

DOI: 10.11973/jxgccl202103009

# 铜箔种类和厚度对钛/钢电阻点焊接头组织和性能的影响

张鹏贤, 禄建强, 陈沛

(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)

**摘要:** 以不同种类、不同厚度铜箔作为过渡层材料, 对 TC4 钛合金和 304 不锈钢薄板进行电阻点焊, 研究了铜箔种类和厚度对接头组织和性能的影响。结果表明: 纯铜箔过渡层焊接接头的抗剪强度明显高于铜合金箔过渡层焊接接头的, 且 T4 铜箔过渡层焊接接头的抗剪强度最高; 随着 T4 铜箔厚度增大, 接头反应区宽度减小, 中间过渡区宽度增大, 熔合区钛-铁金属间化合物减少, 接头抗剪强度先增大后减小, 在厚度为 0.4 mm 时达到最大。

**关键词:** 钛合金; 不锈钢; 电阻点焊; 铜箔过渡层; 抗剪强度

中图分类号: TG453.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-3738(2021)03-0046-06

## Type and Thickness of Copper Foil on Microstructure and Properties of Resistance Spot Welded Joints of Titanium/Steel

ZHANG Pengxian, LU Jianqiang, CHEN Pei

(Provincial and Ministry Co-construction of State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Resistance spot welding was performed on TC4 titanium alloy and 304 stainless steel sheet with copper foils of different types and thicknesses as transition layer materials. The influence of the type and thickness of the copper foils on the microstructure and properties of the joint was studied. The results show that the shear strength of the welding joint with pure copper foils as the transition layer was significantly higher than that of the copper alloy foils as the transition layer, and the welding joint with T4 copper foil as the transition layer had the highest shear strength. With increasing thickness of the T4 copper foil, the width of the reaction zone of the joint decreased, the width of the intermediate transition zone increased, and the Ti-Fe intermetallic compound in the fusion zone decreased, the shear strength of the joints increased first and then decreased, reaching the maximum when the thickness was 0.4 mm.

**Key words:** titanium alloy; stainless steel; resistance spot welding; copper foil transition layer; shear strength

### 0 引言

钛合金与不锈钢焊接构件能够充分发挥两者在性能和经济上的优势, 在航空航天和海洋工程领域应用广泛<sup>[1]</sup>。但是钛合金和不锈钢在热导率、线膨胀系数等方面存在差异, 焊接接头容易形成 TiFe、TiFe<sub>2</sub> 等脆性金属间化合物, 导致焊接质量较差; 同时焊后冷却过程中会产生较大内应力, 导致接头强

度降低, 严重时还会引起开裂。针对以上问题, 一些学者采用在连接界面电镀银、铜金属薄膜和在不锈钢表面喷涂镍等措施<sup>[2-4]</sup>, 但未能有效阻止钛化合物的生成, 接头强度仍较低。

有学者提出, 在钛合金和不锈钢之间添加过渡金属层能实现钛/钢的有效连接<sup>[5]</sup>。KUNDU 等<sup>[6]</sup>以镍层为过渡层实现了工业纯钛和 304 不锈钢的扩散焊, 发现镍元素可以阻止钛、铁元素互扩散, 接头抗剪强度可达 219 MPa; ZHAO 等<sup>[7]</sup>以镍箔作为中间层实现了钛/钢的真空热轧连接, 镍层的介入提高了接头的

收稿日期: 2020-04-21; 修订日期: 2021-01-15

作者简介: 张鹏贤(1970-), 男, 甘肃靖远人, 教授, 博士

©1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

强度和塑性;陈一帆等<sup>[8]</sup>在以铜+铌作为复合过渡层的钛/钢扩散焊的研究中发现,过渡层有利于形成良好的接头。由此可见,以金属镍、铜、铌作为中间过渡层可实现钛/钢的有效连接,提高接头性能。出于经济考虑,实际焊接过程中一般采用铜作为中间过渡层。王红阳等<sup>[9]</sup>以 Cu-Zn 合金箔作为过渡层进行钛/钢激光-电弧复合焊,结果表明,接头发生了明显的冶金反应,生成了 Ti-Cu 系金属间化合物及  $AlCu_2Ti$ ,实现了钛和钢的有效连接;刘彦峰等<sup>[10]</sup>采用铜箔作为中间层对钛、钢进行扩散焊,钛与铁、铬的互扩散得到有效抑制,接头形成了具有多层结构的新相层,其硬度高于基体。综上,铜作为过渡层时,钛和钢可实现良好连接,且铜价格相对较低,便于工业应用。

在钛合金与不锈钢薄板的连接中,电阻点焊因

具有效率高、焊点质量稳定、易于实现自动化等优点<sup>[10]</sup>而应用广泛。目前,关于添加金属过渡层的钛/钢电阻点焊的研究较少。作者采用不同类型、厚度的铜箔作为过渡层,研究了铜箔类型和厚度对钛合金/不锈钢薄板电阻点焊接头组织和性能的影响,为铜箔类型和厚度的选择提供参考。

## 1 试样制备与试验方法

试验材料为宝钛集团生产的 TC4 钛合金板和酒泉钢铁公司生产的 304 不锈钢板,化学成分如表 1 所示,抗拉强度分别为 800,512 MPa。选用苏州中煜达铜业有限公司提供的 T1、T2、T4、TU0、TU1、TU2、H62、H62-1、QSn1.5-0.2 等 9 种铜箔作为过渡层材料,化学成分如表 2 所示。

表 1 钛合金和不锈钢的化学成分(质量分数)

| 材料      | Ti | Fe    | Ni       | C     | Cr        | Al      | Mn   | V       | Si    | N     | S    | H      | F | O     |
|---------|----|-------|----------|-------|-----------|---------|------|---------|-------|-------|------|--------|---|-------|
| TC4 合金  | 余  | ≤0.30 |          | ≤0.10 |           | 5.5~6.8 |      | 3.5~4.5 |       | ≤0.05 |      | ≤0.015 |   | ≤0.20 |
| 304 不锈钢 |    |       | 8.0~10.5 | 0.07  | 17.5~19.5 |         | 2.00 |         | 0.075 |       | 0.03 |        |   | 0.045 |

表 2 铜箔的化学成分(质量分数)

| 牌号             | Cu    | Fe    | Pb    | Ni    | Zn     | Sn    | Bi    | 其他    |
|----------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| T1 纯铜          | 99.95 |       | 0.003 |       |        |       | 0.002 |       |
| T2 纯铜          | 99.90 |       | 0.002 |       | 0.005  | 0.002 | 0.001 |       |
| T4 纯铜          | 99.50 | 0.005 | 0.050 | 0.050 | 0.015  | 0.020 | 0.030 | 0.330 |
| TU0 纯铜         | 99.99 |       | 0.002 |       | 0.001  | 0.002 | 0.005 |       |
| TU1 纯铜         | 99.97 |       | 0.002 | 0.002 | 0.003  | 0.002 | 0.005 | 0.016 |
| TU2 纯铜         | 99.95 |       | 0.002 | 0.010 |        | 0.010 | 0.015 | 0.013 |
| QSn1.5-0.2 铜合金 | 97.30 | 0.100 | 0.050 | 0.200 | 0.300  | 1.700 |       | 0.350 |
| H62-1 铜合金      | 63.00 | 0.100 | 0.100 | 0.500 | 34.900 | 1.100 |       | 0.300 |
| H62 铜合金        | 60.50 | 0.150 | 0.100 |       | 38.748 |       | 0.002 | 0.500 |

在 TC4 钛合金板和 304 不锈钢板上截取尺寸均为 80 mm×20 mm×1.5 mm 的试样,采用 YR-350SA2HGL 型台式电阻点焊机进行点焊,采用 3 层叠加的搭接接头,自上而下叠加次序为钛合金、铜箔、不锈钢,铜箔平面尺寸为 20 mm×20 mm,厚度为 0.210 mm,搭接长度为 20 mm,装配方式如图 1 所示。装配前,用砂纸对母材和铜箔表面进行打磨,放入丙酮溶液中超声波清洗 3 min,取出烘干。装配时,采用高温结构密封胶对铜箔进行定位,并防止焊接区域氧化,密封胶仅涂覆在搭接层侧表面。待密封胶完全凝固后进行焊接,焊接工艺参数见表 3。

沿焊点中心垂直于结合面方向截取尺寸为 12 mm×8 mm×32 mm 的金相试样,经磨抛,采用 2% (质量分数,下同) HF+3% HNO<sub>3</sub>+95% H<sub>2</sub>O 的

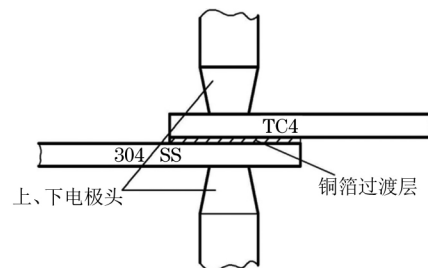


图 1 接头装配方式示意

Fig.1 Diagram of joint assemble method

表 3 焊接工艺参数

Table 3 Welding process parameters

| 编号 | 焊接电流/kA | 焊接时间/s  | 电极压力/MPa |
|----|---------|---------|----------|
| 1  | 2~5     | 1.2     | 0.5      |
| 2  | 3       | 0.6~2.4 | 0.5      |
| 3  | 3       | 1.2     | 0.2~0.6  |

混合溶液腐蚀,在JSM-6700F型扫描电子显微镜下观察显微组织,并用附带的能谱仪(EDS)进行微区成分分析。采用D8ADVANCEA型X射线衍射仪进行物相分析。采用DW-300J型万能试验机对焊接接头进行剪切试验,拉伸速度为 $2\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ ,试验结束后用游标卡尺测量熔核直径,结合最大剪切力计算接头的抗剪强度。

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 工艺参数对抗剪强度的影响

为确定最佳焊接工艺参数,采用 $0.3\text{ mm}$ 厚的T2铜箔作为过渡层对钛合金和不锈钢进行电阻点焊,以接头的抗剪强度作为接头可靠连接判据。由图2可以看出,接头的抗剪强度随焊接电流、焊接时

间、电极压力的增大均呈先增大后减小的趋势,并分别在焊接电流为 $3.0\text{ kA}$ 、焊接时间为 $1.2\text{ s}$ 、电极压力为 $0.5\text{ MPa}$ 时达到峰值。优化工艺为焊接电流 $3.0\text{ kA}$ 、焊接时间 $1.2\text{ s}$ 、电极压力 $0.5\text{ MPa}$ 。后文如无特指,所用工艺均为优化工艺。

### 2.2 铜箔种类及厚度对显微组织的影响

由图3可以看出,T4和H62铜箔过渡层焊接接头的组织可分为钛合金母材区、钛-铜反应区( $A_1$ ,  $A_2$ )、铜中间过渡区( $B_1$ ,  $B_2$ )、铜-不锈钢反应区( $C_1$ ,  $C_2$ )以及不锈钢母材区。T4铜箔过渡层焊接接头的组织分布均匀,晶粒细小,钛-铜、铜-不锈钢反应区厚度小,铜中间过渡区厚度大,这是焊点处的铜箔完全熔化且母材少量熔化,使得扩散的铜原子数量增加,钛、铁原子数量下降导致。结合图4的XRD

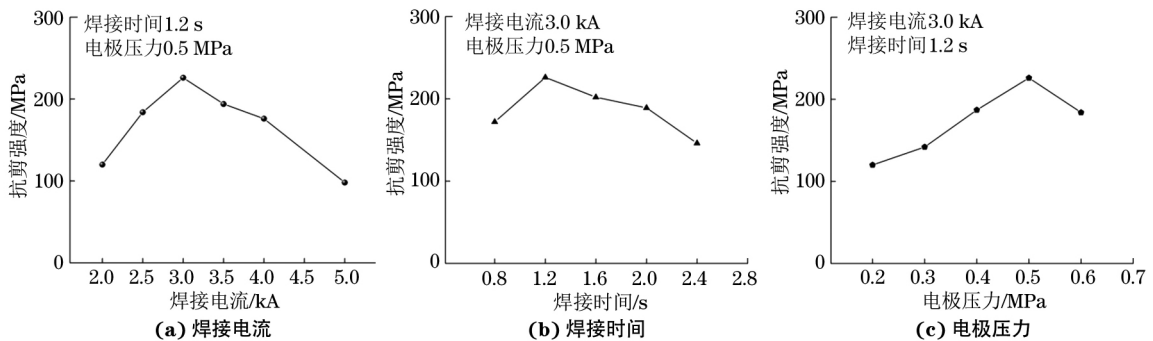


图2 接头抗剪强度随焊接工艺参数的变化曲线

Fig.2 Curves of shear strength vs welding process parameters of joint : (a) welding current ;(b) welding time and (c) electrode pressure

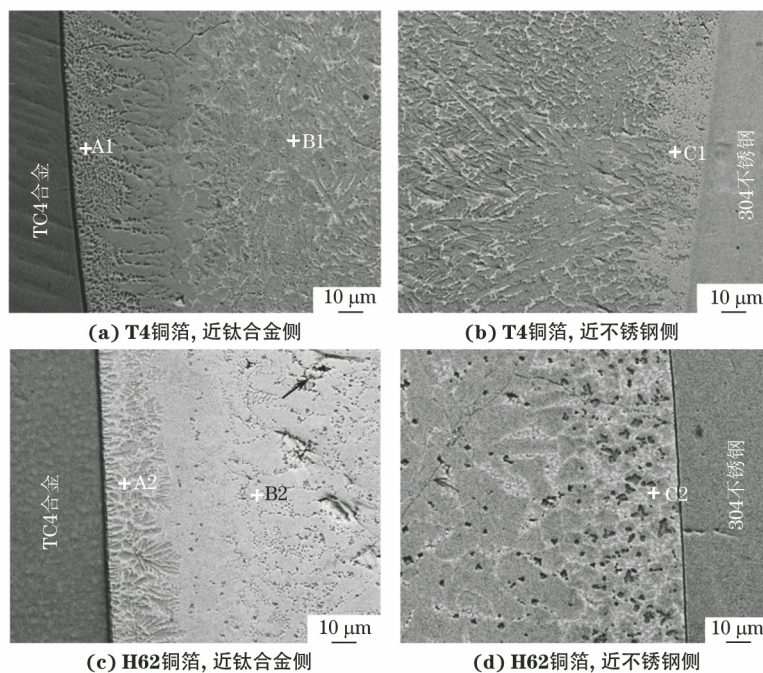


图3  $0.4\text{ mm}$ 厚T4和H62铜箔过渡层接头的剖面显微组织

Fig.3 Profile microstructure of joints with  $0.4\text{ mm}$  thickness T4 (a-b) and H62 (c-d) copper foil as transition layer :

(a,c) near titanium alloy side; and (b,d) near stainless steel side



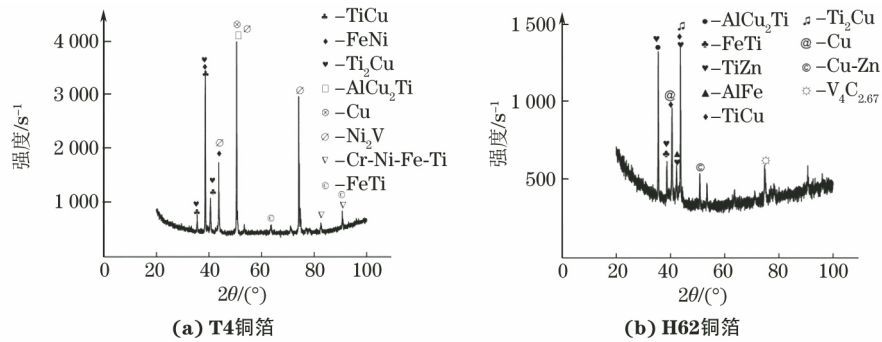


图4 0.4 mm厚T4和H62铜箔过渡层接头熔合区的XRD谱

Fig.4 XRD spectra of fusion zone of joints with 0.4 mm thickness T4 (a) and H62 (b) copper foil as transition layer

谱可知,T4铜箔过渡层焊接接头熔合区中存在富铜的钛基固溶体、钛-铁脆性金属间化合物、钛-铜金属间化合物、铜及形态各异的铜基固溶体。H62铜箔过渡层焊接接头中,存在铜-锌固溶体和脆性锌-钛、钛-铁金属间化合物,接头出现较多的孔洞及裂纹缺陷(箭头所示)。与纯铜箔相比,铜合金箔中的锌、铁等合金元素含量较高,与母材中的钛、铁元素反应生成数量较多的脆性金属间化合物,缺陷和较多的脆性金属间化合物会导致铜合金箔过渡层焊接接头的力学性能降低。

由图5和图6可以看出:与0.4 mm厚T4铜箔过渡层焊接接头相比,0.2 mm厚T4铜箔过渡层焊接接头组织不变,但熔合区中钛-铁脆性金属间化合物增多,且接头出现裂纹,同时反应区厚度增大,过

渡区厚度减小。在焊接过程中,过渡层会阻碍钛、铁原子互扩散。铜箔较薄时,铜元素的介入量少,难以完全阻挡互扩散过程,因此钛-铁金属间化合物数量增多,反应区厚度增大,这会导致接头性能变差。

与0.4 mm厚T4铜箔过渡层焊接接头相比,铜箔厚度为0.6 mm时,接头焊点处铜箔部分熔化,母材几乎不熔化,使得扩散的钛、铁原子数量大大减少,因此钛-铜、铜-不锈钢反应区的厚度减小。同时,未熔化的铜箔参与到接头中形成虚焊缺陷(箭头所示),会导致接头力学性能下降。

由图7可以看出:不同厚度T4铜箔作为过渡层的接头不同区域中的钛、铁、铜元素含量均不同,在焊接过程中,钛原子和铁原子向对侧扩散,铜箔厚度从0.2 mm增大到0.4 mm时,铜过渡层中钛、铁

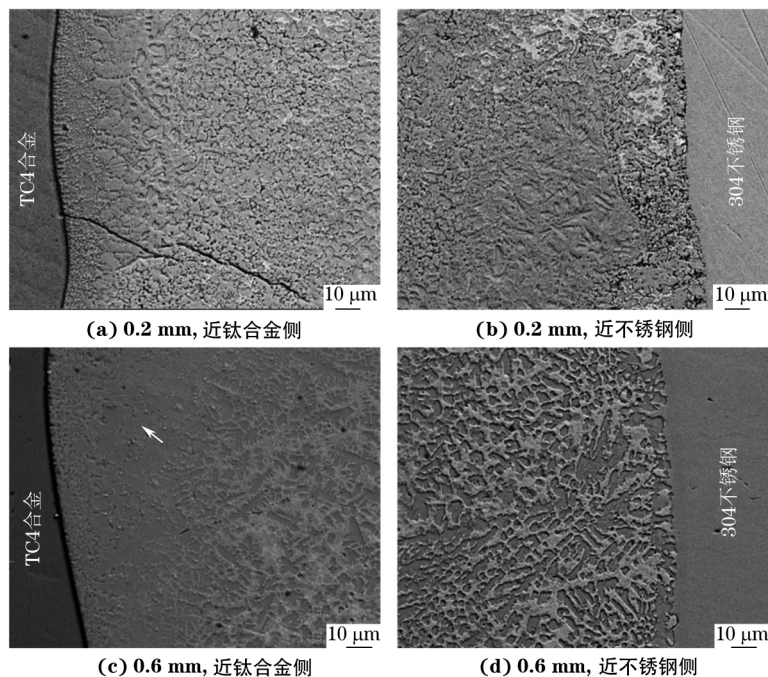


图5 0.2,0.6 mm厚T4铜箔过渡层接头的剖面显微组织

Fig.5 Profile microstructure of joints with 0.2 mm (a-b) and 0.6 mm thickness (c-d) T4 copper foil as transition layers (a,c) near titanium alloy side and (b,d) near stainless steel side

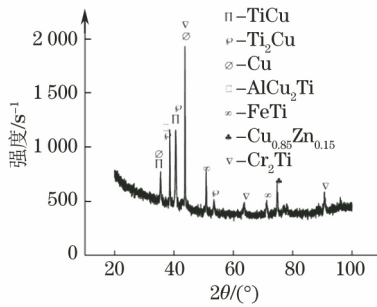


图6 0.2 mm厚T4铜箔过渡层接头熔合区的XRD谱

Fig.6 XRD spectrum of fusion zone of joints with T4 copper foil of 0.2 mm as transition layers

原子的数量明显减少,因此钛-铜反应区、铜-不锈钢反应区宽度减小,铜箔中间过渡区宽度增加,接头性

能提高,厚度增大至0.6 mm时,钛-铜反应区、铜-不锈钢反应区中的钛、铁原子数量极少,宽度均进一步减小,基本消失,铜中间过渡区覆盖整个接头反应区域,接头仅靠铜原子向两侧母材扩散来实现连接,这会使接头的抗剪强度反而降低。

### 2.3 铜箔种类及厚度对抗剪强度的影响

由图8可以看出,铜箔厚度相同时,纯铜箔过渡层焊接接头的抗剪强度均明显高于铜合金箔过渡层焊接接头的,其中,T4铜箔过渡层焊接接头的抗剪强度最高,铜箔类型一致时,厚度越大,抗剪强度越高。由图9可以看出,随T4铜箔厚度增大,接头抗剪强度先增大后减小,在厚度为0.4 mm时达到峰值,为324 MPa。

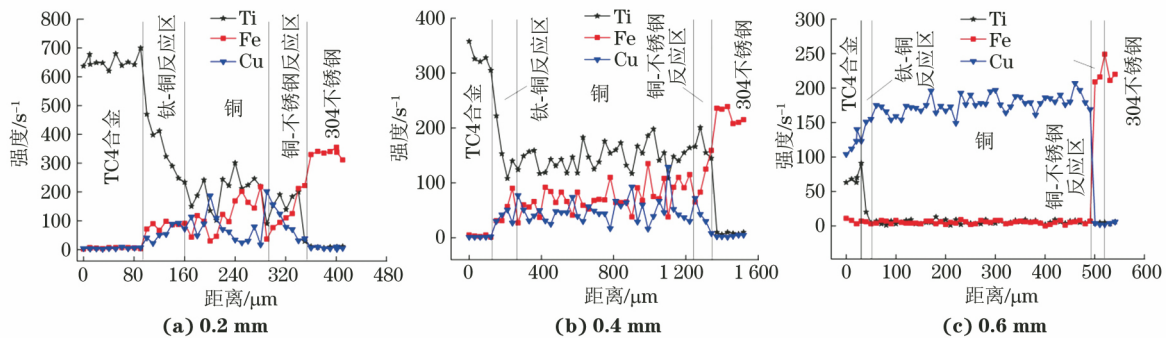


图7 不同厚度T4铜箔过渡层接头中钛、铁、铜元素的EDS线扫结果

Fig.7 EDS line scanning results of Ti, Fe and Cu elements in joints with T4 copper foil of different thickness as transition layers

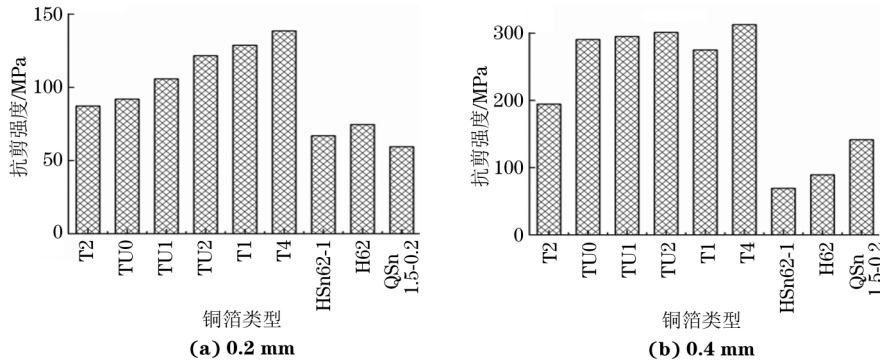


图8 不同类型和厚度铜箔过渡层接头的抗剪强度

Fig.8 Shear strength of joint with different type and thickness of copper foil as transition layers

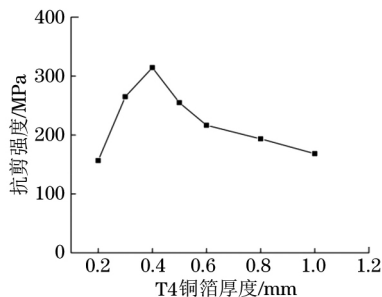


图9 接头抗剪强度随T4铜箔厚度的变化曲线

Fig.9 Curve of shear strength vs thickness of T4 copper foil of joint

## 3 结论

(1) 采用0.3 mm厚T2铜箔作为过渡层材料时,接头抗剪强度随焊接电流、焊接时间和电极压力的增大先增大后减小,且分别在焊接电流为3.0 kA,焊接时间为12 s,电极压力为0.5 MPa时达到最大。

(2) 纯铜箔过渡层焊接接头的抗剪强度明显高于铜合金箔过渡层焊接接头的,且T4铜箔过渡层焊接接头的抗剪强度最高;随着T4铜箔厚度增大,反应区宽度减小,中间过渡区宽度增大,Ti-Fe金属

间化合物减少,接头抗剪强度先增大后减小,在厚度为 0.4 mm 时达到最大。

#### 参考文献:

- [1] 张义福,张华,苏展展,等.Zr-Ni 中间层对 TC4 钛合金/304SS 不锈钢激光焊接头组织性能的影响[J].稀有金属,2020,44(11):1137-1145.  
ZHANG Y F, ZHANG H, SU Z Z, et al. Microstructure and properties of laser welding joints between TC4 titanium alloy and 304SS stainless steel using Zr-Ni multi-interlayer [J] Rare Metal, 2020, 44(11): 1137-1145.
- [2] 宋庭丰,蒋小松,莫德锋,等.不锈钢和钛合金异种金属焊接研究进展[J].材料导报,2015,29(11):81-87.  
SONG T F, JIANG X S, MO D F, et al. Research progress on welding of dissimilar metals of stainless steel and titanium alloy [J]. Material Review, 2015, 29(11): 81-87.
- [3] 王亚荣,樊亚丽,余洋.电镀阻隔层对钛/钢电子束焊接接头性能的影响[J].稀有金属材料与工程,2018,47(1):299-304.  
WANG Y R, FAN Y L, YU Y. Effect of isolation coatings on mechanical property of electron beam welding joint of titanium alloy to stainless steel [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47(1): 299-304.
- [4] 张鹏贤,于海宇,汪韵.镍喷涂层下钛/钢电阻钎焊的接头形成机制[J].焊接学报,2017,38(3):62-66.  
ZHANG P X, YU H Y, WANG G. Formation mechanism of titanium/steel brazing joints with thermally sprayed Ni layer [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2017, 38(3): 62-66.
- [5] 张秉刚,王廷,段潇辉,等.添加铜填充层的 Ti-15-3 钛合金与 304 不锈钢电子束焊接过程中的温度与应力场 [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 398-403.  
ZHANG B G, WANG T, DUAN X H, et al. Temperature and stress fields in electron beam welded Ti-15-3 alloy to 304 stainless steel joint with copper interlayer sheet [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, 22(2): 398-403.
- [6] KUNDU S, CHATTERJEE S. Interfacial microstructure and mechanical properties of diffusion-bonded titanium-stainless steel joints using a nickel interlayer [J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 425(1/2): 107-113.
- [7] ZHAO D S, YAN J C, LIU Y J, et al. Interfacial structure and mechanical properties of hot-roll bonded joints between titanium alloy and stainless steel using niobium interlayer [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(9): 2839-2844.
- [8] 陈一帆,张占领,邱然锋.以铌+铜为复合中间层扩散焊接钛合金/不锈钢接头的组织与性能 [J]. 机械工程材料, 2018, 42(10): 77-80.  
CHEN Y F, ZHANG Z L, QIU R F. Microstructure and property of diffusion welded titanium alloy/stainless steel joint with niobium + copper composite interlayer [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2018, 42(10): 77-80.
- [9] 王红阳,李权,宋刚,等.基于铜合金中间层的钛合金与不锈钢激光-电弧复合热源焊接研究 [J]. 中国激光, 2016, 43(5): 0503002.  
WANG H Y, LI Q, SONG G, et al. Laser-arc hybrid welding of titanium alloy and stainless steel with copper interlayer [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(5): 0503002.
- [10] 刘彦峰,邱云云,张美丽,等.基于铜中间层的钛合金与不锈钢的真空扩散焊研究 [J]. 兵器材料科学与工程, 2017, 40(5): 10-14.  
LIU Y F, QIU Y Y, ZHANG M L, et al. Vacuum diffusion welding of titanium alloy and stainless steel with copper interlayer [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2017, 40(5): 10-14.
- [36] 魏永辉,张永振,陈跃.磁场干涉对不同磁性材料干摩擦特性的影响 [J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 102-110.  
WEI Y H, ZHANG Y Z, CHEN Y. Influence of magnetic field interfering on dry-sliding tribological characteristics of materials with different magnetic properties [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 102-110.
- [37] WINGER J, SCHÜMANN M, KUPKA A, et al. Influence of the particle size on the magnetorheological effect of magnetorheological elastomers [J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 481: 176-182.
- [38] REEVESA C J, MENEZES P L, LOVELL M R, et al. The influence of surface roughness and particulate size on the tribological performance of bio-based multi-functional hybrid lubricants [J]. Tribology International, 2015, 88: 40-55.
- [39] HABIB K A, CANO D L, HEREDIA J A, et al. Effect of debris size on the tribological performance of thermally sprayed coatings [J]. Tribology International, 2020, 143: 106025.
- [40] PEÑA-PARÁS L, GAO H Y, MALDONADO-CORTÉS D, et al. Effects of substrate surface roughness and nano/micro particle additive size on friction and wear in lubricated sliding [J]. Tribology International, 2018, 119: 88-98.

(上接第 5 页)