

钛合金线性摩擦焊接界面组织研究现状*

Research Status of Microstructure of Linear Friction Welded Titanium Alloy

西北工业大学凝固技术国家重点实验室 王新宇 李文亚 马铁军
西北工业大学摩擦焊接陕西省重点实验室



王新宇

硕士研究生,主要从事钛合金线性摩擦焊过程中的组织演变、接头结构与力学性能相关性研究。

由于线性摩擦焊在整体叶盘,特别是双性能叶盘的制造及修复方面具有很大的技术优势,因此,深入、系统地开展线性摩擦焊的应用基础理论研究,掌握整体叶盘线性摩擦焊的接头组织演变与质量控制等技术关键是很有必要的。

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2015.20.056

不断增加,界面金属迅速达到粘塑性状态,然后被挤出,形成飞边。待足量金属被挤出后,停止往复运动并施加顶锻力,完成焊接。与熔焊等焊接方法相比,线性摩擦焊不仅具有摩擦焊接可靠性高、成本低、接头质量优异的优点,还可实现方形、多边形截面等非回转件的可靠连接^[3-4]。

线性摩擦焊在航空航天领域有极其重要的应用与发展前景,引起了国外大型航空发动机制造厂家的高度重视^[5-6],并就线性摩擦焊接制造整体叶盘技术申报了诸多专利,且成功应用在多款发动机上,成为国外严密封锁的核心技术^[7]。例如EJ200发动机的1~3级风扇盘,F119的带有空心叶片的1级风扇叶盘,联合攻击战斗机JSF升力风扇叶盘及JSF119的风扇叶盘的焊接^[8]。由于线性摩擦焊在整体叶盘,特别是双性能叶盘的制造及修复方面具有很大的

技术优势,因此,深入、系统地开展线性摩擦焊的应用基础理论研究,掌握整体叶盘线性摩擦焊的接头组织演变与质量控制等技术关键是很有必要的。

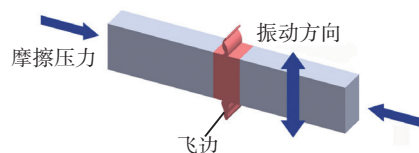


图1 线性摩擦焊原理示意图

同质钛合金线性摩擦焊组织

线性摩擦焊接头焊缝组织一般分为3个区域:(1)焊缝中心区(Weld Center Zone, WCZ)。摩擦界面产生的高温与轴向的摩擦压力、界面剪切力共同作用于该区域,使得位错密度增加,在晶界附近塞积,引起严重的晶格畸变,储存了大量的变形能,

线性摩擦焊(Linear Friction Welding, LFW)是20世纪80年代末问世的一种新型的固相连接方法。它是集焊接、塑性加工、摩擦学、机械、电子等学科技术为一体的先进技术^[1],其原理如图1^[2]所示。焊接过程中,一待焊工件由振动机构驱动,相对于另一待焊工件作直线往复运动。焊接界面金属在往复摩擦与轴向压力作用下产生摩擦热,随着热量

* 国家自然科学基金项目(51574196)资助。

促使该区发生完全动态再结晶,形成细小的等轴晶组织。焊缝区的特点是两侧金属原子相互扩散、晶界相互迁移、物质相互渗透。(2)热力影响区(Thermo-mechanically Affected Zone, TMAZ)。其行为只与本侧材料所承受的热力耦合作用有关,不受另一侧材料的影响。摩擦热和挤压剪切同样对该区域有明显影响,但由于距离焊缝较远,其变形程度和温度较焊缝中心区小,变形能不能满足动态再结晶及相变的需求,因此组织特征表现为沿焊接摩擦方向伸长呈流线形的变形晶粒及部分再结晶组织。(3)热影响区(Heat Affected Zone, HAZ)。该区域的温度进一步降低,看不到明显的变形,对于钛合金而言,由于其导热性差,该区温度对组织的影响很小,致使采用光镜或扫描电镜已不能观察到其组织变化^[9],因此热影响区常被忽略或者被划为热力影响区的一部分来研究。

典型的双相钛合金 TC4 线性摩擦焊接头组织如图 2^[9]所示,可以看出,焊缝及热力影响区形成的金属流线不仅沿焊接界面左右对称,而且沿焊缝中心线上下对称,这是线性摩擦焊往复直线运动的特点造成的。焊缝的中心区为一条腐蚀抗力很高的白色亮线,并没有流线形态的组织,其宽度从中心向两侧逐渐变宽。这一特点是由线性摩擦焊过程中塑性金属流动行为决定的,由于受到往复的剪切作用,焊缝中心的金属不断被挤出到焊缝边缘,且边缘摩擦压应力小于中心,使焊缝边缘的高温金属增加,最终得到一个较宽的焊缝。

Li 等^[10]采用透射电镜对 TC4 线性摩擦焊接头组织进行研究,对接头组织形成做出解释。焊接初始阶段,界面金属在轴向力和切向力的作用下发生变形,晶粒内位错密度随变形程度逐渐增加,大量位错聚集缠结,形成胞状亚结构。随着焊缝温度的上升,α 晶粒全部变为 β 晶粒,胞

状亚结构聚集长大,构成再结晶晶粒的核心。由于焊缝高温停留时间很短,因此再结晶晶粒并不能长大,随着界面温度的降低,α 晶粒沿 β 晶界逐渐生长,或向晶内生长,最终形成焊缝的细晶组织。热力影响区同样受到变形和高温的共同影响,然而相对于焊缝区,其受到的变形和高温较小,储能不满足动态再结晶发生条件,故晶粒尺寸有明显的过渡特征:靠近母材区域温度低,变形小,晶粒较大;靠近焊缝区温度高,变形大,发生部分动态再结晶,组织大小不均。

Land 等^[11]研究了 TC11 钛合金的接头组织,发现焊缝中心发生了动态再结晶,组织特征为板条状 α 晶粒分布在细小的等轴 β 基体上;在热力影响区,晶粒沿摩擦方向伸长,变形程度及转变 β 相的比例均呈现梯度分布,越靠近焊缝中心,变形越严重,且转变 β 相的比例越高。Li 等^[12]对 TC17 钛合金线性摩擦焊接头组织演变进行了研究,结果表明,焊缝中心区域为细小等轴的 α + β 组织,α 晶粒均匀弥散分布于再结晶 β 基体或晶界上;在热力影响区,高度变形的 α 和 β 晶粒沿着变形方向分布,且由于温度分布及变形不均匀,从焊缝中心到母材呈逐渐变化的结构。焊接过程中改变工艺参数,接头显微组织也会随着发生变

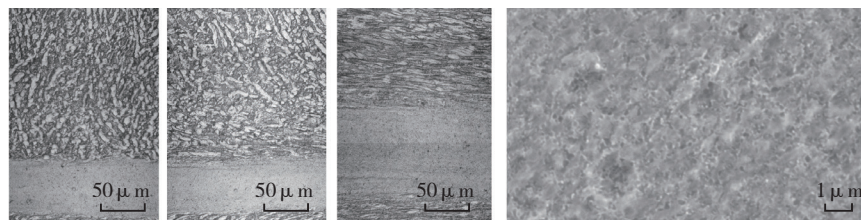
化。Romero 等^[13]详细研究了顶锻压力对线性摩擦焊 TC4 接头显微组织的影响,发现接头宽度随着轴向压力的增大而减小,焊缝区组织为魏氏组织,原始 β 晶粒勾勒出晶界,热力影响区由拉长的 α 和 β 晶粒组成,并沿着变形方向分布。Karadge 等^[14]采用不同尺寸的 TC4 试样进行线性摩擦焊接试验,结果表明,尺寸对焊接接头组织影响不大,焊缝区都是超细晶组织且有针状马氏体存在,只是大试件接头塑性区域晶粒尺寸是小试件的 2 倍。

此外, Dalgaard 等^[15]对近 β 钛合金 Ti5553 (Ti-5Al-5V-5Mo-3Cr) 线性摩擦焊接头组织进行了研究,发现其再结晶行为较双相钛合金更为充分,焊缝中心组织为细小的 β 等轴晶粒(1~5 μm)(见图 3(a))以及极少量的 α 晶粒(含量不足 1%,在图中已不可见)。与母材组织相比,焊缝晶粒显著细化,同时 α 相比比例明显减少,不足 1%。热力影响区组织则以较大的变形 β 晶粒为主,在其晶界位置存在部分再结晶晶粒,α 相比比例与焊缝相近。

对于 α 钛合金,张莎莎等^[16]采用 EBSD 技术对 TA2 线性摩擦焊接头组织进行了初步研究,发现焊缝中心晶粒较母材也发生了显著细化,但晶粒形貌并不是等轴细晶,而是沿摩擦方向伸长的细小晶粒(图 3(b)),



(a) 接头组织低倍光镜图像



(b) 图 2(a) 中 A 区域组织形貌光镜图像

(c) 图 2(a) 中 B 区域组织形貌光镜图像

(d) 图 2(a) 中 C 区域组织形貌光镜图像

(e) 焊缝中心组织扫描电镜图像

图 2 线性摩擦焊 TC4 接头微观组织

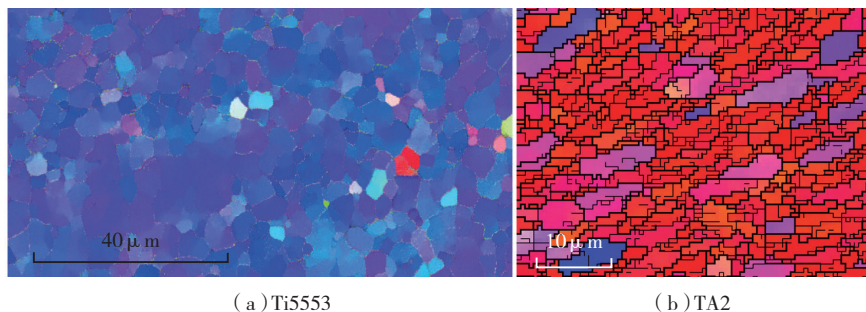


图3 Ti5553和TA2线性摩擦焊焊缝晶粒EBSD图像

这说明 α 钛合金在焊接过程中的动态再结晶行为与 $\alpha + \beta$ 钛合金及 β 钛合金并不完全相同,这可能与钛合金的层错能有较大关系,相对于 $\alpha + \beta$ 钛合金及 β 钛合金, α 钛合金的层错能更高,其发生动态再结晶更为困难。

异质钛合金线性摩擦焊组织

在航空发动机工作时,其叶片和轮盘所处的温度和应力状态是不同的,因此航空发动机的制造需要同时满足轮盘和叶片的不同性能需求,由此产生了双性能整体叶盘。双性能整体叶盘的制造,需要实现异质材料的可靠连接,将不同材料的优势发挥到最大化。因此,研究异种材料的线性摩擦焊有着重要的意义。

从结构角度看,异种材料的焊接问题在本质上是焊接接头的界面问题。由于不同材料的物理性质存在较大差异,接头界面处会出现较大的应力不匹配现象。只有克服或减弱异种材料之间的界面力学失配效应,才能实现异质材料的可靠连接,获得应力分布合理的焊接结构。李晓红等^[17]以异种钛合金的线性摩擦焊为例,进行了材料间相互匹配的界面奇异性分析,结果表明:相较于TC11/TC17而言,TC4/TC17具有较好的界面匹配,获得良好线性摩擦焊接头的可能性更高。

关于异质材料线性摩擦焊接头微观组织演变,目前也有文献报道。Ma等^[18]采用线性摩擦焊方法焊接

了TC4和TC11异质材料,获得了结合质量良好的接头。但与同质接头不同的是,焊缝中心存在一条清晰的界面,如图4所示。焊缝区的TC4一侧为超细晶 α 颗粒(见图4中白色圆形所围区域),这些颗粒弥散分布在 β 基体上,同时有一些 α 颗粒从变形方向被拉长,而在TC11一侧观察到的是亚稳定 β 相, α 晶粒沿着 β 晶界和晶内析出;两侧的TMAZ区域组织明显不同,在TC4侧可以看到很少一部分再结晶晶粒,而TC11侧出现大量被拉长的晶粒,没有观察到再结晶晶粒。Guo等^[19]采用扫描电子显微镜和透射电子显微镜研究了TC4和Ti-6246异质接头微观组织。对于TC4一侧,焊缝区为细小的针状组织,热机影响区内晶粒被拉长,尤其是残留 β 相拉长现象特别严重,热影响区 α 和 β 晶界变得模糊,而Ti-6246焊缝中心区为互相垂直的细小针状组织,热机影响区明显的特点为沿着振动方向被拉长的初始 α 和残留 β ,热影响区的二次 α 相相比母材明显减少。Ji等^[20]对2种不同组织的TC17钛合金线性摩擦焊接头组织进行了研究。结果表明,在焊缝中心区,板条状的斜方马氏体 α'' 在垂直 β 晶界方向上生长,分布在等轴 β 晶基体上,且位错密度较低。热力影响区则为沿焊接方向伸长的晶粒,同时存在大量位错缠结及胞状亚结构。

焊接缺陷及异常组织

对于钛合金的线性摩擦焊,合

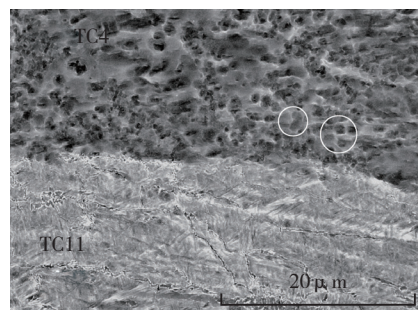
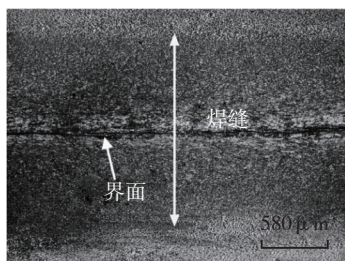


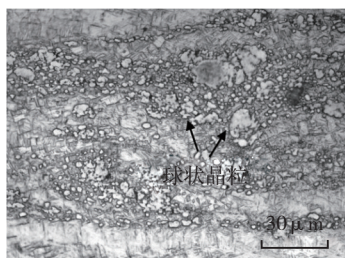
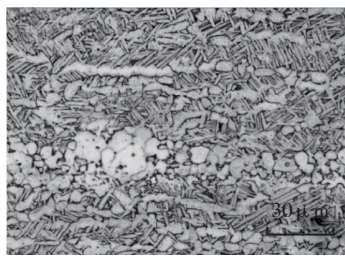
图4 线性摩擦焊TC4/TC11异质接头焊缝组织

适的焊接参数匹配一般能使焊缝实现再结晶,获得良好的结合。对此,Wanjara和Jahazi^[21]以TC4为例进行了系统的研究,分析了焊接参数对焊缝再结晶晶粒尺寸的影响,并发现线性摩擦焊过程存在一个临界热输入值,低于该值会导致塑性金属流动不足,无法将界面杂质彻底排除,最终导致焊缝出现微孔或氧化物夹杂等缺陷。这与Vairis等^[22]关于实现TC4线性摩擦焊良好接合所需最小能量输入的研究结果是一致的。

然而,Li等在对TC4^[23]及TC11^[24]线性摩擦焊接头组织进行研究时,均发现了不同于以往的孔洞、夹杂的异常组织,如图5所示。在较低的放大倍数下(见图5(a)),焊缝似乎存在贯穿裂纹,但在高倍下可以看出,焊缝中心组织为 β 基体上的球状的 α 晶粒和针状的 α' 马氏体,并没有孔洞缺陷(见图5(b))。笔者对球状 α 形成机理进行了分析,认为其形成的原因是摩擦压力较低导致接头热输入不足,使得相变驱动力不足,又因为界面温度分布不均匀,故在两相区变形时,片层 α 因局部剪切及旋转破碎,随后破碎的小片层发生再结晶形成等轴状的组织。在摩擦力的作用下,细小的 α 颗粒通过挤出相对较软的 β 相聚集长大。由于这种异常组织严重降低了接头的力学性能,而且无法通过焊后热处理彻底消除(见图5(c)),因此,通过调整焊接参数控制其形成就显得尤为重要。



(a) 焊缝组织低倍光镜图像

(b) 焊缝中心球状 α 相光镜图像

(c) 热处理后焊缝中心组织扫描电镜图像

图5 TC4线性摩擦焊接头异常组织

结束语

作为整体叶盘制造及维修的关键技术,线性摩擦焊接技术目前在国内外已经成功应用。我国对其研究虽然起步较晚,近年来也得到了较好的发展,但相关的应用基础研究支撑仍然略显单薄。加快线性摩擦焊接技术工程应用基础研究,对于实现国内航空关键部件的自主研发生产,促进我国航空航天事业的发展有着深远的意义。

在钛合金线性摩擦焊组织研究方面,仍然存在一些问题需要解决,如焊接过程中的动态再结晶行为与相变行为,界面组织演变机理等。目前来看,这些问题采用常规的研究手段得到的结果并不十分理想,利用原位观测方法配合热物理模拟技术或许能取得较大突破。此外,对于异质

材料的线性摩擦焊接,如何通过控制参数及焊接热循环,得到较为理想的组织,实现物性差异较大的材料的结合,降低与消除焊接接头应力也是一个重要的课题。

参考文献

- [1] 段立宇. 摩擦焊接的现状与展望. 西北工业大学学报, 1993 (5): 1-8.
- [2] LI W, SHI S X, WANG F F, et al. Numerical simulation of friction welding processes based on ABAQUS environment. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2012, 5(3): 10-19.
- [3] 李志远, 钱乙余, 张久海, 等. 先进连接方法. 北京: 机械工业出版社, 2000: 54-56.
- [4] 赵熹华, 冯吉才. 压焊方法及设备. 北京: 机械工业出版社, 2000: 27-30.
- [5] 石文. 德国 MTU 公司研究的整体叶盘结构. 国际航空, 1997, 3(10): 67-68.
- [6] 丁立铭, 罗·罗公司研制出线性摩擦焊宽弦风扇整体叶盘. 航空制造技术, 1999 (6): 10-12.
- [7] 孙勇, 陈岱民, 刘玉莲. 摩擦焊技术的现状及发展趋势. 机械工艺师, 1996, 19(12): 34-35.
- [8] 张田仓, 韦依, 周梦慰, 等. 线性摩擦焊在整体叶盘制造中的应用. 航空制造技术, 2004 (11): 56-58.
- [9] LI W Y, MA T J, ZHANG Y, et al. Microstructure characterization and mechanical properties of linear friction welded Ti-6Al-4V alloy. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(1-2): 89-92.
- [10] LI W Y, WANG S W, CHEN T, et al. Formation mechanism of linear friction welded Ti-6Al-4V alloy joint based on microstructure observation. Materials Characterization, 2011, 62(1): 130-135.
- [11] LANG B, ZHANG T C, LI X H, et al. Microstructural evolution of a TC11 titanium alloy during linear friction welding. Journal of Materials Science, 2010, 45(22): 6218-6224.
- [12] LI W Y, MA T J, YANG S Q. Microstructure evolution and mechanical properties of linear-friction-welded Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr (Ti17) titanium-alloy joints. Advanced Engineering Materials, 2010, 12(1-2): 35-43.
- [13] ROMERO J, ATTALLAH M M, Preuss M, et al. Effect of the forging pressure on the microstructure and residual stress development in Ti-6Al-4V linear friction welds. Acta Materialia, 2009, 57(18): 5582-5592.
- [14] KARADGE M, PREUSS M, LOVELL C, et al. Texture development in Ti-6Al-4V linear friction welds. Materials Science and Engineering A, 2007, 459(1-2): 182-191.
- [15] DALGAARD E, WANJARA P, GHOLIPOUR J, et al. Linear friction welding of a near- β titanium alloy. Acta Materialia, 2012, 60(2): 770-780.
- [16] 张莎莎. 纯钛线性摩擦焊接接头微观组织与结构研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
- [17] 李晓红, 赵磊, 张彦华. 界面端奇应力场分析在异种材料焊接中的应用. 航空制造技术, 2012(17): 90-95.
- [18] MA T J, ZHONG B, LI W Y, et al. On microstructure and mechanical properties of a linear friction welded dissimilar Ti-6Al-4V and Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si joint. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17 (1): 9-12.
- [19] GUO Y, CHIU Y, ATTALLAH M M, et al. Characterization of dissimilar linear friction welds of α - β titanium alloys. Journal of Materials Engineering and Performance, 2012, 21: 770-776.
- [20] JI Y, CHAI Z, ZHAO D, et al. Linear friction welding of Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr alloy with dissimilar microstructure. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(4): 979-987.
- [21] WANJARA P, JAHAZI M. Linear friction welding of Ti-6Al-4V: processing, microstructure, and mechanical-property interrelationships. Metallurgical and Materials transactions A, 2005, 36(8): 2149-2164.
- [22] VAIRIS A, FROST M. High frequency linear welding of a titanium alloy. Wear, 1998, 217(1): 117-131.
- [23] LI W Y, WU H, MA T J, et al. Influence of parent metal microstructure and post-weld heat treatment on microstructure and mechanical properties of linear friction welded Ti-6Al-4V joint. Advanced Engineering Materials, 2012, 14(5): 312-318.
- [24] LI W Y, WU H J, MA T J, et al. Abnormal microstructure in the weld zone of linear friction welded Ti-6.5Al-3.5Mo-1.5Zr-0.3Si titanium alloy joint and its influence on joint properties. Materials Science and Engineering A, 2014, 599: 38-45.

(责编 玲犀)