

文章编号: 1006-2343 (2008) 02-063-04

ERW 辊弯成形过程 CAD/CAE 集成建模方法研究

李建新^{1, 2}, 谢里阳¹, 刘玉文²

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁沈阳 110004, E-mail: Lijx@baosteel.com;

2. 宝山钢铁股份有限公司, 上海 201900)

摘要: 在 ERW 辊弯成形过程中, 带钢依次经过设置在成形方向上的水平和垂直成形轧辊, 将平面渐进地弯曲成所需要的圆周截面。整个变形是一个经历大位移、有限应变的过程, 具有很强的非线性特征, 成形规律复杂。按照不同的成形段按带钢的进料方向, 将高频直缝焊管辊弯成形过程依次建立预成形段 CAD 模型、线成形段 CAD 模型以及精成形段 CAD 模型, 并将各个成形段的模型集成为高频直缝焊管辊弯成形总体 CAD 模型, 并在此模型为基础进行有限元 CAE 分析。论文介绍的方法在宝山钢铁股份有限公司得到验证和实际应用。

关键词: 高频直缝焊; 辊弯成形; 集成建模; CAD; CAE

中图分类号: TG335.7 **文献标识码:** A

Research on CAD/CAE Integrated Modeling method of ERW roll forming

LI Jian-xin^{1, 2}, XIE Li-yang¹, LIU Yu-wen²

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004, China;

2. Baoshan Iron and Steel Co Ltd, Shanghai, 201900, China)

Abstract: In the cage roll forming process of a ERW pipe, a steel is rolled along some vertical and horizontal cage rolls. The cage roll forming process of ERW pipes is quite complicated, which involves geometry nonlinearity, material nonlinearity and boundary nonlinearity. In order to understand the deformation behavior of sheet metals better and avoid product defect, this paper presents a method of integrating CAD and CAE. Three CAD models are constructed in performing phase, threaded-forming phase and finish-forming phase, respectively. A whole CAD model is constructed based on the three CAD models, and a corresponding CAE model is constructed and analyzed. The proposed methods were applied in BAOSHAN iron and steel Co., LTD.

Key words: ERW; roll forming; integrated modeling; CAD; CAE

高频直缝焊管 (ERW, Electric Resistance Welding) 是将热轧板卷经过成形机成形后, 使钢卷变形为圆滑的圆筒状, 利用高频电流的集肤效应和邻近效应, 使管坯边缘加热熔化, 在一定的挤压力作用下圆筒的熔化两边缘熔合在一起, 经冷却就达到焊接效果, 形成高品质钢管。高频直缝焊管辊弯成形是板带深度加工的一个重要领域, 是以带钢为坯料, 通过多架装配有特定形状成形轧辊的成形机对带钢进行连续渐进弯曲变形, 从而得到均一截面产品的塑性加工方法^[1]。由于直缝焊管具有生产效率高、管壁厚度均匀、尺寸精度高、表面质量好、能源和材料消耗少等优点, 直缝焊管生产在最近的几十年里面有了非常迅速的发展, 目前在世界各国钢管生产中, 直缝焊管所占的比例不断增大。

在高频直缝焊管辊弯成形过程中, 板材依次经过布置在成形方向上的各个水平和垂直成形轧辊, 将平面逐渐连续地弯曲成所需要的圆周截面。整个变形是一个经历大位移、有限应变的过程, 具有很强的非线性特征, 成形规律复杂^[2]。

因此, 为了很好地掌握高频直缝焊管辊弯成形过程中板带的成形规律, 预测成形性能, 国内外众多学者对高频直缝焊管辊弯成形理论和应用上进行了多方面研究^[3, 8]。

针对高频直缝焊管辊弯成形过程复杂、CAD 和 CAE 模型建立困难的特点, 下面探索将高频直缝焊管辊弯成形过程从不同的成形段按带钢的进料方向, 依次建立预成形段 CAD 模型、线成形段 CAD 模型以及精成形段 CAD 模型的建模方法, 并将各个成形段的模型集成为 ERW 焊管辊弯成形 CAD 模型, 以该模型为基础进行有限元 CAE 分析, 对辊弯成形的全流程进行计算, 最终达到优化成形工艺、缩短产品开发周期、提高产品质量的目的。

1 ERW 焊管辊弯模型分段建立方法

1.1 预成形段 CAD 模型

ERW 焊管辊弯成形预成形段是保证辊弯成形的效率的基础。为了保证辊弯的成形效率, 其 CAD 模型应包括: 上夹送辊, 下夹送辊, 上压下辊, 下压下辊, 上弯边辊, 下弯边辊, 成形工具 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 , 粗成形机架 Breakdown, 导向辊以及预成形排辊等。上夹送辊采用液压减震方式, 目的是避免横

收稿日期: 2007-11-15

焊缝通过时产生过大的力。夹送辊装置需要根据成形管材尺寸确定两辊的高度参数 h 来设定。

轧辊间隙 δ 通过改变上辊的高度进行调整。弯边下辊也采用液压减震方式,这也能在横焊缝增加壁厚时起到避免产生过大作用力的作用。弯边下辊也能单独移动以使系统适应带钢厚度。全部的四个弯边轧辊能垂直移动以使系统适应不同的高度。预成形段内成形工具 $R_1 \sim R_4$ 在该段的入口侧,它们与尺寸无关且均为非驱动式,布置在外成形线性段之间,其只能在垂直方向单独调整;粗成形机架集成在预成形段的出口侧,它包括一个覆盖大约一半产品尺寸范围的高度可调的下辊和一个仅在某些尺寸时更改的上辊,两个轧辊都是驱动辊,但只能垂直调整。根据上述高频直缝焊管辊弯成形预成形段原理和功能实现,建立的预成形段 CAD 模型如图 1 所示:

1.2 线成形段 CAD 模型

ERW 焊管辊弯成形预成形段是保证辊弯成形均匀性的基础。为了保证辊弯成形均匀性,线成形段 CAD 模型应包括:导向辊、排辊架、线成形排辊、支撑辊、内成形工具。线性成形段布置在线性预成形段和第一架精成形机架之间而且它分成三部分。每部分包括两个装有一套非驱动辊段外成形线性段。外成形线性段的三个不同部分能以相同方式调整,有 5 个方向可调,它们是出口高度 h_c 调整,出口宽度 w_c 调整,侧梁旋转 r_c ,入口高度 h_r 调整和入口宽度 w_r 调整。

跟预成形段相同,线成形段有多组内成形辊梁布置在外成形线性段之间,并安装与尺寸范围相关的非驱动的内成形辊。另外每个线性段都有数量不等的非驱动下支撑辊,它们都只能垂直调整。驱动侧带钢导向和操作侧带钢导向也能垂直调整。根据上述高频直缝焊管辊弯成形线成形段原理和功能实现,建立的线成形段 CAD 模型如图 2 所示:

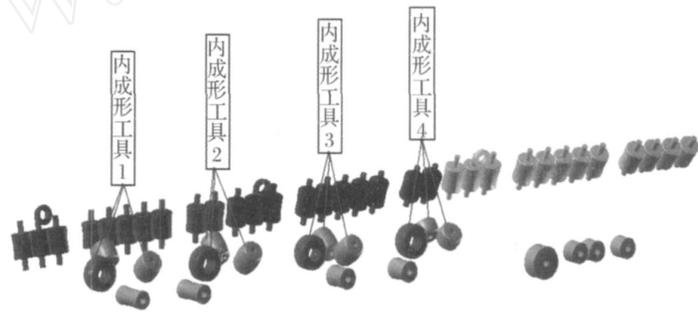
1.3 精成形段 CAD 模型

ERW 焊管辊弯成形预成形段是保证辊弯成形精度的基础。为了保证辊弯的成形精度,精成形段 CAD 模型应包括:多组小排辊、边辊、顶辊和下辊。精成形段从线性成形段接收预成形的带钢并把接近 O 形的开口空心管坯导入到挤压焊接机架。精成形段 1 和精成形段 2 后跟有一套中间精成

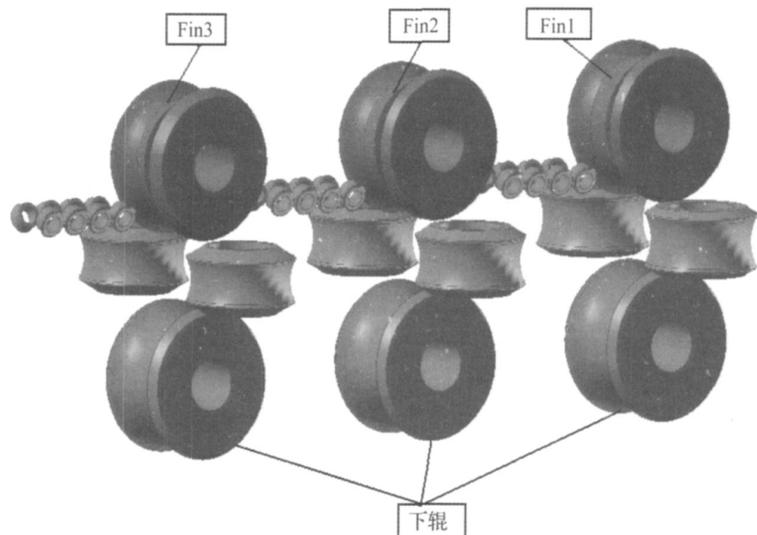
形导辊。精成形段 3 后跟有一套中间边部导向辊。精成形段不仅可生成空心管坯,而且以可控制的方式成形带钢边部,对于消除带钢边缘的边浪和鼓包有一定的作用。根据上述高频直缝焊管辊弯成形精成形段原理和功能实现,建立的精成形段 CAD 模型如图 3 所示:



▲图 1 预成形段 CAD 模型



▲图 2 线成形段 CAD 模型



▲图 3 精成形段 CAD 模型

2 ERW 焊管辊弯 CAD 集成建模方法

利用各参数建立预成形段 CAD 模型、线成形段 CAD 模型和精成形段 CAD 模型后,根据各子模型空间位置参数,对整体高频直缝焊管辊弯成形系统进行自底向上的装配建模。需要说明的是:自底向上的装配也就是通过先创建部件几何模型,再组合成子装配,最后生成装配部件的装配方法。辊弯成形系统的 CAD 总体模型包括预成形段 CAD 模型、线成

形段 CAD 模型、精成形段 CAD 模型,如图 4 所示:

3 ERW 焊管辊弯成形 CAE 模型的建立

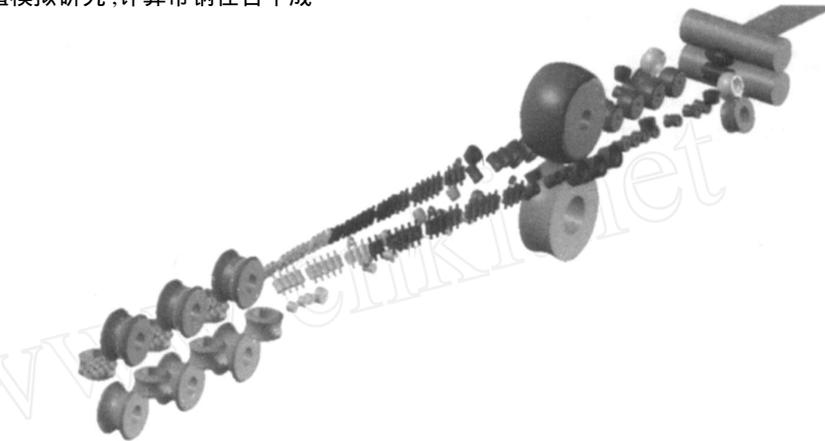
建立辊弯成形系统的 CAD 总体模型后,为了精确的计算辊弯成形的全流程过程,这里采用基于大位移有限变形的 updated-Lagrange 动力显式有限元算法,采用四节点的 BT 壳单元和 8 节点实体单元模型,建立其有限元模型,对带钢的成形过程进行了全流程有限元数值模拟研究,计算带钢在各个成形段的应力、应变、厚度以及构形的变化情况,获得带钢在各个成形阶段的成形规律。建立的高频直缝焊管辊弯成形 CAE 模型如图 5 所示。

4 应用实例

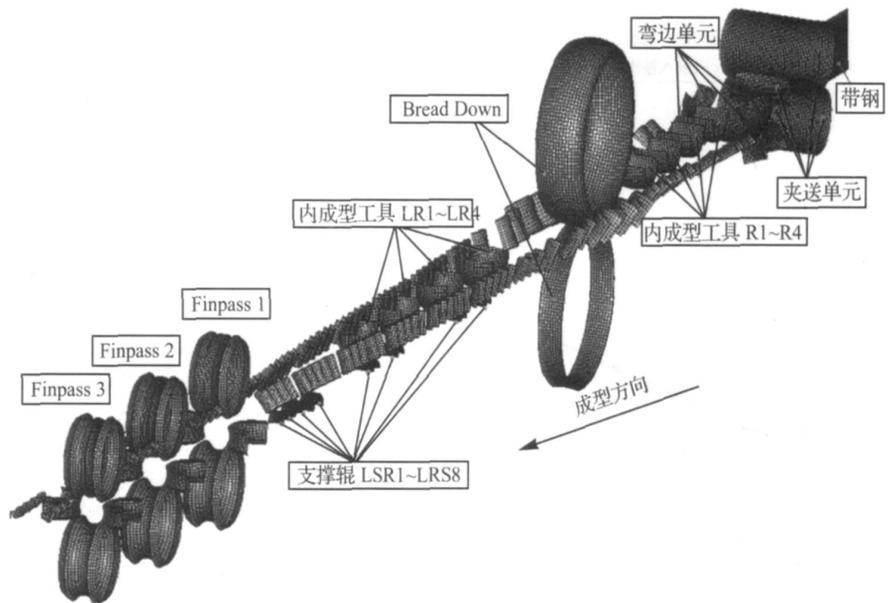
为了验证上述分段建模方法的有效性,现在以管线钢 L245 为例进行成形过程 CAD/CAE 建模分析。将所有轧辊简化成刚性体,其杨氏模量 $E = 210\text{GPa}$,泊松比 $\mu = 0.3$;密度 $\rho = 719\text{g/cm}^3$ 。在显式动力有限元分析中,刚性体的材料属性必须指定真实的材料特性值,以便程序能正确地计算接触表面的刚度。在实际加工过程中,所有轧辊均存在可以绕自身轴线转动的自由度,而在驱动辊带动下板带沿着成形方向的速度一般不超过 0.3m/s 。但是在仿真过程中,需要对实际物理模型进行适当的等效简化,将所有轧辊约束在空间的 6 个自由度,而假定带钢前端节点沿着成形方向为恒定的指定速度。为了加快计算速度,一方面利用对称性,只建立板带的一半模型;另一方面适当增大板带牵引速度,板带前端节点的指定速度取 4m/s 。采用库仑摩擦模型,板带与所有轧辊间的摩擦因数均假定为 0.1 ,板带的接触厚度等于实际的壳单元厚度。板带与轧辊间的接触类型均设定为自动面面接触,可以避免程序计算过程中出现接触法向的判断错误。

对现场带钢在线成形段的两个变形几何特征(开口度和板宽)进行实际测量,得

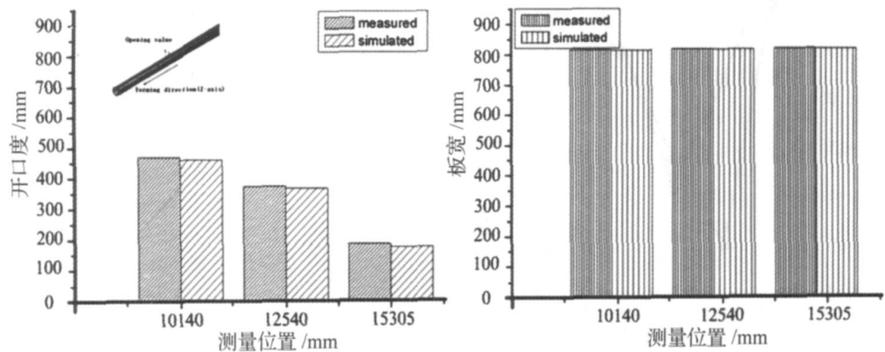
到的实验数据和利用本文所介绍的 CAD/CAE 方法进行结果对比(如图 6 所示):带钢在线成形第 1、2、3 段出口位置开口度的测量值与仿真值的绝对误差分别为 9.30 、 8.95 、 11.80mm ,其对应的相对误差分别为 2.0% 、 2.4% 、 6.5% ;带钢在线成形第 1、2、3 段出口位置横截面弧长的测量值与仿真值的绝对误差分别为 0.6 、 1.98 、 1.8mm ,其对应的相对误差分别为 0.07% 、 0.22% 、 0.20% 。由此可见本文所介绍的



▲ 图 4 辊弯成形系统的 CAD 总体模型



▲ 图 5 辊弯成形系统的 CAE 总体模型



(a) 带钢边缘开口度的数据对比 (b) 带钢横截面板宽的数据对比

▲ 图 6 仿真与实验结果对比

频直缝焊管成形过程 CAD/CAE 集成方法可以满足工程应用。

5 结论

为了能够高效、精确的建立高频直缝焊管辊弯成形过程 CAD 和 CAE 模型,以上按照不同的成形段按带钢的进料方向,将高频直缝焊管辊弯成形过程依次建立预成形段 CAD 模型、线成形段 CAD 模型以及精成形段 CAD 模型,并将各个成形段的模型集成为高频直缝焊管辊弯成形总体 CAD 模型,以该模型为基础进行有限元 CAE 分析。研究结果表明:上述采用的 CAD/CAE 集成建模方法准确、高效;采用该方法,实验结果和仿真结果体现了良好的一致性,且在宝钢钢铁股份有限公司得到验证和实际应用。

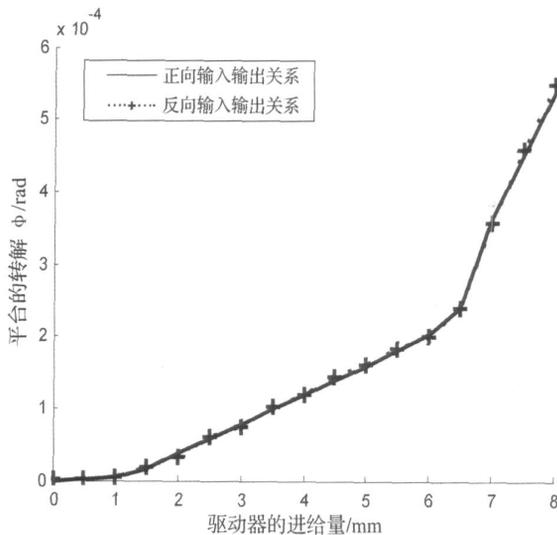
参考文献:

- [1] 王先进. 冷弯形钢生产及应用 [M]. 北京:冶金工业出版社, 1994.
- [2] 李大永. 辊弯成形数值全流程仿真研究现状 [J]. 机械科学与技术, 2004, 23(12): 1466 ~ 1469.

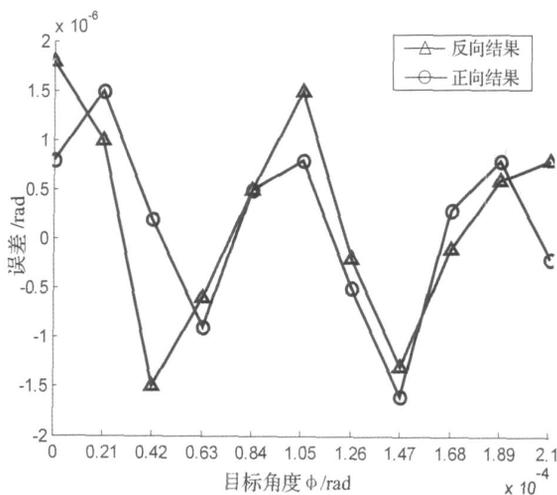
- [3] ZhiWu Han, Cai Liu, Wei-Ping Lu, et al. Experimental investigation and theoretical analysis of roll forming of electrical resistance welded pipes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 145: 311 ~ 316.
- [4] Hiroshi Ona. Cold roll forming for high tensile strength steel sheet proposition on forming of thin spring steel sheet pipe [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 153/154: 247 ~ 252.
- [5] Neffusi G, Prosilier L, Gilomini P. Simulation of the cold-roll forming of circular tubes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1999, 95: 216 ~ 221.
- [6] 周 瑛,姜文光,刘 才. 辊式成形过程的样条有限元分析 [J]. 机械工程学报, 1997, 33(2): 82 ~ 87.
- [7] Han ZW, Liu C, Lu W P. Experimental Investigation and Theoretical Analysis of Roll Forming of Electrical Resistance Welded Pipes [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 145: 311 ~ 316.
- [8] 于恩林,赖明道,蔡松庆. 薄板大位移弹塑性有限元分析 [J]. 焊管, 1994, 17(5): 1 ~ 4.

作者简介:李建新(1975-),男,机械设计与理论专业,在读博士研究生。宝钢钢管厂焊管工艺室主任、工程师;主要从事焊管生产和产品技术研究和管理工作。

(上接第 56 页)



▲图7 平台的输入与输出关系图



▲图8 定位误差图

结果的正确性。制造了原型样机,进行了实验研究,对平台进行了标定,并分析了平台的定位误差。结果表明:平台可以实现 6×10^{-4} rad 的转角范围, 4.2×10^{-8} rad 的理论分辨率, 838HZ 的理论固有频率,达到了设计目的。上述分析与设计方法对同类研究有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 于靖军,毕树生,宗光华. 全柔性机构在微操作机器人系统中的应用 [C]//机械设计与研究(增刊),第十二届全国机构学学术研讨会论文集, 2000: 130 ~ 131.
- [2] YANG R, JOUANEH M, SCHWEIZER R. Design and characterization of a low-profile micro-positioning stage [J]. Precision Engineering, 1996, 18(1): 20 ~ 29.
- [3] N UCH DA. A vertical X-Y stage for X-ray lithography using SOR [J]. Bull Japan Soc Of Prec Eng, 1988, 22(2): 102 ~ 108.
- [4] YOKZAKI. Dual-servo mechanical stage for continuous positioning [J]. Int J. Japan Soc Prec Eng, 1993, 27(2): 172 ~ 173.
- [5] 王建林,胡小唐. 纳米定位技术研究现状 [J]. 机械设计与研究, 2000, (1): 43 ~ 44.
- [6] 张宪民,王华,胡存银. 压电陶瓷驱动三自由度精密定位系统的弹性动力学与输入调理特性研究 [J]. 振动工程学报, 2007, 20(1): 9 ~ 14.
- [7] 马 立,荣伟彬,孙立宁. 三维纳米级微动工作台的设计与分析 [J]. 光学精密工程, 2006, 14(6): 1017 ~ 1024.
- [8] 薛幸福,李庆祥. 精密仪器设计 [M]. 北京:清华大学出版社, 1991.
- [9] John Speich, Michael Goldfarb. A Compliant-Mechanism Based Three Degree-of-Freedom Manipulator for Small-Scale Manipulation [J]. Robotica, 2000, 18: 95 ~ 104.
- [10] 戴 蓉,谢铁邦,常素萍. 纳米级定位精度一维位移工作台 [J]. 中国机械工程, 2006, 17(2): 115 ~ 118.

作者简介:洪始良(1985-),男,硕士研究生,主要研究方向是精密制造。