

## GCr15 轴承钢轧件内部应力的有限元分析

陈红卫<sup>1</sup> 闫志波<sup>2</sup> 刘瑞宁<sup>1</sup> 苏 兰<sup>3</sup>

(1 石家庄钢铁有限责任公司, 石家庄 050031; 2 石家庄职业技术学院机电系, 石家庄 050031;  
3 北京科技大学高效轧制国家工程研究中心, 北京 100083)

**摘 要** 采用有限元分析软件 DEFORM, 对石钢 GCr15 轴承钢 300 mm × 220 mm 铸坯 650 轧机箱形孔轧制 1 ~ 4 道次轧件内部应力进行模拟, 分析了侧壁斜度和轧制温度对应力的影响。结果表明 1/[(H+h)/2] 最小的第 1 道次不利于改善钢材的内部质量; 侧壁倾角越小, 宽度方向的拉应力( $\sigma_x$ ) 越小; 1 050 °C 轧制时各点断裂因子小于 1 100 °C 各点断裂因子。

**关键词** 650 轧机 孔型 GCr15 轴承钢 内应力 有限元分析

## Finite Element Analysis on Internal Stress of Rolling Workpiece of GCr15 Bearing Steel

Chen Hongwei<sup>1</sup>, Yan Zhibo<sup>2</sup>, Liu Ruining<sup>1</sup> and Su Lan<sup>3</sup>

(1 Shijiazhuang Iron and Steel Co Ltd, Shijiazhuang 050031; 2 Department of Machine and Electron, Shijiazhuang Institute of Vocational Technique, Shijiazhuang 050031; 3 National Engineering Research Center for Advanced Rolling Technology, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** The internal stress of workpiece of GCr15 bearing steel 300 mm × 220 mm cast billet during 1 ~ 4 pass of 650 mill with box pass rolling has been simulated by using finite element analysis software DEFORM and the effects of side taper and rolling temperature on stress were analyzed. Results showed that the first pass with minimum 1/[(H+h)/2] value was disadvantage to improve internal quality of steel products; the less side taper the less tensile stress ( $\sigma_x$ ) at width direction; and the fracture factor of each point during rolling at 1 050 °C was less than that at 1 100 °C.

**Material Index** 650 Mill, Pass, GCr15 Bearing Steel, Internal Stress, Finite Element Analysis

采用北京科技大学的 DEFORM 软件对石钢公司的粗轧孔型进行轧件变形的受力分析, 为改善轴承钢材的内部质量提供理论参考。

### 1 粗轧孔型系统分析

石钢公司一轧厂粗轧为 650 轧机, 采用 11 道次箱形孔轧制, 通过计算 1/[(H+h)/2] 值<sup>[1]</sup>, 前 3 道次较小, 范围为 0.31 ~ 0.46, 第 4 道次及以后的道次有所增加, 见表 1。当该值大于 0.5 时, 纵向的拉应力可变为压应力, 因此确定对孔型系统的前 3 道次以及该值较大的第 4 道次进行计算机模拟分析。

### 2 计算机模拟分析

#### 2.1 几何和条件

连铸方坯横截面尺寸为 300 mm × 220 mm, 按

照钢的热膨胀系数, 折算成热形尺寸为 305 mm × 224 mm。为了消除头尾钢端影响, 轧件长度必须大于 3 倍的变形区长度, 计算出第 1 道次的变形区长度为 101.8 mm, 则取轧件长度为 400 mm, 可以满足要求。为了减少单元数目, 利用轧件与孔型的对称性, 取 1/2 模型进行研究, 则轧件的外形尺寸 (mm) 为: 305 (高) × 112 (宽) × 400 (长)。

650 轧机的上辊直径为 680 mm, 中辊直径为 690 mm, 下辊直径为 700 mm。各道次孔型高度与宽度如表 2 所示。

在热模拟试验机 Gleeble-1500 上, 测得不同温度和不同应变速率下 GCr15 钢的应力应变关系曲线, 将其作为有限元模拟计算的材料条件。

表 1 各道次的 1/[(H+h)/2] 值  
Table 1 1/[(H+h)/2] value at each pass

道次	1/[(H+h)/2] 值
1	0.31
2	0.35
3	0.46
4	0.57

表 2 孔型的几何尺寸/mm  
Table 2 Dimension of pass /mm

道次	类型	高度	宽度	槽底宽度
1	箱形孔	267	260	222
2	箱形孔	233	260	224
3	箱形孔	197	262	228
4	箱形孔	162	262	230

2.2 边界条件

轧辊转速为 80 r/min。坯料由于取 1/2 进行计算,在对称面上需要施加法线方向的位移约束。

2.3 轧件断面的应力分析

为分析轧件在孔型轧制时与孔型轧制后的应力状态,在 1~4 道次轧件中心沿高度和宽度方向各选取 4 个关键点,坐标如表 3 所示,其中  $\sigma_x$  方向为轧件宽度方向的应力, $\sigma_y$  方向为厚度压下的应力, $\sigma_z$  方向为轧制线方向的应力。

2.3.1 y 轴(高度方向)各点的应力

表 3 关键点的坐标

Table 3 Coordinates of key point

关键点	宽度	高度
1	0,0	0,0
2	10,0	0,10
3	20,0	0,20
4	30,0	0,30

为说明同一横截面上不同高度的各关键点的应力状态随时间而变化的情况,在图 1 中对比了 1~4 道次的  $\sigma_x$ 、 $\sigma_y$ 、 $\sigma_z$  各点的应力值。

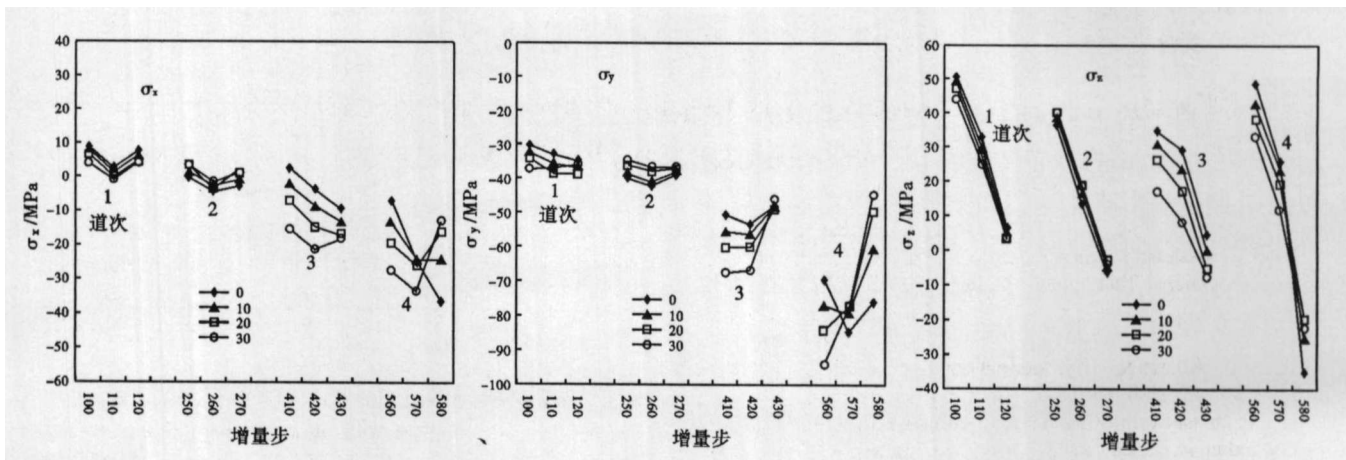


图 1 1~4 道次 y 轴各点应力的变化

Fig. 1 Change of stress of each point of y-axis at 1~4 pass

第 1 道次的各点  $\sigma_x$ , 当第 100 步(轧件刚进入轧制区)时,轧件产生了宽展,宽度方向为拉应力,而且由于孔型侧壁的作用,应力值随着高度增加而减小。最大拉应力发生在轧件中心的 1 点处(8.6 MPa),最小拉应力发生在距轧件中心 30 mm 的第 4 点处(4.1 MPa)。在第 110 步,轧件受到最大压下量,孔型侧壁限制宽展的作用加强,第 1 点至第 3 点的宽度方向拉应力都下降,离轧件中心较远的 4 点(x 坐标为 30 mm)为压应力状态。在第 120 步,第 1 点至第 4 点又恢复宽度方向拉应力状态,趋势与第 100 步时相同。

第 1 道次的各点  $\sigma_y$ , 在第 100 步至 120 步时,轧件处于轧制区,受到高度方向的压下,第 1 点至第 4 点在高度方向都为压应力状态,最大压应力发生在第 4 点处(37 MPa),最小压应力发生在第 1 点处(30 MPa)。

第 1 道次的各点  $\sigma_z$ , 在第 100 步至 120 步时,轧件发生长度方向延伸,第 1 点至第 4 点在轧制方向都为拉应力状态,最大拉应力发生在第 1 点处(50.5 MPa),最小拉应力发生在第 4 点处(43 MPa)。

以上分析可知,距中心越近的点,其压应力较小,而拉应力较大,同时,随着轧制的进行,从第 1~4 道次各点逐渐由两向拉一向压转变为两向压一向拉,甚至三向压应力状态。

2.3.2 x 轴(宽度方向)各点的应力

图 2 中可以看出,第 1 道次当轧件进入轧制区后,各关键点一直处于两向拉一向压的应力状态,图 2 显示,各关键点处宽度方向  $\sigma_x$  为拉应力,且与轧件中心点距离越远的,应力值越小,高度方向与轧制方向的应力随坐标的变化规律与图 1 中一致。同样随着轧制的进行,各点由第 1 道次的两向拉一向压转为第 4 道次的两向压一向拉,不同于 y 轴各点的是 x 轴上各点之间的应力值差别较小。

可见,随着轧制的进行,轧件高度不断下降,轧件心部应力状态虽然仍维持两向拉一向压的应力状态,但宽度方向(x 方向)的拉应力  $\sigma_x$  进一步缩小,最大都不超过 4 MPa。第 4 道次的轧制过程中,由于变形区长度增大,平均高度下降,孔型对轧件的限制变形作用最明显,轧件心部应力状态由两向压一向拉变为三向压的应力状态。

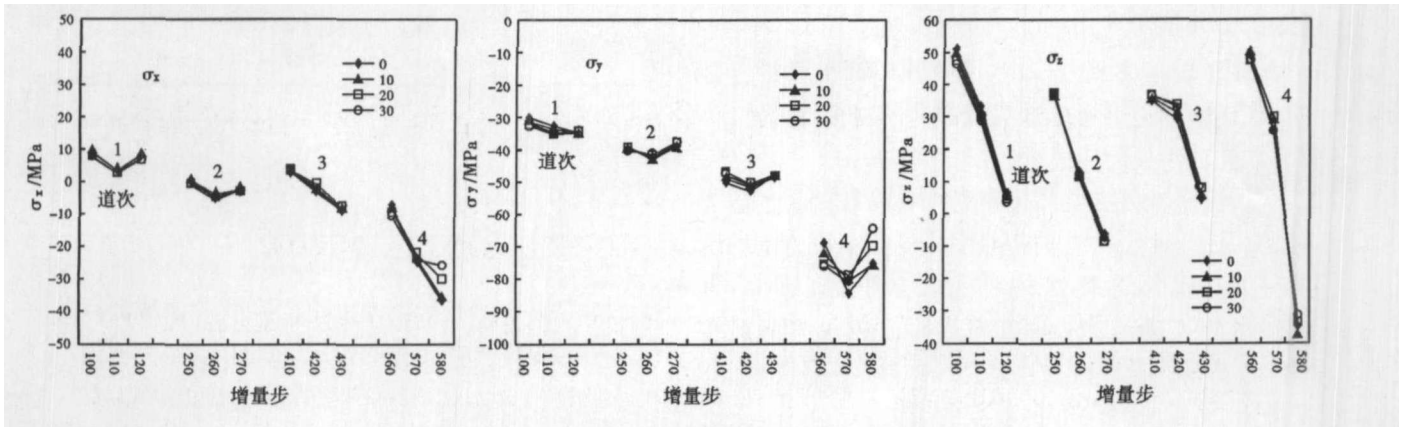


图 2 1~4 道次 x 轴各点应力的变化  
Fig. 2 Change of stress of each point of x-axis at 1~4 pass

作为粗轧的原料, GCr15 连铸坯本身内部不可避免存在空隙、疏松或者微裂纹等冶金缺陷, 为了避免在轧制过程中萌生与扩展微裂纹, 应尽量使轧件的心部处于三向压或两向压一向拉的应力状态。要减少裂纹产生, 必须着重于第 1 道次, 分析其孔型与变形参数对应力状况的影响, 以找出解决办法。

2.3.3 第 1 道次不同侧壁斜度对应力的影响

对比第 1 道次侧壁斜度 8° 和侧壁斜度 12° 的应力情况, 倾角越小, 宽度方向的拉应力(σ<sub>x</sub>) 越小(图 3)。

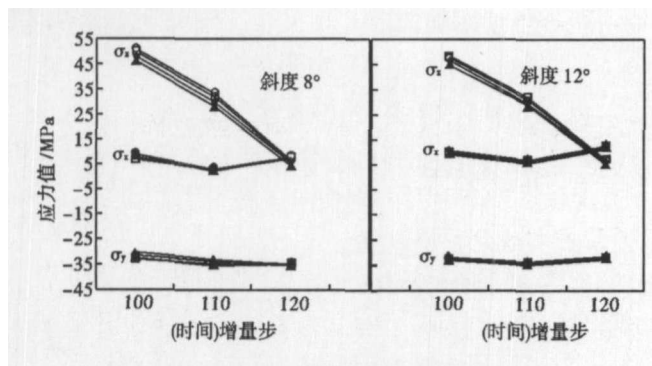


图 3 第 1 道次侧壁斜度对应力的影响  
Fig. 3 Effect of side taper at first pass on stress

2.3.4 第 1 道次轧制温度对应力的影响

以第 1 道次为研究对象, 采用 1 050 °C 与 1 100 °C 的变形温度, 模拟了轧件变形。

为了比较不同变形温度下, 轧件进入轧制区时, 同一横截面上不同高度的各关键点的应力状态, 引入了断裂因子 λ 的判据。λ 的定义如下:

$$\lambda = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_s}$$

式中: σ<sub>max</sub> - 最大正应力; σ<sub>s</sub> - 等效应力。

在第 100 步时, 1 050 °C 与 1 100 °C 下轧件中心高度、宽度方向各点的断裂因子如图 4 所示。从图

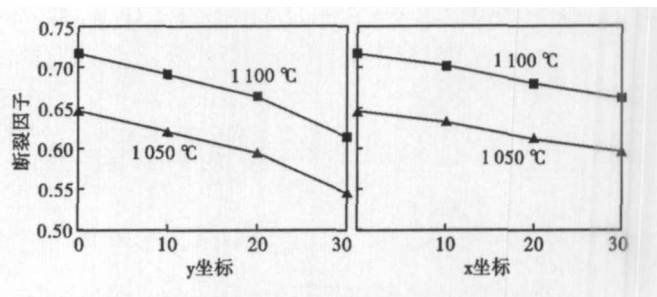


图 4 第 1 道次轧制温度对断裂因子的影响  
Fig. 4 Effect of rolling temperature at first pass on fracture factor

4 中可以看出, 1 050 °C 时各点的断裂因子都小于 1 100 °C 的; 在同一温度下, 与轧件中心距离越大, 断裂因子越小。1 050 °C 时高度方向最小断裂因子(y 坐标 30 mm) 为 0.545, 1 100 °C 时高度方向最小断裂因子(y 坐标 30 mm) 为 0.612。在第 100 步时, 1 050 °C 与 1 100 °C 下轧件中心宽度方向各点的断裂因子变化趋势与高度方向相似, 只是在 1 050 °C 时, 最小的断裂因子(x 坐标 30 mm) 为 0.596, 在 1 100 °C 时, 最小的断裂因子(x 坐标 30 mm) 为 0.662, 都大于高度方向相同距离点的数值。

3 结语

通过 GCr15 轴承钢轧件内部应力的有限元分析可知, 1/[ (H + h)/2 ] 值最小的第 1 道次最不利于改善钢材的内在质量; 侧壁斜度和轧制温度对应力的大小和状态有较大的影响; 根据实际情况对孔型和工艺进行适当调整, 以改善轧件的受力情况。

参考文献

1 赵志业. 金属塑性变形与轧制理论. 北京: 冶金工业出版社, 1980

陈红卫(1967-), 女, 高级工程师, 1989 年北京科技大学毕业, 从事特殊钢工艺研究与产品开发。

收稿日期: 2007-01-09