

DOI: 10.3901/JME.2020.06.110

冷金属过渡条件下铜合金在钛和钢表面上的 润湿行为与界面特征*

常敬欢^{1,2} 曹睿^{1,2} 林巧力^{1,2}

(1. 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 兰州 730050;
2. 兰州理工大学材料科学与工程学院 兰州 730050)

摘要: 研究冷金属过渡条件下 ER CuNiAl 铜合金分别在裸钢板、热镀锌钢板和纯钛板表面的润湿行为和界面特征。结果表明,铜合金在裸钢、热镀锌钢和纯钛表面的润湿性均随着送丝速度的增大而变好,在同等送丝速度下铜合金在裸钢表面的润湿性要好于镀锌钢表面。此体系属于典型的温度依赖润湿体系。铜合金在镀锌钢表面润湿时,由于镀锌层中锌的挥发带走热量使得界面反应温度降低,导致界面反应变弱,润湿性变差;在电弧的作用下,熔滴周围形成了富锌区,其中铝富集于此区域并形成了 AlFeZn_8 和 Al_5Fe_2 化合物。铜合金在裸钢表面润湿时,由于铝与铁具有较强的亲和力,在电弧的作用下,焊丝中的铝很容易在界面上发生反应,从而形成明显的 Cu-Fe-Al 界面反应层。铜合金在纯钛表面润湿时,由于 Ti 在 Cu 中的固溶度较低,在电弧的作用下,铜和钛互溶形成明显的界面反应层,主要由 TiCu、 Ti_2Cu 和 $\alpha\text{-Ti}$ 组成。

关键词: 钛-钢异种金属; 冷金属过渡; 润湿行为; 界面特征

中图分类号: TG422

Wetting and Interface Microstructures of Copper Alloy on Titanium and Steel Surfaces under Cold Metal Transfer Condition

CHANG Jinghuan^{1,2} CAO Rui^{1,2} LIN Qiaoli^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Non-ferrous Metal,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050;
2. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050)

Abstract: The wetting behavior and interface characteristics of ER CuNiAl copper alloy on the surface of bare steel plate, galvanized steel plate and pure titanium plate are studied under cold metal transfer condition. The results show that the wettability of copper alloy on bare steel, galvanized steel and pure titanium surfaces increase with the increase of wire feeding speed, the wettability of copper alloy on the surface of bare steel is better than that of galvanized steel under the same wire feeding speed. This system is a typical temperature-dependent wetting system. When copper alloy is wetted on the surface of galvanized steel, the temperature of interfacial reaction decreases because the heat was taken away by the volatilization of zinc in the galvanized layer, resulting in weak interfacial reaction and poor wettability. Under the action of arc, zinc-rich zone is formed around the copper droplet, in which aluminum is enriched and AlFeZn_8 and Al_5Fe_2 compounds are formed. When copper alloy is wetted on the surface of bare steel, due to the strong affinity between aluminum and iron, aluminum in the welding wire can easily react on the interface under the action of arc, thus the obvious Cu-Fe-Al interface reaction layers were formed. When copper alloy is wetted on the surface of pure titanium, due to the low solid solubility of Ti in Cu, copper and titanium are mixed to form an obvious interface reaction layer under the action of arc, which is mainly composed of TiCu, Ti_2Cu and $\alpha\text{-Ti}$.

Key words: titanium-steel dissimilar metal; cold metal transfer; wetting behavior; interface characteristics

* 国家自然科学基金资助项目(51761027)。20190905 收到初稿, 20200106 收到修改稿

0 前言

随着现代工业的发展和科学技术的进步,单一材料的性能难以满足实际应用需求。轻质、节能、多功能的异种金属焊接结构已成为现代工业领域中重点发展方向^[1]。钛及钛合金以其自身具有良好的塑性和韧性以及优异的抗腐蚀性能,主要应用在航天航空、船舶、电力等领域。钢作为目前应用最广泛的一种金属材料,具有高强度、塑韧性好、成本低廉等多方面优势,钛-钢异种金属焊接充分发挥了材料各自的性能和作用^[2-5]。然而,钛及钛合金与钢在导热性、线性膨胀系数等物理性质方面存在很大的差异,在焊接过程中很容易产生焊接变形、焊接残余应力,增加了焊接的难度^[6]。另一方面,从钛-铁二元相图可以知道,铁在 α -Ti中的溶解度极低,当Fe的质量分数超过0.1%时,则合金内就会形成大量硬脆的金属间化合物TiFe及TiFe₂,降低接头的塑性和强度^[7],使得钛-钢异种金属连接的研究非常有必要。直接连接钛-钢异种金属时,钛-钢接头中存在大量硬脆的Ti-Fe金属间化合物(硬度达600~1 050 HV)^[8],因此,需要添加中间填充金属^[9-14]来抑制Ti-Fe脆性金属间化合物的生成。要获得优质的钛-钢焊接接头,中间填充金属与钛母材和钢母材表面的润湿性是至关重要的因素之一。

研究表明,由于铜与钛反应生成韧性相对较好的Cu-Ti化合物(硬度达500~600 HV)^[12];另外铜及铜合金具备良好的韧性,能起到缓解接头应力的作用,所以采用铜合金连接钛-钢异种金属。目前,学者们主要对金属与陶瓷体系的润湿性和界面结构进行系统研究,例如石墨^[15]、金刚石^[16]、氧化铝^[9,17]、氧化锆^[18]等陶瓷与金属所组成的体系,从而发挥陶瓷与金属各自优异的性能,实现两者之间的连接,进一步制备理想的结构材料。然而对于金属与金属体系的润湿性研究很少涉及,对于铜及铜合金熔滴在钢板和钛板上的润湿性的研究更少,因此还需要通过相关试验和具体的理论分析揭示铜合金熔滴分别在不同母材表面的润湿机理。此外,CAO等^[19]使用镀锌钢板实现了铝-钢、镁-钢的连接,进一步研究了镀锌钢板中镀锌层在焊接过程中的作用。ABDOLLAHZADEH等^[20]通过添加锌中间层来研究镁-铝异种金属接头。KAR等^[21]使用锌中间层实现了铝-钛异种金属的连接。上述研究者均采用锌中间层实现了异种金属的连接,并研究了锌在焊接过程中的作用,并没有学者研究铜合金在镀锌钢表面的润湿行为。

本试验借助冷金属过渡(Cold metal transfer, CMT)焊机系统,通过高速摄像机监测并表征ERCuNiAl铜合金熔滴在不同基板表面的润湿行为并分析其界面形成机理,根据铜合金熔滴在裸钢板、镀锌钢板以及纯钛板上润湿的特征,探究不同体系的共性规律。研究内容有望为钛-钢和铜-钢异种金属焊接接头的性能改善提供一定的理论依据。

1 试验方法

试验所用的材料为直径1.2 mm的ERCuNiAl铜合金焊丝,热镀锌钢板、裸钢板和纯钛TA2板的尺寸为100 mm×50 mm×1 mm,相应的化学成分如表1所示。镀锌层的厚度是10 μ m。

表1 试验材料的化学成分(质量分数) %

材料	元素					
	C	Si	Mn	P	S	
热镀锌 Q235 钢	0.12~0.2	≤0.3	0.3~0.7	≤0.045	≤0.045	
铜合金 焊丝	Al	Ni	Fe	Mn	Pb	Zn
	8.0	6.0	3.0	1.0	0.038	0.003

采用与文献[22]类似的润湿试验,所用的设备为福尼斯电弧焊接系统(CMT 3200,奥地利),背光源,滤波片,高速摄像机和数据处理系统。润湿试验的优点主要在于整个熔滴过渡过程可由高速摄像(1 200 幅/s)记录下来,并用熔滴形状分析软件计算出接触角,接触角的误差为 $\pm 2^\circ$ 。润湿试验前,先采用丙酮对纯钛TA2板待焊面进行清洗,再用砂纸打磨,然后用5%~10%氢氧化钠溶液清洗3~7 min,再用自来水冲洗,然后再用30% HNO₃溶液清洗1~3 min,再用自来水冲洗,最后用酒精冲洗。采用钢刷打磨裸钢板待焊表面,将镀锌钢板和处理好的裸钢板分别放入丙酮中超声清洗3次(每次3 min)。最终将处理好的基板固定在试验平台上。在试验过程中,焊炬垂直于基板,焊枪顶端与基板间的距离为5 mm,焊丝伸出长度3 mm,如图1所示。CMT焊机用于焊接试验的程序为一元程序,即电压和电流随着送丝速度的变化而变化,试验中选择的送丝速度为2.0~7.5 m/min,不同送丝速度对应的电流和电压如表2所示,在不同送丝速度下试验时间均为1.5 s。整个试验过程中采用高纯氩气保护,氩气流量为15 L/min。

润湿试验后,选取典型的试验样品切取横截面打磨和抛光,用配备能谱仪(Energy disperse spectroscopy,

EDS)的扫描电子显微镜(Scanning electron microscopy, SEM)(FEG 450, 荷兰)和 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD)(D8Discover25, 德国)对界面和三相线微观组织进行分析, 所有样品的界面分析均在背散射模式下进行。

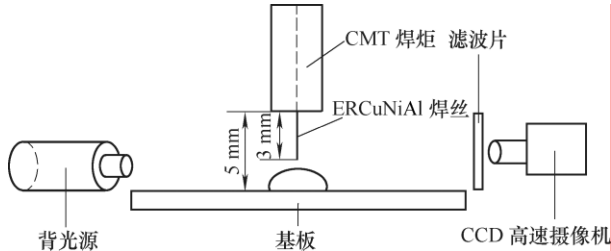


图 1 润湿装置示意图

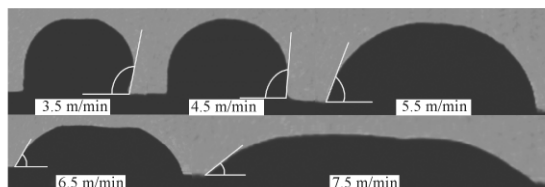
表 2 润湿试验工艺参数

送丝速度/(m/min)	电流/A	电压/V
2.0	58	12.4
2.5	71	12.4
3.0	84	12.5
3.5	103	12.9
4.5	141	13.7
5.5	171	15.0
6.5	194	16.8
7.5	226	22.7

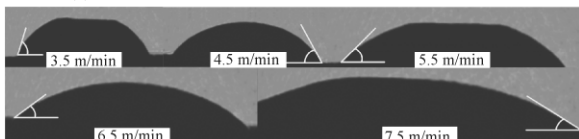
2 结果

2.1 铜合金在钢表面的润湿行为与界面特征

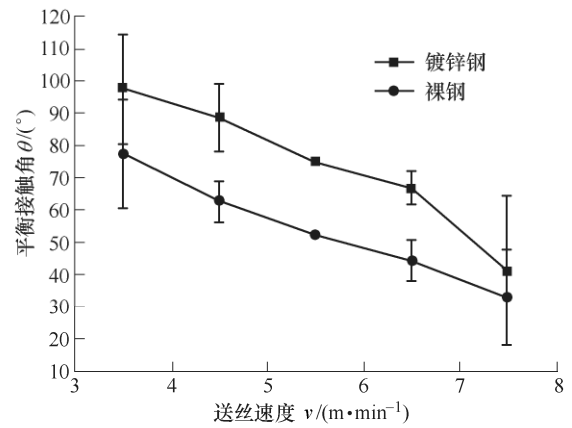
图 2a 和 2b 分别为铜合金在镀锌钢和裸钢表面润湿平衡后的高速摄影图像, 通过对接触角进行测量, 得到铜合金在镀锌钢和裸钢表面润湿后平衡接触角随送丝速度的变化情况, 如图 2c 所示。从图中可以看出, 铜合金在镀锌钢和裸钢表面的最终润湿性随送丝速度的变化规律基本一致, 都随着送丝速度的增大, 平衡接触角逐渐减小, 说明热输入对两种体系的润湿性有很大的影响。



(a) 铜合金在镀锌钢表面润湿平衡后的高速摄影图像



(b) 铜合金在裸钢表面润湿平衡后的高速摄影图像



(c) 铜合金在不同钢表面上润湿后平衡接触角随送丝速度的变化

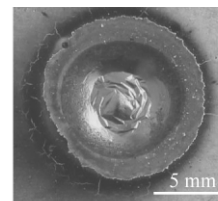
图 2 铜合金在不同钢表面上润湿平衡后的高速摄影图像和平衡接触角随送丝速度的变化

一般认为通过润湿角 θ 的大小来表征润湿性的好坏^[23], 具体情况如表 3 所示。因此, 我们可以看出, 两个体系的平衡接触角随着送丝速度的增大, 在送丝速度为 7.5 m/min 时, 平衡接触角均小于 55°, 说明铜合金在镀锌钢和裸钢表面的润湿性都很好, 且在相同的送丝速度下, 铜-裸钢体系润湿平衡后的接触角相对较小, 从而进一步说明铜合金在裸钢表面的润湿性优于镀锌钢表面的润湿性。

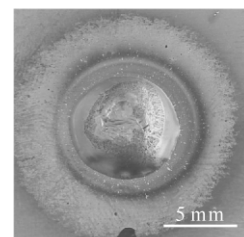
表 3 润湿角与润湿性的关系

润湿角 θ (°)	润湿性
$0 < \theta < 30$	非常好
$30 < \theta < 55$	好
$55 < \theta < 70$	差
$\theta > 70$	非常差

图 3 为润湿试验后典型的试样宏观图片。以 6.5 m/min 的送丝速度润湿后, 铜-镀锌钢(图 3a)和铜-裸钢(图 3b)两者熔滴周围均出现明显的烧损。



(a) 铜合金润湿镀锌钢



(b) 铜合金润湿裸钢

图 3 润湿试验后典型的宏观照片

图4和图5分别为铜合金以6.5 m/min的送丝速度在镀锌钢和裸钢表面润湿后试样的表面形貌。图4a为铜-镀锌钢表面的微观组织。图4a中A区放大如图4b所示,结合图4b中锌元素的面分布图(图4c),可以明显看到锌元素的富集,即富锌区,如图4b中白色的虚线区域所示。EDS点分析^[7, 24]如表4所示,结果表明区1主要由Zn、AlFeZn₈和Al₅Fe₂组成,区2主要为Zn固溶体。富锌区(区2)主要是由于镀锌层的蒸发,且锌与铁的亲和力和弱而形成的。富锌区周围(区1)铝的富集主要来源于镀锌钢中镀层下面有极薄的Al-Fe金属间化合物^[19]。对比图4b和4d,元素线分布曲线与EDS点分析结果一一对应。铜-裸钢表面形貌无明显的元素富集现象,如图5所示。

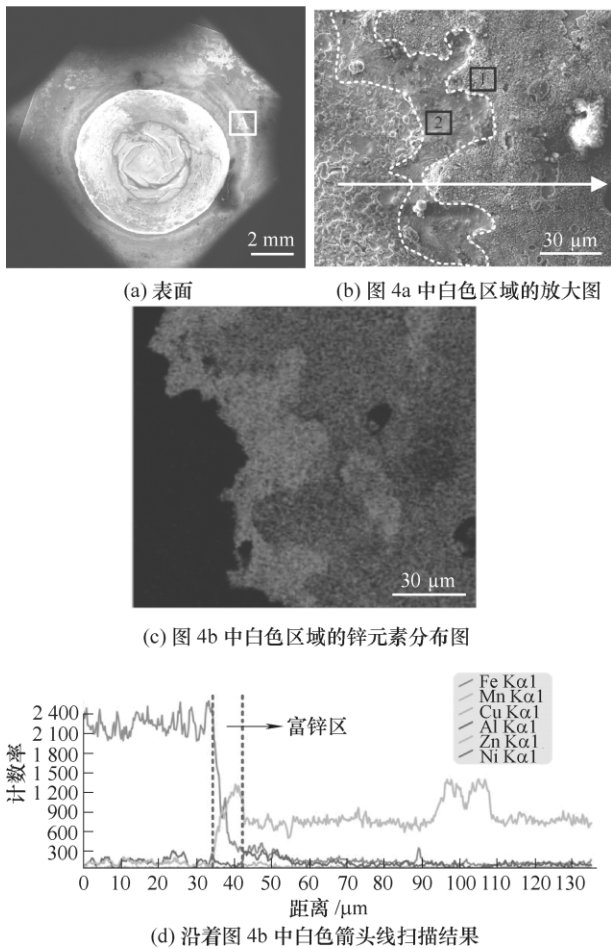


图4 铜合金润湿镀锌钢后试样的微观组织

表4 图4中EDS成分分析(原子分数) %

测试区	Fe	Al	Cu	Zn	Ni	Mn	Si
1	10.3	12.4	4.6	72.1	0.2	0.4	0.1
2	4.8	10.6	1.4	83.0	0.0	0.1	0.1

图6为铜合金以6.5 m/min的送丝速度在镀锌钢表面润湿后横截面试样的微观组织。结合EDS点

分析结果^[7],如表5所示。图6a为界面中心位置的组织,浅灰色的基体相为Cu,深灰色的相为 α -Fe。图6b为三相线边缘组织,浅灰色的基体相与界面处一致,区域6为Fe固溶体,无化合物生成。进一步对三相线前端进行放大,如图6c所示,结合锌元素的面分布图(图6d),明显发现富锌区,与铜-镀锌钢的表面分析结果一致。

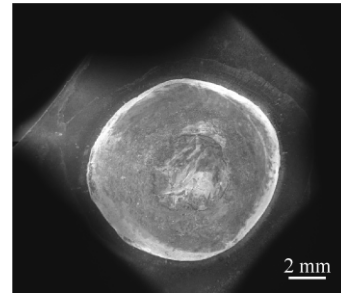


图5 铜合金润湿裸钢后试样表面组织

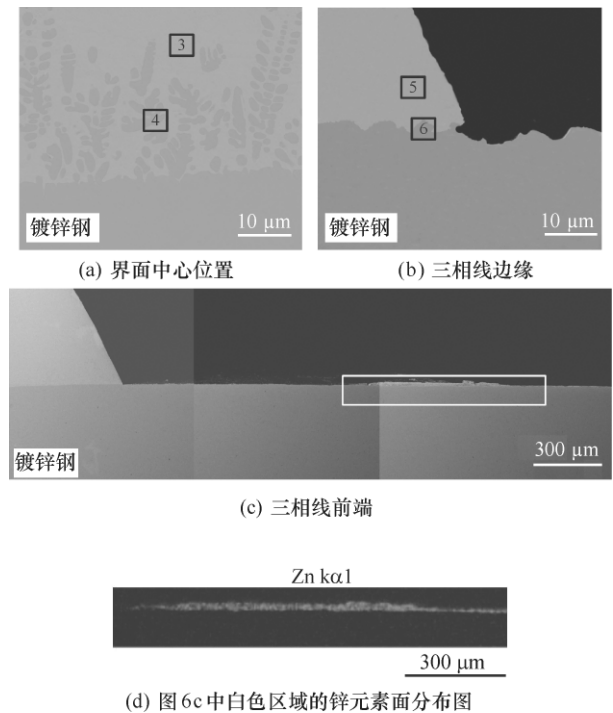


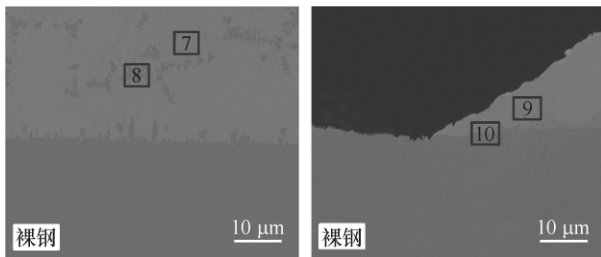
图6 铜合金润湿镀锌钢后横截面试样的微观组织

图7为铜合金以6.5 m/min的送丝速度在裸钢表面润湿后横截面试样的微观组织。结合EDS点分析结果^[7],如表5所示。图7a为界面中心位置的组织,浅灰色的基体相为Cu,深灰色的相为 α -Fe。图7b为三相线边缘组织,区9为Cu,区10为Cu-Fe-Al相。

图8为铜合金以6.5 m/min的送丝速度在裸钢和镀锌钢表面润湿后横截面试样中熔滴的XRD图谱。从图中可以看出,主要由Cu固溶体和Fe固溶体组成。

表 5 图 6 和图 7 中 EDS 成分分析(原子分数) %

测试区	Fe	Al	Cu	Zn	Ni	Mn	Si
3	5.1	17.0	71.5	0.3	4.2	1.2	0.4
4	65.2	13.7	13.5	0.4	4.5	1.1	1.6
5	6.1	17.4	71.3	0.3	3.5	1.1	0.4
6	87.5	5.8	3.3	2.0	0.5	0.4	0.4
7	5.3	14.5	74.5	—	3.6	1.5	0.6
8	60.8	14.2	15.7	—	5.6	1.0	2.8
9	4.9	12.9	76.8	—	3.3	1.8	0.3
10	22.3	14.6	56.5	—	4.2	1.3	1.0



(a) 界面中心位置 (b) 三相线边缘
图 7 铜合金润湿裸钢后横截面试样的微观组织

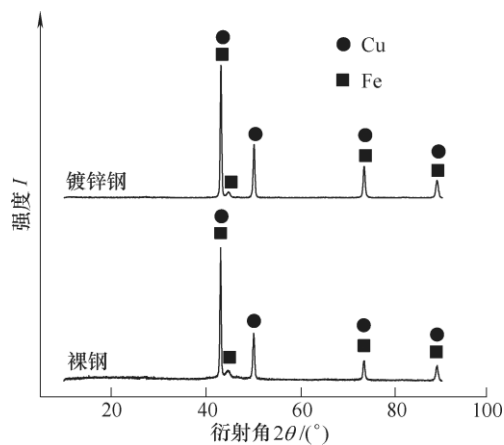


图 8 铜合金在不同钢表面上润湿后横截面试样中熔滴的 XRD 结果分析

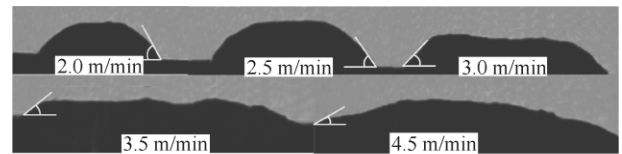
2.2 铜合金在纯钛表面的润湿行为与界面特征

图 9a 为铜合金在纯钛表面润湿平衡后的高速摄影图像, 通过对接触角进行测量, 得到铜合金在纯钛表面润湿后平衡接触角随送丝速度的变化情况, 如图 9b 所示。结果发现随着送丝速度的增大, 平衡接触角逐渐减小, 即润湿性变好。根据表 3 的情况, 在送丝速度为 4.5 m/min 时, 铜合金在纯钛表面润湿后的平衡接触角小于 30°, 说明铜合金在纯钛表面的润湿性非常好。

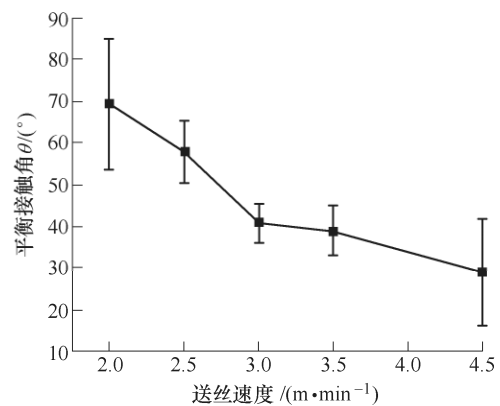
图 10 为铜合金以 2.5 m/min 的送丝速度在纯钛表面润湿后试样的宏观形貌。熔滴周围出现明显的烧损。

图 11 为铜合金以 2.5 m/min 的送丝速度在纯钛表面润湿后横截面试样的微观组织。结合 EDS 点分析^[7]结果, 如表 6 所示。图 11a 为界面中心位置的

组织, 可以明显地看到界面反应层, 如图 11a 中白色的虚线部分所示。结合线扫描结果发现明显的 Ti-Cu 界面反应层, 如图 11e 所示。进一步放大界面反应层(图 11a 中 B 区), 如图 11b 所示, 浅灰色的相为 TiCu 和 Ti₂Cu, 深灰色的相为 α-Ti 和 Ti₂Cu。图 11a 中的 C 区放大如图 11c 所示, 浅灰色的基体相为 Cu, 深灰色的相为 Ti-Cu-Al-Ni 四元相。图 11d 为三相线边缘组织, 没有发现明显的现象。



(a) 铜合金在纯钛表面润湿平衡后的高速摄影图像



(b) 铜合金在纯钛表面润湿后平衡接触角随送丝速度的变化

图 9 铜合金在纯钛表面上润湿平衡后的高速摄影图像和平衡接触角随送丝速度的变化

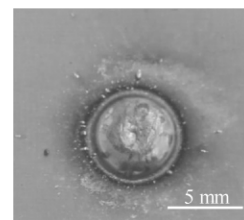
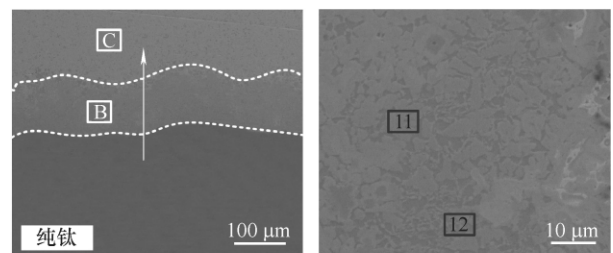


图 10 铜合金在纯钛表面上润湿后典型的宏观照片

图 12 为铜合金以 2.5 m/min 的送丝速度在纯钛表面润湿后横截面试样中熔滴的 XRD 图谱。从图中可以看出, 主要由 TiCu 和 Ti₂Cu 化合物以及 Cu 固溶体和 Ti 固溶体组成。



(a) 界面中心位置 (b) 图 11a 中 B 区放大

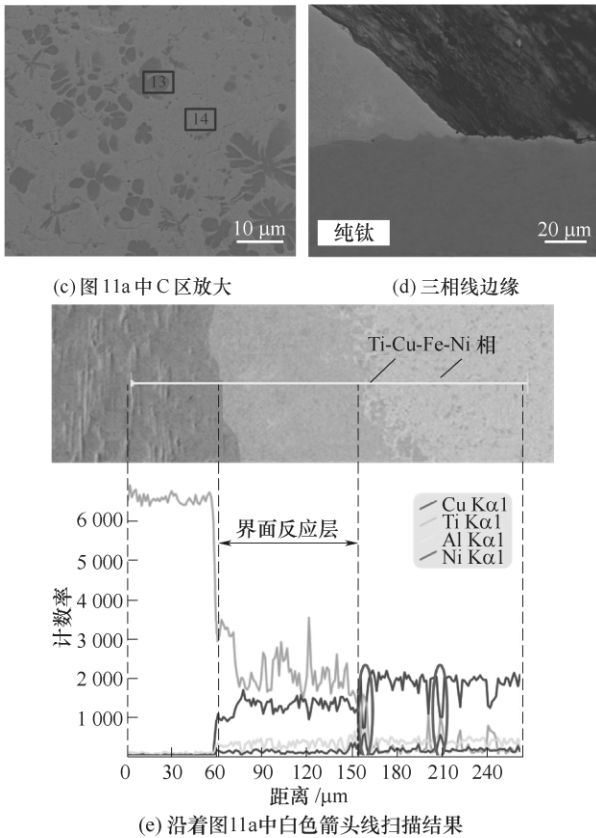


图 11 铜合金润湿钛后横截面试样的微观组织

表 6 图 11 中 EDS 成分分析(原子分数) %

测试区	Ti	Cu	Al	Ni
11	49.9	37.5	9.0	3.6
12	61.5	30.0	7.0	1.5
13	29.2	21.6	25.1	24.1
14	1.5	82.1	14.3	2.1

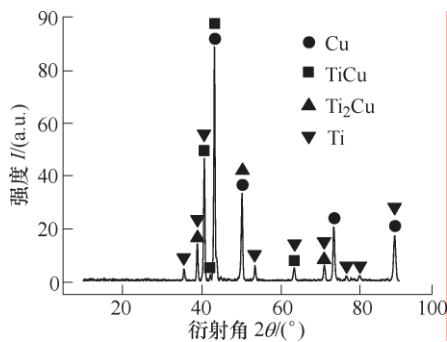


图 12 铜合金在纯钛表面上润湿后横截面试样中熔滴的 XRD 结果分析

3 分析

3.1 润湿性

当液态金属在固态金属表面润湿时，润湿行为不仅受到外部因素的影响，如气氛，温度，基体的表面状态(粗糙度、杂质、吸附性能等)，而且也受

界面反应、表面活性物质及氧化膜等因素的影响。对于本研究而言，CMT 焊接过程中的电弧力，焊丝的回抽力都有可能影响液态金属的润湿和铺展。

一般认为接触角的减小主要是界面自由能的变化引起的。液态金属在固态金属表面的接触角由杨氏方程^[25]来表征

$$\cos \theta_Y = \frac{\sigma_{sv} - \sigma_{sl}}{\sigma_{lv}} \quad (1)$$

式中， σ_{ij} 表示任意两相界面自由能。液-气两相的界面自由能 σ_{lv} 由熔融金属自生的性能决定，因此 σ_{lv} 可以认为是常数。当固态金属的成分变化时，固-气两相的界面自由能 σ_{sv} 和固-液两相的界面自由能 σ_{sl} 发生变化，进一步影响液态金属在固态金属表面的接触角 θ_Y ^[26]。

通过对铜合金在钢和纯钛表面润湿后平衡接触角随送丝速度的变化规律进行分析，在同等送丝速度下铜合金在纯钛表面的润湿性要好于在钢表面的润湿性。从热力学角度考虑，铜合金在钢和纯钛表面上的润湿符合热力学形成条件。假设铜-铁、铜-钛溶液为无限稀释的二元规则溶液，那么可以通过式(2)^[27]来获得两者的相互作用系数 λ_{ij}

$$\lambda_{ij} = (\overline{\Delta H_{i(j)}} + \overline{\Delta H_{j(i)}}) / 2 \quad (2)$$

而混合焓可由文献[27]得到，即 $\overline{\Delta H_{i(j)}}$ 和 $\overline{\Delta H_{j(i)}}$ 分别为 i 在 j 中和 j 在 i 中的混合焓。经计算得 $\lambda_{CuFe} = 51.5 \text{ kJ/mol}$ 、 $\lambda_{CuTi} = -36.5 \text{ kJ/mol}$ ，相互作用系数 λ_{ij} 的数值越负则表示两种金属的相互作用越强，即铜与钛的相互作用相对于铜与铁的较强，因此铜合金在纯钛表面的润湿性更好。

通过对铜合金在镀锌钢和裸钢表面上润湿后平衡接触角随送丝速度的变化规律进行分析，在同等送丝速度下铜合金在裸钢表面的润湿性要好于在镀锌钢表面的润湿性。主要是由于锌蒸发带走了热量，降低了界面反应温度，导致铜合金在镀锌钢表面的润湿性不如在裸钢表面的好。由此可见，在铜合金-钢体系中，锌促进润湿的效果并不是很明显，而在铝-钢体系研究中发现锌促进润湿的效果^[19]。

3.2 界面结构

除了接触角以及混合焓等反应润湿性好坏之外，界面微结构的形成对润湿也起着重要的作用。

在铜合金-镀锌钢体系中，通过表面形貌分析和横截面试样微观组织分析，镀锌钢表面锌层的蒸发，使得熔滴周围形成了明显的富锌区，其中铝富集于此区域并形成了 $AlFeZn_8$ 和 Al_5Fe_2 化合物。在电弧的作用下，锌蒸发带走了热量使得界面反应温度降低，界面反应变弱，从而界面无反应层形成。

在铜合金-裸钢体系中,由于铝与铁具有较强的亲和力,在电弧的作用下,焊丝中的铝很容易在界面上发生反应,从而形成明显的 Cu-Fe-Al 界面反应层,满足热力学条件,可以用吸附能公式^[28]来解释

$$E = m_1(\lambda_{AM} - \lambda_{BM} - \lambda_{AB}) \quad (3)$$

EUSTATHOPOULOS 等^[27]指出对于 B-M/A 三元金属体系(其中 B 为溶剂、A 为金属基板以及 M 为溶质元素)中溶质 M 在 B/A 界面(即液/固界面)上的吸附能可以表示为 E , m_1 为界面结构常数(恒为正值), λ_{ij} 为两种金属之间的相互作用系数,根据公式 2 计算得 $\lambda_{FeAl} = -44.5$ kJ/mol、 $\lambda_{CuAl} = -31$ kJ/mol、 $\lambda_{CuFe} = 51.5$ kJ/mol,代入式(3)计算得,铝在界面上吸附能为 $E/m_1 = -65$ kJ/mol。因此,铜合金-裸钢界面形成 Cu-Fe-Al 界面反应层。

在铜合金-钛体系中,通过对铜合金在纯钛表面润湿后平衡接触角随送丝速度的变化规律进行分析,铜合金在纯钛表面的润湿性良好。通过分析 Cu-Ti 二元相图发现, Ti 在 Cu 中的固溶度较低,在一定的温度下,会形成大量的 Ti-Cu 金属间化合物。通过界面形貌分析,在电弧的作用下,铜和钛混合形成明显的界面反应层,主要由 TiCu、Ti₂Cu 和 α -Ti 组成,界面结合良好。

4 结 论

(1) 铜合金在裸钢、热镀锌钢和纯钛表面的润湿性均随着送丝速度的增大而变好,在同等送丝速度下铜合金在裸钢表面的润湿性要好于镀锌钢表面。

(2) 在铜合金-镀锌钢体系中,镀锌钢表面蒸发的锌挥发带走热量使得界面反应温度降低,界面反应变弱,从而界面无反应层形成,润湿性变差。

(3) 在铜合金-裸钢体系中,由于铝与铁具有较强的亲和力,焊丝中的铝很容易在界面上反应形成金属间化合物,从而形成明显的 Cu-Fe-Al 界面反应层,因此铜-裸钢体系也属于反应润湿。

(4) 在铜合金-纯钛体系中,铜-钛的混合焓较负;在电弧的作用下,铜和钛混合形成明显的 TiCu、Ti₂Cu 和 α -Ti 界面反应层,这两方面决定了铜合金在纯钛表面具有较好的润湿性,并且属于反应润湿体系。

参 考 文 献

- [1] GUO Shun, ZHOU Qi, KONG Jian, et al. Effect of beam offset on the characteristics of copper/304stainless steel electron beam welding[J]. Vacuum, 2016, 128: 205-212.
- [2] 李继红, 谢威威, 杨军, 等. 钛/钢复合板熔化焊接头的组织和性能[J]. 金属热处理, 2016, 41: 48-52.
LI Jihong, XIE Weiwei, YANG Jun, et al. Microstructure and properties of melting welded joint of Ti /steel composite plates[J]. Heat Treatment of Metals, 2016, 41: 48-52.
- [3] 胡珑艺, 王文平. 电厂烟囱用钛钢复合板焊接工艺分析[J]. 机械研究应用, 2016, 29(4): 160-165.
HU Longyi, WANG Wenping. Welding process analysis on the titanium clad steel plate of power plant chimney[J]. Mechanical Research Application, 2016, 29(4): 160-165.
- [4] 单磊. TC4 钛合金-钢复合激光焊接工艺研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
SHAN Lei. Research on laser beam welding TC4 titanium alloy to steel[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [5] 褚巧玲. TA1/Q345 层状复合板焊接机理及其组织演变行为研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
CHU Qiaoling. Fusion welding on TA1/Q345 lamellar structure and joint microstructure evolution[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2017.
- [6] LI L B, SUN Y F. Handbook of metal materials[M]. Beijing: China Machine Press, 2011.
- [7] MASSALAKI T B. Binary alloy phase diagrams[M]. OH: ASM International, 1990.
- [8] 李标峰. 钛与钢及钛复合钢板的焊接性研究(II)[J]. 材料开发与应用, 2004, 19(2): 45-46.
LI Biaofeng. Study on the weldability of titanium and steel and titanium clad steel plate(II)[J]. Development and Application of Materials, 2004, 19(2): 45-46.
- [9] 王廷, 张秉刚, 陈国庆, 等. 钛/钢异种金属焊接存在问题及研究现状[J]. 焊接, 2009(9): 29-33.
WANG Ting, ZHANG Binggang, CHEN Guoqing, et al. Problems and research status of welding of dissimilar metals between titanium alloy and steel[J]. Welding Joining, 2009(9): 29-33.
- [10] WANG Ting, ZHANG Binggang, WANG Houqin, et al. Microstructures and mechanical properties of electron beam-welded titanium-steel joints with vanadium, nickel, copper and silver filler metals[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(4): 1498-1504.
- [11] LEE J G, LEE M K. Microstructure and mechanical behavior of a titanium-to-stainless steel dissimilar joint brazed with Ag-Cu alloy filler and an Ag interlayer[J]. Materials Characterization, 2017, 129: 98-103.
- [12] ZHANG Binggang, WANG Ting, CHEN Guoqing, et al. Contact reactive joining of TA15 and 304 stainless steel

- via a copper interlayer heated by electron beam with a beam deflection[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, 21(10): 2067-2073.
- [13] CHANG Jinghuan, CAO Rui, YAN Yingjie. The joining behavior of titanium and Q235 steel joined by cold metal transfer joining technology[J]. *Materials*, 2019, 12(15): 2413-2429.
- [14] HAO Xiaohu, DONG Honggang, XIA Yueqing, et al. Microstructure and mechanical properties of laser welded TC4 titanium alloy/304 stainless steel joint with (CoCrFeNi) 100-xCux high entropy alloy interlayer[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 803: 649-657.
- [15] WEIRAUCH D A Jr, KRAFICK W J. The effect of carbon on wetting of aluminum oxide by aluminum[J]. *Metallurgical Transactions A*, 1990, 21A: 1745-1751.
- [16] NOGI K, OKUD Y, OGINA K, et al. Wettability of diamond by liquid pure metals[J]. *Materials Transactions JIM*, 1994, 35(3): 156-160.
- [17] LAURENT V, CHATAIN D, CHATILION C, et al. Wettability of monocrystalline alumina by aluminium between its melting point and 1273 K[J]. *Acta Metallurgica*, 1994, 36(7): 1797-1803.
- [18] BANERJI A, SURAPPA M K, ROHATGI P K. Cast aluminum alloys containing dispersions of zircon particles[J]. *Metallurgical Transactions B*, 1983, 14B: 273-283.
- [19] CAO Rui, CHANG Jinghuan, HUANG Qian, et al. Behaviors and effects of Zn coating on welding-brazing process of Al-steel and Mg-steel dissimilar metals[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 31: 674-688.
- [20] ABDOLLAHZADEH A, SHOKUH FAR A, CABRERA J M, et al. The effect of changing chemical composition on dissimilar Mg/Al friction stir welded butt joints using zinc interlayer[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2018, 34: 18-30.
- [21] KAR A, KAILAS S V, SUWAS S. Effect of mechanical mixing in dissimilar friction stir welding of aluminum to titanium with zinc interlayer[J]. *Trans. Indian. Inst. Met.*, 2019, 72(6): 1533-1536.
- [22] LIN Qiaoli, YANG Fan, CAO Rui, et al. Wetting and interfacial characteristics of Mg AZ61 alloy/galvanized steel in cold metal transfer process[J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 2015, 46A: 3793-3796.
- [23] GALE W F, FERGUS J W, INGRAM W M. Wettability of NiAl by a liquid Ni-Si-B alloy[J]. *Journal of Materials Science*, 1997, 32(18): 4931-4940.
- [24] PRINCE A, VILLARS P, OKAMOTO H. *Handbook of ternary phase alloys*[M]. OH, USA: ASM International, 1995.
- [25] YOUNG T. *An Essay on the cohesion of fluids*[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1805, 94: 65-87.
- [26] MA G F, YE H, ZHANG H L, et al. Wettability of molten Sn on AlCoCrCuxFeNi high-entropy alloy[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2017, 199: 1-6.
- [27] EUSTATHOPOULOS N, NICHOLAS M G, DREVET B. *Wettability at high temperatures*[M]. Oxford: Elsevier, 1999.
- [28] LI C D, WANG X J, LIU W Q, et al. Microstructure and strengthening mechanism of carbon nanotubes reinforced magnesium matrix composite[J]. *Mater. Sci. Eng. A*, 2014, 597(8): 264-269.

作者简介: 常敬欢, 女, 1992 年出生, 博士研究生。主要研究方向为异种金属的焊接性。

E-mail: 1716295050@qq.com

曹睿(通信作者), 女, 1977 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为异种金属的焊接性。

E-mail: caorui@lut.edu.cn