

铜/钢/铜冷轧复合薄带弯曲性能实验研究

陈敬琪¹, 刘相华¹, 闫述¹, 于庆波²

(1. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819; 2. 江苏理工学院 机械工程学院, 江苏 常州 213001)

摘 要: 以 Q345 钢带为基材, T3 纯铜为覆材, 通过冷轧复合—中间退火—冷轧减薄—轧后退火的工艺路线, 制备出铜/钢/铜复合薄带. 通过反复弯曲实验研究复合带厚度和退火温度对复合带弯曲性能的影响. 实验发现: 复合带的弯曲性能主要依赖于冷轧复合中的机械作用以及退火过程中的扩散作用. 冷轧复合带随着厚度逐渐减薄, 弯曲性能近似线性增强. 退火工艺能大幅度提高复合带的弯曲性能, 退火温度与弯曲性能基本呈指数关系变化.

关 键 词: 铜/钢/铜复合; 薄带; 弯曲性能; 冷轧工艺; 扩散

中图分类号: TG 335.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)05-0647-06

Experimental Study on Bending Capacity of Copper/Steel/Copper Cold Rolled Composite Strip

CHEN Jing-qi¹, LIU Xiang-hua¹, YAN Shu¹, YU Qing-bo²

(1. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. Mechanical Engineering Institute, Jiangsu Institute of Technology, Changzhou 213001, China. Corresponding author: LIU Xiang-hua, E-mail: liuxh@neu.edu.cn)

Abstract: Using Q345 steel strip as the matrix and T3 pure copper as cladding material, a copper/steel/copper composite strip can be produced by a process route of cold-rolled composing – intermediate annealing – cold – rolled thinning – post rolling. The effects of the strip thickness and annealing temperature on the bending capacity of the composite strip were investigated by repeated bending experiments. It is found that the bending capacity of the composite strip mainly depends on mechanical interaction during the cold-rolled composing and the diffusion features during annealing. When the strip thickness becomes thinner during rolling, the bending capacity of the cold-rolled strip almost linearly increases. Moreover, the annealing process improves the bending capacity of the strip as well. The results shows that the bending capacity has an exponential relationship with annealing temperature.

Key words: copper/steel/copper composite; thin strip; bending capacity; cold rolling process; diffusion

近年来,随着电子信息产业的迅速发展,我国在通信、高性能计算机、数字电视等领域也取得一系列重大技术突破,我国已经成为全球最大的电子信息产品制造基地.单一金属材料性能已不足以提供满足千差万别用户需求的综合性能.复合材料可以将两种性能互补的金属通过适当的加工工艺,合成具有综合两种组元金属优良性能,甚至表现出组元金属均不具有的新性能的新型材

料,因此获得人们的青睐.

相对于纯铜和铜合金,铜/钢层状复合材料由于其优异的力学性能、导电性能、低成本等特点而深受关注.近年来,铜/钢复合材料弯曲性能也越来越受重视,该性能决定其使用寿命与应用领域,电子通信行业中如机械弹片、电连接器端子等都要求材料具有良好的弯曲性能.于宝义等^[1]研究了铜合金 – Q195 – 铜合金三层复合板室温轧制

成形工艺及其复合机理,得到了反复弯曲次数达到 8~16 次的复合板;赵军等^[2]研究了 H62 黄铜与 Q235 钢的轧制复合,得到厚度为 0.9 mm 反复弯曲次数为 32 次的铜/钢/铜复合板。

随着电子元器件向高性能化、微型化发展,厚度 ≤ 0.1 mm 的铜/钢/铜复合薄带在电子通信行业应用越来越广泛,目前对于这种极薄规格复合材料的弯曲性能却鲜有研究. 本文通过冷轧复合—中间退火—冷轧减薄—轧后退火的工艺路线,获得具有优良弯曲性能的复合薄带,并研究了复合带厚度和退火温度等参数对弯曲性能的影响.

1 实验材料与方法

1.1 试样准备

复合带以 Q345 钢材为基材, T3 纯铜为覆材,对应成分见表 1 和表 2. 为了兼顾复合带的导电性和强度,复合前的铜带尺寸为厚 0.6 mm \times 宽 50 mm \times 长 150 mm,钢带尺寸为厚 0.3 mm \times 宽 50 mm \times 长 150 mm. 将铜带、钢带表面进行打磨处理,控制其粗糙度值为 $Ra = 80 \sim 120 \mu\text{m}$,然后通过乙醚清洗并风干.

1.2 复合带制备

采用四辊可逆轧机(工作辊尺寸: $\phi 120$ mm \times

300 mm,支撑辊尺寸: $\phi 340$ mm \times 290 mm)进行单道次冷轧复合,压下率为 75%,冷轧复合后复合带厚度为 0.37 mm. 分别选取温度为 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1 000 $^{\circ}\text{C}$ 进行扩散退火,退火时间为 2 h,退火过程中采用惰性气体保护.

表 1 实验用 T3 工业纯铜化学成分(质量分数)			
Table 1 Major components of industrial T3 pure copper(mass fraction)			
%			
Cu + Ag	Bi	Sb	As
99. 95	0. 001	0. 003	0. 005
Fe	Pb	S	O
0. 02	0. 008	0. 006	0. 007

表 2 实验用 Q345 钢的化学成分(质量分数)					
Table 2 Major components of Q345 steel(mass fraction)					
%					
C	Mn	Si	P	S	Fe
0. 12	1. 20	0. 30	0. 03	0. 02	98. 33

将 700 $^{\circ}\text{C}/2$ h 退火后的复合带进行异步轧制,减薄至不同厚度(0.3, 0.2, 0.1, 0.08, 0.06 mm),再将厚度为 0.1 mm 的复合带进行温度为 200, 300, 400, 500 $^{\circ}\text{C}$,保温时间为 2 h 的轧后退火,得到复合带样品,工艺流程如图 1 所示.

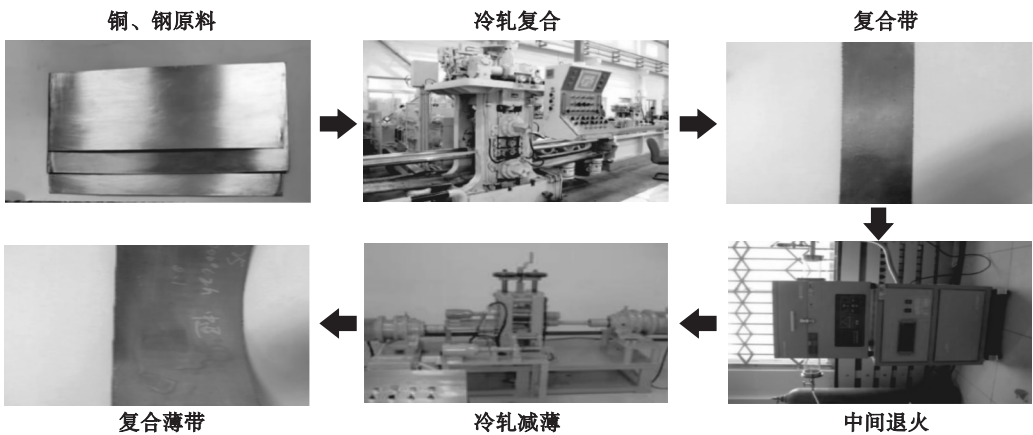


图 1 复合带的制备工艺流程图
Fig. 1 Flow chart of preparation process route to produce a composite strip

1.3 复合带弯曲性能检测与显微组织观察

本文采用反复弯曲实验评定复合带在工程应用中承受弯曲载荷的能力,对复合带进行反复弯曲加载,观察复合带在加载结束以后界面的结合形态(界面是否发生开裂)来评定复合界面的结合强度以及复合带的抗弯性能. 实验过程中对不同厚度、退火温度下复合带中间部位沿轧制方向

切取小块试样,用扫描电镜分析界面形貌,将复合带沿着结合界面撕开并观察撕裂面的形貌.

依据 GB/T 235—2013(厚度 ≤ 3 mm 金属薄板、薄带反复弯曲塑性变形能力的测定)标准,通过反复弯曲实验来衡量复合带的弯曲性能. 试样的长 150 mm,宽 20 mm,取样时,应在复合带表面无损伤的部位切取,试样的边部应留有一定加工

余量,便于去除边部毛刺.将试样一端夹紧,使另一端绕着一定半径的圆柱形表面弯曲 90°,再向相反的方向弯曲 90°,试样在反复弯曲时受到剪应力,通过试样弯曲处结合界面分离时的弯曲次数来评价复合带的弯曲性能.图 2 为反复弯曲实验原理示意图.图中圆柱半径为 1mm,试样由起始位置弯曲 90°后返回起始位置为一次弯曲,其速度每分钟不超过 60 次.实验时应保证试样夹持处不被咬伤,且弯曲时试样夹持处不产生位移.连续弯曲直至复合带异种金属发生分离为止,记下此时的弯曲次数 N ,试样断裂的最后一次弯曲不计入弯曲总次数.

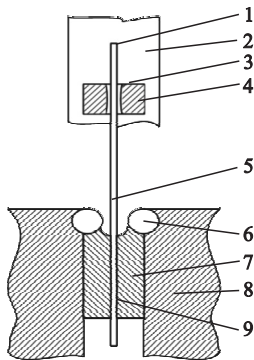


图 2 反复弯曲实验原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of repeated bending test
1—试样;2—弯曲管;3—拨杆夹缝;4—拨杆;5—弯曲臂转动中心轴;6—圆柱支座;7—夹块;8—支座;9—夹持面.

2 弯曲性能

2.1 复合带厚度对弯曲性能的影响

冷轧复合后,厚度为 0.37 mm 的复合带经 700 ℃/2 h 中间退火后,再进行冷轧减薄.图 3 为复合带厚度对弯曲性能的影响.复合带厚度为 0.3 mm 时,反复弯曲次数 N 是 60 次;复合带的厚度为 0.1 mm 时,经过 150 次反复弯曲后复合带弯曲位置出现铜层和钢层分离的现象;而当复合带厚度减薄至 0.06 mm 时,反复弯曲次数高达 560 次.实验表明,随着厚度的逐渐减薄,复合带的抗弯能力呈指数型快速增长,试样厚度减薄至微米级别时,呈现出“越小越强”的尺寸效应,晶粒尺寸显著减小,位错不断塞积,加工硬化程度加剧,应变梯度逐渐增加,屈服强度上升,弯曲性能显著改善^[3].

2.2 退火温度对复合带弯曲性能的影响

图 4 为中间退火温度对复合带弯曲性能的影响.厚度为 0.37 mm 的复合带进行中间退火,退火温度由 400 ℃ 上升至 1 000 ℃ 时,复合带反复弯曲次数由 40 次上升至 102 次,抗弯性能显著上

升.图 5 为轧后退火温度对复合带弯曲性能的影响,未经退火处理、厚度为 0.1 mm 复合带(反复弯曲次数为 150 次),已经具有良好的弯曲性能.而复合带的退火温度由 200 ℃ 上升至 500 ℃ 时,反复弯曲次数由 290 次增加至 650 次,相比于未退火时提高了 4 倍.比较不同退火温度下的复合带弯曲性能,发现将复合带经过轧后退火处理后,随着退火温度的逐渐上升,复合带的弯曲性能近似线性增强.这是由于退火处理使复合带结合界面原子相互扩散,在界面的两侧形成一定厚度的扩散层^[4],从而改善了其结合强度.另外,退火处理可以消除复合带由于塑性变形产生的残余应力^[5],从而增强复合带的弯曲性能.

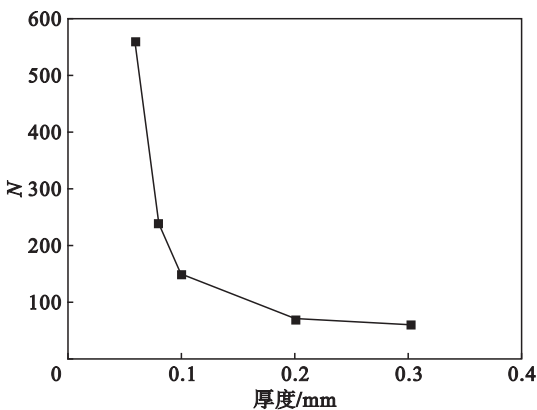


图 3 厚度对复合带弯曲性能的影响
Fig. 3 Effect of thickness on bending capacity of the composite strip

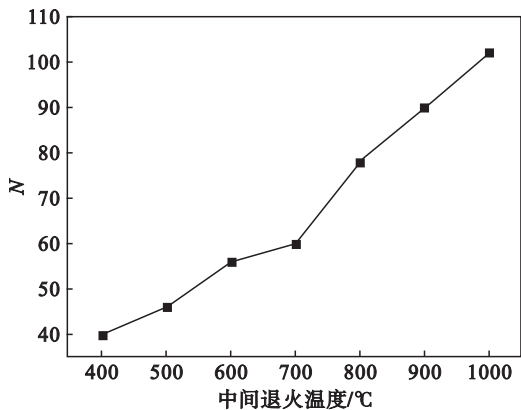


图 4 中间退火温度对复合带弯曲性能的影响
Fig. 4 Effect of intermediate annealing temperature on bending capacity of the composite strip

3 讨 论

复合带的弯曲性能与界面处两种金属结合强度密不可分,而复合带结合强度的产生主要依赖于两个过程:一是冷轧过程中的机械作用,二是退火过程中的扩散作用.

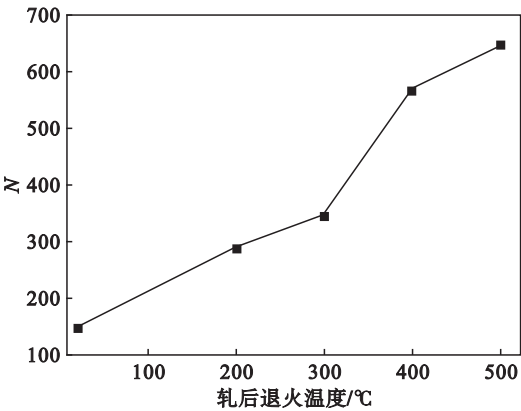


图 5 轧后退火温度对复合带的弯曲性能的影响
Fig. 5 Effect of post-rolling annealing temperature on bending capacity of the composite strip

3.1 冷轧过程中的机械作用

冷轧复合之前,铜带和钢带的表面经打磨,金属基体表面形成加工硬化层.当施加的轧制力很小时,由于金属表面凹凸不平,铜和钢表面接触为点接触,实际的接触面积很小,复合时很难形成有效的机械结合.在施加足够大的轧制力时,金属基体表面发生塑性变形,内部金属受到很大的挤压力冲破表层的加工硬化层,金属带延伸时,加工硬

化层不能随着金属基体一起延伸而破裂,从而形成裂口,内部金属从裂口流出相互结合,这与裂口机制^[1]特征相吻合.内层金属露出表面,在正压力的作用下在界面处相互接触^[6],实现有效的机械结合.

冷轧复合后,对厚度为 0.37 mm 的复合带中间部位沿轧制方向取样,并沿着样品铜钢结合界面撕开,对钢层和铜层的撕裂面形貌及能谱进行分析(图 6).可知,轧制复合时,由于轧制压力和摩擦力的作用,铜钢两种金属紧密接触,黏滞在一起流动.沿着 α -Fe 和 Cu 晶界产生切向应力,使得 α -Fe 和 Cu 晶粒发生了转动和移动,造成其表面晶粒间联系的破坏,出现了显微的空隙^[7].由于加工硬化引起的应力集中,从而产生近似鱼鳞状的裂口(图 6a).在轧制过程中,铜表面的加工硬化层逐渐减薄,被钢层表面的裂口边缘刺破形成裂口^[8](图 6b).图 6c 和图 6d 为钢层和铜层的撕裂面能谱分析,发现两种撕裂面相互独立,Fe, Cu 两种金属元素并没有相互嵌入彼此基体.这说明冷轧复合后,结合界面主要形成物理结合,在室温下一般不会形成冶金结合^[9].

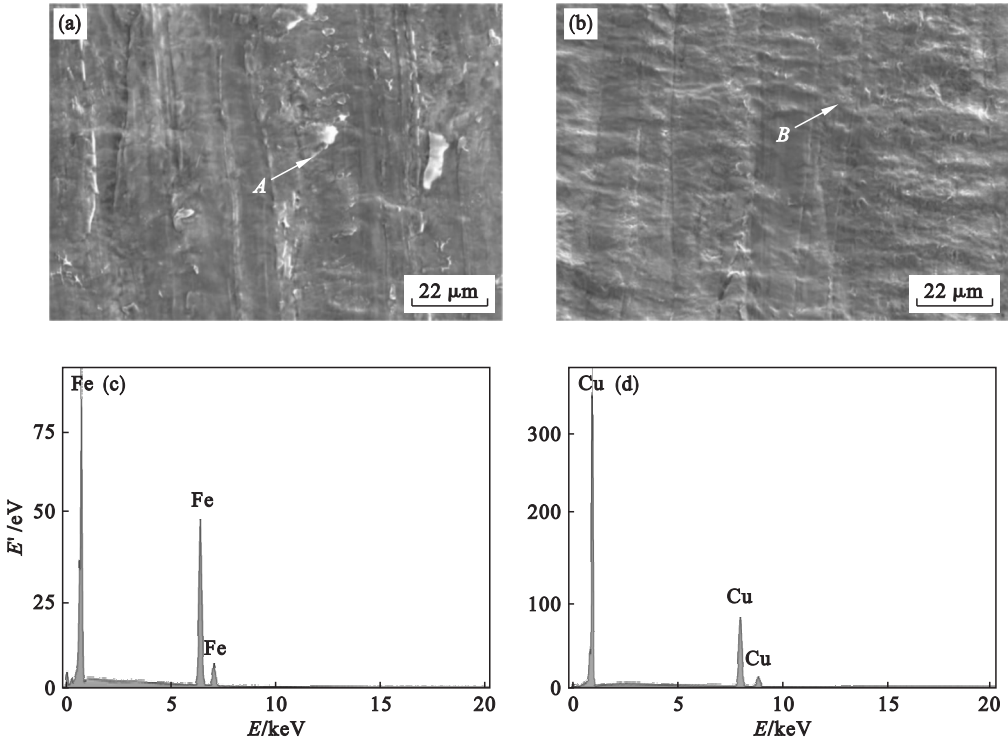


图 6 未退火时复合带撕裂面扫描形貌以及能谱分析
Fig. 6 SEM micrographs and energy spectrum in the tear zone of the composite strip without annealing
(a)—钢层撕裂面; (b)—铜层撕裂面; (c)—A 点能谱分析图; (d)—B 点能谱分析图.

3.2 退火过程中的扩散作用

冷轧复合后,对厚度为 0.37 mm 的复合带进行 600 ℃/2 h 的中间退火后,进行撕裂面形貌观

察及能谱分析(图 7).图 7 a 为钢层撕裂面,对比于图 6 a 中未退火时钢层撕裂面的形貌,出现了很多脊状物,经过能谱分析,发现钢层撕裂面有

Cu 元素的存在(图 7c). 同样在铜层撕裂面的能谱分析中发现 Fe 元素的存在(图 7d). 对比图 6 c 和 6 d 的检测结果,表明复合带经过扩散退火之

后,结合界面两侧 Fe,Cu 元素相互扩散,在撕裂面形貌上表现出“粘接”的特征.

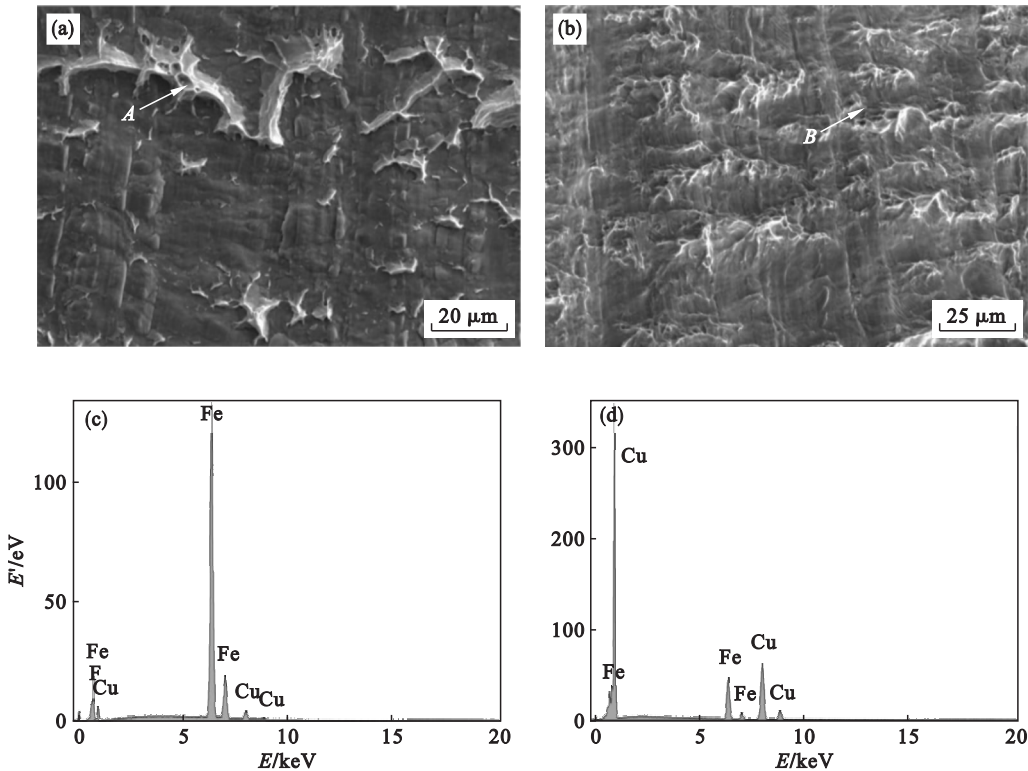


图 7 退火温度为 600 °C 时的复合带撕裂面扫描形貌以及能谱分析

Fig. 7 SEM micrographs and energy spectrum in the tear zone of the composite strip annealed at 600 °C

(a)—钢层撕裂面; (b)—铜层撕裂面; (c)—A 点能谱分析图; (d)—B 点能谱分析图.

厚度为 0.37 mm 复合带中间退火后,对铜/钢结合界面进行形貌观察. 图 8 分别是复合带在 600 °C 和 1 000 °C 时退火 2 h 的界面形貌对比. 图 8 a 中退火温度 600 °C,复合带结合界面存在明显未结合的区域,有大量的孔洞等缺陷. 图 8b 退火温度为 1 000 °C,复合带结合界面孔洞等缺陷几乎完全消失,实现良好结合.

冷轧复合带经过退火后原子扩散作用对复合

带结合强度的影响要比复合时的机械结合作用强很多. 两种金属经过大轧制力复合时,发生剧烈塑性变形,使得铜层和钢层内部产生大量的位错和晶格畸变等缺陷^[10]. 退火可消除复合带的残余应力,促进异种原子之间发生相互扩散,使得界面上大部分的缺陷减小或消失^[11],从而加强复合带的界面结合强度.

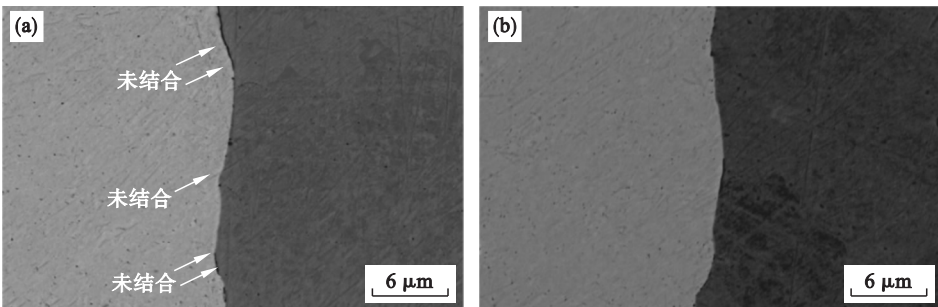


图 8 不同退火温度下的复合带的结合界面形貌扫描图

Fig. 8 SEM micrographs of the composite strip annealed at different temperatures

(a)—600 °C/2h; (b)—1 000 °C/2 h.

图 9 为不同退火温度下复合带结合界面化学成分线扫描. 退火温度由 600 ℃ 升高至 1 000 ℃ 时,复合带结合界面两侧 Cu,Fe 原子相互扩散的深度由 0.8 μm 增长至 1.5 μm. 这一过程主要是发生体扩散,因此速度很慢,经过长时间的保温

后,才能发生越过结合界面的晶粒生长,孔洞等缺陷消失,引起内应力松弛,部分塑性得以恢复. 异种金属复合时,由于两种金属之间原子浓度、热膨胀系数的差别,对原子之间的相互扩散和渗透有加强作用,有利于界面结合强度的提高.

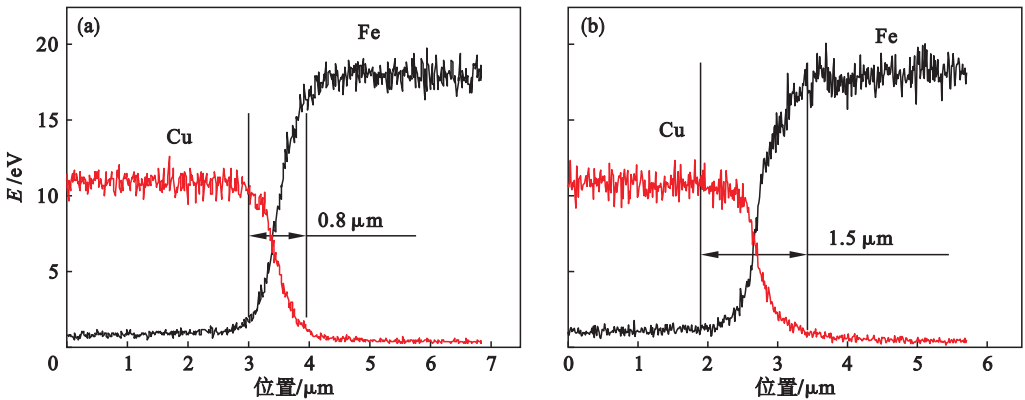


图 9 不同退火温度下的复合带的结合界面线扫描
Fig. 9 Line scanning of EDS analysis for the composite strip annealed at different temperatures
(a)—600 ℃/2 h; (b)—1 000 ℃/2 h.

4 结 论

1) 通过冷轧复合—中间退火—冷轧减薄—轧后退火的工艺路线可以获得具有良好弯曲性能的铜/钢/铜复合薄带.

2) 冷轧复合带随着厚度逐渐减薄,弯曲性能近似线性增强. 退火工艺能大幅度提高复合带的弯曲性能,退火温度与弯曲性能基本呈指数关系变化. 厚度为 0.1 mm 的复合带经过 500 ℃/2 h 退火后,反复弯曲达到 650 次.

3) 复合带弯曲性能主要依赖于冷轧复合中的机械作用以及退火过程中的扩散作用. 复合带经过退火后,结合界面两侧 Cu,Fe 原子相互扩散,退火制度为 1 000 ℃/2 h 时扩散深度为 1.5 μm.

参考文献:

[1] 于宝义,安振之,齐克敏. 铜—钢—铜三层复合板室温轧制成形工艺及结合机制的研究 [J]. 热加工工艺,2001(3): 34—36.
(Yu Bao-yi, An Zhen-zhi, Qi Ke-min. Research on forming process and bonding mechanism of copper-steel-copper three-layer composite plate at room temperature rolling [J]. Thermal Processing, 2001(3): 34—36.)
[2] 赵军,陈久川,米新兰. 铜/钢/铜纳米多层复合板制备 [J]. 北华航天工业学院学报,2013,23(1): 8—9.
(Zhao Jun, Chen Jiu-chuan, Mi Xin-lan. Preparation of copper/steel/copper nanometer multilayer composite plate

[J]. Journal of North China Institute of Aerospace Engineering, 2013, 23(1): 8—9.)
[3] Zhu H X, Karihaloo B L. Size-dependent bending of thin metallic films [J]. International Journal of Plasticity, 2008, 24: 991—1007.
[4] Sheng L Y, Yang F, Xi T F, et al. Influence of heat treatment on interface of Cu/Al bimetal composite fabricated by cold rolling [J]. Composites Part B Engineering, 2011, 42(6): 1468—1473.
[5] Zu G Y, Liu G, Wang N, et al. Effect of annealing technology on intermetallics of Ni/Al cladding strip [J]. Transactions of Materials & Heat Treatment, 2007, 28(2): 54—59.
[6] Zhang Y B, Wang Q J. Study on the mechanism of rolling-bonding of aluminum cladding magnesium alloy [J]. Development & Application of Materials, 2009, 24(6): 72—79.
[7] 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论 [M]. 北京:冶金工业出版社,1996.
(Zhao Zhi-ye. Metal plastic deformation and rolling theory [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1996.)
[8] Bay N. Cold pressure welding—the mechanisms governing bonding [J]. Journal of Engineering for Industry, 1979, 101(2): 121—122.
[9] Bina M H, Dehghani F, Salimi M. Effect of heat treatment on bonding interface in explosive welded copper/stainless steel [J]. Materials & Design, 2013, 45: 504—509.
[10] Qian C H, Ping L I, Xue K M. Interface, lattice strain and dislocation density of SiC_p/Al composite consolidated by equal channel angular pressing and torsion [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015, 25(6): 1744—1751.
[11] Yang Y, Wang D, Lin G, et al. Cu-Fe-Cu laminated composite for electromagnetic shielding by roll-bonding [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2012, 29(4): 126—131.