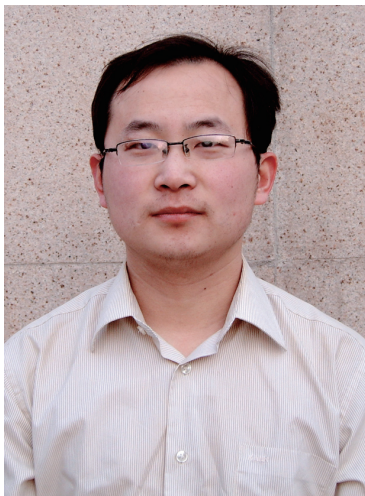


搅拌摩擦焊材料塑性 流动研究现状

Current Status of Material Flow in Friction Stir Welding

北京航空航天大学机械工程及自动化学院 王 刚 曲文卿 赵海云 宋民远
北京航空制造工程研究所中国搅拌摩擦焊中心 董春林 李 光 栾国红



王 刚

现为北京航空航天大学机械工程及自动化学院材料加工系硕士研究生,主要研究方向为材料先进连接工艺。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Weld, FSW)是一种新型的固相连接技术,于1991年在英国焊接研究所(The Welding Institute, TWI)发明并获世界范围内专利保护。这种新型连接技术的出现,克服了传统熔焊的缺陷,能够更加容易地实现铝合金等难焊接材料的焊接工艺过程,并且对能源的消耗少,对环境无污染,所以FSW被誉为“世界焊接史上的第二

目前,主要通过实验和数值模拟的方法来研究材料的塑性流动。A.P. Reynolds分析了当前对于FSW塑性流动的研究,指出对于FSW流动场可以从与轴肩接触的材料表面、搅拌针周围以及搅拌针底部3个方面进行研究。当前,对于FSW中的材料塑性流动的研究,主要存在的问题是:材料流动的机制到底是什么,FSW微观组织周期性变化的原因是什么,以及二者之间存在什么样的关系。

次革命”^[1]。

FSW的原理非常简单,由轴肩(Shoulder)和搅拌针(Pin)组成的搅拌头(Tool)插入焊接板材的对接处,搅拌头边旋转边前进,使前进侧(Advancing Side, AS)和后退侧(Retreating Side, RS)的金属产生塑性流动,形成焊接接头,完成固相连接的过程。

自FSW问世以来,大量学者对FSW的接头组织以及力学性能做了大量的研究,但是由于材料的不可见性,对于FSW焊缝金属在焊接过程中的塑性流动,尚处于探索阶段。目前,主要通过实验和数值模拟的

方法来研究材料的塑性流动。A.P. Reynolds^[2]分析了当前对于FSW塑性流动的研究,指出对于FSW流动场可以从与轴肩接触的材料表面、搅拌针周围以及搅拌针底部3个方面进行研究。当前,对于FSW中的材料塑性流动的研究,主要存在的问题是:材料流动的机制到底是什么,FSW微观组织周期性变化的原因是什么,以及二者之间存在什么样的关系。

实验研究

对于用实验来研究FSW中材料的流变行为,主要是应用一些示踪材

料来跟踪焊缝金属的最初和最终的位置。这些示踪材料主要包括铜箔、铝箔、钨线等。但是示踪材料由于和母材的力学性能等方面存在差异,往往会影响FSW中母材金属的流动。所以,在有些实验中不加入任何示踪材料,只单纯地进行微观组织观察的方法进行研究。

在早期的研究中, Colligan^[3]应用钢球跟踪技术,通过X射线检测和对切片进行观察的方式来研究铝合金FSW中材料的流动。Colligan指出并不是所有搅拌头周围的材料都会发生搅动,在搅拌针后退侧的大部分材料仅仅发生了简单的挤压,并在搅拌针的后方发生了沉淀。

随着研究手段和技术的不断进步,尽管对于FSW过程中材料的塑性流动的研究还不是非常完善,但在某些方面已经产生了一些共识,比如在FSW中的前进侧和后退侧的材料流动是非对称的,在搅拌头的后方材料会“一层一层”的沉淀,最后形成一种带状的结构。

R.M. Leal等人^[4]对AA 5182-H111和AA 6016-T4两种铝合金分别利用了两种不同的搅拌头,在两种不同的工艺参数下进行搅拌摩擦焊接,通过对纵向、横向以及和垫板平行的方向的微观组织的观察,给出了在两种不同的搅拌头的影响下,材料流动的情况。图1和表1分别表示

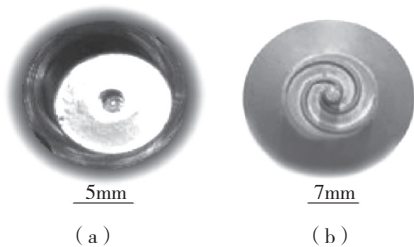


图1 两种搅拌头的宏观形貌

表1 工艺参数

系列	转速 $\omega / (r \cdot \min^{-1})$	焊接速度 $V / (mm \cdot \min^{-1})$	倾斜角度 $\alpha / (^\circ)$	插入深度 h / mm
WS1	1800	160	2.5	0.95
WS2	1200	320	0	0.95

了搅拌头的宏观形貌,以及两种工艺参数。其中(a)型搅拌头在轴肩有角度为 8° 的锥形腔,(b)型搅拌头轴肩呈旋涡状。(a)型搅拌头使用第一系列(WS1)的工艺参数,(b)型搅拌头应用第二系列(WS2)的工艺参数。

研究表明:应用(a)型搅拌头可以得到较为光滑的焊接表面,但会使板材在厚度上变薄,搅拌针在材料的流动中起到了主要的作用,在焊核区形成了“洋葱圆环”的结构;(b)型搅拌头不会引起厚度上的变化,但所得到的焊接表面没有(a)型搅拌头的焊接表面光滑,轴肩对焊接结构的形成起到了关键的作用,从前进侧流入到后退侧材料的数量明显比使用(a)型搅拌头时多。

和R.M. Leal等人一样,K. Kumar、Satish V. Kailas等人^[5]也研究了搅拌头的几何尺寸以及轴肩和搅拌针对材料流动的影响。为了避免示踪材料对FSW中金属材料流动的影响,在研究的过程中没有使用任何的示踪材料,仅仅对焊缝处的微观组织进行了观察。实验所用的焊接材料为7020-T6铝合金,搅拌针长度4.2mm,上部直径6mm,下部直径4mm,轴肩直径20mm,搅拌头的材料为H13,硬度为55HRC,工艺参数分别为搅拌头的转速1400r/min,焊接速度80mm/min,搅拌头的倾角为 2° 。为了研究搅拌针和轴肩在焊缝材料流动中的作用,

K. Kumar、Satish V. Kailas等人使底面垫板有一个倾斜的

角度,这样搅拌头就可以由浅到深地连续插入被焊材料中。

搅拌针插入焊接材料的过程中会形成一个焊接腔室,随着搅拌头和焊接材料之间的交互作用不断增强,轴向压力不断被增大。通过对微观组织的观察,可以看出当轴向压力达到7.4kN时,焊接缺陷消失(如图2所示);当压力达到8.1kN时,在前进侧和后退侧的材料流动失去了对称性,更多的材料从后退侧流向前进侧。在材料的表面,轴肩对材料流动起了主要的作用,使材料由前进侧转移到后退侧;而在搅拌针影响材料流动的区域中,由于在后退侧有一个抗力的作用,使材料向上移动,导致

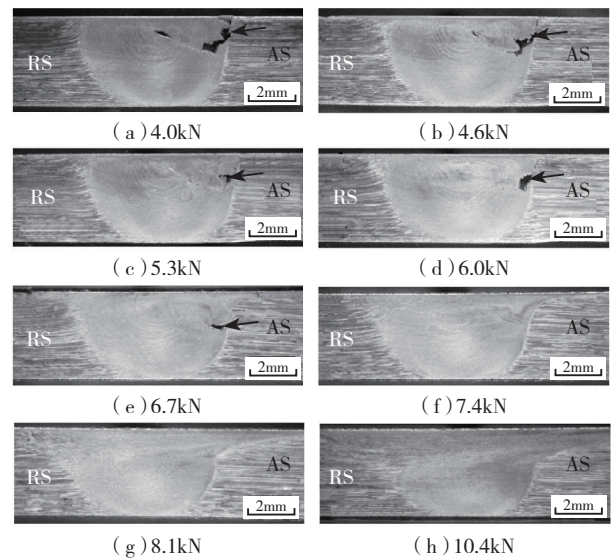


图2 不同轴向压力下的焊接缺陷

了飞边的形成,但随着搅拌头和焊接材料的不断作用,轴肩又把向上流动的材料压回焊接腔室。

综上,K. Kumar, Satish V. Kailas等人提出要合理地设计搅拌针的形状使金属的流动达到最大值,又要合理地设计轴肩的形状,使向上流动的材料能够最大程度地返回到焊接腔室中。

在很多实验中都应用了示踪材料跟踪焊缝金属最初和最终的位置,来研究FSW中材料的流变行为。铜

箔是应用频率比较高的示踪材料,主要是因为铜具有较高的熔点、良好的塑性以及能够和基体金属相区分的颜色。

南昌航空大学柯黎明等人^[6]认为搅拌针的表面形貌对焊缝金属的在厚度方向的塑性流动有重要的影响,分别采用带有左螺纹、右螺纹和光滑表面的3种搅拌针的搅拌头进行实验,并采用0.02mm铜箔作为示踪材料,铜箔采用与LF6、LY12交替叠放的镶嵌方式,以便更好地观察焊缝金属在厚度方向上的塑性流动。

焊后在垂直于焊接方向切割试样,并观察焊缝截面的形态。通过观察,柯黎明等人得出:用带螺纹的圆柱形搅拌针所得到的焊缝截面形貌有明显的“洋葱圆环”特征,搅拌针螺纹的方向影响“洋葱圆环”的位置及焊缝塑性金属的迁移方向:左螺纹使“洋葱圆环”的中心向下移,“洋葱圆环”周围金属向上移动;右螺纹使“洋葱圆环”的中心向上移,“洋葱圆环”周围金属向下移动;当搅拌针表面为光滑状态时,焊缝金属在横截面上以平移为主。

G. Buffa 等人^[7]利用铜箔对T型FSW接头的金属流动进行了研究,实验的装置如图3所示,在上下两块

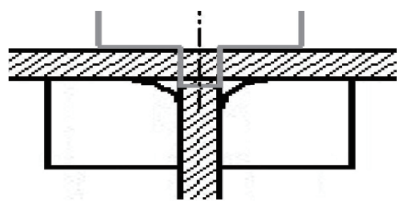


图3 T型接头的FSW

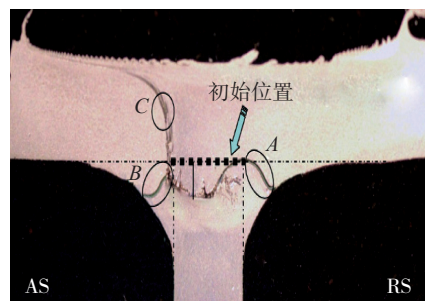


图4 铜箔的最初和最终位置

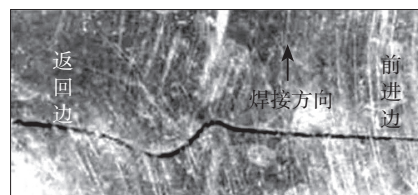
板材的接触处,插入纯度为99.95%的0.1mm厚的铜箔,焊接后铜箔的最终位置如图4所示。从实验的结果可以看出铜箔最终的位置被分为A、B、C3个区,A、B两区的金属受压,流向了夹具的圆角区;位于中间的金属受到垂直向下的压力而向下流动;C区的金属向上流向了左侧,进而流入前进侧。

黄永德、刑丽等人^[8]在LY12铝合金中镶嵌铜箔作为示踪材料,LY12铝合金和铜箔分别采用交替叠放镶嵌和“米”字形镶嵌的方式,观察焊后示踪材料在焊点横截面与水平截面上的分布,初步探讨搅拌摩擦点焊接头塑性金属的流动形态。

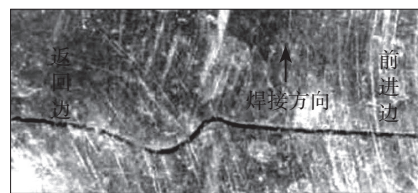
研究表明:在焊点横截面上,从焊点表面向下,塑性变形区宽度逐渐减小,匙孔两侧塑性金属发生塑性变形的区域基本对称;在焊点的上部,塑形金属主要受轴肩的作用,在轴肩摩擦力和材料之间的剪切力作用下沿搅拌针旋转的方向运动,随着距焊点表面距离的增大,塑化金属沿搅拌针旋转方向的运动趋势逐渐减小;搅拌针周围的塑性金属在搅拌针螺纹向下的压力作用下,以螺旋状向焊点底部运动,运动到焊点底部后受底板的阻碍和未塑化金属的挤压作用从搅拌针四周向焊点上部运动。

赵旭东等人^[9]对LF2和LY12两种不同的铝合金进行FSW的焊接,并且分别在厚度为8mm和2mm处嵌入铜箔,焊后观察试样中示踪材料的分布及焊缝金属的流动状况。观察结果如图5所示。

通过对实验结果的分析,表明FSW的流场对于焊缝中心线并不对称,在后退侧和前进侧的金属流动模式也不相同,焊缝金属的流动受轴肩和搅拌针的双重作用。在焊缝的底部,材料的流动模式由搅拌针的旋转挤压控制,当搅拌针向前运动时,前进侧附近少量的金属沿焊接方向移



(a) 8mm 厚度



(b) 2mm 厚度

图5 不同厚度处金属流动的宏观状况

动,而绝大部分金属材料随着搅拌针的向前移动被挤向搅拌针的后方,沿焊接相反的方向流动,最远的移动距离不会超过一个搅拌针直径的位置;后退侧材料仅向后流动,前进侧金属不会越过中心线进入后退侧,而后退侧少部分金属越过焊缝中心线进入前进侧。在焊缝的顶部,材料的流动模式由轴肩的旋转摩擦控制,前进侧大部分金属向前流动,并且终止在前进侧,小部分金属向后流动不超过一个搅拌针半径的距离,后退侧金属向后流动绕过焊缝中心线进入前进侧直至搅拌头的前方。受搅拌头轴肩压力和温度场分布的影响,焊缝金属向前流动的阻力大于向后流动的阻力,大部分的金属向后流动,而且向前流动的最远距离小于向后流动的最远距离。

Carter Hamilton 等人^[10]使用在6061-T6铝合金表面镀Sn的方法来研究材料的流动,其中,所用的两块铝合金板材的厚度为6.35mm,宽度为195mm,呈90°角垂直放置,如此放置使实验更加符合实际情况。

通过扫描电镜对垂直于焊接方向上的切片组织进行观察,得到结果如图6所示。

从扫描电镜的图片上可以看出焊核区呈现明显的“洋葱圆环”的特征,Carter Hamilton 等人认为这是由

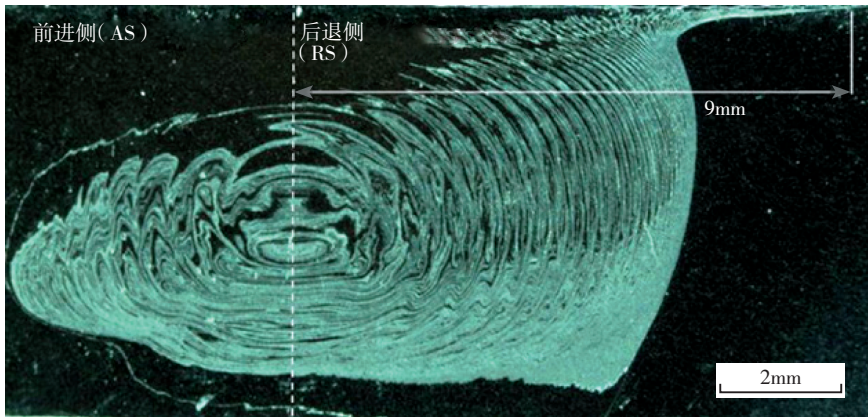


图6 焊核区的显微照片

于第二相粒子(即 Mg_2Sn)的不均匀分布造成的,进一步通过化学成分的分析,在第二相粒子含量较多的带状结构中含有大量的 Sn,由于 Sn 只存在于表面,说明 Sn 是从表面流入焊核区的,通过图片可以看出,表面的材料是通过后退侧转移到焊核区的。Carter Hamilton 等人认为位于表面的材料经后退侧被挤压入搅拌针周围的塑性区和轴肩下方,而原先已经存在的材料会阻止表面材料的进入,这样就形成了已经存在的材料和被挤压入塑性区的表面材料互相交错的情况,进一步发展,导致“洋葱圆环”的形成。

为了使实验的结果能够更加直接的验证数值模型的有效性,而且在焊接一些高熔点合金时,搅拌头的螺纹会很快磨损,Olivier Lorrain 等人^[11]利用两种无螺纹的搅拌头对 7020-T6 轧制钢板进行了搅拌摩擦焊接。这两种搅拌头的搅拌针一种是圆柱状的(SC),一种是圆锥状的且带有 3 个切面(TC3F),其使用的工艺参数如表 2 所示。

Olivier Lorrain 等人利用铜箔作为示踪的材料,从纵向和横向对材料的

流变行为进行了研究,结果表明,无螺纹的搅拌头在 FSW 材料流变行为中所起到的效果和有螺纹的搅拌头具有类似的特点,塑性材料在前进侧的上表面和后退侧的下表面沉淀,当增加转速和轴向压力时,两种搅拌头轴肩的作用都会增强,但带有圆柱形搅拌针的搅拌头其轴肩增加的效果比较明显。锥形搅拌针的 3 个切面会改变材料的流动,产生更加复杂的流动模式。通过观察,在平行于垫板平面上的带状组织之间的间距,和焊缝距(搅拌头每转动一周前进的距离)基本是相等的。

数值模拟

对于 FSW 工艺过程的数值模拟主要集中在 3 个方面^[12]:温度场的模拟、流场的模拟以及组织性能的模拟。由于开展研究的时间不长,对于 FSW 工艺过程的模拟理论尚不完善。

表2 工艺参数

速度焊接 $V/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	轴向压力 F/kN	转速 $\omega / (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	焊接速度·转速 ⁻¹ $(V \cdot \omega^{-1}) / (\text{mm} \cdot \text{r}^{-1})$
100	7.35	300	0.33
100	5.88	600	0.17
500	10.78	600	0.83
500	8.82	900	0.56
900	11.76	900	1.00
900	7.35	1620	0.56

特别是对于流场的模拟,由于摩擦系数的选取,边界条件的选择等因素的不同,常常使模拟的结果和实验结果有所偏离。

对于 FSW 塑性流动过程的模拟,很多学者应用了不同的模拟软件(ABAQUS、ANSYS、DEFORM、FLUENT 等)进行了研究,但主要的方法有两种^[13]:(1)基于固体力学理论的有限元方法(FEM),(2)基于流体动力学理论的有限体积法(FVM)。

张洪武等人^[14]利用有限元软件 ABAQUS 对 FSW 的焊接过程进行了二维的模拟,研究了不同参数对搅拌摩擦焊接材料流动以及残余应力分布的影响。

焊接构件为两块尺寸为 30mm~100mm 的平板,搅拌头的半径为 3mm。搅拌头在焊接过程中被认为是刚体,焊接的板材一共被划分了 11717 个四节点的四边形单元。搅拌头和焊接板材之间的摩擦用库伦摩擦定律来定义,对不同参数的 FSW 数值模拟过程均采用同一温度场。对模拟结果的分析表明:后退侧是材料流动最为剧烈的区域,并且材料流动速度随着搅拌头平移速度以及搅拌头转速的增加而有不同程度的增加。搅拌摩擦焊接过程中,材料的切向流动是材料流动的主要形式,在前进侧材料的流动可能存在涡旋。

Livan Fratini 等人^[15]利用 DEFORM 软件对 FSW 中的材料流动形式及残余应力模拟,也得到了类似的结论。

Schmidt^[16]建立了一种基于流体动力学的 FSW 的二维模型,在此模型中搅拌头和焊接材料的摩擦被看做是粘性摩擦,并且把一个虚线外圆和搅拌头之间的区域定义为剪切区。

模拟结果表明,在特定的条件下,在此模型中模拟的材料塑性流动基本能够符合实验的研究结果,在焊缝处的材料向后移动了大约一个搅

拌针直径的距离,在前进侧的材料围着搅拌针几乎旋转了一周,在刚开始流动的位置停下来。并且利用厚度为 1.8mm 的 5454-O 的示踪材料跟踪 2195-T8 在 FSW 中的材料流动,进行了实验的验证。

Paul A. Colegrove 等人^[17]同样利用基于流体动力学的软件 FLUENT,对 FSW 材料的塑性流动建立了一个三维模型,搅拌头和焊接材料之间也是被定义为粘性摩擦。结果发现塑性变形区的材料转移到搅拌针的后退侧,越靠近轴肩的位置,流动的材料越多。

Z. Zhang 等人^[18]利用 ABAQUS 软件,运用模拟的方法,研究了 FSW 的工艺参数对温度场和流场的影响。结果发现焊接材料的最高温度和 FSW 所需要的功率随着搅拌头转速的提高而升高,后退侧的材料不会进入前进侧,仅仅是被旋转至搅拌头的尾部,而前进侧的材料可以进入后退侧;部分材料会进入搅拌头后方的尾流区域,但在后退侧的材料不会进入这个区域,仅仅是在其周围堆积,这也是飞边形成的原因。随着焊接速度的减少,搅拌头转动速度的提高,搅拌的效果增强,焊接质量提高,但是容易产生飞边。

G. Buffa 等人^[19]对 T 型接头进行搅拌摩擦焊接,运用 DEFORM 软件进行模拟。

通过模拟结果看出焊接的结合线是呈现一个波浪形的,并且可知,在后退侧的材料只是随着搅拌针的转动而转动了很小的角度,而在前进侧材料随着搅拌针几乎转了 180°,这和 Schmidt 的模拟结果相似。并且在模拟中也发现,在 T 型 FSW 接头中,也存在材料由后退侧向前进侧的流动,但和对接接头不同的是,焊缝处的材料有一个向上的速度,主要是因为焊接过程中支撑板像“一堵墙”一样把向下流动的材料反弹回来。

柯黎明^[6]等人建立了焊缝塑化

金属“抽吸-挤压”流动模型,在此模型中柯黎明等人认为:在 FSW 条件下,焊缝处的金属受到搅拌头轴肩和底面刚性垫板的双重限制作用。当搅拌头旋转引起塑化金属沿搅拌针螺纹表面轴向流动时,会形成一个入口端和一个出口端。在入口端,有可能形成一个瞬时空腔,周围塑化金属将被吸向此空腔,形成所谓抽吸效应;在出口端,塑化金属将改变流向并挤压周边金属,形成所谓挤压效应。正是由于这样的抽吸-挤压效应,使高温塑性金属在搅拌针轴向形成剧烈的迁移运动。并且指出抽吸效应的大小与焊接工艺参数有关。在搅拌针表面为左旋螺纹、焊接速度一定的情况下,搅拌头旋转速度较大时,抽吸效应较为显著,所形成“洋葱圆环”花样尺寸较大,这与实验的结果也是相符的。

G. Buffa 等人^[20]将 FSW 的焊接过程看做是一个挤压的过程,轴肩、搅拌针、垫板以及焊缝区域外的金属组成了一个挤压模,它相对于工件移动。同时将 FSW 的焊接过程和挤压过程做了对比研究,指出了在 FSW 中应变和应变率的变化。

J.E. INDACOCHEA 等人^[21]对于 FSW 过程中形成的焊接腔室建立了一个初步的模型。此模型是建立一个平面直角坐标系,使坐标系的原点和轴肩的中心重合,与搅拌针的中心有长度为 e 的偏距。在搅拌头转动的时候就会形成一个最长半径为 $r+e$ 和最短半径为 $r-e$ 的圆,并且认为搅拌针的表面和最长半径划过的区域中的金属是塑形的。利用此模型分析了在各个瞬间金属的流动,表明焊接腔室的大小随着搅拌针的转动而周期性的改变,而且只和搅拌针的位置或者最长半径有关,材料从搅拌针的两侧流向搅拌针的后面,在焊缝的中间相遇,若材料没有完全流动充分,则在焊缝处就会形成缺陷,这和实验的结果是一致的。

结束语

FSW 中金属材料的塑性流动和 FSW 中的温度场、微观组织的结构以及应力和应变都有关系,因此研究 FSW 中的材料的塑性流动,有助于 FSW 中的其他各个方面研究工作的进展。

国内外诸多研究文献中,对于 FSW 材料流动的实验研究虽然取得了一定的共识,但并没有形成统一的认识,在有的研究文献中甚至出现了结论相悖的情况。由于 FSW 本身的特点,目前还没有一种可以直接观测 FSW 过程中塑性材料流动行为的试验手段^[22];对于 FSW 中材料流动的数值模拟,由于模型的建立采用了不同程度的假设,所以部分数值模拟的结果与实验结果有所出入。

利用实验和数值模拟的方法对 FSW 中材料的塑性流动进行研究,其在未来的研究重点主要有以下几点:

(1) 对于在实验中选择的示踪材料,应尽量减小其颗粒的尺寸或者箔片的厚度,其流动模式尽量与母材的流动模式接近,使其性能尽量不对母材的塑性流动产生影响。

(2) 数值模拟应该选择更加合理的边界条件,建立更加准确的数值模型,把对 FSW 中的材料塑性流动的数值模拟和应力分析结合起来。

由于 FSW 中材料的流动是一个非常复杂的问题,受搅拌头的几何尺寸、焊接参数、材料的类型与性能等多方面因素的影响,所以至今为止,尚处在探索阶段。为深入了解 FSW 的工艺过程,应该加深对 FSW 理论层次的研究,采用更加贴合实际条件的模型和实验方法。

本文有参考文献 22 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 侧卫)