

文章编号: 0258-7025(2009)05-1256-05

铜钢激光对接焊研究

付俊^{1,2} 黄坚^{1,2} 姚成武^{1,2} 张喆^{1,2} 吴毅雄^{1,2}

(¹ 上海交通大学材料科学与工程学院, 上海 200240; ² 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240)

摘要 针对铜和钢的物理和化学性能的较大差异,通过理论分析认为铜的熔化量对铜钢异种材料焊接接头的质量有很大影响,同时考虑到铜对激光的高反射率,对此进行了基于斜面对接和激光光束偏向钢侧的铜钢激光对接焊研究,并以三种不同的工艺参数进行了激光焊实验。焊接接头的力学性能测试和焊缝显微组织分析结果表明,铜钢焊接的质量主要取决于铜的熔化量。当铜熔化较少时,接合界面清晰,接头无明显缺陷并表现出良好的力学性能;当铜的熔化量较多时,无明显结合界面,接头出现气孔、裂纹等缺陷,力学性能急剧下降。实验结果表明,设置激光束偏离量为 0.8 mm,可实现低铜钢熔合比,从而获得无缺陷的铜钢焊接接头。

关键词 激光技术; 激光焊接; 铜钢异种材料焊接; 激光束偏置; 斜面对接

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093605.1256

Laser Butt Welding for Copper-Steel Joint

Fu Jun^{1,2} Huang Jian^{1,2} Yao Chengwu^{1,2} Zhang Zhe^{1,2} Wu Yixiong^{1,2}

(¹ School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)
(² Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai 200240, China)

Abstract Theory analysis shows that the copper molten amount has great influence on the joint of copper-steel welding for the large difference in physical and chemical properties between copper and steel. Considering the high laser reflectivity of copper, laser welding for copper-steel joining based on slope butt joint and laser beam offsetting to the steel side is researched. Copper-steel butt joints are welded under three different welding parameters. The observation of microstructure and the measured mechanical properties show that joint quality strongly depends on the molten amount of copper in weld. When the copper molten amount is small, the interface between the copper and the weld is clear, and the joint has no defect and shows good mechanical properties. When the copper molten amount is large, there is no clear interface between the copper and the weld, pores and cracks are observed in weld, and the mechanical performance of joint is poor. Experiment results indicate that with the laser beam offset of 0.8 mm. A low fusion ratio of copper and steel is achieved and a defect free joint is obtained.

Key words laser technique; laser welding; dissimilar materials welding of copper-steel; laser beam offset; slope butt joint

1 引言

伴随着现代工业的发展和科学技术的进步,对焊接构件的性能提出了更高、更苛刻的要求,除需满足普通性能之外,还要求满足如高温强度、耐磨性、耐腐蚀性、低温韧性、磁性、导电性、导热性等多方面的要求。钢与铜及铜合金的焊接不仅充分发挥了材料各自的性能和作用,达到了充分利用的目的,而且大大节省材料,降低成本^[1]。因此开展此方面的研

究极其重要,有很大的发展前景。

铜钢焊接是典型的异种材料焊接。铜和钢的熔点、导热系数、线膨胀系数和力学性能都有着很大的差异,不利于铜钢的直接焊接^[2,3]。基于激光焊接的热能密度大、熔化金属量少、热影响区窄、接头质量高、生产效率高等优点,本文对紫铜和 Q235A 钢进行了激光对接焊的实验研究,并对不同工艺下的焊接接头的力学性能和组织状态进行了分析。

收稿日期: 2008-06-27; **收到修改稿日期**: 2008-09-23

作者简介: 付俊(1983—),男,硕士研究生,主要研究方向为异种材料激光焊接工艺及机理。E-mail: sunces@sjtu.edu.cn

导师简介: 黄坚(1967—),男,副教授,博士,主要研究方向为焊接过程数值模拟和优化、激光加工技术、堆焊技术以及焊接过程控制。E-mail: jhuang@sjtu.edu.cn

2 试验材料及方法

实验用紫铜和 Q235A 钢的化学成分和力学性能见表 1。由于铜和钢物理化学性能的差异,如果采用直接在对接面上施加热源的焊接方法,会存在以下问题:1) 铜的导热系数大,室温时铜的导热系数比钢大 5 倍多,700 °C 时大 10 倍^[4,5]。焊接时热

表 1 紫铜与 Q235A 钢的化学成分及力学性能

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of T1 copper and Q235A

Material	Chemical composition (mass fraction, %)	Tensile strength σ_b /MPa	Yield strength $\sigma_{0.2}$ /MPa	Extensibility δ / %
T1 copper	P \leq 0.001; Bi \leq 0.001; Sb \leq 0.002; As \leq 0.002; Fe \leq 0.005; Ni \leq 0.002; Pb \leq 0.003; Sn \leq 0.002; S \leq 0.002; Zn \leq 0.005; O \leq 0.02; impurity \leq 0.05	215~255	57~61	\geq 30
Q235A	C=0.14~0.22; Mn=0.30~0.65; Si \leq 0.30; P \leq 0.045; S \leq 0.050	375~460	\geq 235	\geq 24

对于铜合金的焊接,由于液态的铜具有很高的氢溶解度,焊接过程中为了避免焊缝产生气孔,有必要减少熔池在液态状态下的停留时间,以减小溶入熔池的气体量。从凝固角度来说,因为铜与钢的线膨胀系数的较大差异会导致较大的焊接应力,所以应尽量避免熔池以“糊状方式”凝固而造成热裂纹^[8]。图 1 为 Fe-Cu 二元合金相图^[9]。由图 1 可见,在钢侧(质量分数 Cu=7.2%)和铜侧(质量分数 Cu=96.5%)分别存在一个包晶反应区。当铜钢焊缝中铜的质量分数为 \leq 7.2%和 \geq 96.5%时,Fe-Cu 二元合金的液-固共存温度区间分别为 1538~1485 °C 和 1096~1084 °C,液相与固相的温差范围较小,可减小焊缝热裂纹、缩孔的产生。但是相比较而言,当焊缝质量分数 Cu \geq 96.5%时,由于液态铜有很高的氢溶解度,且焊缝凝固速度更快,气体来不及排出,对气孔的敏感性很高,容易形成气孔;同时由于铜的高激光反射率和高热传导率,需要很高的激光能量才能形成熔池。因此,接头的铜熔合比率控制

量迅速从铜侧加热区传导出去,使母材与填充金属难以熔合;2) 铜的线胀系数和收缩率比钢大,焊接时必然会产生较大的变形。而当工件刚度很大时,由于变形受阻会产生很大的焊接应力^[6];3) 铜对 10.6 μ m 波长激光的反射率高达 98.4%^[7],造成激光能量的吸收困难。

在 7.2% 以下更有利于铜钢异种金属焊接。

根据以上分析,制定铜钢对接激光焊接工艺方案为:1) 为避免铜对激光的反射,将激光束投射在钢侧,同时再偏向钢一侧以减小铜的熔化量;2) 由于激光在工件上的热量密度沿厚度方向从上到下递减,所以把激光进行正离焦,并结合熔池横截面形状,把对接面加工为一定倾斜角度,以便使铜沿厚度方向的熔化量尽量保持均匀^[10~12];3) 因为铜具有高导热性,为了使铜能更好熔化,焊前对铜侧预热,预热温度为 200 °C。

图 2 为铜钢激光对接焊示意图,其中 α 为对接面倾斜角度, d 为激光光束相对于上表面接缝的偏移量, t 为激光的离焦量。实验用焊接设备使用德国 TRUMPF 生产的 TCF15000 CO₂ 激光器,最大功率为 15 kW。为对比未采用斜面对接的焊接接头效果,选用三组工艺参数进行实验,焊接工艺参数如表 2 所示,其中试样 1 和试样 2 为获取不同熔合比而制定的工艺参数,试样 3 为垂直面对接焊接。采用 MEF4M 金相显微镜,SEM515 扫描电镜对焊缝接头进行显微组织分析,在 T1-Fr020TN.A50 材料实验机上进行焊接接头力学拉伸性能测试,并在 HX-1000 显微硬度测试仪上进行显微硬度测试。

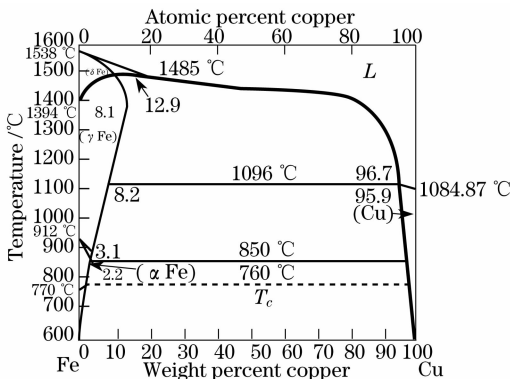


图 1 铁铜相图

Fig. 1 Phase diagram of iron-copper

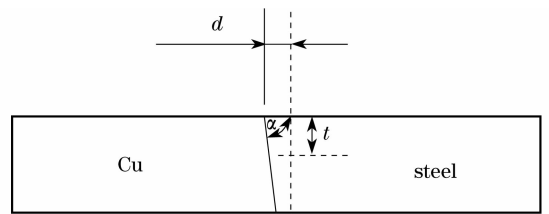


图 2 对接激光焊示意图

Fig. 2 Scheme of butt welding by laser

表2 焊接工艺参数
Table 2 Welding parameters

Sample	Thickness /mm	Laser power /kW	Welding speed (m/min)	$\alpha /(^{\circ})$	d /mm	t /mm
1	10.0	11.0	1	85	0.8	3.0
2	10.0	11.0	1	85	0.4	3.0
3	10.0	11.0	1	90	0.4	3.0

3 实验结果及分析

3.1 力学性能

图3为焊接接头拉伸应力-应变曲线。图3(a)为1号试样接头,力学性能很好,抗拉强度为231.95 MPa,延伸率为28.12%,试样断裂于铜侧母材。图3(b)为2号试样接头,力学性能较差,抗拉强度为152.99 MPa,延伸率为2.48%,试样断裂于焊缝处。3号试样接头因为采用垂直对接的方式,中下部出现未熔合。

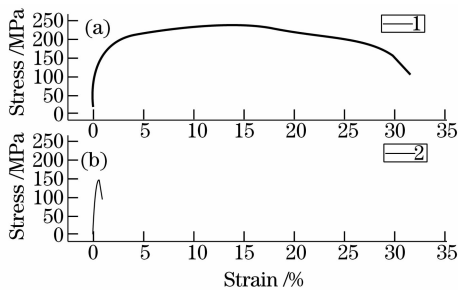


图3 接头拉伸应力-应变曲线

Fig. 3 Stress-strain curve of the joint samples

图4为接头的维氏显微硬度测试结果。铜和钢的硬度差别比较大,Q235A的硬度 ≥ 300 HV_{0.2},T1铜的硬度 ≤ 65 HV_{0.2}。中间的过渡区域为熔合区的硬度。图4(a)为1号试样接头,可以看出上部的熔合区比较宽,中下部较窄。图4(b)为2号试样接头,整个厚度上熔合区都比较宽。

3.2 接头组织状态

图5为1号试样焊接接头。图5(a)为焊接接头宏观形貌,焊缝内无明显的气孔和裂纹等缺陷。图5(b)为1号试样接头元素分布EDX线扫描结果,接头沿厚度方向从上到下的熔合区逐渐变窄,这与接头硬度测试结果相吻合,说明铜的熔入量沿厚度方向逐渐降低。接头靠铜侧界面的上、中部位,即图5(a)中的A,B位置间存在Fe,Cu元素的混合区,其宽度在140~350 μm 之间,可见该处有铜的少量熔化。接头铜侧界面靠下部位,即图5(b)中C位置仅存在Fe,Cu元素的扩散,说明此处铜只是微熔。

图6(a)为2号试样焊接接头宏观形貌,焊缝内

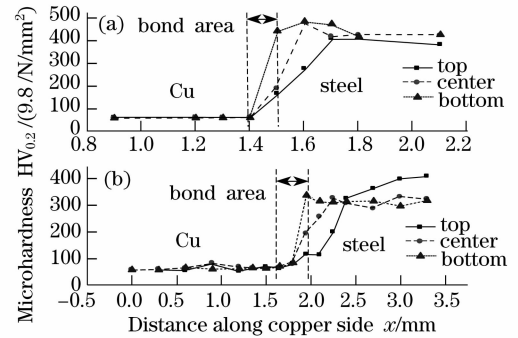


图4 接头的上、中、下位置显微硬度曲线

Fig. 4 Measured microhardness profiles of joints

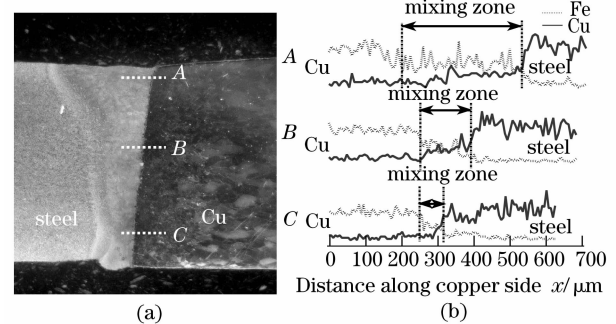


图5 1号试样接头宏观形貌(a)及元素分布EDX线扫描(b)

Fig. 5 Weld bead (a) and element EDX line scanning (b) of joint 1

有明显的气孔和裂纹。图6(b)为2号试样接头元素分布EDX线扫描结果,Fe,Cu元素熔合区的宽度在800~1400 μm 之间,并且从上到下并没有明显变窄,可见铜大量熔化,铜和钢充分熔合。

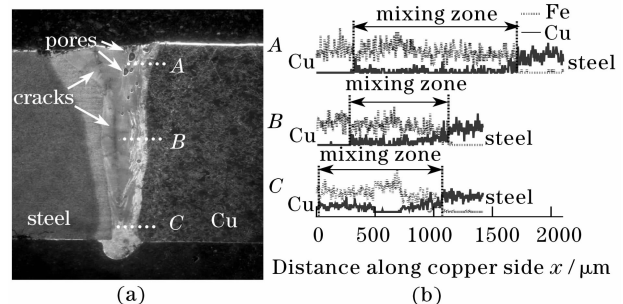


图6 2号试样接头宏观形貌(a)及元素分布EDX线扫描(b)

Fig. 6 Weld bead (a) and element EDX line scanning (b) of joint 2

图 7 为 3 号试样接头宏观形貌,3 号接头为垂直面对接,由图 7 可见,接头中下部未熔合。图 7 中焊缝的形状表明激光焊接热源的上宽下窄的厚度温差特征,正因为这种特征,垂直对接的焊接工艺很难获得厚度方向上均匀熔合的铜钢焊接接头,从实验结果来看,采用斜面对接是合理的。

池流动涡流的搅拌作用造成的^[8,13,14],同时也是接头力学性能良好的原因之一。

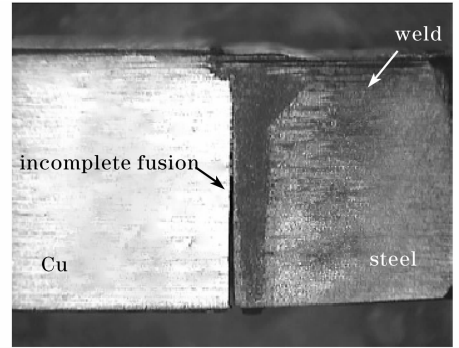


图 7 3 号试样接头宏观形貌
Fig. 7 Weld bead of joint 3

图 8 为 1 号试样接头微观组织形貌,图 8(a)为 1 号试样接头铜侧界面上部分,即图 5(a)中的 A 位置,可以看出结合界面比较光滑,焊缝组织为柱状晶。图 8(b)为 1 号试样接头铜侧界面下部分,即图 5(a)中的 B,C 位置间,界面处有钢呈漩涡状进入铜侧基体现象,这可能是由熔池小孔的反冲压力和熔

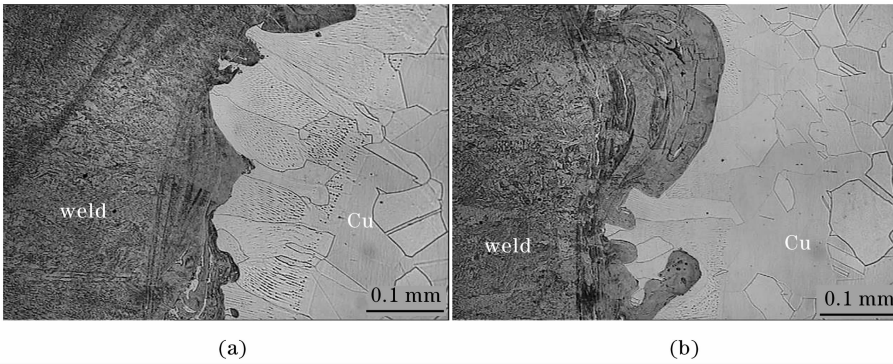


图 8 1 号试样接头微观组织
Fig. 8 Microstructure of weld bead of joint 1

图 9 为 2 号试样接头微观组织形貌,图 9(a)为 2 号试样接头铜侧上半部分,即图 6(a)中的 A 位置,图 9(b)为该接头铜侧下半部分,即图 6(a)中 B,C

间位置。从图中可以看出没有明晰的结合界面,而是由大量颗粒相组成的过渡带。对于 1 号试样和 2 号试样接头界面差异的形成原因还需要进一步的研究。

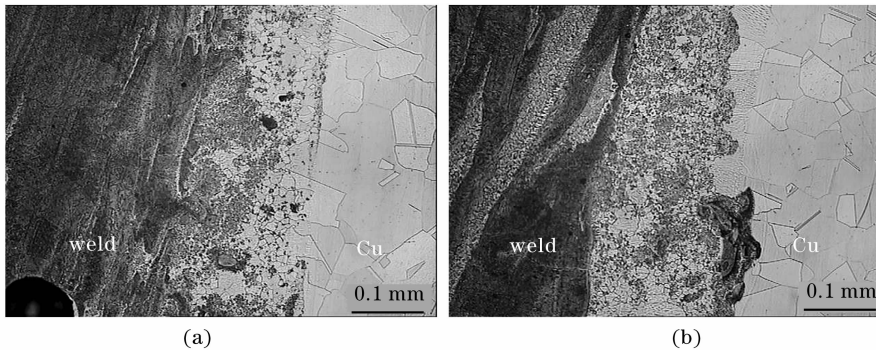


图 9 2 号试样接头微观组织
Fig. 9 Microstructure weld bead of joint 2

4 结 论

对铜钢对接焊进行了实验研究,并对不同工艺下的焊接接头的力学性能和组织状态进行了分析,得到以下结论:1) 当铜熔化较少时,焊接接头无明显缺陷,并且铜的熔化量沿厚度方向从上到下逐渐

减小,上部界面光滑,中下部出现湍流漩涡现象。焊缝接头力学性能优良。

2) 当铜大量熔化时,焊接接头出现气孔、裂纹等缺陷,厚度方向熔化量变化不大。焊缝接头力学性能急剧下降。

3) 对比垂直面面对接、采用斜面对接和激光光束偏向钢侧的激光焊接工艺,通过合理设计斜面角度和激光偏离量,可以控制钢的熔化量而获得性能优异的铜钢焊接接头。

参 考 文 献

- Zhao Jianjun, Ding Xue, Ma Ruilin *et al.*. Practicality Handbook of Dissimilar Materials Welding[M]. Anhui; Anhui Culture and Audiovisual Press, 2005. 905~907
赵健军,丁学,马瑞林等. 异种难焊材料的焊接实用手册[M]. 安徽:安徽文化音像出版社, 2005. 905~907
- Li Yajiang, Wang Juan, Liu Peng *et al.*. Welding and Application of Dissimilar Material [M]. Beijing; Chemical Industry Press, 2004. 176
李亚江,王娟,刘鹏等. 异种难焊材料的焊接及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2004. 176
- Pi Youdong, Dong Peng, Yang Wuxiong *et al.*. Laser penetration brazing of brass and low carbon steel[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1562~1566
皮友东,董鹏,杨武雄等. 黄铜-低碳钢异种金属激光深熔钎焊[J]. 中国激光, 2007, **34**(11): 1562~1566
- Lu Huimin, Chen Yunyuan, Zhu Linjuan *et al.*. Handbook of Mechanical Engineering Performance Materials [M]. Beijing; China Machine Press, 1994. 44~50
鲁惠民,陈运远,朱林娟等. 机械工程性能材料数据手册[M]. 北京:机械工业出版社,1994. 44~50
- Zhang Chaogang, Jiang Zuoyi, Wang Shilun *et al.*. *Practicality Handbook of Engineering Materials* [M]. Beijing; China Standard Press, 1989. 9~21
张朝纲,姜作义,王世伦等. 工程材料实用手册[M]. 北京:中国标准出版社, 1989. 9~21
- Kai Chen, Zhiyong Wang, Rongshi Xiao. Mechanism of welding on dissimilar metals between stainless steel and W-Cu alloy[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(5): 294~296
- ASM International Handbook Committee. Properties and Selection; Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials[M]. ASM Metal Handbook, 1992
- T. Sibillano, A. Ancona, V. Berardi *et al.*. Optical detection of conduction/keyhole mode transition in laser welding[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **191**: 364~367
- ASM International Handbook Committee. Alloy Phase Diagrams [M]. ASM Metal Handbook, 1993
- N. Postacioglu, P. Kapadia, J. Dowden. Theory of the oscillations of an ellipsoidal weld pool in laser welding[J]. *Appl. Phys.*, 1991, **24**: 1288~1292
- Pang Ming, Yu Gang, Liu Zhao *et al.*. Dissimilar metal of K418 and 42CrMo full penetration laser welding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1122~1126
庞铭,虞钢,刘兆等. K418与42CrMo异种金属的激光穿透焊接[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1122~1126
- Wang Wei, Chen Li, Zhao Xingke *et al.*. Effect of welding parameters on formation of welds during laser welding of NiTi shape memory alloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 291~296
王蔚,陈俐,赵兴科等. 激光焊接工艺参数对NiTi形状记忆合金焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2008, **35**(2): 291~296
- Liu Xiubo, Yu Gang, Pang Ming *et al.*. Laser welding of superalloy K418 to 42CrMo steel[J]. *Chinese J. Nonferrous Metals*, 2008, **18**(3):444~447
刘秀波,虞钢,庞铭等. K418高温合金和42CrMo合金钢的激光焊接[J]. 中国有色金属学报, 2008, **18**(3): 444~447
- Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO₂ laser welding of zinc coated high strength steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1133~1138
伍强,陈根余,王贵等. 高强度镀锌钢的CO₂激光焊接[J]. 中国激光, 2006, **33**(8): 1133~1138