

研究与开发

变形量对铜/钢固-液复合双金属材料结合界面影响研究

冯丹竹¹, 胡筱旋², 于明光¹

(1. 鞍钢集团钢铁研究院, 辽宁 鞍山 114009; 2. 鞍钢集团科技发展部, 辽宁 鞍山 114009)

摘要: 采用固液浇注复合的方式制备铜/钢双金属复合材料, 通过 Gleeble-3800 热力模拟试验机研究变形量对铜/钢固-液复合材料结合界面的影响。结果表明, Fe、Cu 元素在界面过渡层连续分布, 随变形量增大, 铜侧及钢侧晶粒尺寸均逐渐减小, 硬度逐渐增大, 过渡层距离逐渐增大, Fe、Cu 元素扩散程度提高; 在 40% 变形量下, 材料各侧晶粒得到显著细化, 硬度最高, 扩散距离可达 17 μm 。铜/钢固-液复合双金属材料界面过渡层的形成是由液态铜浇注在固态钢表面过程中产生浸润和漫流, 随后元素相互扩散共同实现。

关键词: 铜/钢复合材料; 变形量; 结合界面

中图分类号: TB331, TG142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-4613(2023)05-0054-05

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4613.2023.05.0010

Study on Effect of Deformation Amount on Binding Interface of
Copper/Steel Solid-Liquid Composite Bimetal Material

FENG Danzhu¹, HU Xiaoxuan², YU Mingguang¹

(1. Ansteel Iron & Steel Research Institutes, Anshan 114009, Liaoning, China;

2. Science and Technology Development Department of Ansteel Group,
Anshan 114009, Liaoning, China)

Abstract: The copper/steel bimetallic composite material was prepared by solid-liquid casting complex method, and then the effect of deformation amount on the binding interface of the copper/steel solid-liquid composite material was studied by the Gleeble-3800 thermal simulation testing machine. The study results showed that Fe and Cu elements were continuously distributed in the interface transition layer. As the deformation amount increased, the grain sizes on the sides of both copper material and steel material gradually decreased, while their hardness gradually increased, the distance between the transition layers gradually increased and the diffusion level of Fe and Cu elements increased. On the other hand, the grains on each side of the materials were significantly refined under 40% deformation amount and the composite material's hardness was the highest with diffusion distance reaching up to 17 μm . The formation of the interface transition layer of the copper/steel solid-liquid composite bimetallic material was achieved by the infiltration and over-flowing generated in the process of casting on the surface of solid steel by liquid copper, together with subsequent mutual diffusion of elements.

Key words: copper/steel composite material; deformation amount; binding interface

随着工业的发展, 对工艺技术及材料性能的

要求不断提高, 单一材料因综合性能欠佳难以满足多性能需求的现代工业。金属复合板材因兼有复层材料的特殊性能, 又有基层材料的强度和刚度而得到广泛应用^[1]。铜作为一种常用材料, 因其

冯丹竹, 硕士, 高级工程师, 2015年毕业于东北大学材料学专业。E-mail: fengdanzhu@163.com

具有良好的导电导热性、延展性、耐蚀性等而广泛应用^[2]。采用铜/钢复合不仅可发挥原有基体特性,通过结合界面的相互作用使复合材料不但兼顾钢的硬度及铜侧的耐蚀性及导电导热性等^[3],还可大幅降低成本,因此,广泛应用于航空、工程机械、建筑工程、海上石油和天然气钻井平台等领域,其应用前景广阔。目前,铜/钢复合制备工艺可分为三种:固-固相复合、液-液相复合和固-液相复合^[4]。固-液相复合法因其成本低廉,操作简单,结合界面良好,可实现双金属材料的连续化生产而得到广泛应用。铜/钢双金属复合材料的性能主要取决于界面结合状态。良好的界面结合可有效均匀分

布材料内应力,减少应力集中,并能有效地传递应力载荷等信息^[5]。为此,本文研究了不同变形量对固液浇注复合制备的铜/钢双金属复合材料结合界面显微组织、性能、元素分布等的影响,为指导实际生产、提高复合材料质量提供依据。

1 试验材料及方法

选择 EH420 钢作为固相基体,选择工业纯铜作为液相复合层,试验用材料化学成分如表 1 所示,通过固液浇注复合法将二者连接,在复合后的双金属材料上截取 $\Phi 6\text{ mm}\times 15\text{ mm}$ 圆棒状试样,铜和钢的规格为(4+11)mm。

表 1 试验材料的主要成分(质量分数)

Table 1 Main Compositions in Test Material (Mass Fraction)										%
工业纯铜	Cu	Sn	Zn	Pb	Ni	Fe	S			
	99.9	0.002	0.005	0.005	<0.005	0.005	<0.005			
EH420	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	Cr	Nb	Ti
	0.10	0.20	1.60	0.01	0.006	0.80	0.22	0.21	0.032	0.015

采用 Gleeble-3800 热力模拟试验机,将试样于 900 ℃,保温 180 s,随后进行单道次压缩,变形量分别为 20%,30%,40%,应变速率 5 s^{-1} ,以 $20\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 冷却到室温。

将模拟试样进行镶嵌、研磨、抛光后,采用三氯化铁盐酸水溶液腐蚀,通过光学显微镜对双金属复合材料结合界面处显微组织进行观察,采用扫描电镜对界面微观结构及成分分布进行分析,通过显微硬度计测试界面结合层的显微硬度,以评价复合材料在外力加载时所表现抵抗弹塑性变形的能力。

2 试验结果与分析

2.1 不同变形量下复合材料的显微组织

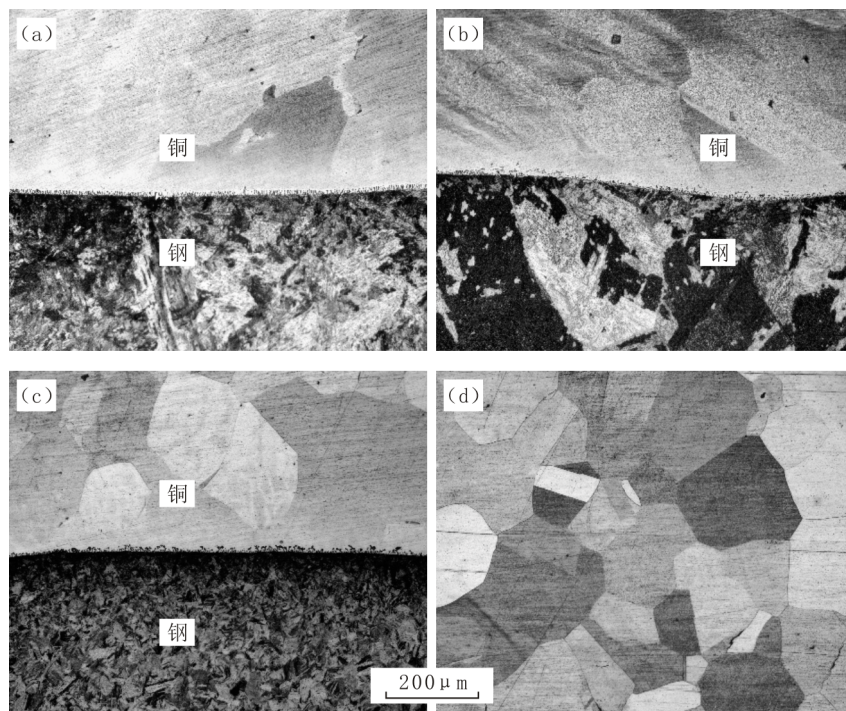
图 1 为不同变形量下复合材料结合界面显微组织形貌。图 1(a)和图 1(b)为形变量 20%和 30%的结合界面组织,由于压缩量较小,铜侧保持一定铸态组织,呈树枝状,枝晶较粗大,钢侧组织为板条马氏体和粒状贝氏体,晶粒粗化明显。图 1(c)和图 1(d)为形变量为 40%的结合界面组织和铜侧微观形貌,铜侧显微组织为 α 单相组织,存在部分等轴晶粒及少量孪晶组织,这

是因为纯铜为面心立方结构^[6],滑移系多,更容易产生滑移^[7],由于变形量增大,提高铜内部应力,在某些晶界处的滑移临界切应力超出了孪晶的临界切应力进而产生了形变孪晶^[7]。呈现该种孪晶组织,一方面与金属晶体结构有关,一方面可能与受力方式有密切的联系^[8]。钢侧组织为板条马氏体,由于变形量增大,铜侧及钢侧晶粒尺寸均显著减小。

2.2 不同变形量下复合材料的硬度

图 2 为不同变形量下复合材料维氏硬度,由图 2(a)可知,在不同变形量下钢侧到结合界面维氏硬度显著降低,由结合界面到铜侧,硬度继续降低直至曲线平缓。随变形量的增加,复合材料的钢-结合界面-铜的硬度均获得一定量的增大。图2(b)为复合材料各侧的平均硬度,发现 40%变形量较 0%变形量钢侧平均硬度提高了 61%,结合界面提高了 36%,铜侧提高了 30%。复合材料经过变形发生塑性形变,使位错滑移、缠结,晶粒破碎、细化,提高材料变形抗力,导致硬度提高,同时晶粒的细化也起到细晶强化作用。双金属复合材料经不同程度变形,晶粒破碎程度和形变量不同^[9],位错密度存在差异,导致塑性变形抗力不同,表现

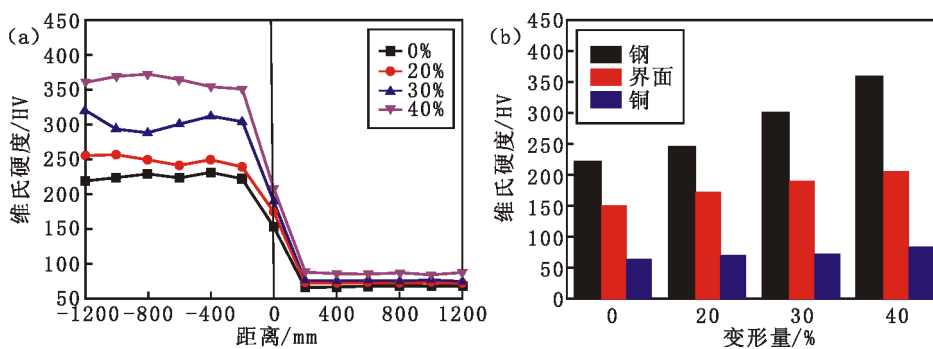
为随变形量增加,硬度增大,40%变形量下,材料 各侧晶粒均得到显著细化,因此其硬度较高。



(a) 20%形变量下结合界面组织; (b) 30%形变量下结合界面组织;
(c) 40%形变量下结合界面组织; (d) 40%形变量下铜侧组织

图1 复合材料在不同形变量下显微组织形貌

Fig. 1 Microstructure Morphology of Composite Material under Different Deformation Amount



(a) 复合材料显微硬度分布; (b) 复合材料各侧平均硬度

图2 不同变形量下复合材料的维氏硬度

Fig. 2 Vickers Hardness of Composite Material under Different Deformation Amount

2.3 不同变形量下复合材料结合界面元素分布

图3为复合材料在不同变形量下经线扫描获得的界面及过渡层Fe、Cu元素扩散曲线。由图可知,在不同变形量下,Fe、Cu元素在界面过渡层连续分布,Fe元素与Cu元素在此处有细微的波动可能是扩散伴随着Fe、Cu元素的化合反应所致。Fe元素从钢侧到过渡层含量逐渐减少,由过渡层

到铜侧急剧降低;Cu元素由铜侧-过渡层-钢侧的元素分布变化趋势与铁元素相反,Fe、Cu元素的扩散趋势均呈“X”型。

随变形量的增加,过渡层距离逐渐增大,Fe、Cu元素扩散程度提高,变形量为40%时,扩散距离可达17 μm,这是由于形变过程可驱使空位被原子填补,促进元素的扩散及界面的结合。此外,

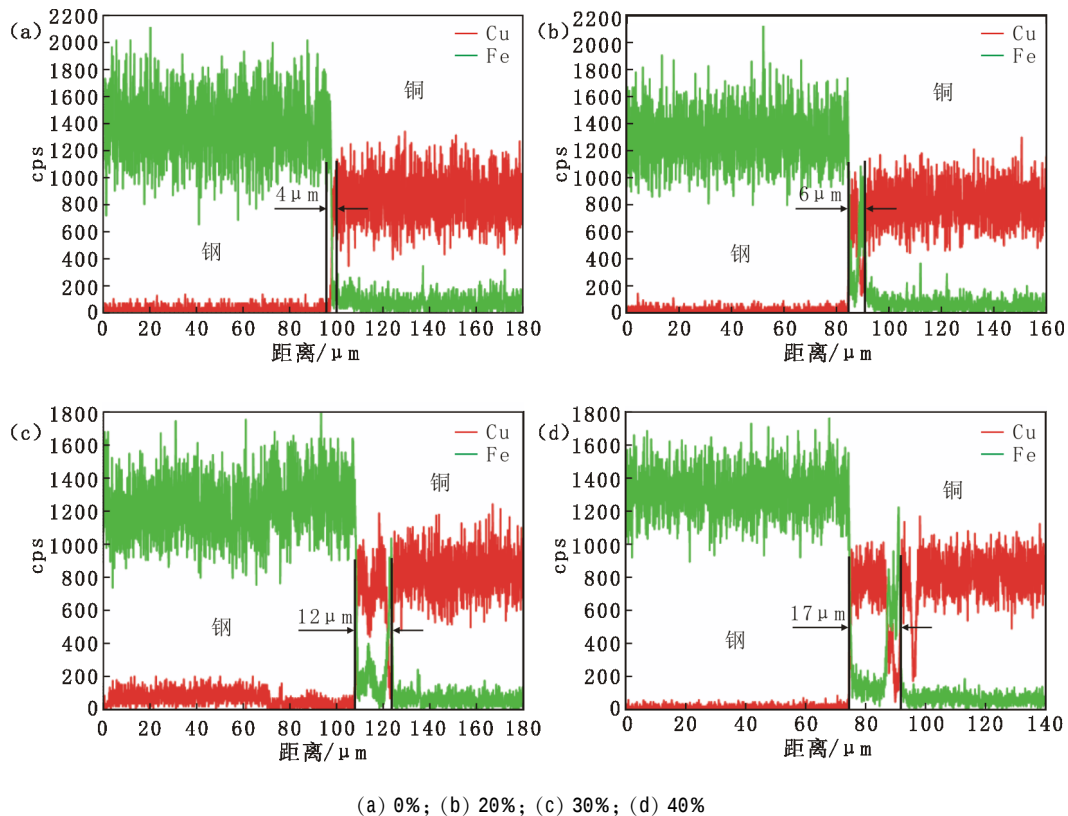


图3 不同变形量下复合材料的界面元素分布

Fig. 3 Interface Element Distribution of Composite Material under Different Deformation Amount

试样形变前均于 900 ℃,保温 180 s,高温下保温一定时间有助于元素扩散,因此变形量为 20%、30%、40%试样的过渡层距离均大于未变形试样。

2.4 双金属复合材料界面结合机理分析与讨论

双金属材料界面过渡层的形成是由液态铜浇注在固态钢表面过程中产生浸润和漫流^[10],随后元素相互扩散共同实现,对其结合机理进行以下两阶段分析讨论。

2.4.1 润湿过程

液相铜浇注于预热的钢板上,可使铜与钢板表面发生浸润和漫流行为,铜与铁原子间距离足够产生物理吸附作用。液相铜受表面张力趋势,液滴与接触平面之间的切线与接触面之间的夹角 θ 称为接触角^[11],其力学关系表达式如下式。

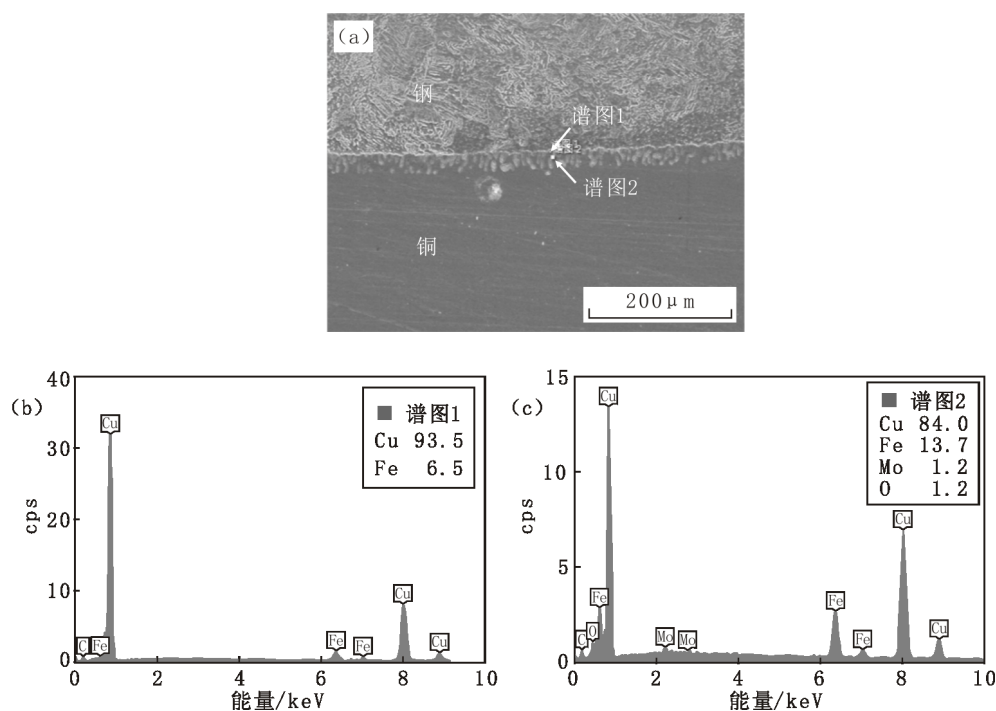
$$\cos\theta = (\sigma_{\text{气固}} - \sigma_{\text{液固}}) / \sigma_{\text{气液}} \quad (1)$$

式中, $\sigma_{\text{气固}}$ 为空气与基体金属间的界面张力^[11]; $\sigma_{\text{液固}}$ 为液态金属与基体金属间的界面张力^[11]; $\sigma_{\text{气液}}$ 为空气与液态金属间的界面张力^[11]。为提高结合界

面润湿效果,应使 θ 接触角减小,由式(1)可知,可降低 $\sigma_{\text{液固}}$ 和 $\sigma_{\text{气液}}$ 。本文通过预热基体钢板使铁原子的激活能提升,降低 $\sigma_{\text{液固}}$,打破界面力学关系的平衡,使液态铜浇注在固态钢表面过程中产生浸润和漫流。

2.4.2 扩散过程

由于固液浇注复合过程温度较高,可激活液相铜原子和基体表面原子,提高其原子激活能,使固相和液相相互接触发生扩散,随着扩散的进行,结合面逐渐增大,元素扩散距离随之增大。扩散过程主要由高温热源和浓度梯度共同作用^[10],铜、铁等原子在固液相结合界面处发生扩散,且优先在表面和结合界面处进行。图4为变形量 20%时结合界面和表面处的 EDS 能谱图,由图4可发现,谱图1和谱图2处的铁、铜等元素在结合界面及表面发生明显扩散,这是由于在结合界面和表面处能量较晶粒内部高,可给予足够的驱动力使元素充分扩散。



(a) 变形量 20% 时 SEM 形貌; (b) 位置 1 处的 EDS 能谱图; (c) 位置 2 处的 EDS 能谱图

图 4 变形量 20% 时结合界面和表面处的 EDS 能谱图

Fig. 4 EDS Energy Spectra at Binding Interface and Surface under 20% Deformation Amount

3 结论

(1) 由于压缩量较小, 形变量 20% 和 30% 的复合材料, 铜侧保持一定铸态组织, 形变量为 40% 时铜侧显微组织为 α 单相组织, 存在部分等轴晶粒及少量孪晶组织, 随变形量增大, 铜侧及钢侧晶粒尺寸均逐渐减小; 随变形量增加, 硬度增大, 40% 变形量下, 材料各侧晶粒均得到显著细化, 因此其硬度最高;

(2) 在不同变形量下, Fe、Cu 元素在界面过渡层连续分布, Fe 元素从钢侧到过渡层含量逐渐减少, 由过渡层到铜侧急剧降低; Cu 元素变化趋势与铁元素相反, 随变形量的增加, 过渡层距离逐渐增大, Fe、Cu 元素扩散程度提高, 变形量为 40% 时, 扩散距离可达 17 μm ;

(3) 铜/钢固-液复合双金属材料界面过渡层的形成是由液态铜浇注在固态钢表面过程中产生浸润和漫流, 随后元素相互扩散共同实现。

参考文献

- [1] 夏兆辉, 姚辉, 孙谊嫒, 等. 铜铝复合材料在电力电气行业的研究和应用[J]. 热加工工艺, 2016, 45(22): 24-28.
- [2] Caron R N. Copper alloys: Alloy and temper designation [M].

Encyclopedia of Materials: Science and Technology, 2008: 1660-1662.

- [3] 王厚勤, 曹建, 张丽霞, 等. 铜合金与钢连接技术研究进展[J]. 焊接技术, 2009, 38(3): 1-5.
- [4] Leedy K D, Stubbins J F. Copper alloy-stainless steel bonded laminates for fusion reactor applications: tensile strength and microstructure[J]. Materials Science and Engineering A, 2001, 297(1): 10-18.
- [5] 陈文革, 侯林涛, 罗启文, 等. 45 钢与 QA19-4 铝青铜的界面冶金分析[J]. 铸造, 2015, 64(6): 538-541.
- [6] 张震宇, 杨纯宜. 铜加工中的连续挤压技术应用[J]. 世界有色金属, 2008(2): 17-18.
- [7] 程禹霖, 运新兵, 杨俊英, 等. 轧制变形量对连续挤压纯铜板带组织性能的影响[J]. 塑性工程学报, 2014, 21(5): 77-81.
- [8] 王露娟, 宋克兴, 王青, 等. 拉拔变形对不同直径纯铜线材组织性能的影响[J]. 河南科技大学学报, 2013, 34(3): 14-17.
- [9] 李顺雨. 锡青铜-钢双金属复合板组织控制及其性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [10] 刘承斌. 连续固液法制备白铜/钢复合板组织性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- [11] 张平, 张元好, 常庆明. 高强铜/钢双金属复合导板的界面结合机制[J]. 特种铸造及有色合金, 2012, 32(8): 768-770.
- [12] 安治国, 黄艳新, 侯环宇, 等. 汽车前轴用贝氏体型非调质钢连续冷却转变[J]. 钢铁, 2016, 51(12): 70-73.

(编辑 田玉婷)

修回日期: 2022-05-28