

轴肩直径对 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦 焊接头组织和性能的影响

马世辉¹, 李积元²

(1. 青海高等职业技术学院, 青海 海东 810700; 2. 青海大学, 青海 西宁 810016)

摘 要: 作为搅拌摩擦焊用搅拌头的重要尺寸, 轴肩直径对焊接接头组织性能都产生影响。采用不同轴肩直径进行了 2 mm 厚 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊试验, 并进行了显微组织的金相(OM)分析和电子背散射衍射(EBSD)分析, 以及力学性能的测试与分析。结果表明, 当轴肩直径在 8~14 mm 时, 2 mm 厚 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊接头焊核区晶粒先细化后粗化、接头抗拉强度和接头系数先提高后下降; 当轴肩直径为 12 mm 时, 焊核区晶粒最细小, 平均晶粒尺寸 ~7 μm, 接头抗拉强度和接头系数最高, 分别为 929 MPa、91%。

关键词: 钛合金; Ti-6Al-4V; 搅拌摩擦焊; 轴肩直径; 显微组织; 力学性能

中图分类号: TF823, TG442 文献标志码: A 文章编号: 1004-7638(2021)03-0082-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2021.03.012

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Influence of shaft shoulder diameter on microstructure and properties of Ti-6Al-4V friction stir welding joint

Ma Shihui¹, Li Jiyuan²

(1. Qinghai Vocational and Technical College, Haidong 810700, Qinghai, China; 2. Qinghai University, Xining 810016, Qinghai, China)

Abstract: As an important parameter for the stir head of friction stir welding (FSW), the diameter of the shaft shoulder has an effect on the microstructure and properties of the welded joints. The friction stir welding of Ti-6Al-4V titanium alloy with 2 mm thickness was carried out with different shaft shoulder diameters. The microstructure and mechanical properties were analyzed. The results show that when the diameter of the shoulder is at 8~14 mm, the grain in the nugget area of the Ti-6Al-4V FSW joint is first refined and then coarse, and the joint tensile strength and joint coefficient are first increased and then decreased. When the diameter of the shoulder is at 12 mm, the grain in the nugget area is the smallest with the average grain size of 7 μm, and the joint tensile strength and joint coefficient are the highest with the value at 929 MPa and 91% respectively.

Key words: titanium alloy, Ti-6Al-4V, friction stir welding, shaft shoulder diameter, microstructure, mechanical properties

0 引言

搅拌摩擦焊被称为是继激光焊后又一革命性的

焊接技术。作为一种新型的固相焊接技术,它在焊接铝合金、镁合金、钛合金等轻合金时,能有效避免熔化焊时极易出现的气孔、夹杂、大变形等缺陷,获

收稿日期:2020-04-16

基金项目:青海省科技厅项目(基于铝合金材料搅拌摩擦焊接技术的焊接机理研究,2016-ZJ-741)。

作者简介:马世辉(1981—),男,汉族,青海海东人,本科,副教授,研究方向:焊接冶金。E-mail: xun832944511199@163.com。

得高质量的焊缝^[1]。搅拌摩擦焊在轻合金尤其是铝合金领域得到广泛应用,但是在高熔点的钛合金领域还存在较多工艺开发方面的问题,吸引了较多科研工作者的研究兴趣。罗海龙等人^[2]分析了 T2-TA1 搅拌摩擦钎焊接头显微组织及结合机理。王月等人^[3-4]研究了低于 β 相相变温度时 TC4 钛合金搅拌摩擦焊接头的成形性能并测试分析了焊接接头的拉伸性能,以及 TC4 钛合金搅拌摩擦搭接焊温度场模拟。张昭和谭治军^[5]采用数值模拟方法进行了搅拌摩擦焊接 Ti-6Al-4V 钛合金晶粒生长分析。姬书得等人^[6]对比分析了 TC4 钛合金静止轴肩和传统搅拌摩擦焊的温度场分布情况。肖翰林等人^[7]测试分析了 TC4 钛合金搅拌摩擦焊接头的疲劳性能。吴利辉等人^[8]研究了 Ti-6Al-4V 合金水下搅拌摩擦焊接头的低温与高应变速率超塑性。搅拌头尺寸设计是搅拌摩擦焊极其重要的一个影响因素,它不仅关系到焊缝表面成形情况,还会对焊缝内部组织和性能产生明显影响。轴肩直径是搅拌头的一个关键尺寸,但是目前关于钛合金搅拌摩擦焊轴肩直径相关研究还鲜有报道。为此,笔者采用 4 种不同轴肩直径的搅拌头进行了 2 mm 厚 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊试验,并进行了焊接接头显微组织和力学性能的测试与分析,研究了轴肩直径对焊接接头组织和力学性能的影响规律。

1 试验材料及方法

被焊母材为外购的商品化 Ti-6Al-4V 钛合金板材,母材尺寸 200 mm×100 mm×2 mm,母材化学成分: 6.12%Al、4.08%V、余量 Ti。母材力学性能参数: 抗拉强度 1 026 MPa、屈服强度 957 MPa、断后伸长率 11.5%。在铣装改装的搅拌摩擦焊机(图 1)上进行试验。搅拌头材质为钨铼合金,搅拌针为圆台型、针根部直径 4 mm、针端部直径 3 mm、针长 1.8 mm;搅拌头轴肩为内凹型,轴肩直径分别为 8、10、12 mm 和 14 mm(对应焊缝依次记为焊缝-8,焊缝-10,焊缝-12,焊缝-14)。焊接时采用相同的焊接工艺参数: 转速 600 r/min、焊接速度 90 mm/min、搅拌头倾斜角度 2.5°、轴肩下压量 0.1 mm。采用的搅拌头外形如图 2 所示。

在每条焊缝上用线切割方法垂直于焊缝切取 1 个金相试件(在焊缝中部切取)、3 个拉伸试件(分别在焊缝前端、中部和后端切取)。经过金相砂纸机械研磨、1 μ 人造金刚石研磨膏抛光后在化学试剂

(15 mL 氢氟酸+30 mL 硝酸+105 mL 去离子水)中浸蚀 10 s,在 PG18 型显微镜下观察试样的内部组织形貌、在 JSM6510 电镜下进行 EBSD 分析。拉伸试件尺寸如图 3 所示,焊缝位于拉伸试件中部位置。拉伸试验在 CTM6000 拉伸试验机上进行,拉伸速度 1 mm/min,并用 JSM6510 型扫描电镜观察试样的拉伸断口形貌。以 3 个拉伸试件测试值的算术平均值作为试样的拉伸测试值。

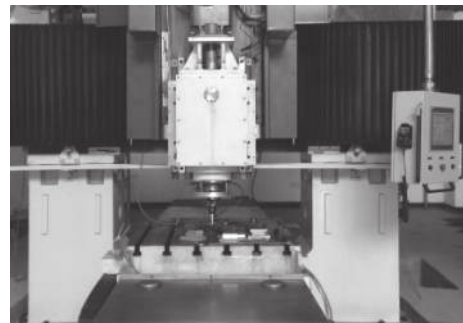


图 1 试验采用的搅拌摩擦焊机示意
Fig. 1 Outline diagram of friction stir welding machine used in the test



图 2 试验采用的搅拌头外形示意
Fig. 2 Outline diagram of mixing head used in the test

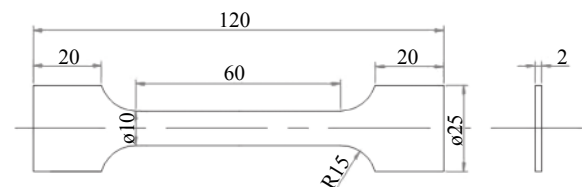


图 3 拉伸试样具体尺寸(单位:mm)
Fig. 3 Specific size of tensile specimens

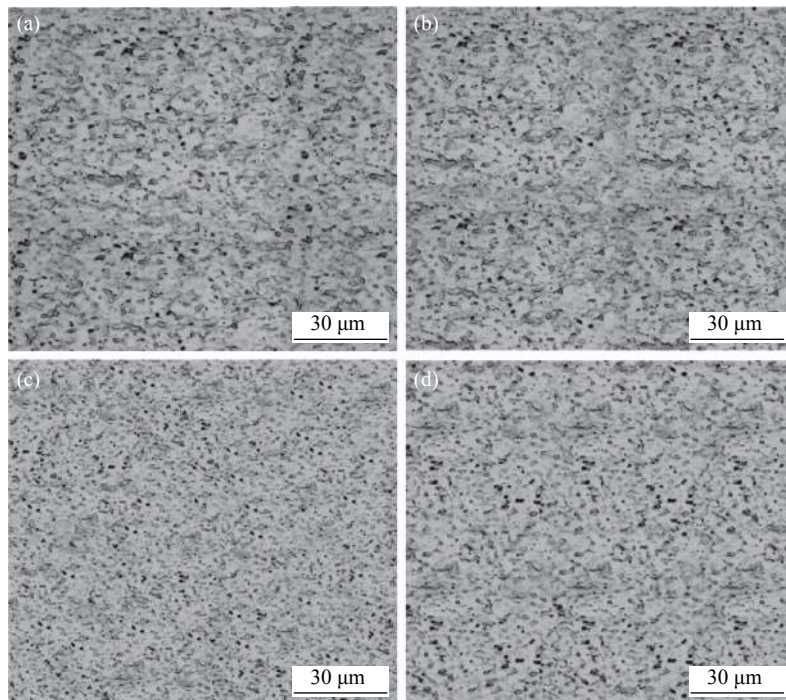
2 试验结果

2.1 显微组织

不同轴肩直径焊接的 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊接头焊核区显微组织 OM(金相)照片及 EBSD

(电子背散射衍射)照片,分别如图 4、5 所示。从图 4、5 可以看出,轴肩直径对焊缝显微组织产生明显影响。随轴肩直径从 8 mm 逐步增大到 14 mm,焊缝焊核区晶粒先细化后粗化。在搅拌摩擦焊过程中,轴肩与母材之间的摩擦生热是焊接热源的主要来源。轴肩直径的大小直接决定着摩擦产热的大小。当轴肩直径过小,焊接过程中产热不足,难以促使焊核区材料发生充分的塑性流动和动态再结晶,从而难以在焊核区获得细小的等轴晶,故轴肩直径 8 mm 时焊核区组织较为粗大;随轴肩直径逐渐增

大,轴肩与被焊母材摩擦产热逐渐增多,焊核区材料获得更加充分的塑性流动和动态再结晶,从而焊核区晶粒逐渐得到细化,当轴肩直径为 12 mm 时,焊核区组织晶粒最细小,平均晶粒尺寸 ~ 7 μm。但是,轴肩直径过大,轴肩与被焊母材之间的摩擦产热过多,将导致焊核区晶粒发生粗化。由此可以看出,轴肩直径过小或过大,都不利于获得晶粒细小的焊核区组织。为了获得均匀的细小等轴晶焊核区组织,在试验参数条件下 2 mm 厚 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊用搅拌头的轴肩直径优选为 12 mm。



(a) 轴肩直径 8 mm; (b) 轴肩直径 10 mm; (c) 轴肩直径 12 mm; (d) 轴肩直径 14 mm

图 4 不同轴肩直径下焊接接头焊核区组织 OM 照片

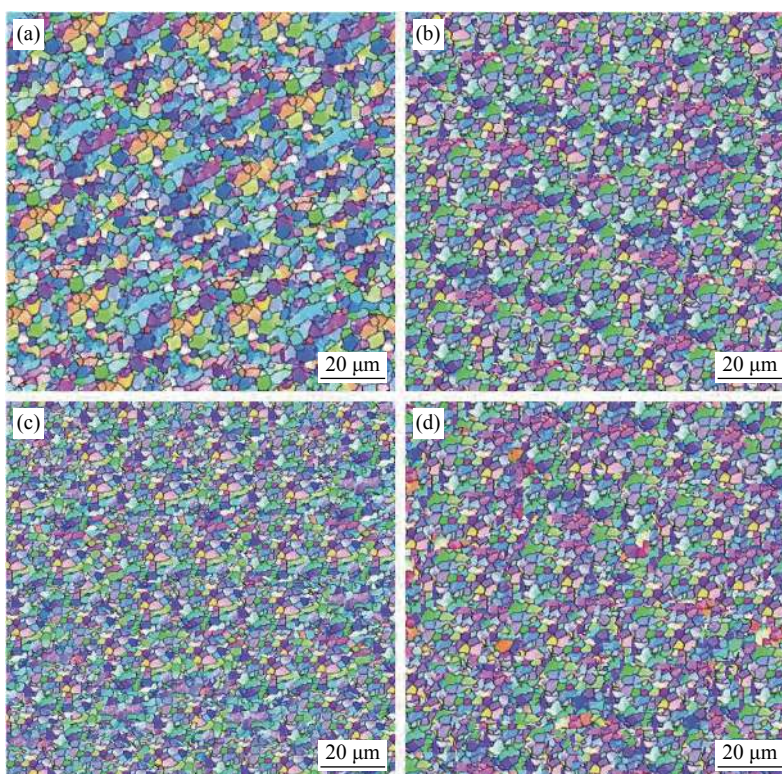
Fig. 4 OM photos of the welds in the stir zone by various shoulder diameters

图 6 是搅拌头轴肩直径 12 mm 时焊接的 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊接头不同区域的显微组织 EBSD 照片。从图 6 可以看出,与母材相比,热影响区组织类似但稍有粗化,这主要是因为热影响区受到高温作用晶粒发生了一定程度上的长大;热机械影响区出现明显的长条状组织以及部分细小晶粒,这主要是因为热机械影响区合金不仅受到高温作用,还受到一定程度的机械搅拌作用;焊核区晶粒为细小的等轴晶,这主要是因为焊核区合金承受着剧烈的机械搅拌作用,发生了明显的动态再结晶。

2.2 力学性能

表 1 是采用不同轴肩直径焊接的 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊接头试样的力学性能测试结果,表

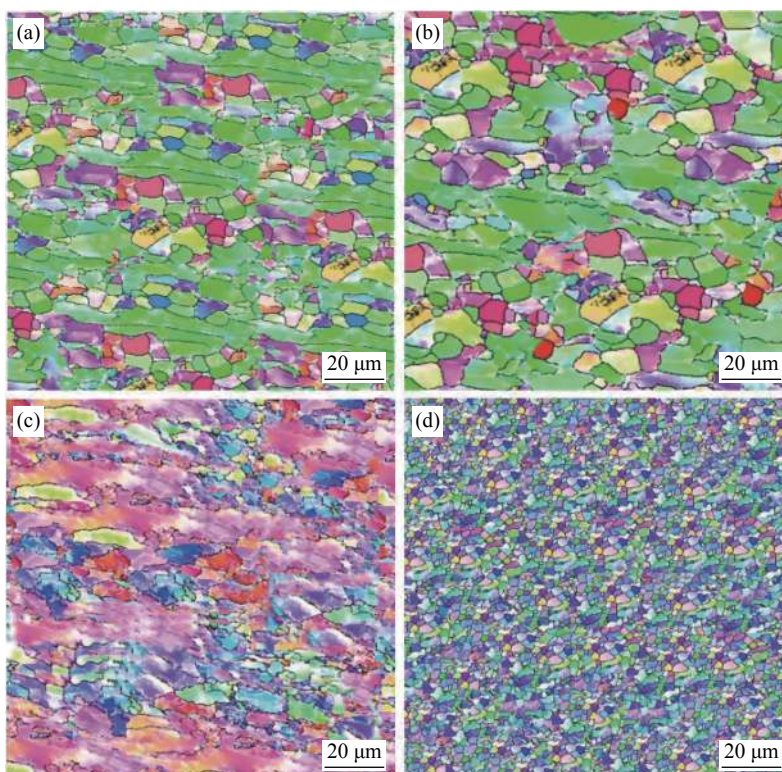
中所述接头系数是指接头平均抗拉强度与 Ti-6Al-4V 钛合金母材抗拉强度(1 026 MPa)的百分比。接头系数表征了接头力学性能的优劣,接头系数越大,接头力学性能越佳;反之,接头系数越小,接头力学性能越差。从表 1 可以看出,随轴肩直径增大,接头抗拉强度和屈服强度均表现为先增大后减小,但断后伸长率变化幅度较小。从表 1 还可以看出,当轴肩直径最小(8 mm)时,接头系数最小,仅为 85%;随着轴肩直径增大,接头系数逐渐增大,接头性能逐渐提高,当轴肩直径为 12 mm 时,接头系数达到最大值(91%),接头平均抗拉强度达到 929 MPa。但是,当轴肩直径进一步增大到 14 mm 时,接头系数没有进一步增大,反而出现了下降。



(a) 轴肩直径 8 mm; (b) 轴肩直径 10 mm; (c) 轴肩直径 12 mm; (d) 轴肩直径 14 mm

图 5 不同轴肩直径下焊接接头焊核区 EBSD 照片

Fig. 5 EBSD photos of the welds in the stir zone by various shoulder diameters



(a) 母材; (b) 热影响区; (c) 热机械影响区; (d) 焊核区

图 6 轴肩直径 12 mm 时焊接接头不同区域显微组织 EBSD 照片

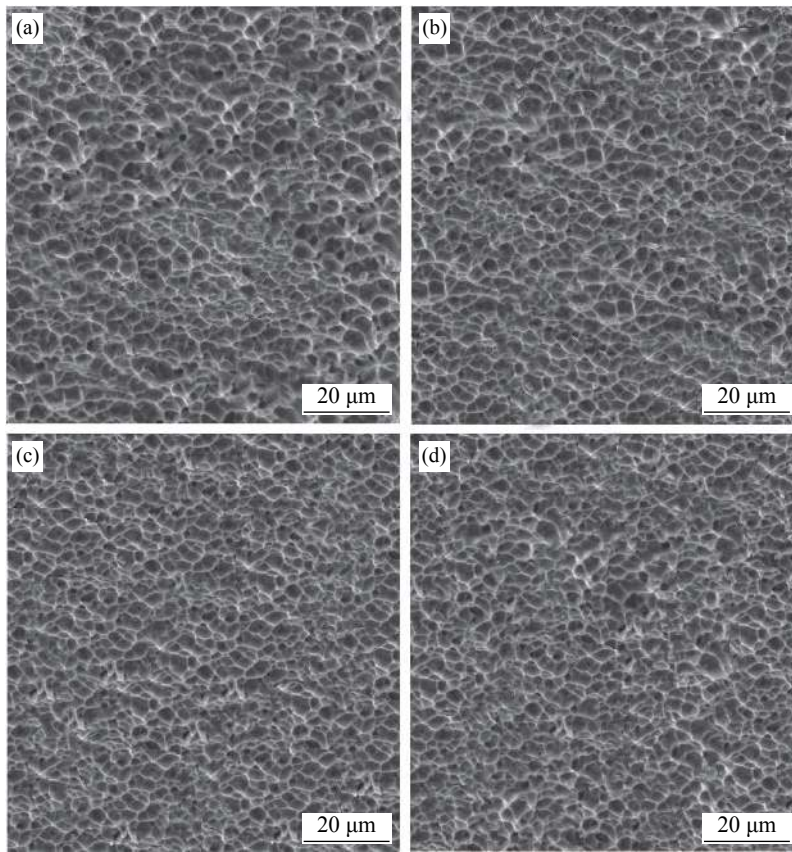
Fig. 6 EBSD photos of the welds in the different zones by shoulder diameter of 12 mm

表 1 不同轴肩直径下接头力学性能测试结果
 Table 1 Mechanical properties of the welds by various shoulder diameters

焊缝编号	搅拌头轴肩直径/mm	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	断后伸长率/%	接头系数/%
焊缝-8	8	872	811	10.5	85
焊缝-10	10	913	850	10.1	89
焊缝-12	12	929	872	10.0	91
焊缝-14	14	920	861	10.2	90

图 7 是采用不同轴肩直径焊接的 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊接头试样拉伸断口形貌。从图 7 可以看出,当轴肩直径在 8~14 mm 范围时,接头拉伸断口均由韧窝和撕裂棱组成,均呈现出较为明显的

韧性断裂特征;但是当轴肩直径过小(8 mm)时,拉伸断口中韧窝较浅显;当轴肩直径增大,拉伸断口中韧窝变得更为细小、深邃,展现出更好的拉伸性能。



(a) 轴肩直径 8 mm; (b) 轴肩直径 10 mm; (c) 轴肩直径 12 mm; (d) 轴肩直径 14 mm

图 7 不同轴肩直径下接头拉伸断口 SEM 照片

Fig. 7 SEM photos of the welds's tensile fracture by various shoulder diameters

2.3 讨论与分析

在搅拌摩擦焊过程中,轴肩的主要作用是在工件表面施加轴向压力,并促使轴肩下方的金属发生软化。轴肩与被焊母材之间摩擦所产生的大量热量将促使被焊金属发生软化和塑性流动,同时通过对被焊母材持续施加轴向压力,可以很好地防止在发生软化的金属内部产生孔洞等缺陷。在 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊过程中,如果轴肩直径过小,很容

易导致产生的摩擦热不足以使被焊母材发生充分的软化和塑性流动,导致焊缝区组织未能发生充分的动态再结晶,使其组织较为粗大,接头抗拉强度偏低、接头系数偏小,难以获得高质量的焊接接头。适当增大轴肩直径,有助于增大摩擦产生的热量,促使被焊母材发生充分的软化和塑性流动,使得焊缝区组织发生充分的动态再结晶,并在搅拌头针的高速剪切作用下进一步细化晶粒,从而获得焊核区晶粒细

小均匀的内部组织,同时获得较佳的抗拉强度和接头系数,获得高质量的焊接接头。但是,过大的轴肩直径,搅拌摩擦焊过程中容易产生过多的摩擦产热,可能导致轴肩下方的被焊母材过热,使得焊核区晶粒发生粗化,接头性能下降。所以在 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊时,过小或过大的轴肩直径都不利于获得高质量的焊接接头。对于 2 mm 厚 Ti-6Al-4V 钛合金而言,搅拌摩擦焊时轴肩直径优选为 12 mm。

在实际的工业化生产中,2 mm 厚 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊的搅拌头轴肩直径建议采用 12 mm,同时为了提高焊接质量,实现高效高质焊接,需要根据被焊产品的尺寸及形状,设计制作专业化的焊接工装,确保工件的刚性固定及高效装夹。由于焊接深度不同,需要的搅拌头尺寸也不同,所以最优轴肩直径也会有所差异。不同厚度钛合金板材的搅拌摩擦焊工艺及搅拌头尺寸优化,是一个系统化

的研究过程。这也是笔者后续研究的方向,将进一步研究其它厚度钛合金板材的搅拌头轴肩直径及其它尺寸优化,以及焊接工艺参数优化,为工业化生产提供更为全面的技术支持。

3 结论

1)当轴肩直径在 8~14 mm 时,2 mm 厚 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊接头焊核区晶粒先细化后粗化;当轴肩直径为 12 mm 时,焊核区晶粒最细小,平均晶粒尺寸~7 μm 。

2)当轴肩直径在 8~14 mm 时,2 mm 厚 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊接头抗拉强度和接头系数先提高后下降;当轴肩直径为 12 mm 时,接头抗拉强度和接头系数最高,分别为 929 MPa、91%。

3)2 mm 厚 Ti-6Al-4V 钛合金搅拌摩擦焊的轴肩直径优选为 12 mm。

参考文献

- [1] Shao Shuai, Huang Yongde, Chen Yuhua. Research status on tools of friction stir welding in titanium alloy[J]. *Journal of Netshape Forming Engineering*, 2019, 11(5): 115-122.
(邵帅,黄永德,陈玉华.钛合金搅拌摩擦焊搅拌头研究现状[J].*精密成形工程*,2019,11(5):115-122.)
- [2] Luo Hailong, Zhang Min, Chu Qiaoling, et al. Microstructure and bonding mechanism of friction stir brazing T2-TA1 lap joint[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2019, 42(3): 12-16.
(罗海龙,张敏,褚巧玲,等.T2-TA1搅拌摩擦钎焊接头显微组织及结合机理分析[J].*兵器材料科学与工程*,2019,42(3):12-16.)
- [3] Wang Yue, Ji Shude, Li Zhengwei, et al. Formation and tensile properties of friction stir welded TC4 titanium alloy joint below β -phase transus temperature[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2018, 28(2): 260-266.
(王月,姬书得,李政玮,等.低于 β 相相变温度时TC4钛合金搅拌摩擦焊接头的成形及拉伸性能[J].*中国有色金属学报*,2018,28(2):260-266.)
- [4] Wang Yue, Zhang Liguang, Wen Quan, et al. Numerical simulation of temperature field during friction stir lap welding of TC4 titanium alloy[J]. *Hot Working Technology*, 2017, 46(11): 175-177.
(王月,张利国,温泉,等.TC4钛合金搅拌摩擦搭接焊的温度场模拟[J].*热加工工艺*,2017,46(11):175-177.)
- [5] Zhang Zhao, Tan Zhijun. Numerical simulation of grain growth of Ti-6Al-4V alloy in friction stir welding[J]. *Ordnance Material Science and Engineering*, 2017, 40(3): 7-11.
(张昭,谭治军.搅拌摩擦焊接Ti-6Al-4V钛合金晶粒生长的数值模拟[J].*兵器材料科学与工程*,2017,40(3):7-11.)
- [6] Ji Shude, Zhuo Bin, Gao Shuangsheng, et al. Temperature field comparison of TC4 titanium between stationary shoulder friction stir welding and traditional friction stir welding[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2016, (19): 98-101.
(姬书得,卓彬,高双胜,等.TC4钛合金静止轴肩和传统搅拌摩擦焊的温度场对比[J].*航空制造技术*,2016,(19):98-101.)
- [7] Xiao Hanlin, Yue Yumei, Wang Yue, et al. Fatigue performance of TC4 titanium alloy friction stir welded joints[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 45(11): 194-196.
(肖翰林,岳玉梅,王月,等.TC4钛合金搅拌摩擦焊接头的疲劳性能[J].*热加工工艺*,2016,45(11):194-196.)
- [8] Wu Lihui, Zhang Hao, Zeng Xianghao, et al. Achieving superior low temperature and high strain rate superplasticity in submerged friction stir welded Ti-6Al-4V alloy[J]. *Science China. Materials*, 2018, 61(3): 417-423.
(吴利辉,张昊,曾祥浩,等.Ti-6Al-4V合金水下搅拌摩擦焊接头的低温与高应变速率超塑性[J].*中国科学:材料科学(英文版)*,2018,61(3):417-423.)