

2219 铝合金搅拌摩擦焊接头裂纹尖端张开位移 (CTOD) 试验研究

杜岩峰^{1,2}, 田志杰², 王 一², 张彦华¹

(1. 北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083; 2. 首都航天机械公司, 北京 100076)

摘 要: 采用裂纹尖端张开位移 (crack tip opening displacement, CTOD) 试验研究了 2219 铝合金搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 接头各区域的断裂性能, 分析了搅拌摩擦焊接头组织结构对接头断裂性能的影响. 研究表明, 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头的断裂呈韧性, 但接头各区域韧性分布呈现明显的不均匀性, 焊核区断裂韧性最好, 热机影响区和热影响区次之, 但均高于母材的断裂韧性.

关键词: 2219 铝合金; 搅拌摩擦焊; 裂纹尖端张开位移

中图分类号: TG 407; TG 453

文献标志码: A

文章编号: 0254-0037(2011)09-1287-05

2219 铝合金属于 Al-Cu-Mn 系可热处理强化合金, 是美国 20 世纪 50 年代后期开始研制的一种高强、耐热、可焊铝合金. 2219 铝合金在低温和高温力学、断裂韧性、焊接以及抗应力腐蚀等性能方面具有明显的优势, 因此在问世后不久即被广泛应用于航天产品生产^[1]. 2219 铝合金采用常规熔焊工艺进行焊接, 气孔倾向性比较严重, 易产生气孔缺陷, 而搅拌摩擦焊 (friction stir welding, FSW) 技术^[2] 的出现为该合金的焊接提供了良好的解决方案.

铝合金搅拌摩擦焊接头的断裂性能是确保结构完整性的关键之一, 由于搅拌摩擦焊的形成机理与现有的熔焊工艺完全不同, 接头的组织结构也不相同, 因此搅拌摩擦焊接头的断裂性能相对于熔焊有其特点. 为保证 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头具有合适的强度与韧性储备, 需要对 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头的断裂行为进行深入研究. 目前针对搅拌摩擦焊技术的研究主要集中于工艺、机理等方面, 对接头断裂性能的研究较少. 少数针对搅拌摩擦焊接头断裂方面的研究^[3] 主要采用传统的夏比冲击功来度量搅拌摩擦焊接头的断裂韧性, 但在缺陷评定中有一定的局限性. 裂纹尖端张开位移 (crack tip opening displacement, CTOD)^[4-6] 是评价材料及焊接接头抗裂纹启裂的重要参量, 与传统的夏比冲击韧度比较, CTOD 更能有效准确地评价搅拌摩擦焊接头的断裂性能, 可以为评定结构的安全可靠性提供试验依据^[7]. 因此本文将采用 CTOD 特征参量对搅拌摩擦焊接头的各个典型区域的断裂韧度进行测量和分析, 为搅拌摩擦焊技术的工程应用提供技术支持.

1 试验方法

1.1 试样制备

试验采用 6 mm 厚 2219 铝合金试板, 材料化学成分及力学性能见表 1^[8].

搅拌摩擦焊采用的搅拌头轴肩直径为 24 mm, 探针直径为 6 mm, 长度为 5.8 mm, 焊接参数为旋转速度 800 r/min, 行进速度 220 mm/min, 搅拌头倾角为 2°.

收稿日期: 2011-03-27.

基金项目: 国防基础科研项目 (B0320060553).

作者简介: 杜岩峰 (1977—), 男, 山东莱州人, 高级工程师.

表 1 2219 铝合金化学成分与力学性能
Table 1 Chemical composition and mechanical properties of 2219 Al alloy

牌号	化学成分 w/%							力学性能		
	Cu	Mn	Ti	Zr	V	Al	σ_b /MPa	σ_s /MPa	δ /%	
2219 T87	5.8 ~ 6.8	0.2 ~ 0.4	0.02 ~ 0.1	0.1 ~ 0.25	0.05 ~ 0.15	余量	475	395	10	
T62							415	290	10	

采用带预制裂纹的单边缺口三点弯曲试样对 2219 铝合金母材及搅拌摩擦焊接头各区域进行 CTOD 试验, 取样如图 1 所示. 由于 CTOD 能直接反映裂纹尖端材料组织的韧性, 因此, 欲评价搅拌摩擦焊接头某个区域的韧性, 只需让裂纹尖端落在试样上的目标区域即可. 对于搅拌摩擦焊接头来说, 通常分为焊核区、热机影响区、热影响区以及轴肩影响区 4 个部分, 形貌上宽下窄, 从取样示例来看, 轴肩影响区覆盖了其他 3 个区域, 因此在本试验中取焊核区、热机影响区、热影响区以及母材进行试验, 其中热机影响区和热影响区在前进边和回撤边分别取样, 取样位置如图 2 所示.

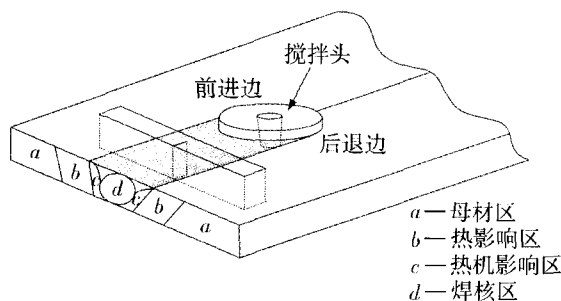


图 1 CTOD 试验取样示意图
Fig. 1 Sample diagram of CTOD

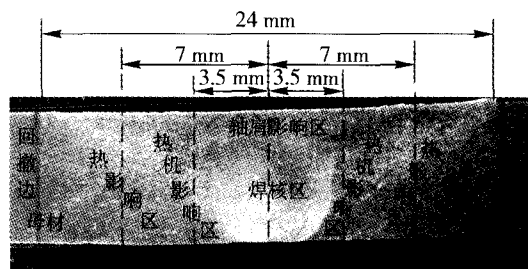


图 2 搅拌摩擦焊接头各区域取样位置
Fig. 2 Sample position of different FSW weld region

试件尺寸依照中华人民共和国国家标准 GB/T2358—94《金属材料裂纹尖端张开位移试验方法》进行加工, 考虑轴肩挤压作用及变形的影响, 取试样厚度为 $B = 5$ mm, 宽度 $W = 4B = 20$ mm, 跨度 $S = 4W = 80$ mm, 长度 $L = 120$ mm, 如图 3 所示.

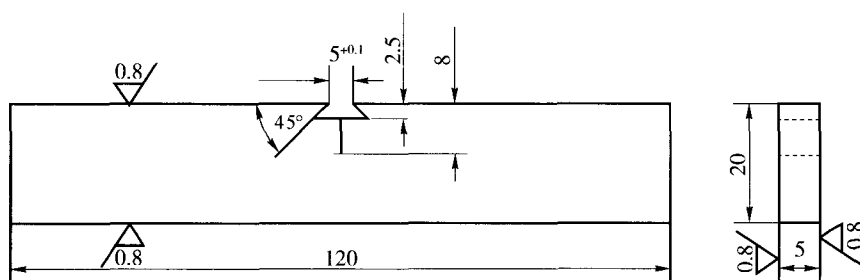


图 3 搅拌摩擦焊接头三点弯曲加工试件
Fig. 3 Three point bend specimen of FSW joints

1.2 试验过程

CTOD 试验在 MTS 810-50 试验机上进行, 每个区域至少取 3 个样, 试验温度为 25 °C, 主要步骤如下:

- 1) 精确测量每个试件的 B 和 W ;
- 2) 采用一次加载方式直到失稳破坏, 参考加载速率为 0.5 ~ 1 mm/min, 同时记录载荷-位移曲线;
- 3) 试件失稳破坏后, 在试验机上快速压断试件, 从断裂试件上取下断口用显微镜测量试件的裂纹长度 a_0 ;
- 4) 在载荷-位移曲线上确定最大载荷, 并测量对应的塑性位移 s_p ;

5) 获得必要的测量数据后, 计算各试件的 CTOD 值.

1.3 CTOD 试验数据计算

根据 GB/T2358—94, 依据特征载荷-位移 ($p-s$) 曲线类型确定 p 与 s , 计算 CTOD 的临界值 δ , 具体计算公式为

$$\delta = \delta_e + \delta_p = \frac{K_1^2 (1 - \mu^2)}{2\sigma_y E} + \frac{r_p (W - a_0) s_p}{r_p (W - a_0) + a_0 + Z} \tag{1}$$

$$K_1 = \frac{Yp}{BW^{1/2}} \tag{2}$$

式中, δ 为临界裂纹尖端张开位移; δ_e 为裂纹尖端张开位移的弹性分量, 式(1)中等式右侧第一项; δ_p 为裂纹尖端张开位移的塑性分量, 式(1)中等式右侧第二项; μ 为泊松比; σ_y 为铝材在试验环境下的屈服强度; E 为铝材在试验环境下的弹性模量; r_p 为塑性转动因子, 对于三点弯曲试件, $r_p = 0.44$; W 为试件宽度; a_0 为原始裂纹长度; s_p 是 $p-s$ 曲线上取值点对应的夹式引伸计张开位移的塑性部分; Z 为引伸计装夹部位到试件表面的距离即刀口厚度, 本试验 $Z = 0 \text{ mm}$; K_1 为根据取值点载荷计算的 I 型应力场强度因子; Y 为试件几何形状因子, 为 a_0/W 的函数, 对于板料 $0.45 < a_0/W < 0.55$, 对于焊缝 $0.45 < a_0/W < 0.7$.

2 试验结果及分析

图 4 为 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头各区域 CTOD 试验完成后的断裂试样. 试验得到的 $p-s$ 线见图

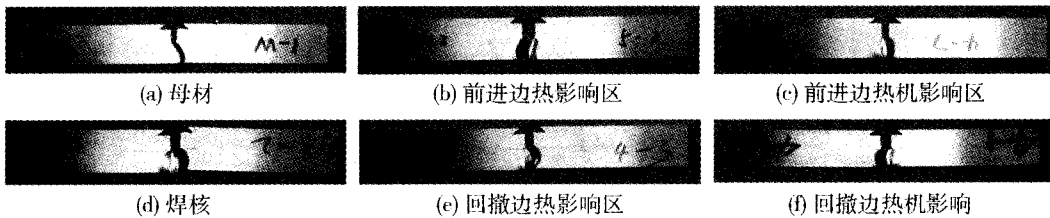


图 4 搅拌摩擦焊接头各区域 CTOD 断裂试样

Fig.4 CTOD specimen of 2219 Al alloy FSW joints

5. 分析 $p-s$ 曲线可以发现, 母材三点弯曲时, 很快就达到最大载荷点并迅速下降, 而热影响区、热机影响区以及焊核区的试件试验过程中均渐次达到最大载荷点, 并且随着位移的增加, 载荷缓慢下降, 均没有出现因为裂纹不稳定扩展造成的曲线陡降. 从图中可以看出, 焊缝前进边和后退边上各区域的 $p-s$ 曲线基本一致, 搅拌摩擦焊接头区域断裂时达到最大载荷点的形式与母材有所不同, 焊缝热影响区在有裂纹条件下承受载荷的能力要弱于热机影响区, 而焊核区在有裂纹的条件下承受载荷的能力最强, 远远高于接头的其他区域, 这说明由等轴细晶粒组织组成的焊核抗裂纹启裂的能力较强.

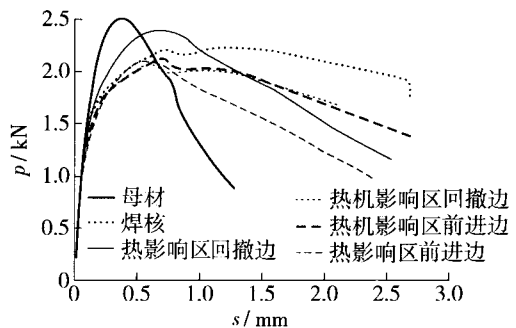


图 5 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头各区域 $p-s$ 曲线

Fig.5 Force-displacement curve of 2219 Al alloy FSW joints

通过式(1)、(2)计算的搅拌摩擦焊接头各区域的 CTOD 分布见图 5. 临界 CTOD 由弹性分量和塑性分量 2 个部分组成, 从图中的数据可以看出各区域 CTOD 的弹性分量差异不大, 但远小于其塑性分量, 因此临界 CTOD 的大小主要由其塑性分量来决定. 从式(1)中 CTOD 的塑性分量计算公式中可以看出, s_p 决定着该值的大小, 而 s_p 是 $p-s$ 曲线上取值点对应的夹式引伸计张开位移的塑性部分, 由此可以确定, 试样的塑性决定着材料的抗脆断能力.

从图6中可以看出,接头的CTOD在焊核中心两侧呈阶梯状对称分布,焊核区的CTOD最大,热机影响区的CTOD次之,且均超过母材的2倍,热影响区的CTOD较小,约为母材的1.5倍,而母材的CTOD最小.前进边各区域的CTOD略小于回撤边的CTOD,但无显著差异. CTOD表征材料抵抗裂纹开裂的能力,其值越大表明材料抵抗裂纹开裂的能力越强,韧性越好.从试验结果看,搅拌摩擦焊接头各区域相对于母材显著提高了材料的抗裂纹开裂的能力.

综合分析图5、6可知,搅拌摩擦焊接头各区域的抗断裂性能呈现明显的不均匀性,由焊核向两端逐步降低,其差值最多可达2倍之多.造成接头抗断裂性能分布的影响因素很多,其中最重要的影响与焊缝的组织结构有关.

从图2可以看出,焊核区的取样位于焊缝中心,对于该区域来说,晶粒在搅拌头探针的搅拌及400~550℃高温的作用下发生剧烈流变和碎化,形成细晶组织结构,如图7(a)所示,极大地提高了此区域的韧性^[9-10].对于热机影响区的取样位置来说,该区域的组织有相当一部分为轴肩作用的细小等轴晶粒组织,并且热机影响区的组织在搅拌摩擦焊过程中既经历了高温影响又承受了搅拌头的挤压变形作用,有一定沉淀相的溶解和析出,晶粒发生明显弯曲变形,是细晶与变形晶粒的混合组织,见图7(b),导致该区域的塑韧性相较于焊核有一定程度降低,但也显著高于母材的塑韧性.对热影响区的取样位置而言,该区域仅包括一小部分细小等轴晶粒组成的轴肩影响区组织,其余大部分为仅经历了热循环作用的热影响区组织,在该区域内晶粒大小较母材没有太大变化,但晶界有一定的粗化现象,见图7(c),该区相当于经历了退火过程,导致该区域的塑韧性相对于热机影响区有较大的下降,但仍明显高于母材的塑韧性.

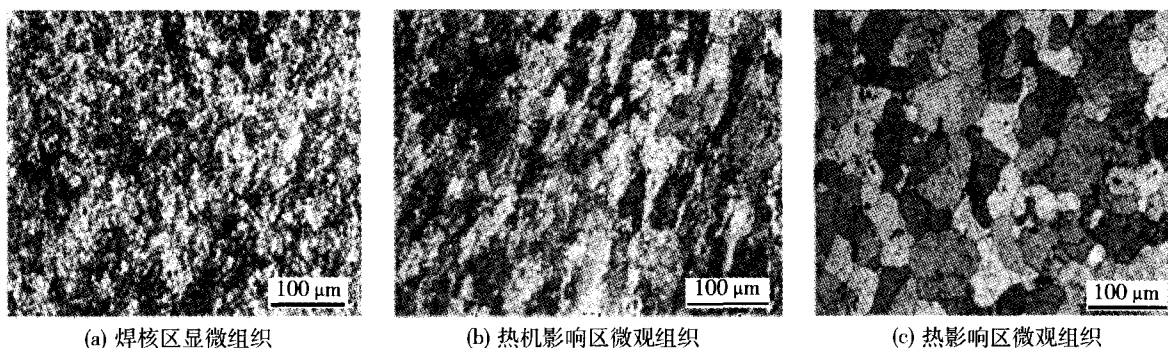


图7 搅拌摩擦焊接头显微组织
Fig.7 Microstructure of FSW joints

综上所述可以看出,CTOD试验可全面反映搅拌摩擦焊接头的抗断裂性能^[8-10].2219铝合金搅拌摩擦焊接头各区的临界CTOD具有较大的差异,表明接头组织结构与性能的不均匀性.在搅拌摩擦焊应用中应重视这一不均匀性对结构整体性能的影响.

3 结论

1) 从试验结果可以看出,2219铝合金搅拌摩擦焊接头各区表现出了比较明显的延性断裂特征.搅拌摩擦焊接头各区域的塑韧性具有明显的不均匀性,焊核区、热机影响区的CTOD较大,超过母材的2倍,热

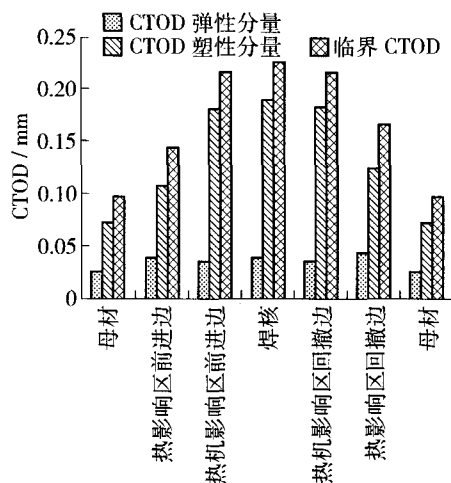


图6 2219铝合金搅拌摩擦焊接头各区域三点弯曲CTOD
Fig.6 Three point bend CTOD values of different specimen

影响区的 CTOD 次之,约为母材的 1.5 倍,而母材的 CTOD 最小. 前进边各区域的 CTOD 略小于回撤边的 CTOD,但无显著差异. 结果表明 2219 铝合金搅拌摩擦焊接头各区域的断裂韧性高于母材.

2) 搅拌摩擦焊接头各区抗开裂性能的差异是接头组织结构所决定的. 焊核区细晶组织的韧性高,热机影响区混合组织的韧性次之,热影响区的退火作用则与原始母材状态有关.

参考文献:

- [1] 刘春飞. 运载贮箱用 2219 类铝合金的电子束焊[J]. 航天制造技术, 2002(8): 3-9.
LIU Chun-fei. 2219 tank carried made by the electron beam welding[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2002(8): 3-9. (in Chinese)
- [2] MIDLING O T, MORLEY E J, SANDYIK A. Norskhydro, rights transferred to TWI friction stir welding: European, EP0752926B1[P]. 1998-05-27.
- [3] 柴鹏. 6063 铝合金搅拌摩擦焊接头冲击断裂分析[J]. 焊接学报, 2005, 26(9): 27-30.
CHAI Peng. 6063 analysis on the impact fracture of friction stir welded aluminum alloy[J]. Welding Technology, 2005, 26(9): 27-30. (in Chinese)
- [4] HE Min, LI Fu-guo. Modified transformation formulae between fracture toughness and CTOD of ductile metals considering predeformation effects[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77: 2763-2771.
- [5] LIAO Min. Dislocation theory based short crack model and its application for aircraft aluminum alloys[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2010, 77: 22-36.
- [6] SHA J B, SUN J, DENG Z J, et al. Micro-crack tip fracture of commercial grade aluminum under mixed mode loading[J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 1999, 31: 119-130.
- [7] 霍立兴. 焊接结构的断裂行为及评定[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [8] 王祝堂, 田荣璋. 铝合金及其加工手册[M]. 3 版. 长沙: 中南大学出版社, 2005.
- [9] SATO Y S, URATA M, KOKAWA H. Recovery retardation in equal channel angular pressed Al-Zr alloy during friction stir welding. Scripta Materialia, 2002, 47(12): 869-873.
- [10] CESCHINI L, BOROMEI I, MINAK G, et al. Microstructure tensile and fatigue properties of AA6061/20% Al₂O₃p friction stir welded joints[J]. Applied Science and Manufacturing, 2007, 38(4): 1200-1210.

CTOD of 2219 Aluminum Alloy Friction Stir Welded Joints

DU Yan-feng^{1,2}, TIAN Zhi-jie², WANG Yi², ZHANG Yan-hua¹

(1. Beihang University, Mechanical Engineering and Automation, Beijing 100083, China;

2. Capital Aerospace Machinery Corporation, Beijing 100076, China)

Abstract: Fracture property of different regions of 2219 aluminum alloy friction stir welds was studied in terms of crack tip opening displacement (CTOD). Three-point bending specimens were used to measure the fracture toughness of various regions of 2219 aluminum alloy friction stir welds. CTOD values were calculated according to *p-s* curves obtained. Results show that the fracture of 2219 aluminum alloy friction stir weld is ductile and the distribution of fracture toughness is heterogeneous; the fracture toughness of weld nugget is the best following thermal-mechanical affected zone and heat affected zone, and base material is the weakest.

Key words: 2219 Aluminum alloy; friction stir welding (FSW); crack tip opening displacement(CTOD)

(责任编辑 吕小红)