

N08120 耐蚀高温合金的高温变形行为及本构方程

王旭明¹, 牛立群^{1,2}, 常富强¹, 李国洲¹, 王炳正¹, 刘 林¹, 梁正龙²

(1. 兰州兰石超合金新材料有限公司, 甘肃 兰州 730314; 2. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 针对 N08120 耐蚀高温合金在锻造和轧制过程中易出现粗晶、开裂和探伤无底波等问题, 采用 Gleeble-1500D 热模拟试验机研究了 N08120 耐蚀高温合金在温度为 850~1250 °C、应变速率为 0.01~1 s⁻¹ 下的高温变形行为。基于 Hansel-Spittle 本构模型标定了其本构方程参数, 为 N08120 耐蚀高温合金在锻造和轧制过程的数值模拟奠定了基础。结合微观组织演变过程, 分析了应力软化的原因, 发现降低温度和提升应变速率有助于细化晶粒。通过对板材轧制过程进行模拟计算所得的轧制力与实际生产数据进行对比, 验证了 Hansel-Spittle 本构模型及本构方程参数的有效性。

关键词: N08120 耐蚀高温合金; 高温变形行为; 本构模型; 再结晶; 轧制

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.08.035

中图分类号: O347.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 08-0263-06

High temperature deformation behavior and constitutive model of anti-corrosion superalloy N08120

Wang Xuming¹, Niu Liqun^{1,2}, Chang Fuqiang¹, Li Guozhou¹, Wang Bingzheng¹, Liu Lin¹, Liang Zhenglong²

(1. Lanzhou Lanshi Super Alloy New Material Co., Ltd., Lanzhou 730314, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aiming at the problems of coarse grain, cracking and flaw detection without bottom wave in the forging and rolling process of corrosion resistant superalloy N08120, the high temperature deformation behavior of corrosion resistant superalloy N08120 at the temperature of 850–1250 °C and the strain rate of 0.01–1 s⁻¹ was studied by Gleeble-1500D thermal simulation testing machine. Based on the Hansel-Spittle constitutive model, the parameters of constitutive equation were calibrated, which laid a foundation for the numerical simulation of the forging and rolling process of corrosion-resistant superalloy N08120. Combined with the microstructure evolution process, the causes of stress softening were analyzed, and it was found that reducing the temperature and increasing the strain rate helped to refine the grain. The rolling force calculated by simulating the rolling process of sheet was compared with the actual production data, the validity of the Hansel-Spittle constitutive model and parameters of constitutive equation was verified.

Key words: anti-corrosion superalloy N08120; high temperature deformation behavior; constitutive model; recrystallization; rolling

在“碳达峰、碳中和”战略下, 新能源行业的发展受到极大关注, 其中光伏能源行业迎来了爆发式建设^[1]。光伏能源行业的发展需要依托冷氢反应器生产的高纯多晶硅原材料, 其生产过程要求设备具备耐高温、耐腐蚀的环境。高温合金 N08120 比 N08810 具有更好的高温强度和耐蚀性, 能够满足光伏行业中高温、高压、高腐蚀等苛刻的服役环境, 是冷氢化反应器的理想选材之一^[2]。2022 年 8 月,

兰州兰石集团有限公司研制出国产首台 N08120 耐蚀高温合金冷氢化流化床反应器, 并强调 N08120 耐蚀高温合金中厚板材制备是冷氢化流化床反应器研制的核心技术, 后续会继续推进 N08120 耐蚀高温合金中厚板制作工艺的开发与升级, 通过优化锻造和轧制工艺以减少生产周期、提高材料利用率、提升产品的质量和减少冷氢反应器的供货周期。

锻造与轧制工艺的制定越来越重视短流程、低成本、高质量等特征, 基于经验性的开发流程不满足产业发展需要。随着信息技术的发展, 数值模拟技术是设计和优化工艺的有效工具, 有限元法被大量应用于锻造和轧制板材工艺研发, 以达到节约成本、提高质量的目的^[3-5]。本构模型是有限元模拟结果准确的前提, 然而, 国内外针对 N08120 耐蚀高温合金高温变形行为的研究较少。因此, 本文依据锻造和轧制工艺的特点, 采取 Gleeble-1500D 热模

收稿日期: 2023-02-21; 修订日期: 2023-05-18

基金项目: 甘肃省教育厅青年博士支持项目 (2024QB-030); 甘肃省联合科研基金重大项目 (23JRR1561); 甘肃省联合科研基金重点项目 (23JRR1562); 甘肃省 2024 年度技术创新引导计划-科技专员专项; 兰州理工大学“红柳杰出青年人才支持计划

作者简介: 王旭明 (1991-), 男, 学士, 副高级工程师

E-mail: wxm0720@163.com

通信作者: 牛立群 (1984-), 男, 博士, 讲师

E-mail: niuliquan111@126.com

拟实验机进行了 N08120 耐蚀高温合金的等温压缩实验, 分析其高温变形行为, 并标定 Hansel-Spittle 本构方程的参数, 为 N08120 耐蚀高温合金热成形工艺的制定和优化提供理论依据。

1 实验材料及方法

N08120 耐蚀高温合金铸锭的化学成分见表 1。

表 1 N08120 耐蚀高温合金的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical components of anti-corrosion superalloy N08120 (% , mass fraction)

C	Si	Mn	Fe	W	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti	Co	Al
0.05	0.60	0.70	27.00	2.50	26.50	36.20	2.45	0.78	0.10	3.00	0.10

2 实验结果与分析

2.1 高温流变曲线

图 1 为 N08120 耐蚀高温合金的高温流变曲线。可以观察到在固定温度和应变速率下, 随着真应变的增加, 真应力迅速增大后又缓慢降低, 呈现出典型的再结晶软化现象的曲线特征^[6-8]。同一应变速率和应变下, 随着温度的升高, 真应力降低。蔺永诚等^[9-10]认为动态再结晶晶粒的形核和长大以及位错的湮没是流变应力降低的原因。应变速率为 0.01 s^{-1} 时, 峰值流变应力从 $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 383 MPa

热压缩试样尺寸为 $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 。采用 Gleeble-1500D 热模拟试验机进行了不同条件下的热压缩实验, 获得真应力-真应变曲线。试样的升温速率为 $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$, 分别加热至 850 、 900 、 1000 、 1150 、 1200 和 $1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 并保温 3 min , 在应变速率为 0.01 、 0.1 s^{-1} 和 1 s^{-1} 下进行热压缩实验, 压缩至真应变为 0.8 后立即水淬。

下降至 $1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 52 MPa , 相差 331 MPa , 如图 1a 所示。应变速率为 0.1 s^{-1} 时, 峰值流变应力从 $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 427 MPa 下降至 $1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 94 MPa , 相差 333 MPa , 如图 1b 所示。应变速率为 1 s^{-1} 时, 峰值流变应力从 $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 439 MPa 下降至 $1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的 115 MPa , 相差 324 MPa , 如图 1c 所示。由上述数据相互对比可知, 相同应变速率下峰值流变应力随着温度的升高而降低, 相同温度下峰值流变应力随着应变速率的升高而增大, 但温度对峰值流变应力的影响大于应变速率, 这是由于温度的升高增大了原子扩散速度, 使动态回复和动态再结晶现象增强, 导致软化效应增强^[11-12]。

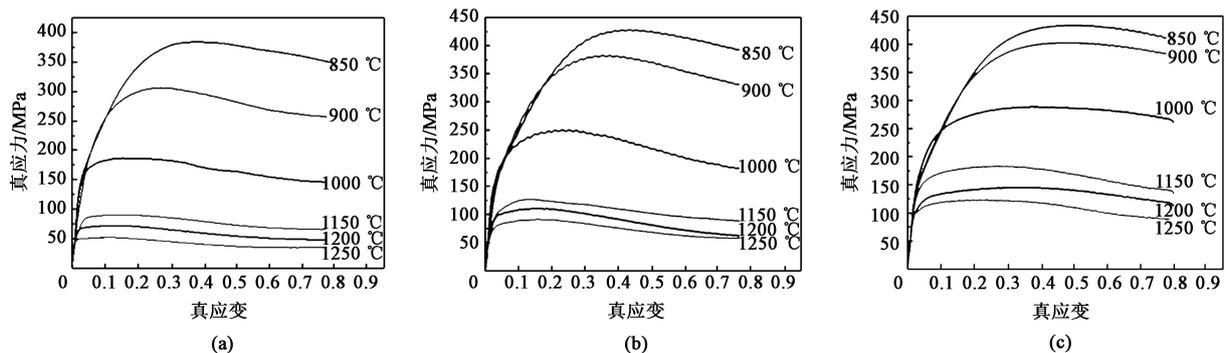


图 1 不同的应变速率下 N08120 耐蚀高温合金的真应力-真应变曲线

(a) 0.01 s^{-1} (b) 0.1 s^{-1} (c) 1 s^{-1}

Fig. 1 True stress-true strain curves of anti-corrosion superalloy N08120 under different strain rates

2.2 微观组织演变

为观察微观组织的演变规律, 将压缩后的试样沿轴线对称切割, 用砂纸进行打磨后机械抛光。使用 NikonLV150 显微镜观察金相组织, 其金相结果如图 2 所示。在温度为 $850 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和变形速率为 0.01 s^{-1} 的条件, 观察到明显的再结晶现象, 这很好地解释了图 1 中的应力软化现象。观察图 2a~图 2d, 发现

在相同应变速率下, 随着温度的升高, 晶粒尺寸变大。观察图 2d~图 2f, 发现在相同温度下, 随着应变速率的增大, 晶粒尺寸越来越小。根据 Hell-Pitch 公式^[13], 流变应力随着晶粒尺寸的减小而增加。这也很好地解释了图 1 中峰值流变应力随着温度的降低和应变速率的升高而升高的现象。综上所述, N08120 耐蚀高温合金在温度为 $850 \sim 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 和应变

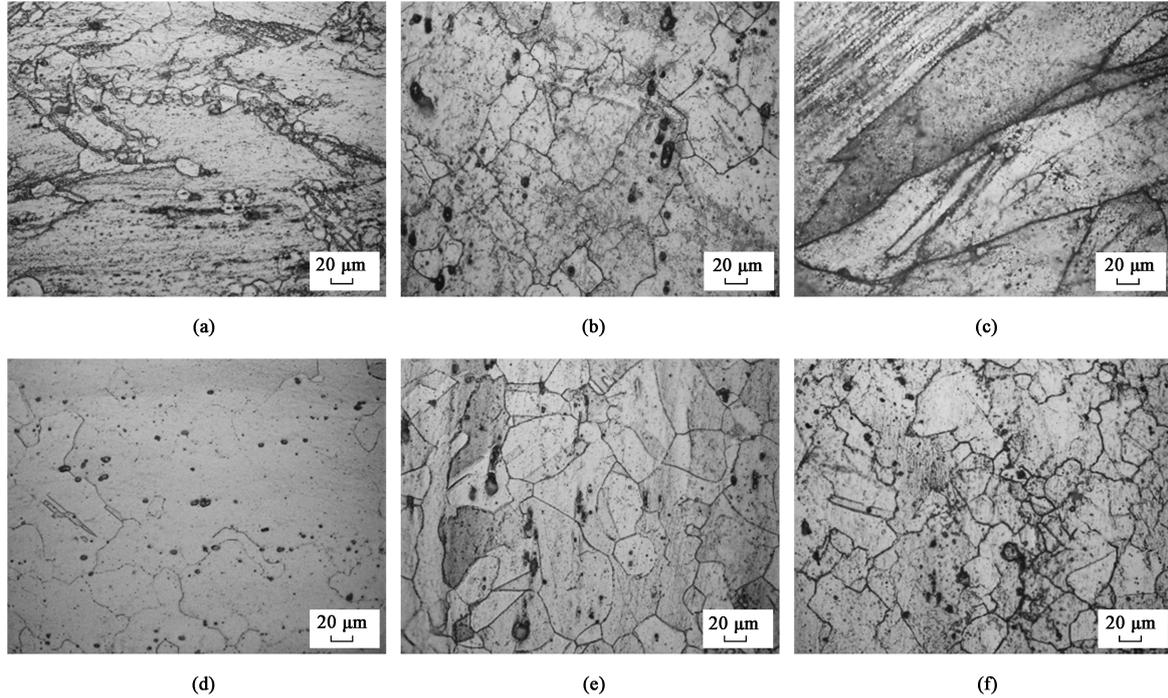


图 2 N08120 耐蚀高温合金在不同热变形条件下的微观组织

(a) 850 °C, 0.01 s⁻¹ (b) 1000 °C, 0.01 s⁻¹ (c) 1250 °C, 0.01 s⁻¹ (d) 1150 °C, 0.01 s⁻¹
(e) 1150 °C, 0.1 s⁻¹ (f) 1150 °C, 1 s⁻¹

Fig. 2 Microstructures of anti-corrosion superalloy N08120 under different thermal deformation conditions

速率为 0.01~1 s⁻¹ 条件下进行热压缩时会发生再结晶, 温度提高会促进晶粒粗化, 应变速率提升会细化晶粒。

2.3 本构模型建立

Hansel-Spittle 本构模型常用来描述材料的高温变形行为^[13], 其表达式为:

$$\sigma = Ae^{m_1 T} \varepsilon^{m_2} \dot{\varepsilon}^{m_3} e^{\frac{m_4}{\varepsilon}} (1 + \varepsilon)^{m_5 T} e^{m_6 \varepsilon} \dot{\varepsilon}^{m_7 T} T^{m_8} \quad (1)$$

式中: σ 为真应力; T 为温度; ε 为真应变; A 为材料相关常数; m_1 和 m_8 为温度敏感系数; m_2 、 m_4 和 m_6 为应变敏感系数; m_3 为应变速率敏感系数; m_5 为耦合温度和应变系数; m_7 为耦合温度和应变速率系数。

对式 (1) 取自然对数, 其表达式为:

$$\ln \sigma = \ln A + m_1 T + m_2 \ln \varepsilon + m_3 \ln \dot{\varepsilon} + \frac{m_4}{\varepsilon} + m_5 T \ln(1 + \varepsilon) + m_6 \varepsilon + m_7 T \ln \dot{\varepsilon} + m_8 \ln T \quad (2)$$

确定温度 T 和真应变 ε 时, 式 (2) 可简化为:

$$\ln \sigma = (m_3 + m_7 T) \ln \dot{\varepsilon} + B \quad (3)$$

式中: B 为常数。

在不同温度和真应变下, 分别以 $\ln \dot{\varepsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 为横纵坐标作图, 如图 3 所示。在固定应变下进行线性拟合, 求得每条直线斜率 ($m_3 + m_7 T$) 的值。不

同应变下, ($m_3 + m_7 T$) 与温度 T 的关系见图 4, m_7 为拟合直线斜率的平均值, 求得 $m_7 = 4.56368 \times 10^{-4} \approx 0$, m_3 为拟合直线截距的平均值, 求得 $m_3 = 0.11781$ 。

确定真应变 ε 和应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 时, 式 (2) 可简化为:

$$\begin{cases} \ln \sigma = [m_1 + m_7 \ln \dot{\varepsilon} + m_3 \ln(1 + \varepsilon)] T + m_8 \ln T + C \\ C = \ln A + m_2 \ln \varepsilon + m_3 \ln \dot{\varepsilon} + \frac{m_4}{\varepsilon} + m_6 \varepsilon \end{cases} \quad (4)$$

在不同应变速率和温度下, 分别以 T 和 $\ln \sigma$ 为横纵坐标作图, 以函数 $\ln \sigma = KT + m_8 \ln T + C$ 进行拟合, 见图 5。在不同应变速率下取 m_8 的平均值, 求得 $m_8 = 5050686$, 且 $m_7 = 0$, 因此, 拟合直线斜率 K 为 $[m_1 + m_5 \ln(1 + \varepsilon)]$ 。不同应变速率下 $[m_1 + m_5 \ln(1 + \varepsilon)]$ 与 $\ln(1 + \varepsilon)$ 的关系见图 6, 拟合直线的截距和斜率分别为 m_1 和 m_5 的值, 求取 m_1 和 m_5 的平均值, 可得 $m_1 = -0.00756$ 和 $m_5 = -0.00553$ 。

确定温度 T 和应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 时, 式 (2) 可以简化为:

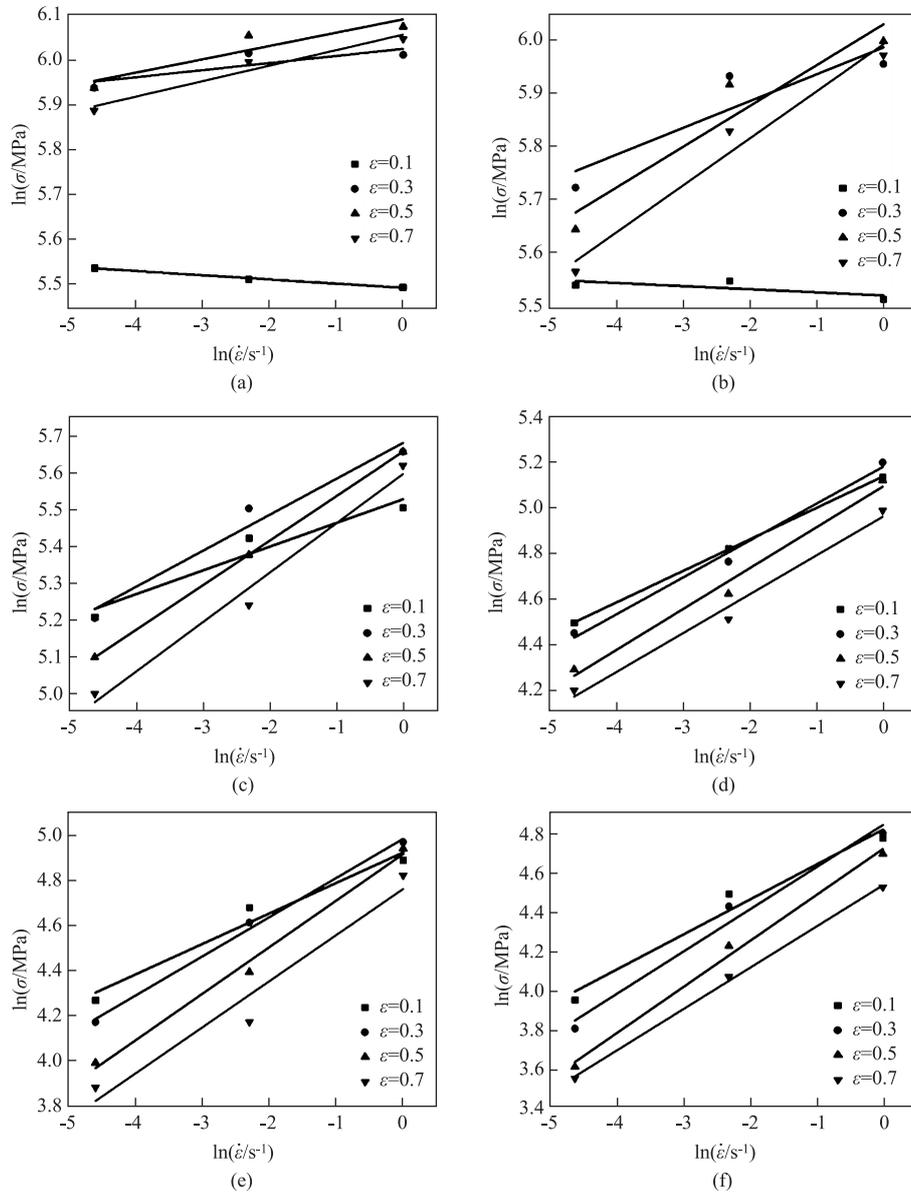


图 3 不同温度下的 $\ln\sigma$ - $\ln\dot{\epsilon}$ 关系曲线
 (a) 850 °C (b) 900 °C (c) 1000 °C (d) 1150 °C (e) 1200 °C (f) 1250 °C

Fig. 3 Relationship curves between $\ln\sigma$ and $\ln\dot{\epsilon}$ at different temperatures

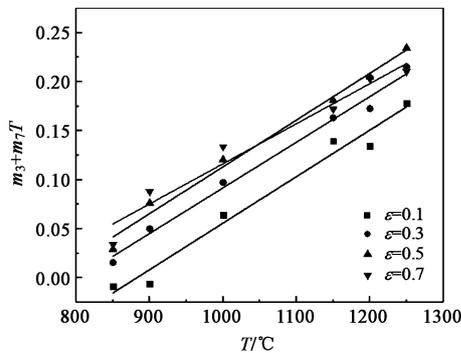


图 4 不同真应变下 (m_3+m_7T) 与 T 的关系曲线

Fig. 4 Relationship curves between (m_3+m_7T) and T at different true strains

$$\begin{cases} \ln\sigma = m_2 \ln\epsilon + \left(\frac{m_4}{\epsilon} + m_6\epsilon\right) + m_5 T \ln(1 + \epsilon) + D \\ D = \ln A + m_1 T + m_3 \ln\dot{\epsilon} + m_7 T \ln\dot{\epsilon} + m_8 \ln T \end{cases} \quad (5)$$

使用函数 $\ln\sigma = m_2 \ln\epsilon + \left(\frac{m_4}{\epsilon} + m_6\epsilon\right) + m_5 T \ln(1 + \epsilon) + D$ 分别对 850、900、1000、1150、1200 和 1250 °C 时 $\ln\sigma$ 与 ϵ 的关系进行拟合, 求取 m_2 、 m_4 和 m_6 的平均值, 得到 $m_2 = 0.58178$ 、 $m_4 \approx 0$ 、 $m_6 = 2.22779$ 。

综上所述, 将计算得到的系数值 $m_1 \sim m_8$ 带入式 (1), 求得 A 在不同温度和应变速率下的平均值, $A = 7.78591 \times 10^{-11}$ 。因此, 确定 N08120 耐蚀高温合

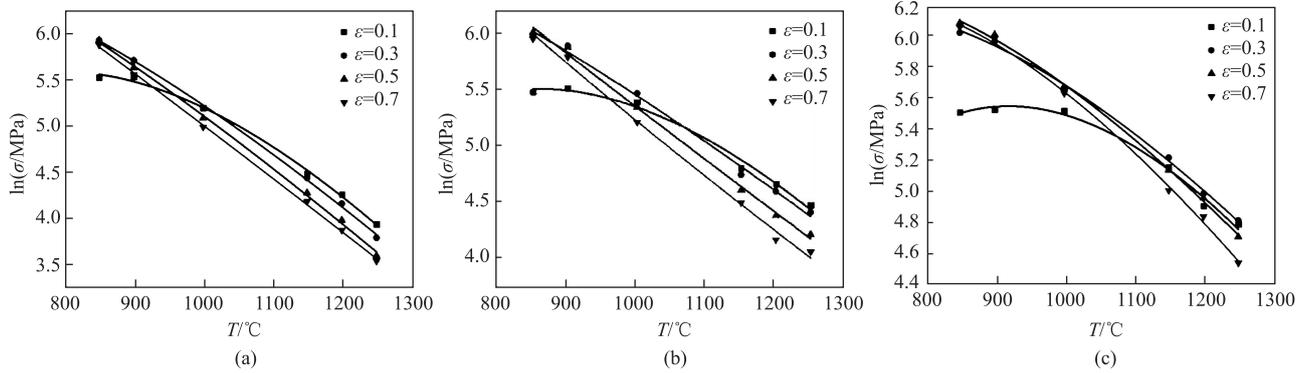


图 5 不同应变速率下 $\ln\sigma$ 与 T 的关系曲线
(a) 0.01 s^{-1} (b) 0.1 s^{-1} (c) 1 s^{-1}

Fig. 5 Relationship curves between $\ln\sigma$ and T at different strain rates

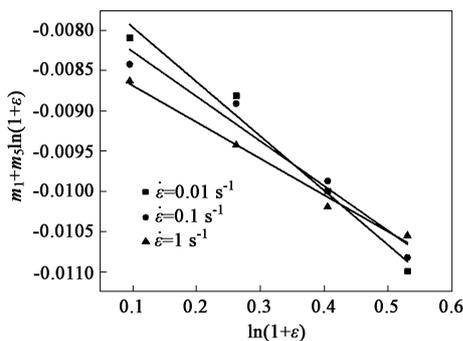


图 6 不同应变速率下 $[m_1 + m_3 \ln(1 + \epsilon)]$ 与 $\ln(1 + \epsilon)$ 的关系曲线
Fig. 6 Relationship curves between $[m_1 + m_3 \ln(1 + \epsilon)]$ and $\ln(1 + \epsilon)$ at different strain rates

金的本构方程为：

$$\sigma = 7.78591 \times 10^{-11} e^{-0.00756T} \epsilon^{0.58178} \dot{\epsilon}^{0.11781} \times (1 + \epsilon)^{-0.00553T} e^{2.22779\epsilon} T^{5.50686} \quad (6)$$

3 板材轧制模拟与实验

使用 FORGE_NxT1.0 锻造模拟软件进行板坯轧制模拟，板坯几何尺寸为 $240\text{ mm} \times 1800\text{ mm} \times 3000\text{ mm}$ 。有限元几何模型和模拟参数设置分别见图 7 和表 2。上、下轧辊的直径均为 $\Phi 2100\text{ mm}$ ，

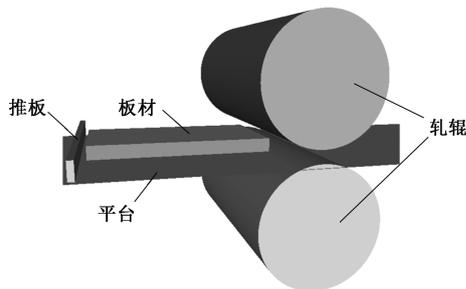


图 7 板材轧制模拟有限元模型
Fig. 7 Finite element model of sheet rolling simulation

上、下轧辊的轴心距离为 2320 mm ，轧辊的长度为 4250 mm ，转速为 $40\text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。板材的厚端为 240 mm ，六面体网格数量为 17280 ，轧制温度为 $1250\text{ }^\circ\text{C}$ 。图 8 为有限元模拟的轧制力-时间曲线，可知最大轧制力约为 50.2 MN 。通过采集电机功率峰值换算为轧制力的模拟值，其与本构方程计算值比较吻合。

表 2 板材轧制模拟参数

Table 2 Simulation parameter of sheet rolling simulation

参数	密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量/ MPa	泊松比	温度/ $^\circ\text{C}$	剪切摩擦 因数	轧制量/ mm
数值	8140	205000	0.308	1250	0.450	20

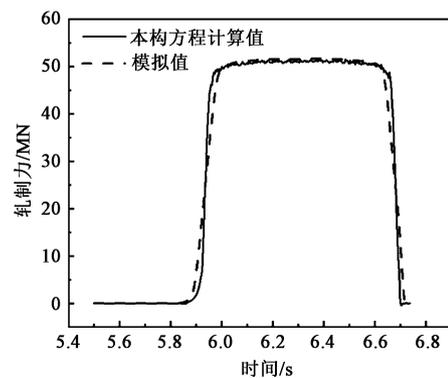


图 8 模拟的轧制力-时间曲线

Fig. 8 Curves of simulated rolling force and time

为了验证本构方程式 (6) 标定参数的准确性，进行了 3 个板材轧制实验，图 9 为板材轧制的实景图。板材加热至 $1250\text{ }^\circ\text{C}$ 保温 1 h ，然后快速转运至轧机进行轧制，转运时间约为 60 s 。通过采集电机功率峰值换算为轧制力，实验测得 3 个板材的轧制力峰值分别为 50.3 、 50.5 和 50.55 MN 。模拟轧制峰值应力略小于实验测得的峰值应力，这可能

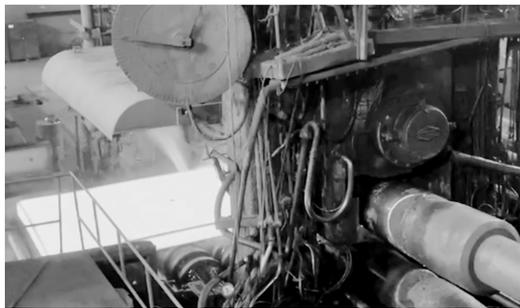


图 9 板材轧制实景图

Fig. 9 Scenes of sheet rolling

是由于数值模拟边界条件与实验有差别，如温度场和几何模型的差别。结果表明，Hansel-Spittle 本构模型能够较准确地预测 N08120 耐蚀高温合金的高温变形行为，为后续中厚板材锻造和轧制方案的优化提供数据支撑。

4 结论

(1) 通过对 N08120 耐蚀高温合金等温热压缩的真应力-真应变曲线进行观察，观察到再结晶软化现象，峰值流变应力随着温度的升高而降低，随着应变速率的升高而升高，且温度效应更显著。

(2) 研究了等温热压缩过程中的变形条件（温度和应变速度）对 N08120 耐蚀高温合金中晶粒尺寸演变的影响，降低热压缩温度或增大应变速率可促进晶粒细化。

(3) 确定了 N08120 耐蚀高温合金的 Hansel-Spittle 本构方程参数，并且通过板材轧制数值模拟和实验的峰值流变应力对比，验证了本构方程参数的准确性。

参考文献：

[1] 李小龙. 平价光伏电站发展历程与研究意义 [J]. 农村电气化, 2022, 418 (3): 66-70.
Li X L. Development history and research significance of affordable photovoltaic power station [J]. Rural Electrification, 2022, 418 (3): 66-70.

[2] Harsh D, Kaustubh S. Effect of addition of calcium-based reagents on defect reduction of cast Fe-Ni-Cr alloy [J]. Advances in Materials and Processing Technologies, 2022, 43: 1-20.

[3] Nakasaki M, Takasu I, Utsunomiya H. Application of hydrostatic integration parameter for free-forging and rolling [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2006, 177 (1): 521-524.

[4] Wang A, Thomson P F, Hodgson P D. A study of pore closure and welding in hot rolling process [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1996, 60: 95-102.

[5] Niu L Q, Zhang Q, Wang B, et al. A modified Hansel-Spittle constitutive equation of Ti-6Al-4V during cogging process [J]. Journal of Alloys and Compounds, 2022, 894: 162387.

[6] 丁慧莹, 管延锦, 李玉琦, 等. GGG70L 球墨铸铁的高温变形行为及其本构模型建立 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 249-255.
Ding H Y, Guan Y J, Li Y Q, et al. Deformation behavior at high temperature and establishment of constitutive model of GGG70L ductile iron [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 249-255.

[7] 王行, 王爱琴, 李昌义, 等. 核电阀门用不锈钢热变形行为研究及应用 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 221-226.
Wang H, Wang A Q, Li C Y, et al. Research and application on thermal deformation behavior for stainless steel of nuclear power valve [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 221-226.

[8] Niu L Q, Cao M, Liang Z L, et al. A modified Johnson-Cook model considering strain softening of A356 alloy [J]. Materials Science & Engineering: A, 2020, 789: 139612.

[9] 蔺永诚, 陈小敏, 陈明松. 镍基合金的热变形行为及智能热加工技术研究进展 [J]. 精密成形工程, 2021, 13 (1): 1-18.
Lin Y C, Chen X M, Chen M S. Recent development of high-temperature deformation behavior and intelligent processing of Ni-based superalloy [J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2021, 13 (1): 1-18.

[10] Lin Y C, Chen M S. A critical review of experimental results and constitutive descriptions for metals and alloys in hot working [J]. Material and Design, 2011, 32 (4): 1733-1759.

[11] 殷剑, 黎诚, 金康, 等. 7022 铝合金的高温力学性能和材料本构方程研究 [J]. 锻压技术, 2023, 48 (1): 237-244.
Yin J, Li C, Jin K, et al. Study on high temperature mechanical properties and material constitutive equation for 7022 aluminum alloy [J]. Forging & Stamping Technology, 2023, 48 (1): 237-244.

[12] 宁静, 王敖, 苏杰, 等. 新型中合金超高强度钢的热变形行为 [J]. 锻压技术, 2022, 47 (12): 234-239.
Ning J, Wang A, Su J, et al. Thermal deformation behavior on new medium alloy ultra-high strength steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2022, 47 (12): 234-239.

[13] 陈学文, 周会军, 陈天安. 基于 Hansel-Spittle 模型的 45Cr4NiMoV 合金热变形行为 [J]. 河南科技大学学报 (自然科学版), 2015, 36 (5): 1-4.
Chen X W, Zhou H J, Chen T A. Hot deformation behavior of 45Cr4NiMoV alloy steel based on Hansel-Spittle model [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2015, 36 (5): 1-4.