

文章编号: 1000-5773(2005)04-0299-06

石英压电晶体在霍普金森压杆 实验中的应用*

林玉亮, 卢芳云, 卢 力

(国防科技大学理学院技术物理研究所, 湖南长沙 410073)

摘要: 利用传统分离式霍普金森压杆(SHPB)对低密度、低波阻材料进行测试时, 存在透射信号弱、试样在加载时间内难以达到受力变形均匀的不足。采用嵌入压电石英晶体技术测试微弱的透射信号, 并监测试样两端应力平衡。实验测试了一种低密度聚氨酯泡沫, 结果表明嵌入压电石英晶体技术可以大幅提高透射信号的幅值和信噪比, 所测试的材料在应变率范围 $1\ 000\sim 4\ 000\ \text{s}^{-1}$ 内应变率效应不明显。

关键词: SHPB; 石英压电晶体; 软材料; 高应变率

中图分类号: O348.2 **文献标识码:** A

1 引 言

自 1949 年 Kolsky^[1] 提出分离式霍普金森杆(SHPB)技术以来, 这一技术得到了广泛的应用。近年来, 随着新型材料的不断涌现, 利用这一技术测试低波阻、低密度材料(又称为软材料)的问题受到大家的关注。但直接利用传统的 SHPB 实验杆来测试软材料的动态力学性质, 一般存在两方面的缺陷: 一是软材料透射信号非常弱, 通常其幅值只有入射信号的几十分之一甚至几百分之一, 这时干扰信号可能与透射信号相当, 甚至可以完全湮没透射信号, 导致无法得到正确的实验结果。二是由于软材料中应力波波速很低, 在相当长的时间内试样中应力和变形处于不均匀状态, 不能满足 SHPB 实验的基本前提。

为了解决这两方面的问题, 人们做了许多尝试与研究。为了解决透射信号弱的问题, W. Chen 等^[2] 提出采用中空的铝管代替原来的钢杆作为输出杆; 刘剑飞等^[3] 用半导体应变片代替传统的金属电阻应变片来测量透过软材料的透射信号。但这两种技术, 前者只能较小程度地提高透射信号的幅值, 后者则很容易受实验环境的影响(温度稳定性差、灵敏度系数非线性大)。W. Chen 等^[4] 在 1999 年提出采用嵌入石英压电晶体技术对软材料进行 SHPB 试验, 结果表明这一技术可以将透射信号的幅值提高 2 个量级以上。对于试样在较长的时间内处于应力、应变不均匀状态的问题, 一般采用入射波整形技术^[5] 来延缓入射波的上升前沿, 使得试样中的应力、应变趋于均匀。在 SHPB 实验中, 采用嵌入石英晶体技术对一种低密度的聚氨酯泡沫材料进行了测试。同时, 利用嵌入压电石英晶片监测试样两端的应力平衡情况, 直观地判断试样中应力分布是否均匀。

2 石英压电晶体测试技术

石英晶体是一种性能稳定、应用广泛的压电晶体, 其介电常数和压电系数的温度稳定性相当好, 在常温范围内这两个参数几乎不随温度变化^[6]。在应力 T (用一列矩阵表示其 6 个独立分量) 作用下, 石英晶体的正压电效应可描述为

* 收稿日期: 2004-11-30; 修回日期: 2005-01-27

基金项目: 国家自然科学基金(10172092); NSAF 联合基金(10276038)

作者简介: 林玉亮(1978—), 男, 博士研究生. E-mail: ansen_liang@163.com

$$\begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{pmatrix} \quad (1)$$

或简写为

$$D_i = d_{ij} T_j \quad (2)$$

式中: D_i ($i=1,2,3$) 为电位移分量(在 SI 单位制中, D_i 与面电荷密度相等); d_{ij} 为压电常数。应力分量 T_j ($j=1,2,3,4,5,6$) 与写成双足标应力分量的对应关系如表 1 所示。

表 1 应力分量双足标与单足标的关系

Table 1 The relation between single and double subscript of a stress vector

D-sub	σ_{xx}	σ_{yy}	σ_{zz}	σ_{yz}	σ_{zx}	σ_{xy}
S-sub	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6

值得注意的是,因为石英是一种各向异性晶体,按不同方向切割的晶片,其物理性质(如弹性、压电效应、温度特性等)相差很大。所以,在设计石英传感器时,要根据不同的使用要求,正确地选择石英片的切型。在霍普金森压杆实验中,采用 x -切石英晶体,其工作原理如下所述。

图 1 给出了 SHPB 实验所采用的石英晶体切片示意图,其中 x, y, z 分别对应石英晶体的三个晶轴方向。当 x -切晶片受到沿晶轴 x 方向的单轴应力 σ_{11} 作用时,晶片将发生变形,引起电极化现象,在垂直于 x 轴的前后表面将产生正负极化电荷 q_x 。根据(1)式知,当晶体处于线弹性范围内时,沿 x 轴的电位移分量 D_1 与应力 σ_{11} 成正比,即

$$D_1 = d_{11} \sigma_{11} = d_{11} F_x / A \quad (3)$$

式中: F_x 为沿晶轴 x 方向施加的力; d_{11} 为压电系数,对于石英晶体 $d_{11} = 2.3 \times 10^{-12}$ C/N; A 为石英晶片的截面积。由于电位移分量在数值上等于晶体的面电荷密度,即有

$$D_1 = q_x / A \quad (4)$$

式中: q_x 为垂直于 x 轴平面上的电荷。将(4)式代入(3)式,可得

$$q_x = d_{11} F_x \quad (5)$$

从上面的推导可以看到,当 x -切石英晶片只受到 x 轴方向的力作用时,沉积在晶体表面的电荷量与其所受力的大小成正比。因此,如果在 SHPB 实验中,将石英晶片嵌于杆中,当应力波在杆中传播通过石英晶片时,晶体因为受力而产生极化电荷,通过测出极化电荷即可推知石英的受力情况,从而导出应力波的状态。同时由表 2 知,石英与 LY12 铝材料的波阻抗相当,两者间存在约 6% 的误差。

表 2 石英与 LY12 铝材料波阻抗比较

Table 2 Mechanical impedance of quartz and aluminium (LY12)

Material	$\rho / (\text{kg/m}^3)$	$C / (\text{m/s})$	A	ρCA
Quartz	2649	5700 ^[7]	A_0	$15.09A_0 \times 10^6$
Al(LY12)	2785	5096	A_0	$14.19A_0 \times 10^6$

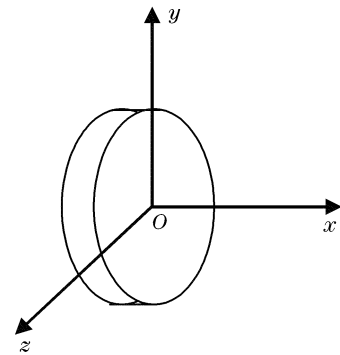


图 1 石英晶体切片

Fig. 1 Quartz crystal disk

$$\sigma_R = \frac{r-1}{r+1}\sigma_1, \quad \sigma_T = \frac{2r}{r+1}\sigma_1 \quad \left(r = \frac{\rho_2 c_2 A_0}{\rho_1 c_1 A_0} \right) \quad (6)$$

通过对(6)式的分析可知当应力波由铝杆传入等截面的石英晶片时,其中超过 97%的波将全部通过。图 2 给出了铝杆中应力波通过石英片前后比较示意图,其中 $\sigma(i)$ 对应入射应力, $\sigma(t)$ 对应透射应力,从该图中可以看到两者相差甚小。扣除实验测试、数据采集及处理过程中带来的误差,可以认为石英的受力情况即反映了铝杆中的应力状态。

图 3 给出了 SHPB 装置示意图,图中 Q_1 、 Q_2 对应两片石英晶体,其局部放大图如图 4 所示。石英晶片的 x 轴与杆轴同向,截面积与杆的截面积相等。其被用导电胶粘贴于铝杆与一薄铝片之间,保证当石英片受压时所产生的电荷可以通过铝杆及铝片导出,利用电荷放大器将这些电荷转化为电压信号输出,由示波器记录。经灵敏度归一处理后,石英晶片所受力与电荷放大器输出电压之间的关系为

$$F = V/K \quad (7)$$

式中: V 为示波器记录的电压值(mV), K 为电荷放大器的放大倍数(mV/unit),计算得到的力的单位为国际单位制。

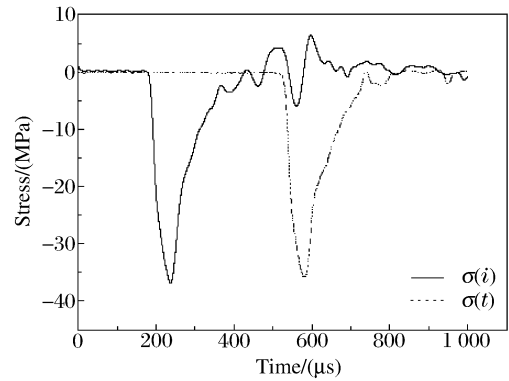


图 2 铝杆中应力波透过石英片示意图
Fig. 2 Stress pulse pass through quartz disc in Al-bar

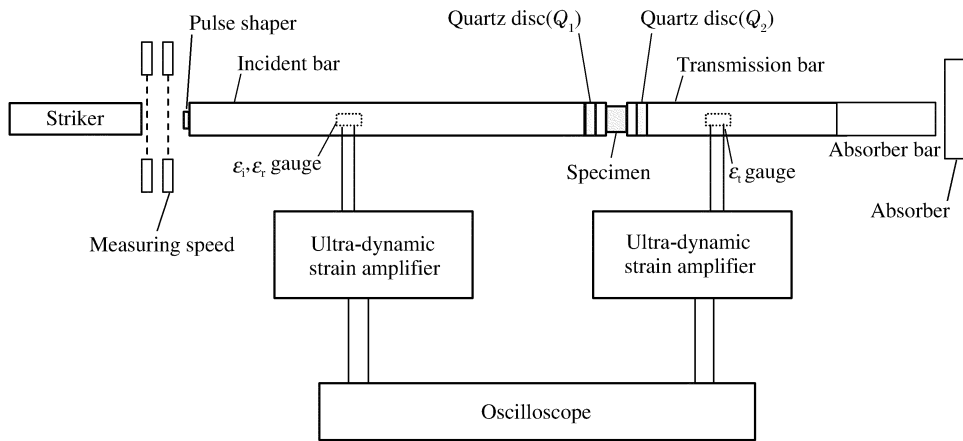


图 3 SHPB 实验装置图
Fig. 3 Schematic of SHPB setup

由于铝的导电性,使得无法既利用石英压电晶体测试透射信号,又用其监测试样两端的应力平衡情况。这是因为若在透射杆中嵌入两片石英压电晶体,铝杆的导电性将使第一片石英片产生正(或负)电荷的表面与另外一片石英片产生正(或负)电荷表面连通,导致两片石英片均无法正常工作。但根据波传播理论,若输出杆为线弹性材料,图 3 中 Q_2 所测试的信号应该与利用应变片测得的透射信号(均换算为应力或应变)相同,所以可以利用 Q_2 测得的信号来代替应变片测得的透射信号。

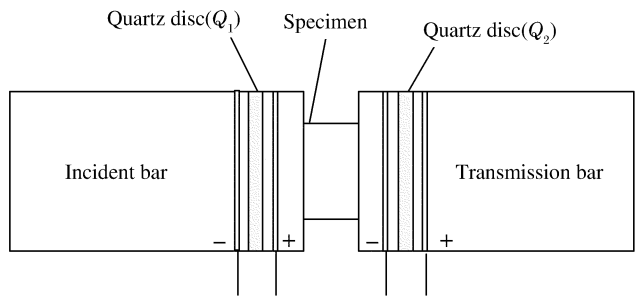


图 4 嵌入压电石英晶体片监测试样两端力平衡装置示意图
Fig. 4 Schematic of quartz transducer embedded in SHPB

3 对泡沫进行 SHPB 实验的结果

所用的 SHPB 实验杆材料为 LY12 铝、直径为 20 mm,入射杆和透射杆的长度分别为 2 000 mm、1 000 mm,子弹的长度可依据不同的需要取 150 mm、300 mm、450 mm 不等。测量入射应变和透射应变的应变片分别安装在入射杆和透射杆的中间位置,得到的信号由 Tektronix TDS 3014B 示波器进行记录。上面提到的石英晶片得到的信号同样送入 Tektronix TDS 3014B 进行记录。

所测试的泡沫为一种硬质聚氨酯泡沫材料,由江苏化工研究院生产,密度为 0.171 g/cm^3 。实验过程中,将试样加工为直径 14 mm、厚度 2.0 mm 的圆片。我们经过对不同厚度试样的实验证明了对于这种泡沫材料,厚度对实验结果的影响不明显。同时,为了减少端面摩擦对实验的影响,将二硫化钼润滑剂均匀地涂抹在试样端面及入射杆和透射杆的端面上。整形器材料选用 H62 黄铜,其尺寸依据所要实现的应变率而选择相应的尺寸。实验时,用真空脂将其粘于入射杆的受撞击面的中央。

图 5 给出了对这种泡沫进行测试得到的典型实验记录。图中通道 1 为入射杆上应变片测得的入射波 ϵ_i 和反射波 ϵ_r ,通道 2 是透射杆上应变片测得的透射波 ϵ_t 。通道 3 和通道 4 是石英监测的试样两端力平衡的信号。通道 3 和通道 4 的两个信号比较可见,实验过程中达到了较好的力平衡状态。通道 4 与通道 2 的信号同为透射信号,比较可见,通道 4 石英的压电信号与通道 2 应变片的信号波形相同,但前者的幅值比后者大约三个量级(通过调整电荷放大器的增益,还可以得到更高的压电信号)。这说明利用石英压电晶体技术完全可以测试这种甚至更低密度的泡沫材料,进而也可以将其推广应用于测试其他软材料的动力学性质。

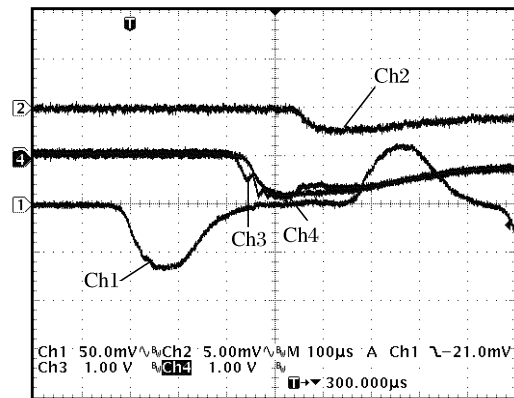


图 5 典型的实验曲线

Fig. 5 Typical records from a polyurethane foam test

图 6 中给出了通过嵌入石英晶体测得的试样两端铝杆中的 Q_1 及 Q_2 处的应力平衡情况。其中,符号对应实验数据点,曲线为数据点 6 次多项式拟合曲线。从图中可以看到在实验加载时间范围内,试样两端的应力基本达到了平衡,满足 SHPB 实验的基本前提。同时为了检验利用 Q_2 测得的信号代替应变片测得的信号作为透射信号的准确性,在图 6 中也给出了应变片得到的透射信号 σ_t ,可以看到两者吻合得很好。因此,可以用石英片 Q_2 测得的信号进行数据处理,这样既可以得到理想的透射信号,又可以很直观地判断试样两端应力是否平衡。

图 7 为实验得到的不同应变率下的应力-应变曲线,符号与曲线的意义同图 6。从中可以看出应力-应变曲线可以分为三个阶段:(1) 弹性段;(2) “平台”阶段;(3) “硬化”密实段。这三个阶段反映了压缩过程中泡沫体的细观行为。在低应力作用下,泡孔的变形是弹性或近弹性的;随着载荷的增加,泡孔的变形趋于非弹性逐渐加大并开始产生破坏,泡孔的空间将逐渐被破碎的泡壁基体填充,随着泡孔的不断破坏和破裂泡壁间相互作用所致的进一步碎化的进行,泡孔的空间被逐渐填实,泡沫体趋向于密实体。

表 3 列出了实验得到的该种聚氨酯泡沫的力学性能特征参数。其中,屈服强度 σ_y 的值取应力应变曲线拐点处对应的应力值;压缩模量 E_c 为估计参考值,其值为图 6 中各应力-应变曲线屈服应力与对应应变所表示的点与坐标原点间连线的斜率。考虑到试样两端的应力平衡情况在开始阶段不是很理想;另外,处理数据时反射和透射信号起跳点的选择也会对应力-应变曲线起始阶段带来较大的影响。因

表 3 聚氨酯泡沫材料的动力学性能参数

Table 3 Dynamic features of a polyurethane foam

$\dot{\epsilon}/(\text{s}^{-1})$	$\sigma_y/(\text{MPa})$	$E_c/(\text{MPa})$
1 800	4. 21	24. 89
3 100	4. 62	25. 92
4 000	4. 35	26. 44

此,这里给出的压缩模量 E_c 的值只能作为参考。但从整个过程来看,所进行的实验满足 SHPB 实验的基本要求,实验结果合理、有效。结果表明,这种聚氨酯泡沫材料在本实验的应变率范围内应变率效应不明显,将三种不同应变率下得到的动态屈服强度取平均值可得 σ_y 为 4.37 MPa。

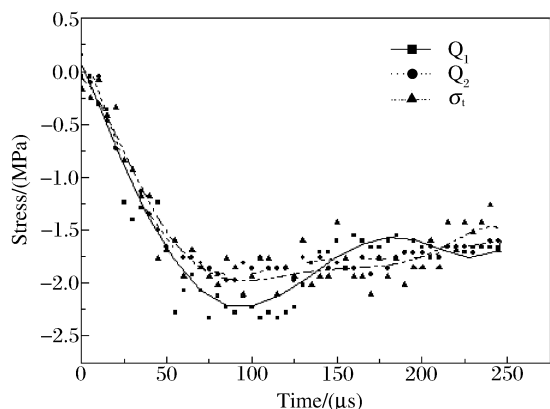


图6 试样两端应力平衡曲线示意图
Fig. 6 Stress equilibrium monitored during a test

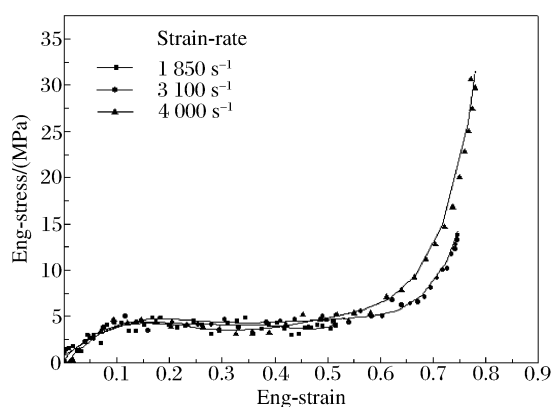


图7 泡沫材料实验应力-应变曲线
Fig. 7 Dynamic stress-strain curves of a polyurethane foam

4 结 论

通过对石英压电晶体测试技术的理论分析及对低密度聚氨酯泡沫进行了 SHPB 实验,证明石英压电晶体技术可以有效地解决传统 SHPB 实验技术测试软材料存在的问题;可以大幅度地提高弱透射信号的幅值,增幅近 3 个量级;对试样两端应力平衡情况进行实时监测,可以很直观地判定实验结果的合理性。

通过与采用应变片得到的透射信号进行的比较可以知道,利用嵌在透射杆中的石英片代替应变片测得的透射信号是正确的。这样,一方面解决了传统的 SHPB 实验杆测试软材料得到的透射信号较弱的问题,又可以很直观地得到试样两端应力平衡监测图。

结果表明,所测试的聚氨酯泡沫材料在动态压缩加载条件下($1\,000\sim 4\,000\text{ s}^{-1}$)应变率效应不明显,动态屈服强度为 4.37 MPa。

References:

- [1] Kolsky H. An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading [J]. Proc Phys Soc, 1949, 62(B): 676—700.
- [2] Chen W, Zhang B, Forrestal M J. A Split Hopkinson Bar Technique for Low-Impedance Materials [J]. Exp Mech, 1999, 39(2): 81—85.
- [3] Liu J F, Wang Z D, Hu S S. The SHPB Experiment Technology for Low Wave Impedance Porous Materials [J]. J Exp Mech, 1998, 13(2): 218—223. (in Chinese)
刘剑飞, 王正道, 胡时胜. 低阻抗多孔材料的 SHPB 实验技术 [J]. 实验力学, 1998, 13(2): 218—223.
- [4] Chen W, Lu F, Zhou B. A Quartz-Crystal-Embedded Split Hopkinson Pressure Bar for Soft Materials [J]. Exp Mech, 2000, 40(1): 1—6.
- [5] Nemat-Nasser S, Isaacs J B, Starrett J E. Hopkinson Techniques for Dynamic Recovery Experiments [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1991, 435(A): 371—391.
- [6] Wang H X, Zhang S Y. Theory and Application of Transducer [M]. Tianjin: Tianjin University Press, 1988. 171—174. (in Chinese)
王化祥, 张淑英. 传感器原理及应用 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988. 171—174.

- [7] Li Y, Qin Z K, Zhou Z G. Measuring of Piezoelectrics and Ferroelectrics [M]. Beijing: Science Press, 1984: 329—330. (in Chinese)
李 远, 秦自楷, 周志刚. 压电与铁材料的测量 [M]. 北京: 科学出版社, 1984. 329—330.

The Application of Quartz Transducer Technique in SHPB

LIN Yu-Liang, LU Fang-Yun, LU Li

(Department of Applied Physics, National University of
Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: During testing low impedance materials (so-called soft materials) by a conventional split Hopkinson pressure bar (SHPB), the transmission strain pulse is too weak to be collected correctly. In addition, the soft material specimen will not deform homogeneously during the testing, which makes it impossible to get valid data. In this paper, a polyurethane foam material was tested by SHPB using a quartz transducer technique. The stress equilibrium in the specimen was monitored by quartz transducer mounted at two end faces of the specimen. Experimental results showed that the amplitude of transmitted signals were increased greatly. Meanwhile, we used a pulse-shaper technique to increase the rise time of the incident pulse, which could ensure stress equilibrium and homogeneous deformation in the specimen. Compressive stress-strain behaviors of the foam showed that there was little effects of strain rates on the material properties at strain-rate of $1\ 000\sim 4\ 000\ \text{s}^{-1}$.

Key words: SHPB; quartz transducer; soft material; high strain rate

《高压物理学报》再次被确定为物理类核心期刊

2004年,《高压物理学报》再次被确定为物理类核心期刊,并入编2004版《中文核心期刊要目总览》,该书于2004年7月由北京大学出版社出版。此版《中文核心期刊要目总览》按《中国图书分类法》的学科体系,列出了75个学科的核心期刊表。

核心期刊缘起于1934年英国文献计量学家布拉德福发现的文献分布特点,其经典的表示就是,专业论文绝大多数集中在少数专业期刊之中。核心期刊的评选工作,是运用科学方法对各种刊物在一定时期内所刊登论文的学术水平和学术影响力进行综合评价的一种科研活动,北京高校图书馆期刊工作研究会成员馆、中国科学院文献中心、中国社会科学院文献中心、农业科学院文献中心、中国人民大学书报资料中心等相关单位的百余名专家和期刊工作者参加了研究,近两千名学科专家参加了2004版核心期刊评审。

2004版核心期刊研究被列为“2001年国家社会科学基金项目”,本版核心期刊评选采用了被引量、被摘量、被引量、它引量、被摘率、影响因子、获国家奖或被国内外重要检索工具收录等7个评价指标。《高压物理学报》被确定为物理类核心期刊。

由北京大学图书馆主持的核心期刊评选工作自1992年开始,每四年举行一次,《高压物理学报》已连续四次被评为物理类核心期刊。在此,编辑部谨向厚爱《高压物理学报》的作者、读者以及为本刊文章严格把关的专家学者致以诚挚的感谢!

欢迎广大专家学者将优秀稿件投给《高压物理学报》,评审意见均为“优”的文章享有快速发表通道。