

退火温度对不同厚度铜铝复合板力学性能影响

孙景涛 陈志新 段海涛 刘雨超

(东华理工大学电子与电气工程学院, 南昌 330013)

摘要 通过冷轧制造不同厚度的铜铝复合板,研究退火温度对其力学性能的影响。检测并评估了铜铝复合板的抗拉强度、屈服强度等力学性能参数及应力-应变曲线,获得了在板材颈缩处的应变场与位移场。结果显示,随着退火温度升高,复合界面扩散层增厚,依次生成 CuAl_2 、 Cu_9Al_4 和 CuAl 金属间化合物,在一定程度上导致铜铝复合板的抗拉强度逐渐下降,伸长率逐渐增加;随着成形板厚度的增大,其抗拉强度和伸长率也逐渐增加。“3 mm厚度+300 °C退火”工艺可达成对强度与塑性的最佳协调控制。

关键词 铜铝复合板;退火;力学性能

中图分类号 TB331;TG146.21

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.T20250453

Effects of Annealing Temperature on Mechanical Properties of Copper-aluminum Composite Plate with Different Thicknesses

SUN Jingtao, CHEN Zhixin, DUAN Haitao, LIU Yuchao

(School of Electronic and Electrical Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013)

Abstract: The influence of annealing temperature on mechanical properties of copper-aluminum composite plates with different thicknesses fabricated by cold rolling was investigated. The mechanical performance parameters including tensile strength and yield strength as well as stress-strain curves were analyzed to obtain strain field and displacement field of sheet at necked region. The results reveal that the diffusion layer at the composite interface is thickened as annealing temperature rises, and CuAl_2 , Cu_9Al_4 , and CuAl intermetallic compounds are successively formed in sequence, leading to a gradual reduction in tensile strength and an increase in elongation of plate to a certain extent. With the thickness augment of formed plate, the tensile strength and elongation are also raised incrementally, indicating that the “3 mm thickness + 300 °C annealing” process achieves desirable coordinated control of strength and plasticity.

Key Words: Copper-aluminum Composite Plates, Annealing, Mechanical Properties

随着3C电子、新能源汽车和太阳能发电等产业的迅速发展,国内对铜及铜合金板带的需求逐步增加^[1],铜的资源短缺及价格的不断上涨迫切需要新的替代材料。铜铝复合板既具备铜的高导电、高导热,又兼具铝的质轻、价廉,可作为新能源与储能领域的理想材料,市场需求规模化高速增长。在电子电力与高效散热领域,铜铝复合板用于散热部件,凭借优异导热性和轻量化,在增强散热性能的同时控制成本与质量,满足高功率器件热管理需求。在高端装备与特种应用方面铜铝复合板通过结构设计整合导电、导热、轻量化和耐蚀等性能,适应多样化高附加值场景。

目前,铜铝复合板的主要制备工艺有爆炸复合、铸轧复合和轧制复合。其中,轧制复合是一种简单、高效

的层状金属复合材料制备技术^[2]。冷轧复合因其生产成本低、效率高,成为工业化生产铜铝复合板的主要方法^[3]。张胜华等^[4]研究了铜/铝轧制复合工艺对复合板结合强度的影响,指出轧制变形率和热处理工艺是影响结合强度的主要因素。KELLER C等^[5]研究了严重塑性变形的Cu-Al复合线材的力学性能,发现不同直径和热处理条件下,其屈服应力和延展性与传统铜包铝线差异显著,热处理后会形成细晶粒微观结构和多种金属间化合物。CHEN Y等^[6]通过单轴拉伸试验研究了不同热处理条件下Cu/Al层状复合材料的协同变形行为,发现界面结合强度和分离铜铝层的强度差异对协同变形性能有耦合影响。退火对铜铝复合板力学性能的影响主要表现为强度下降与塑性提升^[7]。

收稿日期:2025-12-09;修订日期:2026-01-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52365054)

第一作者:孙景涛,男,2001年出生,硕士研究生, E-mail:2516125141@qq.com

通信作者:陈志新,男,1972年出生,副教授, E-mail:Czxchen2008@sina.com

引用格式:孙景涛,陈志新,段海涛,等.退火温度对不同厚度铜铝复合板力学性能影响[J].特种铸造及有色金属,2026,46(4):564-569.

SUN J T, CHEN Z X, DUAN H T, et al. Effects of annealing temperature on mechanical properties of copper-aluminum composite plate with different thicknesses[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2026, 46(4): 564-569.

WANG C等^[8]发现退火处理虽降低铜铝复合薄带抗拉强度,但通过扩散层应力传递作用提升了其塑性。

三维数字图像相关法(3D-DIC)^[9]是一种非接触的光测力学试验方法,具有较强的环境适应性、装备简单、可测试件尺度范围大、全场非接触测量等特点^[10],广泛应用于材料弹塑性行为、损伤演化、断裂机制及疲劳力学分析等领域。该方法有助于精确表征材料表面形貌的演变规律,并深入分析试样在增量荷载作用下的力学响应。

铜铝复合板在应对铜资源紧张、满足新兴产业对材料高性能与轻量化需求方面具有重要战略意义,当前研究与实践更应聚焦于解决界面调控、应力管理和高效加工等实际应用难题。针对这些问题,本研究通过3D-DIC技术与正交试验相结合的措施,明确退火温度与厚度对铜铝复合板力学性能的影响,从全场变形的角度揭示其变形机制与颈缩行为,为铜铝复合板的工艺优化、性能预测与工程应用提供参考,从宏观参数到细观变形的跨尺度、全场和动态表征为金属复合材料的性能调控与失效分析提供新思路与方法。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料与设备

铜铝双层复合板采用冷轧复合法制成,冷轧复合试验在($\phi 120$) $\phi 140/\phi 420\times 450$ 型四辊液压张力冷轧机上进行,单道次轧制压下率为70%。铜板为T2工业纯铜,铝板为1060纯铝(纯度为99.6%),化学成分见表1和表2。铜铝复合板的厚度分别为1、2和3 mm,其中铜、铝厚度比为1:4。采用电火花线切割从板材切割狗骨形标准试样,见图1。

表1 T2铜板的化学成分

Tab.1 Chemical composition of T2 copper plate							%
w_B							
Sb	As	Fe	Pb	S	Bi	Cu+Ag	
0.002	0.002	0.005	0.005	0.005	0.001	余量	

表2 1060铝板的化学成分

Tab.2 Chemical composition of 1060 aluminum plate									%
w_B									
V	Ti	Zn	Mg	Mn	Cu	Fe	Si	Al	
0.05	0.03	0.05	0.03	0.03	0.05	0.35	0.25	余量	

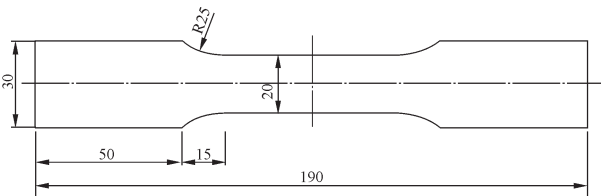


图1 铜铝复合板标准试样

Fig.1 Standard specimen of copper-aluminum composite plate

1.2 试验方法

将切割好的标准试样放入YTH-4-10箱式电阻炉中进行退火处理。以5℃/min的速率分别升温至不同温度(250、300和350℃)后保温60 min,随炉冷却至室温。对试样表面实施散斑喷涂处理。散斑图案可直观表征试样变形信息,其随材料变形产生对应位移运动,随后由双摄像机同步采集材料变形前后的散斑场图像。散斑制作采用喷漆工艺,首先在试样表面均匀喷涂白色底漆,随后将黑色漆点随机散布于白漆基底,经空气中自然风干后形成符合测量要求的散斑图^[11]。正交试验见表3。依据正交试验方案制备铜铝复合板标准试样,试样尺寸见图1。根据GB/T228.1-2021^[12]采用CMT5505型电子万能试验机对试样进行拉伸测试,采用位移控制模式,横梁位移速率设为1 mm/min。通过集成应力应变测量系统实时记录载荷-位移($F-\Delta L$)曲线,同步获取抗拉强度、屈服强度、伸长率及屈服强度与抗拉强度比值等关键力学参数^[13]。同时结合三维数字散斑动态变形测量系统(3D-DIC)监测拉伸全过程位移场与应变场演化,定量表征断裂时刻的变形场分布特征。采用XJTUDIC三维全场应变非接触式测量系统,该系统主要由图像采集控制模块、高精度标定组件(尺寸为128 mm $\times$ 96 mm)及图像显示装置构成;高亮度LED光源提供均匀照明环境;数据采集系统包含双CCD工业相机(UP-800)及其配套控制系统,其中相机采用2 Hz采样频率进行同步图像捕捉。试验过程中,双CCD摄像机同步记录试样表面形变特征,通过数字图像相关技术实现全场应变分析。运用Origin软件绘制工程应力-应变曲线与真应力-真应变曲线。采用Sigma 300VP扫描电镜(SEM)对不同退火温度处理后的界面区域开展系统表征。该仪器配备有角度选择性背散射电子(HDAsB)探测器,可在高真空模式下获得材料的成分衬度图像。同时,其预装的牛津SDD 80能谱仪(EDS)进行成分分析,重点对界面扩散反应层的微观形貌、厚度分布及物相构成进行解析。

表3 正交拉伸试验表

Tab.3 Orthogonal tensile test		
试验号	退火温度/℃	厚度/mm
1	250	1.0
2	250	2.0
3	250	3.0
4	300	1.0
5	300	2.0
6	300	3.0
7	350	1.0
8	350	2.0
9	350	3.0

2 试验结果与讨论

塑性变形阶段,需构建真应力-真应变关系进行分析铜铝复合板的变形行为。真应力-真应变与工程应力-应变的关系可表述为:

$$\epsilon_t = \int_{L_0}^{L_t} \frac{dL}{L} = I_n \frac{L_t}{L_0} = I_n(1 + \epsilon_e) \tag{1}$$

$$\sigma_t = \frac{F}{A} = \frac{FL}{A_0L_0} = \sigma_e(1 + \epsilon_e) \tag{2}$$

式中, L 为标距变量; L_0 为初始标距; L_t 为拉伸后标距; F 为拉伸力; A_0 为初始横截面积; A 为拉伸后横截面积; ϵ_e 、 σ_e 分别为工程应变和工程应力; ϵ_t 、 σ_t 分别为真应变和真应力^[13]。在对铜铝复合板进行了9组拉伸试验,得到不同退火温度和不同厚度下的力学性能,见表4。

表4 铜铝复合板的力学性能

Tab.4 Mechanical performance for copper-aluminum composite plates

试验号	抗拉强度/MPa	屈服强度/MPa	屈服比	伸长率/%
1	110	95	0.86	9.6
2	168	148	0.88	13.4
3	172	149	0.87	18.2
4	106	84	0.79	36.1
5	164	139	0.85	39.8
6	168	151	0.90	44.3
7	101	81	0.80	42.5
8	125	102	0.82	46.9
9	129	106	0.82	52.8

2.1 微观组织演变分析

图2为3 mm铜铝复合板在不同退火温度下的界面形貌。可以看出,在250℃下,Cu、Al原子受限于扩散激活能,仅能发生有限迁移,导致界面处扩散反应较弱,所形成的扩散层较薄。随退火温度提高,原子热运动加剧,跨越扩散能垒的能力增强,促进了界面处原子的扩散与金属间化合物的形成。为明确界面反应产物的组成,对图2中扩散层典型区域进行了EDS分析,见表5。结果表明,250℃退火后界面处主要形成CuAl₂

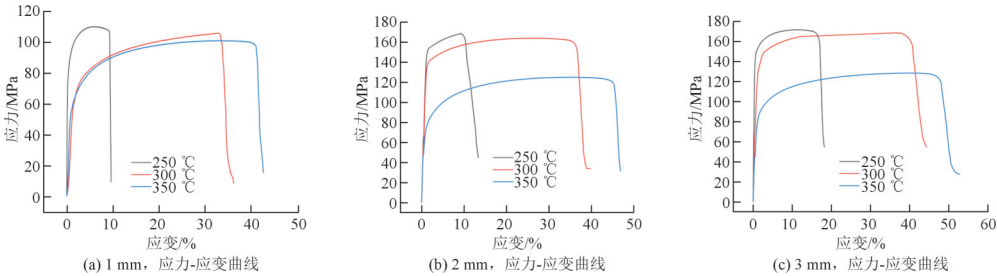


图3 不同厚度、退火温度下铜铝复合板的工程应力-应变曲线及伸长率

Fig.3 Engineering stress-strain curves and elongation of copper-aluminum composite sheets with different thicknesses and annealing temperatures

相;300℃退火时,靠近铜侧的区域生成Cu₉Al₄相,而铝侧则仍以CuAl₂相为主;升温至350℃后,在Cu₉Al₄与CuAl₂相之间出现了CuAl相。上述相演变过程可解释为:退火初期,Al基体中的Cu溶解度迅速饱和,优先形成CuAl₂相;随Cu原子持续扩散,Cu侧浓度升高,进而形成Cu₉Al₄相;当互扩散进行到一定程度,界面局部Cu、Al摩尔比趋近于1:1时,则生成CuAl相,最终构成由Cu₉Al₄、CuAl和CuAl₂相共同组成的多层界面结构。

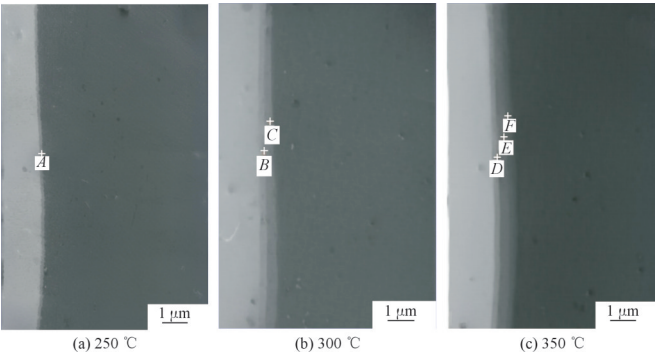


图2 不同温度退火后铜铝复合板的界面形貌

Fig.2 Interfacial morphologies of copper-aluminum composite plates after annealing at different temperatures

表5 铜铝复合板结合界面处EDS分析

Tab.5 EDS results of copper-aluminum composite plate at bonding interface

点	$x_B/\%$		可能的相
	Cu	Al	
A	36.45	63.55	CuAl ₂
B	66.95	33.05	Cu ₉ Al ₄
C	28.27	71.73	CuAl ₂
D	67.52	32.48	Cu ₉ Al ₄
E	48.43	51.57	CuAl
F	27.68	72.32	CuAl ₂

2.2 不同退火温度对铜铝复合板力学性能的影响

图3为不同厚度、退火温度下复合板的应力-应变曲线及伸长率。可以看出,随着退火温度从250℃升高至350℃,不同厚度铜铝复合板的抗拉强度均下降,而伸长率则提高。在250℃下,界面扩散反应初步激活,主要生成CuAl₂金属间化合物。该化合物硬度高、

脆性大,其在界面处以不连续或薄层形式存在,能在一定程度上提高界面结合强度。此时材料的高强度(如3 mm试样达172 MPa)主要源于基体中大量保留的冷轧加工硬化效应,而脆性 CuAl_2 相的存在及基体的低塑性,共同导致了合金伸长率不高。当退火温度为300℃时,界面扩散过程显著增强,金属间化合物的生成进入关键阶段。此时,界面处不存在 CuAl_2 相,开始形成 Cu_9Al_4 相。 Cu_9Al_4 相比 CuAl_2 具有更好的韧性,二者共同构成了连续、均匀且厚度适中的复合反应层,实现了Cu、Al间的冶金结合,优化了载荷传递效率。同时,该温度恰好足以触发铝基体的完全再结晶。因此,“细小等轴晶基体”与“良性化合物界面层”的协同作用,使材料在强度适度下降(3 mm试样为168 MPa)的同时,伸长率大幅提升(达44.3%),实现了强塑性匹配。进一步提高温度至350℃,界面反应趋于剧烈和复杂,除 CuAl_2 和 Cu_9Al_4 外,开始生成更富铝的 CuAl 相。这些脆性金属间化合物导致界面反应层异常增厚、不均匀且脆性显著增加,极易成为微裂纹的萌生与扩展源。尽管基体因再结晶完成与晶粒长大而充分软化,使整体塑性仍有所上升(伸长率为52.8%),但脆性界面已导致塑性增幅趋缓,并成为制约性能提升的短板。对于1 mm薄板,其强度降至101 MPa,表明脆性化合物层在薄板整体结构中的相对危害更为突出。

铜铝复合板力学性能随退火温度的演变,本质上

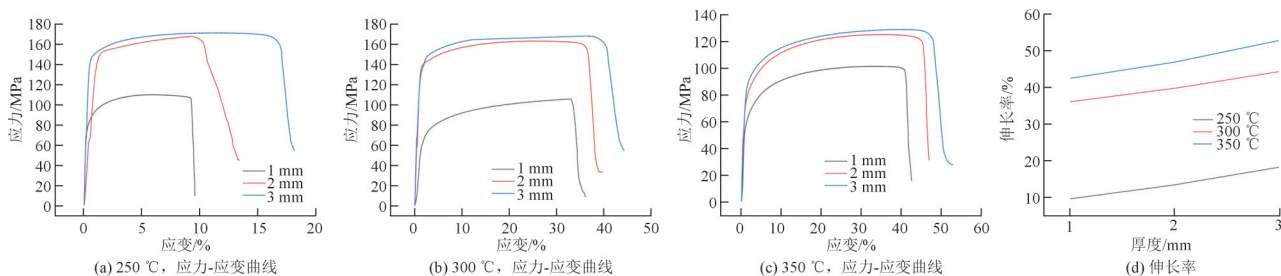


图4 不同厚度、退火温度时试样的工程应力-应变曲线和伸长率

Fig.4 Engineering stress-strain curves and elongation of copper-aluminum composite sheets with different thicknesses and annealing temperatures

综上,低温区间($\leq 300^\circ\text{C}$)厚度主导强度,加工硬化保留效应显著,适用于对强度要求较高的结构件。高温区间($\geq 300^\circ\text{C}$)厚度主导塑性提升,再结晶与晶粒长大充分,适用于需要高成形性的深冲压件。对于要求综合性能的构件,3 mm厚度+300℃退火工艺可实现对强度与塑性的最佳协同调控。

2.4 基于3D-DIC的位移场演化与变形机制分析

选取具有最佳综合性能的试样(300℃退火,3 mm厚度),对其在拉伸断裂前期($t=450\text{ s}$)的三维位移场进行分析,结果见图5。可以看出, x 轴方向(宽度方向)的位移云图呈现典型的对称“X”型分布(图5a)。试样

是界面处 CuAl_2 、 Cu_9Al_4 及 CuAl 等金属间化合物相继生成、其形貌与分布发生演变,并与基体再结晶过程相互作用的结果。300℃退火是生成 Cu_9Al_4 与 CuAl_2 理想复合界面层、实现组织与性能理想匹配的最佳温度。

2.3 不同厚度对铜铝复合板力学性能的影响

图4为不同厚度、退火温度时试样的应力-应变曲线及伸长率。分析可知,在相同退火工艺下,随着板材厚度从1 mm增加至3 mm,抗拉强度与伸长率均呈现系统性提升。在低温退火(250℃)条件下,厚度效应最为显著:3 mm试样的抗拉强度(172 MPa)较1 mm试样(110 MPa)提升约56%,伸长率从9.6%提高至18.2%。这主要归因于较厚板材在冷轧过程中积累了更高的变形储能,且其截面内应力梯度更为复杂,保留了更强的加工硬化效果。在中温退火(300℃)时,厚度对强度的增强效应依然明显,但塑性提升幅度更为突出。3 mm试样在强度保持较高水平(168 MPa)的同时,伸长率跃升至44.3%,显著高于1 mm试样的36.1%。这说明较厚板材在再结晶过程中,具有更充分的组织转变空间与应变协调能力。在高温退火(350℃)后,厚度对强度的贡献减弱,但对塑性的增益仍然显著。3 mm试样伸长率达52.8%,远高于1 mm试样的42.5%。这源于厚板在完全软化后,其内部约束降低,颈缩稳定性增强,从而在拉伸中可承受更大的均匀塑性变形。

两侧边缘位移值最大,并沿宽度方向向中心轴线连续递减,在颈缩中心区域趋近于0。这一特征清晰地描绘了单轴拉伸下颈缩变形的对称收缩模式,表明材料在宽度方向的塑性流动具有良好的协调性,且试样的轴线与拉伸方向精确对中,整体受力状态理想,未发生失稳或扭转。 y 轴方向(长度方向)位移云图显示沿拉伸方向呈现近似平行的梯度分布(图5b)。位移值从底部固定端的接近0,均匀递增至顶部加载端的最大值。在颈缩区域附近,位移等值线明显加密,梯度陡增,直观反映了应变局部化的起始与发展过程,该区域为最终的断裂萌生位置。 z 轴方向(厚度方向)位移场的位移

分布表现出明显的非对称性(图 5c),整体呈现从试样一侧向另一侧单向递增的趋势。这与以下因素有关:层状复合材料在塑性变形中,铜层与铝层之间的塑性流动失配;界面结合状态导致的局部应力/应变三维重分布;冷轧制备引入的初始织构或残余应力各向异性。 z 向位移的非对称性揭示了即使在宏观单轴拉伸条件下,铜铝复合板内部仍存在复杂的三维应力状态。

300 °C退火使材料获得了充分的再结晶软化与良好的界面结合。DIC 位移场显示的宽缓、对称的位移分布,以及相对较晚出现的剧烈应变局域化,从全场变形角度证实了该工艺下材料优异的均匀塑性变形能力和延缓颈缩的效果,这与宏观力学性能中“中强高塑”的结论相互印证。

图 6~图 8 分别为 x 轴(横向)、 y 轴(纵向)及 x - y 平

面(剪切)在不同时刻的应变云图。可以看出, x 轴向应变表现为从轻微膨胀到剧烈收缩。早期阶段($t=60$ s, 190 s)应变云图整体以黄绿色调为主,应变值在 $\pm 10\%$ 范围内,表明试样在宽度方向经历轻微且相对均匀的变形,存在初始的均匀膨胀。颈缩萌生与发展阶段($t=320$ s, 450 s),云图颜色发生根本性转变,以绿色调为主导,颈缩中心区域出现显著的负应变(压缩),其值约为 -20.2% ,标志着宽度方向的收缩局部化并加速。断裂前期($t=450$ s),颈缩区域的压缩应变急剧变化至约 -48.7% ,且高应变区高度集中于狭窄的颈缩带内。云图呈明显的对称“双瓣”分布,这与位移场中 x 轴方向位移的对称“X”型分布相对应,直观揭示了颈缩导致的剧烈横向收缩应变高度局域化。

y 轴方向应变表现为持续拉伸与高度集中。应变

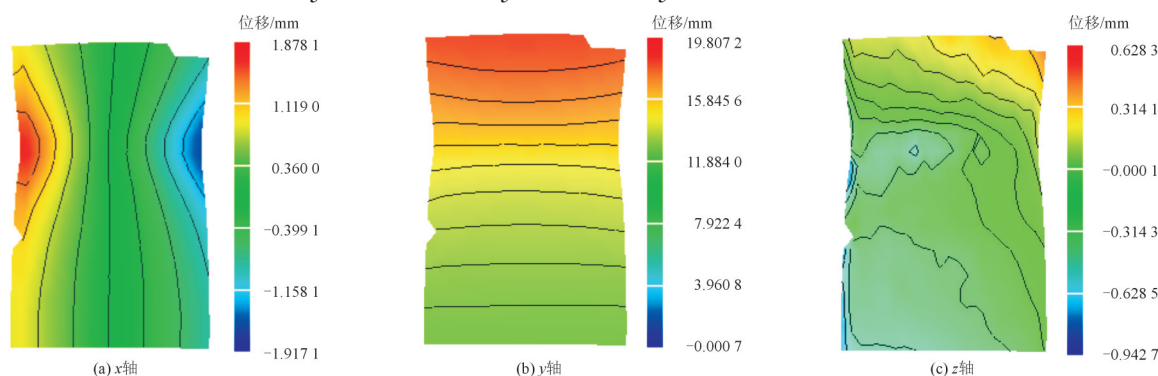


图 5 $t=450$ s 时的 x 、 y 、 z 轴方向的位移云图

Fig.5 Displacement nephogram in x 、 y and z directions at $t=450$ s

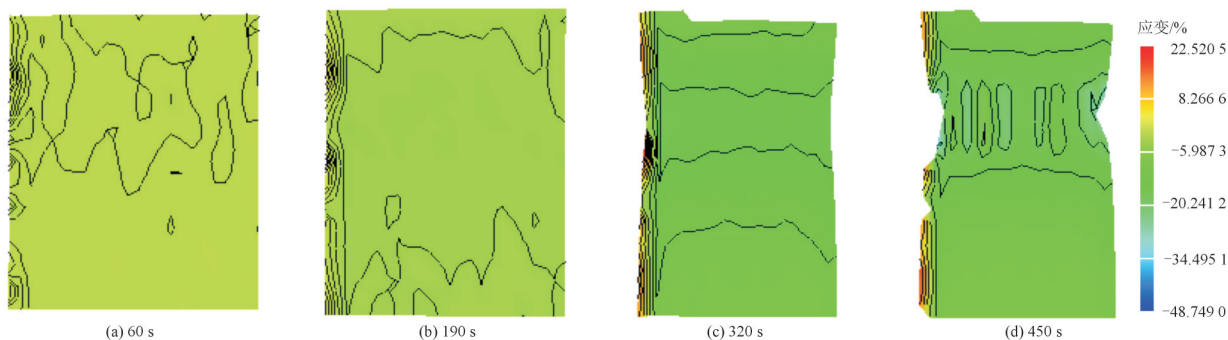


图 6 标准试样在 x 轴不同时间的应变云图

Fig.6 Strain nephogram of standard specimen along x -axis at different moments

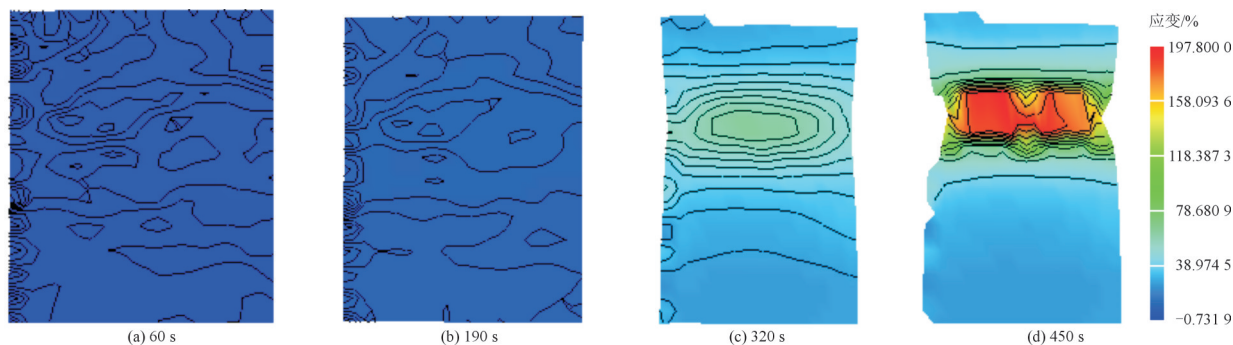
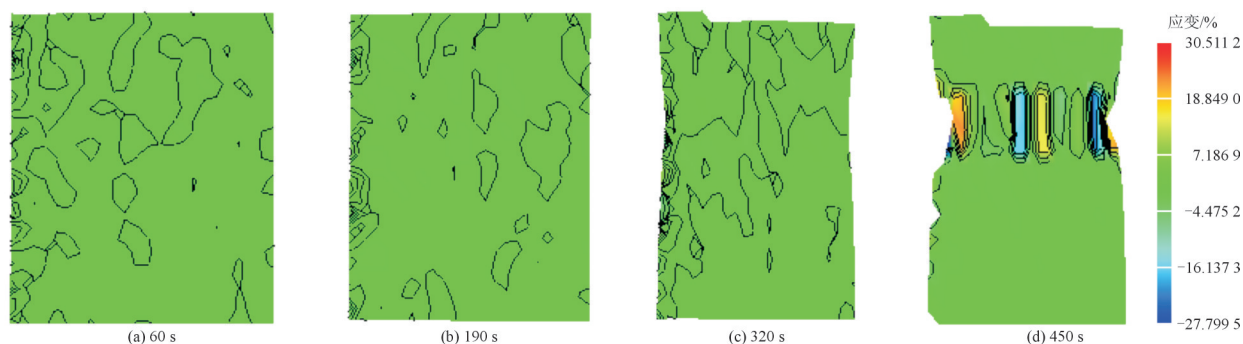


图 7 标准试样在 y 轴不同时间的应变云图

Fig.7 Strain nephogram of standard specimen along y -axis at different moments

图8 标准试样在 xy 平面不同时间的应变云图Fig.8 Strain nephogram of standard specimen along xy -axis at different moments

值随时间呈数量级增长,早期应变分布相对分散($t=60$ s)。随着拉伸进行,高应变区逐渐向颈缩中心汇聚($t=190$ s, 320 s)。至 $t=450$ s,超过150%的极端拉伸应变完全集中于颈缩带,形成一条狭窄的“应变集中带”,这是材料失稳、塑性变形能高度耗散于局部区域的直接证据,与宏观应力-应变曲线中的颈缩下降段相对应。 x - y 平面剪切应变反映了复杂的应力状态。剪切应变云图呈现正负交替的复杂分布。在颈缩区域两侧,形成了方向相反的剪切应变集中区。这表明在单轴宏观拉伸下,颈缩区域内部实际处于复杂的三维应力状态。材料在发生轴向伸长和横向收缩的同时,内部晶粒或铜铝双金属层之间为协调变形,产生了显著的剪切滑移。剪切应变的集中是塑性失稳和多轴应力共同作用的结果,促进了颈缩的加速发展。

3 结 论

(1)随退火温度从 $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升高到 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$,铜铝复合板的抗拉强度逐渐降低,伸长率逐渐提高;随着成形板厚度增加,其抗拉强度和伸长率也逐渐提高。

(2)经 250 、 300 和 $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火后,铜铝复合板界面依次生成 CuAl_2 、 Cu_9Al_4 和 CuAl 金属间化合物,且金属间化合物层随退火温度的升高而不断增厚。

(3)位移场清晰揭示了材料从均匀变形到颈缩局域化的全过程,颈缩中心与宏观断裂位置高度吻合。 x 、 y 轴方向位移的对称与梯度分布,验证了试验的单轴拉伸主导模式与材料的良好变形协调性。 z 轴方向位移的非对称性,提示了层状复合材料在厚度方向变形的复杂性,是未来结合界面应变分析深化研究的方向。

(4)颈缩并非单一维度的变形,而是轴向拉伸应变、横向压缩应变与剪切应变在局部区域协同剧增的复杂三维过程。轴向拉伸应变和横向收缩应变共同定义了一个空间上高度集中的“变形集中带”,这是宏观裂纹萌生与扩展的精确路径。

(5)应变场显示的较长均匀变形期和相对缓变的

应变梯度,从细观尺度证实了“ $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 退火+ 3 mm 厚度”工艺下材料均匀塑性变形能力突出、颈缩延迟的特性,与宏观力学性能测试结果高度自洽,为工艺优化提供了依据。

参 考 文 献

- [1] 袁孚胜. 铜及铜合金板带材的生产现状及发展趋势[J]. 有色冶金设计与研究, 2021, 42(2): 13-15, 24.
- [2] 郑伟波. 铜铝复合板的制备工艺及组织性能研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2022.
- [3] 黄宏军, 李雪琪, 左晓姣, 等. 工艺因素对铜-铝-铜复合板界面结合的影响[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(1): 47-51.
- [4] 张胜华, 郭祖军. 铜-铝复合材料的研究[J]. 中国有色金属学报, 1995(4): 128-132.
- [5] KELLER C, MOISY F, NGUYEN N, et al. Microstructure and mechanical properties characterization of architected copper aluminum composites manufactured by cold-drawing[J]. Materials Characterization, 2021, 172: 110 824.
- [6] CHEN Y, WANG A Q, LIU S Y, et al. Coupling effects of matrix and interface on synergetic deformation behaviors of Cu/Al composite plates[J]. Materials Research Express, 2019, 6(12): 126 5a3.
- [7] ROGACHEV S O, SUNDEEV R V, ANDREEV V A, et al. Effect of annealing on the mechanical tensile behavior of copper-aluminum composites prepared by rotary forging[J]. Russian Metallurgy (Metally), 2023(4): 508-514.
- [8] WANG C, MA L N, MA X G, et al. Effect of annealing temperature on microstructure and tensile properties of copper/aluminum composite thin strip[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2023, 33(3): 701-713.
- [9] MALESA M, MALOWANY K, PAWLICICKI J, et al. Non-destructive testing of industrial structures with the use of multi-camera Digital Image Correlation method [J]. Engineering Failure Analysis, 2016, 69, 122-134.
- [10] 张德海, 李艳芹, 刘建秀, 等. 基于数字散斑相关法的双金属复层板应变光学检测问题研究[J]. 应用光学, 2018, 39(6): 873-879.
- [11] 张哲, 陈志新, 王梧旭. 基于DIC的 SiC_p/Al 复合材料缺口力学性能研究[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(6): 121-127.
- [12] GB/T228.1-2021. 金属材料拉伸试验第1部分室温试验方法[S].
- [13] 王梧旭, 陈志新, 黄书烽, 等. 基于DIC的H60黄铜缺口力学性能研究[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(8): 72-78.

(编辑: 彭瑾)