

文章编号: 1001-4888(2015)05-0590-09

数字图像相关测试技术 在霍普金森杆加载实验中的应用*

范亚夫^{1,3}, 魏延鹏^{1,2}, 薛跃军³, 陈捷^{1,3}

(1. 奇埃富冲击工程与材料技术研究所, 烟台 264003; 2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190;
3. 中国兵器工业第 52 研究所烟台分所, 烟台 264003)

摘要: 本文利用三维数字图像相关(3D-DIC)测试技术, 在 Hopkinson bar 加载条件下测试铝合金动态拉伸力学性能以及 TC4 合金 II 型裂纹的起裂时间和冲击载荷下的失稳扩展速度。两台高速相机保证了被测物体的三维成像, 校准板技术使得所测试的应变-时间历程定量化。利用数据处理软件能够得到关注区内每一点的位移-时间历程、应变-时间历程及主应变等。同时, 针对 TC4 材料的动态断裂过程, 三维数字图像相关技术能够实时地记录预制疲劳裂纹的张开、裂纹尖端起裂、裂纹分叉扩展、失稳传播等各个阶段, 为动态断裂韧性的确定提供了有力工具。

关键词: 数字图像相关; 霍普金森杆加载; 高速摄影; 起裂时间

中图分类号: O346.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-14-273

0 引言

通常所采用的 Hopkinson bar 实验技术主要是用于材料在高应变速率下动态响应研究。如: 材料的应变率效应表征、动态本构曲线的获得及相关本构方程参数的确定等。实验结果表明, 各种工程材料都存在着应变率敏感界限, 对于一般金属, 这种界限大约是 10^{-3} s^{-1} 到 10^3 s^{-1} 。低于 10^{-3} s^{-1} 时属于准静态情况, 而高于 10^{-3} s^{-1} 时, 应变率效应不太明显, 材料的动力特性可能增加新的内容^[1]。因此, 10^{-3} s^{-1} 到 10^3 s^{-1} 条件下的材料动态响应研究是人们特别关注的应变率范畴, 而 Hopkinson bar 冲击加载的实验数据多半都是在应变率为 10^3 s^{-1} 条件下获得的, 所以, 此项技术被广泛应用于材料的动态响应研究, 能够获得不同种类材料在应变率为 $10^2 \text{ s}^{-1} \sim 10^4 \text{ s}^{-1}$ 时的宏观应力-应变-应变率曲线。同时, Hopkinson bar 实现了应力波与应变率的解耦^[2], 使得我们对试样仅考虑应变率效应而忽略了应力波效应。

Hopkinson bar 传统的实验方法往往是采用电测法, 根据输入杆、输出杆上的应变信号, 利用一维弹性波理论得到试件两端的相对速度、位移和载荷, 从而推演出材料的应力-应变关系。然而, 传统电测法无法反映材料变形局部和细节特征, 对材料断裂和破坏的观察, 也只能采用后效观察方式。因此, 人们希望能有一种实时观测手段, 能够较为准确地描述在加载过程中试件变形和破坏的演化图案, 从而, 进一步加深人们对材料动力学性能的认识, 也可为变形局部化、破坏的萌生和发展等热点力学问题的理论研究和数值模拟提供实验依据。

Hopkinson bar 技术是在一维应力波理论和试件变形均匀假设的前提下完成试件上的应力、应变

* 收稿日期: 2014-12-29; 修回日期: 2015-03-11

通讯作者: 魏延鹏(1982-), 男, 博士, 副研究员。主要研究领域: 材料与结构动态响应。Email: weiyangep@imech.ac.cn

率、应变描述的,显然,这种描述与试件的实际变形是有一定差距的。首先,试样承受动态载荷的变形状态要实现均匀变形是很困难的。而且,应力的均匀度受阻于惯性及试样与压杆间的摩擦力^[3]。其次,对于实验时体积改变的材料不能求得真应力和真应变值。

数字图像相关(Digital Image Correlation,简称DIC)测试技术,也称为数字散斑相关方法(Digital Speckle Correlation Method,简称DSCM),不需要均匀应力—应变状态,也不需要力的平衡条件,凭借着随机喷在试件上黑白相间的物质点,实时动态地记录试件变形的每一个瞬间。通过校准板的标定,可准确地给出试件表面的应变场—时间历程,它给出的实验结果说明均匀性假设是有一定局限的。DIC测试技术的这一特色,使得Ⅱ型裂纹的起裂时间以及冲击载荷下的失稳扩展速度的测量成为可能。

DIC的测量范围可自由变化,且与视场大小有关,对于大变形或微小变形尤为有利。如果与显微光学设备相连可测量极小的位移,其灵敏度一般可达 $0.01\sim 0.05\text{pixel}$ 所代表的大小。

采用DIC技术可以测得试件表面每一点的位移,由此得到面内位移场,然后采用适当的滤波和微分可以算得应变场。DIC技术最基本的条件是要在试件表面喷上随机散斑图案,可以喷涂黑白漆。随机图案可以确保表面任意小的区域是唯一的,用数码相机采集变形前、后的图像,采用相关算法可以跟踪任何一个小区域的变形。为了获得全场数据,将试件表面分成许多称为小面的区域,且各不相同。相关算法可分为三步实施:首先,粗略估算位移分量,计算精度为半个像素,位移分量为整型量;其次,根据这些位移分量选择新的变形表面的小面进行计算,获得位移分量的非整型数据;最后,采用傅立叶级数展开的移位技术,改善非整型量数据的精度,因此移位技术抵消了非重叠小面的相互关联,从而得到更精确可信的散斑位移。

1 铝合金动态拉伸性能测试

采用德国Dantec Dynamics公司的数字图像相关(DIC)测试系统Q450设备,通过Hopkinson bar加载,凭借两台高速摄影机记录试样变形的全过程。利用Istra4D分析软件分别给出关注区内相关点的应变—时间历程、位移—时间历程、主应变—时间历程、不同时刻的应变云图、二次加载效应、试件断裂时间,确定应变率并与电测法进行比较。

1.1 实验设计及试件制备

试样编号:LW-001;材料:铝合金板材;标距尺寸: $18.16\text{mm}\times 4.92\text{mm}\times 2.75\text{mm}$;等效直径: 4.15mm ;子弹长: 300mm ,打击速度 $v_0=20.86\text{m/s}$;气压: 1.00MPa ;采样速率: 100000fps ;曝光时间: $10\mu\text{s}$;视场: $208\times 96\text{pixel}$;放大倍数: $0.47\times$;触发方式:声控。测试设备和加载方式分别如图1和图2所示。

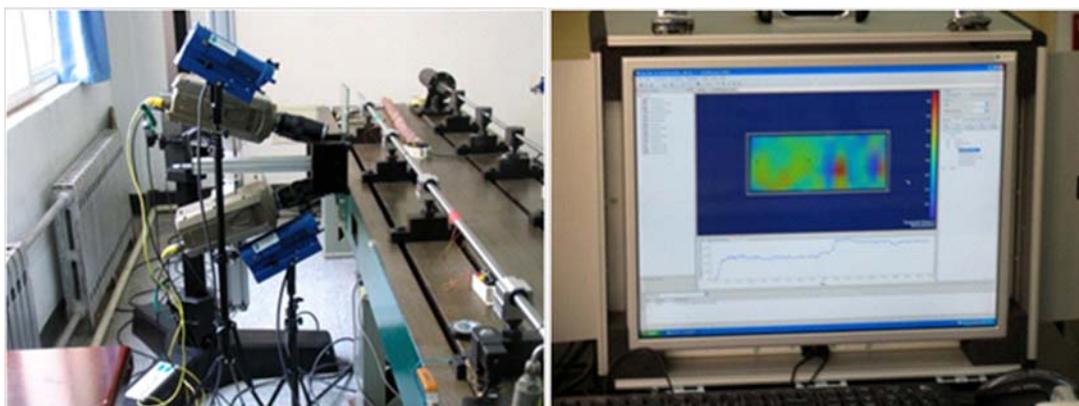


图1 数字图像相关(DIC)测试系统

Fig.1 Measurement system of Digital Image Correlation

1.2 左、中、右三点应变—时间历程比较

图3和图4分别记录了在铝合金拉伸试件的左、中、右三点 x 和 y 方向的应变—时间历程,从中可以看到,在初始的弹性阶段,三条曲线几乎是重合的,只是屈服点有所差别; x 方向的应变—时间历程,

左边点和中间点是一致的,并且到了塑性段依然是一致的;但是右边点无论是屈服点还是塑性段的应变-时间历程均与以上二点有明显不同。而 y 方向的应变-时间历程却是中间点与右边点一致,左边点与它们有较大差别。从上述实验结果可以发现,电测法当中的有关试件应力/应变均匀性假设与真实的试件变形是有着一定差距的。

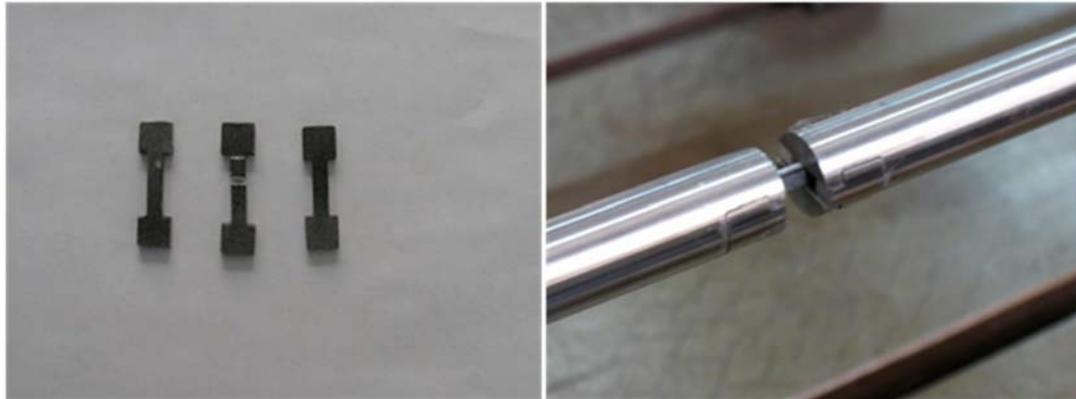


图 2 喷了物质点的拉伸试样及在 Hopkinson bar 上的夹持方法

Fig. 2 Tensile specimens sprayed material point and holding method in the Hopkinson bar

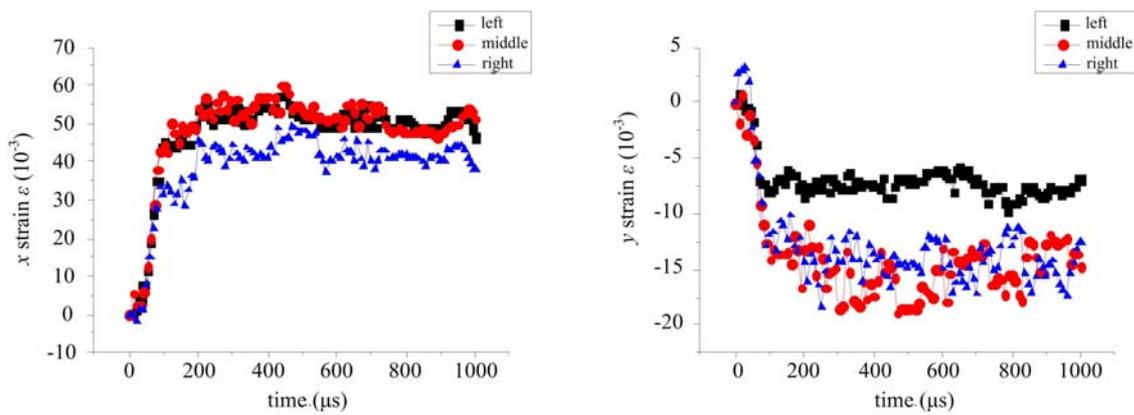


图 3 x, y 方向应变-时间历程

Fig. 3 The histories of x, y direction strain

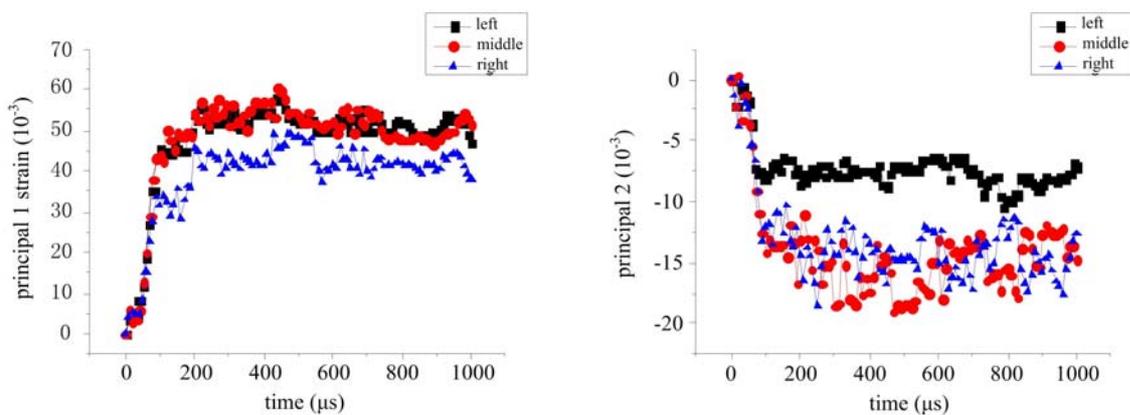


图 4 第一、第二主应变-时间历程

Fig. 4 The histories of principal strain 1 and principal strain 2

1.3 应变云图

从应变云图 5 清楚地看到:撞击 $245\mu s$ 和 $1710\mu s$ 时, x, y 方向应变沿图示直线的分布明显是试件

的中间大,两边小,而且左、右两边是不对称的。又一次通过实验证明了试件变形的不均匀性。

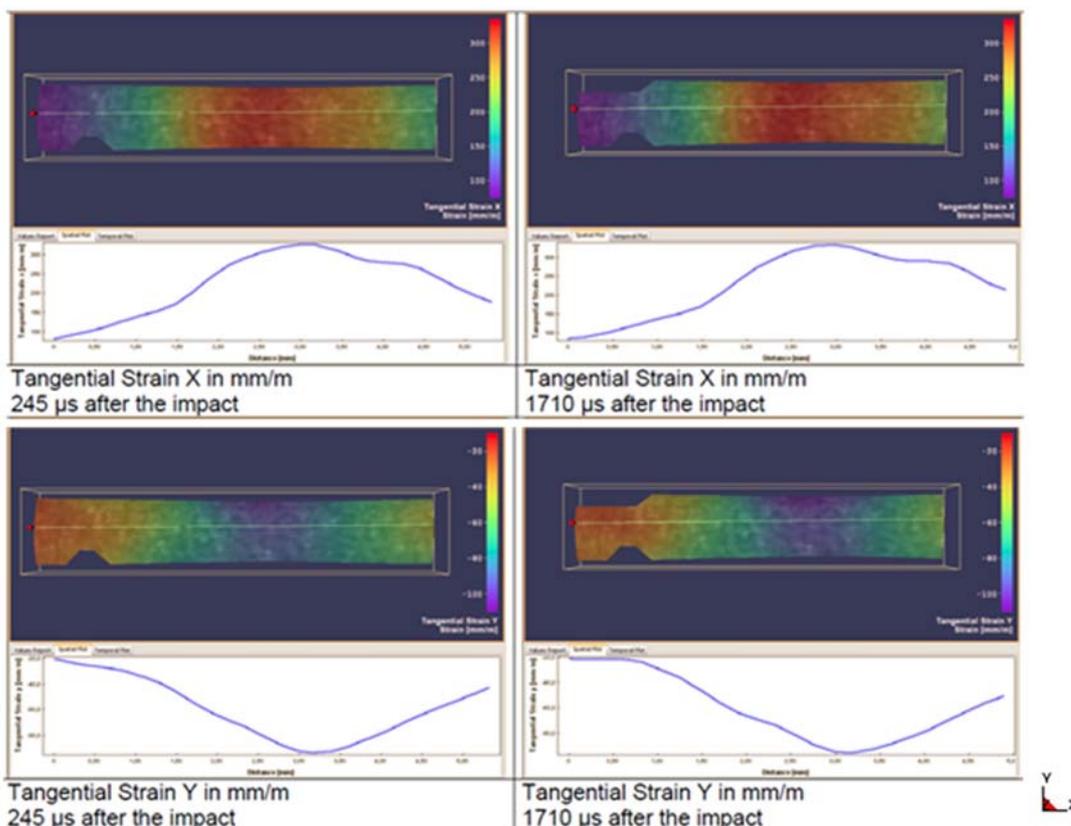


图 5 撞击 245μs 和 1710μs 后, x, y 方向应变沿图示直线的分布
Fig. 5 Distribution of x, y direction strain along graphic straight line after impacting 245μs and 1710μs

1.4 应变率的确定

取中间点第一主应变—时间历程(或 x 方向应变—时间历程)曲线的斜率,可以获得实验的应变率,即 $\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt}$,如图 6 所示。

在进行光测实验的同时,也用电测方法记录了相关波形,按一维应力波理论所处理的实验结果列于表 1。

实验结果表明,两者之间在预测应变率上具有一致性。

图 7 和图 8 分别记录了试件的二次加载和 LW-002 的断裂时间(一个时间步长 10μs)。

2 钛合金 II 型动态裂纹测试

在动态断裂韧性的测试中,起裂时间的准确确定是至关重要的。由于惯性效应的影响,裂纹并非在最大载荷值处起裂,也就是说,载荷的最大值与动态应力强度因子的最大值并不重合。因此,起裂时间必须另行确定。目前,确定起裂时间的方法很多,其中包括:电磁法、电位法、断裂丝栅法、电阻应变片法等。本文利用光测法来确定裂纹的起裂时间。

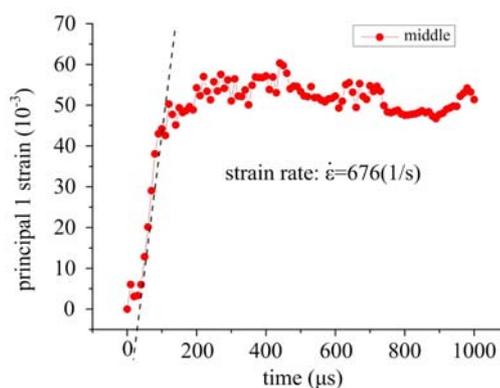


图 6 应变率的确定
Fig. 6 Determine of the strain rate

表1 电测实验结果

Tab.1 The experimental results of electrical measurement

试样编号	初始长度/等效直径(mm)		气压(MPa)	速度(m/s)	温度(°C)	记录通道	$\dot{\epsilon}_{ave}$ (1/s)	σ_s (MPa)	σ_b (MPa)	ϵ_{max} ϵ_p	备注
	L_0	Φ									
LW-001	18.16	4.15	1.6/1.0	20.86	30	CH1-A1 CH2-A2	612	199	258	0.073 0.069	试样未断
LW-002	18.10	4.06	2.0/1.3	27.13	30	CH1-A1 CH2-A2	746	247	262	0.092 0.089	试样断
LW-003	18.05	4.09	2.0/1.3	24.99	31	CH1-A1 CH2-A2	688	543	543	0.012	试样断
LW-004	18.05	4.13	2.5/1.5	29.07	30	CH1-A1 CH2-A2	773	185	282	0.092 0.091	试样断

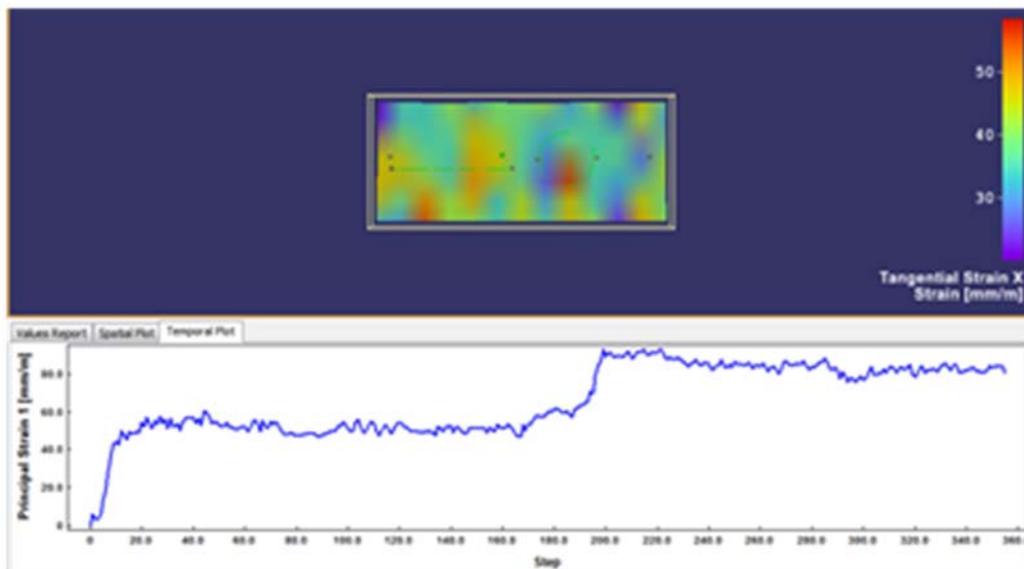


图7 材料的二次加载效应

Fig. 7 Two times loading effect of the material

2.1 起裂时间的确定及裂纹扩展速度

利用电测法获取裂纹起裂时间的主要原理可以表述为:当试件承受载荷作用时,应变片上所测得的应变随载荷的增大而增大,当裂纹起裂时,产生卸载波,使得应变剧烈减小。因此,应变片上所测应变的最大值对应的时间减去应力波从裂尖传播至应变片所需要的时间就是起裂时间^[4]。由图9可以看到,用位移曲线确定裂纹的起裂时间要比用应变一时间曲线直观,容易判断;其次,对于剪开型裂纹,X方向的位移占主要成分。传统的电测法只能给出试件上的应力、应变率和应变,不会直接得到位移。因此,用DIC技术确定冲击载荷下裂纹的起裂时间是十分有利的工具。利用图9的曲线(b),能够合理地解释图10中II裂纹从起裂到失稳扩展的高速摄影照片。起裂时间是 $t_f = (20 - 12) \times 10 \mu s = 80 \mu s$ 。

从获得的总位移一时间历程曲线容易求出裂纹开裂时的速度以及失稳扩展速度分别是:22.56m/s和12.92m/s。若除去刚体位移,裂纹开裂的速度为0.5m/s,而失稳扩展速度分3个阶段:第一阶段是2.16m/s;第二阶段是1.08m/s;第三阶段是3.56m/s。

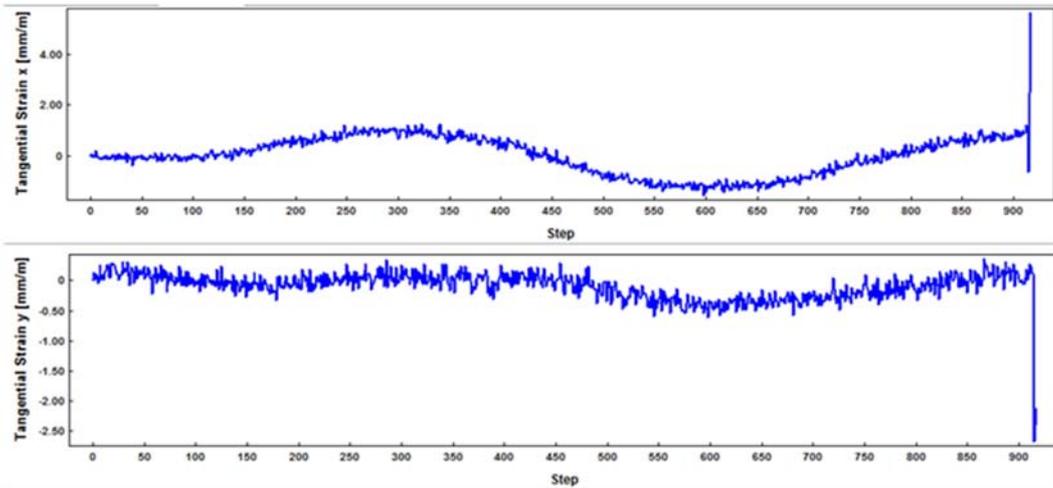


图 8 LW-002 试样的断裂时间(一个时间步长 $10\mu s$)
Fig. 8 The fracture time of LW-002 specimen (Time step: $10\mu s$)

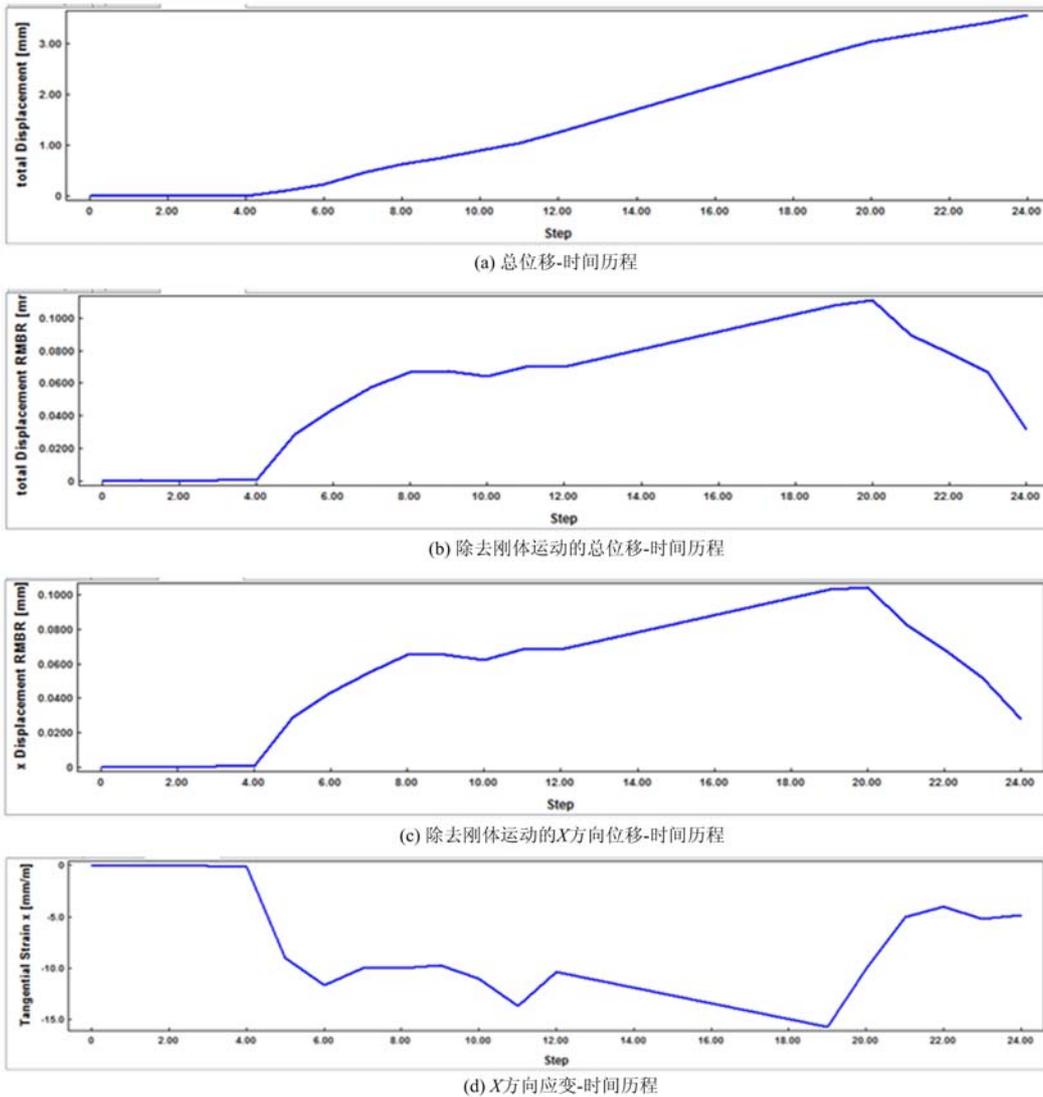


图 9 位移—时间、应变—时间历程曲线
Fig. 9 History curves of displacement, strain



图 10 II 裂纹起裂到失稳扩展的演化过程

Fig. 10 Evolution process of II crack failure instability development

利用图 9(b)还可以得到许多有用的信息:在时间步长为 $4(40\mu\text{s})$ 时,预制的疲劳裂纹尚未张开;经历了 $40\mu\text{s}$,即时间步长达到 8 时,预制的疲劳裂纹分别以三个速度张开;随后,持续约 $40\mu\text{s}$,此间裂纹略有扩展,在时间步长到达 12 时,裂纹开始起裂扩展,即从预制疲劳裂纹的尖端开始扩展,达到时间步长为 $20(200\mu\text{s})$ 时,突然失稳扩展。这期间持续了 $80\mu\text{s}$,也就是所谓的起裂时间。若从预制疲劳裂纹略有扩展算,起裂时间可定义为: $t_f = (20 - 10) \times 10\mu\text{s} = 100\mu\text{s}$ 。

2.2 II 型裂纹起裂到失稳扩展的演化过程

两台相机实时动态地以 $10\mu\text{s}/\text{幅}$ 的拍摄速度记录了裂纹起裂到失稳扩展的全过程。其中包括疲劳裂纹的开裂、能量聚集、裂纹起裂、分叉到失稳扩展。弹丸的撞击速度为 34.88m/s 。

同时,将输入杆和试件上测得的电信号在图 11 中给出,以便与光测数据比较。根据定义,利用试件上获得的电测信号可算得: $t_f = (5.29 - 4.32) \times 10^{-4}\text{s} = 97\mu\text{s}$ 。可见,光测法与电测法是一致的。但 DIC 技术所预测的起裂时间更准确,分析的更细腻一些。

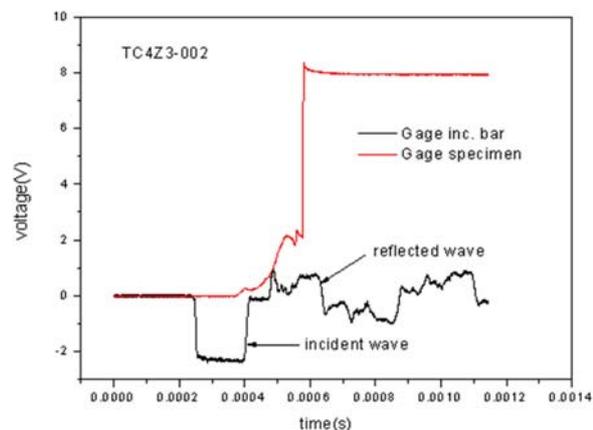


图 11 电测信号记录

Fig. 11 Recording Electrical measuring signal

3 结论

(1) DIC 技术证实了 Hopkinson bar 均匀性假说的局限性,就拉伸实验而言,在给出轴向拉应变的同时能给出横向的压缩应变。同时,可以给出切平面的剪应变。

(2) DIC 技术真实地记录了预制疲劳裂纹的张开,裂纹尖端的起裂、裂纹分叉、扩展到失稳传播,为系统地研究损伤演化过程提供了有利手段。

(3) 可视化的直观效果使我们能够准确判断并确定裂纹的起裂时间,这为动态断裂韧性的测试提供了有效、实用的实验方法。

参考文献:

- [1] 杨桂通. 塑性动力学(新版)[M]. 北京:高等教育出版社, 2000:3-13 (YANG Guitong. Dynamic theory of plasticity (new edition)[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 3-13 (in Chinese))
- [2] 王礼立. 应力波基础(第二版)[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:52-60 (WANG Lili. Foundation of stress waves(second edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005:52-60 (in Chinese))
- [3] Jörgen Kajberg, Bengt Wikman. Viscoplastic parameter estimation by high strain-rate experiments and inverse modeling speckle measurements and high-speed photography[J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44:145-164.
- [4] 李玉龙, 郭伟国, 贾德新等. 40Cr 材料动态起裂韧性 $K_{1d}(\dot{\sigma})$ 的实验测试[J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(1):21-30 (LI Yulon, GUO Weiguo, JIA Dexin, et al. Experimental measurement of dynamic fracture initiation toughness $K_{1d}(\dot{\sigma})$ of 40Cr Steel[J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(1):21-30 (in Chinese))

On the Application of Digital Image Correlation Testing Technology in Hopkinson Bar Loading

FAN Ya-fu^{1,3}, WEI Yang-peng^{1,2}, XUE Yao-jun³, CHEN Jie^{1,3}

(1. Institute of Impact Engineering and Materials Technology G&F, Yantai 264003, China; 2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 3. Yantai Branch, No. 52 Institute of China Ordnance Industry Group, Yantai 264003, China)

Abstract: Dynamic tensile mechanical performance of aluminium alloy specimen and the crack initiation time of II type crack and instability growth rate due to impact loading of TC4 alloy were measured under the condition of Hopkinson bar loading and based on three-dimensional digital image correlation (3D-DIC). Two high-speed cameras were used to ensure 3D imaging of the measured object and calibration plate technology allows to obtain quantitative strain profile. Using data processing software, the displacement profile, strain profile and principal strain at every point within area of interest can be determined by experimental data. At the same time, the crack opening, the tip fracture initiation of prefabricated crack, crack branching and instability growth on different dynamic fracture stages of TC4 alloy can be real-time recorded. Thus, a practical and reliable method to determine crack initiation time and dynamic fracture toughness is proposed in this paper.

Keywords: digital image correlation (DIC); Hopkinson bar loading; high-speed photography; crack initiation time