异形环件多步辗扩模拟

王志军,付建华,齐会萍

(太原科技大学 金属材料成形理论与技术山西省重点实验室,太原 030024)

摘要:目的 采用多步辗扩工艺模型虚拟生产异形环件,研究环件多步辗扩过程中环件的成形规律,为实际生产提供工艺参数。方法 利用 Gleeble-3500D 热模拟实验机对 Q345E 钢进行单道次热压缩实验,建立环件用钢的流变应力模型,在 Simufact 中建立大型锻坯外凹槽内台阶环件多步辗扩三维数值稳定辗扩模型,对环件辗扩过程进行数值模拟。结果 在双件辗扩内台阶环件和外凹槽环件的过程中,在与成形辊的接触部位应变场呈现较大值,环件的温度分布从心部到外逐渐降低,环件的应变与温度分布极为不均匀,辗扩过程需要对芯辊分级降速。结论 通过所建立的多步辗扩模型,可以利用矩形锻坯虚拟生产异形环件。

关键词: 锻坯; Q345E 异形环件; 数值模拟; 热辗扩; Simufact

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2016.06.003

中图分类号: TG316 文献标识码: A 文章编号: 1674-6457 (2016)06-0015-06

Multi-step Simulation of Expanding Exhibition Profiled Ring

WANG Zhi-jun, FU Jian-hua, QI Hui-ping

(Shanxi Key Laboratory of Metallic Materials Forming Theory and Technology, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: Production of Special-shaped Rings by Virtual Multi-step Rolling Process Model, Research the Forming Rule of Ring Parts in Multi-step Ring-expanding Process, for the actual production process parameters. Using Gleeble-3500D thermal simulation testing machine had Q345E steel single pass compression test, Established a flow stress model of forging steel, built a large forging stock for the inner ring outer groove step multistep rolling three-dimensional numerical simulation model of the finite element simulation software SIMUFAC, giving a complete numerical simulation; simulation results are shown the strain field exhibits a large value at the contact portion with the forming roll, the temperature distribution of the ring is gradually reduced from the center to the outside, the strain and temperature distribution of the ring are very uneven, rolling process requires the classification of core roll down. Through the establishment of multi-step rolling model can be used for virtual production of rectangular forging billet ring.

KEY WORDS: forging stock; Q345E shaped ring; forging simulation; hot rolling; Simufact

随着社会对异形截面环件需求的增多,异形环件辗扩工艺的应用也愈加广泛。目前,国外已经能

够生产出截面相对复杂的环件^[1-2], 而国内对于一些 大型非矩形截面环件的生产却并不多见。非矩形截

收稿日期: 2016-10-08

基金项目: 国家自然科学基金(51575371); 山西省重点研发计划重点项目(03012015004)

作者简介: 王志军(1990—), 男, 山西吕梁人, 太原科技大学硕士生, 主要研究方向为锻压设备理论与控制。

通讯作者:付建华(1956—),女,山西太原人,博士,教授,硕士生导师,主要研究方向为特种塑性成形技术、精密成形工艺及设备。

面环件辗扩时经常出现截面轮廓形状不能成形、已 经成形的截面轮廓形状在辗扩过程中又逐渐消失、环件截面轮廓的部分区域不能充满辗扩孔型、环件 在辗扩过程中由于截面轮廓的存在导致碟形翘曲等 特有现象等诸多问题^[3—4]。非矩形截面环件辗扩时横向、纵向的金属流动较为复杂,控制成形也具有高度的复杂性,因此,需要在整个环件的辗扩过程中不断监控,及时调整参数,最终达到成形的目标。

1 异形环件辗扩技术路线

在预生产工程中,生产带有内台阶的大型外凹槽异形环件的实验成本较高,因而需要通过前期利用数值模拟来研究辗扩工艺,进而优化工艺参数用于实际生产。某大型异形环件的尺寸和形状见图 1,环件有内台阶和外凹槽 2 个异形截面轮廓。笔者通过前期大量的数值模拟,发现同时辗扩 2 个轮廓异形环件时辗扩过程不稳定,会出现卡辊和充不满的现象。如果采用将内台阶和外凹槽 2 副孔型的辗扩通过先后 2 步辗扩数值模拟工艺,可以很好地实现异形环件的虚拟生产^[5—6]。第 1 步辗扩内台阶孔型,利用双件辗扩技术一次辗扩 2 个内台阶环件,使第 1 步孔型的辗扩效率也提高。第 2 步外凹槽孔型辗扩变形是在第 1 步辗扩出内台阶环件的基础上继续辗扩,在 2 步辗扩下,可以保证环件充满孔型的同时

外径达到最终尺寸。内台阶的充满容易实现,而在第2步辗扩条件下外凹槽的辗扩过程不够稳定,改进成形辊的进给参数与端面辊旋转后退速度可使得辗扩过程顺利的进行,外凹槽的充满效果也较好。

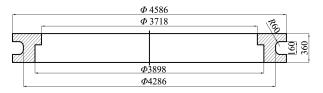


图 1 大型异形环件尺寸和形状 Fig.1 Large shaped ring size and shape

2 内台阶环件热辗扩过程建模

2.1 材料模型

该锻坯材料为德国牌号 S355NL(对应国内牌号Q345E)。材料质量密度为 7850 kg/m³, 弹性模量为210 GPa, 泊松比为 0.3, 比热容为 450 J/(kg·℃),线性膨胀系数取 1.5×10^{-5} ℃。利用 Gleeble-3500D 热模拟实验机对 Q345E 小圆柱棒分别进行单道次热压缩实验。在应变速率为 $0.01, 0.1, 1, 5 \text{ s}^{-1}$,变形温度为 850, 950, 1050, 1150 ℃条件下,取应变为 0.6,得到不同变形条件下 Q345E 钢真应力-真应变曲线,将得到的曲线导入 Simufact 软件中。Q345E 钢高温单道次热压缩变形得到的真应力-应变曲线 见图 2。

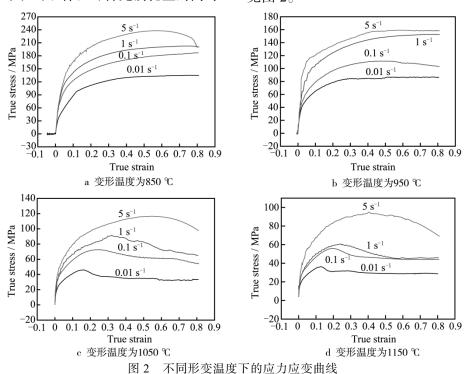


Fig.2 The stress-strain curve under different temperature

2.2 CAE 模型

第 1 步内台阶环件辗扩采用双件辗扩技术,可以避免单件辗扩过程中容易出现爬辊现象,一次辗扩出 2 个内台阶环件用于第 2 步外凹槽的辗扩,又能提高整个异形环件辗扩生产的效率。在 Simufact 软件中利用 Roll Ring 环件辗扩模块中建立内台阶双件辗扩模型,网格划分采用模块的 Ringmesh 划分技术,环件的有限元网格总数为 24 960,单元类型为六面体。整个模型的总步数为 50 758。环件与驱动辊之间存在摩擦和接触热传导,摩擦因数为 0.85,热传导系数为 20 000 W/(m^2 ·K),环件与其他成形辊的摩擦因数为 0.2,环件与空气之间存在热传导和热辐射,热传导系数 50 W/(m^2 ·K),热辐射系数为 0.25 N/(s·mm·K⁴)。模具初始温度为 150 °C,锻坯初始温度为 1200 °C,环境温度为 50 °C。

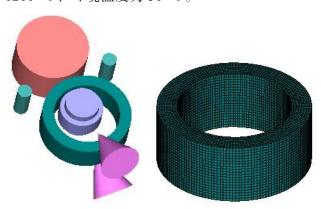


图 3 双件辗扩有限元模型 Fig.3 Two-piece stented finite element model

2.3 进给参数设计

环件辗扩需要同时满足锻透条件和咬入条件,依据某厂锻坯坯料的尺寸(外径×内径×长度)为1564 mm×1064 mm×720 mm, 计算出第 1 步辗扩内台阶成形后的尺寸为 R_{max} 为 1766 mm, R_{min} 为 1270 mm, 台阶高度为 140 mm, 深度为 90 mm。辗扩设备的参数如下:驱动辊半径 R_1 为 1150 mm、芯辊大小直径分别为 600 mm 和 400 mm。根据现有锻坯尺寸以及辗扩设备计算的辗扩工艺参数为:驱动辊转速 30.6 r/min、端面辊初始和终了转速分别为148.718 r/min 和 112.278 r/min。芯辊进给速度在不同的辗扩阶段采用不同的进给规范,咬入阶段为0.8 mm/s,稳定辗扩阶段进行一定的减速为 0.4 mm/s,最后的整圆阶段芯辊不给速度,只是随着

环件进行空转[7-8]。

3 内台阶环件辗扩模拟结果分析

3.1 等效应变场分布规律

根据 Simufact 有限元模拟过程的监控, 在环 件 50%高度方向横向截取,辗扩过程中截面上的 应变分布见图 4。从图 4 可以看出,整个辗扩过程 中,环件的应变分布规律为驱动辊、芯辊与环件 台阶高度的应变、环件的棱角区的应变要明显大 于环件其他部位的应变,且越靠近这些部位的应 变越大。说明整个环件辗扩过程中变形区由成形 辊与环件接触面部位和棱角处向环件内部逐渐扩 展,而台阶垂直方向由于主变形区受到驱动辊较 大轧制力的作用, 也相应产生了较大的应变。环 件内径台阶垂直方向由于芯辊的直线进给,环件 的径向变形大,环件外径台阶端面的应变值在辗 扩过程中与环件内径台阶部位的值趋于一致,这 些区域在环件的辗扩过程中是主要的变形区,这 些区域金属流动有径向和轴向的。整个环件的应 变值大小表明内台阶环件的辗扩过程中变形主要 是台阶高度金属的重新分布过程,整个辗扩过程 比较稳定。

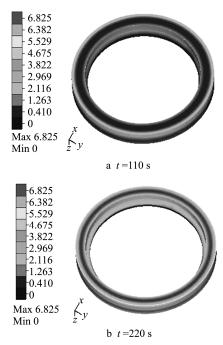


图 4 不同时刻环件应变分布 Fig.4 Different time ring strain contours

3.2 温度场分布规律

在环件 50%高度方向横向截取,环件辗扩过程中截面上的温度分布见图 5。从图 5 中可以看出,环件的高温区域越来越来窄且向环件内部集中,环件内部的温度要远远高于驱动辊和芯辊与环件接触部位的温度,辗扩过程中环件与成形辊的接触传热和环件与空气热辐射对流和传热作用导致环件的局部温度下降较快。

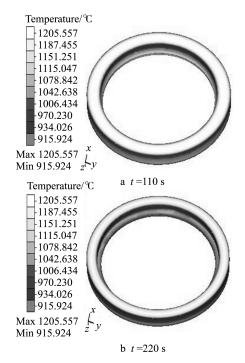


图 5 不同时刻环件温度分布 Fig.5 Different time temperature contours ring

4 外凹槽热辗扩过程建模

外凹槽辗扩利用的毛坯是第 1 步辗扩后的带有内台阶的环件,环件的有限元网格总数为 16 800,单元类型为六面体。整个模型的总步数为 34 047,整个辗扩过程时间为 580 s,其中分别在 126~136 s 内和 226~236 s 内,总计 20 s,这是为了防止辗扩过程中的卡辊现象出现,进而避免芯辊停止进给运动。由于外凹槽的环件辗扩时间较长,为了保证环件的温度在辗扩结束时高于 800 $^{\circ}$,进而将环件的初始温度设定为 1250 $^{\circ}$

外凹槽的高度为 160 mm,深度为 150 mm。主要辗扩工艺参数如下 $^{[11-12]}$:驱动辊大半径 R_1 为 600 mm、小半径为 450 mm,芯辊大小半径分别为 300 mm 和 210 mm,驱动辊转速为 7.644 r/min、端

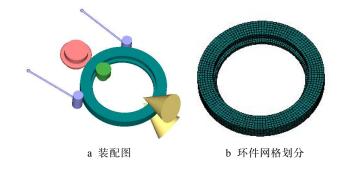


图 6 外凹槽辗扩有限元模型 Fig.6 Outer groove Rolling finite element model

面辊的初始和终了转速分别为 35.743 r/min 和22.550 r/min。芯辊进给速度在不同的辗扩阶段采用不同的进给规范,咬入阶段为 1.2 mm/s;稳定辗扩阶段进行一定的减速,为 0.8 mm/s;整个外凹槽轮廓充满后,芯辊再次降速,以 0.3 mm/s 辗扩环件到预定成品尺寸阶段;最后的整圆阶段芯辊不给速度,只是随着环件进行空转[13—14]。

5 外凹槽环件辗扩模拟结果分析

5.1 等效应变场分布规律

根据 simufact 有限元模拟过程的监控,将环 件按 50%轴向方向纵向截取,辗扩过程中截面上 的应变分布见图 7。从图 7 可以看出,在辗扩过程 中的环件外凹槽填充阶段,驱动辊大半径与环件 接触处,环件大半径垂直面的应变明显大于环件 其他部位的应变,且这些部位的应变值随着芯辊 进给不断增大,这说明在环件外凹槽辗扩过程中, 变形区由驱动辊大半径与环件接触部位和环件台 阶部位向环件内部逐渐扩展, 而驱动辊在外凹槽 垂直方向的应变值最大,因而是主变形区。外凹 槽部位的金属既有径向流动又有轴向流动, 以轴 向流动为主,导致芯辊对环件台阶部位有较大的 辗扩力,内台阶发生较大的应变。在外凹槽轮廓 完全充满阶段,环件外径垂直方向的上下 2 个大 外径由于芯辊的直线进给,环件的径向变形较大, 整个环件外径端面与环件内径台阶高度的应变值 在辗扩过程中最大,并且趋于一致,在外凹槽轮 廓完全辗扩出来直至环件最大外径达到产品尺寸 这一阶段,这些区域在环件的辗扩过程中是主要 的变形区。环件的应变值大小分布规律表明,环 件的辗扩过程中变形主要是外凹槽轮廓充满这一

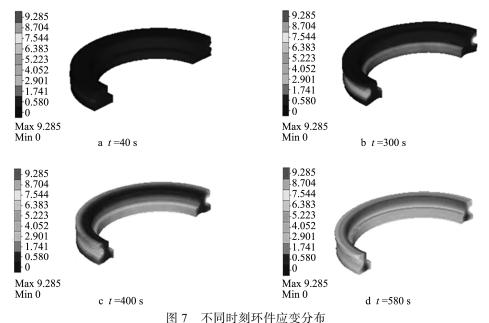


Fig. 7 Different time ring strain contours

阶段金属的重新分布过程,整个辗扩过程相对稳定。

5.2 温度场分布规律

沿轴向 50%方向纵向截取环件,环件辗扩过程中截面上的温度分布见图 8。从图 8 可以看出,辗扩过程中环件的高温区域越来越来窄且向环件内部集中,内部温度要远远高于驱动辊和芯辊与环件接触部位的温度,环件外凹槽高度方向的温

度比环件内部的温度略低,而环件棱角和端面以及环件内台阶部位与成形辊接触传热导致温度下降得最快。在外凹槽辗扩过程中,温度下降较慢是因为在辗扩过程中环件局部产生了温度效应,导致环件的温度局部升高,而环件和成形辊的接触传热以及环件与空气热辐射对流和传热作用会使环件温度下降,在二者共同作用下,产生温度效应的环件部位的温度下降变得缓慢。

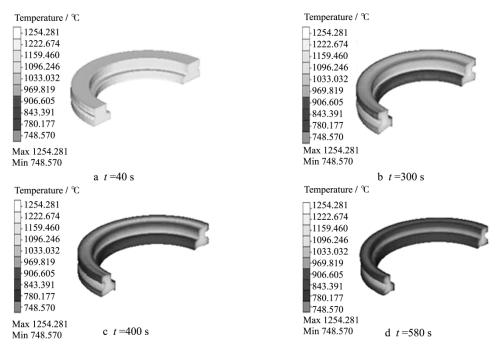


图 8 不同时刻环件温度分布 Fig.8 Different time temperature contours ring

6 结论

- 1) 在驱动辊半径 R₁ 为 1150 mm, 芯辊大小直径分别为 600 mm 和 400 mm, 驱动辊转速 30.6 r/min,端面辊初始和终了转速分别为 148.718 r/min和 112.278 r/min, 芯辊咬入阶段进给速度为 0.8 mm/s,稳定辗扩阶段减速为 0.4 mm/s 的进给参数条件下,双件辗扩内台阶工艺方案辗扩过程平稳,整个环件的应变场在棱角处和成形辊接触的部位呈现较大值,整个环件的变形区由这些部位逐渐向环件内部扩展。在辗扩的过程中温度分布由心部到外逐渐降低,模拟最低的温度在 900 ℃左右,环件部分区域由于温度效应的产生温度会比环件的初始温度略有升高。
- 2) 辗扩外凹槽环件过程中,环件内径和外径 均不对称,环件的辗扩过程可分外凹槽轮廓辗扩阶 段和外凹槽轮廓辗扩结束直至环件最大外径达到 产品尺寸2个阶段。在外凹槽轮廓辗扩阶段,槽高 度方向辗扩时金属既有径向流动又有轴向流动,环 件外径外凹槽高度部位和环件内台阶出应变值最 大,整个环件的变形区由这2个部位向环件内部扩 展,环件内台阶部位与环件外径部位的温度下降最 快。环件轮廓完全充满后,环件外径上下2个端面 与驱动辊接触,在这2个区域内环件应变值与外凹 槽垂直方向和内台阶环件一致,环件变形由这些区 域继续向环件内部扩展,环件的温度心部和槽高度 方向的温度下降较慢,心部散热慢,而槽高度方向 发生了温度效应导致温度下降慢与心部趋于一致。

参考文献:

- [1] CASOTTO S, PASCON F, HABRAKEN A M, et al. Manufacturing Systems for the Production of Seamless-rolled Rings[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996(60): 67—72.
- [2] ALFOZAN A, GUNASEKERA J S. Development of an Experimental Ring Rolling Mill[J]. Forging Industry Educational and Research Foundation, 2003(8): 865— 868.
- [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. HUA Lin, HUANG Xing-gao, ZHU Chun-dong. Ring Rolling Theory and Technology[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001.

- [4] 刘育华, 李永堂, 齐会萍, 等. 外台阶截面环形铸坯 热辗扩成形工艺有限元模拟[J]. 锻压装备与制造技术, 2013, 48(4): 81—83.
 LIU Yu-hua, LI Yong-tang, QI Hui-ping, et al. The Outer Section of the Annular Stepped Slab Hot Rolling Forming Process Fem Simulation[J]. Metal Forming Equipment and Manufacturing Technology, 2013, 48(4): 81—
- [5] ZHOU G, HUA L, QIAN D S. 3D Coupled Thermo-mechanical FE Analysis of Roll Size Effects on the Radial-axial Ring Rolling Process[J]. Computational Materials Science, 2011, 50: 911—924.
- [6] 袁海伦,王泽武,曾青,等. 异形截面环件虚拟轧制及其工艺优化[J]. 塑性工程学报,2006,13(6):15—18. YUAN Hai-lun, WANG Ze-wu, ZENG Qing, et al. Profiled Ring Rolling and Virtual Process Optimization[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2006, 13(6):15—18.
- [7] 刘晓飞. 径轴向轧制过程对环件成型效果影响的数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
 LIU Xiao-fei. Numerical Simulation of Radial-axial Rolling Process Shaping Effect on the Ring[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [8] 袁海伦. 异形截面环件毛坯结构优化设计及轧制过程计算机仿真[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006. YUAN Hai-lun. Profiled Ring Rough Structure Optimization Design and Computer Simulation of Rolling Process[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [9] 钱东升. 异形截面环件冷辗力学原理和工艺设备理论研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009. QIAN Dong-sheng. Study on Cold Rolling Mechanics and Process Equipment Theory of Special-shaped Section Ring Parts[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009.
- [10] 周广. 大型环件径轴向轧制成形工艺理论研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.

 ZHOU Guang .Theoretical Study on Axial Rolling Process of Large Ring Diameter[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.
- [11] 张淑莲, 何养民, 杨大祥, 等. 5 m 径轴向数控轧环机主要参数的确定[J]. 重型机械, 2007(2): 12—14. ZHANG Shu-lian, HE Yang-min, YANG Da-xiang, et al. Calculation of Main Parameters of 5 m Diameter Axial NC Ring Rolling Machine[J]. Heavy Machine, 2007(2): 12—14.
- [12] HUA Lin, QIAN D S, PAN L B. Deformation Behaviors and Conditions in L-section Profile Cold Ring Rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2009, 209(11): 5087—5096.
- [13] ZHAO Y M, QIAN D S. Effect of Rolling Ratio on Groove-section Profile Ring Rolling[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(8): 1679— 1687.
- [14] TIEDEMANN I, HIRT G, KOPP R, et al. Material Flow Determination for Radial Flexible Profile Ring Rolling [J]. Production Engineering, 2007, 1(3): 227—232.