

C18000 铜合金激光焊缝组织和力学性能

祁小勇^{1,2}, 张 威^{1,2}, 余世文^{1,2}, 叶 兵^{1,2}, 王爱华^{1,2}

¹激光先进制造技术湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430223;

²武汉华工激光工程有限责任公司, 湖北 武汉 430223

摘要 对 3 mm 厚的 C18000 铜合金板分别进行了激光焊接和激光填丝焊接研究, 重点分析了焊缝的组织、成分和力学性能。结果表明, 直接采用激光焊接时, 焊缝出现了晶粒长大的现象, 显微硬度为 90 HV, 强度仅为 313 MPa; 采用 ERNiCu-7 焊丝进行激光填丝焊时, 焊缝内 Ni 的质量分数自上而下从 31% 降至 10%, 焊缝组织为单相固溶体, 显微硬度提高到 130~180 HV, 强度提高到 391 MPa, 性能优于直接激光焊接的。

关键词 激光技术; 激光焊接; 光纤激光填丝焊接; C18000 铜合金; 组织; 力学性能

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.071405

Microstructure and Mechanical Property of Laser Weld of C18000 Copper Alloy

Qi Xiaoyong^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}, Yu Shiwen^{1,2}, Ye Bing^{1,2}, Wang Aihua^{1,2}

¹Hubei Province Key Laboratory of Laser Advanced Manufacturing Technology, Wuhan, Hubei 430223, China;

²Wuhan Huagong Laser Engineering Limited Liability Company, Wuhan, Hubei 430223, China

Abstract The research on laser welding and laser welding with filler wires of 3-mm thick C18000 copper alloy plates is conducted. The microstructures, compositions and mechanical property of welds are analyzed emphatically. The results show that, in the case of direct laser welding, the growth of weld grains appears, the weld microhardness is 90 HV, and the weld strength is only 313 MPa. While in the case of laser welding with ERNiCu-7 filler wires, the mass fraction of Ni from top to bottom of the welds drops from 31% to 10%, the weld structure is single-phase solid solution, the weld microhardness increases to 130-180 HV, and the weld strength increases to 391 MPa. These performances are superior to those for the direct laser welding.

Key words laser technique; laser welding; optical fiber laser welding with filler wire; C18000 copper alloy; microstructure; mechanical property

OCIS codes 140.3390; 160.3900

1 引 言

纯铜具有良好的导电性、导热性、焊接性等优点, 因而被广泛应用于导电、导热器材制造等领域。在集成电路制造领域中, 引线框架、连铸结晶器、电火花电阻焊电极、高强导线以及一些电子电器设备所使用的铜合金材料除了需要具有优良的导电性, 还需要具有较高的强度, 以保证零件长期运行的稳定性。纯铜在软态时强度较低, 虽然可以靠冷加工提升强度, 但该工艺会影响工件的塑性。

高强高导铜合金^[1-4]作为一种新型铜合金材料, 除了具有较高的强度、良好的塑性、优良的导电性, 还具有抗氧化、抗应力松弛、抗蠕变, 抗应力腐蚀、抗疲劳、无氢脆等特点。在尽量不降低导电性的前提下, 高强高

收稿日期: 2017-01-22; 收到修改稿日期: 2017-02-09

作者简介: 祁小勇(1987—), 男, 本科, 工程师, 主要从事激光焊接技术及其工程应用方面的研究。

E-mail: qxy52160@126.com

导铜合金提高了铜合金的强度。其制备方法分合金化法与复合材料法两大类,具体包括形变强化、固溶强化、时效强化、沉淀强化、细晶强化、纤维复合强化等。因为固溶元素会使合金的导电、导热性大幅度下降,所以固溶强化法受到了限制;沉淀强化法先对工件进行高温固溶处理,随后进行时效强化,固溶在铜基体中的合金元素呈弥散相析出,工件强度得到提升,同时导电、导热性得到恢复,因此,制备高强高导铜合金的主要途径是时效强化^[5-6]。目前,高性能时效强化铜合金主要包括 Cu-Zr 系、Cu-Cr 系、Cu-Cd 系、Cu-Ni 系、Cu-Fe 系、Cu-Mg 系、Cu-Nb 系等。该类材料在进行焊接时,由于焊接工艺较简单^[7-8],析出项(如 Ni₂Si、Cr₃Si、Cr₂Zr 等)再次固溶到 Cu 基体中,导致基体强度损失较大,这制约了该类材料在很多领域(如结构件制造)的应用。

贺地球等^[9-10]采用搅拌摩擦焊对 20 mm 厚的铬锆铜进行了对接焊接,获得了内部无缺陷的焊缝,接头抗拉强度可达 261 MPa,焊缝硬度为 90 HV;戴安伦等^[11]对搅拌摩擦焊后的高强高导铜合金焊缝进行了时效处理,焊缝强度可达 400 MPa,焊缝硬度为 131 HV;王知等^[12]对钨极稀有气体保护焊后的铬锆铜焊缝进行了 980 °C 时效及 450 °C 时效处理,焊缝性能基本能达到母材水平。时效强化高强高导铜合金的焊接与时效强化铝合金的焊接相类似^[13-15],无论是采用搅拌摩擦焊还是钨极稀有气体保护焊,焊缝强度均较低;特别是稍大的结构件,若焊后进行时效处理,虽然焊缝强度有所回升,但可能导致母材强度下降。激光焊具有高能、高效的优点,可有效减小热影响;利用激光填丝焊接对焊缝进行改性,可实现大范围的三维柔性加工,受环境影响较小。

本文采用激光焊与激光填丝焊两种方法,分别对 3 mm 厚的 C18000 铜镍硅系高强高导铜合金进行焊接实验,对焊缝组织及力学性能进行检测,以期获得较高强度的焊缝。

2 实验设备、材料及方法

2.1 实验设备

实验采用多功能激光焊接平台,如图 1 所示,德国 IPG 公司生产的 YLS-10000 光纤激光器的输出波长为 1080 nm,光纤芯径为 200 μm ,输出功率为 10^4 W;德国普雷茨特公司生产的 YW52 焊接头输出的聚焦光斑直径为 0.5 mm;平台还包括奥地利 Fronius 公司生产的 VR1500 送丝机与德国 Kuka 公司生产的 KR60HA 运动机器人。

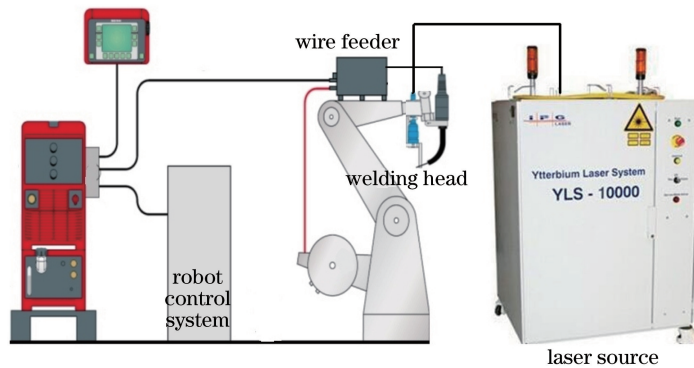


图 1 实验装置

Fig. 1 Experimental setup

2.2 实验材料

实验采用 3 mm 厚的 C18000 铜合金板料,材料冷拉成型,热处理工艺为 900 °C 固溶处理与 450 °C 时效处理,基材微观组织如图 2 所示,成分见表 1,抗拉强度为 700 MPa。激光填丝焊采用美国 SMC 公司生产的 ERNiCu-7 焊丝,其直径为 1.2 mm,成分见表 2。

表 1 C18000 铜合金化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of C18000 copper alloy (mass fraction, %)

Composition	Ni	Cr	Si	Fe	Cu
Value	1.8-3.0	0.1-0.8	0.4-0.8	≤0.15	Bal.

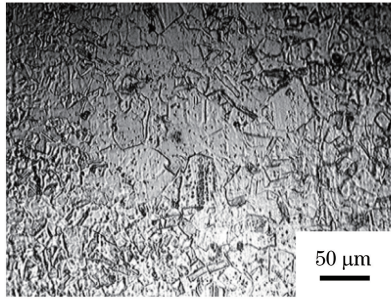


图 2 基材微观组织

Fig. 2 Microstructure of base metal

表 2 ERNiCu-7 焊丝成分(质量分数,%)

Table 2 Chemical compositions of ERNiCu-7 welding wire (mass fraction, %)

Composition	Cu	Mn	Fe	Ti	Si	Al	Other	Ni
Value	28.2	3.35	0.15	2.25	0.34	0.1	<0.5	Bal.

2.3 实验方法

2.3.1 焊接方法

将 3 mm 厚的 C18000 铜合金板材切割为 100 mm×100 mm 的标准试板,采用机械打磨的方式去除板材表面及切口处的氧化皮,然后用丙酮清洗板材以去除其表面油污。将清理好的板材装夹在拼焊夹具上,检查拼缝质量,令拼缝间隙小于 0.1 mm,错边量小于 0.1 mm。优化后的焊接参数见表 3,采用该参数分别进行激光焊接与激光填丝焊接。焊后对焊缝的微观组织及力学性能进行分析。

表 3 焊接参数

Table 3 Welding parameters

Method	Power /W	Speed / (mm·s ⁻¹)	Defocusing / mm	Feed speed / (m·min ⁻¹)	Flow of Ar / (L·min ⁻¹)
Laser welding	5000	40	+1		20
Laser welding with filler wire	5500	40	+5	2.5	20

2.3.2 检测方法

按图 3 所示的尺寸进行金相试样及拉伸试样的取样。

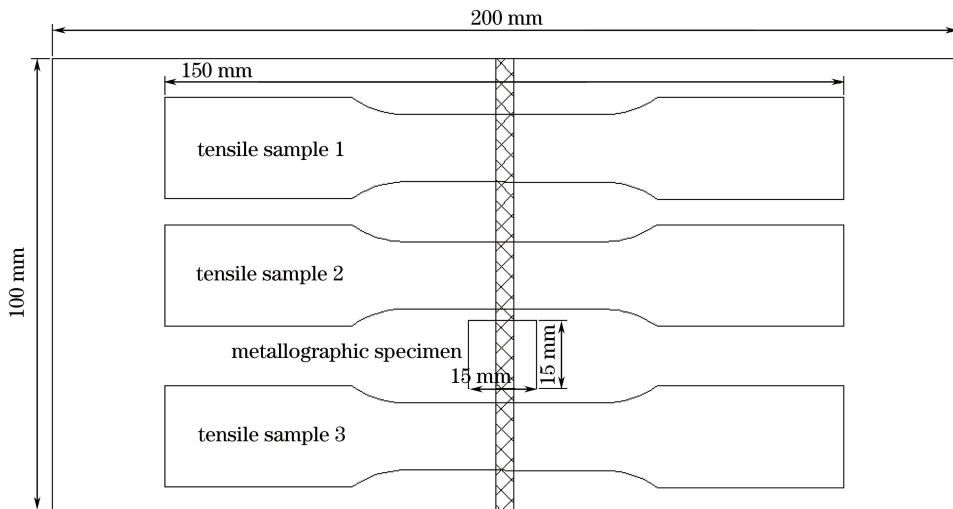


图 3 焊接件取样示意图

Fig. 3 Schematic diagram of welding piece sampling

将金相试样镶嵌后磨抛,采用氯化铁与盐酸的混合水溶液对其进行腐蚀。在便携式电子显微镜下对焊缝截面形貌进行观察,检测焊缝内部是否存在缺陷;采用金相显微镜分析焊缝各区域的组织形态,采用显微硬度计测量各区域显微硬度;采用X射线衍射(XRD)仪测定焊缝物相组成,采用能谱仪(EDS)测量焊缝中部区域成分;采用电子万能试验机对拉伸试样进行拉伸试验,测量焊缝抗拉强度,并分析试样断裂位置。

3 结果与分析

3.1 焊接接头显微组织及成分

图4所示为两类焊缝截面形貌,可以看出,激光焊与激光填丝焊均获得了良好的焊接效果,焊缝饱满,内部无气孔、裂纹等不良缺陷,但后者的焊缝接头形貌明显不同于前者的。对两类焊缝接头进行金相分析,采用EDS对激光填丝焊的焊缝不同区域成分进行分析,结果如图5~7及表4所示。

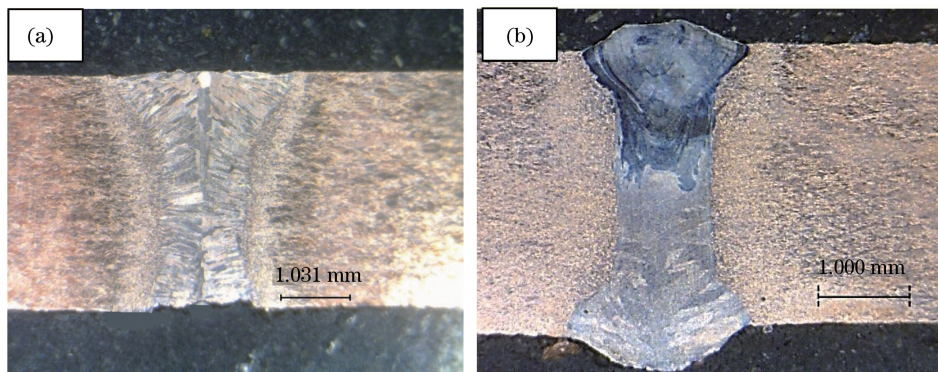


图4 焊缝截面形貌。(a)激光焊;(b)激光填丝焊

Fig. 4 Cross-sectional morphologies of welds. (a) Laser welding; (b) laser welding with filler wire

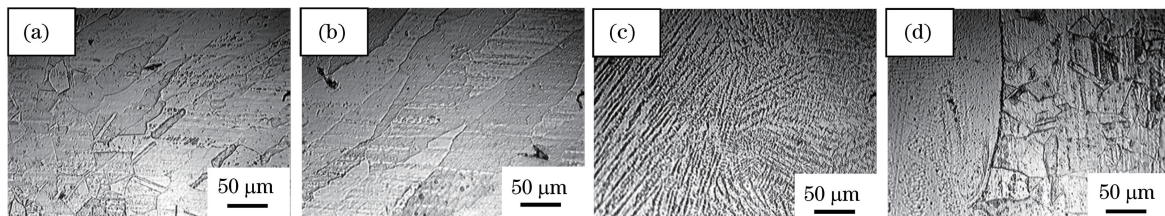


图5 焊缝金相组织形貌。(a)激光焊熔合区;(b)激光焊焊缝区;(c)激光填丝焊焊缝区;(d)激光填丝焊熔合区

Fig. 5 Metallographic morphologies of welds. (a) Fused zone by laser welding; (b) weld zone by laser welding; (c) weld zone by laser welding with filler wire; (d) fused zone by laser welding with filler wire

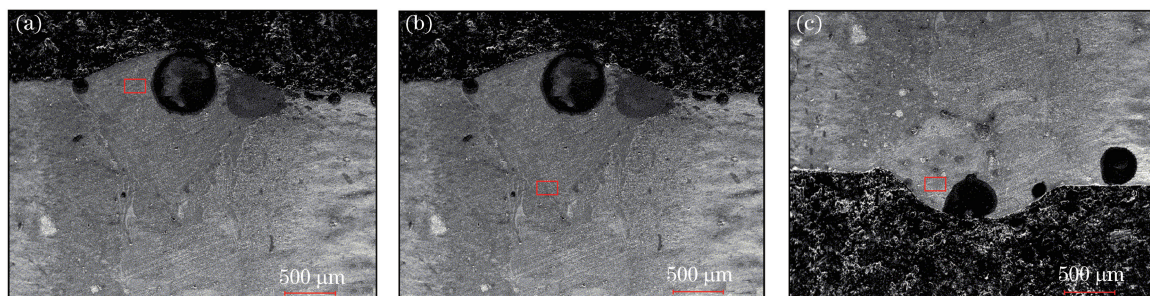


图6 激光填丝焊焊缝形貌。(a)上部;(b)中部;(c)底部

Fig. 6 Morphologies of welds by laser welding with filler wire. (a) Top; (b) middle; (c) bottom

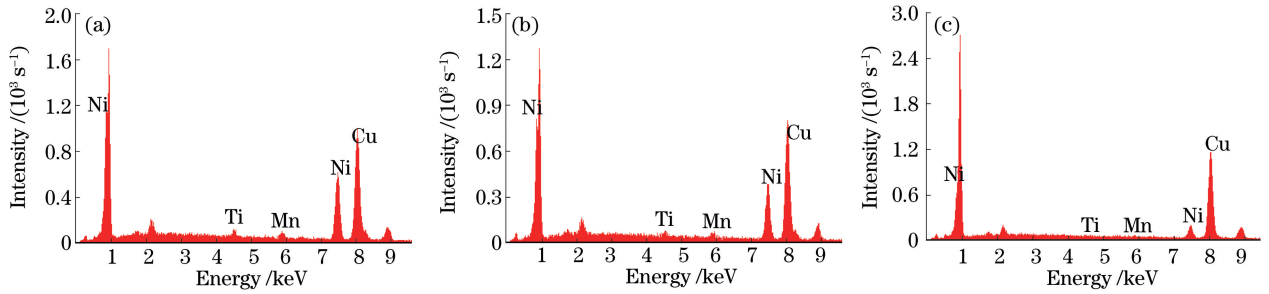


图7 激光填丝焊焊缝 EDS 结果。(a)上部;(b)中部;(c)底部

Fig. 7 EDS results of welds by laser welding with filler wire. (a) Top; (b) middle; (c) bottom

表4 激光填丝焊焊缝的各区域成分

Table 4 Components at different zones of welds by laser welding with filler wire

Position	Element	Mass fraction / %	Atomic fraction / %
Top	TiK	1.24	1.59
	MnK	1.66	1.86
	NiK	31.76	33.28
	CuK	65.34	63.27
Middle	TiK	1.02	1.31
	MnK	1.49	1.67
	NiK	27.36	28.80
	CuK	70.13	68.21
Bottom	TiK	0.37	0.48
	MnK	0.63	0.72
	NiK	10.38	11.11
	CuK	88.63	87.69

从图5可以看出,激光焊的焊缝组织粗大,呈现出明显的再结晶特点,两侧呈对称生长;由于焊丝的加入,激光填丝焊的焊缝组织均匀细小。两者的热影响区均未见明显的晶粒长大。由图6、7及表4可知,焊缝上部Ni元素质量分数约为31%,中部约为27%,底部约为10%,熔池的流动导致了焊缝从上而下成分的变化,同时也导致了激光填丝焊的焊缝从上而下显微组织的差异化,宏观表现为焊缝截面颜色的变化。

3.2 激光填丝焊的焊接接头 XRD 分析结果

激光填丝焊的焊接接头 XRD 图谱如图8所示,其中 2θ 为衍射角。将测试所得图谱与标准卡片相对比,可知该图谱与纯铜的衍射图谱最为相近,即两个区域均为单相组织,这说明焊丝与母材发生了有效的互溶,形成了Ni与Cu的固溶体。激光填丝焊的焊缝组织为单一相,热影响区也是单一相,这是因为基材本身合金元素含量较低,析出的第二相的数量较少,未能被有效检测出。

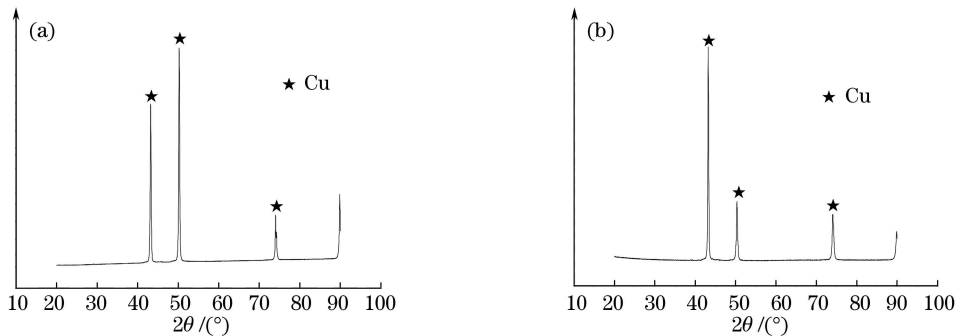


图8 XRD 图谱。(a)焊缝;(b)热影响区

Fig. 8 XRD patterns. (a) Weld; (b) heat-affected zone

3.3 焊接接头显微硬度分析

按图 9 所示的方式,分别对 $P_1 \sim P_4$ 四处的显微硬度进行测量,结果如图 10 所示。

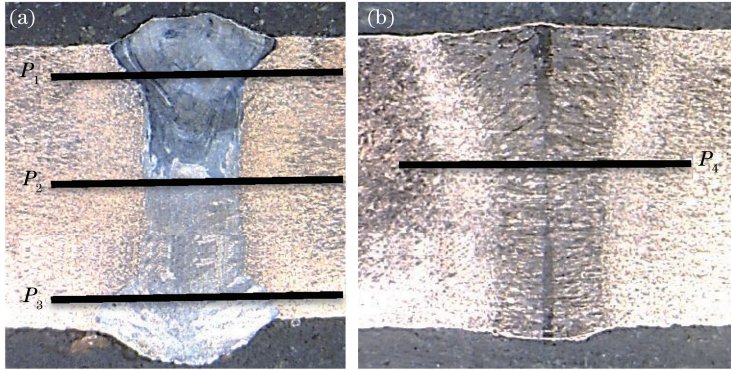


图 9 显微硬度测量示意图。(a)激光填丝焊;(b)激光焊

Fig. 9 Schematic diagram of microhardness measurement. (a) Laser welding with filler wire; (b) laser welding

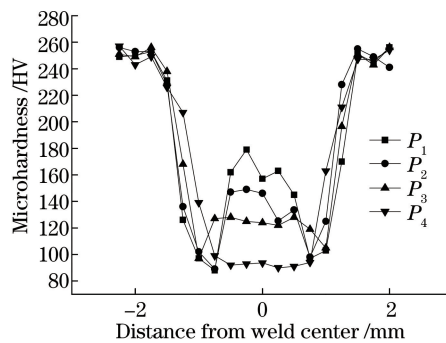


图 10 显微硬度曲线

Fig. 10 Microhardness curves

从图 10 可以看出,激光焊的焊缝硬度较低,仅为 90 HV,低硬度区域宽度约为 2 mm,当偏离焊缝中心的距离大于 1 mm 时,焊缝硬度逐渐上升;因为激光填丝焊的焊缝接头成分存在从上而下的差异,所以显微硬度也有所不同,上部 Ni 含量高的区域硬度可达 170 HV 以上,中部的约为 150 HV,底部 Ni 含量较低的区域硬度仅为 130 HV。两者热影响区的硬度均较低,约为 110 HV。

C18000 铜合金为时效强化铜合金,进行时效处理时,从过饱和固溶体中析出的 Cr 与 Ni_2Si 相弥散分布在基体中形成沉淀相,从而能有效阻止组织晶界和位错的移动,提高铜合金的强度;随着时效处理时间的延长,两种沉淀相长大,强度进一步得到提升。当采用激光焊接时,焊缝区域重熔,析出相固溶到 Cu 原子中形成过饱和固溶体,焊缝塑性提高,但硬度降低;添加 ERNiCu-7 焊丝进行焊接时,添加的 Ni 元素与 Cu 形成单相固溶体,由于 Ni 元素的含量较高,其固溶强化作用突显出来,故与激光焊相比,激光填丝焊的焊缝区域硬度较高。两者的热影响区受热而过时效,析出相长大使强化作用降低,硬度下降。

3.4 焊接接头力学性能

按图 3 所示的取样方式,对两种焊接件各取三个拉伸试样,进行拉伸实验,结果如表 5 及图 11 所示,激光焊的焊缝强度为 313 MPa,激光填丝焊的焊缝强度为 391 MPa,后者达到母材的 55.8%,比前者高 78 MPa。对断裂试样进行截面分析,结果如图 12 所示,激光焊的焊缝断裂发生在焊缝中心,激光填丝焊的焊缝断裂发生在热影响区,与焊缝硬度检测结果吻合。这是因为激光焊接时,焊缝区域重熔,时效强化作用消失;而采用激光填丝焊时, Ni 元素固溶到 Cu 原子中,晶格产生畸变,焊缝区域的强度得到提升,尽管焊缝的 Ni 含量从上而下出现衰减,但最底部仍含有质量分数约为 10% 的 Ni 元素,这起到了一定的固溶强化作用,使焊缝强度高于焊接热影响区的。

表 5 焊接接头拉伸试验结果

Table 5 Tensile test results of weld joints

	Number	Tensile strength /MPa	Average value /MPa
Laser welding	1	309	313
	2	312	
	3	320	
Laser welding with filler wire	4	391	391
	5	394	
	6	390	

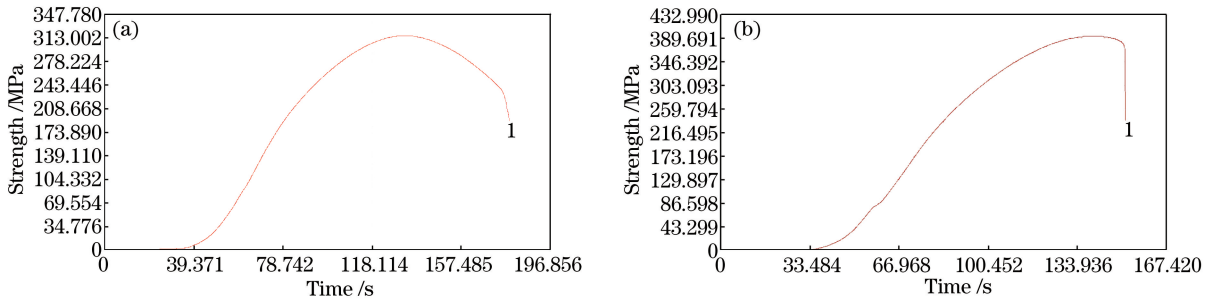


图 11 试样拉伸曲线。(a)激光焊;(b)激光填丝焊

Fig. 11 Tensile curves of specimens. (a) Laser welding; (b) laser welding with filler wire

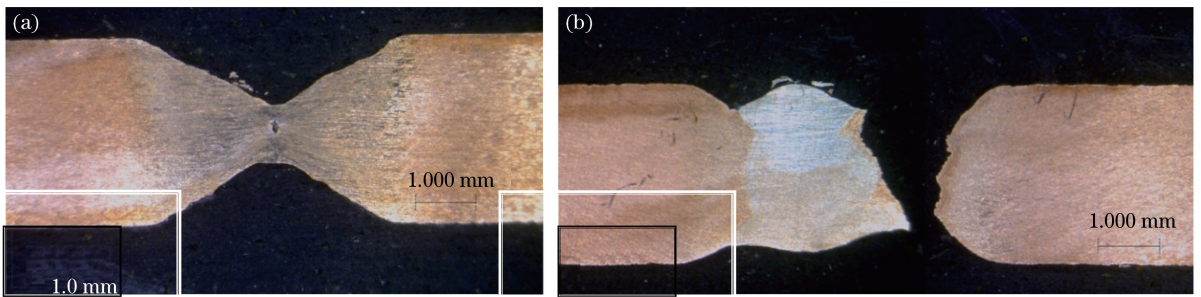


图 12 断口截面形貌。(a)激光焊;(b)激光填丝焊

Fig. 12 Morphologies of fracture sections. (a) Laser welding; (b) laser welding with filler wire

4 结 论

当采用激光直接焊接 C18000 铜合金时,焊缝组织粗大,显微硬度为 90 HV,强度为 313 MPa,约为基材的 44.7%,拉伸断裂发生在焊缝中心。当采用激光填丝焊进行 C18000 铜合金焊接时,焊缝区域 Ni 的质量分数从上至下由 31%降低至 10%;焊缝组织为均匀细小的单相固溶体,硬度最低处达 130 HV,由于 Ni 元素的固溶强化作用,焊缝强度可提高到 391 MPa,达到母材的 55.8%,比激光焊的提升了 11%,断裂出现在热影响区。激光填丝焊与激光焊的焊缝热影响区均出现了软化现象,显微硬度为 110 HV。采用激光填丝焊时,添加 ERNiCu-7 焊丝可提升焊缝区域强度,使其高于热影响区的,同时保证了焊缝的稳定性,焊接质量优于激光焊接的。

参 考 文 献

- [1] 王 丽, 刘 刚, 刘关强, 等. C18000 铜镍铬硅合金棒生产工艺研究[J]. 铜加工, 2006(3): 26-30.
- [2] Liu Guanqiang. New technology research on copper-chromium-zirconium alloy (C18150) bars[J]. Nonferrous Metals Processing, 2011, 40(2): 8-9.
刘关强. 铜-铬-锆合金(C18150)棒材新工艺的研究[J]. 有色金属加工, 2011, 40(2): 8-9.
- [3] Liu Guanqiang. New technology research on copper-chromium-zirconium alloy (C18150) bars[J]. Nonferrous Metals Processing, 2011, 40(3): 5-8.

- 刘关强. 铜-铬-锆合金(C18150)棒材新工艺的研究(续)[J]. 有色金属加工, 2011, 40(3): 5-8.
- [4] Liu Yuemei, Zhang Yan. Study on C18000 alloy ingot fusion casting technology of Cu-Si-Ni system[J]. Foundry Technology, 2004, 25(5): 371-373.
刘月梅, 张 颜. Cu-Si-Ni 系的合金铸锭 C18000 的熔铸工艺研究[J]. 铸造技术, 2004, 25(5): 371-373.
- [5] Lei Jingguo, Liu Ping, Zhao Dongmei, *et al.* Aging precipitation and recrystallization of Cu-Ni-Si alloy[J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2004, 27(1): 45-47.
雷静果, 刘 平, 赵冬梅, 等. CuNiSi 合金的时效析出与再结晶[J]. 兵器材料科学与工程, 2004, 27(1): 45-47.
- [6] Lin Gaoyong, Zeng Juhua, Wang Li, *et al.* Solution and aging strengthening of novel Cu-Al-Fe-Ni wrought aluminum bronze[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(6): 1586-1593.
林高用, 曾菊花, 王 莉, 等. 新型 Cu-Al-Fe-Ni 变形铝青铜的固溶和时效强化[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(6): 1586-1593.
- [7] Chen H C, Bi G J, Nai M L S, *et al.* Enhanced welding efficiency in laser welding of highly reflective pure copper[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 216: 287-293.
- [8] Zhang L J, Ning J, Zhang X J, *et al.* Single pass hybrid laser-MIG welding of 4-mm thick copper without preheating[J]. Materials & Design, 2015, 74: 1-18.
- [9] He Diqu, Xie Ming, Nai Ruilin, *et al.* Microstructure and mechanical properties of welded joints of Cu-Cr-Zr alloy obtained by friction stir welding[J]. Hot Working Technology, 2013, 42(21): 32-34.
贺地求, 谢 明, 奈瑞林, 等. Cu-Cr-Zr 合金板搅拌摩擦焊焊接接头的微观组织与力学性能[J]. 热加工工艺, 2013, 42(21): 32-34.
- [10] Nai Ruilin. Effects of friction stir welding and post welding heat treatment on the properties of Cu-Cr-Zr alloy[D]. Changsha: Central South University, 2013.
奈瑞林. Cu-Cr-Zr 合金的搅拌摩擦焊及焊后热处理工艺对焊缝性能的影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [11] 戴安伦, 孙开源, 朱志愿, 等. 时效处理对异种高强高导铜合金摩擦焊接头性能的影响[J]. 焊接技术, 2015, 44(5): 41-45.
- [12] Wang Zhi. Study on weldability of high strength and high conductivity copper alloy[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2010.
王 知. 高强高导铜合金的焊接性能研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [13] Leo P, Renna G, Casalino G, *et al.* Effect of power distribution on the weld quality during hybrid laser welding of an Al-Mg alloy[J]. Optics & Laser technology, 2015, 73: 118-126.
- [14] Zhang X Y, Yang W X, Xiao R S. Microstructure and mechanical properties of laser beam welded Al-Li alloy 2060 with Al-Mg filler wire[J]. Materials & Design, 2015, 88: 446-450.
- [15] Zhang L, Li X Y, Nie Z R, *et al.* Microstructure and mechanical properties of a new Al-Zn-Mg-Cu alloy joints welded by laser beam[J]. Materials & Design, 2015, 83: 451-458.