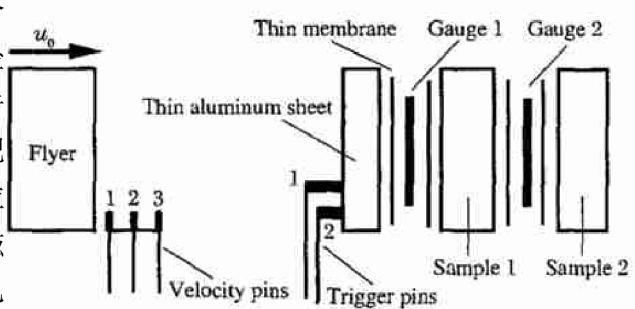


图2 锰铜应力计试验示意图

Fig.2 Schematic diagram of experiments with manganin under a normal plate impact

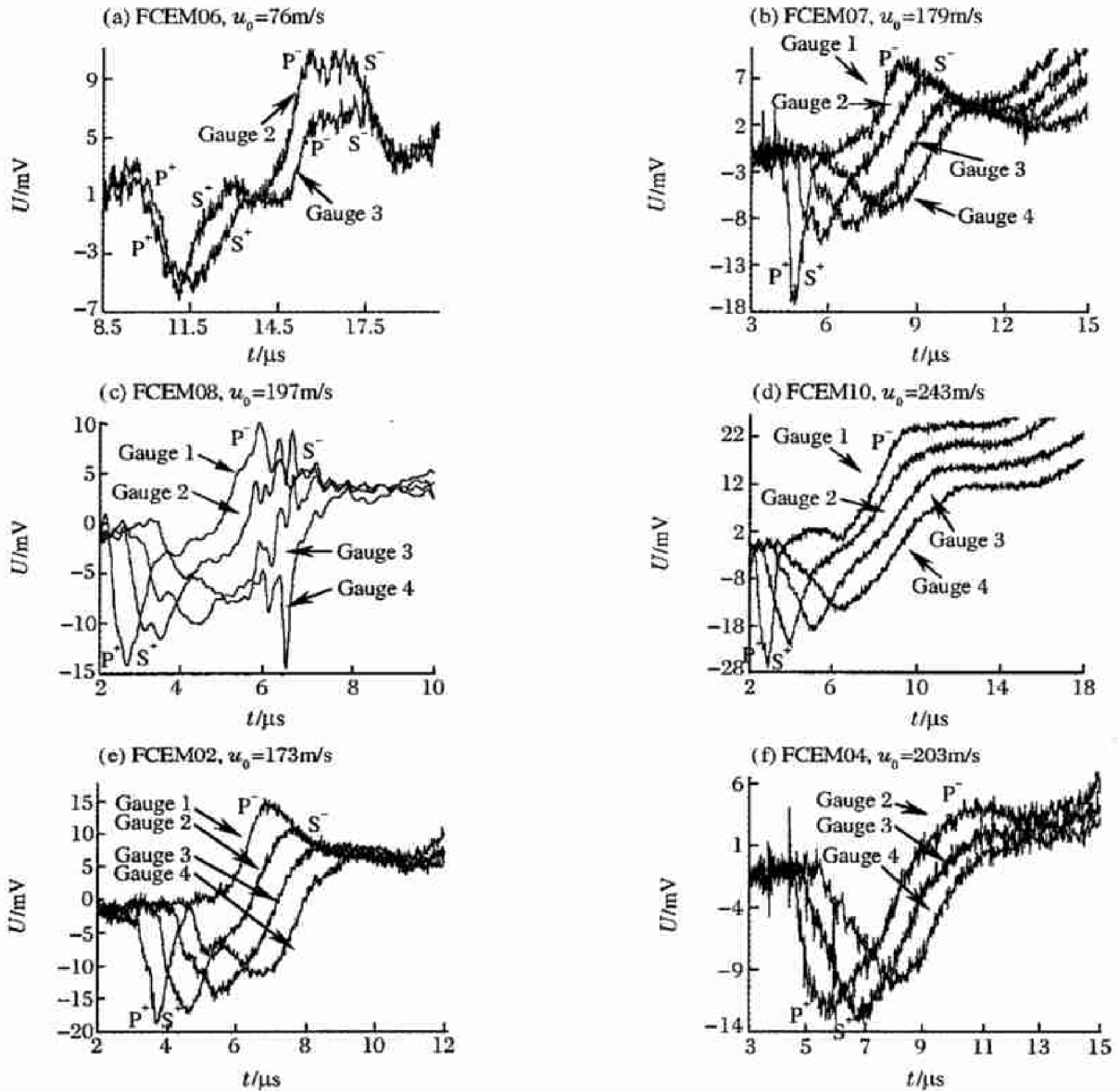


图 3 粒子速度计测试波形

Fig. 3 Wave profiles recorded with electromagnetic particle velocity gauges

通过 S^- 波的出现, 可以初步认为 FCEM 由损伤状态向破坏状态过渡的临界状态对应于冲击速度为 179 ~ 197m/s。进一步的分析将在后面进行。另外, 需说明的是, 除了后面将要讨论的动态剪特性方面略有差别外, 在本次试验中纤维增强水泥的冲击特性与素水泥的基本相同。这主要因为所用的聚丙烯短微纤维含量少、强度低, 对于水泥基材料冲击性能增强作用不大。

应力计测试原始波形见图 4。与粒子速度计测试结果不同的是: 冲击作用下, 粒子速度随深度的衰减并不明显, 而应力波形则有较显著的降低, 即便是在相同的 Lagrange 坐标的点进行对比。

3.2 Hugoniot 冲击绝热过程和损伤分析

根据 Lagrange 路径线法, 对 FCEM 和 CEM 实测波形进行分析, 可以分别得到 $p-V$ 和 $D-u$ Hugoniot 冲击绝热线。其统计结果见表 2 (倾斜角 10°) 和表 3。

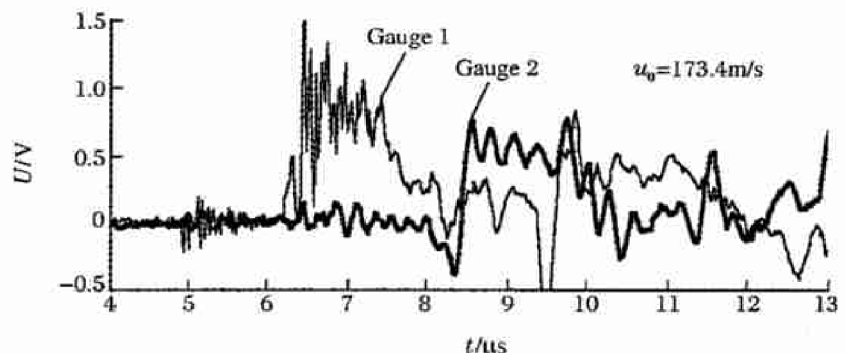


图 4 Shot No MT5 锰铜计测试波形

Fig. 4 Wave profiles of shot No MT5 measured by manganin

表 2 粒子速度计试验结果统计

Table 2 Summary of experimental results with electromagnetic particle velocity gauge

试验 编号	h_f/mm	$u_0/(\text{m/s})$	峰值状态				Lagrangian 波速			
			V/V_0	p/MPa	τ_{s+}/MPa	τ_{s-}/MPa	$U_{p+}/(\text{km/s})$	$U_{s+}/(\text{km/s})$	$U_{p-}/(\text{km/s})$	$U_{s-}/(\text{km/s})$
FCEM06	9.15	76.0	0.9956	186.0	31.4	31.4	5.124	2.273	4.215	2.423
FCEM05	6.58	131.0	0.9840	598.4	41.1	40.8	5.240	2.484	3.452	2.614
FCEM02	6.48	145.8	0.9796	549.9	56.5	48.7	4.864	2.287	4.700	2.712
FCEM07	5.10	179.0	0.9723	628.0	41.8	23.4	4.200	2.428	4.000	2.136
FCEM01	5.14	187.9	0.9799	870.4	61.2	17.6	5.000	1.667	3.751	2.250
FCEM08	5.10	197.0	0.9765	797.3	51.1	10.2	5.000	2.267	4.493	
FCEM09	6.48	206.0	0.9757	1006.5	39.4	0	5.210	2.260		
FCEM10	9.80	243.0	0.9593	865.3	65.1	0	5.300	1.682		
A003 ¹⁾	7.78	312.0	0.9186	716.5	12.2	0	4.316	1.652	4.130	
A001 ¹⁾	8.25	506.0	0.8850	1290.0	15.5	0	4.504	1.566	3.930	
CEM07	9.45	74.0	0.9966	186.2	32.3	32.2	4.782	2.459	3.775	2.317
CEM04	6.50	142.0	0.9827	655.3	42.5	41.8	4.634	2.113		
CEM02	5.16	174.0					4.348	2.273	5.042	
CEM01	6.00	172.8	0.9733	611.6	51.3	27.4	3.858	2.174		
CEM05	6.94	193.0	0.9751	753.5	51.2	13.2	5.263	2.041		
CEM06	6.50	203.0	0.9755	1016.3	30.5	0	5.727	1.709	4.630	
A007 ¹⁾	8.00	320.0	0.9274	805.6	20.3	0	4.460	1.458	3.835	
A006 ¹⁾	7.15	483.6	0.8982	1314.5	25.1	0	5.167	1.696	4.141	

1) 此实验由刘文彦等采用手工刻计在中国工程物理研究院冲击波物理和爆轰物理国防科技重点实验室完成。

表 3 锰铜计测试情况统计

Table 3 Summary of experimental results with Manganin

编号	飞片		垫片		样品 1		样品 2		$u_0/(\text{m/s})$	峰值应力		峰值应变	
	材料	h_f/mm	材料	h_f/mm	材料	h_1/mm	材料	h_2/mm		σ_1/GPa	σ_2/GPa	ϵ_1	ϵ_2
MT1	铝	10.10	铝	2.0	1	5.20	铝	10.0	258.3	1.42	1.20	0.103	0.092
MT2	铝	9.88	铝	2.0	1	5.18	铝	10.0	274.1	1.36	1.23	0.135	0.151
MT3	钢	5.10	铝	2.0	1	5.18	铝	10.0	219.3	1.53	1.13	0.127	0.070
MT5	铝	5.14	铝	2.0	1	5.14	铝	10.0	173.4	1.04	0.74	0.080	0.058

3.2.1 p - V Hugoniot 冲击绝热线

FCEM 和 CEM 的 p - V Hugoniot 冲击绝热线见图 5。

FCEM 的数据包括冲击速度 84 ~ 171m/s 的正撞击试验^[6]、冲击速度 76 ~ 506m/s 倾斜角为 10° 的斜撞击试验和冲击速度 173 ~ 274m/s 的锰铜计正撞击试验。CEM 的数据只包括冲击速度 41 ~ 45m/s 的正撞击试验^[6]、冲击速度 74 ~ 484m/s 倾斜角为 10° 的斜撞击试验。两种材料的 p - V Hugoniot 冲击绝热线基本一致。它们的冲击绝热线有 4 个明显的临界点： A 、 B 、 C 、 D 。其中 A 为材料的 HEL 点，即 Hugoniot 弹性限。 B 为对应着材料 S^- 波消失临界点。它对应着材料的动态剪切强度限，同时也是材料由损伤状态

向破坏状态转化的过渡点。值得指出的是,由于静水压力的存在, Hugoniot 冲击绝热线在此处不存在明显的拐点,因此,采用常规的测试方法是无法确定此临界点的,只有对 S 波进行跟踪测量,才能最终确定。C 是材料性质中非常重要的一个临界点。过此点后,材料的体积有很大的压缩。结合后面进行的试样孔洞调查,把它当成一种典型的孔洞材料时,这种体积压缩就可以理解为材料整体的孔洞崩塌效应。此体积压缩量与孔洞率 10.51% 非常吻合。当材料所受的冲击压力更高时,材料就进行进一步的密实材料的压缩,其起点就是 D。各临界点的具体数值见表 4。

此图中, FCEM 和 CEM 的试验点比较接近,考虑到 5% 的试验误差,两者的冲击压缩性能基本一致,这也说明聚丙烯短微纤维对水泥的增强作用并不明显。

表 4 p-V Hugoniot 冲击绝热线各临界点

Table 4 Summary of critical points in p-V Hugoniot curve

临界点	FCEM		CEM	
	p/MPa	V/V ₀	p/MPa	V/V ₀
A	222.1	0.994	211.5	0.994
B	870.4	0.980	813.6 ¹⁾	0.978 ¹⁾
C	1007.1	0.974	1044.7	0.974
D	1052.8	0.899	1109.5 ¹⁾	0.907 ¹⁾

1) 主要参照 FCEM 的 p-V 线的形态取值。

3.2.2 D-u Hugoniot 冲击绝热线

FCEM 和 CEM 的 u_p - D_p 和 u_s - D_s Hugoniot 冲击绝热线见图 6。

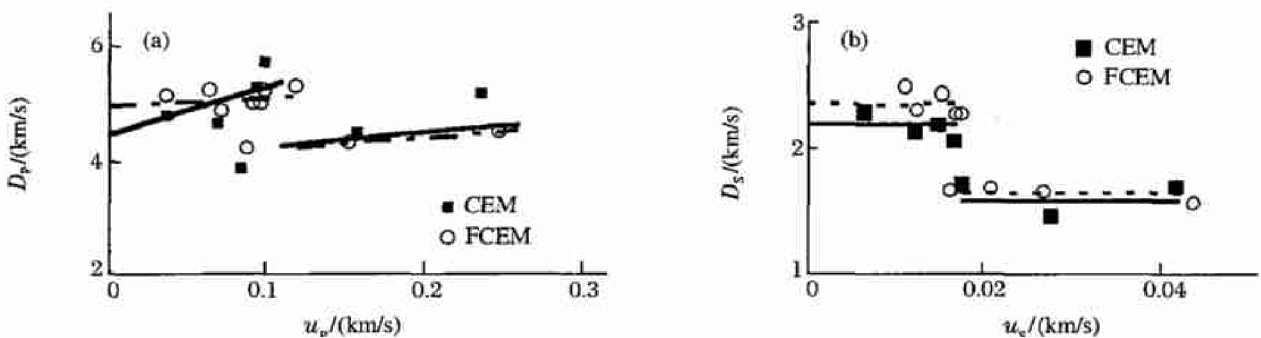


图 6 Hugoniot 线的 D-u 关系

Fig. 6 D-u Hugoniot curve

由图 6(a), FCEM 和 CEM 的 u_p - D_p 数据点趋势基本一致。理论上,根据材料的损伤破坏发展,曲线应分为 3 段,分别对应材料所处的三种状态:完整、损伤和破坏。但由于目前气炮试验的冲击速度比较难控制在较低速度,因此,比较容易得到材料在后两种状态的实验数据。得到的数据主要集中在这一区域,因此, u_p - D_p 曲线只有明显的两段。前者对应完整与损伤阶段,后者对应材料的破坏阶段。

由图 6(b), FCEM 和 CEM 的 u_s - D_s 数据点的趋势也基本一致。曲线基本可分为三段:当剪切方向的冲击速度低于 18m/s 时,二者基本保持为平台, FCEM 的 D_s 在 2400m/s 左右, CEM 的 D_s 在 2300m/s 左右;然后有一个短暂的不太明显的过渡段;当剪切向的冲击速度高于 20m/s 时,最后二者达到另一个

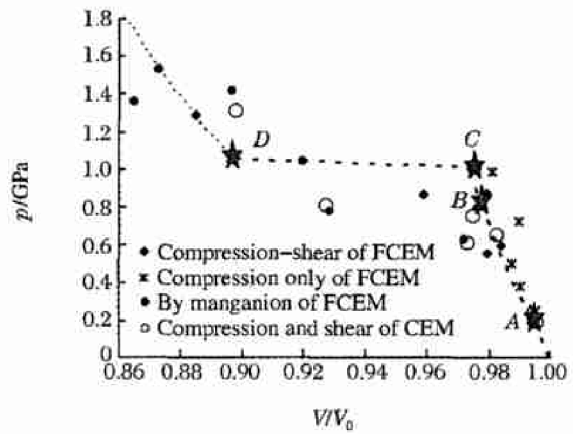


图 5 FCEM 和 CEM 的 p-V 冲击绝热线

Fig. 5 p-V hugoniot curves of FCEM and CEM

平台,FCEM 和 CEM 的 D_S 均在 1500~1600m/s。这 3 段分别对应材料的三种状态:第一个平台对应材料的完整状态,第二个平台对应材料的破坏状态,中间的过渡段则对应材料的损伤状态。这也说明 u_S-D_S 包含的信息要比 u_P-D_P 更丰富。但临界点 B 似乎还是无法确定。

因此,不论是 $p-V$ Hugoniot 冲击绝热线,还是 u_P-D_P 和 u_S-D_S Hugoniot 冲击绝热线,均可以很明确地得到除 B 点以外的其他临界点。而借助 SWT 方法,对材料的性能有了更进一步的了解。

通过以上的讨论,可以得到两类 Hugoniot 冲击绝热线,事实上这两类冲击绝热线是有联系的。因此,可以相互进行校验,由于篇幅的问题本文不列出对比的结果。但须说明的是由于水泥基复合材料在冲击压缩过程中有空洞崩塌的机制,因此, $D-u$ 冲击绝热线一般由两条直线构成,相应可得到两条 $p-V$ 冲击绝热线。空洞崩塌之前的实验数据点基本上落在第一条线上,空洞崩塌后的数据点应该落在第二条线上,但由于实验条件和样品离散的原因,空洞崩塌后的数据点拟合结果不甚理想,而且也无法建立两条线之间的过渡阶段。

3.2.3 动态剪切特性的讨论

对原始波形中分离出来的剪切波进行 Lagrange 分析^[11],可以得到分别对应加载和卸载横波的两个剪切强度。由于加载阶段的应力状态比较复杂,影响因素较多。当材料进入破坏状态时,此阶段尚有正压力的存在,因此材料的性能很大程度上要受材料内部碎片或破碎颗粒间的摩擦作用的影响。对比而言,卸载阶段的应力状态就简单得多,只有剪应力的作用,因此,卸载剪切波的幅值反映的就是材料的残余强度,藉此可以探测脆性材料的动态损伤特性。考虑到剪切波探测的是由于材料,或者主要是由于冲击压缩在材料内部产生的损伤,而分析的剪切行为是在材料已经发生了一定的体积压缩之后的状态,因此比较适宜分析剪切强度与比容的关系,具体见图 7。图中 B' 点与图 5 中的 B 点对应。由此可见,在 B' 点之后,卸载阶段的剪切应力很快降为 0。而由加载阶段得到的剪切应力,由于材料中静水压力的存在,材料内部的摩擦作用,出现波动。甚至到材料明显破坏之后,仍有一定的残余剪应力存在。这也说明采用卸载剪切波分析脆性材料内部动态损伤的有效性和独特的作用。

由图 7 给出的分别基于加卸载剪切波得到的剪应力与相对比容的关系对比可知,过 B' 后的较小区域内,FCEM 的剪切强度要比 CEM 的高;而其它区域则差别不大。这表明,聚丙烯短微纤维只在材料逐渐丧失剪切强度直至孔洞崩塌阶段,即图 5 中的 BC 段起作用。其原因主要是,低于此应力范围,材料处于损伤状态,基体内尚未形成大的贯穿性的弱化带,承载的仍主要为基体材料;而高于此应力范围,材料粉化为细小的颗粒,纤维处于游离状态,不能发挥作用。

根据以上的思想,初步定义材料的损伤 $D=1-\tau_{res}/\tau_{int}$,其中 τ_{res} 为残余剪切强度, τ_{int} 为完整材料的剪切强度。根据图 7,可以得到损伤 D 与粒子速度 u 的关系见图 8。当超过材料的损伤起始点后,随粒子速度的增加,材料的损伤程度急剧加大。值得注意的是,此时材料内部的损伤是加卸载纵波和加载横波对材料共同作用的结果。

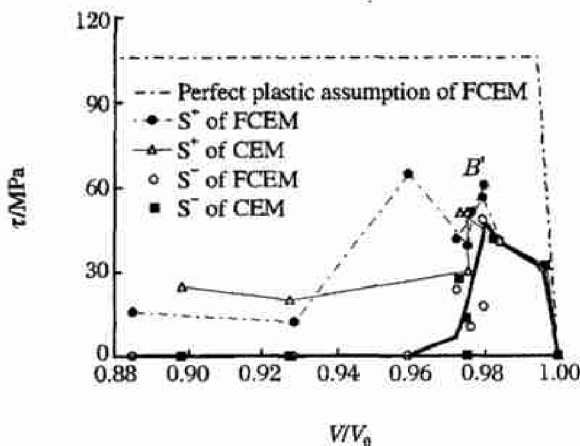


图 7 剪应力与相对比容关系曲线

Fig. 7 Relationship of shear stress to relative specific volume

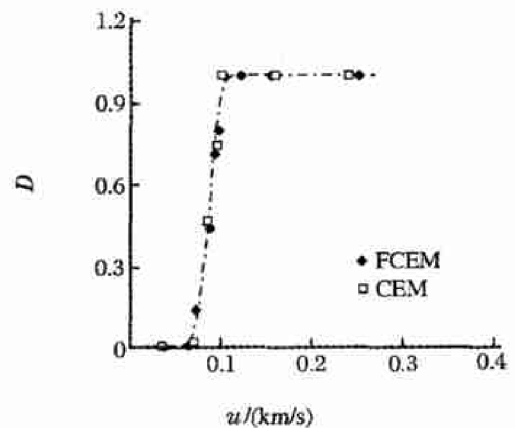


图 8 损伤与粒子速度关系曲线

Fig. 8 Relationship of damage to particle velocity

4 破坏形态分析

4.1 试样破坏形态

图9(a)为纤维增强水泥试件的细观结构。此材料由砂粒、水泥基体、纤维以及空洞组成。在镜下对材料的孔洞直径、气孔率、孔径分布进行统计,素水泥试件的气孔率为9.49%,平均孔洞直径为0.355mm;纤维增强水泥试件的气孔率为10.51%,平均孔洞直径为0.462mm。纤维的加入,不仅加大了样品的平均孔洞直径,同时也增加了样品的气孔率。

图9(b)~(d)为不同冲击速度下,纤维增强水泥试件的宏观破坏形态。图9(b)对应冲击速度较低的情况,此时材料尚处于弹性状态,试件的破坏主要由于边界反射的稀疏波造成。但图中已经反映出,随着冲击速度的增加,材料破坏程度呈现越强烈的趋势。

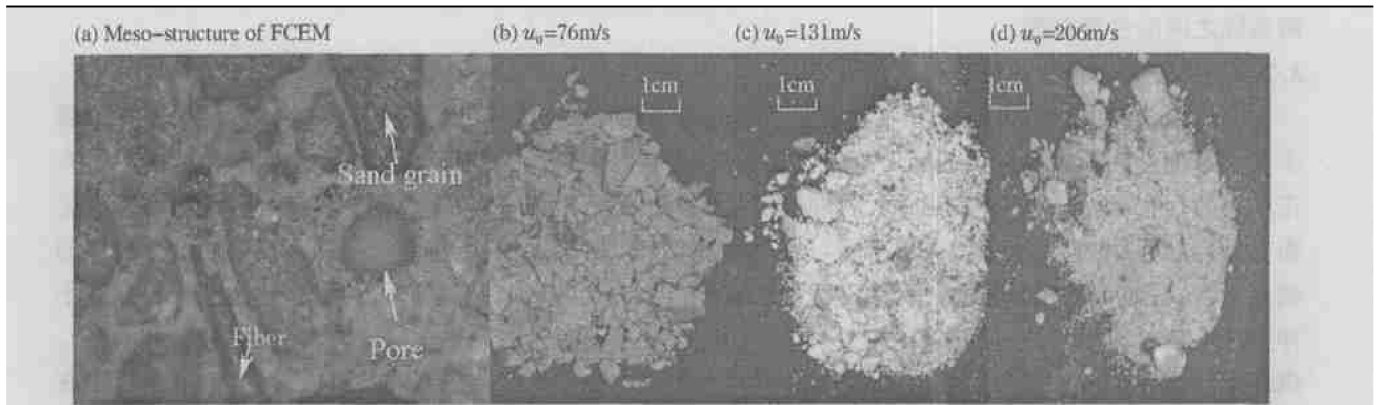


图9 试样细观结构和不同冲击速度下的回收样品形态

Fig.9 Meso-structure and recycle sample of FCEM under various impact velocity

4.2 纤维形态

利用 Nikon 金相显微镜对准静态及冲击试验前后的聚丙烯短微纤维的表面情况和损伤情况进行观察^[6]:图10(a)为聚丙烯短微纤维的原始形貌,可以看到纤维表面光滑平直,无损伤。在样品材料的制备过程中,纤维增强水泥原料在搅拌3分钟后,纤维只是表面的粗糙程度有所变化,但没有更明显的损伤和变形(见图10(b))。准静态单轴压缩试验中,回收的纤维中一部分保持完整,另一部分发生了断裂。纤维增强水泥回收的纤维中极少数出现了刮伤剥离现象,多数只是增加了表面粗糙程度。而且,发生断裂的纤维的断口也比较平齐(见图10(c))。在较低冲击速度的正撞击试验中,纤维增强水泥的回收纤维中发生断裂的比例明显增多。纤维的表面粗糙程度与静压试验中相比有所增加,其它特征包括断裂纤维的断口形式与静压试验中没有明显的区别(见图10(d))。高速冲击压剪实验中,回收纤维几乎没有完整的,长度多小于5mm。这说明聚丙烯短微纤维在材料冲击过程的变形方式不仅是脱粘/拔出,还包括多次断裂及本身的大变形。

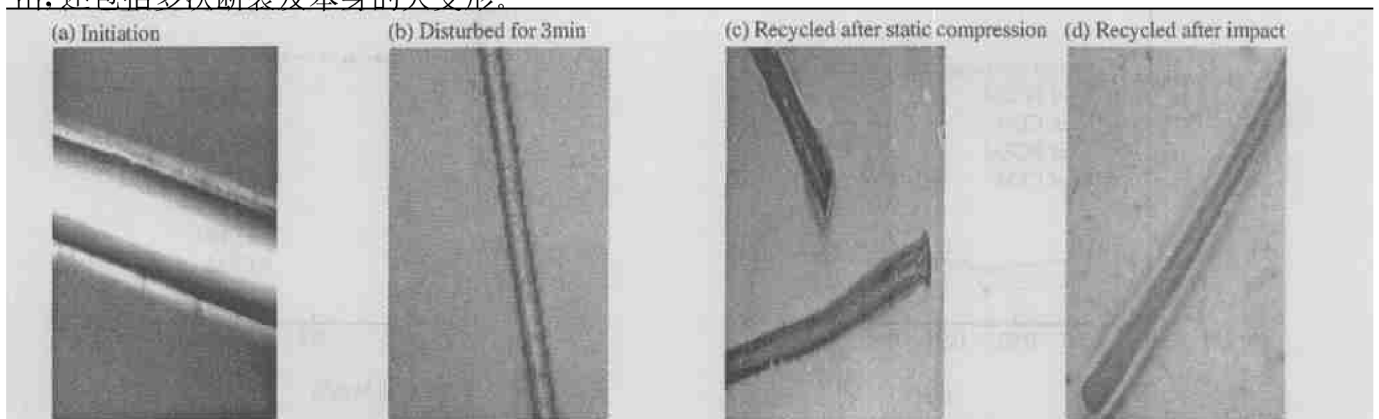


图10 纤维增强水泥试件不同情况下纤维的显微形态

Fig.10 Meso-structure of fiber under various situations

5 结 论

基于唐志平等提出的 SWT 技术对聚丙烯纤维增强水泥进行了冲击速度 84 ~ 171m/s 的正撞击试验和冲击速度 76 ~ 506m/s 倾斜角为 10° 的斜撞击试验,对 CEM 进行了冲击速度 41 ~ 45m/s 的正撞击试验和冲击速度 74 ~ 484m/s 倾斜角为 10° 的斜撞击试验。实验结果表明,两种材料的冲击绝热线均有四个明显的临界点: A、B、C、D,分别对应 Hugoniot 弹性限、S⁻波消失、孔洞崩塌点和颗粒材料的再压缩点。尤其是临界点 B,在过去的研究工作中尚未被揭示。此临界点对应材料内部已经形成大的贯穿性破坏,剪切强度基本消失。但是由于静水压力的存在,Hugoniot 冲击绝热线在此处不存在明显的拐点。因此,采用常规的测试方法无法确定此临界点,只有对 S⁻波进行跟踪测量,才能最终确定。四个临界点将冲击过程分为五个阶段:弹性压缩,损伤的产生和发展,大的贯穿性破坏,孔洞崩塌,固体压缩。当斜撞击的冲击速度超过 250m/s 时,对原始波形进行 Lagrange 分析过程中发现其应力和应变出现异常。因此对 FCEM 在此区域进行了冲击速度 173 ~ 274m/s 的锰铜计正撞击试验。对粒子速度测试结果进行了初步的修正。但是,在此区域得到的应力应变关系,无论是粒子速度测试,还是锰铜计应力测试均存在一定的不足。

对加载和卸载横波分别进行分析得到两个剪切强度。其中由加载阶段得到的剪切应力由于材料中静水压力的存在,材料内部的摩擦作用,出现波动。甚至到材料明显破坏之后,仍有一定的残余剪应力存在。而由卸载阶段分析得到的剪切应力在 B' 点(与上面的 B 点对应)之后,很快降为 0。这说明采用剪切波,尤其是卸载剪切波分析脆性材料内部动态损伤的有效性和独特的作用。

通过 FCEM 和 CEM 两种材料的对比研究表明,聚丙烯短微纤维只在材料逐渐丧失剪切强度直至孔洞崩塌阶段,即图 5 中的 BC 段起作用,而在其他区域作用不大。

参考文献:

- [1] Tang T, Malvern L E, Jenkins D A. Rate effects in uniaxial dynamic compression of concrete[J]. J Eng Mech, 1992, 118: 108.
- [2] 姜锡权. 水泥砂浆静动态力学行为及短纤维增强性能研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 1996.
- [3] 施绍裘, 陈江瑛, 李大红, 等. 水泥砂浆石在准一维应变下的动态力学特性研究[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(4): 326—332.
- SHI Shao-qiu, CHEN Jiang-ying, LI Da-hong, et al. A study on the dynamic mechanical behavior of cement mortar under quasi-one dimensional strain rate[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(4): 326—332.
- [4] 陈叶青. 拉氏分析方法及强动载水泥石的本构关系[D]. 北京: 铁道科学研究院, 1994.
- [5] 唐志平, 刘文彦. 水泥基复合材料的压剪联合冲击实验研究[J]. 中南工业大学学报(自然科学版), 2001, 32(专辑): 23—26.
- TANG Zhi-ping, LIU Wen-yan. Experimental investigation on cement composites under combined compression and shear impact loading[J]. Chinese J Cent South Univ Technol, 2001, 32(Special): 23—26.
- [6] 刘文彦. 水泥基复合材料在冲击载荷下的力学响应和纤维的桥联行为研究[D]. 合肥: 中国科技大学, 2001.
- [7] Gupta Y M. Measurement of compression and shear waves in an impact experiment: role of gauge leads in particle-velocity measurement[J]. J Appl Phys, 1980, 51: 1835.
- [8] Abou-sayed A S, Clifton R J. Pressure-shear waves in fused silica[J]. J Appl Phys, 1976, 47: 1762.
- [9] Boteler J M. Compression-shear study of glass reinforced polyester[A]. Schmidt. Shock Compression of Condensed Matter[C]. The American Institute of Physics, 1997: 537.
- [10] 唐志平, 胡晓军, 廖香丽, 等. 双磁场 IMPS 粒子速度测试系统[J]. 实验力学, 2000, 15(1): 16—21.
- TANG Zhi-ping, HU Xiao-jun, LIAO Xiang-li, et al. An experimental facility for measuring longitudinal and shear waves with dual magnetic fields[J]. Chinese Journal of Experimental Mechanics, 2000, 15(2): 15—21.
- [11] Seaman L. Lagrangian analysis for multiple stress or velocity gages in attenuating waves[J]. J App Phy, 1974, 45(10): 4303—4314.

Experimental investigation on dynamic properties of the polypropylene micro-fiber reinforced cement (FCEM) under impact loading

XU SONG-lin^{*}, TANG Zhi-ping, HU Xiao-jun, CAI Jian

(*Key Laboratory for Mechanical Behavior and Design of Materials,*

Department of Modern Mechanics,

University of Science and Technology of China, Hefei 230026 Anhui, China)

Abstract: Based on the shear wave tracing technique (SWT) proposed by Z.P.Tang, a series of experiments including oblique planar impact of inclination angle 10 degree, impact loading velocity ranging from 75m/s to 506m/s for FCEM and from 74m/s to 484m/s for CEM, have been carried out to investigate the responses of polypropylene micro-fiber reinforced cement to impact loading. Experimental results show that there exist four critical points *A*, *B*, *C* and *D* along the p - V Hugoniot curve. They correspond to the HEL of the material, the shear strength limit and the transition from damage state to failure state, void collapse and the shock compression, respectively. The critical point *B* is difficult to be identified and has not been reported before. However, it can be clearly distinguished with the SWT technique. According to the analyses of shear strength, it can be concluded that the transversal waves, especially the unloading ones, are of importance to the dynamic damage detection in brittle materials.

Key words: solid mechanics; polypropylene micro-fiber reinforced cement (FCEM); shear wave tracing technique (SWT); void collapse; experimental investigation

* Corresponding author: XU SONG-lin
E-mail address: SLXU99@ustc.edu.cn
Telephone: 0551-3606764