

摩擦焊接头塑性金属流动行为 研究现状

Research Status of Plastic Metal Flowing Behavior of Friction Welding Joint

西北工业大学摩擦焊接陕西省重点实验室 李文亚 余 敏 李京龙 李雪飞



李文亚

博士,副教授,硕士生导师,西北工业大学材料学院院长助理。主要研究方向为摩擦焊接与热喷涂。入选 2008 年度教育部新世纪优秀人才计划;主持、参与多项国家自然科学基金、教育部博士点基金等科研项目;2003 年以来发表 SCI 收录论文 65 篇。

摩擦焊接作为一种优质、精密、高效、节能和环保的固相连接技术,在航空航天及一般工业领域都有着巨大的应用潜力,在轻量化、高可靠性及低成本的装备制造中具有独特的优势^[1-3]。比如,在国外工业强国,惯性摩擦焊(IFW)已成功用于航空

通过对摩擦焊塑性流动的研究,建立焊接参数对塑性流动的影响规律,对于确定焊接参数、优化焊接工艺、控制焊缝接头的组织和性能,进而提高焊接质量具有重要的实用价值。

发动机粉末盘与轴的连接^[1],线性摩擦焊(LFW)已被应用到高推重比航空发动机整体叶盘的关键制造^[2],搅拌摩擦焊(FSW)已用于飞机机舱等大型铝合金构件的制造^[3]。国内也将摩擦焊应用到了部分构件制造上^[1-3]。国内对摩擦焊的研究主要集中在对摩擦焊工艺及应用的研究。而对摩擦焊基础研究较少,至今仍有一些基础科学问题有待阐明,如热源机制、接头塑性金属流动行为等。正是由于国内基础研究的落后和国外技术的封锁,使得摩擦焊接头质量的稳定性与可靠性较低,因而制约了摩擦焊在国内重要构件上的大规模应用。

摩擦焊是一个涉及温度、力学、冶金及其相互作用的高度复杂过程^[4],此过程中以摩擦界面处材料的塑性变形为主,界面处塑性金属流动的产生以及流动行为将会影响到热

源的产生以及界面的扩散与动态回复再结晶,进而影响到焊接接头的质量。塑性金属层是否连续、完整和牢固地覆盖于摩擦界面,对能否形成无缺陷、优质的焊接接头具有重要影响。因此,研究摩擦焊接过程中塑性金属流动行为非常重要。通过对摩擦焊塑性流动的研究,建立焊接参数对塑性流动的影响规律,对于确定焊接参数、优化焊接工艺、控制焊缝接头的组织和性能,进而提高焊接质量具有重要的实用价值。

旋转摩擦焊接头 金属塑性流动

国外早期有关摩擦焊的研究主要集中在旋转摩擦焊接头形成过程中塑性流动与温度场的数值研究。1973年,Duffin与Bahrani^[5]对低碳钢管的连续驱动摩擦焊接过程进行了实验研究与分析,将工艺规范参数

与试样的变形情况进行了相关分析。1985年, Francis与Craine^[6]针对薄壁管件的连续驱动摩擦焊过程的摩擦阶段(不包括顶锻阶段)进行了分析,将变形层当做大粘性系数的牛顿流体,研究了变形层厚度、轴向缩短量与温度的关系。一些文献采用解析法建立塑性区的分析模型对摩擦焊进行了定性研究。如Rich等^[7]采用工程应力解析法建立了塑性区的塑性变形模型,从理论上定性地描述了顶锻变形阶段塑性区的流动情况。1994年, Midling与Grong^[8]采用实验与解析方法研究了Al-Mg-Si合金与Al-SiC复合材料的摩擦焊接过程中的温度变化与塑性流动行为,预测了接头的应变场与温度场。1997年, Bendzsak^[9]等人通过解析的方法,对惯性摩擦焊接头的塑性金属流动行为进行了初步的阐述。以上文献摩擦热的处理都是以当量热流密度的形式从摩擦界面输入,模型简化过多,尽管部分计算结果与实验结果吻合,摩擦焊条件下的塑性流动行为仍然没有被很好地阐明。

国内才荫先等^[10]于1984年采用了急停技术对45钢连续驱动摩擦焊接过程中变形层和高温区的扩展过程进行了研究。实验开展了摩擦压力和摩擦时间对变形层和高温区扩展过程规律的研究,并揭示了在摩擦加热开始时,变形层首先在距离圆心1/2~2/3半径处的摩擦表面上形成。变形层的厚度随摩擦压力的增大而增大。史弼^[11]采用解析法对摩擦焊接过程中的高温塑性变形区进行研究,定性地分析了焊接参数对塑性区宽度的影响。最近,张全忠^[12]基于弹塑性有限元理论,建立了GH4169环形件惯性摩擦焊接过程的热力耦合计算模型,并利用该模型定量地分析了环形件摩擦焊接过程接头塑性区的分布、扩展规律以及塑性区金属塑性变形速率的分布和变化情况。

搅拌摩擦焊接过程 塑性流动

在搅拌摩擦焊接过程中,工具形状、焊接参数和待焊材料直接影响焊缝金属的塑性流动,从而决定了焊核区、热机械影响区、热影响区的大小和性能^[13]。对搅拌摩擦焊过程中焊缝塑性金属流动的研究方法目前主要包括材料流动的可视化和计算机模拟2个方面。

1 试验方法

试验方法是获得摩擦焊塑性流动可视化的有效手段,近年来国内外对搅拌摩擦焊接过程材料塑性流动行为进行了大量实验研究,所采用的方法主要有:异种合金/金属焊接^[14-16]、焊缝组织观察^[17-18]、标记示踪技术等。涉及的主要技术有搅拌针冷冻技术和急停技术。

为可视化焊缝中复杂的塑性流动, Murr等^[14-15]研究了搅拌摩擦焊接2024Al和6061Al,铜和6061Al异种材料的连接。Ouyang等^[16]研究了FSW焊接2024Al和6061Al的材料流动行为,并将焊缝区域分为机械混合区、塑性流动区及由等轴晶组成的非混合区。异质金属的放置位置将影响焊缝组织和材料流动形态:放置于前进侧的软铝合金由于搅拌作用进入硬合金中时,其漩涡状流动形态较焊接同等硬度合金时更明显;而当硬合金位于前进侧时,硬合金被搅入软金属时,硬金属几乎占据了横截面焊缝,但漩涡状流动形态不明显。

Krishnan^[17]采用不同的焊接参数研究了搅拌摩擦焊6061Al和7075Al合金“洋葱圆环”的形成过程。葱环形状

是材料塑性流动的直接体现,这是采用组织法研究材料塑性流动的基础,而对葱环形成机理的研究对于研究整个材料的塑性流动过程有着重要的意义^[18]。Colligan等^[19]采用了钢球跟踪和急停技术研究了铝合金搅拌摩擦焊接头的流动行为。Colligan指出搅拌摩擦焊过程是材料搅拌和挤压共同作用的结果,具有不同流动特性和密度的示踪材料将导致不同的结果。

标记示踪技术是最为常用的观察金属塑性流动的方法,它是通过在合金母材中填入异种材料或元素,焊后观察所填异种材料或元素在焊缝接头中的分布,对比焊接前后异种材料或元素的位置变化状况,从而确定焊缝金属的流动状况。目前,所采用的示踪材料主要有:与母材具有不同腐蚀性的铝合金材料^[20-21]、铜箔^[22]、Al-SiCp和Al-W^[23]复合材料等。基于标记材料与母材金属流动一致且不影响母材金属流动,焊接后与母材有明显的腐蚀差异的选取原则, Reynolds和Seidel^[20-21]采用标记嵌入技术(marker insert technique)对搅拌摩擦焊2195Al-T8的材料流动行为进行了研究,标记材料5454Al-H32沿焊接方向埋入母材,布局如图1所示。腐蚀相观察发现:材料沿焊缝中心非对称流动,大量的标记材料在焊接后转移到它原始位置的后方,仅仅在前进侧上有少量的材料

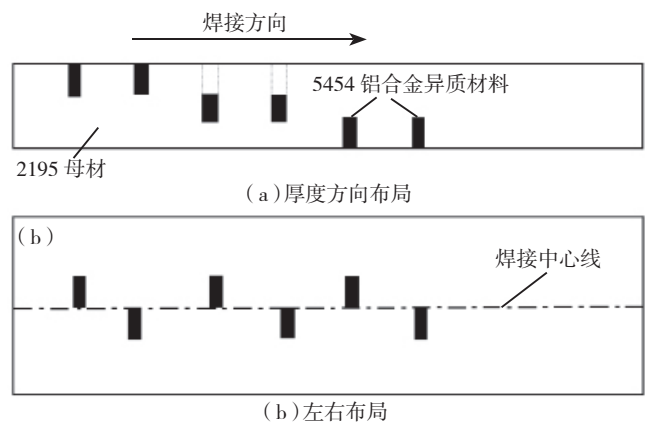


图1 标记布局示意图^[21]

转移到它原始位置前方。其次,材料在搅拌针范围内,前进侧材料向下流动,而在后退侧向上移动,“搅拌”效应仅作用在焊缝顶部,此处材料运输直接受到旋转工具轴肩的影响。Reynolds 等通过以上现象将搅拌摩擦过程粗略描述为一个“原位挤压(in-situ extruding)”过程。

Guerra^[22]采用接触面追踪仪和焊接结束时将搅拌针停滞在焊缝内的技术(搅拌针冷冻技术)研究了搅拌摩擦焊接 6061Al 的金属流动特性。它通过在接触面处嵌入 0.1mm 的高纯度 Cu 箔,焊后进行显微组织观察,实验表明流场流动情况主要由 2 个过程组成,第一个过程主要是前进侧搅拌针前方金属随着搅拌针旋转方向旋转前进,流动金属受到搅拌针螺纹的作用而向下流动,回填到前进侧,另一过程是后退侧流动的金属被挤出以填充前进侧。2 个过程各自形成的材料性能差异较大,因而文中得到焊缝性能与焊缝内塑性金属流动相关的结论。

随着复合材料的大范围应用,有研究者考虑了采用复合材料做标记材料,如 London^[23]采用 Al-SiCp 和 Al-W 复合材料作为示踪材料对搅拌摩擦焊接 7075Al-T7451 材料塑性流动进行了研究。实验结果表明,位于搅拌针前方的材料受到工具倾角作用明显上升,焊缝前方金属产生“犁耕行为(ploughing action)”。示踪材料在搅拌针周围发生剪切,而同时受到轴肩的作用被向下挤压。London 表明,在 FSW 中材料变形量取决于与搅拌针的相对位置,焊缝前进侧示踪材料分布区域较焊缝中心处宽。

国内对材料塑性流动的研究起步较晚,目前的文献中研究方法多引用国外的实验方法,例如,邢丽等^[24]通过研究 2014Al 合金的搅拌摩擦工艺及组织,对材料塑性流动进行了系列推测。报道指出,在前进侧焊缝塑性金属流动方向与母材塑性金属流

动方向相反,使母材金属与焊缝金属之间存在很大的变形差,在返回侧焊缝塑性金属流动方向与母材塑性金属流动方向一致,母材金属几乎平滑地与焊缝金属一起变形。栾国红^[25]采用异种铝合金搭接方式进行搅拌摩擦焊实验,焊后通过观察比较 2 种铝合金组织在焊缝金属的位置分布变化情况确定焊缝金属的流动情况。研究^[26-27]分别采用紫铜做标示材料和标记嵌入技术研究了铝合金塑性金属流动形态。实验均得到了类似 Reynolds 和 Seidel^[20-21]的实验结果。

实验方法探索焊缝金属的流动具有操作简单、观察直接的特点,且取得了一定的成果,但由于搅拌摩擦焊过程的复杂性,使得实验误差和工作量较大,且只能对焊缝金属的流动作定性分析。同时实验方法由于无法直接看到材料流动的过程而受到很大的限制。

2 计算机模拟技术

随着计算机技术的发展,运用解析和数学建模的方法来研究分析焊接过程中材料的流动成为一种重要的研究手段。早期的研究多采用二维模型对材料流动进行研究。文献[28]建立了滑动界面和摩擦接触 2 个模型模拟了 FSW 过程,计算预测了材料的流动形式,计算结果与标记嵌入技术获得的结果吻合较好^[20-21]。Smith 等^[29]建立了热力耦合流动模型,此模型将工具几何、合金类型、工具旋转速度、工具位置和移动速度作为输入量预测了材料的流动过程。Colegrove 等^[30]采用了二维计算流体力学软件 Fluent 研究了 FSW 工具附近的金属流动。所获得流动规律与 London 和 Guerra^[22-23]实验得到的流动规律几乎一致。文献[31]详细介绍了一种数值模拟和实验相结合的方法。数值模拟建立的固相力学模型确定了材料流动的速度场、材料流动特征以及塑性流动过程中的应力分布。实验部分是通过可视化跟

踪技术确定焊接前后的材料的流动模式。Seidel 等^[32]基于流体力学理论建立二维 FSW 模型,此模型将把 FSW 焊接过程认为是层流、粘性、非牛顿流体绕过旋转的圆柱体搅拌头。材料塑性变形产热使得焊缝金属发生软化。二维模型预测了焊缝金属流动在多数情况下,材料都是从后退侧绕过搅拌头流动的。

基于流体力学分析材料流动行为是不能准确反映材料在焊接过程中的运动本质的,一些学者(如张洪武等^[33])使用通用有限元软件 ABAQUS 对 FSW 的搅拌过程进行二维模拟,研究了焊接工艺过程中焊件材料的流动情况以及在焊接过程中材料的应力和应变情况。得到以下 3 种流动模式,即:前进侧的材料绕搅拌头旋转数周之后沉积在搅拌头之后的尾迹中;后退侧的材料直接被搅拌头旋推到搅拌头的后方;靠近中间焊缝处的材料会进入旋转区绕搅拌头旋转。

以上二维模型过于简单,做了过多假设,并不能代表真实的 FSW 流动特性。英国焊接研究所的 Smith 在文献[34]中总结了搅拌摩擦焊过程中材料流动模拟的进展,指出搅拌摩擦焊三维空间模型更具有实践意义。Colegrove 等^[35]应用商用计算流体力学软件 FLUENT 模拟了 FSW 过程中金属材料的塑性流动,建立了 TrivexTM 搅拌头和 TrifluteTM 搅拌头的三维滑动模型。这些模型揭示了围绕探针的三维流动情况,并预测了横向压力和向下方向的压力。但在这个模型中, Colegrove 没有考虑搅拌头螺旋线、搅拌头倾斜角度、轴肩上的同心圆环以及搅拌头探针顶端冠状凸起对流体流动的影响。文献[36]利用温度场作为边界条件针对搅拌摩擦焊焊缝中复杂的金属的流动建立的模型分析了焊接速度、搅拌头旋转速度对模型的影响。得出了许多焊接过程中真实的特征,但此模

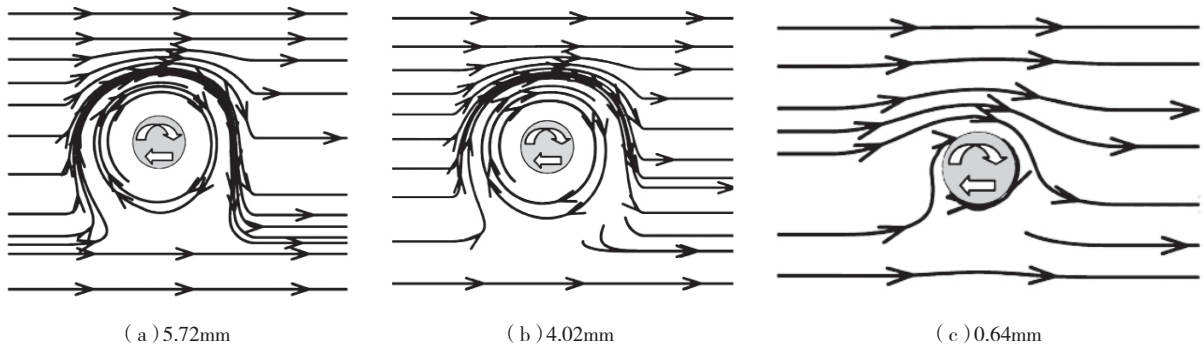


图2 距搅拌针端不同距离截面流线图^[38]

型没有预测出焊接压力。Nandan 等人^[37]根据以前的实验建立了三维金属粘塑性流动模型,模拟结果表明,搅拌摩擦焊过程热传导和材料流动有着明显的不对称性,而且随着焊接速度和搅拌头旋转速度的提高,这种不对称性也在增强。最近,Nandan 等人^[38]还建立了搅拌摩擦焊接中碳钢三维粘塑性流动和传热模型,模型采用非牛顿粘性计算了金属的流动,文献得到了不同深度的水平面流线(如图2所示),流线显示了近圆的存在,且为闭合的流线,这说明搅拌针周围材料存在回流。图中还表明材料移动主要发生在后退侧。

国内栾国红等^[39]在铝合金搅拌摩擦焊接头行为分析中详细介绍了搅拌摩擦焊接头塑性流变数值模拟所得到的结果。在搅拌头轴肩下大约1.5mm处,搅拌摩擦焊前进侧的塑性流体结构中存在一个不稳定区域——紊流区。这个紊流区的存在会严重改变金属材料的过渡途径。王大勇等^[40]建立了搅拌摩擦焊过程中热塑性软化区的流动行为物理模型,并将塑性软化区分为3层:轴肩附近、搅拌针上部和搅拌针下端附近。通过模型的建立和计算得出3层的材料流动特征各不相同:轴肩附近的材料首先流入因搅拌针行进而在搅拌针后部留下的空腔内,剩余材料则围绕着轴肩由前进侧流动到搅拌头的后部;搅拌针上部附近的材料以剪切的方式从搅拌针前部流

动到搅拌针后部;而搅拌针下端附近的材料以挤压的方式从搅拌针的前部流动到搅拌针的后部。王希靖等^[41]和王训宏等^[42]均采用FLUENT流体工程仿真软件对搅拌摩擦焊焊缝金属的塑性流动进行了数值计算与模拟。文献[42]初步得出了搅拌摩擦焊焊缝塑性流体流动横向、纵向规律。

从已有的文献来看,采用FLUENT软件能较好地模拟FSW中流体的塑性流动,但温度场无法很好阐明。同时,由于搅拌摩擦焊接头的特殊性,看作纯流体也是对实际过程的较大简化,结果也不太理想。文献[43]采用ABAQUS软件建立了基于非线性连续介质力学有限元模型,研究了不同参数下的搅拌摩擦焊条件下的材料流动,模拟结果表明,焊缝前进侧存在漩涡,且漩涡中材料流动速度随着移动速度的增加而增加。

3 物理模型

最近,Liechty等^[44]首次采用粘土(plasticine)作为物理类似物研究了搅拌摩擦焊金属塑性流动行为。文献中采用了不同硬度的非硫化粘土(NFP),实验表明相对较软的粘土能获得无缺陷焊缝,其流动特性也类似金属。虽然粘土是一种不定形的材料,其焊缝组织与金属组织不同,但其与金属具有相同的热物性,因而能定性分析和复制搅拌摩擦焊过程金属材料流动行为。同时采用不同颜色而性能相同的粘土可作为

标识材料可视化材料流动。Liechty等在文献[45]中对粘土物理模拟材料塑性流动做了进一步研究,通过在粘土中埋置小钢球和质点网格法定量研究搅拌摩擦材料流动过程。实验通过质点网格法获得了搅拌针附近材料的最大应变和应变率,分别为4.4和 $1.3s^{-1}$ 。实验结果还表明,工件材料和搅拌针表面为滑动接触,且紧邻搅拌针材料的最大速度为搅拌针速度的6%~7%。

结束语

对摩擦焊过程中接头塑性金属流动的实验研究虽然取得了一定的成绩,但由于摩擦焊过程的复杂性和无法直接看到焊接过程中材料的流动而受到很大的限制。随着计算机技术的发展,运用数值模拟的方法来研究分析焊接过程中材料的流动具有更广阔的前景。对摩擦焊塑性流动过程的数值模拟有助于对摩擦焊接机理的深刻理解,但由于摩擦焊是一个非常复杂的过程,与其相关的很多热物性参数还很缺乏,从而使得摩擦塑性流动数值研究仍面临诸多困难。但我们相信,随着计算机技术的发展和摩擦焊研究的进一步加深,摩擦焊过程数值模拟必将能为摩擦焊技术的发展和应提供新的动力。

本文共有参考文献45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 泰山)