DOI: 10.3901/JME.2020.06.184

搅拌摩擦焊材料流动的试验表征研究现状*

甄云乾 刘小超 申志康 陈海燕

(西北工业大学陕西省摩擦焊接工程技术重点实验室 西安 710072)

摘要: 搅拌摩擦焊作为一种较新的固相连接技术,在航空航天、高速列车、汽车、船舶等机械制造领域中具有广阔的应用前景。充分认识搅拌摩擦焊接过程中的塑性材料流动,对于深刻理解焊缝成形机理、优化焊接工艺具有重要的理论指导意义。综述了当前搅拌摩擦焊塑性材料流动的试验表征技术研究现状,重点分析了采用“点”、“线”、“面”和“体”形标记材料来研究塑性材料流动的优缺点。在此基础上,综述了搅拌摩擦焊缝成形机理的研究现状,探讨了关于材料流动的尚未有效解决的关键科学问题。

关键词: 搅拌摩擦焊; 塑性材料流动; 标记材料; 焊缝成形

中图分类号: TG456

State-of-art of Experimental Characterization of Material Flow in Friction Stir Welding

ZHEN Yunqian LIU Xiaochao SHEN Zhikang CHEN Haiyan

(Shaanxi Key Laboratory of Friction Welding Technologies,
Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072)

Abstract: Friction stir welding (FSW), as a relatively new solid-state welding technique, is a promising technique in the field of aerospace, high-speed train, automobile, shipbuilding and other machinery manufacturing. Fully understanding the plastic flow of the deformed materials in the process of friction stir welding is of importance in theory for deeply understanding the mechanism of the weld formation and optimizing the welding process. The state-of-art of the experimental characterization of the material flow in friction stir welding is summarized, and the advantages and disadvantages of using dots, lines, planes and solids as marker materials to study the material flow are emphatically analysed. Further, the research status of friction stir weld formation is reviewed, and the key scientific problems about the material flow which have not been solved effectively are discussed.

Key words: friction stir welding; material flow; marker materials; weld formation

0 前言

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是英国焊接研究所于 1991 年发明的一种新的固相焊接技术^[1]。与传统的熔焊相比,FSW 接头无裂纹、夹杂、气孔等缺陷,同时焊接时所需要热输入较小,具有接头质量高、焊接变形小和节能环保等优点,在铝合金等轻质材料的焊接方面具有突出优势^[2-5]。通常认为,FSW 通过高速旋转的搅拌头和工件相对运动而产生的摩擦热使搅拌头周围的金属发生软化,并在其搅拌作用下填充搅拌针行走后留下的空腔而实现材料连接。因此,深刻认识 FSW 焊接过程中的

塑性材料流动,对于理解焊缝成形机理、优化焊接工艺参数、控制接头的组织和性能、提高接头质量具有重要的理论指导意义^[6]。但是,搅拌头周围的塑性材料流动十分复杂,且焊缝成形是在密闭的空间内进行,难以通过肉眼直接观察^[7]。为此,研究者广泛开展材料流动的可视化研究。目前采用的方法主要是通过标记材料示踪而进行试验表征^[8]以及采用计算机数值模拟并加以简单的试验验证^[6]。

数值模拟是一种间接但有效地获取材料流动过程的研究方法。研究人员已经通过将塑性金属材料假定为黏塑性流体,利用计算流体力学的方法来计算模拟 FSW 过程中的塑性材料流动^[6, 9-13],并研究了剪切层内温度场、速度场、应力场、应变速率场和黏度场的特点。但是这些模型难以处理 FSW 中的非连续流动问题(例如在搅拌针影响区形成的周期

* 国家自然科学基金资助项目(51905437)。20190830 收到初稿,20191103 收到修改稿

性带状结构^[14]。而采用固体力学的方法虽然可以解决材料流动不连续问题^[15-18], 但是由于网格容易畸变, 需要不断对网格进行重新划分, 使得计算时间成本增加。

另一种思路是利用试验表征的手段, 直接地呈现材料流动过程。为了突显材料流动, 往往需要采用与母材存在一定物性差异的材料作为标记, 再通过各种各样的手段在线或离线观测标记材料的迁移, 从而重构搅拌头周围的材料流动场景。

然而, 不同材质和形状的标记材料往往具有不同的示踪效果。为了厘清标记材料的选用准则, 尽可能地提高标记材料示踪的精度, 充分揭示焊缝成形机理, 本文从标记材料的形状特点出发, 综述了各种形状标记材料的优缺点, 并对焊缝成形机理的研究现状进行梳理, 力争指出当前 FSW 材料流动研究中仍未有效解决的关键科学问题。

1 标记材料

标记材料示踪法是一种常见的科学研究方法, 广泛应用于各种过程监测的研究之中。1999 年 COLLIGAN^[19]率先将该方法引入到 FSW 过程中材料流动的研究之中。FSW 中的标记材料示踪法, 一般是指焊前将标记材料嵌入母材中的特定位置, 然后在焊接过程中或者焊后通过 X 射线透视、金相分析等手段来观察标记材料的运动轨迹, 从而获取塑性材料的流动信息。标记材料的材质、形状、尺寸等不同, 其表征材料流动的能力也有所区别。根据标记材料示踪的维度, 可以大致按照“点”“线”“面”“体”来对标记材料进行分类。本文将按照以上顺序来进行综述。

1.1 “点”形标记材料

顾名思义, “点”形标记材料是指无论标记材料是什么材质, 具有怎样的形状, 用来示踪时, 都将其抽象为一个无体积的“点”。这一类标记材料主要有小球和粉末等。

小球是较早用于探究 FSW 过程中塑性材料流动的标记材料。COLLIGAN^[19]在焊前将直径为 0.38 mm 的小钢球嵌在对接工件的不同位置处, 如图 1 所示, 焊接时采用搅拌头“急停技术”, 焊后通过 X 射线透视的方法从不同视图观察小钢球的位置, 来研究焊缝中塑性金属的流动。

MORISADA 等^[20-21]使用直径为 0.3 mm 的小钨球作为示踪材料, 并使用两套 X 射线实时成像系统来观察小钨球的运动轨迹, 从而对 FSW 过程中的塑性材料流动进行三维可视化研究。其试验原理示意

图1 钢球在工件中的位置

图如图 2 所示。研究发现, 在搅拌针周围存在一个各向等厚的流动区, 在流动区内材料流动受轴肩倾角的影响而发生倾斜。同时, 流动区内外侧的材料流速高于内侧的材料流速, 距离搅拌头中心相同距离处前进侧的材料流速小于后退侧的材料流速。

图2 X射线实时成像试验原理示意图

相比于直接将小球嵌入母材中, KUMAR 等^[22]采用试验模拟的方法, 使用 $10\ \mu\text{m} \pm 2\ \mu\text{m}$ 的玻璃小球(密度为 $1\ 100\ \text{kg/m}^3$)作为示踪材料, 放入透明的粘塑性流体(密度为 $1\ 000\ \text{kg/m}^3$)中, 同时借助于粒子图像测速技术来模拟研究 FSW 中的材料流动行为。其试验原理如图 3 所示。

图3 粒子图像测速技术试验原理示意图

使用小球作为标记材料再配以适当的观测手段, 基本上能够实现对 FSW 材料流动的焊后或实时观测。但是为了便于观测, 小球的材质通常与基体材料有所区别, 往往需要具有显著的密度差异才能实现良好的观测效果。这就导致了标记材料与基体材料之间的物性差异巨大。标记材料到底能够在多大程度上表征真实的材料流动, 并未有确切的研究。至于采用玻璃小球和黏塑性流体来模拟 FSW 过程, 就更加难以具有说服力。

相比于小球,粉末具有更小的体积、更加接近于基体材料的密度以及更好的连续性,因此也被广泛用作标记材料来研究 FSW 的材料流动。王希靖等^[23]在 10 mm 厚的 LF2 铝合金板的不同位置处嵌入 Fe 粉,焊后采用扫描电镜对不同深度的水平截面进行能谱分析,观察 Fe 粉在焊缝金属中的分布,由此来推定塑性金属的二维流动。结果表明,塑性金属流动关于焊缝中心并不对称。焊缝下部金属受搅拌针作用,前进侧大部分金属与焊接方向相反向后流动,小部分金属向前流动,但都未进入后退侧;后退侧金属都向后流动,且有部分金属进入前进侧。焊缝上部金属主要受轴肩作用,前进侧大部分金属向前流动但未进入后退侧,小部分金属向后流动;后退侧金属沿旋转方向流入前进侧^[23]。DONATH 等^[24]将 Ti 粉分别预置在 4 mm 厚的 2024 铝合金的前进侧或后退侧,焊接时采用搅拌头“急停技术”来研究标记材料的流动状况。

虽然粉末作为标记材料具有体积较小,连续性较好等优点,但由于粉末之间摩擦力不足,在焊接过程中容易滑动,不能真实地反映材料的塑性流动。

1.2 “线”形标记材料

“线”形标记材料是指将标记材料抽象成一条无体积的线。“线”形标记材料具有良好的连续性和空间展示性,是研究材料三维塑性流动的理想型标记材料。

SCHNEIDER 等^[25]采用直径 63.5 μm 的钨丝作为标记材料,并将其通过点焊的方式固定在 2195 铝合金的对接面内,焊后通过 X 射线透视的方法观察侧视图和俯视图中钨碎片的位置,并观察不同截面的金相组织来确定钨碎片的大小和间距,同时结合数学模型,来研究 FSW 过程中塑性金属的流动。为了获得更加准确的材料流动信息, SCHNEIDER 等^[26]随后采用直径 25 μm 的钨丝和直径 250 μm 的铅丝点焊在对接面且距离轴肩下表面 0.13 cm 处,焊接时搅拌头中心偏离对接面一段距离,如图 4 所示。同样采用 X 射线透视来观察水平面和侧面,揭示了 FSW 过程中材料流动的周期性。

图 4 预置铅(钨)丝位置示意图

虽然“线”形标记材料相对于“点”形标记材料,具有更好的分辨效果和可操作性^[25],但由于预置在工件内的可行性较差,目前仍鲜有采用“线”

形标记材料研究 FSW 材料流动的报道。但是相信随着机加工手段的进步,“线”形标记材料会越来越受到研究者的青睐。

1.3 “面”形标记材料

同理,“面”形标记材料是将标记材料抽象为无体积的面,采用“面”形标记材料可以一次性收集整个面上的材料流动情况,相比于“点”形和“线”形标记材料,具有显著的优势。并且,“面”形标记材料材质的选择也相对宽泛,更容易选出与基体材料物性差异较小的标记材料。典型的“面”形标记材料有金属箔片、氧化层等。

1.3.1 铜箔

一般认为铜箔具有良好的塑性,同时和铝合金等基体材料的色泽、耐蚀性等差异较大,因此被广泛应用于铝合金 FSW 材料流动的研究之中。

柯黎明等^[27-28]采用紫铜箔作为标记材料,将紫铜箔和铝合金板在工件厚度方向上交替叠放(图 5a)、在焊接方向上交替叠放(图 5b)或将紫铜箔垂直于焊接方向插入工件中(图 5c)进行标记材料示踪。焊后通过观察焊缝金相组织的各个截面来推断材料流动。

图 5 预置铜箔位置示意图

SCHMIDT 等^[29]使用 0.1 mm 的铜箔作为标记材料,沿焊接方向和垂直于焊接方向插入被焊工件中,焊接时采用搅拌头“急停技术”,焊后借助于电子计算机断层扫描(Computed tomography, CT)技术来观察铜箔在三维空间的位置,同时观察了搅拌头在不

同位置退出时(图 6), 焊缝和匙孔在不同水平截面上的金相组织, 从而进行 FSW 过程中塑性材料流动的三维可视化研究。

图 6 搅拌头退出孔与标记材料的相对位置

1.3.2 铝箔

铝箔在室温下虽然没有铜箔塑性好, 用作研究铝合金 FSW 材料流动的标记材料时, 与基体的色泽差异也没有铜箔大, 但是铝箔的密度较低, 与母材的热物理性质更加接近, 相对来说更能准确反映 FSW 中的材料流动情况, 因而也被广泛地用做标记材料来研究 FSW 的材料流动。

REYNOLDS 等^[30-32]使用 1.8 mm 厚的 5454 铝合金作为标记材料嵌入 2195 铝板中的顶部、中部和底部(图 7a), 以及在前进侧和后退侧交错放置(图 7b), 这样可防止两侧标记材料的相互影响。焊后通过观察各个截面的金相组织来推断材料流动。

图 7 铝箔位置示意图

XU 等^[14]采用 0.1 mm 厚的纯铝箔作为标记材料, 焊前放置在 6061 铝合金工件的对接面, 如图 8 所示。焊后通过观察焊缝金相组织的横截面、纵截面和水平截面, 从而获得焊缝材料的流动模式。

图 8 铝箔在 6061 铝合金工件中的位置示意图

1.3.3 金箔

金箔在室温下虽然比铜箔的塑性好, 用作研究铝合金 FSW 材料流动的标记材料时与基体的色泽差异也比较大, 但是因为金箔的密度较大, 价格昂贵, 且与母材的热物理性质相差较大, 因此很少见到使用金箔作为标记材料来研究铝合金 FSW 的材料流动。但是金和银的热物理性质接近, 耐蚀性差异较大, 因此可以用金箔作为标记材料来研究银的 FSW 材料流动。

NAGIRA 等^[33]使用 0.2 mm 的纯金箔作为标记材料, 焊前嵌入银板的对接面(与图 8 类似), 焊接时采用搅拌头“急停技术”, 焊后通过观察匙孔的横截面和水平截面的金相组织, 来研究焊接过程中的塑性金属流动。

1.3.4 氧化层

与传统的标记材料相比, 氧化层不仅薄, 而且与母材的冶金结合性好, 且易于观察, 因此氧化膜作为标记材料可以很好地追踪塑性金属的流动。ZENG 等^[34]通过放电加工获得铝合金工件表面的氧化层, 再将该氧化层用作工件的对接面, 如图 9 所示, 焊接时采用搅拌头“急停技术”, 焊后观察焊缝和匙孔不同水平截面和横截面的金相组织, 推断铝合金 FSW 过程中塑性金属的流动规律。研究发现, 搅拌针周围材料的流动能力自上而下依次减弱, 在同一水平面, 前进侧的材料流动比后退侧的材料流动更为剧烈。此外, 搅拌针表面的线速度要大于与之接触的材料流速, 表明搅拌头和材料之间存在着相对运动^[34]。

图 9 氧化层位置示意图

值得一提的是, 有时候为了简便起见, 也会将“面”形标记材料在某个截面上假定为二维的“线”形标记材料来追踪材料流动。

1.4 “体”形标记材料

“体”形标记材料是指具有一定体积的块状标记材料, 和“点”形、“线”形和“面”形标记材料相比, 不再是抽象出来的产物, 因此, 从示踪效果来讲, 更加贴近真实的材料流动。但是“体”形标记材料因具有一定的体积, 无法像“点”、“线”、“面”形标记材料那样进行局部的材料流动追踪。其获得的材料流动信息, 通常是一个宏观、全局的材料流

动场。

常见的“体”形标记材料是采用两种成分不同的基体材料互为标记。例如沿着异种材料的对接面进行焊接时,前进侧的材料和后退侧的材料会发生流动和相互混合,由于不同材料耐蚀性不同,可以通过焊后金相分析直观地观测到材料的流动。

ZHONG 等^[35]利用 2024 铝合金和 6061 铝合金对接焊(图 10),焊后观察焊缝横截面的金相组织来研究附加的超声振动对 FSW 材料流动的影响。

图 10 异种材料对接焊接示意图

LIU 等^[36]采用横贯式异种材料焊接进行材料流动示踪研究,即在焊接异种铝合金时,搅拌头垂直于对接口前进,这样,第一种材料会在搅拌头的带动下进入第二种材料中,二者可相互视为标记材料。焊后通过观察匙孔的水平截面、横截面以及纵截面的金相组织来推断材料流动。其试验原理示意图如图 11 所示。该方法有效地揭示了 FSW 焊缝结构的形成机理。

图 11 横贯式异种材料焊接示意图

GAO 等^[37]采用异种材料搭接焊方式进行标记材料示踪,来研究附加超声振动对 FSW 搭接焊过程中材料流动的影响。其将 6061 铝合金和 2024 铝合金以如图 12 所示的方式进行搭接焊,焊接时采用搅拌头“急停技术”,焊后观察匙孔和焊缝在不同横截面上的宏观金相照片,从而获得超声振动对 FSW 搭接焊过程中材料流动的影响。

图 12 异种材料搭接焊示意图

2 焊缝成形

在 FSW 焊接过程中,塑性材料的流动直接关系

到焊缝成形的质量。研究 FSW 过程中的塑性材料流动,对于充分理解焊缝成形机理,分析焊缝内部孔洞和表面成形不良等缺陷的产生原因,具有重要的理论指导意义。总结上述各类采用标记材料示踪的研究结果,可以发现 FSW 的焊缝成形往往具有以下突出特点。

(1) 焊缝横截面通常呈现出上宽下窄的漏斗状。轴肩和搅拌针都会对材料流动和焊缝成形产生影响,并且两者是相互影响的。GUERRA 等^[38]在文章里提到:焊缝上部(约 1/3 厚度)的材料主要受轴肩影响而流动,而下部的材料主要受搅拌针的影响而流动。ESMAEILI 等^[39]研究也表明:上部材料主要受到轴肩的作用,因此将其定义轴肩影响区;下部材料主要受到搅拌针的作用,将其定义为搅拌针影响区。

XU 等^[14]采用“面”形标记材料示踪,发现在下部搅拌针影响区会形成周期性带状结构。周期性带状结构在焊缝水平截面和纵截面上的间距都等于搅拌头旋转一周所前进的距离。该周期性带状结构在焊缝横截面上表现为“洋葱环”结构。LIU 等^[40]同样采用“面”形标记材料,通过搅拌头急停并观察“匙孔”周围的材料流动,发现在轴肩影响区,材料流动是连续的,而在搅拌针影响区,材料流动是非连续的,并因此而导致周期性带状结构的形成。这些研究有效揭示了“洋葱环”结构的本质,即“洋葱环”结构实际上是材料周期性流动形成的一个个弧面在焊缝横截面上的剖视图。LIU 等^[36]随后采用“体”形标记材料进一步研究指出,在轴肩影响区,绕着搅拌头存在一个旋转流动区,旋转流动区的材料一边随着搅拌头沿焊接方向移动,一边在垂直方向螺旋上升,运动到焊缝上表面。而形成主要焊缝结构的材料则以连续流动的方式直接绕过旋转流动区,停留在焊道上。

(2) 焊缝表面会形成周期性的弧纹结构。该周期性弧纹结构与搅拌针影响区的周期性带状结构既有相似之处,也有所区别。相似之处在于二者的周期性间距都等于搅拌头旋转一周所前进的距离,表明二者的形成与搅拌头的旋转密切相关。CUI 等^[41]认为二者都是由搅拌头旋转造成的应力状态变化而引起的机械震动效应,而应力状态的变化是由于搅拌针表面的螺纹而引起的。CUI 等的理论很好地解释了带螺纹的搅拌针焊接时出现的周期性弧纹结构,但是对于 LIU 等^[42]使用光滑表面的搅拌针仍然观察到周期性弧纹结构,该理论不能做出合理的解释。HU 等^[43]认为在搅拌头旋转一周内,材料从“硬”变“软”导致了搅拌头位置的波动,进而导

致表面弧纹结构。但是需要指出的是, 虽然 LIU 等^[44]的研究证实了搅拌头偏移的存在: 搅拌头和工件材料之间的接触力会使搅拌针偏移原始位置, 向前进侧和焊接反方向偏移; 当焊接“终止”后, 系统松弛使搅拌针在离开工件之前沿弧线返回其原始位置。但是这种偏移是连续性的, 并不是周期性的。因此 HU 等的理论仍然无法解释表面周期性弧纹的形成。

表面弧纹结构和搅拌针影响区的周期性带状结构的区别在于, 前者与后者之间隔着轴肩影响区, 但是在轴肩影响区却从未观察到周期性现象。因此, 有理由相信他们之间并没有直接关联。总而言之, 目前关于表面弧纹形成机理的认识仍然不足, 仍需进一步研究。

(3) 热输入不足时, 焊缝底部会出现隧道型缺陷; 热输入不足加剧时, 内部隧道型缺陷会延伸至焊缝表面, 呈现出表面沟槽缺陷。

MORISADA 等^[45]应用小钨球示踪和实时 X 射线成像系统直接地观察到了焊缝底部隧道型缺陷的形成过程。发现该类缺陷是由于缺乏旋转的材料流动而引起的。缺陷形成时, 材料流动比率(材料流动角速度与搅拌头旋转角速度之比)明显减小, 且变得不稳定。LIU 等^[42]通过“面”形标记材料示踪和焊后金相观察, 推断出隧道型缺陷的发生位置位于三个不同区域的材料流动的交汇处, 即搅拌针底部驱动的材料流动, 搅拌针侧面驱动的材料流动, 以及受轴肩驱动的材料流动。当热输入不足时, 材料的软化程度不够, 搅拌针影响区的材料会因驱动力不足而无法从搅拌针后方的后退侧流动到与前进侧的剪切面(搅拌针向前行走时在前进侧旋转剪切材料而形成)相接触。这时, 会在二者之间形成一个间隙。接下来, 如果轴肩从该区域上方经过时产生的锻压力足够大, 就可以将轴肩影响区的材料挤压进入这个间隙, 从而避免缺陷的产生, 而如果锻压力也不足, 这个间隙就因无法弥合而形成永久性间隙, 也即隧道型缺陷。而当热输入严重不足时, 在搅拌头后方, 不仅搅拌针影响区的材料无法从后退侧流动到与前进侧的剪切面相接触, 轴肩影响区的材料也因软化程度不足而无法从后退侧流动到前进侧, 导致了表面沟槽缺陷的产生。

3 存在的问题

目前为止, 关于 FSW 材料流动的试验表征研究主要还是集中在搅拌过程中的材料迁移机理, 即焊缝的宏观结构是如何形成的。而对材料流动过程

中的流速、经受的应变和应变速率等关系到焊缝微观组织演变的关键流动数据的试验表征研究还严重不足。

MORISADA 等^[20-21]利用两套 X 射线实时成像系统和小钨球示踪, 成功观察到了三维的材料流动信息。再根据材料流速的变化来评估材料的塑性应变速率。KUMAR 等^[22]利用一个试验模拟的方法, 将微小的玻璃球放进透明的黏塑性材料中, 再结合粒子图像测速技术, 从而获得材料的流速信息, 然后再通过与 MORISADA 等类似的方法, 来计算流动过程中的应变速率。但是, 上述两种方法测量的材料流速和应变速率的精确度仍存在问题: 第一种方法, 钨球的密度远大于周围的基体材料, 导致钨球的速度变化总是滞后于周围材料的速度变化; 第二种方法, 透明的黏塑性材料与真实的金属材料物性差异巨大, 并不能真实反映 FSW 焊接过程。

针对此问题, LIU 等^[46-47]提出了一个新的解决方案。他们在“面”形标记材料的基础上, 赋予其一定的厚度, 使其具有“体”形标记材料的优点。通过采用与基体材料物理性质相近、化学组分含量不同的材料作为标记材料, 并结合搅拌头“急停技术”, 通过评估标记材料在搅拌头周围的畸变, 来获取材料流动的流速、应变以及应变速率。然而, 目前的评估方法是材料流动近似为二维的平面流动, 即仅考虑标记材料在匙孔水平面上的迁移和畸变。而实际的材料流动是一个三维的流动过程。如何采用试验手段表征三维空间内的材料流速、应变和应变速率, 是当前面临的主要挑战。

4 结论

本文归纳总结了采用试验表征手段研究搅拌摩擦焊接过程中材料流动的各类方法。重点分析了采用“点”、“线”、“面”和“体”形标记材料的试验方法及其优缺点。综述了搅拌摩擦焊缝成形机理研究现状, 指出了需要进一步研究的关键科学问题, 具体如下。

(1) 采用“点”形标记材料时, 通常观测难度较大。为了便于观测, 往往需要使用物性差异巨大的材料做标记, 牺牲了标记材料示踪法的精度, 并且“点”形标记材料无连续性。“线”形标记材料具有良好的连续性和空间展示性, 应大力发展。“面”形标记材料应用最为广泛, 可以一次性收集整个面内的材料流动信息, 但是无法有效处理三维的材料流动问题。“体”形标记材料可以获得全局的材料流动信息, 但是难以进行局部的材料流动追踪。

(2) 搅拌摩擦焊缝主要包括轴肩影响区和搅拌针影响区。轴肩影响区内存在旋转流动区, 旋转流动区前方的材料以连续流动的方式绕过旋转流动区直接停留在焊道上。搅拌针影响区的材料流动是非连续的, 具有显著的周期性。焊缝横截面上表现出的“洋葱环”结构实际上是这些周期性流动形成的一个个弧面的剖视图。关于搅拌针影响区的周期性材料流动和焊缝表面弧纹结构的产生机理, 仍需进一步研究。

(3) 当前, 搅拌摩擦焊塑性材料流动的试验表征面临的最大挑战是如何表征三维空间下的材料流动速率、应变和应变速率。这些关键的物理冶金参量对最终的焊缝微观组织和性能起着决定性作用。

参 考 文 献

- [1] THOMAS W M, NICHOLAS E D, NEEDHAM J C, et al. Friction stir butt welding: Great Britain, 9125978.8[P]. 1991-12-08.
- [2] MISHRA R S, MA Z Y. Friction stir welding and processing[J]. Materials Science and Engineering, 2005, 50(1): 1-78.
- [3] 万震宇, 周霞, 张昭. 6005-T6 铝合金搅拌摩擦焊接微观组织演变计算及力学性能预测[J]. 机械工程学报, 2018, 54(8): 129-136.
WAN Zhenyu, ZHOU Xia, ZHANG Zhao. Calculations of microstructural changes and predictions of mechanical properties in friction stir welding of AA6005-T6[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(8): 129-136.
- [4] PADHY G K, WU C S, GAO S. Friction stir based welding and processing technologies-processes, parameters, microstructures and applications: A review[J]. Journal of Materials Science and Technology, 2018, 34(1): 1-38.
- [5] 于明润, 赵洪运, 蒋智华, 等. 铝/黄铜异种金属搅拌摩擦焊接接头显微组织与力学性能[J]. 机械工程学报, 2019, 55(6): 39-45.
YU Mingrun, ZHAO Hongyun, JIANG Zhihua, et al. Research on microstructure and mechanical properties of friction stir lap welded aluminum/brass dissimilar joint[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(6): 39-45.
- [6] 武传松, 宿浩, 石磊. 搅拌摩擦焊接产热传热过程与材料流动的数值模拟[J]. 金属学报, 2018, 54(2): 265-277.
WU Chuansong, SU Hao, SHI Lei. Numerical simulation of heat generation, heat transfer and material flow in friction stir welding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2018, 54(2): 265-277.
- [7] 李文亚, 余敏, 李京龙, 等. 摩擦焊接头塑性金属流动行为研究现状[J]. 航空制造技术, 2010(24): 85-88.
LI Wenya, YU Min, LI Jinglong, et al. Research status of plastic metal flowing behavior of friction welding joint[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2010(24): 85-88.
- [8] 毛育青, 江周明, 柯黎明, 等. 铝合金厚板搅拌摩擦焊焊缝金属流动行为研究进展[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 1-15.
MAO Yuqing, JIANG Zhouming, KE Liming, et al. Material flow behavior of friction stir welding aluminum alloy thick plate joint[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(5): 1-15.
- [9] NANDAN R, DEBROY T, BHADRESHIA H K D H. Recent advances in friction stir welding-Process, weldment structure and properties[J]. Progress in Materials Science, 2008, 53(6): 980-1023.
- [10] SHI L, WU C S. Transient model of heat transfer and material flow at different stages of friction stir welding process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2017, 25: 323-339.
- [11] 陈高强, 史清宇. 搅拌摩擦焊中材料流动行为数值模拟的研究进展[J]. 机械工程学报, 2015, 51(22): 1-12.
CHEN Gaoqiang, SHI Qingyu. Recent advances in numerical simulation of material flow behavior during frictions stir Welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(22): 1-12.
- [12] JI S D, SHI Q Y, ZHANG L G, et al. Numerical simulation of material flow behavior of friction stir welding influenced by rotational tool geometry[J]. Computational Materials Science, 2012, 63: 218-226.
- [13] ZHANG J, SHEN Y, LI B, et al. Numerical simulation and experimental investigation on friction stir welding of 6061-T6 aluminum alloy[J]. Materials and Design, 2014, 60(8): 94-101.
- [14] XU S, DENG X. A study of texture patterns in friction stir welds[J]. Acta Materialia, 2008, 56(6): 1326-1341.
- [15] SCHMIDT H, HATTEL J. A local model for the thermomechanical conditions in friction stir welding[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005, 13(1): 77-93.
- [16] GUERDOUX S, FOURMENT L. A 3D numerical simulation of different phases of friction stir welding[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2009, 17(7): 075001.
- [17] TONGNE A, DESRAYAUD C, JAHAZI M, et al. On material flow in friction stir welded Al alloys[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 239: 284-296.
- [18] 张昭, 张洪武. 搅拌摩擦焊的数值模拟[D]. 北京: 科学出版社, 2016.
ZHANG Zhao, ZHANG Hongwu. Numerical simulation

- of friction stir welding[D]. Beijing: Science Press, 2016.
- [19] COLLIGAN K. Material flow behavior during friction stir welding of aluminum[J]. *Weld Journal*, 1999, 78(7): 229-237.
- [20] MORISADA Y, FUJII H, KAWAHITO Y, et al. Three-dimensional visualization of material flow during friction stir welding by two pairs of X-ray transmission systems[J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65(12): 1085-1088.
- [21] MORISADA Y, IMAIZUMI T, FUJII H. Determination of strain rate in friction stir welding by three-dimensional visualization of material flow using X-ray radiography[J]. *Scripta Materialia*, 2015, 106: 57-60.
- [22] KUMAR R, PANCHOLI V, BHARTI R P. Material flow visualization and determination of strain rate during friction stir welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 255: 470-476.
- [23] 王希靖, 韩晓辉, 李常锋, 等. 厚铝合金板搅拌摩擦焊塑性金属不同深度的水平流动状况[J]. *中国有色金属学报*, 2005, 15(2): 198-204.
WANG Xijing, HAN Xiaohui, LI Changfeng, et al. Horizontal flow status of plastic metal in different depth during friction stir welding for thick aluminum alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005(2): 198-204.
- [24] DONATH T, BECKMANN F, ZETTLER R, et al. Investigation of material flow in friction stir welding using computed microtomography[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2004, 705(1): 1312-1315.
- [25] SCHNEIDER J A, NUNES A C. Thermo-mechanical processing in friction stir welds[C]// TMS Annual Meeting, March 2-6, 2003, San Diego. 2003: 43-54.
- [26] SCHNEIDER J, BESHEARS R, NUNES A C. Interfacial sticking and slipping in the friction stir welding process[J]. *Materials Science and Engineering A (Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing)*, 2006, 435-436: 297-304.
- [27] 黄奉安, 邢丽, 柯黎明, 等. 搅拌摩擦焊焊缝材料二维塑性流动研究[J]. *南昌航空工业学院学报*, 2003, 17(3): 17-19.
HUANG Fengan, XING Li, KE Liming, et al. The studies of material two-dimensional plastic flow in friction stir welding[J]. *Journal of Nanchang Institute of Aeronautical Technology*, 2003, 17(3): 17-19.
- [28] 张武, 柯黎明, 邢丽. 搅拌摩擦焊焊缝横截面塑性材料迁移行为分析[J]. *材料工程*, 2008(2): 62-66.
ZHANG Wu, KE Liming, XING Li. Investigation of the cross section transfer of plasticized materials in friction stir welding for aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Engineering*, 2008(2): 62-66.
- [29] SCHMIDT H N B, DICKERSON T L, HATTEL J H. Material flow in butt friction stir welds in AA2024-T3[J]. *Acta Materialia*, 2006, 54(4): 1199-1209.
- [30] SEIDEL T U, REYNOLDS A P. Visualization of the material flow in AA2195 friction stir welds using a marker insert technique[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2001, 32(11): 2879-2884.
- [31] REYNOLDS A P. Visualisation of material flow in autogenous friction stir welds[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2000, 5(2): 120-124.
- [32] REYNOLDS A P. Flow visualization and simulation in FSW[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 58(5): 338-342.
- [33] NAGIRA T, LIU X C, USHIODA K, et al. Role of annealing twinning in microstructural evolution of high purity silver during friction stir welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2019, 24(7): 644-651.
- [34] ZENG X H, XUE P, WANG D, et al. Material flow and void defect formation in friction stir welding of aluminium alloys[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018, 23(8): 677-686.
- [35] ZHONG Y B, WU C S, PADHY G K. Effect of ultrasonic vibration on welding load, temperature and material flow in friction stir welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, 239: 273-283.
- [36] LIU X C, SUN Y F, MORISADA Y, et al. Dynamics of rotational flow in friction stir welding of aluminium alloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2018, 252: 643-651.
- [37] GAO S, WU C S, PADHY G K. Process and joint quality of ultrasonic vibration enhanced friction stir lap welding[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2018, 23(8): 693-703.
- [38] GUERRA M, SCHMIDT C, MCCLURE J C, et al. Flow patterns during friction stir welding[J]. *Materials Characterization*, 2002, 49(2): 95-101.
- [39] ESMAEILI A, BESHARATI GIVI M K, ZAREIE RAJANI H R. Experimental investigation of material flow welding defects in friction stir welding of aluminum to brass[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2012, 27(12): 1402-1408.
- [40] LIU X C, WU C S. Material flow in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 225: 32-44.
- [41] CUI G R, MA Z Y, LI S X. Periodical plastic flow pattern in friction stir processed Al-Mg alloy[J]. *Scripta Materialia*, 2008, 58(12): 1082-1085.
- [42] LIU X C, WU C S. Elimination of tunnel defect in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding[J].

- Materials and Design, 2016, 90: 350-358.
- [43] HU Y, LIU H, FUJII H. Improving the mechanical properties of 2219-T6 aluminum alloy joints by ultrasonic vibrations during friction stir welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 75-84.
- [44] LIU F C, NELSON T W. In-situ material flow pattern around probe during friction stir welding of austenitic stainless steel[J]. Materials and Design, 2016, 110: 354-364.
- [45] MORISADA Y, IMAIZUMI T, FUJII H. Clarification of material flow and defect formation during friction stir welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining. 2015, 20(2): 130-137.
- [46] LIU X, WU C, PADHY G K. Characterization of plastic deformation and material flow in ultrasonic vibration enhanced friction stir welding[J]. Scripta Materialia, 2015, 102: 95-98.
- [47] LIU X C, SUN Y F, NAGIRA T, et al. Experimental evaluation of strain and strain rate during rapid cooling friction stir welding of pure copper[J]. Science and Technology of Welding and Joining. 2019, 24(4): 352-359.

作者简介: 甄云乾, 男, 1994 年出生。主要研究方向为搅拌摩擦焊接过程金属塑性流动行为。

E-mail: yunqianzhen@163.com

刘小超(通信作者), 男, 1990 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为搅拌摩擦焊工艺机理及与之相关的材料行为。

E-mail: xcliu@nwpu.edu.cn