

激光与光电子学进展

两种光束偏角下的铜-钢激光焊接工艺

徐爱民¹, 汤超², 李周选¹, 何卫^{2*}, 叶成¹, 吴昊²¹浙江华电器材检测研究所有限公司, 浙江 杭州 310015;²武汉南瑞电力工程技术装备有限公司, 湖北 武汉 430415

摘要 铜具有很高的热导率和激光反射率, 在铜-钢激光焊接过程中铜侧易出现未熔合和咬边缺陷, 针对这一问题, 使用 4 kW 光纤激光器进行两种激光光束偏角下的 T2 紫铜和 SUS304 奥氏体不锈钢的激光焊接工艺研究, 发现激光光束向钢侧偏转能显著增加铜的熔化量, 进而抑制焊缝成形缺陷, 促进焊缝组织混合, 优化焊缝连接形式, 并促使铜侧界面处成分平缓过渡, 得到强度稳定的焊接接头。

关键词 激光光学; 激光焊接; T2 紫铜; SUS304; 光束偏角

中图分类号 TG456.7 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.1114004

Copper-Steel Laser Welding Process under Two Laser Deflection Angles

Xu Aiming¹, Tang Chao², Li Zhouxuan¹, He Wei^{2*}, Ye Cheng¹, Wu Hao²¹Zhejiang Huadian Equipment Testing Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang 310015, China;²Wuhan NARI Electric Power Engineering Technology & Equipment Co., Ltd.,
Wuhan, Hubei 430415, China

Abstract Copper has extremely high thermal conductivity and laser reflectivity. Hence, incomplete fusion and undercut problems commonly occur on the copper side during the laser welding of copper and steel. Herein, the laser welding process of T2 copper and SUS304 austenitic stainless steel was performed under two laser deflection angles using the 4-kW fiber laser. The deflection of the laser beam on the steel side can significantly increase the amount of copper in the weld, suppress weld forming defects, promote the mixing of the weld microstructure, optimize the connection form of the weld joint, and promote the smooth transition of components at the copper side interface. Consequently, reliable weld joints can be obtained.

Key words laser optics; laser welding; T2 copper; SUS304; beam deflection angles

OCIS codes 160.3900; 140.3380; 140.3430

1 引言

铜-钢异种金属构件具有轻量化、低成本, 以及优良的导电、导热和抗腐蚀性能等特点, 在军工、电气、汽车等领域得到广泛应用^[1-2]。随着工业水平不

断提高, 对焊接产品的质量要求越来越高, 对铜和钢的异种焊接工艺提出了更高的要求, 需要不断地革新焊接工艺方法。激光焊接具有能量密度高、焊接速度快、热影响区窄、深宽比大等特点^[3-4], 非常有利于薄板的高效率、高质量连接, 因此采用激光焊

收稿日期: 2020-09-14; 修回日期: 2020-10-20; 录用日期: 2020-11-18

基金项目: 浙江华电器材检测研究所有限公司科技项目(5211HD190001)

*E-mail: hewei7@sgepri.sgcc.com.cn

接铜-钢接头具有很高的应用价值。

目前,铜和钢的焊接存在一定的技术难度,铜具有很高的激光反射率和散热速率^[5-6],焊接过程中铜板一侧会散失大量的热,导致焊接接头成形不均匀,从而影响焊接接头质量,因此有必要对铜和钢的焊接工艺进行一些处理。目前学术界采用了一些处理方法,如上海交通大学的学者使用高功率 CO₂ 激光器焊接铜-钢厚板,通过开斜坡口并填充镍片等方式,提高了焊缝中铜相和铁相比例相差较大时的焊接接头质量,而两种相的比例相近时焊缝中存在大量中间相粒子,影响了焊接接头质量,并且铜熔化是焊接接头强度弱化的主要原因^[7-8];北京科技大学和哈尔滨工业大学的学者在采用激光焊接铜和钢时,将激光束向钢侧偏置 0.1 mm 并偏转 2°~4°,避免了铜的反射,同时也抑制了铜熔化,在一定程度上提升了焊

接强度,但工艺窗口很窄,激光对中困难^[9-11];哈尔滨工业大学的学者在焊接铬青铜与不锈钢板时,将电子束向铜侧偏移,使焊缝组织更加均匀,富铜相增多,强度明显提升^[12-13]。但上述方法均存在工艺窗口较窄、工艺复杂、加工难度大、精度较差等问题,为了在无光束偏移和其他预处理情况下获得良好的铜-钢激光焊接接头,本研究采用两种激光入射偏角,分析了激光偏角对焊缝成形、组织及性能的影响。

2 实验材料与方法

2.1 实验材料

实验材料为 SUS304 奥氏体不锈钢和 T2 紫铜,使用砂轮机和线切割机将其切制成 70 mm×50 mm×2 mm 的试板,不开坡口。两种合金材料中元素质量分数如表 1 和表 2 所示。

表 1 T2 紫铜合金元素成分

Table 1 Element composition of T2 copper alloy

Element	Cu+Ag	Fe	Zn	Sn	Ni	Pb	O	S	Impurity
Mass fraction / %	≥99.9	≤0.005	≤0.005	≤0.002	≤0.005	≤0.005	≤0.06	≤0.005	≤0.02

表 2 SUS304 奥氏体不锈钢元素成分

Table 2 Element composition of SUS304 austenitic stainless steel

Element	Ni	Cr	Mn	Si	C	O	P	S	Fe
Mass fraction / %	18.0—20.0	8.0—10.0	≤2.00	≤1.00	≤0.08	≤0.06	≤0.045	≤0.03	Balance

2.2 实验方法

使用德国 IPG-ILR-4000 W 光纤激光器和 ABB 机器人进行激光焊接实验,激光器波长为 1.06 μm,最大功率为 4000 W,透视焦长为 250 mm,聚焦光斑直径为 0.3 mm,激光器设备如图 1 所示。实验开始前,使用钢丝刷清理试板表面的油污和氧化皮,用丙酮溶液清洗焊件表面防止再次污染。实验过程中,选用激光功率为 3 kW,离焦量为 0,光斑位置位于拼缝中心,焊接速度为 1.8 m/min,从后方侧吹纯 Ar 保护气,保护气体的流量为 1.2 m³/h。鉴于铜-

钢激光焊接过程中存在铜散热快、反射率高等问题,在激光光束偏向焊接方向 5°的基础上,分别设置了激光光束偏向钢侧 0°(偏角 1)和 10°(偏角 2)两种激光偏角。图 2 为两种激光偏角下沿焊缝方向的投影示意图,激光偏角 2 明显向钢侧倾斜,对比研究了两种激光偏角对铜-钢焊接接头的影响。

使用扫描仪扫描焊缝正面和背面的宏观图片,使用 DK7732 型线切割机切割金相试样和拉伸试样。使用 XQ-2B 型镶嵌机对金相试样进行镶嵌,使用 YMP-2B 型金相试样磨抛机磨抛焊缝横

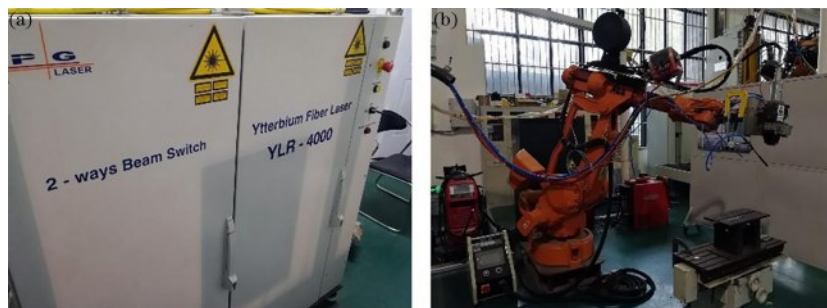


图 1 激光器控制柜和机器人实物图。(a) 4000 W 激光器控制柜;(b) ABB 机器人

Fig. 1 Pictures of laser control cabinet and robot. (a) Control cabinet of 4000 W laser device;(b) ABB robot

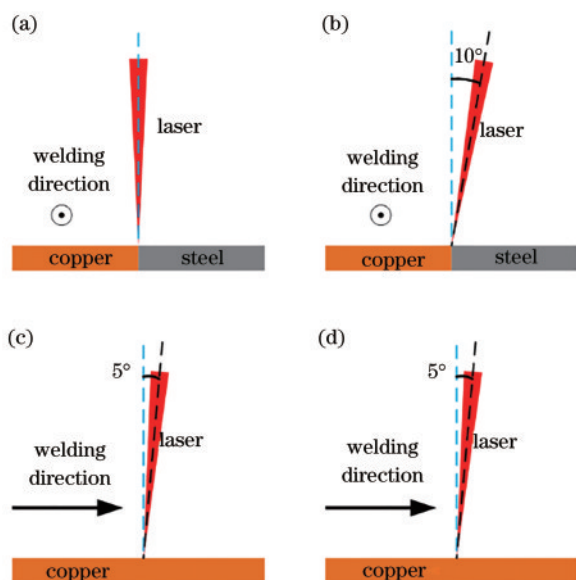


图2 激光光束偏角示意图。(a)(c)偏角1°; (b)(d)偏角2°
Fig. 2 Schematic of laser beam deflection angles.
(a) (c) Angle 1°; (b) (d) angle 2°

截面,使用 600, 800, 1000, 1200, 1500 目砂纸依次研磨,使用粒径为 0.5 mm 的金刚石抛光膏进行抛光处理。实验使用的腐蚀剂有 3 种,硝酸和酒精体积比为 1:9 的混合溶液用于腐蚀并观察铜的母材组织, HNO₃(10 mL)、HF(20 mL)、H₂O(70 mL) 的混合溶液用于腐蚀不锈钢母材组织,王水稀释液 (V_{H₂O}: V_{HCl}: V_{HNO₃}=4: 3: 1) 用于腐蚀焊缝区并观察焊缝区域的晶粒组织。经过前两种腐蚀剂处理后,能观察到焊缝区域的成分分布,但不能观察到晶粒组织。使用体视显微镜(15~20 倍)观察焊缝的宏观形貌,使用 LWS-LWD300LMDT 型金相显微镜观察焊缝区域的组织分布情况。使用

山东莱州华银试验仪器有限公司生产的 DHV-1000 型维氏硬度计测量焊缝区域的显微硬度。拉伸试验使用的拉伸设备为日本 SHIMADZU 公司生产的 AG-IC 型电子拉伸试验机。使用 FEI 环境扫描显微镜观察拉伸试样断口,测量焊缝元素成分。

3 实验结果

3.1 焊缝成形

研究了两种激光光束偏角下焊缝宏观成形和横截面形貌,结果如表 3 所示。结果表明,在偏角 1 的情况下,试样表面颜色与钢板颜色较为一致,焊缝向钢板一侧偏移,且焊缝横断面铜侧出现了咬边和未焊合缺陷,说明焊缝中钢板大量熔化。这是因为激光光束只向焊接方向偏转,对铜板和钢板热输入一致,而铜板具有很高的激光反射率和散热速率,导致铜板吸收的能量很少,最后焊缝中铜含量很少,因此焊缝向钢板偏移并且与铜侧结合较差,容易产生未焊合缺陷。由于焊缝下部的激光光束能量少于焊缝上部,因此在焊缝下部铜侧熔合线附近可以观察到明显的咬边凹陷,这就缩小了焊缝截面积,削弱了焊接接头强度。在偏角 2 的情况下,焊缝颜色更接近铜板颜色,焊缝分布均匀,既没有向钢侧偏移,也没有向铜侧偏移,焊缝横截面成形均匀,说明这种激光偏角下铜板和钢板均有熔化,熔化的铜填充焊缝,从而抑制了成形缺陷。激光光束向钢侧偏转,但聚焦光斑中心仍然在拼缝中央,这就解决了光斑对中困难的问题,光束照射到铜母材一侧,使铜板大量熔化并填充焊缝。

表3 两种激光光束偏角下的焊缝外观成形与横断面形貌

Table 3 Weld joint appearance and cross-section morphology at different laser beam deflection angles

Sample No.	Macrostructure	Cross-sectional structure
Angle 1 (0°)	Top surface	incomplete fusion undercut 500 μm
	Bottom surface	
Angle 2 (10°)	Top surface	500 μm
	Bottom surface	

3.2 焊缝组织

Fe 和 Cu 在液相下无限互溶,在固相下互溶度

很小,因此紫铜和奥氏体不锈钢组成的焊接接头中主要存在富铁相组织和富铜相组织^[14-16]。图 3 展示

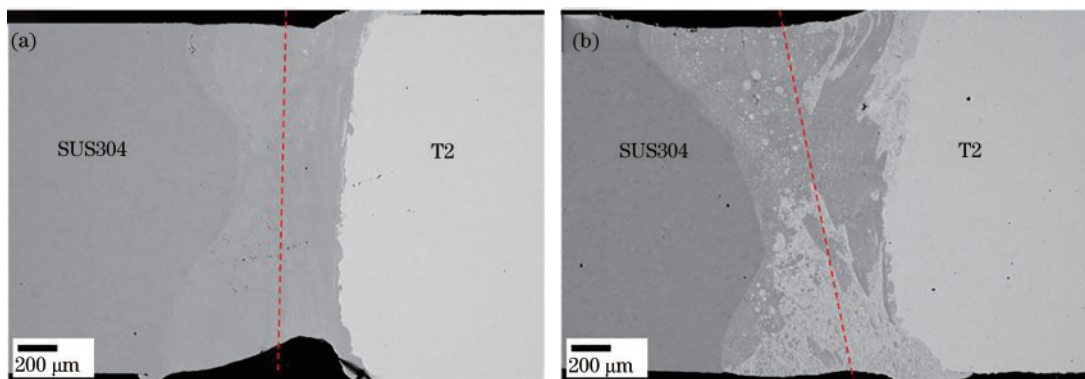


图3 不同偏角下的焊缝组织分布。(a)偏角1;(b)偏角2

Fig. 3 Weld tissue distribution under different deflection angles. (a) Angle 1; (b) angle 2

了两种激光偏角下的焊缝组织,其中的虚线为焊缝中心线。结果表明:偏角1的试样焊缝较为竖直,焊缝组织主要为富铁相;偏角2的试样焊缝呈倾斜状态,焊缝中存在块状、条状、细球状的富铁相和富铜相,两相混合得较为充分。激光光束倾斜入射并向铜侧偏移,导致焊缝下部的Cu大量熔化,因而焊缝呈现上部Fe多、下部Cu多的分层现象。铜的密度大于SUS304不锈钢的密度,导致富铜相向下运动,促进了焊缝组织混合,强化了Fe和Cu分层分布的特征。

对偏角2的试样进行了更高倍数的组织观察,

发现焊缝的块状富铁相中弥散分布着大量球状富铜相,呈现出一种多孔状的组织结构,如图4(a)所示;而球状富铜相中又弥散分布着大量富铁相,如图4(b)所示。这可能是因为Fe的凝固温度高于Cu的凝固温度,在1536℃时,液相中的Fe析出形成块状、条状和球状的富铁相,当温度降低到1083℃以下,已凝固的富铁相内包裹的富铜相液体逐步凝固析出,形成大小不一的球状富铜相组织,这种球状组织在凝固过程中又会夹杂大量的细球状富铁相,促使富铁相和富铜相在凝固过程中充分混合。

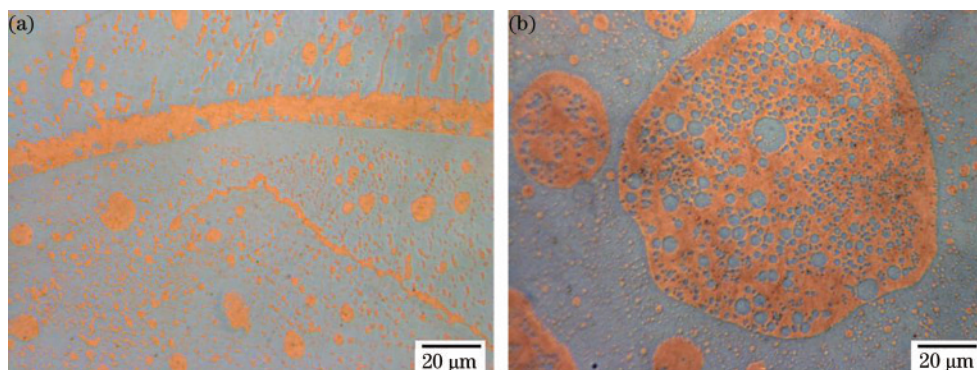


图4 偏角2试样的焊缝微观组织。(a)块状组织;(b)球状组织

Fig. 4 Weld micro-tissue of angle 2 sample. (a) Massive tissue; (b) spherical tissue

图5和图6分别展示了两种激光光束偏角下焊缝中部的元素线扫描结果。可以看出:在偏角1试样中,焊缝元素主要是Fe和Cr,在焊缝铜侧界面处Fe和Cu的变化非常剧烈;在偏角2试样中,Fe和Cu交错分布,元素混合得更加充分,在界面处元素变化非常平缓^[4-5]。

3.3 焊缝界面

对于铜-钢异种接头而言,焊缝与母材的结合界面质量直接影响焊缝的强度,由于紫铜的强度

比不锈钢的强度弱很多,因而焊缝铜侧界面是铜-钢焊接接头的脆弱区域,本实验重点研究了两种激光偏角下焊缝铜侧界面的区别。通过使用光学显微镜、超景深显微镜、扫描电镜对焊缝界面进行观察,结果表明,在两种激光偏角下,焊缝钢侧和铜侧界面存在较大差异。在偏角1的情况下,由于焊缝成分与SUS304母材很相似,因此铜侧界面分界清楚,界面左侧组织主要为富铁相和极少量富铜相,说明铜母材在高温下软化并且些许熔化,同

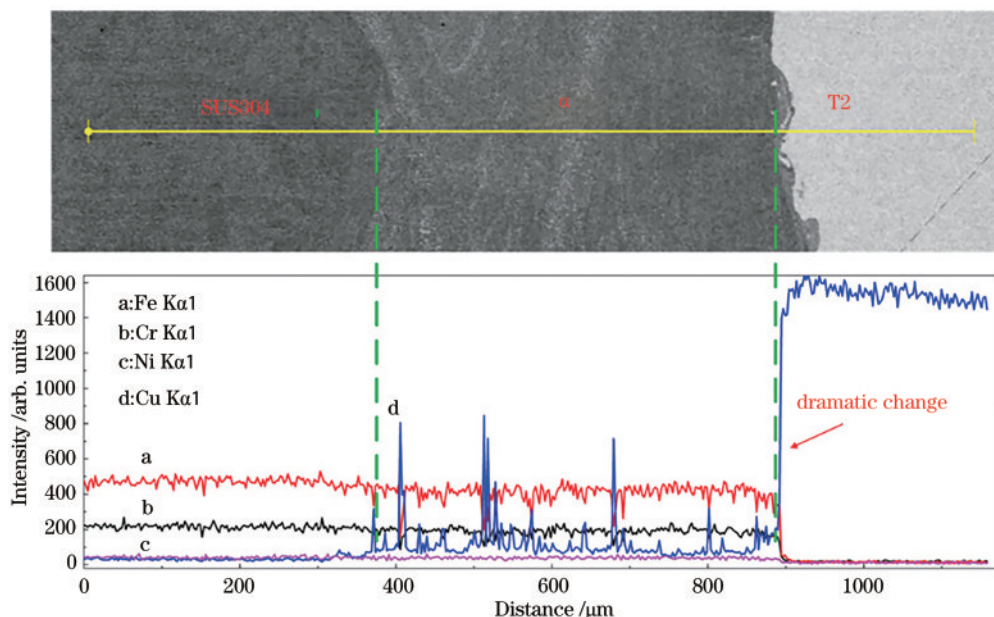


图 5 偏角 1 试样的焊缝中部元素线扫描结果

Fig. 5 Elemental scanning results of angle 1 sample along the middle position of weld

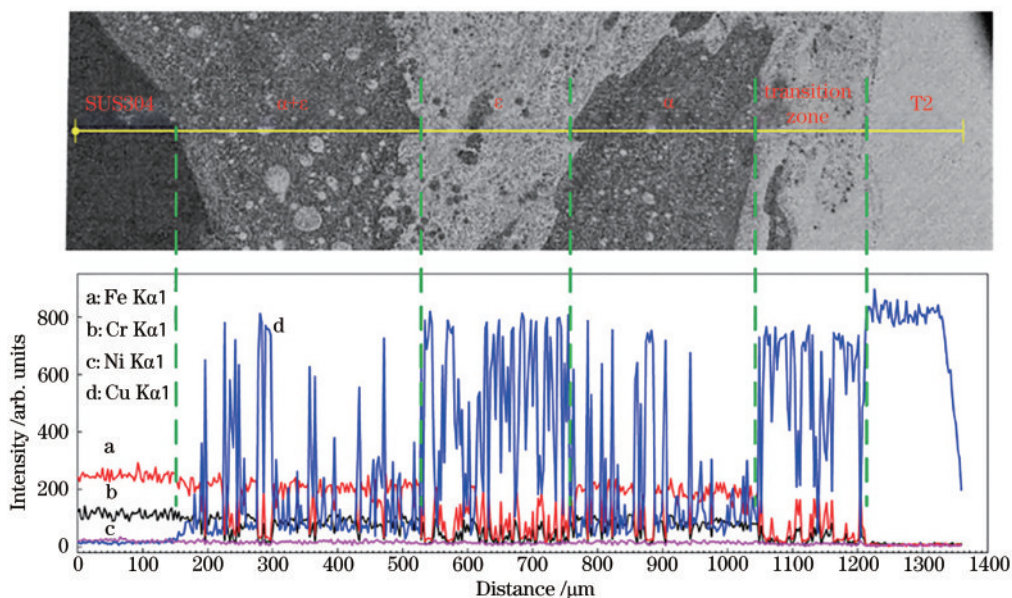


图 6 偏角 2 试样的焊缝中部元素线扫描结果

Fig. 6 Elemental scanning results of angle 2 sample along the middle position of weld

时钢板熔化形成熔池冲击焊缝界面,故形成褶皱,但钢液无法向铜侧扩散,故形成钎接界面,如图 7(a)所示;而在偏角 2 的情况下,Cu 大量熔化,在液相下 Fe 和 Cu 混合充分,因而钢侧出现了大量球状和块状富铜相,同时,焊缝铜侧界面的分界线较为模糊,说明铜母材发生了明显的熔化并且 Cu 和 Fe 充分混合,如图 7(b)所示。激光束向钢板一侧偏转,导致铜板侧的输入热量较多,保证了铜板熔化,而铜的密度大于不锈钢的密度,焊缝处于倾

斜状态,在重力作用下固-液界面上方的 Cu 和固-液界面下方的 Fe 发生对流,于是在铜板一侧形成了熔焊界面,界面结合面积较大,成分梯度较小,促进了焊缝强度的提升。

3.4 焊缝性能

3.4.1 显微硬度测试

对两种激光光束入射偏角下焊缝的显微硬度进行测量,结果如图 8 所示。结果表明:在偏角 1 的情况下,在铜母材与焊缝的界面处显微硬度变化曲

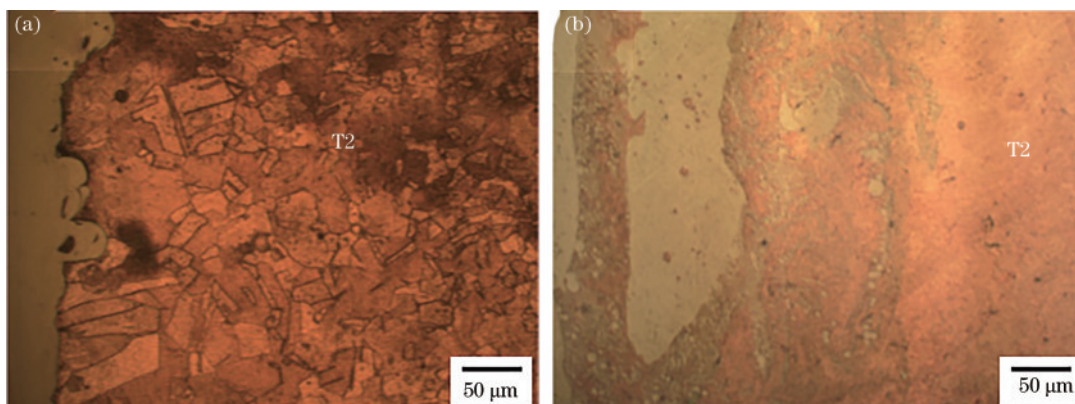


图 7 不同偏角下的焊缝铜侧界面。(a)偏角 1;(b)偏角 2

Fig. 7 Weld interface in copper side under different deflection angles. (a) Angle 1; (b) angle 2

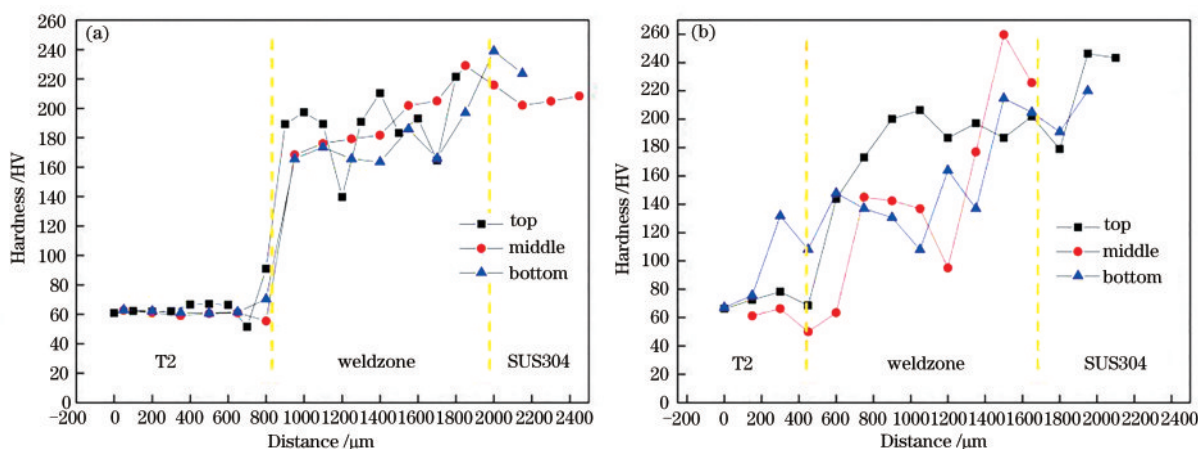


图 8 不同偏角下的焊缝显微硬度。(a)偏角 1;(b)偏角 2

Fig. 8 Weld micro-hardness under different deflection angles. (a) Angle 1; (b) angle 2

线较陡,这与金相图显示的焊缝铜侧为钎接界面的结果较为一致,钎接界面处成分、组织、显微硬度变化梯度大,且易出现未熔合的缺陷,对形成较大强度的焊接接头不利;在偏角 2 的情况下,焊缝组织充分混合,因此从铜侧至钢侧硬度缓慢变化,硬度的数值与焊缝的组织分布有直接对应关系,说明在激光光束向钢侧偏转的过程中,显微硬度从铜侧至钢侧的变化较为平缓。

3.4.2 力学性能测试

焊接试样的拉伸性能测试依据 GB/T 228—2002 进行,线切割加工的板材试样标距为 46 mm,拉伸速率为 3 mm/min,每个激光偏角下进行 5 组拉伸测试并取 5 组测试结果的平均值(表 4)。结果表明:在偏角 1 的情况下,焊缝试样的最大抗拉强度和最小抗拉强度差值太大,力学性能不稳定,延伸率较小;在偏角 2 的情况下,试样的最大抗拉强度和平均抗拉强度较为接近,力学性能稳定,延伸率有所提升。

表 4 力学性能测试结果

Table 4 Test results of mechanical properties

Angle	Average tensile strength / MPa	Maximum tensile strength / MPa	Minimum tensile strength / MPa	Average elongation rate / %
Angle 1	226.47	267.33	102.03	4.44
Angle 2	251.69	256.33	226.56	5.26

图 9 展示了两种激光偏角下拉伸断口试样的电镜照片。在偏角 1 的情况下,断口有撕裂棱、微裂纹等,断裂形式为脆性断裂,断口含有 Fe 和 Cu,因而

断裂位置位于钎接界面及焊缝区域,断裂原因为铜侧存在未熔合与咬边缺陷;在偏角 2 的情况下,断口存在大面积的韧窝区域,断口富含 Cu,断裂形式为

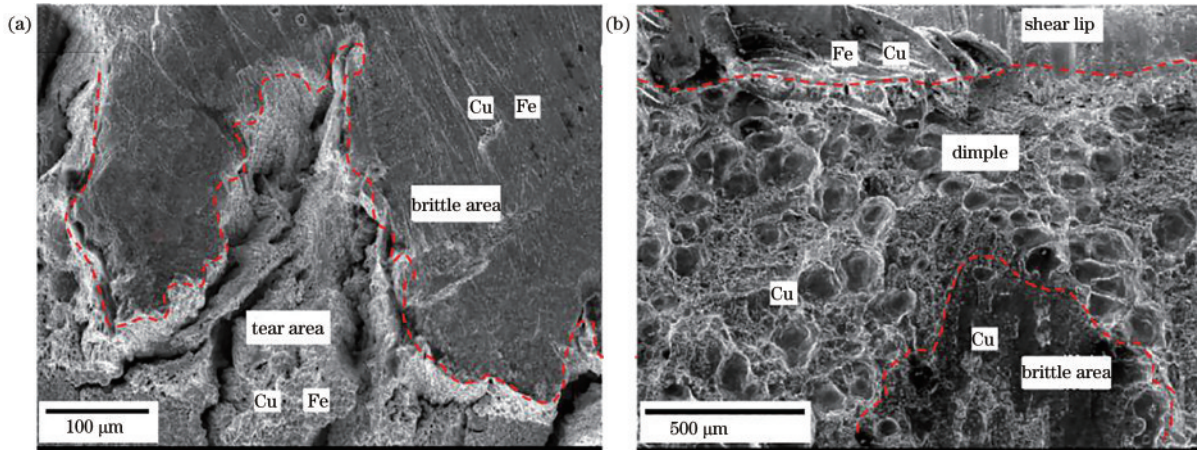


图9 不同偏角下的焊缝断口。(a)偏角1;(b)偏角2

Fig. 9 Weld fracture under different deflection angles. (a) Angle 1; (b) angle 2

韧性+脆性混合断裂,断裂位置为铜侧热影响区,断裂原因为铜热影响区受热软化。

4 结 论

使用4 kW 光纤激光器进行了两种激光光束偏角下的T2紫铜和SUS304奥氏体不锈钢的激光焊接工艺研究,结果发现:焊缝内的块状富铁相内部弥散分布着大量球状富铜相,球状富铜相内又弥散分布着大量絮状富铁相组织;激光光束偏向钢侧 10° 时,焊缝铜侧界面处元素和组织过渡得更加均匀,避免了焊缝断于铜侧界面;采用 10° 偏角时,铜-钢激光焊接接头抗拉强度提升了11.14%,接头延伸率提升了18.47%。从断口可以看出,接头的塑性增强。

参 考 文 献

- [1] Han C X, Zhang K K, Yang Y L, et al. Welding present situation of steel and copper or copper alloy [J]. Hot Working Technology, 2003, 32(6): 53-55.
韩彩霞, 张柯柯, 杨蕴林, 等. 钢与铜及铜合金的焊接研究现状[J]. 热加工工艺, 2003, 32(6): 53-55.
- [2] Shang D Z, Zhang J, Feng A X, et al. Effect of surface texturization on microstructure and mechanical properties of laser welded copper/steel joint [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0902004.
尚大智, 张健, 冯爱新, 等. 焊面织构化对铜/钢激光焊接接头组织及力学性能的影响[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0902004.
- [3] Zhao L, Han X, Zou J L, et al. Research on formation process of keyhole during fiber laser deep penetration welding [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(7): 071402.
赵乐, 韩雪, 邹江林, 等. 光纤激光深熔焊接小孔形成过程的研究[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(7): 071402.
- [4] Cao Z, Jiang R J, Du W Z, et al. Distortion control by in-site high frequency peening in laser welding of thin-walled structures [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(9): 0902003.
曹政, 姜仁杰, 杜伟哲, 等. 薄壁结构激光焊接随焊高频冲击变形控制[J]. 中国激光, 2020, 47(9): 0902003.
- [5] Wang K H, Xu Y L, Kong J S, et al. Copper-steel CO₂ welding with steel electrode [J]. Transactions of the China Welding Institution, 1996, 17(4): 258-262.
王克鸿, 徐越兰, 孔建寿, 等. 铜-钢接头的钢焊丝熔化极CO₂焊[J]. 焊接学报, 1996, 17(4): 258-262.
- [6] Guo H. Vacuum brazing of copper and stainless steel [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2003: 45-50.
郭红. 铜与不锈钢的真空钎焊[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2003: 45-50.
- [7] Fu J. Laser welding for copper-steel joint [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2009: 66-68.
付俊. 铜钢异种材料激光焊接研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2009: 66-68.
- [8] Fu J, Huang J, Yao C W, et al. Laser butt welding for copper-steel joint [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(5): 1256-1260.

- 付俊, 黄坚, 姚成武, 等. 铜钢激光对接焊研究[J]. 中国激光, 2009, 36(5): 1256-1260.
- [9] Chen H S, Zhang M X, Huang J H, et al. Research on laser welding characteristics of copper-steel dissimilar metals [C]//Proceedings of the 18th National Welding Conference of the Welding Society of Chinese Mechanical Engineering Society. Nanchang: [s.n.], 2013: 55-58.
陈树海, 张茗馨, 黄继华, 等. 铜-钢异种金属激光焊接特性研究[C]//中国机械工程学会焊接学会第十八次全国焊接学术会议论文集. 南昌: [s.n.], 2013: 55-58.
- [10] Chen S H, Huang J H, Xia J, et al. Influence of processing parameters on the characteristics of stainless steel/copper laser welding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 222: 43-51.
- [11] Chen S H, Huang J H, Xia J, et al. Microstructural characteristics of a stainless steel/copper dissimilar joint made by laser welding [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44(8): 3690-3696.
- [12] Zhang B G, He J S, Wu L, et al. Microstructures and phase composition of QCr0.8/1Cr21Ni5Ti joint by EBW with focus on steel side [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2005, 26 (11): 89-92.
- 张秉刚, 何景山, 吴林, 等. 铬青铜与双相不锈钢偏钢电子束焊接头组织及相构成 [J]. 焊接学报, 2005, 26 (11): 89-92.
- [13] Chen J Y, Wang X N, Lü F, et al. Microstructure and mechanical properties of welded joints of low carbon steels welded by laser beam oscillating welding [J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47 (3): 0302006.
陈靖雨, 王晓南, 吕凡, 等. 激光束摆动焊接低碳钢焊接接头的组织和力学性能 [J]. 中国激光, 2020, 47(3): 0302006.
- [14] Magnabosco I, Ferro P, Bonollo F, et al. An investigation of fusion zone microstructures in electron beam welding of copper-stainless steel [J]. Materials Science and Engineering A, 2006, 424(1/2): 163-173.
- [15] Tosto S, Nenci F, Hu J D, et al. Microstructure of copper-AISI type 304L electron beam welded alloy [J]. Materials Science and Technology, 2003, 19 (4): 519-522.
- [16] Zhang B G, Zhao J, Li X P, et al. Electron beam welding of 304 stainless steel to QCr_{0.8} copper alloy with copper filler wire [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24 (12): 4059-4066.