

# 未焊透缺陷深度对 LY12 铝合金搅拌摩擦焊焊缝电导率的影响

Effect of the Lack of Penetration on the Conductivity of  
LY12 Aluminum Alloy Friction Stir Welds

张小帆, 邢 丽, 杨成刚, 柯黎明

(南昌航空大学 材料热加工技术航空科技重点实验室, 南昌 330063)

ZHANG Xiao-fan, XING Li, YANG Cheng-gang, KE Li-ming

(Aeronautical Key Laboratory of the Hot-working Technology for  
Materials, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**摘要:** 采用涡流电导测量仪, 测量了 LY12 铝合金搅拌摩擦焊垂直于焊缝方向的电导率分布及具有不同深度未焊透缺陷处焊缝的电导率。结果表明, 焊缝中部电导率较高, 母材电导率较低, 存在一过渡区, 各区的电导率变化与其组织变化有关。未焊透深度对焊缝电导率分布曲线有影响。当未焊透深度较小时, 其焊缝中心电导率相对无缺陷时变化不大。当未焊透深度较大时, 其焊缝中心电导率值急剧下降, 且未焊透深度越大, 电导率值越低。

**关键词:** 搅拌摩擦焊; 未焊透; 涡流; 电导率

中图分类号: TG453.9 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2010)02-0013-04

**Abstract:** The eddy current conductivity gauge was used to measure the conductivity distribution of the weld cross section and the conductivity at the original weld line with different depth of the lack of penetration (LOP) defect in the friction stir weld of LY12 aluminum alloy. The results show that, the conductivity in the nugget zone is higher than the base metal, and there is a transient zone between these two areas. The variation of conductivity is related with the microstructure in the weld. The depth of the LOP defect affects the distribution of the conductivity in the weld. If the depth of the LOP is small, the conductivity of the welds is almost same as the welds without any defect. On the contrary, If the depth of the LOP is big, the conductivity at the centre of the weld decreased dramatically, and the deeper the defect is, the lower conductivity is.

**Key words:** friction stir welding; LOP; eddy current; conductivity

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW)在轻金属材料连接方面具有诸多优点,如接头疲劳、拉伸和弯曲性能良好;焊接时无飞溅、不需使用保护气体;焊后接头残余应力和变形小<sup>[1]</sup>;接头内不形成气孔和热裂纹缺陷<sup>[2]</sup>。正是由于上述优点,目前该焊接方法在航空航天、船舶以及汽车制造等工业领域正在得到广泛的应用。随着应用范围的不断扩大,如何检测和评价FSW焊缝质量已成为目前FSW和无损检测领域的一个重要课题<sup>[3]</sup>。目前国内外对FSW的无损检测技术处于缺陷表征与检测方法探索、技术积累阶段<sup>[4]</sup>。

电导率与金属微观组织、力学性能的关系,已越来越引起人们的重视并得到利用。例如对铝合金进行不同方式的热处理时,铝合金内部组织发生变化,从而引

起电导率的变化<sup>[5]</sup>。利用这一原理,涡流电导率法作为对铝合金热处理状态和质量判断的可靠方法已得到了广泛的应用<sup>[6]</sup>,但该方法应用在搅拌摩擦焊焊缝的检测上很少。FSW焊缝区的缺陷具有明显的紧贴、细微的特点,本实验采用涡流电导率法,通过测量焊缝区电导率的分布特征,研究搅拌摩擦焊未焊透缺陷对涡流电导率的影响。

## 1 实验方法

用CZ状态LY12铝合金板材,进行FSW对接焊,板材尺寸为300mm×75mm×6mm,制备未焊透缺陷试件。采用同样尺寸的板材,用相同的焊接参数进行平铺焊。

实验在 X53K 型立式铣床改装的搅拌摩擦焊机上 进行焊接。采用的搅拌头轴肩直径为 13mm, 搅拌针 长度为 2.8mm 且带右螺纹。焊接工艺参数为搅拌头 行走速度为  $60\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 旋转速度为  $750\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ , 搅拌头倾斜角为  $2^\circ$ 。

焊接完成后, 将两个试板上的焊缝背面沿焊缝方 向均等分为六段, 每段用铣床逐次切铣不同厚度值, 制 备出不同深度的搅拌摩擦焊未焊透(简称 LOP) 试样和同样焊缝尺寸不同板厚的平铺焊试样。图 1 为试样 的制备示意图。

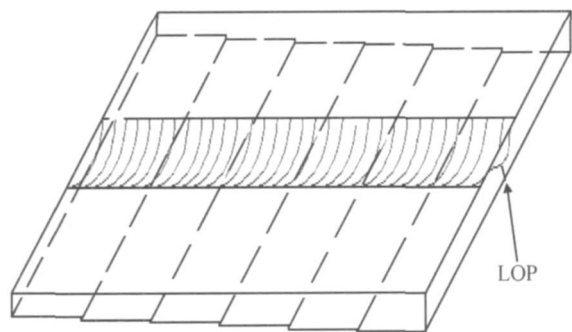


图 1 FSW 试样的制备

Fig. 1 Preparation of FSW specimen

用 Auto Sigma 3000DL 电导率测量仪检测试样 上的电导率, 本实验选择 60kHz 工作频率。在 FSW 焊接试样的焊缝背面用涡流电导率探头沿垂直于焊缝 的方向每间隔 1mm 的距离测量电导率值, 如图 2 所 示。将测量的电导率值绘制成垂直于焊缝方向上的电 导率分布, 得到对接焊时未焊透缺陷对电导率的影响 和平铺焊时板厚对焊缝上电导率的影响。

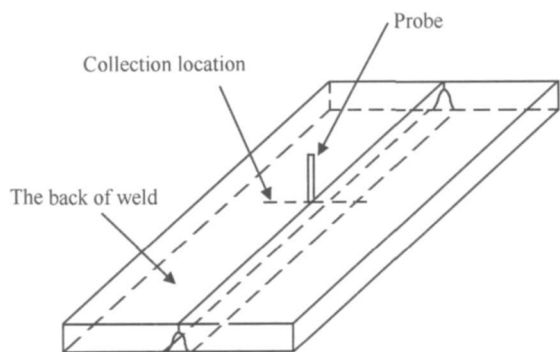


图 2 涡流电导率采集示意图

Fig. 2 Sketch map of eddy current conductivity collection

## 2 实验结果与分析

### 2.1 焊缝上的电导率分布

图 3 为含有未焊透缺陷的搅拌摩擦焊焊缝横截面

形貌, 其中 A 为母材 (Base metal); B 为热影响区 (HAZ), 该区受到了从焊接区传导过来的热量的影 响; C 区为热力影响区 (TMZ), 该区既受到搅拌针对 其产生的塑性变形影响, 又受到焊接温度的影响; D 区 为焊核 (DXZ), 是两块焊件的共有部分。H 为试样的 未焊透深度。

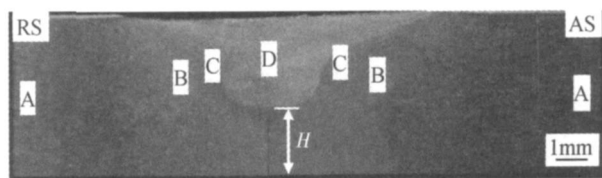


图 3 焊缝横截面宏观形貌

Fig. 3 Macrograph feature of weld cross section

图 4 为在 FSW 对接焊试样测量的不同深度未焊 透缺陷的电导率分布。图中纵坐标为电导率值, 横坐 标轴为距离焊缝中心距离。未焊透深度 H 分别为 0, 0.2, 0.7, 1.2, 1.7, 2.2mm。从图 4 可以看出, 焊缝横 截面上的电导率分布特征是, 母材上的电导率最低, 从 热影响区开始随距母材的距离增加, 即越往焊缝中心 靠近, 电导率逐渐升高, 到达热力影响区电导率到最大 值。焊核区的电导率比热力影响区略低。当未焊透深 度 H 小于 1.2mm 时, 焊缝中心区域的电导率数值比 热力影响区的稍有下降, 在焊缝无未焊透 (即 H = 0) 时, 焊缝中心电导率值最低。随未焊透深度 (H < 1.2) 增加, 电导率稍有增加, 但不明显。当 H 再增加 (H > 1.2) 时, 随 H 增加, 电导率明显降低。当未焊 透深度 H 为 2.2mm 时, 焊核中心的电导率明显下 降。

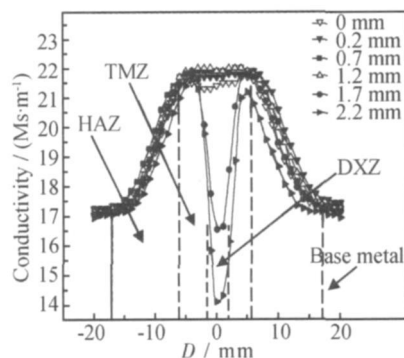


图 4 不同未焊透深度时焊缝的电导率分布

Fig. 4 Conductivity distribution of butt weld

图 5 为平铺 FSW 焊接头的电导率分布。图中 h 值为焊核底部距离焊缝底面的距离, 分别为 0, 0.5, 1.0, 1.3, 1.9mm。从图 5 可以看出, 电导率沿焊缝横 向截面的分布与图 4 的相近, 不同板厚的母材处的电

导率基本相同,说明板厚对电导率的影响不大。热影响区与热力影响区的电导率分布规律也相似,均是从热影响区开始,越靠近焊缝中心电导率值越高,到达热力影响区升到最大。在焊缝中心区,当焊核底部距离焊缝底面的距离  $h$  小于 1.3mm 时,其电导率分布与图 4 也相似,随着  $h$  增大,电导率呈略上升的趋势。当  $h$  为 0mm 时的电导率最低,然后随着  $h$  增加,电导率也增加。但与图 5 不同的是,当  $h$  为 1.9mm 时,电导率从焊缝中心的最高点处开始,随着离焊缝中心距离的增大电导率值逐渐降低,最后到达母材。

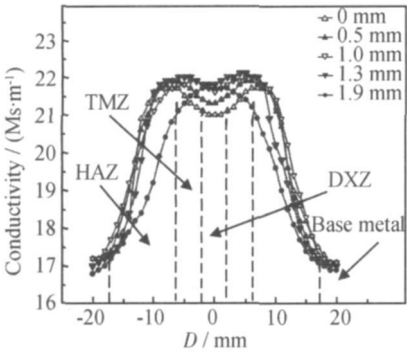


图 5 焊核距底部不同距离时平铺焊的电导率分布  
Fig. 5 Conductivity distribution of overlaying weld

图 6 为距焊核底部不同距离时,焊缝中心的电导率值。从图 6 可以看出,大于 1.7mm 深的未焊透缺陷对电导率的影响很大,在未焊透处电导率急剧下降,

而平铺焊试样的焊缝中心电导率值变化很小。小于 1.3mm 深的未焊透缺陷对电导率的影响比较小,此时主要是焊缝组织的变化影响电导率。

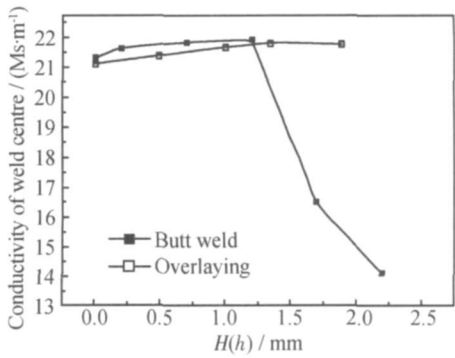


图 6 焊缝中心电导率值  
Fig. 6 Conductivity in center of weld

2.2 焊缝组织的变化对电导率的影响

图 7 是搅拌摩擦焊焊缝各区域的显微组织形貌。图 7(a) 是母材,由于母材中的强化相粒子在点阵中分布不均匀,电子散射很大,电导率最低。

图 7(b) 是热影响区组织形貌,在焊接过程中仅受到热循环作用,该区晶粒没有发生形变,相对于母材有粗化现象。略为粗大的晶粒在一定程度上降低了散射率,从而提高了电导率。随着离焊缝中心距离的增加,焊接热影响减弱,电导率逐渐降低,最后到达母材区。

图 7(c) 是热力影响区组织形貌,其受到的搅拌针作用会小于焊核区,这部分材料发生了较大程度的变

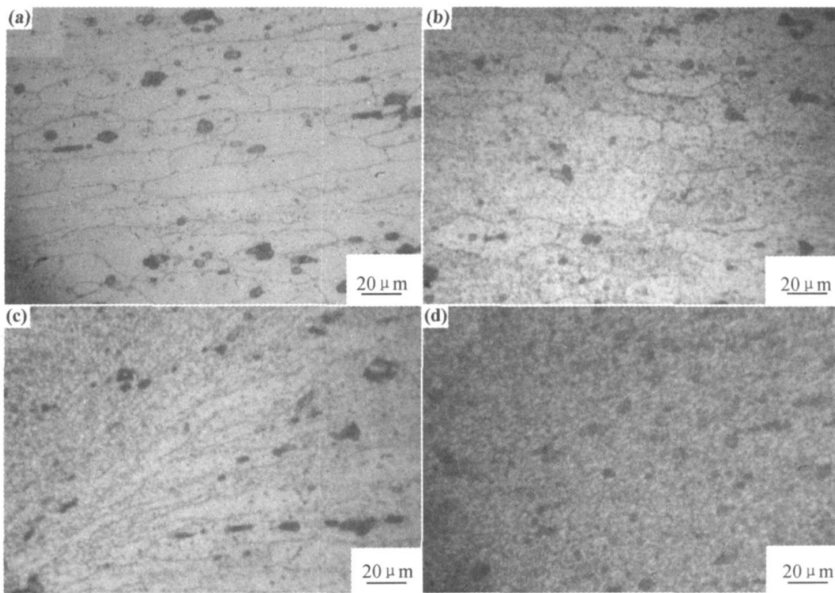


图 7 搅拌摩擦焊焊缝各区域微观组织形貌 (a) 母材; (b) 热影响区; (c) 热力影响区; (d) 焊核  
Fig. 7 Microstructure feature of each area in FSW weld (a) base metal; (b) HAZ; (c) TMZ; (d) DXZ

形,并且在热循环的作用下发生回复。该区域较强的焊接热作用使得 CZ 状态的铝合金固溶体完成有序化,对自由电子的散射率显著降低,使得电导率上升。压应力作用下的塑性变形使原子振幅减小,使得电阻率降低,即电导率升高。综合上述因素,热力影响区在整个焊缝接头区表现出很高的电导率。

图 7(d) 是焊核区组织形貌,该区由于受到搅拌针的强烈搅拌作用,经历了较高温度的热循环,组织发生动态再结晶。一方面动态再结晶过程消除了形变造成的点阵畸变和晶体缺陷,位错密度比两侧热力影响区低,降低了自由电子的散射率,使电导率上升;另一方面,热循环和强烈的搅拌作用转化形成的等轴细小晶粒,使得晶界数量显著增多,增大了电子散射几率,降低了电导率。所以焊核区电导率呈现出高于母材区又略低于两侧的热力影响区的特征。

综上所述,各区域组织对电导率的影响情况为:热力影响区电导率最高;焊核的电导率值介于母材区与热力影响区之间;热影响区电导率随着离焊缝中心距离越远,电导率值越低,最后到达母材区。

图 8 为平铺焊时焊核正下方微观组织。从图 8 可以看出,平铺试样中焊核下方组织与焊核两侧的组织相似,也经历了热和热力作用,呈现出明显的组织变化,因此测量焊核下方电导率时引起电导率变化。

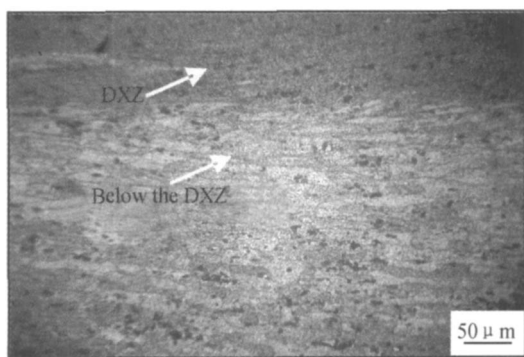


图 8 焊核下方微观组织

Fig. 8 Microstructure below the DXZ

当未焊透深度和平铺焊试样焊核底部距离焊缝底面的距离(即  $H/h$ )不同时,涡流电导率仪检测到的焊缝组织也不同。随着  $H$  减小,涡流电导率仪所测的区域越接近焊核区。对于平铺焊试样, $H$  的变化引起的电导率变化是由热影响区、热力影响区和焊核区的组织不同导致。对于有未焊透缺陷的试样,所检测的电导率变化是由未焊透缺陷、热影响区、热力影响区和焊核区引起的。未焊透深度较小,距焊核近时,焊核底部的未焊透缺陷受到搅拌针挤压作用较大,使未焊透缺

陷间隙更小,导致用电导仪无法检测出缺陷信号。当未焊透  $H$  小于 1.3mm 时,电导仪所测的区域只是测到焊核下部的热力影响和热影响区组织对电导的影响。当未焊透  $H$  大于 1.3mm 时,由于  $H$  的增大,未焊透缺陷间隙也增大,此时,电导率的变化反映了未焊透缺陷及焊缝组织的变化,且随未焊透缺陷深度  $H$  增大,电导率值急剧下降。

### 3 结论

(1) 搅拌摩擦焊焊缝中各区域组织的变化会使电导率发生变化。热力影响区电导率最高,焊核区的电导率介于母材与热力影响区之间,然后在热影响区随着离焊缝中心距离的增大,电导率逐渐降低,最后达到母材区。

(2) 采用涡流电导率法对搅拌摩擦焊未焊透缺陷进行检测,未焊透缺陷深度较小且缺陷紧贴,不容易分辨出缺陷。未焊透缺陷深度较大时,焊缝中心区电导率值有明显变化,缺陷使电导率急剧降低,随未焊透深度增加,电导率降低。

### 参考文献

- [1] 刘会杰,潘庆,孔庆伟,等. 搅拌摩擦焊焊接缺陷的研究[J]. 焊接, 2007, (2): 17-22.
- [2] 王大勇,冯吉才,王攀峰. 搅拌摩擦焊用搅拌头研究现状与发展趋势[J]. 焊接, 2004, (6): 6-10.
- [3] 徐蒋明,柯黎明,邢丽,等. 搅拌摩擦焊焊缝缺陷的超声波动态波形研究[J]. 无损探伤, 2008, 32(1): 5-8.
- [4] ANDRÉ LAMARRE, OLIVIER DUPUIS, MICHAEL MOLES. Complete inspection of friction stir welds in aluminum using ultrasonic and eddy current arrays [J]. CINDE Journal, 2006, 27(4): 14-16.
- [5] 于洪伟,李俊峰,刘秀华. 热处理制度对 6082 铝合金电导率的影响[J]. 轻合金加工技术, 2002, 30(9): 12-14.
- [6] 关伟平,包俊成. LY12 铝合金热处理工艺、电导率和机械性能关系的试验研究[J]. 航空工艺技术, 1998, (4): 34-36.
- [7] 徐可北,周俊华,任吉林,等. 涡流检测[M]. 北京:机械工业出版社, 2004.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50870119); 航空科学基金项目(20061156003); 无损检测技术教育部重点实验室基金资助项目(ZD200629005)

收稿日期: 2009-02-24; 修订日期: 2009-09-27

作者简介: 张小帆(1983—), 女, 硕士, 研究方向为搅拌摩擦焊焊缝缺陷的涡流检测, 联系地址: 江西省南昌市丰和南大道 696 号南昌航空大学航空制造工程学院 邢丽(收)(330063), E-mail: xingli\_59@126.com