

Cu/Al 层厚比对波纹辊轧制 Cu/Al 复合板变形行为和结合性能的影响

高翔宇¹, 黄志权¹, 江连运¹, 王涛², 马立峰¹

(1. 太原科技大学 机械工程学院, 山西 太原 030024)

(2. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 本工作通过抗剪切强度测试、剪切断面显微观察和有限元仿真等手段对不同 Cu/Al 层厚比下波纹辊轧制 (CRB) Cu/Al 复合板的金属的变形行为和界面结合性能进行了研究。结果发现, CRB 过程中界面处形成了局部强正应力和多个“搓轧区”, 促进了复合板的塑性变形和界面结合。增大 Cu/Al 层厚比可提升 Cu 层的变形率和波谷界面处的正应力, 有利于降低 Cu/Al 复合板的翘曲程度, 并增强界面的整体结合性能。当层厚比从 2:10 增加到 2:4 时, 界面抗剪切强度从 40.39 MPa 上升到 47.24 MPa, 但界面抗剪切强度的波动逐渐增大。

关键词: 变形行为; 结合性能; 波纹辊轧制复合; Cu/Al 复合板

中图分类号: TG339

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2023)04-1447-08

Cu/Al 复合板由于同时具备铜的良好导电、导热性和铝的质轻、成形性优良等特点, 被广泛应用于航空航天、电力电子、通讯和光伏新能源等领域^[1-3]。目前, Cu/Al 复合板的制备方法主要有轧制复合、搅拌摩擦焊、钎焊、铸轧复合以及扩散焊等^[4]。其中, 轧制复合工艺由于操作简单、成本低以及生产效率高的特点应用最为广泛^[5]。波-平连轧复合工艺 (CFR) 作为一种能使金属间同时产生强剪切应力和强正应力的新型轧制复合技术在双金属复合板的制备方面表现出很大的优势^[6]。

CFR 工艺可以分为 2 个阶段: (1) 波纹辊轧制复合 (CRB) 阶段; (2) 平辊轧制复合 (FRB) 阶段。之前的研究表明, 采用 CFR 制备 Cu/Al 双金属复合板可以实现界面的高强度结合和基体的显著晶粒细化^[7]。尤其是在 CRB (一道次) 阶段, 波峰和波谷处形成了牢固的结合界面, 抗剪切强度达到了传统平轧工艺的 2 倍以上^[8]。在对 CFR 制备的 Mg/Al 复合板微观组织演变和力学性能的研究中发现, CRB 工艺可以显著弱化基体的织构强度, 在 FRB (二道次) 过程中基体发生显著晶粒细化和孪晶活化, 且结合界面由传统平轧的二维转变成三维, 界面结合强度明显提升, Mg/Al 的综合力学性能得到有效提升^[7]。Li 等人^[9]研究发现, 金属层的厚度比对金属层间的协调变形行为和界面

的结合性能有显著影响。然而, 目前关于不同 Cu/Al 层厚比下 CRB 轧制过程中金属的变形行为和结合过程研究甚少, 对界面应力应变分布、微观形貌以及结合性能的变化尚不明确。

因此, 本研究采用 CRB 工艺制备了铜/铝波纹复合板, 对轧制变形过程中界面处的应力应变分布以及界面微观组织演变规律进行研究, 对 CFR 工艺的优化有重要的指导意义。

1 实验方法和数值仿真

1.1 实验方法

本次研究采用材料为工业纯铜 (T2) 和工业纯铝 (1060), 其规格和力学性能如表 1 所示。轧前将所有板材进行去应力退火处理。使用钢丝刷和丙酮溶液对待复合表面进行清理, 以去除表面的氧化层、油污和污染物, 同时增大接触表面间的摩擦系数, 为界面的结合创造有利条件^[10]。然后把板坯进行叠放, 用纯铝铆钉将组合好的板坯头部进行铆接, 防止轧制过程中发生跑偏。

实验采用 4 组不同 Cu/Al 层厚比 (2:4、2:6、2:8、2:10) 坯料。CRB 实验在上辊为波纹辊、下辊为平辊的 350 二辊轧机上进行, 轧辊的平均直径均为 320 mm, 轧制时难变形的 Cu 层与波纹辊接触, 易变形的 Al 层与

收稿日期: 2022-04-16

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFA0707300, 2018YFA0707301); 国家自然科学基金面上项目 (52175354, 52075357)

作者简介: 高翔宇, 男, 1990 年生, 博士, 讲师, 太原科技大学机械工程学院, 山西 太原 030024, 电话: 0351-2776769, E-mail: 2021103@tyust.edu.cn

平辊接触。轧制压下率为 40%，轧制速度为 0.1 m/s。轧制工艺示意图和波纹辊曲线如图 1 所示。轧后复合板最厚的位置命名为波峰，最薄的地方为波谷，中间位置根据轧制方向分为前腰和后腰。

在 Cu/Al 波纹复合板 8 个不同位置处切取抗剪切强度测试试样，取样位置示意图见图 2a。剪切试样参

照 GB/T 8547-2006 标准^[11]，试样尺寸见图 2b。抗剪切强度测试实验在 Instron 5969 万能材料试验机上进行。采用 SEM JSM-IT50 扫描电子显微镜 (SEM) 和其配备的 Oxford X 射线能量色散谱仪 (EDS) 探头对特征位置处 (波峰和波谷) 的剪切断面形貌和成分进行分析。

表 1 铜、铝板材的力学性能和规格

Table 1 Mechanical properties and specifications of Al and Cu plates

Plate	Dimension	Hardness/MPa	Yield strength/MPa	Strength/MPa	Elongation/%
T2 Cu	200 mm (L)×60 mm (W)×2 mm (H)	842.8	90	278	22.83
1060 Al	200 mm (L)×60 mm (W)	401.8	79	115	19.33

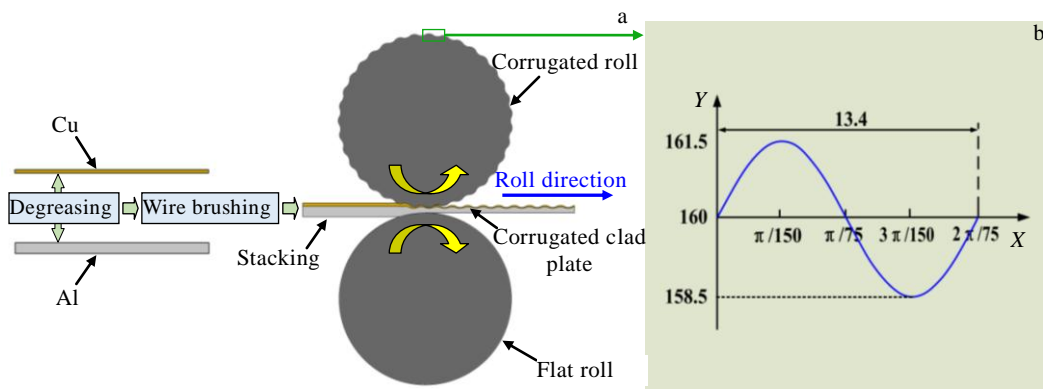


图 1 CRB 工艺示意图和波纹辊曲线

Fig.1 Schematic diagram of CRB process (a) and corrugated roll curve (b)

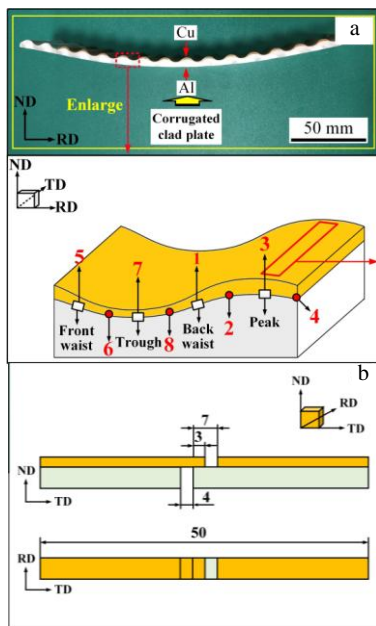


图 2 剪切试样取样位置和规格

Fig.2 Positions (a) and specifications (b) of the shear samples

1.2 数值仿真

采用 Abaqus 有限元仿真软件对 Cu/Al 复合板轧制过程进行数值模拟。轧辊和板材模型尺寸和实验保持一致，轧制模型如图 3 所示。假设铜板和铝板均为各向同性材料，轧辊设置为刚体^[12]。铜和铝的本构模型通过拉伸实验获取。轧辊与铜层、轧辊与铝层、铜层与铝层之间的摩擦系数分别设置为 0.15、0.20 和 0.20^[13]。为了节省计算时间，全部仿真在二维显示动

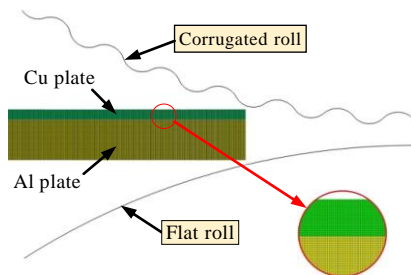


图 3 CRB 有限元模型和网格

Fig.3 FE meshing and geometry of the CRB

力学平面应变条件下进行。此外,在整个模拟过程中,动能与总能量之比小于 5%^[14]。前期研究表明^[6],该模型仿真结果和实验数据误差在 5% 以内,模型可靠性高。

2 结果和讨论

2.1 不同层厚比下 Cu/Al 波纹复合板变形行为分析

图 4 为 Cu/Al 层厚比为 2:4、2:6、2:8 和 2:10 的金属组合采用 CRB 工艺在 40% 压下率下制备的波纹复合板的宏观形貌,所有板材均发生了不同程度的翘曲,且复合板的翘曲程度随 Cu/Al 层厚比的增大而减小。

图 5 所示为 Cu 层和 Al 层的变形率分布情况。可以看出, Cu/Al 层厚比对金属层的变形行为有较大影响。Cu/Al 层厚比为 2:4 时, Cu 层整体的平均变形率达到了 43.23%, 而 Al 层则为 36.15%。此时,板材几

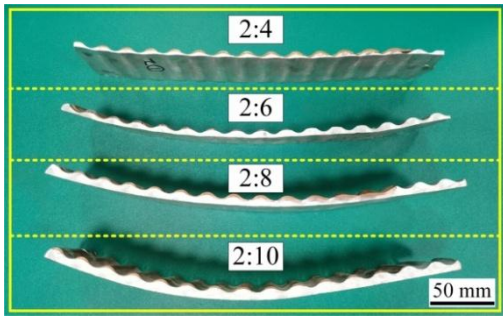


图 4 不同 Cu/Al 层厚比轧后板材

Fig.4 Clad plate with different thickness-ratios of Cu/Al

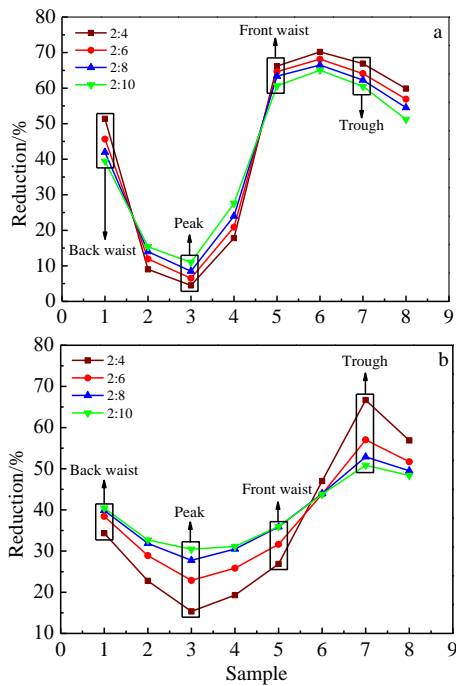


图 5 Cu 层和 Al 层的变形率分布

Fig.5 Reduction distribution of Cu layer (a) and Al layer (b)

乎不发生翘曲,说明 Cu 层(波浪状)和 Al 层在水平方向上的平均延伸率分量相当。随着 Cu/Al 层厚比的减小, Cu 层整体的平均变形率则呈逐渐下降趋势,而 Al 层的平均变形率则逐渐上升,如图 6 所示。当 Cu/Al 层厚比为 2:10 时, Cu 层整体的平均变形率降低至 41.35%, 而 Al 层则上升至 39.22%。两层金属间的变形率差进一步缩小,导致 Cu 层在水平方向上的平均延伸率分量小于 Al 层。因此,随着 Cu/Al 层厚比的减小,板材逐渐向 Cu 侧发生翘曲。

2.2 层厚比对 Cu/Al 复合板界面结合行为的影响

图 7 所示为波纹界面不同位置的抗剪切强度测试结果。可以看出,随着 Cu/Al 层厚比的减小,整个波纹界面的抗剪切强度波动幅度逐渐减小。整个波纹界

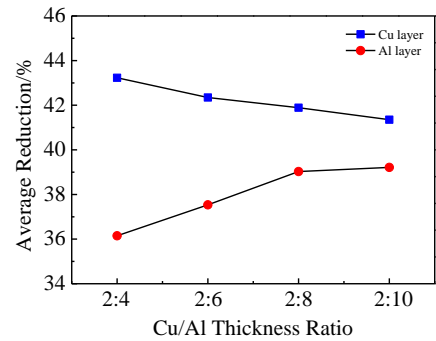


图 6 Cu 层和 Al 层平均压下率分布

Fig.6 Average reduction distribution of Cu and Al layers

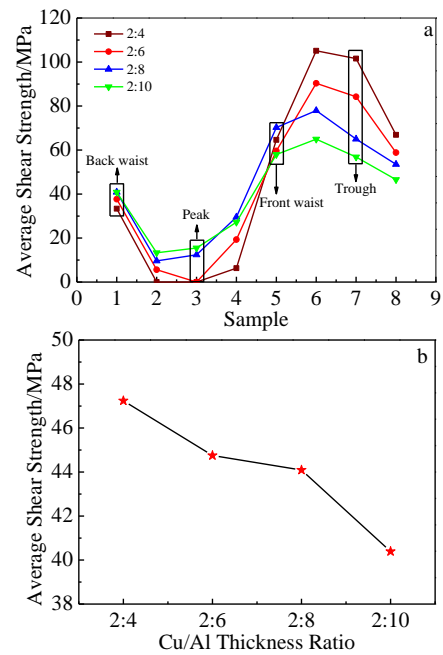


图 7 波纹界面抗剪切强度分布和平均抗剪切强度

Fig.7 Shear strength distribution of corrugated interface (a) and average shear strength (b)

面抗剪切强度的最大值和最小值差由层厚比为 2:4 时的 105.11 MPa 降低到层厚比为 2:10 时的 51.66 MPa。平均抗剪切强度在层厚比为 2:4 时达到最大值 47.24 MPa，在层厚比为 2:10 时降低至最小值为 40.39 MPa。值得注意的是，在层厚比为 2:4 和 2:6 时在后腰/波峰和波峰处出现未结合的现象。

图 8 和图 9 所示分别为在不同 Cu/Al 层厚比条件下轧后复合板波峰和波谷处 Cu 侧剪切断面的微观形貌和 EDS 元素面扫描。在波峰处，层厚比为 2:4（图 8a~8c）和 2:6（图 8d~8f）的 Cu 侧剪切断面上黏着有少量由于界面层间摩擦而剥落的 Al 屑或 Al 块，表面硬脆层完整，界面未结合。对应的 Al 侧剪切断面上没有脊状分布的 Al 形成，见图 10a 和图 10b。图 8g~8i 所示，层厚比为 2:8 的铜侧剪切断面则开始形成裂纹，并形成了初步的机械结合。当层厚比为 2:10 时，波峰处的 Cu 层变形率进一步增大，表面裂纹逐渐扩展，界面结合区域增加，并在剪切断面形成少量带状 Al，见图 8j~8l，结合强度达到了 15.5 MPa。对应的 Al 侧

也形成了断裂脊状 Al 形貌，如图 10 所示。

图 9 所示波谷处所有 Cu 侧剪切断面均黏着有大量的脊状 Al。随着 Cu/Al 层厚比逐渐减小，Cu 侧剪切断面脊状 Al 的覆盖面积逐渐减小。图 9a~9f 所示，层厚比为 2:4 和 2:6 的 Cu 侧形成了网状 Al 形貌，粘 Al 面积占比分别为 95.2% 和 76.6%，抗剪切强度分别达到了 101.57 和 84.22 MPa。层厚比为 2:8 和 2:10 的 Cu 侧断面则演变为十字带状的粘 Al 形貌（见图 9g~9l），粘 Al 面积占比分别减少为 62.3% 和 46.3%，抗剪切强度降至 64.97 和 54.84 MPa。图 10e~10h 中 Al 侧剪切断面也产生了大量的断裂脊状 Al，与图 9 中 Cu 侧断面黏着的脊状 Al 形貌相吻合。

2.3 CRB 对不同层厚比复合板变形行为和界面结合性能的影响机制

图 11 所示为不同 Cu/Al 层厚比下轧制变形区正应力的分布情况，结果显示在后腰/波峰处形成了“未填充”区，所有“未填充”区对应的界面位置处正应力都会出现突降的现象。Govindaraj^[15]研究认为增大界

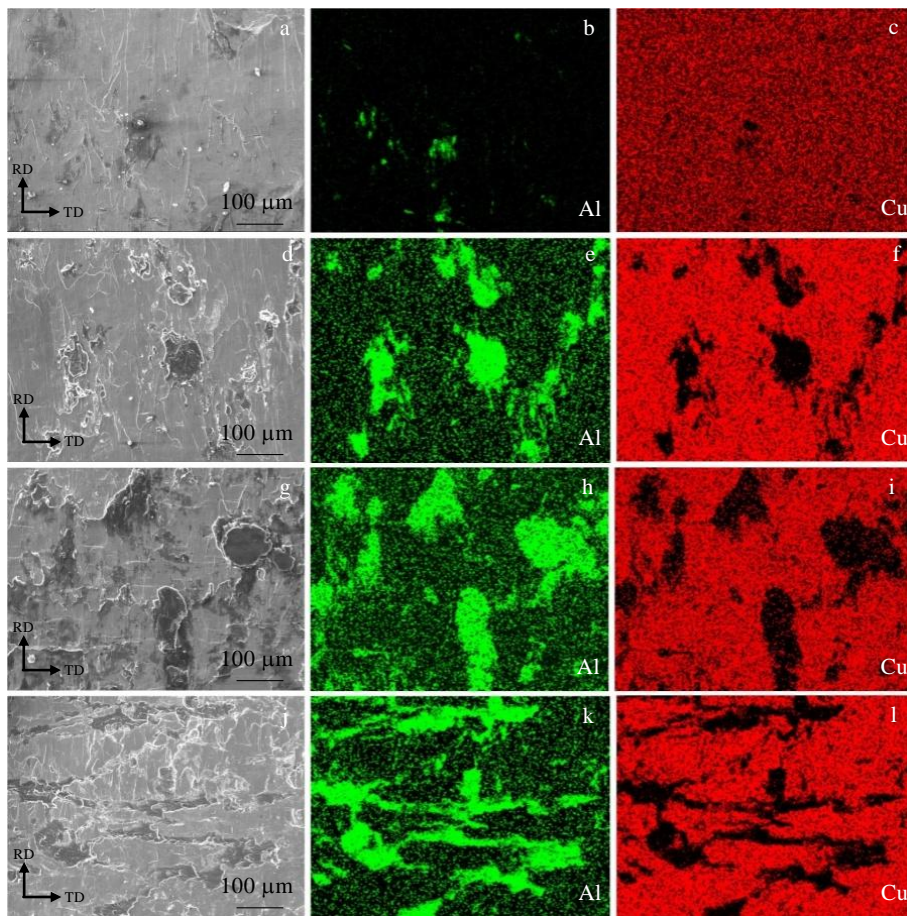


图 8 不同 Cu/Al 层厚比下波峰处 Cu 侧剪切断面形貌和 EDS 元素面扫描

Fig.8 Shear section morphologies (a, d, g, j) and EDS mappings of Al (b, e, h, k) and Cu (c, f, i, l) of Cu sides at the peak with different thickness ratios of Cu/Al: (a-c) 2:4, (d-f) 2:6, (g-i) 2:8, and (j-l) 2:10

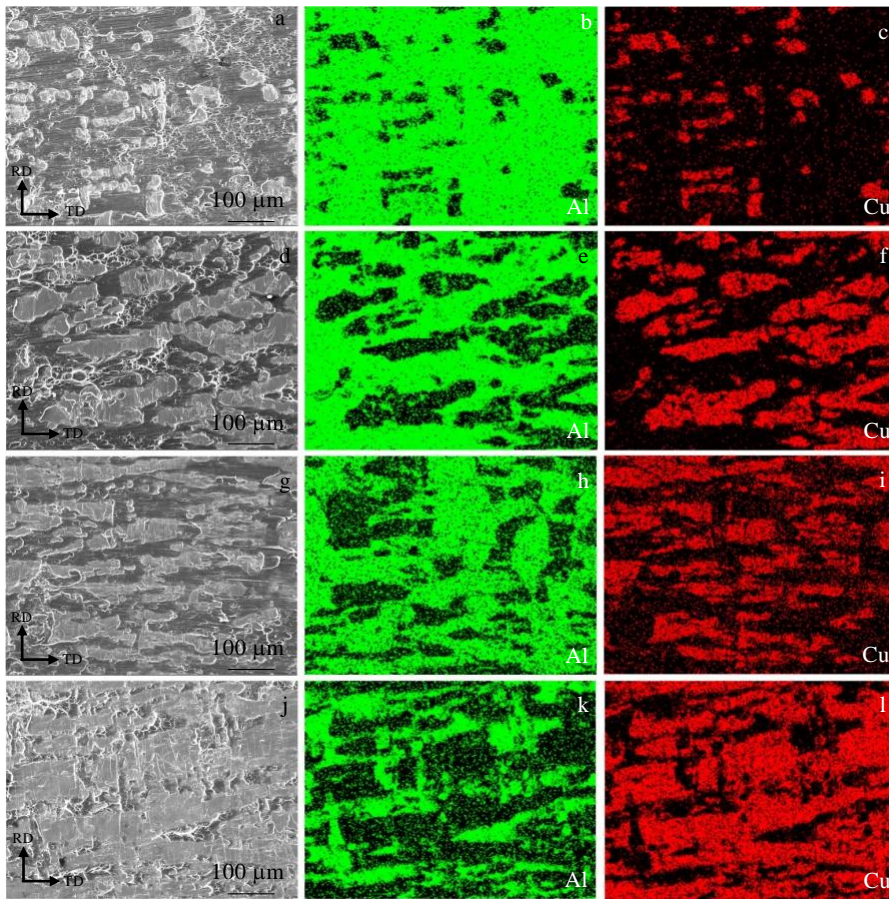


图 9 不同 Cu/Al 层厚比下波谷处 Cu 侧剪切断面形貌和 EDS 元素面扫描

Fig.9 Shear section morphologies (a, d, g, j) and EDS mappings of Al (b, e, h, k) and Cu (c, f, i, l) of Cu sides at the trough with different thickness ratios of Cu/Al: (a-c) 2:4, (d-f) 2:6, (g-i) 2:8, and (j-l) 2:10

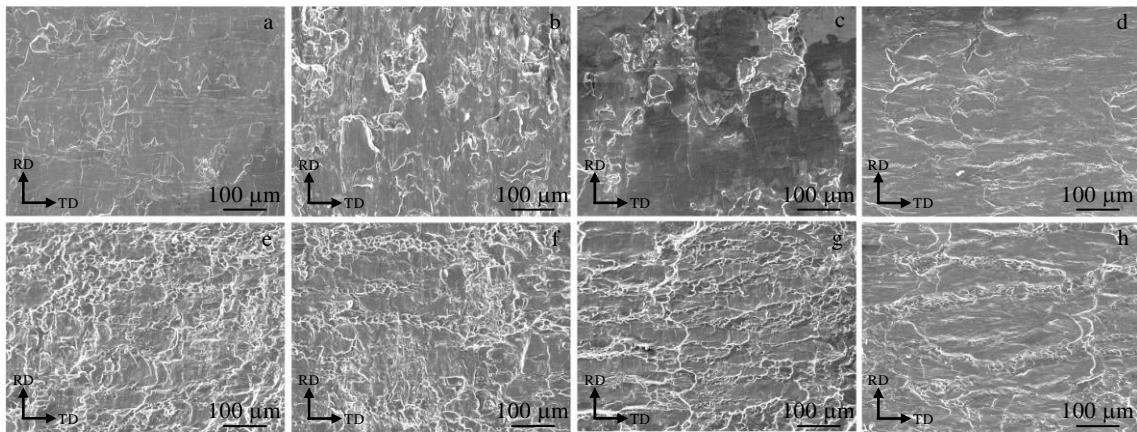


图 10 不同 Cu/Al 层厚比下波峰和波谷处 Al 基体剪切断面形貌

Fig.10 Shear section morphologies of Al substrates at the peak (a-d) and trough (e-h) with different thickness ratios of Cu/Al: (a, e) 2:4, (b, f) 2:6, (c, g) 2:8, and (d, h) 2:10

面处正应力可以为界面间的结合提供更多的能量，且界面的结合强度与正应力呈正相关。可见，界面处形成的“未填充”区会使界面的结合强度明显降低。因此，图 8a~8f 中波峰处铜侧剪切断面没有形成结合，

且后腰/波峰处的抗剪切强度低于其他位置。与之相反，波谷处则形成了局部强应力，因此图 9a~9f 中波谷处铜侧剪切断面形成了大面积网状粘铝形貌。

当 Cu/Al 层厚比逐渐减小时，轧制变形区不断扩大，

轧制力逐渐被分散，波谷界面处局部强应力快速下降，波峰处正应力则逐渐上升，整个界面的正应力分布更加均匀，因此界面的抗剪切强度波动逐渐减小（见图 7）。

根据薄膜理论^[16]，金属间的结合主要依赖于表面硬脆层和污染层破裂后暴露出来的新鲜金属接触区，因此增大界面层变形率是提高界面的结合强度的有效途径^[17]。另外，Wang^[18]发现界面处形成的摩擦剪切应力可以加剧界面层的塑性变形，降低金属的空位迁移能和活化能，并产生了大量的变形热，为界面处原子的扩散提供了更多能量，提高界面处原子间的扩散能力，有利于界面处形成牢固结合。可见，仅通过正应力的分布大小判断界面的结合状态显然是不全面的，且

通过界面正应力分布无法解释图 7 中波谷/前腰处抗剪切强度高于波峰处的现象。还需要通过界面处的摩擦剪切应力和界面层的应变分布对界面形貌的演化过程进行分析。

图 12 所示为轧制变形区 Cu 层和 Al 层表面摩擦剪切应力的分布情况。板材上、下表面的箭头代表表面受到的摩擦剪切应力的方向，红色箭头表示与轧向一致，蓝色箭头则相反。金属层上下表面摩擦剪切应力相反的区域则形成了“搓轧区”。

可以看出，“搓轧区”主要分布在前腰和后腰处，且界面摩擦剪切应力在波谷/前腰处达到峰值，“搓轧区”产生的剪切应力更有利于波谷/前腰界面处发生剪

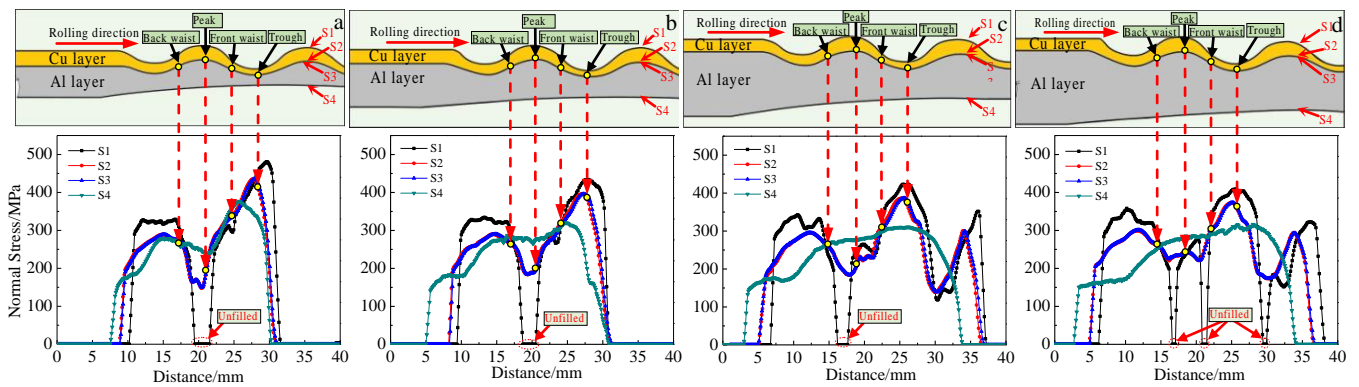


图 11 不同 Cu/Al 层厚比下正应力分布

Fig.11 Normal stress distribution with different thickness ratios of Cu/Al: (a) 2:4, (b) 2:6, (c) 2:8 and (d) 2:10

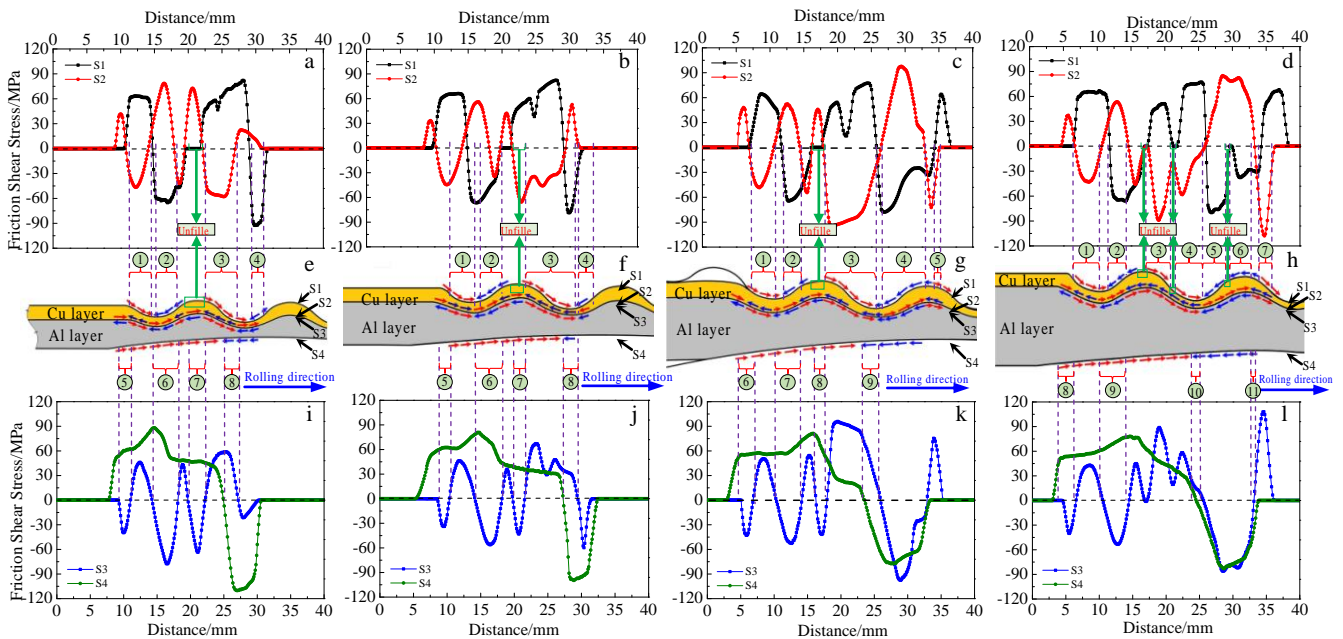


图 12 不同 Cu/Al 层厚比下 Cu 层和 Al 层摩擦剪切应力分布

Fig.12 Friction shear stress distribution of Cu (a-d) and Al (i-l) layers and model of rolling deformation zone (e-h) with different thickness ratios of Cu/Al: (a, e, i) 2:4, (b, f, j) 2:6, (c, g, k) 2:8^[6], and (d, h, l) 2:10

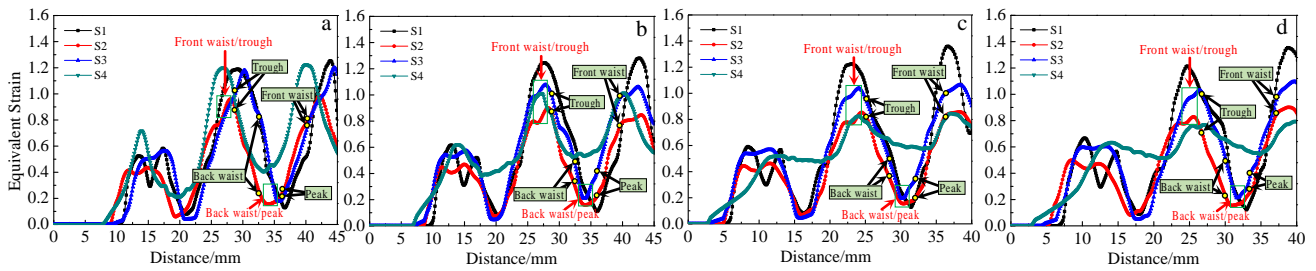


图 13 不同 Cu/Al 层厚比下等效应变分布

Fig.13 Equivalent strain distribution with different thickness ratios of Cu/Al: (a) 2:4, (b) 2:6, (c) 2:8^[6], and (d) 2:10

切变形。相应地,图 13 等效应变分布结果显示波谷/前腰处等效应变几乎达到最大。这说明 CRB 过程中界面处形成的强剪切应力可促进局部界面区域的剪切变形,从而提升界面的结合强度。

此外,图 12 所示前腰和后腰处均形成了强烈的摩擦剪切应力,但是从图 13 等效应变分布的结果来看,前腰处界面层的应变值明显大于后腰处。这是因为前腰处正应力较大(见图 11),界面处剪切作用力的渗透能力更强,对界面层的变形和界面层硬脆层破裂的促进作用更大导致的。相应地,前腰处界面表层暴露出的新鲜金属面积更大,为界面结合提供了更多的结合区域,因此前腰处的抗剪切强度明显高于后腰处(图 7)。

综合以上分析可知,CRB 过程中界面形成的局部强正应力和多“搓轧区”产生的剪切应力对复合板的塑性变形和界面结合有显著的促进作用。且不同 Cu/Al 层厚比会改变轧制过程中界面应力应变分布状况,从而影响金属的变形行为和界面结合性能。

3 结 论

1) 采用 CRB 制备 Cu/Al 复合板,板材的翘曲程度随着 Cu/Al 层厚比增大逐渐减小,当层厚比为 2:4 时,板材几乎不发生翘曲。

2) 增大 Cu/Al 层厚比有利于提升界面的整体结合性能,平均抗剪切强度从层厚比为 2:4 的 47.24 MPa 降低至层厚比为 2:10 的 40.39 MPa。

3) 随着 Cu/Al 层厚比的减小,轧制变形区不断扩大,轧制力逐渐被分散,界面正应力分布更加均匀,界面抗剪切强度波动幅度逐渐减小。

4) CRB 过程中界面形成的局部强正应力和多“搓轧区”产生的剪切应力共同作用促进了复合板的塑性变形和界面结合。

参考文献 References

[1] Kim Wom Nyon, Hong Sunlg. *Materials Science and Engineering A*[J], 2016, 651: 976

[2] Lee Jongbeom, Park Jeongmin, Jeong Haguk. *Materials Letters*[J], 2018, 222: 122

[3] Li Xiaobing, Zu Guoyin, Wang Ping *et al. Rare Metals*[J], 2014, 33(5): 556

[4] Mao Zhiping, Xie Jingpei, Wang Aiqin *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2020, 285: 116 804

[5] Lee K S, Lee S E, Sung H K *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2013, 583: 177

[6] Gao Xiangyu, Bian Liping, Zhao Jingwei *et al. Journal of Materials Research and Technology*[J], 2021, 13: 216

[7] Wang Tao, Wang Yuelin, Bian Liping *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2019, 765: 138 318

[8] Wang Tao, Gao Xiangyu, Zhang Zhixiong *et al. Rare Metals*[J], 2021, 40(5): 1284

[9] Li Long, Nagai Kotobu, Yin Fuxing. *Science & Technology of Advanced Materials*[J], 2008, 9(2): 23 001

[10] Jamaati Roohollah, Toroghinejad Mohammad. *Materials & Design*[J], 2010, 31: 4508

[11] Xiao Hong, Qi Zichen, Yu Chao *et al. Journal of Materials Processing Technology*[J], 2017, 249: 285

[12] Ebrahimi S H, Dehghani K, Aghazadeh J *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 718: 311

[13] Huang Qingxue, Zhang Jiang, Zhu Lin *et al. Rare Metal Materials and Engineering*[J], 2017, 46(7): 1749

[14] Rahdari M, Reihanian M, Baghal S L *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2018, 738: 98

[15] Govindaraj Nagaraj, Lauvdal Steinar, Holmedal Bjorn. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 2013, 213(6): 955

[16] Pan D, Gao K, Yu J *et al. Materials Science & Technology*[J], 2013, 5(9): 934

[17] Kocich Radim, Kuncicka Lenka, Machackova Adela *et al. Materials & Design*[J], 2017, 123: 137

[18] Wang Chunyang, Jiang Yanbin, Xie Jianxin *et al. Materials Science and Engineering A*[J], 2017, 708: 50

Effect of Cu/Al Thickness-Ratio on Deformation Behavior and Bonding Properties of Corrugated Roll Bonding Cu/Al Clad Plates

Gao Xiangyu¹, Huang Zhiquan¹, Jiang Lianyun¹, Wang Tao², Ma Lifeng¹

(1. College of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

(2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The deformation behavior and interfacial bonding properties of Cu/Al clad plates with different Cu/Al thickness-ratios by corrugated roll bonding (CRB) were investigated by shear strength test, microstructure observation of shear section and finite element simulation. The results show that local strong normal stress and multiple “cross-shear” zones form at the interfaces during the CRB process, which promotes the plastic deformation and interface bonding of the clad plates. Increasing the Cu/Al thickness-ratio can increase the deformation rate of the Cu layer and enhance the interface normal stress at the trough, which is beneficial to reduce the warpage of the Cu/Al clad plates and enhance the overall bonding properties of the interface. When the Cu/Al thickness-ratio increases from 2:10 to 2:4, the interfacial shear strength increases from 40.39 MPa to 47.24 MPa, whereas the fluctuation of the shear strength gradually increases.

Key words: deformation behavior; bonding properties; corrugated roll bonding; Cu/Al clad plate

Corresponding author: Wang Tao, Ph. D., Professor, College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-6010290, E-mail: twang@tyut.edu.cn