

Q235/304 碳钢-不锈钢复合板界面结合的有限元模拟

董 洁¹ 吴 成² 庞玉华¹ 刘晓燕¹

(1 西安建筑科技大学冶金工程研究所,西安 710055;2 西安交通大学材料科学与工程学院,西安 710055)

摘 要 应用 MARC 软件对 304 不锈钢(% :17 ~ 19Cr,8 ~ 11Ni)/Q235 碳钢(% :0.14 ~ 0.22C)复合板前 5 道次往复热轧过程(变形率% :3.4、10.4、25.0、37.8、49.4)进行有限元模拟,得出 Q235 钢和 304 不锈钢在界面处的应力和应变分布。模拟结果表明,在两种材料都进入塑性变形状态时,界面处法向应力值达到或超过 304 不锈钢界面温度下的变形抗力,且两种材料应变平均值的差值 ≤ 0.01 时即可复合,该模拟结果与生产试验结果一致;这说明使用小的单道次变形率,大的累积变形率可获得结合良好的碳钢/不锈钢复合板。

关键词 碳钢/不锈钢热轧复合板 界面结合条件 有限元模拟

Finite Element Simulation of Q235/304 Carbon Steel-Stainless Steel Clad Sheet Interface Combination

Dong Jie¹, Wu Cheng², Pang Yuhua¹ and Liu Xiaoyan¹

(1 Metallurgical Engineering Institute, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055;
2 School of Materials Science and Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710055)

Abstract The finite element simulation on initial 5 passes multi-pass hot rolling process with deformation 3.4% , 10.4% , 25.0% , 37.8% , 49.4% for Q235 carbon steel (0.14 ~ 0.22C) / 304 stainless steel (17 ~ 19Cr, 8 ~ 11Ni) clad sheet has been carried out by software MARC to get the distribution of stress and strain at interface of Q235 carbon steel and 304 stainless steel. Simulation results indicated that the stainless and carbon steel can be bonded as both materials being plastic stage and the normal stress at interface being up to or larger than the deformation resistance of 304 stainless steel, and the difference of average strain between both materials being less than 0.01. The simulation results were in agreement with that of pilot commercial production. It shows that using small reduction ratio at single pass with large cumulative deformation rate is available to get excellent combined carbon/stainless clad sheet.

Material Index Carbon/Stainless Steel Hot Rolled Clad Sheet, Interface Bonding Conditions, Finite Element Simulation

轧制复合法是生产复合板常用的方法之一^[1]。目前,热轧复合板大多采取首道次大压下量^[2](通常为 30% ~ 50%)的轧制,这对设备提出很高的要求,同时也增加了设备损耗和降低了设备的安全使用性能。另外,复合板热轧复合阶段的理论研究由于受传统方法的局限,难以对结合面上的应力应变的分布情况进行分析,因此对这方面的研究不是很多^[3-6],而复合界面的状态对复合板质量的影响尤为关键^[6]。本文应用 MARC 软件对不锈钢复合板小的单道次变形率、大的累积变形率的往复轧制过程进行有限元模拟,通过对界面处两种材料的应力应变场的计算,并结合现场实际,分析得出了两种材料实现复合的条件,这可为生产厂家充分利用现有设备和制定热轧复合的轧制规程提供理论依据。

1 有限元模型的建立

在复合板轧制过程中,由于组坯材料性能的不同,轧制时易出现翘曲,为避免出现此现象,提出了

盒式组坯、对称叠轧复合板方法。基板采用 Q235 碳钢板,复板为 AISI304 不锈钢板,周边焊以边条,其材质为 Q235。材料的化学成分如表 1 所示。

表 1 304 不锈钢和 Q235 碳钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of 304 stainless steel and Q235 carbon steel / %

钢号	C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P
304	≤ 0.07	≤ 1.00	≤ 2.00	17.00 ~ 19.00	8.00 ~ 11.00	≤ 0.025	≤ 0.035
Q235	0.14 ~ 0.22	0.12 ~ 0.30	0.40 ~ 0.65	-	-	≤ 0.055	≤ 0.045

在有限元模拟中,双金属复合板对称轧制可采用单板轧制时的一些假设条件,着重处理不锈钢复合板的材料属性,以及界面的接触情况。由于整个轧制过程为多道次往复热轧,所以在模拟过程中,建立了多个载荷工况。

1.1 工艺参数的确定

不锈钢复合板坯的几何尺寸如下:2 200 mm × 72 mm Q235 碳钢基板,2 000 mm × 14 mm 304 不锈钢复板,2 200 mm × 60 mm Q235 碳钢边条。

实验轧机轧辊直径为 800 mm,辊身长度3 330 mm,前4道次的轧辊转速为 3.14 r/s,以后为 5.23 r/s。开轧温度为1 200 ℃。

1.2 轧制模型的简化和界面情况假定

轧制过程中,因为 $b/h \gg 10$,复合板宽展很少,可忽略不计,且沿接触弧方向的单位压力相等,视为平面变形问题^[7]。

对界面情况的处理为上下层金属共用一条边界,边界上划分相同的单元数,以保证在变形过程中相对应的节点上的应力、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。

1.3 轧制模型建立

轧件的轧制中心线是对称的,取1/2厚度作为研究对象,取样长度基板为 400 mm,复板为 340 mm,边条为 20 mm。以 MARC 的四边形等参单元划分,其中上层基板划分了1 120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1 488个单元。其单元的划分如图1所示。

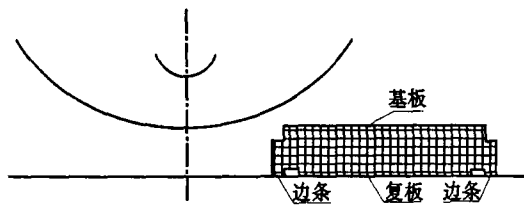


图1 不锈钢/碳钢复合板热轧有限元模型

Fig.1 Finite element method model for hot rolling of stainless steel/carbon steel clad sheet

1.4 载荷工况的设立

由于建立的是一个关于多道次轧制复合板的模型,对热轧全过程进行仿真,在多道次热轧过程中,下一道次中轧件的温度、应力应变和形状要继承上一道次的变形后的形态,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。

2 有限元模拟结果分析及界面结合条件的确立

2.1 界面处应力结果分析

热轧复合板结合机理目前尚无定论,许多学者提出了不同的结合机理如再结晶理论、金属键理论、能量理论、扩散理论、位错理论等,这些理论所阐述的结合条件都要求一定的能量,即要求两种金属质点具有一定的应力和应变。对于小的单道次变形

率、大的累积变形率的多道次热轧不锈钢复合板工艺来说,其关键取决于两种材料的界面结合条件。

采用开轧温度为1 200 ℃,压下规程为(mm)86→83→77→64.5→53.5→43.5→34.5→26.5→20→17→14→12。前5道次的累计变形率分别为(%)3.4、10.4、25、37.8、49.4。轧件前5道次界面节点垂直压应力在变形区的分布(横坐标正向为变形区的出口方向)如图2所示。

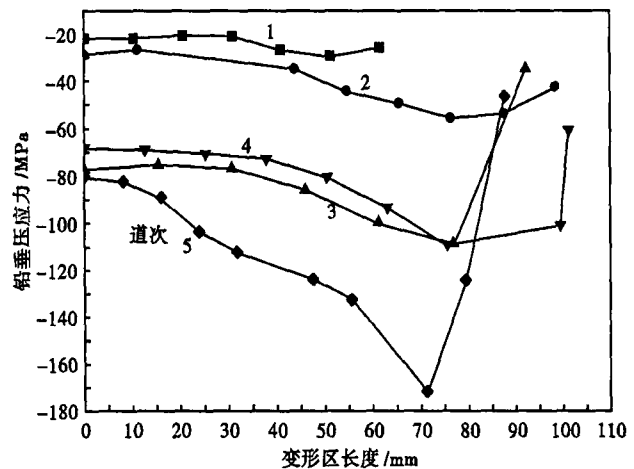


图2 前5道次变形区中复合板界面处的铅垂应力值分布
Fig.2 Vertical stress distribution at interface of clad sheet in deformation region during initial 5 passes

第1道次垂直方向压应力的平均值为 23.85 MPa。第2、3、4、5道次平均值分别为 41.9、90.2、92.8、98.28 MPa。文献[9]通过计算不锈钢复合板两层金属板界面上垂直压应力与复板材料变形抗力之比对不锈钢复合板热轧复合情况进行判断,认为比值大于1时就可以发生粘合,如果只按应力条件分析,不锈钢复合板应在第3道次发生复合,但在实验轧制条件下,情况并非如此。因此,应力条件的满足只是界面结合条件的必要条件之一。还应考察两种材料在界面处的应变条件。

2.2 界面处应变结果分析

轧件前5道次界面处两种材料等效应变在变形区的分布(横坐标正向为变形区的出口方向)如图3所示。在第1道次中,由于不锈钢的变形抗力(62 MPa)比Q235(46 MPa)的变形抗力高^[8],所以Q235的等效应变值高于304不锈钢,在第2和第3道次,应变存在着一定的错乱。这是因为在第2与第3道次Q235端部下垂,不锈钢不均匀变形所致。第4道次两种材料的界面处的应变接近一致。到第5道次达到基本一致。其中,前5道次的变形率分别为:第1道次的变形率为3.4%,第2、3、4、5道次的

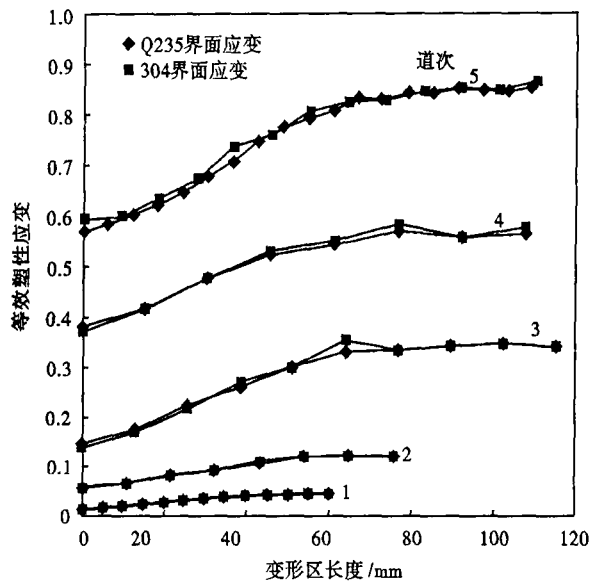


图3 前5道次变形中复合板界面处的等效应变分布图

Fig. 3 Equivalent strain distribution at interface of clad sheet in deformation region during initial 5 passes

累计变形量(%)分别为10.4、25、37.8、49.4。Q235和304不锈钢的等效应变的平均值分别为0.759和0.766,其差值为0.007。

当采用压下规程86→80→69→56→45→34→24→17.5→14.5→12时,在第4道次Q235和304不锈钢的等效应变的平均值分别为0.6905和0.6818,其差值为0.0087,两种材料在第5道次达到贴和,这与试验轧制所得到结果基本一致。因此,界面结合条件下不仅要满足应力要求,还要满足两种材料的变形协调性要求。

当采用压下规程86→82→75→62→51→41→33→25→19.5→15.5→13.5→12和86→81→71→58.5→47.5→36.5→26.5→18.5→14.5→1轧制不锈钢复合板时也可以得到上述结果。这说明通过单道次小变形率、大的累积变形率的轧制工艺可以得到结合良好的不锈钢复合板。尽管此种方法比首道次大压下量的轧制规程的变形量要高^[9],但对降低设备磨损及提高设备的安全使用性能是有利的。

模拟结果表明,当首道次的压下量小于3 mm时,Q235的应变要高于304不锈钢的应变,这说明轧辊的大部分变形功消耗在较软的金属变形上面,对不锈钢的变形贡献不是很大。这是不可取的,因为按照双金属复合的机理,层间的相对滑动不利于破坏在金属界面处连续的氧化膜层。适当提高首道

次压下量可以尽快地使两种材料在界面上产生应变错乱,这不仅有助于破坏表面薄膜的连续性,还可以整体提高显微接触界面的能量水平,从而促进材料发生复合。

3 结论

以弹塑性有限元法为理论基础,利用MARC软件对不锈钢/碳钢复合板多道次轧制过程进行有限元模拟。根据模拟以及试验轧制结果分析可得出,开轧温度为1200℃时,对称轧制条件下,判断界面结合的条件为:

- (1) 两种材料都进入塑性状态;
- (2) 两种材料的法向应力值达到或超过304不锈钢在界面温度条件下的变形抗力;
- (3) 两种材料各自的变形量达到或超过某一值,并且其应变平均值的差值要小于0.01;
- (4) 适当提高首道次压下量可以促进两种材料发生复合;
- (5) 可以使用小的单道次变形率、大的累积变形率的方法获得结合良好的不锈钢复合板。

参考文献

- 1 耿炳玺. 中国不锈钢的现状和发展. 特殊钢, 1999, 20(10): 34
- 2 Akio Segawa, Takao Kawanami. Rolling-deformation Characteristics of Clad Materials Determined by Model Experiment and Numerical Simulation; Experimental Rolling Tests Using Plasticine. Journal of Materials Technology, 1995(47): 389
- 3 Henryk Dya, Maciej Pietrzyk. On the Theory of the Process of Hot Rolling of Bimetal Plate and Sheet. Journal of Mechanical Working Technology, 1983, 8: 309
- 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. 中国有色金属学报, 2001, 11(6): 107
- 5 庞玉华, 吴成, 严平. 不锈钢-碳钢复合板多道次小变形轧制温度场的数值模拟. 特殊钢, 2006, 27(2): 9
- 6 Lukaschkin N D, Borissow A P. Interface Surface Behavior in the Upsetting of Sandwich Metal Sheets. Journal of Materials Processing Technology, 1996(61): 292
- 7 段坤祥, 史庆南, 林大昭, 等. 精密复合带材异步轧制工艺中的一些基本问题. 稀有金属, 1998, 22(增刊): 300
- 8 张继祥. 金属机械性能的试验实用数据手册. 北京: 国防工业出版社, 1982
- 9 宗家富, 张文志, 许秀梅, 等. 双金属板热轧复合模拟及最小相对压下量的确定. 燕山大学学报, 2005, 1(29): 27

董洁(1968-), 女, 讲师, 西安建筑科技大学毕业, 冶金过程数学模拟研究。

收稿日期: 2007-12-06