

## 风电塔筒用纵筋板轧制的有限元模拟与实验

曹 菡, 鲁仰辉, 李高盛

(国家电投集团科学技术研究院有限公司, 北京 100001)

**摘要:** 风电塔筒在风电机组经济性评价中具有重要地位, 为研究一体成形纵筋板的轧制工艺, 采用有限元方法进行了模拟计算, 分析了轧制工艺参数、孔型参数等各种因素对筋高的影响规律; 开展了小规格纵筋板轧制实验, 获得了一批筋高大于 2 mm、基板厚度为 3 mm、宽度为 200 mm、长度为 700 mm 的纵筋板。研究表明, 在一定条件下加大压下率是提高筋高的有效途径; 加热温度过高、保温时间过长会加重烧损, 所增加的氧化铁皮会减小摩擦因数, 不利于咬入, 也不利于成筋。实验所得结果与有限元仿真结果吻合较好, 可为加筋塔筒的应用提供理论依据。

**关键词:** 纵筋板; 压下率; 摩擦因数; 孔型设计; 轧制

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.09.024

**中图分类号:** TG335      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-3940 (2022) 09-0163-05

## Finite element simulation and experiment on rolling of longitudinal rib plate in wind power tower

Cao Han, Lu Yanghui, Li Gaosheng

(State Power Investment Corporation Research Institute of Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100001, China)

**Abstract:** The wind power tower plays an important role in the economic evaluation of wind turbine. Therefore, in order to study the rolling process of the integrally formed longitudinal rib plate, the simulation calculation was conducted by finite element method, and the influence laws of various factors such as rolling process parameters and hole-type parameters on the height of rib were analyzed. Then, rolling experiments of small-sized longitudinal rib plate were carried out, and a batch of longitudinal rib plates with the rib height greater than 2 mm, the base plate thickness of 3 mm, the width of 200 mm and the length of 700 mm were obtained. The research shows that increasing the reduction rate under certain conditions is an effective way to increase the height of rib, too high heating temperature and too long holding time will increase the burning loss, and the increased iron oxide scale will reduce the friction factor, which is not conducive to biting and rib formation. The experimental results are in good agreement with the finite element simulation results, which can provide a theoretical basis for the application of tower with ribs.

**Key words:** longitudinal rib plate; reduction rate; friction factor; hole-type design; rolling

近年来, 风电单机的容量越来越大、叶片越来越长、塔筒高度屡创新高。塔筒是风电机组的重要组成部分, 要承受风电机组上部零部件的全部重力载荷以及自然界的各种复杂的动力交变载荷, 易发生结构动力失稳或破坏。采用轧制钢板作为塔筒的原材料, 将钢板横向卷制成形。典型的生产工艺为: 数控切割机下料—厚板开坡口—卷板机卷板—纵焊缝焊接—塔筒整圆—塔筒组对及环焊缝焊接—质量检验—喷砂防腐等<sup>[1]</sup>。提高塔筒的结构强度, 在高塔筒的前提下尤为重要。针对塔筒易失稳和损坏的

现象, 有关专家提出了加筋的塔筒结构形式, 即在传统圆筒型塔筒的外表面纵向排布梯形加强筋, 以降低高塔筒的挠曲变形, 提高结构的安全性, 研究表明, 加筋型与桁架混合型塔筒能够显著提高低阶整体模态频率<sup>[2-3]</sup>。

纵筋板是加筋塔筒的原材料, 是在钢板的一个表面上均布纵向凸筋的一类异型钢板。采用纵筋板制造钢管可以有效增加钢管的轴向刚度, 抑制变形。纵筋板因其具有较好的强度和刚度, 在建筑、车船集装箱制造等领域有广泛的应用前景<sup>[4]</sup>。20 世纪末, 纵筋板轧制技术得到了较为充分的研究, 取得了丰富的研究成果<sup>[5-8]</sup>。近年来, 随着计算机技术和有限元方法的发展以及应用领域的拓宽, 纵筋板轧制工艺的研究又受到重视, 日本公开了纵筋板轧

收稿日期: 2021-12-15; 修订日期: 2022-03-20

作者简介: 曹 菡 (1987-), 女, 硕士, 高级工程师

E-mail: caohan01@spic.com.cn

制的专利<sup>[9]</sup>,我国东北大学、武汉理工大学的学者发表了其研究成果,在成筋规律、孔型优化、多道次轧制工艺等方面作出了尝试和探索<sup>[4,10-12]</sup>。在此基础上,本文结合风电用钢的尺寸特点,按相似原理,采用有限元与实验相结合的方法,探讨了纵筋板的成筋规律,得出了最佳单道次轧制工艺参数。

## 1 有限元模拟

### 1.1 计算模型

ABAQUS 软件在轧制领域有广泛的应用,本文使用 ABAQUS 软件对纵筋板轧制过程进行仿真模拟。首先,建立有限元模型,上辊带有 9 个深度为 3 mm、宽度为 7 mm、间隔为 13 mm、沿辊身中心向两侧均匀布置的沟槽。对模型进行网格划分,在轧辊的孔型部分及轧件与其对应部分细化网格,模型共有 1146862 个单元,其中带有孔型的轧辊共划分 301678 个单元,包括 300312 个 R3D4 单元和 1366 个 R3D3 单元;平辊共划分 9184 个 R3D4 单元;轧件共划分 836000 个 C3D8T 单元。模型装配图如图 1 所示。

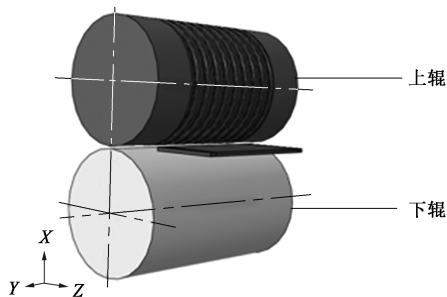


图 1 纵筋板轧制模型装配图

Fig. 1 Assembly diagram of longitudinal rib plate rolling model

轧辊和轧件之间服从库伦摩擦;轧辊均设置为刚体,将轧件设置为弹塑性体,轧件材质为 Q345B 钢,其化学成分与物理性质可参考国家标准 GB/T 1591—2018<sup>[13]</sup>。轧件的初始温度设置为 900 ℃;轧辊温度设置为 25 ℃,转速设置为 18 rad·s<sup>-1</sup>。对整体模型采用 100 倍质量放大系数开展动态显式热力耦合模拟计算。模型计算完毕后,纵筋板经辊缝轧出,如图 2 所示。

### 1.2 仿真模拟结果分析

#### 1.2.1 压下率的影响

已有的研究表明,在其他条件不变时,压下率是影响筋高的最敏感因素。首先针对压下率对筋高的影响开展研究,设纵筋板的目标基板厚度为 3 mm 并保持不变,将入口钢板厚度设为 5.00、

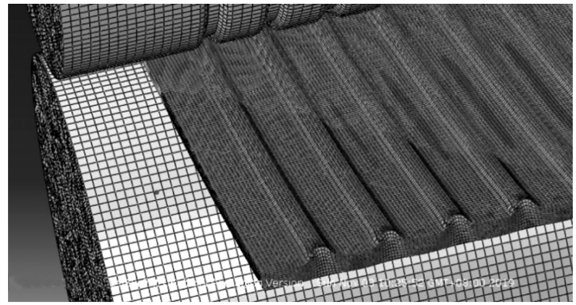


图 2 模型的网格划分及计算结果

Fig. 2 Meshing and calculation results of model

5.25、5.50、5.75 和 6.00 mm,其他条件不变,成为只有入口厚度不同而其他参数均相同的 5 个计算方案,采用 ABAQUS 模型分别进行计算。计算结果如图 3 所示。

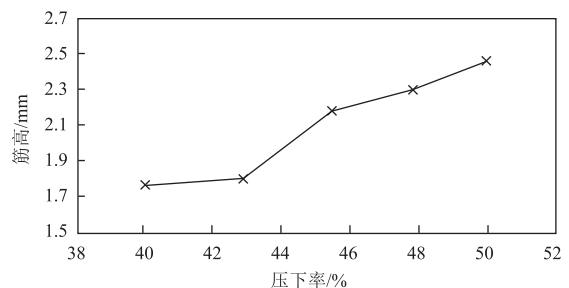


图 3 筋高与压下率关系曲线

Fig. 3 Relationship curve between rib height and reduction rate

在纵筋板轧制过程中,纵筋的顶部、侧壁处及纵筋间隔处的压下率不同,本文以各相邻纵筋顶部间距中心的基板厚度的平均值为轧后基板的平均厚度,压下率  $\delta$  的计算公式见式 (1):

$$\delta = \frac{H - h}{H} \times 100\% \quad (1)$$

式中:  $H$  为原料厚度, mm;  $h$  为轧后基板的平均厚度, mm。

排除纵筋头尾处筋高不正常波动的部分,筋高按式 (2) 计算:

$$h_r = h_h - h_0 \quad (2)$$

式中:  $h_r$  为筋高, mm;  $h_h$  为正常筋部最高点的厚度, mm;  $h_0$  为基板厚度, mm。

由图 3 可知,在当前计算条件下,筋高随着压下率的增大而增高,在压下率小于 42.9% 时,筋高随压下率的增加有所提高,但增幅不大;在压下率由 42.9% 提高至 45.5% 时,筋高的增加量与压下率的增加量的比值明显增加,其后随着压下率的增高,筋高仍增高,但趋势稍稍放缓。在制定纵筋板轧制工艺时,应尽量提高单道次的压下率。但是,压下

率受到轧机能力、咬入角等因素的影响，不可能无限制地提高。考虑到可能存在的筋高增加量与压下率增加量的比值明显增加的区域，可以将压下率设置在该范围内，或略高于该范围。

1.2.2 摩擦因数的影响

考虑现有实验条件，将摩擦因数分别设置为 0.1~0.5，以 0.1 为步长递增，分别进行计算，所得的摩擦因数与筋高的关系曲线如图 4 所示。由图 4 可见，随着摩擦因数的提高，筋高随之升高，二

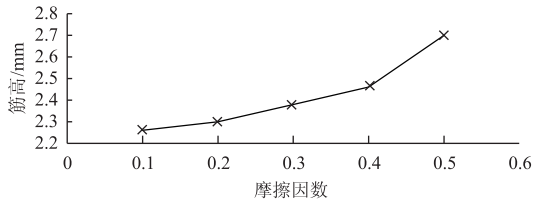


图 4 摩擦因数与筋高的关系曲线

Fig. 4 Relationship curve between friction factor and rib height

者的关系可用二次曲线拟合。摩擦因数是轧制实验中难以精确控制的因素，与轧辊表面状态、轧辊材质、轧件表面状态、轧件温度、润滑条件等多种因素有关。为了在现有条件下提高筋高，应尽可能增大摩擦因数。

1.2.3 孔型参数的影响

孔型侧壁角度会影响成筋率，且随着侧壁角度的增大，成筋率有提高的趋势。为了研究侧壁角度较大时对当前轧制条件下成筋率的影响，将孔型辊上的 9 个孔型的侧壁角度和侧壁底部的倒角半径作了改动，将 9 个孔型分为 3 组，每组包括 3 个相邻的孔型，每组孔型的侧壁角度相同，间距相同，3 组孔型的侧壁角度分别为 60°、75°和 90°。计算所用的侧壁角度、倒角半径和筋高的计算结果见表 1。表 1 中编号为 5 的孔型位于轧辊轴向中间位置，1~4 号孔型和 6~9 号孔型分别位于 5 号孔型的两侧。

表 1 侧壁角度、倒角半径设置和筋高的计算结果

Table 1 Setting of sidewall angle and chamfer radius and calculation results for rib height

组号	1			2			3		
编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
侧壁角度/(°)	60	60	60	75	75	75	90	90	90
底部倒角半径/mm	3	2	1	3	1	2	1	2	3
筋高/mm	1.62	1.74	1.81	1.87	1.85	1.85	1.90	1.90	1.82

模拟计算结果验证了文献 [4] 中提到的关于侧壁角度对成筋率的影响规律，即当侧壁角度增大时，成筋率明显提高。观察模拟计算结果，当侧壁角度为 75°和 90°时，其筋高明显大于侧壁角度为 60°时的筋高；第 2 组孔型位于轧辊的中部，其侧壁角度为 75°，从左至右，其底部倒角半径分别为 3、1 和 2 mm，因该组孔型位于中部，受孔型相对位置的影响较小，受底部倒角半径的影响较为明显，即随着底部倒角半径的增大，筋高略有增高。第 1 组和第 3 组孔型位于轧辊的边部，其筋高受孔型位置的影响较为明显，虽然处于边部的孔型的底部倒角半径为较大的 3 mm，由轧辊外部向内逐个减小至 1 mm，但是其编号为 3 及编号为 7 的孔型距离边部较远，筋高高于外侧的孔型。另外，虽然说明侧壁角度增大有利于提高筋高，但是在筋底变形非常剧烈时，为了缓和这种剧烈的变形并进一步提高筋高，需增大底部倒角半径，但是底部倒角半径的增大实际上使筋底拓宽，筋底的实际间隔减小。

综合考虑实际的轧制条件，认为为了提高成筋

率，需尽可能地增大压下率并增大轧辊与轧件间的摩擦因数，由于加热时产生的氧化铁皮使辊缝润滑，因此，应尽量减少氧化铁皮的产生，同时考虑轧机能力，将加热温度设为 900 ℃并保温 10 min，这样既使轧件充分固溶、降低变形抗力，又减少了氧化铁皮的产生，提高了摩擦因数，经对比观察，实际模型的摩擦因数应为 0.5 左右。为了增大压下率，应尽可能地增大原料的厚度，结合实际，将原料厚度定为 6.00 mm，实际的原料厚度会在一定公差范围内波动。为了使成筋更为顺利，减少筋底部金属流动的障碍，将孔型侧壁底部倒角半径设置为 3 mm。

2 纵筋板的轧制实验

在 300 mm 二辊实验轧机上开展实验，轧机采用电机传动，配有 ZQ850 减速机，减速机速比为 12.64，输入功率为 82~174 kW，轧辊转速固定为 18 rad·s<sup>-1</sup>，采用 Rx4-85-13B 高温箱式电阻炉对轧件加热，出炉后立即轧制，上辊带有沟槽，下辊为



平辊。轧辊为半冷硬铸铁, 辊身直径为  $\Phi 180$  mm, 辊身长度为 300 mm。轧辊孔型共 9 副, 均匀分布于辊身中部, 轧辊孔型如图 5 所示, 其中  $R_1$  为孔型侧壁底部的倒角半径。轧辊的上辊照片如图 6 所示。

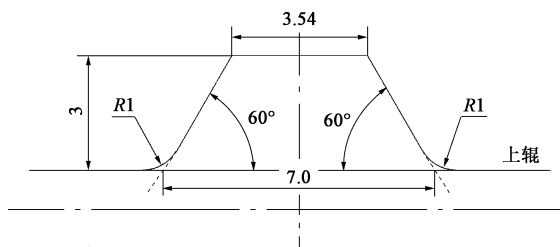


图 5 孔型示意图

Fig. 5 Schematic diagram of hole-type

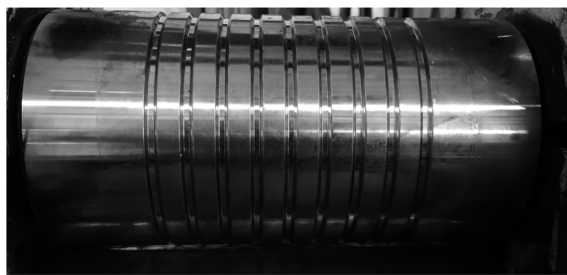


图 6 上辊照片

Fig. 6 Photo of upper roll

选取厚度为 6.0 mm 的 Q345B 钢板, 其长度为 550 mm、宽度为 200 mm, 按侧壁角度为  $60^\circ$ 、纵筋底部宽度为 7 mm、高度为 3 mm、纵筋顶部中心间隔为 20 mm、纵筋根部圆角半径为 3 mm 的孔型及模拟计算中给出的工艺参数进行试轧, 轧后基板的厚度为 3.16 mm, 筋高为 2.69 mm。这与模拟计算结果非常接近, 表明模拟计算模型给出的边界条件、工艺条件与实际相符, 模拟计算得出的规律性结果具有借鉴意义。

按本文设计的工艺, 在实验轧机上轧制 10 块纵筋板, 其原料取自同一块钢板, 经切割获得, 其轧制入口厚度、宽度相同, 将原料放在同一加热炉内同时加热, 可认为其出炉温度相同。考虑到轧辊和轧件的表面状况, 认为轧辊和轧件之间的摩擦因数为 0.2。为了得到较高的纵筋, 取压下率为 50%。其原料厚度为  $6_{-0.25}^0$  mm、宽度为 200 mm, 目标出口厚度为 3 mm, 轧制后基板厚度为 3.00~3.19 mm, 筋高位于 3.16~2.78 mm 之间 (图 7), 宽度为 203~205 mm。轧制所得的基板厚度与模拟计算的基板厚度的比值分布于 0.95~1.01 之间, 平均值为 0.98, 标准差为 0.02; 轧制所得的筋高与模拟所得

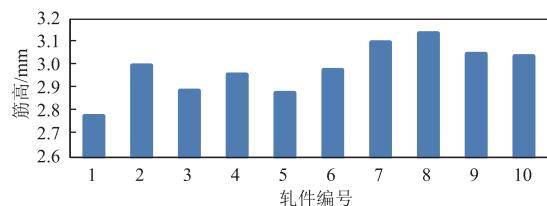


图 7 轧制所得纵筋板筋高分布

Fig. 7 Distributions of rib height for longitudinal rib plate by rolling

筋高的比值分布于 1.03~1.17 之间, 平均值为 1.11, 标准差为 0.04, 如图 8 所示。

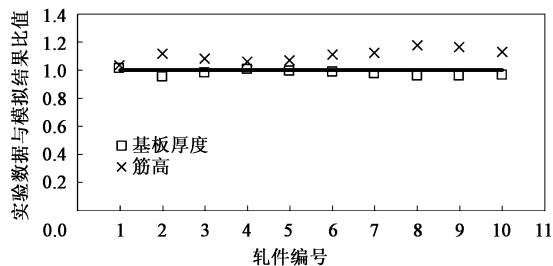


图 8 实验结果与模拟结果的对比

Fig. 8 Comparison between experiment and simulation results

考虑到原料厚度波动、测量误差等因素, 可以认为有限元模拟计算结果与实验结果吻合较好, 有限元模拟计算结果对于轧制实验有指导意义。

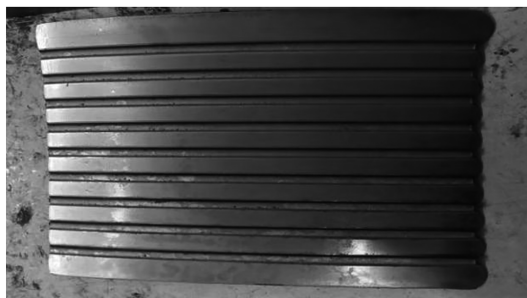


图 9 实验得到的纵筋板照片

Fig. 9 Photo of longitudinal rib plate obtained from experiments

### 3 结论

(1) 实验结果与有限元仿真结果吻合较好, 可为加筋塔筒的应用研究提供依据。

(2) 在现有条件下, 加大压下率是获得理想筋高的有效途径。

(3) 为了在现有条件下提高筋高, 应尽可能增大摩擦因数。

(4) 排除孔型相对位置的影响, 随着孔型侧壁底部倒角半径的增大, 筋高略有增高。

(5) 加热温度过高, 保温时间过长会增加烧

损,所增加的氧化铁皮会减小摩擦因数,不利于咬入,也不利于成筋。

#### 参考文献:

- [1] 陈鸿,王东明. LP 钢板风电塔筒生产工艺试验与关键装备研发[J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56 (4): 32-38.  
Chen H, Wang D M. LP steel plate wind power tower production process test and key equipment research and development [J]. China Metalforming Equipment & Manufacturing Technology, 2021, 56 (4): 32-38.
- [2] 卢华兴,陈明阳,刘伟,等. 风电机组混合型塔筒静强度分析与模态分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42 (2): 155-163.  
Lu H X, Chen M Y, Liu W, et al. Static strength analysis and modal analysis of hybrid towers for wind turbines [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2020, 42 (2): 155-163.
- [3] 燕鹏,殷俊,张天贺,等. 基于有限元的风电塔筒涡激振动分析[J]. 风能, 2020, (3): 66-70.  
Yan P, Yin J, Zhang T H, et al. Vortex-induced vibration analysis of wind power tower based on finite element [J]. Wind Energy, 2020, (3): 66-70.
- [4] 于游. 纵筋板轧制变形规律数值模拟与实验研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2014.  
Yu Y. Numerical Simulation and Experimental Research on Rolling Deformation Law of Strip Steel with Longitudinal Ribs [D]. Shenyang: Northeastern University, 2014.
- [5] Promvong P, Pethkool S, Pimsarn M, et al. Heat transfer augmentation in a helical-ribbed tube with double twisted tape inserts [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, 39: 953-959.
- [6] Jiang Z Y, Tieu A K. 3D finite element modeling of ribbed strip rolling [J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2000, 40: 2139-2154.
- [7] Jiang Z Y, Xiong S W, Tieu A K, et al. Modelling of the effect of friction on cold strip rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201: 85-90.
- [8] Liu Y M, Sun J, Wang Q L, et al. Mathematical model for rolling based on energy method [J]. Meccanica, 2017, 52: 2069-2080.
- [9] Miyake Masaru, 三宅勝. Caliber roll for rolling steel sheet with longitudinal rib, and method for rolling steel sheet with longitudinal rib [P]. Japan: JP2007197129, 2009-02-12.
- [10] 毛华杰,张昊. 铝合金纵筋类异型截面板的成形规律研究[J]. 热加工工艺, 2018, 47 (21): 148-151.  
Mao H J, Zhang H. Research on the forming law of aluminum alloy longitudinal bars with special-shaped section [J]. Hot Working Technology, 2018, 47 (21): 148-151.
- [11] 毛华杰,赵耀宁,兰箭. 带纵筋平板的轧制成形规律与极限研究[J]. 锻压技术, 2020, 45 (8): 49-55.  
Mao H J, Zhao Y N, Lan J. Research on rolling forming law and limit of flat plate with longitudinal ribs [J]. Forging & Stamping Technology, 2020, 45 (8): 49-55.
- [12] 赵耀宁. 带纵筋异型板的多道次轧制成形工艺研究[M]. 武汉: 武汉理工大学, 2020.  
Zhao Y N. Research on Multi-pass Rolling Forming Process of Special-shaped Plate with Longitudinal Ribs [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.
- [13] GB/T 1591—2018, 低合金高强度结构钢[S].  
GB/T 1591—2018, High strength low alloy structural steels [S].

