

波纹辊形参数对轧制 Cu/Al 层合板翘曲的影响

冯光^{1,2,3}, 张恒¹, 郜豪杰¹, 申依伦¹

(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. 太原理工大学 先进成形与制造技术中澳联合研究中心, 山西 太原 030024)

摘要: 采用传统方法轧制 Cu/Al 层合板的过程中易出现翘曲变形, 新型波纹辊轧制对改善其翘曲变形具有积极作用, 为探究波纹辊形参数对轧制 Cu/Al 层合板的翘曲的影响规律, 借助数值模拟方法, 研究了轧辊波纹幅值与周期对轧制 Cu/Al 层合板翘曲的影响。结果表明: 对于给定初始厚度的 Cu/Al 层合板, 其翘曲曲率随着波纹幅值的增大先减小后增大, 随着波纹周期的增大而增大, 其中, 波纹幅值为 0.2 mm、波纹周期为 π mm 的波纹辊轧制的 Cu/Al 层合板的翘曲曲率最小。研究结果可为制备高板形质量的 Cu/Al 层合板提供技术参考。

关键词: 波纹辊; 轧制; Cu/Al 层合板; 翘曲; 波纹幅值; 波纹周期

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.014

中图分类号: TG335.1

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0106-08

Influence of corrugated roller profile parameters on warpage of rolled Cu/Al laminates

Feng Guang^{1,2,3}, Zhang Heng¹, Gao Haojie¹, Shen Yilun¹

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

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

3. TYUT-UOW Joint Research Center of Advanced Forming and Manufacturing, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Warpage deformation is prone to occur during the traditional rolling process of Cu/Al laminates, and the new corrugated roller rolling has a positive effect on improving the warpage deformation. Therefore, in order to explore the influence laws of corrugated roller profile parameters on the warpage of rolled Cu/Al laminates, with the help of numerical simulation method, the influences of corrugation amplitudes and period of roller on the warpage of rolled Cu/Al laminates were studied. The results show that for Cu/Al laminates with a given initial thickness, the warpage curvature first decreases and then increases with the increasing of corrugation amplitude, and increases with the increasing of corrugation period. When the corrugation amplitude of corrugated roller is 0.2 mm and the corrugation period is π mm, the Cu/Al laminate rolled has the smallest warpage curvature. The research results can provide technical reference for the preparation of Cu/Al laminates with high quality of plate shape.

Key words: corrugated roller; rolling; Cu/Al laminates; warpage; corrugation amplitude; corrugation period

Cu/Al 层合板兼具了铜的高强度、高导电导热性与铝的质轻、耐腐蚀等优点, 在航天、航空、汽车、电子、医疗等领域具有广阔的应用前景^[1-2]。Cu/Al 层合板的制备方法主要有轧制复合法、爆炸复合法、挤压法和铸轧复合法等, 其中, 轧制复

法具有工艺简单、效率高、成本低等特点, 是目前应用较广泛的制备方法^[3-5]。

采用传统平辊轧制 Cu/Al 层合板, 极易朝铜板侧翘曲, 成为影响层合板板形质量的重要缺陷。关于轧制金属层合板翘曲问题, 学者做了大量研究。谢红飙等^[6]研究了轧制 Al/Mg 层合板翘曲问题, 认为异种金属在轧制方向塑性变形不协调会引起层合板两侧应力不平衡, 使其向应力较小的金属一侧弯曲, 可通过预加热应力较小金属一侧轧辊的方法减小层合板翘曲。何冰冷等^[7]分析了辊速比对异步轧制不锈钢/碳钢层合板翘曲的影响, 认为调节难变形

收稿日期: 2023-05-24; 修订日期: 2023-09-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (52074190); 山西省留学回国人员科技活动择优资助重点项目 (20220007); 山西省科技重大专项资助项目 (20181101008)

作者简介: 冯光 (1983-), 男, 博士, 副教授

E-mail: feng_guang@yeah.net

金属侧的轧辊速度略大于易变形金属侧可减小层合板头部翘曲。于孟等^[8]研究了不锈钢/碳钢层合板翘曲行为,发现层合板在轧制复合过程中易产生塑性延伸不均匀,导致其沿轧向发生翘曲。Wang C H 等^[9]建立层合板翘曲解析力学模型,获得了层合板沿轧制方向的不均匀延伸与翘曲程度的定量关系,指出层合板翘曲高度与其上下表面金属延伸差、厚度比呈正比关系,与厚度呈反比关系。近年来,黄庆学等^[10]提出了一种新型波纹辊轧制复合法,采用波纹辊+平辊组合方式轧制双金属层合板,轧制过程中将难变形金属板材置于波纹辊侧,得到上表面和结合界面为波纹面而下表面为平面的层合板,其轧制原理及轧后层合板截面组元材料分布如图 1 所示。前期,Wang T 等^[11]、Li S 等^[12]与刘畅等^[13]采用波纹辊轧制复合法分别轧制 Cu/Al、Mg/Al 与 Ti/Al 层合板,发现波纹辊辊面周期性波纹结构可促进难变形金属延展,有助于减小金属层合板翘曲。但是,关于波纹辊辊形参数对轧制 Cu/Al 层合板翘曲变形的影响未有相关系统的研究报道。

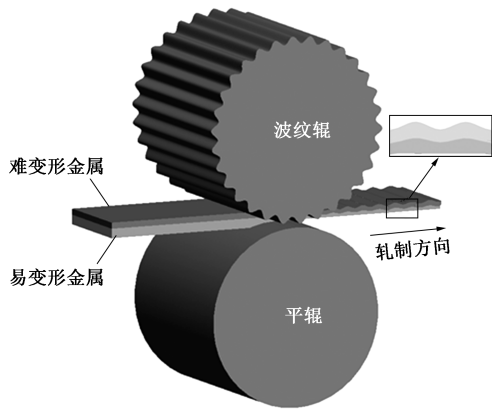


图 1 波纹辊轧制原理图及轧后层合板截面组元材料分布
Fig. 1 Principle diagram of corrugated roller rolling and component material distribution on section of laminates after rolling

本文利用数值模拟方法,研究了不同波纹幅值与周期的波纹辊对轧制 Cu/Al 层合板翘曲的影响,并通过轧制实验制备了板形平直的 Cu/Al 层合板。研究内容为波纹辊轧制高板形质量的 Cu/Al 层合板提供了技术参考。

1 有限元模型的建立

1.1 建立几何模型

轧制前后 Cu/Al 层合板的宽度基本不变,为提升模型计算效率,建立波纹辊轧制 Cu/Al 层合板的

二维数值模拟模型,如图 2 所示。波纹辊的平均直径与平辊直径均为 $\Phi 150\text{ mm}$,组元金属板坯的长度均为 100 mm ,总厚度为 2.5 mm 。Cu 为覆板材料,其厚度占比通常不超过 50%,因此将铜板厚度设置为 1 mm 。铜板与铝板材料的物理性能参数如表 1 所示。

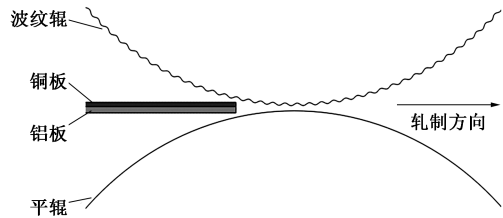


图 2 波纹辊轧制 Cu/Al 层合板几何模型

Fig. 2 Geometric model of Cu/Al laminates by corrugated roller rolling

表 1 材料物理性能参数

Table 1 Physical property parameters of materials

材料	弹性模量/GPa	泊松比	屈服强度/MPa	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)
Cu	115	0.325	90	8.98
Al	68	0.350	79	2.70

1.2 轧制参数设定与网格划分

轧制过程中,轧辊的变形可忽略不计,故将其设置为刚体。板材与轧辊的接触面采用库伦摩擦模型,铜板与波纹辊、铝板与平辊间的摩擦因数分别设定为 0.15 和 0.30。本文主要研究不同辊形参数下 Cu/Al 层合板的翘曲规律及其上下表面的形变情况,铜板与铝板的接触界面对其影响较小,故将其设置为绑定。取轧后层合板厚度最大与最小处压下率的均值,记作平均压下率,其值为 40%。轧制速度为 $125\text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

铜板与铝板采用一阶减缩积分 CPE4R 单元进行网格划分。辊面波纹结构是波纹辊轧制复合法的关键所在,划分网格时应确保网格大小能真实反应波纹辊辊缝中金属塑性变形情况。经多次实验,将铜板划分为 2500 个均匀单元与 3006 个节点,将铝板划分为 3500 个均匀单元与 4008 个节点较为合理。

1.3 有限元模拟方案

波纹辊辊面波纹结构采用正弦曲线,其主要参数为波纹幅值与波纹周期。采用控制变量法先分析波纹幅值对层合板翘曲的影响,根据已有经验将波纹周期设定为 $\pi\text{ mm}$,选取系列波纹幅值进行模拟,幅值设置如表 2 所示,其中幅值为 0.0 mm 时,为传统平辊轧制。待其分析完成,选取较优的波纹幅值参数,分析波纹周期对层合板翘曲的影响规律,设置系列波纹周期如表 3 所示。

表 2 波纹幅值设置 (mm)

Table 2 Setting of corrugation amplitudes (mm)

序号	波纹幅值
1	0.0
2	0.1
3	0.2
4	0.3
5	0.4
6	0.5

表 3 波纹周期设置 (mm)

Table 3 Setting of corrugation periods (mm)

序号	波纹周期
1	π
2	2π
3	3π
4	4π
5	5π

2 层合板翘曲曲率计算方法

为了更直观地表征不同辊形参数下 Cu/Al 层合板翘曲程度的变化,本文参考了宜亚丽等^[14]计算层合板翘曲的方法。在轧后层合板的铝侧表面两端与中间各取一点,分别记作 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$ 、 $C(x_3, y_3)$,具体取点位置如图 3 所示。按照式 (1) 计算得到层合板翘曲曲率 k 。

$$\frac{1}{k^2} = \rho^2 = (x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 \quad (1)$$

式中: i 为点的编号, $i=1, 2, 3$, 分别对应点 A 、 B 、 C ; x_0 、 y_0 分别为圆心 O 的横纵坐标; ρ 为 Cu/Al 层合板的翘曲半径。

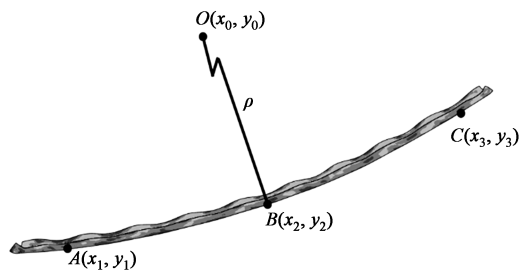


图 3 层合板翘曲曲率计算取点位置

Fig. 3 Point positions for warpage curvature calculation of laminates

规定层合板翘向铜板侧时,翘曲曲率为正,反之,为负。根据工业生产对轧制金属板材的平直度要

求,当 $|k| \leq 1.5 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$ 时,即可认定为平板。

3 数值模拟结果分析

3.1 波纹幅值对 Cu/Al 层合板翘曲的影响

图 4 给出了不同波纹幅值的波纹辊轧制 Cu/Al 层合板翘曲曲率的变化情况,由图 4 可知, Cu/Al 层合板翘曲曲率随着波纹幅值的增大先减小后增大。波纹幅值为 0.0 mm 时,即传统平辊轧制,层合板的翘曲曲率最大,为 $13.42 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$;波纹幅值为 0.2 mm 时,层合板的翘曲曲率最小,为 $1.57 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$,翘曲曲率减小至前者的 11.7%。结合图 5 中不同波纹幅值下 Cu/Al 层合板截面组元材料分布情况分析发现,波纹辊轧制 Cu/Al 层合板翘曲曲率的变化与之相关。波纹幅值为 0.1、0.2 mm 时(图 5b、图 5c),层合板截面组元材料分布为铜侧波峰与结合界面波谷对应、铜侧波谷与结合界面波峰对应的交替形式,且层合板翘曲曲率随着波纹幅值的增大而减小;波纹幅值为 0.3、0.4 与 0.5 mm 时(图 5d、图 5e、图 5f),层合板截面组元材料分布为铜侧波峰与结合界面波峰对应、铜侧波谷与结合界面波谷对应的交替形式,且波纹幅值越大,对应形式越明显,层合板的翘曲曲率越大。

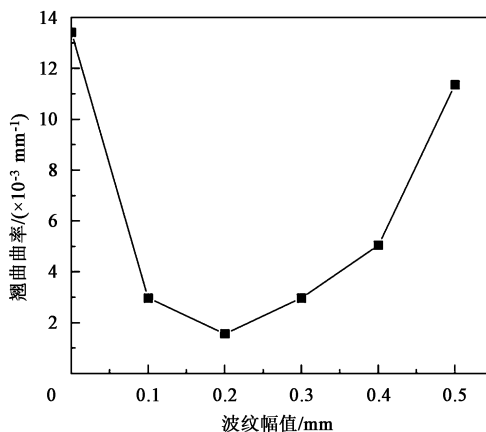


图 4 不同波纹幅值下 Cu/Al 层合板翘曲曲率

Fig. 4 Warpage curvatures of Cu/Al laminates under different corrugation amplitudes

金属层合板沿轧向延伸的分布形式及其上下表面的延伸差是导致层合板翘曲的根源^[9]。提取轧后层合板上下表面两个周期长度内节点的轧向应变表征层合板表面轧向的延伸情况,分析波纹辊形参数影响层合板翘曲曲率的原因,图 6 为波纹辊轧制 Cu/Al 层合板轧向应变分布云图及其应变提取区域示意图。

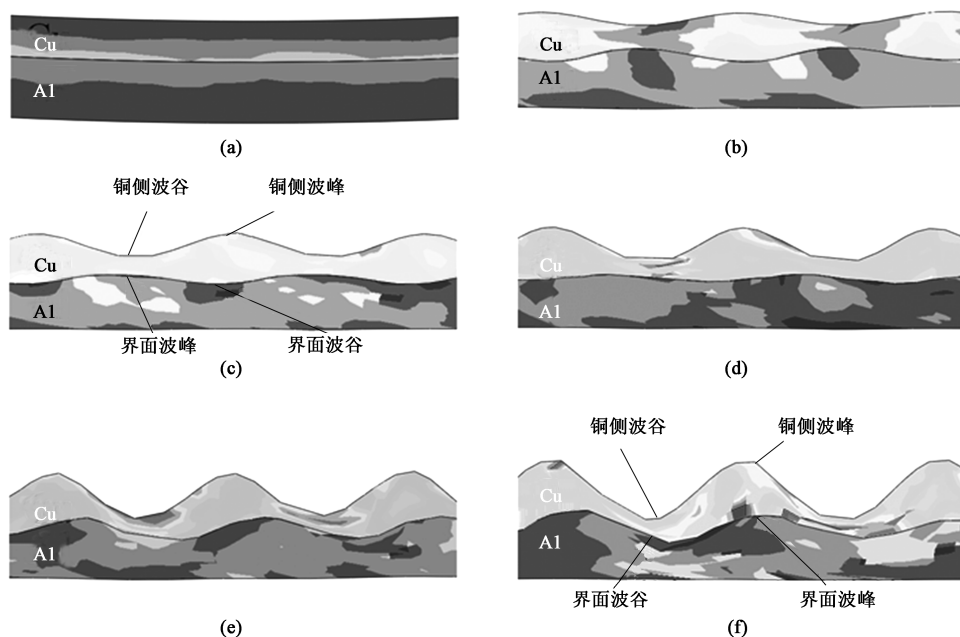


图 5 不同波纹幅值下 Cu/Al 层合板截面组元材料分布

(a) 0.0 mm (b) 0.1 mm (c) 0.2 mm (d) 0.3 mm (e) 0.4 mm (f) 0.5 mm

Fig. 5 Component material distributions on section of Cu/Al laminates under different corrugation amplitudes

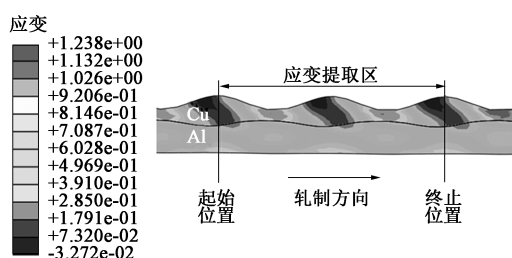


图 6 波纹辊轧制 Cu/Al 层合板轧向应变分布云图及应变提取区域示意图

Fig. 6 Strain distribution nephogram along rolling direction and schematic diagram of strain extraction area for rolled Cu/Al laminates by corrugated roller

图 7 为不同波纹幅值的波纹辊轧后 Cu/Al 层合板上下表面两个周期长度内对应节点的轧向应变。其中图 7a 为传统平辊轧制，其铜侧的应变始终小于铝侧，且二者的平均应变差维持在 0.36 左右，说明采用传统平辊轧制 Cu/Al 层合板时，两金属板的轧向延伸差始终存在且数值较大，致使层合板严重翘向铜侧。在图 7b~图 7f 中，Cu/Al 层合板上下表面的轧向应变值均出现周期性变化，且铜侧的变化幅度较大，局部区域应变大于或等于铝侧，这与传统平辊轧制显著不同，铜侧局部区域发生大变形，有利于减小难变形铜板与铝板之间的延伸差，从而减小层合板翘曲。另外，波纹幅值为 0.1 与 0.2 mm 时，约 1/2 长度区域内铜侧的应变大于或等于铝侧；幅值为 0.3、0.4 与 0.5 mm 时，铜侧应变大

于或等于铝侧的区域长度逐渐减小。原因：幅值较小时，波纹辊辊面波纹结构主要促进铜板延展，使层合板截面组元材料分布为铜侧波峰与结合界面波谷对应、铜侧波谷与结合界面波峰对应的交替形式，较长区域内铜侧的应变大于或等于铝侧，大幅消减了两金属板间的轧向延伸差，层合板的翘曲曲率显著减小；幅值较大时，波纹结构的作用效果沿层合板厚度方向延伸，促进铜板与铝板同步延展，使层合板截面组元材料分布为铜侧波峰与结合界面波峰对应、铜侧波谷与结合界面波谷对应的交替形式，大部分区域中铜侧的应变仍小于变形抗力小的铝侧，未起到显著协调组元金属板间延伸差异的作用。

3.2 波纹周期对 Cu/Al 层合板翘曲的影响

通过 3.1 节的分析发现，波纹幅值为 0.2 mm 的波纹辊可大幅减小层合板的翘曲曲率，故基于该波纹幅值，研究不同波纹周期的波纹辊轧制对 Cu/Al 层合板翘曲曲率的影响，其变化情况如图 8 所示。由图 8 可知，Cu/Al 层合板的翘曲曲率随着波纹周期的增大而增大。结合图 9 分析可知，波纹周期为 π 和 2π mm 时，层合板截面组元材料分布形式发生转变，层合板的翘曲曲率显著增大，其与 3.1 节中截面组元材料分布形式改变导致层合板翘曲曲率增大的原因一致；周期为 3π 、 4π 与 5π mm，层合板截面组元材料分布均为铜侧波峰与结合界面波

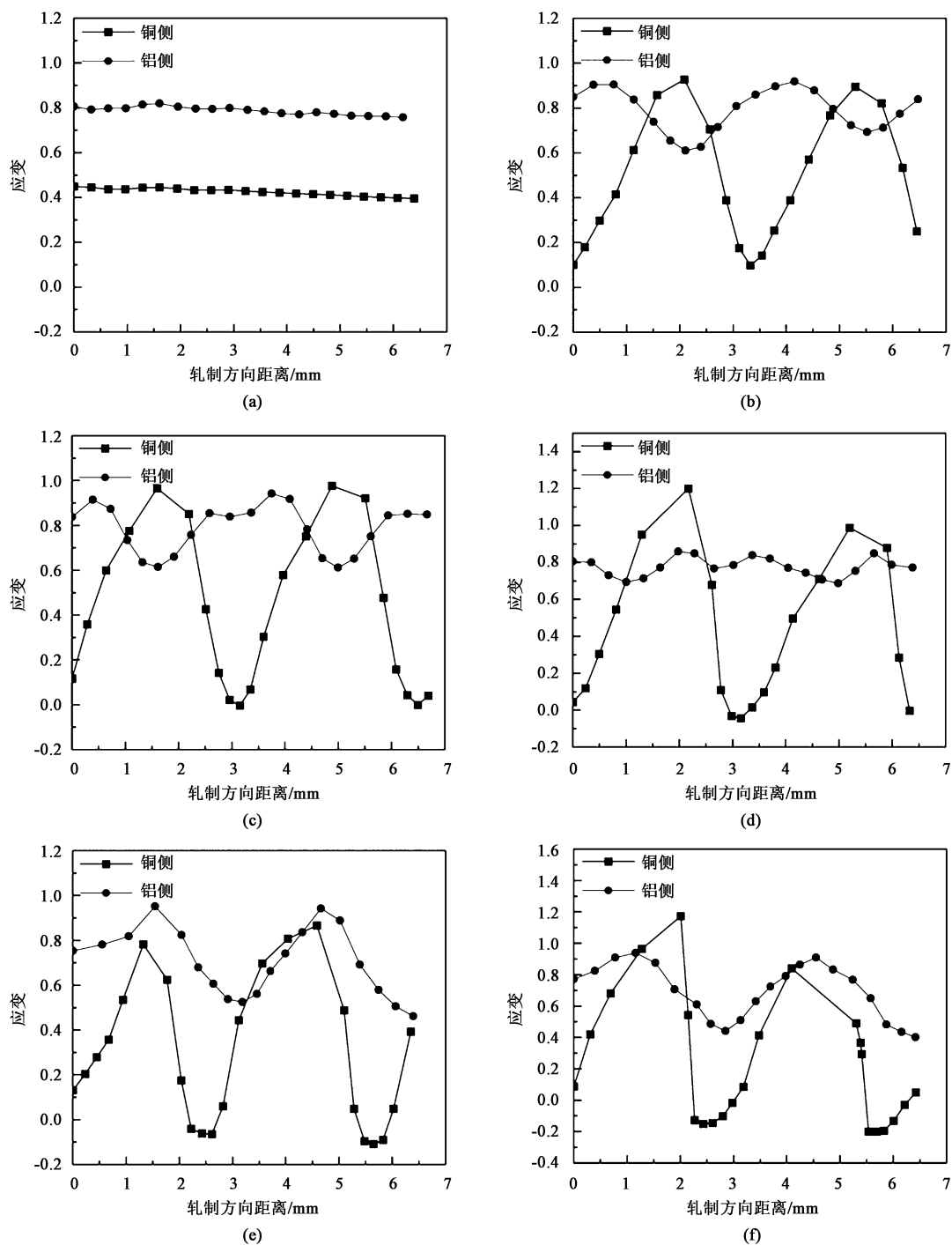


图 7 不同波纹幅值下 Cu/Al 层合板上下表面轧向应变

(a) 0.0 mm (b) 0.1 mm (c) 0.2 mm (d) 0.3 mm (e) 0.4 mm (f) 0.5 mm

Fig. 7 Strains along rolling direction on upper and lower surfaces of Cu/Al laminates under different corrugation amplitudes

峰对应、铜侧波谷与结合界面波谷对应的交替形式，层合板的翘曲曲率增大、幅度逐渐减小，直至与同等参数下传统平辊轧制 Cu/Al 层合板的翘曲曲率接近。

提取部分波纹周期下 Cu/Al 层合板上下表面两个周期长度内对应节点的轧向应变，如图 10 所示，

发现随着波纹周期的增大，层合板上下表面应变曲线的平均距离逐渐增大，且当波纹周期为 5π mm 时，其上下表面应变曲线保持着较大距离，平均应变差值为 0.33，与相同参数下传统平辊轧制层合板上下表面的平均应变差值相差 8%。说明波纹周期增大，层合板上下表面的金属延伸差增大，逐渐趋

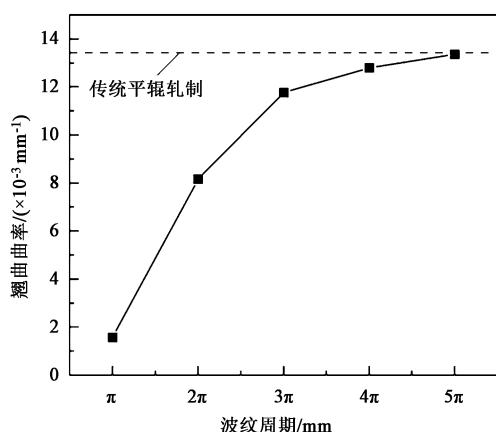


图 8 不同波纹周期下 Cu/Al 层合板翘曲曲率

Fig. 8 Warpage curvatures of Cu/Al laminates under different corrugation periods

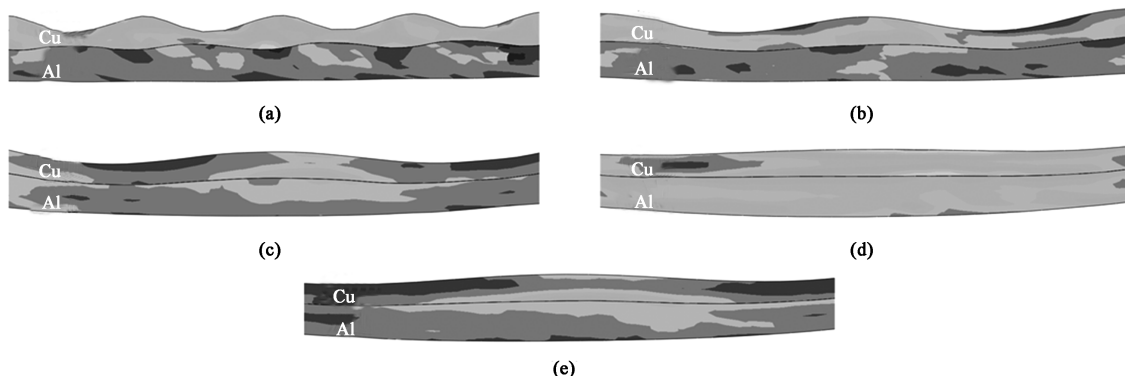


图 9 不同波纹周期下 Cu/Al 层合板截面组元材料分布

(a) $\pi \text{ mm}$ (b) $2\pi \text{ mm}$ (c) $3\pi \text{ mm}$ (d) $4\pi \text{ mm}$ (e) $5\pi \text{ mm}$

Fig. 9 Component material distributions on section of Cu/Al laminates under different corrugation periods

致, 波纹辊与平辊表面粗糙度分别为 1.3 与 $1.0 \mu\text{m}$ 。选择尺寸分别为 100 mm(长) \times 50 mm(宽) \times 1 mm(厚) 的铜板和同幅面 1.5 mm 厚的铝板为板坯, 组元材料的主要化学成分如表 4 所示。轧前对铜板与铝板的待结合表面进行打磨以去除氧化层, 并用酒精擦洗表面, 消除油污及金属碎屑后, 用细铝丝将金属板两头绑定, 完成制坯。

轧制时将铜板置于波纹辊侧, 以 40% 的平均压下率进行室温轧制, 得到如图 11 所示的 Cu/Al 层合板。将层合板的铜侧朝上平放于测试台上, 以其与测试平台的接触点为原点建立直角坐标系, 测量层合板的铝侧表面两端与原点间的距离, 记作 $A(x_1, y_1)$ 、 $B(x_2, y_2)$, 然后在层合板中间位置的铝侧表面再选一点, 测量其与原点间的距离, 记作 $C(x_3, y_3)$, 将 3 点坐标代入式 (1), 求得该层合板翘曲曲率为 $1.24 \times 10^{-3} \text{ mm}^{-1}$, 根据轧制金属板材的平直度要求, 可认定为平板。

于与传统平辊轧制层合板一致。其原因为: 波纹幅值不变, 周期增大, 波纹辊辊面波纹结构变化平缓, 其促使铜板延展的作用减弱, 且波纹周期过大, 会导致该作用基本失效。另外, 提取的层合板上下表面节点轧向应变是其在水平方向上的投影, 由于波纹周期增大, 层合板翘曲严重, 使图 10c 与图 10d 中层合板轧向应变值出现规律性下降, 但不影响观察同一位置上下表面应变差。

4 轧制实验

选取数值模拟中, Cu/Al 层合板翘曲曲率最小的波纹辊辊形参数进行轧制实验, 即波纹幅值与周期分别为 0.2 与 $\pi \text{ mm}$ 。轧辊直径与数值模拟中参数一

5 结论

(1) Cu/Al 层合板的翘曲曲率随着波纹幅值的增大先减小后增大。波纹幅值 $\leq 0.2 \text{ mm}$ 时, 波纹结构主要促进铜板金属延展, 使较长区域内铜侧的应变大于或等于铝侧, 大幅消减了两金属板间的轧向延伸差, 层合板的翘曲曲率随着幅值的增大而减小; 波纹幅值 $> 0.2 \text{ mm}$ 时, 波纹结构的作用效果沿层合板厚度方向延伸, 促进铜板与铝板延展, 大部分区域中铜侧的应变仍小于变形抗力小的铝侧, 未起到显著协调组元金属板间延伸差异的作用, 层合板翘曲曲率随着幅值的增大而增大。

(2) Cu/Al 层合板翘曲曲率随着波纹曲线周期的增大而增大。波纹幅值不变, 周期增大, 波纹辊辊面波纹结构变化平缓, 其促使铜板延展的作用减弱。

(3) 在不同波纹幅值与周期波纹辊轧制 Cu/Al

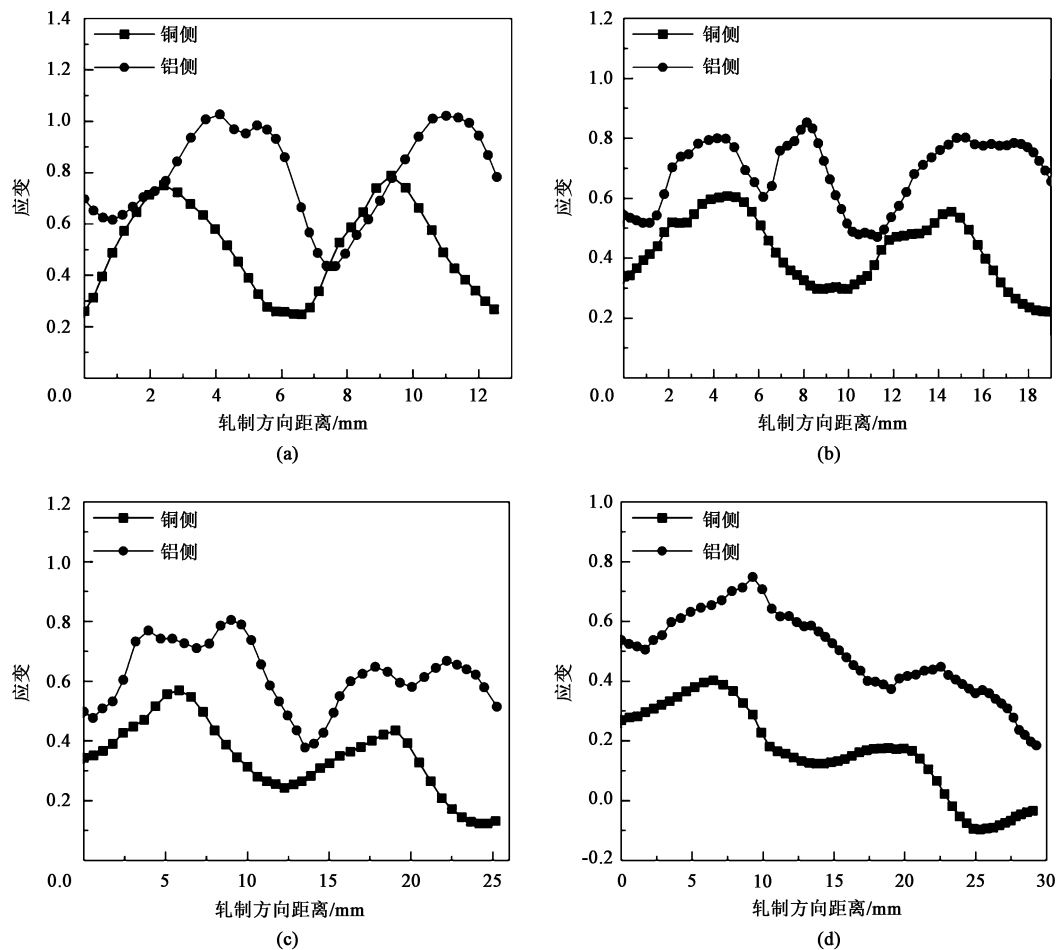


图 10 不同波纹周期下 Cu/Al 层合板上下表面轧向应变

(a) 2π mm (b) 3π mm (c) 4π mm (d) 5π mm

Fig. 10 Strains along rolling direction on upper and lower surfaces of Cu/Al laminates under different corrugation periods

表 4 材料的主要化学成分（%，质量分数）
Table 4 Main chemical compositions of materials
（%，mass fraction）

材料	Al	Si	Fe	其他
Al（1060）	99.60	0.11	0.25	0.04
材料	Cu	Fe	Pb	其他
Cu（T2）	99.90	0.005	0.005	0.01

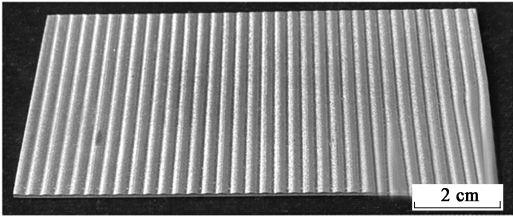


图 11 波纹辊轧制 Cu/Al 层合板

Fig. 11 Cu/Al laminates rolled by corrugated roller

层合板的数值模拟中，波纹幅值为 0.2 mm、周期为 π mm 的波纹辊轧制的 Cu/Al 层合板的翘曲曲率最

小。并选取该辊形参数对波纹辊进行轧制实验，得到了平直的 Cu/Al 层合板。

参考文献：

[1] 李华清, 尚郑平. 铜铝层状金属的研发与应用 [J]. 有色金属材料与工程, 2022, 43 (6): 40-46.
Li H Q, Shang Z P. Development and application of Cu-Al clad metals [J]. Nonferrous Metal Materials and Engineering, 2022, 43 (6): 40-46.

[2] 尚郑平, 王项, 范国栋, 等. 铜铝复合材料生产与应用 [J]. 中国有色金属, 2014, 530 (13): 45-46.
Shang Z P, Wang X, Fan G D, et al. Production and application of copper-aluminum composites [J]. China Nonferrous Metals, 2014, 530 (3): 45-46.

[3] 史豪杰, 丁旭, 罗海龙, 等. 异种有色金属复合板制备技术的研究进展 [J]. 热加工工艺, 2019, 48 (6): 1-5.
Shi H J, Ding X, Luo H L, et al. Research progress of preparation technology of heterogeneous nonferrous metal composite plate [J]. Hot Working Technology, 2019, 48 (6): 1-5.

- [4] 陈连生, 张鑫磊, 郑小平, 等. 轧制双金属复合板材的研究现状[J]. 稀有金属材料与工程, 2018, 47 (10): 3243-3250.
Chen L S, Zhang X L, Zheng X P, et al. Research status of bi-metal laminated composite plate prepared by rolling process [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2018, 47 (10): 3243-3250.
- [5] 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): 42-56.
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): 42-56.
- [6] 谢红枫, 郑阳, 郭允畅, 等. 轧制制备铝/镁复合板数值模拟和翘曲变形控制[J]. 精密成形工程, 2021, 13 (6): 42-48.
Xie H B, Zheng Y, Guo Y C, et al. Numerical simulation and warpage deformation control of rolled aluminum/magnesium composite plate [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (6): 42-48.
- [7] 何冰冷, 张心金, 何毅, 等. 碳钢/不锈钢复合厚板热轧头部翘曲有限元模拟[J]. 轧钢, 2016, 33 (2): 16-19.
He B L, Zhang X J, He Y, et al. Simulation of head warping in hot rolling of carbon steel and stainless steel clad plate [J]. Steel Rolling, 2016, 33 (2): 16-19.
- [8] 于孟, 王春海, 张晓峰, 等. 不锈钢/碳钢复合板平整轧制过程板形翘曲行为[J]. 钢铁, 2022, 57 (7): 106-114.
Yu M, Wang C H, Zhang X F, et al. Shape warping behavior of stainless steel/carbon steel clad plate during temper rolling [J]. Iron and Steel, 2022, 57 (7): 106-114.
- [9] Wang C H, Zhang Q D, Li H, et al. Warpage deformation behavior of metal laminates [J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 43 (3): 409-421.
- [10] 黄庆学, 朱琳, 李玉贵, 等. 一种轧制金属复合板带的方法[P]. 中国: 201410028776.4, 2014-04-23.
Huang Q X, Zhu L, Li Y G, et al. The invention relates to a method for rolling a metal composite plate strip [P]. China: 201410028776.4, 2014-04-23.
- [11] Wang T, Gao X Y, Zhang Z X, et al. Interfacial bonding mechanism of Cu/Al composite plate produced by corrugated cold roll bonding [J]. Rare Metals, 2021, 40 (5): 1284-1293.
- [12] Li S, Luo C, Bashir M U, et al. Interface structures and mechanical properties of corrugated+flat rolled and traditional rolled Mg/Al clad plates [J]. Rare Metals, 2021, 40 (10): 2947-2955.
- [13] 刘畅, 贾毅, 李莎, 等. 波纹辊冷轧钛/铝复合板的组织和力学性能研究[J]. 塑性工程学报, 2020, 27 (12): 66-72.
Liu C, Jia Y, Li S, et al. Study on microstructure and mechanical properties of cold rolled Ti/Al composite plate with corrugated roller [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2020, 27 (12): 66-72.
- [14] 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.

欢迎订阅《锻压技术》杂志(月刊)

国内外公开发行, 全国各地邮局均可订阅, 逾期未订上者可与编辑部联系邮购

《锻压技术》杂志 1958 年创刊, 中国机械工业联合会主管、中国机械总院集团北京机电研究所有限公司和中国机械工程学会塑性工程分会主办。本刊是全国锻压行业会刊, 全国中文核心期刊, 被国内外多个著名检索系统收录。突出技术内容, 注重技术和信息相结合, 全面反映锻压行业的技术进步和发展趋势。

主要栏目: 综述、锻造、板料成形、管材成形、挤压与拉拔、轧制、特种成形、装备与成套技术、模具、摩擦与润滑、加热与热处理、测试技术、节能技术、材料与成形性能、理论与实验研究、计算机应用、技术交流、标准化、行业信息等。

读者对象: 大专院校的师生, 金属塑性成形(锻压)领域的科研、设计、生产部门的工程技术人员以及中等以上文化程度的工人等。

本刊为月刊, 每月 25 日出版, 大 16 开本, 256 页。统一刊号: CN11-1942/TG。邮发代号: 2-322。

(一) 购买期刊: ● 每册定价: 25.00 元; ● 年定价: 300.00 元。

(二) 购买合订本: ● 1991-2011 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 110 元/本;

● 2012-2013 年合订本(每本包含全年 1-6 期杂志): 140 元/本;

● 2014-2018 年合订本(上册)(包含上半年 1-6 期杂志)、2014-2018 年合订本(下册)(包含下半年 7-12 期杂志): 180 元/本。

直接通过编辑部订阅者, 请与杂志发行部负责人林玉彤联系。并按编辑部地址汇款, 款到后我们会定期寄给您刊物。

邮局汇款信息:

地址: 北京市海淀区学清路 18 号北京机电研究所有限公司 709 室

邮编: 100083

收款人: 《锻压技术》编辑部

附言处: 请注明“订阅《锻压技术》”

联系人: 林玉彤 电话: 010-62920652-804

E-mail: fst_linyutong@163.com

《锻压技术》编辑部