

20CrMnTi 齿轮钢棒材热连轧有限元模拟

肖 玉 洪慧平 冯富春

(北京科技大学材料科学与工程学院,北京 100083)

摘 要 通过对棒材热连轧过程的分析,建立了 20CrMnTi 钢 800 ~ 1 150 °C,变形量 0 ~ 0.8,应变速率 0 ~ 3 s⁻¹ 的 Hensel-Spittel 流变应力模型;利用 LARSTRAN/SHAPE 有限元软件模拟了 20CrMnTi 从 200 mm × 200 mm 的方坯经 8 道次连轧为 Φ90 mm 圆棒的过程,分析了轧件在圆弧侧壁的圆孔型和直线侧壁的圆孔型下轧制过程中的应力场、应变场、温度场和轧制力及力矩的变化情况。模拟结果表明,轧件圆角部位等效应力、等效应变较大且温度较低,容易出现轧制质量缺陷;圆弧侧壁的圆孔型轧制圆钢时的精度略高于直线侧壁的圆孔型。

关键词 棒材 热连轧 20CrMnTi 齿轮钢 有限元 模拟仿真

Finite Element Simulation of Hot Continuous Rolling Process of Gear Steel 20CrMnTi Bar Products

Xiao Yu, Hong Huiping and Feng Fuchun

(School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

Abstract A Hensel-Spittel flow stress model of steel 20CrMnTi with strain 0 ~ 0.8 and strain rate 0 ~ 3 s⁻¹ at 800 ~ 1 150 °C is established by analysis on hot continuous rolling process of round bar. With using finite element software LARSTRAN/SHAPE the simulation of process of steel 20CrMnTi with 8 pass rolling from 200 mm × 200 mm billet to Φ90 mm round bar has been carried out to analyze the variation of stress, strain and temperature field, and rolling force and torque of rolling stock during process of rolling by round pass with curved side wall and round pass with straight-line side wall. Simulated results show that at round corner of stock the equivalent stress and equivalent strain are bigger and the temperature is lower than that at other region, so the defects easily occur at the corner of stock; the precision of round bar rolled by round pass with curved side wall is slightly higher than that by round pass with straight-line side wall.

Material Index Round Steel, Hot Continuous Rolling, Gear Steel 20CrMnTi, Finite Element, Simulation

随着汽车等相关工业向高精度、大批量、自动化流水线生产方式的发展,客户对齿轮钢有了越来越高的要求标准^[1,2]。LARSTRAN/SHAPE 有限元模拟软件在型钢轧制模拟方面具有一定的优势,本实验就是利用它建立了 20CrMnTi 钢 8 道次热连轧圆棒材粘塑性有限元模型,模拟材料变形过程中的等效应力场、应变场、温度场和轧制力及力矩的变化情况和分析易产生轧制缺陷的部位。

1 数学模型的建立

1.1 流变应力模型

为了更精确的反映 20CrMnTi 齿轮钢棒材轧制的高温塑性变形特性^[3],需要选择合适的流变应力模型。本文采用 Hensel-Spittel 流变应力数学模型:

$$\sigma = p_0 \exp(p_1 T) \dot{\epsilon}^{p_2} \epsilon^{p_3} \exp(p_4 \epsilon) \quad (1)$$

式中:σ- 应力/MPa; T- 变形温度/°C; ε- 变形量; ε̇-

变形速率/s⁻¹; p₀ ~ p₄- 回归系数(与钢种相关)。

由式(1)可知,当温度和应变速率一定时,应力与变形量成一定的幂指数关系。利用热模拟压缩实验得到的 20CrMnTi 钢在不同温度、变形量和变形速率下的变形抗力,采用通用全局优化算法,将上述数据导入综合优化软件中,进行非线性回归拟合处理即可得到模型中的回归系数值,如表 1 所示。通过回归后模型计算得到的不同条件下的变形抗力数据和实验数据进行对比(图 1),可以发现该模型所得计算值与实验值比较接近,所以模型可用。

回归后流变应力模型为:

$$\sigma = 4\,337.99 \exp(-0.002\,8\,T) \dot{\epsilon}^{0.080\,6} \epsilon^{0.380\,9} \exp(-0.884\,5\epsilon) \quad (2)$$

1.2 有限元模型及边界条件

实验有限元模拟连轧孔型系统为箱-椭圆-圆孔型系统。首先,在模型工件中建立几何体,轧件初始

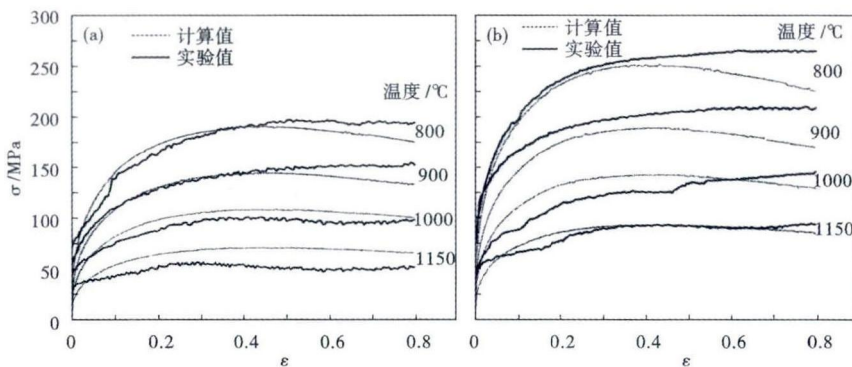


图 1 20CrMnTi 钢流变应力曲线实验值与计算值对比:(a) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon}=3 \text{ s}^{-1}$
 Fig.1 Comparison between experiment data and calculated data of flow stress curves of steel 20CrMnTi: (a) $\dot{\epsilon}=0.1 \text{ s}^{-1}$; (b) $\dot{\epsilon}=3 \text{ s}^{-1}$

表 1 流变应力模型回归系数值

Table 1 Regression coefficient of flow stress model

p_0	p_1	p_2	p_3	p_4
4 337.99	-0.002 8	0.080 6	0.380 9	-0.884 5

断面尺寸为 200 mm × 200 mm, 轧制成品圆钢尺寸为 $\Phi 90 \text{ mm}$, 其钢的化学成分如表 2 所示。从对称性和缩短计算时间方面考虑, 模拟时建立轧件、轧辊的 1/4 模型, 8 架次轧机“平(H)-立(V)”交替布置。模型中的网格均采用 8 节点 6 面体等参单元, 其中轧件共 1 476 个结点, 1 000 个单元; 每个轧辊总单元数为 360。连轧过程中的有限元模型如图 2 所示。在模拟过程中选择 PEP&LARSTRAN 的模型诊断和

表 2 20CrMnTi 钢化学成分/%

Table 2 Chemical composition of steel 20CrMnTi / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Ti
0.17 ~ 0.23	0.17 ~ 0.37	0.80 ~ 1.10	≤ 0.035	≤ 0.035	1.00 ~ 1.30	≤ 0.030	≤ 0.030	0.04 ~ 0.10

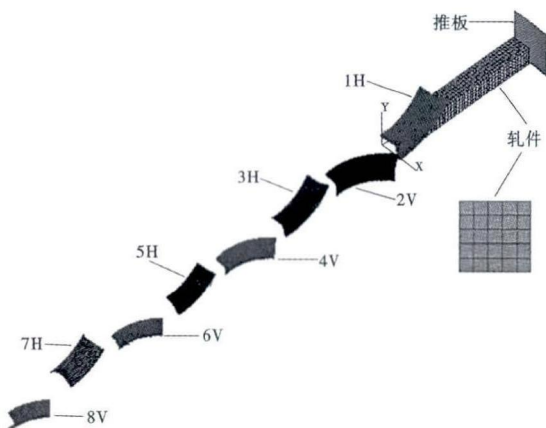


图 2 20CrMnTi 钢 8 道次连轧有限元模型

Fig. 2 Finite element model of 8 passes continuous rolling process of steel 20CrMnTi

网格优化技术^[4-5]。主要边界条件:(1)轧件的热辐射系数取 0.86, 轧件与轧辊的接触换热系数取 $20 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{°C})$; 热功转换系数取 0.9; (2)轧件与轧辊之间以及轧件与刚性推板之间的摩擦系数均取 0.3; (3)轧辊和刚性推板温度 300 °C , 环境温度 25 °C , 开轧温度 1100 °C 。

2 有限元模拟结果分析

2.1 轧制过程中应力应变的变化

截取每道次轧辊出口附近的轧件横截面等效应力、应变变化云图, 如图 3、图 4 所示。轧件每经过一个道次其等效应力值、等效应变值都会发生改变, 且不同节点的数值是不一样的, 它的改变反应了轧件在各个道次的变形受力情况。由图 3 可知, 轧件等效应力先呈现逐道次增加的趋势, 随后在第 5 道次达到一个峰值后又逐渐减小。因为前 5 个道次孔型过渡相对比较平缓, 随着应变量的累积, 应力也随之增大; 从第 6 道次开始由于轧制力减小且轧件温度升高使得等效应力值降低。从图 4 中可以看出, 各道次轧件表面等效应变较大(尤其是圆角部位)而心部等效应变较小, 终轧道次时二者相差达到了 1.85, 说明轧制变形是由轧件表面向心部传递; 而且从水平辊的椭圆孔型到立辊的圆孔型等效应变增幅最大, 说明该道次过渡变形程度最大; 轧件表面所有与轧辊接触的部分累计的等效应变较大; 而轧件心部和侧表面累计的等效应变则较小。综上, 轧件轧制过程中等效应力、应变较大且温度较低的圆角部位易出现轧制缺陷, 如轧制裂纹等。

2.2 轧制过程中的温度变化

从模拟结果来看, 连轧开始后轧件内部和表面的温度差异较大, 这主要是由于轧制时轧件尺寸随着孔型尺寸变化大、轧制速度较快造成的。由于轧制过程中的应变主要发生在距表面 1/2 处, 塑性变形功大部分转化为热量, 使得该区域温度越来越高, 累计的应变越大, 最终温度越高, 所以轧件从第 2 道次开始距表面 1/2 处温度比轧件中心温度高且呈不断上升趋势; 轧件因变形而产生大量热量后会向中心和表面传导, 而中心热量不易在短时间内散发出去, 使得中心温度也缓慢上升; 轧件表面向空气中辐射热量并与温度低的轧辊接触发生热传导, 从而使得

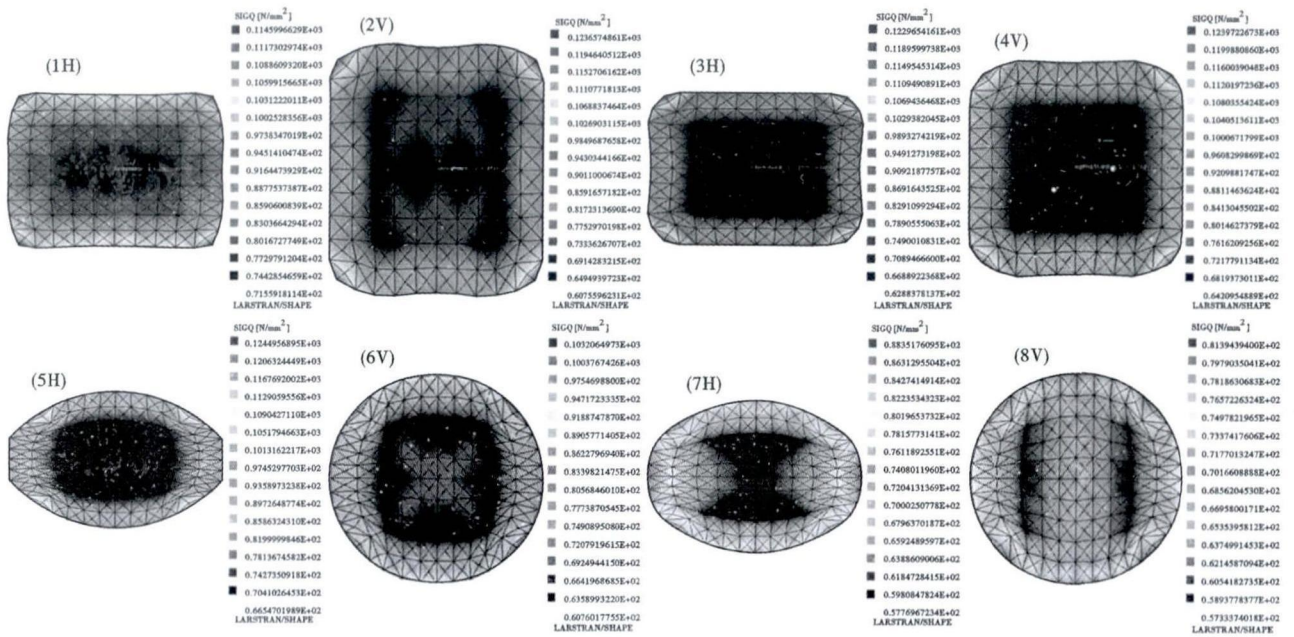


图 3 20CrMnTi 钢 8 道次轧件横截面等效应力分布

Fig. 3 Distribution of equivalent stress on cross section of stock during 8 passes continuous rolling process of steel 20CrMnTi

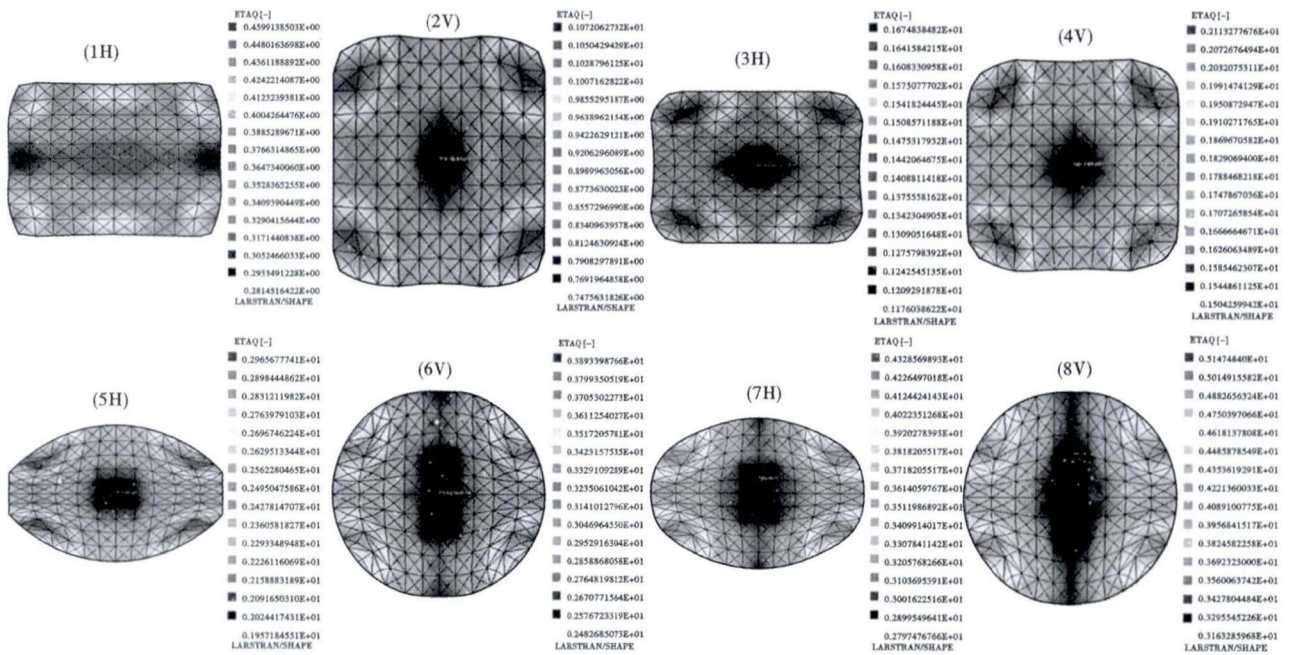


图 4 20CrMnTi 钢 8 道次轧件横截面等效应变分布

Fig. 4 Distribution of equivalent strain on cross section of stock during 8 passes continuous rolling process of steel 20CrMnTi

表面温度快速下降,最低可降至 934 ℃。轧制终了阶段在各种热量交换的综合作用影响下,轧件表面和内部温度又趋于一致。

2.3 连轧过程中的轧制力、力矩变化

轧件被轧机咬入和抛出时为非稳态轧制,此时轧制力、力矩随时间变化剧烈;轧制力和力矩在一定范围内波动时为稳态轧制。从图 5 中可见,前 2 道

次由于变形量较大,轧制力相应也比较大;第 5 道次椭圆孔型中的轧制力和轧制力矩均大于第 4 道次箱型孔的,是由于方轧件变椭圆不均匀变形较大造成;之后随着轧件变形量减少,轧辊孔型尺寸减小,轧制力、轧制力矩也随之减小,最终减小为 0。这种结果也与连轧过程中等效应力的变化趋势相符。

2.4 两种成品圆孔型设计方法的对比

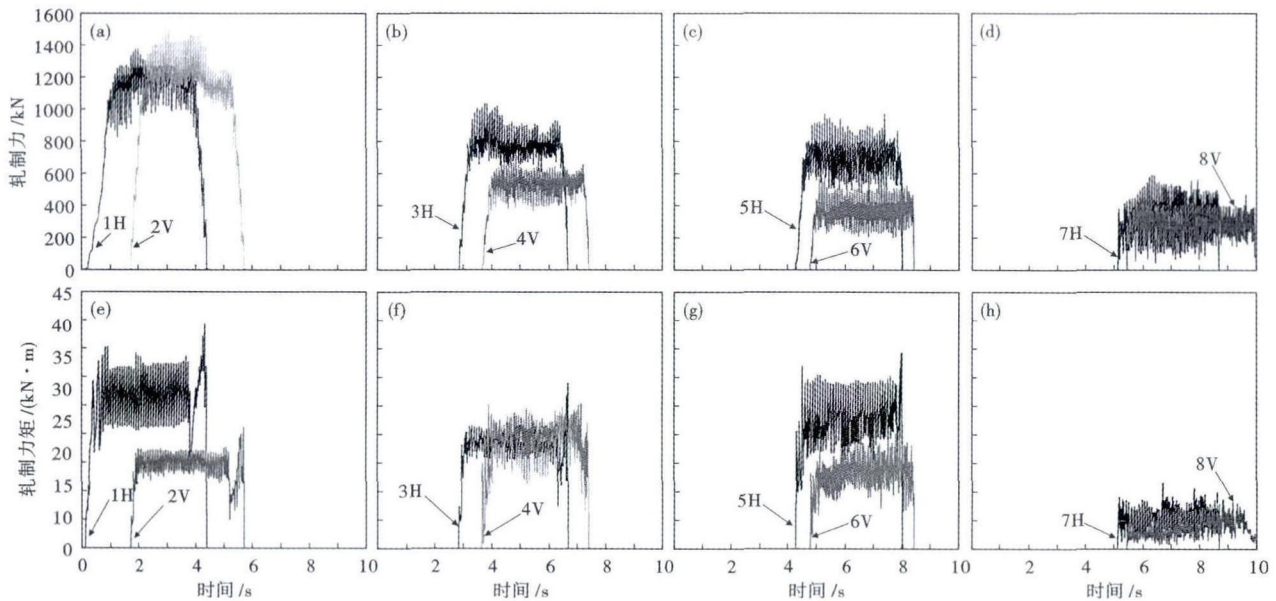


图 5 20CrMnTi 钢 8 道次连轧过程中的轧制力、力矩曲线变化

Fig. 5 Change of curves of rolling force and torque of steel 20CrMnTi during 8 passes continuous rolling process

目前圆钢成品孔型主要有两种:圆弧侧壁的圆孔型和直线侧壁的圆孔型^[5]。模拟时除第 8 道次成品圆孔型不同外,其余孔型及参数设置均相同以对比两种孔型的优劣。在模拟轧制完成后每隔相等的距离测量轧件宽度和高度方向尺寸,共取 9 组数据,并与实际生产中测得的成品圆钢宽度及高度方向尺寸 91 mm × 91 mm 作对比,计算各组尺寸的相对误差(表 3)。可见轧出轧件不论是宽度方向还是高度方向尺寸的相对误差平均值都是圆弧侧壁的要偏小一些,其中直线侧壁的高度方向相对误差平均值为 0.88%,而圆弧侧壁的仅为 0.35%。因此圆弧侧壁的圆孔型轧制得到的成品圆钢尺寸偏差较小。另外,模拟结果中轧件横断面等效应力分布云图上体现出圆弧侧壁孔型轧制时的轧件表面应力分布较直线侧壁的更均匀,所以总体看来圆弧侧壁的圆孔型

表 3 圆弧侧壁和直线侧壁孔型轧制轧件尺寸相对误差/%
Table 3 Relative error of stock size by round pass with curved side wall and straight-line side wall / %

序号	宽度相对误差		高度相对误差	
	圆弧	直线	圆弧	直线
1	0.46	0.53	0.73	0.95
2	0.44	0.37	0.97	0.86
3	0.59	0.53	1.21	1.30
4	0.51	0.44	1.05	1.74
5	0.35	0.24	1.14	1.76
6	0.66	0.70	0.02	1.47
7	0.33	0.90	0.59	0.42
8	0.57	0.18	0.92	0.20
9	0.29	0.59	0.44	0.37
平均误差	0.47	0.50	0.35	0.88

一定程度上优于直线侧壁的圆孔型。

3 结论

(1) 轧件与轧辊接触部位累积等效应变较大,轧制过程中最大等效应力值出现在第 5 道次椭圆孔型中, σ_{max} 为 124.5 MPa,各道次轧件圆角部位温度低,应力、应变大,易产生裂纹等轧制缺陷,生产实际中应特别注意及时调整工艺参数以避免严重质量问题的发生。

(2) 圆钢成品圆弧侧壁孔型因轧件宽度、高度方向尺寸更为符合实测值且轧件表面等效应力分布更为均匀而优于直线侧壁孔型。而圆弧侧壁孔型是否总是优于直线侧壁孔型还有待进一步深入研究。

参考文献

[1] 肖洪文,罗立波,毛高禄. 20CrMnTi 生产工艺实践[J]. 江西冶金, 2006, 26(3): 8-10.
 [2] 曹志刚,杜忠泽,许伟阳,等. 20CrMnTi 齿轮钢生产工艺改进[J]. 钢铁钒钛, 2011, 32(4): 92-96.
 [3] 胡成亮,张莹,赵震,等. 20CrMnTiH 齿轮钢高温塑性变形特性[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(10): 1627-1631.
 [4] 洪慧平,康永林. 开轧温度对 42CrMo4 钢轧制动态组织变化影响的有限元模拟[J]. 特殊钢, 2011, 32(2): 15-17.
 [5] 胡彬. 型钢孔型设计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2010: 37-38.

肖 玉(1988-),女,硕士研究生(北京科技大学),2011 年长安大学(本科)毕业,特殊钢轧制有限元模拟研究。

E-mail: ustbyuxiaocl@163.com

收稿日期:2013-10-21