

# 铝合金焊缝疲劳开裂的原位同步辐射 X 射线成像

吴圣川<sup>1</sup>, 胡雅楠<sup>1</sup>, 付亚楠<sup>2</sup>, Buffière J Y<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学 牵引动力国家重点实验室, 成都 610031; 2. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201204;  
3. 法国里昂国立应用科学学院 材料实验室, 法国 里昂 F-69621)

**摘 要:** 基于第三代高精度同步辐射 X 射线三维成像技术, 开展表面经抛光的铝合金光纤激光-脉冲电弧复合焊接接头疲劳裂纹萌生和扩展的原位可视化研究。结果表明, 疲劳裂纹均优先从样品(亚或次)表面或角(亚)表面上的焊接气孔处萌生和扩展, 并呈现典型的 I 型表面半椭圆或四分之一椭圆(或圆形)裂纹形貌。一旦裂纹萌生, 裂纹在表面的扩展速率低于内部, 且存在局部加速和停滞现象, 萌生源的特征长度越大, 则裂纹萌生和扩展寿命越短, 裂纹形貌为高度非线性的空间特征。此外基于经典 Newman 表面半椭圆形裂纹形貌预测结果与试验基本一致。

**关键词:** 同步辐射 X 射线成像; 疲劳裂纹; 激光焊接; 铝合金; 高速列车

**中图分类号:** TG 405 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2015)12-0005-04

## 0 序 言

焊接接头是高速列车主承载结构发生疲劳破坏最主要的区域<sup>[1]</sup>。为了揭示焊接结构的疲劳损伤机制<sup>[2]</sup>, 一般采用小尺寸试样的表面观测技术、代表性破坏断口技术以及发展复杂的理论模型。然而这种传统的抗疲劳断裂设计及研究方法仅能获得材料自由外表面的疲劳行为<sup>[3]</sup>, 不能“非破坏性”准确揭示和全面追踪材料内部的疲劳损伤。通过对样品的计算机断层切片照片(CT)进行三维重构, 能够无损地呈现出大块材料内疲劳损伤的演变过程。研究表明, 疲劳短裂纹占材料总寿命的比例高达 90%, 并具有与长裂纹明显不同的扩展特征<sup>[4]</sup>。但因工业 CT 的精度为毫米级, 科学家仍然很难实时追踪和定量表征疲劳裂纹演变过程。

同步辐射光具有亮度高、准直性好、光谱连续、分辨率高等一系列的优异特性, 比工业 CT 的试验水平高出几个数量级, 是目前唯一可穿透大块金属材料开展疲劳损伤演变原位研究的大科学装置<sup>[5]</sup>。同步辐射光另一个独特优势是能够在不破坏样品整体性实时获取材料的微结构行为。已有研究表明<sup>[6]</sup>, 气孔间距及至自由表面距离越小, 裂纹愈易萌生和扩展; 气孔尺寸不是疲劳裂纹萌生的决定性因素, 等效直径为 10~100 μm 气孔更易萌生裂纹(推翻了

前述小于 0.2 mm 气孔即可忽略其影响的定论)。文献[7]指出, 真实裂纹因气孔分布及组织不均匀性呈现出高度非线性的空间生长特征, 与疲劳断裂力学中经典的规则裂纹面的理论假设明显不一致, 必须进一步开展微观机制方面的研究。

通过前期研究, 对铝合金 7020-T651 焊缝气孔进行了定量统计分析<sup>[8]</sup>, 指出气孔主要为近球形的冶金型氢气孔, 等效直径为 20 μm 的最多, 并且数量众多。

## 1 试验方法

选择轧制国产动车组用铝合金 7020-T651, 线切割为 2 mm 左右的薄板, 经化学清洗和钢丝刷打磨后, 在光纤激光-脉冲电弧复合焊接平台上对接焊, 焊接工艺参数为: 激光功率为 3.5 kW, 电弧电流为 140 A, 焊接速度为 9 m/min, 离焦量为 0 mm, 光丝间距为 2 mm, 氩气流量为 1.5 L/min。焊丝为进口铝镁合金 5356, 直径为 1.2 mm, 不仅有利于补充焊接过程蒸发烧损的 Mg 元素, 而且有利于降低热裂倾向。为了有效模拟实际打磨焊缝, 先后用粗细砂纸去除上下余高及其它几何不连续特征, 自然时效 3 个月后测得激光复合焊 7020-T651 接头的屈服强度和抗拉强度分别为 209.8 和 255.9 MPa。

首先在上海光源和欧洲光源进行气孔的三维成像, 获得复合焊缝初始状态, 再在欧洲光源 ID19 线站的微型疲劳试验机上进行原位 X 射线疲劳加载成像试验, 基本参数: 试验频率  $f = 20$  Hz, 应力比  $R =$

收稿日期: 2015-04-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11572267); 牵引动力国家重点实验室开放基金资助项目(2015TPL\_T07, TPL1505, TPL1503)

0.1,常幅应力幅值  $\sigma_a = 148 \text{ MPa}$ , X 射线光子能量 19 keV,其中 X 射线源至样品距离为 64 m,狗骨形样品至探测器距离约 15 cm,空间分辨率为  $0.7 \mu\text{m}$ ,曝光时间为 0.1 s.

首先对无加载和峰值加载样品进行成像,作为初始损伤状态;然后对样品进行正弦疲劳加载,每 500 加载循环进行一次保持峰值应力的 X 射线成像.样品旋转  $180^\circ$ 后就实现了整个样品的成像;一旦成像完毕即可在线使用三维重构软件 Amira 监测样品中是否有裂纹萌生,裂纹稳定扩展后用户可自行决定加载周数,以便得到所需要的损伤形貌;应注意当裂纹面约占整个界面的 20% 时,要适当减少加载循环数,以避免发生意外断裂.疲劳损伤演变过程的重构步骤同文献 [8].

## 2 试验结果与分析

依照以上参数和程序完成 8 个样品的原位疲劳成像试验,另外 1 个样品由于机时限制不得不中断试验.试验结果表明,疲劳裂纹均从样品表面附近的较大尺寸气孔处萌生,随后稳定扩展为典型的半椭圆或四分之一形貌.

### 2.1 疲劳裂纹萌生

图 1 为焊缝在疲劳加载下裂纹萌生和扩展的空间形貌,其中图 1a 为总寿命  $N = 47\ 200$  周次时裂纹萌生于角表面的单个较大尺寸气孔,即表面单气孔启裂;图 1b 为总疲劳寿命  $N = 86\ 000$  周次( $> 2\ 000$  周次后样品发生断裂)时裂纹萌生于角表面或亚角表面处的两个小尺寸气孔处,即亚表面启裂.

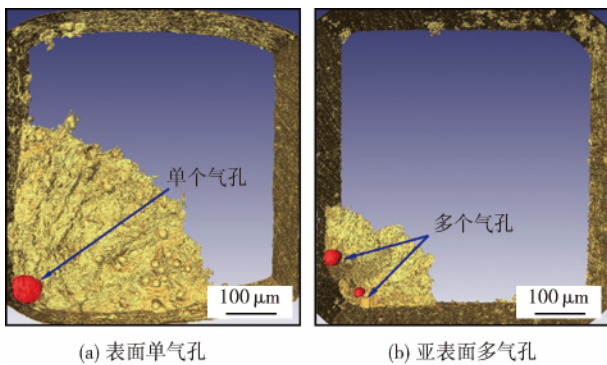


图 1 焊缝角气孔导致的四分之一椭圆裂纹

Fig. 1 Quarter ellipse corner fatigue cracked shape

由图 1 可知,疲劳裂纹起源于复合焊缝样品棱角处的气孔处,等效直径均不超过  $0.1 \text{ mm}$ .由于焊缝经过抛光打磨,位于亚表面的气孔露出(图 1a),从而成为天然缺口,在大应变载荷下发生显著塑性

变形,并萌生裂纹.此外在样品亚表面的气孔也会优先萌生裂纹,并与萌生于表面气孔的裂纹重合和折叠,最终形成典型的角裂纹.需要指出的是,萌生于亚表面气孔的裂纹的样品总疲劳寿命较长,例如图 1b 疲劳寿命到了  $N = 88\ 000$  周次仍未发生破坏,而萌生于表面气孔的裂纹的样品总疲劳寿命则明显较短( $N = 47\ 200$  周次).这说明打磨处理产生了裂纹源,为了提高样品总疲劳寿命,应该采用诸如重熔或强化方法消除表面几何不连续.

图 2 为焊缝在疲劳加载下的椭圆形裂纹萌生和扩展的空间形貌,其中图 2a 表示疲劳寿命  $N = 24\ 700$  周次时裂纹起源于自由表面上单个较大尺寸气孔,最终扩展为典型的半椭圆形,图 2b 表示疲劳寿命  $N = 40\ 900$  周次时裂纹分别起源于两种表面气孔,然后同时扩展,最终形成典型的半椭圆形形貌.

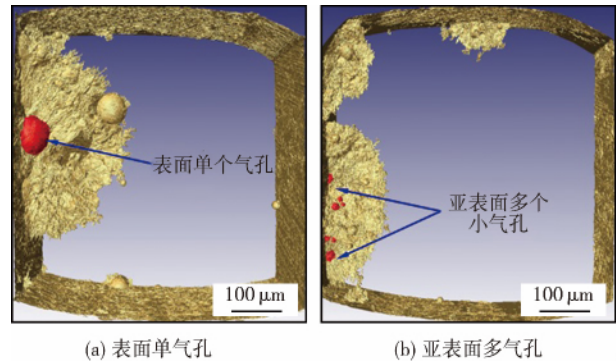


图 2 焊缝表面气孔导致的半椭圆裂纹

Fig. 2 Semi-elliptical fatigue cracked shape

从图 2 中清楚地看出,疲劳裂纹萌生于样品的自由表面,然后稳定扩展最终形成典型的半椭圆形形貌,初始缺陷(表面气孔)尺寸越大(图 2a),同时样品的总疲劳寿命也越低,并且呈现多裂纹同时萌生和扩展的特征(图 2b).

疲劳裂纹均起源于样品表面或亚表面,呈现典型的 I 型裂纹扩展模式,最后形成典型的半椭圆或四分之一圆形.此外表面气孔尺寸越大,样品总疲劳寿命也越低.这说明虽然对焊缝进行了打磨处理,去除了大部分毛刺和焊趾等不连续性的影响,却引入了新的缺陷(被表面切割的气孔),气孔尺寸成为控制样品疲劳寿命的重要因素.

可以通过两种途径实现样品疲劳寿命的控制:一是对样品进行重熔(如电弧熔修),消除表面上较大尺寸气孔;二是通过表面改性如激光冲击等来降低不连续性.另一方面,有必要开展表面气孔尺寸与样品萌生寿命和总疲劳寿命关系的研究,建立定量化的寿命模型.

### 2.2 疲劳裂纹扩展

为了更加清晰地揭示疲劳裂纹的演变过程及规律,图 3 给出了两个典型样品图 1a 和图 2a 中疲劳裂纹在垂直于加载轴的平面上的投影图。

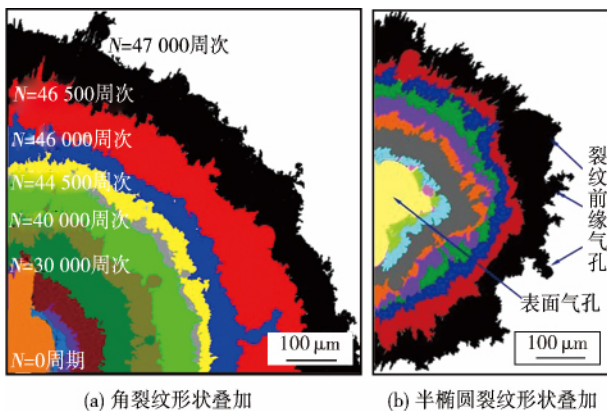


图 3 疲劳裂纹扩展的叠加形貌

Fig. 3 Superimposed crack growth front evolutions

从图 3 清楚看出,疲劳裂纹均起源于自由表面的被切割气孔处,其疲劳寿命约占总寿命 40%,扩展寿命占总疲劳寿命绝大部分。这说明切割气孔的存在作为天然缺口对于应力集中有利,因此很快便产生引起滑移带运动并导致裂纹产生。

另一方面,空间裂纹呈现高度的非线性生长模式,并非经典疲劳断裂力学中规则的裂纹形貌。这一结论的意义在于传统的基于表面和断口观测获得的裂纹扩展速率模型并未完整描述真实裂纹的扩展特性。同时还存在局部加速和停滞现象,而加速部位多存在气孔。统计发现被裂纹切割的气孔的平均球度为 0.68,等效直径为 15~35 μm,这也说明裂纹并不是总是向着气孔尺寸最大的区域扩展。这种与气孔尺寸和分布有关的裂纹扩展机制有待于进一步研究。此外一般认为裂纹的局部加速和停滞现象与材料的微观组织特征有关,还有必要从微结构尺度(如晶粒尺寸和取向、夹杂、强化相等)全面揭示裂纹扩展的微观行为。

也有研究者认为气孔的聚集会加速裂纹扩展,但总体上对裂纹扩展速率的影响并不大。从图 3 可以看出,总体上看裂纹前缘的气孔对裂纹扩展局部形貌和扩展速率影响较大,但还很难定量评定其对整体裂纹扩展特性的影响。

以图 2b 中的复合焊缝样品为例,简单给出多个表面气孔萌生裂纹的疲劳损伤演变过程,并对其进行初步的定量分析,进一步的量化系统研究见后续论文。图 4 给出了萌生于多个表面缺陷的裂纹同

时扩展、汇合并最终形成一个典型的半椭圆形裂纹的详细演变过程。

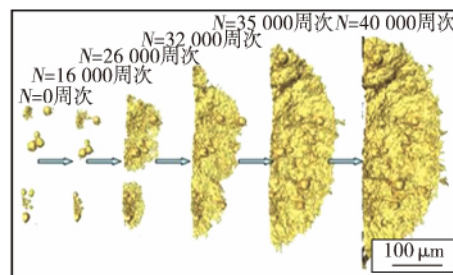


图 4 多疲劳裂纹源演变过程

Fig. 4 Semi-elliptical cracking evolutions

由图 4 可见,样品自由表面上(图 2b)有多个尺寸约 30 μm 的小气孔,在外加载荷的作用下同时萌生裂纹并扩展,最终汇聚为一个半椭圆裂纹,当裂纹投影面积约为样品截面 21% 时,样品发生破坏。如果把图中 3 个小气孔聚集区看做等效气孔时,其特征长度约为 100 μm,据此就可以定量研究裂纹萌生和扩展对寿命的影响。有研究认为气孔距离可以作为评估疲劳裂纹萌生的因素<sup>[9]</sup>。从图 4 中还可以粗略地看出,材料内部裂纹扩展速率要高于表面,这主要是因为内部为三向应力状态,拘束度较大,从而更容易引起应力集中和塑性变形。

### 2.3 疲劳开裂表征

以图 4 中焊缝样品的疲劳裂纹演变为例,对裂纹扩展形貌及扩展速率进行简单的定量表征。设裂纹在材料深度方向上的长度为  $a$ ,在样品表面上的半长为  $c$ ,可得如图 5 所示的形貌。

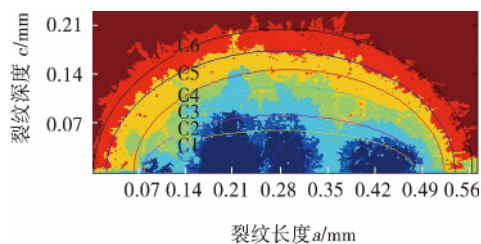


图 5 半椭圆裂纹形貌拟合

Fig. 5 Characterized crack front shapes

研究发现,采用三个缺陷源等效为一个初始裂纹的形式较为合适。图 5 中半椭圆曲线代表拟合的裂纹前缘,基本含义如表 1 所示。

由图 5 和表 1 可知,疲劳裂纹在材料内部和表面上的扩展速率并不相同,因此基于表面和断口观测得到的扩展速率并不能直接替代真实特征。假设内部裂纹前沿 A 点和表面裂纹前沿 B 点各自服从经典的裂纹扩展速率 Paris 公式,根据 Newman 的表

表 1 扩展周次及裂纹尺寸  
Table 1 Fatigue cracked cycles and size

裂纹前缘	疲劳寿命 $N(10^4 \text{ 周次})$	裂纹长度 $a/\mu\text{m}$	裂纹深度 $c/\mu\text{m}$
C1	2.0	59.5	201.6
C2	2.6	81.2	207.5
C3	3.0	121.8	217.0
C4	3.3	145.6	230.3
C5	3.5	172.2	259.0
C6	4.0	203.0	281.1

面半椭圆裂纹形貌理论计算方程为<sup>[10]</sup>

$$\frac{da}{dN} = C_A \Delta K_A^n, \quad \frac{dc}{dN} = C_B \Delta K_B^n \quad (1)$$

$$C_B = 0.9^n C_A \quad (2)$$

$$\Delta a = \left( \frac{\Delta K_A}{0.9 \Delta K_B} \right)^n \Delta c \quad (3)$$

式中:  $\Delta a$  和  $\Delta c$  分别为表面半椭圆形裂纹在内部和表面上的长度增量;  $\Delta K_A$  和  $\Delta K_B$  分别为内部点 A 和表面点 B 处的应力强度因子;  $C_A$ 、 $C_B$  和  $n$  为材料常数。

图 6 给出了基于 Newman 法的内部裂纹形貌预测值与试验结果(图 5)的对比。

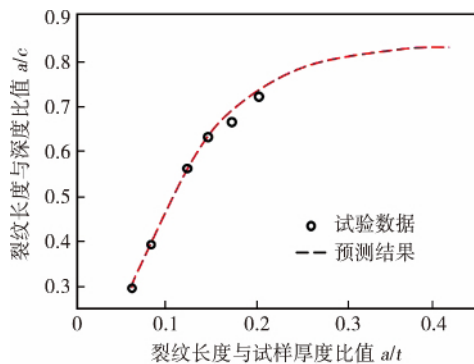


图 6 表面半椭圆疲劳裂纹形貌

Fig. 6 Predicted semi-elliptical fatigue cracks

从图 6 可以看出,采用表面半椭圆形拟合现有试验结果是合理的;同时也表明这一阶段的疲劳裂纹已呈现稳定扩展特征,这也为后续研究建立包含内部裂纹和表面裂纹行为的裂纹扩展速率数学模型提供了基本的理论依据和试验数据。

### 3 结 论

(1) 疲劳裂纹均萌生于样品(亚)表面和角(亚)表面的气孔处,并呈现典型的 I 型裂纹扩展模式和表面半椭圆和四分之一椭圆形貌。

(2) 由于应力状态的不同,样品表面上的疲劳

裂纹扩展速率低于样品内部,并且内部裂纹前缘上各点的裂纹扩展速率也不相同。

(3) 与样品自由表面相交或处于亚表面上气孔的尺寸越大或距离越小,越容易引起应力集中,其裂纹萌生和扩展寿命也越短。

(4) 基于 Newman 的表面半椭圆形裂纹预测值与试验结果基本一致。

### 参考文献:

- [1] 张 健,雷 振,王旭友. 高速列车 6005A 铝合金型材焊接热裂纹分析[J]. 焊接学报,2012,33(8): 60-64.  
Zhang Jian, Lei Zhen, Wang Xuyou. Weld hot crack analysis of 6005A aluminum alloy profile for high-speed train[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(8): 60-64.
- [2] 郑修麟,王 泓,鄢君辉,等. 材料疲劳理论与工程应用[M]. 北京: 科学出版社,2013.
- [3] 吴圣川,周鑫淼,张卫华,等. 激光-电弧复合焊接 7075-T6 铝合金裂纹扩展分析[J]. 焊接学报,2013,34(2): 5-8.  
Wu Shengchuan, Zhou Xinmiao, Zhang Weihua, et al. Fatigue life prediction of laser-MIG hybrid welded 7075-T6 Al alloys joints[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 5-8.
- [4] 亚伯·斯海维. 材料与结构的疲劳[M]. 第二版,吴学仁,译. 北京: 航空工业出版社,2014.
- [5] 王绍刚,王苏程,张 磊. 高分辨透射 X 射线三维成像在材料科学中的应用[J]. 金属学报,2013,49(8): 897-910.  
Wang Shaogang, Wang Sucheng, Zhang Lei. Application of high resolution transmission X-ray tomography in material science[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2013, 49(8): 897-910.
- [6] Buffière J Y, Savelli S, Jouneau P H, et al. Experimental study of porosity and its relation to fatigue mechanism of model Al-Si7-Mg0.3 cast Al alloys[J]. Material Science Engineering A, 2001, 316(1/2): 115-126.
- [7] Zhang H, Toda H, Qu P C, et al. Three-dimensional fatigue crack growth behavior in an aluminum alloy investigated with in situ high-resolution synchrotron X-ray microtomography[J]. Acta Materialia, 2009, 57(11): 3287-3300.
- [8] 喻 程,吴圣川,胡雅楠,等. 铝合金熔焊微气孔的三维同步辐射 X 射线成像[J]. 金属学报,2015,51(2): 159-168.  
Yu Cheng, Wu Shengchuan, Hu Yanan, et al. Three-dimensional imaging of gas pores in fusion welded Al alloys by synchrotron radiation X-ray microtomography[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(2): 159-168.
- [9] 何 超,崔仕明,刘永杰,等. 气孔对铝合金焊接接头超长疲劳寿命的影响[J]. 焊接学报,2014,35(11): 18-22.  
He Chao, Cui Shiming, Liu Yongjie, et al. Effect of pore on super long fatigue life of aluminum alloy welded joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(11): 18-22.
- [10] Newman Jr J C, Raju I S. An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1981, 15(1): 185-192.

作者简介: 吴圣川,男,1979 年出生,博士,副教授,硕士研究生导师。主要从事工程结构抗疲劳断裂设计及其仿真软件研究开发。发表论文 50 余篇。Email: wusc@swjtu.edu.cn

## MAIN TOPICS ,ABSTRACTS & KEY WORDS

### CCD calibration technology for low-power laser automatic repair of dies

LIU Lijun<sup>1,2</sup>, ZHANG Weijie<sup>2</sup>, HU Xiong-wu<sup>3</sup>, ZHANG Hongxing<sup>2</sup> ( 1. Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. Ningbo Institute of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315100, China; 3. Kim Ningbo Co., Ltd., Ningbo 315174, China). pp 1 – 4

**Abstract:** Aim at the quality control problems during the process, visual sensing technology was introduced. In order to obtain the visual feature information accurately, the imaging system was analyzed, imaging model was put forward, and the sub-pixel corner extraction algorithm was compared. External parameters and extrinsic parameters was obtained by improved calibration algorithm of Zhang using color optimized calibration target. Results show that calibration error is 0.712 305 pixel, it namely that 0.123 mm. Two dies was repaired after the calibration, which could meet the accuracy requirement and this method was practical and reliable.

**Key words:** mould laser repair; imaging system; sub-pixel corner detection; calibration

### Study on fatigue cracking of welded aluminum alloys via in situ synchrotron radiation X-ray microtomography

WU Shengchuan<sup>1</sup>, HU Yanan<sup>1</sup>, FU Yanan<sup>2</sup>, Buffière J Y<sup>3</sup> ( 1. State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China; 3. Laboratoire Matériaux, MATEIS, INSA-Lyon/CNRS-UMR 5510, Villeurbanne F-69621, France). pp 5 – 8

**Abstract:** Hybrid fiber laser and pulsed arc welded aluminum alloys via sound polishing were prepared and then three dimensional in situ fatigue imaging of welded joints was conducted by the high resolution synchrotron radiation X-ray computed microtomography (SR- $\mu$ CT). Experimental results show that fatigue cracks are frequently initiated and propagated from the broken pores at the surface or sub-surface of hybrid welds, presenting a typical I mode semi-elliptical and quarter ellipse or circle profile. It is also found that the inner fatigue crack growth is faster than the surface crack with significant local acceleration and arrest behaviors together with highly nonlinear spatial propagation. Moreover, the longer the characteristic length of initial crack, the shorter the fatigue life of hybrid welds. Besides, there is a good agreement between the prediction of fatigue crack morphology based on Newman method and experimental results.

**Key words:** synchrotron radiation X-ray tomography; fatigue cracks; laser welding; aluminum alloys; high-speed trains

### Ultrasonic nondestructive evaluation of friction stir welding joints based on independent component analysis

YUAN Keyi<sup>1,2</sup>, HAN Zandong<sup>1,2</sup>, SHI Qingyu<sup>1,2</sup>, ZHONG Yuexian<sup>1,2</sup> ( 1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Key Laboratory of Tribology, Tsinghua University, Beijing 100084, China). pp 9 – 12

**Abstract:** The kissing-bond defect in friction stir welding (FSW) joints is difficult to detect with conventional ultrasonic method. A new ultrasonic feature imaging method was proposed for the problem. The method was composed of these steps: getting feature space of inspecting signal by decomposing time-domain signal with independent component analysis (ICA) method, finding out feature vectors for detecting targets according to energy transfer characteristic in ultrasonic detection, projecting ultrasonic signal to the feature vectors; obtaining feature parameter value by accumulating all the projections, using the feature parameter value to reconstruct the image of FSW joints. This method was used to conduct ultrasonic imaging for FSW joints with different tensile strength, and the images were also compared with ones generated by conventional C scan. The results showed that, inspecting results with this new method had good coherence with tension experiments, and showed a better detecting sensitivity for FSW joints evaluation than conventional C scan.

**Key words:** friction stir welding; ultrasonic; independent component analysis; weldments

### Numerical simulation of temperature field in 9% Cr steel thick-wall pipe in local PWHT

HU Lei<sup>1,2</sup>, WANG Xue<sup>1,2</sup>, MENG Qingyun<sup>3</sup>, XIAO Deming<sup>4</sup>, WANG Pengfei<sup>3</sup>, YAN Zheng<sup>4</sup>, ZHANG Yongsheng<sup>4</sup> ( 1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Key Laboratory of Transients in Hydraulic Machinery, Ministry of Education, Wuhan 430072, China; 3. Hebei Canghai Pipe Fitting Group Co., Ltd., Yanshan 061300, China; 4. Tianjin Electric Power Construction Company, Tianjin 300012, China). pp 13 – 16, 21

**Abstract:** A FE program which could adjust heat input automatically according to the temperature at the controlling point was developed based on the heat input tracking method. The temperature distributions of 9% Cr steel pipe in local post weld heat treatment (PWHT) was simulated by using this program. The simulation results were in good agreement with the experimental results. The temperature field distributed as a parabola at the axial direction. There existed approximate linear relationship between metal temperature and radial distance. The temperature variations between the outer wall and the inner wall was about 17 ~ 18 °C within the distance of two times wall thickness to the weld center. The calculated soak band width according to the local PWHT parameters recommend by current domestic standard was wide enough to meet the requirements of heat treatment. Equivalence point on the outer wall which had the same temperature as the weld center in inner wall was obtained in order to monitor the temperature variation in inner wall during PWHT.

**Key words:** 9% Cr steel; local PWHT; numerical simulation; temperature field