

钒钛材料与应用

# TC21 钛合金与 G50 钢的超高强扩散 焊接头组织与性能研究

刘 姣, 成培鑫, 席锦会

(西部金属材料股份有限公司, 陕西 西安 710201)

**摘 要:** 使用改进的真空扩散焊接方法制备了 TC21 钛合金及 G50 高强钢的超高强扩散焊接头。在刚性模具约束下, 以 V/Cu 为过渡层, 在 915 °C 保温 60 min 进行焊接, 焊接压力为 20 MPa。与传统扩散焊工艺不同, 待焊件接头处于三向压应力状态, 使焊接界面处金属塑性流动及元素扩散更充分, 可有效消除界面孔洞、微孔等缺陷, 所制备的接头抗拉强度达 752 MPa, 为目前研究报道的钛钢接头强度最高值。界面分析显示, TC21/V、V/Cu 界面处无析出相, Cu/G50 界面处析出富铁相, 拉伸时接头从富铁相处断裂。

**关键词:** TC21 钛合金; G50 高强钢; 扩散焊; 超高强焊接接头

中图分类号: TF823, TG453.9

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2025)03-0041-04

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2025.03.007

开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID):



听  
语  
音  
与  
作  
者  
互  
动  
聊  
科  
研

## Microstructure and properties of ultra-high strength diffusion-bonded joint between TC21 titanium alloy and G50 steel

LIU Jiao, CHENG Peixin, XI Jinhui

(Western Metal Materials Co., Ltd., Xi'an 710201, Shaanxi, China)

**Abstract:** An ultra-high strength joint between TC21 titanium alloy and G50 high-strength steel had been prepared by an improved diffusion bonding in this study. Under the constraints of a rigid mold, the diffusion bonding using the V and Cu as interlayers was carried out at 915 °C for 60 minutes with an axial load of 20 MPa. Unlike the traditional diffusion bonding processes where the joint was under uni-directional compressive stress, the bonded samples in this study were subjected to triaxial compressive stress state, which promoted more sufficient metal flow and elemental diffusion at the interfaces. This effectively eliminated interfacial defects such as voids and micro-pores. The tensile strength of the joint was as high as 752 MPa, which was so far the highest that have been reported in the literature for the joints between titanium and steel prepared by diffusion bonding. The interface analysis showed that there were no precipitates at the TC21/V and V/Cu interfaces, and Fe-rich precipitates were observed at the Cu/G50 interface. In the tensile test, the fracture occurred in the interface between Cu and G50, resulting from the Fe-rich precipitates.

**Key words:** TC21 titanium alloy, G50 high-strength steel, diffusion bonding, ultra high strength joint

收稿日期: 2024-12-16

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFB3705604), 陕西省稀有金属装备制造共性技术研发平台(2024ZG-GXPT-02)。

作者简介: 刘姣, 1992 年出生, 女, 陕西西安人, 硕士, 助理工程师, 主要从事有色金属加工工作, E-mail: [great\\_liujiao@163.com](mailto:great_liujiao@163.com)。

## 0 引言

钛和钢的异种金属焊接构件可充分实现二者在成本及性能上的优势互补,在航空航天、武器装备、核电化工等领域具备广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。然而,由于钛在钢中的固溶度低,且二者热导率、热膨胀系数等物理性能差异较大,采用传统的熔化焊、摩擦焊、钎焊及爆炸焊等方法制备的接头极易产生应力集中,脆性相析出等缺陷,难以获得性能可靠且优良的钛钢接头<sup>[2-3]</sup>。采用真空扩散焊可有效解决上述问题。

真空扩散焊时,通过引入中间层,可有效缓解接头的应力集中,同时抑制 TiFe、TiFe<sub>2</sub>、TiC 等脆性金属间化合物的析出<sup>[4]</sup>。基于材料的化学相容性,V 和 Cu 已被证实是实现钛钢扩散连接的可靠中间层<sup>[5]</sup>。GAO 等人<sup>[6]</sup>以 Ni/Cu/V 为中间层,在 890 ℃对 4J36 合金和 TC4 钛合金进行了真空扩散焊,获得了无任何脆性析出相的界面,接头强度最高为 249.3 MPa。HE 等人<sup>[7]</sup>研究了以 Ti/V/Cu、V/Cu 为中间层的 TiAl 合金及 40Cr 钢的扩散焊,所得接头的抗拉强度最高为 350 MPa。LIU 等人<sup>[8]</sup>以 V/Cu/Co 为过渡层扩散焊接了 TC4 钛合金及 316L 不锈钢,在界面无脆性析出相的情况下接头强度最高为 292 MPa。可以看出,通过引入中间层有助于实现钛材和钢材的连接,但接头强度十分有限。传统焊接方式下,界面处的金属塑性流动不充分,导致局部区域未达到原子尺度的物理接触,在后续焊接时,无法形成有效的元素扩散,最终使得接头处存在一些微小的孔洞、针孔等缺陷,恶化接头性能。为提高接头强度,课题组提出了一种改进的真空扩散焊接方法,在刚性模具约束下,以 V、Cu 作为中间层,实现了 TC21 钛合金与 G50 高强钢的可靠连接。进一步研究了接头的显微组织和力学性能,证实了改进的真空扩散焊接方法的可靠性,为钛钢异种金属构件的扩散连接提供了重要参考。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

待焊基材为 TC21 及 G50 热轧棒材,规格均为 Ø50 mm×50 mm。中间层材料选用 50 μm 厚的纯钒箔及 30 μm 厚的纯铜箔。TC21 与 G50 基材的力学性能见表 1,化学成分见表 2。采用金相法测得 TC21 基材的 α→β 相变点( $T_{\beta}$ )为 935 ℃。焊接前对两种基材进行精车,然后用 6.5 μm 砂纸打磨待焊接面,使其粗糙度小于 0.8 μm。最后用酒精超声清洗待焊接件与中间层材料,风干备用。

表 1 TC21 钛合金及 G50 高强钢力学性能

Table 1 Tensile properties of the base metals of TC21 and G50

| 基材   | 抗拉强度/MPa | 屈服强度/MPa | 延伸率/% |
|------|----------|----------|-------|
| TC21 | 1 262    | 1 117    | 12.5  |
| G50  | 1 750    | 1 510    | 12.3  |

表 2 TC21 钛合金及 G50 高强钢基材化学成分

Table 2 Chemical compositions of the base metals of TC21 and G50

| 基材   | Fe   | Ti   | Al | Ni   | Nb   | Cr   | Mo   | Zr   | Sn   | Si   | Mn   | C    |
|------|------|------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| TC21 | Bal. | 6.64 |    |      |      | 1.78 | 3.18 | 2.10 | 1.96 |      |      | 0.01 |
| G50  | Bal. |      |    | 4.51 | 0.03 | 1.10 | 0.60 |      |      | 1.80 | 0.70 | 0.29 |

### 1.2 焊接工艺

真空扩散焊接温度的选择需兼顾基材原子扩散能力及高温下组织稳定性两方面因素。温度过低时,待焊面微区塑性变形及元素扩散不充分;当温度太高时,界面两侧 Ti 元素和 Fe 元素扩散速度差异太大,导致元素交换不平衡,从而产生 Kirkendall 孔洞,恶化接头性能<sup>[9]</sup>。对于钛合金而言,当温度超过相变点时,合金处于 β 单相区,组织迅速粗化,在随后的冷却过程中形成粗大的魏氏组织,导致基材塑性急剧下降。基于上述分析,试验选取的焊接温度为 915 ℃(比  $T_{\beta}$  低 20 ℃)。为提高界面焊合率,焊接时采取分段式升温,第一阶段升温速率为 10 ℃/min,升至 700 ℃后保温 30 min;第二阶段升温速率为 7 ℃/min,温度到达 915 ℃后保温 60 min,保温结束后在真空中冷却。预焊接压力为 10 MPa,焊接压力为 20 MPa,焊接过程中真空度小于  $1 \times 10^{-2}$  Pa。工艺曲线如图 1 所示。

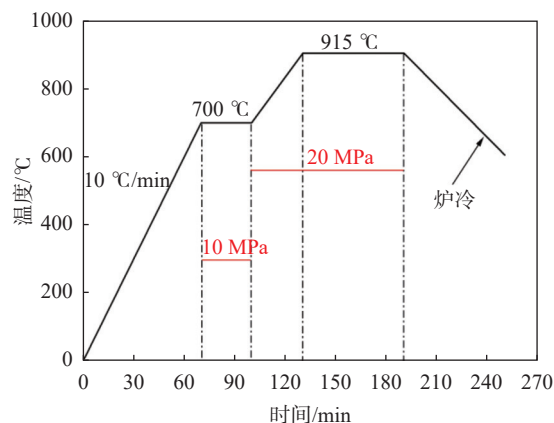
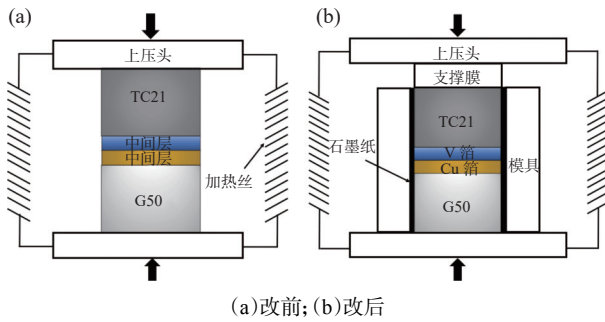


图 1 扩散焊接工艺参数曲线

Fig. 1 Diffusion bonding process flow diagram

传统扩散焊接工件装配如图 2(a)<sup>[10]</sup>所示,试验对传统工艺进行了改进,改进后的工件装配如图 2(b)所示。焊接前,先将待焊件按“TC21-V-Cu-G50”的顺序进行装配,用 0.5 mm 厚的石墨纸包裹待焊件,然后将其置于环形 316L 模具中,模具与待焊件间隙为 0.7 mm。



(a)改前;(b)改后

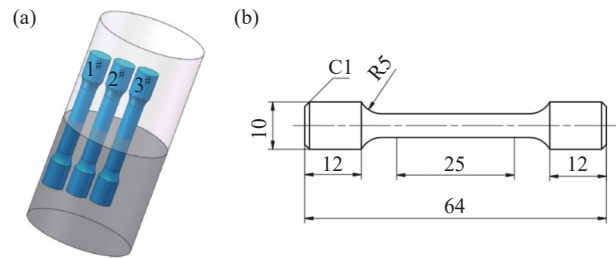
图2 扩散焊接工艺装配

Fig. 2 Assembly diagram of bonding process

### 1.3 测试表征

采用蔡司 Axio Vert.AI 金相显微镜及蔡司 360 型扫描电子显微镜(SEM)对接头组织以及断口形貌进行观察, INSTRON-5500R 型电子万能试验机对接头室温拉伸性能进行测试, 取样位置及测试样尺寸如图3所示, 机加时确保焊缝处于中间位置。拉伸速率为 0.5 mm/min, 试验依据 GB/T 228.1-2021

进行。测试三个试样, 取平均值作为最终接头强度。



(a)取样位置;(b)试样尺寸

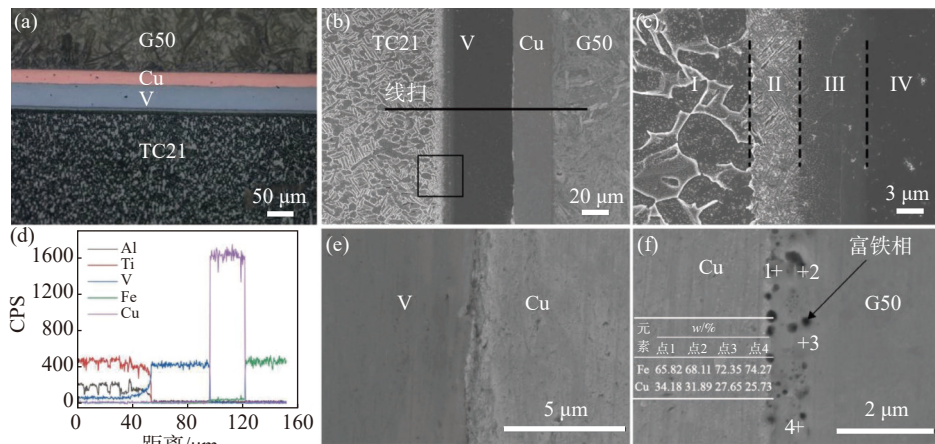
图3 取样位置及试样尺寸(单位:mm)

Fig. 3 The sampling position and dimension of tensile specimen

## 2 结果分析

### 2.1 显微组织

接头组织形貌如图4所示。



(a)接头金相图;(b)接头 SEM 图;(c)TC21/V 界面放大图;(d)界面线扫结果;(e)V/Cu 界面;(f)Cu/G50 界面

图4 接头组织形貌

Fig. 4 The microstructure morphologies of the joint

由图4(a)可以看出, TC21 基材仍为双态组织, G50 钢呈马氏体组织。焊接接头处, TC21 基材与 V 中间层、V 中间层与 Cu 中间层、Cu 中间层与 G50 基材三个焊接界面均结合良好, 界面未见任何孔洞、裂纹、未焊合等缺陷。如图4(b)(c)所示, TC21 与 V 层界面处存在过渡组织, 区域 I、II、III、IV 分别为 TC21 基材、魏氏组织、Ti-V 互溶区以及纯 V 层。结合图4(d)能谱结果可知, 扩散焊接时 TC21 基材中  $\alpha$  稳定元素 Al 向 V 中间层扩散, V 层中的  $\beta$  稳定元素 V 向 TC21 基材扩散, 使得 II 区域中  $\alpha$  稳定元素贫化,  $\beta$  稳定元素含量升高, 最终导致区域 II 的  $T_{\beta}$  相变点较 TC21 基材降低。当处于焊接温度 915  $^{\circ}\text{C}$  时, 区域 II 进入  $\beta$  单向区, 在焊后冷

却时形成如图所示的魏氏组织。区域 III 为 TC21 基材中 Ti 元素与 V 中间层中的 V 元素互扩散形成的 Ti(V)固溶体区。V-Cu 中间层界面形貌如图4(e)所示。可以看出, 该界面处无析出相、孔洞及开裂等缺陷, 界面结合良好。结合 V-Cu 相图可知, 在焊接温度 915  $^{\circ}\text{C}$  下, V 在 Cu 中的固溶度约 3%, Cu 在 V 中的原子溶解度约 6%。由于 V 与 Cu 之间的固溶度较低, V/Cu 界面并未形成明显可见的元素扩散层, 但很显然为强结合界面。这种 V/Cu 之间未形成明显扩散层, 但仍为强结合界面的现象, 在文献 [7-8] 中均有报道。在 Cu-G50 界面处, 发现球状第二相析出, 经 EDS 检测, 该相为由 Fe、Cu 组成的富铁相, 如图4(f)所示。该富铁相与其他 Cu/钢



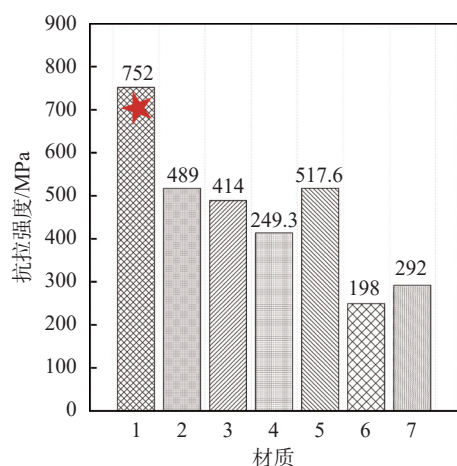
界面处富铁析出相的研究结果一致<sup>[11-12]</sup>。

## 2.2 力学性能

TC21/V/Cu/G50 接头的室温拉伸结果如表 3 所示,平均抗拉强度高达 752 MPa。值得注意的是,试验所制备的钛钢扩散焊接头强度为目前研究报道的最高值,图 5 为试验研究与部分钛钢扩散焊接代表性研究成果的对比<sup>[6-8, 10, 13-14]</sup>。

表 3 TC21/V/Cu/G50 扩散焊接接头力学性能  
Table 3 Mechanical properties of TC21/V/Cu/G50 diffusion bonded joint

| 编号             | 抗拉强度 |
|----------------|------|
| 1 <sup>#</sup> | 756  |
| 2 <sup>#</sup> | 751  |
| 3 <sup>#</sup> | 749  |
| 平均值            | 752  |



1-TC21/V/Cu/G50; 2-TC4/Nb/Cu/316L; 3-CP-Ti/Ag/304; 4-4J36/Ni/Cu/V/TC4;  
5-TC4/Ni/17-4不锈钢; 6-TiAl/V/Cu/40Cr; 7-TC4/V/Cu/Co/316L

图 5 钛钢扩散焊接头性能对比

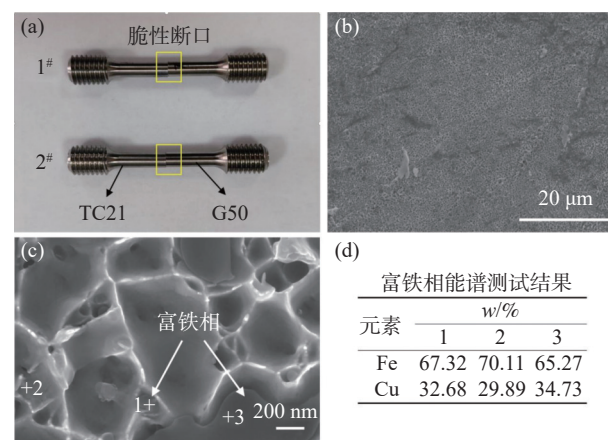
Fig. 5 The performance comparison of diffusion bonding joints

分析认为真空扩散焊时,待焊件不发生明显的宏观塑性变形,仅待焊接面在高温高压下产生局部塑性屈服,使原本粗糙不平的待焊面之间形成原子级别的物理接触,从而在界面原子激活、元素扩散的作用下形成冶金结合接头。在传统焊接工艺下,待焊件受单向压应力作用,这种应力状态不利于界面塑性屈服,难以通过金属流动消除局部区域存在的微孔,焊合率难以保证。笔者的研究中,待焊件在

焊接温度下产生热膨胀,与模具形成紧密贴合,当施加轴向载荷时,接头受三向压应力作用。这种应力状态下,界面的塑性屈服及金属流动更充分,可有效解决由于界面物理接触不良导致的孔洞、针孔等缺陷,为后续元素扩散提供了可靠保障,最终形成性能可靠且稳定的高强焊接接头。

## 2.3 断口形貌

接头室温拉伸断口形貌如图 6 所示。拉伸时接头在 Cu/G50 界面处断裂,断口平齐,呈脆性断裂。断口处可见球状、片状富铁析出相,如图 6(c)(d)所示。这些富铁相是引起接头断裂的原因。



(a)宏观断口; (b)断口 SEM 图; (c)断口析出相形貌;  
(d)富铁析出相成分

图 6 TC21/V/Cu/G50 扩散焊接头断口形貌

Fig. 6 Fracture morphology of TC21/V/Cu/G50 diffusion bonded joint

## 3 结论

1) 以 V、Cu 为过渡层材料,采用改进的真空扩散焊工艺制备了 TC21 钛合金和 G50 高强钢的超高强扩散焊接头,接头的抗拉强度达 752 MPa。

2) 在刚性模具约束下,焊接接头受三向压应力作用,焊接界面实现了充分的塑性屈服以及元素扩散,界面无空洞、裂纹,焊接良好。TC21/V 界面、V/Cu 界面为强结合界面,无脆性析出相;Cu/G50 界面析出含铜的富铁相。

3) 拉伸试验显示,接头断裂发生在 Cu/G50 界面处,是富铁相导致的脆性断裂。

## 参考文献

- [1] KUNDU S, SAM S, CHATTERJEE S. Interface microstructure and strength properties of Ti-6Al-4V and microduplex stainless steel diffusion bonded joints[J]. Materials & Design, 2011, 32(5): 2997-3003.
- [2] VELMURUGAN C, SENTHILKUMAR V, SARALA S, et al. Low temperature diffusion bonding of Ti-6Al-4V and duplex stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016(234): 272-279.

(下转第 52 页)

- Science and Engineering A, 2017, 707: 576-584.
- [18] STOLTZ R E, PELLOUX R M. The Bauschinger effect in precipitation strengthened aluminum alloys[J]. Metallurgical Transactions A, 1976, 7(8): 1295-1306.
- [19] WANG Y F, LI C, LING X Y, *et al.* An overview on the bauschinger effect in metallic materials[J]. China Nuclear Science and Technology Report, 2002(0): 410-423.  
(王延峰, 李聪, 凌绪玉等. 金属材料的包申格效应综述[J]. 中国核科技报告, 2002(0): 410-423.)
- [20] MACEWEN S R, ELLS C E, WOO O T. The bauschinger effect in Zircaloy-2[J]. Journal of Nuclear Materials, 1981, 101: 336-349.
- [21] IBRAHIM K, HUSEYIN S, CHUMLYAKOV Y I, *et al.* The effect of twinning and slip on the bauschinger effect of hadfield steel single crystals[J]. Metallurgical Transactions, 2001, 32A: 695-706.
- [22] GERD L, JAMES C, WILLIAMS. Titanium[M]. Berlin: Springer-Verlag. 2007.
- [23] WILLIAMS J C, BAGGERLY R G, PATOU N E. Deformation behavior of HCP Ti-Al alloy single crystals[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2002, 33: 837-850.
- [24] YU W X, LÜ Y F, LI S K, *et al.* Mechanism of the anisotropy of yield ratio in TA5 titanium alloy plates[J]. Materials Science and Engineering A, 2015, 639: 314-319.
- [25] AMBARD A, GUÉTAZ L, LOUCHET F, *et al.* Role of interphases in the deformation mechanisms of an  $\alpha/\beta$  titanium alloy at 20 K[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 319: 404-408.
- [26] AKHTAR A. Basal slip and twinning in  $\alpha$ -titanium single crystals[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 1975, 6: 1105-1113.
- [27] ZULFIKAR H A K, WANG Z R. Bauschinger effect in a modified Zr-2.5wt% Nb pressure tube material[J]. Materials Science and Engineering A: 1993, 171(1-2): 55-63
- [28] WANG Z Q, ALEXANDRU D S, MA D, *et al.* Stress relaxation behavior and mechanisms in Ti-6Al-4V determined via in situ neutron diffraction: application to additive manufacturing[J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 7: 585-592.
- [29] HUANG Z, YUAN W H, ZHU J J. Low temperature stress relaxation and morphology evolution of Ti-6.5Al-2Zr-1Mo-1V titanium alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2002, 51(1): 83-91.

编辑 邓淑惠

(上接第 44 页)

- [3] ZHANG Y, SUN D Q, GU X Y, *et al.* Microstructure and mechanical property improvement of dissimilar metal joints for TC4 Ti alloy to 301L stainless steel[J]. Journal of Materials Science, 2018(53): 2942-2955.
- [4] ELREFAEY A, TILLMANN W. Solid state diffusion bonding of titanium to steel using a copper base alloy as interlayer[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(5): 2746-2752.
- [5] WANG T, ZHANG B G, CHEN G Q, *et al.* High strength electron beam welded titanium-stainless steel joint with V/Cu based composite filler metals[J]. Vacuum, 2013(94): 41-47.
- [6] GAO Q, JIANG X S, SUN H L, *et al.* Interfacial reaction and microstructure investigation of 4J36/Ni/Cu/V/TC4 diffusion-bonded joints[J]. Materials Letters, 2021 (305): 130809.
- [7] HE P, ZHANG B G, FENG J C, *et al.* Diffusion bonding of TiAl to 40Cr steel with interlayers Ti/V/Cu and V/Cu[J]. Aerospace Materials & Technology, 2000(4): 53-57.  
(何鹏, 张秉刚, 冯吉才, 等. 以 Ti/V/Cu、V/Cu 为中间层的 TiAl 合金与 40Cr 钢的扩散连接[J]. 宇航材料工艺, 2000(4): 53-57.)
- [8] LIU Y, JIANG X S, SUN H L, *et al.* Interfacial reaction and microstructure investigation of TC4/V/Cu/Co/316L diffusion-bonded joints[J]. Materials Letters, 2020 (261): 127140.
- [9] HE P, ZHANG J H, ZHOU R L, *et al.* Diffusion bonding technology of a titanium alloy to a stainless steel web with an Ni interlayer[J]. Materials Characterization, 1999, 43(5): 287-292.
- [10] SONG T F, JIANG X S, SHAO Z Y, *et al.* Microstructure and mechanical properties of vacuum diffusion bonded joints between Ti-6Al-4V titanium alloy and AISI316L stainless steel using Cu/Nb multi-interlayer[J]. Vacuum, 2017(145): 68-76.
- [11] CHEN K X, LI Z X, WANG Z D, *et al.* Morphological evolution of Fe-rich precipitates in a Cu-2.0Fe alloy during isothermal treatment[J]. Acta Metall Sin, 2023, 59(12): 1665-1674.  
(陈凯旋, 李宗烜, 王自东, 等. Cu-2.0Fe 合金等温处理过程中富 Fe 析出相的形态演变[J]. 金属学报, 2023, 59(12): 1665-1674.)
- [12] SUN H, HAN Y, LI Y. Microstructure and strength of diffusion bonding W alloy/304 stainless steel joint using a Cu interlayer[J]. International Journal of Refractory Metals and Hard Materials, 2023(113): 106188.
- [13] DENG Y Q, SHENG G M, XU C, *et al.* Evaluation of the microstructure and mechanical properties of diffusion bonded joints of titanium to stainless steel with a pure silver interlayer[J]. Materials & Design, 2013(46): 84-87.
- [14] KUNDU S, MISHRA B, OLSON D L, *et al.* Interfacial reactions and strength properties of diffusion bonded joints of Ti64 alloy and 17-4PH stainless steel using nickel alloy interlayer[J]. Materials & Design, 2013 (51): 714-722.

编辑 张维娜