

铜/铝/铜复合板异步轧制变形行为有限元分析

王振华^{1,2}, 刘元铭^{1,2}, 王 涛^{1,2}, 李 旭³

(1. 太原理工大学 机械与运载工程学院, 山西 太原 030024;

2. 太原理工大学 先进金属复合材料成形技术与装备教育部工程研究中心, 山西 太原 030024;

3. 东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

摘要: 采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立了铜/铝/铜复合板异步轧制成形弹塑性有限元模型, 将有限元模型仿真结果同实际轧制实验结果进行对比, 证明有限元模型的准确性。通过对异步轧制变形区进行分析和研究发现, 在相同条件下, 与同步轧制相比, 异步轧制可以有效地减小轧制正应力, 并增大后滑区摩擦应力; 异步轧制搓轧区可以促进复合板结合界面的金属流动, 在其他轧制条件相同的情况下, 压下率越大, 搓轧区越小, 异步速比越大, 搓轧区越大; 靠近快速辊一侧结合界面铜板的等效应变要大于靠近慢速辊一侧结合界面铜板的等效应变, 中间铝板的等效应变大于两侧铜板。随着异步速比的增大, 复合板结合界面上两种金属的等效应变的差距逐渐缩小, 变形将会更加协调, 有利于增强复合板的结合强度。整体研究对铜铝复合板制备工艺的优化提供了理论依据。

关键词: 铜/铝/铜复合板; 异步轧制; 搓轧区; 摩擦应力; 等效应变

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.07.025

中图分类号: TG335.81

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2022) 07-0175-09

Finite element analysis on deformation behavior of Cu/Al/Cu clad sheet during asynchronous rolling

Wang Zhenhua^{1,2}, Liu Yuanming^{1,2}, Wang Tao^{1,2}, Li Xu³

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Engineering Research Center of Advanced Metal Composites Forming Technology and Equipment, Ministry of Education, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

3. State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China)

Abstract: An elastic-plastic finite element model of asynchronous rolling for Cu/Al/Cu clad sheet was established by software ANSYS/LS-DYNA, and the accuracy of the finite element model was proved by comparing the simulation results of finite element model with the actual rolling experiment results. Then, through the analysis and study of asynchronous rolling deformation zone, it is found that under the same conditions, compared with synchronous rolling, the asynchronous rolling effectively reduces the rolling normal stress and increases the friction stress in the backward slip zone, and the cross-shear zone of asynchronous rolling promotes the metal flow at the bonding interface of clad sheet. Under the same conditions of other rolling, the larger the reduction rate is, the smaller the cross-shear zone is, the larger the asynchronous speed ratio is, and the larger the cross-shear zone is. The equivalent strain of the bonding interface copper sheet near the fast roll side is greater than that near the slow roll side, and the equivalent strain of the intermediate aluminum sheet is greater than that of copper sheets on both sides. With the increasing of asynchronous speed ratio, the equivalent strain difference between the two metals on the bonding interface of the clad sheet is gradually reduced, and the deformation becomes more coordinated, which is conducive to enhancing the bonding strength of the clad sheet. The research provides theoretical basis for the preparation process optimization of copper-aluminum clad sheet.

Key words: Cu/Al/Cu clad sheet; asynchronous rolling; cross-shear zone; friction stress; equivalent strain

金属层状复合材料是通过先进加工技术将两种

或两种以上金属复合而成的新型材料^[1], 其综合了各组元金属材料的优异性能, 避免了单一金属材料的固有缺陷, 因而在航空、石油、化工、电子、造船等工业领域得到了越来越广泛的应用^[2-6]。常见的金属层状复合材料有镁铝、钛钢、铜铝以及多层不锈钢层状复合板。其中, 镁铝复合板材兼具镁合

收稿日期: 2021-12-03; 修订日期: 2022-03-19

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFA0707300); 国家自然科学基金资助项目 (51904206, 51974196)

作者简介: 王振华 (1990-), 男, 博士, 助理研究员

E-mail: wangzhenhua@tyut.edu.cn

金的高比强度和铝合金优良的抗腐蚀性能^[7-8]。钛钢复合板则充分结合了钛材优异的耐蚀性能和钢材良好的力学性能^[9]。多层金属复合板因可实现强韧性统一而用于生产刀具、复合装甲等^[10]。

本文研究的铜/铝/铜复合板是另一种典型的金属层状复合材料,部分产品通过轧制复合法即可实现生产^[11-12],制备工艺相对简单。一般而言,轧制复合制备铜/铝/铜复合板的方法主要分为冷轧复合、热轧复合以及异步轧制复合^[13-16],其制备关键是通过首道次的大压下量和轧后退火处理来实现铜铝界面间金属原子的机械啮合和冶金结合^[17-18]。铜/铝/铜轧制复合过程包括多个阶段和多种影响因素,仅通过实际轧制实验难以对这一过程的力学性能参数进行准确描述,有限元方法则是分析集材料非线性和几何非线性于一体的复杂接触问题的有效手段^[19-20]。Randari M 等^[21]采用实验和有限元仿真的方法研究了铝/铜/铝层状复合材料的制备工艺,研究发现,当中间层硬质金属铜板较薄时,轧制过程中容易发生颈缩、断裂。黄福祥等^[22]采用有限元法对铜银轧制复合的精轧过程进行了数值模拟,分析了压下量对轧件与轧辊间接触力以及轧件变形等的影响规律。李世芸等^[23]建立了刚塑性有限元模型,对两种金属复合过程中轧辊与轧件的应力、应变的分布规律进行了研究。孙铁铠等^[24]则使用弹塑性有限元对两种金属的轧制复合过程进行了研究,并比较了数值计算结果和解析计算结果,发现数值计算结果的误差小于 15%。异步轧制复合是一种新型的轧制复合方法,通过设置上下轧辊不同线速度使得多层金属在轧制变形区形成搓轧区,在搓轧区不同金属界面剪应力的作用下,界面金属沿某一角度发生滑移,使得界面金属原子之间互相渗透、黏合,促进复合界面结合强度的提升^[25]。本文采用 ANSYS/LS-DYNA 软件建立铜/铝/铜异步轧制复合弹塑性有限元模型,然后对异步轧制搓轧区的应力、应变进行系统分析,深入探究压下率、异步速比对复合界面变形情况的影响规律。

1 有限元模型的建立

1.1 材料模型的定义

材料采用的铜材为紫铜,铝材为工业纯铝,假设轧辊为刚性辊;铜/铝/铜 3 层板材轧件为双线性硬化材料;接触界面采用库伦摩擦模型;轧制温度

为一般室温状态;采用 ANSYS 中 SOLID164 实体单元进行网格划分。材料的具体物理性能参数取值如表 1 所示。

表 1 轧件材料物理性能参数

Table 1 Physical property parameters of rolled piece materials

材料	屈服强度/MPa	弹性模量/GPa	泊松比	密度/(kg·m ⁻³)
铜	90	108	0.33	8920
铝	40	69	0.35	2702

1.2 几何模型的建立

在数值仿真过程中,为兼顾实际轧制工艺和模型计算效率,对刚性体轧辊在辊身长度方向上进行缩短,在满足轧制稳定性的条件下对轧件长度进行适当缩短。最终建立如表 2 中所示的轧件几何体。

表 2 轧辊和轧件的几何尺寸

Table 2 Geometric dimensions of roll and rolled piece

轧辊		轧件	
直径/mm	辊身长度/mm	铜板尺寸/(mm×mm×mm)	铝板尺寸/(mm×mm×mm)
Φ450	60	80×30×1	80×30×2

1.3 网格划分

网格划分是否合理对有限元模型的计算精度具有重要影响,经过多次实验,本文最终网格划分策略为:在铜板长度方向上平均分为 180 段,宽度方向上平均分为 60 段,厚度方向上平均分为 6 段;铝板在长度和宽度方向上的划分同铜板一致,厚度方向上平均分为 12 段。最终,铜板模型网格划分为 64800 个单元和 77287 个节点,铝板模型网格划分为 129600 个单元和 143533 个节点。划分后的几何模型如图 1 所示。

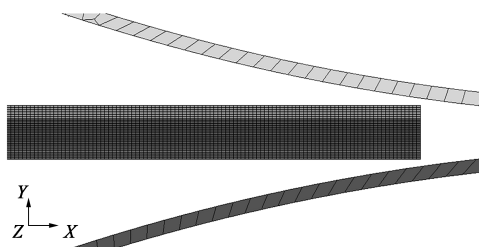


图 1 网格模型图

Fig. 1 Mesh model diagram

1.4 轧制参数的设置

有限元模型轧制过程中的参数主要涉及接触表面的摩擦因数、上下辊转速以及压下率,在本文

中，铜/铝/铜复合板待复合表面采用角磨机进行了打磨，使铜铝新鲜金属完全暴露出来以方便进行轧制复合，但是角磨机打磨大大增加了铜铝待复合界面的粗糙度，综合经验值以及相关文献^[26-27]，本文将铜/铝板间的动摩擦因数设定为 0.40，静摩擦因数设定为 0.50；铜板表面与轧辊间的动摩擦因数和静摩擦因数分别设置为 0.25 和 0.35。其他参数设置如表 3 所示。

表 3 异步轧制模型相关参数设置

Table 3 Setting of parameters related with asynchronous rolling model	
参数	数值
铜/铝板间动摩擦因数 μ_d	0.40
铜/铝板间静摩擦因数 μ_s	0.50
铜板表面与轧辊间动摩擦因数 μ'_d	0.25
铜板表面与轧辊间静摩擦因数 μ'_s	0.35
上辊角速度 $\omega_u/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	4.0、4.2、4.4、4.6、4.8
下辊角速度 $\omega_d/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	4.0
轧辊异步速比 i ($r=50\%$)	1.00、1.05、1.10、1.15、1.20
压下率 $r/\%$ ($i=1.15$)	40、45、50、55

注：轧辊异步速比为上下轧辊角速度之比，即 $i=\omega_u/\omega_d$

2 有限元模型实验验证

2.1 实验材料

选择工业纯铝 L1060 和纯铜 T2 进行异步冷轧复合实验，实验材料的规格分别为：长度为 100 mm、宽度为 30 mm，铝板厚度为 2 mm，铜板厚度为 1 mm。两种材料的主要化学成分如表 4 和表 5 所示。

表 4 T2 铜的化学成分（%，质量分数）

Table 4 Chemical compositions of T2 copper (%, mass fraction)			
Fe	S	Pb	Cu
0.005	0.005	0.005	余量

表 5 L1060 铝的化学成分（%，质量分数）

Table 5 Chemical compositions of L1060 aluminum (%, mass fraction)						
Fe	Si	Cu	Cu	Mn	Mg	Al
0.15	0.10	0.05	0.05	0.03	0.03	余量

为了消除原始材料的加工硬化和残余应力，在复合轧制前对铜板和铝板进行了去应力退火，具体为加热至 300 ℃保温 1 h。对热处理后的铜板和铝板进行表面清洗和机械打磨，采用质量分数为 5% 的 H₂SO₄ 溶液酸洗铜板、5% 的 NaOH 溶液碱洗铝板，各浸泡 10 min 以去除表面氧化物，然后用角磨机打磨金属板的待复合表面，使其表面露出新鲜金属。异步复合轧制工艺的参数设置如表 6 所示。实验制备的部分复合板如图 2 所示。

表 6 异步轧制复合实验的工艺参数

Table 6 Process parameters of asynchronous rolling compound experiment		
序号	压下率 $r/\%$	轧辊异步速比 i
1	40	1.00
2	45	1.00
3	50	1.00
4	55	1.00
5	65	1.00
6	70	1.00
7	40	1.15
8	45	1.15
9	50	1.15
10	55	1.15
11	65	1.15
12	70	1.15
13	50	1.05
14	50	1.10
15	50	1.15
16	50	1.20



图 2 轧后复合板试样

Fig. 2 Clad sheet specimens after rolling

2.2 实验与数值模拟数据比较

为了证明所建立的有限元模型的准确性，在轧辊异步速比 $i = 1.15$ 且压下率不同以及压下率 $r = 50\%$ 且轧辊异步速比不同的两种情况下，对轧后复合板各层的厚度和总厚度进行测量，并与有限元模拟结果进行对比，结果如表 7 和表 8 所示。其中 h_{Cu} 为轧后铜层厚度， h_{Al} 为轧后铝层厚度， h 为轧后铜/铝/铜复合板总厚度。由表 7 和表 8 可以发现，实验结果和有限元仿真结果的数据相近，总体相对误差小于 4.2%。

表 7 不同压下率下复合板轧后厚度值 ($i = 1.15$)

Table 7 Thickness values of clad sheet after rolling under different reduction rates ($i = 1.15$)

厚度	压下率/%								
	45			50			55		
	实验/	FEM/	相对	实验/	FEM/	相对	实验/	FEM/	相对
	mm	mm	误差/	mm	mm	误差/	mm	mm	误差/
			%			%			%
h_{Cu}	0.616	0.635	3.1	0.560	0.570	1.8	0.487	0.506	3.9
h_{Al}	0.972	1.002	3.1	0.866	0.902	4.2	0.792	0.818	3.3
h	2.204	2.272	3.1	1.986	2.042	2.8	1.766	1.830	3.7

表 8 不同轧辊异步速比下复合板轧后厚度值 ($r = 50\%$)

Table 8 Thickness values of clad sheet after rolling under different roll asynchronous speed ratios ($r = 50\%$)

厚度	轧辊异步速比								
	1.05			1.10			1.15		
	实验/	FEM/	相对误差/%	实验/	FEM/	相对误差/%	实验/	FEM/	相对误差/%
	mm	mm		mm	mm		mm	mm	
h_{Cu}	0.576	0.585	1.6	0.574	0.582	1.4	0.574	0.580	1.0
h_{Al}	0.876	0.890	0.5	0.876	0.902	3.0	0.884	0.894	1.1
h	2.038	2.060	1.8	2.024	2.066	2.1	2.030	2.054	1.2

取上下两层铜板的平均厚度值作为轧后铜板厚度，作出轧后铜、铝厚度值与压下率及轧辊异步速比之间的关系曲线，如图 3 和图 4 所示，其中， h_{Cu}^e 为复合板铜板厚度的实验值， h_{Cu}^s 为复合板铜板厚度的有限元仿真值， h_{Al}^e 为复合板铝板厚度的实验值， h_{Al}^s 为复合板铝板厚度的有限元仿真值。

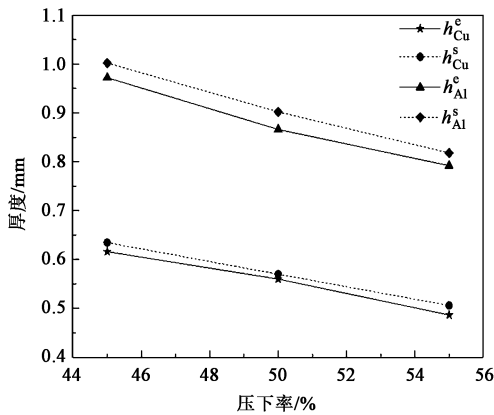


图 3 组元金属厚度与压下率的关系曲线 ($i = 1.15$)

Fig. 3 Relationship curves of component metal thicknesses and reduction rates ($i = 1.15$)

由图 3 和图 4 可以看出，实验数据和有限元仿真数据的吻合度较好。经计算发现，复合板有限元仿真总厚度值与实验总厚度值的相对误差在

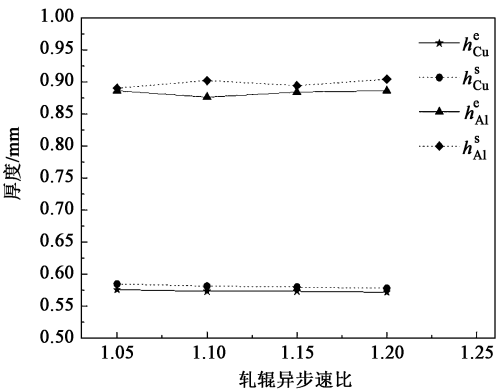


图 4 组元金属厚度与轧辊异步速比的关系曲线 ($r = 50\%$)

Fig. 4 Relationship curves of component metal thicknesses and roll asynchronous speed ratios ($r = 50\%$)

1.2%~4.0%之间，有力证明了有限元模型计算的结果可靠、精度较高，完全可以采用有限元方法来研究复合板制备过程力学性能参数的变化规律。

3 仿真结果的分析 and 讨论

3.1 同步轧制和异步轧制正应力对比

首先，分别对同步轧制和异步轧制条件下轧辊与轧件接触弧上正应力的分布情况进行了对比研究。图 5 显示了在压下率为 50% 下，同步轧制和异步轧

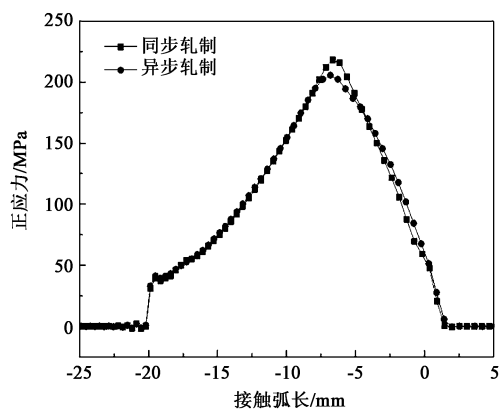
图5 同步轧制和异步轧制的正应力对比 ($r=50\%$)

Fig. 5 Normal stress comparison of synchronous rolling and asynchronous rolling ($r=50\%$)

制中正应力沿接触弧长度方向的分布情况,从中可以看出,异步轧制的正应力峰值小于同步轧制,说明异步轧制具有减小轧制力的作用。图6则显示了不同轧辊异步速比条件下正应力的对比情况,从图6可以看出,随着轧辊异步速比的增大,正应力峰值越来越小,说明增大轧辊异步速比同样具有减小轧制力的作用。

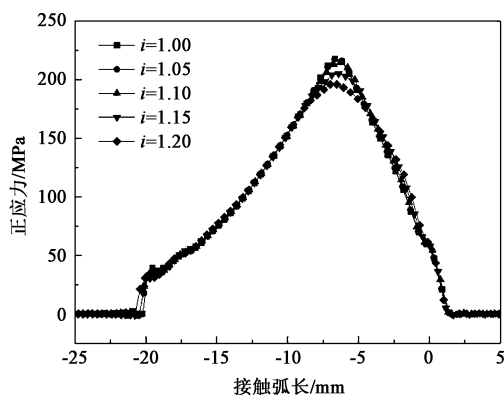


图6 不同轧辊异步速比下正应力的变化曲线

Fig. 6 Change curves of normal stress under different roll asynchronous speed ratios

3.2 同步轧制和异步轧制摩擦应力对比

从图7可以看出,相同的压下率(50%)下,在前滑区,异步轧制摩擦应力要略小于同步轧制,在后滑区,异步轧制摩擦应力要明显大于同步轧制。由轧制理论可知,后滑区是金属由弹性变形向塑性变形的过渡区域,在这一阶段,较大的摩擦应力可以促使复合板结合界面的新鲜金属破裂并加速其流动,增大复合界面两种金属的接触面积,加强二者的相互作用,形成更多的金属键连接,两种材料间的黏合程度更加致密,因此,异步轧

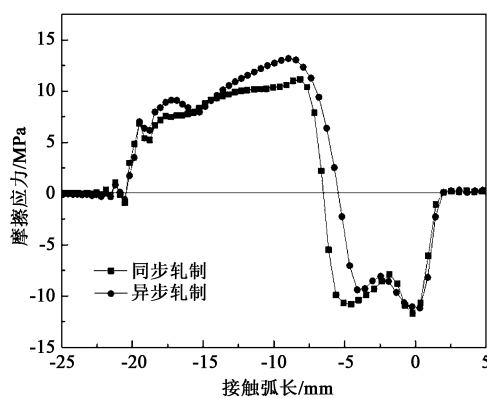
图7 同步轧制与异步轧制下摩擦应力沿接触弧分布对比 ($r=50\%$)

Fig. 7 Comparison on friction stress distributions of synchronous rolling and asynchronous rolling along contact arc ($r=50\%$)

制后滑区的强摩擦应力作用有助于金属复合板界面结合强度的提高。与此不同的是,前滑区的两种金属结合界面正在或已经完成了黏合,过大的摩擦应力可能会拉裂已经完成复合的金属界面,起到破坏作用,因此,应尽量降低前滑区的摩擦应力,异步轧制正好可以起到这种作用。从以上分析可以得出:异步轧制在减小轧制正应力的同时,还可以通过改变变形区的摩擦应力分布来增强复合板界面的结合强度。

3.3 压下率对搓轧区大小的影响

异步轧制上下轧辊与复合板两条接触弧上中性点之间的区域定义为搓轧区,上下两个中性点之间的水平投影距离定义为搓轧区的宽度 D ,如图8所示,其中, l 为接触弧水平投影长度, R 为轧辊半径, $h_{\text{铜}}$ 为轧前铜板厚度, $h_{\text{铝}}$ 为轧前铝板厚度。轧制过程中,中间铝板的上下表面即为复合板的两个结

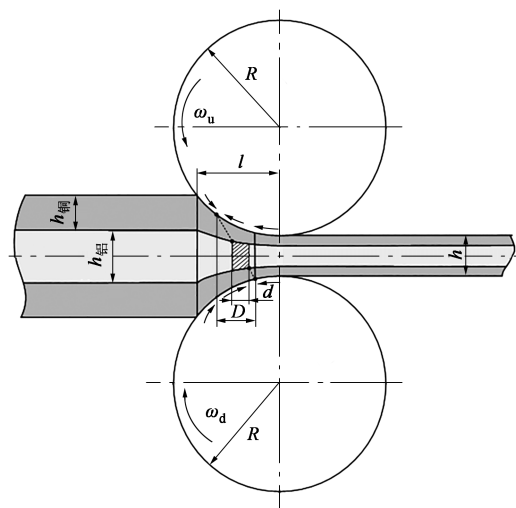


图8 搓轧区及搓轧区宽度示意图

Fig. 8 Schematic diagram of cross-shear zone and its width

合界面,而复合板中间层铝板的搓轧区是复合板整体搓轧区的一部分,中间层铝板搓轧区宽度能够代表异步复合轧制中整体搓轧区的大小,在图 8 中表示为 d 。

在 $i = 1.15$ 的前提下,分别对压下率为 40%、45%、50%、55% 这 4 种条件下的变形进行了仿真实验,根据实验结果绘制了金属复合板结合界面摩擦应力沿变形区接触弧的分布曲线,如图 9 所示。图 9 中,上接触界面代表上层铜板和铝板的接触表面,下接触界面代表下层铜板和铝板的接触表面,

阴影区域的宽度代表所形成的搓轧区的宽度。由图 9 可以看出,异步轧制时,靠近快速辊(上辊)一侧接触弧上中性点的位置向轧件咬入端移动,靠近慢速辊(下辊)一侧接触弧上中性点的位置向轧件出口端移动。在轧辊异步速比一定的前提下,随着压下率的增加,搓轧区的宽度逐渐缩短,其所占变形区的比例也逐渐缩小,这不利于变形区界面新鲜金属的流出。因此,实际轧制时,在保证两种金属实现良好结合的前提下,应选择合适的压下率,压下率并非越大越好。

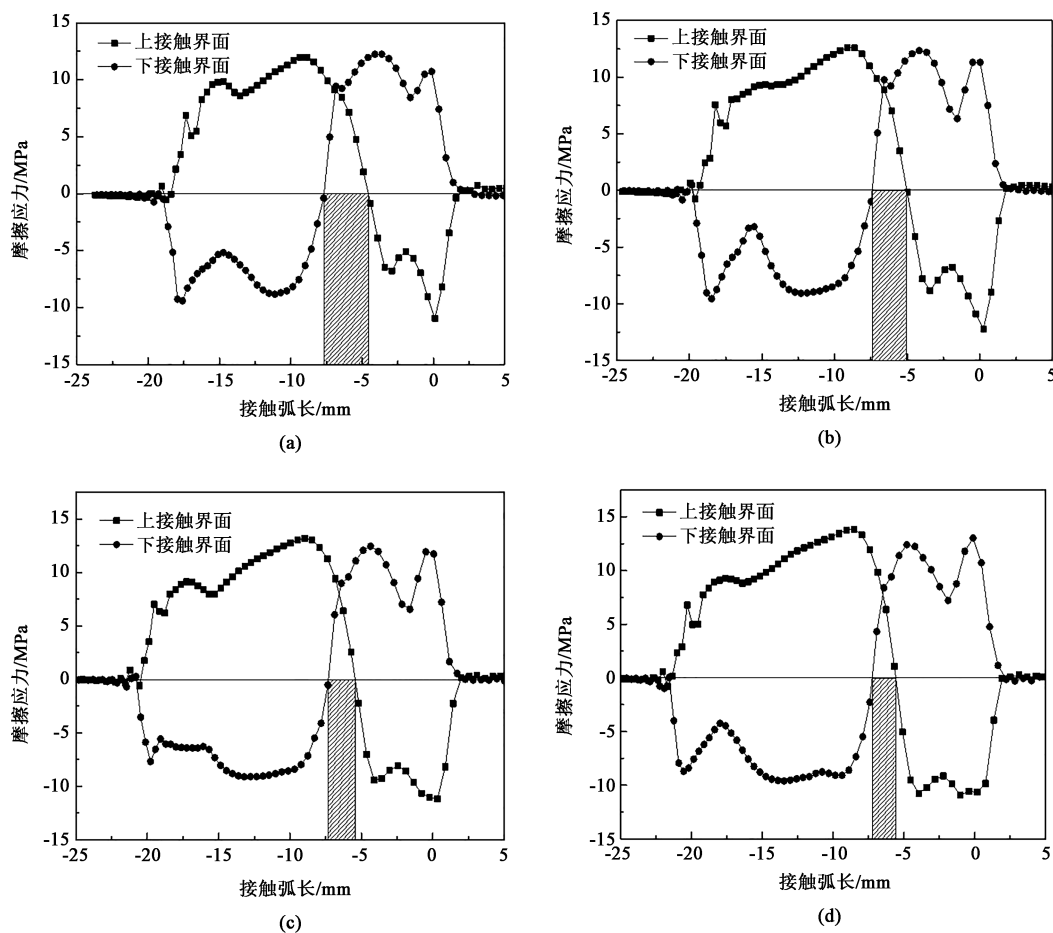


图 9 压下率对搓轧区大小的影响

(a) $r=40\%$ (b) $r=45\%$ (c) $r=50\%$ (d) $r=55\%$

Fig. 9 Effects of reduction rate on size of cross-shear zone

3.4 轧辊异步速比对搓轧区大小的影响

在 $r = 50\%$ 的前提下,分别对轧辊异步速比为 1.05、1.10、1.15 和 1.20 这 4 种条件下的变形进行了仿真实验,根据实验结果同样绘制了金属复合板结合界面的摩擦应力沿变形区接触弧的分布曲线,如图 10 所示。由图 10 可以看出,在压下率一定的前提下,随着轧辊异步速比的增大,搓轧区的宽度

也越来越大,搓轧区的增大将导致结合界面的两种金属由于流动速度差异变大而产生错位,促成两层金属在塑性变形区内相互摩擦和交融,加剧内部晶粒的相互黏合作用,形成金属键键合力,从而增强复合板界面的结合强度。

3.5 变形沿厚度方向的分布

取轧辊异步轧制稳定阶段的复合板变形区作为

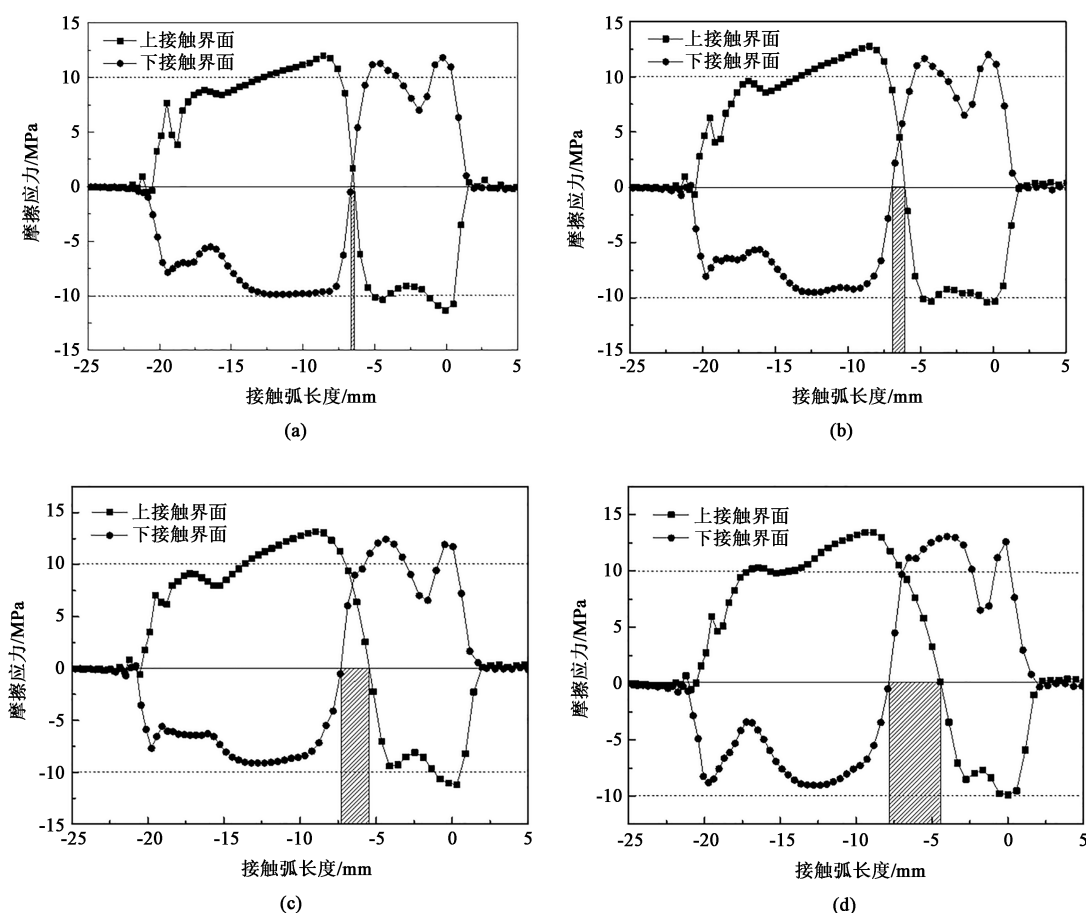


图10 轧辊异步速比对搓轧区大小的影响

(a) $i=1.05$ (b) $i=1.10$ (c) $i=1.15$ (d) $i=1.20$

Fig. 10 Effects of roll asynchronous speed ratio on size of cross-shear zone

研究对象,在变形区厚度方向取一组节点进行等效应变分析。绘制等效应变沿厚度方向的变化情况,如图11所示,图11中 Cu_u 代表上层铜板, Cu_d 代表下层铜板, Al 代表中间铝板。定义中间铝板的厚度中心为坐标原点,上辊一侧为厚度坐标正方向,下辊一侧为厚度坐标负方向。图11a、图11b、图11c和图11d分别代表轧辊异步速比为1.05、1.10、1.15和1.20这4种情况下复合板的等效应变在厚度方向的分布规律。图11中虚线代表3层金属的分界面,也是复合板结合界面。从图11中可以看出,在两个结合界面上,快速辊侧铜板的等效应变整体大于慢速辊侧铜板的等效应变。异步速比较低时,铝板的等效应变高于铜板的等效应变,两者的差值较大,随着轧辊异步速比的逐渐增大,慢速辊侧铜板的等效应变减小,由 $i=1.00$ 时的最大值1.02减小至 $i=1.20$ 时的最大值0.65。此外,结合界面上两种金属的等效应变差值随着轧辊异步速比的增大而减小,差值从最大时的0.3左右减小至0.05左

右,这种现象说明随着轧辊异步速比的提高,复合板在结合界面两种金属的变形更加协调,在实际轧制中表现为更好的结合强度。

4 结论

(1) 与同步轧制相比,异步轧制可以在减小轧制正应力的前提下,通过增强后滑区的摩擦应力和减小前滑区的摩擦应力来达到提升铜/铝/铜金属复合板界面结合强度的目的。

(2) 搓轧区的存在可以有效地提高铜/铝/铜金属复合板界面的结合强度。在其他轧制条件不变的前提下,压下率越大,异步轧制变形搓轧区越小;异步速比越大,异步轧制变形搓轧区越大。合适的压下率和异步速比对金属复合板的制备具有关键作用。

(3) 异步轧制条件下,快速辊侧结合界面铜板的等效应变要大于慢速辊侧结合界面铜板的等效应

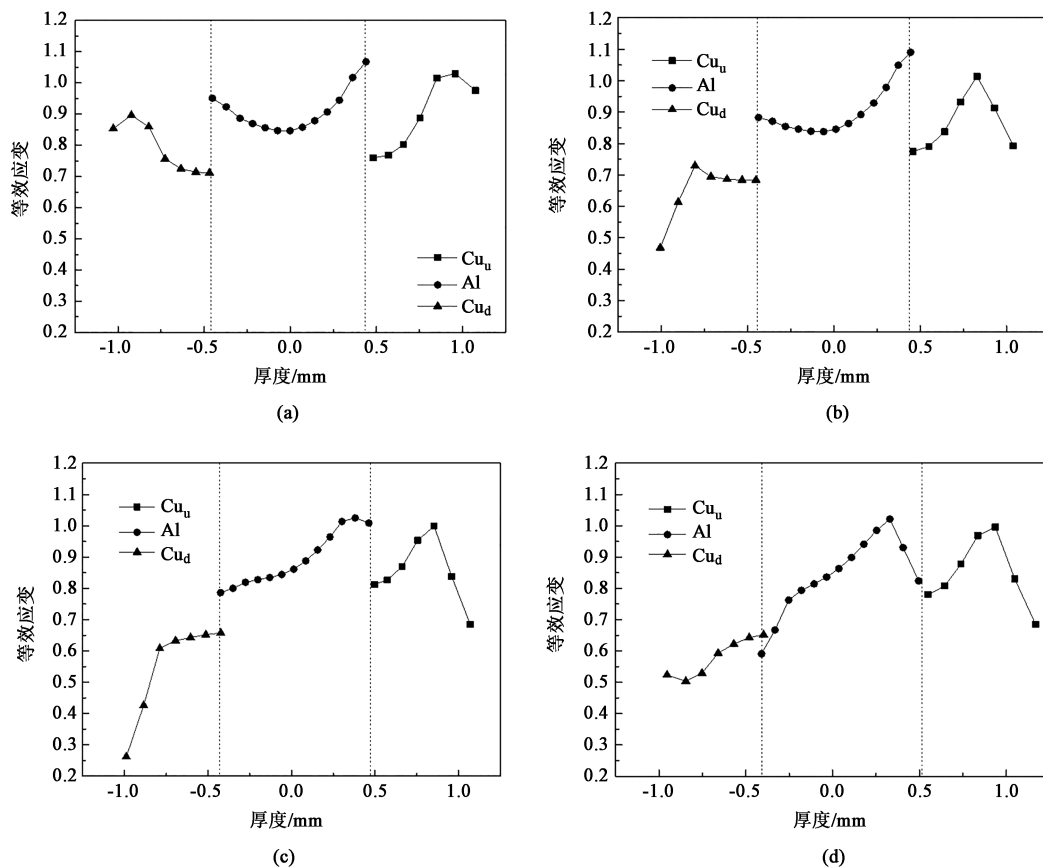


图 11 等效应变沿复合板整体厚度方向的分布

(a) $i=1.05$ (b) $i=1.10$ (c) $i=1.15$ (d) $i=1.20$

Fig. 11 Distributions of equivalent strain along overall thickness direction of clad sheet

变,中间铝板的等效应变大于两侧铜板。随着异步速比的增大,复合板结合界面上两种金属的等效应变的差距逐渐缩小,变形更加协调。

参考文献:

- [1] 王涛,齐艳阳,刘江林,等.金属层合板轧制复合工艺国内外研究进展[J].哈尔滨工业大学学报,2020,52(6):48-62.
Wang T, Qi Y Y, Liu J L, et al. Research progress of metal laminates roll bonding process at home and abroad [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52 (6): 48-62.
- [2] 徐涛.金属层状复合材料的发展与应用[J].轻合金加工技术,2012,(6):7-10.
Xu T. Development and application of laminated-metal composite [J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2012, (6): 7-10.
- [3] 田捍卫,王爱琴,刘帅洋,等.铜铝层状复合材料的研究进展[J].材料科学与工程学报,2019,37(1):168-173.
Tian H W, Wang A Q, Liu S Y, et al. Research progress on copper-aluminum laminated composites [J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2019, 37 (1): 168-173.
- [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,1995,5(4):128-132.
Zhang S H, Guo Z J. Study on copper-aluminum composites [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1995, 5 (4): 128-132.
- [5] 刘腾,刘平,王渠东.铜铝双金属复合材料的研究进展[J].材料导报,2013,(19):4-8,25.
Liu T, Liu P, Wang Q D. Research progress on copper/aluminum bimetal composite [J]. Materials Reports, 2013, (19): 4-8, 25.
- [6] 刘国平,王渠东,蒋海燕.铜/铝双金属复合材料研究新进展[J].材料导报,2020,34(19):7115-7122.
Liu G P, Wang Q D, Jiang H Y. New research progress on copper/aluminum bimetallic composites [J]. Materials Reports, 2020, 34 (19): 7115-7122.
- [7] 梅瑞斌,史现利,包立,等.多道次热辊轧制Al/Mg层状复合板材结合面特性研究[J/OL].复合材料学报:1-14 [2022-05-13]. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210902.006.
Mei R B, Shi X L, Bao L, et al. Interface characteristics study of Al/Mg laminated composite sheets by multi-passes RHR [J/OL]. Acta Materialiae Compositae Sinica: 1-14 [2022-05-13]. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20210902.006.
- [8] 陈琦,迟之东.镁/铝复合板材制备工艺及性能研究[J].有色金属加工,2015,44(1):26-28.

- Chen Q, Chi Z D. Study of preparation and properties of Mg/Al composite sheet [J]. *Nonferrous Metals Processing*, 2015, 44 (1): 26-28.
- [9] 田世伟, 江海涛, 刘继雄, 等. 钛铜复合板双金属的流变行为及轧制制备 [J]. *材料导报*, 2019, 33 (24): 4141-4146.
- Tian S W, Jiang H T, Liu J X, et al. Rheological behavior and hot rolling process of titanium/steel clad plate [J]. *Materials Reports*, 2019, 33 (24): 4141-4146.
- [10] 余伟, 王班, 贺婕, 等. 多层金属复合板的热轧制备方法 [J]. *材料工程*, 2017, 45 (2): 32-38.
- Yu W, Wang B, He J, et al. Hot-rolled process of multilayered composite metal plate [J]. *Journal of Materials Engineering*, 2017, 45 (2): 32-38.
- [11] 刘理. 铜/铝复合板轧制工艺与理论研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2006.
- Liu L. Research on Rolling Process and Theory of Cu/Al Rolling Clad Sheet [D]. Shenyang: Northeast University, 2006.
- [12] 黄宏军, 张泽伟, 王书生, 等. 铜铝薄板轧制复合工艺 [J]. *沈阳工业大学学报*, 2009, (5): 531-535.
- Huang H J, Zhang Z W, Wang S S, et al. Roll cladding technology for copper-aluminum thin sheet [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2009, (5): 531-535.
- [13] 罗龙, 王宝峰, 李丽荣. 铜/铝热轧扩散复合界面扩散的分子动力学模拟 [J]. *热处理技术与装备*, 2011, 32 (2): 55-60.
- Luo L, Wang B F, Li L R. Molecular dynamics simulation of diffusion behavior at the interface of hot rolling diffusion bonding of Cu/Al [J]. *Heat Treatment Technology and Equipment*, 2011, 32 (2): 55-60.
- [14] 王平, 刘静. 铜/铝冷轧复合薄带热处理工艺及界面组织和性能研究 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2014, 43 (9): 2232-2236.
- Wang P, Liu J. Heat Treatment technique and interface microstructure and property for cold-rolling copper-aluminum composite strip [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2014, 43 (9): 2232-2236.
- [15] 常东旭, 王平, 赵莹莹. 铜/铝异步轧制复合带的界面反应与强化机制 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2019, 40 (11): 1574-1578.
- Chang D X, Wang P, Zhao Y Y. Interfacial reaction and strengthening mechanism of Cu/Al composite strip produced by asymmetrical rolling [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2019, 40 (11): 1574-1578.
- [16] 赵莹莹, 王泽宇, 龚潇雨, 等. 铜铝异步轧制复合工艺及组织性能 [J]. *焊接学报*, 2016, (11): 71-74.
- Zhao Y Y, Wang Z Y, Gong X Y, et al. Microstructure and property of asymmetric rolled Cu/Al composites [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, (11): 71-74.
- [17] 朱永伟, 谢刚朝. 层压金属复合材料的加工技术 [J]. *矿冶工程*, 1998, 18 (2): 68-72.
- Zhu Y W, Xie G C. Processing technology of laminated metal composites [J]. *Mining and Metallurgical Engineering*, 1998, 18 (2): 68-72.
- [18] 王跃林, 高翔宇, 王涛, 等. 冷轧铜/铝复合板横向界面结合强度研究 [J]. *热加工工艺*, 2020, 49 (3): 99-102.
- Wang Y L, Gao X Y, Wang T, et al. Research on transverse interface bond strength of cold rolled copper/aluminum clad sheet [J]. *Hot Working Technology*, 2020, 49 (3): 99-102.
- [19] Szota P, Dyja H. Numerical modelling of the bimetallic reinforcement bar rolling process [J]. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2007, 25 (1): 130-136.
- [20] Jeon C H, Han S W, Joo B D, et al. Deformation analysis for cold rolling of Al-Cu double layered sheet by physical modeling and finite element method [J]. *Metals and Materials International*, 2013, 19 (5): 1069-1076.
- [21] Randari M, Reihanian M, Baghal S M L. Microstructural control and layer continuity in deformation bonding of metallic laminated composites [J]. *Materials Science and Engineering*, 2018, 738 (19): 98-110.
- [22] 黄福祥, 汪振, 李司山. 压下量对 Ag/Cu 复合材料轧制变形影响的模拟 [J]. *重庆工学院学报*, 2009, 23 (5): 129-135.
- Huang F X, Wang Z, Li S S. Simulation on influence of percent reduction on rolling deformation of Ag/Cu composite [J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology*, 2009, 23 (5): 129-135.
- [23] 李世芸, 张曙红, 张代明. 双金属复合带材轧制过程有限元模拟 [J]. *中国有色金属学报*, 2001, 11 (6): 1078-1082.
- Li S Y, Zhang S H, Zhang D M. Finite element simulation of rolling process of bimetallic composite strip [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2001, 11 (6): 1078-1082.
- [24] 孙铁铠, 刘恩来. 用弹塑性有限元模拟双金属复合板轧制 [J]. *钢铁研究学报*, 2002, 14 (5): 26-29.
- Sun T K, Liu E L. Simulation of bimetal composite plate rolling by FEM [J]. *Journal of Iron and Steel Research*, 2002, 14 (5): 26-29.
- [25] 祖国胤, 李小兵, 丁明明, 等. 异步轧制铜/铝双金属复合板变形行为的研究 [J]. *东北大学学报: 自然科学版*, 2011, 32 (5): 675-678.
- Zu G Y, Li X B, Ding M M, et al. Investigating deformation behavior of asymmetrically rolled Cu/Al bimetal clad sheets [J]. *Journal of Northeastern University: Natural Science*, 2011, 32 (5): 675-678.
- [26] 何亚龙. 铜/铝双金属复合管连轧变形过程数值模拟 [J]. *甘肃科技*, 2015, 31 (3): 42-45.
- He Y L. Numerical simulation of the continuous rolling deformation process of copper/aluminum bimetallic composite pipe [J]. *Gansu Science and Technology*, 2015, 31 (3): 42-45.
- [27] 赵鸿金, 胡玉军, 李涛涛, 等. 工艺参数对连续挤压铜/铝复合接触线成形的数值模拟研究 [J]. *材料科学与工艺*, 2015, 23 (1): 95-100.
- Zhao H J, Hu Y J, Li T T, et al. The numerical simulation of Cu/Al contact wire forming during continuous extrusion cladding process [J]. *Materials Science & Technology*, 2015, 23 (1): 95-100.