

空心坯料楔横轧内孔缩孔变化的影响规律研究

黄晓敏¹, 纪宏超², 刘晋平^{1*}

(1.北京科技大学 机械工程学院, 北京 100083; 2.华北理工大学 机械工程学院, 河北 唐山 063210)

摘要:以 21-2N 耐热合金钢空心坯料为研究对象, 采用 DEFORM-3D 模拟了楔横轧空心坯料的成形过程, 对不同工艺参数下空心轧件的变形情况进行研究. 根据有限元模拟结果, 揭示了不同工艺参数对空心坯料内孔缩孔的影响规律, 即空心轧件轧后缩孔率大小和分布沿轧件轴向的变化、轧件内孔大小和分布沿轧件轴向的变化、轧件壁厚变化等一系列变化规律. 分析结果表明, 工艺参数的改变会显著影响空心坯料的缩孔.

关键词:楔横轧; 空心坯料; 21-2N; 内孔缩孔

中图分类号: TG335.19

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2018) 01-0030-06

楔横轧是一种轴类零件成形新工艺, 以其连续局部的成形方式, 在阶梯轴类件的制造方面显示出特殊的优势, 与传统锻造、切削工艺相比, 具有效率高 3~7 倍、节约材料 20%~40%、产品精度高、劳动条件好、模具寿命长和产品成本低等优点, 适合于大批量生产回转类零件坯料^[1-3]. 气门是控制发动机进排气的重要零件. 空心气门具有减重、降温、节能环保的优点, 是当今气门的发展趋势. 目前空心气门制坯方法主要有实心气门钻孔法和反挤压法, 都存在生产效率低、成本高等缺点^[4-9]. 本文以楔横轧空心气门为研究对象, 研究空心件轧制过程中内孔缩孔变化. 缩孔是指无芯棒空心轴类轧件横截面轧前有一个原始内孔, 轧制过程中轧件金属径向压缩轴向延伸, 待轧制完成后, 内孔收缩, 形成比原始内孔要小的内孔.

楔横轧制过程中工艺参数的选择对轧件的成形有重要影响, 空心件缩孔的变化情况是描述成形质量的一个重要方面. 因此, 研究工艺参数对无芯棒空心轴类件轧后缩孔的变化规律具有重要的实际意义. 本文采用数值模拟方法分析不同工艺参数对楔横轧 21-2N 空心坯料缩孔的影响规律, 为楔横轧成形空心坯料及模具设计提供理论依据.

1 空心坯料楔横轧有限元模型的建立

空心轧件有限元模型如图 1 所示. 考虑到结构的对称性, 取模型的 1/2 进行计算, 施加对称面约束, 轧辊设置为刚体, 轧件设置为刚塑性, 划分 100 000 个网格. 本文研究的是 21-2N 耐热钢, 轧制温度 1 160 °C, 采用 H500 轧机, 轧辊直径 $\phi 500$ mm, 轧辊转速 $8 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$, 轧件外径 15 mm, 内径 6 mm. 根据实践经验, 轧件相对壁厚和断面收缩率对轧件缩孔变化的影响较显著, 因此本文主要研究轧件原始相对壁厚和断面收缩率的影响. 选取成形角 30° , 展宽角 6.5° , 模拟的具体工艺参数见表 1. 21-2N 耐热钢有限元模拟结果如图 2 所示.

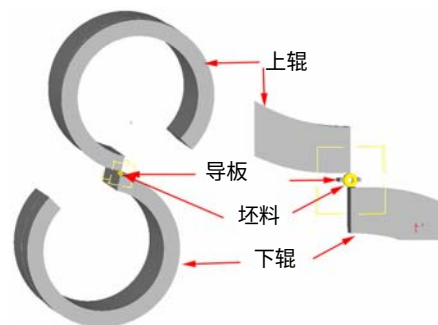


图 1 有限元模型

收稿日期: 2017-11-07.

宁波大学学报(理工版) 网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金 (51375042).

第一作者: 黄晓敏 (1986—), 女, 河北唐山人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 零件轧制成形工艺. E-mail: hxm8606@126.com

*通信作者: 刘晋平 (1966—), 女, 北京人, 副教授, 主要研究方向: 零件轧制成形工艺. E-mail: liujp@ustb.edu.cn

表 1 有限元模拟的工艺参数

模拟 序号	成形 角/(°)	展宽 角/(°)	温度/ °C	断面收 缩率/%	原始相 对壁厚	分 组
1	30	6.5	1 160	30.56	0.600	第 1 组
2	30	6.5	1 160	41.22	0.600	第 1 组
3	30	6.5	1 160	51.00	0.600	第 1 组
4	30	6.5	1 160	59.89	0.600	第 1 组
5	30	6.5	1 160	67.89	0.600	第 1 组
6	30	6.5	1 160	67.89	0.467	第 2 组
7	30	6.5	1 160	67.89	0.600	第 2 组
8	30	6.5	1 160	67.89	0.733	第 2 组



图 2 有限元模拟结果

2 内孔缩孔的描述和计算

引入缩孔率、轧后横截面内孔内径值以及轧后壁厚减薄率 3 个指标评价缩孔. 3 个指标可通过对轧件轧后缩孔而求得, 并且能够描述轧件轧后缩孔的变化情况以及内表面的成形效果.

设轧件原始内孔横截面面积为 S_1 , 轧后内孔横截面面积为 S_2 , 则缩孔率 λ 可表示为:

$$\lambda = (S_1 - S_2) / S_1 \times 100\%. \quad (1)$$

轧后轧件横截面的内径沿轧件轴向分布有波动, 内孔圆度不高. 为了分析不同工艺参数下轧件内孔的变化规律, 对轧后轧件横截面内径值 d_1 进行分析, d_1 可根据轧后内孔面积计算. 根据缩孔率和轧件原始内径值, 可算出轧件轧后横截面的内径值. 无芯棒轴类零件楔横轧制, 在缩孔的同时, 内外径均减小, 但减小的幅度不一致, 轧件壁厚会发生改变. 对轧后轧件的壁厚减薄率 γ 的研究也很重要. 壁厚减薄率是指轧前壁厚减去轧后壁厚的差值与轧前壁厚的比值^[2], 即

$$\gamma = \frac{(D - d) - (D_1 - d_1)}{(D - d)}, \quad (2)$$

式中: D 为轧前外径; D_1 为轧后外径; d 为原始内径; d_1 为轧后内径.

采用 Photoshop 计算缩孔率^[3]. 计算出缩孔率后, 可继续求出轧后横截面内孔的内径值和壁厚

减薄率. 通过截取轧件横截面的内孔图像, 获取各图像的像素值, 而图片的尺寸等于像素值比图片的分辨率. 在截取轧件横截面内孔图像时, 图片分辨率一致, 内孔实际尺寸的比值可以用像素的比值来表示, 这样内孔的缩孔率就可以用像素值的比值来表示. 以轧件的对称面为起点截面, 沿轴向每隔 10 mm 取一个横截面, 共取 13 个横截面; 然后算出每个横截面的缩孔率, 并以轧件横截面沿轴向的位置为横坐标, 建立坐标系, 方便不同参数间缩孔率的比较. 具体操作步骤为:

(1)沿轴向截横截面, 导入 Photoshop 软件中.

(2)圈出轧后内径多边形, 并记录直方图中的像素数.

(3)圈出原始内径多边形, 并记录直方图中的像素数.

(4)轧后内孔面积为:

$$S_2 = \frac{N_2 \times \pi d^2}{N_1 \times 4}, \quad (3)$$

轧后横截面内孔的内径为:

$$d_1 = \sqrt{\frac{N_2}{N_1}} \cdot d, \quad (4)$$

式中: N_2 为轧后内径像素数; N_1 为原始内径像素数; d 为气门原始内径; d_1 为气门轧后内径.

(5)设 λ 为缩孔率, 则

$$\lambda = (N_1 - N_2) / N_1. \quad (5)$$

通过对不同工艺参数下 3 个指标的研究, 可以了解轧件轧后缩孔率大小和变化、轧件内孔大小和分布沿轧件轴向的变化、轧件壁厚的变化等一系列变化规律. 本研究中轧件外径设为 15 mm, 内径设为 4、6、8 mm.

3 工艺参数对轧件缩孔率的影响

3.1 轧件原始相对壁厚的影响

图 3 为轧件原始相对壁厚对轧件不同位置的缩孔率的影响规律. 从图 3 可以看出, 在不同的轧件原始相对壁厚 Q 的情况下, 轧件缩孔率起伏不定, 难以找出统一的缩孔率来比较分析. 原始相对壁厚为 0.467 时, 轧件轴向不同位置的缩孔率在 85.77%~92.53%之间, 从展宽 40~120 mm 的区域内缩孔率波动较小, 大部分位置的缩孔率分布在

88%~91%之间. 原始相对壁厚为 0.600 时, 轴向不同位置的缩孔率都不一致, 在 83.30%~89.04%之间浮动, 在轴向 40~120 mm 的区域内缩孔率波动较小, 大部分位置的缩孔率分布在 87%~88%之间. 原始相对壁厚为 0.733 时, 轧件轴向不同位置的缩孔率都不一致, 在 81.95%~86.18%之间浮动, 在轴向 20~120 mm 的区域内缩孔率波动较小, 大部分位置的缩孔率分布在 83%~85%之间. 整体比较来看, 较大的缩孔率波动都发生在轧件对称面附近, 其他位置的缩孔率波动较小. 缩孔率沿轴向的分布波动性, 特别是展宽成形区域轧件的分布波动性, 从轧件原始相对壁厚为 0.467~0.733 呈减弱的趋势. 随着原始相对壁厚的增大, 内表面金属径向流动稳定性增强, 内孔的成形效果主要取决于金属径向的流动. 随着径向金属流动的稳定性增强, 最后形成的缩孔大小分布的波动也就减弱. 尽管每个原始内径下的缩孔率分布都不一致, 但经过比较后可以发现, 轧件原始相对壁厚为 0.467 时, 缩孔率主要分布在 90%左右; 为 0.600 时, 缩孔率主要分布在 88%左右; 为 0.733 时, 缩孔率主要分布在 84%左右.

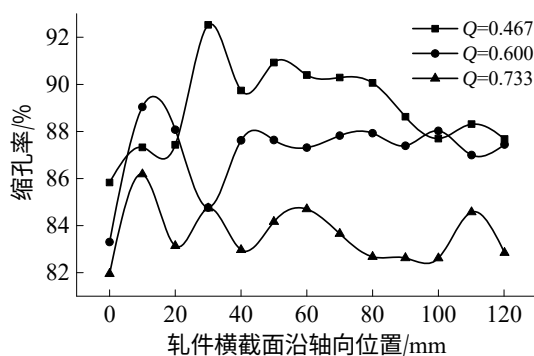


图3 轧件原始相对壁厚对缩孔率的影响

随着原始相对壁厚的增大, 轧件轧后的缩孔率总体上呈现逐渐减小的趋势, 且减小的幅度逐渐增大. 这是由于随着轧件原始相对壁厚的增大, 金属的径向流动困难造成的结果.

3.2 断面收缩率的影响

图4为轧件断面收缩率对轧件不同位置的缩孔率的影响规律. 整体比较来看, 较大的缩孔率波动发生在轧件对称面附近, 其他位置的缩孔率由于展宽的作用分布波动较小. 缩孔率沿轴向的波动性从断面收缩率的 30.56%至 67.89%, 呈减弱趋

势. 随着断面收缩率的增加, 模具与轧件的接触面积增大, 轴向力增大, 径向力减小, 轧件金属径向的流动稳定性逐渐增强, 最后缩孔波动性也就减弱. 尽管每个断面收缩率下的缩孔率分布都有波动, 但经比较可发现, 断面收缩率 ψ 为 30.56%时, 缩孔率主要分布在 25%左右; ψ 为 41.22%时, 缩孔率主要分布在 62%左右; ψ 为 51.00%时, 缩孔率主要分布在 73%左右; ψ 为 59.89%时, 缩孔率主要分布在 81%左右; ψ 为 67.89%时, 缩孔率主要分布在 88%左右.

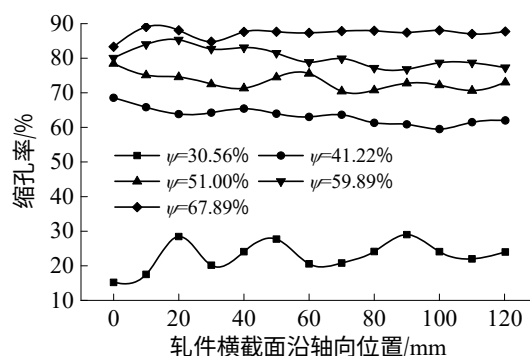


图4 断面收缩率对缩孔率的影响

随着断面收缩率的增大, 轧件轧后的缩孔率总体呈现逐渐增大的趋势, 且增大的幅度逐渐减小. 这是由于随着断面收缩率增大, 金属径向的压入值增大, 缩孔更小, 缩孔率也就更大. 但随着断面收缩率的增大, 金属轴向流动量增大, 金属径向流动量相对越小, 缩孔率增大的幅度反而减小. 同时发现, 当轧件断面收缩率为 30.56%时, 相比其他断面收缩率, 其缩孔率要小得多. 轧件断面收缩率小到一定值时, 模具对轧件径向作用主要集中在外层金属, 影响程度明显减弱, 轧件金属在模具的作用下径向压入值明显减小, 缩孔较大, 缩孔率较小.

4 工艺参数对轧后轧件内孔内径的影响

4.1 轧件原始相对壁厚的影响

图5为轧件原始相对壁厚对轧件不同位置的内径值大小的影响规律. 从图5可发现, 不同原始相对壁厚下的轧件轧后内径值呈现起伏现象, 在轧件对称面附近波动较大, 其他位置相对平稳. 内径值沿轴向的分布波动性, 特别是展宽成形区域轧件的分布波动性, 从轧件原始相对壁厚为 0.467

至0.733,呈减弱趋势.这是由于壁厚增大,轧件金属径向流动稳定性增强而造成的结果.

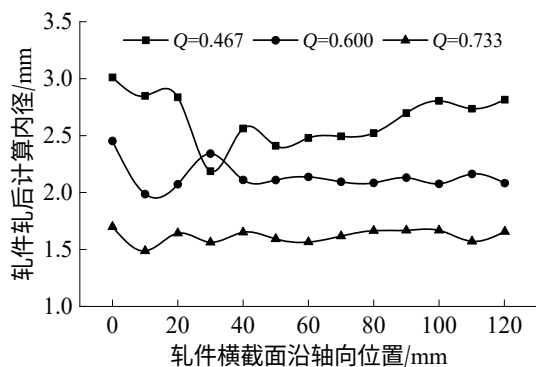


图5 轧件原始相对壁厚对内径值的影响

原始相对壁厚为0.467时,内径值主要在2.5 mm左右;原始相对壁厚为0.600时,内径值主要在2.1 mm左右;原始相对壁厚为0.733时,内径值主要在1.6 mm左右.可见,随着轧件原始相对壁厚的增大,轧件轧后内径值随之减小.轧件原始相对壁厚越大,轧件原始的内径值就越小,同时金属径向流动越困难,缩孔率越小.但原始内径值较小这一因素发挥了主要的作用,使得随着轧件原始相对壁厚的增大,轧件轧后内径值随之减小.

4.2 断面收缩率的影响

图6为轧件断面收缩率对轧件不同位置的内径值的影响规律.从图6可发现,不同断面收缩率下的轧件轧后内径值也呈现起伏的现象,在轧件对称面附近波动较大,其他位置相对平稳.缩孔率沿轴向分布的波动性从断面收缩率30.56%至67.89%,呈现减弱趋势.这是由于随着断面收缩率的增大,轧件金属径向流动稳定性增强.

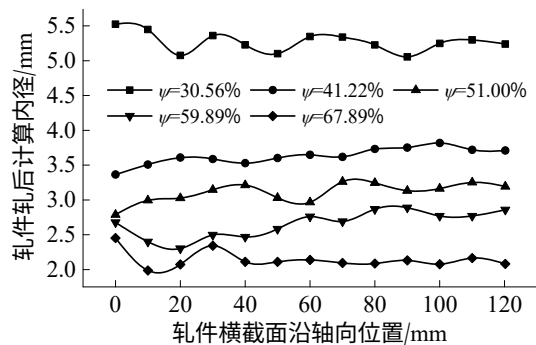


图6 断面收缩率对内径值的影响

在断面收缩率分别为30.56%、41.22%、51.00%、59.89%、67.89%的情况下,内径值分别主要分布在

5.3、3.6、3.2、2.6、2.1 mm左右.可见,随着断面收缩率的增大,轧件轧后内径值随之减小.这是由于随着断面收缩率的增大,金属径向的压入值增大,导致轧件轧后内径值减小.同时可见,当轧件断面收缩率为30.56%时,轧件轧后内径值明显要比其他参数下大很多.

5 工艺参数对壁厚减薄率的影响

5.1 轧件原始相对壁厚的影响

图7为轧件原始相对壁厚对轧件不同位置的壁厚减薄率的影响规律.不同原始相对壁厚下的轧件壁厚减薄率呈现起伏的现象,在轧件对称面附近波动较大,其他位置相对平稳.壁厚减薄率沿轴向的分布,特别是展宽成形区域的分布波动性从轧件原始相对壁厚为0.467至0.733,大体呈减弱趋势.这是由于壁厚增大,轧件金属径向流动稳定性增强而造成的结果.

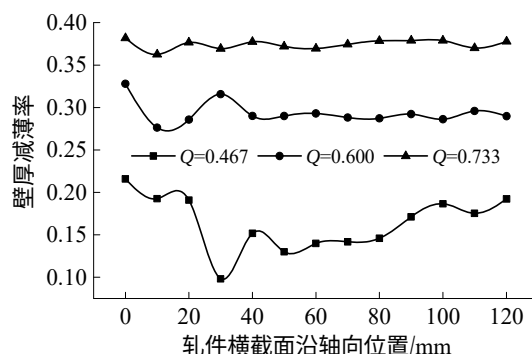


图7 轧件原始相对壁厚对壁厚减薄率的影响

同时从图7可以看出,随着轧件原始相对壁厚的增大,壁厚减薄率随之增大,且增大的幅度逐渐减小.当轧件原始相对壁厚为0.467时,轧件壁厚减薄率主要在0.15左右分布;当轧件原始相对壁厚为0.600时,轧件壁厚减薄率主要在0.28左右分布;当轧件原始相对壁厚为0.733时,轧件壁厚减薄率主要在0.37左右分布.这是由于随着原始相对壁厚的增大,轧件金属径向的流动愈加困难,金属更容易向轴向排挤.金属更多的轴向排挤流动使得轧件金属径向流动量减少,轧后的壁厚相对更小,体现为壁厚减薄率更大.但是随着轧件原始壁厚的增大,金属在轴向流动过程中受到的阻力也越大,轧后壁厚减小的幅度减小,表现为轧件壁厚减薄率增大的幅度随着原始相对壁厚的增大而

逐渐减小.

5.2 断面收缩率的影响

图 8 为轧件断面收缩率对轧件不同位置的壁厚减薄率的影响规律. 从图 8 可看出, 不同断面收缩率下的轧件壁厚减薄率呈现起伏的现象, 在轧件对称面附近波动较大, 其他位置相对平稳. 壁厚减薄率沿轴向的分布波动性, 特别是展宽成形区域的分布波动性从断面收缩率为 30.56%至 67.89%, 大体上呈减弱趋势. 这是由于断面收缩率增大, 轧件金属径向流动稳定性增强而造成的结果.

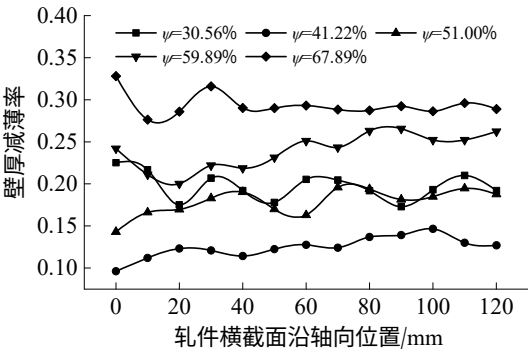


图 8 断面收缩率对壁厚减薄率的影响

从图 8 还可以看出, 在断面收缩率为 41.22%~67.89%的范围内, 随着轧件断面收缩率的增大, 壁厚减薄率随之增大. 当断面收缩率为 41.22%时, 壁厚减薄率主要分布在 0.13 左右; 当断面收缩率为 51%时, 壁厚减薄率主要分布在 0.18 左右; 当断面收缩率为 59.89%时, 壁厚减薄率主要分布在 0.25 左右; 当断面收缩率为 67.89%时, 壁厚减薄率主要分布在 0.29 左右. 这是由于随着断面收缩率的增大, 轧件金属轴向排挤量增大, 径向流动量减少, 使得轧件壁厚减小, 表现为轧件壁厚减薄率增大.

同时可以看出, 当断面收缩率为 30.56%时, 壁厚减薄率主要分布在 0.2 左右, 较小的断面收缩率下反而有了较大的壁厚减薄率. 当断面收缩率为 30.56%时, 壁厚减薄率主要分布在 0.2 左右, 是因为当轧件断面收缩率较小时, 模具对轧件径向作用的效果明显减弱, 主要影响外表面金属, 虽然轧件外表面金属被模具径向压入, 但是内表面金属径向压入值很小, 使得轧件壁厚减小值较大, 体现为壁厚减薄率较大. 各断面收缩率下的壁厚减薄率见表 2.

表 2 不同断面收缩率下的壁厚减薄率

断面收缩率/%	壁厚减薄率
30.56	0.20
41.22	0.13
51.00	0.18
59.89	0.25
67.89	0.29

6 楔横轧空心坯料制坯实验

为了验证小直径无芯棒空心坯料楔横轧轧制的实际可行性和成形效果, 设计了一系列楔横轧实验. 轧件材料为 21-4N 钢, 采用 H500 楔横轧机, 模具顶圆直径为 500 mm. 轧件外径设为 15 mm, 内径设为 4、6、8 mm, 实验参数见表 3. 实验共轧制成功 20 余件轧件. 所得部分轧件形貌如图 9 所示. 实验结果见表 4.

表 3 楔横轧实验参数

实验组	成形角/(°)	展宽角/(°)	斜楔尖部圆角/mm	温度/°C	轧前内径/mm
第 1 组	28	5	6	1 160	4
第 2 组	28	5	6	1 160	6
第 3 组	28	5	6	1 160	8



图 9 轧制实验部分轧件

表 4 实验结果

实验组数	轧前内径/mm	实验结果
第 1 组	4	已成形, 无螺旋纹, 有缩颈现象, 轧后内孔存在
第 2 组	6	已成形, 无螺旋纹, 微缩颈, 轧后内孔存在
第 3 组	8	已成形, 无螺旋纹, 表面质量较好, 轧后内孔存在

7 结论

本文对空心坯料楔横轧制坯中缩孔规律进行了研究, 通过理论分析、数值模拟和轧制实验相结合的方法得到以下主要结论:

(1) 轧件的原始相对壁厚从 0.467 增大到 0.733, 缩孔率、内径值和壁厚减薄率沿轧件轴向的分布波动性呈现减弱的现象, 且随着轧件原始相对壁厚的增大, 轧件轧后的缩孔率和内径值随之减小, 壁厚减薄率随之增大。因此, 在一定范围内, 轧件原始相对壁厚越大, 缩孔沿轧件轴向分布的波动性越小, 缩孔和壁厚减薄的效果越显著。

(2) 轧件的断面收缩率从 30.56% 增大到 67.89%, 轧件轧后的缩孔率、内径值和壁厚减薄率沿轧件轴向的分布波动性呈现减小的现象, 且随着断面收缩率的增大, 轧后轧件的缩孔率随之增大, 内径值随之减小。但随着断面收缩率的增大, 壁厚减薄率先减小后增大, 断面收缩率为 41.22% 时为转折点。因此, 在一定范围内, 断面收缩率越大, 缩孔沿轧件轴向分布的波动性越弱, 缩孔效果也越显著, 而

壁厚减薄率则是先减小后增大。

参考文献:

- [1] 胡正寰, 张康生, 王宝雨, 等. 楔横轧零件成形技术与模拟仿真[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004:10-30.
- [2] 丁韡. 楔横轧等内径空心轴热力耦合数值模拟[D]. 北京: 北京科技大学, 2010.
- [3] 蔡亚宁. 楔横轧二次楔轧制心部缺陷的实验研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2007.
- [4] 王冰, 赵强, 王萍, 等. 摩托车气门材料及热处理[J]. 摩托车技术, 2003(5):19-21.
- [5] 汪立亮, 姬建伟. 车用发动机气门材料的选用及其新材料的开发[J]. 湖北汽车, 2000(2):37.
- [6] 吴旭初, 沈文君. 发动机气门材料应用及进展[J]. 内燃机工程, 1999(1):36-37.
- [7] 胡学根. 空心气门及其制造工艺[J]. 内燃机配件, 2002(5):13-19.
- [8] Yoshimura H. Method for production of valve head portion of hollow engine valve and hollow engine valve: USA, 2011174259B2[P]. 2011-07-21.
- [9] 胡学根. 空心气门及其制造工艺[J]. 内燃机配件, 2002(6):9-14.

Influence rules for shrinkage cavity variation of hollow billet in cross wedge rolling

HUANG Xiao-min¹, JI Hong-chao², LIU Jin-ping^{1*}

(1.School of Mechanical Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2.School of Mechanical Engineering, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China)

Abstract: Aiming at exploring the hollow billets of 21-2N heat resistant steel, Deform-3D software is used to simulate the forming process of hollow billet for cross wedge rolling, and to investigate the deformation condition with different process parameters. The finite element simulation results reveal how the inner hole shrinkage of hollow billet is affected by different process parameters. These varying influential rules include shrinkage ratio of hollow work-piece after rolling and variation of distribution in the axial direction of work-piece, and size of internal bore of work-piece variation of distribution in the axial direction of work-piece and change of work-piece wall thickness. The analytic results show that the shrinkage of the hollow billet can be significantly affected by the process parameters.

Key words: cross wedge rolling; hollow billet; 21-2N; shrinkage hole

(责任编辑 史小丽)