

# 316L 不锈钢/T2 紫铜热等静压扩散连接接头的微观组织与力学性能

麻相龙<sup>1</sup>, 曹睿<sup>1</sup>, 董浩<sup>2</sup>, 王彩芹<sup>2</sup>, 张龙戈<sup>2</sup>, 闫英杰<sup>1</sup>

(1. 兰州理工大学, 有色金属先进加工与再利用省部共建国家重点实验室, 兰州, 730050; 2. 中国钢研科技集团有限公司安泰科技股份有限公司, 北京, 100081)

**摘要:** 采用热等静压 (hot isostatic pressing, HIP) 工艺对棒材 316L 不锈钢/T2 紫铜进行连接, 分析连接界面微观组织和力学性能。结果表明, 在塑性变形和扩散反应的连接机制下, 异种金属连接接头结合良好, 两侧基体元素发生了明显的互扩散, 最终形成了  $3.9 \mu\text{m}$  厚的扩散层, 扩散层分为两侧的扩散影响区 (diffusion affected zone, DAZ) 和中间反应层 (reaction layer, RL), 扩散层及其附近的 T2 紫铜侧有树枝状的  $\gamma$ -Fe 相、条状  $\alpha(\text{Cu}, \text{Ni})$  相和不规则块状富 Cr 相析出。硬度试验结果表明, 连接接头硬度要高于较弱 T2 紫铜母材, 接头平均硬度为  $94 \text{ HV0.1}$ , 未出现硬度突变的现象, 表明接头没有脆性金属间化合物生成, 拉伸试验最终在 T2 紫铜母材断裂, 断裂机制为韧性断裂, 最大抗拉强度为  $165 \text{ MPa}$ , 接头及其附近析出相的弥散分布形成了第二相强化机制, 阻碍位错的运动, 最终使得连接接头具有较高的硬度和较好的结合强度。

**创新点:** (1) 采用热等静压技术实现了异种金属 316L 不锈钢/T2 紫铜的有效连接。  
(2) 明晰了 316L 不锈钢/T2 紫铜连接接头的强化机制和连接机理, 并建立起组织与性能的关系。

**关键词:** 热等静压扩散连接; 微观组织; 异种金属; 力学性能

中图分类号: TG 457.1

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20220522002

## 0 序言

铜/钢异种金属连接构件具有独特而优越的综合性能, 如良好的导电性、导热性及一定的强度等, 在电气、电子、化工、交通和航空航天等行业得到广泛的应用<sup>[1-7]</sup>。铜原子和铁原子的原子序数相差不大, 两者液态下互溶, 可以通过焊接实现冶金结合。然而铜与钢的连接由于两者熔点相差  $300 \sim 400^\circ\text{C}$ , 热导率相差近 5 倍, 铜的线膨胀系数比铁高 15% 左右<sup>[1]</sup>。这些物理性能上的较大差异使得通过传统的熔化焊得到的焊接接头易产生焊缝热裂纹、热影响区渗透裂纹等各种缺陷, 冶金反应时易产生金属间化合物, 进而导致力学性能有所降低<sup>[1-2]</sup>。目前, 对于铜/钢异种金属连接采用钎焊和固相压力焊均可得到优质的焊接接头<sup>[5-8]</sup>。高炜<sup>[5]</sup>采用高频

感应钎焊工艺连接 T2 紫铜与 316L 不锈钢, 选用 Sn-Cu 系二元共晶钎料, 得到了优良的焊接接头, 焊缝金属间元素充分扩散、冶金结合良好, 未出现焊接缺陷。Zhang 等人<sup>[6]</sup>通过爆炸焊对无氧高导电铜板和低碳钢板进行连接, 观察到结合界面呈波浪状, 熔合区形成了细小的晶粒和  $56 \text{ nm}$  的纳米晶粒。细晶和纳米晶的加入大大改善了冶金结合界面, 试样最大抗拉强度达到  $315 \text{ MPa}$ 。Suman 等人<sup>[7]</sup>采用磁脉冲焊的方法对纯铜和低碳钢管以搭接方式连接, 得到成形好的焊接接头, 高能冲击引起的应变硬化效应使界面钢侧显微硬度显著提高。

目前, 与熔化焊相比, 固相焊和钎焊因其较低的焊接热输入可有效减少焊缝和热影响区裂纹的产生, 但是对于一些大型的异种金属连接构件, 涉及到的焊缝比较繁多, 采用传统的固相焊或钎焊工艺往往效率很低, 很难满足工程上批量生产的需求。热等静压技术是 20 世纪 50 年代中期由美国 Battelle 研究所发明, 它是在一个密闭的容器中, 以高压气体 (氮气、氩气等) 为媒介, 对容器内的材料

施加各向均等的静压力, 在高温高压的作用下, 实现材料的致密结合<sup>[3-4,8-9]</sup>. 与传统固相焊相比, 在异种材料连接方面, 热等静压扩散连接的材料具有致密度高、冶金结合好、结合强度高等优点. 热等静压技术因其在扩散连接方面存在巨大优势, 在异种金属焊接中拥有广阔前景<sup>[3-4]</sup>, 尤其是在实际工程应用中, 热等静压技术可实现大型异种金属构件连接一次成形, 保证连接质量可靠性的同时大大提高了生产效率. 就钢/铜异种金属热等静压扩散连接工艺展开研究, 分析了连接接头的微观组织、连接机理和力学性能. 为工程上热等静压扩散连接钢/铜异种金属构件批量化生产提供理论参考.

表 1 T2 紫铜和 316L 不锈钢的化学成分(质量分数, %)  
Table 1 Chemical compositions of the T2 copper and 316L stainless steel

材料	Fe	Cu	C	Cr	Ni	Mn	Mo	Pb
T2	0.005	余量	—	—	—	—	—	0.005
316L	余量	—	0.03	16.07	12.01	2.00	2.21	—

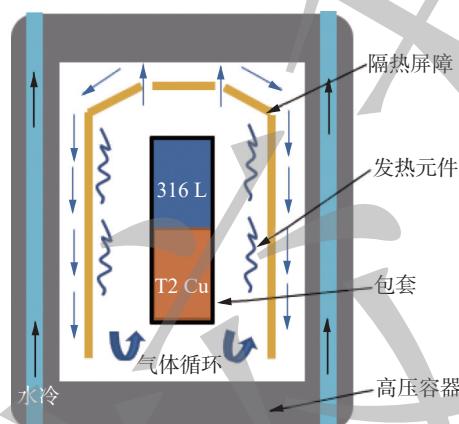


图 1 钢/铜热等静压扩散连接示意图  
Fig. 1 Schematic diagram of steel/copper HIP diffusion bonding

热等静压结束后沿着包套轴向方向线切割切取金相样品, 经过磨、抛后在 Zeiss Axio Observer 金相显微镜下观察其金相组织. 同时, 用 JEOL JSM 720F 扫描电子显微镜及其附带的 Oxford X-Max 能谱仪 (energy dispersive spectroscopy, EDS) 分析接头微观组织和元素扩散情况. 硬度试验采用 VH1102-01-0087 维氏显微硬度计, 以接头分界线为中心, 在分界线附近选取  $600 \mu\text{m} \times 700 \mu\text{m}$  的区域, 分成  $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  的小格, 间隔  $0.1 \text{ mm}$  打点, 加载载荷为  $9.8 \text{ N}$ , 加载时间为  $15 \text{ s}$ . 最终得到硬度分布云图. 拉伸试验根据 GB/T 228.1—2010《金属材料拉伸试验 第 1 部分: 室温试验方法》采

## 1 试验方法

试件尺寸均为  $\phi 55 \text{ mm} \times 45 \text{ mm}$  的 316L 不锈钢棒和 T2 紫铜棒采用对接的方式装配到包套中, 经封焊、检漏、脱气等常规操作流程后进行热等静压扩散连接. 316L 不锈钢和 T2 紫铜的化学成分如表 1 所示. 热等静压装配示意图如图 1 所示. 试验所用的包套尺寸为  $\phi 60 \text{ mm} \times 95 \text{ mm}$ , 厚度为  $2.5 \text{ mm}$ , 材质为 20 钢. 采用的热等静压工艺为: 温度  $950 \sim 1000^\circ\text{C}$ , 压力  $120 \sim 140 \text{ MPa}$ , 保温保压  $2 \sim 3 \text{ h}$ , 随炉自然冷却.

表 1 T2 紫铜和 316L 不锈钢的化学成分(质量分数, %)

用直径  $\phi 10 \text{ mm} \times 65 \text{ mm}$  的棒状试样, 连接界面位于试样中间位置. 采用 Instron 5582 型双立柱电子万能试验机进行室温拉伸试验. 采用 JEOL JSM 720F 型扫描电子显微镜对断口形貌进行观察.

## 2 试验结果与分析

### 2.1 铜/钢连接接头宏观形貌

图 2 为热等静压后 316L 不锈钢与 T2 紫铜连接接头在光学显微镜下的图像. 宏观上未发现明显的裂纹和孔洞等缺陷, 初步表明接头结合良好.

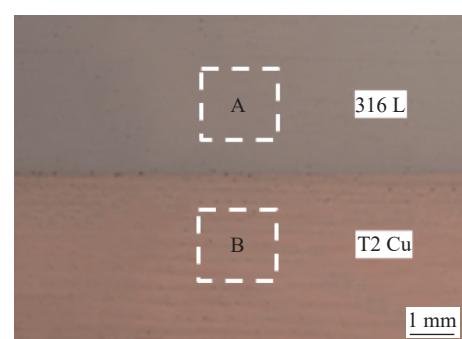


图 2 钢/铜连接接头宏观形貌  
Fig. 2 Macro-morphology of the steel/copper joints

图 3 为图 2 上侧 A 虚线框 316L 不锈钢的金相组织, 其组织由等轴的奥氏体晶粒和  $\delta$  铁素体相组成. 图 4 为图 2 下侧 B 虚线框 T2 紫铜的金相组

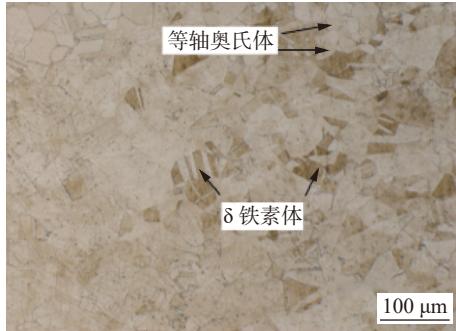


图 3 316L 不锈钢的微观组织

Fig. 3 Microstructure of the 316L stainless steel

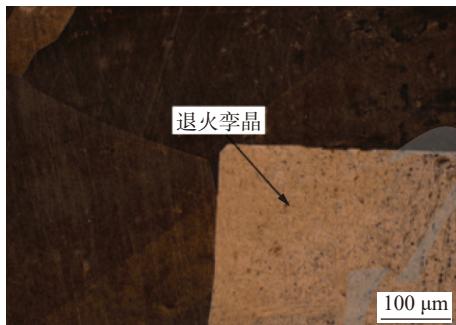


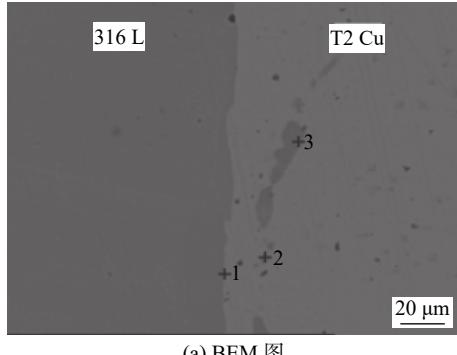
图 4 T2 紫铜的微观组织

Fig. 4 Microstructure of the T2 copper

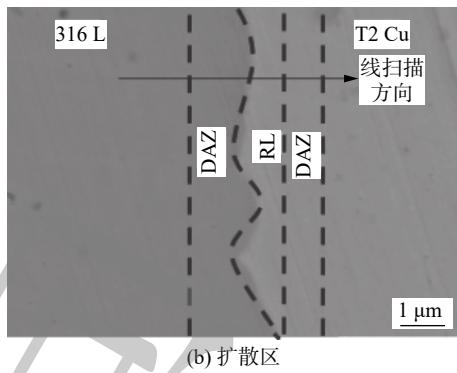
织, 晶粒长大明显, 存在典型的退火孪晶组织.

## 2.2 铜/钢连接接头微观组织分析

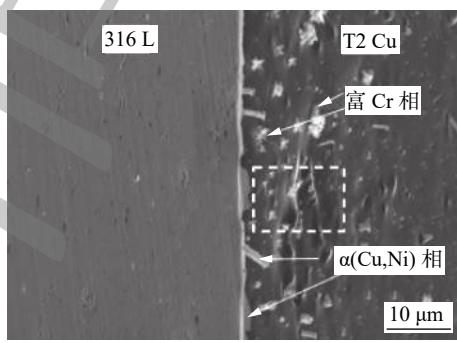
图 5 为 316L 不锈钢/T2 紫铜接头的微观形貌及其附近的析出相. 图 5a 为扫描电子显微镜背散射模式 (back scattered electron, BSE) 的接头微观形貌, 发现热等静压后的 316L 不锈钢与 T2 紫铜连接接头呈波状结合分布, 表明热等静压扩散连接的 316L 不锈钢/T2 紫铜接头具有较高的结合强度. 因为波状连接相较于平直界面增大了连接界面的接触区域, 形成相互咬合的效果, 使得结合更加牢固<sup>[9]</sup>. 图 5b 为接头扩散区, 对铜/钢接头进行 EDS 线扫描, 结果如图 6 所示, 两侧元素发生明显的扩散行为, 形成一个宽度为  $3.9 \mu\text{m}$  的扩散层, 整个扩散层分为 3 部分, 分别为两侧的 DAZ 区 (扩散影响区, 基材相占大多数) 和中间的 RL 层 (反应层, 新相核化的区域)<sup>[10]</sup>. 钢/铜热等静压扩散连接是一个固相扩散连接的过程, 两侧铁、铜原子的扩散机制为空位机制<sup>[2]</sup>, 在高温高压下, 通过塑性变形和扩散反应实现铜/钢接头的可靠连接, 根据 Kirkendall 效应扩散完成后连接界面最终向元素扩散速率快的一侧移动, Cu 原子的扩散速率大于 Fe 原子, 所以连接界面最终偏向 T2 侧<sup>[11-14]</sup>. 从图 5a 可以看到, 在接头及其附近的 T2 侧存在衬度明显不同于基体的



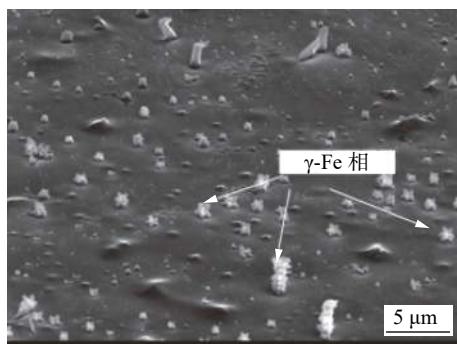
(a) BEM 图



(b) 扩散区



(c) 接头微观形貌



(d) 接头附近 T2 区域

图 5 接头微观形貌及其附近析出相

Fig. 5 Micro morphology of joint and precipitated phase near the joint. (a) BEM picture; (b) diffusion zone; (c) micro morphology of joint; (d) T2 region near the joint

相. 结合图 5c 接头微观形貌可以看到, 这些区域有树枝状、条状和不规则块状析出相产生, 图 5d 为图 5c 虚线框中放大后的微观形貌, 发现树枝状的析出相弥散的分布于接头及附近 T2 紫铜基体

上,对接头及其附近析出相进行EDS点扫描,点扫描结果如表2所示。结合Cu-Fe二元相图和Cu-Ni二元相图,这些树枝状和条状的析出相推断分别为 $\gamma$ -Fe相和 $\alpha$ (Cu, Ni)相<sup>[9-14]</sup>。不规则块状的析出相为富Cr相。结合图6的EDS线扫描结果和表2的EDS点扫描结果可以表明,反应层由 $\alpha$ (Cu, Ni)相和 $\gamma$ -Fe相组成,而在T2紫铜扩散影响区主要为 $\gamma$ -Fe相和富Cr相。

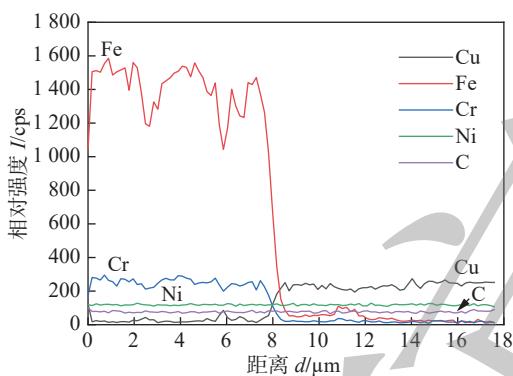


图6 图5b接头扩散区线扫描结果

Fig. 6 Line scanning results of joint diffusion zone in Fig. 5b

表2 图5a中点扫描的结果(质量分数, %)  
Table 2 Results of point scanning in Fig. 5a

位置	Fe	Cr	Cu	Ni	可能的析出相
1	21.4	3.1	72.7	2.8	$\alpha$ (Cu, Ni)相
2	22.8	4.4	70.2	2.6	$\gamma$ -Fe相
3	30	59.2	5.2	—	富Cr析出相

### 2.3 连接接头的硬度分布

为了研究连接接头硬度分布情况,在接头选区进行维氏显微硬度试验,获得接头及其附近的硬度分布云图。从图7可以发现,316L不锈钢侧的平均硬度值最高,为130 HV0.1,316L不锈钢/T2紫铜

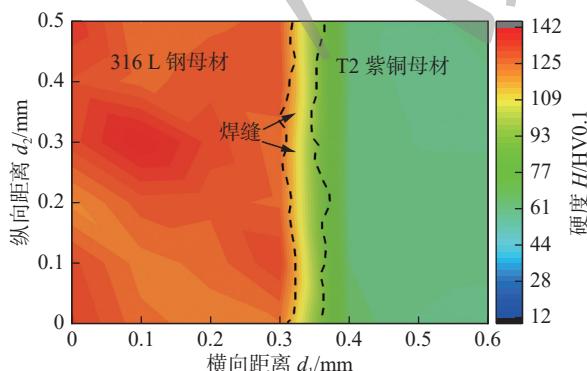


图7 接头附近显微维氏硬度分布

Fig. 7 Vickers microhardness distribution near the joint

接头平均硬度高于T2紫铜侧平均硬度,接头平均硬度为94 HV0.1。

接头硬度的分布与组织分析中图5c所观察到连接接头有均匀分布的析出相有关,析出相引发的第二相强化机制使得接头区域抵抗变形的能力大大提高,增加了接头区域的硬度<sup>[9]</sup>。从316L不锈钢侧到T2紫铜侧硬度值逐渐降低,在接头及其附近区域并没有发现硬度突变的现象发生,说明在热等静压后316L不锈钢/T2紫铜扩散界面及其附近区域并未有金属间化合物生成,进一步说明界面结合较好<sup>[10]</sup>。

### 2.4 连接接头的抗拉强度

316L不锈钢/T2紫铜接头拉伸试验断裂于T2紫铜基体,可见接头冶金结合质量很好。接头的抗拉强度和断后伸长率如图8所示,最大抗拉强度为165 MPa,断后伸长率为30.5%,断面收缩率为83.0%。在拉伸过程中可以观察到明显的“颈缩”现象,结合图9的断面形貌可知,断口呈现微孔聚集型的韧性断裂。对断裂原因进一步分析,发现图5c所示接头及其附近存在的富Cr相、 $\alpha$ (Cu, Ni)相和 $\gamma$ -Fe析出相均匀弥散分布于接头及接头附近的T2紫铜基体相中,与周围位错间发生交互作用,阻

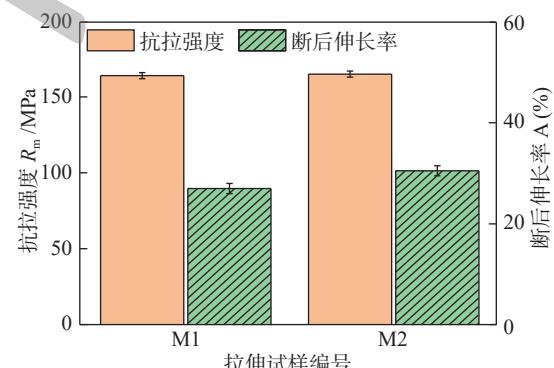


图8 接头的抗拉强度和断后伸长率

Fig. 8 Tensile strength and elongation of joint

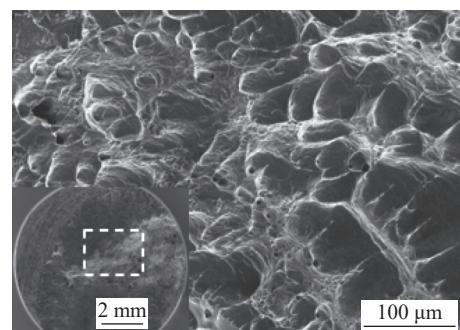


图9 拉伸试样的断口形貌

Fig. 9 Fracture morphology of the tensile specimen

碍位错的运动,提高了这些区域的强度,而离接头较远的 T2 紫铜基体没有强化机制,且热等静压过程中较大的热输入导致晶粒粗大而软化最终发生断裂<sup>[9,15-16]</sup>。

### 3 结论

(1) 采用热等静压工艺成功连接了 316L 不锈钢/T2 紫铜,接头呈波状结合,且连接接头无明显的宏观缺陷。

(2) 在塑性变形和扩散反应的连接机制作用下,两侧基体主要元素通过空位机制发生明显的扩散,形成了厚度为 3.9 μm 的扩散层,在连接接头及其附近的 T2 紫铜侧发现了树枝状 γ-Fe 相、条状 α(Cu, Ni) 相组织和不规则块状富 Cr 相组织存在。

(3) 对连接接头进行力学性能分析表明,连接接头平均硬度值为 94 HV0.1,高于较弱 T2 紫铜,但是没有硬度突变现象,表明接头没有金属间化合物生成,拉伸试验结果最终在 T2 紫铜侧失效断裂,最大抗拉强度为 165 MPa,接头及其附近的析出相形成了第二相强化,而 T2 紫铜由于没有强化机制且热等静压较大的热输入导致晶粒粗化而断裂。

### 参考文献

- [1] 李亚江,王娟.异种难焊材料的焊接及工程应用 [M].北京:化学工业出版社,2014.
- Li Yajiang, Wang Juan. Welding and engineering application of dissimilar refractory materials[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2014.
- [2] 张义.异种金属焊接技术 [M].北京:机械工业出版社,2016.
- Zhang Yi. Dissimilar metal welding technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.
- [3] Jiang Chao, Long Weimin, Feng Jian, et al. Thermal fatigue behavior of copper/stainless steel explosive welding joint[J]. China Welding, 2021, 30(4): 25–29.
- [4] 尚文静.热等静压(HIP)技术和设备的发展及应用 [J].有色冶金设计与研究, 2010, 32(2): 18–21.
- Shang Wenjing. Development and application of HIP technology and equipment[J]. Nonferrous Metallurgy Design and Research, 2010, 32(2): 18–21.
- [5] 高炜.永久型阴极板导电杆—钢异种金属连接工艺及性能分析 [D].兰州:兰州理工大学, 2017.
- Gao Wei. Connecting process and performance analysis of copper and steel dissimilar metal for permanent Cathode plate conductive rod [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2017.
- [6] Zhang H, Jiao K X, Zhang J L, et al. Experimental and numerical investigations of interface characteristics of copper/steel composite prepared by explosive welding[J]. Materials & Design, 2018, 154: 140–152.
- [7] Suman Patra, Kanwer Singh Arora, Mahadev Shome, et al. Interface characteristics and performance of magnetic pulse welded copper-steel tubes[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 245: 278–286.
- [8] Wei R, Zhao S X, Dong H, et al. Enhancing the CuCrZr/316L HIP-joint by Ni electroplating[J]. Fusion Engineering and Design, 2017, 117: 58–62.
- [9] 李继红,张云龙,杜明科,等.合金元素对铜/钢接头连接机理及性能的影响 [J].焊接学报, 2021, 42(3): 34–41.
- Li Jihong, Zhang Yunlong, Du Mingke, et al. Effect of alloying elements on bonding mechanism and properties of copper/steel joint[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(3): 34–41.
- [10] 丁文,王小京,刘宁,等. CoCrFeMnNi 高熵合金作为中间层的 Cu/304 不锈钢扩散连接研究 [J]. 金属学报, 2020, 56(8): 1084–1090.
- Ding Wen, Wang Xiaojing, Liu Ning, et al. Diffusion bonding of Cu/304 stainless steel with CoCrFeMnNi high entropy alloy as intermediate layer[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(8): 1084–1090.
- [11] Li Y, Parfitt D, Flewitt P E J, et al. Microstructural considerations of enhanced tensile strength and mechanical constraint in a copper/stainless steel brazed joint[J]. Materials Science and Engineering A, 2020, 796: 139992.
- [12] Zhao X, Duan L, Wang Y. Fast interdiffusion and Kirkendall effects of SiC-coated C/SiC composites joined by a Ti-Nb-Ti interlayer via spark plasma sintering[J]. Journal of the European Ceramic Society, 2019, 39(5): 1757–1765.
- [13] 黄伶明,王万景,王纪超,等.低活化钢双壁管的热等静压扩散连接 [J].焊接学报, 2022, 43(1): 92–97.
- Huang Lingming, Wang Wanjing, Wang Jichao, et al. HIP diffusion bonding of reduced activation steel double wall tube[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2022, 43(1): 92–97.
- [14] Aboudi D, Lebaili S, Taouinet M, et al. Microstructure evolution of diffusion welded 304L/Zircaloy4 with copper interlayer[J]. Materials & Design, 2017, 116: 386–394.
- [15] Yang Ming, Ma Honghao, Shen Zhaowu, et al. Study on explosive welding for manufacturing meshing bonding interface of CuCrZr to 316L stainless steel[J]. Fusion Engineering and Design, 2019, 143: 106–114.
- [16] Poo-arpong Y, Duangnil S, Bamrungkoh D, et al. Gas tungsten arc welding of copper to stainless steel for ultra-high vacuum applications[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 277: 116490.

**第一作者:**麻相龙,博士研究生;主要研究方向异种金属连接;Email: 3498915896@qq.com.

**通信作者:**曹睿,博士,教授,博士研究生导师;Email: caorui@lut.edu.cn.