

钛合金棒材连轧变形过程分析及孔型优化设计

叶力平, 朱艳春, 秦建平

(太原科技大学, 山西 太原 030024)

摘要: 在钛合金棒材热连轧机组“平三角-圆”孔型基础上, 基于对轧制过程分析和有限元模拟, 对现有的平三角孔型加以改进, 形成改进型“平三角-圆”孔型系统, 然后将 $\Phi 25$ mm的TC4钛合金棒材在改进孔型后的八机架Y型轧机上连轧至 $\Phi 15$ mm, 以求解决轧件出耳子、扭转、圆度差等问题, 提高产品的尺寸精度。

关键词: 钛合金棒材; 有限元模拟; 平三角孔型; 优化设计

中图分类号: TG337.6

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2015)08-2058-05

钛合金具有密度小、强度大、耐热性强、耐腐蚀、生物相容性好、无磁性、无毒性、热稳定性好等诸多优良特性, 被广泛应用于航空航天、海洋船舶、生物医疗、冶金建筑、民生用品等领域^[1]。随着应用范围的推广、需求量的增大, 对钛合金产品的质量要求也进一步增加, 这就要求对钛合金的生产加工工艺进一步优化。对于钛合金线材, 传统的方法是采用横列式轧机往复轧制。为了改善钛合金棒材的机械性能和加工工艺性, 采用热连轧技术生产小规格钛合金棒材是必要的。本工作针对我国某条钛合金棒材连轧生产线生产中出现的诸如耳子、扭转、圆度差等问题, 通过理论分析和ansys有限元软件对轧制过程进行模拟仿真, 对孔型系统加以优化, 力求解决上述问题^[2]。

1 连轧孔型系统的改进

某厂钛合金棒材连轧生产机组为8机架三辊Y型轧机, 钛合牌号TC4, 坯料为直径25 mm的棒料, 经8道次轧制成直径为15 mm的成品, 原始孔型为平三角-圆-平三角-圆-平三角-圆-圆-圆孔型^[3-5], 如图1所示。但是在实际生产中, 轧出的钛合金成品棒材往往存在着贯穿产品全长的耳子、轧件大幅度扭转以及成品棒材圆度差等诸多问题, 最终导致产品尺寸精度不达标。针对上述问题, 提出设想: 能否对平三角孔型加以改进, 使改进后的平三角孔型能够减弱轧件金属的周向流动不均匀性造成的轧件扭转, 同时减小轧件金属在圆孔型中向辊缝处的流动幅度。

通过对连轧孔型进行多次优化改进, 然后对轧制过程进行有限元模拟仿真, 在不增加轧制道次的基础上, 其中对第1、3架次平三角孔型加以相应改进, 得

到的对轧制过程的模拟仿真结果最为理想, 以第1架次为例, 改进前后的孔型对照如图2所示。

2 有限元模型的建立

应用有限元模拟软件ANSYS/LS-DYNA对钛合

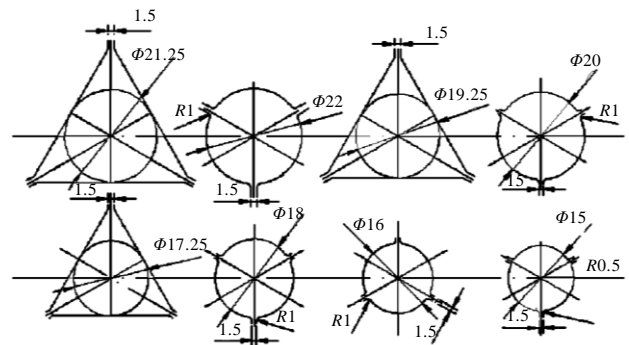


图1 平三角-圆孔型系统

Fig.1 Flat triangle-round passes system (mm)

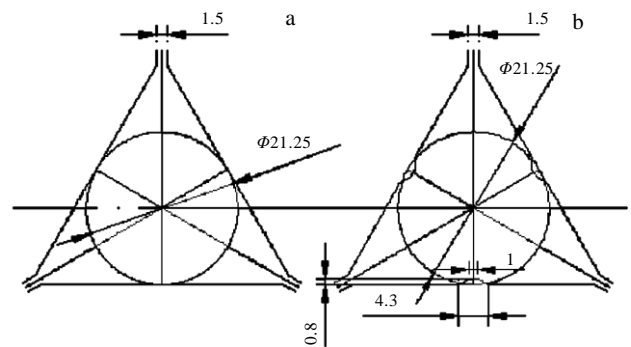


图2 改进前后的平三角孔型对照

Fig.2 Flat triangle pass before and after improvement: (a) the traditional flat triangle pass and (b) flat triangle pass after improvement (mm)

收稿日期: 2014-08-22

基金项目: 博士启动基金(20132016)

作者简介: 叶力平, 男, 1988年生, 硕士生, 太原科技大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030024, E-mail: crazystone.1986@163.com

金棒材在改进后的孔型系统中的变形过程进行模拟仿真，由于金属变形的复杂性以及计算条件的局限性，在模拟时需要对轧制过程做一定的简化和假设^[6]：

1) 由于在实际轧制变形过程中，轧辊相对轧件的塑性变形微乎其乎，且不考虑弹性变形，模拟时可以假定轧辊为刚体；

2) 轧辊和轧件之间的摩擦符合库伦摩擦定律；

3) 假设棒材在稳态轧制过程中温度保持不变，因此轧件的弹性模量可以取稳定轧制温度下对应的弹性模量。

2.1 单元和材料属性

建模时轧件和轧辊的材料特性参数如表 1 所示，坯料和轧辊均采用 SOLID164 单元进行网格划分。现实生产中轧机布置为紧凑式连轧机组，为了缩短轧制时间从而减少计算量，模拟时机架间距定 0.15 m，用网格扫掠的方法划分网格。对轧件进行网格划分时，要想轧件在连轧机组中做稳态轧制，必须保证轧件的长度，同时考虑到减少轧件单元格划分数量以节省计算时间，这里综合取为 0.5 m。由于连轧机组由 Y 型轧机组成，且为正 Y 倒 Y 交替布置，轧件在轧制过程中六向受压，划分网格时使轧件圆截面六等分，以便于观察模拟结果中轧件在圆周方向上的受力和变形；同时考虑到钛合金塑性差、难变形，轧件模拟过程中难以咬入的问题，在划分单元网格时仅将轧件的头部划分得相对密集^[7]，如图 3a 所示，这样既有利于模拟

过程的咬入计算，又减少了单元数量。最终在建立的模型中，平三角孔型中每个轧辊划分为 2040 个单元格，圆三角孔型中每个轧辊划分为 2520 个单元格，轧件划分为 108 000 个单元格，改进型平三角孔型轧辊网格划分如图 3b 所示。

2.2 初始轧制条件

模拟时，轧件以恒定初速度 $v_0=0.25$ m/s 向轧辊运动，咬入后依靠与轧辊之间的接触摩擦完成轧制过程，轧制参数如表 2 所示。轧件与轧辊之间的接触定义为自动面对面接触，接触面为轧件，目标接触面为轧辊。结合热轧圆钢有限元分析和现场工艺润滑条件，轧件与轧辊之间的静摩擦系数设为 0.3，动摩擦系数设为 0.28^[8]。

生成有限元模型，并且完成有限元软件的其余前处理操作，然后生成关键字 k 文件 (LS-DYNA 程序的标准输入文件)，递交给 LS-DYNA SOLVER 求解器进行计算，建立好的整体有限元模型如图 4 所示。

表 1 材料属性参数

Table 1 Parameters of material

| Part | Density/ kg m ⁻³ | Elastic modulus/ GPa | Poisson ratio | Yield strength/ MPa | Shear modulus/ MPa |
|-----------------|--------------------------------|----------------------------|------------------|---------------------------|--------------------------|
| Roll | 7850 | 210 | 0.30 | | |
| Rolled piece | 4450 | 60 | 0.41 | 72 | 30 |

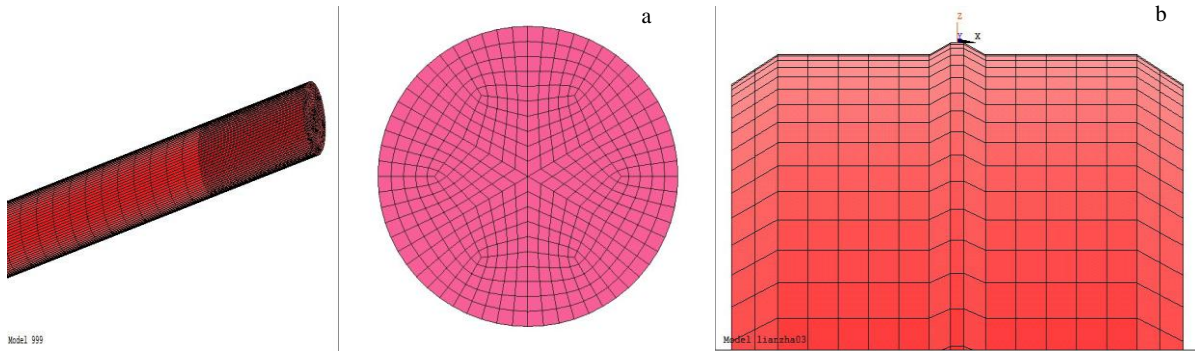


图 3 有限元模型

Fig.3 Finite element models: (a) the mesh division of the workpiece and (b) the mesh division of the improved flat triangle roller

表 2 轧制参数

Table 2 Rolling parameters

| Pass | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|---|-------|--------|-------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Nominal diameter of roll/mm | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 | 200 |
| Working diameter of roll/mm | 200 | 198.81 | 200 | 198.81 | 200 | 198.80 | 198.15 | 198.15 |
| Roll linear velocity/m · s ⁻¹ | 0.473 | 0.597 | 0.642 | 0.719 | 0.777 | 0.878 | 1.05 | 1.2 |
| Roll angular velocity/rad · s ⁻¹ | 4.726 | 6.006 | 6.422 | 7.233 | 7.77 | 8.833 | 10.598 | 12.112 |
| Fill ratio/% | 0.9 | 0.93 | 0.88 | 0.93 | 0.88 | 0.94 | 0.99 | 0.99 |



图 4 整体有限元模型

Fig.4 Whole finite element model

3 模拟结果与分析

LS-PREPOST 是 ANSYS/LS-DYNA 自带的后

处理软件，对模拟结果进行处理和分析。钛合金棒材在连轧各道次稳定轧制阶段坯料横截面变形过程如图 5 所示。

为了检验在改进型连轧孔型中轧件轧制结束后的尺寸精度，在坯料的头尾各 0.1 m 处和中间部位 3 处地方取 3 个截面，如图 6 中 A、B、C 3 点处，然后观察轧制结束后对应 3 点处的断面变形情况，如图 6a~6c 所示。相对于传统的“平三角-圆”孔型系统，其轧件断面变形网格则出现了明显的扭转变形，并伴有非常严重的耳子，如图 6d 所示。可见，改进型孔型系统轧制的钛合金棒材的圆截面尺寸精度明显得到了改善，传统孔型常见的轧制缺陷如图 7 所示。

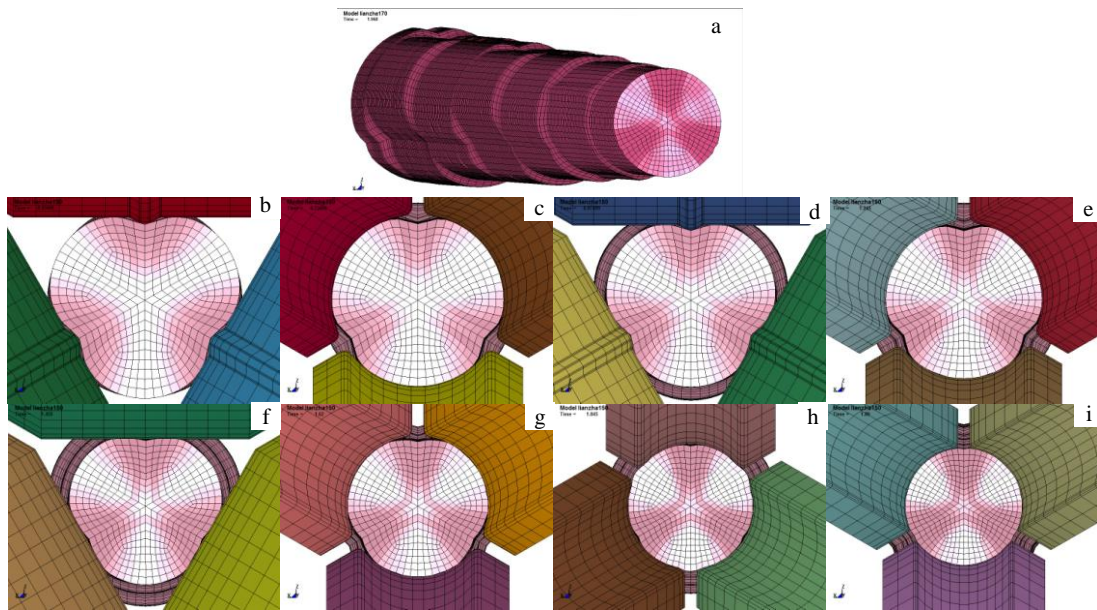


图 5 轧件横截面变形过程图

Fig.5 Cross-sectional deforming process of the workpiece: (a) the deformation of the workpiece in some passes, (b) the first stand, (c) the second stand, (d) the third stand, (e) the fourth stand, (f) the fifth stand, (g) the sixth stand, (h) the seventh stand, and (i) the eighth stand

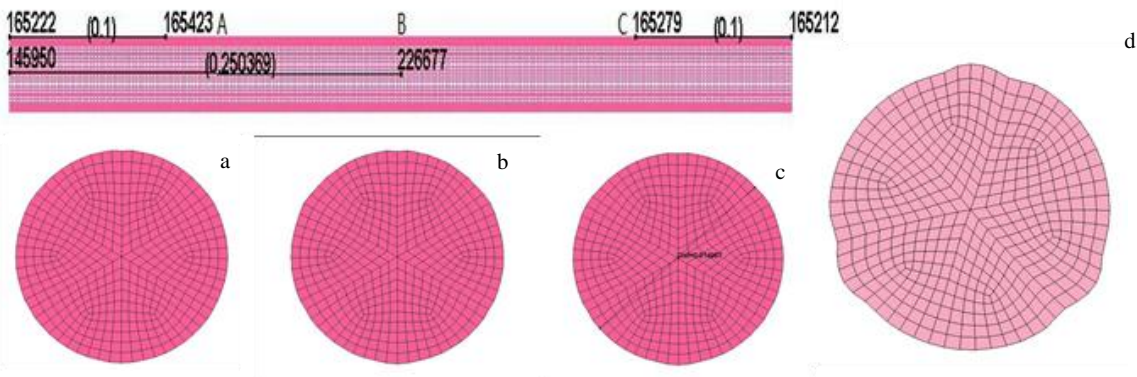


图 6 轧制结束后轧件横截面变形网格

Fig.6 Cross-sectional deforming meshes of the workpiece after rolling: (a) point A, (b) point B, (c) point C, and (d) the cross-sectional deforming meshes of the workpiece in the traditional flat triangle-round passes system

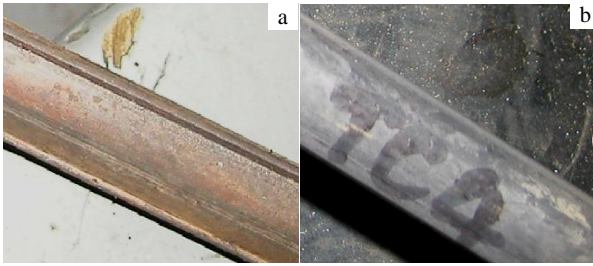


图 7 传统孔型常见的轧制缺陷

Fig.7 Common rolling defects in the traditional pass: (a) ears and (b) twist

本次模拟采用的轧机是三辊 Y 型轧机，轧件在模拟轧制过程中六向受压，为了研究钛合金棒材在轧制过程中轧件横截面随时间的具体变形过程，由于对称性取轧件的 1/6 也即图 8a 中 A~C 区域作为研究对象，在 A、B 2 点和 B、C 2 点之间再各取 2 点 D、E，把由 LS-DYNA SOLVER 求解器得到的 A、B、C、D、E 5 点处的直径随时间变化数据导入到 Origin 软件中，得到图 8b 所示曲线。因为 A 点和 C 点具有对称性，所以这 2 点处直径随时间变化的曲线在图 8b 中

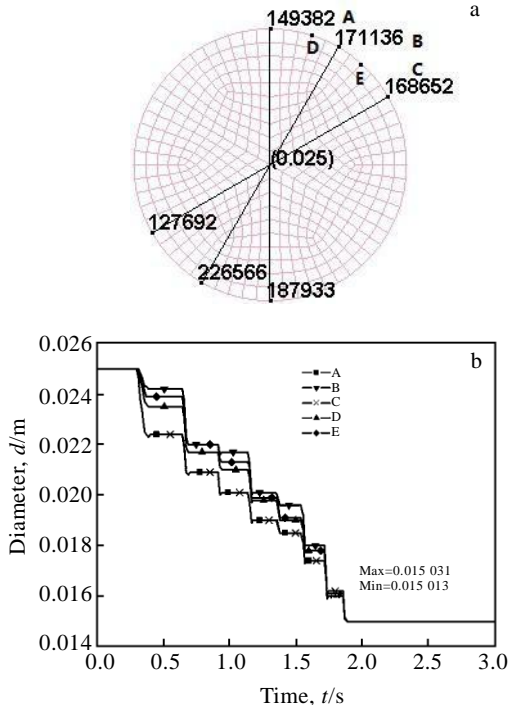


图 8 轧件断面直径随时间变化图

Fig.8 Change of the diameter of the rolled piece section over time: (a) the specified point diameter and (b) the consolidated graph

基本重合。A点和C点交替位于辊底和辊缝处，B点则始终位于辊底和辊缝的中间过渡处，3点处的直径处于临界位置相对于整个轧件具有代表性。从图8b中可以直观明了的看出A、B、C、D、E处轧件直径在整个轧制阶段的变化趋势，并且可以从图中读出轧制开始时棒材的直径值0.025 m，也即坯料的直径，轧制结束后各曲线趋于一条重合的直线，且成品钛棒直径变化范围为0.015013~0.015031 m，可知轧制结束后轧件的圆截面各处直径值差异较小，圆度非常好，和成品理论直径0.015 m相比符合GB/T702-2008规定的热轧圆钢尺寸偏差要求。

4 结 论

1) 基于改进型“平三角-圆”孔型系统，结合 ANSYS/LS-DYNA 非线性有限元软件，生动形象的模拟出了钛合金棒材在连轧机组中的变形过程。

2) 改进型平三角孔型相当于在传统的平辊辊底处加装了一圈梯形块，这样在轧制时，梯形块压入轧件中并且轧件被压入的部位出现在下一道次圆孔型的辊缝处，减少了轧件金属向辊缝处的流动幅度，从而减少了耳子的产生。

3) 梯形块压入轧件中也起到了对轧件的定位作用，大大减弱了轧件在传统平三角孔型中由于轧件金属密度不均匀、轧件的弹性回复、轧机工作震动引起的轧件金属周向流动的不均匀性，在很大程度上降低了在传统“平三角-圆”孔型系统中常见的轧件扭转问题的发生概率。

4) 同时梯形块的存在也限制了轧件金属的周向流动，迫使金属轴向延伸，进而提高了道次延伸系数，增加了道次压下量，在一定程度上解决了因压下量过大带来的诸多问题，还可以充分利用现有设备，增大坯料尺寸继而增强了坯料的加工能力。

5) 从最终的模拟结果可以直观的看出改进型“平三角-圆”孔型系统能够很好改善钛合金棒材的圆度，进而提高了产品的尺寸精度。

参考文献 References

[1] Huang Yongguang(黄永光). *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20: 891
 [2] Hu Haiping(胡海萍). *Journal of Science and Technology Beijing*(北京科技大学学报)[J], 1999, 21(4): 373
 [3] Shai Meirong(帅美荣), Qin Jianping(秦建平). *Modern Manufacturing Engineering*(现代制造工程)[J], 2008, 3: 102
 [4] Shai Meirong(帅美荣), Huang Qingxue(黄庆学), Qin Jianping(秦建平) et al. *Rare Metal Materials and*

- Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2012, 41(6): 952
- [5] Shai Meirong(帅美荣), Huang Qingxue(黄庆学), Zhu Yanchun(朱艳春) *et al.* *Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2013, 42(5): 909
- [6] Guo Lafeng(郭拉凤), Yuan Meini(原梅妮), Liang Minjie(梁敏洁). *Chinese Journal of Rare Metals*(稀有金属)[J], 2011, 35(2): 196
- [7] Zhang Chuanguo(章传国), Liu Jing(刘靖), Han Jingtao(韩静涛). *Journal of Plasticity Engineering*(塑性工程学报)[J], 2005, 12: 155
- [8] Zhang Xiaoyong(张小勇), Chen Guo(陈果), Zhou Jialin(周家林). *Journal of Wuhan University of Science and Technology* (武汉科技大学学报)[J], 2010, 33(4): 373

Deformation Process Analysis and Pass Optimum Design for Continuous Rolling of Titanium Alloy Bars

Ye Liping, Zhu Yanchun, Qin Jianping

(Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The existing flat triangle pass was improved in the "flat triangle-round" pass system of titanium alloy bar hot continuous rolling, based on analysis of rolling process and finite element simulation. Titanium alloy TC4 rod with $\Phi 25$ mm was rolled to that with $\Phi 15$ mm by the improved 8 stand tandem Y type rolling mill, aimed to solve the problems such as ears throughout the bar, twist and the poor roundness, and to improve the dimension precision of productions.

Key words: titanium alloy bar; finite element simulation; flat triangle pass; optimum design

Corresponding author: Zhu Yanchun, Ph. D., Lecturer, School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, P. R. China, Tel: 0086-351-6998115, E-mail: lzlyzc@163.com