

· 试验研究 ·

200 mm × 200 mm 连铸坯连轧 Φ100 mm 42CrMo 钢三维有限元模拟

魏 军^{1,2} 洪慧平¹ 赵爱民¹ 康永林¹

(1 北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083; 2 承德建龙特殊钢有限公司, 承德 067201)

摘 要 采用 MSC. Marc 有限元模拟软件, 针对 200 mm × 200 mm 连铸方坯连轧 Φ100 mm 42CrMo 圆钢工艺过程进行三维热力耦合模拟仿真。因圆角在孔型中塑性应变较大且变形由表及里逐渐深入, 因此对断面采用网格偏差划分方法以细分表层及圆角区域单元。根据连轧过程应力场、应变场和温度分布及轧制力和轧制力矩变化特点, 得出合金钢轧制时圆角易出现裂纹的重要原因是该区域总等效塑性应变、等效应力和温降较大。机架间及轧后断面尺寸实测值与模拟值相符合。

关键词 42CrMo 钢 棒材 连轧 有限元模拟

3-Dimensional Finite Element Simulation on Continuous Rolling Φ100 mm Steel 42CrMo by 200 mm × 200 mm Cast Bloom

Wei Jun^{1,2}, Hong Huiping¹, Zhao Aimin¹ and Kang Yonglin¹

(1 School of Material Science and Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083;
2 Chengde Jianlong Special Steel Co, Ltd, Chengde 067201)

Abstract 3-dimensional thermodynamic coupling simulation for continuous rolling process of Φ100 mm round steel 42CrMo by 200 mm × 200 mm cast bloom has been carried out by using MSC. Marc finite element simulation software. As the plastic stain at round corner of stock in pass is larger and the deformation is gradually from surface to inner, the method of grid deviation division for cross section is adopted to fine the element of surface and round corner area. Based on the characteristics of stress field, strain field and temperature distribution as well as change of rolling force and torque during continuous rolling process, it is obtained that during alloy steel rolling, the larger total equivalent strain, equivalent stress and temperature drop are key reason of occurred crack at round corner of stock. The simulated values of cross section size of stock between stands and after rolling correspond to the measured values.

Material Index Steel 42CrMo, Round Product, Continuous Rolling, Finite Element Simulation

当前国内众多合金钢棒材连轧机组的产品设计大纲针对 200 mm × 200 mm 连铸方坯大多是连轧 Φ80 mm 以下规格棒材^[1,2]。若开发更大规格圆钢, 必须建立合理可行的棒材连轧工艺控制方案。本文应用有限元模拟技术以及网格偏差划分方法研究用 200 mm × 200 mm 连铸方坯生产 Φ100 mm 42CrMo 合金钢棒材的工艺设计方法, 并进行了工业应用。

1 有限元模型及边界条件建立

1.1 初始条件

42CrMo 钢连铸方坯断面尺寸为 200 mm × 200 mm, 圆角半径 8 mm, 长度 9 000 mm。用棒材连轧机组前面 6 架“平(H)-立(V)”布置的粗轧机连轧 Φ100 mm 圆钢。将孔型系统设计为: “箱形孔(H1)、箱形孔(V2)、箱形孔(H3)、方箱孔(V4)、椭圆孔(H5)、圆孔(V6)”。前面 2 个道次轧辊直径均为 Φ700 mm, 后面 4 个道次轧辊直径均为 Φ610 mm,

末道次轧制速度为 800 mm/s。开轧温度根据实测取为 1 100 ℃。

1.2 边界条件及有限元模型

采用更新 Lagrange 法的热力耦合弹塑性有限元法以及 von Mises 屈服准则和 Prandtl-Reuss 流动法则。为更好地满足连续轧制的工艺要求, 机架间距取相邻机架轧辊直径和的一半。轧件长度取为 2 400 mm。因为连铸坯圆角最先与孔型侧壁接触其塑性应变较大, 因此对轧件断面采用网格偏差划分并细分表层及圆角区域单元。长度方向取 160 等份, 每个横断面取 50 个单元。采用八节点六面体等参单元, 共取 8 000 个单元和 10 626 个节点。采用剪切摩擦模型, 摩擦因子 $m = 0.7$ 。泊松比 0.3, 密度 $7.85 \times 10^{-3} \text{ g/mm}^3$ 。流变曲线取自 Marc 材料库。

轧件与周围环境的对流和辐射换热边界条件可统一写为:

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

式中： t - 轧件表面温度； t_{∞} - 环境温度； α - 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， α 取为 $0.17 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。轧辊与轧件之间的接触传热边界条件可表示为：

$$q = h_c(t - t_d)$$

式中： h_c - 接触热传导系数； t_d - 接触体表面温度，取 $h_c = 4.4 \text{ kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{C})$ 。变形功的热转换系数取 0.9 。轧辊和轧件产生的摩擦热，平均分至轧件和轧辊接触体上处理^[3]。

2 模拟仿真结果及分析

2.1 连轧过程应力、应变和温度分布

图 1(a) 为连轧 $\Phi 100 \text{ mm}$ 42CrMo 钢横断面上节点 A、B、C 的总等效塑性应变分布。其中节点 A 在垂直于 H1 轧辊轴线的方向，定义为 Y 方向；节点

C 在平行于 H1 轧辊轴线的水平方向，定义为 X 方向；节点 B 位于圆角处。从图 1(a) 中可见，在圆角附近有较大的总等效塑性应变（连轧后节点 B 的总等效塑性应变为 3.326），其主要原因是连铸方坯进入第 1 架箱形孔型时，圆角部分最先接触孔型侧壁并发生较大塑性应变，另外在成品前孔（H5）发生“方进圆”时圆角区域的塑性应变也较大。

图 1(b) 为轧件断面上不同位置节点 A、B、C 的温度随增量步的变化曲线。由于圆角区域与轧辊接触传热及空冷降温显著（节点 B 的温度在第 2 道次降至 899 C ）。在各道次出口，节点 B（圆角区域）的温度也最低。圆角位置（节点 B）温度最低，即塑性变差，但是其所受的不均匀塑性应变最大，而且在连轧过程中圆角处节点 B 的 Mises 等效应力也较大（最高达 190.3 MPa ，如图 2）。

上述应力、应变和温度变化特点是合金钢轧制裂纹缺陷在圆角区域容易出现的重要原因，尤其是

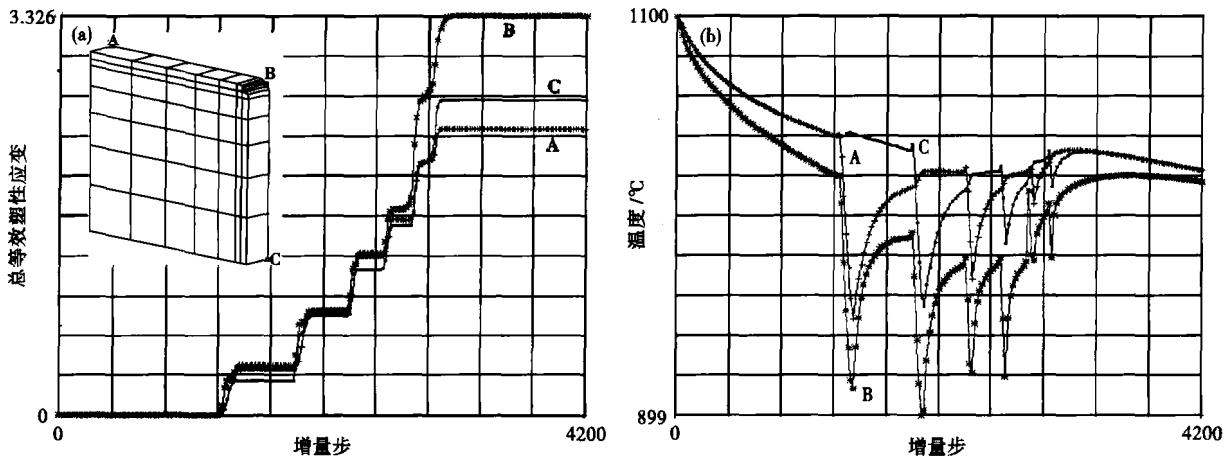


图 1 连轧 $\Phi 100 \text{ mm}$ 42CrMo 钢横断面上节点 A、B、C 的总等效塑性应变 (a) 及温度变化 (b)

Fig. 1 Total equivalent plastic strain (a) and temperature change (b) at node A, B and C of cross section of $\Phi 100 \text{ mm}$ round steel 42CrMo during continuous rolling

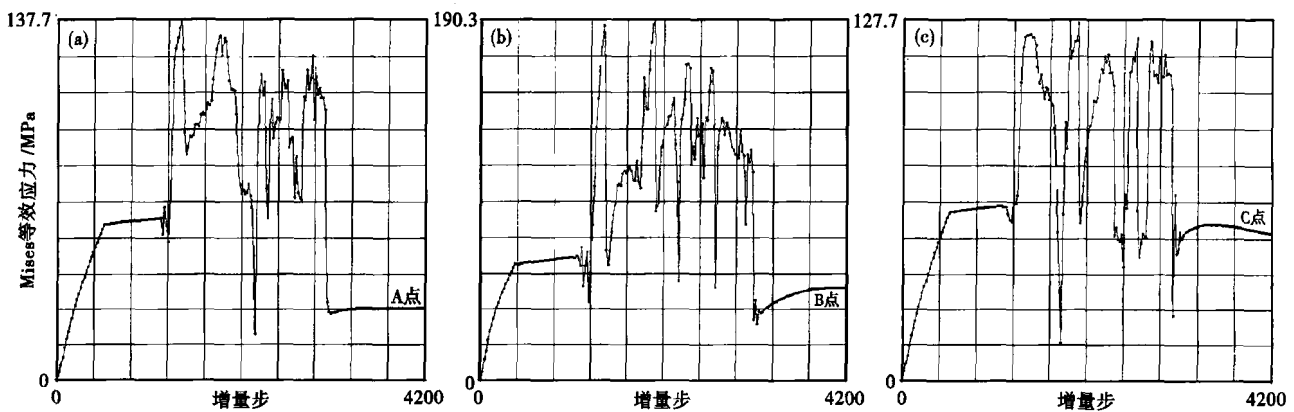


图 2 连轧 $\Phi 100 \text{ mm}$ 42CrMo 钢横断面上节点 A(a)、B(b)、C(c) 的 Mises 等效应力变化

Fig. 2 Change of Mises equivalent stress at node A(a), B(b) and C(c) of cross section of $\Phi 100 \text{ mm}$ round steel 42CrMo during continuous rolling

对裂纹较敏感的合金钢。

2.2 连轧过程轧制力学参数变化

图3为Φ100 mm 42CrMo 圆钢连轧过程轧制力和轧制力矩随增量步的变化曲线(1/4断面情况),从图3可见,除第5道次(H5)外,稳定连轧阶段轧制力和轧制力矩均沿轧制方向依次减小,这反映了总体上道次延伸系数沿轧制方向逐渐减小的规律。但是在H5道次的稳定连轧阶段轧制力和轧制力矩出现显著升高,这是因为在成品前孔(H5)“方进圆”产生的不均匀塑性应变变形较大。另外可以观察到在H1和V2之间存在轻微堆钢,而后续道次之间存在轻微拉钢,这种张力情况适用于Φ100 mm 42CrMo 圆钢的连轧工艺要求。

图4为Φ100 mm 42CrMo 圆钢连轧各道次出口断面尺寸(高度和宽度)模拟值与生产实测值的比较。考虑到在高温状态实际轧件表层氧化铁皮等因素影响,可见模拟值与实测值是吻合的。在连轧后(即V6机架后)X方向(水平方向)圆钢直径模拟值为Φ100.4 mm,实测值Φ101 mm;Y方向(垂直方向)圆钢直径模拟值为Φ100.9 mm,实测值Φ101 mm。另外对实际轧出的Φ100 mm 42CrMo 圆钢进行低倍组织及表面检验,结果均满足质量要求。

3 结论

(1)用200 mm × 200 mm 连铸方坯,6道次连轧方法(H1箱孔、V2箱孔、H3箱孔、V4方孔、H5椭圆孔、V6圆孔)能够生产出质量合格的Φ100 mm 42CrMo 圆钢。

(2)在200 mm × 200 mm 连铸方坯连轧Φ100 mm 42CrMo 圆钢三维有限元模拟中,采用网格偏差划分并细分表层及圆角区域单元的建模方法是合理可靠的,轧件尺寸模拟结果与实际相吻合。

(3)从变形历程看,圆角区域的总等效塑性应变和等效应力及温降较大,这是轧制裂纹在圆角区域易于出现的重要原因。

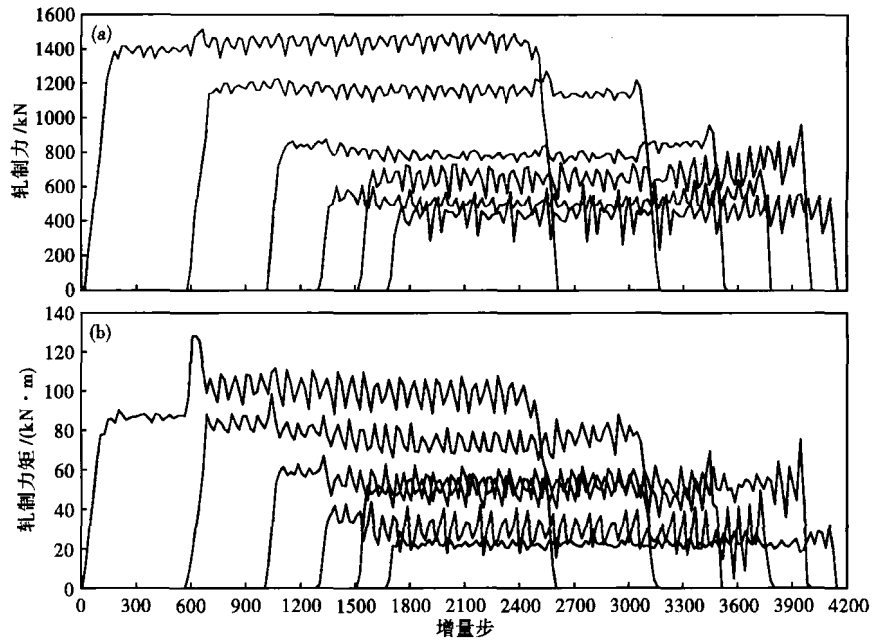


图3 6道次连轧Φ100 mm 42CrMo 圆钢轧制力(a)和力矩(b)变化曲线(1/4断面)
Fig.3 Curves of simulated rolling force (a) and rolling torque (b) for Φ100 mm round steel 42CrMo during 6 passes continuous rolling, 1/4 cross section of stock

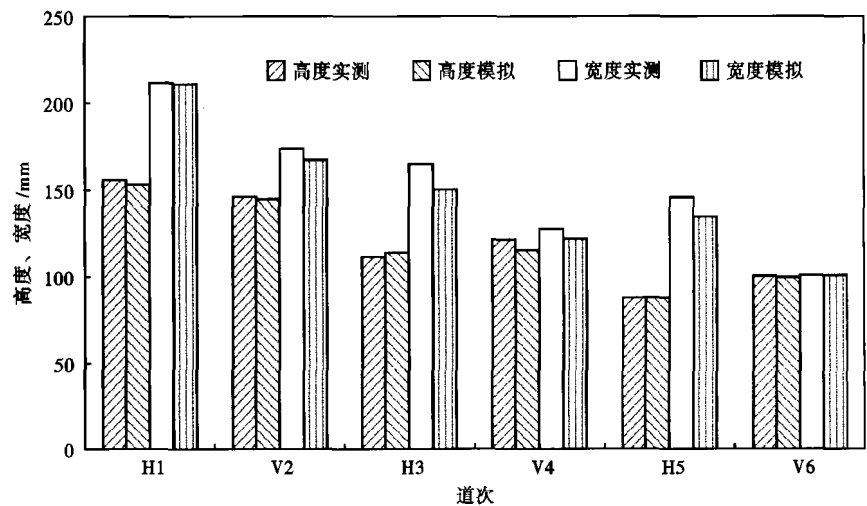


图4 Φ100 mm 42CrMo 圆钢6道次连轧各道次出口尺寸的模拟值和实测值比较
Fig.4 Comparison between simulated values and measured values of size of stock at outlet of each pass during 6 passes continuous rolling of Φ100 mm round steel 42CrMo

参考文献

- 1 崔 艳. 国内棒材生产线生产工艺及设备综述. 重型机械科技, 2004(1):45
- 2 《小型型钢连轧生产工艺及设备》编写组. 小型型钢连轧生产工艺及设备. 北京:冶金工业出版社,1999
- 3 洪慧平,康永林. 椭圆孔型轧制合金钢方坯三维弹塑性有限元模拟. 北京科技大学学报,2003,25(2):171

魏 军(1969-),男,博士后,特种钢质量研究。

收稿日期:2009-07-09