

## 搅拌摩擦焊 S 线特征模型\*

## Model for S-Line Characteristics in FSW

中航工业北京航空制造工程研究所  
航空焊接与连接技术航空科技重点实验室  
南京晨光集团有限责任公司

王卫兵 董春林 栾国红 张坤  
周海峰

**[摘要]** 建立搅拌摩擦焊 S 线特征模型,阐述了 S 线特征产生的规律及其在焊核中的分布形态。将 S 线特征处母材简化成刚性质点,借助 XY 面、XZ 面内 S 线特征处刚性质点的运动轨迹,描述了 S 线特征的产生规律。在 XY 面内, S 线特征以焊接步长  $\mu$  为周期分布在焊核内。在 XZ 面内,轴肩影响区内 S 线特征不明显且刚性质点具有向前进侧运动的趋势,搅拌针影响区内 S 线特征呈不规则曲线形状分布在焊核内。通过 6005 铝合金搅拌摩擦焊 S 线特征的试验研究,验证了 S 线模型的合理性。利用该模型分析了 S 线特征与板厚的相关性、搭接界面上翘等工程问题,并提出解决措施。

**关键词:** S 线特征模型 待焊界面 刚性质点 焊接步长

**[ABSTRACT]** The characteristics of S-line in friction stir welding joint including its generating law, location morphology are expounded, furthermore, the model is established. The parent material is simplified to rigid particle, and following up its motion track in XY, XZ planes, the generating law of S-line is elaborated. In XY plane, S-line distributes cyclically in nugget zone with interval of  $\mu$ , whilst, in XZ plane, S-line fails to be clearly seen and is prone to move towards advancing side in shoulder-affected zone; Meanwhile, it manifests in irregularly-shaped curves in pin-affected zone. The assumption is verified by AA6005 welding experiment carried out by friction stir welding. The S-line model presented in this paper puts insight to relative engineering application.

**Keywords:** Model for S-line characteristic Pre-welding interface Rigid particle Welding step

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.S1.007

搅拌摩擦焊技术(Friction Stir Welding, FSW)作为革命性的固相焊接技术,已广泛应用于诸多有色金属的连接。FSW 接头组织致密、性能优越,得到了有色金属焊接领域的广泛认可。

\* 航空科学基金资助项目(2012ZE25007)资助。

随着 FSW 技术应用的深入,FSW 基础研究已成为研究热点,而 FSW 对接焊焊核中部区域普遍存在的 S 线特征是研究热点之一。诸多学者对 S 线特征的成分及产生原因进行了深入研究,Chen 等<sup>[1]</sup>认为 S 线特征区域分布有  $Al_2O_3$  颗粒,谢腾飞等<sup>[2]</sup>认为通过改变搅拌针的形状可以影响 S 线特征的形成。在待焊界面消失模型理论<sup>[3]</sup>的基础上,文中提出 S 线特征模型,解释了 S 线特征分布规律, S 线的分布规律侧面揭示了 FSW 过程中塑性金属的流动规律,同时讨论了消除 S 线特征的措施,为 FSW 接头性能的优化提供理论基础。

## 1 模型的提出

铝合金薄板 FSW 对接接头中的 S 线分布如图 1 所示,其中 XY 面 S 线特征为平行于焊缝上表面的平面内 S 线分布特征描述, XZ 面 S 线特征为平行于横截面内的平面内 S 线分布特征描述,焊接方向沿 Y 坐标轴的正向。焊接步长( $\mu$ )为焊接单步内搅拌头移动的距离,即搅拌头旋转一周沿焊接方向移动的距离, $\mu = \text{焊接速度}(v) / \text{焊接转速}(w)$ 。FSW 焊缝弧纹是指 FSW 焊接过程中材料的层状转移在焊核内部留下的明暗相间的纹路,弧纹的间距代表了一个焊接步长。XY 面内 S 线特征以  $\mu$  为周期分布,且与焊缝弧纹的周期性位置重叠。

图 2 为 XY 面 S 线特征分布模型,该 XY 面位于板材的中部位置,在 Z 方向上远离轴肩影响区,研究时

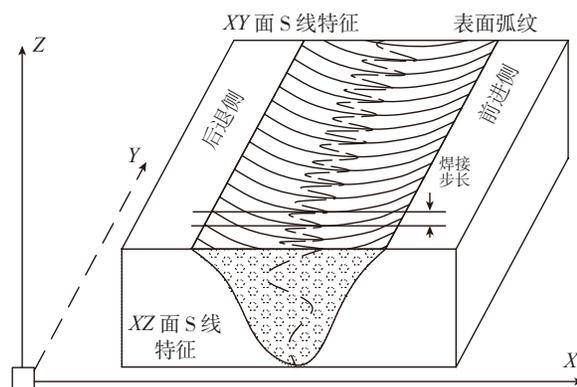


图1 FSW接头示意图

Fig.1 Schematic of FSW weld

间单位为单个 $\mu$ 所需时间。为更直观分析S线形成过程,把S线离散成刚性质点,然后对刚性质点进行受力分析,进而得出S线的运动及分布特点。取图2描述的XY面内的任意待焊质点 $a$ 作为研究对象,描述该质点 $a$ 运动过程中所承受的推动力及阻力。质点 $a$ 所受的推动力包括搅拌针螺纹的导向驱动作用( $F_1$ )、搅拌头表面与塑性金属间的摩擦力( $F_2$ )、塑性金属流动过程中塑性金属层间的粘着剪切力( $F_3$ )、塑性金属流动层内部质点的推力( $F_4$ ,该作用力与质点运动方向相同)。该质点运动的阻力为塑性金属流动过程中塑性金属层间的粘着剪切力( $f_1$ )、塑性金属层内部质点间的作用力( $f_2$ )。

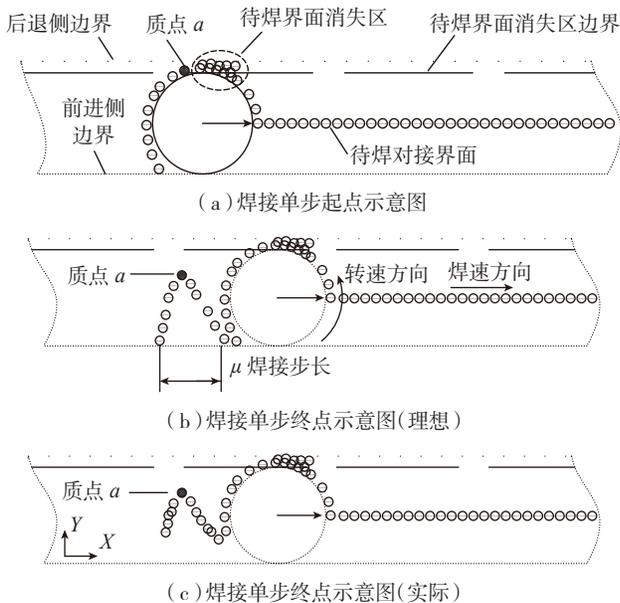


图2 XY平面S线特征模型

Fig.2 Model of S-line feature in XY plane

图2(a)中,前进侧边界为一条直线,因该侧为塑性金属的起点,材料被旋转的搅拌针剪切下来,同时会在搅拌针的后侧形成瞬间空腔,随着塑性金属的转移流动会瞬间填补该空腔,因而前进侧焊核和母材间存在明显的晶粒尺寸突变。后退侧边界为外缘参差不齐的带状区域,该带状区域的宽度是待焊界面消失区的宽度,在后退侧晶粒均匀由焊核向母材过渡。图2(b)为理想状态下 $\mu$ 内S线特征的分布状态,在此不考虑质点所受塑性材料层间的粘着剪切阻力( $f_1$ ),质点通过待焊界面消失区后会由后退侧向前进侧运动,质点运动到焊缝的前进侧边界而停止运动,并随着焊接的进行,S线特征以 $\mu$ 为规律呈现周期性分布。实际质点 $a$ 在运动过程中,除了塑性金属层内部质点的阻力外,还受塑性金属层间的粘着摩擦阻力,随着焊缝的冷却,该粘着阻力会增大,因而质点的运动无法到达焊缝的前进侧,而是分布在焊核内部,并且分布特征不具有严格的周期性,

因质点的受力条件与焊缝的状态(对接间隙、压入量等)紧密相关,因而质点的运动轨迹也不完全相同。

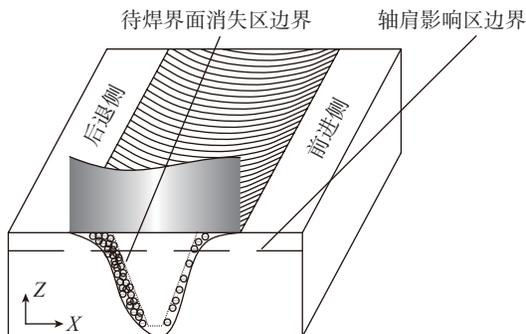
图3为S线特征在XZ面内的分布模型,在靠近轴肩的焊核区域为轴肩影响区,该区域内S线质点除了受搅拌针的作用外还受轴肩的驱动作用,质点发生大范围空间内的塑性金属流动,若轴肩的形貌结构所驱动塑性金属流动的幅度足够大,可以在轴肩影响区内把S线完全碎化,则焊核轴肩影响区内没有S线特征。如果轴肩的形貌结构和焊接参数不足以驱动轴肩影响区内的塑性金属发生大范围的流动,S线上的质点仍然会在轴肩的驱动下由搅拌针的后侧向前进侧运动,靠近轴肩越近的质点向前进侧转移的幅度越大。如图3(a)所示,S线特征上的刚性质点聚集在焊缝后退侧的待焊界面消失区,在搅拌针和轴肩的驱动下向前进侧转移。如图3(b)所示,在理想条件下不考虑运动质点承受的阻力 $f_1$ 的情况下,S线上的质点会运动到前进侧边界停止。然而,实际情况如图3(c)所示,质点所受的驱动力( $F_1+F_2+F_3+F_4$ )受搅拌针形貌及轴肩结构的影响在Z向方向差异较大,同时质点的运动过程中受塑性金属流动层间的粘着剪切力( $f_1$ )因温度的不同而不一致,导致质点会不规则分布在焊核内部,甚至分布在三维空间内高度扭曲的曲面内,最终S线在XZ面内呈现不规则的曲线形式,该曲线的特点为轴肩影响区域内的质点偏向前进侧,原因为该区域内质点所承受轴肩的驱动力起主导作用,随着距焊缝上表面越远这种主导作用会逐渐消失。

## 2 试验验证

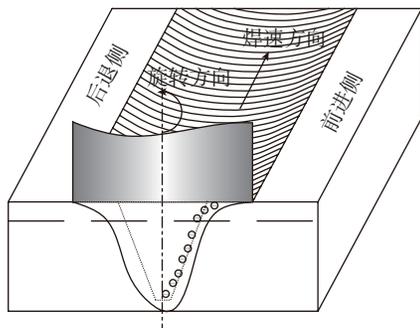
为验证上述模型的合理性,对4mm厚的6005-T6铝合金进行FSW对接焊接,焊接参数为1400r/min、600mm/min、 $\mu=0.43$ mm,转速方向为逆时针。搅拌头轴肩 $\phi=12$ mm,轴肩结构为螺旋槽结构,搅拌针为锥形且根部 $\phi=4.3$ mm,搅拌针螺纹为右旋,螺纹槽深度 $h=0.3$ mm。为了描述搅拌针旋转一周沿焊接方向移动的距离与搅拌针螺纹深度间的关系对S线特征分布的影响,定义搅拌针对S线特征的碎化系数 $\lambda$ 为 $h$ 与 $\mu$ 的比值,即 $\lambda=h/\mu$ 。

### 2.1 XY面S线特征

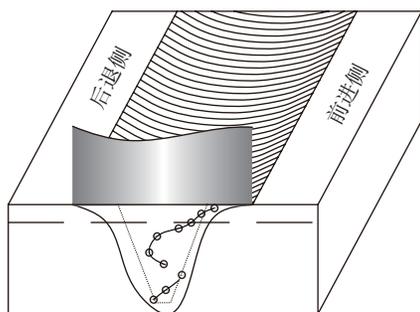
图4为距离焊缝上表面1mm处XY面内的FSW焊缝形貌,焊缝的边界表明前进侧的边界为规则的直线,且该直线的延长线与尾孔边缘相切。后退侧外缘为不规则的曲线,后退侧外缘与界面消失区边界间的距离为待焊界面消失区的宽度,S线形态为连续分布在焊缝中部区域的波浪线。取A区域进行扫描电镜观察, $\mu_1=0.48$ mm, $\mu_2=0.42$ mm,焊接参数的 $\mu$ 为0.43mm,S线周期距离与 $\mu$ 基本一致,与Holli<sup>[4]</sup>的试验结果吻合。试



(a) 焊接单步起点示意图



(b) 焊接单步终点示意图(理想)



(c) 焊接单步终点示意图(实际)

图3 XZ平面S线特征模型描述

Fig.3 Model of S-line feature in XZ plane

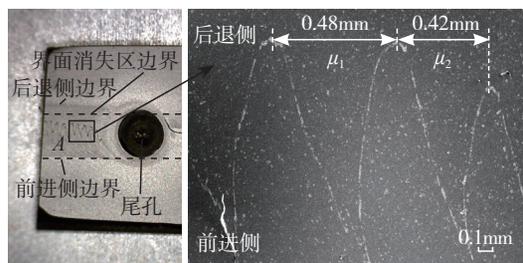


图4 XY平面S线特征试验结果

Fig.4 S-line feature viewed in XY plane

验结果与图2所描述的模型一致,验证了模型的合理性。

## 2.2 XZ面S线特征

图5为焊缝XZ面内S线的分布形貌,试验结果表明S线为断续不规则曲线,分布在焊核的中部区域,轴肩影响区内S线特征不明显,靠近轴肩影响区的S线向前进侧倾斜,原因为搅拌头的旋转方向为逆时针,轴肩

上的螺旋槽结构驱动轴肩影响区的材料向前进侧转移。前进侧焊缝与母材存在明显分界线,该分界线为前进侧边界。后退侧的焊缝的晶粒与母材晶粒尺寸过渡平缓,没有明显分界线。

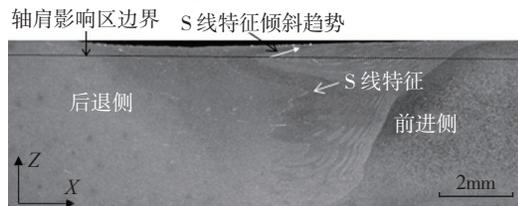


图5 XZ平面S线特征试验结果

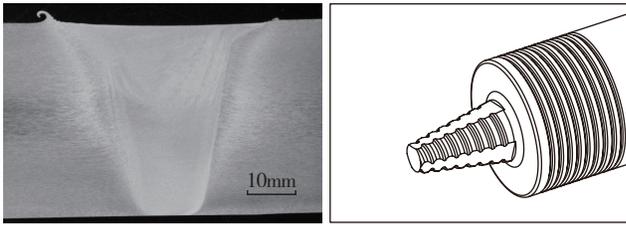
Fig.5 Testing result of S-line feature in XZ plane

## 3 讨论

通过对XY面及XZ面内FSW焊核内S线分布特征模型的试验验证,证明了文中对S线产生及分布特征描述的合理性,利用S线特征模型理论对工程中的几个常见问题进行分析,并讨论相应的解决方案。

(1)工程实践表明S线特征普遍存在于薄板FSW焊核内,厚度小于6mm铝合金薄板尤其明显,而对于厚度较大的铝合金FSW接头内部S线特征不明显。图6为40mm厚7050高强铝合金FSW焊缝横截面金相试验结果及搅拌头,图6(a)表明FSW焊核内没有S线特征,焊接参数为 $v=160r/min$ 、 $w=30mm/min$ 、 $\mu_{厚板}=0.186mm$ 、 $h_{厚板}=1.5mm$ 、 $\lambda_{厚板}=h_{厚板}/\mu_{厚板}=8.3$ 。图5中4mm厚铝合金焊接 $\lambda_{薄板}=0.7$ ,焊核中S线特征明显,且 $\lambda_{厚板}$ 远远大于 $\lambda_{薄板}$ 。在FSW焊接过程中 $\lambda > 1$ ,说明搅拌针螺纹深度大于焊接单步搅拌针移动距离, $\lambda$ 越大越有利于搅拌上螺纹对塑性金属流动的驱动( $F_1$ 越大),因而40mm铝合金焊接过程中,搅拌针上的螺纹对塑性金属流动的驱动作用远远大于焊接4mm铝合金的搅拌针,对待焊界面的碎化作用更强。另外如图6(b)所示,搅拌针圆锥面上加工出3个平面,平面结构与螺纹槽的交汇处存在锋利的尖角结构,这些尖角结构对S线特征的碎化作用有极大帮助。同时40mm的厚度范围导致塑性金属流动在Z向范围内有更充足的空间发生位移,正是塑性金属更充分的流动促进了S线特征的碎化。

通过分析40mm铝合金FSW焊核内没有S线特征的原因,得到避免或减弱薄板焊核中的S线特征的措施:  
a. 增加搅拌针的螺纹深度及螺纹升角提高 $F_1$ ,促进塑性金属的流动;  
b. 使搅拌针的表面粗度增大,提高搅拌针表面对塑性金属的剪切驱动作用;  
c. 加工出更多的尖角结构,利于S线特征的碎化;  
d. 优化焊接参数,尽量提高 $\lambda$ 。有研究表明,通过提高转速减小焊接步长的方法,也可以有效避免FSW焊核内S线特征。

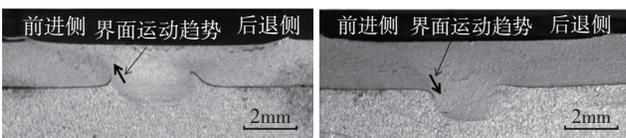


(a) 40mm 铝合金 FSW 焊核 (b) 搅拌头示意图

图6 40mm厚铝合金FSW

Fig.6 FSW of 40mm-thick aluminum alloy

(2) 为了明确焊接界面处的刚性质点在竖直方向的运动规律,通过对普遍存在于 FSW 搭接接头内的界面畸变现象分析进行说明<sup>[5]</sup>。图 7 为 FSW 搭接焊接过程中界面畸变情况的试验结果。图 7 (a) 为搅拌摩擦搭接焊过程中常见的现象,即前进侧的界面会向焊缝上表面上翘,原因为搅拌针上的右旋螺纹在主轴逆时针旋转焊接的过程中会驱动前进侧附近的刚性质点向上运动,也就是界面畸变上翘的原因为搅拌针上的螺纹驱动作用。图 7 (b) 的试验结果验证了界面畸变与搅拌针螺纹的驱动作用有关,即采用相同结构的搅拌针,把主轴旋转方向调整为顺时针,则前进侧界面畸变向下翘。工程实践表明,在选用搅拌针没有螺纹结构时,前进侧的界面仍然表现为向焊缝的上表面运动,原因为焊缝的上表面存在轴肩影响区,产热量和塑性金属流动范围更大,导致焊缝上部的温度高。更高的温度以及塑性金属流动范围更大,导致焊缝上部塑性金属的内压力小,故前进侧搭接界面处刚性质点发生向上运动的趋势。通过分析搭接界面前进侧界面畸变的原因,得出减弱或消除 FSW 前进侧搭接界面畸变的措施为,优化搅拌针对塑性金属向上的驱动力,同时降低轴肩影响区的产热量,降低焊缝上下部的温度梯度。前进侧搭接界面向上的运动趋势证明,文中 S 线特征消失模型中的质点还发生复杂的 Z 向范围内的运动。文中模型为了简化分析,没有考虑质点的上下运动。



(a) 右旋螺纹逆时针旋转 (b) 右旋螺纹顺时针旋转

图7 FSW搭接焊试验结果

Fig.7 Results of FSW lap

## 4 结论

(1) 提出 S 线特征模型,抽象地描述了 S 线特征的产生原因及分布形态,通过对 XY 面、XZ 面内 S 线特征的试验研究,证明该模型具有合理性。该模型为 S 线特征的形成及避免提供了理论依据。(2) 通过对 S 线特征

的分析,总结了 FSW 过程中塑性金属流动的驱动力及阻力等受力条件,在分析 S 线特征分布的同时,以 S 线特征为示踪方法侧面描述了塑性金属流动的规律,即塑性金属呈现周期转移、层内流动的规律。(3) S 线特征消失模型可以为薄板铝合金 FSW 接头 S 线特征、搭接界面畸变的避免等问题提供理论依据。(4) XY 面及 XY 面焊核内 S 线特征的试验研究,证明 6005 铝合金 FSW 焊缝 S 线特征分布于焊核的中部区域,待焊界面处的刚性质点虽然经过搅拌头的驱动作用但仍保持在原先位置附近,即 6005 铝合金待焊界面处的刚性质点具有在 FSW 过程中保持在原有位置取向的特性,优化搅拌头结构及焊接参数的最终目的正是驱动质点离开原先的位置并发生大范围的位移,文中的研究成果明确了评判搅拌头及 FSW 参数的依据。

## 参考文献

- [1] Chen H B, Yan K. The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds. *Materials Science and Engineering*, 2006,433(1-2): 64-69.
- [2] 谢腾飞,邢丽. 搅拌针形状对 FSW 焊缝 S 曲线形成的影响. *热加工工艺*, 2008,37(7):64-66.
- [3] 王卫兵,佟建华. FSW 待焊界面消失模型. *焊接学报*, 2013,34(6):37-40.
- [4] Klagesd H K. The "lazy S" feature in friction stir welding of AA2099 aluminum-lithium alloy[D]. Monterey: Naval Postgraduate School, 2007.
- [5] 郭晓娟,李光. 搅拌摩擦搭接焊界面成形机制及影响因素. *航空制造技术*, 2009(12):62-65.

(责编 一帆 古京)

(上接第 6 页)

## 4 结论

(1) 针对薄壁焊接,配合间隙越大,焊缝表面越趋于下陷,熔深越深。

(2) 经验证 0.20mm 间隙值合理,故锂离子单体电池生产工艺中规定的允许最大间隙值 0.15mm 合理而且严格,工艺过程控制有效。

(3) 针对薄壁焊接,在同样焊接参数下,平均熔深随着间隙值的增大而增大,故在实际生产中,对于稍大一些的对接配合间隙,可适当减小线能量,如减小焊接束流,以获得相对稳定的熔深。

## 参考文献

- [1] 刘湘. 高能束流加工技术的现状及发展. *航空制造技术*, 1995(S1):13-15.
- [2] 张秉刚,吴林,冯吉才. 国内外电子束焊接技术研究现状. *焊接*, 2004(2):5-8.
- [3] 王辉. 钛合金张力贮箱焊接工艺改进. *火箭推进*, 2001(5):37-41.

(责编 亿霖)