环件径向冷轧塑性变形及残余应力分布仿真

赵晓慈 张以都 张洪伟

(北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘 要: 为了消除环件冷轧过程中产生的残余应力, 采用弹塑性大变形有限元法对环件径向冷轧过程进行仿真. 研究揭示了矩形截面铝合金环件径向冷轧工艺中总压下量不变时, 芯辊进给速度对环件塑性变形大小及分布规律的影响. 结果表明: 进给速度相对较小时, 环件鱼尾形状系数较大, 随着进给速度进一步增大, 鱼尾形状系数反而减小. 根据塑性变形的不一致性产生残余应力的原理, 进一步分析由此塑性变形规律形成的残余应力分布情况, 从而为消除冷轧后残余应力提供理论依据.

关 键 词: 径向轧制; 有限元; 残余应力

中图分类号: TP 391.9

文献标识码: A 文章编号: 1001-5965(2008)09-1088-04

Simulation analysis of plastic deformation and residual stress distribution of radial ring rolling

Zhao Xiaoci Zhang Yidu Zhang Hongwei

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract To eliminate the residual stress formed during the process of ring rolling, the radial ring rolling was simulated by elas-plastics large deformation finite element analysis. Al alloy rings with rectangular cross-section were adopted as workpieces and total depressing amounts of mandrel with different feed velocities were identical. Magnitude and distribution of plastic deformation in different feed velocity of mandrel were studied. The simulated results show that the fishtail shape coefficient is high when the feed velocity is relatively low and will be reduced with increase of feed velocity. According to the mechanism that inconsistent plastic deformation is the cause of residual stress, the corresponding residual stress distribution of radial ring rolling was analyzed. The research provides foundation for the residual stress relief study.

Key words radial rolling; finite element; residual stress

环件轧制又称为环件辗扩, 它是一种高效优质少切削的连续局部成形的先进塑性加工工艺. 环件轧制具有加工质量好、生产效率高、生产成本低、材料利用率高等一系列优点, 是航空发动机、火箭发动机、航空飞机、轴承环等无缝环件的重要加工工艺, 在航空航天、火车、船舶等工业部门得到日益广泛的应用. 由环件轧制形成的毛坯在后期的加工过程中会产生较大的变形, 变形的原因有很多, 如加工受力变形、残余应力变形、切削热变形等, 其中残余应力变形是一个重要方面. 目前我国几家主要的飞机制造企业在生产过程中都遇到了无法准确控制因残余应力而引起的环件加工变形问题, 因此, 准确模拟出轧制后残余应力的分布并消除残余应力已经成为急需解决的关键问题. 金属冷轧后的残余应力是由于表面和心部材料的塑性变形程度不一致而造成的[1]. 且不均匀的塑性变形引起的残余应力与应变的正负号恰恰相反, 即相对伸长的部分件呈现压应力, 未伸长或相对缩短的部分则呈现拉应力. 目前有关资料已对环件轧制进行有限元数值模拟, 但以讨论轧制工艺对环件成形的影响为主, 未讨论轧制后环件中的残余应力分布. 本文在研究径向轧环变形的

收稿日期: 2007-09-13

基金项目: 航空"十五"支撑技术资助项目 (B2120061326)

作者简介: 赵晓慈 (1979-), 女, 江苏大丰人, 博士生, skyzh@me.buaa.edu.cn

基础上, 进一步研究轧后环件内残余应力分布规律, 为今后消除轧后环件残余应力作参考.

1　仿真模型的建立

环件冷轧是集几何非线性、物理非线性和边界条件不稳定于一身的非稳态三维变形过程. 本文采用具有强大求解非线性功能的 MSC. Marc作为仿真平台, 建立环件径向轧制模型如图 1所示. 驱动辊绕固定轴旋转, 芯辊向驱动辊方向连续进给, 环件在驱动辊和芯辊的作用下反复通过两辊之间的缝隙 (孔型)产生壁厚减薄, 直径增大的连续变形, 两个导向辊以一定的约束力抱住环件起定心和防振作用.

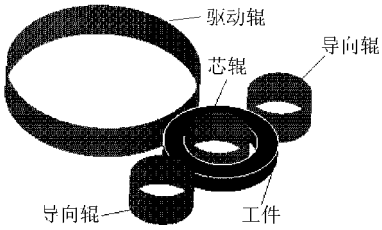


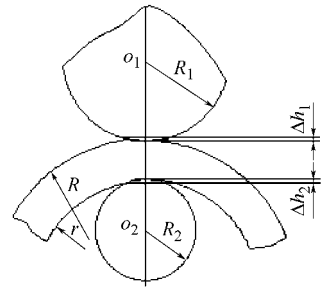
图 1　环件径向轧制模型

由于研究的是常温下环件轧制过程, 材料的弹性变形不可忽略, 因此采用弹塑性有限元模型, 不考虑温度对材料塑性变形的影响. 为使环件能被咬入, 假设驱动辊、芯辊与环件表面接触均匀, 摩擦系数为 0. 3, 采用库仑摩擦模型; 导向辊与环件之间采用无摩擦模型. 在环件轧制中驱动辊、芯辊和导向辊的变形相对于环件的变形很小, 因此, 在接触设置中将驱动辊、芯辊和导向辊设置成刚体, 环件设置成可变形体. 导向辊的位移路径参考文献 [2]的设置方法. 本文采用的环件材料为典型的铝合金, 密度 2 700 kg/mm^3, 弹性模量 71 GPa, 泊松比 0. 3, 网格划分采用 8节点的六面体单元. 由于大型环件轧制过程的模拟要消耗很大的计算机资源, 因此为了缩短计算时间, 本文建立了较小尺寸的环件和模具, 具体尺寸及工艺参数如下: 驱动辊转速为 3 rad/s, 芯辊进给速度为 0. 5~ 3mm/s, 环件初始外径为 61. 915mm; 环件初始内径为 39. 685mm; 环件初始高为 20mm; 壁厚减小量为 6. 23mm; 驱动辊半径为 104. 8mm; 芯辊半径为 34. 9mm; 导向辊半径为 34. 9mm. 本文的研究方法同样适用于大直径环件的轧制模拟.

2　分析与讨论

2. 1　环件金属的流动

环件轧制中, 由于驱动辊与芯辊直径相差悬殊, 两辊又分别从环件的内外表面对其进行轧制进给, 所以两辊对环件的内外进给量是不同的. 环件轧制进给的几何关系如图 2所示.



Δh_1—驱动辊对环件外表面的进给量;
Δh_2—芯辊对环件内表面亦即内孔的进给量.

图 2　环件轧制进给的几何关系示意图

若忽略进给中轧辊的弹性变形, 则由文献 [3]得

$$\frac{\Delta h_1}{\Delta h_2} = \frac{1/R_1 + 1/R}{1/R_2 - 1/r} \qquad (1)$$

式中, R_1和 R_2分别为驱动辊和芯辊的工作半径; r 和 R 分别为环件的内外半径. R_1和 R_2保持不变, 在轧制开始时 R 和 r值最小, 此时分母值达到最小, 而分子值达到最大, 式 (1)的比值最大; 随着轧制的进行环件内径 r和外径 R 逐渐增大, 式 (1)的分子逐渐减小, 而分母逐渐增大, 环件外表面进给量与内表面进给量的比值逐渐减小. 在一般的环件轧制中驱动辊半径远大于芯辊半径, 因此外表面进给量比内表面进给量大, 本文中 $\Delta h_1/\Delta h_2$比值范围为 1. 79~ 7. 44

图 3是仿真得到的进给速度为 1mm/s时轧制终了环件等效塑性应变分布图, 由图知环件外表面塑性变形大于内表面塑性变形, 心部变形最小, 这与理论推导是一致的.

图 4为环件轧制轴向宽展的径向截面图. 由图可知环件外侧的轴向宽展比内侧的轴向宽展大, 这与环件内外侧塑性变形大小相对应, 即外侧塑性变形大, 金属流动大, 轴向宽展较大; 内侧塑性变形相对较小, 金属流动小, 轴向宽展也较小. 在芯辊不断进给作用下, 环件内外表面首先发生

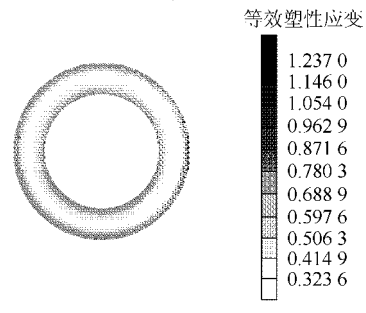
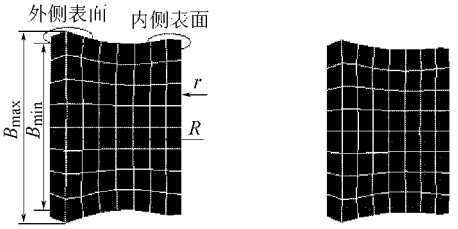


图 3　轧制后环件等效塑性应变分布图

塑性变形, 然后逐渐渗透到心部, 产生较小塑性变形, 使环件心部产生很小的轴向宽展, 甚至会出现负轴向宽展. 环件的内侧和外侧表面比相邻区域的轴向宽展要小. 这主要由于环件内外侧表面分别与芯辊和驱动辊接触, 接触面的摩擦阻碍了环件内外表面的轴向宽展.



a 进给速度 1 mm/s b 进给速度 3 mm/s

图 4 不同进给速度下环件径向轧制的轴向宽展

由于金属的不均匀塑性变形, 环件径向轧制轴向端面会出现如图 4所示的鱼尾形状. 鱼尾形状系数即为衡量端面质量的一个重要参数[4], 其定义为: $F_t=\frac{B_{max}-B_{min}}{B_0}$, 其中, B_o为环件的原始轴向宽度; B_{max}和 B_{min}分别为环件轧制终了时自由端面最大、最小宽度.

当进给速度较小时, 单位时间压下量较小, 只有环件表层附近金属发生塑性变形产生轴向流动, 而心部塑性变形很小几乎不产生轴向伸长, 从而环件内外宽展较大, 心部宽展很小, 因此鱼尾形状系数较大如图 4a所示; 当进给速度较大时, 单位时间内环件的压下量增大, 一方面使塑性变形较为均匀地穿透环整个件壁厚, 这有利于金属均匀流动, 鱼尾形状缺陷显著减轻, 另一方面进给速度增大时, 环件与驱动辊之间的压力增大, 摩擦力也随之增大, 从而使环件最外层金属的轴向流动更困难, 这也减小了鱼尾形状系数, 如图 4b所示.

2.2 轧环残余应力分布分析

环件轧制塑性变形的不一致性最终形成了一定分布的残余应力. 图 5是进给速度分别为 1, 2, 3 mm/s下环件轧制方向应力分布.

当进给速度较小时, 单位时间压下量较小, 仅靠近表面的金属材料产生塑性延伸, 而内层材料没有延伸, 或延伸量很小. 由于轧制后环件表面和内层仍为一整体, 轧制时塑性延伸不等的表层和内层之间必然存在应变调节, 即内层材料阻止表层伸长, 而表层材料同时拉伸内层, 从而使内层呈残余拉应力, 表层呈残余压应力. 当进给速度增大时, 单位时间进给量增大, 塑性变形区穿透整个环件厚度, 原先的心部刚性牵制作用消失, 产生较均匀的周向伸长变形, 整个区域轧制方向的应变较均匀, 轧制方向的残余应力也较均匀. 当进给速度进一步增大时, 表面和心部都产生较大塑性延伸, 此时表层金属由于与轧辊之间的接触阻力而延伸量较小, 相反, 内层材料塑性延伸量较大. 这样, 在内层和表层的应变调节中, 将是表层材料阻止内层材料塑性延伸而呈残余拉应力, 内层则呈残余压应力. 这与板材轧制的残余应力分布规律有很大的相似性[5-6]. 即单位时间压缩量较小时, 环件表面呈残余压应力, 心部呈残余拉应力; 单位时间压缩量较大时, 表面为残余拉应力, 往心部方向依次呈压应力和拉应力, 如图 6所示.

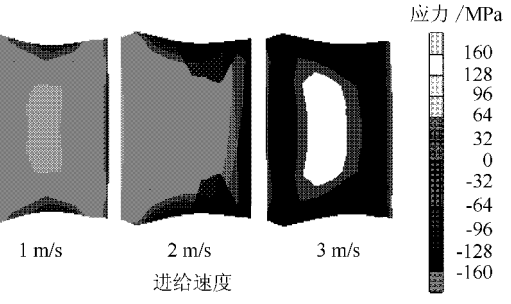
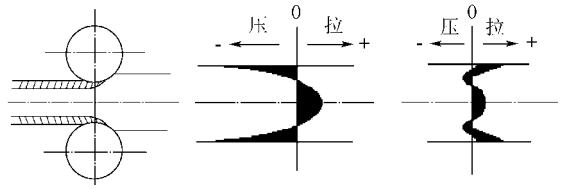


图 5 不同进给速度下环件冷轧后轧制方向应力分布

驱动辊和芯辊的摩擦阻力阻碍了环件内外表面的轴向宽展, 从而对环件的轴向应力分布产生重要影响, 使环件与芯辊和驱动辊接触的内外表面区域呈圆弧形轴向压应力区, 如图 7所示. 由于环件的整体性和应变的调节作用, 环件的心部呈轴向拉应力.



a 板材轧制示意图 b 压缩量小 c 压缩量大

图 6 板材冷轧后残余应力分布

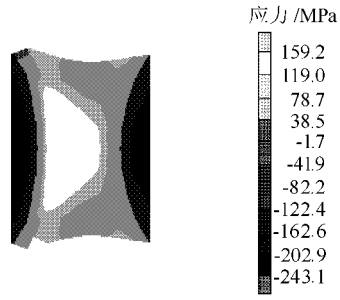


图 7 环件冷轧后轴向应力分布

3 结 论

分析了环件径向轧制过程金属的流动规律, 结果表明环件外表面塑性变形大于内表面塑性变

形. 塑性变形的不一致性导致了轴向端面产生鱼尾形状的轴向宽展. 在此研究基础上进一步分析了环件残余应力分布规律, 即芯辊进给速度较小时, 环件表面呈残余压应力, 心部呈残余拉应力; 芯辊进给速度较大时, 表面为残余拉应力, 往心部方向依次呈压应力和拉应力, 这样的残余应力分布不利于环件的抗疲劳能力, 因此在实际生产实践中不能一味追求生产效率而忽视后期环件的疲劳寿命. 消除和减小轧制后环件的残余应力是解决环件加工变形问题的根本所在, 因此基于本文分析得出的残余应力分布规律, 进一步研究环件的时效技术与方法是下一步研究工作的重点.

参考文献 (References)

[1] 米谷茂. 残余应力的产生和对策 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1983: 210-214
Mi Gumao. The produce and countermeasure of residual stress [M]. Beijing: China Machine Press, 1983: 210-214(in Chinese)

[2] Wang Min, Yang He, Sun Zhichao, et al. Dynamic explicit FE modeling of hot ring rolling process[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2006, 16: 1274-1280

[3] 华林, 黄兴高, 朱春东. 环件轧制理论和技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001: 7-8
Hua Lin, Huang Xingao, Zhu Chundong. Theory and technology of ring rolling[M]. Beijing: China Machine Press, 2001: 7-8(in Chinese)

[4] 李兰云, 杨合, 郭良刚, 等. 芯辊进给速度对环件冷轧工艺的影响规律 [J]. 机械科学与技术, 2005, 24(7): 809-811
Li Lanyun, Yang He, Guo Lianggang, et al. Effect of feed velocity of mandrel on cold ring roll process[J]. Mechanical Science and Technology, 2005, 24(7): 809-811(in Chinese)

[5] 方博武. 金属冷热加工的残余应力 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1991: 84-86
Fang Bowu. Residual stress of metal cold-thermal manufacture [M]. Beijing: China Higher Education Press, 1991: 84-86(in Chinese)

[6] 赵丽丽, 张以都. 预拉伸板轧制-拉伸残余应力的计算机仿真 [J]. 北京航空航天大学学报, 2004, 30(7): 605-609
Zhao Lili, Zhang Yidu. Computer simulation of residual stress for cold rolling prestretching board[J]. Jounal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2004, 30(7): 606-609(in Chinese)

(责任编辑: 文丽芳)

(上接第 1006页)

3 结束语

五轴加工过程中由于曲面表面问题或走刀步长较长而带来的非线性误差严重影响着被加工曲面的表面质量. 五轴加工中奇异点处的加工误差是非线性误差的一种极端情况. 本文提出了一种通过监测刀轴变化来检测并修正非线性误差的方法. 该方法可以应用于处理由刀轴的变化量过大而带来的非线性误差问题, 通过对刀轴变化的监测可以避免刀轨整体加密带来的过大的计算量, 从而减少了计算时间, 提高了加工效率. 仿真结果表明了该方法的有效性.

参考文献 (References)

[1] 周济, 周艳红. 数控加工技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002: 200
Zhou Ji, Zhou Yanhong. Technology of NC machining [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 200(in Chinese)

[2] Bohez E L J. Compensating for systematic errors in 5-axis NC machining[J]. Computer Aided Design, 2002, 34(5): 391-403

[3] 周济, 周艳红. 五坐标数控加工的理论误差分析与控制 [J]. 机械工程学报, 1999, 35(5): 54-57
Zhou Ji, Zhou Yanhong. Analysis and control of the theoretical error in five-axis NC machining[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1999, 35(5): 54-57(in Chinese)

[4] 范冬青, 张洪. 曲面数控加工中的非线性误差 [J]. 机械设计与制造, 2004, 35(4): 35-37
Fan Dongqing, Zhang Hong. Non-linear error in the NC machining of free surface[J]. Machinery Design & Manufacture, 2004, 35(4): 35-37(in Chinese)

[5] Ramesh R, Mannan M A, Poo A N. Error compensation in machine tools-a review: Part I: geometric, cutting-force induced and fixture-dependent errors[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40(9): 1235-56

[6] Ho Mingche, Hwang Yeanren, Hu Chang-hsia. Five-axis tool orientation smoothing using quaternion interpolation algorithm [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, 43(4): 1259-1267

[7] Munlin M, Makhanov S S, Bohez E L J. Optimization of rotations of a five-axis milling machine near stationary points[J]. Computer Aided Design, 2003, 36(7): 1117-1128

[8] Affouard A, Duc E, Lartigue C, et al. Avoiding 5-axis singularities using tool path deformation[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, 44(4): 415-425

[9] Knut Sørby. Inverse kinematics of five-axis machines near singular configurations[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2007, 47(2): 299-306

[10] Anotaipaiboon W, Makhanov S S, Bohez E L J. Optimal setup for five-axis machining[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(9): 964-977

(责任编辑: 文丽芳)