

角钢成形过程三维有限元热力耦合模拟

阎军¹⁾ 鹿守理¹⁾ 陈希克²⁾

1) 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083 2) 马钢钢铁股份有限公司, 马鞍山

摘 要 应用 MARC/autoforge 商用有限元程序, 采用大变形弹塑性有限元方法对角钢的轧制过程进行了三维有限元热力耦合模拟. 对模拟过程中涉及到的变形、温度场和宽展等进行了分析和探讨, 重点分析了角钢异形孔中轧件的变形和应力分布. 数值模拟的结果和现场实际轧制的情况进行了对比, 结果证明数值模拟结果与实际轧制情况相符合.

关键词 角钢; 三维变形; 数值模拟

分类号 TG 335.4

目前采用有限元方法对三维热轧问题的研究还很不深入, 文献[1~4]的共同特点是在轧件的横断面上采用有限元分析, 而在轧制方向采用简化分析, 这种简化假设与实际是不符的; 此外假设等温变形也会造成很大的误差. 因此, 本文应用三维有限元方法, 同时考虑温度场的不均匀分布, 采用热力耦合的方式模拟型钢的变形更能揭示变形过程的实质.

1 有限元模拟计算中关键问题的处理

型钢三维变形模拟中涉及到的关键问题主要包括有限元网格的布局、边界条件的确定、初始接触点的计算、时间步长的选取和主要力学模型的确定等.

1.1 有限元模型和边界条件

角钢变形由于其对称性, 可取 1/2 断面进行网格划分. 由于异型孔形状复杂, 且存在许多较小的圆角半径, 不同区域变形的剧烈程度也不同, 在进行网格划分时, 曲率变化较大的地方划分较细的网格, 这样才能更好地逼近轧件的形状, 因而, 单元的数目较多. 根据轧件长度和断面上单元尺寸的平均值确定单元数目, 轧件长度的选取应考虑到在长度方向应有一段稳定的变形区域, 可取轧制平均接触弧长的 3 倍左右. 按照计算的精度取决于网格的疏密, 同时考虑

到硬件的能力和计算成本的原则, 在不同的孔型中单元数分别取 2 200~2 800 个.

材料的热物性参数取自 MARC/Autoforge 材料库. 所选钢种成分与模拟的实际钢种 Q235 基本一致. 将型钢的热变形时的轧辊视为恒温刚性体.

边界条件包括接触面上的摩擦边界条件和传热边界条件. 接触面上的摩擦采用库仑摩擦规律. 根据不同的轧制条件, 摩擦因数可取 0.3~0.4. 轧件的自由表面存在与周围环境的对流和辐射换热, 轧件与轧辊接触时存在接触传热. 前两类边界条件在传热学中称为第三类边界条件, 可统一写为下式.

$$q = -\lambda \left(\frac{\partial t}{\partial n} \right) = \alpha(t - t_{\infty}) \quad (1)$$

式中: t 为轧件表面温度; t_{∞} 为环境温度; α 为换热系数. 换热系数 α 可写成对流换热系数 h 与等效辐射换热系数 h_r 之和. 与环境的对流换热系数, 根据文献 [5] 并结合现场条件, 一般为 0.01~0.1 kW/m²K, 本文取 0.03 kW/m²K. 与环境之间的辐射换热系数可根据辐射定律, 并转换成(1)式的形式, 可得等效辐射换热系数为:

$$h_r = \sigma \epsilon (t + t_{\infty})(t^2 + t_{\infty}^2) \quad (2)$$

式中: σ 为波尔兹曼常数 5.67×10^{-8} W/m²K; ϵ 为材料热辐射率, 本文取 $\epsilon = 0.8$. 由(2)式可知, 等效辐射换热系数与温度有关, 因而辐射边界条件是非线性的.

轧辊与轧件之间的接触热传导一般用接触热传导系数 h_c 来简化处理 2 个固体之间的接触

传热问题. 本文 h_c 取 $15\text{ kW/m}^2\text{K}$. 轧件对称面采用绝热边界 $q=0$ 处理.

金属的变形会产生变形热, 热功转换系数取 $0.9^{[6]}$. 另外, 轧辊和轧件接触表面的摩擦也会产生热, 该部分热量可平均分配至轧件和轧辊.

1.2 初始接触点的确定

本文在计算中采用了数值分析的方法确定初始接触点, 计算方法如下.

首先可任意假设轧件在垂直方向的位置, 这一假设位置并不能保证轧件与上下轧辊同时接触. 由于沿轧辊的宽度方向各处的轧辊半径是不同的, 因而各点的接触弧长也不相同. 如图1所示, 轧件在A点与上轧辊接触, 而轧件要在B点才与下轧辊接触, 因此轧件必须运行到虚线所示的位置. 因此, 上下辊的接触弧长 $L_1(x)$ 与 $L_2(x)$ 不相等. 此时必须将轧件沿垂直方向向下移动, 直到满足上下辊的接触弧长相等为止. 计算时可沿孔型宽度方向分别计算出上辊和下辊的最大接触弧长, 根据二者的差别确定轧件在垂直方向的移动量, 从而确定出初始接触点. 按照这种方法编制了不同坯料进入切分孔, 蝶式

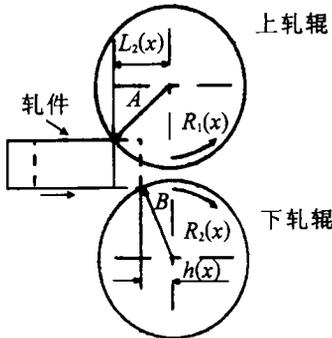


图1 初始接触点计算图示

孔和成品孔的初始接触点计算程序.

采用上述方法计算初始接触点准确可靠. 同时这种方法也可用于计算理想接触区的形状、不同区域接触的先后次序、分析轧件在异型孔中咬入状况以及判断轧制的稳定性.

1.3 时间步长的选取

时间步长与轧制速度、变形所需的时间、每个步长的平均变形量、单元尺寸的平均大小密切相关. 根据对角钢、方进椭圆、圆进椭圆等简单断面型钢的模拟计算, 可以确定时间步长与上述参数之间的大致关系. 按照每个时间步长轧件的轧出量作为判断的标准, 根据我们所用的单元尺寸, 此值大约为 0.4 .

2 模拟计算条件

本文所模拟的问题取自现场实际中的角钢轧制. 轧机的布置形式为三列横列式, 生产4号角钢, 机组主要参数见表1. 共用5个异型孔. 切分孔采用平底切分孔, 成品孔为开口式, 其余为上下开口交替布置的蝶式孔. 孔型的主要构成尺寸见表2.

轧制温度在 900 到 $1150\text{ }^\circ\text{C}$, 异型孔轧制温度在 900 到 $1020\text{ }^\circ\text{C}$.

表1 主要设备参数 (轧制钢种: Q235)

轧机	电机功率 W/kW	电机转速 $n_1/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	轧辊转速 $n_2/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	轧制速度 $v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
350×2	630	590	130.92	2.40
300×3	800	590	190.9	3.00
300×1	400	590	294.69	4.63

表2 角钢异型孔孔型基本尺寸

mm

孔型类型	腿厚	顶角/ $^\circ$	弯曲半径	构成厚度	孔宽	内跨圆弧	备注
切分孔	11.5	105	20	—	58.22	—	平底
蝶式孔	8.3	90	18	46.662	61.15	15	—
蝶式孔	6.0	90	18	46.662	63.12	11	—
蝶式孔	4.8	90	18	46.662	63.12	7	—
成品孔	3.9	90	—	—	69.00	5	—

3 模拟计算结果及分析

3.1 变形分析

角钢在轧制过程中, 由于同时存在着宽展和延伸, 显示了典型的三维变形的特征. 本文进行了轧件从咬入到稳定变形整个过程的模拟, 可清楚地看出从非稳态到稳态整个变形过程中轧件的变形状况. 变形前的平面在变形过程中

发生了严重的翘曲, 不再保持为平面. 因而, 平面假设是不符合实际的, 采用简化的拟三维的分析方法必然会带来误差. 图2是在蝶式孔轧制中从轧件中取出的3个截面在轧制后的形状变化, 图中显示出平面形状的扭曲十分严重. 这种现象的产生主要是轧件接触轧辊的不同时性和在轧件宽度方向压下的不均匀导致的轧件纵向延伸不一致造成的. 轧件纵向延伸的

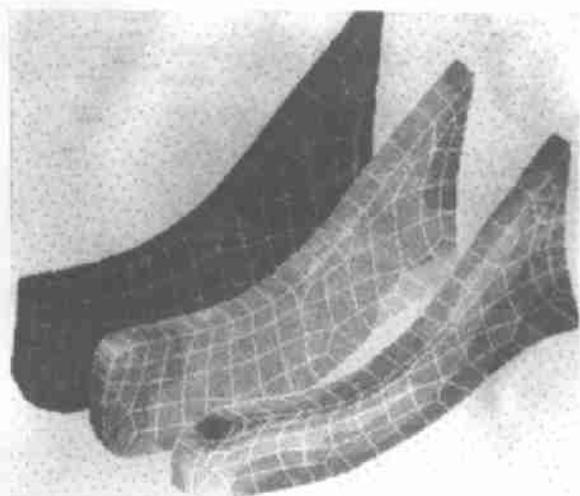


图2 轧件平面形状的变化. 时间 0.0125s, 增量步 100 不一致必然会对轧件的横向宽展带来影响. 这种情况无论是在切分孔、蝶式孔或成品孔中都不同程度的存在. 这反映了型钢三维变形问题的实质.

通过模拟计算可以清楚地了解角钢在变形过程中变形的分布状况. 切分孔前采用的是圆底大侧壁斜度的立压孔, 使切分孔的来料中部

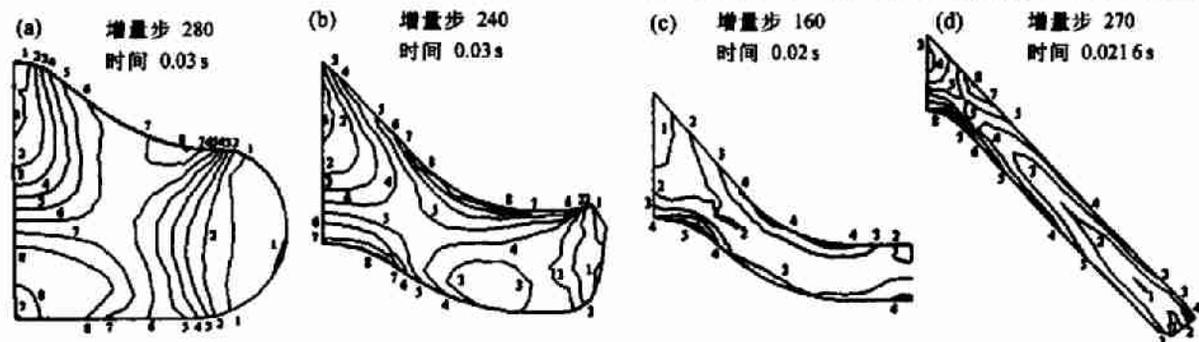


图3 不同孔型中轧件断面上等效塑性应变的分布. (a) 0—0.1144, 1—0.1576, 2—0.2009, 3—0.2441, 4—0.2873, 5—0.3305, 6—0.3737, 7—0.4169, 8—0.4601, 9—0.5033; (b) 0—0.3088, 1—0.3858, 2—0.4629, 3—0.5399, 4—0.6170, 5—0.6940, 6—0.7711, 7—0.8481, 8—0.9252, 9—1.002; (c) 0—0.3631, 1—0.4700, 2—0.5769, 3—0.6838, 4—0.7907, 5—0.8976, 6—1.005, 7—1.111, 8—1.218, 9—1.325; (d) 0—0.1849, 1—0.2284, 2—0.2719, 3—0.3154, 4—0.3589, 5—0.4024, 6—0.4459, 7—0.4894, 8—0.5329, 9—0.5764.

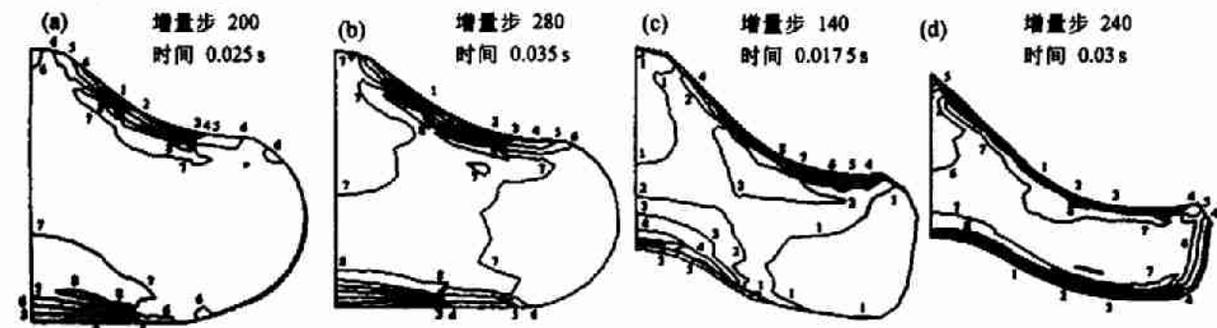


图4 轧件断面上温度的分布, $t/^\circ\text{C}$. (a) 0—984.5, 1—990.5, 2—996.6, 3—1003, 4—1009, 5—1015, 6—1021, 7—1027, 8—1033, 9—1039; (b) 0—966.8, 1—975.2, 2—983.6, 3—992.0, 4—1000, 5—1009, 6—1017, 7—1026, 8—1034, 9—1042; (c) 0—978.5, 1—1003, 2—1007, 3—1010, 4—1014, 5—1018, 6—1022, 7—1026, 8—1030, 9—1033; (d) 0—963.6, 1—968.5, 2—973.5, 3—978.5, 4—983.5, 5—988.5, 6—993.5, 7—998.5, 8—1003, 9—1008.

厚度较大, 以保证在切分孔轧制时中部有一定的压下量, 使顶角能够充满. 从轧件的整个变形情况来看, 一般在孔型上缘线弯曲处和孔型下缘线内跨圆弧处的变形比较大, 而在孔型顶角处和腿部的变形相对较小. 如侧壁有较强的限制宽展, 在侧壁圆弧处的变形较大. 图3给出了轧件在不同孔型中轧件某一断面上的等效塑性应变的分布. 平底切分孔由于压下量较小, 变形不十分剧烈. 由于来料是中部厚, 边部薄的形状, 因此, 在底部和弯曲半径处的变形和应力都较大. 蝶式孔由于压下量较大, 总的变形也较大. 成品孔主要是压弯变形, 腿厚压下量相对较小, 在内跨圆弧和上缘部分变形较大. 从整个模拟计算来看, 顶角部分充满较好, 金属在这里只是向顶角流动, 没有受到很大的阻力. 因而, 显示出的变形都不是很大.

3.2 轧制过程中的温度场

轧件中的温度场的分布也是不均匀的. 图4为切分孔和第一道蝶式孔中轧件温度的分布情况. 从图中可看出, 在与轧辊接触的表面温度

较低,变形剧烈处温度较高.其余孔型中温度的变化规律也有同样规律.

3.3 轧件宽展分析

图5显示了轧件的计算宽展和实际轧件宽展的比较以及轧件顶角的充填情况.从图中可

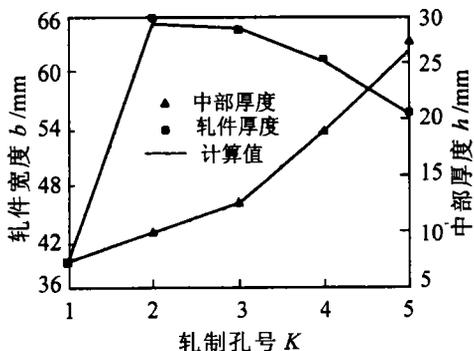


图5 轧件宽展和中部厚度计算值与实测值的比较

将孔型尺寸放宽1mm后,这种现象便消失.这说明模拟计算可以准确地反映轧辊调整参数的变化对轧件变形带来的影响.异型孔轧制中,孔型的侧壁对金属的横向流动有强烈的限制作用,金属的宽展实际上是限制宽展.采用不同宽度的蝶式孔进行计算的结果显示,将限制宽展看成是孔型中的宽展和自由宽展的比值,在蝶式孔中限制宽展的大小应在60%~70%.

4 结论

(1) 商用有限元软件MARC/Autoforge可以用来分析型钢的三维变形过程.(2) 采用三维有限元方法分析型钢的热轧过程能更清楚地了解金属的变形规律,通过定量分析更准确地掌握型钢三维变形的实质.(3) 不均匀变形是型钢变形的主要特征.

以看出,模拟计算的结果十分准确,完全满足实际的需要.从前述孔型表中可以看出,K3孔的设计腿厚与实际调整中的腿厚有较大的差别,在实际采样中发现此时轧件已出了一些耳朵,在模拟计算中同样可以反映出来,如图6所示.

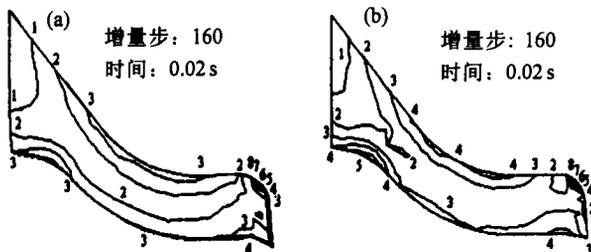


图6 在不同宽度的孔型中轧件脚端等效塑性应变.

(a) 0—0.350 8,1—0.502 0,2—0.653 2,3—0.804 4,4—0.955 7,5—1.107 0,6—1.258 0,7—1.409 0,8—1.561 0,9—1.712 0;(b) 0—0.363 1,1—0.470 0,2—0.576 9,3—0.683 8,4—0.790 7,5—0.897 6,6—1.005 0,7—1.111 0,8—1.218 0,9—1.325.

参考文献

- Kim N, Lee S M. Simulation of Square-to-Oval Single Pass Rolling Using a Computationally Effective Finite and Slab Element Method. *Journal of Engineering Industry*, 1992, 114(8): 329
- Park J J, Oh S I. Application of Three Dimensional Finite Element Analysis to Shape Rolling Process. *Transaction of ASME*, 1990, 112(2): 36
- Glowacki M, Kuziak R, Malinowski Z, et al. Modelling of Heat Transfer, Plastic Flow and Microstructural Evolution During Shape Rolling. *Journal of Materials Processing Technology*, 1995, 53: 509
- Ping X, Tatsuhiko Aizawa, Junji Kihara. Roll Pass Evaluation for Hot Shape Rolling Processes. *Journal of Materials Processing Technology*, 1991, 27: 163
- 杨世铭. 传热学. 北京: 北京高等教育出版社, 1987
- Wertheimer T B. Thermal Mechanically Coupled Analysis in Metal Forming Process. *Numerical Methods in Industrial Forming Processes*. Swanwea: Pineridge Press Ltd, 1982. 425

Simulation of Angle Steel Rolling with Three-Dimensional Coupled Thermo-Mechanical FEM

Yan Jun¹⁾, Lu Shouli¹⁾, Chen Xike²⁾

1) Material Science and Engineering School, UST Beijing, Beijing 100083, China 2) Maanshan Iron and Steel Company Ltd, Mannshan, China

ABSTRACT With the help of commercial finite element software MARC/Autoforge, angle steel rolling process using large strain elasto-plastic coupled thermo-mechanical finite element method was simulated. The problems of metal deformation, temperature field and spread were analysed and key point was placed to distribution of deformation and stress in rolling process. Simulation results compared with rolling practice which shows numerical simulation is good agreement with rolling practice.

KEY WOEDS angle steel; three-dimensional deformation; numerical simulation