

黏接界面试件拉伸变形破坏过程的 数字散斑相关方法分析

姜爱民¹, 李高春¹, 郭 宇², 邱 欣¹, 王玉峰¹

(1. 海军航空工程学院 飞行器工程系, 山东 烟台 264001;

2. 中国航天科工集团公司 六院四十一所, 呼和浩特 010010)

摘 要: 对黏接界面试件拉伸变形破坏过程进行了观察,通过编制数字散斑相关方法(DSCM)处理图像,提取得到试件表面随着载荷变化而变化的位移场和应变场及其演化过程.结果表明:带预制脱黏黏接界面试件在拉伸过程中,由于预制脱黏尖端附近产生应变集中将产生起裂.DSCM能较好地应用于黏接界面试件表面的变形和破坏分析中,定量测量了界面变形场,并与试验结果相吻合.

关 键 词: 黏接界面; 数字散斑相关方法; 变形破坏; 变形场; 固体火箭发动机

中图分类号: V512

文献标志码: A

Investigation on adhesive interface specimen deformation and failure process under tension using digital speckle correlation method

JIANG Ai-min¹, LI Gao-chun¹, GUO Yu², QIU Xin¹, WANG Yu-feng¹

(1. Department of Aircraft Engineering,

Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai Shandong 264001, China;

2. The 41st Institute of the 6th Academy,

China Aerospace Science and Industry Corporation, Hohhot 010010, China)

Abstract: The deformation and failure process of adhesive interface specimen under tension was observed. By digital speckle correlation method (DSCM) to deal with images, displacement and strain field of specimen surface varying with load and their evolution process were achieved. The results show that during the tensile process the adhesive interface specimen with stress-release flap could be vulnerable crack at the tip of stress-release flap because of strain concentration. DSCM is an effective experimental method for studying characteristic of deformation and failure of adhesive interface specimen. The quantificational measurement results of adhesive interface deformation field are consistent with the data obtained from the experiment.

Key words: adhesive interface; digital speckle correlation method; deformation and failure; deformation field; solid rocket motor

在固体火箭发动机中,特别是在贴壁浇注的固体火箭发动机中,一般采用壳体/绝热层/衬层/推进剂的多界面结构形式.发动机界面黏接起着非常重要的作用,其性能的优劣直接关系到发动

机的结构完整性和可靠性^[1-4].

由于界面两侧材料的力学性能差异,容易在界面附近产生应力集中,导致微裂纹的萌生、扩展,使得界面成为整个结构中的薄弱环节^[5-8].另

外,由于界面组成、结构的复杂性导致界面的失效模式和机理非常复杂,界面黏接性能研究面临着许多挑战^[9-10]。当前,黏接界面试验研究方面主要集中在宏观强度测试^[11-14],宏观强度测试为界面的设计提供了依据,但难以分析其在外载作用下的变形破坏机理。

本文对黏接界面单向拉伸变形破坏过程进行了动态观察,通过编制 DSCM 处理程序,实现了变形过程的定量测量,得到试件表面的位移场和应变场,分析其分布规律,为进行黏接界面失效机理分析和数值模拟提供试验依据。

1 DSCM 基本原理

DSCM 是一种从物体表面随机分布的散斑直接提取位移场和应变场的测量方法,具有非接触、实时、全场测量等优点^[15-18]。其基本思想是:给定物体变形前后的两个数字图像,在变形后的散斑场中识别出对应于变形前散斑区域,判断物体变形后,散斑场经变换恢复到变形前对应的散斑场相似程度的指标,即散斑场之间的相关性,把变形测量问题转化为一个相关计算过程。原理如图 1 所示。

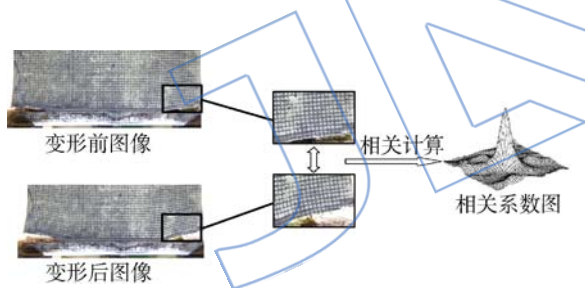


图 1 DSCM 原理

Fig. 1 Principle of DSCM

相关系数公式是相关计算的关键,相关系数公式有多种形式,研究表明采用式(1)作为相关系数,单峰性好。

$$c = \frac{\left\{ \sum \sum [(f - \bar{f}) \cdot (g - \bar{g})] \right\}^2}{\sum \sum (f - \bar{f})^2 \cdot \sum \sum (g - \bar{g})^2} \quad (1)$$

其中 c 为相关系数; $f = f(i, j)$ 和 $g = g(i + u, j + v)$ 分别为以源点和目标点为中心散斑图的灰度值; $\bar{f}$ 和 $\bar{g}$ 为灰度平均值。

相关系数是两个子区间相似程度的一个数学上的度量,相关系数等于 1 为完全正相关;小于 1 时两个子区间不完全相关。对于实际情况而言,相关系数一般小于 1,通过求解相关系数的极大值,可实现变形量的提取。

2 试验装置及试验过程

为了能真实再现拉伸过程的界面变形破坏过程,在电子万能试验机上进行拉伸试验,采用数码相机对其拉伸过程进行观察,按照一定的采集频率进行采集,直到试件破坏。根据记录黏接界面的变形失效信息,分析其宏观演化过程。整个试验系统如图 2 所示。



图 2 宏观动态观察试验系统设置

Fig. 2 Configuration of macro-dynamic observation testing system

试验前仔细检查并清洗相机和镜头。根据环境及测量的要求,将相机固定在三角架上;调节相机支架,使镜头与试件待测面垂直。采用稳定、均匀 LED(light emitting diode)光源照射到试件表面测试区,选择镜头、光圈,调整焦距,以便得到合适大小的清晰图像。

试验时采用电子万能试验机施加恒定位移加载速率,电子万能试验机加载速率为 1 mm/min,试验在室温条件下进行。

黏接界面试件是由金属件、绝热层、衬层和推进剂组成,这些物体具有不同的表面灰度值,可以作为天然的散斑场,但表面灰度值相差小,反差小。图 3 给出了原始试件及其表面灰度值分布,由图可见黏接界面表面有一定的灰度分布,但表面灰度值差异不大。为了保证得到较高的相关系数值,需要在试件表面制作人工散斑^[19]。

可以采用在物体表面喷涂玻璃微珠漆的方法来制作人工散斑,此种方法在使用与相机同轴方向照明光照时,具有较好的反差,但其成本高,本文中采用成本较低的油印技术。在蜡纸上使用针式打印机打印出相应的格栅,然后用滚轮、油墨将栅格印刷到原始试件表面,图 4 给出了制斑后试件及其表面灰度值。从图中可以看出,制作格栅

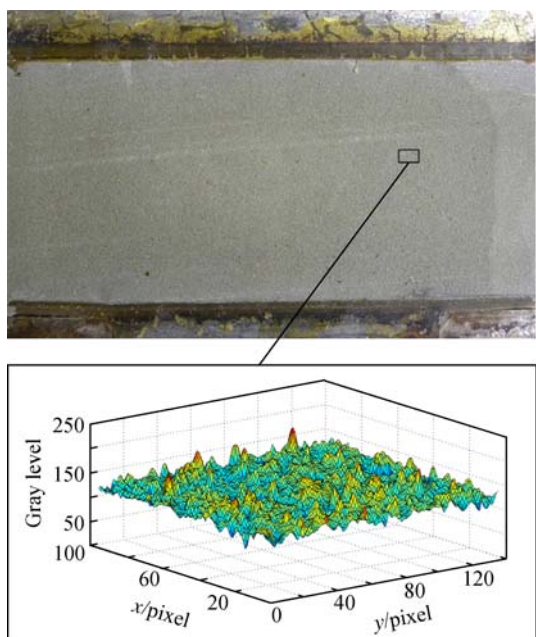


图3 原始试件及其表面灰度值

Fig. 3 Original specimen and its exterior gray level

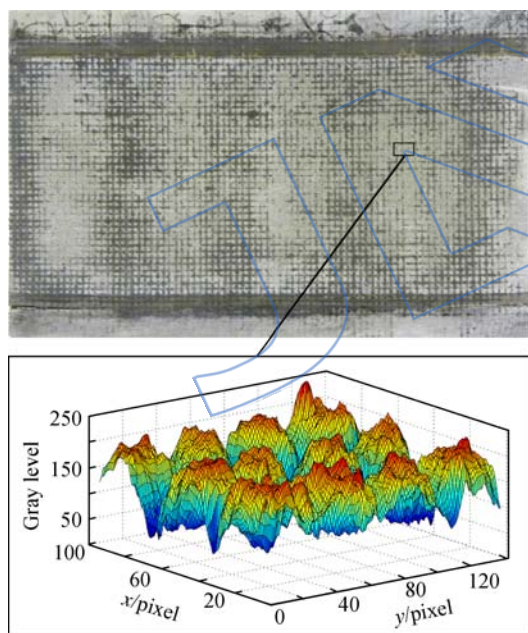


图4 制斑后试件及其表面灰度值

Fig. 4 Speckled specimen and its exterior gray level

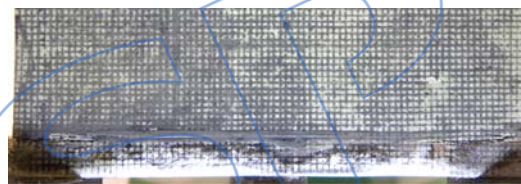
后增加了对比度,使图像中包含的信息明朗化。

将在试验过程中获取的图片编制成图像序列,并在第一张图像上生成网格点,采用 Matlab 软件编制 DSCM 程序,对采集到的图像进行数据处理,获取计算结果,并进行计算结果的可视化。

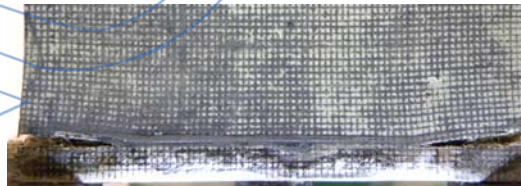
3 试验结果及分析

施加在黏接界面试件的外界位移载荷与试件

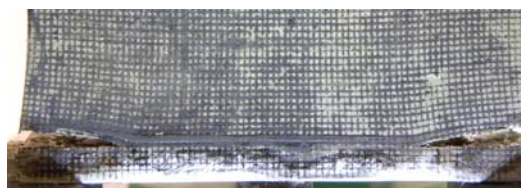
拉伸方向的尺寸之比,称为外界拉伸应变。图5显示了黏接界面不同拉伸阶段的变形破坏过程。由图可见:当外界拉伸应变较小时,试件中推进剂、绝热层位移分布较为均匀,宏观难以观察其变化(图5(a)~图5(b))。随着外界位移载荷的增加,由于试件两侧设计预制脱黏,在预制脱黏的尖端出现大变形,但一般来说,预制脱黏层采用延伸率较好材料制成,在上述变形作用下不会产生断裂(图5(c)~图5(d))。随着外界位移载荷进一步增加,在黏接界面中推进剂内部开始起裂(图5(e)),起裂始于预制脱黏趋近衬层与推进剂的界面。最后,起始裂纹进一步扩展,形成宏观裂隙,进而使黏接界面破坏(图5(f)),界面便失去承载能力而导致黏接结构件发生失效。整个拉伸失效过程主要分为裂纹的起裂、扩展、最终失效等阶段。



(a) 外界拉伸应变为4%



(b) 外界拉伸应变为8%



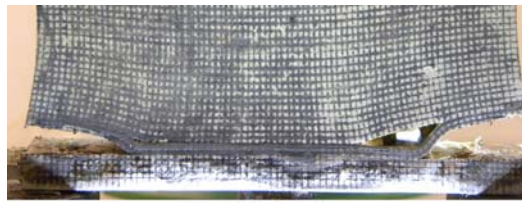
(c) 外界拉伸应变为12%



(d) 外界拉伸应变为16%



(e) 外界拉伸应变为20%

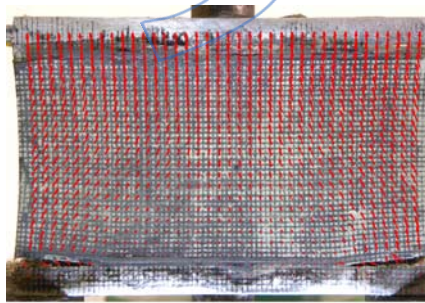


(f) 外界拉伸应变为23%

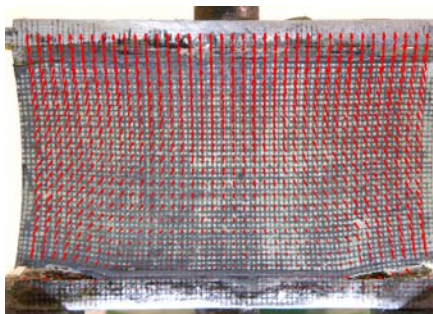
图5 黏接界面拉伸破坏过程

Fig. 5 Tensile failure process of adhesive interface

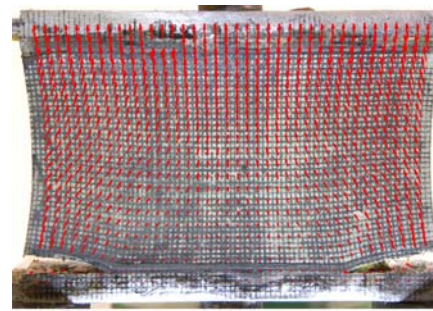
根据 DSCM 的分析结果,图 6 给出了位移矢量分布图,位移矢量的大小与方向能够直观地反映黏接界面试件的变形特点. 通过不同图片的位移矢量特点分析,形象地展示黏接界面试件在拉伸过程的变形及其演化过程. 在外界拉伸应变为 4%, 8%(图 6(a)~图 6(b))时,位移矢量方向以垂直向上为主,侧向位移很小,试件表现为垂直拉伸,靠近预制脱黏的位移较大,在载荷作用下,起到释放应力的作用. 钢板附近由于受其约束,位移相对较小,通过位移矢量分布图可以形象地观察到黏接界面整个表面的变形特征. 随着外界拉伸应变的增加(图 6(c)~图 6(d)),位移矢量分布图特征基本不变,但在黏接界面试件中间部位外侧,由于为自由表面,出现横向位移并向中间靠拢,越靠近黏接界面试件外部,横向位移越大,试件中间区域变窄. 随着外界拉伸应变进一步增加,在推进剂/衬层附近位移场出现阶跃,在图像上表现为裂纹宽度的增大(图 6(e)~图 6(f)).



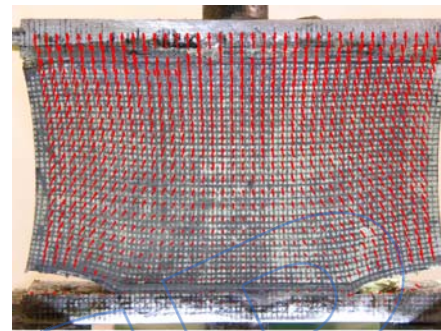
(a) 外界拉伸应变为4%



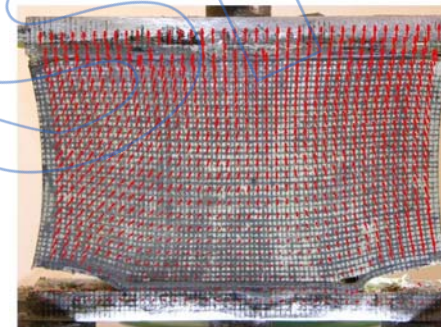
(b) 外界拉伸应变为8%



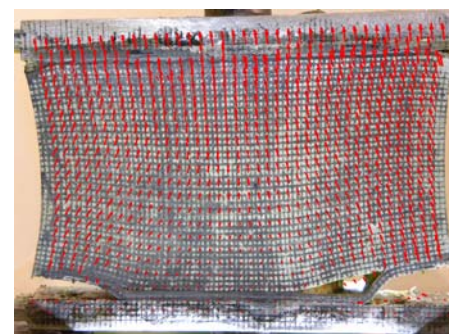
(c) 外界拉伸应变为12%



(d) 外界拉伸应变为16%



(e) 外界拉伸应变为20%



(f) 外界拉伸应变为23%

图6 位移矢量分布图

Fig. 6 Distribution of displacement vector

图 7 和图 8 分别给出了 x 方向(与拉伸方向垂直)和 y 方向(拉伸方向)的应变场 ϵ_x 和 ϵ_y 云图.

x 方向应变 ϵ_x 在预制脱黏区附近为负,表明在预制脱黏尖端附近受到 x 方向约束而产生压

缩应变,压缩应变随拉伸位移的增加而增加,但应变场的分布形式基本不变.另外,由于试件在制作过程中的不对称性,左右两边 ϵ_x 呈现一定不对称性.在测量过程中,图像存在一定的噪声,使获得的应变场存在一定的波动.

y 方向应变 ϵ_y 取值为正,表明受拉伸位移作用, ϵ_y 在预制脱黏尖端附近和黏接界面中部最大,在黏接界面的钢板附近由于受到钢板约束作

用, ϵ_y 则相对较小;在裂纹自由端, ϵ_y 也相对较小.

由于设置了预制脱黏区,矩形试件受拉伸时,主要由黏接区受力,而且破坏首先由该处起始,这与宏观观察试验结果一致.

上述计算表明,DSCM 能够较好地分析黏接界面试件的变形和破坏过程,从而为研究黏接界面失效提供了一个有效的试验手段.

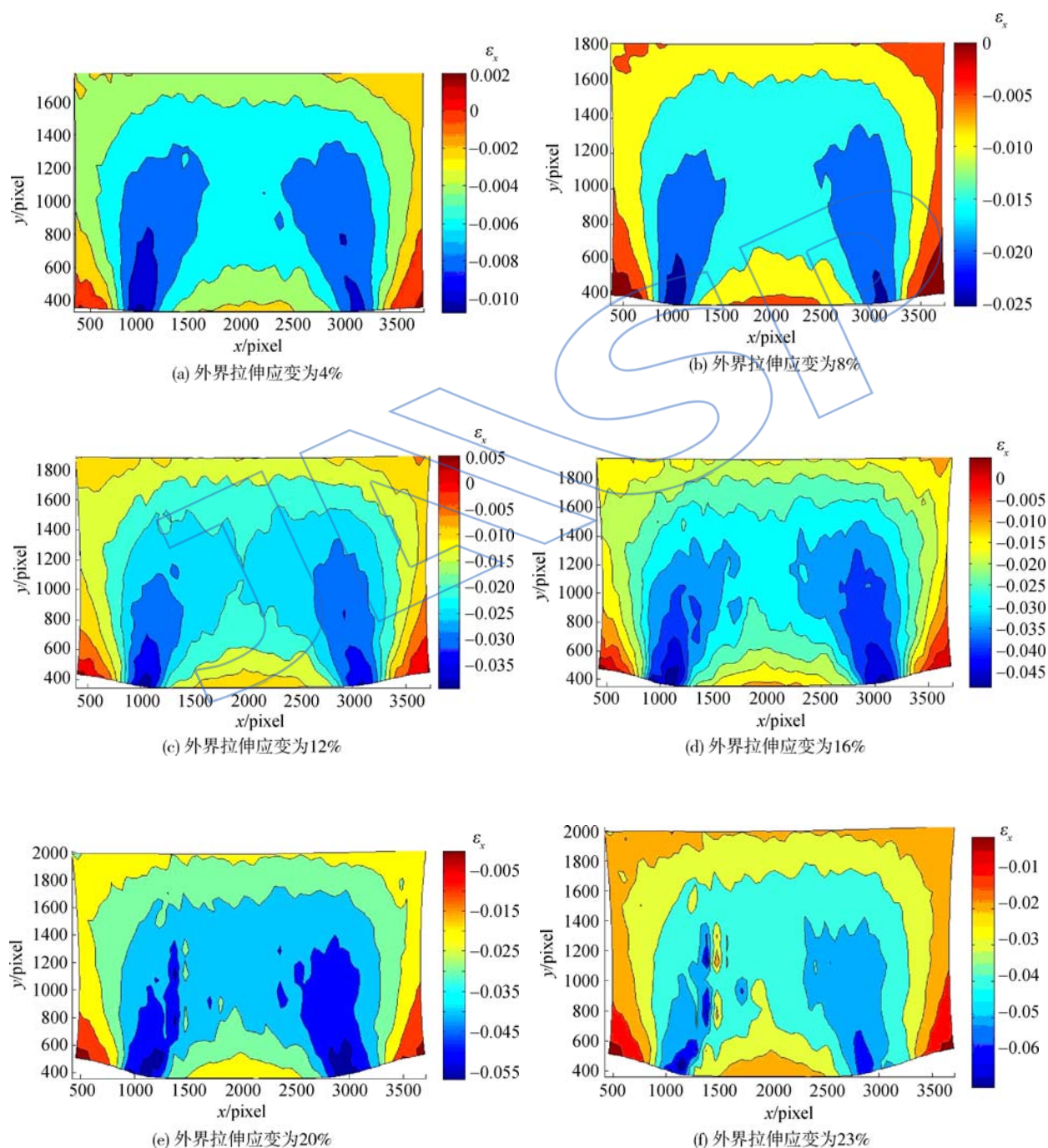
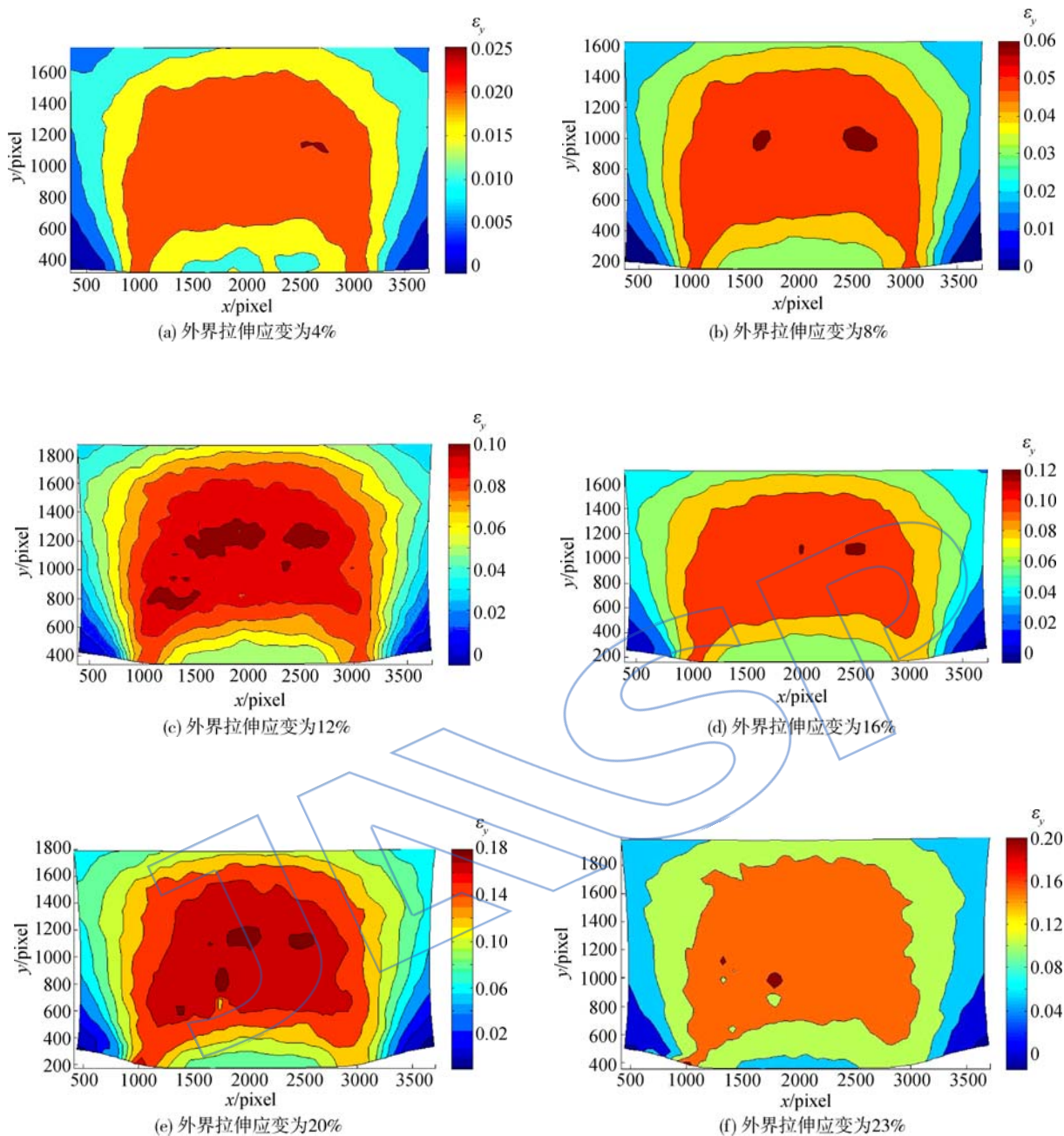


图7 应变场 ϵ_x 云图

Fig. 7 Contour of strain field ϵ_x

图8 应变场 ϵ_y 云图Fig. 8 Contour of strain field ϵ_y

4 结论

采用 DSCM 分析了黏接界面试件拉伸变形破坏过程,得到了不同加载阶段黏接界面试件表面位移场和应变场及其演化过程.研究表明:

1) DSCM 可应用于黏接界面试件的变形测量,可以得到量化的观测结果,用于后续分析.

2) 带预制脱黏黏接界面试件在拉伸过程中,预制脱黏尖端附近受到 x 方向约束而产生压缩应变, y 方向由于受到钢板约束作用,在预制脱黏尖端附近产生应变集中,在拉伸过程中起裂发生

于预制脱黏尖端附近,与宏观观察试验一致.

参考文献:

- [1] Propulsion and Energetics Panel Working Group. Structural assessment of solid propellant grains [R]. Advisory Group for Aerospace Research and Development, AGARD AR-350, 1997.
- [2] 郑晓亚,柳青,王卫祥. 固体装药结构界面应力分析[J]. 航空动力学报, 2012, 27(8): 1861-1866.
ZHENG Xiaoya, LIU Qing, WANG Weixiang. Interface stress analysis of solid motor grain structure[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(8): 1861-1866. (in Chinese)
- [3] 姜爱民,李高春,黄卫东. 固体火箭发动机粘接界面力学性

- 能的有限元计算及参数分析[J]. 火炸药学报, 2012, 35(4): 56-60.
- JIANG Aimin, LI Gaochun, HUANG Weidong. Finite element computation and parametric analysis on mechanical property of solid rocket motor bondline[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2012, 35(4): 56-60. (in Chinese)
- [4] Grythe K F, Hansen F K, Olsen T. Adhesion in solid propellant rocket motors[J]. Journal of Adhesion, 2007, 83(3): 223-254.
- [5] 尹华丽, 王清和. 界面粘接性能的影响因素[J]. 固体火箭技术, 1998, 21(3): 40-46.
- YIN Huali, WANG Qinghe. Factors of influencing the bond characteristics at interface[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 1998, 21(3): 40-46. (in Chinese)
- [6] 邢耀国, 金广文, 许学春, 等. 某型固体发动机综合性能试验与寿命评估[J]. 推进技术, 2004, 25(2): 176-179.
- XING Yaoguo, JIN Guangwen, XU Xuechun, et al. Comprehensive property tests and service life evaluation for solid rocket motors[J]. Journal of Propulsion Technology, 2004, 25(2): 176-179. (in Chinese)
- [7] 许萌萌, 胡春波, 何国强. 固体火箭发动机界面脱粘裂纹分析[J]. 固体火箭技术, 2008, 31(2): 121-124.
- XU Mengmeng, HU Chunbo, HE Guoqiang. Analysis on interfacial debond crack of SRM[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2008, 31(2): 121-124. (in Chinese)
- [8] Grythe K F, Hansen F K. Diffusion rates and the role of diffusion in solid propellant rocket motor adhesion[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2007, 103(3): 1529-1538.
- [9] Pierre-Louis E, Lin S R, Patel N R. Motor case-to-insulation bond proof-test criterion[J]. Journal of Propulsion and Power, 1992, 8(2): 303-307.
- [10] 许巍, 陈力, 张钱城, 等. 粘结界面力学行为及其表征[J]. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(12): 1361-1376.
- XU Wei, CHEN Li, ZHANG Qiancheng, et al. Mechanical behavior and characterization of adhesive interface[J]. China Science: Technical Science, 2012, 42(12): 1361-1376. (in Chinese)
- [11] Kuhlmann T L. Modified maximum principal stress criterion for propellant liner bond failures[J]. Journal of Propulsion and Power, 1987, 3(3): 235-240.
- [12] Choupani N. Interfacial mixed-mode fracture characterization of adhesively bonded joints[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008, 28(6): 267-282.
- [13] Wu J D. Time-dependent mixed-mode fracture of solid rocket motor bond line systems[D]. Austin, US: The University of Texas, 1999.
- [14] Giants T W. Case bond liner systems for solid rocket motors[R]. Aerospace Corporation Laboratory Operations, AD-A242297, 1991.
- [15] 李高春, 刘著卿, 张璇, 等. SEM与数字图像法分析复合推进剂微观破坏[J]. 含能材料, 2013, 21(3): 330-333.
- LI Gaochun, LIU Zhuqing, ZHANG Xuan, et al. Microscopic failure in solid propellant by coupling SEM and digital image correlation method[J]. Chinese Journal of Energetic Material, 2013, 21(3): 330-333. (in Chinese)
- [16] 马少鹏, 金观昌, 潘一山. 白光 DSCM 方法用于岩石变形观测的研究[J]. 实验力学, 2002, 17(1): 10-16.
- MA Shaopeng, JIN Guanchang, PAN Yishan. Study on the white light DSCM method for deformation measurement of rock materials[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2002, 17(1): 10-16. (in Chinese)
- [17] Rae P J, Palmer S J, Goldrein H T. White-light digital image cross-correlation analysis of the deformation of composite materials with random microstructure[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2004, 41(4): 635-648.
- [18] 彭瑞东, 翁炜, 左建平, 等. 数字散斑相关法在 SEM 观测岩石变形时的应用[J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(4): 650-656.
- PENG Ruidong, WENG Wei, ZUO Jianping, et al. Application of digital speckle correlation method on the measurement of rock deformation by SEM[J]. Journal of China University of Mining and Technology, 2012, 41(4): 650-656. (in Chinese)
- [19] 潘兵, 吴大方, 夏勇. 数字图像相关方法中散斑图质量评价研究[J]. 实验力学, 2010, 25(2): 120-129.
- PAN Bing, WU Dafang, XIA Yong. Study of speckle pattern quality assessment used in digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2010, 25(2): 120-129. (in Chinese)