

铜与不锈钢搅拌摩擦焊搭接接头的显微组织

贺地求, 徐少华, 彭建红, 汪建, 贺暑俊

(中南大学 高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 采用搅拌摩擦焊方法实现 T2 紫铜和不锈钢异种金属的焊接, 得到外观成形良好、变形小的搭接接头。通过金相、能谱扫描分析焊接接头组织。结果表明: 紫铜-不锈钢搭接接头后退侧塑性较好的紫铜金属材料从上往下流动形成层状流线, 在焊缝交界处与塑性较差的不锈钢金属材料形成具有模糊界线的区域组织; 焊核区上表面组织为细小的等轴晶, 紫铜侧组织由于受高温时间较长, 为粗大的等轴晶, 钢侧组织受搅拌针端部作用形成再结晶晶粒, 交界处出现涡流交迭形状; 前进侧有两种组织形貌, 即铜基混合条带和钢基混合条带; 紫铜-不锈钢异种材料焊接时在不锈钢侧存在搅拌头磨损后脱落的元素成分。

关键词: T2 紫铜; 不锈钢; 搅拌摩擦焊; 搭接接头; 显微组织

中图分类号: TG456.9

文献标志码: A

Microstructure of friction stir welding lap joint between pure copper and stainless steel

HE Di-qiu, XU Shao-hua, PENG Jian-hong, WANG Jian, HE Shu-jun

(State Key Laboratory of Complicated Equipment Design and Extreme Manufacturing,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The dissimilar metals of copper (T2) and stainless steel (304) were jointed by friction stir welding (FSW), and the lap joints with good appearance, small deformation were obtained. The microstructure of welded joint was studied by optical microscopy and energy disperse spectroscopy (EDS). The results show that the copper metal with good ductility of the retreating side in the lap joint flows from top to bottom, forms layered streamline. In the interfacial region, regional organizations with vague boundaries are generated with stainless steel metal, which has poor plasticity. On the surface in nugget, the organization shows fine equiaxed grain, the copper side in nugget shows coarse equiaxed grain due to the long high temperature, while the stainless steel side in nugget shows the recrystallization grains originated from the effect of the pin end, and the organization in the juncture shows eddy overlap shape. The organization in advanced side has two morphologies: hybrid striped strap based on steel and hybrid striped strap based on copper. In copper and stainless steel welding process, there are some element worn from the pin tool in the stainless steel base metal.

Key words: T2 copper; stainless steel; friction stir welding; lap joint; microstructure

紫铜是一种重要的有色金属, 它具有良好的导热性、导电性、抗磁性、常温和低温塑性。304 不锈钢是应用最为广泛的一种铬-镍不锈钢, 具有很强的耐腐蚀性, 其对碱溶液及大部分有机酸和无机酸亦具有良好的耐腐蚀能力, 而且还有良好的耐热性、低温强度

和力学性能。在很多工程结构中, 如电解锌装置中的导电头以及电渣熔铸冷凝器等均出现紫铜与不锈钢的焊接件, 这样可以同时具有不锈钢、紫铜两者的优势, 但这两种材料的焊接一直是一个难题。目前, 紫铜与不锈钢的焊接主要采用钎焊、堆焊、熔焊等焊接方

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2010CB731704)

收稿日期: 2011-08-02; 修订日期: 2011-11-15

通信作者: 贺地求, 教授, 硕士; 电话: 13974973948; Email: hdqzp@163.com

法^[1-3]。张志及等^[4]采用钨极氩弧焊方法实现了紫铜与不锈钢的焊接, 但焊接质量无法保证; 王相田和浩清勇^[5]采用氧气-乙炔焰黄铜钎焊工艺较好地实现了紫铜与不锈钢异种材料的焊接, 但此焊接方法操作难度大, 容易出现氧化铜、氧化亚铜与铜的共同体, 施焊时易出现气孔、夹杂和焊接裂纹等缺陷; 王志德^[6]采用 Z308 堆焊在不锈钢上, 再用 T107 焊接铜与纯 Ni 层, 由于 Ni 在固、液态下均能与铜无限互溶, 所以能消除 Cu 的有害作用, 有效地防止裂纹, 提高接头和力学性能, 但该焊接方法在不锈钢侧易出现缺陷, 且接头的塑、韧性较低, 成本太高^[7]。

搅拌摩擦焊(Friction stir welding, FSW)是固态扩散焊接方法, 它对材料的物理化学性能和力学性能等影响不敏感, 能较好地克服不同材料焊接性能差异带来的焊接困难。由于搅拌摩擦焊是在低于材料熔点温度下进行的, 所以能有效地避免熔化焊的一些缺陷, 减少脆性金属间化合物的形成, 比较适合异种材料的焊接^[8]。LEE 和 JUIVG^[9]研究了铜的搅拌摩擦焊接头性能; 刘小文等^[10]和王希靖等^[11]研究了紫铜-黄铜的搅拌摩擦焊; 刑丽等^[12]采用搅拌摩擦焊焊接了低碳钢与紫铜异种金属, 并对其焊缝的显微组织进行了分析; XUE 等^[13]对铝-铜异种合金的搅拌摩擦焊进行了研究^[12]; CHEN 等^[14]和沈璐等^[15]对异种材料的搅拌摩擦焊整体和局部力学性能和微观组织进行了概述。但目前还未见有紫铜与不锈钢搭接 FSW 的研究报道。本文作者对紫铜与不锈钢搭接的搅拌摩擦焊进行研究, 分析接头的显微组织, 探讨不锈钢与紫铜搭接接头的形成机制, 以期为进一步提升紫铜-不锈钢焊接件的各项性能提供研究基础。

1 实验

试验材料为 4 mm 厚的 T2 紫铜板和 1 mm 厚的 304 不锈钢板, 其化学成分如表 1 所列。在自主研发的搅拌摩擦焊机上进行 FWS 试验, 搅拌头用高温合金制成, 搅拌针为带螺纹圆台形, 焊接形式为单道搭接焊, 搅拌针从紫铜上表面插入。焊接前对表面和搭接面进行严格清理, 并采用专门设计的夹具进行有效夹紧。

焊接速度为 100 mm/min, 搅拌头旋转速度为 1 000 r/min, 搅拌头倾角为 2°。焊后沿垂直于焊缝横截面方向截取金相试样, 打磨、抛光后用三氯化铁盐酸溶液(2 g FeCl+10 mL 饱和 HCl+40 mL H₂O)分开腐蚀接头的不同部位。侵蚀时采用胶头滴管逐滴添加法

表 1 材料主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of copper (T2) and stainless steel (304)

Material	Mass fraction/%			
	Cu	Sn	Pb	Zn
Copper (T2)	≥99.90	≤0.002	≤0.005	≤0.005

Material	Mass fraction/%				
	C	Si	Mn	Cr	Ni
Stainless steel (304)	≤0.08	≤1.00	≤2.00	18	9

先侵蚀 304 不锈钢层, 并尽量避免侵蚀到紫铜侧, 然后迅速更换侵蚀液侵蚀紫铜, 待紫铜变色后立即用蒸馏水冲洗, 然后用酒精脱水吹干。用 Leica 图像分析仪观察接头不同部位的显微组织结构, 采用能谱分析仪分析接头特殊部位的元素分布。

2 结果与分析

2.1 焊缝的表面成形

图 1 所示为紫铜-不锈钢 FSW 搭接焊缝的表面形貌。从图 1 可以看出, 焊缝表面比较光滑, 在焊接过程中由于搅拌头轴肩的挤压作用, 表面形成了柔软细密的丝絮状弧形纹, 飞边较少, 焊接变形小。

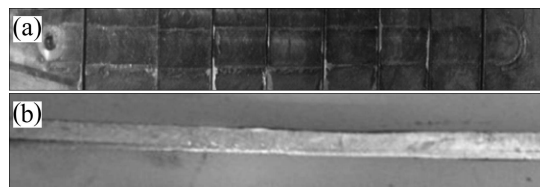


图 1 紫铜-不锈钢 FSW 焊缝的表面形貌

Fig. 1 Appearances of friction stir welded seam of pure copper-stainless steel: (a) Top side; (b) Flank side

采用光学显微镜观察焊缝横截面的宏观形貌, 结果如图 2 所示, 其中上部为紫铜, 下部为不锈钢。从图 2 可以看出, 焊缝交界处发生了有效致密的结合。后退侧有明显的层状流线从上往下延伸至交界处; 焊核区交界部分出现塑性涡流状交迭形貌; 前进侧是黑白相间的“火炬”状金属流。为了以后分析方便, 在此将前进侧、焊核区、后退侧分别标记为 A 区域、B 区域和 C 区域。并将不锈钢侧交界处标记为 D 区域, 各区域如图 2 所示。

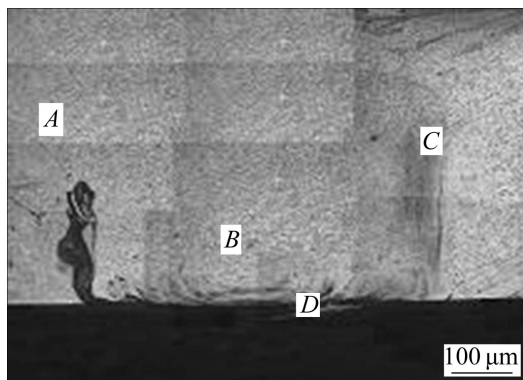


图 2 紫铜-不锈钢 FSW 接头的截面宏观形貌

Fig. 2 Macroscopic overview of cross-section in pure copper-stainless steel FSW joint

2.2 焊缝的显微组织

图 3 所示为紫铜-不锈钢 FSW 接头不锈钢母材

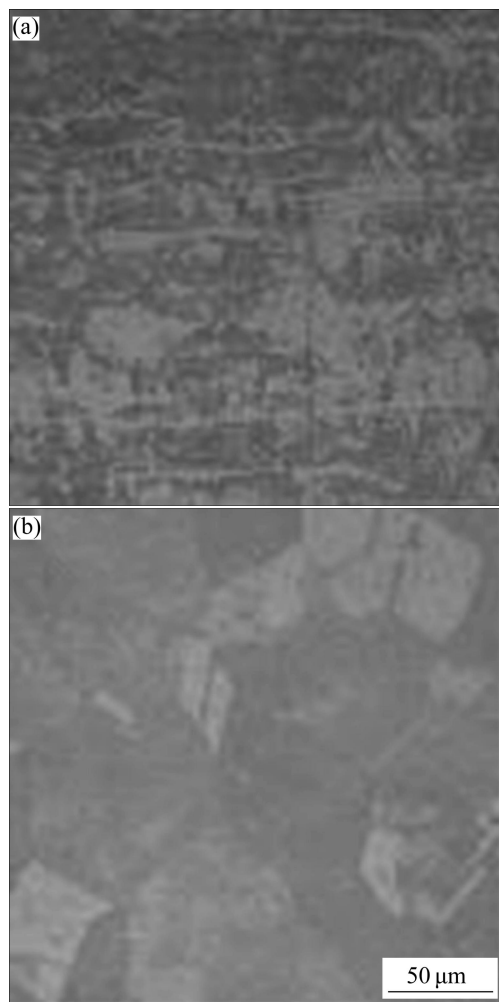


图 3 紫铜-不锈钢 FSW 接头母材的微观组织

Fig. 3 Microstructures of base metals in pure copper-stainless steel FSW joint: (a) Stainless steel; (b) Pure copper

和紫铜母材金相组织。从图 3 可以看出, 不锈钢母材为奥氏体组织, 并且受到明显的挤压成型作用, 晶粒拉长; 紫铜母材组织晶粒粗大, 由于其母材的层错能较低, 所以存在孪晶组织。

2.2.1 前进侧的显微组织

前进侧(A 区域)显微组织如图 4 所示。从图 4 可以看出, 前进侧出现了火炬状流线, 钢侧金属在剧烈的搅拌剪切作用下, 处于“黏稠状态”被拉伸入铜基母材内部, 并且在 1.5 mm 左右位置, 铜基母材的阻力与搅拌作用力达到平衡, 钢基金属材料停止向上流动, 与铜基金属材料形成了两种组织形貌: 铜基混合条带和钢基混合条带。条带的宽窄不一, 黑白相间, 白色条带为铜基混合条带, 铜和钢形成了均匀的混合物, 为细小的等轴晶, 黑色条带则为钢基混合条带, 在后面的能谱实验中还会进行分析。

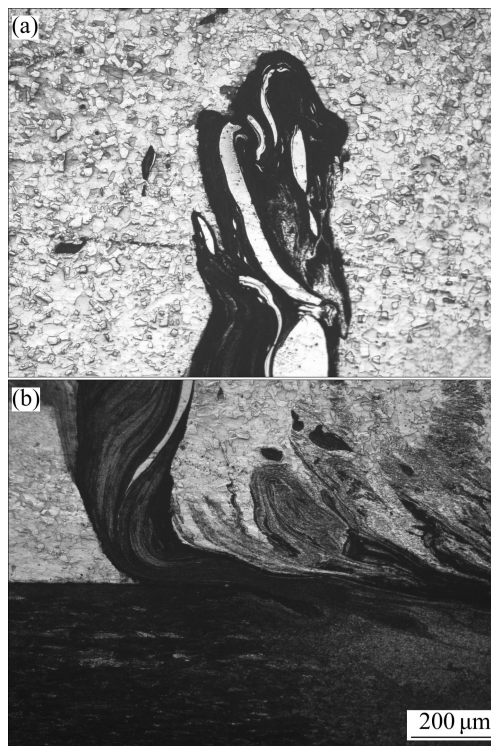


图 4 紫铜-不锈钢 FSW 接头前进侧的显微组织

Fig. 4 Microstructures of advanced side of pure copper-stainless steel FSW joint: (a) Central organization; (b) Junction organization

2.2.2 焊核区的显微组织

焊核区(B 区域)从上到下可以分为 4 个区域: 轴肩挤压区、焊核区铜侧、交界区、焊核区钢侧。各区域的显微组织分别如图 5(a)~(d)所示。由图 5 可以看出, 轴肩挤压区在轴肩剧烈的作用下, 材料发生了强烈的挤压变形, 组织破碎完全, 形成了非常细小的等

轴晶粒; 焊核区铜侧晶粒出现长大现象。这是因为紫铜与不锈钢的热传导系数相差很大, 紫铜的导热系数高, 大量的热从紫铜一侧传递出去, 而在焊缝的交界处, 不锈钢的导热系数低, 导致上侧紫铜区域高温停留时间长, 紫铜晶粒长大为粗大的等轴晶。在焊核区的交界处, 犬牙交错漩涡状流线由中心焊核向左右两边均势扩展, 且呈现出明显的洋葱头样特征。这是不锈钢板的“硬壁效应”致使材料流动受阻形成的; 焊核区铜侧直接受到搅拌针端部的摩擦搅拌作用, 焊头与不锈钢板“硬碰”产生高温, 晶粒大量破碎并发生再结晶, 晶粒非常细小, 与不锈钢母材形成了明显的界限。不锈钢和紫铜在交界处形成的混合条带, 条带颜色深浅不一, 白色条带以紫铜母材金属为主, 均匀混合了不锈钢金属材料, 黑色条带则是不锈钢基材料中均匀混合了紫铜金属材料; 两种材料间发生了充分的混合, 形成了可靠的连接。

2.2.3 后退侧的显微组织

后退侧(C 区域)的显微组织如图 6 所示。从图 6 可以看出, 后退侧组织非常细小, 形成了明显的层状流线, 层与层之间有明显的塑性剪切变形痕迹, 这种层状流线与焊缝右侧金属的流动方向吻合。由于搅拌针带有螺纹, 所以在焊接过程中焊缝右侧金属受到从上往下的挤压力和搅拌针的高速搅拌力。在机械力和

温度场的作用下, 焊缝右侧搅拌区金属剧烈破碎并从上向下流动, 与未被搅拌区域的母材热状态不同, 形成明显界限。塑性较好的紫铜金属流在交界处带动塑性化程度较差的不锈钢金属, 一部分以条带状延伸至不锈钢侧, 形成相互交错的具有模糊界线的区域组织; 另一部分形成深入铜材中的火炬状混合条带, 提高了连接强度。

2.3 焊缝的能谱分析

为了分析焊缝的元素分布, 选取两个典型区域分别进行能谱分析, 具体位置如图 7 所示, 其中图 7(a)、(b)分别对应图 2 中的 A 区域、D 区域, 其结果如表 2 所列。如图 7(a)所示, A 区域中有明显的黑白相间的混合条带。其中区域 5 为紫铜的母材, 其中含有微量的 Fe 元素; 区域 1、2、3 和 4 均含有紫铜和不锈钢基体的元素成分, 但其摩尔比各不相同。区域 1、3 中不锈钢基体成分占多数, 不锈钢基体成分与 Cu 的摩尔比接近 9:1; 区域 2 中 Cu 的摩尔分数超过 60%, 不锈钢基体成分与 Cu 的摩尔比接近 2:3; 区域 4 中不锈钢基体成分与 Cu 的摩尔比接近 2:1。因此, 该区域可能是 Fe-Cu-Cr-Ni 金属间化合物和紫铜母材、不锈钢母材的混合物, 其中白色条带为 Fe-Cu-Cr-Ni 金属间化合物和紫铜母材的混合物, 黑色条带为 Fe-Cu-Cr-Ni

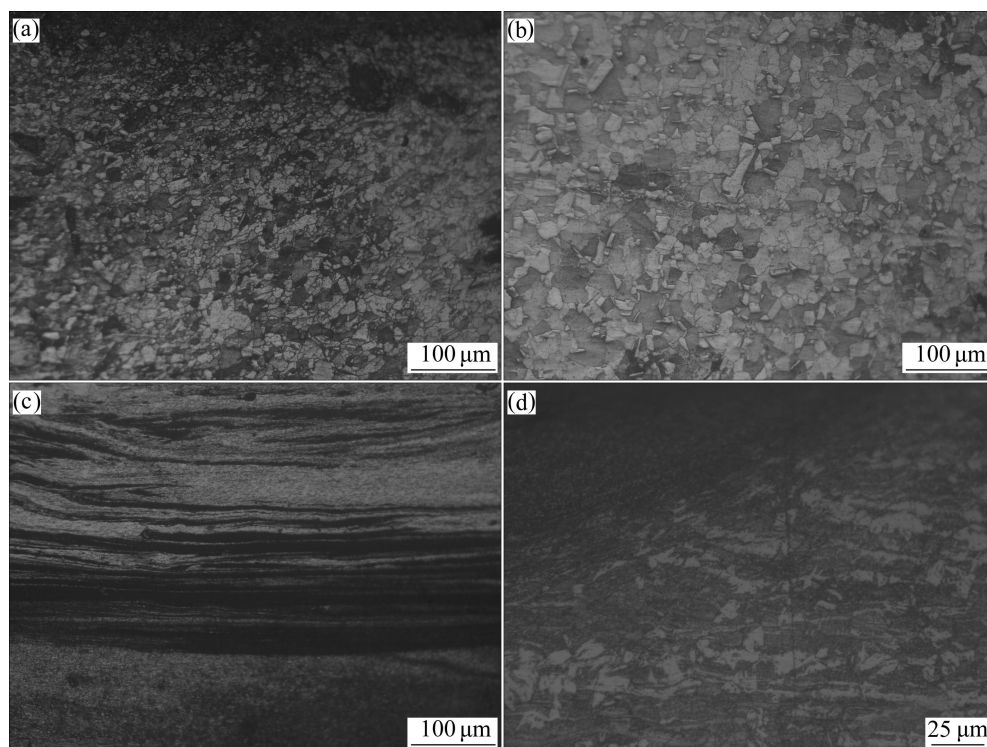


图 5 紫铜-不锈钢 FSW 接头焊核区的显微组织

Fig. 5 Microstructures of center zone of pure copper-stainless steel FSW joint: (a) Squeeze shoulder area; (b) Copper side of center zone; (c) Junction area; (d) Stainless steel side of center zone

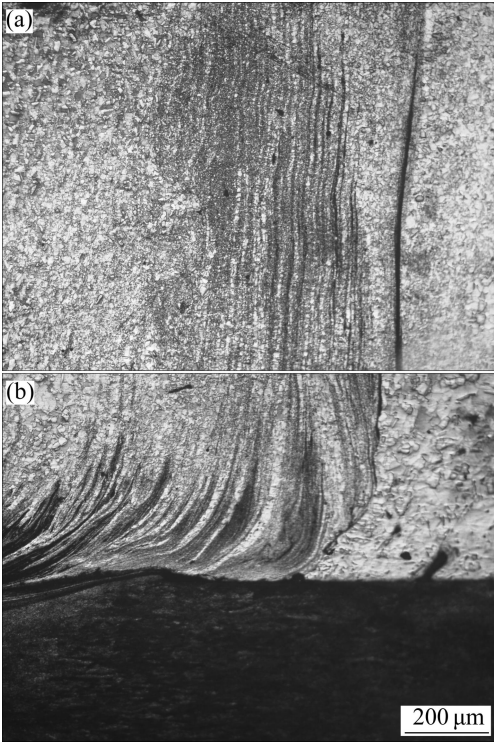


图 6 紫铜-不锈钢 FSW 接头后退侧的显微组织

Fig. 6 Microstructures of retreating side of pure copper-stainless steel FSW joint: (a) Central organization; (b) Junction organization

金属间化合物和不锈钢母材的混合物。如图 7(b)所示, *D* 区域中没有发现 Cu 元素, 这说明在焊接过程中, Cu 元素并有扩散到该区域。区域 8 的成分为不锈钢母材成分; 区域 6 和 7 为成分偏析区, 出现 Co、W、Mo、Ti、Ni 等元素成分, 这与搅拌头所用的高温合金材料的成分接近。因此, 该区域含有搅拌头磨损后的元素成分, 说明进行紫铜-不锈钢异种材料焊接时, 搅拌头会出现一定程度的磨损。此外, 在能谱分析中,

表 2 紫铜-不锈钢 FSW 接头不同位置的元素含量

Table 2 Chemical composition of different zones in copper-stainless steel FSW joint

Zone No.	Mole fraction/%								
	Cu	Ni	Fe	Cr	Co	Mo	W	Ti	Mn
1	10.97	10.55	58.37	16.57	—	1.11	0.77	0.33	1.33
2	61.04	3.52	25.87	7.33	—	0.66	0.54	0.25	0.79
3	6.82	9.80	62.59	17.52	—	0.85	0.78	0.26	1.38
4	34.71	6.42	44.27	12.14	—	0.54	0.85	0.09	0.98
5	95.19	0.32	2.33	0.71	—	—	1.35	0.03	0.07
6	—	22.80	45.98	18.39	4.02	4.413	2.50	1.17	1.01
7	—	51.50	1.64	18.93	10.70	9.36	4.53	3.21	0.13
8	—	7.27	71.31	18.47	0.70	0.39	0.41	0.02	1.43

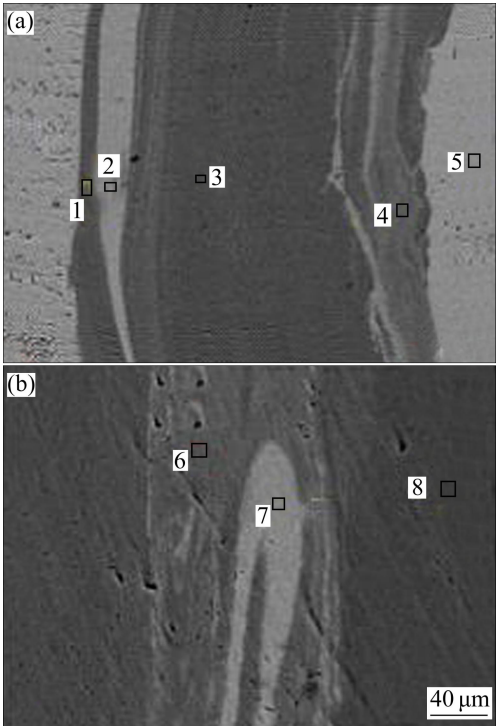


图 7 紫铜-不锈钢 FSW 接头的 SEM 像

Fig. 7 SEM images of pure copper-stainless steel FSW joint: (a) Copper side; (b) Stainless steel side

没有发现 O 元素的存在, 这说明利用搅拌摩擦焊焊接紫铜与不锈钢可以有效地避免紫铜氧化所带来的各种缺陷。

3 结论

1) 采用搅拌摩擦焊方法进行紫铜与不锈钢搭接焊是可行的, 得到了表面成形良好、变形小的搭接接

头。

2) 接头金属材料从后退侧流向前进侧,形成了明显的层状流线,并且在前进侧形成了两种组织形貌:铜基混合条带和钢基混合条带。焊核区从上往下依次形成了细小的等轴晶、粗大的等轴晶和再结晶晶粒,在交界处形成了涡流状交迭形貌。

3) 进行紫铜-不锈钢异种材料焊接时,在不锈钢侧存在搅拌头磨损后脱落的元素成分。

REFERENCES

- [1] 中国焊接学会. 焊接手册(第2卷)[M]. 北京:机械工业出版社, 1992
Chinese Welding Society. Welding manual(Volume 2)[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1992
- [2] 刘中青. 异种材料的焊接[M]. 北京:科学出版社, 1990: 76-83
LIU Zhong-qing. Welding dissimilar materials [M]. Beijing: Science Press, 1990: 76-83.
- [3] 周振丰. 焊接冶金与金属焊接[M]. 北京:机械工业出版社, 1988.
ZHOU Zhen-feng. Welding metallurgy and welding of metal [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 1988.
- [4] 张志及, 纪花, 邵文明. 铜与不锈钢的氩弧焊接的显微组织分析[J]. 机械工程与自动化, 2010, 10(5): 95-96.
ZHANG Zhi-ji, JI Hua, SHAO Wen-ming. Microstructure analysis of argon arc welding joints of copper and stainless steel [J]. Mechanical Engineering and Automation, 2010, 10(5): 95-96.
- [5] 王相田, 浩清勇. 紫铜和不锈钢的焊接[J]. 煤炭技术, 2002, 6: 53-54.
WANG Xiang-tian, HAO Qing-yong. Welding red copper on stainless steel [J]. Coal Technology, 2002, 6: 53-54.
- [6] 王志德. 采用过渡层法焊接不锈钢与紫铜[J]. 焊接技术, 1979, 1: 28-32.
WANG Zhi-de. Welding stainless steel with copper by interlayer method [J]. Welding Technology, 1979, 1: 28-32.
- [7] 吕念春, 牛济泰, 国旭明. 紫铜与不锈钢的焊接[J]. 材料科学与工艺, 2000, 8(2): 46-50.
LÜ Lian-chun, NIU Ji-tai, GUO Xu-ming. Welding red copper on stainless steel [J]. Materials Science and Technology, 2000, 8(2): 46-50.
- [8] 陈玉华, 董春林, 倪泉, 柯黎明. 钛合金/铝合金搅拌摩擦焊接头的显微组织[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(1): 211-214.
CHEN Yu-hua, DONG Chun-lin, NI Quan, KE Li-ming. Microstructure of friction stir welding joint between titanium and aluminum dissimilar alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(1): 211-214.
- [9] LEE W B, JUNG S B. The joint properties of copper by friction stir welding [J]. Materials Letters, 2004, 58(6): 1041-1046.
- [10] 刘小文, 杨宁宁, 穆耀钊. 紫铜-黄铜搅拌摩擦焊接头的组织与力学性能[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(5): 700-704.
LIU Xiao-wen, YANG Ning-ning, MU Yao-zhao. Microstructure and mechanical properties of friction-stir welded joint of pure copper to brass [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(5): 700-704.
- [11] 王希靖, 达朝炳, 李晶. T2紫铜与H62黄铜异种材料间的搅拌摩擦焊工艺研究[J]. 兰州理工大学学报, 2007, 33(1): 29-33.
WANG Xi-jing, DA Zhao-bing, LI Jing. Investigation of the technology of friction-stir welding for dissimilar materials of T2 copper to H62 brass [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2007, 33(1): 29-33.
- [12] 刑丽, 李磊, 柯黎明. 低碳钢与紫铜搅拌摩擦焊接头显微组织分析[J]. 焊接学报, 2007, 28(2): 17-20.
XING Li, LI Lei, KE Li-ming. Microstructural investigation on friction stir welds of dissimilar metals between mild steel and copper [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2007, 28(2): 17-20.
- [13] XUE P, XIAO B L, NI D R, MA Z Y. Enhanced mechanical properties of friction stir welded dissimilar Al-Cu joint by intermetallic compounds [J]. Materials Science and Engineering A, 2010: 5723-5727.
- [14] CHEN A A Z, JOS S, RINZE B. Global and local mechanical properties and microstructure of friction stir welds with dissimilar materials and/or thicknesses [J]. Materials and Materials Transactions A, 2010: 3365-3378.
- [15] 沈璐, 陈影, 葛继平, 沈长斌. 异种金属材料搅拌摩擦焊的研究现状及展望[J]. 电焊机, 2010, 40(6): 53-56.
SHEN Lu, CHEN Ying, GE Ji-ping, SHEN Chang-bin. Research status and prospect on friction stir welding of dissimilar metals [J]. Electric Welding Machine, 2010, 40(6): 53-56.

(编辑 何学锋)