

# 铝/钢轧制复合有限元二次开发模拟与实验研究

高勃兴, 邹德坤, 谢红飙, 肖宏, 朱宇飞

(燕山大学 国家冷轧板带装备及工艺工程技术研究中心, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要:** **目的** 针对铝/钢两种金属性能差异大, 轧制复合存在严重的变形不协调及结合强度低的问题, 研究轧辊同径与异径及单辊驱动对复合板协调变形及结合强度的影响。**方法** 通过有限元二次开发进行模拟建模, 并结合同步和异步轧制实验分析板翘曲机理。**结果** 与铝板接触的轧辊作为主驱动辊可使板变形更协调且结合强度更高, 变形翘曲度为 0.048, 结合强度为 34.2 MPa。**结论** 采用接触铝侧轧辊单侧驱动, 双金属界面实现复合的位置更靠近轧辊出口, 复合后的双金属界面间的剪应力和所受弯矩较小, 制备的铝/钢复合板变形协调性更好, 且结合强度更高。

**关键词:** 铝/钢复合板; 变形协调性; ABAQUS; 机理分析; 结合强度

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2021.06.007

**中图分类号:** TG335.81 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2021)06-0056-08

## Simulation and Experimental Study on Finite Element Secondary Development of Aluminum/Steel Rolling Composite

GAO Bo-xing, ZOU De-kun, XIE Hong-biao, XIAO Hong, ZHU Yu-fei

(National Engineering Research Center for Equipment and Technology of Cold Strip Rolling,  
Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China)

**ABSTRACT:** The work aims to study the influence of the same diameter and different diameter of the roll and the single roll drive on the coordinated deformation and the bonding strength of the composite plate, so as to solve the large difference in properties between aluminum and steel, the serious deformation incoordination and low bonding strength in rolling compound. Through secondary development of finite element modeling, the plate warpage mechanism was analyzed in combination with synchronous and asynchronous rolling experiment. The roller in contact with the aluminum plate as the main driving roller could make the plate deformation more coordinated. The bonding strength was higher. The deformation warpage was 0.048 and the bonding strength was 34.2 MPa. When the roll contacting the aluminum side is driven, the position of bimetal interface is closer to the exit of the roll. Moreover, the shear stress and bending moment between the composited bimetal interfaces are smaller. Aluminum/steel composite plate prepared by this method has better deformation coordination and higher bonding strength.

**KEY WORDS:** aluminum/steel composite plate; deformation compatibility; ABAQUS; mechanism analysis; bonding strength

铝/钢双金属复合板是一种以铝基合金为覆层材料<sup>[1-3]</sup>, 碳钢或低合金钢为增强体的金属复合板。铝/

钢复合板兼具钢的高强度和铝优良的导电性、导热性和耐腐蚀性等优点<sup>[4-6]</sup>, 被广泛应用于航空航天、国

收稿日期: 2021-07-06

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFA0707302); 河北省钢铁联合基金(E2019203466)

作者简介: 高勃兴(1995—), 男, 硕士生, 主要研究方向为金属复合材料异温异步轧制及变形协调性。

通讯作者: 谢红飙(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为复合材料轧制理论与技术。

防装备、医疗器械、汽车和家电等方面，受到世界各国的重视并得到了广泛应用<sup>[7-11]</sup>。由于铝/钢物理性能差异大，轧制复合时容易出现变形不协调而引起复合板轧后翘曲及结合强度低的问题，进而导致翘曲程度过大，板无法进入矫直机，也不方便进行退火处理，当板结合强度较低时，在矫直或退火过程中容易引起复合板开裂<sup>[12-13]</sup>。

目前实现异种金属复合常见的方法有爆炸复合法、轧制复合法和扩散焊接法等，其中，轧制复合法具有产品尺寸精确、复合材料性能均匀一致性好、生产成本低且效率高、易于大规模生产的优点。成熟的轧制复合工艺试验成本较高，利用有限元模拟轧制具有成本低、周期短、劳动强度低的优点，易于获取合理的轧制工艺。

有限元模拟可以准确分析金属轧制时的受力情况，可预测不同工艺下的轧后板型<sup>[14]</sup>，节约实验成本。在模拟异种金属轧制成形方面，许多学者采用有限元模拟轧制过程，采用接触面处理方式(包括共节点法、粘结法和自然接触法)<sup>[15]</sup>，共节点法和粘结法假设在轧制前已经实现了异种金属的复合，忽略了轧制复合前存在双金属相对滑动的情况，而自然接触法假设没有考虑轧制过程中双金属的复合问题。这几种常用的接触状态方法都不能合理地模拟双金属轧制过程。

为了准确模拟铝/钢轧制复合过程以及分析其内部应力状态，文中选用 ABAQUS 有限元软件，通过有限元二次开发，建立铝/钢轧制复合的模型，并采用异步轧制工艺，解决铝/钢复合板轧制变形不协调性问题。通过对模拟结果及提取的应力数据进行分析，确定最佳轧制工艺，达到复合板各层金属的协调变形，利用该方法成功制备出具有高结合强度的铝/钢复合板。

## 1 复合板的有限元模拟及分析

### 1.1 有限元模型的建立

对于复合板的轧制，由于其宽度方向尺寸远大于厚度方向，因此将复合板的轧制过程简化为无横向宽展的平面应变模型。文中接触属性设置选择法向接触属性，在进行接触判断时提供了经典摩擦模型的扩展版本，扩展包括对许用剪应力、各向异性等附加因素，满足了所有接触分析的适用性。法向的接触行为设置为“硬接触”，提供了以下两种法向判断模型如图 1 所示，其判断条件如式(1)时为分离状态，如式(2)时为接触状态。

$$P=0, h<0 \tag{1}$$

$$h=0, P<0 \tag{2}$$

式中： $P$ 为接触压力； $h$ 为接触判断处的相对距离。

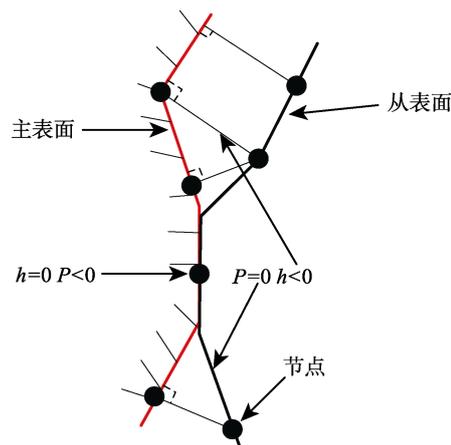


图 1 法向判断模型

Fig.1 Normal judgment model

接触判断的流程如图 2 所示，文中选用 ABAQUS/Standard 隐式求解器，通过用户子程序功能，在轧制区的接触判定中，利用接触属性设置中用户自定义的 FRIC 子程序定义双金属接触面的接触属性，即轧制区实现“粘着”状态作为判断双金属轧制复合的起始条件。轧制区外的轧件接触面双金属之间会存在界面间的滑动，轧制区内轧件由于两金属层性能差异较大，会存在类似轧制变形区的“前滑区”“粘着区”“后滑区”，为轧制制备双金属复合板提供了一种更合理的有限元模型，可以模拟出轧制铝/钢复合板从咬入到实现复合的过程，可以更好地了解轧制过程金属塑性变形的过程，以及轧制过程各接触面应力的变化过程，该模拟结果与实验结果更贴切。

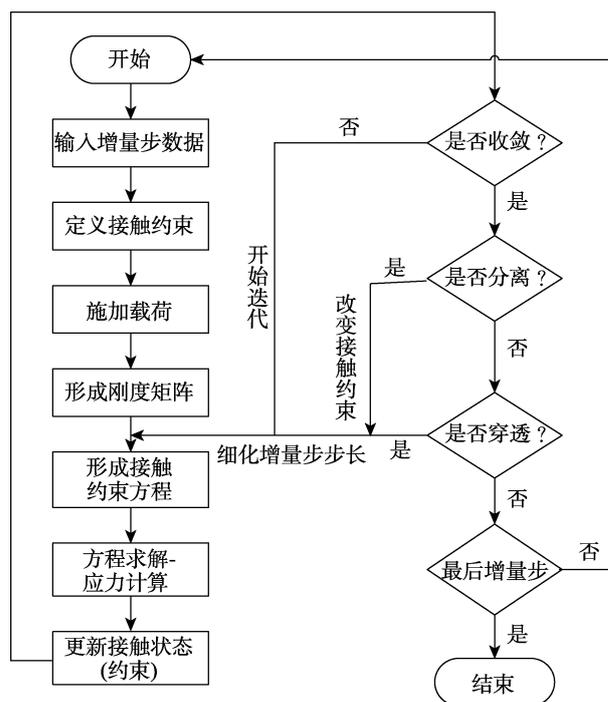


图 2 ABAQUS 增量步内接触判断

Fig.2 ABAQUS incremental intra-step contact judgment chart

假设模型中的轧辊为刚性辊,轧制过程不存在弹性变形,轧件设置为弹塑性体,在设置双金属接触界面的接触对时,选用刚度较大的钢层为主面,铝层为从面。文中在对轧件进行网格划分时,网格形状选择四边形,网格类型为 CPE4R4 结点双线性平面应变减缩积分单元,沿厚度方向分层,对参与接触判断的接触面网格进行更精细划分,本模型轧制过程轧件前部位于辊缝中,随着轧辊压下而实现咬入,故会对该部分网格细化。轧件长度为 50 mm,铝层厚为 0.5 mm,钢层厚度为 2 mm,异径和同径轧辊上下直径尺寸分别为  $\phi 191$  mm-200 mm,  $\phi 200$  mm-200 mm,速比分别为 0.955 和 1,轧辊角速度为 0.5 rad/s,根据轧制过程中不同工艺,通过调整轧辊尺寸,建立完整的数值模拟的几何模型如图 3 所示。

模拟轧制双金属复合板,需要对钢层和铝层设置不同的材料属性,为使模拟结果与实验结果相近,对实验所用的材料进行了拉伸试验,使用拉伸试验机测出材料的真实应力-应变曲线如图 4 所示,文中模型中双金属材料的塑性定义为各向同性,材料的主要物理参数见表 1。

ABAQUS 中用 3 种颜色分别表示 3 种接触状态,红色表示接触状态为粘着状态,绿色表示接触状态为

滑动状态,蓝色表示该处为分离状态,以此分析轧制过程中接触界面接触状态的变化过程。验证 FRIC 子程序的作用,使用 ABAQUS 内核程序双金属接触状态如图 5a 所示,加入 FRIC 子程序后的双金属接触界面状态如图 5b 所示。

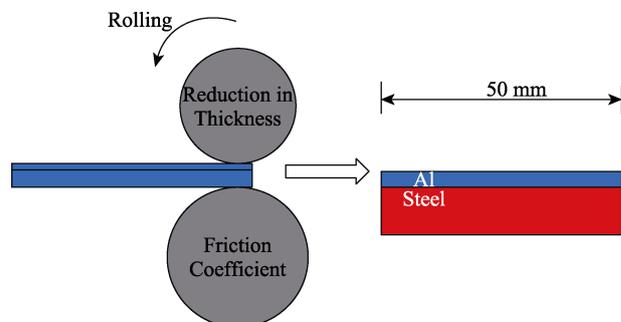


图 3 复合板轧制有限元模型

Fig.3 Finite element model of composite plate rolling

表 1 材料的主要物理参数

Tab.1 Main physical parameters of the material

材料	弹性模量/MPa	屈服强度/MPa	泊松比	密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
5052	69 000	159	0.32	2.7
Q195	210 000	195	0.3	7.8

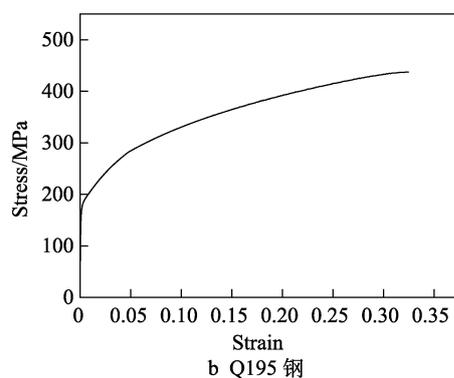
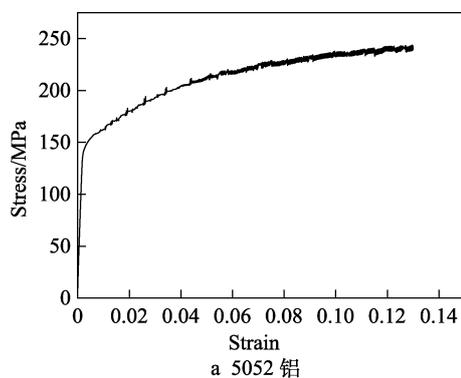


图 4 真实应力-应变曲线

Fig.4 True stress-strain curve

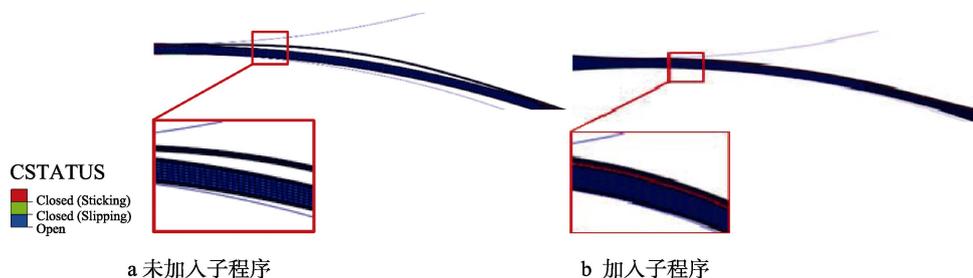


图 5 双金属接触面接触状态

Fig.5 Contact state diagram of bimetal contact surface

## 1.2 复合板模拟结果应力分析

文中以轧制区实现“粘着”状态作为判断双金属轧制复合的起始判据,以轧辊线速度和轧板速度相等

位置定义为中性点,即复合板过中性点即实现粘着。使用辊径为  $\phi 200$  mm-200 mm 的轧制模型对铝/铝及铝/钢复合板轧制过程进行数值模拟,轧后的 Mises 应力云图如图 6 所示,结果显示轧后铝/铝复合板平

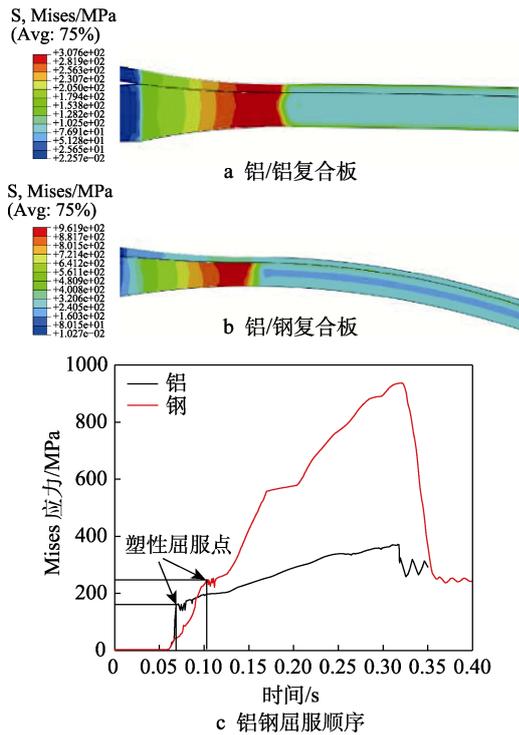


图 6 轧制区等效应力  
Fig.6 Equal effect diagram of rolling zone

直，铝/钢复合板向钢侧翘曲。

为了更好地分析铝/钢轧后翘曲原因，以铝/铝轧制复合作为对照。图 6a 为上、下层均为铝板时，双层铝板几乎同时进入塑性变形，且沿厚度方向应力分布上下基本对称，所以轧后复合板平直。当铝/钢轧制复合时，如图 6c 所示，铝板由于屈服强度较小，先进入塑性变形，钢板屈服强度高，后进入塑性变形，模拟结果显示见图 6b 由于变形不协调，轧后复合板出现了明显的向钢侧翘曲现象。

为了进一步分析铝/钢复合板轧后翘曲原因，提取了铝钢接触界面各层应力 ( $\sigma$  为轧向应力,  $\tau$  为剪应力) 分布情况。由轧向应力分布见图 7a 可知，随着轧制进行，铝/铝复合板的上、下金属层均受到较小的轧制方向拉应力，如图 7b 可知，所受剪应力大小基本一致；对于铝/钢复合板，轧后接触侧铝层受到轧制方向较大的压应力，钢层受到轧制方向较大的拉应力，轧制方向应力 (以下简称轧向应力) 极不对称，轧件出轧制区不受外力作用后，部分应力需要释放，复合板向钢侧弯曲。

在轧制双金属复合板时，存在两金属厚度和材料性能的不对称，而材料性能的不对称是影响轧后复合板翘曲情况的主要原因，轧件的轧制方向应力分布可以反映轧后板型的翘曲情况。以轧辊中心连线  $x=0$  为截面处，提取该截面轧制方向应力分布，如图 8 所示，在轧制铝/铝复合板时，截面轧制方向应力值在厚度中心线处近似对称，而轧制铝/钢复合板时，由于两种金属的性能差异较大，铝层易变形，整个厚度方向

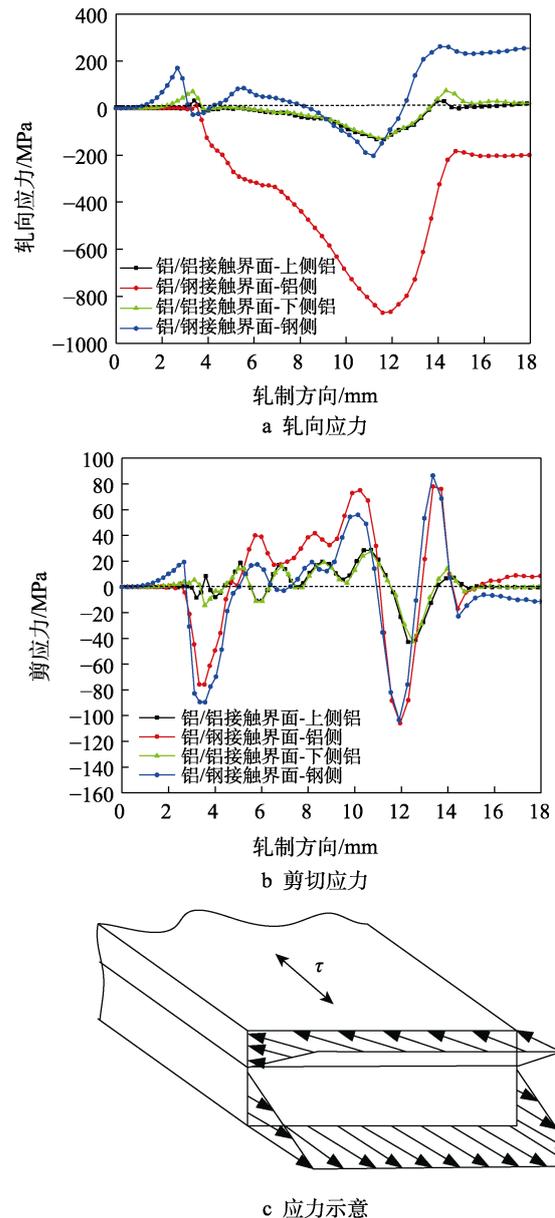


图 7 铝/铝和铝/钢复合板接触面应力分布  
Fig.7 Stress distribution on the contact surface of aluminum/aluminum and steel/aluminum composite plates

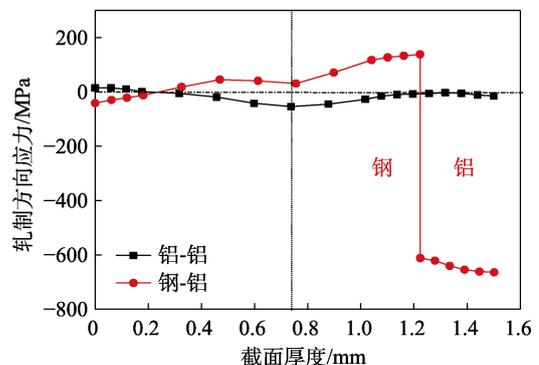


图 8 铝/铝和铝/钢复合板在  $x=0$  截面轧制方向应力  
Fig.8 Stress diagram of aluminum/aluminum and steel/aluminum composite plates at cross section rolling direction when  $x=0$

受到较大的轧制方向压应力,接触界面钢层有抑制铝层的变形作用,钢层受到沿轧制方向较大的拉应力;在轧辊与钢层接触侧,钢层受到轧制方向的压应力,与轧后平直的铝/铝复合板轧向应力相比,铝/钢复合板应力在沿厚度方向分布严重不对称,即在铝/钢复合板截面存在较大的弯矩,随着轧制的进行,外力消失后部分应力释放,轧后的铝/钢复合板板型会出现较大弯曲。

图 9a—b 分别为同步轧制和异径轧制后铝/钢复合板翘曲示意图,异径轧辊尺寸为  $\Phi 191\text{ mm}-200\text{ mm}$ ,明显观察到同步轧制后的双金属复合板翘曲严重且紧贴轧辊,翘曲度测得数值为 0.1192,异径轧制后的双金属复合板与轧辊表面分离且翘曲明显减小,翘曲度测得数值为 0.0835;在异径轧制基础上,提出了单辊驱动轧制工艺,如图 9c 和 d 所示,分别为单辊上驱动和下驱动,上辊驱动轧制工艺可以显著改善铝/钢复合板翘曲度。单侧轧辊驱动的轧制方式如下:选择其中一个轧辊作为主动辊,沿轧制方向转动,另一个轧辊作为从动轧辊完成轧制过程。其他参数选择相同,只改变其中一个轧辊的工作状态,设定主动轧辊以  $0.5\text{ rad/s}$  的角速度旋转,从动轧辊释放转动方向的自由度。由图 9c 可知,单侧上轧辊作为主动轧辊驱动时,轧后复合板板形更加平直。

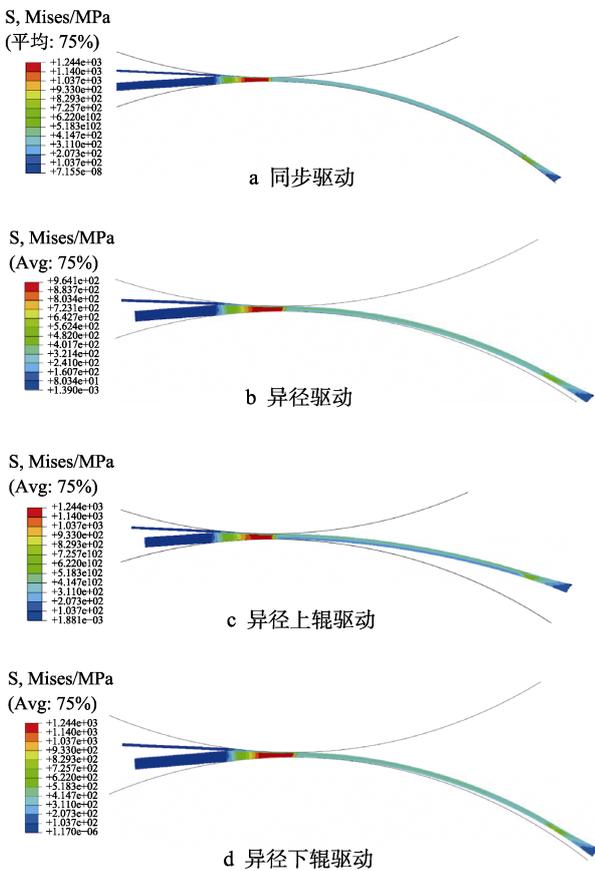


图 9 单辊驱动轧制铝/钢复合板

Fig.9 Single roller drive rolled steel/aluminum composite plate

为分析单辊驱动轧制对制备铝/钢复合板变形协调性的影响,提取各接触面的应力值,如图 10 所示。上辊驱动的轧制过程中,轧辊线速度的不同(主动辊的线速度大于从动辊的线速度)会影响轧制区轧件中性点的位置。由图 10a 中轧向应力分布可知,在轧辊出口处,与轧辊接触的铝层和钢层分别受到较小的轧向压应力和拉应力。由图 10b 剪应力分布可知,铝层接触的上侧轧辊作主驱动辊时,铝层和轧辊的接触面中性点(剪应力等于 0)位置靠近轧辊近出口处,即中性点前移,下侧轧辊的轧制线速度较小,与其接触的钢层速度大于轧辊速度的区域变长,即中性点后移;钢铝接触界面的铝层中性点同样前移,轧制中双金属的接触界面所受到的摩擦力大小相等,方向相反,故接触界面钢层的中性点与铝层中性点位置重合,界面实现复合的区域靠近轧辊出口。

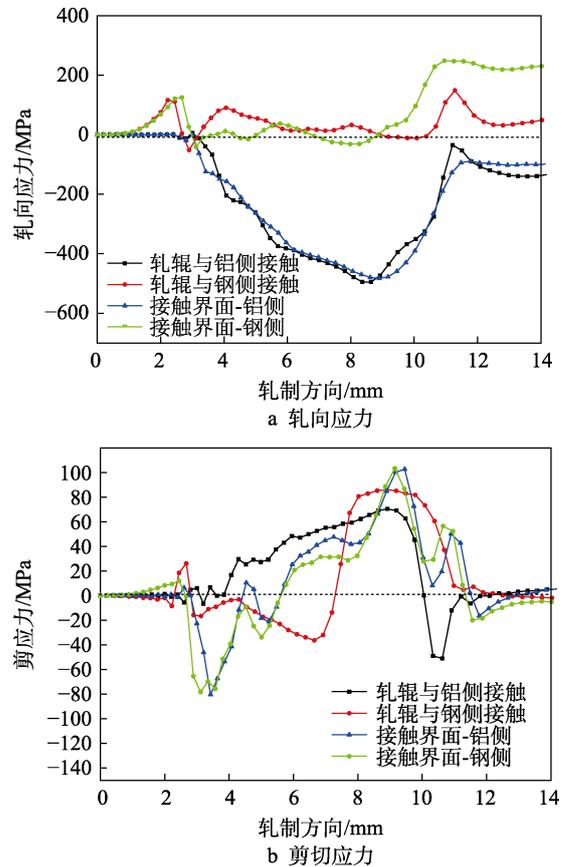


图 10 上辊驱动各接触界面应力

Fig.10 Stress diagram of each contact interface driven by the upper roller

下辊作为主辊驱动时提取的各接触面应力分布如图 11 所示,由图 11a 中轧向应力分布可知,在轧辊出口处,与轧辊接触的铝层和钢层分别受到较大的轧向压应力和拉应力。由图 11b 的剪应力分布可知,上侧轧辊为从动辊时线速度较小,与其接触的铝层速度较大大于轧辊速度的区域变大,中性点后移;同理钢层接触的下侧轧辊作为主动辊驱动时,下侧轧辊和钢

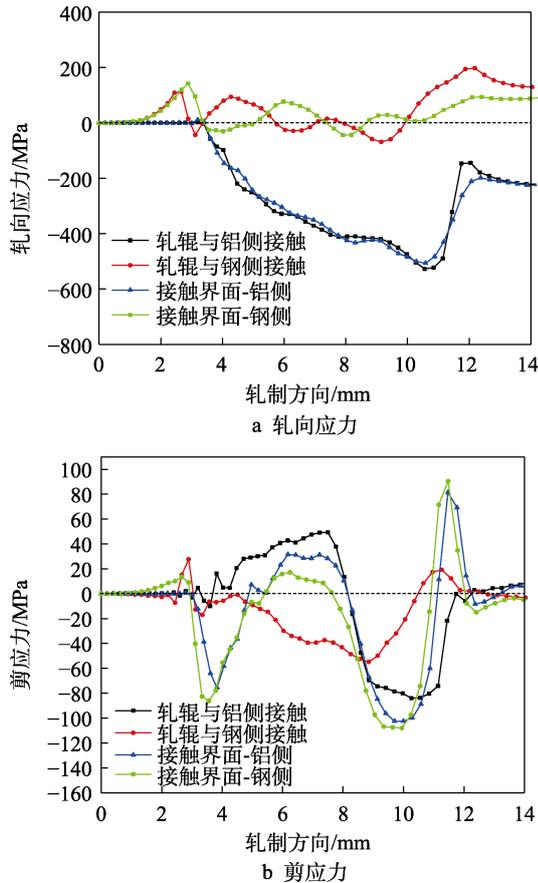


图 11 下辊驱动各接触面应力

Fig.11 Stress diagram of each contact surface driven by the lower roller

层接触面中性点前移。界面的中性点主要受到铝层的影响，故在接触界面的中性点同样后移，界面实现复合的区域远离轧辊出口，这与上轧辊单驱动结果相反，分析认为：复合区长度的增加加剧了铝板变形以及钢板的牵制作用。

提取上、下辊驱动轧辊中心连线  $x=0$  处截面的轧制方向应力分布如图 12 所示。上辊驱动时，铝层受到的轧制方向压应力较小，这是由于铝层直接与主

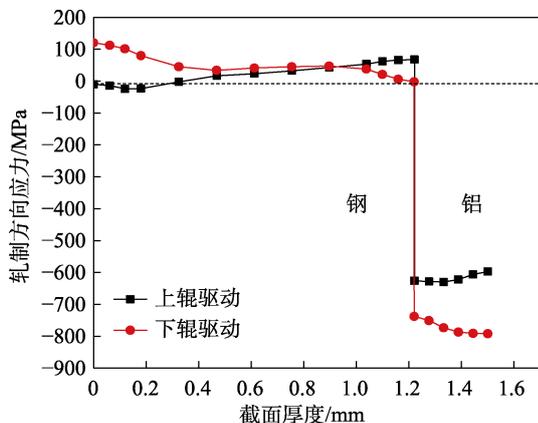


图 12 单辊驱动截面  $x=0$  处轧制方向应力

Fig.12 Rolling direction stress at the driving cross section of single roll when  $x=0$

动轧辊相接触，对铝层金属的流动有促进作用。当轧件离开辊缝后不再受到外力作用，厚度方截面所受的力和力矩应当为 0。随着轧制过程的进行，为满足外力为 0 的结果，轧辊中轧件所受应力离开轧辊后部分应力会逐渐释放，沿轧制方向受压处会逐渐延伸，受拉处会逐渐紧缩，从而使轧件逐渐向钢侧弯曲。上单辊驱动时，在轧件离开辊缝时截面弯矩值较小，在其他轧制条件相同的情况下，相比下单辊驱动，轧制后的铝/钢复合板变形协调性更好。

## 2 铝/钢复合板轧制实验与结果对比

文中实验为冷轧制备铝/钢复合板，实验材料选择了厚度为 0.5 mm 的 5052 铝板与厚度为 2 mm 的 Q195 钢板，均沿轧制方向取矩形尺寸为 50 mm×30 mm。实验前用 180 目砂纸打磨去除氧化层，并用酒精和丙酮去除表面油污，并迅速吹干表面组坯，再将钢板和铝板的一端，在钻床上进行钻孔，压下率为 60% 时，轧后实验和模拟结果如图 14 所示，实验结果与有限元模型基本一致（实验测量单元格间距为 1 mm）。对板型翘曲度情况进行描述，计算公式见式 (3)，翘曲测量如图 13 所示。

$$\gamma = \frac{h}{l} \tag{3}$$

式中： $\gamma$  为特定部分的翘曲度； $h$  为翘曲量，目标与参考对象之间的最大距离； $l$  为标在参考对象上的指定投影。

对实验所制备的铝/钢复合板进行剥离试验，剥离示意图及剥离强度曲线如图 15 所示，平均剥离强度如式 (4) 所示。异径和同径双辊同时驱动时，复合板的结合强度分别为 13.6 N/mm 和 5.1 N/mm。上、下侧单辊驱动时，测量复合板的结合强度分别为 34.2 N/mm 和 29.5 N/mm。由测得的剥离强度可知，单侧辊驱动时比同步和异径轧制时制备的铝/钢复合板剥离强度大，且上轧辊驱动时制备的铝/钢复合板剥离强度最大。

$$\text{平均剥离强度} = \frac{\text{平均载荷}}{\text{板宽}} \tag{4}$$

测得的翘曲度和剥离强度的关系成如图 16 所示，实验制备的双金属复合板随着翘曲度减小，变形协调性增加，界面剥离强度增大，结合强度增高。对比异径与同径驱动，异径单辊驱动轧制更有利于复合板变形协调。铝/钢复合板数值模拟翘曲度数值与实验轧后测得数值基本一致，误差范围为 10%。

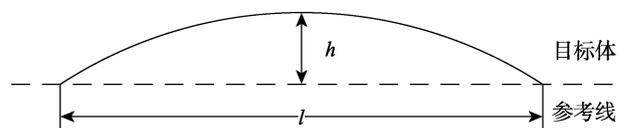
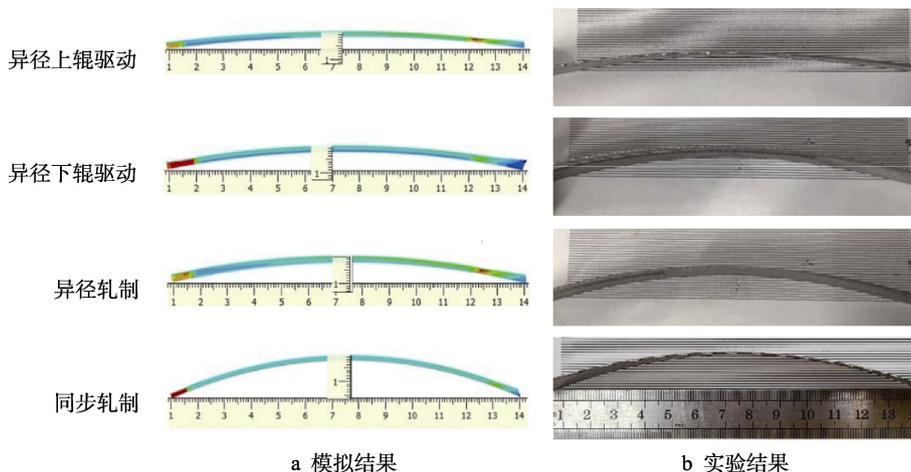


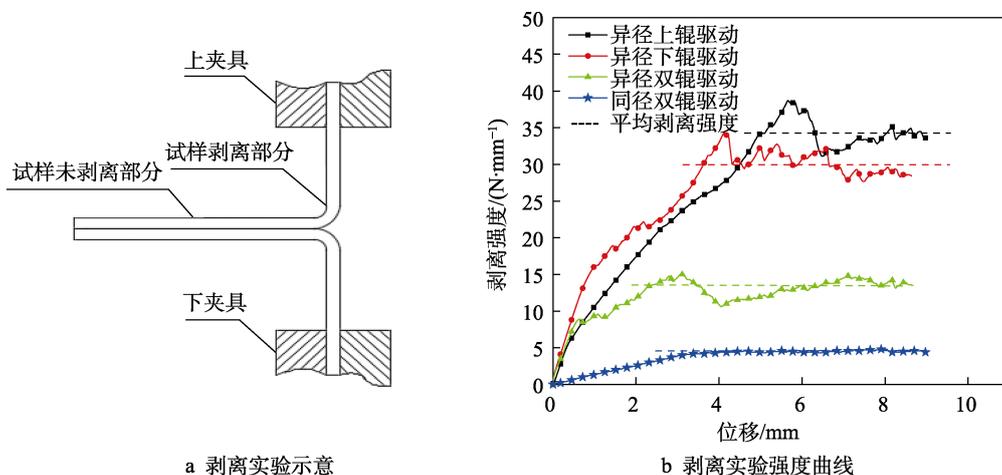
图 13 翘曲测量示意

Fig.13 Schematic diagram of warpage measurement



a 模拟结果 b 实验结果  
图 14 轧后实验和模拟结果对比

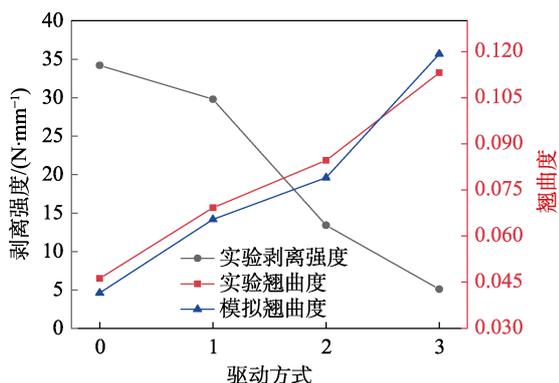
Fig.14 Comparison of test and simulation results after rolling



a 剥离实验示意 b 剥离实验强度曲线

图 15 剥离实验示意

Fig.15 Diagram of peeling test



注：横坐标 0 为异径上辊驱动；1 为异径下辊驱动；  
2 为异径双辊驱动；3 为同径双辊驱动

图 16 不同驱动方式下剥离强度与板形翘曲关系

Fig.16 Relationship between peeling strength and plate warpage under different driving modes

### 3 结论

1) 使用 ABAQUS 子程序 Fric 二次开发，设定

轧制过程中双金属接触界面出现的“粘着”接触状态作为判断双金属复合的判据,该数值模拟方式可以实现轧制过程中双金属接触面由“分离”到“复合”的过程,通过模拟可成功预测轧后复合板翘曲度。

2) 铝钢轧制时,双金属界面实现复合的位置越靠近轧辊出口,复合后的双金属界面间的剪应力越小且沿厚度方向所受弯矩越小,制备的铝/钢复合板变形协调性越好。

3) 与铝侧接触的轧辊为主动辊驱动时,更有利于提高铝/钢复合板变形协调性,轧后复合板更平直且结合强度更高。

#### 参考文献:

[1] 汪毅聪,张浪,肖虎,等. 铸造法制备金属陶瓷/钢基覆层材料的组织及性能[J]. 特种铸造及有色合金, 2020, 40(6): 664—667.  
WANG Yi-cong, ZHANG Lang, XIAO Hu, et al. Microstructure and Properties of Cermet/Steel-Based

- Cladding Materials Prepared by Casting Method[J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 2020, 40(6): 664—667.
- [2] LEE J, LEE S, LEE J, et al. Change of Microstructure and Hardness of Duo-Casted Al3003/Al4004 Clad Material during Extrusion Process[J]. Metals, 2020, 10(12): 1648.
- [3] UACJ Corporation. Patent Issued for Aluminum-Alloy Clad Material and Method of Manufacturing the Same (USPTO 10, 640, 852)[J]. News of Science, 2020(4): 852.
- [4] TETSUYUKI I, HIROSHI U, RYO M. Finite Element Analysis of Plastic Instability Phenomenon in Cold Rolling of Clad Sheets[J]. Procedia Engineering, 2017, 184: 306—312.
- [5] RICE M C, FLEISCHER C A, ZUPAN M. Study on the Collapse of Pin-Reinforced Foam Sandwich Panel Cores[J]. Experimental Mechanics, 2006, 46(2): 197—204.
- [6] 王冲, 王立颖, 赵鹤群, 等. 钢铝复合板梁式结构在车体上的应用[J]. 科技信息, 2012(35): 140. WANG Chong, WANG Li-ying, ZHAO He-qun, et al. Application of Steel and Aluminum Composite Plate Beam Structure on Car Body[J]. Science and Technology Information, 2012(35): 140.
- [7] 许爱军, 万海峰, 梁春祖, 等. 低温钛合金材料应用现状及发展趋势[J]. 精密成形工程, 2020, 12(6): 145—156. XU Ai-jun, WAN Hai-feng, LIANG Chun-zu, et al. Application Status and Development Trend of Low Temperature Titanium Alloy Materials[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(6): 145—156.
- [8] 刘岗. 钢铝复合轨在北京市轨道交通大兴线工程中的应用[J]. 铁道标准设计, 2011(1): 119—122. LIU Gang. Application of Steel and Aluminum Composite Rail in Beijing Metro Da Xing Line Project[J]. Railway Standard Design, 2011(1): 119—122.
- [9] 董成材, 周海涛, 李雪健, 等. SiC<sub>p</sub>/AZ91 复合材料大口径管材的热挤压成形研[J]. 精密成形工程, 2020, 12(5): 53—58. DONG Cheng-cai, ZHOU Hai-tao, LI Xue-jian, et al. Research on Hot Extrusion Forming of Large Diameter SiC<sub>p</sub>/AZ91 Composite Pipe[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2020, 12(5): 53—58.
- [10] 韩海东, 张鹏, 杜云慧, 等. 钢背铝基轴瓦材料复合新工艺探索[J]. 内燃机配件, 2008(3): 18—21. HAN Hai-dong, ZHANG Peng, DU Yun-hui, et al. New Technology Exploration of Steel Back Aluminum Base Shaft Shingle Material Composite[J]. Internal Combustion Engine Accessories, 2008(3): 18—21.
- [11] 李奇涵, 王宝中, 高嵩, 等. 高强钢-铝合金材料的流动应力模型研究及应用[J]. 精密成形工程, 2021, 13(4): 121—126. LI Qi-han, WANG Bao-zhong, GAO Song, et al. Study on Flow Stress Model of High-Strength Steel and Aluminum Alloy in Clinching[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13(4): 121—126.
- [12] 代付荣. 镍-钢复合板复层裂纹开裂成因及解决方法[J]. 中国化工装备, 2019, 21(1): 23—26. DAI Fu-rong. Causes and Solutions of Crack in Nickel-Steel Cladding Plate[J]. China Chemical Equipment, 2019, 21(1): 23—26.
- [13] 侯美伶, 张艳, 孔祥伟, 等. SA387Gr11CL2 低碳合金钢 150 mm 复合板调质分层开裂原因分析和工艺改进[J]. 特殊钢, 2020, 41(2): 28—31. HOU Mei-ling, ZHANG Yan, KONG Xiang-wei, et al. Analysis and Process Improvement of Stratification Cracking of SA387GR11CL2 Low Carbon Alloy Steel Plate[J]. Special Steel, 2020, 41(2): 28—31.
- [14] 商存亮, 饶静, 杨立庆, 等. 薄规格特殊钢轧后板形研究与探讨[J]. 金属材料与冶金工程, 2019, 47(4): 38—41. SHANG Cun-liang, RAO Jing, YANG Li-qing, et al. Research and Discussion on Sheet Shape of Thin Special Steel After Rolling[J]. Metal Materials and Metallurgical Engineering, 2019, 47(4): 38—41.
- [15] 陈芳育, 李进, 邱玮楨, 等. 基于 Python 的 ABAQUS 二次开发在复合材料层合板冲击建模中的应用[J]. 装备环境工程, 2020, 17(9): 1—6. CHEN Fang-yu, LI Jin, QIU Wei-zhen, et al. Application of Python-Based ABAQUS Secondary Development in Impact Modeling of Composite Laminates[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(9): 1—6.