

轴端长度对楔横轧阶梯轴成形光轴端面质量的影响

束学道^{1,2}, 韩素涛^{1,2}, 位杰^{1,2}

(1.宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2.浙江省零件轧制成形技术研究重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要:随着楔横轧工艺的不断创新与产品范围的进一步扩大,阶梯轴楔横轧成形光轴时,由于金属流动的不均匀性导致轴端长度直接影响着轧件轴端质量,从而降低产品的材料利用率。为探明其影响规律,提高轧件端部质量与楔横轧的材料利用率,通过DEFORM-3D有限元软件,采用数值模拟与轧制实验相结合的研究方法,对楔横轧阶梯轴成形光轴的轧制过程进行有限元模拟,通过分析轧制过程中的应力场、应变场及特征点,揭示轧制过程金属流动规律,阐明轧制变形机理;在此基础上,采用交互正交试验设计轴端长度、台阶倾角、台阶长度、断面收缩率4个工艺参数,分析这些参数对轴端凹心的影响关系,即凹心值与轴端长度、台阶倾角成负相关,与台阶长度、断面收缩率成正相关,且随着坯料轴端长度的减小最终轧件端部凹心逐渐增大。应用统计软件SPSS 22.0拟合获得各工艺参数与轧件端部质量的关系方程式,以凹心值等于零为目标,获取了最优轴端长度对端部质量的影响方程式。通过轧制实验与模拟对比分析,获得的轧件形状和最终的端部凹心值基本一致,进一步验证了模拟分析的可靠性。本文获得的公式与端面质量的影响规律,可以有效地从理论上提高轧件端部质量,确定闭联合楔横轧闭式轧制轴端长度,实现楔横轧无料头近净成形。

关键词:轴端长度; 工艺参数; 端部质量; 楔横轧; 凹心

中图分类号: TG335.19

文献标志码: A

文章编号: 2096-3246(2018)02-0177-07

Effects of Shaft-end Length on the End-face Quality of Equal Diameter Shaft Formed with Cross Wedge Rolling from the Stepped Shaft

SHU Xuedao^{1,2}, HAN Sutao^{1,2}, WEI Jie^{1,2}

(1.College of Mechanical Eng. and Mechanics,Ningbo Univ.,Ningbo 315211,China;

2.Zhejiang Provincial Key Lab. of Part Rolling Technol.,Ningbo 315211,China)

Abstract: With the continuous innovation of cross wedge rolling technology, its product range is also expanding. When the stepped shaft is formed to equal diameter shaft by the cross wedge rolling, the quality of the shaft end is directly affected by its length due to the inhomogeneous flow of metal. Besides, the material utilization ratio is reduced. To obtain the better end-face quality and higher material utilization rate, it is necessary to study the influence rule in the cross wedge rolling process. The rolling-forming process was studied with numerical simulations on the DEFORM-3D finite element software and rolling experiments. Based on analysis of the distributions of the stress field, the strain field and the feature points, initially, the law of metal flow was revealed and the deformation mechanism of rolling process was clarified. Taking into account the complexity of influencing factors, the mutual orthogonal experiment was adopted to design the four process parameters of shaft-end length, step angle, step length and cross-section shrinkage ratio. The influence of these parameters on the end concave was verified, and the results showed that the concave value gradually increases as the step length and cross-section shrinkage ratio increase, while with the decrease of shaft length and step angle. Therefore, a smaller concave can be attained by reducing the shaft end length. The software SPSS 22.0 was used to analyze statistical data, and the relationship equation between the process parameters and the quality of the shaft end-face was ascertained. With the concave heart value of zero as the goal, it also determined the influence equation of the optimum shaft-end length on end-face quality. By comparative analyses of the rolling test and the simulation, shapes of the rolled piece and concave values of the end-face were basically same, so the reliability of the simu-

收稿日期: 2017-08-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51475247); 浙江省科技计划资助项目(2016C31018), 浙江省自然科学基金重点资助项目(LZ17E050001)

作者简介: 束学道(1968—), 男, 教授, 博士后。研究方向: 塑性加工工艺。E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

网络出版时间: 2018-03-18 23:14:05 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.TB.20180318.2313.004.html>

lation analysis was further verified. Theoretically, these influence rules and formulas can effectively improve the end-face quality of rolled piece, and determine the optimum length of the shaft end, achieving near net forming without material head in cross wedge rolling.

Key words: shaft-end length; process parameters; end-face quality; cross wedge rolling; concave

楔横轧技术在热塑性成形钢材领域发挥着至关重要的作用, 主要因为它具有高效、节材、节能、环保等众多优点^[1-2]。实际应用中因楔横轧过程中表面金属流动快于心部金属而导致轴端出现凹心缺陷, 使得材料利用率难以突破85%^[3]。

为进一步改善楔横轧成形中的轴端成形质量, 提高材料利用率, 国内外学者从不同角度对楔横轧工艺进行研究。Danno等^[4]研究了开式楔横轧工艺参数对轧件端部凹心的影响规律; Pater^[5]通过工程数值模拟分析闭式轧制过程, 证明了闭式轧制能有效的提高轧件端面质量。刘桂华等^[6]对楔横轧制塑性变形过程中的本质特征进行了研究, 得到了轧件内部应力状态与内部变形的规律; 马振海等^[7]运用有限元软件进行成形模拟分析, 获得了工艺参数对轴端凹心的影响规律: 轴端凹心随成形角增加而减小; 随展宽角增加而增大; 段万泽^[8]研究了不同工艺参数对无台阶端头轧件料头的影响规律, 并对不同参数对料头体积影响程度进行了分析。魏新红^[9-10]等运用网格法、轴向应变图法和位移法分析了开式轧制中轧件轴端凹心产生机理, 并提出了通过改变坯料形状来消除凹心, 得出了随着端部倾角越大端部凹心越小; 龚文炜^[11]在分析凹心形成机理和坯料形状改变对凹心抑制规律的基础上, 提出挤压式楔横轧的成形思路并且通过模拟和试验验证了它的可行性; 程超^[12]通过有限元软件对闭式楔横轧工艺进行数值模拟, 通过应力应变场分析得到了闭式楔横轧金属流动特点, 并分析了不同工艺参数对端部质量的影响规律; 姬开宇、柳传、位杰^[13-15]等提出了闭开联合轧制方法, 并添加了挡楔, 使轧件端部质量得到了明显改善, 相对于传统开式轧制凹心值减少了71%。

综上所述方法, 均基于由原始坯料直径轧制成轴端, 基于阶梯轴楔横轧成形光轴国内外没有研究。因此, 作者对不同工艺参数楔横轧阶梯轴成形光轴的轧制过程进行有限元模拟, 在阐明轧制过程变形机理的基础上, 拟合获得各工艺参数与轧件端部质量的关系方程式, 进而获取了轴端长度对端部质量的影响式。研究结果为进一步探究阶梯轴楔横轧成形光轴提供了新思路, 为闭开联合楔横轧闭式轧制轴端长度的确定提供理论依据。

1 有限元模型建立

轧件坯料及成品图形状如图1所示, 先在ProE中

建立几何模型, 导入到DEFORM-3D前处理中模拟, 考虑轧制对称性, 为节约计算时间, 采用1/2模型。坯料轧制温度设为1 050 ℃, 材料选为AISI-4140[70-2200F(20-1200C)]对应42CrMo钢, 采用四面体相对网格方式划分网格, 网格数为32 000, 最小和最大单元大小分别为1.2 mm和2.4 mm, 并对坯料进行对称边界设定和体积补偿。两轧辊转速设为0.45 rad/s, 坯料与轧辊间摩擦系数设为2, 成形角为28°, 展宽角为8°, 有限元数值模拟模型如图2所示。

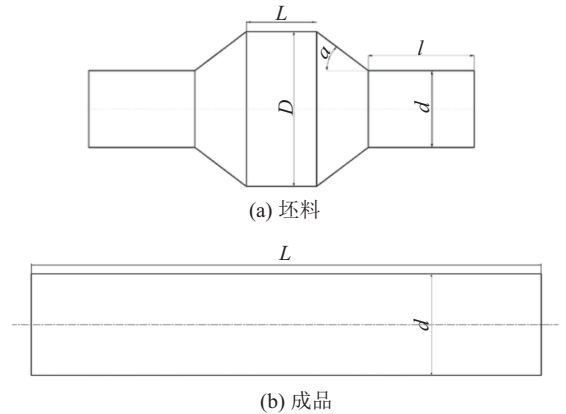


图1 轧件坯料及成品图

Fig.1 Workpiece and the finished rolled part

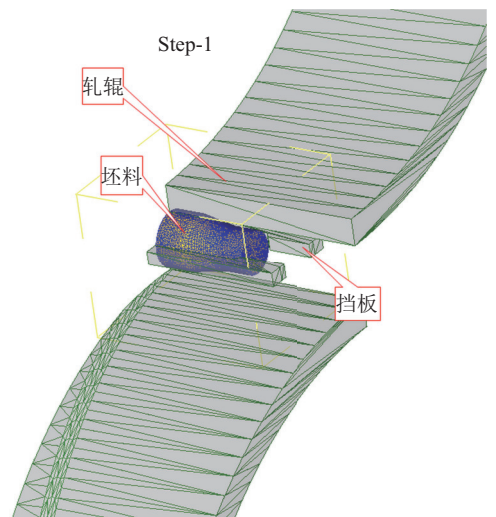


图2 有限元模型

Fig.2 Finite element model

2 阶梯轴楔横轧成形光轴变形机理

2.1 应力场分布

整个轧制过程中轧件中间纵截面轴向应力分布如图3所示, 图3(a)中楔入段轧件心部区域存在较大

拉应力,上下呈“树”状且为对称分布,轴向变形正由内侧向轴端推进,在楔入接触区由于成形楔对轧件作用存在较大压应力,且往心部轴向压应力逐渐减小。图3(b)中展宽接触区存在较大轴向压应力,心部存在一定拉应力,发生了一定的轴向变形,值得注意的是,在金属与挡板接触区域存在压应力并延伸到了心部,说明挡板对进入挡板间金属起到阻挡作用。图3(c)精整段中不轧制轴端应力为零不再发生变形,凹心成形结束,而在轧件与轧辊接触部分仍存在一定压应力。

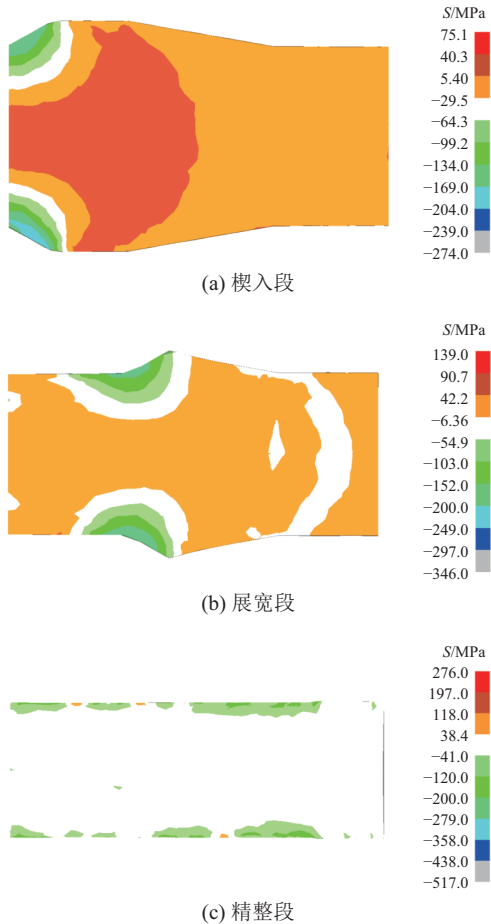


图3 轧制过程中轧件中间纵截面轴向应力分布

Fig.3 Axial stress distribution of middle-longitudinal section of rolled part during rolling

2.2 应变场分布

整个轧制过程中轧件中间纵截面应变分布如图4所示,图4(a)中轴向拉应变只存在在楔入接触区,说明在这一区域轴向变形较明显,轴端应变为零,无变形发生。图4(b)中成形区存在轴向压应变,相对未成形区金属轴向流动性差。图4(c)中精整段不轧制轴端不再发生金属流动,凹心成形。

为了探究开式轧制轧件等效应变分布规律,考虑到表面没有全部受到成形楔的作用,故在轧件中

间截面纵向等距选取6个特征点和在轧件端部中心到边缘等距选取6个特征点进行观察分析。特征点分布如图5所示。

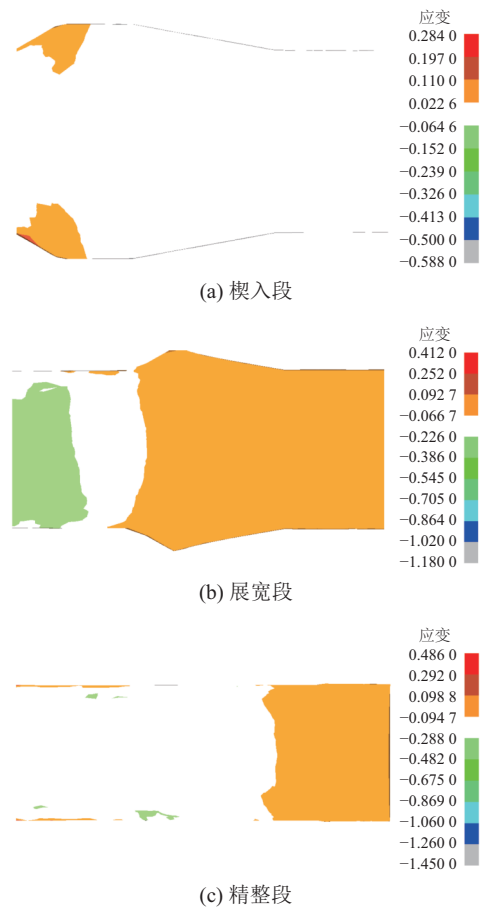


图4 轧制过程中轧件中间纵截面轴向应变分布

Fig.4 Axial strain distribution of middle-longitudinal section of rolled part during rolling

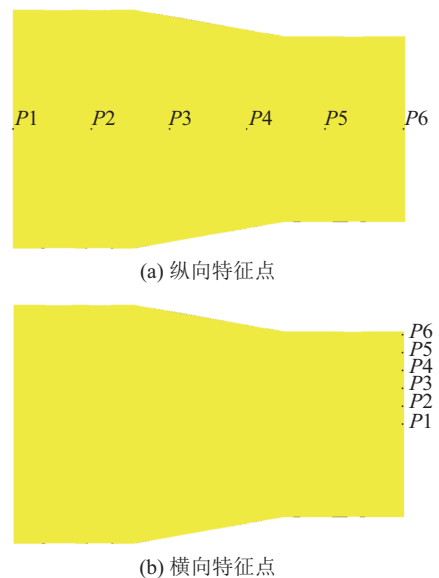


图5 特征点分布

Fig.5 Distribution of feature points

通过对特征点的追踪获得了轧件等效应变的分布规律,如图6所示。图6(a)纵向等效应变中可以直观的看到各点的等效应变均先增大后趋于稳定不变,不同的是P1到P6在开始时等效应变速率和最终应变值依次减小,主要因为P1到P4点依次得到轧制,轧制过后的点应变值稳定不变,受到成形楔的作用几乎没有,而P5和P6点没有受到成形楔的作用力,故产生的等效应变较小或几乎没有。图6(b)横向等效应变中可以清晰看到处在轧件表面P6点等效应变在0.7 s左右突然增大后趋于平缓,随后又呈阶梯式增大,等效应变值也相对其他点大,主要是因为P6初次受到挡板作用突然增大,随后离开挡板后不再增大,旋转半周后又进入挡板等效应力有小幅度的增长,不断循环出现了此现象。由于P5点距离轧件表面比较近,因此也出现了类似P6点情况只是变化幅度较小。挡板的作用没有影响到P4点,故P1到P4点变化趋势相同,最大值也相差不大。

4个工艺参数作为影响因素,每个因素选取了3个水平进行观察分析,轴端凹心的大小通常用作衡量端面质量好坏的标准,故选取轴端凹心值作为试验指标。本试验选取等水平正交表,因素水平表如表1所示。

表1 因素水平表

Tab.1 Table of factors and levels				
因素水平	轴端长度 A/mm	台阶倾角 B/(°)	台阶长度 C/mm	断面收缩率 D/%
水平1	10	10	10	40
水平2	20	20	20	50
水平3	30	30	30	60

应用统计数据软件SPSS 22.0,求出凹心多元线性回归方程并检验其显著性,得出各参数与凹心值的线性回归,如表2所示。

表2 工艺参数对凹心值影响的规律线性回归

Tab.2 Linear regression of the influence of technological parameters on concavity

因变量	自变量	非标准化系数		标准化系数		T	显著性
		beta	标准误差	beta			
凹心值w	(常数)	-0.291	1.470			-0.198	0.845
	A	-0.040	0.021	-0.300		-1.938	0.068
	B	-0.047	0.020	-0.358		-2.325	0.031
	A×B	0.015	0.021	0.109		0.703	0.491
	C	0.050	0.022	0.368		2.294	0.033
	A×C	-0.015	0.021	-0.112		-0.719	0.481
	A×D	0.016	0.022	0.118		0.741	0.468
	D	0.062	0.022	0.444		2.859	0.010

通过回归得出凹心值与各因素间关系式(1):

$$w = 0.05l_1 + 0.016\mu + 0.062\psi - 0.291 - 0.04l - 0.047\alpha - 0.15\lambda - 0.015\beta \quad (1)$$

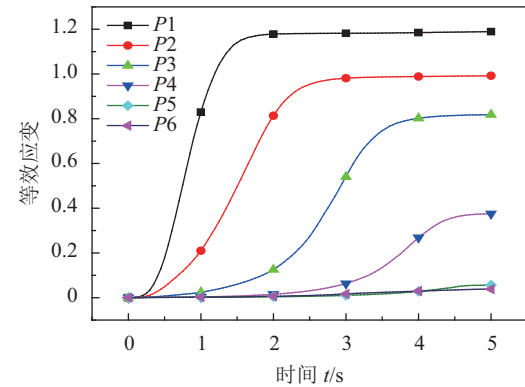
式中, w 为凹心值, l_1 为台阶长度, l 为轴端长度, ψ 为断面收缩率, μ 为AB交互, λ 为AC交互, β 为AD交互。

式(1)中,当 w 趋于零时,得最优轴端长度为式(2):

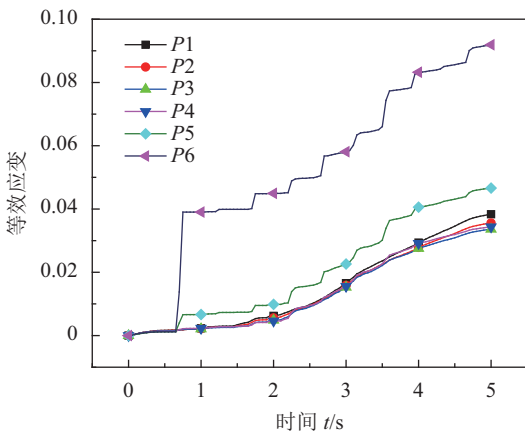
$$l = 1.25l_1 + 0.4\mu + 1.55\psi - 7.275 - 1.175\alpha - 3.75\lambda - 0.375\beta \quad (2)$$

各个自变量的复相关系数为 $R=0.745$,回归方程的 F 检验值为3.395,凹心值与轴端长度 l 、台阶倾角 α 、 λ 、 β 成负相关,与台阶长度 l_1 、断面收缩率 ψ 、 μ 成正相关。针对不同轴端长度分析,随着轴端长度增大则端部凹心减小。本实验模型是闭式轧制到轴端长度为30 mm时凹心值被控制在1 mm之内,质量最优,如图7所示。

对轧制30 mm轴端的轧件端部,在端面上设置3个追踪点分别为中心点、1/2半径点、边缘点,从端部表面节点轴向位移,图8可知,三点变化趋势几乎



(a) 纵向等效应变分布



(b) 横向等效应变分布

图6 等效应变分布

Fig.6 Distribution of effective strain

3 交互正交试验设计

试验考虑轴端长度、台阶倾角、台阶长度、断面收缩率可能对轴端质量产生重大的影响,故选取这

一致,且P1点与P3点的位移差在1.0 mm之内,说明轧制过程中轴端端部几乎没有变形,即轧件端部基本没有凹心,质量最优。

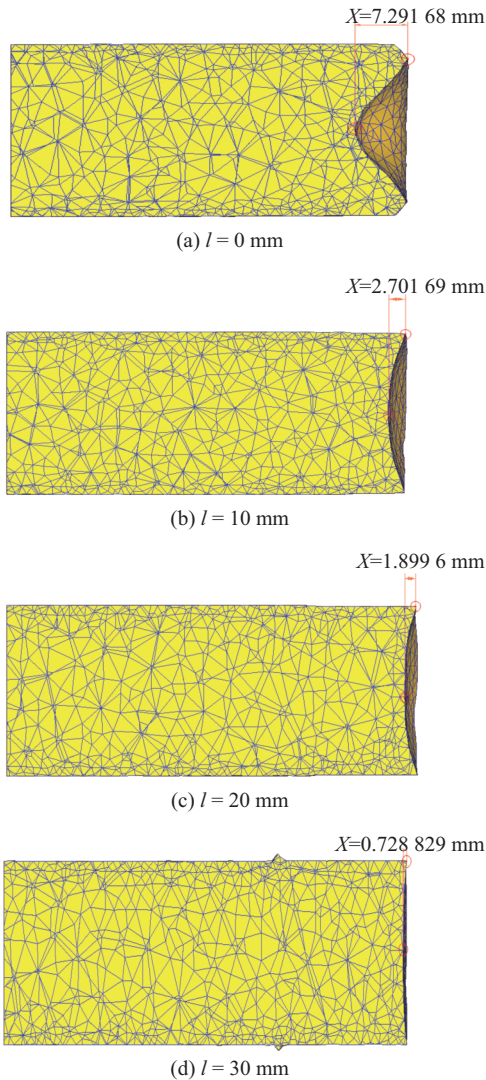


图7 不同轴端长度对应凹心

Fig.7 Concavity of different length of rolled part end

4 轧制实验

轧制实验在H630楔横轧机上完成。轧制模具如图9所示,轧制温度为1 050 ℃,材料和工艺参数与模拟一致,对台阶倾角为30°的3组不同轴端长度的轧件进行轧制,结果如图10所示。

为了更为直观地观察不同轴端长度对端部凹心产生的影响,如图11所示。从图11可以看出随着坯料轴端长度的减小最终轧件端部凹心逐渐增大。

对轧件进行端部凹心测量,为了使测量结果更为精确,用一张具有厚度的卡片支撑游标卡尺,放置在两个相互垂直的位置进行测量并取平均值,最终减去卡片厚度即得凹心值。测量过程如图12所示。

通过测量可知,试验中轴端长度为30 mm的轧件

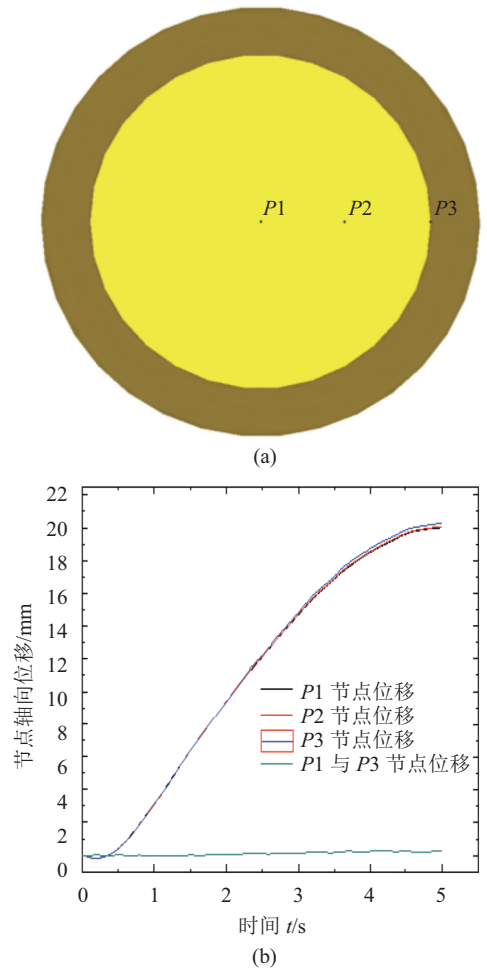


图8 端面追踪点及楔横轧轴件端部表面节点轴向位移图
Fig.8 Tracking points and the axial displacement of surface points of rolled part end



图9 轧制模具

Fig.9 Rolling mould

端部凹心值为零,即台阶的轧制对轴端没有造成影响,故取2#轧件进行实验模拟凹心值对比,如表3所示。

表3 模拟与实验结果对比

Tab.3 Comparison of results of simulation and experiment of 2# shaft

序号	模拟值/mm	实验值/mm	误差/%
2#	1.89	1.48	21

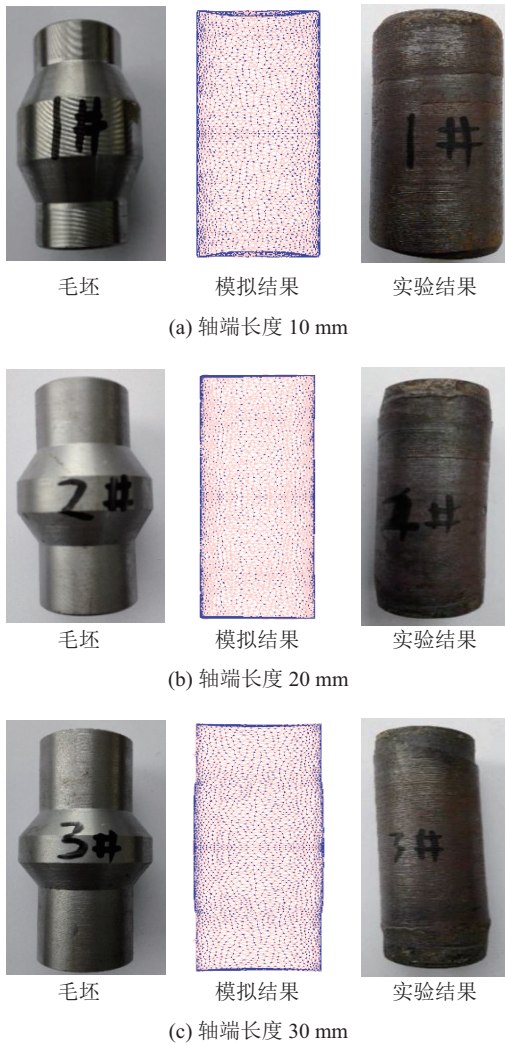


图 10 不同坯料参数下模拟与实验结果对比

Fig.10 Comparison of simulation and experimental results under different billet parameters



图 11 不同轴端长度轧件凹心对比

Fig.11 Comparison of concave for different lengths of rolled part end

由表3看出,模拟与实验值基本一致。产生的误差主要由以下原因造成:实验时挡板长度小于轧件长度,且能随着轧制坯料直径减小而自动调节接触位置^[16],挡板始终与轧件接触,保证了轧制的稳定;而模拟时挡板难以实现这种自动调节功能,

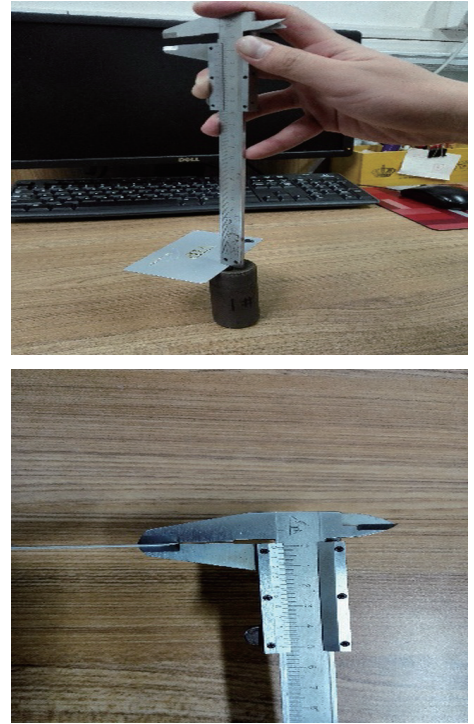


图 12 开式轧制轧件凹心测量

Fig.12 Measurement of concave by open rolling

致使随着坯料直径减小,挡板将失去约束坯料的作用,无法实现稳定轧制。为此,在模拟时采用了“凹”型加长挡板的处理,在轧制后期约束直径不变的轴端部分,随着轧制过程的进行,挡板塑形轴端,导致轴端表面金属向端部流动,造成了模拟结果比实验结果凹心值偏大。尽管模拟与实验挡板设置差异造成约21%的误差,但两者的凹心值都控制在2 mm以下,达到了成形的要求。因此模拟的结果可靠。

5 结 论

1)通过对轧件在整个轧制过程中应力和应变场分析,得到了楔横轧轧件产生凹心机理:在楔入段,轴端基本无变形,展宽段时,轴端有较小的凹心产生,精整段凹心稳定,控制凹心在展宽段进行。

2)通过正交交互试验及回归分析得到了凹心值与工艺参数之间的理论关系式,且随着坯料轴端长度的减小最终轧件端部凹心逐渐增大;设凹心值为零时,得到轴端长度与其他工艺参数之间的关系式,为有效减少凹心提供理论依据。

3)通过对开式轧制实验与模拟对比分析,获得的轧件形状和最终的端部凹心值基本一致,验证了模拟分析的可靠性,为进一步探究阶梯轴楔横轧成形光轴提供了新思路,为闭开联合楔横轧闭式轧制轴端长度的确定提供理论依据。

参考文献:

- [1] 束学道,Valery Y,S,孙宝寿,等.楔横轧理论与成形技术.[M].北京:科学出版社,2014.
- [2] Shu Xuedao,Zhao Peng.Dynamic characteristics of automobile semi-axes cross wedge rolling mills[J].Journal of University of Science and Technology Beijing,2007,29(12):1254-1258.[束学道,赵鹏.汽车半轴楔横轧机动态特性[J].北京科技大学学报,2007,29(12):1254-1258.]
- [3] Wei Xinhong,Shu Xuedao.Influence regularities of tangential force of cross wedge rolling asymmetric shaft-parts[J].Journal of Central South University,2012,32(5):43-47.[魏新红,束学道.楔横轧非对称轴类件切向力影响规律[J].中南大学学报,2012,32(5):43-47.]
- [4] Danno A, Awano T.Effect of rolling conditions on formation of central cavity in 2-roll cross rolling[J].Journal of JSTP,1976,17:117-124.
- [5] Pater B.A study of cross wedge rolling process[J].Journal of Materials Processing Technology,1997,80/81(98):370-375.
- [6] Liu Guihua,Xu Chunguo, Ren Guangsheng.Research on material flow trait during cross wedge rolling process[J].Journal of Plasticity Engineering,2009,4(16):187-191.[刘桂华,徐春国,任广升.楔横轧变形过程中轧件内部金属流动规律[J].塑性工程学报,2009,4(16):187-191.]
- [7] Ma Zhenhai, Yang Cuiping, Hu Zhenhuan.Study on the influence factors of the end concave of cross wedge rolling[J].Forging and Stamping Technology,2002,27(1):29-30.[马振海,杨翠苹,胡正寰.楔横轧轧件端头凹心影响因素的研究[J].锻压技术,2002,27(1):29-30.]
- [8] Duan Wanze.Study on the head loss of cross wedge rolling [D].Beijing:Beijing University of Science & Technology, 2010.[段万泽.楔横轧轧件料头损耗规律的研究[D].北京:北京科技大学,2010.]
- [9] Wei Xinhong,Shu Xuedao.Research on the influence of the end shape of the billet on the concave of cross wedge rolling[J].Hot Working Technology,2012,40(3):54-56.[魏新红,束学道.坯料端部形状对楔横轧轧件凹心影响研究[J].热加工工艺,2012,40(3):54-56.]
- [10] Wei Xinhong.Study on the end rolling quality of cross wedge rolling [D].Ningbo:Ningbo University,2011.[魏新红.楔横轧轴类件端部轧制质量研究[D].宁波:宁波大学,2011.]
- [11] Gong Wenwei.Evolution of cross wedge rolling non symmetric shaft microstructure and non stub bar technology[D].Ningbo:Ningbo University,2012[龚文伟.楔横轧非对称轴类件微观组织演变规律及无料头技术研究[D].宁波:宁波大学,2012.]
- [12] Cheng Chao.Research on the shaft parts and end quality of closed cross wedge rolling[D].Ningbo:Ningbo University, 2013.[程超.闭式楔横轧成形轴类件及其端部质量研究[D].宁波大学.2013.]
- [13] Ji Kaiyu,Shu Xuedao,Sun Baoshou.Finite element numerical simulation of closed-open CWR based on the block wedge and twice closed rolling[J].Journal of Ningbo University(Natural Science & Engineering Edition),2016, 29(2):73-76.[姬开宇,束学道,孙宝寿,等.基于挡楔与二次闭式的闭开联合楔横轧有限元数值分析[J].宁波大学学报(理工版),2016,29(2):73-76.]
- [14] Liu Chuan,Shu Xuedao.Research on roll-cutting blank force of cross wedge rolling[J].Hot Working Technology, 2015,44(15):101-103.[柳传,束学道.圆弧角对楔横轧轧件端部凹心的影响研究[J].热加工工艺,2015,44(15):101-103.]
- [15] Wei Jie,Shu Xuedao,Liu Chuan,et al.Influence of technological parameters on end-face quality of closed-open cross wedge rollingshafts[J].HotWorkingTechnology,2016, 45(15):140-144.[位杰,束学道,柳传,等.工艺参数对闭开联合楔横轧轴件端部质量的影响[J].热加工工艺,2016, 45(15):140-144.]
- [16] 束学道,李子轩,周子荣,等.一种楔横轧轧机的挡板装置:ZL201610080512.2[P].2017-10-24.

(编辑 黄小川)

引用格式: Shu Xuedao,Han Suta,Wei Jie.Effects of shaft-end length on the end-face quality of equal diameter shaft formed with cross wedge rolling from the stepped Shaft[J].Advanced Engineering Sciences,2018,50(2):177-183.[束学道,韩素涛,位杰.轴端长度对楔横轧阶梯轴成形光轴端面质量的影响[J].工程科学与技术,2018,50(2):177-183.]