

TC4 钛合金单丝 MIG 接头疲劳损伤行为研究

张 龙¹, 李清波², 戴 宇¹, 陈东高^{1*}, 何逸凡¹

(1. 中国兵器科学研究院宁波分院, 浙江 宁波 315103; 2. 哈尔滨第一机械集团有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150056)

摘 要:采用单丝 MIG 焊工艺焊接 15 mm 厚 TC4 钛合金, 对母材和焊接接头的组织、拉伸性能、疲劳性能进行分析测试。结果表明: 焊接接头分为母材、热影响区和焊缝区 3 个部分, 其中母材为 $\alpha+\beta$ 等轴组织, 热影响区为 $\alpha+\beta$ 和 α' 马氏体组成的混合组织, 焊缝区在强烈热冲击作用下, 晶粒粗化, 晶粒内为 α' 马氏体组织。接头拉伸试样断裂在母材处, 断后延伸率为 10.5%。母材和焊接接头疲劳寿命随着应力水平的增加而减小, 在高应力水平下, 母材疲劳寿命高于母材, 低应力水平下则相反; 母材疲劳源位于试样表面的划痕处, 接头疲劳起源于内部气孔处, 接头疲劳扩展区有许多二次裂纹, 接头扩展区疲劳条带间距小于母材, 接头和母材瞬断区都有大量韧窝。

关键词:TC4 钛合金; 单丝 MIG 焊; 显微组织; α' 马氏体; 疲劳性能

中图分类号: TF823

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2022)02-0062-06

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2022.02.010

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听语音
聊科研
与作者互动

A study on fatigue damage behavior of single-wire MIG welding joint for TC4 titanium alloy

Zhang Long¹, Li Qingbo², Dai Yu¹, Chen Donggao^{1*}, He Yifan¹

(1. Ningbo Branch of China Ordnance Research Institute, Ningbo 315103, Zhejiang, China; 2. Harbin First Machinery Group Co., Ltd., Harbin 150056, Heilongjiang, China)

Abstract: A single-wire MIG welding process was carried out to weld TC4 titanium alloy with a thickness of 15 mm. The base metal and welded joint microstructure, tensile, and fatigue properties were analyzed and tested. The results showed that the welded joints were divided into the base metal, heat-affected zone, and weld zone. The base metal had an $\alpha+\beta$ equiaxed structure, and the heat-affected zone was a mixture of $\alpha+\beta$ and α' -martensite. The grains in the weld zone presented a coarse state under the intense thermal shock; meanwhile, the α' -martensite structure formed the interior of the grain. The tensile specimen fractured at the base metal, and the elongation after fracture was 10.5%. The fatigue life of base metal and welded joints decreased with increased stress levels. The fatigue life of base metal was higher than that of base metal at high-stress levels but opposite at low-stress levels. The fatigue source of the base metal was located at the surface scratches of the sample, and the joint fatigue originated from the internal pores. Many secondary cracks formed in the fatigue propagation zone of the joint, the spacing of the fatigue bands in the fatigue propagation zone was more minor than that of the base metal, and there were many dimples in the transient fracture zone of the joint and the base metal.

Key words: TC4 titanium alloy, single-wire MIG welding, microstructure, α' -martensite, fatigue performance

收稿日期: 2022-03-28

基金项目: 宁波市自然科学基金资助项目(2018A610169)。

作者简介: 张龙 (1991—), 男, 河南永城人, 硕士研究生, 工程师, 主要工作方向为钛合金先进制造技术, E-mail: 1027578531@qq.com; * 通讯作者: 陈东高, 男, 研究员, 研究方向为轻质材料焊接制造技术, E-mail: chendg2580@sina.com。

0 引言

TC4 钛合金属于 $\alpha+\beta$ 双相钛合金^[1], 因具有强度高、密度小、耐腐蚀性优异等性能, 被广泛应用于航空航天、化工等领域^[2-4]。MIG 焊(熔化极惰性气体保护焊)因具有熔覆效率高、良好的焊接可达性、设备成本低等优势得到越来越多的关注^[5-6], 其在大型装备的焊接过程中, 与激光焊、等离子弧焊、电子束焊、TIG 焊方法相比有巨大的经济效益。目前, 单丝 MIG 焊接钛合金的研究主要集中在调整焊缝成形、优化焊接工艺、提高接头力学性能等方面, 如牟刚等人^[7]研究了 8 mm 钛板摆动 MIG 焊和手工 TIG 焊对工艺与性能影响, 认为摆动 MIG 焊可以获得良好的焊缝成形, 但接头强度要低于手工 TIG 焊。李瑞武等人^[8]通过工艺优化, 首次将双面双弧 MIG 焊应用到大型 T 形接头的焊接上。何逸凡等人^[9]研

究了不同热处理工艺对 MIG 焊接头性能的影响, 认为热处理降低了接头残余应力的分布, 从而提高了接头强度和断后伸长率。

现阶段, 单丝 MIG 焊接头在动荷载作用下的疲劳性能研究较少, 而疲劳作为一种结构的重要失效方式应得到重视^[10-11]。笔者研究母材和接头的疲劳损伤行为, 得到母材和接头的 S-N 曲线, 并分析疲劳裂纹的扩展规律, 为 TC4 钛合金单丝 MIG 的应用提供理论和试验基础。

1 试验材料与方法

母材为 300 mm×300 mm×15 mm 的 TC4 钛合金试板, 状态为热处理态。焊丝牌号为 ERTi-5, 直径 1.2 mm, 母材和焊丝的成分如表 1 所示, 采用单面焊双面成形方式焊接, 具体坡口如图 1 所示, 焊接过程采用高纯氩气对焊缝高温区域进行保护。

表 1 母材和焊丝化学成分

Table 1 Chemical composition of base metal and welding wire

	Ti	Al	V	Fe	C	N	H	O
母材	余量	6.28	4.04	0.136	0.017	0.01	0.001	0.13
焊丝	余量	5.58	4.13	0.22	0.05	0.03	0.015	0.4

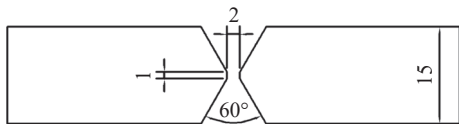


图 1 焊接坡口示意 (单位:mm)

Fig. 1 Schematic Diagram of welding groove

首先, 焊前采用乙醇清洗母材及坡口附近的油污, 然后对所焊板材进行装配, 装配完成后进行焊接。

单丝 MIG 焊采用 TPS-4 000 一体化焊机, 具体焊接工艺参数如表 2 所示。沿垂直于焊缝方向取疲劳试样, 疲劳试样具体尺寸如图 2 所示, 疲劳试验条件: 试验温度 25 ℃, 正弦波加载, 频率 100 Hz, 应力比 0.1, 对加工完成的疲劳试样进行抛光处理, 清除表面的划痕。采用 ZEISS 显微镜观察接头组织形貌, 用 FEI Quanta-250 扫描电镜观察疲劳断口, 分析疲劳裂纹扩展机制。

表 2 焊接工艺参数

Table 2 Welding process parameters

焊接电流/A	焊接速度/(m·min ⁻¹)	干伸长/mm	保护气流量/(L·min ⁻¹)	弧长修正/%
140 ~ 180	0.3 ~ 0.6	12 ~ 15	20 ~ 25	+30

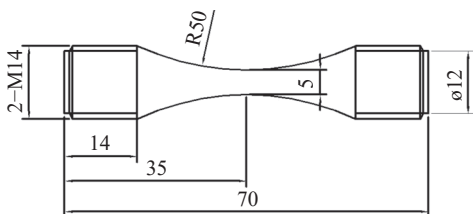


图 2 疲劳试样尺寸 (单位:mm)

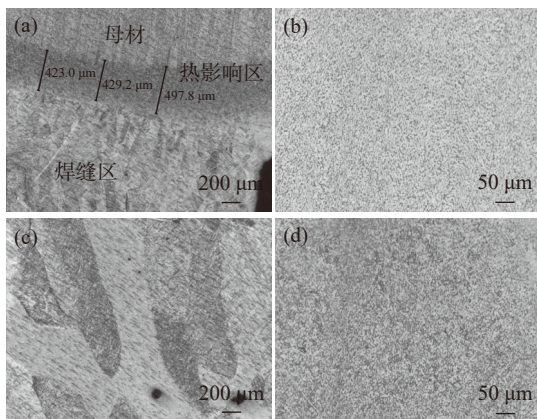
Fig. 2 Fatigue sample size

2 结果与分析

2.1 焊接接头显微组织

TC4 钛合金单丝 MIG 焊接头的显微组织如图 3 所示, 从图 3(a)可以看出焊接接头分为母材、热影响区和焊缝区 3 个部分, 各部分之间界限明显,

热影响区平均宽度为 450 μm 。其中母材为 $\alpha+\beta$ 双相钛合金,母材组织为等轴组织,以片层状的 α 相为基体,晶间存在少量 β 相, α 相晶粒被拉长呈现出棒槌形、椭圆形。焊缝区晶粒粗大,晶粒内部的针状马氏体 α' 有两个生长方向且相互垂直,长宽比大。热影响区为原始 α 和 β 以及新生成的 α' 相组成的混合组织。TC4 钛合金在单丝 MIG 焊热循环作用下,焊缝区微观组织在焊接过程中经历了从 $\alpha\rightarrow\beta\rightarrow$ 高温 $\beta\rightarrow\text{L}\rightarrow\alpha'$ 马氏体相的转变。钛合金在热源的强烈热冲击作用下,其组织迅速向高温 β 相过渡,起初,原始的 β 相发生第一阶段转变,形成高温 β 相,直到分布在 α 晶粒间的 β 相的原始组织完全消失;当温度增加至 $\alpha\rightarrow\beta$ 相变温度时,便开始第二阶段的转变过程,即原始的 α 相向高温 β 相的转变,在加热过程中,晶粒以晶界突跳式位移的方式吞噬合并周围的小晶粒迅速长大,相变过程中,各相之间存在着严格的晶体学取向关系和强烈的组织遗传性,转变结束后,仅存的高温 β 相被保留了下来,最终形成接头焊缝区的基本组织,当温度升高到 $\beta\rightarrow\text{L}$ 转变温度时, β 相便向液相过渡,最终全部成为 L 相。焊缝区金属在冷却过程中,由于焊缝温度高、冷却速度快而发生马氏体相变,在发生马氏体相变时,不发生原子扩散,仅发生 β 相原子整体的、有规律的近程迁移。随着温度降低,初生的 α' 晶粒依附在熔合区附近加热到半熔化状态下的基体金属表面形核,并向焊缝中心生长。最终形成由针状马氏体组成的网篮状焊缝组织形态。热影响区加热温度相比于焊缝区要低,部分组织在加热过程中形成高温 β 相,在冷却过程中形成 α' 相,其余部分不发生相变,原始 α 相和 β 相被保留下来。



(a) 焊接接头; (b) 母材; (c) 焊缝区; (d) 热影响区
图3 焊接接头微观组织
Fig. 3 Microstructure of welded joint

2.2 焊接接头拉伸性能

对单丝 MIG 焊接头进行全厚度板拉伸试验,拉伸试样如图4所示,TC4 钛合金母材和接头的拉伸试验结果如表3所示,母材的抗拉强度平均值为 843 MPa,断后伸长率为 13.5%,单丝 MIG 焊接头抗拉强度平均值为 850 MPa,断后延伸率为 10.5%。拉伸试样断裂在母材处,表明接头强度不低于母材,接头强度较高与其在焊接热循环下形成 α' 相有关。

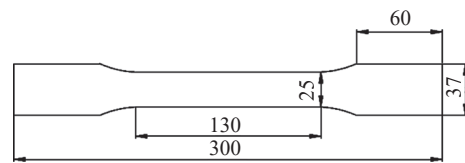


图4 拉伸试样尺寸(单位:mm)
Fig. 4 Tensile specimen size

表3 拉伸试验结果
Table 3 Tensile test results

样品名称	样品编号	抗拉强度/MPa	延伸率/%
母材	1-1	846	12.5
母材	1-2	840	14.0
母材	1-3	843	11.0
焊缝	1-1	848	11.5
焊缝	1-2	850	11.0
焊缝	1-3	852	12.0

接头拉伸试样断口形貌如图5所示,拉伸试样断口存在大量的韧窝,韧窝的形成分为空洞形核、生长、集聚和断裂四个过程。在外力作用下,随着变形和焊接应力集中产生空穴,随着外力的增加,空穴不断生长并与其他空穴集聚形成微裂纹,微裂纹不断扩展,最终发生断裂。由此推断,接头拉伸试样的断裂方式为韧性断裂。

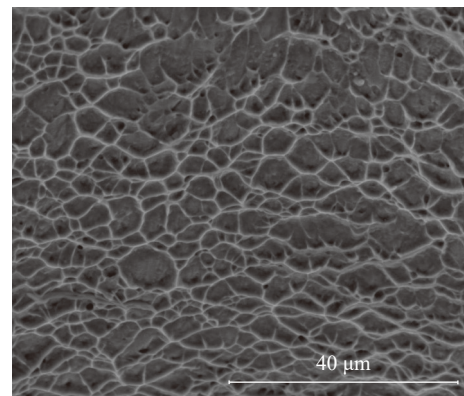


图5 接头拉伸试样断口形貌
Fig. 5 Fracture morphology of joint tensile specimen

2.3 母材和焊接接头疲劳性能

母材和接头疲劳性能测试结果如表 4 所示, 可以看出, 随着应力水平的提高, 疲劳寿命逐渐降低。对表中的数据采用 3 参数幂指数函数公式^[12] 计算母材和接头的 S-N 曲线(图 6)。幂指数函数公式如(1)、(2)所示。

$$(\sigma_{\max} - c)^m N = D \tag{1}$$

$$\lg N = \lg D - m \lg(\sigma_{\max} - c) \tag{2}$$

式中, c 、 m 、 D 为与试验材料和测试约束条件相关的参数; σ_{\max} 为应力水平, MPa; N 为疲劳寿命, 次。

表 4 疲劳试验测试结果
Table 4 Fatigue test results

样品	应力水平/MPa	疲劳寿命N/次
母材	422	34 354 900
	506	1 435 500
	548	317 700
	590	118 300
	425	100 000 000
焊缝	510	4 351 100
	552	1 114 700
	595	320 400

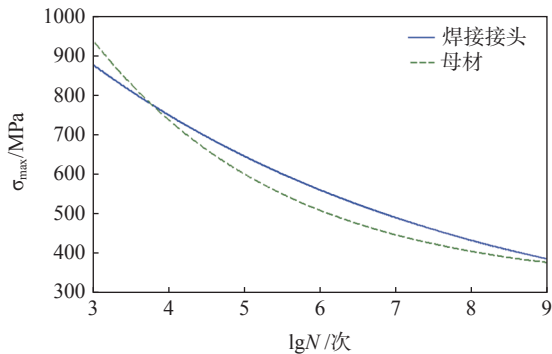


图 6 母材和焊接接头的 S-N 曲线
Fig. 6 S-N curve of base metal and welded joint

采用 MATLAB 软件对试验数据进行拟合, 计算 S-N 曲线中的未知参数, 得到母材和焊接接头的 S-N 曲线函数, 分别如式(3)、(4)所示。

$$\lg N = 19.33 - 5.86 \lg(\sigma_{\max} - 319.06) \tag{3}$$

$$\lg N = 36.05 - 11.63 \lg(\sigma_{\max} - 172) \tag{4}$$

母材和接头 S-N 曲线交点处的横坐标为 3.78, 当 $N < 6\ 100$ 次, 母材疲劳强度高于接头, 当 $6\ 100 < N < 10^7$ 时, 接头疲劳强度高于母材。疲劳寿命为 10^7 时, 母材的极限疲劳强度为 447 MPa, 接头为

490.5 MPa。单丝 MIG 焊接头在快速冷却过程中, 发生不平衡相变, 焊缝区组织为针状马氏体, 马氏体组织在外加应力的作用下, 其组织内部位错启动困难, 接头区疲劳裂纹的萌生和扩展需要更多的势能, 故在低应力水平下, 接头疲劳寿命高于母材。高应力水平下接头疲劳强度低于母材, 这是因为接头存在组织和力学性能的不均匀性, 尤其存在某些焊接缺陷, 缺陷处的局部应力集中, 导致疲劳裂纹萌生, 疲劳性能下降。

疲劳试样断口分为疲劳源区、裂纹扩展区、瞬断区三个部分, 图 7 为母材和焊接接头疲劳断口, 母材疲劳裂纹萌生于试样表面, 疲劳试样在加工时表面难免存在划痕, 造成局部应力集中, 成为疲劳源。此外, 当试样表面处于应力状态下时, 有利于塑性滑移的进行, 表面晶粒比内部晶粒更容易滑移开裂, 故疲劳裂纹萌生于试样表面。接头疲劳裂纹萌生于内部气孔处, 气孔的存在同样造成应力集中, 成为微裂纹的发源地。母材和接头疲劳源处都具有放射性纹路, 其方向汇聚且指向裂纹萌生位置。

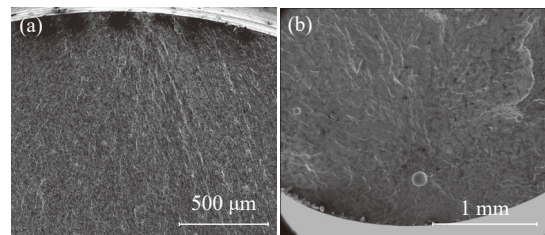
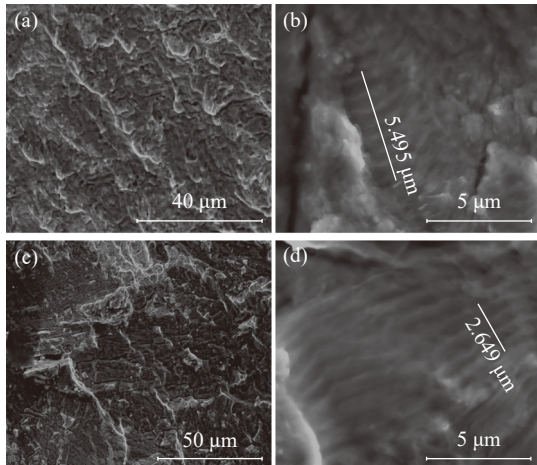


图 7 母材和焊接接头疲劳源形貌
Fig. 7 Fatigue source morphology of base metal and welded joint

疲劳裂纹扩展过程中分为两个阶段, 第一阶段是个别侵入沟或挤出脊先形成微裂纹, 这一阶段裂纹扩展路径曲折, 扩展速率很慢。第二阶段是裂纹垂直于主应力方向扩展, 在距离疲劳源几个晶粒尺寸处方向发生改变, 母材裂纹扩展区如图 8(a)、(b) 所示, 可以看出扩展区有大小不等、高低不平的小断块, 小断块边缘是凸起的撕裂棱。焊接接头裂纹扩展区如图 8(c)、(d) 所示, 接头疲劳扩展区有许多二次裂纹, 裂纹之间相互平行, 裂纹密度高, 表明裂纹扩展过程中受到晶界和晶粒之间的阻碍作用大, 扩展所需能量越大, 裂纹的扩展速度越慢。图 8(b)、(d) 为典型疲劳扩展区特征—疲劳条带, 相邻的疲劳条带相互平行, 疲劳条带呈现出波浪形且垂直于裂纹扩展方向。条带之间的间距表示应力循环一周裂纹所扩展的距离, 可以用它表征裂纹扩展速度的

快慢,间距越大,裂纹扩展速度越快。母材相邻疲劳条带距离为 $0.785\ \mu\text{m}$,接头条带之间的距离为 $0.662\ \mu\text{m}$,接头条带之间的距离小于母材疲劳条带的距离,说明接头疲劳性能优于母材。



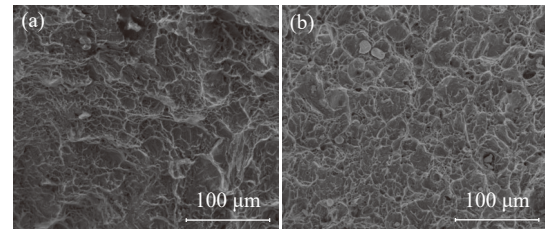
(a)、(b)母材; (c)(d)接头区

图8 母材和焊接接头疲劳裂纹扩展区形貌

Fig. 8 Morphology of fatigue crack propagation zone of base metal and welded joint

母材和焊接接头瞬断区形貌如图9所示,随着循环次数的增加,当剩余承载面不足以承受外加载荷时,试样发生断裂。瞬断区呈现出暗灰色,母材和接头的瞬断区具有大量的韧窝,韧窝深度反应裂纹

扩展时的塑性变形程度,利用它可以定性地分析材料的断裂韧性和止裂能力,接头瞬断区韧窝更深,表明接头断裂韧性和止裂能力高于母材。



(a)母材; (b)焊接接头

图9 母材和焊接接头瞬断区形貌

Fig. 9 Morphologies of base metal and transient fracture zone of welded joint

3 结论

1)单丝MIG焊接头的焊缝区和热影响区在热循环作用下发生马氏体相变,焊缝区晶粒长大明显,焊缝区主要为 α' 马氏体,热影响区组织形态存在不均匀性,为 $\alpha+\beta$ 和 α' 的混合组织。

2)焊接接头断裂在母材处,断裂方式为韧性断裂。

3)在疲劳寿命为 $N=10^7$ 条件下,母材的极限疲劳强度低于焊接接头,母材和焊接接头疲劳裂纹都起源于应力集中处,裂纹在焊接接头处的扩展速度低于母材。

参考文献

- [1] Han Xu, Li Qiang, Jiang Xunrong, *et al.* Research on corrosion of TC4 titanium alloy in concentrated high-salt wastewater environment[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(6): 133-137.
(韩旭,李强,姜训勇,等.高盐废水浓缩环境中的TC4钛合金腐蚀研究[J].*钢铁钒钛*, 2021, 42(6): 133-137.)
- [2] Zhao Qinyang, Chen Yongnan, Xu Yiku, *et al.* Progress and prospects of cost-effective manufacturing technologies for titanium alloys[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2021, 31(11): 3127-3140.
(赵秦阳,陈永楠,徐义库,等.钛合金材料低成本化制备技术进展与展望[J].*中国有色金属学报*, 2021, 31(11): 3127-3140.)
- [3] Zhao Yongqing, Ge Peng, Xin Shewei. Progresses of R&D on Ti-alloy materials in recent 5 years[J]. *Materials China*, 2020, 39(7): 527-534.
(赵永庆,葛鹏,辛社伟.近五年钛合金材料研发进展[J].*中国材料进展*, 2020, 39(7): 527-534.)
- [4] Feng Jing, Fan Limin, Geng Naitao, *et al.* Research on TIG welding process of high strength titanium alloy[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(6): 158-163.
(冯靖,樊立民,耿乃涛,等.高强钛合金TIG焊接工艺研究[J].*钢铁钒钛*, 2021, 42(6): 158-163.)
- [5] Liu Jia, Xu Jialei, Ma Zhaowei, *et al.* Research on hybrid welding technique based on plasma and MIG of titanium alloy[J]. *Materials Reports*, 2021, 35(S02): 358-360.
(刘甲,徐家磊,马照伟,等.钛合金等离子和MIG复合焊接技术研究[J].*材料导报*, 2021, 35(S02): 358-360.)
- [6] Liu Shouyi, Wang Youjun, Geng Tao. Study on microstructure and mechanical properties of MIG welded joint of TA5 titanium alloy[J]. *Journal of Dalian Jiaotong University*, 2018, 39(3): 86-88.
(刘守义,王有君,耿涛.钛合金MIG焊接头组织性能[J].*大连交通大学学报*, 2018, 39(3): 86-88.)

- [7] Mou Gang, Hua Xueming, Xu Xiaobo, *et al.* Comparative study on welding procedure and performance of 8 mm thick TC4 titanium alloy with TIG and MIG[J]. *Electric Welding Machine*, 2020, 50(4): 70–74.
(牟刚, 华学明, 徐小波, 等. 8 mm厚TC4钛合金TIG、MIG焊接工艺及性能对比研究[J]. *电焊机*, 2020, 50(4): 70–74.)
- [8] Li Ruiwu, Qiu Shengwen, Xu Jialei, *et al.* Double-sided double-arc MIG welding process of titanium alloy T-joint[J]. *Welding & Joining*, 2020, (8): 39–44,63.
(李瑞武, 邱胜闻, 徐家磊, 等. 钛合金T形接头双面双弧MIG焊工艺[J]. *焊接*, 2020, (8): 39–44,63.)
- [9] He Yifan, Chen Donggao, Zhang Long, *et al.* Research on microstructure and properties of TC4 titanium alloy MIG welded joints after heat treatment[J]. *Iron Steel Vanadium Titanium*, 2021, 42(6): 164–170.
(何逸凡, 陈东高, 张龙, 等. TC4钛合金MIG焊接接头热处理后组织性能研究[J]. *钢铁钒钛*, 2021, 42(6): 164–170.)
- [10] Xu Liang, Su Juji, Zhou Song, *et al.* Fatigue performance and fracture mechanism of dual-beam laser welded T-joints of TC4 titanium alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2019, 29(7): 1408–1416.
(许良, 苏居季, 周松, 等. TC4钛合金激光双光束焊T形接头疲劳性能及断裂机理[J]. *中国有色金属学报*, 2019, 29(7): 1408–1416.)
- [11] Yang Wulin, Yang Xiaohua, Li Xiaoyan, *et al.* Analysis on fatigue property and fracture mechanism of TC4 titanium alloy joint during laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2012, 33(3): 105–108,118.
(杨武林, 杨晓华, 李晓延, 等. TC4钛合金薄板激光焊接接头的疲劳寿命及断口分析[J]. *焊接学报*, 2012, 33(3): 105–108,118.)
- [12] Xiao Lei, Feng Ganjiang. Low-cycle fatigue behavior of new single crystal superalloy WZ4 at high temperature[J]. *Hot Working Technology*, 2019, (2): 50–54.
(肖磊, 冯赣江. 新型单晶高温合金WZ4的高温低周疲劳行为[J]. *热加工工艺*, 2019, (2): 50–54.)

编辑 杨冬梅

(上接第 61 页)

- [14] Liu Y, Zhang D. Effects of structural differences of graphene and the preparation strategies on the photocatalytic activity of graphene–TiO₂ composite film[J]. *J Mater Sci Mater Electron*, 2017, 28: 4965–4973.
- [15] Thaweechai T, Siriaksoontorn W, Poo-arporn Y, *et al.* Transparent graphene quantum dot/amorphous TiO₂ nanocomposite sol as homogeneous-like photocatalyst[J]. *J Nanopart Res*, 2021, 23: 225.
- [16] Gao Wei, Zhao Zhifeng, Zhou Changhai. Preparation and electrochemical properties of polypyrrole/graphene composites[J]. *Journal of Heilongjiang University of Science and Technology*, 2018, 28(2): 204–208.
(高微, 赵志凤, 周长海. 聚吡咯/石墨烯复合材料的制备及电化学性能[J]. *黑龙江科技大学学报*, 2018, 28(2): 204–208.)
- [17] Sun Aihua, Guo Pengju, Li Yong, *et al.* Preparation of titania nano-particles by self-born seed-hydrolysis of TiCl₄[J]. *China Powder Science and Technology*, 2008, 14(6): 44–48.
(孙爱华, 郭鹏举, 李勇, 等. TiCl₄自生晶种水解法制备纳米二氧化钛[J]. *中国粉体技术*, 2008, 14(6): 44–48.)
- [18] Huang Mianfeng, Zheng Zhixiang, Xu Guanqing, *et al.* Preparation, characterization and photocatalytic activity of exfoliated graphite supported titanium dioxide photocatalyst[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2008, 38(3): 325–329.
(黄绵峰, 郑治祥, 徐光青, 等. 膨胀石墨负载纳米二氧化钛光催化剂的制备、表征与其光催化性能[J]. *硅酸盐学报*, 2008, 38(3): 325–329.)
- [19] Zuo R, Du G, Zhang W, *et al.* Photocatalytic degradation of methylene blue using TiO₂ impregnated diatomite[J]. *Adv Mater Sci Eng*, 2014, 2014: 1–7.
- [20] Balarak D, Mengelizadeh N, Rajiv P, *et al.* Photocatalytic degradation of amoxicillin from aqueous solutions by titanium dioxide nanoparticles loaded on graphene oxide[J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2021, 28: 49743–49754.

编辑 杨冬梅