

# 铜/钨异种金属 A-TIG 电弧点焊工艺及性能

顾玉芬, 邓志然, 石 玓, 李 广, 张 刚

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 采用钨极惰性气体焊(TIG)对铜/钨异种金属进行焊接, 分别对涂覆 SiO<sub>2</sub> 和未涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的试件进行搭接点焊, 并对焊点形貌、接头截面及微观形貌和拉力进行分析。结果表明, 未涂覆 SiO<sub>2</sub> 的焊点呈凸起状, 且不规则, 界面结合处存在较多的孔洞缺陷, 涂覆 SiO<sub>2</sub> 的焊点中心出现圆形凹坑, 界面处孔洞等缺陷减少; 接头界面处均发生了铜/钨的互扩散, 涂覆 SiO<sub>2</sub> 的试件比未涂覆的界面更加致密; 相同电流下, 涂覆 SiO<sub>2</sub> 的接头拉力比未涂覆 SiO<sub>2</sub> 的高, 并且接头断裂位置明显不同。

**关键词:** TIG 点焊; 活性剂; 宏观形貌; 微观形貌; 拉力

**中图分类号:** TG444; TG146.1<sup>†1</sup>

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1002-185X(2019)03-0947-06

随着现代科技的发展, 异种材料的连接成为焊接领域研究的热点, 广泛应用于现代工程结构中。钨作为耐热材料, 在航空航天、能源和电子等领域有特殊的作用, 例如一些等离子体元件的首选复合结构件就是钨与铜及其合金的连接件<sup>[1,2]</sup>。由于铜与钨在熔点、导热性及热膨胀系数等物理性质上相差悬殊, 所以对钨和铜直接焊接的难度很大。目前铜/钨连接技术主要有热等静压焊、扩散焊、钎焊、活性金属浇铸技术等<sup>[1-12]</sup>。热等静压是在高温高压下实现钨/铜难熔金属的焊接, 适合偏滤器材料的制造<sup>[3,4]</sup>, 为了减少热应力, 有的加入了过渡层<sup>[4]</sup>。国外研究人员对过渡层进行了研究, 用来提高偏滤器模块的性能<sup>[5,6]</sup>; 扩散焊需要在母材之间添加分别与钨和铜互溶的中间层金属, 如 Ni<sup>[7]</sup>、CuMn<sup>[8]</sup>、Ti/Ni/Ti<sup>[1]</sup>; 钎焊需要在母材之间添加熔点低于母材的钎料, 钨/铜连接所用钎料主要为 Cu-Mn 合金或 Ag-Cu 合金<sup>[9,10]</sup>; 活性金属浇铸技术是将纯铜浇铸在钨表面, 然后通过电子束焊接, 热等静压焊或钎焊与 Cu 合金进行连接<sup>[11,12]</sup>。最近几年, 在工业生产中, 为了把钨板轧制成超薄板, 需要采用塑性较好的铜板作为引板进行轧制, 由于轧制过程中会产生牵引力, 所以对铜/钨连接的接头性能有较高的要求。由于以上的焊接方法存在一定的局限性, 因此需要提出一种新工艺来实现铜/钨的连接。

综上所述, 基于钨板轧制过程中, 对铜/钨接头的连接强度有较高要求, 同时为了节约成本, 简化工艺。本研究引入了活性电弧焊的方法, 采用 TIG 点焊, 在

未涂覆 SiO<sub>2</sub> 和涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的情况下, 采用不同的电流对铜/钨异种金属进行搭接点焊。并对接头焊点成形情况、接头形貌、接头拉力进行分析。首次将此活性焊接方法引入到铜/钨异种金属点焊中。

## 1 实 验

实验所选用的纯钨(W1)和纯铜(T2)主要物理性能见表 1。其中钨板的尺寸为 100 mm×30 mm×0.5 mm, 铜板的尺寸为 100 mm×30 mm×1 mm, 实验所选用的活性剂为 SiO<sub>2</sub>。焊接前用砂纸由粗到细将被焊材料仔细打磨, 除去表面污垢, 之后再丙酮和乙醇先后超声波清洗, 吹干备用。考虑到钨本身脆性大, 焊接裂纹倾向较大<sup>[13,14]</sup>, 所以本次试验从铜侧进行焊接, 采用 TIG 点焊方法对铜/钨试件在未涂覆 SiO<sub>2</sub> 和涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的情况下分别进行搭接点焊, 焊接电流分别选为 110、140、170 A。在铜侧待焊处用毛刷涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂, 涂覆面积为 12 mm×12 mm, 并涂覆均匀, 涂覆的程度以掩盖住铜的金属光泽为宜。实验选用的焊机为松下焊机(YC-300WP), 钨极尖端距离试件的距离为 3 mm, 点焊时间为 4 s。点焊过程中采用的保护气体为氩气, 气体流量为 10 mL/min。同时, 利用高速摄像观测在涂覆活性剂和未涂覆活性剂情况下电弧形貌。点焊完成后制备金相试样和拉伸试样, 采用型号为 Quanta 450FEG 扫描电子显微镜(SEM)观察焊点微观形貌和界面结合情况, 利用 WDW-300J 型电子拉伸试验机测试接头拉力。焊接接头的力学性能

收稿日期: 2018-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(51675256); 兰州理工大学红柳杰出人才培养计划(J201201)

作者简介: 顾玉芬, 女, 1975 年生, 硕士, 副教授, 兰州理工大学材料学院, 甘肃 兰州 730050, 电话: 0931-2972765, E-mail: guyf@lut.cn

表 1 钨、铜的主要物理性能

Table 1 Main physical properties of tungsten and copper

Materials	Coefficient of thermal expansion/ $\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$	Coefficient of thermal conductivity/ $\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	Melting point/ $^\circ\text{C}$	Strength/MPa	Elastic modulus/ $\times 10^5 \text{ MPa}$	Density/ $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
W (W1)	4.5	164	3410	550	3.45	19.32
Cu (T2)	16.6	390	1083	120	1.29	8.96

直接影响焊接件在实际使用过程中的可靠性，因此室温下对铜/钨点焊试件进行了拉伸实验。每组选取 3 个试件进行拉伸，并取其最大拉力的平均值。

## 2 结果与分析

### 2.1 焊点形貌

图 1 为不同电流下，未涂覆  $\text{SiO}_2$  和涂覆  $\text{SiO}_2$  活性剂情况下的焊点形貌。未涂覆  $\text{SiO}_2$  活性剂，焊接电流为 110 A 时，不能实现铜/钨的连接（图 1a），并且随电流的增加，焊点呈凸起状，且不规则。当电流达到 170 A 时，焊点出现了明显的缺陷（图 1c）。涂覆  $\text{SiO}_2$  活性剂后，焊接电流为 110 A 时，实现了铜/钨的连接（图 1d）。并且焊点存在明显的圆形凹坑，随着电流的增加，圆形凹坑变大。焊点成形较规则，成形美观，并没有随电流的增加而出现缺陷。从图 1 焊点的截面图（箭头指示处，放大 60 倍）可以看出，未涂覆

$\text{SiO}_2$  活性剂的铜/钨界面结合处存在较多的孔洞，缺陷较多。涂覆  $\text{SiO}_2$  活性剂的铜/钨界面结合处缺陷很少，且随着电流的增加焊点凹陷程度增大，界面结合处缺陷减少。通过以上现象说明活性剂的加入明显改善了焊点的成形和减少了界面处的孔洞等缺陷。

### 2.2 接头微观形貌

利用扫描电子显微镜对铜/钨点焊接头微观形貌和界面结合情况进行观察。图 2、图 3 分别为不同电流时，未涂覆  $\text{SiO}_2$  和涂覆  $\text{SiO}_2$  活性剂情况下的点焊接头微观形貌及铜/钨界面结合情况。可以看出未涂覆  $\text{SiO}_2$  时，界面结合处存在较多缺陷（图 2a、2c），界面结合不致密。涂覆  $\text{SiO}_2$  后界面处缺陷明显减少，而且随着电流增加，界面结合的更加良好，当电流达到 170 A 时，界面处几乎没有缺陷，结合致密（图 3a、3c、3e）。这说明活性剂的加入明显改善了铜/钨界面的结合情况。从图 2b、2d 及图 3b、3d、3f 的 EDS 线扫描图可以

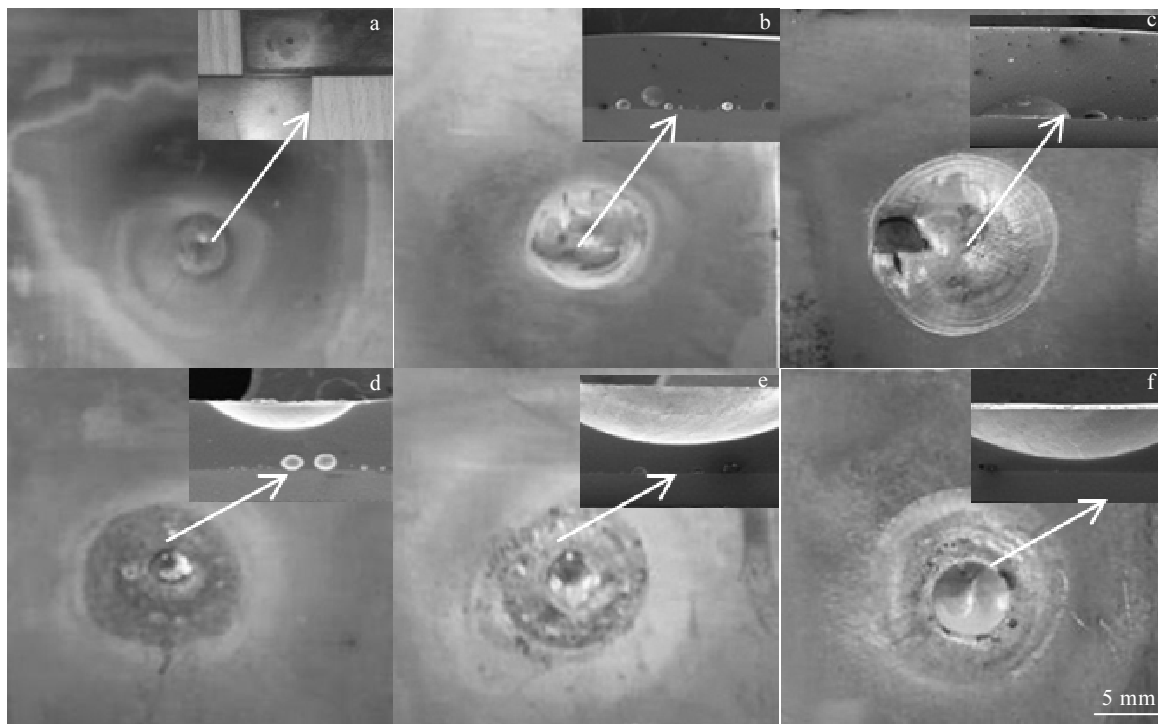


图 1 不同电流下涂覆  $\text{SiO}_2$  前后焊点形貌

Fig.1 Appearance of welding spot before (a~c) and after (d~f)  $\text{SiO}_2$  coating at different currents: (a, d) 110 A; (b, e) 140 A; (c, f) 170 A

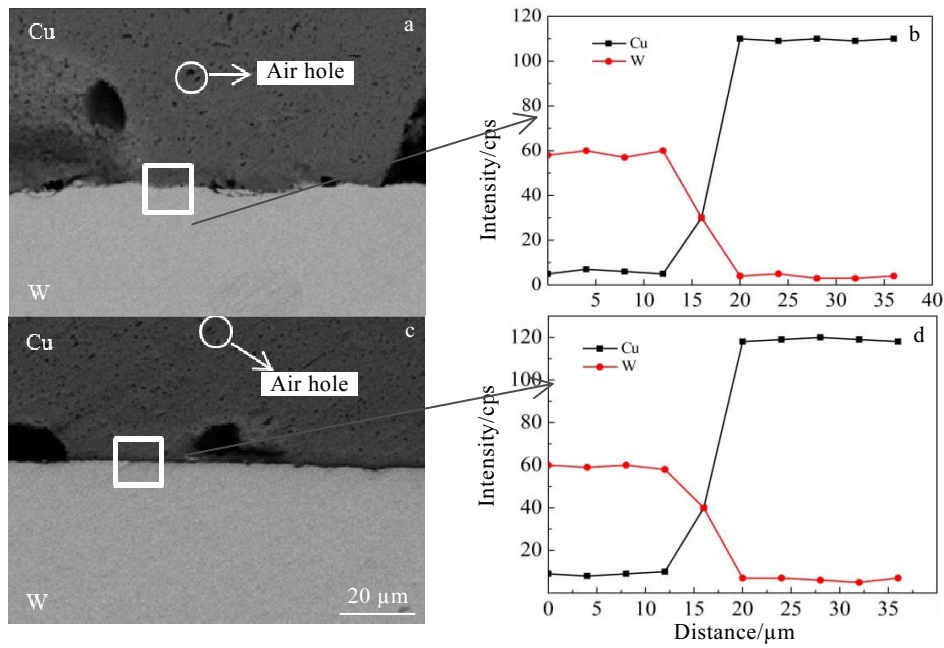


图 2 未涂覆  $\text{SiO}_2$  时接头 SEM 微观形貌及微区 EDS 元素线扫描

Fig.2 SEM images (a, c) and the corresponding EDS element line scanning (b, d) of the uncoated joints : (a, b)  $I=140$  A and (c, d)  $I=170$  A

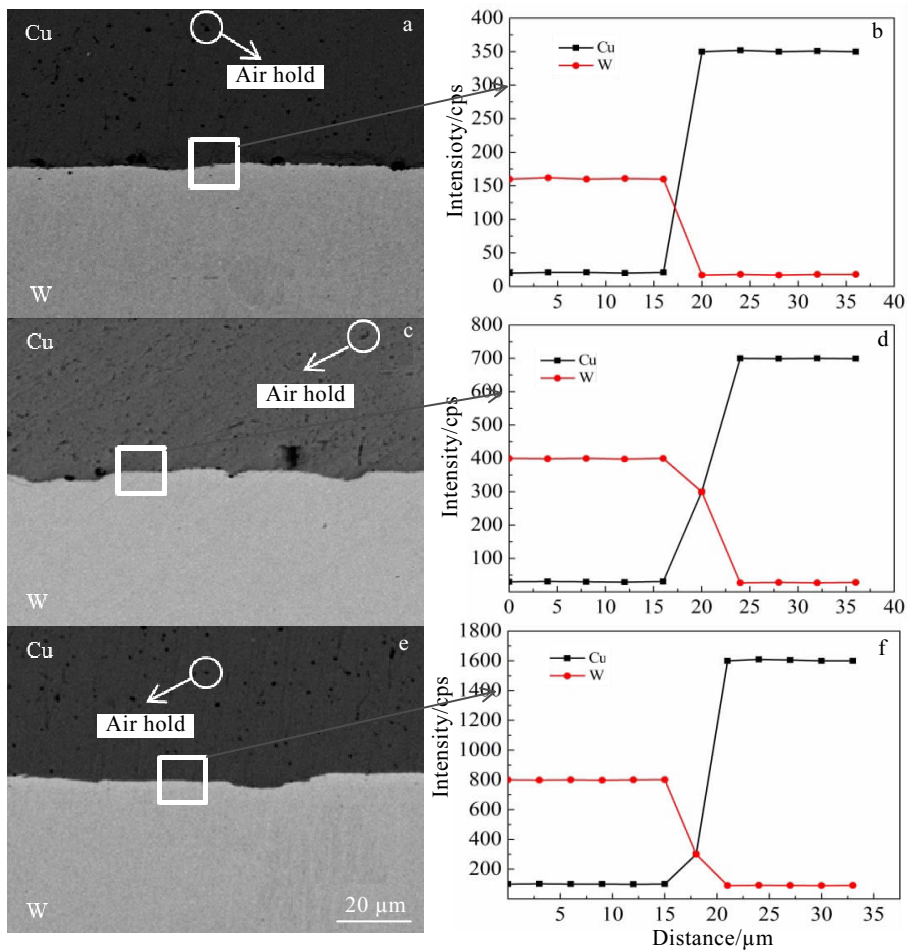


图 3 涂覆  $\text{SiO}_2$  时接头 SEM 微观形貌及相应微区的 EDS 元素线扫描

Fig.3 SEM images (a, c, e) and the corresponding EDS element line scanning (b, d, f) of the  $\text{SiO}_2$  coated joints: (a, b)  $I=110$  A, (c, d)  $I=140$ , and (e, f)  $I=170$  A

看出未涂覆 SiO<sub>2</sub> 和涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的界面微区内均发生了铜/钨的互扩散, 扩散范围约为 36 μm, 这说明铜/钨之间达到了原子间结合, 从铜/钨相图(图 4)可以看出铜/钨在液态下几乎不固溶, 也不会生成金属间化合物, 所以只是单纯的产生了原子间的扩散, 使铜原子和钨原子在基体中互扩散, 形成固溶结构, 从而达到钨/铜的冶金结合<sup>[15]</sup>。虽然实验前钨表面已经磨光, 但是微观上表面还是凹凸不平 (见图 2、图 3 中接头微观形貌), 这也有利于铜与钨形成微观表面的机械咬合, 进一步增强接头连接的可靠性。

从图 2、图 3 中接头微观形貌可以看到铜侧出现了很多微小气孔, 气孔是铜及其铜合金焊接的一个主要问题, 焊接紫铜时焊缝中的气孔主要是氢气孔, 由氢和水蒸气所引起<sup>[15,16]</sup>。铜的高温熔池有较大吸氢能力, 由于焊接过程冷却很快, 铜热导率较高, 再加上点焊时间为 4 s, 高温停留时间太短, 氢或水蒸气很容易来不及上浮而聚集形成扩散性气孔。同时高温时铜与氧有较大的亲和力而生成 CuO<sub>2</sub>, 它在凝固时不溶于铜而析出, 与 CO 或氢反应生成水蒸气和 CO<sub>2</sub>, 形成反应性气孔。

2.3 活性剂的作用及连接机理分析

为了进一步解释活性剂的作用, 采用高速摄像对电弧形态进行拍摄, 如图 5 所示, 涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的试件和未涂覆的相比, 电弧形态有显著差异, 涂覆

SiO<sub>2</sub> 活性剂的电弧下部亮度较大 (椭圆区域), 电弧有不同程度的膨胀 (由于电弧热作用, 使活性剂蒸发形成气流和等离子气流相遇导致膨胀<sup>[17]</sup>)。结合以上现象发现, 由于 TIG 焊接电弧能量分散、能量密度低、电弧力小<sup>[18]</sup>, 再加上铜的热导率很大, 所以 110 A 的电流很难实现铜/钨的连接。当涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂后改变了电弧形态, 使熔池上的阳极斑点收缩, 致使导电面积减少, 在收缩区域电流密度增加, 同时电弧压力也增大, 熔池内部金属液体流动加快加深<sup>[19,20]</sup>, 熔池中心区温度升高, 液态金属的流动使电弧热量直接传向熔池底部, 提高了熔池底部加热效率。由于铜的高

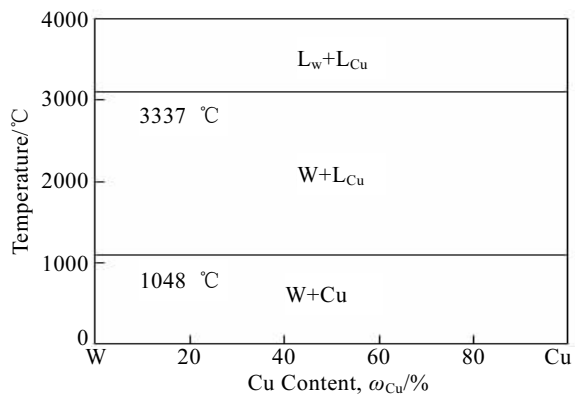


图 4 铜/钨相图

Fig.4 Phase portrait of Cu/W

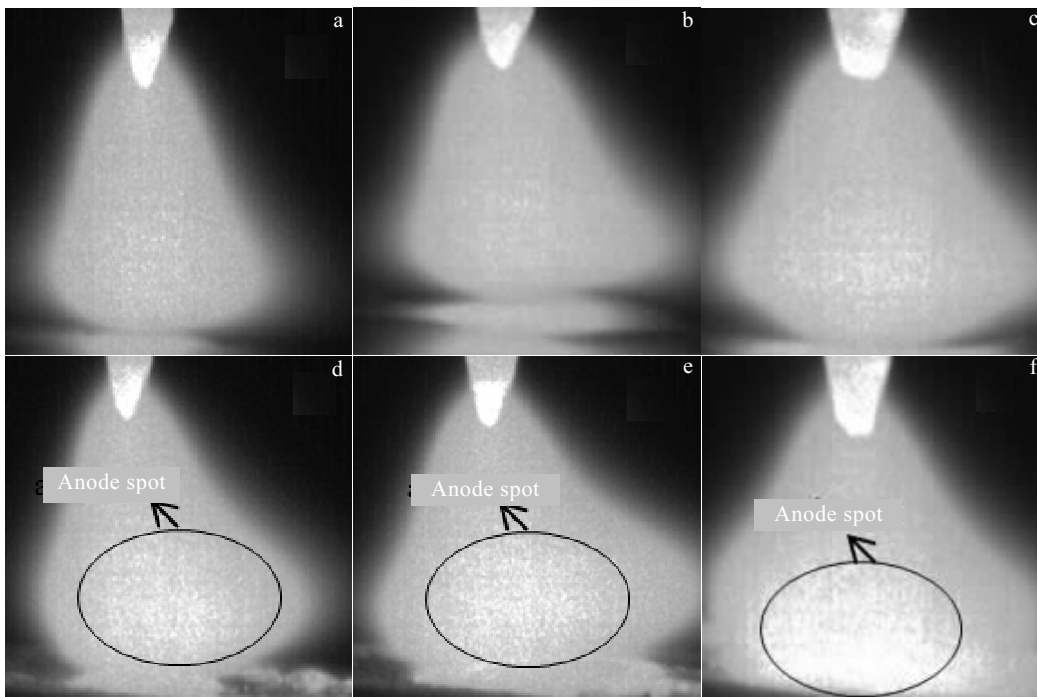


图 5 不同电流下涂覆 SiO<sub>2</sub> 前后的电弧形态

Fig.5 Form of the arc for the uncoated (a~c) and SiO<sub>2</sub> coated (d~f) samples at different currents: (a, d) 110 A; (b, e) 140 A; (c, f) 170 A

润湿性<sup>[15]</sup>，熔融的铜在未熔化的钨表面润湿扩散，2 种金属形成冶金结合，从而成功实现钨/铜连接。而且随着电流升高，阳极斑点收缩更加严重（图 5d、5e、5f），温度更高，致使焊点的圆形凹坑变深，凹陷程度增加，增强了熔池中铜液的润湿铺展，减少了界面结合处的缺陷。此外，由于活性剂的加入为熔池中引入了表面活性元素，使熔池中液态金属表面张力减小，熔池表面形成从周边向中心的 Marangoni 对流，熔池表面下凹曲率增加<sup>[17-20]</sup>，有利于铜在钨上的润湿铺展。通过以上分析表明，SiO<sub>2</sub> 活性剂的加入，可以有效改善界面结合情况，可以实现小电流下（110 A）的铜/钨异种金属焊接。

2.4 接头拉力分析

从表 2 中的拉伸结果可以看出相同电流的情况下，涂敷 SiO<sub>2</sub> 活性剂的试件比未涂覆的试件拉力值要高。涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的试件，在电流为 140 A 时拉力值最大，为 2.86 kN；当电流达到 170 A 时，拉力反而略有减小。未涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的试件，在电流为 170 A 时拉力值最大，为 1.57 kN。从图 6 可以看出，未涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂时，电流为 140 A 时从焊点处发生了剥离（图 6a），电流为 170 A 时从焊点中心处钨侧断裂（图

6b）。涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂后，电流为 110 A 时从焊点处剥离（图 6c，）电流为 140 和 170 A 时（图 6d、6e），断裂均发生在靠近焊点处钨侧的热影响区处。这说明活性剂 SiO<sub>2</sub> 的加入明显改善了铜/钨点焊接头的力学性能，在活性剂的作用下，增强了铜在钨表面的润湿铺展，使焊点结合牢靠，焊点处拉力高于靠近焊点处钨侧热影响区的拉力，由于焊接温度的原因，热影响区的基体金属因为再结晶和晶粒长大而变脆，同时高温下空气的污染（O、N）也会导致热影响区脆性增加，从而使钨侧热影响区成为接头薄弱地带<sup>[14-15,21]</sup>。当电流进一步增加达到 170 A 时，由于热输入的变化，导致焊点处钨侧热影响区脆化严重<sup>[14-16]</sup>，所以导致接头性能恶化，力学性能有所下降。

表 2 涂覆 SiO<sub>2</sub> 前后的试样在不同电流下的拉力值  
Table 2 Pull force of the samples uncoated and SiO<sub>2</sub> coated at different currents (kN)

Current/A	110	140	170
Uncoated SiO <sub>2</sub>	-	0.95	1.57
Coated SiO <sub>2</sub>	0.87	2.86	2.48

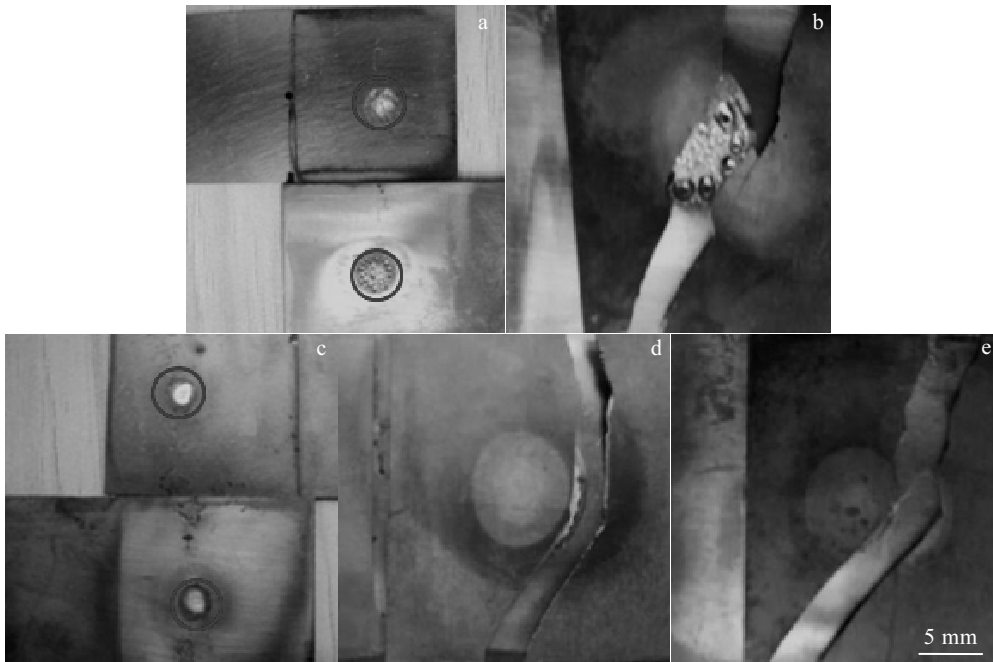


图 6 不同电流下涂覆 SiO<sub>2</sub> 前后接头的断裂位置

Fig.6 Fracture position of the uncoated (a, b) and the SiO<sub>2</sub> coated (c~e) joints at different currents: (a, d) 140 A; (b, e) 170 A; (c) 110 A

3 结 论

1) 未涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的试件焊点呈凸起状，且不规则，当电流达到 170 A 时，焊点出现了明显的缺

陷。涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的试件焊点出现了圆形凹坑，形状规则，并没有随电流增加出现缺陷。涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂后成功实现了小电流下（110 A）铜/钨的连接。

2) 未涂覆 SiO<sub>2</sub> 和涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的接头界面微

区均发生了铜/钨的互扩散, 达到了原子间结合, 涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的试件和未涂覆的相比, 界面结合更加致密, 缺陷较少。

3) 涂覆 SiO<sub>2</sub> 活性剂的试件比未涂覆的试件接头拉力要高, 接头断裂位置有明显区别。

#### 参考文献 References

- [1] Zou Guisheng(邹贵生), Zhao Wenqing(赵文庆), Wu Aiping(吴爱萍) *et al. Journal of Aeronautical Materials(航空材料学报)*[J], 2004, 24(3): 36
- [2] Jiang D F, Long J Y, Cai M Y *et al. Materials and Design*[J], 2017, 114: 185
- [3] Wu Jihong(吴继红), Zhang Fu(张 斧), Yan Jiancheng(严建成). *Welding & Joining(焊接)*[J], 2002(6): 13
- [4] Wang Qin(王 钦), Yang Fazhan(杨发展), Zhu Hailong(朱海龙) *et al. The Chinese Journal of Nonferrous Metals(中国有色金属学报)*[J], 2015, 25(2): 360
- [5] Litunovsky N, Alekseenko E, Makhankov A *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2011, 86 (9-11): 1749
- [6] Richou M, Missirlan M, Riccardi B *et al. Fusion Engineering and Design*[J], 2011, 86(9-11): 1771
- [7] Batra I S, Kale G B, Saha T K *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2004, 369(1): 119
- [8] Liu X, Lian Y, Chen L *et al. Nucl Mater*[J], 2014, 455(1): 382
- [9] Zou Guisheng(邹贵生), Wu Aiping(吴爱萍), Gao Shouchuan(高守传) *et al. New Technology & New Process(新技术新工艺)*[J], 2002(6): 40
- [10] Barabash V, Akiba M, Cardella A *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 2000, 283-287: 1248
- [11] Barabash V, Akiba M, Mazul I *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 1996, 233- 237: 718
- [12] Smida I, Akibab M, Vieiderc G *et al. Journal of Nuclear Materials*[J], 1998, s258-263(4): 160
- [13] Chen Dongliang(陈东亮), Du Yueyi(杜乐一), Wang Ying(王英) *et al. Ordnance Material Science and Engineering(兵器材料科学与工程)*[J], 2016, 39(6): 124
- [14] Howard B C. *Missile Technology Abroad(国外导弹技术)*[J], 1982(1): 59
- [15] Chen Jie(陈 杰). *Thesis for Master(硕士论文)* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2010
- [16] Li Yajiang(李亚江), Li Jianing(李嘉宁), Wang Juan(王 娟). *Nonferrous Metal Welding and Application(有色金属焊接及应用)*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015
- [17] Liu Fengyao(刘凤尧), Yang Chunli(杨春利), Lin Sanbao(林三宝) *et al. Acta Metallurgica Sinica(金属学报)*[J], 2003, 39(6): 661
- [18] Yu Randong(于然东). *Thesis for Master(硕士论文)*[D]. Jiangsu: Jiangsu University of Science and Technology, 2011
- [19] Ge Xiaoceng(葛小层). *Welding Technology(焊接技术)*[J], 2003, 32(3): 18
- [20] Liu Lei(刘 雷), Yu Zhishui(于治水), Chen Jie(陈 杰). *Journal of Shanghai University of Engineering Science(上海工程技术大学学报)*[J], 2010, 24(1): 89
- [21] Kurishital H, Arakawa H, Matsuo S *et al. Materials Transaction*[J], 2013, 54(4): 456

## Process and Performance of Cu/W Dissimilar Metal Welded by A-TIG Arc Spot Welding

Gu Yufen, Deng Zhiran, Shi Yu, Li Guang, Zhang Gang

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,  
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Dissimilar metals Cu/W were welded by Tungsten Inert Gas (TIG). In the case of coating SiO<sub>2</sub> activating flux and uncoating SiO<sub>2</sub>, the spot welding of W overlapped by Cu was conducted, and the appearance of spot welding, cross-section, microstructure and tensile strength of joints were analyzed. The results indicate that top surface of the welding spots without SiO<sub>2</sub> are convex and irregular, and there are many holes at the interface. In the case of coating SiO<sub>2</sub>, however, the center of the welding spot exhibits round pits, and the number of holes at interface declines. Interdiffusion occurs between Cu and W, and the interface of samples coated with SiO<sub>2</sub> is tighter than that of the uncoated. When the welding current is the same, the strength of SiO<sub>2</sub>-coated joint is higher than that of the uncoated. In addition, fracture appears at markedly different positions in the two cases of welding.

**Key words:** TIG spot welding; activating flux; macroscopic feature; microstructure; pull force

Corresponding author: Gu Yufen, Master, Associate Professor, College of Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, P. R. China, Tel: 0086-931-2972765, E-mail: guyf@lut.cn