

文章编号: 0258-7025(2009)09-2393-06

复杂结构精密焊件中缺陷空间定位及可视化

石端虎¹ 刚 铁² 黄传辉¹ 杨根喜¹

¹ 徐州工程学院机电工程学院, 江苏 徐州 221008
² 哈尔滨工业大学现代焊接生产技术国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 探讨了复杂结构激光焊件 X 射线检测图像中定位特征点的选择, 建立了缺陷深度与偏移量计算的数学模型, 确定了缺陷在精密焊缝中的空间分布特征。提出了缺陷空间位置数据的自动提取算法, 实现了复杂结构激光焊件中缺陷空间位置数据的快速提取, 并对提取结果进行了实验验证。结果表明所提出的提取算法是可行的。建立了复杂激光焊件的三维模型, 自动导入已提取的缺陷空间位置数据, 实现了复杂结构激光焊件中批量缺陷的空间位置可视化。

关键词 激光技术; 无损检测; 空间定位及可视化; X 射线检测; 激光焊件

中图分类号 TG115.28⁺1; TN249; TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093609.2393

Spatial Locating and Visualization of Defects in Precision Weldments with Complex Structure

Shi Duanhu¹ Gang Tie² Huang Chuanhui¹ Yang Genxi¹

¹ School of Electromechanical Engineering, Xuzhou Institute of Technology, Xuzhou, Jiangsu 221008, China
² State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract Selection of locating feature point in X-ray detection images for laser weldments with complex structure was discussed, mathematic models of defects depth and deviation were established, and spatial distribution feature of defects in precision weldments was determined. Automated extraction algorithm of defects spatial location data was provided, the quick extraction of defects spatial location data in laser weldments with complex structure was achieved, and experimental verification was proceeded. The results show that the extracted extraction algorithm is feasible. Three-dimensional model of laser weldments with complex structure are established after the spatial location data of defects is input, the visualization of spatial location for bulk defects in laser weldments with complex structure is achieved.

Key words laser technique; non-destructive; spatial locating and visualization; X-ray detection; laser weldments

1 引 言

钛合金由于具有质量轻、比强度和比刚度高、耐腐蚀性好等特点以及优良的综合性能, 在航空航天、国防、军事等领域的重要焊接结构上得到了广泛应用。激光焊接具有能量集中、热输入小、焊缝成型好、“净化效应”等优越性, 非常适合焊接钛合金薄板^[1~8], 但是采用激光焊接钛合金时, 由于焊接冷却速度快、保护不当会在焊缝中产生气孔等缺陷^[9,10]。

本文的主要研究对象为复杂结构激光焊件, 其接头形式为工字型, 翼板与栅格形式的腹板采用激光焊连接起来, 接头的最薄弱环节为焊件结合面。如果大量气孔分布在焊件结合面位置, 在航天飞行器高速飞行时在载荷作用下会造成该部位撕裂, 进而对飞行安全带来隐患, 严重时会造成重大的灾难性事故。因此采用无损检测方法确定其内部缺陷的空间位置及分布, 并实现其内部缺陷空间位置可视

收稿日期: 2008-12-11; 收到修改稿日期: 2008-12-30

基金项目: 江苏省高校自然科学基金资助课题。

作者简介: 石端虎(1973—), 男, 讲师, 博士, 主要从事焊缝的无损检测及缺陷识别、可视化等方面的研究。

E-mail: shiduanhu@126.com

化,对复杂结构激光焊件的结构完整性评价有重要的意义。目前国内外研究人员在普通结构焊件中的缺陷检测及识别方面开展了较多的研究^[11~13],在缺陷深度定位方面也开展了一定的研究^[14~16],但定位精度不高,且对于复杂结构精密焊件中微小缺陷空间定位及可视化的研究鲜有报道。为此,本文采用X射线实时成像系统对复杂结构激光焊件进行了检测,探索其检测方案和工艺,并建立了微小缺陷深度和偏移量计算的数学模型,确定微小缺陷的空间位置及分布,进而实现其内部微小缺陷的空间位置可视化。

2 精密焊件的结构

复杂结构激光焊件的外观如图1所示,焊件正反两面均有激光焊缝。局部纵断面图如图2所示,横断面为工字型如图3所示。图3中的气孔正位于焊件结合面位置,对焊接结构的疲劳性能等有很大的影响。

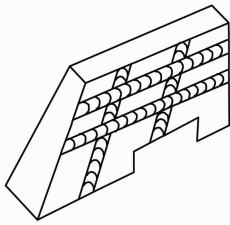


图1 复杂结构激光焊件总体图

Fig.1 General graph of laser weldments with complex structure

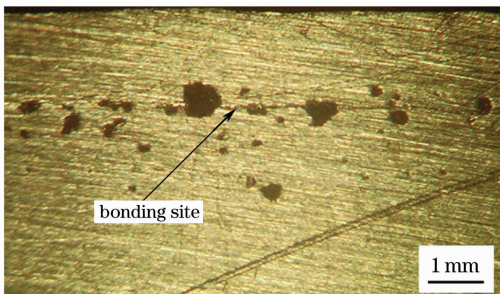


图2 焊件纵断面

Fig.2 Longitudinal section of weldments

被检测焊件为蒙皮框架结构,接头形式采用工字型,蒙皮和骨架采用激光焊连接在一起,接头的最薄弱环节是蒙皮与骨架间的结合面。由于焊缝尺寸小,结构复杂,采用超声和常规的射线方法难以实现该结构的检测。本课题组经过多次实验采用多视角成像的方法实现了对该焊件中缺陷的检测,并获得了含有微小缺陷的检测图像,如图4所示,图中的小

白点为焊件中的气孔缺陷。

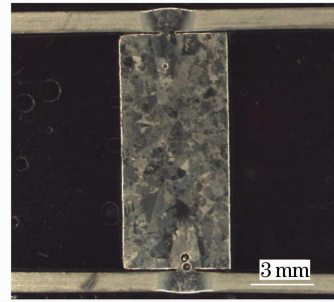


图3 焊件横断面

Fig.3 Transverse section of weldments

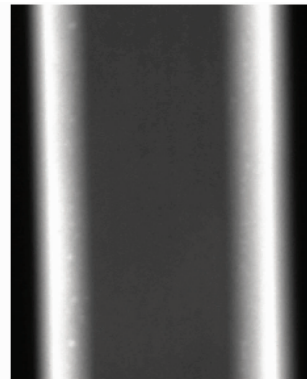


图4 检测图像

Fig.4 Detection image

3 数学模型的建立

根据图像灰度分布特征及线灰度分布曲线的特点,定位特征点的选择可以有以下两种方案:一种是以射线穿透焊件最薄处为定位特征点,见图5中1和3的位置;另一种是以射线穿透焊件最厚处为定位特征点,见图5中2和4的位置。鉴于1和3处易于受到光栅边缘高亮度区的影响,采用了2和4为定位特征点。

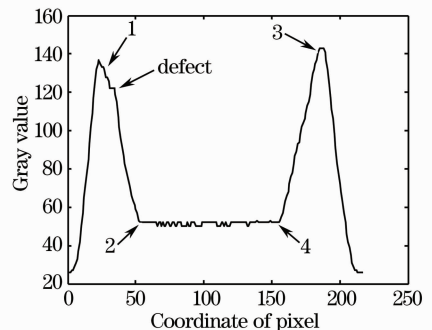


图5 线灰度分布曲线

Fig.5 Distribution curve of line gray

图6为缺陷深度数学模型建立的示意图,图7为缺陷偏移量数学模型建立的示意图。

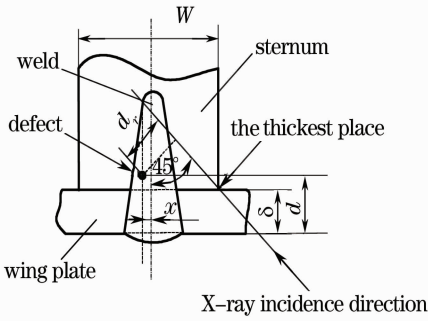


图 6 缺陷数学模型建立的示意图

Fig. 6 Schematic of derivation mathematic model for defect depth

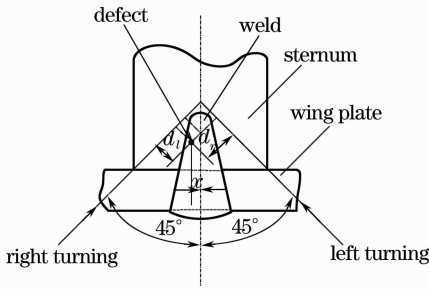


图 7 缺陷偏移量数学模型建立的示意图

Fig. 7 Schematic of derivation mathematic model for defect deviation

根据图 6 和图 7 中的几何关系,以焊缝中心线和水平线的交点为坐标原点,可以得到缺陷深度和偏移量计算的数学模型

$$d = \left(\frac{W}{2} + x + \delta\right) - \sqrt{2}d_r, \quad (1)$$

$$x = \frac{d_r - d_l}{\sqrt{2}}. \quad (2)$$

当 $x > 0$ 时缺陷位于焊缝中心的左侧;当 $x = 0$ 时缺陷位于焊缝中心;当 $x < 0$ 时缺陷位于焊缝中心的右侧。式中 d 为缺陷中心到翼板表面的距离; d_l 为焊件右转时缺陷中心到特征点 2 的投影距离; d_r 为焊件左转时缺陷中心到特征点 4 的投影距离; W 为腹板宽度; δ 为翼板厚度; x 为缺陷偏离焊缝中心的距离。

把标定后的投影距离代入公式(1)和(2)就可以计算缺陷偏移量和深度。同时通过实际焊件的破坏性实验可以得到缺陷的实际深度,算法的可靠性可以通过比较缺陷深度计算值与测量值的差异大小来验证。对 22 个缺陷的初步验证结果表明,其缺陷深度计算值和测量值的平均相对误差为 6.4%,其对比结果如图 8 所示。气孔直径计算值和测量值的平均相对误差为 2.5%,其对比结果如图 9 所示。

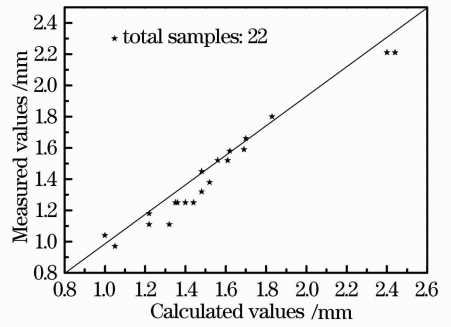


图 8 缺陷深度测量值和计算值的对比

Fig. 8 Comparison of measured and calculated values for defect depth

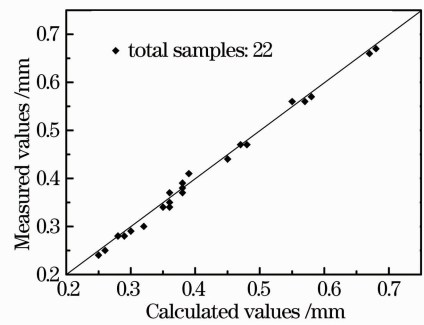


图 9 气孔直径测量值和计算值的对比

Fig. 9 Comparison of measured and calculated values for pore radius

4 缺陷空间位置数据的自动提取

在自动提取投影距离的基础上,可以自动计算出缺陷深度和偏移量的大小,同时也可以自动提取计算缺陷半径的大小和距离图像一端的距离,这样通过对缺陷距图像一端的距离就可以自动把缺陷的三维位置及其半径对应到一起,也就实现了缺陷空间位置数据的自动提取。由于检测到的缺陷并非全为正球形,在左右旋转图像中同一缺陷中心点的位置并非完全相同,因此设计的对应准则为:如果左右旋转图像中的缺陷距离图像一端的距离在一定的范围内,符合设定的判定准则,就判断其为同一个缺陷。实现了缺陷的自动对应对后续的缺陷数据自动输入及缺陷空间位置可视化打下良好的基础,同时也减少了人为因素的干扰,对于提高复杂结构精密焊件检测的自动化和鲁棒性有着积极的意义。图 10 为缺陷空间位置数据自动提取的算法流程图。

缺陷空间位置数据的自动提取界面如图 11 和 12 所示。

对实际焊件上 26 条焊缝中的缺陷进行了空间位置数据提取,提取的缺陷总样本数为 398 个。同

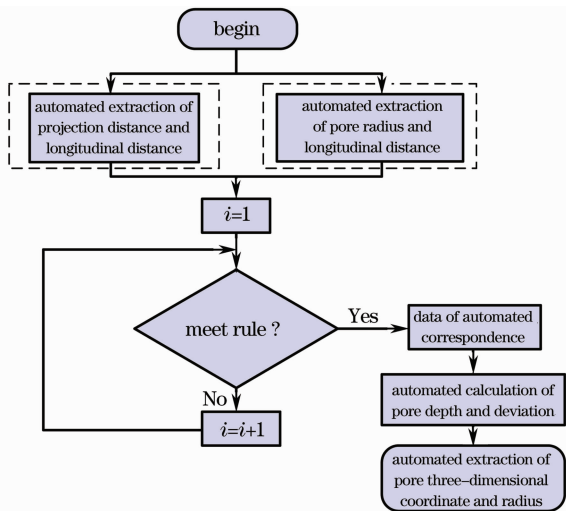


图 10 缺陷空间位置数据自动提取的算法流程图
 Fig. 10 Flowchart of automated extraction algorithm for defect spatial location

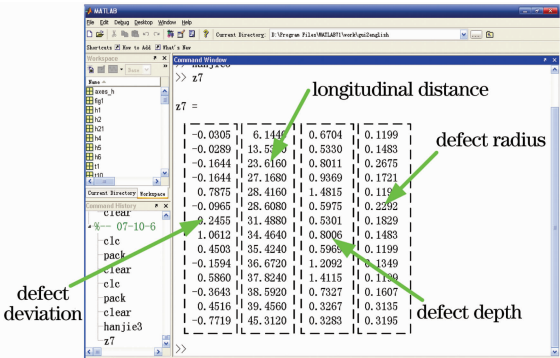


图 11 正面焊缝中自动对应的缺陷数据
 Fig. 11 Defect data of automated correspondence for front face weld

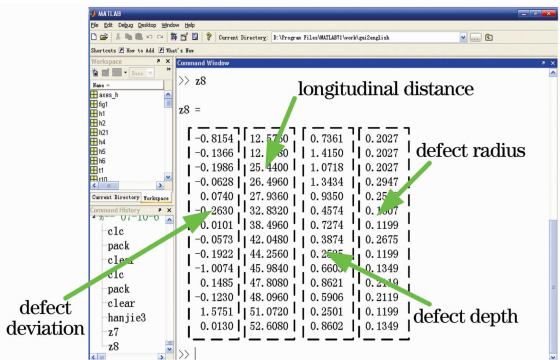


图 12 背面焊缝中自动对应的缺陷数据
 Fig. 12 Defect data of automated correspondence for back face weld

时对缺陷深度、偏移量、大小以及缺陷沿焊缝纵向的分布进行了统计,图 13 是缺陷深度及其出现频数的直方图。

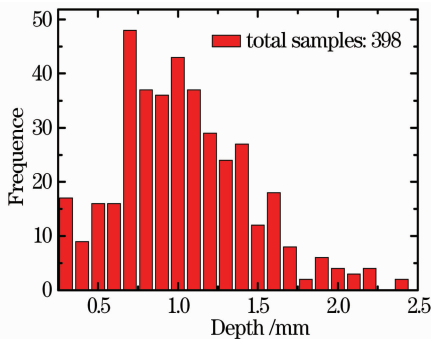


图 13 缺陷深度及其频数

Fig. 13 Defect depth and frequency

有 313 个,占总样本的 78.6%。缺陷大多分布在焊缝结合面位置(翼板的厚度为 1.0 mm),对焊件的接头性能有很大的影响。图 14 为缺陷偏移量及其出现频数的直方图,图中缺陷偏移量分布在 -0.8~0.8 mm 之间。

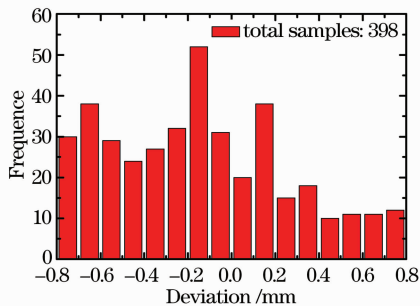


图 14 缺陷偏移量及其频数

Fig. 14 Defect deviation and frequency

图 15 是气孔直径及其出现频数的直方图。图中缺陷直径在 0.3~0.7 mm 之间的缺陷个数为 291 个,占总样本的 73.1%;直径在 0.3 mm 以下的缺陷有 94 个,占总样本的 23.6%;直径大于 0.7 mm 的缺陷有 12 个,占总样本的 3.0%。

图 16 是缺陷沿焊缝纵向的出现频数,图中缺陷沿焊缝纵向呈随机分布。

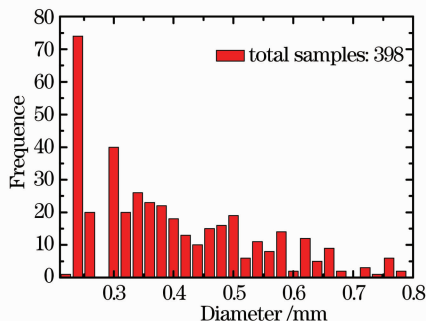


图 15 气孔直径及频数

Fig. 15 Pore diameter and frequency

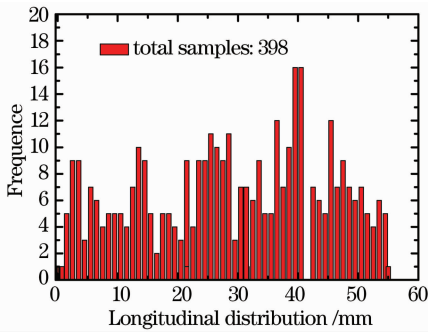


图 16 缺陷纵向分布及频数

Fig. 16 Defect longitudinal distribution and frequency

5 缺陷空间位置可视化

采用无损检测的方法确定复杂结构精密焊件中缺陷的空间位置之后,若能实现其在复杂结构焊件中的可视化,结合断裂力学的方法就可对复杂结构精密焊件进行无损评价,这对于重要焊接结构的结构完整性评价有着重要的意义。

检测的复杂结构精密焊件局部结构为工字型,只需要提供焊件结构的每个顶点的三维数据, Matalab 软件就可以建立所需要的工字型焊件模型。为了更好地实现缺陷可视化,建立了 GUI 界面。GUI 界面上可实现焊件三维模型的自动生成、正面焊缝和背面焊缝自动提取数据的输入、三视图显示、透明化处理 and 任意角度调整及鼠标控制图形等功能,进一步提高了缺陷可视化的效率和直观性。图 17 为气孔缺陷可视化的界面。

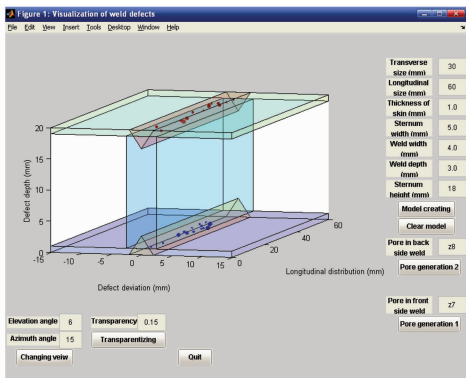


图 17 气孔缺陷可视化界面

Fig. 17 Visualization interface of pore defect

从图 17 中可以清楚、直观地了解所有气孔在焊件内部的空间位置分布和大小,解决了复杂结构焊件内部缺陷信息三维显示的难题。

6 结 论

以射线穿透焊件最厚处为定位特征点建立了复

杂结构精密焊件中缺陷深度与偏移量计算的数学模型,并通过实际焊件的破坏性实验对提出的数学模型进行了有效的验证。

提出了缺陷空间位置数据的自动提取算法,对实际焊件上 26 条焊缝中的 398 个缺陷进行了自动提取。缺陷空间位置数据提取结果表明,78.6% 的缺陷分布在焊件结合面位置,缺陷偏移量在 $-0.8\sim 0.8$ mm 之间,缺陷沿焊件纵向呈随机分布。

开发了焊件缺陷空间位置可视化程序,该程序可实现焊件三维建模、缺陷数据自动输入、缺陷自动显示、透明化处理、旋转角度调整等功能,大大提高了缺陷可视化的效率。

参 考 文 献

- Zou Shikun, Tang Yu, Gong Shuili. Study on technology of laser welding titanium alloy sheets[J]. *Welding Technology*, 2003, **32**(5): 16~18
邹世坤, 汤 昱, 巩水利. 钛合金薄板激光焊件技术研究[J]. 焊接技术, 2003, **32**(5): 16~18
- Wei Huakai, Sun Fujuan. Technology of laser welding on Al-Mg-Sc and 2Al2[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(10): 1615~1618
魏华凯, 孙福娟. Al-Mg-Sc 与 2Al2 激光对焊工艺[J]. 中国激光, 2008, **35**(10): 1615~1618
- Wu Qiang, Chen Genyu, Xu Lanying et al.. CO2 laser welding of vehicle body[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(12): 1726~1731
伍 强, 陈根余, 徐兰英等. CO2 激光焊接车身拼焊板[J]. 中国激光, 2007, **34**(12): 1726~1731
- Pang Ming, Yu Gang, Liu Zhao et al.. Dissimilar metal of K418 and 42CrMo full penetration laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1122~1126
庞 铭, 虞 钢, 刘 兆等. K418 与 42CrMo 异种金属的激光穿透焊接[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1122~1126
- Sun Fujuan, Liu Hongjun, Zhang Danfeng. Technology of LY12CZ's laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2): 273~277
孙福娟, 刘洪军, 张丹峰. LY12CZ 铝合金激光焊接工艺[J]. 中国激光, 2006, **33**(2): 273~277
- Wu Dongjiang, Yin Bo, Zhang Weizhe et al.. Nd:YAG laser beam welding invar36 alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1773~1777
吴东江, 尹 波, 张维哲等. Nd:YAG 激光焊接殷钢材料的工艺研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1773~1777
- Xiao Rongshi, Wu Shikai. Progress on laser-arc hybrid welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1680~1685
肖荣诗, 吴世凯. 激光-电弧复合焊接的研究进展[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1680~1685
- Li Liqun, Chen Yanbin, Tao Wang. Research on dual-beam welding characteristics of aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(11): 1783~1788
李俐群, 陈彦斌, 陶 汪. 铝合金双光束焊接特性研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(11): 1783~1788
- Gang Tie, Shi Duanhu, Yuan Yuan. Distribution feature of tiny flaw in laser welding parts of titanium alloy using X-ray detection [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(11): 1372~1376
刚 铁, 石端虎, 袁 媛. 射线检测钛合金激光焊件微小缺陷分布特征[J]. 光电子·激光, 2006, **17**(11): 1372~1376
- Qi Junfeng, Niu Zhen, Zhang Dongyun et al.. Control of shaping

- of welds for CO₂ laser welding shipbuilding T-section aluminum alloy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 297~302
祁俊峰, 牛 振, 张冬云等. CO₂激光焊接船用铝合金 T 型材的焊缝成形控制[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 297~302
- 11 Shi Duanhu, Gang Tie, Yang Shuangyang *et al.*. Research on segmentation and distribution features of small defects in precision weldments with complex structure [J]. *NDT&E International*, 2007, **40**(5): 397~404
- 12 Gang Tie, Shi Duanhu, Yuan Yuan *et al.*. Segmentation of small defects in laser weld of titanium alloy with complex structure[J]. *Insight: Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, 2006, **48**(12): 731~734
- 13 Shi Duanhu, Gang Tie, Yuan Yuan *et al.*. Image segmentation of small defects in precision weldments with complex structure[J]. *China Welding*, 2007, **16**(1): 52~56
- 14 Ren Mingzhao, Gao Yan. Depth locating technology for welding defects based on parallax method [J]. *Welding Technology*, 2003, **32**(6): 49~50
任明照, 高 岩. 基于视差法的焊接缺陷深度定位技术[J]. *焊接技术*, 2003, **32**(6): 49~50
- 15 Shi Haijie, Chen Shuyue, Chang Hong. Locating emulation and error analysis of parallax method in X-ray detection[J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2006, **16**(6): 152~154
石海杰, 陈树越, 常 虹. 射线检测中视差法定位仿真与误差分析[J]. *科技情报开发与经济*, 2006, **16**(6): 152~154
- 16 Gang Tie, Shi Duanhu, Yuan Yuan *et al.*. Distribution features of small defects in precision weldments of titanium alloy [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2006, **48** (1): 1341~1345