



Friction-Stir Welding Technology of Light Alloy and Its New Development

北京航空制造工程研究所搅拌摩擦焊技术研究室 栾国红



栾国红

课题负责人,高级工程师,长期从事压力焊、熔焊等焊接方法的工艺及设备研究和开发。现为北京航空制造工程研究所高级工程师,中国搅拌摩擦焊中心主任,搅拌摩擦焊接技术专家,北京赛福斯特技术有限公司总经理,主要负责中心自主研发搅拌摩擦焊接设备及工艺技术的开发,曾主持多项“八五”、“九五”、“十五”等重要项目。

26 航空制造技术·2009年第9期

搅拌摩擦焊(FSW)作为一种快速发展的新型固相焊接方法,正在成为世界范围内的热点焊接方法。该方法自发明^[1]以来就受到制造业关注,现正在逐渐成为轻合金金属的主导焊接方法,在新型飞机、空间飞行器、舰船、高速列车、汽车、电子、电力以及能源等行业得到推广应用。

现代交通工具的高速、节能、轻量化是当今技术发展的大趋势,轻质陆路和海洋交通工具,如铝合金高速列车、全铝合金汽车、铝合金高速舰船等产品逐渐受到市场欢迎;同时,镁合金和钛合金等轻合金材料在飞机、导弹及运载火箭等空间运输工具领域也得到了广泛的应用和深入发展。

焊接是轻合金材料的重要连接技术之一,具有减重、节材和提高生产效率的作用。新型的高强铝合金、镁合金和钛合金等材料采用传统的

熔焊(TIG/MAG)方法存在系列问题,如熔焊过程中合金元素的烧损和力学性能降低、焊缝缺陷的产生和结构可靠性损伤、接头的残余应力和变形等。所以,一方面传统的熔焊方法在向高能量密度的等离子、电子束和激光等先进熔焊方法发展,另一方面,新型的固相(非熔化)焊接方法如搅拌摩擦焊在轻合金焊接方面得到了快速发展和应用。

搅拌摩擦焊(FSW)作为一种快速发展的新型固相焊接方法,正在成为世界范围内的热点焊接方法。该

方法自发明^[1]以来就受到制造工业关注,现正在逐渐成为轻合金金属的主导焊接方法,在新型飞机、空间飞行器、舰船、高速列车、汽车、电子、电力以及能源等行业得到推广应用。本文在简要介绍搅拌摩擦焊方法的原理和特点的基础上,主要介绍了铝合金^[2-3]、镁合金^[4]、钛合金^[5-7]等轻合金材料的搅拌摩擦焊技术,并且对搅拌摩擦焊技术的基础问题和进一步发展进行了探讨和展望。

搅拌摩擦焊原理和特点

搅拌摩擦焊是利用一种特殊的搅拌工具(搅拌头),在动力驱动下旋转着插入待焊零件的界面,搅拌头与被焊材料的物理摩擦使待焊材料的温度升高并热塑化,当搅拌工具沿着待焊界面向前移动时,在搅拌头摩擦、搅拌及锻压作用下,热塑化材料由搅拌工具的前部向后部转移,并在热-力复合作用下扩散和再结晶,形成致密可靠的固相连接。

搅拌摩擦焊过程中,主要有搅拌工具的旋转、插入、热塑化和向前移动等步骤组成。焊接过程中,热塑化的金属材料需要在搅拌工具的作用下进行迁移,在迁移过程中搅拌工具的形状对焊缝的形貌具有决定性的影响,尤其在周期性的摩擦载荷和位移行为的作用下,焊缝的横截面金相组织具有典型的“洋葱”环状结构特点。

经过实际焊接温度测量和数值模拟计算结果得知,搅拌摩擦焊的焊接温度一般都低于被焊接材料的熔点,由于搅拌摩擦焊的热源主要来源于搅拌工具与材料之间的物理摩擦和对塑化材料的变形屈服,当搅拌工具周围的材料温度上升时,材料的摩擦系数及屈服强度的降低会导致搅拌工具产热量减少,焊接温度也就会随之而降低;另外,如果被焊接材料达到了熔化状态,就会几乎终止焊接过程的产热行为,

这是一种极端行为,搅拌摩擦焊实质上是一个金属材料在动态热平衡和压力条件下的持续性的固相扩散连接过程。

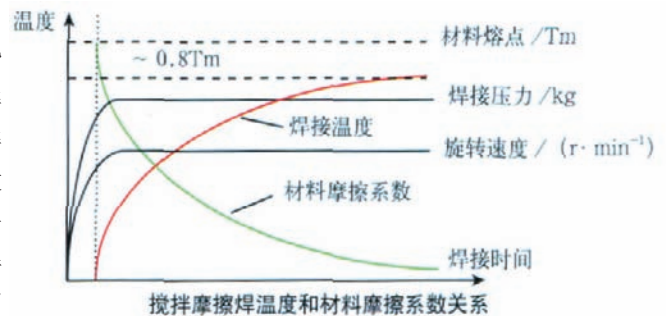
搅拌摩擦焊过程简单易控,非常类似于机械铣削加工,整个焊接过程不存在材料的熔化,没有烟尘和飞溅,焊接时不需要焊丝和保护气,具有诸多技术优越性。

首先,搅拌摩擦焊是固相焊接,接头性能优异。焊接过程无气孔和凝固裂纹等缺陷产生,无合金元素的烧损和偏析,接头组织致密,焊核区是致密精细的等轴晶组织结构,表现为各向同性。接头静态性能指标皆优于熔焊接头,搅拌摩擦焊接头性能数据离散性小,与熔焊接头相比,搅拌摩擦焊接头具有优异的抗疲劳性能,对于LF5、LF6等铝合金材料,焊缝区的断裂韧性甚至超过母材。

其次,搅拌摩擦焊焊缝应力低、变形小。搅拌摩擦焊接温度低于常规熔焊方法,焊接过程中没有材料的凝固收缩,接头的残余应力低,焊接结构的变形小,其主要原因是焊接过程中搅拌工具的轴肩和搅拌针上特殊设计的塑流位移沟槽和螺纹对焊缝区域的材料实施动态锻压作用,进一步降低了焊缝区域的残余应力和结构变形。

第三,搅拌摩擦焊是自动化焊接工艺、生产效率高。搅拌摩擦焊的施焊条件是具有机床设备类似的运动伺服驱动以及焊接参数的传感、设置和控制。焊接过程类似于铣床机械

加工,焊接参数容易实现直接的测量和控制,非常适合自动化焊接。产品生产不需要严格的焊接工人培训和认证,只需要简单的数控操作培训就可以从事批量化的工业产品生产。焊接生产效率由设备的运动控制决定,对于薄板铝合金材料,如2mm的6061Al材料,焊接速度可以达到6m/min。而且,搅拌摩擦焊接深度直接由搅拌工具的搅拌针的长度决定,对于厚度0.5~100mm的铝合金板材,搅拌摩擦焊可以一次单道实现焊接,与普通熔焊工艺相比较,生产效率可以提高5~10倍。



第四,搅拌摩擦焊是节能、节材、环保及绿色焊接技术。搅拌摩擦焊只在焊接区产热,并且直接由机械能转变为摩擦热能和塑性变形能,不需要热的传导,不需要电源加热,没有焦耳热损失,焊接热效率高,与电阻点焊比较可以节约90%的电能。通常情况下,搅拌摩擦焊不需要保护气和焊丝,焊接界面不需要特殊的打磨和开坡口,除电能外,几乎没有其他消耗。焊接过程工件不熔化,所以不会产生飞溅和烟尘,不需要吸尘装置,焊接环境良好;没有弧光、紫外和高频辐射,操作者可直接目视观察焊接过程,没有电击危险,是一种名副其实的绿色焊接技术。

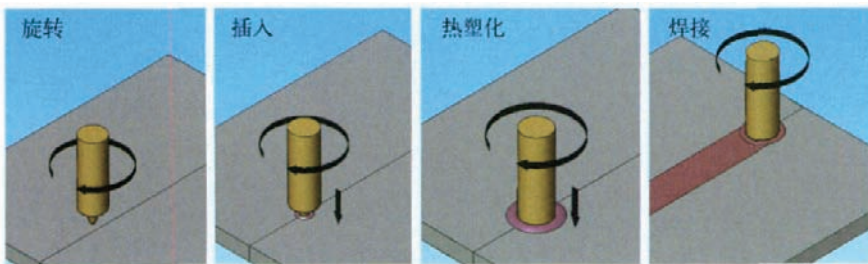
当然,搅拌摩擦焊在某些方面也存在局限性,例如:基于搅拌摩擦焊

表1 不同系列铝合金材料可焊性对比

系列	1000 (Al)	2000 (Cu)	5000 (Mg)	6000 (Si)	7000 (Zn)	8000 (Li)
熔焊 (MAG/TIG)	可焊	部分可焊	可焊	可焊	不可焊	不可焊
搅拌摩擦焊 (FSW)	可焊	可焊	可焊	可焊	可焊	可焊

本身的工艺特点,搅拌摩擦焊过程中需要施加足够大的顶锻压力和向前驱动力,所以被焊零件需要有一定的结构刚性或被牢牢固定来实现焊接;由于搅拌头的回抽,焊接末尾会存在“匙孔”,所以必要时,焊接工艺上需要添加“引入板和引出板”,甚至需要开发复杂的搅拌针可回抽焊接技术,或采用搅拌摩擦塞焊补孔;另外,与弧焊相比较,搅拌摩擦焊方法缺乏相对的柔性,焊接过程中需要对焊缝施加巨大的顶锻压力,局限了搅拌摩擦焊技术在机器人等柔性设备上的应用。

铝合金的搅拌摩擦焊



搅拌摩擦焊接过程

材料技术的进步使铝合金材料得到了快速发展,迄今已经发展出航空铝合金、宇航铝合金、装甲铝合金、铝基复合材料等不同系列和品种。在通常情况下,对于这些先进的铝合金材料,制造工艺一般不推荐甚至禁止使用熔焊进行连接。但是搅拌摩擦焊可以焊接所有系列的铝合金^[2-3](表1),从方法上彻底解决了铝合金材料的焊接问题。

铝合金的搅拌摩擦焊缝表面与机械铣削加工痕迹相类似,呈现周期性的波纹特征。焊缝的宽度与搅拌工具的轴肩直径相一致。铝合金材料搅拌摩擦焊缝的宏观显微组织一般具有典型的“洋葱环”状特征。根据焊缝区域晶粒的特点和所经历的物理冶金过程,搅拌摩擦焊接头一般具有4个特征区域,从焊缝中心到母材金属分别是:动态再结晶区、热-机影响区、热影响区、母材金属。其中动态再结晶区域的材料经历了

高应变速率条件下的回复和再结晶过程,热-机影响区金属材料在热循环和摩擦压力条件下主要发生了晶粒的畸变和长大,并且是搅拌摩擦焊区别于熔焊的特征区域。

对于所有系列的铝合金材料,搅拌摩擦焊工艺技术已经基本成熟,在焊接厚度上英国焊接研究所(TWI)已经实现了100mm厚度以上铝合金结构可靠焊接。在中国,2003年北京航空制造工程研究所中国搅拌摩擦焊中心就已经实现20mm厚度2000系列宇航材料的搅拌摩擦焊,2007年又实现了单道40mm厚度(双面70mm)铝合金搅

拌摩擦焊接。

从焊接结构角度讲,一般认为搅拌摩擦焊是长、直焊缝(平板对接和搭接)的理想焊接方法,但是,实际上由于搅拌摩擦焊过程不存在被焊接材料的熔化,焊缝成形和质量不会受到焊缝或工件位置的影响,主要依靠设备来保证,搅拌摩擦焊可以实现全位置结构的焊接,如水平焊、垂直焊、仰焊以及任意位置和角度的轨道焊接。典型的搅拌摩擦焊接头形式包括板板对接、多层对接、多层搭接、T形接头、角接等。中国搅拌摩擦焊中心2007年研制成功的国内首台大型多轴数控搅拌摩擦焊设备,已经实现运载火箭燃料贮箱椭球形箱底产品的纵缝和环缝搅拌摩擦焊。

在国家相关机构和部门的支持下,中国搅拌摩擦焊中心已经完成了系列化的铝合金材料的搅拌摩擦焊力学性能研究,其中包括纯铝、硬铝、锻铝、铸铝超硬铝及铝锂合金材

料等。对于非热处理强化铝合金材料(如5083A1),搅拌摩擦焊的热循环过程对材料的连接强度没有影响,搅拌摩擦焊接头硬度会明显提高,拉伸测试一般在远离焊缝的母材上断裂,连接系数已达到了100%。对于热处理强化铝合金(如6082-T6、2219-T87和7075-T7351等),接头强度的最低值一般出现在靠近焊核区的前进侧,经过焊后固溶热处理,接头的性能可以得到回复和强化。对于7000系列超硬铝和装甲铝合金,经过自然时效,接头的强度可以得到进一步提高。表2为中国搅拌摩擦焊中心于2008年研究获得的飞机铝合金材料搅拌摩擦焊接头室温性能数据,这些数据的取得为我国新型飞机制造技术的发展奠定了基础。

镁合金的搅拌摩擦焊

镁合金是最轻的工程金属材料,密度是铝合金的2/3,钢合金的1/4,但比刚度和比强度是铝合金的1.8倍和2.1倍,而且具有很好的耐冲击,阻尼吸震和电磁屏蔽以及切削加工性能,将成为现代汽车、航空、航天、国防建设的重要材料。所以镁合金的连接是搅拌摩擦焊发展的又一个重要方向。

2001年英国焊接研究所首次实现了AZ91和AM50镁合金材料的搅拌摩擦焊接^[8-9]。研究结果认为,镁合金与铝合金相类似,具有很好的搅拌摩擦焊接性,由于接头组织的精细化,接头的硬度的得到了提高,机械性能和疲劳性能与母材相当。

2002年英国TWI又对AM50、AM60、AZ31、AZ91等进行搅拌摩擦焊技术研究,研究结果表明搅拌摩擦焊非常适合同种和异种镁合金材料的焊接,并且不会受到母材金属中的气孔、晶间夹杂等的影响。但是与铝合金比较,镁合金的搅拌摩擦焊工艺窗口较窄,还需要进一步改进和优

化搅拌工具的设计。另外相对于AZ系列镁合金,AM系列镁合金更容易对搅拌工具粘着,要实现AM系列镁合金的搅拌摩擦焊,还需要对搅拌摩擦焊工具表面镀膜和优化搅拌摩擦焊工艺条件。搅拌摩擦焊过程对镁合金材料有软化作用,但是接头的连接强度一般不会低于母材的80%~90%。

中国搅拌摩擦焊中心早在2002年就与哈工大等科研院所合作进行镁合金材料的搅拌摩擦焊研究,AZ31镁合金表现出非常好的搅拌摩擦焊接性,连接系数可以达到95%以上。另外南昌航空学院、天津大学、清华大学、西北工业大学、西安交通大学等也开展了镁合金的搅拌摩擦焊研究,材料主要有AZ31、AZ81、AZ91、MB2、MB3、MB8等镁合金,但都处于探索研究阶段。而中国搅拌摩擦焊中心已经在镁合金搅拌摩擦焊工具材料的选择、外形设计优化、表面镀膜处理、工艺参数的优化、接头性能的控制、镁合金结构和产品的焊接进行开发,目前中心正在尝试陆路交通工具的镁合金结构的搅拌摩擦焊工程化。

钛合金的搅拌摩擦焊

随着搅拌摩擦焊技术在低熔点轻金属材料领域的快速发展和成功应用,搅拌摩擦焊也逐渐向黑色金属及其他高熔点材料转移,其中钛合金的搅拌摩擦焊就是其发展方向之一。钛合金材料主要应用于航空、航天工业制造领域,尤其是飞机制造领域得到广泛应用,传统条件下,钛合金材料可以采用熔焊方法进行焊接,但是熔焊条件苛刻,控制过程复杂,并且易产生缺陷、接头强度较低。2005年中国搅拌摩擦焊中心针对常用的Ti-6Al-4V(TC4)钛合金材料进行了搅拌摩擦焊探索性研究,目标是利用搅拌摩擦焊实现钛合金材料的高质量焊接。

要实现钛合金的焊接,首先需要确定搅拌工具的材料。经过研究发现,钛合金的搅拌摩擦焊温度接近1334℃,普通工具钢、不锈钢、镍基高温合金等无法提供足够的热强度和刚度来制造搅拌工具满足搅拌摩擦焊焊接要求。考虑到材料的成本、可加工性以及商业性,本研究中搅拌工具材料为钨-铼合金(25%)。搅拌工具的轴肩采用了同心环状结构,搅拌针进行了平面锥形设计,以减少焊接过程中的金属塑流过渡抗力。

Ti-6Al-4V属于 $\alpha + \beta$ 相钛合金,其化学活性随温度升高而增

实现了全厚度搅拌摩擦焊接。

Ti-6Al-4V钛合金搅拌摩擦焊接接头金相图。可以看出,钛合金FSW接头形貌呈典型“碗”状结构,上部为轴肩摩擦作用区,下部为搅拌针作用区,焊接接头整体形貌与搅拌针形状非常接近,并且整个接头形貌基本上沿焊缝中心对称,焊缝前进侧与后退侧的形貌差别很小,这一点与铝合金搅拌摩擦焊接头中通常观察到的非对称形貌有明显不同;在钛合金接头中没有观察到铝合金搅拌摩擦焊接头典型的“洋葱环”结构。

比较钛合金FSW接头的微观

表2 飞机铝合金搅拌摩擦焊接头室温性能数据

材料和状态	母材	厚度/mm	屈服强度/MPa	抗拉强度/MPa	延伸率/%	接头系数/%
2024-T3	BM	1.3	-	501.4	24.2	95
	FSW	1.3	-	475.7	8.8	
2024-T3	BM	1.6	311.9	467.4	23.7	94
	FSW	1.6	310.8	460.5	14.1	
2524-T3	BM	1.6	-	449.2	28.9	100
	FSW	1.6	-	449.8	13.0	
7050-T7451	BM	6	462.89	526.5	13.1	87
	FSW	4	-	462.5	-	
7075-T6	BM	2.6	-	566.3	14.5	84
	FSW	2.6	-	475.8	6.4	

强,在高温条件下其抗氧化能力急剧下降,表面氧化层厚度会迅速增加,因此,在Ti-6Al-4V钛合金搅拌摩擦焊接过程中对FSW的焊缝进行了严格的惰性气体保护。要实现钛合金的搅拌摩擦焊,还需要考虑搅拌工具的传热以及对搅拌工具的夹持和保护,本研究中使用了特殊设计的液体介质冷却和气介质双层保护装置。搅拌摩擦焊过程中焊接垫板承受的温度和载荷与搅拌头类似,普通的钢垫板已经不能满足搅拌摩擦焊需要,本研究中采用了镍基高温合金材料(GH4169)作为焊接垫板。研究表明Ti-6Al-4V钛合金焊接性良好,FSW焊缝的表面得到了良好保护,焊缝呈银白色,背部平整,

金相组织,可以观察到Ti-6Al-4V钛合金母材组织比较均匀,基体由等轴 α 相和条状 β 晶粒组成,相间界面比较明显;FSW焊核区 α 相增多,并且有板状 α 相出现,可能是焊接过程当温度超过890℃时, β 相发生相变的结果。

选取典型试样对Ti-6Al-4V钛合金搅拌摩擦焊接头力学性能进行了测试,结果显示Ti-6Al-4V钛合金搅拌摩擦焊接头平均拉伸强度为820MPa,达到母材强度(895MPa)的90%,说明钛合金对于搅拌摩擦焊来说具有良好的焊接性。

异种材料的搅拌摩擦焊

搅拌摩擦焊的固相焊接优势以

及焊接过程中的物理冶金行为有助于实现异种材料的焊接。所以在工业化应用中,产品设计工程师不需要考虑不同系列铝合金之间的材料兼容性以及母材和焊材的匹配问题,搅拌摩擦焊可以直接实现不同系列和牌号铝合金材料的焊接(如2024/6061)。迄今,所中国搅拌摩擦焊中心已经实现了铝/镁(6061/AZ31)、铝/铜(1100/T2)、铝/钢(2A14/1Gr18Ni9Ti)等异种材料的搅拌摩擦焊接。

对于其他固相焊接方法,如普通回转摩擦焊、惯性摩擦焊和线性摩擦焊,由于焊接时间短,异种材料介质在焊接界面相互扩散渗透的位移有限,其接头性能存在陡变特点。而搅拌摩擦焊接头由于搅拌工具的独立搅拌行为在一定体积范围内扩大了异种材料的相互扩散和渗透,并且对于熔点及力学性能相近的铝合金、镁合金等轻质材料,搅拌摩擦焊接头的层状间混组织结构特征,消除了普通摩擦焊接头组织和成分的陡变特性,达到了均匀过渡的效果,有助于提高结构的整体一致性和疲劳性。

对于熔点相差巨大的异种金属材料,如铝合金和铜合金,也可以实现搅拌摩擦焊接。中国搅拌摩擦焊中心在2003年就实现了1100铝合金和T2铜接头的搅拌摩擦焊,在2005年还实现了6061铝合金和T2铜的搭接形式的搅拌摩擦焊接。铝/铜异种材料的搅拌摩擦焊具有一定的技术难度,由于2种材料的熔点相差巨大,铝合金的可锻温度为 $340^{\circ}\text{C} \sim 480^{\circ}\text{C}$,铜合金的可锻温度为 $590^{\circ}\text{C} \sim 930^{\circ}\text{C}$,要实现2种材料在同一个可锻塑化温度下的搅拌摩擦焊接非常困难,必须采取特定的技术手段才能实现,如焊接中心线和界面的偏移以及加大铝合金一侧的冷却和导热等。金相组织说明,铝铜合金的搅拌摩擦焊接头中,铜材质多以单个介质晶粒和畸变孤岛形式在接

头中存在,不容易和铝材料发生均匀性的间混组织结构,尽管可以实现冶金连接,但在 $480^{\circ}\text{C} \sim 520^{\circ}\text{C}$ 的搅拌摩擦焊温度范围内,很容易产生CuAl₂脆性相,影响接头的力学性能。

钢/铝复合接头在舰船中普遍使用,爆炸焊方法是普遍采用的一种工业化焊接方法。但是由于机械性能上的巨大差异,要实现钢/铝异种材料的搅拌摩擦焊同样具有技术难度。2005年,中国搅拌摩擦焊中心对钢/铝异种材料进行了试验研究。研究中首先考虑搅拌工具的选择必须满足既可以实现钢搅拌摩擦焊的热强度要求,还要有耐磨损特性,并且在搅拌头的形状设计上既要满足热塑流过渡要求,又要能恰当地对钢界面进行活化作用,从而可以实现瞬态固相扩散连接。所以钢铝异种材料的搅拌摩擦焊工具一般会选用镍基高温合金材料或钨基粉末烧结材料,焊接过程中搅拌针的外缘向钢材料靠近,并且要保持合适的过盈或间隙,依靠瞬间的焊接搅拌作用力加快材料之间的扩散连接,从而实现钢铝材料的搅拌摩擦焊。

日本大阪大学的研究人员尝试利用搅拌摩擦焊实现钛金属和镁合金的连接。采用的材料为工业纯钛轧制材及AZ31镁合金挤压材,被焊材板厚度为2.5mm,焊接形式为拼焊,焊接工具为SKD61模具钢。研究表明当搅拌头前进侧在AZ31一侧,后退侧在钛金属一侧时,形成的焊缝较好,而且镁合金不易耗损。当焊具旋转速度达1500r/min,搅拌头位置偏钛板侧约1mm时,可以得到无缺陷的合格接头,接头强度可以达到镁合金母材的65%。

搅拌摩擦焊的基础问题

虽然搅拌摩擦焊已经在轻金属材料领域得到快速发展和工业应用,但是搅拌摩擦焊还有许多基础性的

问题需要深入研究和理解,以便使该方法更加成熟和工业化。

首先,与其他固相焊接方法不同,搅拌摩擦焊依靠第三者介质作为产热源,并且直接利用机械能转化为热能,但搅拌摩擦焊具体产热机理还不是很清楚。有学者认为^[10],搅拌摩擦焊的产热是焊接工具搅拌摩擦机械能和热塑化材料的变形能共同作用的结果。在焊接插入阶段,摩擦热为主导;在焊接时,塑化金属的变形热将主导焊接产热的多少。但是目前大多数国内的研究文献还局限于依靠摩擦热进行搅拌摩擦焊机理的研究和过程模拟。对于搅拌摩擦焊产热机理的明确以及产热量的精准掌握是该技术发展的出发点。

其次,对于焊缝区金属材料,经过搅拌摩擦焊工具的搅拌摩擦作用,热塑化的金属材料需要从搅拌工具前部向后迁移才能实现焊缝的填充和扩散焊接^[11]。但是目前的各种示踪研究方法很难完全模拟和表达热塑化金属材料在搅拌摩擦焊接过程中连续相、离散相、强化相等在高应变速率条件下的动态恢复和再结晶,就连搅拌摩擦焊表面的波纹状表征以及焊缝内部典型“洋葱环”状组织结构和经常出现的“S”特征线,虽然在学术界也有一些研究和表述,但还没有学者能够给出明确的物理学和冶金学解释。所以对搅拌摩擦焊的塑流过渡和焊缝成型进行精确建模和模拟是掌握搅拌摩擦焊的基础。

第三,搅拌摩擦焊过程中存在热塑化金属材料在高应变速率下的动态再结晶和恢复,这种行为特征表面上直接与焊接参数相关,实质上与焊接接头的力学性能表现具有直接联系。所以研究在动态和极端的搅拌和摩擦相结合的物理行为作用下,轻金属材料在近熔点温度区域的超塑性表现、相变、偏析、凝聚及再结晶等特点是搅拌摩擦焊实现工程化应用的基础。

第四,搅拌摩擦焊的核心技术之一就是搅拌工具(搅拌头)。搅拌头是实现焊接和确保焊缝质量的先决条件。所以针对不同种类的金属材料、不同的接头形式和结构特点以及生产的经济性,优选搅拌头的材料和加工方法,优化搅拌头的形状和结构以便提高焊接质量和效率,以及对搅拌头进行表面改性以提高使用寿命等是搅拌摩擦焊的关键。

第五,搅拌摩擦焊接头的缺陷检测和质量评定也是搅拌摩擦焊的基础。作为一种新的焊接方法,搅拌摩擦焊缝的缺陷产生、检测和判定是该技术发展中提出的新问题。所以对搅拌摩擦焊接头的可靠性研究、检测方法研究以及判定标准的研究都是搅拌摩擦焊深入发展和在制造工业领域广泛应用的基础。

搅拌摩擦焊技术的新发展

迄今,搅拌摩擦焊已经在工业制造领域引起了一场革命,人们开始在全景领域考虑这种焊接方法的深入发展和对连接概念的影响。

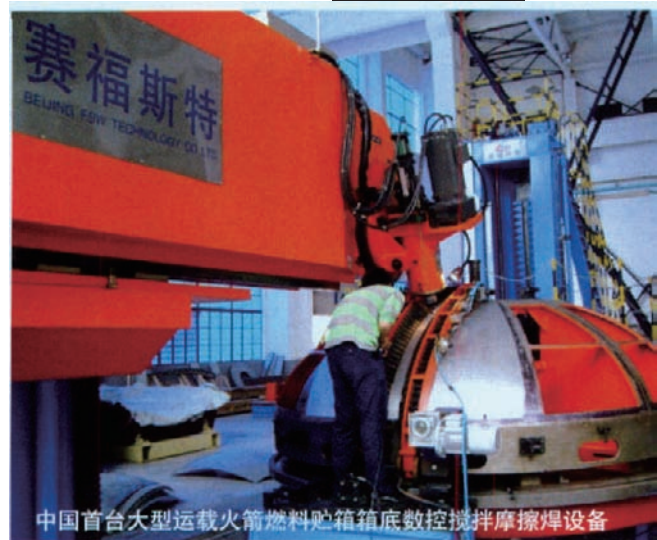
传统概念中的焊接是一种材料局部熔化和凝固的微冶炼过程,旋转摩擦焊是一种经历摩擦和压力顶锻的面对面瞬间扩散过程,扩散焊是一种时间消耗性的静压力扩散过程;而搅拌摩擦焊是一种低温(低于材料的熔点)机械搅拌摩擦条件下的高效物理冶金过程,其特点是:(1)焊接温度低、窗口裕度大,在全可锻温度范围内(150℃~450℃,A1)都可以实现焊接;(2)被焊接材料进行了充分机械搅拌和物理混合,具有一定体积范围,明显区别于回转摩擦焊的面连接;(3)焊接区域金属材料经历了固相条件下的大位置迁移和过渡,实现了高应变速率条件下的动态恢复和再结晶,具有高效焊接特点。基于以上特点,搅拌摩擦焊原则上可以实现全金属材料的焊接,甚至可以在太空中实现焊接。如2006年大阪大

学焊接研究所实现了熔点为2620℃超高温钼合金材料的搅拌摩擦焊^[12]。

在焊接方法上,搅拌摩擦焊已经发展出普通搅拌摩擦焊点焊、摆动式搅拌摩擦焊点焊和回填式搅拌摩擦焊点焊等方法,这些新型的点焊方法可以代替电阻点焊和实现“以焊代铆”,具有节能、高效和高性能的特点,在新型汽车和飞机制造方面具有深远影响,如日本川崎重工已经把普通搅拌摩擦焊点焊应用于高级轿车制造,美国的波音公司已经把回填式搅拌摩擦焊应用于F22战斗机的改型和换代。

普通的搅拌摩擦焊一般采用轴肩和搅拌针一体式的搅拌焊接工具,搅拌针的长度决定了焊接深度。为适应待焊工件的厚度变化,目前中国搅拌摩擦焊中心已经发展了搅拌针长度可以调节的肩针分体式搅拌摩擦焊工具,这种分体式搅拌摩擦焊工具一方面可以调节和控制焊接深度,另一方面还可以实现无匙孔搅拌摩擦焊;另外分体式的轴肩和搅拌针可以使用双动力驱动,焊接时搅拌工具的轴肩和搅拌针分别设定不同的旋转速度和压力,从而可以达到控制焊接接头热输入的效果。2008年8月英国焊接研究所公开报导了利用固定轴肩式搅拌摩擦焊实现钛合金材料连接^[13]。与此同时中国搅拌摩擦焊中心也开发出了可产生加强余高的固定轴肩式搅拌摩擦焊方法,并申请了发明专利。

近期,搅拌摩擦焊又发展出了双轴肩搅拌摩擦焊和双针搅拌摩擦焊技术。双轴肩搅拌摩擦焊可以实现对接工件的双面加热,彻底解决了普通搅拌摩擦焊容易产生根部未焊透的问题。2008年6月中国搅拌摩擦焊中心发明了类似的背部动态辅助摩擦加热型搅拌摩擦焊技术,解决了



普通搅拌摩擦焊大厚度焊接时热场不均匀的问题。双针搅拌摩擦焊方法控制焊缝的宽度和接头成形,可以提高接头的力学均匀性,在飞机类搭接接头产品中有很好的应用前景。

结论

(1)搅拌摩擦焊是一种新型的轻金属固相焊接方法,具有突出的技术优越性,可以广泛应用于轻合金金属材料工业制造领域。

(2)搅拌摩擦焊对轻金属材料具有很好的焊接性,既可以实现同种材料的焊接,又可以实现异种材料的焊接,尤其是钛/镁、镁/铝等异种材料的搅拌摩擦焊接,对新型航空、航天飞行器的设计和制造具有深远的意义。

(3)搅拌摩擦焊作为一种新型焊接方法,从物理产热、流变转移、再结晶细化、搅拌工具材料、缺陷检测和质量控制等方面存在诸多基础性问题需要深入研究和解决。

(4)搅拌摩擦焊是一种发展中的焊接方法,适合现代工业制造的发展,不断有新的搅拌摩擦焊方法诞生和得到推广应用,对汽车、列车、飞机等制造工业产生深远影响。

注:本文有参考文献13篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向编辑部索取。(责编 依然)