复合材料学报 Acta Materiae Compositae Sinica
第29卷 第4期 8月 2012年
Vol. 29 No. 4 August 2012

文章编号：1000-3851(2012)04-0126-06

磁屏 Cu－Fe－Cu 叠层材料的轧制复合

杨益航，王德志*，林高用，段柏华，柳华炎，邹艳明
（中南大学 材料科学与工程学院，长沙 410083）

摘 要： 选用电工纯铁与无氧铜两种组元材料，采用轧制复合工艺制备了 Cu－Fe－Cu 磁屏叠层材料，对轧合件进行力学性能分析，并运用金相显微镜、扫描电镜、能谱仪等手段分析复合件界面形貌及复合机制。结果表明：采用 50％热轧压下率可使铜、铁板有效复合，轧合件内各叠层厚度尺寸稳定、叠层间平行度良好，经简单退火后其叠层间无明显扩散发生，叠层间抗剪切强度达 167 MPa，此时热轧的主要复合机制为机械啮合。

关键词： 电磁屏蔽；叠层材料；轧制复合；力学性能；复合机制

中图分类号： TG335.5 **文献标志码：** A

Cu－Fe－Cu laminated composite for electromagnetic shielding by roll-bonding

YANG Yihang, WANG Dezhi*, LIN Gaoyong, DUAN Baihua, LIU Huayan, ZOU Yanming
(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Roll-bonding was used to prepare of Cu－Fe－Cu laminated composite for electromagnetic shielding, oxygen-free copper sheet and electrical iron sheet were chosen as its components. Mechanical property experiments on the laminated composite were executed by using of material testing machine, the microstructure and mechanism of bonding were investigated by means of metalloscope, SEM and EDS. The results show that Cu and Fe can be bonded by hot rolling when reduction rate achieves 50％, thickness deviation and parallelism of each laminates are fine. After the annealing process, it is hard to find the diffusion of Cu and Fe, and the shear strength of interface comes to 167 MPa. The mechanism of bonding by hot rolling is mechanically engage.

Keywords: electromagnetic shielding; laminated composite; roll－bonded; mechanical property; mechanism of bonding

随着雷达微波、无线电及微电子技术的发展，电子通讯设备愈来愈趋向于灵敏、密集、宽频与功能多样化，这不仅引发电磁波干扰、电磁环境污染，而且军用电子设备的电磁辐射有可能成为敌方侦察的线索，导致电磁信息泄漏。因此开发高效能、宽频带且力学性能优良的电磁屏蔽材料意义重大[1-2]。

在电磁屏蔽材料中，铁磁材料和金属良导体材料是常用的屏蔽材料。铁磁材料适用于低频（＜100 kHz）磁场的屏蔽。其作用原理是利用铁磁材料的高磁导率引导磁力线通过高穿透材料并在附近空间降低磁通密度而达到磁屏蔽目的，常用的铁磁材料有纯铁、硅钢、坡莫合金（铁镍合金）等。但铁磁性材料因电导率低而不适合高频电磁场的屏蔽，对于中高频（100 kHz～1.5 GHz）磁场以及静电场则需具有较高电导率的金属良导体，因此电导率也已成为电磁屏蔽中选择屏蔽材料的主要依据，常见的有钢板、镀锌薄钢板、铜板、铝板等电导率高的材料[3]。

采用热轧复合工艺制备的磁屏 Cu－Fe－Cu 叠层复合材料，因兼具纯铁高导磁及无氧铜优异电导率的性能优势，对高、低频率的电磁波表现出良好的屏蔽效果；而且叠层间具有较好的力学性能，因此在航天航空、军工及普通电子产品等领域中应用前景十分广阔。

本文中选取电工纯铁与无氧铜为二组元材料，采用热轧复合工艺，制备了一种宽频带的磁屏 Cu－

收到初稿日期： 2011-07-01；**收到修改稿日期：** 2011-09-22；**网络出版时间：** 2012-02-09 16:15:09
网络出版地址： www.cnki.net/kcms/detail/11.1801.TB.20120209.1615.001.html
基金项目： 863 计划项目(2007AA03Z517)
通讯作者： 王德志，教授，博士生导师，从事难熔金属等相关的研究与开发 E-mail：dzwang@csu.edu.cn

Fe－Cu 叠层复合材料，分析了轧合件的力学性能，研究了复合件界面形貌及复合机制。

1 实验部分

1.1 原材料

所选电工纯铁为常用于电磁铁芯及仪器仪表元件的 DT4 纯铁，由太钢生产的冷轧薄板，厚度 2 mm，厚度公差≤±0.03 mm；无氧铜为常用于电真空器件的 TU1 纯铜，由洛铜生产的冷轧薄板，厚度 2 mm，其中 Cu≥99.97%，O≤0.003%，杂质总含量≤0.03%。两种材料的电磁性能如表 1、表 2 所示。

1.2 磁屏 Cu－Fe－Cu 叠层复合材料的制备

轧制复合包括四个基本步骤：备料→表面预处理→冷/热轧制复合→轧后热处理。

1.2.1 备 料

将所选的电工纯铁与无氧铜板材，切割成 30 mm×100 mm 的长方料，并对其进行退火软化处理。无氧铜退火工艺：在氩气保护氛围中升温至 450 ℃并保温 1 h，然后随炉缓冷；而电工纯铁为保障其优良的磁性能，依标准采用阶梯多级退火工艺：将试样加热至 800 ℃，然后以低于 50 ℃/h 的速度使其从 800 ℃升温至 900 ℃，在 900 ℃保温 4 h，然后又以低于 50 ℃/h 的速度降至 700 ℃，继续随炉冷却到低于 500 ℃即可取出，整个过程同样在氩气保护气氛中进行。

1.2.2 表面预处理

在轧制复合前的表面预处理是整个过程中非常关键的一步，处理质量将直接影响轧制复合结合强度甚至成品的使用性能。本文中对备料依次采用了水磨砂纸打磨氧化层、超声波清洗、浓度为 10% NaOH＋10% Na_2CO_3 碱溶液与 15% HCl＋10% HNO_3 酸溶液的分别酸碱洗、最后酒精清洗等步骤以去除表面粉尘残渣、氧化物、油脂等杂质。

同时为使二者在轧制过程中能充分复合，对已表面处理过的材料进行钢刷毛化处理，然后采用强吹风机将刷出的金属粉屑吹走。此时选择一个纯铁片与两个无氧铜片，按照铜、铁、铜次序叠放，将其头尾铆合后即成为一组待加工试样。

1.2.3 轧制复合

轧制复合是金属板在受到轧机施加的强大压力的作用下，在两层金属的待复合表面发生塑性变形，表面金属层破裂。随后，洁净而活化的金属层从破裂的金属表面露出，并在强大压力作用下形成平面状的机械啮合或冶金结合。其与单金属板轧制的根本区别在于，轧制复合必须施以大的初始道次压下量，以促使复合面的完全物理接触[6-9]。本文中采用大压下率热轧工艺对 Cu－Fe－Cu 叠片进行轧制复合。

先在 H_2 气氛炉内将已铆合的 Cu－Fe－Cu 叠片加热至 850 ℃，然后保温 0.5 h(加热＋保温总时间为 2 h)，接着进行大变形热轧。叠片由气氛炉内取出后立即放入轧机，尽量避免金属高温时在空气中产生表面氧化，在 50%压下率时叠片顺利由轧机咬入轧合。

1.2.4 轧后热处理

由于铜的回复温度及再结晶温度均低于铁，故以铜为依据，制定了如下去应力退火工艺：将轧合件在氩气气氛下加热至 450 ℃并保温 30 min，接着继续加热到 600 ℃并保温 1 h，然后随炉冷却至室温。

1.3 性能测试及表征

对轧合后 Cu－Fe－Cu 叠层材料进行相关性能检测分析。首先截取一段轧合件横截面试样，观察其形貌，然后将制备好的试样依次采用水磨砂纸打磨、抛光布抛光、30% HNO_3 的溶液腐蚀，后置于舜宇 MX 金相显微镜下观察金相显微组织；采用能量色散 X 射线光谱仪对抛光后的界面进行能谱分析，分别对 Cu、Fe 元素进行线扫描检测；试样经深度抛光后继续运用 Quanta－200 型环境扫描电镜观察其微观形貌及成分衬度，分别运用其中二次电子和背散射电子两种信号进行分析。因叠层间剪切强度可较好地表征轧合件力学性能，采用 MTS－858 型万能拉伸试验机进行界面剪切拉伸试验，设置加载速率为1 mm/min，相同样品进行三次试验。

表 1 电工纯铁 DT4 的磁性能参数[4]

Table 1 Magnetic properties of electrical iron DT4[4]

Curie point/℃	Coercive force/(A·m^{-1})	Permeability/(mH·m^{-1})	Magnetic induction intensity/T				
			B_5	B_{10}	B_{25}	B_{50}	B_{100}
770	31.84	15.12	1.4	1.5	1.62	1.77	1.8

表 2　无氧铜和电磁铁导电性能[4-5]

Table 2　Electric conductivity properties of oxygen-free copper and electrical iron[4-5]

	Resistivity/ ($10^{-8}\Omega\cdot m$)	Temperature coefficient of resistance(20 ℃)
Oxygen-free copper	1.75	0.0039
Electrical iron	11.0	0.005

最后，迅速将剪切拉伸后的试样置于 SIRION200 型场发射电镜下观察其剪切断面情况，以分析叠层复合机制。

2　结果与讨论

2.1　轧合件的微观形貌

原铜、铁、铜叠置后总厚度 6 mm，经 50%热轧复合后，厚度变为 3 mm。轧合件横截面照片如图 1 所示。可见轧合件的三叠层均复合良好，界面结合处无明显波浪、凹坑等形貌，各叠层厚度均匀、平行度好，这对磁场的均匀性将起到很好的基础保障作用。

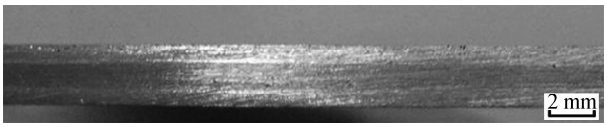

图 1　Cu－Fe－Cu 叠层复合材料热轧件外观

Fig. 1　Cross section of the hot-roll bonded sheet of the Cu－Fe－Cu laminated composites

图 2 为铜铁叠层结合面的金相照片及能谱分析。由于纯铜的再结晶退火温度较低（300～450 ℃），热轧复合中850 ℃的温度已远高于其再结晶温度，且纯铜的层错能较低、扩展位错宽，其动态回复过程进行得很慢，因此在热轧复合加工中较易发生动态再结晶而生成等轴状晶粒和孪晶[10]。尽管工业纯铁的再结晶退火温度为 500～600 ℃，但其层错能较高，易发生动态回复，在热轧过程中发生位错的交滑移及攀移。由图 2(a)可明显观察到，铜片层的晶粒尺寸明显大于铁片层晶粒，这与轧制后复合件的退火温度选取有关。由于铁的回复再结晶温度高于铜的回复再结晶温度，在退火中当铜已经发生再结晶时，铁才刚开始回复，导致铜片层晶粒普遍大于铁片层晶粒。另外，由图 2(a)中很难观察到界面处有过渡层出现，这也说明铜铁结合面处无新相生成。

图 2(b)为铜铁结合面处的能谱分析结果。可见，铜铁在各自方含量很稳定，靠近结合面处也基本无斜度出现，仅在结合处出现突降，说明铜铁结合处无明显的元素扩散。

图 3 为四种放大倍数的叠层界面扫描电镜照片。其中图 3(a)为试样全貌照片，可见各叠层厚度均匀平行度较好，这与宏观数码照片相似。而从背散射照片(图 3(b)～3(d))，除可观察更细微结构外，还可根据不同原子序数造成的衬度变化来定性分析材料结合面处的成分变化情况。可见，叠片结合处均无任何裂痕及孔洞等缺陷出现，即叠片间已实现紧密结合，叠层轧制复合良好。当放大至 2000 倍时(图 3(c))，在界面结合处才可见明显波浪及细微突起形貌，但其厚度偏差依然控制在±5 μm 之内，因此采用热轧可基本不影响叠层各组元材料功能作用的发挥。

2.2　轧合件的力学性能

无线电设备等通常需工作于复杂环境中，如温度较高、频繁移动等，这对其中零部件的力学性能

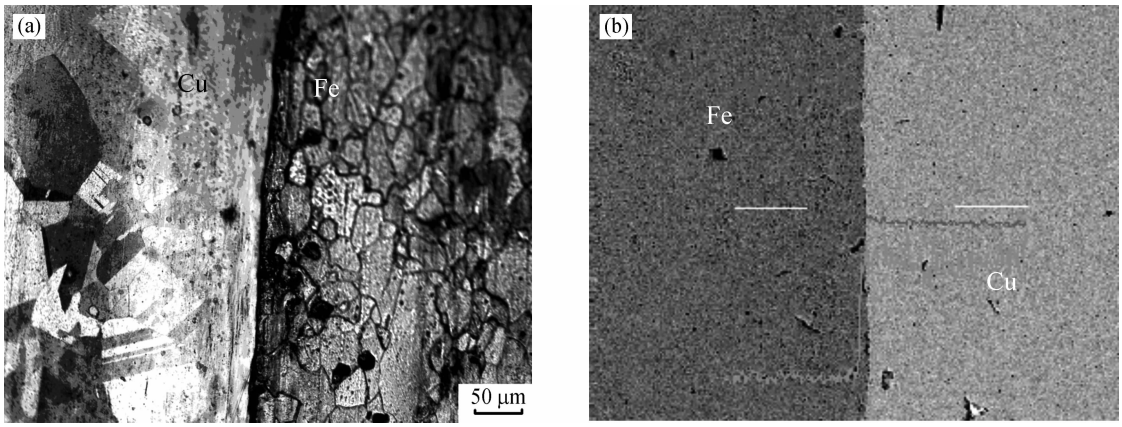

图 2　Cu－Fe－Cu 叠层复合材料界面金相(a)及能谱分析(b)

Fig. 2　Metallographic (a) and EDS (b) of the bonding surface of the Cu－Fe－Cu laminated composites

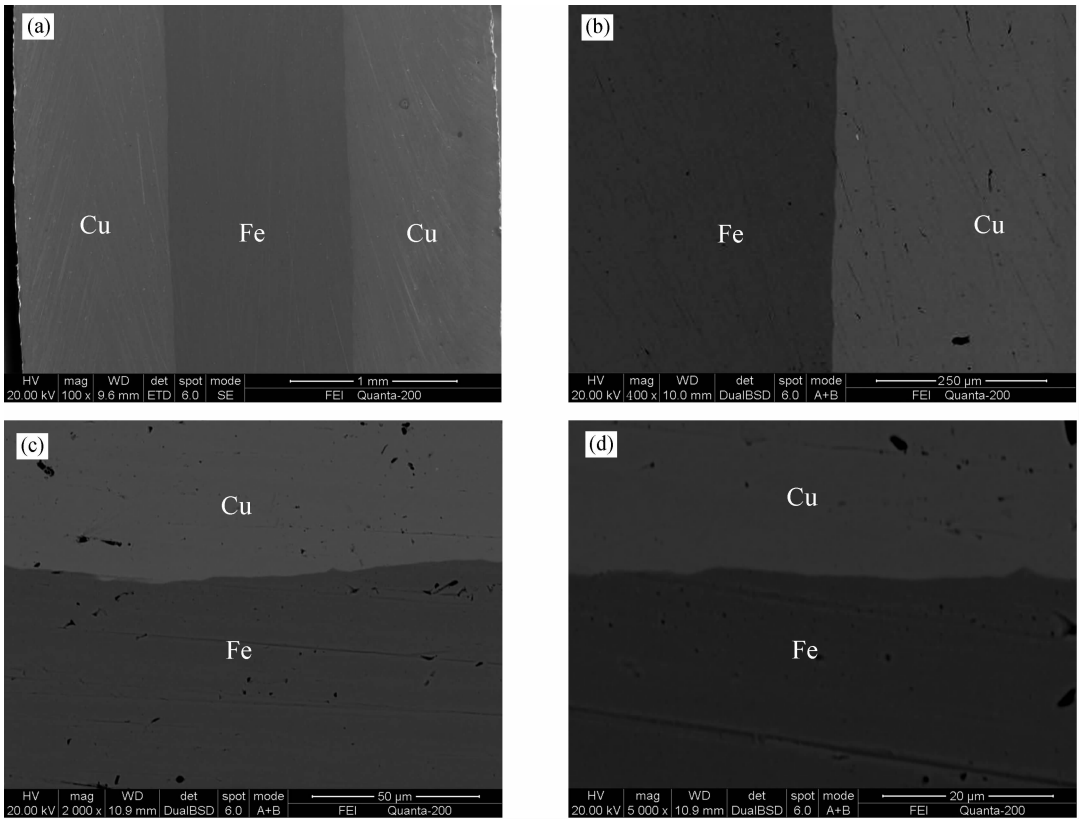

图 3　Cu－Fe－Cu 叠层复合材料的横截面扫描电镜照片

Fig. 3　SEM images of the cross-section surface of the Cu－Fe－Cu laminated composites

也提出了较高的要求。在叠层复合材料中，叠层间的剪切强度可很好反映界面结合强度[11-12]。本文中将 50% 压下率热轧复合的试样，依据 GB/T 6396－2008 标准，加工出试样的规格尺寸如图4(a)所示，并检测其界面的抗剪切强度。其中图 4(b)为加工后的试样形貌。

将轧合后未经退火处理的 Cu－Fe－Cu 叠层材料结合面抗剪切强度，与硬态下无氧铜及电工纯铁的抗拉伸力学性能相比较，其结果如表 3 所示。其中 Cu－Fe－Cu 叠层抗剪切强度检测准备了三组试样，除第三组外另两组数据非常接近，且三次检测的抗剪切强度平均值达 167 MPa。

热轧复合后 Cu－Fe－Cu 叠层间的抗剪切强度 167 MPa，达到无氧铜抗拉伸强度的 70%，这也说明轧合件内叠片间达到了较高的结合强度[13-14]。具有 167 MPa 的剪切强度的叠层材料在实际运用中能很好满足电磁器件的需求，从而实现了在不影响功能性能下兼具良好力学性能的目的。

2.3　轧合件剪切断口分析及复合机制

图 5 为剪切试验后 Cu－Fe－Cu 叠层复合材料的结合面扫描照片。可见，剪切界面上出现很多撕

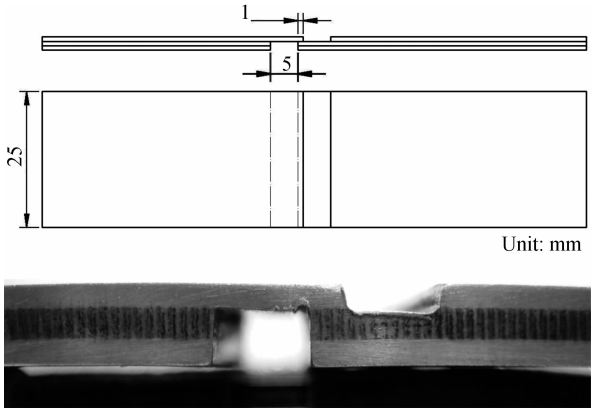

图 4　Cu－Fe－Cu 叠层材料的剪切试样及示意图

Fig. 4　Schematic (a) and prepared specimen (b) for shear strength test of the Cu－Fe－Cu laminated composites

表 3　原材料力学性能及轧合件抗剪切强度

Table 3　Bonding tensile shear strength test of roll-bonded sheet

	Stress at offset yield/MPa	Stress at yield/MPa
Cu (Y)	195.31	249.83
Fe (Y)	209.62	315.11
Cu－Fe－Cu 1	159.75	189.94
Cu－Fe－Cu 2	168.64	189.61
Cu－Fe－Cu 3	116.83	122.26
Cu－Fe－Cu mean	148.41	167.27

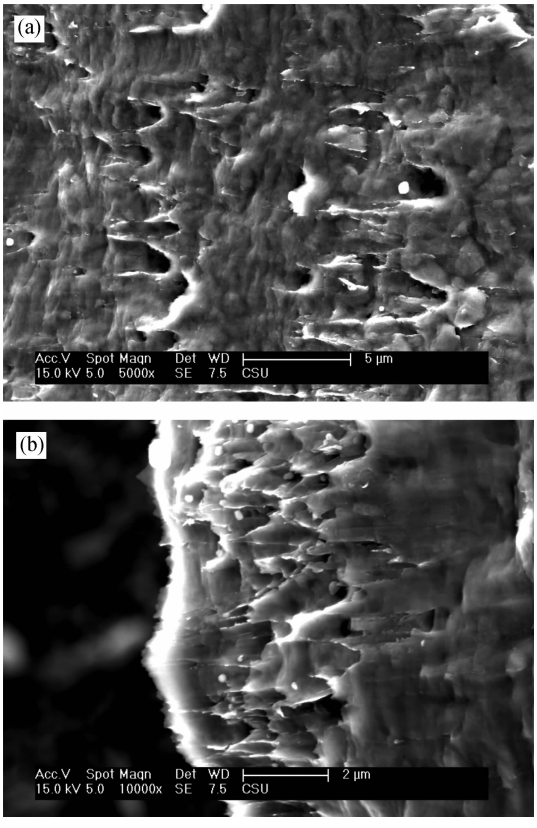

图 5　剪切试验后 Cu－Fe－Cu 叠层复合材料的结合面扫描照片

Fig. 5　SEM images of the bonding surface of the Cu－Fe－Cu laminated composites after shear strength test

扯痕迹，端部留有微孔。据此可知两叠层组元在复合过程中有相互咬合作用，即较硬方咬入较软方现象。这是由于在轧制前分别对铜、铁表面进行了钢刷毛化处理，使其表面暴露出新鲜金属，而热轧时因高温高压的影响，铜铁的表面层进一步破裂，达到密实的物理接触，呈现机械啮合的状态。

另外在大变形轧制复合的过程中，因钢刷毛化处理留下凹坑底部的硬度较高会出现裂口，且其随着变形宽化，露出的新鲜表面与铜结合，形成硬化块破裂结合机制[6]。在轧机的强大压力和大变形量的条件下，凹坑周围的非硬化区还可能形成表面膜破裂结合机制[15]。在线扫描能谱图 2(b)及电镜扫描照片图 3(d)中，其叠层结合处很难观察到铜、铁间有扩散发生，说明扩散并不是铜铁热轧复合的主要结合原因，即 850 ℃的热轧加工难以使铜、铁之间产生扩散结合机制。综合本次试验断口微观照片及能谱分析结果可知，机械啮合为铜铁热轧复合的主要结合机制。

3　结　论

（1）选用 2 mm 厚的电工纯铁与无氧铜薄板，采用 850 ℃、50%压下率的热轧工艺制备出 Cu－Fe－Cu 叠层复合材料，该叠层材料既有电工纯铁的高导磁性，又兼备无氧铜的高导电性。

（2）热轧复合的叠层材料结合紧密，力学性能良好。叠层间的抗剪切强度达 167 MPa。

（3）各叠层间不仅结合紧密，而且厚度尺寸偏差小，偏差在±5 μm 之内，良好的叠片间平行度对磁场的均匀性起到较好的保障作用。

（4）在 850 ℃下铜铁叠片的热轧复合主要为机械啮合复合机制。

参考文献：

[1]　刘献明，付绍云，张以河，孙正滨，李广涛. 雷达隐身复合材料的研究进展 [J]. 材料导报，2004，18(5)：8-11.
Liu Xianming，Fu Shaoyun，Zhang Yihe，Sun Zhengbin，Li Guangtao. Research progress on radar stealth composites [J]. Materials Review，2004，18(5)：8-11.

[2]　古映莹，邱小勇，胡启明，刘雪颖. 电磁屏蔽材料的研究进展 [J]. 材料导报，2005，19(2)：53-56.
Gu Yingying，Qiu Xiaoyong，Hu Qiming，Liu Xueying. Development of electromagnetic shielding material [J]. Materials Review，2005，19(2)：53-56.

[3]　聂士东. 低频磁屏蔽膜的制备与性能研究 [D]. 北京：北京工业大学，2007.

[4]　袁希平. 纯铁 DT9 性能简介 [J]. 真空电子技术，1993(3)：43-45.
Yuan Xiping. Introduction to property of pure iron DT9 [J]. Vacuum Electronics，1993(3)：43-45.

[5]　卫红凡. 浅谈低氧铜杆和无氧铜杆的性能及应用 [J]. 机械管理开发，2005，12(6)：54-55.
Wei Hongfan. Talk about the performance and application of low-oxygen and non-oxygen copper rod [J]. Mechanical Management and Development，2005，12(6)：54－55.

[6]　于宝义，齐克敏，安振之. 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 Baoyi，Qi Kemin，An Zhenzhi. The study of the compound technology and bond mechanism copper alloy/Q195/copper alloy three-ply cladding sheet [J]. Hot Working Technology，2001(3)：34-36.

[7]　Watanabe Yuichiro，Ishihara Keiichi N，Shingu P Hideo. Strength of nano-thickness multi-layered Fe－Cu composites produced by repeated pressing and rolling [J]. Scripta Mater，2001，44(8/9)：1853-1857.

[8]　Cepeda-Jiménez C M，Hidalgo P，Pozuelo M，Ruano O A，Carreño F. Influence of constituent materials on the impact

toughness and fracture mechanisms of hot - roll - bonded aluminum multilayer laminates [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2010, 41(1): 61-72.

[9] Chaudhari Gajanan P, Acoff Viola. Cold roll bonding of multi-layered bi-metal laminate composites [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(10): 1667-1675.

[10] 王海山，王志法，姜国圣，肖学章，莫文剑. 退火温度对轧制复合 Cu/Mo/Cu 电子封装材料性能的影响 [J]. 金属热处理，2004，29(5)：17-20.
Wang Haishan, Wang Zhifa, Jiang Guosheng, Xiao Xuezhang, Mo Wenjian. Effect of annealing temperatures on the properties of roll-bonding Cu/Mo/Cu electronic packaging composites [J]. Heat Treatment of Metals, 2004, 29(5): 17-20.

[11] Oya Tetsuo, Tiesler Nicolas, Kawanishi Seiichiro, Yanagimoto Jun, Koseki Toshihiko. Experimental and numerical analysis of multilayered steel sheets upon bending [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2010, 210(14): 1926-1933.

[12] Nambu S, Michiuchi M, Inoue J, Koseki T. Effect of interfacial bonding strength on tensile ductility of multilayered steel composites [J]. Composites Science and Technology, 2009, 69(11/12): 1936-1941.

[13] 刘 玲，黄争鸣，董国华，袁国青，林 刚. 含环氧-SiC 复合微/纳米纤维的层合板制备及其力学性能 [J]. 复合材料学报，2006，23(3)：20-24.
Liu Ling, Huang Zhengming, Dong Guohua, Yuan Guoqing, Lin Gang. Fabrication and mechanical properties of composite laminates with epoxy - SiC compound ultrafine fiber interfaces [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(3): 20-24.

[14] 刘 韦华，矫桂琼，管国阳，常岩军. Z-pin 增强陶瓷基复合材料拉伸和层间剪切性能 [J]. 复合材料学报，2007，24(1)：86-90.
Liu Wei, Jiao Guiqiong, Guan Guoyang, Chang Yanjun. Investigation on tensile and interlaminar shear of plain woven CMC with Z-pin reinforcement [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2007, 24(1): 86-90.

[15] 李兴刚，齐克敏，朱 泉. 锌/铝轧制复合研究 [J]. 中国有色金属学报，1999，9(2)：300-304.
Li Xinggang, Qi Kemin, Zhu Quan. Coldrolling of Zn/Al clad material [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(2): 300-304.