

SHPB实验数据处理的解耦方法^{*}

宋博 宋力 胡时胜

(中国科学技术大学力学和机械工程系 230027)

摘要 分析了 SHPB 试验中导致试件早期应力不均匀性的主要因素,指出试件中应力波的波速是与试件材料的应力应变曲线耦合在一起的,提出了考虑应力不均匀性的解耦方法,这种解耦方法具有普遍性,可广泛用于 SHPB 实验数据处理。

关键词 分离式霍普金森压杆 应力不均匀性

中图法分类号 TB302

1 引言

自 1949 年 Kolsky 提出分离式 Hopkinson 压杆 (简称 SHPB) 以来,这一实验技术得到了长足发展并日趋完善,尤其是对于金属等波阻抗较高的材料。但对于低波阻抗材料,以往 SHPB 试验数据处理则存在着许多不足。低波阻抗材料是指波阻抗值 (材料密度与材料中应力波波速乘积 ρc) 很小的一类材料,而波阻抗是表征材料在动态载荷下力学特性的一个基本参数,它反映了应力波从一种介质到另一种介质的传播特性^[1]。高聚物及其多孔介质,例如聚氨酯泡沫塑料,泡沫硅橡胶等都属于低波阻抗材料。这类材料在进行 SHPB 实验数据处理时会遇到一些问题。首先,不同于金属材料,低波阻抗材料的透射信号都非常小,通常其幅度只有入射信号的几十分之一甚至几百分之一,这时外界的干扰信号就足以与透射信号相比,甚至可以完全淹没透射信号,这样直接计算出来的结果误差很大;其次,由于低波阻抗材料中的应力波波速小 (对于橡胶材料,其应力波波速仅为 46m/s),所以在相当长时间内试件处于应力不均匀状态,在数据处理中经常采用的应力均匀假定已不再成立。

然而由于近年来材料科学的兴起和不断发展,一大批新型工程材料不断涌现出来,低波阻抗材料作为一种新型的缓冲吸能材料;越来越受到航空、航天、军事防护、包装运输等各领域的重视,已广泛地应用于易损物品的缓冲包装、重要设备的防护及结构物内部填充等。因此,研究低波阻抗材料在各种冲击载荷下的力学行为已是有关设计部门日益关注的问题。这就要求我们对 SHPB 实验数据处理方法进行修改,使其不仅能适用于高波阻抗材料,也能适用于低波阻抗的材料。

对于金属类材料,由于应力波在其中传播速度很大,在极短时间内试件中的应力波会来回反射很多次从而达到应力均匀化,故在 SHPB 上对此类介质作高应变率加载试验时,除了一维应力假定外,再作应力均匀化假定也是合理的,而对于低波阻抗材料而言,其应力波传播速度很低,应力波在试件中传播一个来回需要的时间很长,会出现试件内较长时间的应力不均匀性,即试件左右端面应力不相等。周风华等^[2]就高聚物材料在 SHPB 试验中,试件早期应力不

^{*} 中国工程物理研究院基金项目,批准号 960102

宋博:男,1972年生,博士生。

1997-01-13收到原稿,1997-04-01收到修改稿。

均匀性作了较为详细的讨论,发现高聚物材料 SHPB 试验中存在时间不均匀性和空间不均匀性,而且这种应力不均匀性会对最后的实验处理结果产生较大的影响,并分别对上述两种不均匀性提出了修正方法。然而他们在修正时间不均匀性时,平移时间为 $t_0 = L_0 / c_0$,没有考虑试件被压实后的波速的提高,即所谓简单时间平移法,这种方法用于低阻抗软介质试件上将会产生较大的误差。刘剑飞等^[3]针对这个问题提出了不均匀时间平移法,即平移时间 $f(t) = L_0 / c(t)$,式中 L_0 为试件的初始长度, $c(t)$ 为当时试件中的波速,是个与试件性质有关的量,因此这实际上是个试件中的波速与应力应变关系需同时确定的耦合问题。他在所研究的聚氨酯泡沫塑料的 SHPB 试验中,采用了 $c = (E/d)^{1/2}$,并利用了他本人建立的模量 E 与密度 d 之间的对应关系,而密度 d 又可换算为应变 X 从而直接求出 $c(t)$,进而求得相应的平移时间 $f(t)$ 。但是模量 E 与密度 d 的这种对应关系是依赖于材料本身性质的,不同的材料具有不同的对应关系,在一般情况下,模量 E 与密度 d 的这种对应关系是很难甚至无法得到的,因此,这种方法使用起来很不方便,也是很困难的。

2 考虑应力不均匀性的解耦方法

如上所说,试件中应力波波速是随着试件的变形(应变)而变化,所以为考虑试件应力不均匀性的影响,必须知道试验过程中试件中应力波波速的变化情况。然而文献[3]中采用的公式 $c = (E/d)^{1/2}$ 仅适用于弹性范围,而采用公式 $c = (d^e/d dX)^{1/2}$ 则适用于更广的变形范围,更具有普遍性。但是依公式 $c = (d^e/d dX)^{1/2}$ 可知,试件中应力波波速是依赖于试件材料的应力应变曲线的,而在 SHPB 试验中,试件材料的应力应变曲线又是考虑应力不均匀性影响之后经计算得到的,所以正如前面所说,这是一个试件中应力波传播速度与试件应力应变曲线需同时确定的耦合问题,其求解过程实际就是一个解耦的过程。

我们仍然采用不均匀时间平移法,所不同的是一边考虑应力不均匀性影响,一边计算试件材料的应力应变曲线,随后根据此时刻应力应变曲线求得的试件中应力波波速再去考虑下一时刻的应力不均匀性的影响,如此循环递推,可以最终求得材料应力应变曲线。可以想象,在考虑试件中应力不均匀性影响后得到的试件左端面的应力波形相对于试件右端面的应力波形,并不是象简单时间平移法那样仅仅进行简单平移,而且还包含一个展缩的过程。同时,对于低波阻抗材料,由于反射波信号和入射波信号几乎相等,这时已不能用这两个波形确定试件左端面的应力,为解决这个问题,可以通过对透射波信号采用不均匀时间平移法反推试件左端面的应力,随后取试件左、右端面应力的平均值就得到了试件本身的应力,下面的公式(3)中就采用了这种方法。

这种解耦方法的具体算法为

$$X(t_i) = \frac{c}{L_0} \{X(t_i) - X(t_i) - X[t_i - f(t_i)]\} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (1)$$

$$X(t_i) \approx X(t_i) \Delta t + X(t_{i-1}) \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (2)$$

$$c(t_i) = \{X(t_i - f_0) + X[t_i + f(t_i) - f_0]\} \frac{EA}{2A_0} \quad (i = 1, 2, 3, \dots) \quad (3)$$

式中

$$f_0 = \frac{L_0}{c_0} \quad (4)$$

$$f(t) = \frac{L_0}{c_s(t_{i-1})} \quad (i= 1, 2, 3, \dots) \quad (5)$$

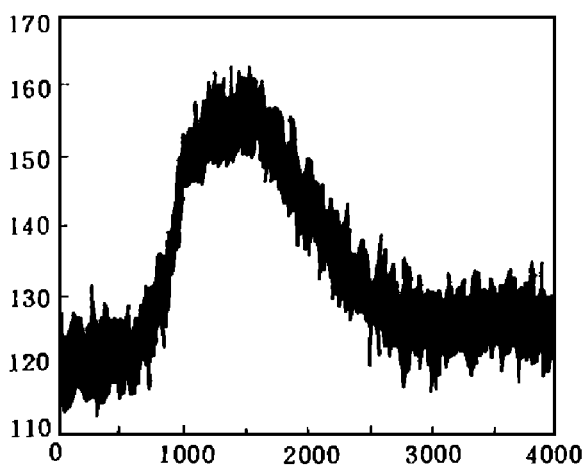
$$c_s(t) = \left(\frac{E_s(t)}{d} \right)^{1/2} \quad (i= 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

$$E_s(t) = \frac{e(t) - e(t_{i-1})}{X(t) - X(t_{i-1})} \quad (i= 1, 2, 3, \dots) \quad (7)$$

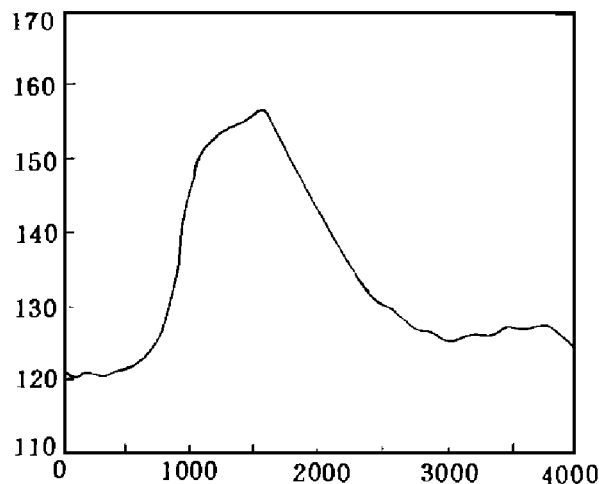
初始条件为

$$c_s(t_0) = c_s(0) = c_{s0} \quad (8)$$

式中: $c_s(t)$, $f(t)$, $E_s(t)$ 分别为试件在 t 时刻的试件应力波波速、平移时间和应力应变曲线的割线模量, L_0 , c_{s0} 分别为试件的初始长度、初始应力波波速, A_0 为试件的横截面积, c , A , E 分别为压杆的弹性波速、横截面积和弹性模量, $X(t)$, $X(t)$, $X(t)$ 分别为入射波、反射波和透射波的应变信号, $\dot{X}(t)$, $\dot{X}(t)$, $e(t)$ 分别为求得的试件材料在 t 时刻的工程应变率、工程应变和工程应力。由 (6) 式知 $E_s(t)$ 必须大于零, 而在实际数据处理过程中 (7) 式并不一定能保证这一点, 针对这种情况, 我们采用以下两个步骤: (1) 在试验数据处理之前先对原始曲线进行滤波, 尽量避免负模量并使计算结果更加精确。滤波可以采用快速傅里叶变换 (FFT) 的方法^[4], 图 1 给出了原始信号和经滤波后的信号, 经比较表明, 滤波方法是使 SHPB 试验数据处理更为精确的一种很好的方法; (2) 导致 $E_s(t)$ 小于零或等于零的原因主要是由于弥散效应导致的波形的振荡, 即透射波形上的抖动。如果 $E_s(t)$ 小于零或等于零, 令这一时刻的平移时间等于前一时刻的平移时间, 即假设这两个时刻试件中的应力波波速是相等的, 这两点之间只存在简单的时间平移, 而不存在展缩, 考虑到相邻两时刻的时间间隔是很短的, 所以这种方法所带来的误差也是很小的。



(a) Original waveform



(b) Waveform after filtration

图 1 原始波形与滤波后的波形比较

Fig. 1 Comparison of the original waveform and that after filtration

我们采用解耦的不均匀性时间平移法对聚氨酯泡沫塑料的 SHPB 试验数据进行了处理。图 2 为处理后得到的试件左右端面的应力波形, 显示了试件两端的应力从不均匀到均匀的时间演化过程。图 3 为解耦方法处理后得到的聚氨酯泡沫塑料的应力应变曲线和文献 [3] 中结果的比较, 两者的实验结果吻合得相当好, 表明了这种解耦方法能够很好地解决低波阻抗材料中较

长时间内应力不均匀性对实验结果的影响问题

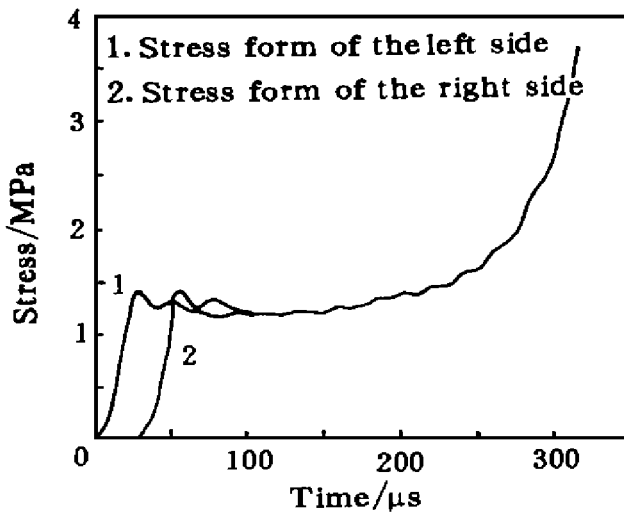


图2 经解耦平移后试件左右端面应力波形
Fig. 2 The stress wave form left and right side of the specimen after translation with coupling solved

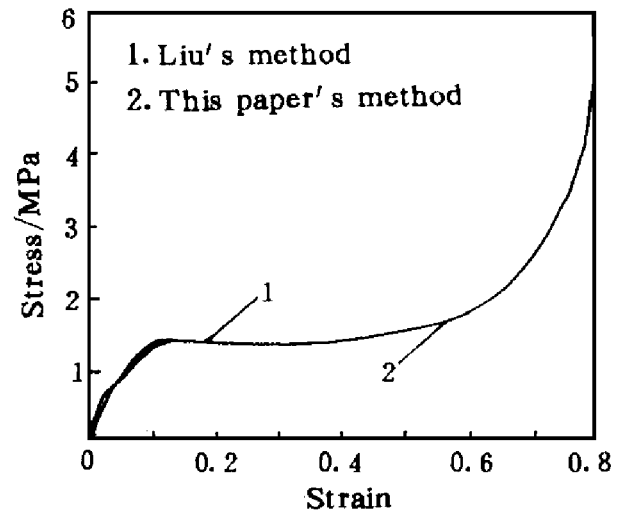


图3 解耦方法与 [3] 中的方法得到的试件应力应变曲线的比较
Fig. 3 Comparison of the stress-strain curve of the specimen with coupling solved by our method and the method of [3]

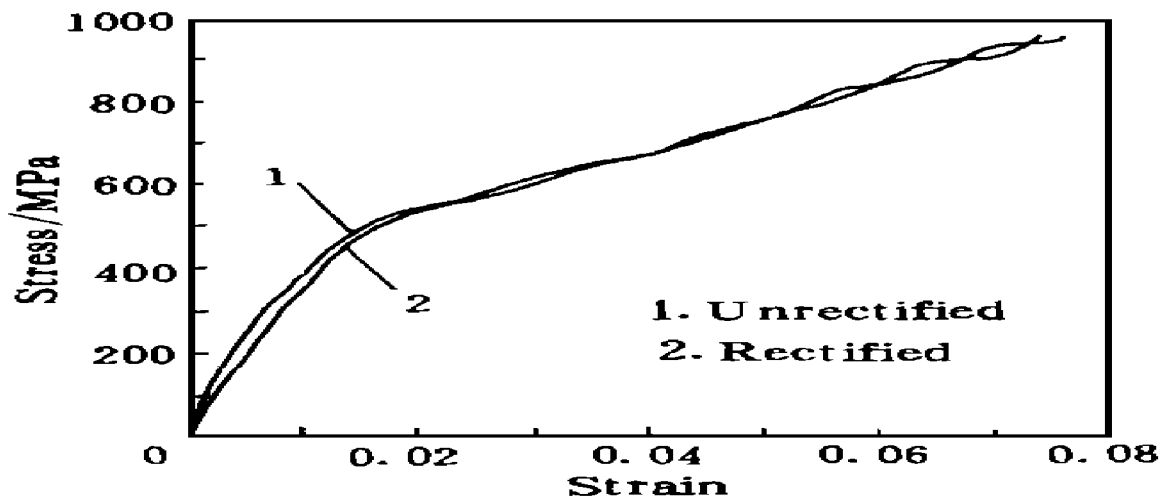


图4 不锈钢材料常规和解耦两种处理方法所得的应力应变曲线比较
Fig. 4 Comparison of the stress-strain curve of stainless steel with conventional steel method and our coupling solved method

我们又用同样的方法对于波阻抗较高的金属类材料的 SHPB 试验数据进行了处理, 其结果与采用常规方法的结果是一致的 (如图 4 所示)。可见, 本文中的解耦方法不仅能够用于低波阻抗材料, 还同样适用于波阻抗较高的金属材料。

3 结论

由于低波阻抗材料 SHPB 实验时在较长时间内会存在应力不均匀性, 常规的实验数据处理方法已不能较好地解决这一问题, 针对这一问题, 本文得到了如下结论:

1 分析了材料在进行 SHPB 试验时, 试件中应力波波速是造成应力不均匀的重要因素, 并且试件中的应力波波速在实验过程中又是不断变化的, 依赖于当时的应力和应变。指出在整个试验过程中, 实际是试件中应力波波速与试件材料应力应变曲线相互关联耦合问题。

2 在简单时间平移法和不均匀时间平移法的基础上阐述了对透射波进行不均匀时间平移的解耦方法, 并给出了具体的计算递推公式。本文的解耦方法和文献 [3] 中方法得到的应力应变曲线是精确吻合的。

3 通过对常规方法和解耦方法得到的不锈钢材料应力应变曲线的比较, 说明了这种解耦方法不仅适用于聚氨酯泡沫塑料这类低波阻抗材料, 而且对高波阻的金属类材料也同样适用。因而具有比以往方法更好的普遍性, 是可以广泛应用于 SHPB 实验数据处理中的一种准确、实用而又有效的方法。

参 考 文 献

- 1 王礼立. 应力波基础. 北京: 国防工业出版社, 1985
- 2 周风华, 王礼立, 胡时胜. 高聚物 SHPB 试验中试件早期应力不均匀性的影响. 实验力学, 1992, 7(1): 23~29
- 3 刘剑飞, 王正道, 胡时胜. 低阻抗多孔介质材料的 SHPB 实验技术. 实验力学, 待发表.
- 4 应怀樵. 波形和频谱分析与随机数据处理. 北京: 中国铁道出版社, 1983

COUPLING SOLVED METHOD OF SHPB EXPERIMENTAL DATA PROCESSING

Song Bo, Song Li, Hu Shisheng

(University of Science and Technology of China, Hefei 230027)

ABSTRACT In this paper, the main factors that lead to the stress nonuniformity in the early stage of specimen deformation in SHPB test are analysed. It is pointed out that the stress wave velocity in the specimen is coupled with stress-strain curve of the specimen. The coupling solved method about the stress nonuniformity is put forward. This method is of universal significance and can be applied widely for SHPB experimental data processing.

KEY WORDS Split Hopkinson's Pressure Bar (SHPB), stress nonuniformity