

# 液压缸缸筒内孔滚压工艺的有限元模拟

王宾

(山西平阳重工机械有限责任公司, 山西 侯马 043003)

**摘要:** 为了更好地研究缸筒内表面成形质量以及工艺参数的合理性。利用 Deform 有限元分析软件对液压缸缸筒内孔表面滚压加工状态进行有限元分析, 从分析结果中得到缸筒的等效应力、表面受力分布、材料速度矢量以及成形表面质量等, 通过缸筒内孔滚压的有限元分析, 对液压缸缸筒内孔滚压成形工艺编制提供了一定的指导。

**关键词:** 液压缸缸筒; 滚压; 有限元模拟

**DOI:** 10.3969/j.issn.1674-6457.2017.04.024

**中图分类号:** TG376.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-6457(2017)04-0130-05

## FEM Simulation of Inner Hole Rolling of Hydraulic Cylinder Barrel

WANG Bin

(Shanxi Pingyang Industry Machinery Co., Ltd., Houma 043003, China)

**ABSTRACT:** The paper aims to study surface shaping quality and reasonability of technological parameter in cylinder barrel preferably. FEA software was adopted to have finite element analysis on inner hole rolling state of hydraulic cylinder barrel. Equivalent stress, surface stress distribution, velocity vector and forming surface quality, etc. of the cylinder barrel were obtained from analysis. Finite element analysis on inner hole rolling of hydraulic cylinder barrel provide certain guidance for forming inner hole rolling process of hydraulic cylinder barrel.

**KEY WORDS:** hydraulic cylinder barrel; rolling; FEM simulation

有限元方法是一种常用的进行工艺模拟加工的方法, 分析精度高、功能强、分析范围广, 适用于任何塑性加工模拟。能够有效地处理模具特征、工件与模具之间的加工状况、材料的硬化强化效果、不同点材料的速度情况以及温度等对材料塑性加工的影响, 可以形象地获得应力场、速度场、温度场等塑性成形过程中材料力学和流动的相关信息, 并且可以分析质量缺陷的由来, 为企业实际生产加工提供科学的理论参考<sup>[1]</sup>。金属的滚压塑性成形是由金属材料的局部塑性成形, 演变成连续局部塑性成形的一种特殊的材料加工方法, 利用有限元分析技术能够得到金属滚压成形中的应力场、应变场和极限载荷等, 经过调整工艺参数, 可以获得零件加工中最合理的工艺参数, 来优

化和提高工件的加工质量和使用寿命。

## 1 液压缸缸筒内孔滚压成形原理

滚压加工原理见图 1, 缸筒内孔滚压加工状态见图 2。滚压加工是通过滚压头沿缸筒轴向进给, 缸筒旋转, 滚压头中的滚柱径向辗压缸筒内孔壁。当金属表面的压应力超过材料弹性极限时, 金属晶粒之间发生位错、滑移和破碎, 金属比容增大, 就会发生材料的塑性变形, 平整了缸筒内孔表面的微观不平度, 提高了缸筒内孔表面耐蚀能力, 同时缸筒内孔表层产生了冷作硬化, 提高了表面硬度, 改善了缸筒内孔表面质量<sup>[2]</sup>。

收稿日期: 2017-05-06

作者简介: 王宾(1980—), 男, 工程师, 主要从事新产品开发。

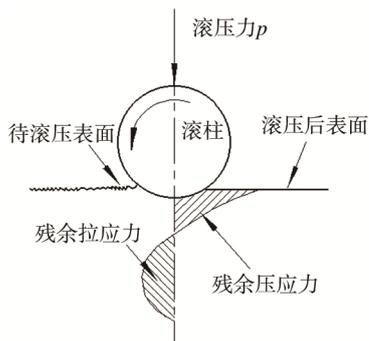


图1 滚压加工原理  
Fig.1 Rolling principle

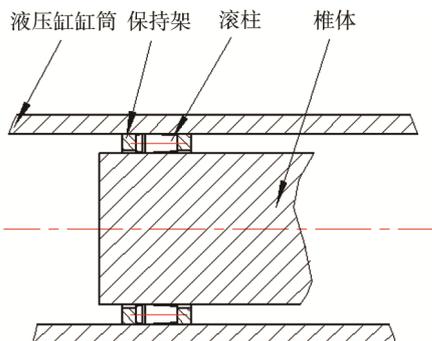


图2 缸筒滚压加工状态  
Fig.2 Cylinder rolling processing

## 2 模型建立与工艺参数设定

有限元分析技术在材料滚压加工中已经得到了普遍的应用，主要集中在花键、螺纹、曲轴类等零件滚压加工过程中<sup>[3-6]</sup>，在对液压缸缸筒及相类似的工件的内孔滚压成形加工的有限元分析报道很少，由于缸筒类型的内孔滚压加工过程金属变形机理非常复杂，其相应的金属材料在滚压下的变形机理研究仅限于理论和加工试验阶段，加工过程中又常常发生质量不稳定的情况，利用有限元分析软件来研究缸筒内孔滚压加工的成形以及与工艺参数的相符合性是必要的。

液压缸缸筒内孔在实际滚压过程中要受到滚压头加工精度、润滑情况、缸筒内孔等多方面因素的制约和影响，为了节约时间，降低计算机分析的工作量，在不影响求解精度的前提下，有限元分析在忽略一些不稳定因素的情况下，对缸筒内孔滚压分析做了如下假设：① 假设温度保温保持不变，为常温 30 °C；② 滚柱为刚塑性材料，忽略弹性变形；③ 假设工件材料为各向同性，材料本构模型为弹塑性；④ 假设摩擦因数为恒定值 0.1。有限元模型见图 3。

文中有限元分析中缸筒材料设置为 27SiMn 钢<sup>[7-8]</sup>，缸筒模型尺寸规格为  $\phi 168 \text{ mm} \times \phi 140 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ ，缸筒材料的屈服强度为 835 MPa，抗拉强度为 980 MPa，弹性模量为 210 GPa，泊松比为 0.3。

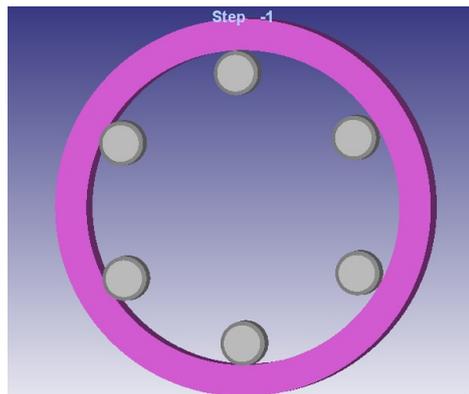


图3 缸筒和模具的有限元模型  
Fig.3 FEM of cylinder and die

滚柱数量对缸筒内孔滚压效果影响很大，滚柱数量多时，会增加对缸筒内孔同一点的滚压次数，增加滚压力的总压力和总功耗，可能导致缸筒内孔金属表层的起皮和脱落现象；滚柱数量少时，会导致缸筒内孔材料滚压不均匀，鉴于实践经验，文中有限元分析采用 6 个滚柱，6 个锥形滚柱沿周向位置均匀分布，滚柱所用材料为 GCr15，热处理后的硬度为 55HRC~60HRC。有限元分析采用实际滚压加工的工艺参数，缸筒模型长度为 50 mm，缸筒模型为弹塑性体，缸筒模型材料为 27SiMn，滚压头外径为 140.25 mm，滚压头轴向移动速度为 6.66 mm/s，滚压头转速为 23.03 rad/s。

在分析中，设定缸筒静止状态，滚柱在公转和自转相结合的情况下进行轴向进给，滚压头沿 z 轴轴向进给速度为 400 mm/min，公转转速为 23.03 rad/s，滚柱自转的转速为 161 rad/s，采用剪切摩擦模型，摩擦因数设定为 0.1，设置界面见图 4。

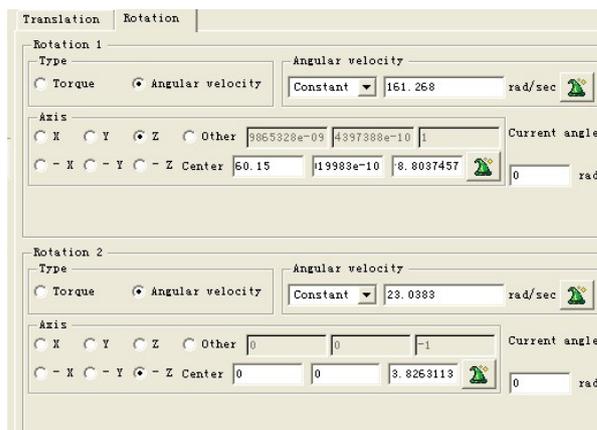


图4 自转和公转角速度设置界面  
Fig.4 Autobiography and orbital angular velocity setting interface

## 3 缸筒模型网格划分

在 Deform-3D 软件的前处理中对缸筒模型进行

网格划分, 网格设置的粗细和数量对分析结果有重要的影响, 网格太细导致分析的工作量太大, 计算时间很长, 效率很低, 网格太粗会导致分析结果准确率低。

缸筒模型网格划分采用塑性有限元分析常用的四面体单元, 鉴于缸筒内孔滚压过程是内孔表层材料的局部变形, 在滚柱和缸筒接触的地方为了有效地反应应力变化, 需要进行网格细化处理, 而离接触表面较远的外层材料中, 受力影响较小, 考虑计算效率在不影响分析结果的情况下网格划分得要粗些。把缸筒模型节点数为 6219 个, 网格划分为 25 019 个, 缸筒模型网格划分情况见图 5。

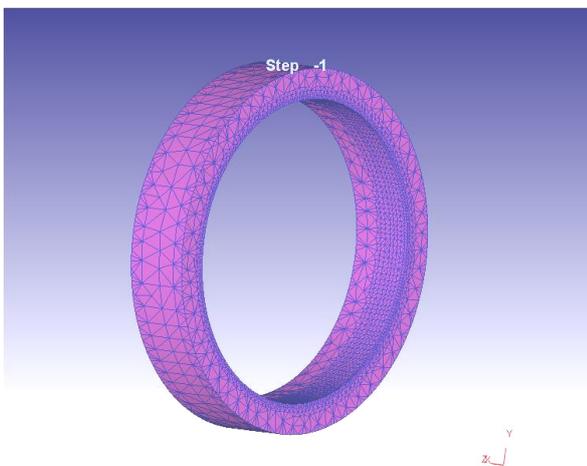


图 5 缸筒网格划分  
Fig.5 Cylinder meshing diagram

## 4 有限元分析相关数据

通过利用软件进行工艺状态的有限元分析, 可以获得缸筒不同位置的金属材料在滚压过程中的一些信息, 比如应力、速度以及金属的变形过程等, 对这些信息进行筛选分析整理, 能够比较全面地对液压缸缸筒内孔滚压过程中金属材料的变化过程有一个详细的了解, 为以后的相应规格乃至类似结构的工件的内孔滚压生产提供参数设定依据。

### 4.1 滚柱受力分析

在缸筒内孔滚压过程中, 滚压头滚柱受力情况是滚压头设计参考的非常重要的参数, 也是选择机床设备的主要参考因素。

缸筒滚压加工过程中滚柱的压力-行程曲线见图 6, 缸筒内孔滚压加工的第 1 阶段在 0~1.3 mm 处, 随着滚柱轴向进给量的增加, 滚柱与工件的接触面积在逐渐增加, 滚柱所受的载荷也在不断增大, 缸筒内孔滚压加工的第 2 阶段在 1.3~3.3 mm 处, 滚柱所受的滚压力随着滚柱径向进给的逐渐增加也在不断增大。

缸筒内孔滚压加工的稳定阶段在 3.3~6.6 mm 处, 缸筒内孔表面金属材料产生了加工硬化, 致使滚柱所受

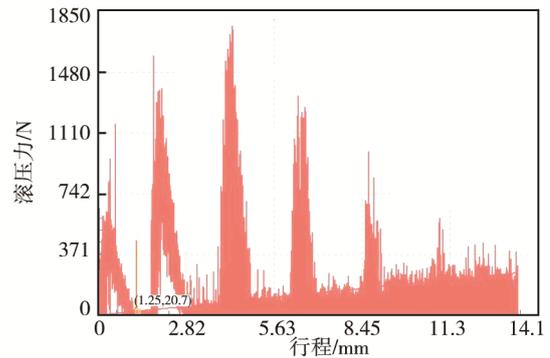


图 6 滚柱滚压力-行程曲线  
Fig.6 Roller pressure curves

的滚压力在不断变化并逐渐增加, 滚柱受的压力最大值达到 1840 N, 在 6.6 mm 以后, 缸筒内孔金属表面已经完全回弹, 滚柱的滚压力开始下降并渐渐趋于稳定, 这个阶段缸筒内孔表面滚压成形已经完成, 金属晶粒得到细化, 光洁度明显提高。从图 6 还可以看出, 缸筒内孔表面在滚压过程中金属是连续局部逐渐成形, 从而导致了每个阶段内滚压力都是在一定的范围内进行波动。

### 4.2 液压缸缸筒内孔滚压过程的等效应力分布

文中分析共进行 10 000 步, 从中选择了第 2 000, 5 000, 8 000, 10 000 步共 4 个不同的时刻来体现液压缸缸筒内孔滚压过程中材料所受的等效应力。滚压过程中的等效应力分布见图 7, 分析可知, 缸筒内孔表面材料在接触区域发生了加工硬化, 在滚柱与缸筒内孔表面初始接触的时候, 导致等效应力均匀分布在滚柱与工件接触的位置。在滚压头沿缸筒轴向逐渐进给的同时, 应力也逐渐开始从滚柱和缸筒接触面, 向缸筒外径传递且应力分布也较为不均匀。滚柱与缸筒内表面接触的部分, 相对离开内孔表面越远的地方, 小区域压应力越大, 滚柱施压给缸筒的压力从内部向外部扩散, 使应力在一定区域呈辐射分布状态现象。

### 4.3 液压缸缸筒内孔滚压过程的速度场

缸筒内孔滚压加工是缸筒旋转、滚压头轴向进给的过程, 在整个滚压过程中, 缸筒内孔表面得到了强化。缸筒内表层金属材料收到滚柱施加的压力后, 在径向方向产生流动堆积强化现象, 导致缸筒内表层金属材料的疲劳强度得到提高。材料的流动速度由缸筒内层向外层由大逐渐变小, 缸筒滚压过程材料速度矢量见图 8。

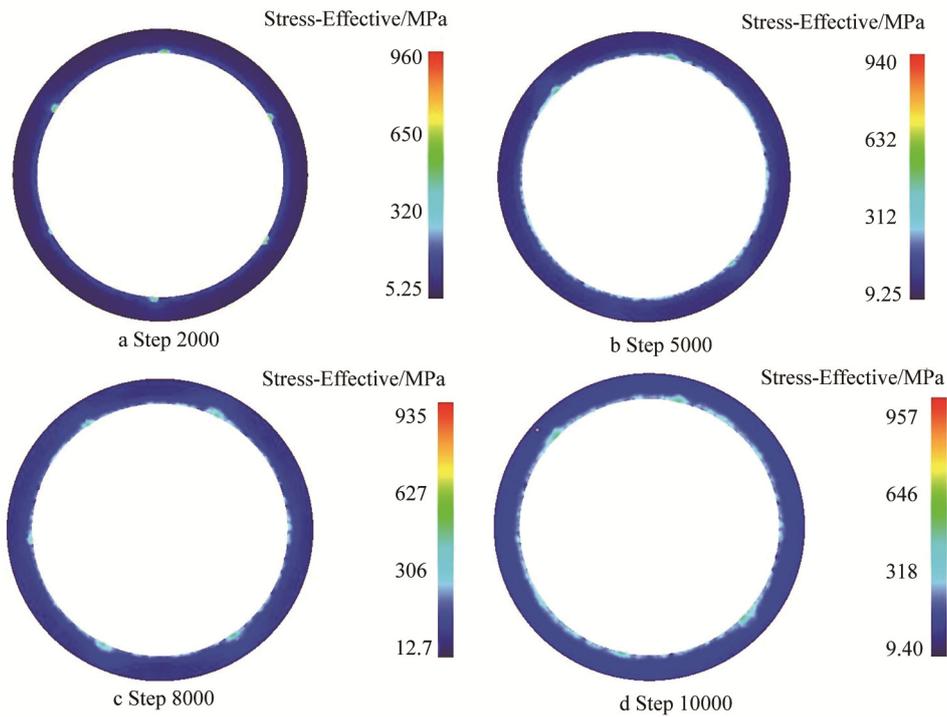


图7 滚压过程中的等效应力分布  
Fig.7 The equivalent stress distribution in the process of rolling

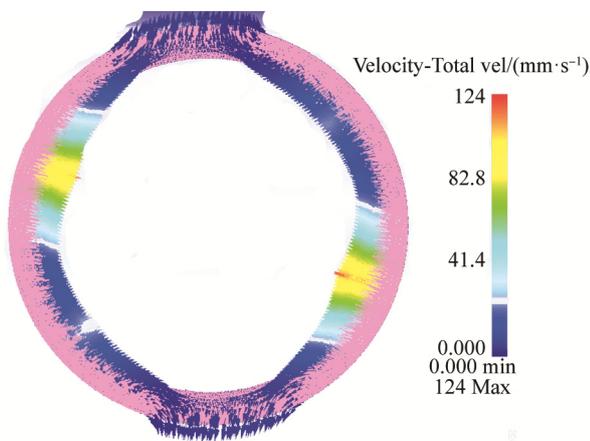


图8 缸筒滚压过程中材料的速度矢量  
Fig.8 Cylinder rolling velocity vector diagram

#### 4.4 液压缸缸筒内孔滚压后的成形效果

有限元模拟缸筒内孔滚压后表面的成形效果见图9，可以明显发现，相对于其他表面材料，内孔表面滚压后发生了塑性变形，而且表面平整、光滑。

#### 4.5 应力变化曲线

受到进给量、滚压速度、滚压力、以及缸筒材料的弹性回复的影响后，缸筒内孔滚压加工后不同位置形成的残余应力不相同，文中选取缸筒内表面周向均布的4个点，来全面分析缸筒内表面产生残余应力的

分布情况。选取4个点的位置坐标分别是：1(70.01, 0, 0.1), 2(0, 70.01, 0.1), 3(-70.01, 0, 0.1), 4(0, -70.01, 0.1)，缸筒滚压后内孔周向上的4个点的应力随时间的变化曲线见图10。从图10可以得到，缸筒内孔在滚压过程中产生了残余压应力。从曲线1来看，该点在受到滚柱滚压之前，受到的应力表现为压应力，滚柱到达该点时施加滚压后，压应力转变为拉应力，该点应力在受到滚柱施加力以及其他多种因素的影响下，在一定范围内波动较大。该点随着滚柱继续推进，已变为滚压后的一点，滚压力和其他因素对该点的影响较小，残余压应力最大值达到-620 MPa，并最终趋于稳定状态，最后形成稳定的残余应力值<sup>[9]</sup>。



图9 缸筒滚压后的效果  
Fig.9 Rolling effect

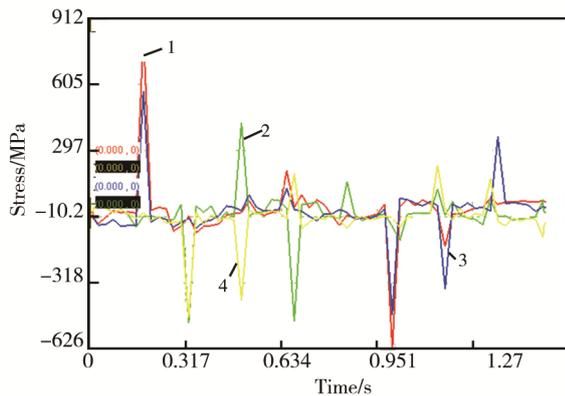


图10 缸筒内4点应力变化的曲线

Fig.10 The curve of stress change at four point

## 5 结论

通过对液压缸缸筒滚压原理进行了介绍,通过对一种缸筒在一组工艺参数下进行了数值模拟,给出了滚柱受力、缸筒应力、材料速度场参数,得出了比较合理的表面质量。缸筒滚压工艺数值模拟是在比较理想的条件下进行的,需要进行大量的模拟和实践才可以给出合理的参数参考。缸筒滚压工艺数值模拟在一定程度上还是能够比较真实的反映实际情况,在实际不能进行实物试验的情况下,数值模拟还是有很大的帮助。充分利用计算机数值模拟能够对缸筒滚压工艺在不同的工艺参数下进行分析对比,对比分析结果能够给出较合理的工艺参数,尤其是直径在 $\Phi 400$  mm以上的缸筒由于现有滚压工艺不太完善,尤其适合利用计算机数值模拟对工艺进行参数优化。

### 参考文献:

- [1] 谢水生,王祖唐.金属塑性成形工步的有限元数值模拟[M].北京:冶金工业出版社,1997.  
XIE Shui-sheng, WANG Zu-tang. Finite Element Numerical Simulation of Metal Plastic Forming Process[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997.
- [2] 程通模.滚压和挤压光整加工[M].北京:机械工业出版社,1989.  
CHENG Tong-mo. Roll Pressure and Press the Finishing Process[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989.
- [3] 毛华杰,沈小燕.粉末冶金件表面滚压塑性变形强化过程的数值模拟[J].热加工工艺,2010,39(11):110—114.  
MAO Hua-jie, SHEN Xiao-yan. Numerical Simulation of Powder Metallurgy Components Strengthened by Surface Rolling[J]. Hot Working Technology, 2010, 39(11): 110—114.
- [4] 李永堂,张大伟,宋建丽,等.花键冷滚压精密成形力学分析与数值模拟[J].锻压装备与制造技术,2007,15(6):79—82.  
LI Yong-tang, ZHANG Da-wei, SONG Jian-li, et al. Mechanics Analysis and Numerical Simulation on the Precise Cold Roll Forming Process of Spline[J]. China Metal Forming Equipment & Manufacturing Technology, 2007, 15(6): 79—82.
- [5] 王明福,付建华,刘志奇,等.花键冷滚压成形有限元分析[J].锻压技术,2010,35(4):55—59.  
WANG Ming-fu, FU Jian-hua, LIU Zhi-qi, et al. Finite Element Analysis of Spline Cold Roll Forming Process[J]. Forging & Stamping Technology, 2010, 35(4): 55—59.
- [6] 王红军.基于DEFORM软件的车削加工仿真[J].现代制造,1998,42(2):56—62.  
WANG Hong-jun. Turning Processing Simulation Based on DEFORM Software[J]. Modern Manufacturing, 1998, 42(2): 56—62.
- [7] 尚显光,王向杰,赵俊岩.“零保温”淬火温度对27SiMn钢组织和性能的影响[J].机械与电子,2007,17(21):362—365.  
SHANG Xian-guang, WANG Xiang-jie, ZHAO Jun-yan. The Effect of "Zero Insulation" Quenching Temperature on 27SiMn Steel Structure and Performance[J]. Science & Technology Information, 2007, 17(21): 362—365.
- [8] 李敏科,李春强,解文正.基于ABAQUS的27SiMn钢管温度场变形分析[J].科技传播,2010,142(5):140—143.  
LI Min-ke, LI Chun-qiang, XIE Wen-zheng. Deformation Analysis Based on the 27SiMn Steel Tube Temperature Field of ABAQUS[J]. Public Communication of Science & Technology, 2010, 142(5): 140—143.
- [9] 王晓璐.液压缸内孔滚压工艺的模拟及实验研究[D].太原:太原科技大学,2011.  
WANG Xiao-lu. Simulation and Experiment of Hydraulic Cylinder Inner Rolling Pressure Process[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2011.