

# 不锈钢复合板多道次热轧工艺模拟试验研究\*

庞玉华<sup>1\*</sup>, 吴 成<sup>1</sup>, 万 宏<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 冶金学院, 陕西 西安 710055; 2. 中国航天科工集团 210 研究所, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 应用 Marc 弹塑性有限元软件建立了不锈钢复合板多道次二维热轧模型。通过对轧制过程温度场、应力场及应变场的计算分析, 结合提出的复合界面达到冶金结合的判定条件, 给出了确定最小累计变形率的方法, 同时结合实验条件制定了合理的轧制规程; 通过复合板轧制试验及相关组织性能测试结果分析, 验证了在不增加设备损耗和安全使用性能的情况下, 通过小的单道次压下率, 大的多道次累计变形率的轧制方法可以获得结合良好的不锈钢复合板。

**关键词:** 复合板; 界面; 累积变形; 有限元

**中图分类号:** TB332; TM25 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2006) 04-0020-04

## Study on multi-pass hot rolling technology of stainless clad sheet by simulation and experiment

PANG Yu-hua<sup>1</sup>, WU Cheng<sup>1</sup>, WAN Hong<sup>2</sup>

(1. School of Metallurgy, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an Shanxi 710055, China;

2. 210th Research Institute of CASC, Xi'an Shanxi 710061, China)

**Abstract:** The 2-D elasto-plastic finite-element model for the multi-pass hot-rolling process of stainless clad sheet is established using software MARC. According to the calculation and analysis about the distribution of temperature field, equivalent stress and strain, combined with the preset more refined metallurgy bonding condition at interface of clad sheet, the method of minimum accumulative deformation ratio is proposed and the right rolling parameter suitable for experiment is also put forward. At the same time, the reasonable rolling rule is established with the testing conditions. On the basis of rolling experiment result and the related structure performance test, the fair quality of stainless clad sheet can be guaranteed through the method of small single reduction ratio and large multi pass accumulative deformation ratio in the condition of original facilities consumption and safety.

**Keywords:** clad sheet; interface; accumulative deformation; FEM

## 1 引言

不锈钢复合板属于高附加值产品, 作为整体不锈钢的替代材料, 可应用于需求整体不锈钢的所有行业。目前, 研究多集中在爆炸复合方法, 但复合板尺寸偏小。关于热轧复合的研究很少, 特别是关于热轧复合的轧制工艺参数研究则更少。根据已有研究成果: 不锈钢复合板实现冶金结合需要 50% 以上的单道次压下率, 我国现有的热轧生产设备大多无法满足此要求。如果用小的单道次变形率、大的累计变形率, 在宽板轧机上能生产不锈钢复合板, 必将能大幅扩大我国不锈钢复合板生产能力, 减少

进口量, 带来显著的经济效益。因此, 本文应用大型有限元分析软件 MARC 为工具, 对不锈钢/碳钢热轧复合过程进行了弹塑性有限元数值模拟, 研究了变形区内应力应变、界面上和表面上的应力分布, 为制定热轧复合工艺提供了理论依据, 并通过试验检验了模拟工艺的可行性。

## 2 有限元模型的建立

(1) 根据轧制复合基本原理, 不锈钢复合板轧制工艺基本与单板轧制相同, 主要是组坯——加热——轧制等。但由于材料性能不同, 轧制时易出现弯曲, 因而拟采用对称叠轧方法。本文模拟参数: 基板: 材质 Q235; 厚 72mm; 宽 2200mm; 复板: 材质 304; 厚 14mm; 宽 2000mm; 边条: 材质 Q235; 厚 60mm; 宽 2200mm; 初始温度为 1200℃;

(2) 采用单板轧制时的假设条件, 建立 2D 有限单元模型。取样长度基板为 400mm, 复板为

\* 西安市工业攻关项目 (ZZ05059); 陕西省自然科学基金项目 (2004E119)。

\*\* 女, 41 岁, 博士, 副教授

收稿日期: 2005-08-18

340 mm, 边条为 20mm。以四边形等参单元划分, 其中上层基板划分了 1120 个单元, 下层复板划分了 272 个单元, 两个边条划分了 96 个单元, 总共为 1488 个单元。据文献 [4], 界面情况作如下处理: 对于 2D 模型, 上下层金属共用一条边界, 边界上划分相同单元数, 以保证变形过程中相对应节点上的应力、应变一一对应, 上下层单元相对距离为一极小值, 并将其设定为接触, 单元的划分如图 1 所示。

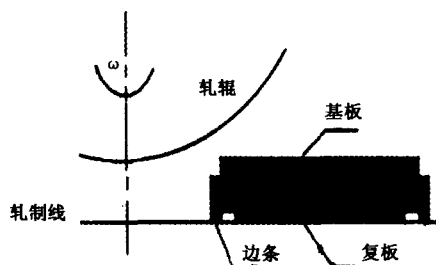


图 1 单元划分

Fig. 1 Unit demarcation

(3) 用多道次轧制复合板的模型对热轧全过程进行仿真, 没有看到相关报道。在多道次热轧过程中, 下一道次轧件温度、应力应变和形状与上一道次密切相关, 为此, 在分析过程中, 采用与轧制道次相对应的多个载荷工况, 建立多个轧辊, 推钢体, 并设定与轧件的接触关系; 同时, 改变轧辊的运动状况, 使轧辊转动的同时保持平动, 而轧件则保持静止。

### 3 计算结果及分析

根据实验轧机条件和轧制原理, 制定模拟轧制工艺规程为 86→83→77→64.5→53.5→43.5→34.5→26.5→20→17→14→12 (单位/mm)。实验轧机轧辊直径为 800mm, 辊身长度为 3330mm。

#### 3.1 温度场分布

限于篇幅, 示意第 1 道次轧后温度分布于图 2。计算结果表明: 对于每一道次而言, 当轧件进入轧制区后, 由于轧件与轧辊接触, 轧件表面温度持续下降, 界面处温度略有提升; 轧件出轧制区后, 表面温度由于中心热量向表面传递有所回升。另外, 随着轧制过程的进行, 轧件内部高向上的温度梯度逐渐减小。

轧件表面温度在第 1 道次轧后从 1200℃ 下降到 1181.1℃, 由于温升, 第 2 次进入变形区前, 升到 1181.29℃; 第 2 道次表面温度持续下降, 最低点温度为 1162.9℃, 到第 3 次进入变形区前, 上升为 1163.74℃; 第 3 道次表面温度下降到 1135.62℃, 进入第 4 道次前, 温度上升为 1137.78℃; 第 4 道

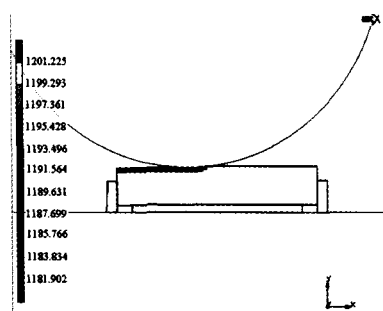


图 2 第 1 道次温度场分布

Fig. 2 Distribution of temperature filed of first pass

次, 表面温度下降到 1106.93℃ 并逐步上升为 1112.45℃。在第 5 道次, 由于轧制速度的提高, 轧辊转速从前 4 道次的 3.14 r/s 提高到 5.23 r/s, 表面温度的下降趋势减缓, 最低温度为 1099.81℃; 第 6 道次末表面温度为 1090.56℃; 第 7 道次末表面温度为 1095.8℃; 在随后的几个道次中, 轧件越来越薄, 轧制压力的不断提高使轧件与轧辊的摩擦力增大, 再加上轧件中心温度不断升高使传递到表面的热量不断增大, 补偿了轧件表面向环境传递的热量使得轧件表面的温度提高, 第 8 道次表面温度为 1110.2℃; 第 9 道次表面温度为 1129.3℃; 第 10 道次表面温度 1134.5℃; 最后, 终轧温度为 1145.3℃。

在双金属固相复合中, 界面温度是影响粘合重要因素之一。因此, 了解在往复轧制中界面处温度的变化规律非常重要。图 3 所示为第 1 及第 11 道次两种材料界面温度变化趋势。

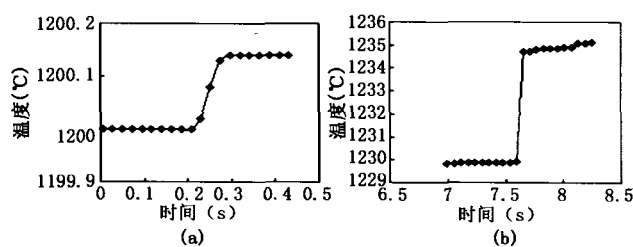


图 3 界面温度变化趋势

(a) 第 1 道; (b) 第 11 道次

Fig. 3 Changeable tendency of interface temperature

由图可知界面处的温度呈“S”形, 分为 3 个阶段, 进轧制区之前, 温度基本保持不变, 进入轧制区后温度变化比较剧烈, 温度在轧制过程中不但降低反而有所升高。这是由于界面处只发生热传导, 没有对流作用。随着轧制速度的提高, 这种温升现象比较明显。出轧制区之后, 温度基本保持不变。

第 1 道次界面温度比开轧温度升高 0.14℃, 为

1200.14℃；第2道次界面温度则持续升高，上升为1200.57℃；第3道次表界面温度上升为1202.85℃；在第4道次，界面温度上升为1205.13℃；在第5道次界面温度上升到1208.9℃。第6道次末界面温度为1211.81℃；第7道次界面温度为1217.9℃。第8道界面温度1220.4℃；第9道次界面温度为1225℃；第10道次界面温度为1230℃；最后一道次界面温度为1235℃。

### 3.2 应力分析

如图4所示，轧制变形区内的应力最大，等效应力的最大值出现在轧制中性面附近。在前几道次，界面处出现了应力分布不均匀，原因在于材料没有产生大面积粘合，在界面处有很强的摩擦作用。随着轧制的不断进行，界面处的等效应力值趋于均匀。

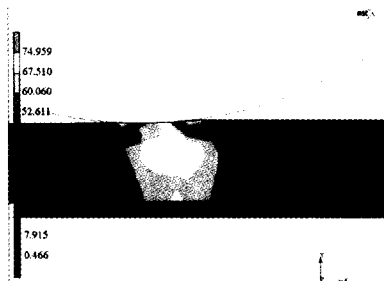


图4 第1道次轧后应力场分布

Fig. 4 Distribution of stress filed of first pass

另外，在应力云图中也可以发现，Q235的变形区大于304的变形区。304相对于Q235受一个 $R+h_1$ 轧辊作用，其中， $R$ 为实际轧辊半径， $h_1$ 为基板轧后高度。也就是说在不锈钢复合板轧制中，两层材料的接触弧长、接触面积和压下率是不同的。例如，首道次压下为3mm时，Q235轧前高度为72mm，轧后高度为69.5mm，实际分配的压下量为2.5mm；304不锈钢轧前高度为14mm，轧后高度为13.5mm，实际分配的压下量为0.5mm。各自压下量的比值与其高度的权值相接近，约为0.2。按照接触弧长的理论计算公式 $l=\sqrt{R*\Delta h}$ （ $\Delta h$ 为绝对压下量）可分别计算出每一道次两种材料的接触弧长。在第1道次中，Q235和304各自的接触弧长为31.62mm、15.32mm。这是复合板轧制区别于单板轧制的一个重要特点。

### 3.3 应变分析

如图5所示，应变分布基本与单板轧制类似。在前几道次，由于压下量比较小，变形不能深入到轧件中部。在轧制区中，最大的应变值出现在Q235层偏向于轧辊的上半部分，这是由于在轧辊的约束

下表层金属流动受限制所致。例如在第1道次，应变的最大值出现在Q235层偏向轧辊的1/4处，其值约为0.097，此时，表面层应变为0.075。

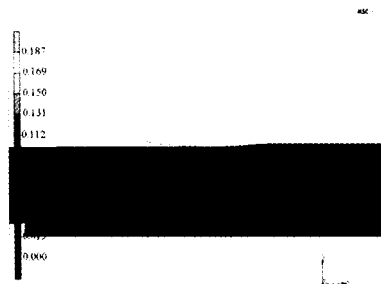


图5 第1道次轧后应变场分布

Fig. 5 Distribution of strain filed of first pass

当变形量逐渐增大时，变形逐渐渗透到轧件中部，同时，Q235端部长出304的那部分材料在轧制力作用下逐渐形成对不锈钢的包覆，其轧制类似于某些有色金属的包覆轧制。由于不锈钢和Q235材料性质的不同，在辊缝的约束下它们的受力状态必定有所差异，若不考虑它们之间的相对滑动，在完成复合之后，为了保证两层金属流动状态的一致性，必然要导致一个附加应力场。这个应力场与结合面的结合强度的关系，应能在应变图示中体现出来。当基层和复层结合完好成为一体，轧制时变形区内具有变形协调现象。或者说结合面处的两层金属之间存在着牵拉作用力，这个牵拉力不足以使结合破坏。另外，随着材料的不断延伸，界面处材料表面产生的氧化铁皮愈加弥散分布，绽露出更多的新鲜金属，产生的结合点也越多，结合强度就越高。

### 3.4 界面结合的判定

(1) 界面结合条件 确定层状板发生复合应满足下列3个条件：两种材料都进入塑性状态；两种材料的法向应力值达到或超过304不锈钢的在界面温度条件下的变形抗力；两种材料各自的变形量达到或超过某一值，并且应变平均值的差值要小于0.01。

(2) 应力判定 如图6所示为前3道次界面节点垂直压应力在变形区的分布图。根据图示，可计算出第1道次垂直方向压应力的平均值为23.85MPa，第2道次为41.9 MPa，第3道次为90.2 MPa。Q235和304在此温度时的屈服应力分别为46MPa和62MPa。仅按应力条件，不锈钢复合板在第3道次复合。

(3) 应变判定 图7为界面效应应变分布图。第1道次，由于不锈钢变形抗力比Q235变形抗力高，所以在变形区内Q235等效应变比304的大；在第2道

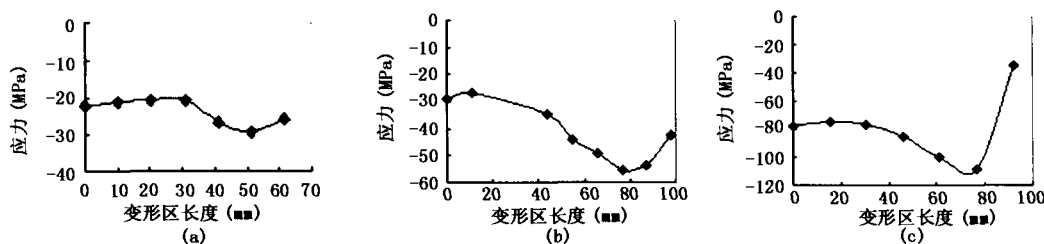


图6 界面处铅垂应力分布图

(a) 第1道次; (b) 第2道次; (c) 第3道次

Fig. 6 Vertical stress distribution of interface

次和第3道次, 应变存在着一定的错乱。这是因为Q235端部下垂及不锈钢不均匀变形所致; 第4道次两种材料界面处的应变接近一致; 到第5道次达到基本一致。第5道次的累计变形量为49.4%。

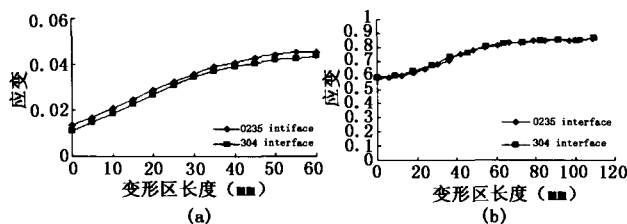


图7 界面应变分布图

(a) 第1道次 (b) 第5道次

Fig. 7 Distribution of interface strain

在第5道次, 304 不锈钢在变形区内的等效应变的平均值为0.766, Q235 的等效应变的平均值为0.759, 其差值为0.007。满足达到初始复合的条件。此时, 轧件的累计变形量达到49.4%。可以确定, 两种材料在第5道次达到贴和。因此, 根据界面结合条件, 轧件在第5道次实现复合。

#### 4 结论

依据模拟工艺参数, 在3300mm轧机上进行了小批量试验。力学性能测试均达到GB/T8165—97 I II级要求, 结合界面为细线状, 结合良好; 组织为再结晶组织 (图8); 拉伸、剪切试样均在复合界面处破断, 试样破断前均有明显塑性变形发生。对断口所作的电镜分析表明断口形貌韧窝丰富 (图9), 主要属于韧性断裂。结合界面两侧的金属原子相互扩散良好, 实现了冶金结合 (图10)。因此, 在不增加了设备损耗和安全使用性能的情况下, 通过单道次小的压下率, 大的累计变形率的方法获得了结合良好的不锈钢复合板。

#### 参考文献:

[1] Hwang Y M, Hsu H H, Hwang Y L. Analytical and experi-



图8 金相组织电镜照片 (×100)

Fig. 8 Metallurgy structure photographs of clad plates



图9 断口形貌 (×100)

Fig. 9 Break profile photographs of clad plates

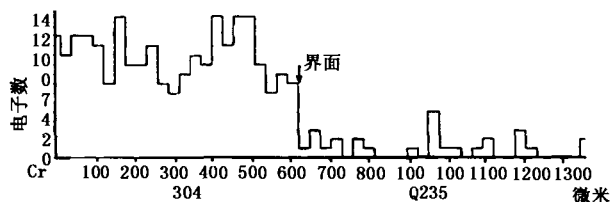


图10 界面扩散分析

Fig. 10 Analysis of interfacial spread of clad plates

mental study on bonding behavior at the roll gap during complex rolling of sandwich sheets [J]. International Journal of Mechanics Science, 2000, 42 (12): 2417-2437.

- [2] Tzou G Y. Theoretical study on the cold sandwich rolling considering coulomb friction [J]. Journal of Material at Praessing Technology, 2001, 114 (1): 41-50.
- [3] Lukaschkin N. D, Borissow A. P. Interface surface behaviour in the upsetting of sandwich metal sheets [J]. Journal of Material Technology, 1996 (61): 292-297.
- [4] 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): 1075-1076.