

闭开联合楔横轧微观组织温度的影响规律

陈吉^{1,2}, 束学道^{1,2*}, 周子荣^{1,2}

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211;

2. 浙江省零件轧制成形技术重点实验室, 浙江 宁波 315211)

摘要: 以42CrMo钢为研究材料, 在Deform-3D软件中建立了闭开联合楔横轧热-力-微观组织耦合的有限元模型. 通过单因素方法, 分析了轧制温度对轧件平均晶粒尺寸的影响规律. 结果表明, 降低轧制温度, 轧件越有利于结晶, 平均晶粒尺寸越小; 闭式轧制后晶粒随着温度的降低整体得到细化; 开式阶段晶粒随着温度的升高, 平均晶粒大小变化不明显. 通过金相实验与模拟对比发现, 两者曲线趋势一致, 误差为15%, 验证了有限元模拟的可靠性.

关键词: 轧制温度; 闭开联合; 楔横轧; 微观组织

中图分类号: TG335.19

文献标志码: A

文章编号: 1001-5132 (2019) 03-0055-06

楔横轧技术具有高效、节材、环保等多项优点而被广泛应用于轴类零件成形^[1]. 但该技术的一个瓶颈是凹心缺陷, 致使材料利用率难以突破85%. 为此研究人员对如何减少凹心做了相应的研究, Pater^[2]对闭式楔横轧过程进行了数值模拟分析, 证明了闭式楔横轧提高轴端质量的可行性. 马振海等^[3]分析了凹心产生的原因, 并研究了工艺参数对凹心的影响规律, 发现通过优化参数可以减少凹心. 程超^[4]研究了闭式楔横轧轧件的高轴端质量, 得出了闭式轧制相对开式轧制能够大大提高轴端质量, 可减少凹心值48.35%. 魏新红等^[5]从轧件轴端形状入手, 通过改变轴端形状角度分析其对凹心的影响, 得到了端部倾角越大端部凹心越小的结论. 文献[6-8]提出了闭开联合轧制方法, 其原理是闭式轧制由轴向两端向轴向内侧轧制, 轧件在模具封闭孔型作用下进行径向压缩、轴向压缩变形; 当闭式轧制结束, 开式轧制开始, 此时模具再将轧件从轴向内侧部分向两端轧制, 直至轧制到闭式轧制结束位置处, 通过增加挡楔, 明显提高了轧件端部质量, 使凹心值相较于开式轧制减小了71.6%, 表明闭开联合轧制能显著减小轧件凹心, 提高产品材料的利用率.

由于温度对轧制过程的微观组织影响较大^[9], 且相关研究尚未见报道. 因此, 本文以42CrMo钢为研究材料, 在Deform-3D软件中建立了闭开联合轧制热-力-微观组织耦合的有限元模型, 通过单因素试验法, 研究轧制温度对闭开联合楔横轧微观组织的影响规律, 以期推广闭开联合轧制, 实现无料头生产提供参考.

1 闭开联合楔横轧热-力-组织耦合有限元建模

在金属塑性变形过程中, 晶粒尺寸的变化主要取决于动态再结晶, 其对材料的强度和韧性起着决定性作用. 因此本文通过建立材料的热-力-组织耦合有限元建模, 通过Deform-3D软件对楔横轧闭开联合轧制过程中轴类件的晶粒尺寸大小进行了模拟.

1.1 材料模型

模拟材料选择42CrMo钢, 因为该材料具有良好的韧性和强度, 且淬透性较高, 具有高的蠕变强度和持久强度. 对不同应变速率下, 42CrMo钢在不同变形温度下的真实应力—应变曲线进行多元拟合, 得到材料的本构方程为^[10]:

$$\dot{\varepsilon} = 1.34 \times 10^{18} [\sinh(8.198 \times 10^{-3} \sigma)]^{8.1434}.$$

收稿日期: 2018-12-20.

宁波大学学报(理工版)网址: <http://journalg.nbu.edu.cn/>

基金项目: 国家自然科学基金(51475247); 浙江省自然科学基金重点项目(LZ17E050001).

第一作者: 陈吉(1994—), 男, 浙江宁波人, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 金属塑性成形技术. E-mail: 751462449@qq.com

*通信作者: 束学道(1968—), 男, 安徽舒城人, 教授, 主要研究方向: 零件轧制技术. E-mail: shuxuedao@nbu.edu.cn

$$\exp(-4.6334 \times 10^5 / (RT)), \quad (1)$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; σ 为峰值应力; R 为气体常数; T 为变形温度.

1.2 动态再结晶模型

在塑性成形中, 晶粒变化主要可分为 3 个阶段: 回复、再结晶和晶粒长大(图 1). 在热变形条件下, 随着位错密度的增加, 位错运动使得位错重新排列或消失(动态回复), 当畸变能积累到一定程度就会发生再结晶, 使更多的位错消失(动态再结晶).

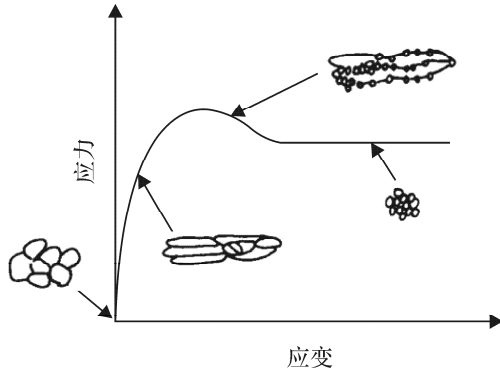


图 1 奥氏体热加工真应力—真应变曲线^[11]

从图 1 可以获取曲线最大应力值 σ_p 、应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 、变形温度 T 之间的关系式:

$$\dot{\varepsilon} \approx A \sigma^n \exp(-\frac{Q}{RT}), \quad (2)$$

其中: A 为定值; n 是应力指数, 在动态再结晶发生时 n 通常取 4~6; Q 为变形活化能; R 为气体定值.

Q 与应力、温度没有相关关系时, σ_p 可以用 Zener-Hollomon 因子 Z 进行表达:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(\frac{Q}{RT}) = A \sigma^n, \quad (3)$$

Z 是温度补偿变形速率因子, Z 值随着变形温度降低、变形速率增大而变大. 动态再结晶完成后还会发生晶粒长大. 在楔横轧工艺中, 轧件在塑性变形结束后的时间, 或者工序的间隙均会发生晶粒长大现象, 此时轧件的平均晶粒尺寸会相应地变大.

动态再结晶的临界应变 ε_c 可以通过应力—应变曲线的峰值应变估算 ε_p . 动态再结晶在应力达到峰值前就会发生, 当应力达到峰值应力时, 其对应的应变 ε_p 可体现材料的变形状态.

动态再结晶激活准则可以描述为^[12]:

$$\varepsilon_p = 7.28 \times 10^{-4} d_0^{0.31} [\dot{\varepsilon} \exp(247000 / (RT))]^{0.21},$$

$$\varepsilon_c = 0.696 \varepsilon_p, \quad (5)$$

式中: Q 为动态再结晶激活能, 其值为 51 870 J·mol⁻¹; d_0 为初始晶粒尺寸; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; R 为气体常数, 取 8.31 J·(K·mol)⁻¹; T 为变形温度.

动态再结晶体积分数方程为^[13]:

$$\varepsilon_{0.5} = 3.0 \times 10^{-3} d_0^{0.4} \dot{\varepsilon}^{0.086} \exp(\frac{4089}{T}), \quad (6)$$

$$X_{\text{drex}} = 1 - \exp \left[-0.693 \left(\frac{\varepsilon - \varepsilon_c}{\varepsilon_{0.5} - \varepsilon_c} \right)^{1.8} \right], \quad (7)$$

晶粒尺寸方程为^[13]:

$$d_{\text{drex}} = 38 d_0^{0.8} \dot{\varepsilon}^{-0.234} \exp(-\frac{42327.5}{RT}), \quad (8)$$

晶粒长大方程为^[13]:

$$d = (d_0^{3.55} + 2.90 \times 10^{25} \exp(-\frac{64273.96}{T}) t)^{\frac{1}{3.55}}, \quad (9)$$

式中: X_{drex} 为动态再结晶体积分数; ε 为动态应变值; $\varepsilon_{0.5}$ 为动态再结晶体积分数为 50% 时的应变; d_{drex} 为动态晶粒尺寸; d_0 为初始晶粒尺寸.

1.3 有限元模型的建立

采用单因素试验分析法探究温度对平均晶粒尺寸的影响. 单因素分析定量为: 初始坯料直径 45 mm, 长度 60 mm; 轧后直径 30 mm, 长度 135 mm, 如图 2 所示. 设 4 个水平温度因素, 分别为 950、1 050、1 150、1 250 °C. 其余工艺参数为: 轧辊转速 0.419 rad·s⁻¹, 开式留轧长度 25 mm, 断面收缩率 55.6%, 模具闭式成形角 30°, 闭式展宽角 8°, 开式成形角 30°, 开式展宽角 8°.

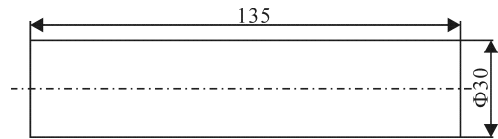


图 2 开式轧制轧后轧件尺寸形状

根据以上工艺参数, 在 Pro-E 三维软件中建立装配模型, 将建立的模型导入到 Deform-3D 软件中, 考虑到模具的对称性, 取 1/2 建立轧制模型. 坯料网格划分采用四面体网格自动划分, 网格数设定为 32 000, 并设置边界条件和体积补偿. 轧件与轧辊间的摩擦值设定为 2, 轧件与挡板接触也产生摩擦, 但是其值较小, 因此设定为 0.1. 初始晶粒尺寸设为 150 μm. 轧件与轧辊的传热系数设为 11

$W \cdot (\text{mm}^2 \cdot \text{K})^{-1}$, 轧件与空气的对流换热系数设为 $0.02 W \cdot (\text{mm}^2 \cdot \text{K})^{-1}$. 建立的有限元数值模型如图 3 所示.

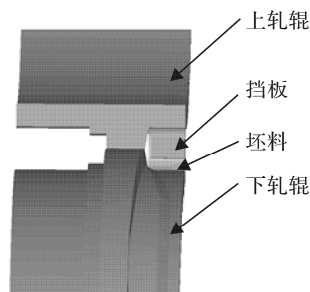


图3 闭开联合楔横轧有限元模型

2 闭开联合楔横轧微观组织温度的影响规律

2.1 追踪点设置

为了准确追踪闭式和开式过程, 选取轧后特征点(图 4), 其中特征点 $P1$ 、 $P2$ 、 $P3$ 为经过开式轧制后中间截面上的 3 个点, 反映了开式轧制后平均晶粒尺寸, 点 $P4$ 、 $P5$ 、 $P6$ 为经过闭式轧制后中间截面上的 3 个点, 反映了闭式轧制后平均晶粒尺寸.

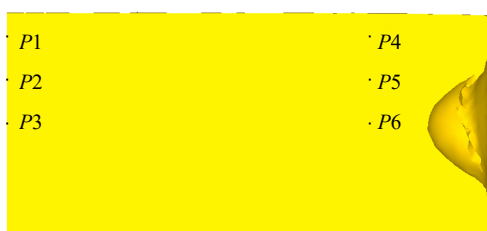


图4 轧后截面特征点

2.2 温度对平均晶粒大小的影响

设置轧制温度为 950 、 1050 、 1150 、 1250 $^{\circ}\text{C}$ 4 种情况, 通过热力耦合有限元模拟, 得出各阶段轧制结束后不同轧制温度下纵截面的平均晶粒尺寸分布, 如图 5 和图 6 所示.

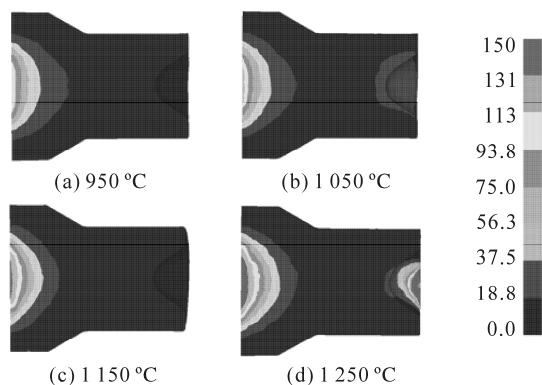


图5 闭式轧制结束轧件纵截面平均晶粒尺寸(单位 μm)

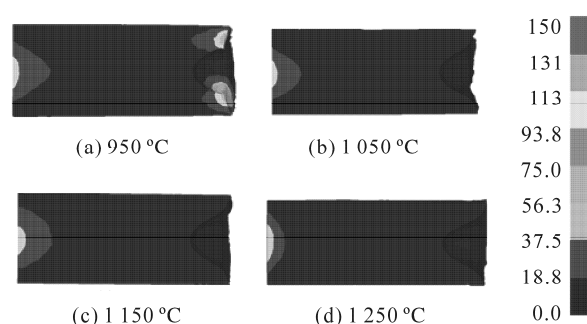
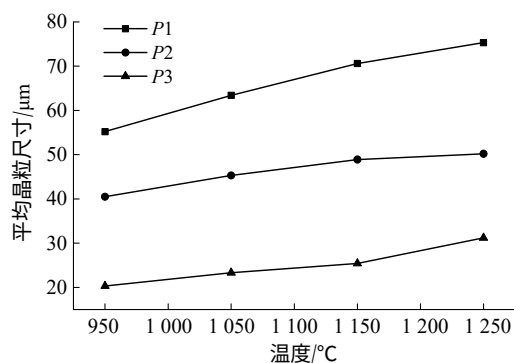


图6 开式轧制结束轧件纵截面平均晶粒尺寸(单位 μm)

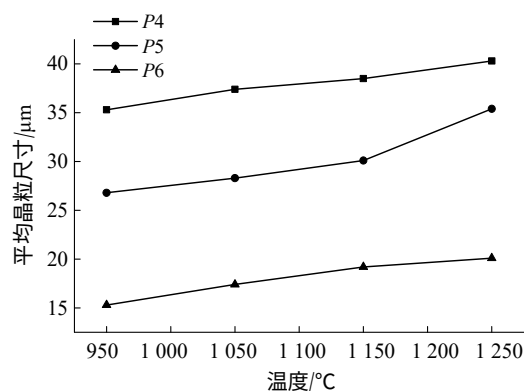
从图 5 可以看出, 随着轧制温度的升高, 闭式轧制结束后心部金属平均晶粒变大. 其主要原因: 虽然高温为晶粒提供了再结晶激活能, 但是在挡楔挤压作用下晶粒尺寸减小的速度减缓, 不利于细化.

从图 6 可以看出, 开式阶段晶粒随着温度的升高平均晶粒大小变化不大, 主要原因是闭式轧制散热多, 到开式阶段温差变小.

对轧件纵截面的 6 个点取值进行统计, 通过数据软件得到 2 个过程中轧件纵截面平均晶粒尺寸随轧制温度的变化曲线(图 7).



(a) 开式阶段



(b) 闭式阶段

图7 不同轧制温度下追踪点平均晶粒尺寸变化曲线

从图 7 可以看出, 开式轧制后表面点 $P3$ 晶粒细化程度大于心部 $P1$ 点, 而且内部点 $P1$ 、 $P2$ 随着温度降低晶粒逐渐细化, 而表面点 $P3$ 则随接触点的不同晶粒尺寸也不同. 比较 3 个轧制温度下的晶粒尺寸, 当初始温度设置成 $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时, 最小平均晶粒尺寸可细化到 $15\text{ }\mu\text{m}$, 表层晶粒尺寸最小到 $35\text{ }\mu\text{m}$, 轧件的晶粒尺寸得以大大细化, 而且径向的表层和心部晶粒尺寸相差较小.

综上所述, 随着温度升高, 晶粒尺寸变大, 这是因为温度升高改变了晶粒的储存能及晶界迁移率, 促使再结晶晶粒长大. 在闭式轧制和开式阶段, 轧件表面的晶粒尺寸都小于轧件内部的晶粒尺寸. 这是因为轧件外表面在轧制过程中变形大、温度高、位错滑移充分, 完全发生动态再结晶, 进而晶粒细化. 轧件内部也得到热传导作用, 使内部也发生动态再结晶. 降低轧制温度可以得到较小的晶粒尺寸, 有效地改善晶粒尺寸分布不均的程度, 提高产品的机械性能.

3 轧制及金相实验

本次实验主要验证轧制温度对轧件轧后晶粒尺寸的影响规律. 图 8 是闭开联合轧制实验所用模具, 图 9 是轧制实验所用坯料.



图 8 轧制实验所用模具



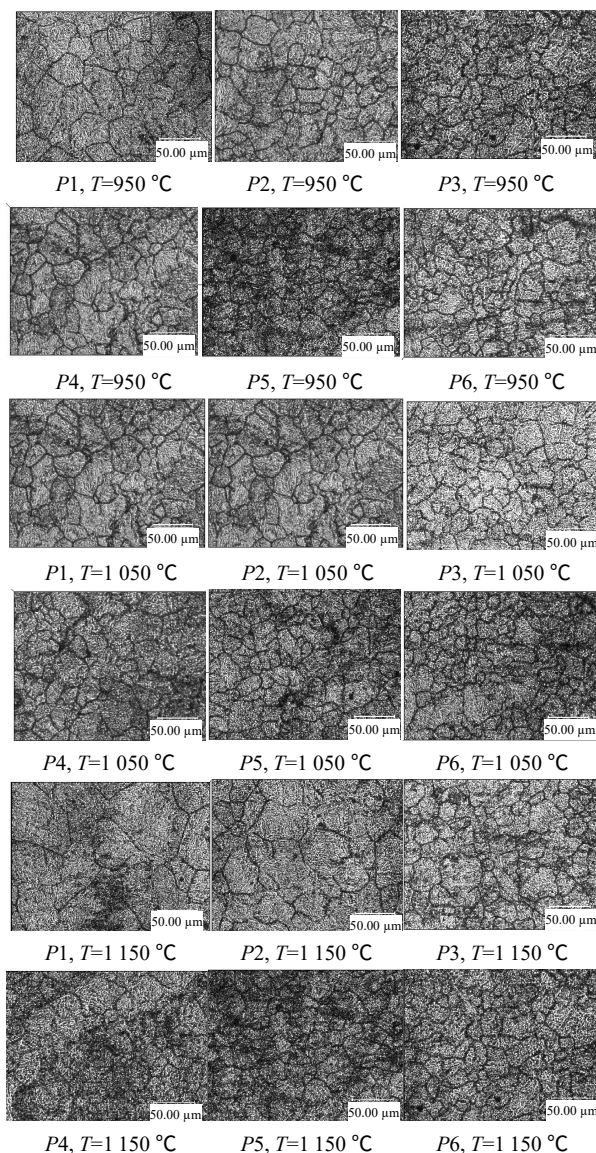
图 9 部分实验坯料

轧制实验在实验室所拥有的 H630 楔横轧机上进行, 整个实验过程包括模具的安装、坯料的加热、坯料轧制过程和轧件水冷. 图 10 为闭开联合轧制实验冷却后的轧件.



图 10 闭开联合轧制实验冷却后的轧件

在显微镜下对试件的腐蚀面进行观察, 得到 24 张试件的金相图(图 11).



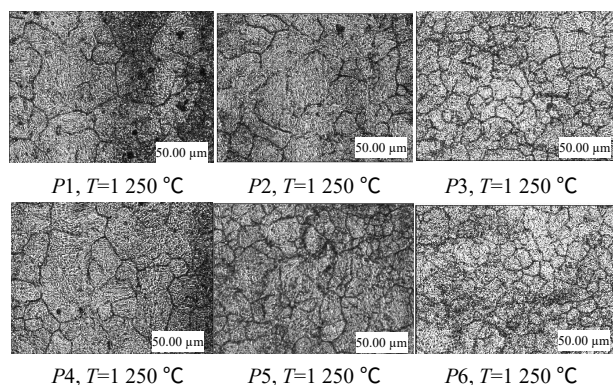


图 11 不同轧制温度下实验得到的轧件金相图

通过实验获取了不同温度下各点的平均晶粒尺寸, 开式轧制影响的点 $P1$ 、 $P2$ 、 $P3$ 模拟值与实验值对比如图 12 所示; 闭式轧制影响的点 $P4$ 、 $P5$ 、 $P6$ 模拟值与实验值对比如图 13 所示。

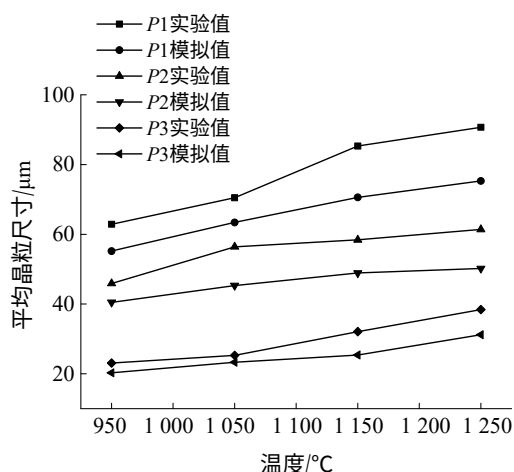


图 12 不同轧制温度开式轧制跟踪点平均晶粒尺寸变化曲线

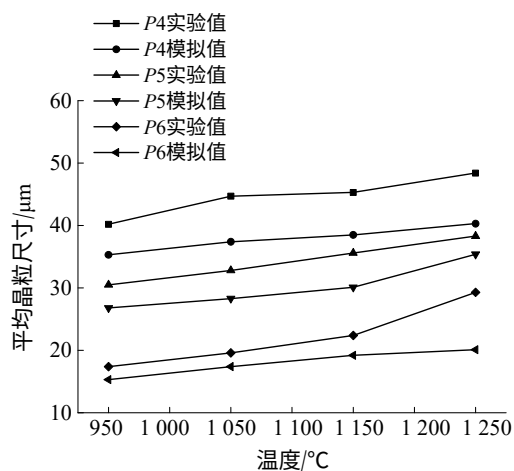


图 13 不同轧制温度闭式轧制跟踪点平均晶粒尺寸变化曲线

通过对比可以看出, 金属各点平均晶粒尺寸同样都是随着温度的升高而增大, 且越往表面晶粒尺寸越小, 相同点实验值略大于模拟值, 误差 15%。误差原因是因为在实际实验时, 难以像模拟一样对实验条件进行精确控制, 轧件在轧制结束时, 从模具上掉落下来, 此时需要花费一定时间将轧件用夹钳夹住放入水盆中, 轧件在塑性变形结束后的时间, 或者工序的间隙均会发生晶粒长大现象。此时轧件温度处于高温状态, 再结晶晶粒会继续长大, 导致最终实验数据偏大。模拟和实验值在相同阶段的微观组织对比分析获取的曲线趋势一致, 验证了有限元模拟结果的可靠性。

4 结论

(1)降低轧制温度, 可以获得更小的平均晶粒尺寸。闭式轧制后晶粒随着温度的降低整体得到细化, 开式阶段晶粒随着温度的升高平均晶粒大小变化不明显; 闭开联合轧制使轧件晶粒得到了进一步细化, 说明了闭开联合轧制能够提高材料的性能。

(2)模拟与实验结果表明, 在相同阶段的微观组织对比分析获取的曲线趋势一致, 误差 15%, 验证了有限元模拟结果的可靠性。

本文的研究结果为合理确定轧制温度和实现楔横轧无料头轧制提供了参考。

参考文献:

- [1] 胡正寰, 张康生, 王宝雨, 等. 楔横轧零件成形技术与模拟仿真[M]. 北京: 冶金出版社, 2005:10-15.
- [2] Pater Z. A study of cross wedge rolling process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1998, 98(80/81):370-375.
- [3] 马振海, 杨翠苹, 胡正寰. 楔横轧轧件端头凹心影响因素的研究[J]. 锻压技术, 2002, 27(1):29-31.
- [4] 程超. 闭式楔横轧成形轴类件及其端部质量研究[D]. 宁波: 宁波大学, 2013.
- [5] 魏新红, 束学道. 坯料端部形状对楔横轧轧件凹心影响研究[J]. 热加工工艺, 2012, 40(3):54-56.
- [6] 姬开宇, 束学道, 孙宝寿, 等. 基于挡楔与二次闭式的闭开联合楔横轧有限元数值模拟[J]. 宁波大学学报(理工版), 2016, 29(2):73-76.
- [7] Wei J, Shu X D, Tian D Y, et, al. Study in shaft end forming quality of closed-open cross wedge, rolling shaft

- using a wedge block[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5):1-11.
- [8] Shu X D, Wei J, Liu C. Study on the control of end quality by closed cross wedge rolling based wedge block[J]. Metalurgija, 2017, 56(1/2):123-126.
- [9] 朱德彪, 束学道. 工艺参数对楔横轧 GH4169 合金轴类件力能参数的影响[J]. 塑性工程学报, 2018, 25(1):52-59.
- [10] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢的热压缩流变应力行为[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2008, 39(3):549-553.
- [11] 俞汉清, 陈金德. 金属塑性成形原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999:19-25.
- [12] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢亚动态再结晶行为研究[J]. 材料热处理学报, 2009, 30(2):71-75.
- [13] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢变形奥氏体的静态再结晶[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(2):411-416.

Effect of rolling temperature on microstructure of closed-open cross wedge rolling

CHEN Ji^{1,2}, SHU Xue-dao^{1,2*}, ZHOU Zi-rong^{1,2}

(1.Faculty of Mechanical Engineering & Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2.Zhejiang Provincial Key Laboratory of Part Rolling Technology, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to ensure the mechanical properties of the closed-open cross wedge rolling products, this paper uses 42CrMo as the research material, and establishes the finite element model of the combined heat-force-micro-structure coupling with Deform-3D software. The influence of rolling temperature on the average grain size of the rolled piece was analyzed by single factor method. It was obtained that the rolling piece was more favorable for crystallization and the average grain size was smaller as the rolling temperature decreased. After closed rolling, the grain size is getting refined as the temperature decreases. In the open rolling stage, the grain size does not change significantly with the increasing of temperature. Through the comparison of metallographic experiments and simulations, the trend of the two curves is consistent with an error of 15%, which verifies the reliability of the finite element simulation.

Key words: rolling temperature; closed-open joint; cross wedge rolling; microstructure

(责任编辑 史小丽)