

引文格式:刘延啸,王振华,刘元铭,等.铜/铝复合板波纹轧过程模拟及变形行为分析[J].太原理工大学学报,2022,53(4):759-765.

LIU Yanxiao, WANG Zhenhua, LIU Yuanming, et al. Corrugated rolling simulation and deformation behavior analysis of Cu/Al composite plate[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2022, 53(4): 759-765.

铜/铝复合板波纹轧过程模拟及变形行为分析

刘延啸^a, 王振华^{a,b,c}, 刘元铭^{a,b,c}, 刘燕萍^a, 王 涛^{a,b,c}

(太原理工大学 a. 机械与运载工程学院, b. 先进金属复合材料成形技术与装备教育部
工程研究中心, c. 中澳联合研究中心, 太原 030024)

摘 要:为探究波纹轧过程中铜/铝复合板应力-应变特点和组织演变规律,建立了三维有限元模型,并通过轧制试验验证了模型的准确性。针对波纹轧过程的复杂变化情况,分析了轧制变形区的应力-应变曲线,并通过扫描电子显微镜观察了铜板侧结合界面形貌和黏铝的质量分数。结果表明:当压下率为 50% 时,压应力在靠近出口的波谷处达到最大值(1 306.28 MPa),等效应变在靠近出口的前波腰处达到最大值;波纹轧过程产生了 3 个搓轧区;出口处铜板侧多处黏铝的质量分数超过 40%。铜板前波腰产生了剧烈变形,明显薄于后波腰。波纹轧过程中产生的多个搓轧区促进了金属表层破裂和新鲜金属流出,有利于异种金属结合。

关键词:铜/铝复合板;波纹轧;有限元法;变形行为

中图分类号:TG335.81 **文献标识码:**A

DOI:10.16355/j.cnki.issn1007-9432tyut.2022.04.022 **文章编号:**1007-9432(2022)04-0759-07

Corrugated Rolling Simulation and Deformation Behavior Analysis of Cu/Al Composite Plate

LIU Yanxiao^a, WANG Zhenhua^{a,b,c}, LIU Yuanming^{a,b,c}, LIU Yanping^a, WANG Tao^{a,b,c}

(a. College of Mechanical and Vehicle Engineering, b. Engineering Research Center of Advanced Metal Composites Forming Technology and Equipment, Ministry of Education, c. TYUT-UOW Joint Research Center, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: In order to explore the stress-strain characteristics and microstructure evolution of Cu/Al composite plate during corrugated rolling, a three-dimensional finite element model was established. The accuracy of the model was verified by rolling experiments. The compressive stress, shear stress, and equivalent strain at the characteristic position of rolling deformation zone were extracted and their distribution characteristics were analyzed. In addition, the morphology of the bonding interface and mass fraction of Al on Cu plate side were characterized by scanning electron microscopy. The results show that when the reduction rate is 50%, the compressive stress reaches the maximum value (1 306.28 MPa), and the equivalent strain reaches the maximum at the front waist near the outlet. The corrugated rolling process produces three rolling zones, which promotes the surface metal rupture and the outflow of fresh metal, and facilitates

收稿日期:2021-10-10

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFA0707300, 2018YFB1308700);国家自然科学基金资助项目(51904206, 51905372, 51805359, U1710254);中国博士后科学基金资助项目(2020M670705);山西省高等学校科技创新项目(2019L0258)

第一作者:刘延啸(1995—),硕士研究生,(E-mail)296360123@qq.com

通信作者:刘元铭(1988—),博士,副教授,主要从事复合板轧制工艺的研究,(E-mail)liuyuanming@tyut.edu.cn

the bonding of dissimilar metals. The mass fraction of Al at multiple positions on the Cu plate side at outlet exceeds 40%. The front waist of Cu plate bears severe deformation, and is obviously thinner than the back waist.

Keywords: Cu/Al composite plate; corrugated rolling; finite element method; deformation behavior

随着现代工业对材料性能需求的不断提高和科学技术的迅猛发展,能够发挥两种金属性能优势的双金属复合材料应运而生^[1-3]。铜/铝复合板综合了铜导电、导热的良好性能以及铝质量轻、价格低廉的优点,并结合良好的冶金工艺,解决了物理搭接状态下的电化学腐蚀问题,广泛用于电子、电力、冶金设备、机械、汽车、能源和生活用具等各个领域^[4-5]。

常见的复合板制备方法有爆炸复合法、扩散焊接法、挤压拉拔法和轧制复合法等。其中,轧制复合法以其工艺简单、操作方便和能耗低的特点被广泛应用。陈鑫等^[6]对不同压下量的冷轧铝/钢复合板进行研究,发现复合主要与铝表面硬化层破裂程度有关。程明阳等^[7]通过能谱分析仪分析了铜铝复合板界面结合效果,并通过剥离试验分析了复合板的力学性能。

近几年,一种新型波纹轧工艺以其轧制板材质量好、结合强度高特点广受关注^[8]。WANG et al^[9-10]发现波纹轧制备镁/铝复合板促进了结合界面处晶粒细化,提升了界面结合强度,降低了残余应力,改善了板材形状。

为了对复合板轧制过程进行更深入的分析,许多学者采用有限元软件对轧制过程进行模拟。宜亚丽等^[11]建立了 316L/Ni/EH40 复合板异步轧制有限元模型,发现随着厚度比的增加,轧制力增大且复合板翘曲更严重,同时研究了辊速比对板形的影响,当辊速比为 1.15 时,复合板较为平直。CHEN^[12]对含内部缺陷的板材轧制进行了研究,发现最大应变和应力位于空洞前后。DYJA et al^[13]研究了铜铝棒材的轧制过程,由于双金属组分的流变特性不同,软层金属流动更为强烈。

申宏卓等^[14]通过建立镁/铝复合板波纹轧模型,发现镁合金在波纹辊的作用下产生了更大变形,且较高的界面温度有利于发生动态再结晶,促使复合板实现更充分的复合。PAN et al^[15]建立了复合板异温轧制模型,发现随着压下率的增大,界面处摩擦因数增大,复合板结合处厚度增加,且较小的剪切屈服应力比有利于复合板结合。LIN et al^[16]建立了三维轧制模型,得到轧制工艺参数与轧制力之间的

关系,并且可以预测最小轧制力。CHING et al^[17]建立了复合板热轧模型,并对轧制过程的应力、应变进行分析,发现轧制出口侧等效应变大于轧制入口侧等效应变,金属表面附近相对容易发生塑性流动。

目前关于复合板的研究主要是利用有限元分析不同工艺参数对板形的影响,利用实验分析轧制后板材组织和力学性能,然而复合板轧制过程中的变形行为及相应的金属流动特征尚未阐述清晰。文中建立了铜/铝复合板波纹轧有限元模型,利用模型分析轧制变形区内的应力和应变分布特点,阐明波纹轧过程中金属流动规律,并通过扫描电镜和能谱分析技术,揭示复合板结合状况,为优化波纹轧工艺奠定基础。

1 实验与有限元模拟

1.1 实验方案

采用尺寸为 150 mm×50 mm×4 mm 的 5052 铝和 150 mm×50 mm×1 mm 的 T2 紫铜,材料成分如表 1 所示。实验前先用打磨机将板材待结合表面进行打磨,去除氧化层,并用丙酮或者酒精擦洗,清除油污及金属碎屑。表面处理后将板材头、尾部用铝丝绑定,然后在上辊为波纹辊(正弦曲线波纹,等效直径为 150 mm,幅度为 0.55 mm,周期为 0.062 8 s)和下辊为平辊(直径为 150 mm)的二辊轧机上进行轧制,铜板与波纹辊接触,铝板与平辊接触,轧制过程在室温下进行,压下率为 50%,如图 1 所示。

表 1 实验材料成分(质量分数)
Table 1 Component of experimental materials
(mass fraction) %

材料	Cu	Al	Fe	Cr
T2 紫铜	余量	—	0.003	—
5052 铝	0.1	余量	0.400	0.15~0.35

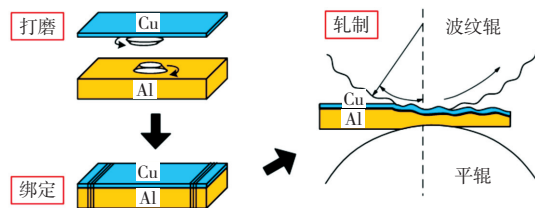


图 1 轧制流程示意

Fig. 1 Rolling process diagram

1.2 有限元模型

1.2.1 模型建立

采用有限元软件进行建模,模型分为轧辊和复合板两部分。由于轧辊变形较小可忽略不计,所以将轧辊设置为刚体。假设铜板、铝板为各向同性的弹塑性材料,铜板与铝板之间和铜板、铝板与轧辊之间的接触设置为面-面罚接触,摩擦系数分别为0.05,0.3,0.22。为了节省计算时间,采用1/2模型,铜板尺寸为50 mm×25 mm×1 mm,铝板尺寸为50 mm×25 mm×4 mm。模拟轧制速度与实际轧制速度相同,为1.3 rad/s。网格采用实体单元C3D8R,且单元格尺寸为0.2 mm×0.2 mm×0.2 mm。规定轧制方向为 D_R 方向,法向为 D_N 方向,横向为 D_T 方向,如图2所示。

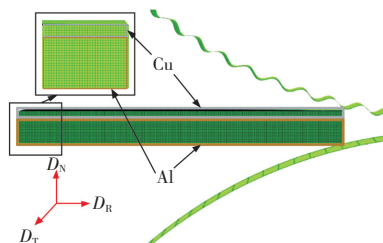


图2 有限元模型

Fig. 2 Finite element model

1.2.2 模型验证

模拟结果中复合板厚度与实际轧制复合板厚度如图3所示。由图可知,实际轧制复合板厚度略大于模拟中复合板厚度,这是因为有限元模拟中轧辊为刚体,而实际轧制过程中,轧辊为弹塑性体,会发生弹性变形。将两者数据进行对比,发现高度差平均值小于0.1 mm,即误差小于4%,因此有限元模拟结果可靠。

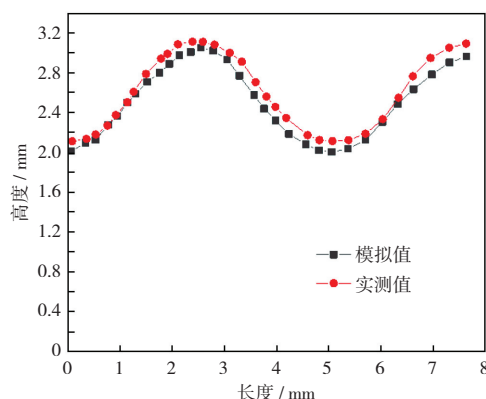


图3 复合板厚度对比

Fig. 3 Thickness comparison of composite plate

2 有限元结果分析

在轧制过程中,应力是复合板结合的主要因素,

对复合板的变形翘曲影响较大,同时应变也是影响复合质量的重要因素,根据应力、应变分布特点可以研究复合板的变形特征^[18-20]。由于轧件刚进入轧制变形区时,变形量很小,主要变形发生在变形区的中后部,所以在变形区中后部取图4所示的8处特征位置。通过分析波谷(a,A)、后波腰(b,B)、波峰(c,C)、前波腰(d,D)等位置应力、应变变化特点,揭示波纹轧过程中金属变形规律。

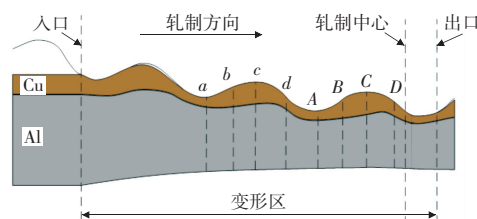


图4 轧卡试件示意

Fig. 4 Schematic diagram of rolled specimen

2.1 压应力分析

有限元模拟复合板上下表面压应力曲线如图5所示。铜板侧8个特征位置中,波谷位置a处的压应力较大,这是由于波谷位置相较其他位置压下量大。后波腰位置b处金属受到轧辊压力作用,向波峰位置c处流动,导致压应力小于波谷位置a而略大于波峰位置c处。金属流动到波峰位置c处产生堆积,向出口方向流动受到抑制,导致波峰位置c处压应力有一个小幅提升,其值为531.15 MPa,小于后波腰位置b处而大于前波腰位置d处。前波腰位置d处由于波峰位置A处的挤压流动性增加,导致此处压应力远小于波峰位置c处,其值为137.27 MPa。在波峰位置A处压下率最大,压应力为8个特征位置的最大值1306.28 MPa。后波腰位置B处、波峰位置C处、前波腰位置D处金属已经填满波纹轧波谷。后波腰位置B处和波峰位置C处相较之前的b和c处压下量增大,压应力增加。前波腰位置D处相较d处金属流动受到抑制,所以压

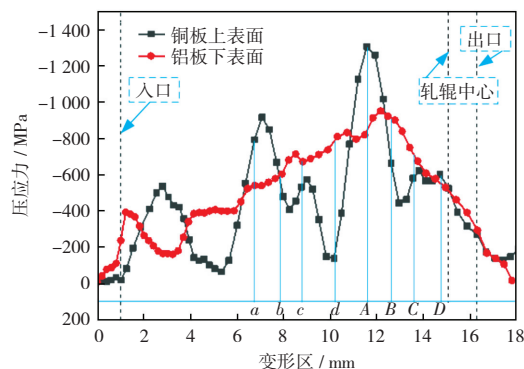


图5 复合板表面压应力

Fig. 5 Compressive stress of composite plate surface

应力有较大提升,其值为 599.94 MPa.

铝板侧压应力在刚入轧辊时急速上升,这是由于此处波纹辊波峰位置与铜板接触,使铝板压应力升高,而之后下降则是因为波纹辊波谷等位置还没有接触铜板.下降到 160.40 MPa 时,波纹辊再次接触铜板,因此铝板侧压应力开始上升,达到峰值 951.62 MPa 后再次下降.

有限元模拟复合板结合表面压应力曲线如图 6 所示.铜板与铝板压应力相差不大,均在波谷 a 处取得较大的压应力.而前波腰 d 处则由于铜板上表面压应力非常小而取得较小值.在 A 、 B 、 C 、 D 中,压下量大的波谷处压应力最大,压下量小的波峰处压应力最小.

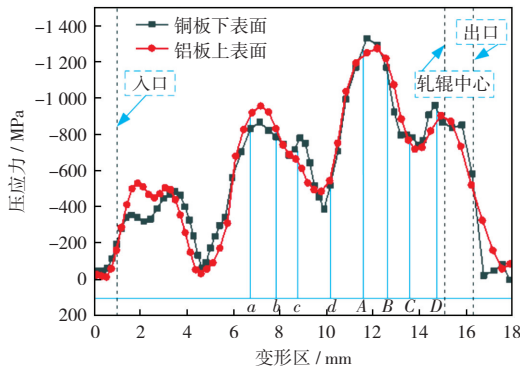


图 6 复合板结合界面压应力

Fig. 6 Compressive stress of composite plate interface

2.2 剪应力分析

有限元模拟复合板上下表面剪应力曲线如图 7 所示.铜板侧波谷位置 a 处剪应力与轧制方向相反,金属向入口流动,而 a 处与 b 处之间剪应力方向逐渐转变为与轧制方向相同,金属向出口流动,即波谷处金属向两侧流动.后波腰位置 b 剪应力与轧制方向相同,且 b 处剪应力较大, b 处金属向 c 处流动.波峰位置 c 处剪应力为正值,说明此处金属仍在向出口流动.前波腰位置 d 处剪应力与轧向相反,则金属堆积在 c 处与 d 处之间.波谷位置 A 处和后波腰位置 B 处与 a 处、 b 处类似.波谷位置 C 处由于波纹辊型的影响,向出口流动受到抑制,导致此处剪应力方向与轧制方向相反,前波腰位置 D 处与 d 处类似.铝板侧剪应力曲线则与平轧类似^[18].

图 7 中虚线框内铜板侧与铝板侧剪应力方向相反,形成了搓轧区,即波谷位置 a 、前波腰位置 d 和后波腰位置 B 处产生搓轧,促进了金属变形和表面延伸,使金属表层产生更多裂纹,新鲜金属更容易流出,有利于复合板结合^[21].

2.3 等效应变分析

有限元模拟复合板结合界面等效应变曲线如图

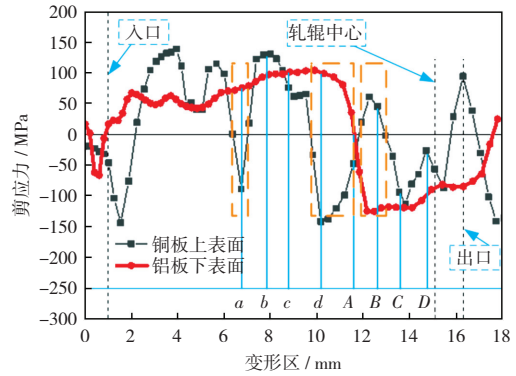


图 7 复合板表面剪应力

Fig. 7 Shear stress of composite plate surface

8 所示.铜板和铝板等效应变在波峰位置 c 处和 C 处为谷值,这是因为波峰处较其他位置压下量小,并且受到的剪切应力较小,所以等效应变相较于周围几点更小.铜板在前波腰 d 处和 D 处达到峰值,而铝板则是在波谷 a 处和 A 处以及前波腰 d 处和 D 处等效应变较大.这是因为前波腰 d 处在搓轧区内,上下表面反向的剪应力促进了金属变形,而 D 处则是在搓轧之后承受更大的压应力,发生更剧烈的变形,而波谷处相对其他位置压下量较大,变形更大.

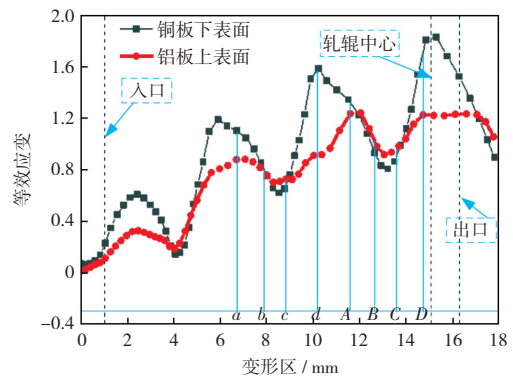


图 8 复合板结合界面等效应变

Fig. 8 Equivalent strain at interface of composite plate

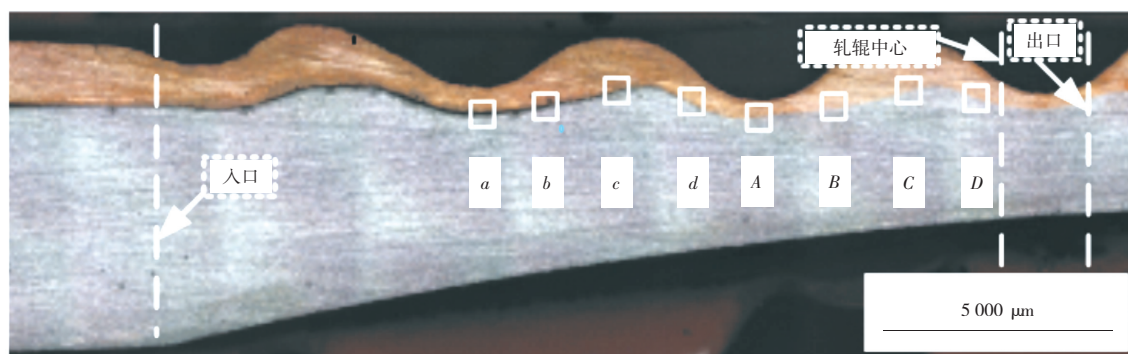
3 结果与分析

3.1 $D_T \times D_N$ 面形貌分析

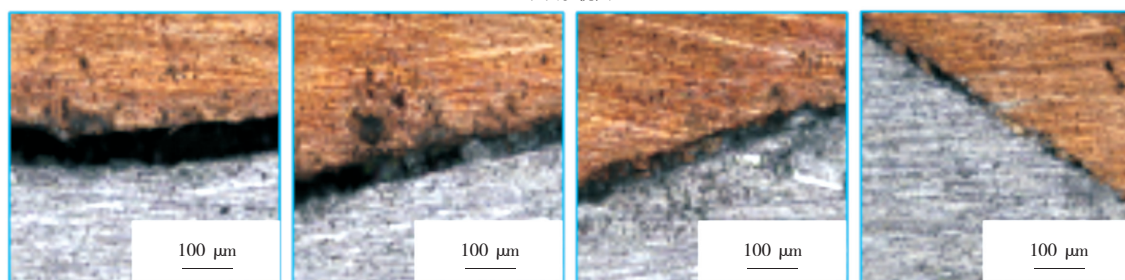
轧卡试件形貌及各位置结合界面图,如图 9 所示.波谷位置 a 处到前波腰位置 d 处结合界面存在缝隙且缝隙不断变小,而波谷位置 A 处结合界面之间已经没有缝隙,对 A 处进行能谱线扫,扫描结果如图 10 所示.可知, A 处结合界面两侧铜和铝连续变化,且扩散层厚度为 $5.3 \mu\text{m}$,说明铜板和铝板在 A 处已经结合^[22].这是由于 A 处受到了极大的压应力,波纹辊型挤压金属向两侧流动,波谷中间位置金属表层破裂,新鲜金属流出并在压应力的作

用下实现冶金结合。此外,铜板和铝板在前波腰 d 和 D 处比后波腰 b 和 B 处薄,与应变分析相符,即

前波腰处由于搓轧的作用产生了更剧烈的变形。



(a) 形貌图

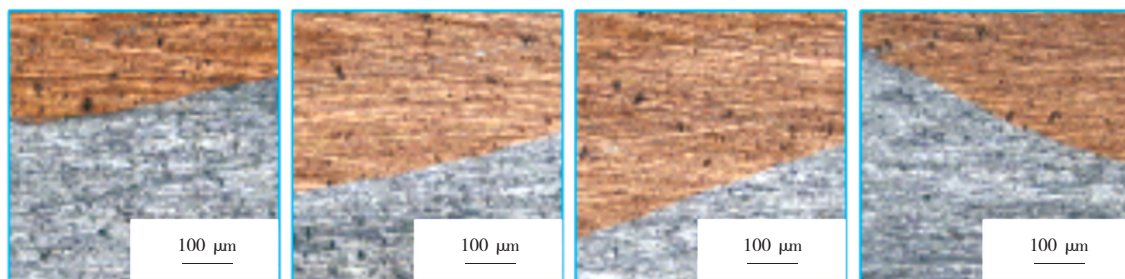


(b) 位置 a

(c) 位置 b

(d) 位置 c

(e) 位置 d



(f) 位置 A

(g) 位置 B

(h) 位置 C

(i) 位置 D

图9 轧卡试样形貌

Fig. 9 Morphology of rolled specimen enlarged view of combination interface of each position

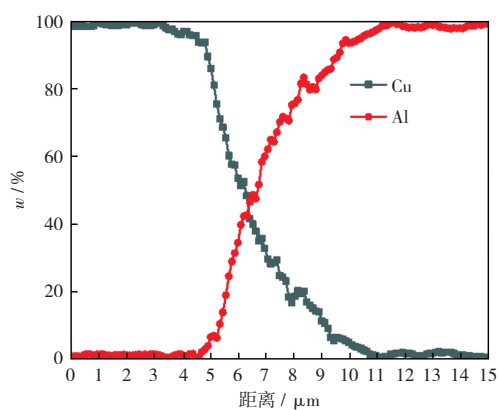


图10 波谷 A 处能谱线扫结果

Fig. 10 Energy dispersive spectroscopy results at trough A

3.2 $D_R \times D_T$ 面形貌分析

所选8处特征位置结合界面铜板侧形貌与面扫结果,如图11所示。波谷位置 a 处有少量铝脊,并且已经有块状铝黏结在铜板侧,到 A 处,铝脊变长,

且有更多块状铝黏结在铜板侧,这是由于从 a 处到 A 处压应力大幅提升,有利于提高复合板结合强度。后波腰位置 b 处有少量铝屑黏结在铜板侧,到 B 处复合板经历了更大的压应力和剪应力之后,变为铝脊黏结在铜板侧。波峰位置 c 处只有零星的铝屑黏结在铜板侧。到 C 处,随着压应力的增加有一块片状铝黏结在铜板侧,并有少量铝屑粘结在铜板侧。前波腰位置 d 处有大量铝屑粘结在铜板侧,这是因为 d 处上下表面剪应力方向相反,促进金属破裂,新鲜铝流出黏结在铜板侧。到 D 处,压应力增大,从破裂处流出更多新鲜铝,所以铜板侧可以观测到大量片状铝。

3.3 $D_R \times D_T$ 面元素比例分析

采用能谱分析技术对各位位置剥离界面铜板侧黏铝的质量分数进行测量。在特征位置 a 、 b 、 c 、 d 中, a 和 d 处黏铝量较大,质量分数分别为 32.8% 和

33.2%, a 处铝的质量分数较高是因为此处压应力最大, 而 d 处则是因为搓轧的作用铝板表层破裂, 新鲜铝流出黏结到铜板表面。在特征位置 A、B、C、D 中, A、B、D 处黏铝量都较高, 只有 C 处较少。

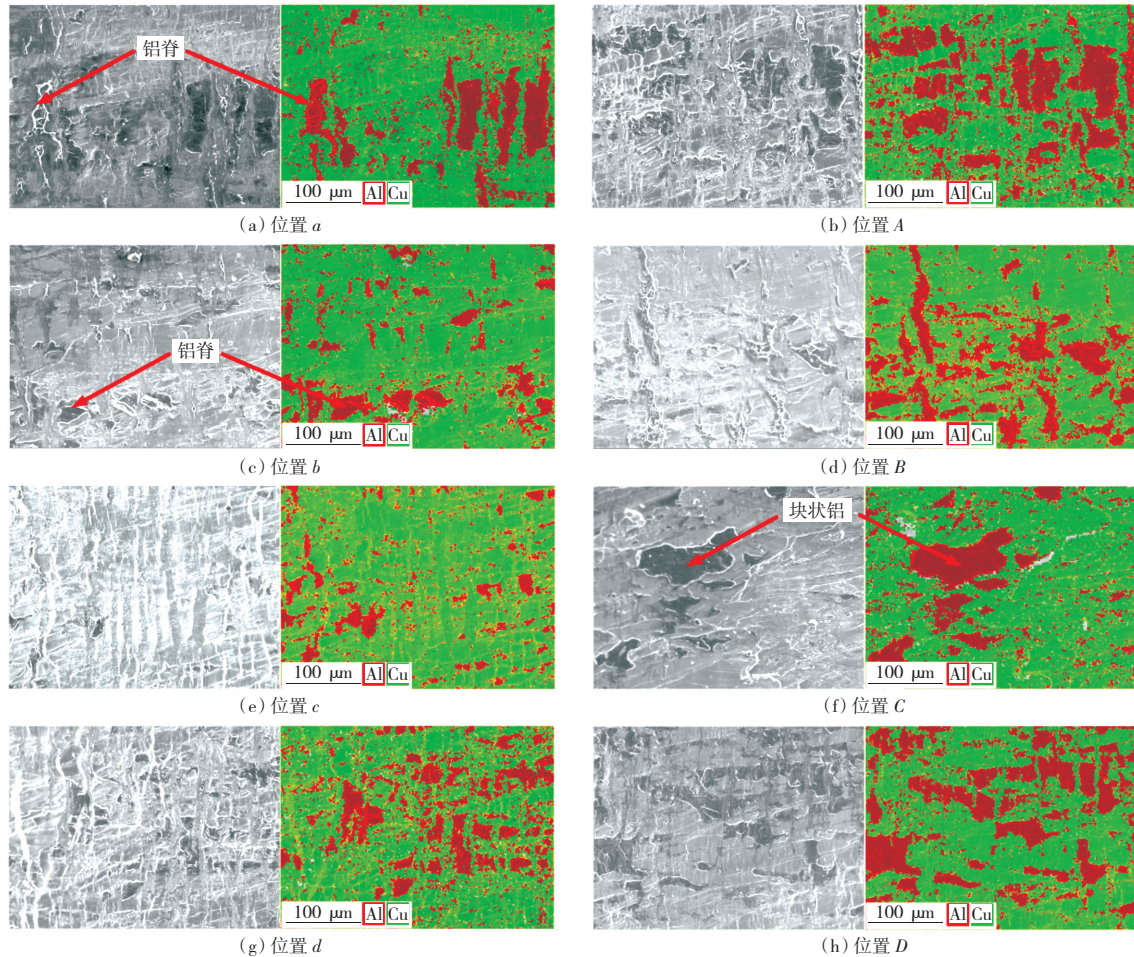


图 11 各位置剥离界面形貌图与能谱面扫

Fig. 11 Surface topography and energy spectrum scanning of stripping interface at each positions

4 结束语

建立并验证了铜/铝复合板波纹轧有限元模型, 利用有限元模型对轧制变形区的压应力、剪应力以及等效应变的特点进行了分析, 阐明了轧制过程中金属流动规律, 为进一步优化波纹辊轧制工艺提供理论指导, 具体结论如下。

- 1) 铜板在前波腰处等效应变最大, 且前波腰比后波腰薄。铝板在波谷和前波腰处等效应变较大。
- 2) 铜板侧在轧制变形区内靠近出口的波谷处

C 处因为处于波峰位置, 此处压下量较小, 其所受压应力也较小, 没有发生剧烈的塑性变形, 所以铝的质量分数只有 28.6%, 而 A、B、D 处压下量较大, 黏铝的质量分数均超过 40%。

压应力最大, 为 1 306.28 MPa, 变形区中间段前波腰处压应力较小, 铝板侧压应力最大为 951.62 MPa。

3) 轧制变形区内铜板侧剪应力方向发生多次转变, 铝板侧剪应力方向转变较少, 共产生了 3 个搓轧区, 促进表层金属破裂, 使新鲜金属流出有利于结合。

4) 复合板在靠近出口侧的一个波形开始结合。结合后波峰处黏铝量较少, 黏铝的质量分数为 28.6%, 其他特征位置黏铝量较高, 质量分数均在 40% 以上。

参考文献:

- [1] NIE H H, LIANG W, ZHENG L W, et al. The microstructure, texture and mechanical properties of the rolled Al/Mg/Al clad sheets[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2016, 25(11): 4695-4705.
- [2] 韩世伟, 罗展, 蒋晓, 等. 螺纹搅拌针直径对铝/钢填丝搅拌摩擦焊接头组织及性能的影响[J]. 精密成形工程, 2021, 13(2): 111-115.

- HAN S W, LUO Z, JIANG X, et al. Effect of diameter of thread stirring pin on microstructure and properties of friction stir welded joint of Al/Steel with interlayer[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(2): 111-115.
- [3] 孙凯, 薛新. 钛铝复合板非等通道横向共挤压工艺优化[J]. 精密成形工程, 2020, 12(2): 23-30.
- SUN K, XUE X. Process optimization of Ti/Al lamination by non-equal channel lateral co-extrusion[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(2): 23-30.
- [4] 吕震宇. 异步轧制铜/铝复合板界面结合强度研究[J]. 塑性工程学报, 2019, 26(4): 99-103.
- LYU Z Y. Research on interfacial bonding strength of asynchronous rolled copper/aluminum composite plate[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2019, 26(4): 99-103.
- [5] PENG X K, WUHRER R, HENESS G, et al. On the interface development and fracture behaviour of roll bonded copper/aluminium metal laminates[J]. Journal of Materials Science, 1999, 34(9): 2029-2038.
- [6] 陈鑫, 李龙, 周德敬. 冷轧铝钢复合板初始及稳定复合压下量的确定[J]. 塑性工程学报, 2015, 22(3): 128-132.
- CHEN X, LI L, ZHOU D J. Research of the initial and stable bonding reduction of Al-St cladding plates by cold roll bonding[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2015, 22(3): 128-132.
- [7] 程明阳, 王爱琴, 毛志平, 等. 铜铝复合板界面组织与性能[J]. 河南科技大学学报(自然科学版), 2017, 38(1): 10-14.
- CHENG M Y, WANG A Q, MAO Z P, et al. Interface layer structure and properties of Cu/Al compound plate[J]. Journal of Henan University of Science and Technology(Natural Science), 2017, 38(1): 10-14.
- [8] WANG T, LI S, REN Z K, et al. A novel approach for preparing Cu/Al laminated composite based on corrugated roll[J]. Materials Letters, 2019, 234: 79-82.
- [9] WANG T, WANG Y L, BIAN L P, et al. Microstructural evolution and mechanical behavior of Mg/Al laminated composite sheet by novel corrugated rolling and flat rolling[J]. Materials Science and Engineering: A, 2019, 765: 1-12.
- [10] WANG T, LI S, NIU H, et al. EBSD research on the interfacial microstructure of the corrugated Mg/Al laminated material[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(3): 5840-5847.
- [11] 宜亚丽, 韩晓铠, 金贺荣. 带夹层不锈钢复合板异步轧制数值模拟[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(6): 79-86.
- YI Y L, HAN X K, JIN H R. Numerical simulation of asymmetric rolling of sandwiched stainless steel clad plates[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(6): 79-86.
- [12] CHEN D C. An investigation into deformation mechanisms in the rolling of complex sheets with internal defects[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2007, 221(7): 1139-1145.
- [13] DYJA H, MRÓZ S, MILENIN A. Theoretical and experimental analysis of the rolling process of bimetallic rods Cu-steel and Cu-Al[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153-154: 100-107.
- [14] 申宏卓, 刘元铭, 刘延啸, 等. Mg/Al 复合板波纹轧模拟及变形区微观组织演变分析[J]. 中国机械工程, 2021, 32(22): 2731-2738.
- SHEN H Z, LIU Y M, LIU Y X, et al. Simulation of corrugated rolling and analysis of microstructure evolution in deformation zone of Mg/Al composite plate[J]. China Mechanical Engineering, 2021, 32(22): 2731-2738.
- [15] PAN S C, HUANG M N, TZOU G Y, et al. Analysis of asymmetrical cold and hot bond rolling of unbounded clad sheet under constant shear friction[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177(1/2/3): 114-120.
- [16] LIN J C. Prediction of rolling force and deformation in three-dimensional cold rolling by using the finite-element method and a neural network[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2002, 20(11): 799-806.
- [17] CHING L Z, GUO H T. Hot rolling of an aluminum-copper sandwich flat strip with the three-dimensional finite element method[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 99(1): 154-168.
- [18] WANG T, LIU W L, LIU Y M, et al. Formation mechanism of dynamic multi-neutral points and cross shear zones in corrugated rolling of Cu/Al laminated composite[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2021, 295: 1-11.
- [19] 柴箫君, 李洪波, 张杰, 等. 热轧轧制压力横向分布规律及预测模型[J]. 钢铁, 2017, 52(6): 52-60.
- CHAI X J, LI H B, ZHANG J, et al. Transverse distribution law of rolling force and its prediction model in hot rolling[J]. Iron and Steel, 2017, 52(6): 52-60.
- [20] HUA F, ZHANG C Y, LI Q, et al. Numerical simulation of rolling process and microstructure evolution of AM50 Mg alloy during hot rolling process[J]. Advanced Materials Research, 2011, 291/292/293/294: 449-454.
- [21] 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: 485-491.
- [22] 许贺彬, 马旻, 谭锦麟, 等. 轧制速度对复合板边裂与显微组织的影响[J]. 塑性工程学报, 2020, 27(10): 33-39.
- XU H B, MA M, TAN J L, et al. Effects of rolling speed on edge crack and microstructure of laminated plate[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27(10): 33-39.