

开轧温度对 42CrMo4 钢轧制动态组织变化影响的有限元模拟

洪慧平 康永林

(北京科技大学材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要 应用 LARSTRAN/SHAPE 有限元模拟软件对 42CrMo4 合金钢箱形孔型轧制过程进行三维热力耦合有限元模拟。用粘塑性有限元理论模拟轧制过程各时间离散步的局部量包括等效应力、等效应变、等效应变速率、温度分布等,由此计算动态再结晶和晶粒大小的变化。通过模拟研究得出开轧温度 $\geq 1050\text{ }^\circ\text{C}$ 时,42CrMo4 钢动态再结晶显著增加,生产 42CrMo4 钢棒材的合适开轧温度为 $1050\sim 1100\text{ }^\circ\text{C}$ 。

关键词 42CrMo4 钢 热轧 动态再结晶 有限元模拟

Finite Element Simulation for Effect of Initial Rolling Temperature on Change of Rolling Dynamic Structure of Steel 42CrMo4

Hong Huiping and Kang Yonglin

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

Abstract The three dimensional thermal mechanically coupled simulation on alloy steel 42CrMo4 rolling in box pass has been carried out by using LARSTRAN/SHAPE finite element software. The local variables including equivalent stress, equivalent strain, equivalent strain rate and temperature distribution etc during rolling are simulated incrementally by viscoplastic finite element method to calculate the dynamic recrystallization and grain size after each discrete time step. It is obtained by simulation that with initial rolling temperature $\geq 1050\text{ }^\circ\text{C}$, the percentage of dynamic recrystallization for hot rolled steel 42CrMo4 increases. In steel 42CrMo4 production the available initial rolling temperature is $1050\sim 1100\text{ }^\circ\text{C}$.

Material Index Steel 42CrMo4, Hot Rolling, Dynamic Recrystallization, Finite Element Simulation

由于轧制过程发生的动态组织变化对于轧件的质量及性能有重要影响,并且准确模拟预测轧制动态组织变化是有效控制轧材质量和性能的前提条件,因此国内外研究者在轧制组织模拟方面进行了许多研究^[1-4]。本文应用 LARSTRAN/SHAPE 软件的粘塑性有限元模拟技术,采用 Hensel-Spittel 流变应力模型,首先计算 42CrMo4 合金钢在箱形孔轧制各个时间离散步内的局部量(等效应力、等效应变、等效应变速率和温度分布等),用考虑变形历史影响的动态组织计算程序 STRUCSIM 计算各个时间离散步内的动态组织变化及有效应变。根据不同开轧温度条件下的组织变化模拟结果,定量地得出开轧温度对动态组织(动态再结晶、晶粒大小等)变化的影响关系,为合理制定 42CrMo4 合金钢棒材的开轧温度提供理论依据。

1 热轧过程动态组织的模拟方法

图 1 所示^[4-6],材料始于一均匀软化组织 S_1 ,该组织 S_1 在变形过程(A)中,在达到时间点(B)的临界等效应变 $\varepsilon_k(1)$ 前发生均匀的加工硬化。一旦超过 $\varepsilon_k(1)$,则组织的一部分 S_2 将发生动态再结晶,并将被作为独立部分观察。该部分组织在进一步的变

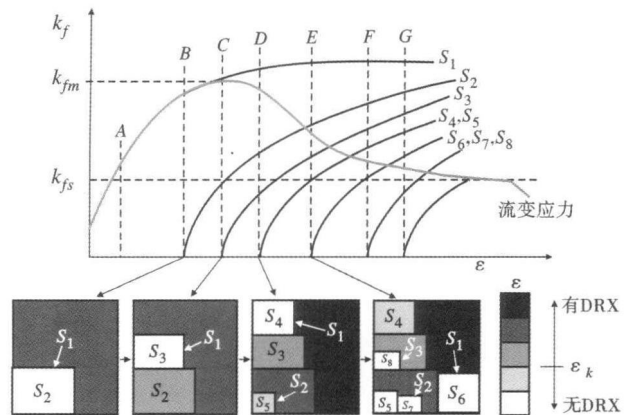


图 1 热轧过程动态再结晶模拟原理

Fig. 1 Principle of simulation for dynamic recrystallization of steel during hot rolling

形过程中也会从 k_{f0} 出发按硬化定律发生加工硬化,然而考虑到新的再结晶晶粒大小。组织 S_1 的其余部分也继续发生加工硬化,然而由于新出现的再结晶的组织部分 S_2 到 S_6 而持续减少。从时间点(D)起,先前从时间点 B 开始新出现的组织部分 S_2 的一部分也能在超过其临界等效应变 $\varepsilon_k(2)$ 时发生动态再结晶,以至于从这一时间点开始,既有从 S_1 出现的新组织部分 S_4 ,也有从 S_2 出现的新组织部分 S_5 。

由于再结晶区域的晶粒大小一般小于原始组织的晶粒大小,因此再结晶区域的组织能够更早地达到其发生新的再结晶所需的临界等效应变。硬化区域的消失和不断伴随发生的软化区域组织,以及出现区域同时发生的硬化,最终导致一个有恒定流变应力 k_f 的稳定状态。各再结晶组织部分的百分数可由 Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov (JMAK) 函数确定^[4-6]。

2 材料模型及有限元模型和边界条件建立

2.1 流变应力及动态组织变化模型

表 1 包含 42CrMo4 钢的 Hensel-Spittel 流变应力模型以及动态再结晶模型^[2,7]。其中 k_f 为流变应力, φ 为变形程度, $\dot{\varphi}$ 为变形速率, θ 为变形温度; Z 为 Zener-Hollomon 参数, ε 为等效应变, $\dot{\varepsilon}$ 为等效应变速率, Q_{def} 为激活能; ε_m 为 k_f 达到最大值 k_{fm} 时的等效应变, d_0 为原始晶粒大小; ε_k 为发生动态再结晶时的临界等效应变; ε_s 为 k_f 开始进入稳定区间的等效应变; X_{dvm} 为动态再结晶百分数; d_{dvm} 为动态再结晶的晶粒大小,表 1 中, m_{1-4} 、 a_{1-4} 、 b_{1-2} 、 c_{1-3} 、 d_{1-2} 、 e_{1-4} 、 o_{1-3} 均为系数。

2.2 有限元模型及边界条件确定

42CrMo4 钢的初始横截面尺寸为 200 mm × 200 mm,圆角半径为 6 mm,箱形孔型槽口宽度为 226 mm,孔型高度为 158 mm。轧辊直径为 700 mm,开轧温度为 1 100 °C,轧辊转速为 8.140 2 r/min。主要边界条件包括:热辐射系数为 0.86,接触传热系数为 0.004 4 W/(K · mm²),轧辊温度为 300 °C,环境温度为 30 °C,库仑摩擦系数为 0.3。塑性变形功转换为变形热的部分一般为 85% ~ 95%^[5,6],本文取 90%。

用前后处理器 PEP (Programmer's Environment for Pre-/Postprocessing) 建立有限元模型^[7]。考虑模型 1/4 对称性,轧件原始长度取为 440 mm,沿轧件横截面圆角区域进行网格细化,采用 4480 个六面体单元和 5535

表 1 42CrMo4 钢流变应力及动态再结晶模型

Table 1 Flow stress and dynamic recrystallization models for steel 42CrMo4

流变应力及材料模型	42CrMo4 钢
$k_f = K \exp(m_1 \theta) \dot{\varphi}^{m_2} \varphi^{m_3} \exp(m_4 \varphi)$	$K = 6\,514.299\,8, m_1 = -0.003\,599\,6, m_2 = 0.125\,75, m_3 = 0.296\,14, m_4 = -0.675\,8$
$Z = \dot{\varepsilon} \cdot \exp\left(\frac{Q_{def}}{RT}\right)$	$Q_{def} = 301.413\,8 \text{ kJ/mol}$
$\varepsilon_m = a_1 \cdot d_0^{a_2} \cdot Z^{a_3}$	$a_1 = 6.636 \times 10^{-4}, a_2 = 0.5, a_3 = 0.148\,5$
$\varepsilon_k = a_4 \cdot \varepsilon_m$	$a_4 = 0.8$
$\varepsilon_s = e_1 \cdot \varepsilon_m + e_2 \cdot d_0^{e_3} \cdot Z^{e_4}$	$e_1 = 0, e_2 = 5.802\,576 \times 10^{-4}, e_3 = 0.5, e_4 = 0.175\,3$
$k_{fm} = \frac{1}{o_3} \sinh^{-1}\left(\frac{o_1 \cdot Z^{o_2}}{o_3}\right)$	$o_1 = 5.559\,5 \times 10^{-3}, o_2 = 1\,657.129 \times 10^{-4}, o_3 = 510.3668 \times 10^{-5}$
$\frac{k_f}{k_{fm}} = \left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon_m} \exp\left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_m}\right) \right]^C$	$C_1 = 323.735 \times 10^{-3}, C_2 = 0, C_3 = 0$
$C = C_1 1 - \exp[C_2 (\ln Z)] ^{C_3}$	
$X_{dvm} = 1 - \exp\left[d_1 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_k}{\varepsilon_s - \varepsilon_k} \right)^{d_2} \right]$	$d_1 = -1, d_2 = 2.5$
$d_{dvm} = b_1 \cdot Z^{b_2}$	$b_1 = 1\,104.607, b_2 = -1\,280.542 \times 10^{-4}$

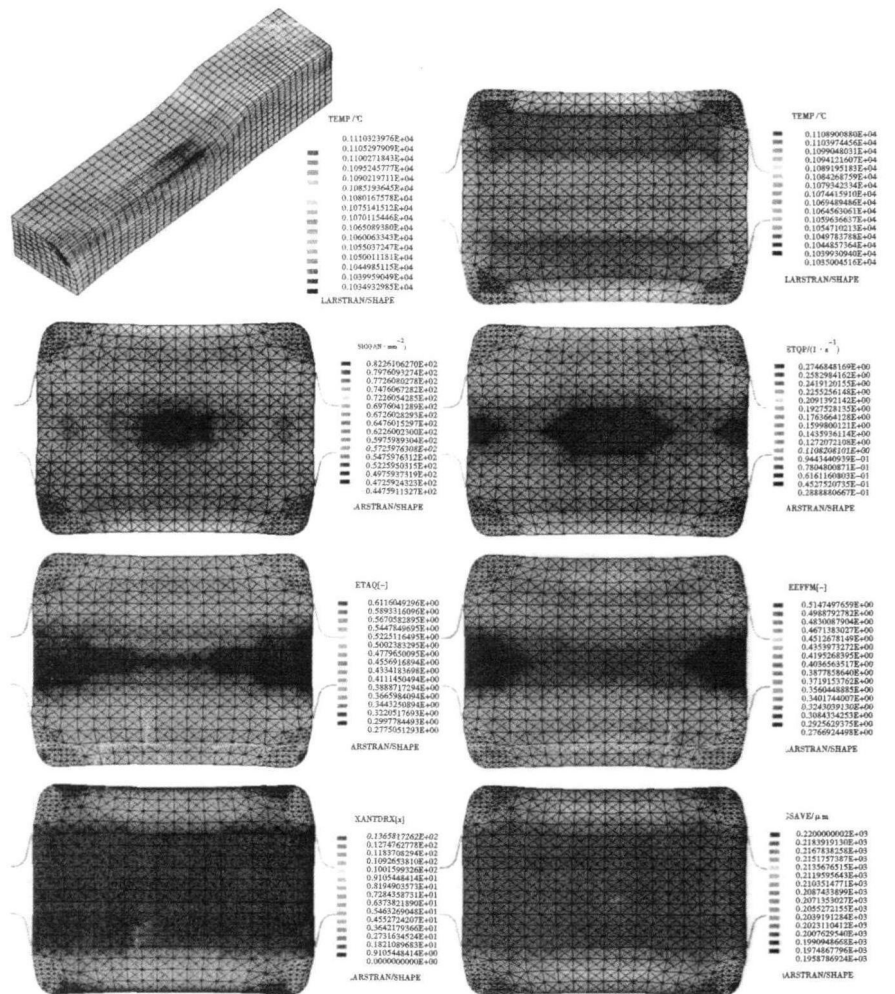


图 2 箱形孔出口横截面上力学参数及动态组织变化 (42CrMo4 钢, $\theta_0 = 1\,100\text{ °C}$)
Fig. 2 Mechanical parameters and dynamic structure change on cross section at exit of box pass, steel 42CrMo4, $\theta_0 = 1\,100\text{ °C}$

个节点。在模拟过程中选择 PEP&LARSTRAN 的模型诊断及网格优化技术^[7]。

3 轧制过程模拟及分析

图2为开轧温度 $\theta_0 = 1100\text{ }^\circ\text{C}$ 时42CrMo4钢在箱形孔中轧制出口横截面的力学参数及动态组织变化,其中变形热使轧件局部温度(TEMP)升高到 $1108.9\text{ }^\circ\text{C}$ 而在出口横截面上角部区域温降最大,最低温度为 $1035\text{ }^\circ\text{C}$ 。在角部区域: von Mises 等效应力(SIGQ)最大值为 82.26 MPa ,等效应变速率(ETQP)最大值为 0.2747 s^{-1} ,等效应变(ETAQ)最大值为 0.6116 ,考虑动态再结晶影响的有效等效应变(EFFM)最大值为 0.5147 。动态再结晶百分数(XANTDRX)最大值为 13.66% ,平均晶粒大小(GSAVE)在角部达到最小值为 $197.5\text{ }\mu\text{m}$ 。

由此可见,42CrMo4钢在箱形孔中轧制时,孔型

出口横截面上的温降,等效应变、等效应变速率,等效应力、动态再结晶百分数以及平均晶粒大小的变化都在轧件角部区域达到最大;与横截面上其它位置相比,角部区域的塑性最低,使其容易产生裂纹。

图3为不同开轧温度条件下42CrMo4钢箱形孔轧制出口横截面上圆角区域的动态再结晶百分数(XANTDRX)最大值及平均晶粒大小(GSAVE)最小值。由图3可见,当开轧温度低于 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 时,角部的动态再结晶百分数和平均晶粒大小的变化都很小,即在如此低温下开轧会使得轧件塑性显著降低,不利于控制裂纹;当开轧温度高于 $1050\text{ }^\circ\text{C}$ 时,角部动态再结晶及平均晶粒大小的变化显著增大,使得角部塑性提高,这有利于控制裂纹。在生产上,为提高42CrMo4钢棒材质量,其合适的开轧温度为 $1050\sim 1100\text{ }^\circ\text{C}$ 。

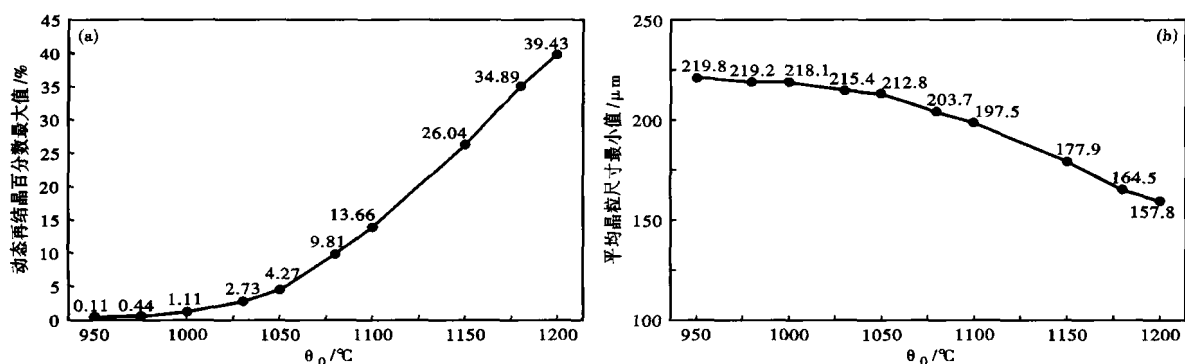


图3 开轧温度 θ_0 对箱形孔出口横截面上角部动态再结晶百分数最大值(a)及平均晶粒尺寸最小值(b)的影响,42CrMo4钢
Fig. 3 Effect of initial rolling temperature θ_0 on maximum value of dynamic recrystallization percentage (a) and minimum value of average grain size (b) in corner of cross section at exit of box pass, steel 42CrMo4

4 结论

(1)42CrMo4钢在箱形孔中轧制时,孔型出口横截面上的温降,等效应力、等效应变、等效应变速率都在轧件角部区域达到最大,与断面上其它位置相比,角部塑性降低最大,角部最易产生裂纹。

(2)当开轧温度低于 $1000\text{ }^\circ\text{C}$ 时,动态再结晶百分数和平均晶粒尺寸的变化都很小,当开轧温度高于 $1050\text{ }^\circ\text{C}$ 时动态再结晶显著增多。在生产42CrMo4钢棒材的合适开轧温度为 $1050\sim 1100\text{ }^\circ\text{C}$ 。

致谢 感谢德国 acut Aachener Umformtechnik GmbH 公司的技术支持。

参考文献

1 Hodgson P D, Gibbs R K. A Mathematical Model to Predict the Me-

- chanical Properties of Hot Rolled C-Mn and Microalloyed Steels. ISIJ International, 1992, 32(12): 1329
- Karhausen K. Integrierte Prozeß- und Gefügesimulation bei der Warmumformung, Dissertation am IBF, RWTH Aachen, 1994
- 赵辉, 鹿守理. 热轧微观组织的计算机模拟及性能预报(一). 轧钢, 1997(5): 56
- Wolske M. Umformbarkeit und Modellierung der Gefügeentwicklung von Nickelbasislegierungen, Dissertation am IBF, RWTH Aachen, 2005
- Kopp R, Wiegels H. Einführung in die Umformtechnik. Verlag der Augustinus Buchhandlung. Aachen, 1999
- Kopp R, Wiegels H. 金属塑性成形导论. 康永林, 洪慧平译. 北京: 高等教育出版社, 2010
- Franzke M, Gruber J, Barton G. PEP (Programmer's Environment for Pre-/Postprocessing) Benutzerhandbuch zur Version 3. 62, Aachener Umformtechnik GmbH, 2008

洪慧平(1963-),男,博士后,副教授,金属塑性成形数值模拟及优化研究。

收稿日期:2010-11-15