

铝合金摩擦搅拌焊接焊区的 I/II 型复合断裂研究

杨邦成, 郭荣鑫, 程赫明

(昆明理工大学 建筑工程学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 采用二维计算机视觉 - 数字图像比对技术, 进行裂纹稳定扩展实时表面位移测量, 定量分析了铝合金 2024 - T351 母材及摩擦搅拌焊接后不均匀、各向异性的焊区的 I/II 型复合裂纹稳定扩展的断裂性能、临界 COD 及其分量 COD_I 和 COD_{II} , 并研究了母材及焊区裂纹的扩展路径。结果表明 (1) 距裂纹尖端后某一固定距离的临界 COD 可反映焊区的断裂韧性, (2) 临界 COD 值反映复合裂纹的扩展受 I 型或 II 型裂纹扩展主导, (3) 焊区的临界 COD 值对应地为母材的 85%, (4) 用数字图像比对技术分析 I/II 型裂纹的断裂性能是切实可行的一种新方法。

关键词: 计算机视觉; 复合型裂纹; 铝合金; 摩擦搅拌焊接

中图分类号: O346.12 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007 - 855X(2005)04 - 0078 - 05

Mixed Mode I/II Fracture of Aluminum Alloy Friction Stir Weld's Joints

YANG Bang-cheng, GUO Rong-xin, CHENG He-ming

(Faculty of Civil and Architectural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650224, China)

Abstract: Surface displacement in stable crack tearing is measured with the adoption of digital image correlation. Quantitative analyses are provided on mixed mode I/II fracture, critical COD and its components - COD_I and COD_{II} for AA2024 - T351 base metals and joints of friction stir welds. Crack paths are also studied. It is shown from the result that (a) critical COD behind fixed distance of crack tip along crack path is a parameter of fracture toughness of joints, (b) critical COD dominates the transition of mixed mode fracture for Mode I or Mode II, (c) value of critical COD of joints is 85% of that of base metal, (d) digital image correlation is a viable method to the mixed mode fracture analysis.

Key words: computer vision; mixed mode fracture; aluminum - base alloy; friction stir welding

0 引言

铝合金材料由于重量轻、抗腐蚀、易成形等优点, 受到制造工业的青睐。硬铝合金 2024 - T351 (以下简称 AA2024 - T351) 一直是航空、航天、高速列车、高速舰船及民用工业等制造领域中最重要、最常用的材料。但是, 铝合金材料常规焊接的难度又限制了这种材料的进一步推广应用。1991 年由英国焊接研究所发明的摩擦搅拌焊接技术 (Friction Stir Welding, 简称 FSW), 正是专门针对铝、铜、钛等常规焊接困难的合金的一种新型固态焊接方法^[1~3], 它近几年来发展迅速, 将逐步成为熔焊的替代技术。目前针对 AA2024 - T351 的摩擦搅拌焊接工艺已获初步成功^[4~6]; 对其焊区的显微结构、金相变化的研究已有少量文献报道^[7]。但对其焊区的 I/II 型断裂性能研究的文献极为少见。焊区的断裂性能研究的滞后, 阻碍了该技术、该材料的工业应用。因此, 对焊区的断裂性能进行研究, 寻求某种断裂参量来作为工程结构抗断设计、可靠性分析的依据, 显得极为重要。研究表明^[8,9], 金属材料 I/II 型裂纹扩展的临界 COD 值, 可作为一种有效的断裂参量。故本文采用临界 COD 的概念, 对 AA2024 - T351 焊区这样一种不均质、各向异性的材料, 试图建立起临界 COD 判据。具体进行了以下研究: 采用 Arcan 试验来实现 I/II 复合型裂纹的断裂过程。利用二维计算机视觉技术, 通过对裂纹尖端区域的图像的数字图像比对分析, 精确地获得焊区裂纹扩展的临

收稿日期: 2004 - 11 - 16

第一作者简介: 杨邦成 (1965. 2 ~), 男, 副教授, 主要研究方向: 复合断裂与计算机视觉。E-mail: yang504@yahoo.com

界 COD 值. 分析焊区的 I/II 型断裂性能以及与母材的区别.

1 实验技术

实验中采用 Arcan 试验来实现 I 型、II 型及 I/II 型复合断裂过程. 研究中采用厚 6.35 mm 厚、长 1.2 m、宽 0.61 m 的 AA2024 - T351 板材, 用摩擦搅拌焊接 (对焊). 试件取 L - T 试件.

Arcan 试件是从母材及焊接后的 AA2024 - T351 板材上用水切割机程序切割而成. Arcan 试件的形状及几何尺寸, 预裂纹与焊区位置如图 1 所示. 研究中, 试件沿焊接中线 (X - Z 平面上, Y = 0 处), 预制疲劳裂纹. 疲劳裂纹长度 $a_0 = 25.4 \text{ mm}$, 与试件宽度的比率恒为 $a/w = 1/6$

复合断裂试验用 MTS 材料试验机加载, 采用位移控制. 由一垂直于试件表面的一台 CCD 数字照相机按一定的时间步长记录裂纹尖端区域的数字图像, 同时, 计算机记录拍照瞬时的载荷. 自制的 Arcan 夹具可轻易实现 I 型单向拉伸到 II 型剪切及 I/II 型间任意角度的复合断裂试验.

本文分别对 AA2024 - T351 母材和焊接后的板材进行了 I 型 ($\theta = 0^\circ$)、II 型 ($\theta = 90^\circ$) 及 I/II 型 ($\theta = 30^\circ, 60^\circ$) 复合断裂试验. 通过裂纹尖端区域的图像的数字图像比对分析, 精确地计算出各种条件下母材及摩擦搅拌焊接焊区裂纹扩展的临界 COD 值、裂纹扩展路径、沿裂纹扩展路径的裂纹扩展量 a 及载荷 - 裂纹扩展长度 ($P - a$) 曲线.

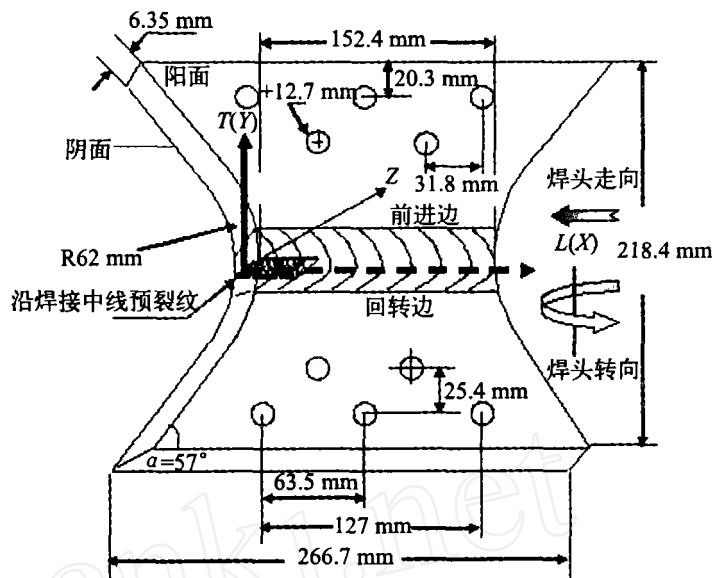


图1 Arcan试件的几何尺寸, 预裂纹与焊区位置示意图

Fig. 1 Scheme of dimension of Arcan specimen, position for pre-crack and joint of FSW

2 计算机视觉技术 临界 COD 测量与计算

计算机视觉是一种对物体的自动识别技术. 此处指计算机化、非接触性的固体结构表面变形测量的一种方法, 称为数字图像比对技术. 该技术可对物体面内位移及三维变形进行测量. 具体原理可参见文献^[10].

获取临界 COD 值的数据采集方法如下: 首先进行制斑. 在试件表面用商业用涂料喷制成每个斑点约 $45 \mu\text{m}$ 大小的黑白图形, 见图 2. 其次进行图像采集. 采用一个 CCD 相机加上长镜头采集裂纹尖端 $7 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 大小的图像. 研究中, 使用的采集系统由一个带有 2X 放大且具有 200 mm 长焦距的 Pulnix CCD 相机加上一个图像采集卡组成. 所有试件拍摄图像放大精度为 $80 \sim 100 \text{ pixel/mm}$. 然后, 加载系统采用位移控制, 并从电脑显示器上观察裂纹扩展. 这样, 裂纹尖端区域的图像的获得将处于以下两种时刻 (a) 裂纹刚开始扩展或 (b) 裂纹刚扩展完一小步. 图 2 表示用于裂纹扩展中临界 COD 计算的两幅数字图像. 当获得一幅图像后, 载荷、位移继续增加, 不断重复上述过程, 直到裂纹变成不稳定扩展为止.

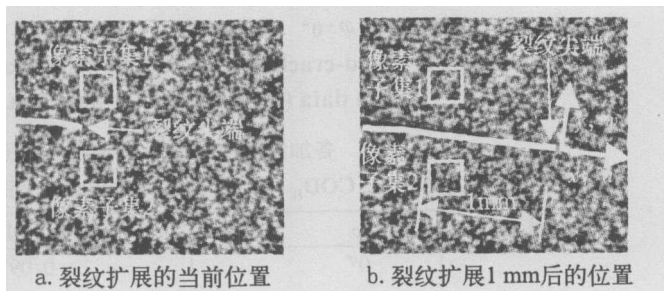


图2 临界COD的计算方法示意图

Fig.2 Schemae of critical COD calculation

当获取裂纹扩展的各阶段数字图像后, 在当前位置的裂纹尖端后一定位置处沿裂纹方向上下取两个像素子集, 与裂纹扩展 1 mm 后的图像中两子集的位置比较, 即可测量试件表面平面位移, 进而计算当前位

置的裂纹扩展的临界 COD 的值. 研究中采用二微数字图像比对技术, 后处理数字图像, 并计算焊区和母材中裂纹扩展全程的临界 COD 值及其分量— COD_I 和 COD_{II} . 临界 COD 定义为裂纹尖端后面沿裂纹方向 1 mm 处裂纹上下表面的相对张开位移^[8-10]. 局部对应于 I 和 II 型裂纹的临界 COD 分量— COD_I (当地垂直于裂纹面的张开位移) 和 COD_{II} (当地平行于裂纹面的滑开位移) 将是裂纹扩展量 a 的函数, 分别可表示为:

$$COD = \{ (u_2 - u_1)^2 + (v_2 - v_1)^2 \}^{1/2} \quad (1)$$

$$COD_I = v_2 - v_1 \quad (2)$$

$$COD_{II} = u_2 - u_1 \quad (3)$$

此处 (u_i, v_i) 是裂纹尖端局部, 沿垂直于裂纹面的 x 和沿裂纹扩展方向 y 方向, 两子集 1 和 2 的裂纹表面位移分量.

3 实验结果和计算结果

图 3 为 AA2024 - T351 母材在 $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 加载下的载荷 - 裂纹扩展长度 ($P - a$) 曲线、相应的平均临界 COD 值及对应裂纹扩展路径. 图 4 为焊区裂纹, 在 $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 加载下的载荷 - 裂纹扩展长度 ($P - a$) 曲线、相应的平均临界 COD 值及裂纹扩展路径. 图 5 为母材及焊区裂纹在 $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 加载下的 COD_I 和 COD_{II} 与裂纹扩展量 (a) 关系的计算结果. 表 1 表示各加载角度下母材及焊区平均临界 COD、 COD_I 和 COD_{II} 及断裂类型. 定义 $k = P_{max}(\varphi) / P_{max}(0^\circ)$. 其中, $P_{max}(\varphi)$ 为各角度下的最大载荷; $P_{max}(0^\circ)$ 为 $\varphi = 0^\circ$ 的最大载荷. 则 k 可表示各角度下裂纹扩展的最大载荷与 $\varphi = 0^\circ$ 的最大载荷间的比例关系. 结果也如表 1 所示.

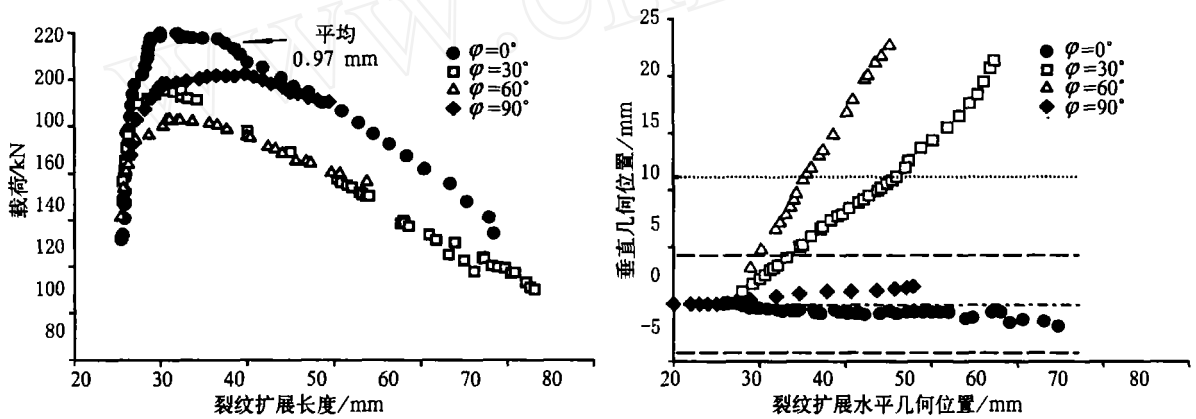


图3 母材裂纹在 $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ 加载下的 $P-a$ 曲线、临界 COD 值(左图)及裂纹扩展路径(右图)

Fig. 3 Load-crack extension data with measured total COD values(left figure) and crack path data (right figure) for base metal at $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ loading

表 1 各加载角度下母材及焊区的 k 值、COD、 COD_I 和 COD_{II} 及断裂类型

Tab 1 k, COD, COD_I, COD_{II} and mode domination at different loading angles for Base Metals and FSW's joints

材料		k	临界 COD/mm	COD_I /mm	COD_{II} /mm	断裂类型
母材	0°	1	0.097	0.097	0.005	I型
	30°	0.87	0.096	0.096	0.010	I型
	60°	0.80	0.097	0.096	0.013	I型
	90°	0.88	0.098	0.014	0.097	I型
焊区	0°	1	0.081	0.080	0.004	I型
	30°	0.87	0.082	0.078	0.021	复合型
	60°	0.84	0.083	0.066	0.050	复合型
	90°	0.92	0.087	0.008	0.087	I型

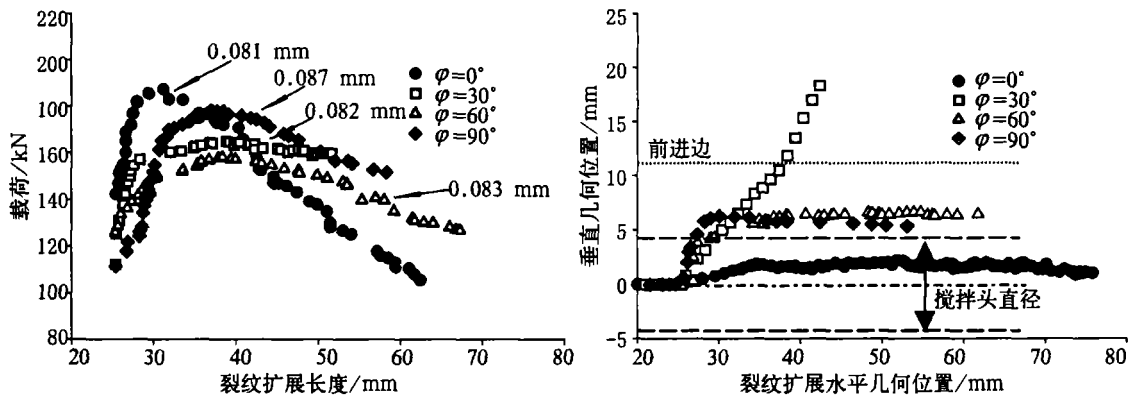


图4 焊区裂纹在 $\varphi=0^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90° 加载下的 P - a 曲线、临界 COD 值(左图)及裂纹扩展路径(右图)
 Fig.4 Load-crack extension data with measured total COD values(left figure) and crack path data (right figure) for FSW's joint at $\varphi=0^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90° loading

4 结果分析与讨论

各种加载角度下的载荷 - 裂纹扩展长度 ($P - a$) 曲线 (见图 3、4 左图) 及表 1 中 k 值表明: 对母材和焊区 (a) I 型裂纹能承受的载荷最大, (b) 随着远场剪切载荷的增加 (增大), 裂纹体的承载能力降低 (最大可达 20%) (c) 焊缝区的最大承载能力与母材相比, 也降低了 20%。这是可以预见的, 这是因为 AA2024 - T351 焊接后由于显微结构的变化, 显微硬度和屈服强度降低所致。

对临界 COD 分量 - COD_I 和 COD_{II} 与裂纹扩展量 (a) 关系曲线 (见图 5) 及其分析结果 (见表 1) 表明: (a) 母材和焊缝区断裂表现各不相同, 母材在 $\varphi = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ$ 加载下由 I 型断裂主导 (COD_I 平均为 0.096 mm, 而 COD_{II} 小于 0.01 mm); $\varphi = 90^\circ$ 时, 由 II 型断裂主导 (COD_I 为 0.015 mm, 而 COD_{II} 为 0.097 mm)。(b) 焊缝区 $\varphi = 0^\circ$ 加载下, 由 I 型断裂主导 (COD_I 为 0.080 mm, 而 COD_{II} 为 0.004 mm); $\varphi = 90^\circ$ 时, 由 II 型断裂主导 (COD_I 为 0.008 mm, 而 COD_{II} 为 0.087 mm)。但 $\varphi = 30^\circ, 60^\circ$ 加载下, 为复合型断裂。特别是 $\varphi = 60^\circ$ 时, COD_I 与 COD_{II} 相近 (COD_I 为 0.066 mm, 而 COD_{II} 为 0.050 mm)。这与随后试件断口形貌的检查和断口的金相分析结果一致。

对图 3、4 中各种角度加载下的平均临界 COD (标于 $P - a$ 曲线上及表 1 中) 分析表明: 沿稳定扩展的扩展路径, 各型裂纹尖端的临界 COD (a) 基本相同。母材平均为 0.097 mm, 焊区平均为 0.083 mm, 焊缝区降低 15%。(b) 临界 COD 值基本独立于加载角度。这两点特性极有意义, 使得用临界 COD 来衡量焊接材料的断裂韧性变得现实。这与其它金属材料的研究结果^[8,9] 完全吻合。故临界 COD 不仅可作为参数来衡量金属材料的断裂韧性, 也可衡量像焊缝区这样不均质、各向异性、应力应变呈梯度分布的材料断裂韧性。

结合裂纹的扩展路径 (见图 3、4 右图) 分析发现, 焊区裂纹在 (a) $\varphi = 0^\circ, 30^\circ$ 的扩展路径与母材相似; 在 (b) $\varphi = 90^\circ$ 时, $a = 5$ mm 后, 扩展路径与母材相似; (c) $\varphi = 60^\circ$ 时, $a = 5$ mm 前, 扩展路径与母材相似; $a = 5$ mm 后, 裂纹沿焊区受搅拌区域的边沿扩展。这与母材截然不同。同时考虑到 $\varphi = 90^\circ$ 时, $a = 5$ mm 前, 多次重复实验都表明焊区裂纹扩展路径与 $\varphi = 60^\circ$ 时相同这一特点, 说明摩擦搅拌焊接后晶粒的重结晶、第二相粒子的破碎与重新分布等改变的显微结构对复合裂纹初期扩展有导向作用。这部分内容将另文给出。

5 结束语

采用二维计算机视觉技术对 I/II 型裂纹的断裂研究是一种新方法, 有其独特的优点, 切实可行的。本文研究表明距裂纹尖端后某一固定距离的临界 COD 可反映焊区的断裂韧性; 临界 COD 值反映出复合型裂纹的扩展受 I 型或 II 型裂纹扩展主导。故临界 COD 不仅可作为参数来衡量金属材料的断裂韧性, 也可

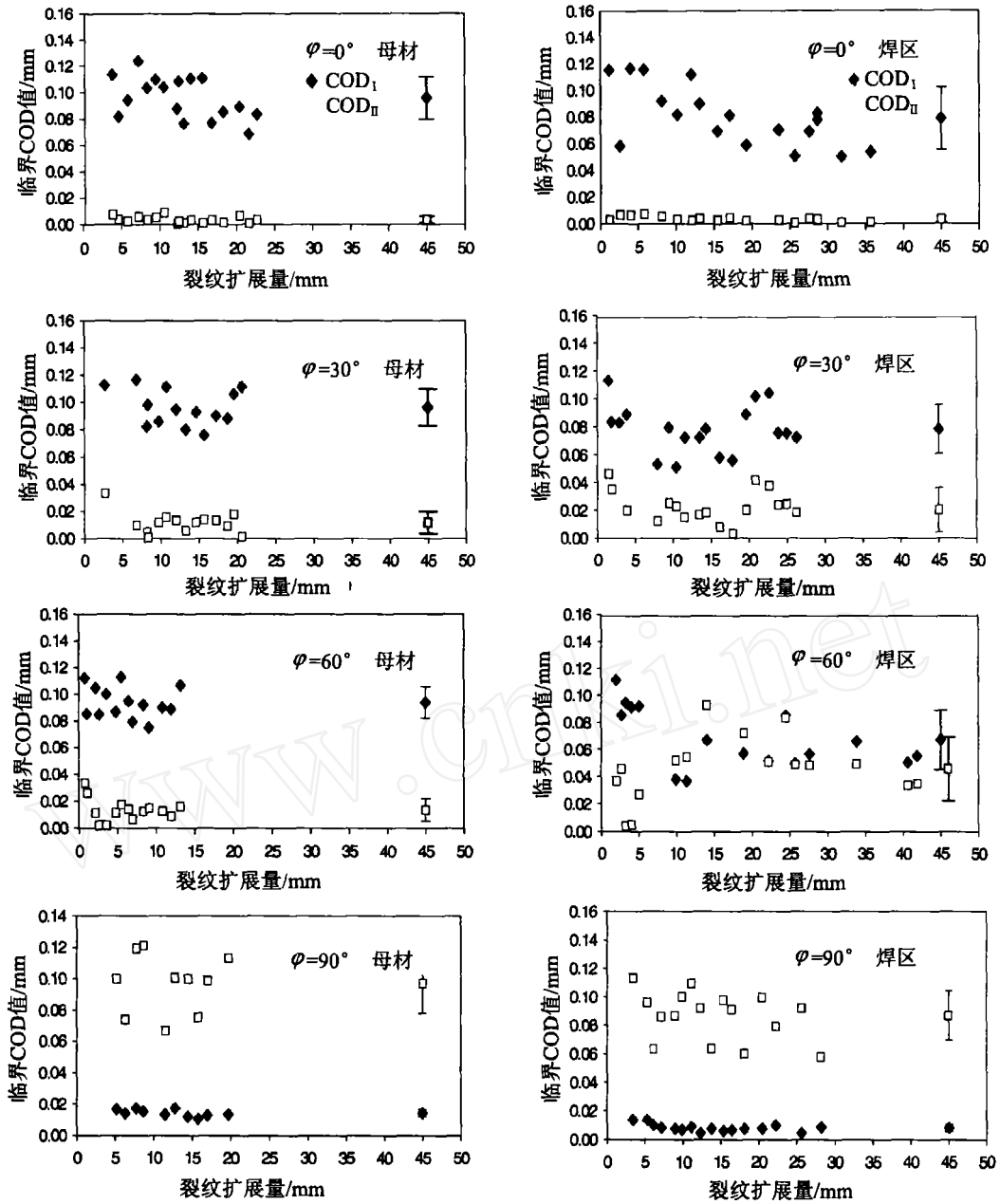


图5 母材及焊区裂纹在 $\varphi=0^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90° 加载下的 COD_I 和 COD_{II} 与裂纹扩展量 (Δa) 关系图
 Fig.5 COD_I and COD_{II} versus crack extension of base material and FSW's joints at $\varphi=0^\circ$ 、 30° 、 60° 、 90° loading

衡量像焊缝区这样不均匀、各向异性、应力应变呈梯度分布的材料断裂韧性,具有普遍性。

应当指出,焊区的焊接性能与焊接参数有关,临界 COD 也会是焊接参数的函数.正因为如此,临界 COD 又可作为焊接参数的优化依据。

本文的研究得到了美国 University of South Carolina 及 Prof MA Sutton 和 Prof AP Reynolds 资金上、实验上、计算上的支持.作者在此深表谢意。

参考文献:

[1] Thomas WM, Nicholas ED, Needham JC, et al International Patent Application[J]. No PCT/GB92/02203.
 [2] Daves CJ. Introduction to friction stir welding and its development[J]. Welding and Metal Fabrication, 1995, 63(1): 15~

不多,但汞含量较高;另外,垃圾中废纸张、杂草树枝树叶、厨余垃圾、橡胶、塑料、皮革、纤维制品中都含有汞,这些垃圾中汞含量虽然相对较低但数量庞大,也是汞源的重要贡献因子。重金属汞具有分压低,极易挥发的特性,有资料表明,在焚烧过程中,垃圾中 80% 以上的汞就会挥发进入烟气,大约只有不到 20% 的汞分布在渣相中,挥发的汞大部分以单质汞的形式存在,另外还有 HgCl_2 、 HgO 等存在形式。试验中烟气出焚烧炉后,经急冷塔湿式洗气,再通过除尘设备除尘,再经引风机通过烟囱排放,这个过程基本上可以将烟气中 HgCl_2 等含汞物质脱出,然而元素态的 Hg 以我们目前的实验手段可能不易被凝结去除。

5.3 实验改进对策^[3,4]

针对 2004 年 4 月 1 日实验中出现的烟气中汞含量较高的现象,为了降低烟气中汞的排放浓度,我们实施了改进方案:在急冷塔湿式洗气后除尘器前安装吸附剂滤床加强对汞金属的吸附,拟选用的吸附剂有活性炭、海泡石等。目前这项研究工作正在进行当中。

6 结论

通过在自行研制的 MSW I-10 型城市生活垃圾焚烧炉上进行的工业扩大化试验表明,通过补充辅助燃料,对于不进行严格分拣的昆明地区的生活垃圾焚烧炉能以 80.14% 的生产负荷连续平稳运行。经过一些净化措施烟气 SO_2 、 HCl 等酸性污染物远远低于国家排放标准,烟气中烟尘、 CO 、 NO_x 、 HCl 、 Cd 、 Pb 的排放浓度都符合国家排放标准,但 Hg 的排放浓度出现超标,其迁移和分布、排放特性及脱离规律有待我们进一步去研究。

参考文献:

- [1] 田文栋,魏小林. 城市固体废弃物的焚烧实验 [J]. 中国环境科学, 2001, 21(1): 49 ~ 53
- [2] 王华. 二恶英零排放化城市生活垃圾焚烧技术 [M]. 北京:冶金工业出版社, 2001. 83
- [3] 赵有才. 环境工程化学 [M]. 北京:化学工业出版社, 2003. 499 ~ 500
- [4] 葛俊,徐旭,张若冰,等. 垃圾焚烧重金属污染物控制现状 [J]. 环境科学研究, 2001, 14(3): 63 ~ 64

(上接第 82 页)

- [3] Murr LE, Li Y, Trillo EA, et al. Fundamental issues and industrial applications of friction - stir welding [J]. Materials Technology, 2000, 15(1): 37 ~ 48
- [4] Jata KV. Friction stir welding of high strength aluminum alloys[J]. Materials Science Forum, 2000, 331 (ID: 1701 ~ 1712
- [5] Daves CJ, Thomas WM. Friction stir process welds aluminum alloys[J]. Welding Journal, 1996, 75(3): 41 ~ 45.
- [6] Nicholas ED, Thomas WM. Review of friction processes for aerospace applications [J]. International Journal of Materials & Product Technology, 1998, 13(1 - 2): 45 ~ 55.
- [7] Sutton MA, Yang B (杨邦成), Reynolds AP, et al. Microstructural studies of friction stir welds in 2024 - T3 aluminum [J]. Materials Science and Engineering A, 2002, 323(1 - 2): 160 ~ 166
- [8] Sutton MA, Ma F, Deng F. Development and Application of a CTOD - Based Mixed Mode Fracture Criterion [J]. International Journal for Solids and Structures, 2000, 37(1): 3591 ~ 3618
- [9] Sutton MA, Boone ML, Ma F, et al. A combined modeling - experimental study of the crack opening displacement criterion for characterization of stable crack growth under mixed mode I/II loading in thin sheet materials [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2000, 66(3): 171 ~ 185
- [10] Sutton MA, McNeill SR, Helm JD, et al. Advances in Two - dimensional and Three - dimensional Computer Vision [J]. Photomechanics, Springer Verlag Topics in Applied Physics, 1999, 77(2): 323 ~ 372