

几种新型搅拌摩擦焊技术

New Types of Friction Stir Welding Technology

大连交通大学 韩文妥 许鸿吉
北京航空制造工程研究所 李光 董春林 栾国红



韩文妥

大连交通大学与北京航空制造工程研究所联合培养硕士研究生。从事搅拌摩擦焊方面的研究。参与项目：“十一五”重点项目“新型精密焊接技术与装备研究”；航空基金重点项目“搅拌摩擦焊应力与变形规律研究”、“飞机整体结构件搅拌摩擦焊综合强度性能基础研究”等。

搅拌摩擦焊技术自 1991 年问世以来就倍受业界瞩目，特别是 1996 年搅拌摩擦焊被成功应用于宇航结构件的焊接以后，在制造业掀起了技术研究、发展和推广应用的热潮^[1-3]。

双轴肩自适应搅拌摩擦焊技术

搅拌摩擦焊作为一种先进的固

经过多年的发展和实践，新型的搅拌摩擦焊技术层出不穷，涉及领域广泛，其中最具代表性和创新性的新型搅拌摩擦焊技术有：双轴肩自适应搅拌摩擦焊技术、复合热源搅拌摩擦焊接技术、动态控制低应力无变形搅拌摩擦焊技术和双头搅拌摩擦焊技术。

相连接技术，已经在造船、航空航天、轨道交通等领域获得了广泛的应用。但是在一些特殊的加工过程中需要搅拌摩擦焊设备提供较大的焊接力，同时要求在焊接过程中对待焊零件进行严格装夹（包括背部的刚性支撑），这给某些特殊结构形式下实施 FSW 造成了困难，如大直径火箭贮箱环缝结构的焊接等。而双轴肩自适应搅拌摩擦焊（Self-Reacting Pin Tool, SRPT）技术成功地解决了上述问题。

1 原理

双轴肩自适应搅拌摩擦焊是通过上下轴肩夹持作用加紧工件，下轴肩代替了常规搅拌摩擦焊的垫板装置。搅拌针与驱动装置及下轴肩相连，这样既可调节加载载荷又可调整下轴肩的位置。且上轴肩与单独的驱动轴相连，这种上下轴肩单独控制的方式使得自适应系统得以实现，并且使上下轴肩的顶锻力反向相等，整

个工件在垂直板件方向所受合力为零。由于 SRPT 采用了两个轴肩的模式，提高了焊缝背部的热输入，可以预防和降低焊缝背部缺陷。

与常规 FSW 相比，SRPT 有两个独立控制的轴肩；常规 FSW 焊件背面需要配套的刚性支撑垫板，而 SRPT 焊件背面则不需要；常规 FSW 被焊工件需要严格的装夹，焊件需要被垂直及侧向压紧，而 SRPT 大大简化了装夹机构；常规 FSW 焊缝背部常常是整个焊件的薄弱环节，SRPT 由于下轴肩的产热减小了从焊缝表面到背部的温度梯度，降低了焊缝的热损耗，提高了热效率，因此可以很好地消除焊缝背部未焊透等缺陷。

2 试验验证与工程应用

Edwards 等^[4]成功地应用双轴肩自适应搅拌摩擦焊技术对薄板铝合金进行了焊接，试验表明：在薄板焊接领域此技术可以实现 1.8mm 及

更薄的铝合金型材的焊接;焊接速度可以达到 $1\text{m}/\text{min}$ 以上;对 2mm 厚A16061铝合金的试验表明,焊缝强度系数可达88%,而且强度系数还可以进一步提高。

TWI的研究表明^[5]:双轴肩技术可以在较低的轴向顶锻力下焊接 25mm 厚的铝板;此项技术可以提供完全焊透的焊缝,不会出现未焊透和其他根部缺陷。

复合热源搅拌摩擦焊技术

复合焊接是指为了满足材料加工的要求,将2种或2种以上单一焊接方法集于一体,取长补短,从而形成新的、更为先进的焊接方法。由于搅拌摩擦焊过程中,焊接热能主要是搅拌头与工件间的摩擦产热及塑性变形产热,其特殊的产热方式决定了在焊接高熔点、大厚度合金时焊接速度往往较低。为克服上述不足,焊接工作者们不断研究开发出多种FSW复合技术,如以感应热、电阻热、电弧、激光、等离子弧等做为辅助热源的复合搅拌摩擦焊接技术^[6-7]。

但这些方法在实际应用中总存在这样或那样的缺点,如以感应热为辅助热源的复合搅拌摩擦焊接技术,无法利用感应线圈在特定位置上精确加热,只适用于导磁性材料。并且感应电流可能会横越焊接路径形成不良的放电火花等。而以电阻热为辅助热源的复合搅拌摩擦焊接技术只适用于导电材料,需要对搅拌头进行特殊处理以避免其导电等。目前国际上在此领域的研发工作主要是以激光为辅助热源的复合搅拌摩擦焊技术(Laser Assisted Friction Stir Welding, LAFSW)和以等离子弧为辅助热源的复合搅拌摩擦焊技术(Plasma Arc Assisted Friction Stir Welding, PAFSW)^[6-8]。

1 以激光为辅助热源的复合搅拌摩擦焊技术

以激光为辅助热源的复合搅拌

摩擦焊技术在焊接过程中采用高能激光束预热搅拌头前方待焊接试件。试件在激光的作用下受热变软,在随激光跟进的搅拌头旋转、摩擦、锻压作用下最终形成牢固的接头。G. Kohn等人发现通过对激光能量及作用区域的控制,可以准确控制焊接热输入的大小和工件预热区域的范围,避免了搅拌头和夹持装置受到激光热能的影响。

由于LAFSW采用激光预热搅拌摩擦焊跟进焊接的新型模式,使搅拌头前方工件在搅拌头到达要焊部位前事先软化,减少了搅拌工具进给和旋转的阻力,减小了工件的受力,同时可以提高焊接速度。所以这种模式不但可以减小搅拌头的损耗,也可以简化工件夹持机构或降低工件夹持所需的装卡力,提高焊接效率。

G. Kohn等人^[8]对 4mm 厚的AZ91镁合金板进行了LAFSW焊接试验。搅拌头轴肩尺寸 20mm ,圆柱搅拌针直径 9mm ,针长 4mm 。激光束在旋转工具前方被完全聚焦成直径 1cm 的光点。采用点焊将热电偶接至试验试片表面以校正焊件温度。激光功率设定为 200W ,利用此能量将实验试片加热至 320°C 左右。而焊件只用4个螺栓固定在试验台上。搅拌头转速为 $1700\text{r}/\text{min}$,焊接速度 $50\text{mm}/\text{min}$ 。从试验件焊后宏观照片看,采用LAFSW技术可以焊接出表面成型良好,且无缺陷的焊缝。

LAFSW存在的问题是激光在某些反射率高的材料表面会产生反射,激光能的利用率低,造成能源浪费。如果在这些材料表面涂覆防反射材料,会造成工艺上的复杂。为了减少激光能的反射率,采用在焊缝处开坡口的方法,此方法在一定程度上减少了激光的反射,但是用来填充焊缝的金属减少了,易形成塌陷。LAFSW的研究还有待深入,后续工作主要集中在针对不同材料找出激

光与摩擦焊接参数的组合参数;对LAFSW的焊接变形进行测量和控制等。

2 以等离子弧为辅助热源的复合搅拌摩擦焊技术

以等离子弧为辅助热源的复合搅拌摩擦焊原理与LAFSW原理类似,只是预热能量的来源不同。焊接时,搅拌头在电机驱动下高速旋转并沿待焊工件的对接面压入待焊工件,当搅拌头的轴肩与待焊工件紧密接触后,搅拌头沿对接面向前移动实现焊接,焊接区域在搅拌头产生的摩擦热与等离子弧产生的辅助热量共同作用下发生塑化,最终在搅拌头后部形成焊缝。

此项技术由于采用了高能辅助热源等离子弧与搅拌摩擦焊复合的方式,大大拓宽了搅拌摩擦焊的适用范围,减少了搅拌头的顶锻力和焊接时向前运动的阻力,大大降低搅拌头的磨损,提高了搅拌头的寿命;同时提高了焊接效率,并且为以后航空航天领域对其它高熔点和硬度材料的焊接打下基础。

刘会杰等人^[6,9]在国内率先开展了以等离子弧为辅助热源的搅拌摩擦研究。试验材料为航天工业中常用来做为燃料贮箱材料的2219-T6铝合金。试验所用的焊接设备为FSW-3LM-003型搅拌摩擦焊机和Plasma fine 15等离子弧焊机。采用机械方法将等离子枪与搅拌摩擦焊机相连,等离子枪与搅拌头的距离为 25mm 。

对常规FSW研究表明^[6],当转速为 $800\text{r}/\text{min}$ 时,形成无焊接缺陷接头的最高焊接速度为 $260\text{mm}/\text{min}$ 。最高抗拉强度可以达到 341MPa ,是母材强度的82%,接头全部断在热影响区内,断裂形式为混合断裂。通过对接头沉淀相及焊接热循环的研究发现,热影响区内的 θ' 相粗化是造成其软化的主要原因,并且焊速过低会导致 θ' 相

粗化的时间变长,导致力学性能的降低。因此,为了提高焊接接头力学性能,应该采用焊接时间较短的焊接规范。

对以等离子弧为辅助热源的搅拌摩擦焊的研究表明^[6,9],当转速为800r/min时,形成无焊接缺陷接头的最高焊接速度为600mm/min,接头最高抗拉强度达到360MPa,是母材强度的86%,接头全部断在焊核区内,断口为混合型断口。通过对焊接热循环的研究表明,热影响区的高温保持时间很短, θ' 相粗化程度减小。而焊核区内形成粗大的 θ 相所造成的接头软化,并没有由于晶粒的细化所弥补,形成了接头中最薄弱的区域。

可见此项技术能够实现常用航空航天材料2219-T6铝合金的可靠连接,在保证接头力学性能的前提下,将焊接速度提高了1倍,这充分说明这一新技术的可行性,且工艺简单,易于实现。随着此项技术的不断完善发展,必将为我国航空航天事业做出更大的贡献。

动态控制低应力无变形搅拌摩擦焊技术

搅拌摩擦焊热输入低,较熔焊相比构件焊后残余应力低、变形相对较小。但薄壁铝合金结构搅拌摩擦焊的焊接应力与变形问题还是表现得很突出,与工程实际的要求有一定差距。有学者认为FSW焊接残余应力与其他焊接方法得到的接头残余应力大小类似,纵向残余应力的最大值接近材料的屈服应力^[10-12]。

北京航空制造工程研究所中国搅拌摩擦焊中心,基于关桥院士发明的动态控制低应力无变形(Dynamically Controlled Low Stress No Distortion, DC-LSND)焊接法,设计开发了新型的阵列式射流冲击热沉装置,将DC-LSND技术应用于搅拌摩擦焊过程,达到了控

制FSW焊接残余应力和失稳变形的目的^[13]。

1 原理

DC-LSND FSW技术成功地将低应力无变形焊接法应用于搅拌摩擦焊中,在焊接热源的适当部位,设置一个能对焊缝局部产生急冷作用的热沉,与焊接热源构成热源—热沉系统,在焊接过程中形成一个畸变的温度场。虽然此项技术在开始施焊时同常规FSW一样会在焊缝区产生缩短的不协调应变,但热沉的存在使高温焊缝的热量向热沉方向传导,减少了热量积累,使高温区范围变窄。同时,由于焊缝受冷急剧收缩,减少了焊缝及其附近区域金属在焊接过程中产生的压缩塑性应变。因此,残余拉应力区域和残余拉应力大小都得到控制,相应的焊缝两侧的残余压应力也降到较低的水平,从而可以使薄壁构件不发生翘曲失稳变形。DC-LSND FSW设备主要由压缩空气系统、冷却水系统、控制系统和阵列式射流冲击热沉组成。热沉对搅拌头形成半包围状态,同时焊接前方采用压缩空气将多余的冷却水吹向后方,防止水及杂质进入未焊合的焊缝,影响接头性能^[10-13]。

2 技术特点

DC-LSND FSW设备的核心部分——热沉系统是依据阵列式射流冲击原理设计而成的。该热沉系统可以根据FSW焊接过程中各个区域温度的分布,设置不同的微射流孔直径和分布密度,从而形成不同的冷却效果。热沉喷嘴还可以根据需要制作成不同的形状,结合不同的微射流冲击孔的分布形式,主动控制FSW焊接区域的温度场和热弹塑性应力应变场,从而达到

FSW低应力无变形的焊接效果。由于采用压缩空气将多余的冷却水吹向搅拌头的后方,因此避免了冷却水侵入焊缝。所以此技术可以在控制焊接变形的同时,可得到成型美观、性能优良的焊缝。

3 试验验证

李光等人^[13]对5083、6082、2A12等工程常用铝合金进行了DC-LSND FSW与常规FSW焊接对比试验,结果如下:

DC-LSND焊接技术可以有效减小FSW焊接变形,1000mm×100mm×3.5mm 5083铝合金常规FSW焊接后局部翘曲变形十分明显,而DC-LSND FSW焊后则基本无变形,如图1。DC-LSND FSW接头残余应力分布规律与常规搅拌摩擦焊接头残余应力分布类似,但应力峰值比常规焊降低50%以上,残余拉应力分布范围变窄,如图2所示。

DC-LSND FSW与常规FSW焊缝氢含量的对比分析表明,5A06铝合金母材中氢含量为0.002350% (相对质量分数),常规FSW焊缝中氢含量为0.002349%,而采用DC-LSND方法获得的FSW焊缝中氢含量为0.002350%。可见,阵列射流冲击热沉系统对搅拌摩擦焊具有较好的工艺适用性,



图1 DC-LSND与常规FSW焊后变形比较

彻底排除了冷却水侵入FSW焊缝的可能。接头力学性能分析表明,对热处理不可强化的5A06-O铝合金,DC-LSND FSW接头性能没有

明显影响;对热处理可强化的 6082-T6 铝合金,接头拉伸性能较常规 FSW 接头可提高 8% 左右,且接头弯曲性能良好,可达到弯曲 180° 无裂纹。

DC-LSND FSW 技术是动态低应力无变形焊接法和阵列式射流冲击换热原理在搅拌摩擦焊中的成功应用,可谓强强联合。其对焊接变

动。这种工艺方法最适合用于焊接搭接接头,它可以使搭接焊的缺陷出现在两个焊缝之间。

(2) 前后一字排列式双头 (Tandem Twin-stir) 搅拌摩擦焊,该方式按焊接方向,两个搅拌头一前一后排布,转向相反。这种方式适用于所有 FSW 接头形式,后面搅拌头的主要作用在于对前面搅拌头焊接

用前后一字排列式双头搅拌摩擦焊方式焊接 6083-T6 铝合金材料。

通过金相分析发现,前后一字排列式双头搅拌摩擦焊接接头与常规搅拌摩擦焊焊缝区域情况类似,焊核区晶粒细小,但存在少数表面粉碎氧化物。但在 6mm 厚 6082-T6 铝合金一字排列式双头搅拌摩擦焊接接头中,无论前进侧还是后退侧的焊缝区域残留氧化物均有所减少,前后交错排列式双头搅拌摩擦焊 3mm 厚 5083 - H111 铝合金搭接接头的金相分析表明,焊接区域尺寸可达板厚度的 4.3 倍。

无论是前后排列、平行排列、还是交错排列式双头搅拌摩擦焊,优点远远大于其不足之处。

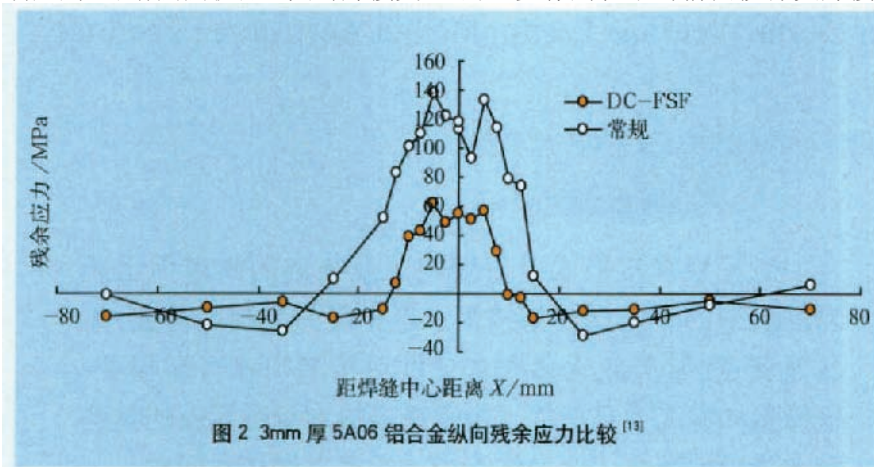
多头系统可以确保在较小的扭矩下实现材料的可靠连接。采用前后交错排列式双头搅拌摩擦焊工艺,用于材料加工和搭接焊具有独特优势,而且可以在更大的对接间隙下实现对接接头的可靠连接。双头搅拌摩擦焊的研究刚刚起步,迄今为止,TWI 采用两个(或更多)旋向相反的搅拌头同时焊接,这将会开辟一个新的研究领域。更多搅拌头同时焊接可以产生更多的热量,该方法可能成为钢及其他高温合金搅拌摩擦焊中的一大优势^[14-15]。

结束语

随着以上几种新型搅拌摩擦焊技术的不断发展和完善,搅拌摩擦焊的发展空间会得到进一步的拓展,新型搅拌摩擦焊技术必将推动制造业更快更好地发展,同时这些新技术也必将拥有更广阔的市场,在不久的将来必将迎来快速的发展和应用的高峰。

本文有参考文献 15 篇,因篇幅所限未能一一列出,读者如有需要,请与本刊编辑部联系。

(责编 微凉)



形和残余应力的控制效果突出,且工艺适用性好,具有良好的技术、经济价值和广阔的应用前景。

双头搅拌摩擦焊技术

1 原理

双头搅拌摩擦焊 (Twin-stir™ FSW) 采用两个转动相反的搅拌头同时进行焊接,由于两个搅拌头转动方向相反,产生的工作扭矩因相互抵消而减弱,焊接过程中采用较小的侧向装夹力就能实现可靠的连接^[14-15]。在双搅拌头复杂的机械力和摩擦热的作用下,塑性金属的流动、焊接温度场、应力应变场都将收到影响,这会对焊件性能产生很大的影响。

2 Twin-stir™ FSW 的几种形式及其特点

目前,双头搅拌摩擦焊有 3 种方式^[14-15],分别是:

(1) 平行并列式双头 (Parallel Twin-stir) 搅拌摩擦焊,该方式采用两个转向相反的搅拌头,按照平行并列方式排布,一同沿焊接方向移

后的残留氧化膜进行完全破碎,提高了焊接接头质量。

常规搅拌摩擦焊焊缝经过二次焊接(搅拌头旋向相反),可使氧化膜完全破碎弥散分布,而不会损伤接头的机械性能。采用双搅拌头前后一字排列的 FSW 方法,在前方搅拌头的作用下,材料已经软化,这样就降低了对后方跟进的搅拌头的要求。

(3) 前后交错排列式双头 (Staggered Twin-stir) 搅拌摩擦焊,该方式沿焊接方向,两个搅拌头前后交错排列,并非与焊缝中心线平行,采用这种方式可以形成更宽的焊缝区域。两个搅拌头重叠区域的氧化膜将得到更好的破碎和弥散性分布。该方法的突出之处在于第二个搅拌头位置可调,可以覆盖前方搅拌头的焊接区域,消除焊缝减薄。且焊缝区晶粒细化,氧化膜破碎完全,呈弥散分布。

3 试验验证

TWI 采用 Twin-stir™ 搅拌头进行了双头搅拌摩擦焊焊接,试验采