

# 厚度比与退火温度对铜/铝冷轧板冲压性能与界面结合强度的影响

陈 才<sup>1</sup>, 孔 诚<sup>1</sup>, 王名川<sup>1</sup>, 赵金库<sup>2</sup>, 杜忠华<sup>3</sup>, 杨 森<sup>4</sup>

(1. 南京理工大学 中法工程师学院, 江苏 南京 210094; 2. 黑龙江北方工具有限公司, 黑龙江 牡丹江 157013;  
3. 南京理工大学 机械工程学院, 江苏 南京 210094; 4. 南京理工大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 为满足弹药智能制造和轻量化需求, 采用冷轧法制备了厚度比分别为 1:1、1:5 和 1:9 的 Cu/Al 复合板, 研究厚度比对复合板冲压性能与界面结合强度的影响。通过单轴拉伸试验获得了材料的基本力学性能和各向异性参数, 以类拉深工艺的冲杯试验和杯突试验定量表征 Cu/Al 复合板的冲压性能。进一步研究了退火温度对复合板力学各向异性行为和界面结合强度的影响, 以调控复合板的冲压性能。结果表明, 3 种 Cu/Al 复合板冲压成形件的质量良好, 铜层厚度比越高, 复合板的冲压性能越好; 经过 500 °C/120 min 退火后, 板材的力学各向异性参数达到最低的 0.027, 冲压成形性能明显改善; 随着退火温度的升高, 扩散层的厚度逐渐变大, 界面结合强度先升高后降低。研究结果可为制备具有优良冲压性能的 Cu/Al 复合板提供理论指导。

**关键词:** Cu/Al 复合板材; 冲杯试验; 杯突试验; 力学各向异性行为; 界面结合强度

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.07.012

**中图分类号:** TB331      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2023) 07-0082-11

## Influences of thickness ratio and annealing temperature on stamping properties and interfacial bonding strength for copper/aluminum cold rolled plate

Chen Cai<sup>1</sup>, Kong Cheng<sup>1</sup>, Wang Mingchuan<sup>1</sup>, Zhao Jinku<sup>2</sup>, Du Zhonghua<sup>3</sup>, Yang Sen<sup>4</sup>

(1. Sino-French Engineer School, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Heilongjiang North Tool Co., Ltd., Mudanjiang 157013, China;

3. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

4. School of Materials Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** In order to meet the needs of intelligent manufacturing and lightweight ammunition, Cu/Al composite plate with the thickness ratios of 1:1, 1:5 and 1:9 were prepared by cold rolling method, and the influences of thickness ratio on stamping properties and interfacial bonding strength of composite plates were studied. Then, the basic mechanical properties and anisotropy parameters of materials were obtained by uniaxial tensile tests, and the stamping properties of Cu/Al composite plate were quantitatively characterized by the deep drawing cups testing and Erichsen cupping test. Furthermore, the influences of annealing temperature on the mechanical anisotropy behavior and interfacial bonding strength of composite plates were studied to regulate the stamping properties of composite plate. The results show that the quality of stamping parts for three kinds of Cu/Al composite plates is good, and the higher the thickness ratio of copper layer is, the better the stamping properties of composite plate are. After annealing at 500 °C/120 min, the mechanical anisotropy parameter of plate reaches the lowest value of 0.027, and the stamping properties is significantly improved. As the annealing temperature increases, the thickness of diffusion layer gradually increases, and the interfacial bonding strength first increases and then decreases. Thus, the research results can provide the theoretical guidance for the preparation of Cu/Al composite plates with excellent stamping properties.

**Key words:** Cu/Al composite plate; deep drawing cups testing; Erichsen cupping test; mechanical anisotropy behavior; interfacial bonding strength

轻量化是新一代弹药武器装备设计与智能制造的研究热点, 以穿甲弹设计为例, 为提高穿甲效率

与威力, 需要大幅度地减轻弹头壳的配重、增加弹芯的配重从而提高弹的穿甲威力。目前, 弹头壳、弹壳等零件以流动性好、适合存储的铜合金为主要的材料, 其主要通过板材冲盂、拉深工艺制备<sup>[1-2]</sup>, 但铜的成本较高, 且我国的铜主要依赖于进口, 因此, 采用轻金属代替或者部分代替铜合金在军工领域中的应用是实现新一代武器轻量化的关

收稿日期: 2023-03-04; 修订日期: 2023-06-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51901101, 11802131)

作者简介: 陈 才 (1985-), 男, 博士, 讲师

E-mail: cai.chen@njust.edu.cn

键。铝合金具有质量轻、比强度高、耐腐蚀性好等性能,是实现轻量化的理想材料,用铝合金代替黄铜合金制作子弹最大可实现减重 50%~60%,可大幅度提高其他部件的配重,以实现增强弹药威力的目标。基于此目标,在弹头壳、弹壳等冲压零件的生产中,保留铜合金的基本特性,以铜铝复合板材为研究对象,在实现零件轻量化的基础上同步提高复合板材的力学性能与冲压成形性能是研究的热点。

铜铝复合板材的生产包括爆炸复合、挤压复合、铸轧复合以及轧制复合等<sup>[3-6]</sup>,轧制复合中冷轧复合具有设备简单、操作稳定且成本较低的优势,可应用于大批量生产,后续热处理方式又可影响板材的力学性能和界面结合情况,因此冷轧+退火工艺无疑是制备铜铝复合板材的首选方式<sup>[7-9]</sup>。

复合板材通常需要后续的冲压加工来进一步形成具有特定形状的零件,而其中异种金属塑性变形能力的不同和轧制金属各向异性行为通常会导致冲压成形件产生开裂、起皱、制耳现象<sup>[10-12]</sup>。目前,已经有不少学者对铜铝复合轧制板材的性能进行过研究,但是比较系统地介绍和测试铜铝复合板材深冲件性能的相关文献仍然较少。根据刘哲等<sup>[13]</sup>的研究,轧制态及退火态铜铝复合板在拉深成形时,缺陷位置出现在凸模圆角及凸缘处,界面化合物的破碎程度随着变形量的增加而增加。Zhang X H 等<sup>[14]</sup>研究了纯钛板材冷拉深成形过程中微观组织及组织的演化规律,发现在拉深件的胀形区、拉深区、法兰区这 3 个区域中塑性应变均由位错滑移与变形孪晶共同产生。Lu R H 等<sup>[15]</sup>针对 Ti/Al 复合材料薄板的拉深过程,建立了相应的理论模型,并通过试验对有限元模拟结果进行了验证。

基于目前对于铜铝复合板相关性能的研究,本文采用冷轧复合法制备了不同厚度比的铜铝复合板,采用冲杯试验、杯突试验等方式探究厚度比对板材冲压性能的影响,揭示不同厚度比的板材对材料深冲加工的影响规律,从而选择适当厚度比的铜铝复合板材。后续通过热处理工艺调控板材的各向异性行为,系统地研究了退火工艺对界面结合和力学性能的影响,为制备优良的铜铝复合板材筒形件提供理论基础。

## 1 试验材料及方法

试验所用的母材为单层无氧纯铜 C10200 和 L1060 纯铝,原始母材均购自无锡银邦金属复合材

料有限公司,初始状态为冷轧态。将无氧纯铜和纯铝板材分别切为原始厚度不同的 3 组:(1)组 1,纯铜 1200 mm×124 mm×(0.84±0.05) mm、纯铝 1200 mm×124 mm×(8.16±0.15) mm;(2)组 2,纯铜 1200 mm×124 mm×(1.40±0.05) mm、纯铝 1200 mm×124 mm×(7.60±0.15) mm;(3)组 3,纯铜 1200 mm×124 mm×(4.06±0.05) mm、纯铝 1200 mm×124 mm×(4.94±0.15) mm。分别进行 300℃/60 min 的轧前去应力退火处理。轧制前进行酸洗铜板、碱洗铝板、表面打磨等表面处理,以去除表面氧化层,增加粘结面积。试验在直径为 Φ590 mm 的轧机上进行,采用同步匀速轧制,轧制速度为 3 m·min<sup>-1</sup>,轧制过程无润滑。在单道次冷轧过程中,轧制压下率为 66%,轧制后分别获得厚度比为 1:9 (组 1)、1:5 (组 2)、1:1 (组 3) 的铜/铝复合板材。轧后显微组织如图 1 所示,界面无任何间隙、气孔或无界区域,界面处有扩散层,厚度约为 2.1 μm,3 种厚度比铜/铝复合板材的扩散层厚度基本无差异,表明复合材料之间获得了良好的冶金结合。

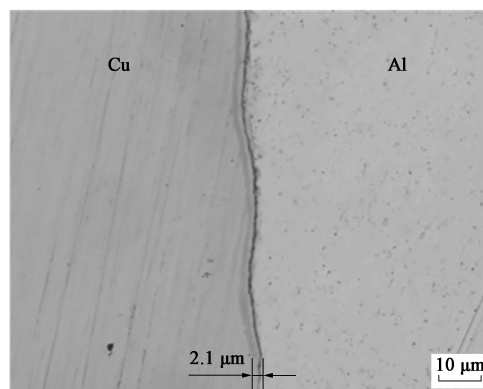


图 1 Cu/Al 复合板界面处金相显微组织

Fig. 1 Metallographic microstructure at interface of Cu/Al composite plate

为进一步提高结合质量和冲压性能,采用等时不等温的退火方式,探究不同退火温度对板材力学性能的影响,冷轧 Cu/Al 复合板材分别在 250、300、400 和 500℃ 的保护气氛马弗炉中退火 120 min。如图 2 所示,采用沿平行于轧制方向 (Rolling Direction, RD)、与 RD 成 45° 的对角线方向 (Diagonal Direction, DD)、以及与 RD 垂直的横向方向 (Transverse Direction, TD) 制备拉伸样品,使用 UTM4000 拉伸试验机进行了单轴拉伸试验,标距为 8 mm,宽度为 3 mm,拉伸速率为 0.5 mm·min<sup>-1</sup>,等效应变速率为 1×10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>。

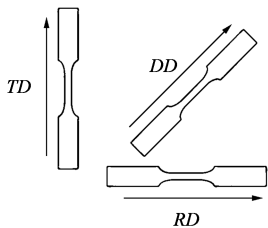


图 2 沿不同方向的拉伸试样的几何形状

Fig. 2 Geometry shapes of tensile specimens along different directions

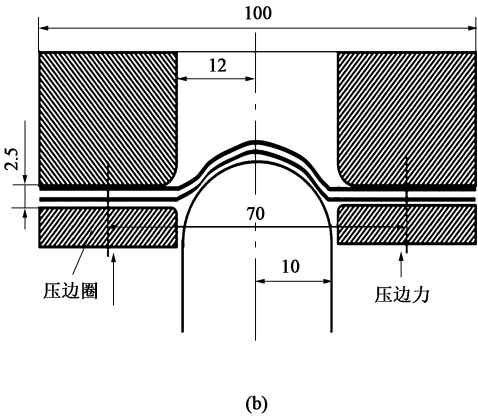
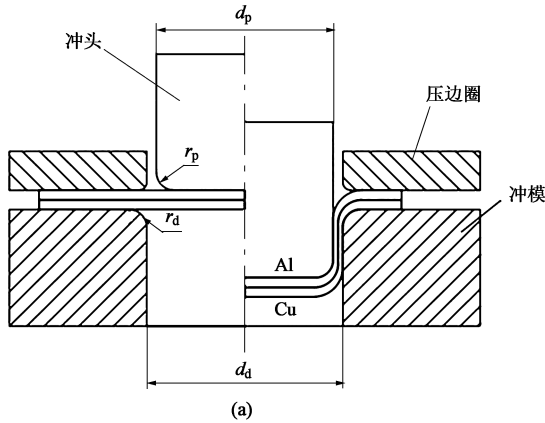


图 3 冲杯试验 (a) 和杯突试验 (b) 示意图

Fig. 3 Schematic diagrams of deep drawing cups testing (a) and Erichsen cupping test (b)

界面结合处剥离 20 mm 左右,并用拉伸试验机的上下夹头夹持,剥离速度为  $100\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

复合材料的厚度比是冲压成形件中最重要参数之一,不同厚度比的 Cu/Al 复合板材的获得主要取决于原始板材厚度。此外,两种金属板材在轧制复合过程中的变形速率的差异也是决定最终厚度比的重要因素。表 1 为 Cu/Al 复合板材的厚度比和具体厚度组成。

表 1 Cu/Al 复合板材的厚度比和具体厚度组成

Table 1 Thickness ratio and specific thickness composition of

Cu/Al composite plate

组号	铜铝厚度比	总厚度/mm	Cu 层厚度/mm	Al 层厚度/mm
1	1 : 9	3.0	0.3	2.7
2	1 : 5	3.0	0.5	2.5
3	1 : 1	3.0	1.5	1.5

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 厚度比对铜铝复合板力学性能的影响

图 4 为不同厚度比的铜/铝复合板材沿 RD 样品的工程应力-工程应变曲线。从图 4 中可以看出, Cu/Al 复合板的强度介于单层 Cu 和 Al 之间,而伸长率比单相的铜层提高了近一倍。此外,随着 Cu 层厚

为了分析和理解铜铝复合板材的拉深变形和应力应变特性,根据 GB/T 5125—2008<sup>[16]</sup> 和 GB/T 4156—2020<sup>[17]</sup> 分别进行冲杯试验和杯突试验,试验示意图如图 3 所示,其中  $d_p$  为冲头直径,  $r_p$  为冲头圆角半径,  $d_d$  为冲模内径,  $r_d$  为冲模圆角半径。冲压速度为  $10\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 铝表面与拉深冲头接触。此外,采用剥离试验测定复合板的结合强度。将退火后的复合板切成  $160\text{ mm} \times 25\text{ mm}$  的试样,预先在

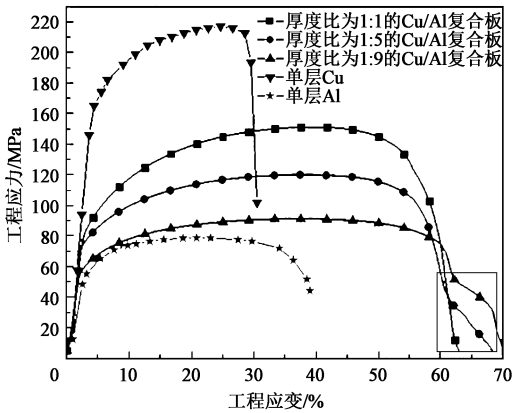


图 4 不同厚度比的 Cu/Al 复合板材的工程应力-工程应变曲线

Fig. 4 Engineering stress-engineering strain curves of Cu/Al composite plate with different thickness ratios

度比的增加,抗拉强度同步提高,厚度比为 1 : 1 的复合板的抗拉强度达到了 151 MPa。根据混合定律 (Role of Mixture, ROM) 得到的轧制后复合板的抗拉强度理论值要略低于试验测得的抗拉强度,其表达式见式 (1)。

$$R_{mCu/Al} = \nu_{Cu} R_{mCu} + \nu_{Al} R_{mAl} \quad (1)$$

式中:  $R_{mCu/Al}$  为复合板的抗拉强度;  $\nu_{Cu}$  和  $\nu_{Al}$  分别为铜层和铝层所占的体积分数;  $R_{mCu}$  和  $R_{mAl}$  分别为铜板和铝板的抗拉强度,本文取值分别为 211 和



78 MPa;  $R_{mCu/Al}$  为铜铝复合板的抗拉强度。

分析其原因是应变集中导致界面处微观组织的改变以及界面扩散层的存在<sup>[18]</sup>。一般来说, 高强度高塑性的铜铝复合板具有良好的整体成形性能。

在应变硬化指数较小的情况下, 铜层具有高强度低韧性, 铝层具有低强度高韧性。如图 5 所示, 当复合板材的拉伸变形达到 Cu 的均匀延伸极限时, 颈缩首先出现在 Cu 侧。但由于复合板材具有良好的界面结合性能, Cu 的颈缩和 Al 的均匀变形行为相互协调, 导致复合板材均匀延伸。在颈缩至断裂分离阶段, 铜铝结合界面在颈缩区开裂, 并先后断

裂。类似的现象也有过报道, Kim I K 等<sup>[19]</sup> 和刘帅洋等<sup>[20]</sup> 研究表明, Mg/Al/STS 层状复合材料在拉伸均匀变形阶段由于界面开裂而使得应力呈现阶梯状的现象, 而在本研究中这种现象在缩颈断裂末期才出现, 如图 4 方框所示。产生这种现象的原因为: 铜铝组元本身的变形特征之间存在差异, 铜层的韧性比铝层差, 在拉伸变形过程中铜层先发生失稳断裂, 之后铜铝复合板中铝层的单独变形行为与纯铝板相一致。并且, 随着铜层厚度的增加, 应力不再呈现阶梯状, 反映了更好的界面结合强度使得铜铝拉伸变形行为相互协调。

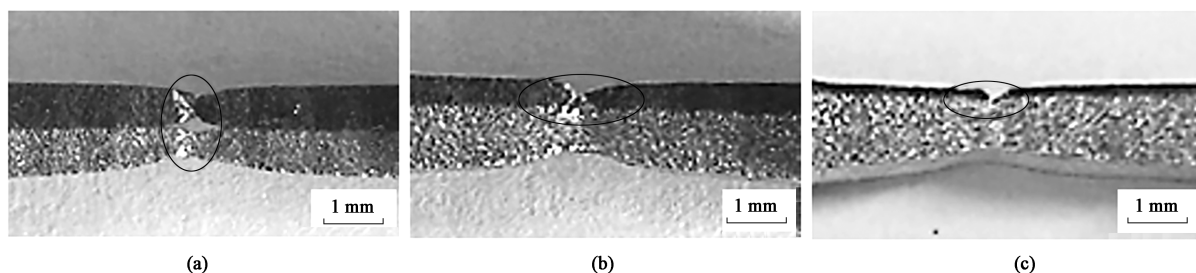


图 5 不同厚度比的 Cu/Al 复合板拉伸断裂处的缩颈现象

(a) 1:1 (b) 1:5 (c) 1:9

Fig. 5 Necking phenomenons at tensile fracture of Cu/Al composite plates with different thickness ratios

图 6 为厚度比为 1:1 的 Cu/Al 复合板的拉伸断口形貌。由图 6a 和图 6b 中可以看到, 铝侧具有大

而深的等轴状韧窝, 铜侧韧窝小而浅, 说明铜层和铝层在拉伸末期均发生典型的剪切韧性断裂。一般

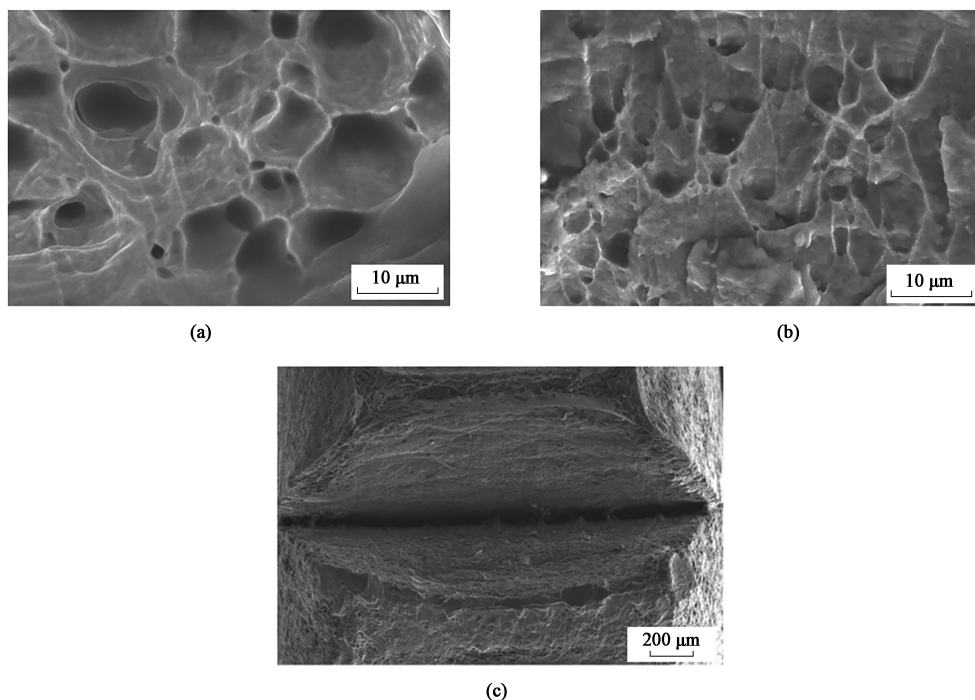


图 6 厚度比为 1:1 的 Cu/Al 复合板拉伸断口形貌

(a) 铝侧 (b) 铜侧 (c) 断口宏观形貌

Fig. 6 Tensile fracture morphologies of Cu/Al composite plate with thickness ratio of 1:1

(a) Aluminum side (b) Copper side (c) Macroscopic morphology of fracture



来说, 韧窝越大、越深, 反映材料的韧性越好; 韧窝小而浅, 则说明材料在拉伸时被快速撕裂, 材料的脆性特征明显。由图 6 中的宏观断口形貌可以看出, 铜层和铝层均发生明显的缩颈, 然而铝的层错能较高, 轧制过程中更容易发生动态回复和再结晶, 从而使铝层拉伸时的韧性较铜层高, 颈缩先出现在铜层, 这与拉伸试验结果一致。

2.2 厚度比对铜铝复合板冲压性能的影响

冲杯试验发现直径  $\Phi 60$  mm 的圆板可顺利成形为杯形件, 如图 7 所示, 但仔细观察杯形件口部出现了起皱现象, 这是由于模具表面粗糙, 没有添加润滑剂而导致的。此外, 凸模圆角处有减薄现象, 若进一步增大毛坯直径, 则可能会使拉深件破裂, 成形失败。

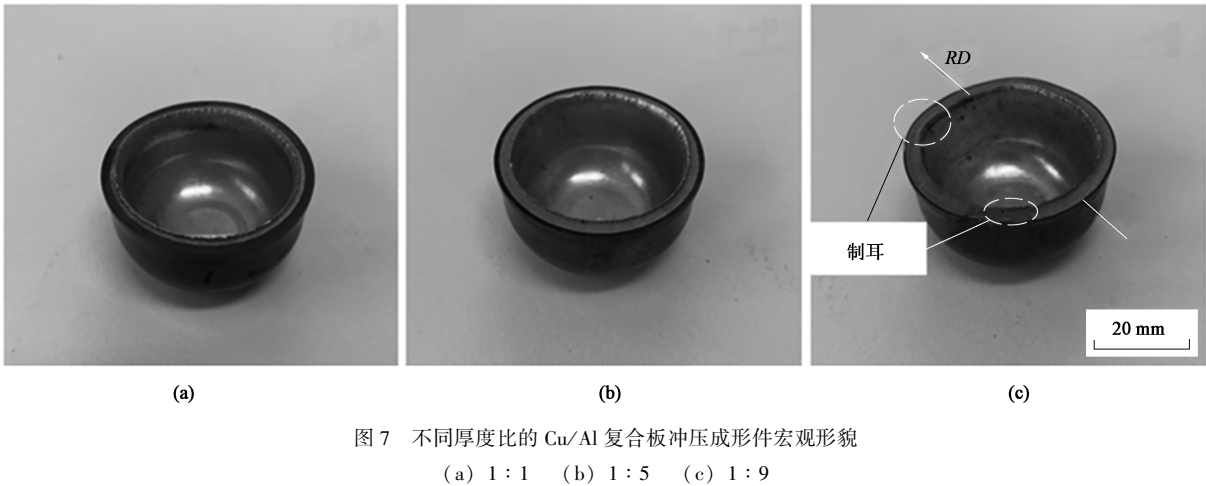


图 7 不同厚度比的 Cu/Al 复合板冲压成形件宏观形貌  
(a) 1 : 1 (b) 1 : 5 (c) 1 : 9  
Fig. 7 Macroscopic morphologies of Cu/Al composite plate stamping parts with different thickness ratios

具有力学各向同性的金属板材, 经深冲后, 其冲杯边缘通常是比较平整的, 而具有织构的板材冲杯的边缘则出现高低不平的凸起, 被称为“制耳”。由于冷轧状态的纯铜含有 S 型、Brass 型和 Copper 型织构的混合组分<sup>[21]</sup>; 冷轧状态纯铝的变形织构为  $(110)[1\bar{1}2] + (112)[11\bar{1}] + (123)[634]$ 。这几种变形织构促进在与 RD 成  $45^{\circ}/135^{\circ}$  方向上形成制耳,

如图 7c 所示, 共产生 4 个制耳。冲杯试验后的制耳高度和制耳率如表 2 中所示, 若以杯底为基准点测量, 厚度比为 1 : 9 的 Cu/Al 复合板的制耳高度最大, 为 1.75 mm, 制耳率为 7.8%; 厚度比为 1 : 1 的 Cu/Al 复合板的制耳高度最小, 为 0.22 mm, 制耳率为 0.9%。结果表明 Al 的各向异性要比 Cu 更高, 越容易促进制耳产生。

表 2 冲杯试验后的制耳高度和制耳率  
Table 2 Earing heights and earing rates after deep drawing cups testing

铜铝厚度比	冲头直径 $d_p$ /mm	冲头圆角半径 $r_p$ /mm	冲模内径 $d_d$ /mm	冲模圆角半径 $r_d$ /mm	冲压力/kN	制耳高度/mm	制耳率/%
1 : 1	$\Phi 32$	9.0	$\Phi 39.8$	9.0	28.5	0.22	0.9
1 : 5	$\Phi 32$	9.0	$\Phi 39.8$	9.0	21.9	0.60	2.6
1 : 9	$\Phi 32$	9.0	$\Phi 39.8$	9.0	19.2	1.75	7.8

图 8 为 3 种厚度比的铜铝复合板的冲压力-行程曲线。图 8 中 3 种厚度比的板材均重复了 4 次试验, 曲线基本重合, 说明成形工艺非常稳定。随着厚度比的增加, 冲压力逐渐增加, 厚度比为 1 : 1 的铜/铝复合板的冲压力比厚度比为 1 : 9 的铜/铝复合板的冲压力提高了 48%。当加工硬化使冲压力增大的速度与因法兰面积减小使冲压力降低的速度达到平衡时, 拉深力达到最大值。试验中的最大冲压力达

到了 28.5 N, 冷轧 Cu/Al 复合板具有较强的加工硬化, 冲压过程中容易产生裂纹和制耳。因此, 需要进一步研究不同温度退火工艺对板材冲压的影响, 以消除板材的内应力和降低板材的各向异性, 从而使板材的冲压性能进一步提高。

图 9 为杯突试验测试的铜铝复合板的杯突成形件。室温下, 以固定方式压边, 压边力为 10 kN, 冲压速度为  $10\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ , 分别对厚度比 1 : 1、

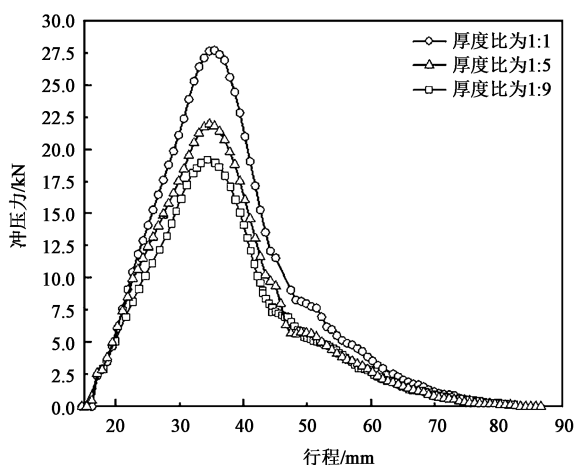


图8 Cu/Al复合板冲压力-行程曲线

Fig. 8 Stamping force-displacement curves of Cu/Al composite plate

1:5、1:9的铜铝复合板材进行杯突试验, 获得如下结果: 随着铜层厚度比从10%提高至50%, 杯突值提高了5.3%, 如图10所示。这是由于厚度比为1:9的复合板铜层较薄, 仅为0.3 mm, 杯突时外侧铜层的变形量大, 凸模圆角处较薄的铜层由于大变形而出现破裂。随着铜层厚度比的增加, 界面结合性能变好, 铜铝金属间的协调变形能力提高, 所以, 板材的胀形性能略有增强。试验过程中, 由于模具表面与板材之间的摩擦, 以及模具的凹模圆角较小, 在切向压应力和径向拉应力的作用下, 坯料无法通过凹模圆角流向直壁, 造成较大的应力集中, 杯突部分在凸模圆角处容易发生破裂。

### 2.3 退火工艺对板材各向异性行为的影响

对于轧制金属板材, 由于晶体的择优取向, 材料的力学性能常表现出明显的各向异性。不同方向

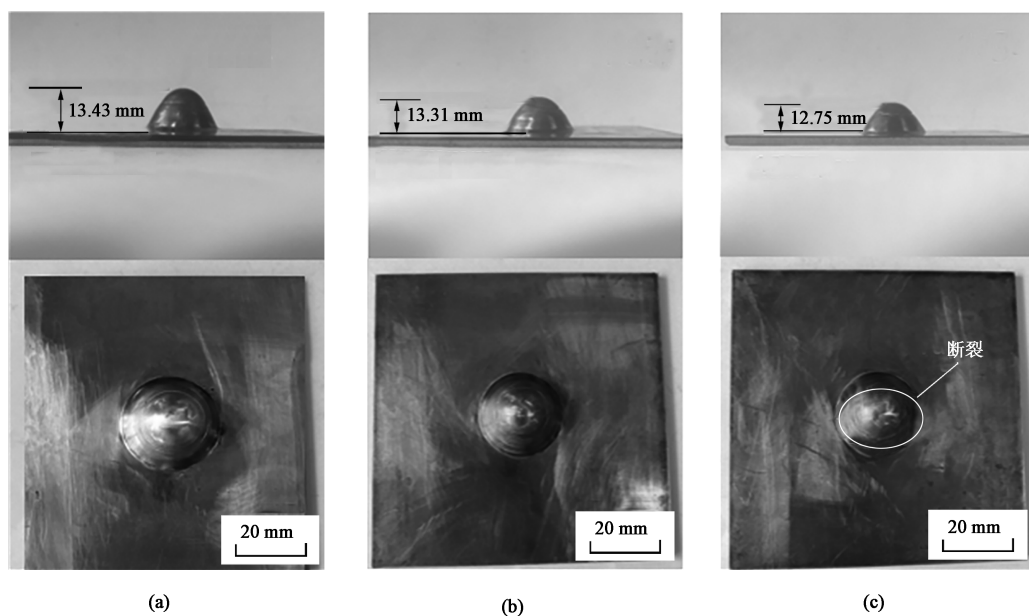


图9 不同厚度比的Cu/Al复合板的埃氏杯突试验件

(a) 1:1 (b) 1:5 (c) 1:9

Fig. 9 Parts by Erichsen cupping test of Cu/Al composite plates with different thickness ratios

上塑性变形行为的变化可用Lankford值参数或各向异性系数来表征。

塑性应变比 $r$ 为沿宽度方向与厚度方向真应变的比值, 即:

$$r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_t} = \frac{\ln(b/b_0)}{\ln(t/t_0)} \quad (2)$$

式中:  $\varepsilon_b$  为沿宽度方向的真应变;  $\varepsilon_t$  为沿厚度方向的真应变;  $b_0$ 、 $b$  分别为板材初始和最终的宽度;  $t_0$ 、 $t$  分别为初始和最终的厚度。

在试验中, 由于板材的厚度变化相对于宽度变

化很小(通常至少相差一个数量级), 所以两个方向应变的测量误差很大, 为了减小试验误差、提高测量精度。式(2)可用同一量级的长度方向真应变和宽度方向真应变来表示, 根据塑性变形材料体积不变原理, 可由式(3)计算 $r$ 值:

$$r = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_t} = \frac{\ln(b/b_0)}{\ln(t/t_0)} = \frac{\ln(b/b_0)}{\ln(b_0 l_0 / b l)} \quad (3)$$

式中:  $l_0$ 、 $l$  分别为板料初始和最终的标距长度。

本试验中选取25%的工程应变量为均匀变形阶段时测量主应变的最佳点, 试验中分别沿与轧制方

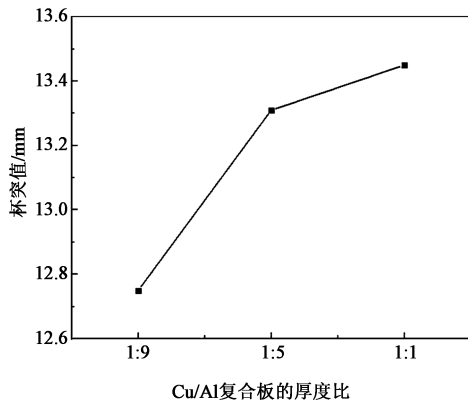


图 10 不同厚度比的 Cu/Al 复合板的杯突值

Fig. 10 Cupping values of Cu/Al composite plates with different thickness ratios

向成  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  的方向测定板材的  $r$  值, 根据下式计算平均塑性应变比  $\bar{r}$  和平面各向异性程度  $\Delta r$  (制耳参数)。

$$\bar{r} = \frac{r_{RD} + 2r_{DD} + r_{TD}}{4} \quad (4)$$

$$\Delta r = \frac{r_{RD} + r_{TD} - 2r_{DD}}{2} \quad (5)$$

式中:  $r_{RD}$ 、 $r_{DD}$ 、 $r_{TD}$  分别为沿与轧制方向成  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$  方向的  $r$  值。

厚度比为 1:1 的铜铝复合板在 250~500  $^\circ\text{C}$  退火温度下沿不同方向的  $r$  值见图 11。从图 11 中可见, 随着退火温度的升高,  $r$  值显著减小, 同时  $r_{TD}/r_{RD}$  比值增大。经过 250 和 300  $^\circ\text{C}$  退火后  $45^\circ$  方向的  $r$  值要高于  $0^\circ$  和  $90^\circ$ , 而经过 400 和 500  $^\circ\text{C}$  退火后  $45^\circ$  方向上的  $r$  值要低于  $0^\circ$  和  $90^\circ$  方向。如表 3 所示,  $\Delta r < 0$ , 制耳在  $45^\circ/135^\circ$  方向产生;  $\Delta r > 0$ , 制耳在  $0^\circ/90^\circ$  方向产生。这种现象的原因为: 低温退火时纯铜含有的 S 型、Brass 型和 Copper 型织构组分和纯铝含有的  $(110)[1\bar{1}2] + (112)[11\bar{1}] + (123)[634]$  变形织构未完全消除, 仍起主导作用, 促进在  $45^\circ/135^\circ$  方向上产生制耳。而高温退火后, 纯铜的退火织构组分一般为 Cube 型和 Goss 型, 纯铝退火后为立方织构, 这两种织构促进在  $RD$ 、 $TD$  方向上产生制耳<sup>[21]</sup>。如表 3 所示, 随着退火温度的升高, 平均塑性应变比由 250  $^\circ\text{C}$  时的 0.536 减小至 500  $^\circ\text{C}$  时的 0.123, 平面的各向异性程度在 500  $^\circ\text{C}$  时最低, 为 0.027。这是由于再结晶同时产生许多随机取向晶粒, 制约了织构的影响效果, 使得制耳并不显著。

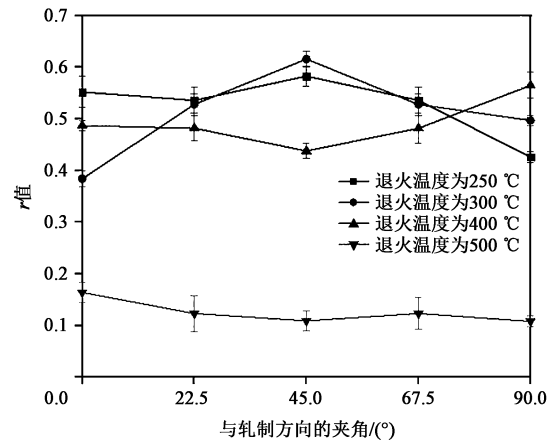
图 11 250~500  $^\circ\text{C}$  退火温度下 Cu/Al 复合板不同方向的  $r$  值Fig. 11  $r$  values for Cu/Al composite plate at annealing temperature of 250~500  $^\circ\text{C}$  along different directions

表 3 不同退火温度下 Cu/Al 复合板平均塑性应变比和平面各向异性

Table 3 Average plastic strain ratios and planar anisotropy of Cu/Al composite plate at different annealing temperatures

退火温度/ $^\circ\text{C}$	$r_{RD}$	$r_{DD}$	$r_{TD}$	$\bar{r}$	$\Delta r$
250	0.552	0.583	0.426	0.536	-0.094
300	0.384	0.616	0.497	0.528	-0.176
400	0.487	0.438	0.565	0.482	0.088
500	0.164	0.109	0.108	0.123	0.027

图 12 为不同厚度比的铜铝复合板在 250~500  $^\circ\text{C}$  退火温度下的  $r$  值的变化趋势。由图 12 可知, 不同厚度比的铜铝复合板  $r$  值的变化基本一致, 随着退火温度的升高, 平均塑性应变比逐渐减小, 制耳参数逐渐接近 0。这表明退火温度升高, 有利于板材朝各方向均匀地变形, 从而降低冲压件的制耳率, 减小修边余量, 提高材料利用率。

## 2.4 退火温度对界面组织的影响

图 13 为不同温度退火后厚度比为 1:1 的铜/铝复合板的纵截面 SEM-EDX 线扫描图。由图 13 中可以看出, 经过 250、300、400 和 500  $^\circ\text{C}$  退火后, 扩散层厚度分别为 2.1、4.0、8.4、24  $\mu\text{m}$ , 扩散层厚度随着退火温度的升高逐渐递增。刘哲等<sup>[13]</sup>的研究结果表明, 退火温度高于 350  $^\circ\text{C}$ , 保温 2 h 后, 金属间化合物破碎和不连续的现象基本消失, 金属间化合物重新生长并连接成片。

如表 4 所示, 结合 EDX 点扫描分析, 250  $^\circ\text{C}$  退火时只在铝基体上检测出少量  $\text{CuAl}_2$  相; 300  $^\circ\text{C}$  时, 铜基体上出现  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  相, 铝基体上为  $\text{CuAl}_2$



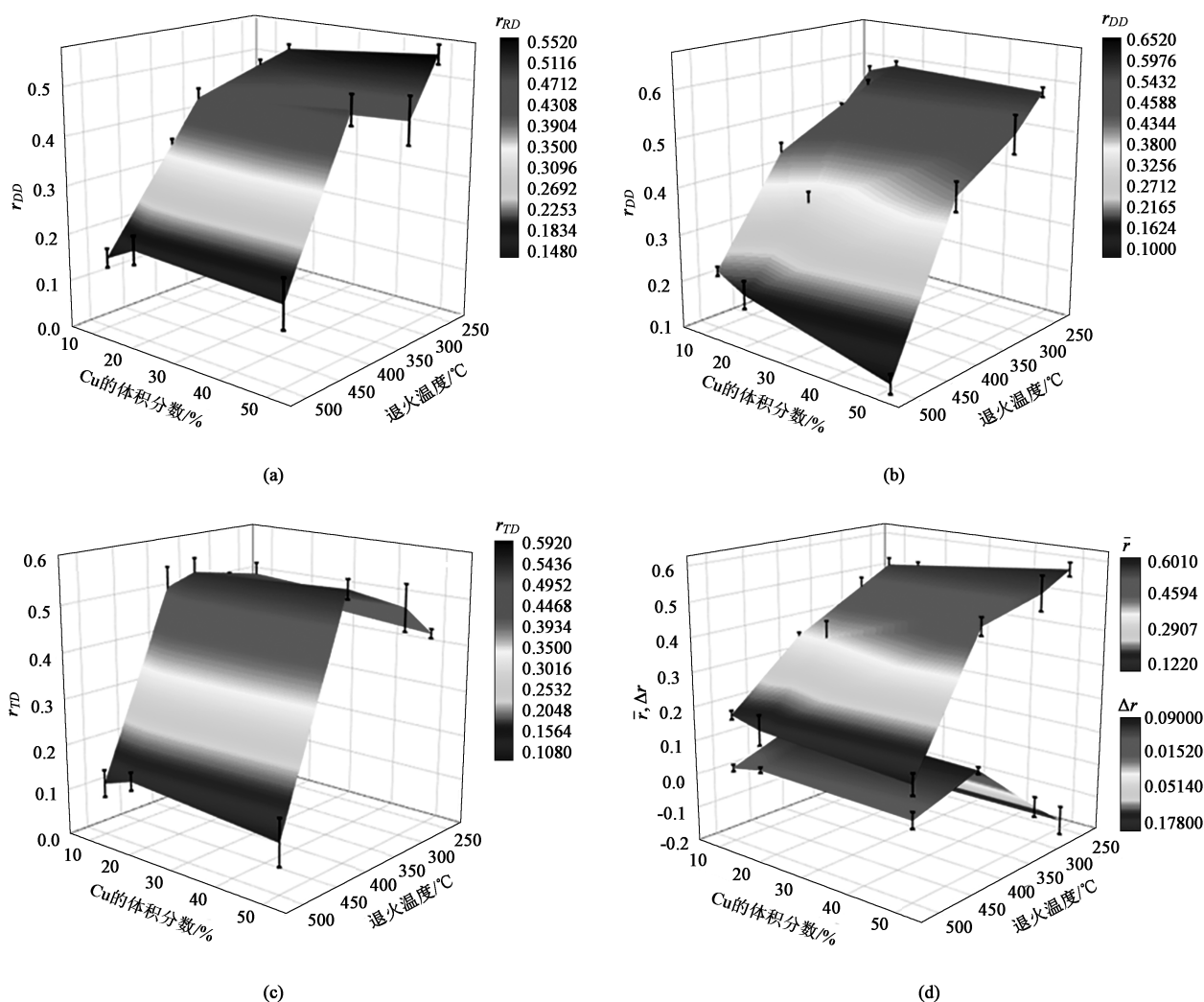


图 12 退火温度和厚度比对  $r$  值的影响  
(a)  $r_{RD}$  (b)  $r_{DD}$  (c)  $r_{TD}$  (d)  $\bar{r}$  和  $\Delta r$

Fig. 12 Effects of annealing temperature and thickness ratio on  $r$  values

相,  $\text{CuAl}_2$  相较  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  相优先生成; 退火温度为 400 °C 时, 金属间化合物分别为  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  相、 $\text{CuAl}$  相、 $\text{CuAl}_2$  相, 分析其原因是退火温度高于 300 °C 时,  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$  相和  $\text{CuAl}_2$  相反应生成了新相  $\text{CuAl}$ ; 退火温度升至 500 °C 时, 扩散层厚度明显增加, 从铜侧到铝侧相的成分依次为  $\text{Cu}_9\text{Al}_4$ 、 $\text{CuAl}$ 、 $\text{CuAl}_2$ 。

## 2.5 退火温度对界面结合强度的影响

图 14a 为 250 °C 退火后不同厚度比的铜铝复合板的结合强度。由图 14 中可以看出, 随着 Cu 层厚度比的增加, 铜铝复合板的结合强度由  $4.8 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$  显著升高至  $19.3 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$ , 厚度比为 1:1 的复合板的界面结合效果最佳。图 14b 为铜铝复合板的结合强度随退火温度的变化趋势。

随着退火温度的升高, 铜铝复合板的结合强度先上升后下降, 之后趋于稳定。退火温度为 300 °C 时, 试样的结合强度相对较好。这是由于低温退火时, 金属发生回复与再结晶, 产生空位扩散, 位错移动和重排, 释放了轧制过程中积累的储存能, 加工硬化的效果减弱<sup>[9]</sup>。因此, 低温退火可获得相对较好的结合性能。超过 400 °C 后, 界面处生成了硬而脆的金属间化合物, 影响了界面的结合性能。由以上分析可知, 复合板的界面结合强度是由厚度比、退火软化和金属间化合物共同影响的。

## 3 结论

(1) 冷轧铜铝复合板材的抗拉强度介于单层

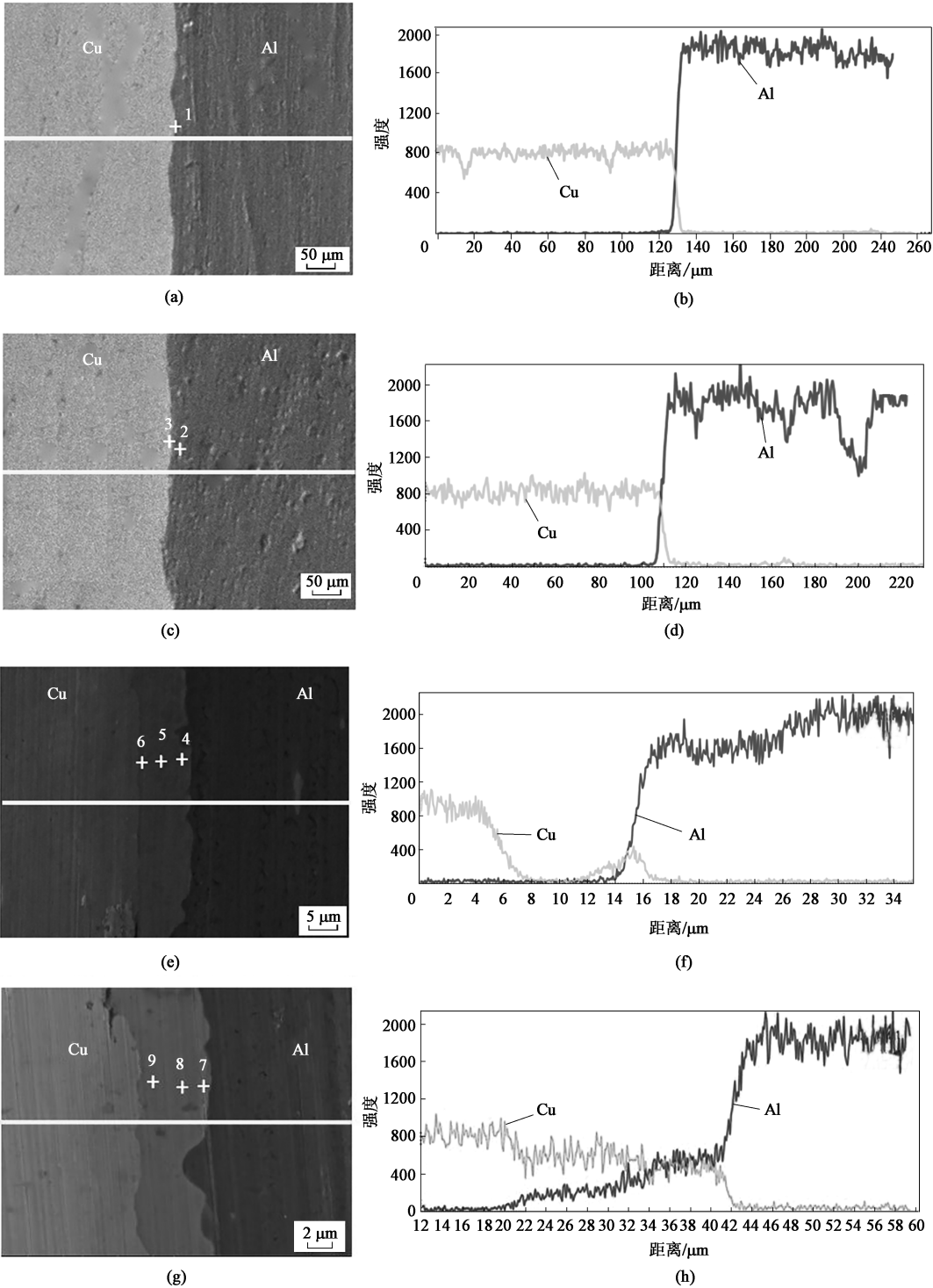


图 13 不同退火温度下厚度比为 1 : 1 的 Cu/Al 复合板的纵截面 SEM-EDX 线扫描分析结果

(a) 250 °C 退火后扫描电镜图像 (b) 250 °C 退火后 Cu 和 Al 元素分布 (c) 300 °C 退火后扫描电镜图像

(d) 300 °C 退火后 Cu 和 Al 元素分布 (e) 400 °C 退火后扫描电镜图像 (f) 400 °C 退火后 Cu 和 Al 元素分布

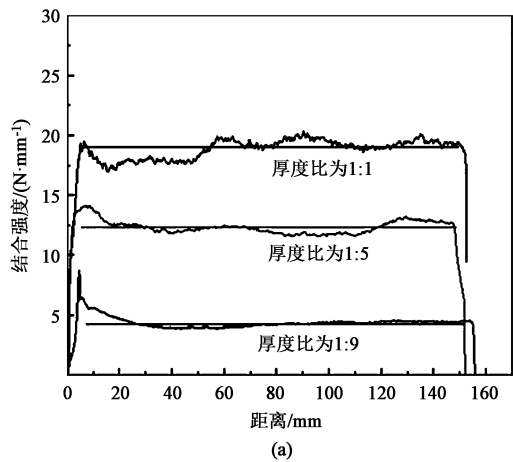
(g) 500 °C 退火后扫描电镜图像 (h) 500 °C 退火后 Cu 和 Al 元素分布

Fig. 13 SEM-EDX line scan analysis results of longitudinal sections for Cu/Al composite plates with thickness ratio of 1 : 1 at different annealing temperatures

- (a) SEM images after annealing at 250 °C
- (b) Distribution of Cu and Al elements after annealing at 250 °C
- (c) SEM images after annealing at 300 °C
- (d) Distribution of Cu and Al elements after annealing at 300 °C
- (e) SEM images after annealing at 400 °C
- (f) Distribution of Cu and Al elements after annealing at 400 °C
- (g) SEM images after annealing at 500 °C
- (h) Distribution of Cu and Al elements after annealing at 500 °C

表 4 不同退火温度下 Cu/Al 复合板 EDX 点扫描结果  
(%, 质量分数)

Table 4 EDX point scan results of Cu/Al composite plates at different annealing temperatures (%, mass fraction)			
退火温度/℃	测量点	Al	Cu
250	1	67.67	32.33
	2	61.10	38.90
300	3	37.17	62.83
	4	68.06	31.94
400	5	45.23	54.77
	6	27.48	72.52
500	7	71.28	28.72
	8	46.16	53.84
	9	32.32	67.68



Cu、Al 之间，随着厚度比的增加，抗拉强度同步提高，缩颈断裂末期应力呈现阶梯状的现象基本消失。

(2) 铜铝复合板冲杯成形件的质量良好，在杯口部出现有规律的 4 个制耳，方向沿 45°/135°、厚度比为 1 : 1 的铜铝复合板所需的冲压力最大达到了 28.5 kN，产生的制耳最少，且杯突值最大，为 13.43 mm，具有良好的冲压成形性能。

(3) 退火温度高于 500 ℃ 时，轧制板材的拉深性能得到改善，塑性应变比为 0.123，制耳参数为 0.027。

(4) 铜层厚度比越高，界面结合越好，随着退火温度的升高，扩散层厚度递增，结合强度先升高后降低，铜铝复合板在 300 ℃ 退火 120 min 后具有最佳的界面结合性能。

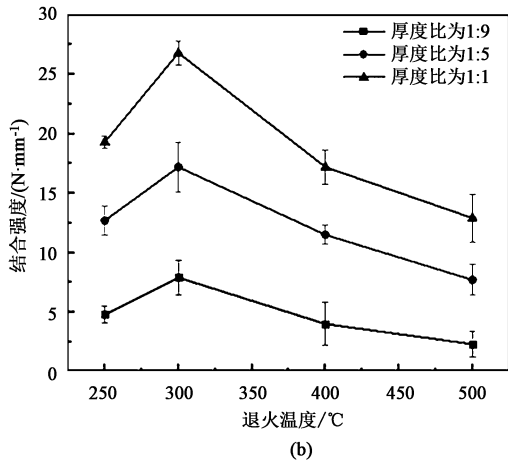


图 14 厚度比 (a) 和退火温度 (b) 对复合板结合强度的影响

Fig. 14 Effects of thickness ratio (a) and annealing temperature (b) on bonding strength for composite plates

参考文献：

[1] Hajizadeh K, Tajally M, Emadoddin E, et al. Study of texture, anisotropy and formability of cartridge brass sheets [J]. Alloys and Compounds A, 2014, 588: 690-696.

[2] 肖善超. 弹壳多模一次连续变薄拉深工艺研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2012.

Xiao S C. Research on Multi-mode-one-offirong Process for Cartridge Case [D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2012.

[3] Findik F. Recent developments in explosive welding [J]. Materials & Design, 2011, 32 (3): 1081-1093.

[4] Durgutlu A, Gulenc B, Findik F. Examination of copper/stainless steel joints formed by explosive welding [J]. Materials & Design, 2005, 26 (6): 497-507.

[5] Athar M, Tolaminejad B. Weldability window and the effect of interface morphology on the properties of Al/Cu/Al laminated composites fabricated by explosive welding [J]. Materials & Design, 2015, 86 (5): 516-525.

[6] Liu T, Wang Q D, Sui Y D, et al. An investigation into interface formation and mechanical properties of aluminum-copper bimetal by squeeze casting [J]. Materials & Design, 2016, 89: 1137-1146.

[7] Li X B, Zu G Y, Ding M M, et al. Interfacial microstructure and mechanical properties of Cu/Al clad sheet fabricated by asymmetrical roll bonding and annealing [J]. Materials Science and Engineering: A, 2011, 529 (1): 485-491.

[8] 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, 2011, 42 (6): 1468-1473.

[9] 郝平菊, 王振华, 刘元铭. 退火温度对铜/铝/铜复合板结合性能的影响 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (24): 159-162.

Hao P J, Wang Z H, Liu Y M. Effect of annealing temperature on bonding properties of Cu/Al/Cu clad sheet [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (24): 159-162.

[10] Yuan S J, Cheng W J, Liu W, et al. A novel deep drawing process for aluminum alloy sheets at cryogenic temperatures [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 284: 116743.



- [11] Olaf Engler. Control of texture and earing in aluminium alloy AA-3105 sheet for packaging applications [J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 538: 69-80.
- [12] 康永飞, 白朴存, 佟乃强, 等. 3003 铝合金冲压变形前后微观组织及其结构演变规律研究 [J]. 内蒙古工业大学学报: 自然科学版, 2018, 37 (2): 102-108.
- Kang Y F, Bai P C, Tong N Q, et al. Study on microstructure and texture evolution of 3003 aluminum alloy before and after stamping deformation [J]. Journal of Inner Mongolia University of Technology: Natural Science Edition, 2018, 37 (2): 102-108.
- [13] 刘哲, 王爱琴, 谢敬佩, 等. 铜铝复合板的拉深变形行为 [J]. 材料热处理学报, 2021, 42 (6): 22-28.
- Liu Z, Wang A Q, Xie J P, et al. Drawing deformation behavior of Cu /Al composite plates [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2021, 42 (6): 22-28.
- [14] Zhang X H, Tang B, Zhang X L, et al. Microstructure and texture of commercially pure titanium in cold deep drawing [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2012, (3): 496-502.
- [15] Lu R H, Liu Y T, Yan M, et al. Theoretical, experimental and numerical studies on the deep drawing behavior of Ti/Al composite sheets with different thickness ratios fabricated by roll bonding [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 297: 117246.
- [16] GB/T 5125—2008, 有色金属冲杯试验方法 [S].
- GB/T 5125—2008, Method for deep drawing cups testing of non-ferrous metals [S].
- [17] GB/T 4156—2020, 金属材料 薄板和薄带 埃里克森杯突试验 [S].
- GB/T 4156—2020, Metallic materials—Sheet and strip—Erichsen cupping test [S].
- [18] Lee K S, Su E L, Kim J S, et al. Interface microstructure and deformation behavior of an Al-Cu dissimilar metal plate [J]. Journal of Korean Institute of Metals & Materials, 2013, 51 (7): 535-545.
- [19] Kim I K, Hong S I. Roll-bonded tri-layered Mg/Al/stainless steel clad composites and their deformation and fracture behaviour [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2013, 44 (8): 3890-3900.
- [20] 刘帅洋, 王爱琴, 田捍卫, 等. 不同应变速率下铜/铝层状复合材料的拉伸变形行为 [J]. 材料热处理学报, 2018, 39 (10): 8-14.
- Liu S Y, Wang A Q, Tian H W, et al. Tensile deformation behavior of Cu /Al layered composites under different strain rates [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2018, 39 (10): 8-14.
- [21] 杨莹, 马靖楠, 何岩, 等. 纯铜热处理工艺参数对微拉深成形的影响 [J]. 热加工工艺, 2018, 47 (16): 238-241.
- Yang Y, Ma J N, He Y, et al. Effect of heat treatment process parameters of pure copper on micro-drawing forming [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (16): 238-241.

## 欢迎订阅《塑性工程学报》杂志



欢迎关注微信公众号

《塑性工程学报》(Journal of Plasticity Engineering)创刊于1994年,是由中国科学技术协会主管、中国机械工程学会主办的学术刊物。《塑性工程学报》为全国中文核心期刊,被众多知名数据库收录:中文核心期刊要目总览(北大)、中国科学引文数据库(CSCD)来源期刊(核心库)、中国科技期刊引证报告统计源核心期刊、中国科技核心期刊(中国科技论文统计源期刊)、中国学术期刊文摘数据库(核心版,CSAD-C)、中国学术期刊综合评价数据库、美国化学文摘CA、美国剑桥科学文摘材料信息(CSA:MI)、Scopus数据库、日本科学技术振兴机构中国文献数据库等。本刊主要报道与塑性成形领域及其交叉学科相关的前沿性、创新性的基础理论研究和工程技术应用等优秀科研成果。

### 办刊宗旨:

活跃本专业学术思想,提高本专业学术理论,强化本专业学术交流,为不断提高我国塑性工程基础水平,确立我国塑性工程界在世界科技阵营中的地位而服务。

### 读者对象:

本刊适用于从事与材料塑性成形理论研究、科研、生产、设计等相关的高校师生、科研人员及专业技术人员阅读。

### 本刊订阅方式

1. 全国各地邮局均可直接订阅  
本刊为月刊,大16开本,每月末出版  
邮发代号: 80-353  
国际标准刊号: ISSN 1007-2012  
国内统一刊号: CN 11-3449/TG  
国内定价: 40.00元/册
2. 逾期未定上者,可与编辑部联系订阅  
汇款地址: 北京市海淀区学清路18号  
收款人: 《塑性工程学报》编辑部  
联系人: 薛老师  
联系电话/传真: 010-62912592  
电子邮箱: sxgxcb@263.net

欢迎投稿,网址: <http://sxgc.cbpt.cnki.net/>