

钛合金搅拌摩擦焊搅拌头研究现状

邵帅, 黄永德, 陈玉华

(南昌航空大学 江西省航空构件成形与连接重点实验室, 南昌 330036)

摘要: 搅拌摩擦焊在焊接钛合金这类高熔点金属方面具有很大优势, 但是搅拌头的磨损一直是其一大难点。对钛合金搅拌摩擦焊中的搅拌头结构、材料选择进行了讨论, 认为圆锥形搅拌针综合性能较好, 而在材料选择方面, 认为目前应用前景较好的是钨钼合金, 但不同材料的组合可能更符合未来发展的方向。为了研究搅拌头的磨损机理及如何减小磨损, 列举了几种辅助焊接工艺及目前应用较广的模拟仿真, 指出辅助焊接工艺可减小搅拌头磨损, 但目前工艺不完善等问题依然存在, 需要进一步优化, 包括模拟仿真在内, 对于钛合金搅拌摩擦焊搅拌头结构、材料优化、磨损机理、辅助焊接工艺等研究均较少, 限制了其研究进展及应用。

关键词: 钛合金; 搅拌摩擦焊; 搅拌头; 研究现状

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2019.05.017

中图分类号: TG453 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2019)05-0115-08

Research Status on Tools of Friction Stir Welding in Titanium Alloy

SHAO Shuai, HUANG Yong-de, CHEN Yu-hua

(Jiangxi Key Laboratory of Forming and Joining Technology for Aerospace Components,
Nanchang Hangkong University, Nanchang 330036, China)

ABSTRACT: Friction stir welding has great advantages in welding high melting point metals such as titanium alloys, but the wear of the tools has always been a major difficulty. Therefore, the structures and materials of the tools of friction stir welding in titanium alloy were discussed in the article. It is considered that the comprehensive performance of the conical stirring needle is better. In terms of material selection, the tungsten-rhenium alloy has a better application prospect currently, but the combination of different materials may be more promising in the future. To study the wear mechanism of the tools and the method of reducing wear, several auxiliary welding processes and simulations widely used now are listed. It is pointed out that the auxiliary welding process can reduce the wear of the tools, but the process is still incomplete and they also have a lot of room for improvement. Except for simulation, there are few researches on structure, material optimization, wear mechanism and auxiliary process of titanium alloy friction stir welding tools. This limits its research progress and application.

KEY WORDS: titanium alloy; friction stir welding; tools; research status

钛合金被称为宇宙金属、空间金属, 自 20 世纪中叶发展以来, 受到了越来越多的关注^[1-2], 全球各国学者对其进行了大量研究, 逐渐了解了钛及钛合金

的基本特性。钛及钛合金除密度小、强度高、比强度和比刚度大、热强性好及优良的耐腐蚀性外, 还具有生物相容性好、无磁性等突出的特殊性质, 故被广泛应

收稿日期: 2019-07-20

基金项目: 江西省优势科技创新团队重点项目(20181BCB19002); 江西省科技厅重点研发计划(20171BBE50010)

作者简介: 邵帅(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为搅拌摩擦焊。

通讯作者: 黄永德(1974—), 男, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为搅拌摩擦焊和微连接。

用于航空航天、船舶、汽车、医疗等各个领域^[3-6]。随着钛及钛合金大量的应用,其连接方式也成为了主要的研究方向。

搅拌摩擦焊(Friction Stir Welding, FSW),作为问世仅20余载的新兴技术,以其绿色环保、变形及应力小、无裂纹等区别于熔焊方法的独特优势,获得了极大的关注与应用^[7-8]。在对铝^[9-10]、镁^[11-12]、铜^[13]等低熔点金属成功焊接的基础上,对钛及钛合金的连接也取得了不错成效,对钛合金FSW的工艺、组织、性能等研究也在不断加深^[14-17]。目前对钛合金FSW过程中,遇到的主要挑战就是搅拌头严重磨损的问题,这会对焊缝的形貌、性能等造成严重损害。文中将在前人的基础上,详细介绍钛及钛合金搅拌头结构设计、材料选择及失效机理,辅助焊接工艺以及数值模拟,为广大研究工作者提供参考。

1 搅拌头结构设计

搅拌头通常由夹持柄、轴肩、搅拌针等几部分组成,对于铝、镁等熔点及硬度较低的金属,通常采用一体式设计。由于轴肩及搅拌针与工件是直接接触,通过摩擦产热为焊缝提供热量,对于钛合金这种熔点高、硬度高、流动应力大的金属,其磨损会较为严重,所以出于经济性考虑,大多采用分体式设计,以便在搅拌头失效后对其进行重新加工或更换。为了减少轴肩及搅拌针的磨损及增强塑性金属的流动,许多学者对这二者的形状设计进行了研究。

1) 轴肩。轴肩是FSW过程中产热的主要来源。其尺寸大小在一定程度上决定了产热量的多少^[18]。在焊接过程中,轴肩还起到封闭塑性区域、对塑性金属施加顶锻力的作用,所以轴肩的设计可谓十分重要。起初在焊接铝合金时,其轴肩形状形式很多,如图1所示,目前在焊接钛合金时,常用的轴肩设计通常有以下3种:平面轴肩、内凹轴肩、同心圆轴肩。对此,张利国等^[19]还对其进行了数值模拟,并进行了验证试验,发现其材料流动性从高到低依次为:同心圆形、内凹形、平面形。但是对其他形式轴肩作用的研究还比较少,需要不断试验对其进行补充。

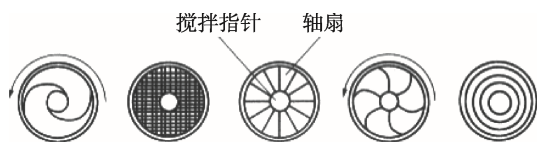


图1 各种不同形貌轴肩^[20]
Fig.1 Various shape shoulders

2) 搅拌针。如果说轴肩是搅拌头产热的核心,那么搅拌针就是控制塑性金属流动的核心。现在对钛合金等高熔点金属进行FSW时,常用的搅拌针形状为锥形(圆台形)、圆柱形和三角锥形也有使用。虽然与圆柱形搅拌针相比,圆锥形搅拌针产热量较少,

但是其改善了圆柱形搅拌针根部应力大、易折损的问题,故其使用性能优于圆柱形搅拌针^[21-22]。而且由于塑性状态的钛合金粘结性较强,所以通常不需要在搅拌针表面加工螺纹来增强其流动性,这也在谢飞飞^[23]、栾国红等^[24]的实验中得到验证。在搅拌针尺寸方面,经Wang等^[25]、栾国红等^[24]研究发现,采用较大的搅拌针有助于减少其磨损。但是,搅拌头形状、尺寸对塑形金属流动的影响、机理等研究还未达成共识,仍需继续对其进行探索,扩大对此方面的了解。

2 搅拌头材料及磨损机理

虽然FSW相对熔焊来说温度较低,但其峰值温度仍然达到了母材熔点的80%甚至更高^[24]。通常来讲,搅拌头的高温性能及耐磨损性能等均要优于被焊材料,以此来保证搅拌头的寿命及接头的质量。而钛及钛合金因为熔点高、强度大、硬度高、高温性能好等特点,对搅拌头材料提出了更高的要求^[26],因此,国内外针对钛及钛合金的搅拌头材料选择进行了大量探索。

在钛及钛合金FSW初始阶段,所用的搅拌头材料主要有WC和多晶立方氮化硼(PCBN)两种。有研究^[27]发现,使用WC作为搅拌头时,其中心的搅拌针磨损较少,但轴肩边缘磨损严重,这是因为虽然WC耐磨性较高,但是其高温下抗氧化能力较弱,会导致氧化钨的生成,从而降低了其耐磨损能力,导致其轴肩失效,如图2所示。然而Seighalani等^[28]在使用WC为搅拌针,分别换用HSS和钨作为轴肩后发现,其轴肩磨损依然严重,但并没有对其磨损机理作出解释。



图2 WC搅拌头形貌^[27]
Fig.2 WC tool shape

对于PCBN搅拌头而言,Hanke等^[29]认为,在高温下,由于PCBN的粘结剂在高温下会发生软化,对BN晶粒的作用力降低,BN晶粒会发生扩散,使得BN部分溶解在母材中,导致PCBN晶粒表面粗糙,降低了其耐磨性能,从而发生严重磨损。Zhang等^[30]对其进行研究时也证实了这一理论,实验发现,在焊接过程中,PCBN搅拌头发生了严重磨损,并在焊缝顶部表面发现了PCBN碎片及TiB_x的存在,说明PCBN中的B可能发生熔化并与钛母材发生了化学反应,导致该搅拌头的寿命降低。

除此之外，焊缝底板温度太低，使得搅拌针受到的阻力大，也是搅拌头失效的原因之一。谢飞飞^[23]在选用定向凝固的 DZ22 研究钛合金 FSW 时发现，虽然可获得表面成形良好、无缺陷的焊缝，但是搅拌针在焊接 400 mm 后磨损变短，直至完全失效，其形貌如图 3 所示。这可能是因为钛合金导热性较差，使得焊缝底板部位温度低，从而加大了搅拌针的磨损。也有人^[31]研究了铌合金作为搅拌头的应用，发现其耐磨损性能较强，且其高温抗氧化性能较好，但在高性能的基础上，伴随而来的是更加难于加工的问题。而在钼合金方面，由于其具有低温脆性及在高温下易氧化的特性，在承受焊接时在高温下会产生严重磨损，这也在王快社等^[32]的实验中得到了证实，因此其应用较少。

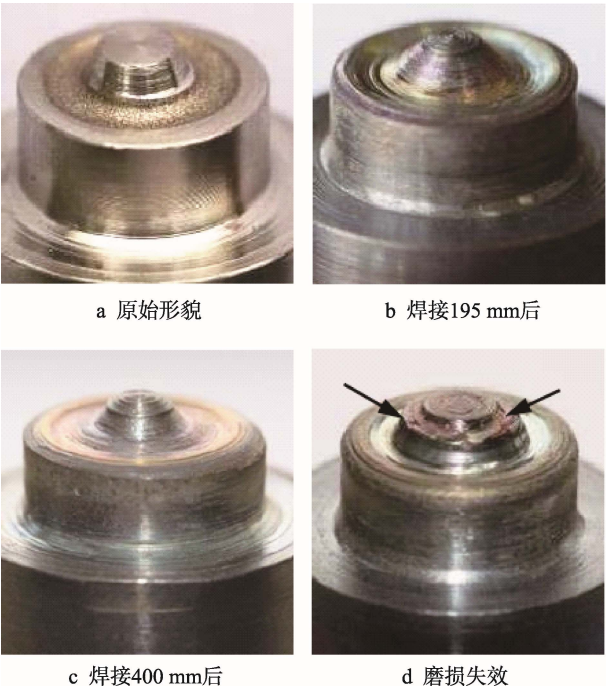


图 3 搅拌头焊接前后形貌^[23]
Fig.3 Shape of tool before and after welding

在目前的钛及钛合金 FSW 中，钨铌合金因为出色的高温性能及耐磨损性能应用较多，因此国内外学者对其进行了大量研究。Liu 等^[8]、Zhou 等^[33]、Lertora 等^[34]在对钛合金进行 FSW 时使用钨铌合金作为搅拌头，发现焊缝成形较好，未发现体积缺陷。栾国红等^[24]也对其进行了研究，搅拌头焊前焊后形貌如图 4 所示，轴肩采用了同心环状结构，搅拌针为三面锥形，实验发现，虽然其搅拌头磨损并不严重，但是三面锥形几乎消失，而且轴肩的同心圆缝隙同样被钛合金粘着和填充，这成为了其失效的主因，但是有望通过表面镀膜等工艺措施来改善。

各搅拌头材料优缺点如表 1 所示。综上所述，搅拌头的失效主要有氧化失效、反应失效、磨损失效、

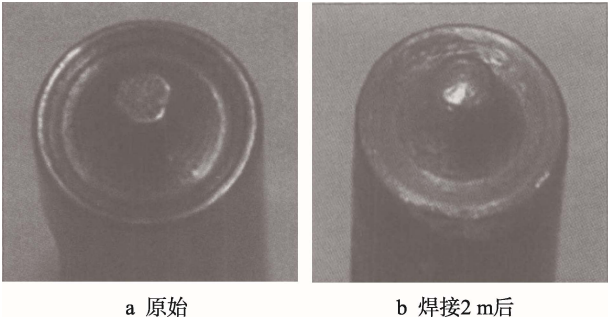


图 4 搅拌头形貌^[24]
Fig.4 Shape of tool

表 1 各搅拌头材料优缺点对比
Tab.1 Comparison of advantages and disadvantages of each tool material

材料	优点	缺点
WC 镍基合金	成本低、容易加工	抗氧化能力较弱，易磨损
PCBN	硬度高、价格低	粘结剂软化，与母材反应、
钼合金	熔点高	高温下易氧化、磨损
铌合金	耐磨损性能及高温耐	价格昂贵，加工
W-Re 合金	氧化性能较好	困难

粘结失效等形式。不同的搅拌头材料会有不同的失效形式，甚至被焊材料不同也会改变搅拌头的失效形式，所以搅拌头的磨损机理还有待更进一步的研究。在材料选择方面，钨铌合金是目前的主选材料，但是与铌基合金类似，价格昂贵、难以加工同样是其难题。与之相比，WC 成本低、容易加工等优点显得十分突出。在此基础上，除了发展性能更加优异的新材料外，研究轴肩及搅拌针材料的不同组合，如张嘉波等^[35]采用钨铌合金作为搅拌针材料，而轴肩部分采用 WC-Co 合金，研究经济性及使用性俱佳的搅拌头也是其发展的一个主要方向。

3 辅助焊接工艺

在钛及钛合金的 FSW 中，由于钛合金硬度高，耐磨性强，且其热导率较低，使得钛合金沿厚度方向温度梯度较大，焊缝下部温度较低，造成下部金属流动性较差，从而使得搅拌针的磨损较为严重。而且由于搅拌头磨损，会引起搅拌头形状发生变化，从而影响摩擦热的产生和材料的流动，导致接头出现未焊透等缺陷。所以为了提高焊缝的质量，减少搅拌头的磨损，扩大工艺窗口，辅助焊接工艺非常必要。

目前的辅助焊接工艺形式主要有激光、电弧、电流、感应加热及超声等能量辅助等。这些辅助工艺的本质都是通过不同的热源，来给被焊板材预热（超声主要是通过降低流动应力），从而软化材料并达到减小温度梯度的目的。目前，国内外研究人员在辅助焊

接工艺方面, 针对铝合金的研究较多^[36-38], 而对钛合金的研究较少, 但对其也有一定的借鉴意义。文中将以激光辅助FSW为例, 对其进行介绍。

激光辅助搅拌摩擦焊 (Laser-assisted friction stir welding, LAF-SW) 的设备如图 5 所示, 在焊接时, 激光束在搅拌头作用前对工件局部进行预热, 然后再由搅拌头进行常规的搅拌摩擦焊接, 完成连接。激光预热可以使待焊工件软化, 降低了工件在焊接时受到的扭矩, 从而降低了工装要求, 同时搅拌头进给时的阻力也有所降低, 因此能够减轻搅拌头的磨损。

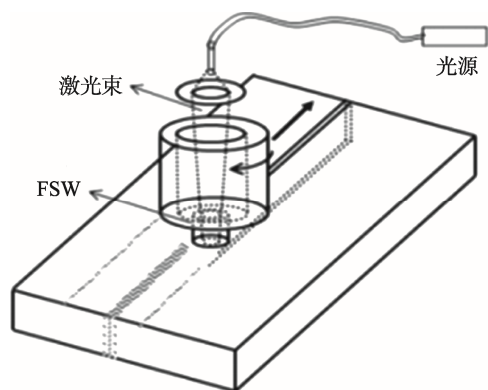


图 5 激光辅助搅拌摩擦焊系统^[39]
Fig.5 Laser-assisted friction stir welding system

在此基础上, Campanelli 等^[40]发现, 在激光辅助下, 焊缝表面光滑明亮, 随着激光功率的增加, 促进了搅拌头周围塑性材料的流动, 使得接头屈服强度降低, 断裂伸长率有较大的提高。而在电弧辅助^[41-42]、电流辅助^[43-44]、感应辅助^[45]、超声波辅助^[46]FSW 方面也有类似结论, 证明了辅助焊接工艺的可行性。

此外, Ji 等^[47]通过采用背部加热的方式对钛合金母材进行了 FSW, 如图 6 所示, 该工艺成形良好, 消除了传统 FSW 中的“撕裂性缺陷”, 并且减少了钨铈搅拌头的磨损, 拓宽了钛合金 FSW 的工艺范围。

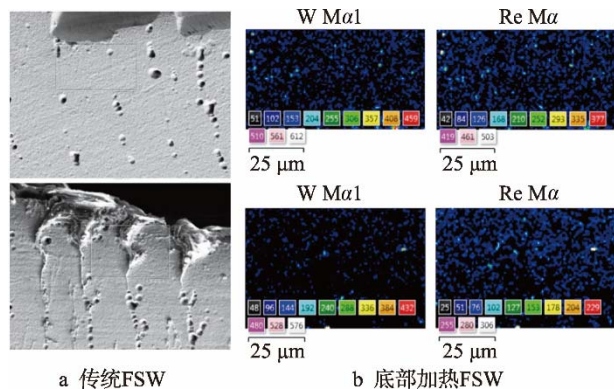


图 6 SZ 顶部搅拌头磨损对比^[47]
Fig.6 Comparison on wear of the tool in top SZ

对钛合金的研究中, 文献^[48]提出, 置氢处理可以降低双相钛合金的相变点, 而且, 在置氢处理过程中, 会发生 $\alpha \rightarrow \beta$ 的转变, 使得 β 相的比例增加, 从而改善材料的塑性变形能力。这可能是一个降低搅拌头磨损的新思路。

辅助焊接工艺可以降低钛合金的流动应力, 提高其塑性变形能力, 从而拓宽焊接工艺范围, 降低搅拌头磨损, 但是这些辅助焊接工艺, 除了其本身所存在的缺点外, 还普遍存在能量利用率低, 焊接设备、操作复杂等不足之处, 还需要进一步改进优化。

4 焊接数值模拟

在 FSW 过程中, 数值模拟受到了越来越多人的青睐, 因为相比于实验方法, 在人为操作及材料等方面的误差大大降低。但是目前针对钛及钛合金的数值模拟研究还比较缺乏。Sahlot 等^[49]基于三维传热与材料流动 (HTMF) 建立了数值模型, 来计算搅拌头上的温度分布、材料流动和应力分布等, 图 7 展示了搅拌头轴向及搅拌针底部径向上的磨损程度。由于搅拌针尖端处的应力较高, 尖端附近的磨损量比轴肩附近

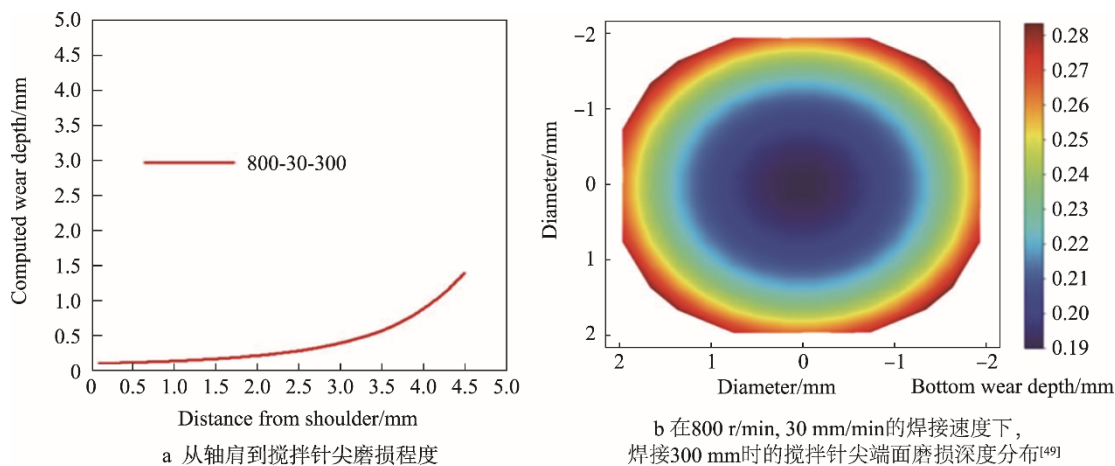


图 7 搅拌头磨损数值模拟^[49]
Fig.7 Numerical simulation of tool wear

的磨损量大,而且与中心相比,轴肩外围的应力更大,导致轴肩边缘磨损更严重;而且其磨损程度随转速的增加而增加。然而,由于交互作用时间的减少,预估的磨损随焊接速度的增加而减小。

由于在 FSW 过程中,搅拌头磨损与温度场有很大关系,所以对于温度场的研究也越来越多,这对于揭示搅拌头的失效机制同样具有重要意义。赵俊敏等^[50]利用 ANSYS 有限元分析软件,建立了 FSW 过程热输入数值模型,分析了 4 mm 厚 TC4 钛合金板对接的三维瞬态温度场分布,如图 8 和图 9 所示。可分析得出,钛合金 FSW 的最大温度保持在 1220 °C,低于钛合金的熔点,说明搅拌摩擦焊可以实现钛合金的固相连接,这与张辉等^[51]的模拟结果一致,而在厚度方向存在温度梯度,即离轴肩越远温度峰值越低,这会加剧搅拌针端部的磨损。

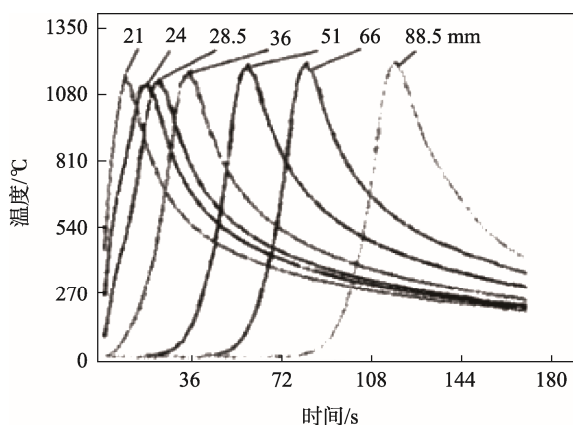


图 8 距离焊合面 2 mm 处不同特征点的温度变化^[50]

Fig.8 Temperature variation of different feature points at 2 mm from the welding surface

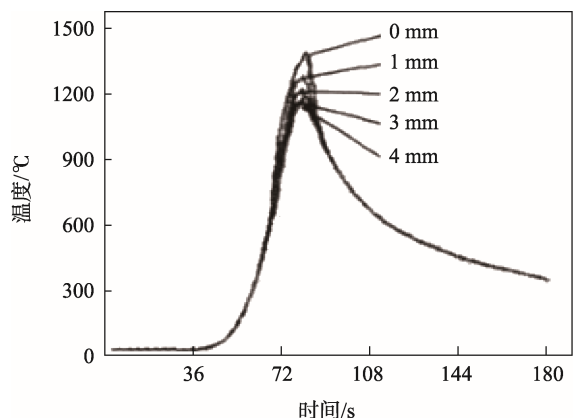


图 9 不同厚度处各点的温度变化^[50]

Fig.9 Temperature changes at various points of different thicknesses

目前对搅拌头磨损的模拟仿真的研究较少,尤其是对钛合金等高熔点金属而言,这限制了其研究进展。

5 总结与展望

搅拌摩擦焊以焊接质量高、自动化强、成本低等

显著优势成为关注重点并获得广泛应用,但是对钛合金而言,其搅拌头磨损仍是一大难题,仍是关注的焦点。虽然辅助加热焊接工艺在一定程度上减少了其磨损,然而其工艺还有待进一步改善,而且针对钛合金的辅助加热搅拌摩擦焊的研究还较少,模拟仿真等也有限,限制了钛合金 FSW 进一步的发展与应用,因此,搅拌头材料的优化、焊接过程中的磨损机制、辅助工艺对焊接质量和温度场的影响及工艺优化等仍是未来研究需要考虑的重点。

参考文献:

- [1] 王彦峰,李争显,杜继红,等. TC4 钛合金表面渗碳复合 TiN(Ti)膜层的抗冲蚀性能[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(6): 1878—1883.
WANG Yan-feng, LI Zheng-xian, DU Ji-hong, et al. Erosion Resistance of Surface Carburized Composite TiN(Ti) Film on TC4 Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(6): 1878—1883.
- [2] 何波,邢盟,孙长青,等. 热处理对激光沉积 TC4/TC11 组织和性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(6): 1929—1935.
HE Bo, XING Meng, SUN Chang-qing, et al. Effect of Heat Treatment on Microstructure and Properties of Laser Deposited TC4/TC11[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(6): 1929—1935.
- [3] 牛京喆,孙中刚,常辉,等. 3D 打印医用钛合金研究进展[J]. 稀有金属材料与工程, 2019, 48(5): 1697—1706.
NIU Jing-zhe, SUN Zhong-gang, CHANG Hui, et al. Research Progress in 3D Printing Medical Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2019, 48(5): 1697—1706.
- [4] 阴中炜,孙彦波,张绪虎,等. 粉末钛合金热等静压近净成形技术及发展现状[J]. 材料导报, 2019, 33(7): 1099—1108.
YIN Zhong-wei, SUN Yan-bo, ZHANG Xu-hu, et al. Near-net Shaping of Titanium Alloy Powders by HIP Technology: a Review[J]. Materials Reports, 2019, 33(7): 1099—1108.
- [5] 黄森森,马英杰,张仕林,等. $\alpha+\beta$ 两相钛合金元素再分配行为及其对显微组织和力学性能的影响[J]. 金属学报, 2019, 55(6): 741—750.
HUANG Sen-sen, MA Ying-jie, ZHANG Shi-lin, et al. Influence of Alloying Elements Partitioning Behaviors on the Microstructure and Mechanical Properties in $\alpha+\beta$ Titanium Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2019, 55(6): 741—750.
- [6] 宋凯,毛小南,辛社伟,等. 钛合金焊接接头组织性能研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(S2): 336—340.
SONG Kai, MAO Xiao-nan, XIN She-wei, et al. Research Progress on Microstructure and Properties of Titanium Alloy Welded Joints[J]. Materials Reports,

- 2018, 32(S2): 336—340.
- [7] SANDERS D G, EDWARDS P, CANTRELL A M, et al. Friction Stir-Welded Titanium Alloy Ti-6Al-4V: Microstructure, Mechanical and Fracture Properties[J]. *Journal of Metals*, 2015, 67(5): 1054—1063.
- [8] LIU H J, ZHOU L. Microstructural Zones and Tensile Characteristics of Friction Stir Welded Joint of TC4 Titanium Alloy[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(10): 1873—1878.
- [9] 姜月, 朱浩, 刘家伦, 等. 7075 铝合金搅拌摩擦焊工艺对接头沉淀相析出行为影响[J]. *中国有色金属学报*, 2018, 28(11): 2191—2198.
- JIANG Yue, ZHU Hao, LIU Jia-lun, et al. Effect of 7075 Aluminum Alloy Friction Stir Welding Process on Precipitation Behavior of Joint Precipitates[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(11): 2191—2198.
- [10] 王希靖, 魏学玲, 张亮亮. 6082-T6 铝合金搅拌摩擦焊组织演变与力学性能[J]. *焊接学报*, 2018, 39(3): 1—5.
- WANG Xi-jing, WEI Xue-ling, ZHANG Liang-liang. Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Friction Stir Welded 6082-T6 Aluminum Alloy[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(3): 1—5.
- [11] 冯吉才, 王亚荣, 张忠典. 镁合金焊接技术的研究现状及应用[J]. *中国有色金属学报*, 2005(2): 165—178.
- FENG Ji-cai, WANG Ya-rong, ZHANG Zhong-dian. Status and Expectation of Research on Welding of Magnesium Alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2005(2): 165—178.
- [12] 马宗义, 商乔, 倪丁瑞, 等. 镁合金搅拌摩擦焊接的研究现状与展望[J]. *金属学报*, 2018, 54(11): 1597—1617.
- MA Zong-yi, SHANG Qiao, NI Ding-rui, et al. Friction Stir Welding of Magnesium Alloys: A Review[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2018, 54(11): 1597—1617.
- [13] 许楠, 包晔峰, 宋元宁. H70 黄铜冷源辅助搅拌摩擦焊接接头微观组织和力学性能分析[J]. *焊接学报*, 2018, 39(7): 93—96.
- XU Nan, BAO Ye-feng, SONG Qi-ning. Analysis of Microstructure and Mechanical Properties on H70 Brass Joint by Cold Source Assisted Friction Stir Welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2018, 39(7): 93—96.
- [14] FUJII H, SUN Y F, KATO H, et al. Investigation of Welding Parameter Dependent Microstructure and Mechanical Properties in Friction Stir Welded Pure Ti Joints[J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2010, 527(15): 3386—3391.
- [15] NAKAI M, NIINOMI M, ISHIDA Y, et al. Heat Treatment to Improve Fatigue Strength of Friction Stir Welded Ti-6Al-4V Alloy Butt Joint[J]. *Materials Transactions*, 2017, 58(8): 1223—1226.
- [16] NAKAI M, NIINOMI M, KOMINE K, et al. High-Cycle Fatigue Properties of an Easily Hot-Workable (Alpha Plus Beta)-type Titanium Alloy Butt Joint Prepared by Friction Stir Welding Below Beta Transus Temperature[J]. *Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 2019, 742: 553—563.
- [17] SANDERS D G, RAMULU M, KLOCK-MCCOOK E J, et al. Characterization of Superplastically Formed Friction Stir Weld in Titanium 6AL-4V: Preliminary Results[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2008, 17(2): 187—192.
- [18] 海敏娜, 王快社, 郝亚鑫, 等. 钛及钛合金搅拌摩擦焊搅拌头最新研究进展[J]. *热加工工艺*, 2014, 43(9): 6—8.
- HAI Min-na, WANG Kuai-she, HAO Ya-xin, et al. Latest Research on Stirring Tool of Titanium and Titanium Alloy of Friction Stir Welding[J]. *Hot Working Technology*, 2014, 43(9): 6—8.
- [19] 张利国, 孟庆国, 姬书得, 等. 轴肩结构对搅拌摩擦焊过程中材料流动的影响[J]. *材料科学与工艺*, 2012, 20(3): 99—102.
- ZHANG Li-guo, MENG Qing-guo, JI Shu-de, et al. Effect of the Shoulder Geometry of Rotational Tool on Material Flow Behavior in Friction Stir Welding[J]. *Materials Science & Technology*, 2012, 20(3): 99—102.
- [20] 何建军, 刘明宇, 杨宗辉. 搅拌头: 搅拌摩擦焊的心脏[J]. *电焊机*, 2004(1): 24—26.
- HE Jian-jun, LIU Ming-yu, YANG Zong-hui. Stirring Head-the Heart of Friction Stir Welding[J]. *Electric Welding Machine*, 2004(1): 24—26.
- [21] 李程锦, 王陆钊, 刘其鹏, 等. 搅拌头几何参数及倾角对搅拌摩擦焊接质量影响的数值分析[J]. *大连交通大学学报*, 2017, 38(5): 70—74.
- LI Cheng-jin, WANG Lu-zhao, LIU Qi-peng, et al. Numerical Analysis of Influence of Geometric Parameters and Inclination Angle of Stirring Head on Friction Stir Welding Quality[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2017, 38(5): 70—74.
- [22] 王大勇, 冯吉才, 王攀峰. 搅拌摩擦焊用搅拌头研究现状与发展趋势[J]. *焊接*, 2004(6): 6—10.
- WANG Da-yong, FENG Ji-cai, WANG Pan-feng. Research Status and Trend of Rotational Tool Used for Friction Stir Welding[J]. *Welding & Joining*, 2004(6): 6—10.
- [23] 谢飞飞. TC4 钛合金搅拌摩擦焊接头组织与性能研究[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2012.
- XIE Fei-fei. Research on Microstructure and Properties of Friction Stir Welded Joint of TC4 Titanium Alloy[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2012.
- [24] 栾国红, 柴鹏, 孙成斌. 钛合金的搅拌摩擦焊探索[J]. *焊接学报*, 2005(11): 83—88.
- LUAN Guo-hong, CHAI Peng, SUN Cheng-bin. Exploration of Friction Stir Welding of Titanium

- Alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005(11): 83—88.
- [25] WANG J Y, SU J Q, MISHRA R S, et al. Tool Wear Mechanisms in Friction Stir Welding of Ti-6Al-4V Alloy[J]. Wear, 2014, 321: 25—32.
- [26] 周利, 周炜璐, 杜正勇, 等. 钛及钛合金搅拌摩擦焊研究进展[J]. 精密成形工程, 2015, 7(5): 46—51.
ZHOU Li, ZHOU Wei-lu, DU Zheng-yong, et al. Research Progress in Friction Stir Welding of Titanium and Titanium Alloys[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(5): 46—51.
- [27] FALL A, FESHARAKI M H, KHODABANDEH A R, et al. Tool Wear Characteristics and Effect on Microstructure in Ti-6Al-4V Friction Stir Welded Joints[J]. Metals, 2016, 6(11): 275.
- [28] SEIGHALANI K R, GIVI M K B, NASIRI A M, et al. Investigations on the Effects of the Tool Material, Geometry, and Tilt Angle on Friction Stir Welding of Pure Titanium[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2010, 19(7): 955—962.
- [29] HANKE S, LEMOS G V B, BERGMANN L, et al. Degradation Mechanisms of PCBN Tool Material during Friction Stir Welding of Ni-base Alloy 625[J]. Wear, 2017, 376: 403—408.
- [30] ZHANG Y, SATO Y S, KOKAWA H, et al. Stir Zone Microstructure of Commercial Purity Titanium Friction Stir Welded Using PCBN Tool[J]. Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, 2008, 488(1/2): 25—30.
- [31] MIYAZAWA T, IWAMOTO Y, MARUKO T, et al. Development of High Strength Ir Based Alloy Tool for Friction Stir Welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2012, 17(3): 213—218.
- [32] 王快社, 张小龙, 沈洋, 等. TC4 钛合金搅拌摩擦焊连接组织形貌研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2008, 37(11): 2045—2048.
WANG Kuai-she, ZHANG Xiao-long, SHEN Yang, et al. Study on Microstructure and Morphology of TC4 Titanium Alloy Friction Stir Welding[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2008, 37(11): 2045—2048.
- [33] ZHOU L, LIU H J, LIU Q W. Effect of Rotation Speed on Microstructure and Mechanical Properties of Ti-6Al-4V Friction Stir Welded Joints[J]. Materials & Design, 2010, 31(5): 2631—2636.
- [34] LERTORA E, MANDOLFINO C, GAMBARO C. Ti 6Al-4V FSW Weldability: Mechanical Characterization and Fatigue Life Analysis[J]. Key Engineering Materials, 2014, 611/612: 1476—1483.
- [35] 张嘉波, 邹鑫, 陈滨熹, 等. WC-Re 复合搅拌头设计及其制造工艺研究[J]. 制造技术与机床, 2019(6): 97—102.
ZHANG Jia-bo, ZOU Xin, CHEN Bin-xi, et al. A Study of Design and Manufacturing Process of WC-Re Composite Friction Stir Welding Tool[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019(6): 97—102.
- [36] 陈超, 余朗, 陈玉华, 等. 铝合金超声辅助搅拌摩擦焊接接头组织性能研究[J]. 精密成形工程, 2018, 10(5): 33—37.
CHEN Chao, YU Lang, CHEN Yu-hua, et al. Microstructure and Properties of Aluminium Alloy Welding Joint by Ultrasonic-assisted Friction Stir Welding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2018, 10(5): 33—37.
- [37] 张婧, 封小松, 许辉, 等. 2219-T6 激光同轴辅助搅拌摩擦焊性能与组织分析[J]. 焊接学报, 2018, 39(8): 82—86.
ZHANG Jing, FENG Xiao-song, XU Hui, et al. Performance and Microstructure Analysis of 2219-T6 Coaxial Laser Auxiliary Friction Stir Welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2018, 39(8): 82—86.
- [38] 刘小超, 武传松. 外加能量辅助搅拌摩擦焊技术的研究进展[J]. 精密成形工程, 2015, 7(5): 13—24.
LIU Xiao-chao, WU Chuan-song. Research Progress of Secondary Energy Assisted Friction Stir Welding[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2015, 7(5): 13—24.
- [39] 许辉, 封小松, 尹玉环. 铝合金激光同轴辅助加热搅拌摩擦焊工艺[C]// 第二十次全国焊接学术会议, 2015.
XU Hui, FENG Xiao-song, YIN Yu-huan. Aluminum Alloy Coaxial Laser Auxiliary Heating Friction Stir Welding Process[C]// The 20th National Welding Conference, 2015.
- [40] CAMPANELLI S L, CASALINO G, CASAVOLA C, et al. Analysis and Comparison of Friction Stir Welding and Laser Assisted Friction Stir Welding of Aluminum Alloy[J]. Materials, 2013, 6(12): 5923—5941.
- [41] 许惠斌, 罗磊, 张硕, 等. 焊接电流对电弧辅助下铝钢搅拌摩擦焊接头界面微观结构的影响[C]// 第二十次全国焊接学术会议, 2015.
XU Hui-bin, LUO Lei, ZHANG Shuo, et al. Effect of Welding Current on the Interface Microstructure of Aluminum and Steel Friction Stir Welded Joint under Arc Assist[C]// The 20th National Welding Conference, 2015.
- [42] BANG H, BANG H, SONG H, et al. Joint Properties of Dissimilar Al6061-T6 Aluminum Alloy/Ti-6%Al-4%V Titanium Alloy by Gas Tungsten Arc Welding Assisted Hybrid Friction Stir Welding[J]. Materials & Design, 2013, 51: 544—551.
- [43] SANTOS T G, MIRANDA R M, VILACA P. Friction Stir Welding Assisted by Electrical Joule Effect[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(10): 2127—2133.
- [44] OLIVEIRA J P, DUARTE J F, INACIO P, et al. Production of Al/NiTi Composites by Friction Stir Welding Assisted by Electrical Current[J]. Materials &

- Design, 2017, 113: 311—318.
- [45] VIJENDRA B, SHARMA A. Induction Heated Tool Assisted Friction-stir Welding (i-FSW): a Novel Hybrid Process for Joining of Thermoplastics[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2015, 20: 234—244.
- [46] 叶绍勇, 贺地球, 杨坤玉, 等. 超声辅助搅拌摩擦焊对焊缝残余应力的影响[J]. 中国有色金属学报, 2013, 23(7): 1843—1847.
- YE Shao-yong, HE Di-qiu, YANG Kun-yu, et al. Effect of Ultrasonic Assisted Friction Stir Welding on Residual Stress of Welded Joint[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2013, 23(7): 1843—1847.
- [47] JI S D, LI Z W, WANG Y, et al. Joint Formation and Mechanical Properties of Back Heating Assisted Friction Stir Welded Ti-6Al-4V Alloy[J]. Materials & Design, 2017, 113: 37—46.
- [48] 韩玉杰, 王耀奇, 侯红亮, 等. 置氢 TC16 钛合金微观组织与变形行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2017, 46(S1): 51—55.
- HAN Yu-jie, WANG Yao-qi, HOU Hong-liang, et al. Microstructure and Deformation Behavior of Hydrogenated TC16 Titanium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2017, 46(S1): 51—55.
- [49] SAHLOT P, ARORA A. Numerical Model for Prediction of Tool Wear and Worn-out Pin Profile during Friction Stir Welding[J]. Wear, 2018, 408: 96—107.
- [50] 赵俊敏, 王玉, 尹欣, 等. TC4 钛合金搅拌摩擦焊温度场的数值模拟[J]. 机械工程材料, 2008(5): 78—81.
- ZHAO Jun-min, WANG Yu, YIN Xin, et al. Numerical Simulation of Temperature Field in Friction Stir Welding for TC4 Titanium Alloy[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2008(5): 78—81.
- [51] 张辉, 王玉, 尹欣, 等. 基于 Matlab 的钛合金 TC4 搅拌摩擦焊温度场数值模型[J]. 热加工工艺, 2008, 37(1): 54—56.
- ZHANG Hui, WANG Yu, YIN Xin, et al. Numerical Model of Temperature Field on Friction Stir Welding of TC4 Alloy Based on Matlab[J]. Hot Working Technology, 2008, 37(1): 54—56.