

# 工艺参数对楔横轧 4Cr9Si2 表面螺旋痕的影响

黄江华, 刘晋平, 王宝雨, 胡正寰  
(北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083)

**摘 要:** 借助 DEFORM 软件对 4Cr9Si2 楔横轧成形过程进行了数值模拟, 分析了工艺参数对楔横轧 4Cr9Si2 轧件表面螺旋痕影响规律. 结果表明: 轧件表面螺旋痕是轧件在成形过程中产生应力状态改变而产生的缺陷. 随着成形角增大, 表面螺旋痕深度将增加; 随着楔尖圆角增大, 表面螺旋痕将迅速降低; 展宽角对表面螺旋痕影响较小; 断面收缩率减小, 塑性变形量小, 表面螺旋痕将减轻. 通过实验验证了有限元模拟的正确性. 最后对某型气门进行了模拟和实验, 当  $\Psi = 70.84\%$  时, 在  $\alpha = 32^\circ$ ,  $\beta = 7.5^\circ$ ,  $R = 12\text{ mm}$  下得到了表面无螺旋痕气门.

**关 键 词:** 楔横轧; 4Cr9Si2; 数值模拟; 工艺参数; 表面螺旋痕

中图分类号: TG 335.19      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2014)12-1778-05

## Effect of the Process Parameters on Surface Spiral in Cross Wedge Rolling of 4Cr9Si2

HUANG Jiang-hua, LIU Jin-ping, WANG Bao-yu, HU Zheng-huan

(School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China.  
Corresponding author: LIU Jin-ping, E-mail: liujp@ustb.edu.cn)

**Abstract:** Cross wedge rolling process of 4Cr9Si2 was simulated by DEFORM software, and the influence of process parameters on surface spiral on cross wedge rolling of 4Cr9Si2 was analyzed. The results showed that the surface spiral was resulted from the variation of stress state which was generated in the process of rolling. As the forming angle increased, the depth of surface spiral increased. The surface spiral decreased after increasing of wedge tip fillet. Effect of stretching angle on the surface spiral was not obvious. When the area reduction decreased, plastic deformation was smaller and the surface spiral reduced. These simulated results were verified by experiments. The process parameters for a certain type of valve were determined to be  $\alpha = 32^\circ$ ,  $\beta = 7.5^\circ$ ,  $R = 12\text{ mm}$ , when area reduction is 70.84%, and valves without surface spiral were experimentally achieved.

**Key words:** cross wedge rolling; 4Cr9Si2; numerical simulation; process parameters; surface spiral

气门在高温高压等环境中工作, 因此要求气门材料具备耐高温耐高压等特点, 常用气门材料有马氏体钢、奥氏体钢、高温合金和钛合金<sup>[1]</sup>. 4Cr9Si2 是一种马氏体耐热钢, 用于制造发动机进气门. 传统气门制坯方法有电热镦粗和热挤压<sup>[2-3]</sup>, 存在效率低、废品率高及模具损坏严重等缺陷<sup>[4]</sup>. 随着汽车工业发展, 对气门需求量越来越大, 传统制坯方法已经无法满足大批量要求,

为此, 北京科技大学提出了一种新的气门制坯方法——楔横轧制坯.

楔横轧是一种高效、低耗、绿色先进轴类零件成形工艺, 有生产效率高、节约材料等优点. 特点是两个轴心线平行的轧辊同方向旋转, 轧件在轧辊带动下, 作平行于轧辊轴心线与轧辊方向相反的旋转运动, 实现径向压缩和轴向延伸变形. 4Cr9Si2 钢合金含量高、塑性差, 材料变形过程中

收稿日期: 2013-09-15

基金项目: 广东登云汽配零件轧制成形院士工作站(2011A090700026); “现代交通金属材料与加工技术北京实验室”资助项目.

作者简介: 黄江华(1981-), 男, 湖南永兴人, 北京科技大学博士研究生; 王宝雨(1966-), 男, 山东成武人, 北京科技大学研究员; 胡正寰(1934-), 男, 湖北孝感人, 北京科技大学教授, 博士生导师, 中国工程院院士.

对温度比较敏感,容易出现心部疏松和表面螺旋痕等<sup>[5-7]</sup>,表面螺旋痕将影响加工余量.通过刚塑性有限元软件 DEFORM 对 4Cr9Si2 楔横轧过程进行了数值模拟,采用单一因素方法,模拟了材料成形时工艺参数——成形角、展宽角、断面收缩率及楔尖圆角对楔横轧 4Cr9Si2 表面螺旋痕的影响规律,从应力状态分析了轧件表面产生螺旋痕的原因,并对某型气门成形进行了模拟,最后通过实验验证了模拟的正确性.

### 1 有限元模型建立

图 1 为楔横轧有限元模型,包括上下模具、轧件及导板.楔横轧为对称轧制,取轧件一半计算.模具设为刚体,轧辊转速为恒速(8 r/min).4Cr9Si2 是一种温度敏感材料,模拟过程中考虑温度场作用,设轧件与模具综合传热系数为  $40 \times 10^3 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ <sup>[8]</sup>.坯料初始温度为 1 120 ℃,轧辊直径为 500 mm,坯料直径为 25 mm.模拟参数如表 1 所示(轴向为 Z 向,横向为 Y 向,径向为 X 向).

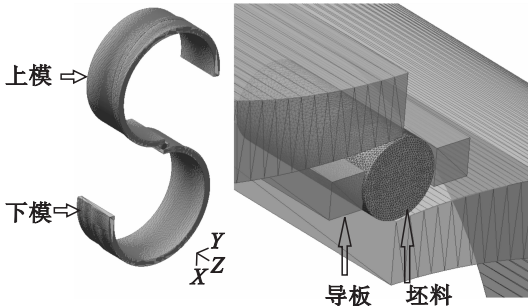


图 1 楔横轧有限元模型  
Fig. 1 Finite element model of cross wedge rolling

表 1 主要模拟参数

Table 1 Main process parameters for simulation

序号	成形角 $\alpha/(\text{^\circ})$	展宽角 $\beta/(\text{^\circ})$	断面收缩率 $\Psi/\%$	楔尖圆角 $R/\text{mm}$
1	22/26/ 32/36	6.67	71	0
2	32	5.5/6.67/ 7.5/8.5	71	0
3	36	7.5	30/48/ 64/71	0
4	32	6.67	71	0/4/ 8/12

### 2 有限元模拟过程分析

#### 2.1 表面螺旋痕成形机理分析

在  $\beta = 7.5$ ,  $\Psi = 71\%$ ,  $R = 0 \text{ mm}$ ,  $\alpha = 22^\circ$  和  $36^\circ$

条件下研究螺旋痕产生机理.取图 2 特征点跟踪位置,  $P_1$  在两条螺旋痕之间,  $P_2$  在螺旋痕凹槽底部,  $P_1$  与  $P_2$  所在横截面半径差即为表面螺旋痕深度.

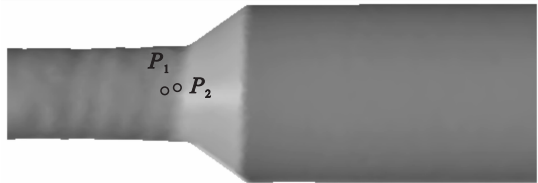


图 2 特征点位置  
Fig. 2 Position of tracking point

图 3 是特征点随轧制时间横截面半径变化图.  $P_1$  和  $P_2$  点半径值在某时间点相交后,随后分开,最后  $P_2$  点半径减少程度大于  $P_1$ ,在延续一段时间后,半径差值基本上不再变化.

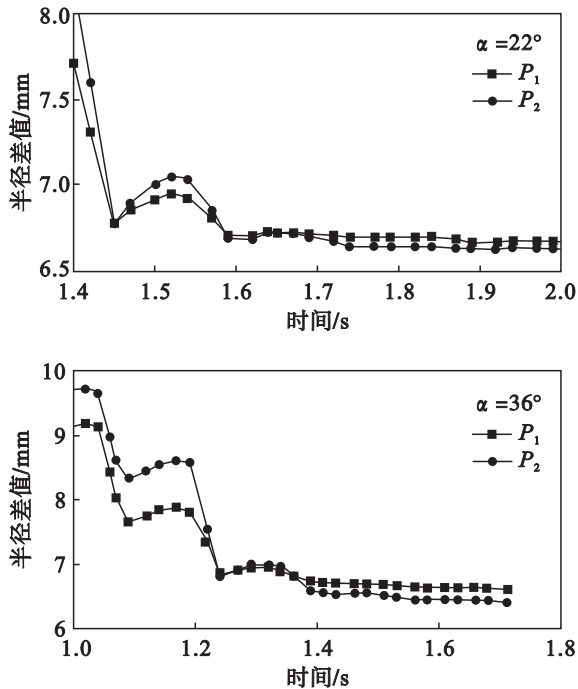


图 3 特征点横截面半径变化图  
Fig. 3 Variation of radius of cross section

图 4 是图 3 中交叉点前后特征点变形力学图.图 4a 中前两个时间步特征点  $P_1$  轴向应力  $\sigma_z$  为 100 MPa,远远大于径向压应力  $\sigma_x$ ,应变为一个正应变和两个负应变“伸长类变形类型”,尺寸主导方向为轴向方向伸长.从第 3 个时间步开始,  $P_1$  轴向拉应力  $\sigma_z$  急剧减少,径向应力  $\sigma_x$  与轴向应力  $\sigma_z$  数值相差不大,应变类型为两个正应变和一个负应变“压缩类应变”作用,尺寸主导方向为径向压缩.由图 4b 可知,  $P_2$  点在第一时间步时,轴向拉应力  $\sigma_z$  达到 129.59 MPa,径向应力  $\sigma_x$  相比轴向应力  $\sigma_z$ ,其差值很大.从第二个时间步开始,

$P_2$  轴向应力  $\sigma_z$  急剧减少, 径向应力  $\sigma_x$  增大, 与  $P_1$  点对比, 在第 2 个时间步时,  $P_2$  受一个负应变和两个正应变的“压缩类应变类型”作用, 尺寸主导方向为径向压缩. 从  $P_1$  点到  $P_2$  点, 即从“伸长类应变类型”到“压缩类应变类型”中间连接部分, 必存在着一个中性面, 此中性面为“平面变形状态”. 此时, 在  $P_1$  点附近质点, 其径向和横向应变增量都是负的, 仅轴向是正的, 此时尺寸增加为主导方向且沿轴向拉伸, 而对于  $P_2$  点附近质点, 虽然轴向的应变分量是正的, 但是在径向和横向都为负的, 结果形成了“压缩类变形状态”, 且尺寸减少方向为径向, 即径向压缩. 所以在第二个时间步时, 相比于  $P_1$  点,  $P_2$  半径值急剧减小. 在第三个时间步时,  $P_1$  和  $P_2$  点都变成“压缩类变形状态”, 但相对  $P_1$  点,  $P_2$  点的径向压缩占主导作用, 因此  $P_1$  和  $P_2$  点半径差值进一步减小. 因此, 表面螺旋痕的产生是由于轧件在轧制过程中, 轧制区域对已轧制区域力的“牵拉”作用, 使表面点轴向应力  $\sigma_z$  减小以及径向应力  $\sigma_x$  增大而导致应变状态类型的改变, 即从“拉伸类应变状态”变为“压缩类应变状态”.

在图 4c 中, 前两个时间步时应变状态都是受到一个正应变和两个负应变的“伸长类变形状态”, 尺寸主导方向沿轴向拉伸. 图 4d 为  $P_2$  点变形力学图. 与  $P_1$  点对比, 第 2 个时间步时  $P_2$  受到两个正应变和一个负应变“压缩类变形状态”, 轴向应变分量为正, 径向和横向都为负, 因此  $P_2$  点将径向压缩. 与  $\alpha = 36^\circ$  时  $P_2$  相比,  $P_2$  点径向主导作用明显, 即由于应力偏张量作用, 因此径向尺寸变化大,  $\alpha = 22^\circ$  时, 径向和轴向主导作用相当, 即应力偏张量基本上保持一致, 所以径向尺寸变化比较小.

### 2.2 成形角对轧件表面螺旋痕影响分析

成形角  $\alpha$  是楔横轧一个重要参数, 图 5 是  $\alpha$  对表面螺旋痕影响. 当  $\alpha$  增大时, 表面螺旋痕深度与成形角增大成正比. 当  $\alpha = 22^\circ$  时, 特征点半径差值为 0.03 mm; 当  $\alpha = 26^\circ$  时, 其值为 0.08 mm. 随着  $\alpha$  增大到  $36^\circ$  时, 半径差值达到 0.18 mm 左右.

### 2.3 楔尖圆角对轧件表面螺旋痕影响分析

楔尖圆角  $R$  相当于减小  $\alpha$  以及把轧制区分两次成形, 因此减少了表面螺旋痕产生. 图 6 是  $R$  对表面螺旋痕模拟特征点半径差值, 当  $R = 0$  mm 时, 特征点半径差值为 0.15 mm; 当  $R = 4$  mm 时, 其值为 0.08 mm; 当  $R = 12$  mm 时,  $P_1$  与  $P_2$  点半径差值仅为 0.03 mm. 因此, 增大楔尖圆角可以迅速降低轧件表面螺旋痕深度.

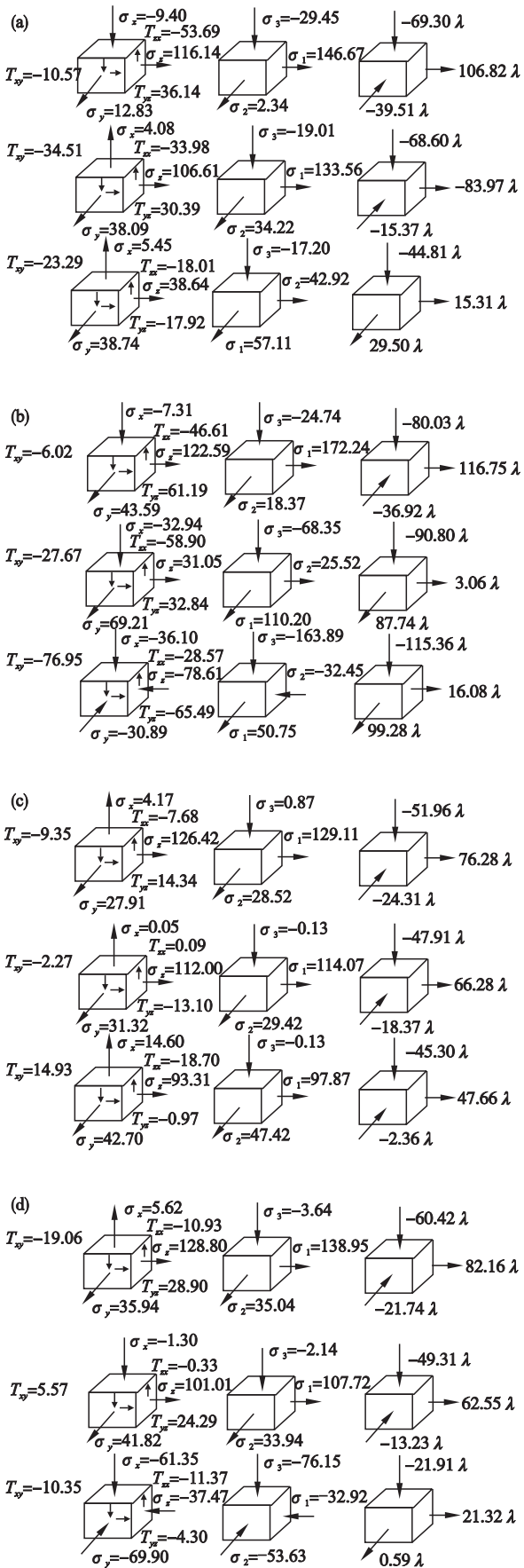


图 4 特征点变形力学图  
Fig. 4 Deformation mechanics figure of tracking point  
(a) —  $\alpha = 36^\circ, P_1$ ; (b) —  $\alpha = 36^\circ, P_2$ ;  
(c) —  $\alpha = 22^\circ, P_1$ ; (d) —  $\alpha = 22^\circ, P_2$ .

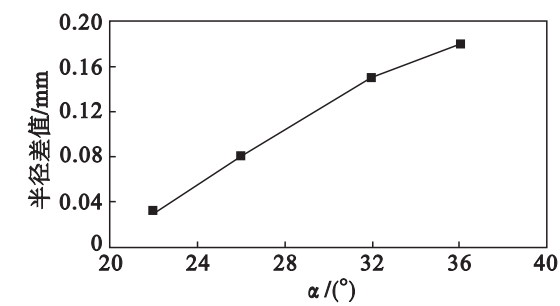


图 5 成形角对表面螺旋痕影响  
Fig. 5 Effect of forming angle on surface spiral

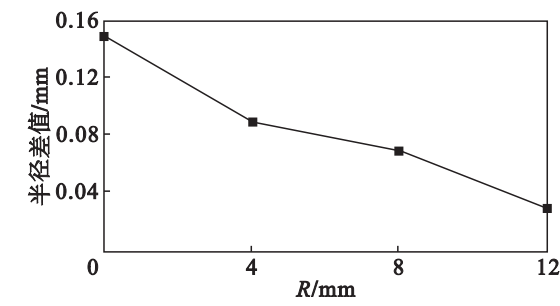


图 6 楔尖圆角对表面螺旋痕影响  
Fig. 6 Effect of  $R$  on surface spiral

2.4 展宽角对轧件表面螺旋痕影响分析

展宽角  $\beta$  是决定模具规格的一个重要参数,对成形有重要影响.图 7 为  $\beta$  对表面螺旋痕影响.  $\beta$  对表面螺旋痕有一定影响,但不是很大.当  $\beta = 5^{\circ}30'$  时,半径差值为 0.12 mm;随着  $\beta$  增大到  $6^{\circ}40'$ ,半径差值为 0.15 mm;当  $\beta$  为  $7^{\circ}30'$  和  $8^{\circ}30'$  时,半径差值差别不是很大,其值为 0.17 mm 左右.因此,当  $\beta$  超过  $6^{\circ}40'$  时, $\beta$  对表面螺旋痕影响不如  $\alpha$  和  $R$  明显.

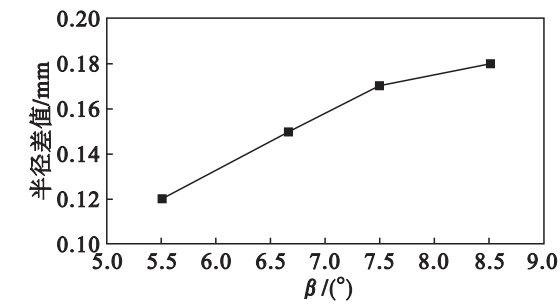


图 7 展宽角对表面螺旋痕影响  
Fig. 7 Effect of  $\beta$  on surface spiral

2.5 断面收缩率对轧件表面螺旋痕影响分析

图 8 是不同断面收缩率( $\Psi$ )对表面螺旋痕影响.随着  $\Psi$  减小,表面螺旋痕明显减小,当  $\Psi = 71\%$  时,特征点半径差值为 0.185 mm,而随着  $\Psi$  的减小,即使  $\alpha = 36^{\circ}$  时,当  $\Psi = 48\%$  时,其半径差值为 0.05 mm,当断面收缩率降低到 30% 时,轧件表面已经不存在表面螺旋痕,特征点半径差值

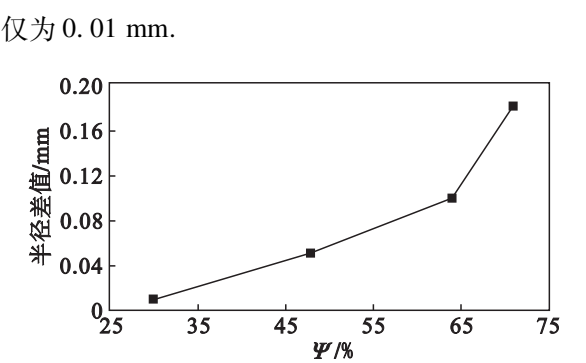


图 8 断面收缩率对表面螺旋痕影响  
Fig. 8 Effect of area reduction on surface spiral

从以上模拟分析中可以看出,表面螺旋痕随着成形角、展宽角以及断面收缩率的增大而增大,随着楔尖圆角增大而减小.

3 轧制实验

参照模拟在轧机上进行轧制实验.实验参数见表 2.当  $\beta = 8^{\circ}30'$  时,轧件旋转已经不顺利.

表 2 实验工艺参数				
Table 2 Process parameters for experiments				
序号	成形角 $\alpha /(^{\circ})$	展宽角 $\beta /(^{\circ})$	断面收缩率 $\Psi/\%$	楔尖圆角 $R/\text{mm}$
1	22/26/ 32/36	6.67	70.84	4
2	32	5.5/6.67/ 7.5/8.5	70.84	4
3	36	7.5	64/70.84/75	4
4	32	6.67	70.84	4/8/12

图 9 是在实验轧制过程中,成形角、楔尖圆角、展宽角以及断面收缩率对表面螺旋痕的影响.从图中可以看出,实验结果和模拟结果基本上一致,且从整体上看,实验结果都比模拟结果大,这是因为有限元数值模拟网格粗.

某公司进气门材料为 4Cr9Si2 马氏体钢,杆部最后尺寸为 12.5 mm,经过高径比以及楔横轧断面收缩率轧制最佳范围,取  $\Psi = 70.84\%$ ,轧前直径为 25 mm,轧后直径为 13.5 mm.根据模拟分析,取  $\beta = 7^{\circ}30'$  ( $\beta$  大有利于改善心部缺陷), $\alpha = 32^{\circ}$ , $R = 12\text{ mm}$  作为模拟和实验参数.有限元模拟与实验结果如图 10 所示,从模拟和实验中可以看出,轧件表面已经不存在表面螺旋痕,最终轧制成形的半径差为 0.02 mm 左右,达到了气门轧制节材的要求,降低了表面加工余量,最终降低了生产成本.

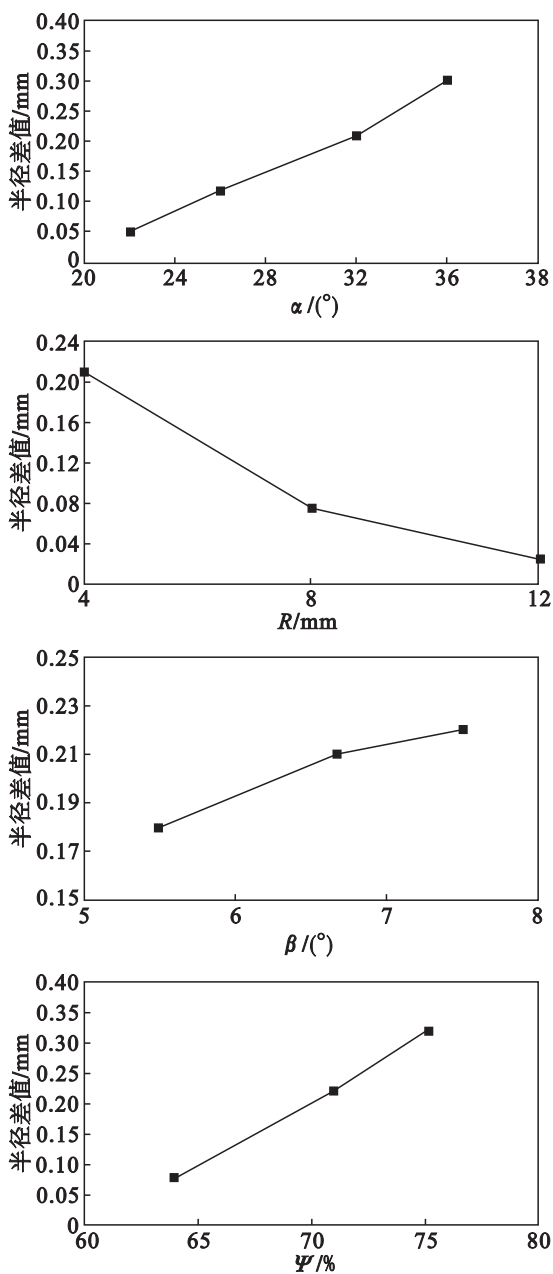


图 9 工艺参数对表面螺旋痕影响

Fig. 9 Effect of process parameters on surface spiral

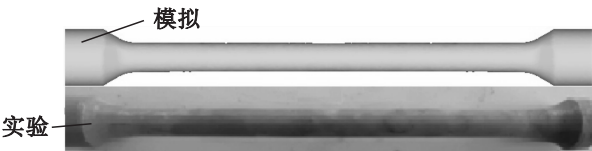


图 10 模拟与实验结果比较

Fig. 10 Comparison of simulation and experiment

4 结 论

1) 表面螺旋痕的产生是轧件表面轴向应力 $\sigma_z$ 减小, 径向力 $\sigma_x$ 增大而导致表面应变状态改

变而造成的. 即表面点从“拉伸类应变状态”变为“压缩类应变状态”.

2) 随着  $\alpha$  增大, 表面螺旋痕将急剧增大;  $\beta$  增大, 表面螺旋痕深度将增大, 但其影响不如  $\alpha$ ; 随着  $\Psi$  增大, 表面螺旋痕将会急剧增大.

3)  $R$  相当于减小  $\alpha$  以及使轧件两次成形, 因此它有利于改善表面螺旋痕.  $R = 12 \text{ mm}$  时, 即使  $\Psi = 71\%$  及  $\alpha = 32^{\circ}$ , 螺旋痕半径差值为  $0.03 \text{ mm}$  左右.

4) 产品实验中, 某气门  $\Psi = 70.84\%$ , 在  $\beta = 7^{\circ}30'$ ,  $R = 12 \text{ mm}$  以及  $\alpha = 32^{\circ}$  时, 轧件表面半径差仅为  $0.02 \text{ mm}$ .

参考文献:

[1] 王忠诚, 孙向东. 汽车零部件热处理技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 164 – 175.  
(Wang Zhong-cheng, Sun Xiang-dong. Auto parts heat treatment technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 164 – 175.)

[2] Jeong H S, Cho J R, Lee N K, et al. Simulation of electric upsetting and forging process for large marine diesel engine exhaust valves [J]. *Materials Science Forum*, 2006, 510/511: 142 – 145.

[3] Painter B, Shivpur R, Altan T. Prediction of die wears during hot-extrusion of engine valves [J]. *Materials Processing Technology*, 1996, 59: 132 – 143.

[4] Biba N, Lishnij A, Vlasov A. Simulation of coupled problem of electric upsetting [J]. *Materials Processing Technology*, 1998, 81/82: 184 – 187.

[5] Li Q, Lovell M R, Slaughter W, et al. Investigation of the morphology of internal defects in cross wedge rolling [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2002, 125/126: 248 – 257.

[6] 张康生, 杜惠萍, 杨翠苹, 等. 楔横轧轧件螺旋痕产生原因分析 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(8): 93 – 98.  
(Zhang Kang-sheng, Du Hui-ping, Yang Cui-ping, et al. Study on the cause of spiral groove in cross wedge rolling [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2011, 47(8): 93 – 98.)

[7] Li Q, Lovell M R. The establishment of a failure criterion in cross wedge rolling [J]. *The International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 2004, 24: 180 – 189.

[8] Ying F Q. Analysis on temperature distribution in cross wedge rolling process with finite element method [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, 187/188: 392 – 396.