

低碳结构钢中厚板 MAS 轧制过程有限元模拟

张春林 程晓茹 董述峰 张焕军
(武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081)

摘要 根据低碳结构钢 Q235 ($C \leq 0.20\%$) 4300 mm 中厚板现场轧制工艺, 采用有限元软件 ABAQUS/Explicit 建立弹塑性有限元模型对展宽比 1.70、精轧伸长率 7.87 的中厚板普通轧制过程和 MAS (水岛平面形状控制轧制法) 轧制过程分别进行了模拟计算, 对不同变形阶段进行了对比分析。结果表明, MAS 轧制法能明显改善中厚板轧后平面形状, 其形状的改变量与 MAS 轧制段设置参数直接相关, 对比不同参数下 MAS 轧制结果得出 MAS 轧制最优参数 $\Delta L \times \Delta h$ 为 300×3 。

关键词 ABAQUS/Explicit 中厚板 MAS 轧制 模拟计算 平面形状

Finite Element Simulation for Medium-Heavy Plate of Low Carbon Steel Rolling with MAS Method

Zhang Chunlin, Cheng Xiaoru, Dong Shufeng and Zhang Huanjun
(College of Material Science and Metallurgical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

Abstract Based on works rolling process of 4300 mm medium-heavy plate of low carbon steel Q235 ($C \leq 0.20\%$) the elastic-plastic finite element model is established by using the finite element software ABAQUS/Explicit to simulate and calculate the general rolling process and MAS (Mizushima automatic plan view pattern control system) rolling process for medium-heavy plate with spread ratio 1.70 and finishing rolling elongation 7.87, and the comparative analysis on different deformation stages is carried out. Results show that the plane shape of rolled medium-heavy plate is obviously improved by using MAS rolling method, its changed value in shape is directly related to the setting parameters at MAS rolling stage, and the MAS rolling optimum parameter i. e. $\Delta L \times \Delta h = 300 \times 3$ is obtained by comparing the rolling results using different MAS parameters.

Material Index ABAQUS/Explicit, Medium-Heavy Plate, MAS Rolling, Simulating Calculation, Plane Shape

中厚板是国民经济发展所必须的一种重要钢铁材料, 主要用于建筑工程、机械结构、汽车行业、桥梁、油气输送管线等方面。但我国中厚板成材率普遍偏低, 在中厚板成材率损失中切头尾和切边损失分别约占总损失的 23% 和 26%, 因此有效控制轧制过程中钢板的平面形状可减少切损提高钢板成材率。在此研究领域日本川崎制铁所水岛厚板厂最早开发了水岛平面形状控制轧制法 (Mizushima automatic plan view pattern control system), 简称 MAS 轧制法。此法应用于有计算机控制的四辊厚板轧机上, 可使中厚板的收得率提高 4.4%。1978 年 1 月在川崎水岛厂 2 号厚板轧机上采用成形 MAS 轧制法创造了收得率 94.2% 的高记录^[1]。本文采用有限元软件 ABAQUS/Explicit 对 MAS 轧制过程进行了模拟计算, 并对轧制过程中各阶段影响钢板平面形状的因素进行了分析。

1 有限元模型

1.1 参数计算

参照钢厂 4300 mm 中厚板实际轧制工艺, 借助有限元软件 ABAQUS/Explicit 对展宽比为 1.70、精轧伸长率为 7.87 的普通轧制过程和 MAS 轧制过程分别进行模拟计算, 所用坯料钢种为碳素结构钢 Q235 ($C \leq 0.20\%$), 其各道次变形抗力可由公式 (1) 计算:

$$\sigma_s = \sigma_0 \exp(b_1 T + b_2) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10} \right)^{b_3 T + b_4} \cdot \left[b_6 \left(\frac{\beta}{0.4} \right)^{b_5} - (b_6 - 1) \frac{\beta}{0.4} \right] T = (t_0 + 273) / 1000^{[2]} \quad (1)$$

式中: σ_s - 变形抗力/MPa; σ_0 - 基准变形抗力/MPa; $\dot{\epsilon}$ - 变形速度; β - 变形程度; t_0 - 变形温度/°C; b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 、 b_5 、 b_6 、- 分别为回归系数, 其值如表 1 所示。

表 1 Q235 钢变形抗力回归系数

Table 1 Regression coefficient of deformation resistance of steel Q235

σ_0	b_1	b_2	b_3	b_4	b_5	b_6
150.6	-2.878	3.665	0.186 1	-0.121 6	0.379 5	1.402

参数的选用过程中一定要保证其单位的统一,否则运行过程中会提示错误。应力应变分别采用真实应力和真实应变,如果所知数据分别是工程应力和工程应变则可以通过公式(2)进行转化:

$$\sigma = \sigma_{\text{nom}} (1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad \varepsilon = \ln(1 + \varepsilon_{\text{nom}}) \quad (2)$$

式中: σ - 真实应力; ε - 真实应变; σ_{nom} - 工程应力; ε_{nom} - 工程应变^[3]。

有限元模型的其他参数如表 2 所示。

表 2 轧辊与坯料模拟参数

Table 2 Simulation parameters for roller and slab

项 目	参 数	
轧 辊	辊径/mm	1 050
	辊身长/mm	4 600
	角速度/($\text{r} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.8 ~ 10.8
	材料属性	刚性
坯 料	规格($H \times B \times L$)/mm	200 × 2 200 × 3 320
	密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	7.85
	MAS 轧制参数	300 × 2, 300 × 3, 500 × 2, 500 × 3, 500 × 4
	摩擦系数	0.25
	摩擦及塑性生热系数	0.9
	接触热传导系数/[$\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{°C})^{-1}$]	30.4
	对流换热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{°C}^{-1}$)	65
	辐射系数	0.8
	环境温度/°C	30
	轧辊温度/°C	200
	波尔兹曼系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)	5.67×10^{-8}

由于 ABAQUS/Explicit 是显示求解器在分析过程中是有条件稳定的,增量步必须小于某个极限值以保证加速度在每个增量步中尽量接近常数,这样才能对速度和位移进行积分,此极限值称为稳定极限值,上述所有参数的设定完成之后可以通过公式(3)求得该稳定极限值(Δt_{stable})。

$$\Delta t_{\text{stable}} = \frac{L^c}{C_d} \quad C_d = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (3)$$

式中: L^c - 单元长度,对于极度扭曲单元取最短单元尺寸; C_d - 材料的波速; E - 弹性模量; ρ - 密度^[4]。

1.2 网格划分及模型边界条件

为节约运算资源加快运算速度,模拟过程中几何模型的建立可利用轧辊及轧件的几何对称性取轧件厚度的1/2建立1/2几何模型,并在相应的对称面

上施加 y 方向的零位移约束。在初始分析步中,在轧件的对称面上施加对称边界条件同时对轧件施加以初始温度场,并对轧件施加一稳定速度场以实现轧制过程的顺利咬入。模拟过程中轧件与轧辊之间的接触存在摩擦,接触性质选用 Friction, Penalty 来定义,然后填入与温度相对应的摩擦系数。由于轧件平面形状的不良,主要是因为轧件头尾部无外端作用,从而三维变形显著,宽展增加而引起的,因此,为了研究头尾自由端变形对平面形状的影响和简化计算,不考虑轧辊的弹性变形对平面形状的影响,设轧辊为具有单一温度自由度的解析刚体。在模拟过程中对轧辊不划分网格,在其质心设定参考点,定义刚体约束条件,使之具有绕其轴线的转动自由度以一定的初始速度绕其轴线转动。坯料采用六面体八节点实体热力耦合六面体缩减积分单元类型 C3D8RT 进行网格划分,考虑到轧制过程中轧件头尾及边部变形对平面形状影响较大,网格划分时采用切分法进行,轧件头尾及边部网格细化,模拟过程中的有限元模型如图 1 所示。

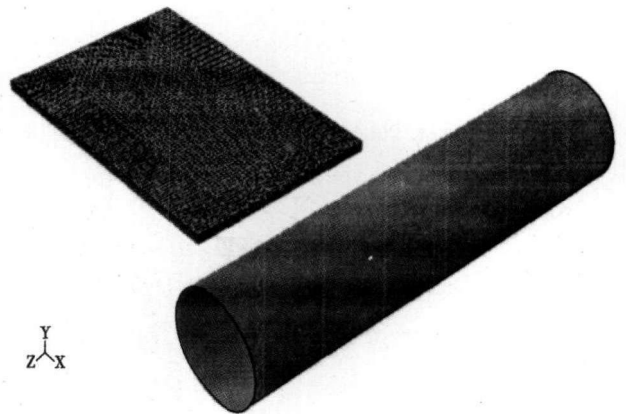


图 1 MAS 轧制有限元模型

Fig. 1 Finite element model for rolling plate by using MAS method

2 MAS 轧制模拟过程的实现

模拟开始轧辊以恒定的角速度绕 z 轴转动,在轧件上施加一均匀的速度场使其能够顺利咬入,之后轧件以与轧辊相应的线速度进行轧制直到轧制结束。结合钢厂中厚板现场生产过程中实际压下规程,成形轧制压下率小而宽展轧制压下率大,实用坯料展宽比为 1.70、精轧伸长率为 7.87 时成品钢板的头尾呈凸形、边部呈凹形,为修正成品钢板的平面形状提高成材率,成形轧制的最后一道次应用负楔形 MAS 轧制,用以弥补轧制过程中的边部变形,负楔形 MAS 轧制过程中辊缝变化如图 2 所示^[1]。

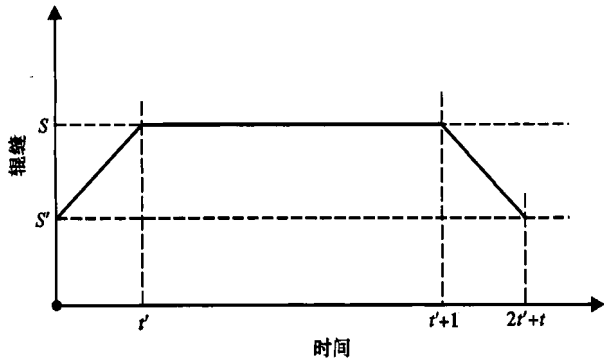


图 2 负楔形 MAS 轧制过程中辊缝变化
Fig. 2 Gap change in negative wedge rolling process with MAS

为了保证轧件头尾楔形的对称,以一个稳定的轧辊转速进行轧制,不进行轧制过程的升速、稳定和减速的速度控制。图 2 时间坐标轴上原点处为轧制的起始时刻,此时 S' 为楔形顶点的设定值,在时间段 t' 内轧辊中心匀速上升 $\Delta h/2$,辊缝上升到 S ,轧件向前运动距离为 ΔL ;在之后的 $\Delta t_1 = (t' + t) - t'$ 时间段内轧辊辊缝保持 S 不变,轧件向前运动的距离为 $(L - 2\Delta L)$;随后的 Δt_2 时间段内轧辊中心匀速下移 $\Delta h/2$ 回到楔形顶点的原始设定值 S' ,MAS 轧制过程结束。

MAS 轧制过程结束后,转钢 90° 进行展宽轧制阶段,之后再转钢 90° 进行精轧直至轧制成品尺寸。

3 各变形阶段钢板形状变化

中厚板的轧制过程主要有成形轧制、展宽轧制及精轧 3 个阶段,各轧制阶段中轧件横向及纵向的不均匀塑性变形在头尾部和边部最为明显,这就造成了钢板最终轧后平面形状不是矩形,造成了钢板头尾部及侧边切损量增大,降低了钢板的成材率^[5]。

以不同 MAS 轧制参数 $\Delta L \times \Delta h$ (其中 ΔL 为楔形段长度, $\Delta h/2$ 为楔形段高度) 的轧制过程为例,对普通轧制过程和不同参数下 MAS 轧制过程进行了模拟计算和对比分析,各轧制阶段钢板的头尾及边部形状如图 3 所示。由于在成形轧制最后一道次实施负楔形 MAS 轧制,从图 2 可知,成形轧制后的板坯中间厚两端薄,并呈楔形分布。由图 3(a) 可知,与普通轧制相比,采用负楔形 MAS 轧制后板坯的头部的凸形加剧,并且头部凸形量增加值与 MAS 轧制参数 Δh 、 ΔL 的乘积成正比关系,但其头部形状基本不变。由图 3(b) 可知,经负楔形 MAS 成形轧制后板

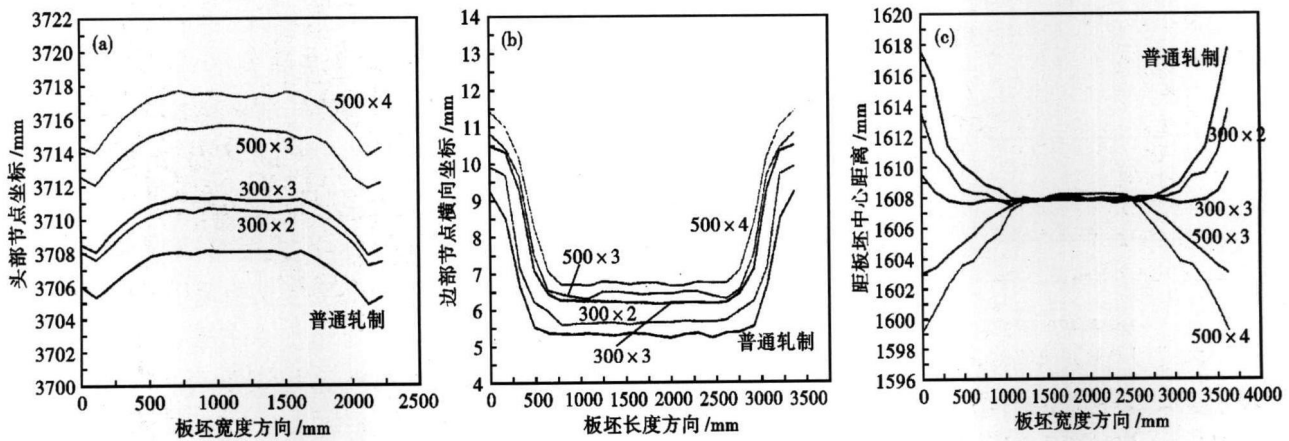


图 3 板坯成形轧制后头部(a)、边部(b)和展宽轧制后头部(c)形状
Fig. 3 Shape of head (a) and edge (b) of forming rolled slab; and shape of head of broadening rolled slab (c)

坯的头尾外凸长度比普通轧制要大,此外凸长度值受 MAS 轧制参数 Δh 影响较大。

板坯成形轧制后转 90° 进行展宽轧制,由于在成形最后一道次采用负楔形 MAS 控制,成形轧制结束时板坯成中间厚两端薄的形状,这就使得在接下来的展宽轧制过程中板坯中间的延伸量大于边部延伸量,从而弥补了此阶段头部(上阶段边部)的初始凹形,展宽轧制后的板坯头部形状如图 3(c) 所示,采用负楔形 MAS 轧制后板坯头部形状与 MAS 轧制

参数 Δh 、 ΔL 有关, ΔL 相同时 Δh 大的板坯展宽后头部凸形的改变程度较大, Δh 相同时 ΔL 大的板坯展宽轧制后头部凸形影响长度增加。采用 MAS 轧制参数 300×2 板坯中部延伸增加部分弥补了成形轧制后边部凹形使展宽后头尾部趋于平直,但补偿量仍显不足,当采用 MAS 轧制参数 300×3 时头部略显凹形已趋于平齐,当采用 MAS 轧制参数 500×3 时延伸过量使板坯头部呈现凸形,采用 MAS 轧制参数 500×4 时这种现象更加明显凸形加剧。

板坯展宽轧制再转 90° 进行精轧, 精轧阶段由于轧件已经较薄, 变形近似于平面变形, 轧件四边形状不变, 随着轧件轧薄, 头尾异形量增加, 边部(上阶段头尾部)异形量近似不变。

4 模拟结果分析

中厚板在轧制过程中由于轧件头尾部无外端作用, 三维变形显著, 宽展增加, 从而导致轧件的头尾及边部的不平齐。在成形轧制后头尾呈凸形, 边部呈凹形, 如图 4(a) 所示。为改善精轧后钢板平面形状, 在成形轧制最后一道次根据具体情况采用不同的 MAS 轧制方法, 本文采用负楔形 MAS 轧制控制。成形轧制结束后板坯成中间厚头尾两端薄的形状, 从而使得在随后的展宽轧制过程中中间延伸大于边部, 以此来改善头尾的不平齐, 此改善量的大小与 MAS 轧制参数有关, 采用不同 MAS 轧制参数可将展宽轧制后的头尾形状改变为凸形或凹形两种情况, 如图 4(b) 所示。本文在成形最后一道次采用了负楔形 MAS 轧制控制侧重改善精轧后钢板边部形状, 如要改善精轧后头尾形状可在展宽最后一道次采用相应的 MAS 轧制控制, 从而使精轧后钢板平面形状更接近矩形。

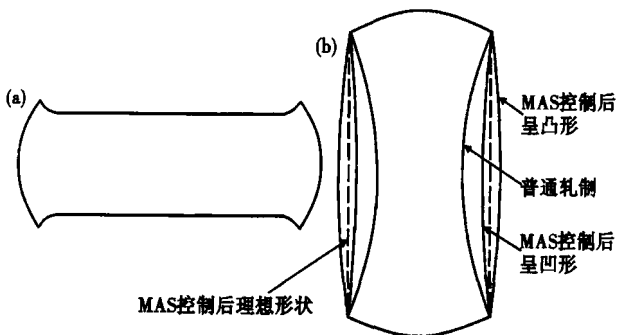


图 4 成形轧制后板坯形状(a); 普通宽展轧制和不同 MAS 参数宽展轧制后板坯形状对比(b)

Fig. 4 Shape of forming rolled plate (a); comparison between shapes of plate after general broadening rolling process and broadening rolling process with different MAS parameters (b)

为改善这种由头尾自由端三维变形引起的头尾和边部的不平齐, 本文采用不同 MAS 轧制参数对中厚板的轧制过程进行了模拟控制, 精轧后的钢板边部形状如图 5 所示, 对比普通轧制过程采用负楔形 MAS 轧制可以显著改变成品钢板的边部形状, 其最大宽度变化量比普通轧制减少了 6~8 mm, 宽度变化长度则减少了大约 2 000 mm。从图 5 中可以看出, 成品钢板边部形状的改变量与 MAS 轧制参数有关, 当采用轧制参数 300×2 时, 钢板边部形状与普

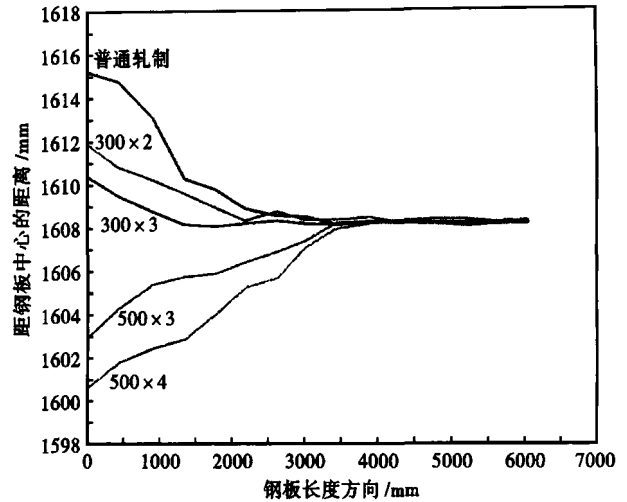


图 5 精轧后钢板边部形状

Fig. 5 Shape of edge of finishing rolled plate

通轧制相比有所改善, 但成品钢板边部补偿量明显不足; 当采用轧制参数 500×3 时, 钢板边部局部宽度减少出现了“过补偿”现象; 当采用轧制参数 500×4 时, 这种“过补偿”现象更加明显。当采用轧制参数 300×3 时轧后钢板边部较为平直, 平面形状比其它轧制参数控制时效果更好。

5 结论

(1) MAS 轧制可以显著改善成品钢板边部形状, 钢板边部形状改变量的大小与 MAS 轧制参数 ($\Delta h \times \Delta L$) 的设置有关, 轧制长度 ΔL 一定时, 钢板宽度改变量主要由压下量 Δh 控制, 而轧制长度 ΔL 的大小决定了 MAS 轧制后成品钢板边部改善长度。

(2) 成型最后一道次采用 MAS 轧制可以改善成品钢板边部形状, 如要使其头尾形状也得到较大改善, 可在展宽最后一道次再实施一次 MAS 轧制, 这样可得到更接近矩形的成品钢板。

(3) 较为合理的 MAS 轧制参数 ($\Delta h \times \Delta L$) 为 300×3。

参考文献

- 1 王国栋. 中国中厚板轧制技术与装备. 北京: 冶金工业出版社, 2009
- 2 周纪华, 管克智. 金属塑性变形阻力. 北京: 机械工业出版社, 1989
- 3 石亦平, 周玉蓉. ABAQUS 有限元分析实例详解. 北京: 机械工业出版社, 2006
- 4 曹金凤, 石亦平. ABAQUS 有限元分析常见问题解答. 北京: 机械工业出版社, 2009
- 5 孙本荣, 王有铭, 陈 瑛. 中厚钢板生产. 北京: 冶金工业出版社, 1993

张春林(1983-), 男, 硕士研究生, 轧制过程计算机控制研究。

收稿日期: 2010-07-09