

Simufact Forming 在模拟 30CrNi2MoV 钢锭加热及锻造过程的应用

曾 云^{1,2}, 李卫平^{1,2}, 刘 升^{1,3}, 张志成^{1,2}, 胡瑞海^{1,2}, 周 杨^{1,2}

(1. 大冶特殊钢有限公司 研究分院, 湖北 黄石 435001; 2. 高品质特殊钢湖北省重点实验室, 湖北 黄石 435001;
3. 武汉科技大学 材料学部, 湖北 武汉 430081)

摘要: 运用 Gleeble 3800 热模拟机对 30CrNi2MoV 钢进行高温拉伸热模拟, 结果显示, 在锻造温度 ≥ 800 °C 时, 断面收缩率 $\geq 93.8\%$, 应力-应变曲线表现为塑性变形; 锻造温度在 800 °C 以下为脆性变形。运用 Simufact Forming 模拟 9 t 大钢锭的加热过程、锻造成形过程, 通过将加热模型与锻造模型数据有机结合起来, 精准控制终锻温度在 800 °C 以上, 确保终锻变形处于塑性变形区, 降低了锻材形变过程的裂纹敏感性, 有效地防止了锻造过程产生深裂纹, 从而改善了钢材表面质量。并将模拟结果与实践生产进行对比验证, 结果表明, 实际终锻温度与模拟温度相差不超过 10 °C, 表明模拟模型可以接受。此外, 将 9 t 大钢锭的加热时间优化为 21 h, 避免了加热时间过长造成的能源浪费以及材料组织晶粒粗大影响力学性能。

关键词: 30CrNi2MoV 钢; 锻造; 表面裂纹; 锻造温度; 加热时间

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.01.008

中图分类号: TG316.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2024) 01-0059-08

Application of Simufact Forming in heating and forging process simulation of 30CrNi2MoV steel ingot

Zeng Yun^{1,2}, Li Weiping^{1,2}, Liu Sheng^{1,3}, Zhang Zhicheng^{1,2}, Hu Ruihai^{1,2}, Zhou Yang^{1,2}

(1. R&D Institute, Daye Special Steel Co., Ltd., Huangshi 435001, China; 2. Hubei Key Laboratory of High Quality Special Steel, Huangshi 435001, China; 3. Materials Department, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081, China)

Abstract: Thermal simulation of high temperature tensile for 30CrNi2MoV steel was conducted by the Gleeble 3800 thermal simulator. The results show that when the forging temperature is ≥ 800 °C, the percentage reduction of area is $\geq 93.8\%$, the stress-strain curve appears plastic deformation, and it is brittle deformation when the forging temperature is below 800 °C. Then, the heating and forging processes of 9 t large steel ingot is simulated by Simufact Forming, and by combining the data of heating model and forging model, the final forging temperature is accurately controlled above 800 °C to ensure that the final forging deformation is in the plastic deformation zone and reduce the crack sensitivity during the deformation process of the forging material. Furthermore, the deep cracks is effectively prevented from occurring during the deformation process to improve the surface quality of steel, and the simulation results are compared and verified with the actual production. The results show that the difference between the actual final forging temperature and the simulated temperature is less than 10 °C, which indicates that the simulation model is acceptable. The heating time of 9 t large steel ingot is optimized to 21 h to avoid excessive heating time, which causes energy waste and coarse grains of the material structure to affect the mechanical properties.

Key words: 30CrNi2MoV steel; forging; surface crack; forging temperature; heating time

针对直径在 $\Phi 400$ mm 以上的大规格锻材, 为保证内部质量, 要求控制压缩比 ≥ 4.0 , 通常需要使用锭重在 9 t 及以上的大钢锭的 (直径在 $\Phi 820$ mm 以上)。然而对于大钢锭的加热工艺, 目前工业上一般按照 JB/T 6052—2005^[1] 或经验公式^[2] 来制定,

加热时间容易过短或者过长, 尤其当钢种不同时, 合理的加热时间难以精准计算。保温时间过短会造成终锻温度偏低, 导致钢材热塑性差, 锻造过程容易产生深裂纹而报废; 保温时间过长会造成成本的浪费, 同时容易引起材料过热、粗晶, 最终影响材料的力学性能。

本文先通过对 30CrNi2MoV 钢材料进行 Gleeble 热拉伸模拟试验, 研究材料的高温塑性与锻造温度的关系。再运用 Simufact Forming 模拟软件中的热处理模块, 模拟了 9 t 大钢锭在加热过程中表面、1/4

收稿日期: 2023-09-12; 修订日期: 2023-12-01

基金项目: 湖北省自然科学基金联合基金项目 (2022CFD078)

作者简介: 曾 云 (1988-), 男, 学士, 工程师

E-mail: zengyuncq@163.com

直径、中心 3 个质点的温度云图，由此可以判断出坯料的透烧情况。然后将加热模型的数据导入 Simufact Forming 的自由锻模块，模拟出锻造成形过程及温度的变化。将加热模型与锻造模型数据有机结合起来，最终实现精准控制终锻温度，确保材料在锻造变形过程处于良好的塑性变形区，从而提升锻材的表面质量，同时，通过优化加热保温时间避免

了加热时间过长造成的粗晶及能源浪费。

1 试验材料及工艺

1.1 化学成分

GJB 1220A—2020^[3]的要求及试验钢成品成分见表 1。

表 1 30CrNi2MoV 钢的化学成分（%，质量分数）
Table 1 Chemical compositions of 30CrNi2MoV steel（%，mass fraction）

项目	C	Mn	P	S	Si	Cr	Mo	Ni	V
GJB 1220A—2020 要求	0.26~0.33	0.30~0.60	≤0.030	≤0.030	0.17~0.37	0.60~0.90	0.20~0.30	2.00~2.50	0.15~0.30
试验钢	0.30	0.55	0.012	0.008	0.25	0.85	0.25	2.20	0.18

1.2 工艺流程

30CrNi2MoV 钢的锻造工艺流程为：20 t 电炉→LF 炉外精炼→VD 真空脱气→模铸 9 t 钢锭→钢锭加热→锻造成材（Φ420 mm）→退火→检验、矫直、砂轮扒皮→超声探伤、磁粉探伤、精整→包装入库。

2 试验方法

2.1 Gleeble 3800 高温拉伸热模拟

将 Φ10 mm×121.5 mm 的 30CrNi2MoV 钢热拉伸试样在 Gleeble 3800 热模拟试验机上进行高温拉伸

热模拟试验^[4-6]。参数设置为：升温速率为 5℃·s⁻¹，保温时间为 5 min，应变速率为 0.1 s⁻¹。

2.2 Simufact Forming 加热过程模拟

运用 Simufact Forming 软件中的“热处理模块”对 9 t 的 30CrNi2MoV 钢锭加热过程进行仿真模拟^[7]。为研究 9 t 钢锭加热工艺的合理性，分别模拟了加热时间为 19、21 和 23 h（预热及升温工艺相同，仅保温时间不同，为方便描述，统一将时间为 19 h 的工艺称为 1 组，21 h 的工艺称为 2 组，23 h 的工艺称为 3 组）的加热过程，工艺曲线图如图 1 所示。加热模型及网格划分如图 2 所示^[8]。

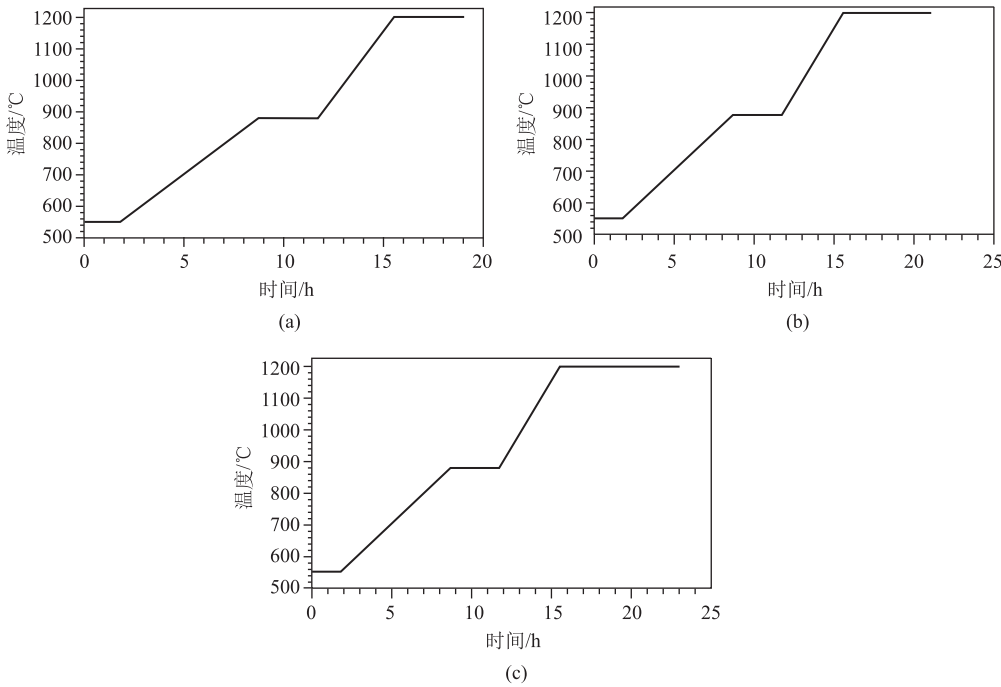


图 1 不同加热时间下的工艺曲线
(a) 19 h (b) 21 h (c) 23 h
Fig. 1 Process curves under different heating time

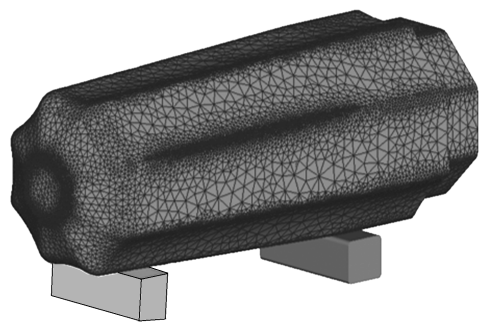


图 2 加热模型及网格划分
Fig. 2 Heating model and meshing

2.3 Simufact Forming 锻造成形模拟

将 9 t 的 30CrNi2MoV 钢锭加热过程的模拟结果导入 Simufact Forming 软件中的“自由锻”模块，对锻造过程的镦粗、拔长、锻造成形过程进行模拟，如图 3 所示。

3 试验结果与分析

3.1 Gleeble 3800 高温拉伸热模拟结果分析

30CrNi2MoV 钢在 650~1100 ℃ 温度区间的断面收缩率曲线如图 4 所示，应力-应变图如图 5 所示。

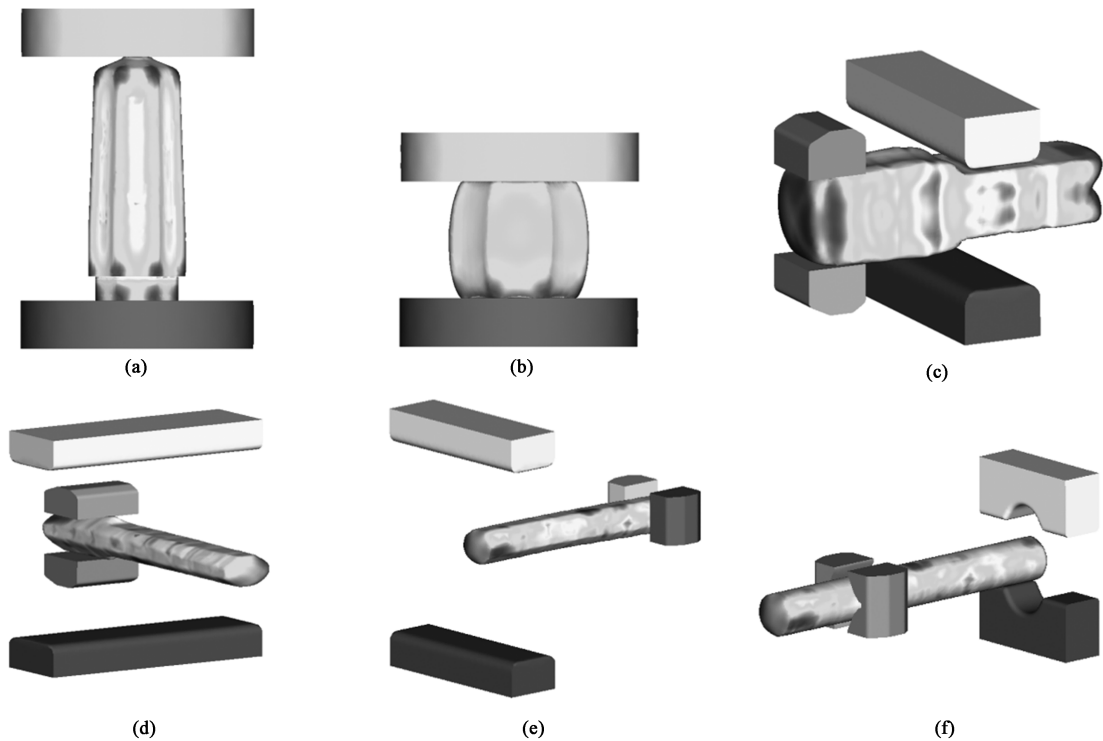


图 3 锻造工艺过程
(a) 镦粗前 (b) 镦粗 (c) 拔长 (d) 锻八边形 (e) 锻十六边形 (f) 甩圆
Fig. 3 Forging process
(a) Before upsetting (b) Upsetting (c) Drawing (d) Forged into octagons
(e) Forged into hexagon (f) Round forging

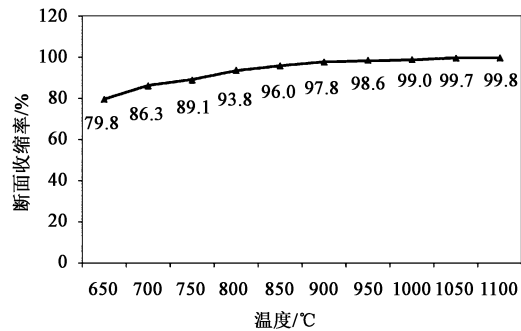


图 4 断面收缩率与温度的关系曲线
Fig. 4 Relationship curve of percentage reduction of area and temperature

750 ℃ 及以下，材料为脆性断裂，800 ℃ 及以上为塑性断裂^[9-10]。由于裂纹敏感性与材料断面收缩率有很强的相关性^[11]，断面收缩率越小，裂纹敏感性越强。从图 4 可以看出，断面收缩率在 800 ℃ 以下时的斜率明显增大，塑性显著减小，裂纹敏感性显著增强，因此终锻温度应控制在 800 ℃ 以上^[12-13]。

3.2 Simufact Forming 加热过程模拟结果分析

为对比分析钢锭整个截面的透烧情况，选取钢锭表面、1/4 直径、中心 3 个质点（依次记为点

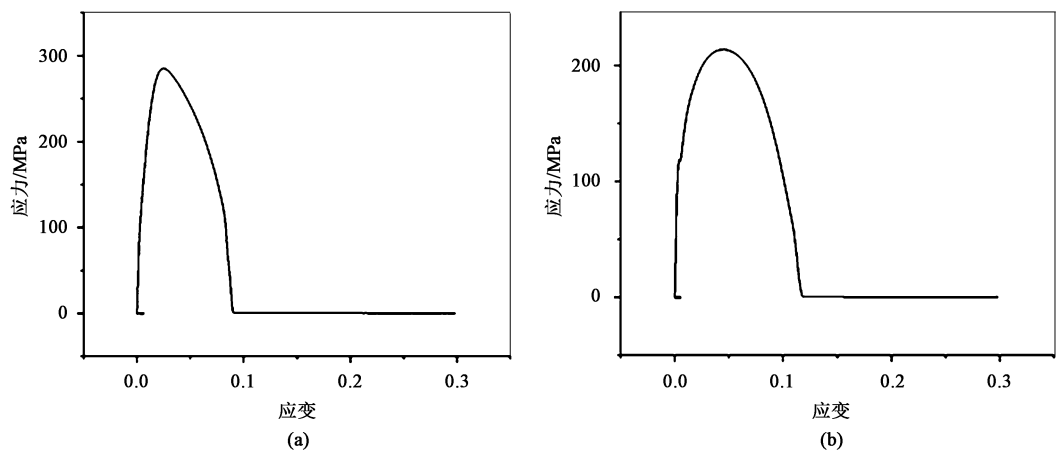


图 5 不同温度下的应力-应变曲线
(a) 750 °C (b) 800 °C

Fig. 5 Stress-strain curves at different temperatures

3、2、1) 进行追踪, 加热模拟结束后温度分别如图 6 所示。通过对比发现, 3 种工艺下的表面温度相差不大, 2 组钢锭 1/4 直径处的温度比 1 组的高 9.41 °C, 比 3 组的低 5.72 °C; 2 组钢锭中心的温度比 1 组的高 13.48 °C, 比 3 组的低 8.21 °C。1 组钢锭

表面与中心的温度差为 22.96 °C, 2 组的为 10.47 °C, 3 组的为 2.86 °C。

3.3 Simufact Forming 锻造成形模拟结果分析

锻造成形模拟结束后, 钢材表面温度如图 7 所示, 1 组钢锭成材后头、中和尾部的温度分别为

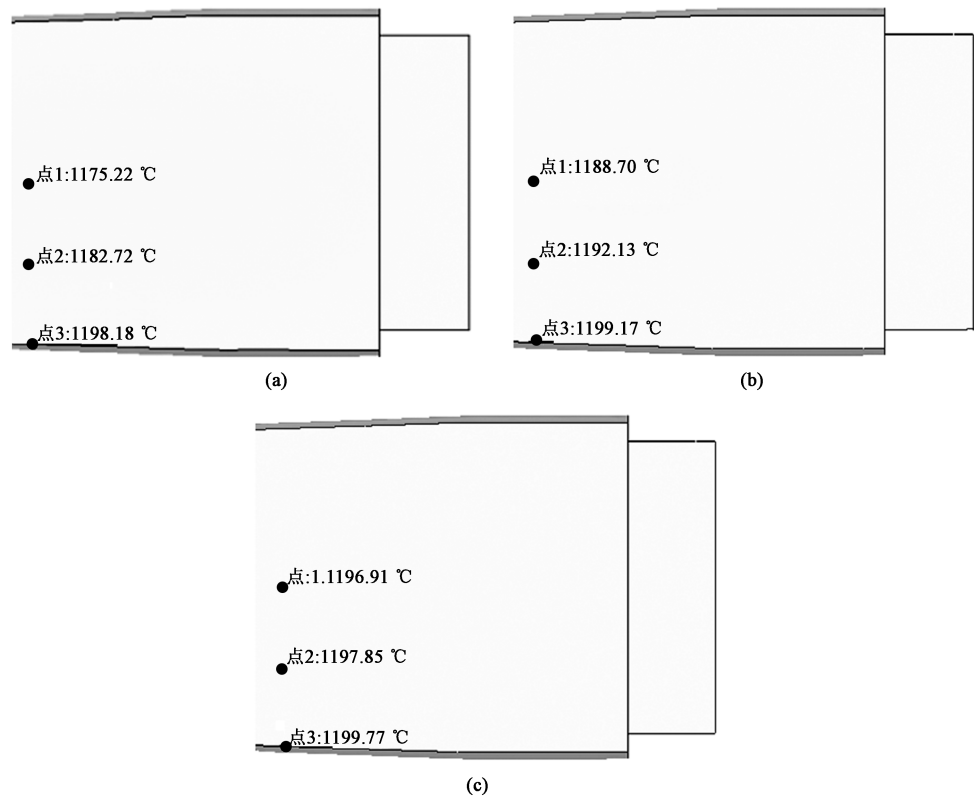


图 6 不同加热时间下钢锭的表面、1/4 直径、中心处的温度
(a) 19 h (b) 21 h (c) 23 h

Fig. 6 Temperatures of surface, 1/4 diameter and center in ingot under different heating time

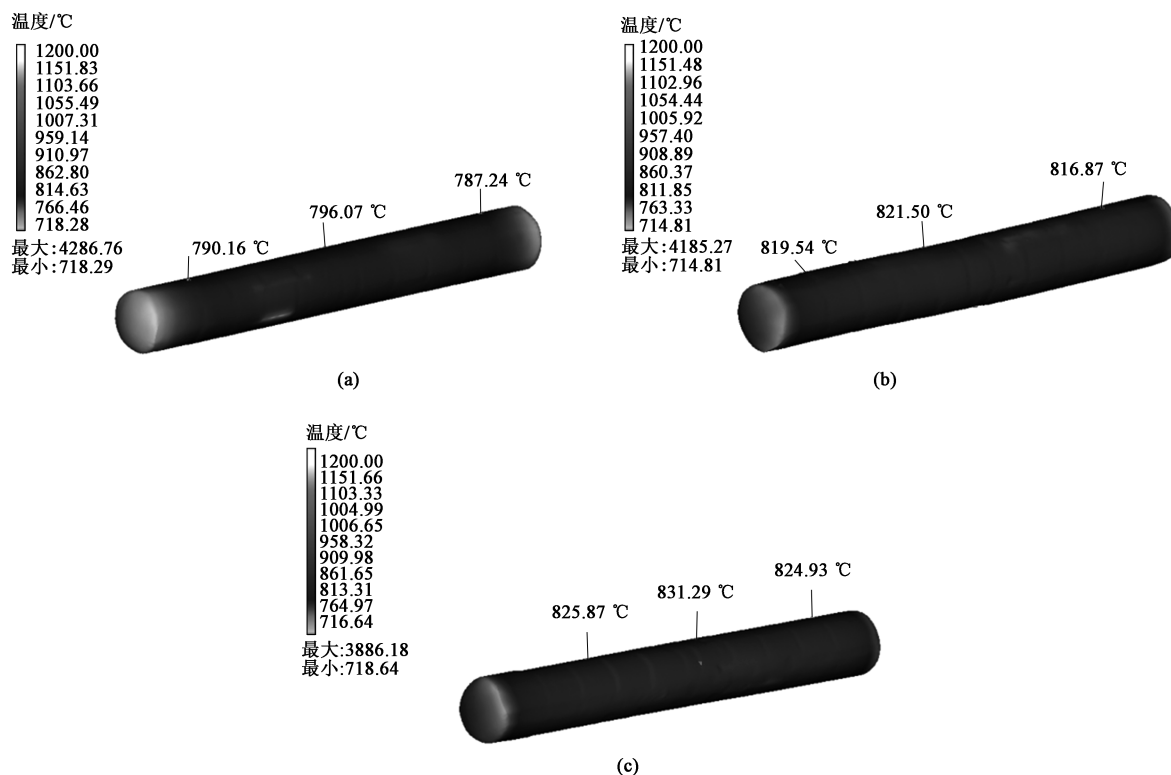


图 7 不同加热时间下终锻温度场分布

(a) 19 h (b) 21 h (c) 23 h

Fig. 7 Final forging temperature field distributions under different heating time

790.16、795.07 和 787.24 °C；2 组钢锭成材后头、中和尾部的温度分别为 819.54、821.50 和 816.87 °C；3 组钢锭成材后头、中和尾部的温度分别为 825.87、831.29 和 824.93 °C。由 3.1 节可知，终锻温度下，1 组钢锭处于脆性变形区，2 组和 3 组处于塑性变形区。

3.4 实践生产过程验证

按 2.2 节中 3 种加热工艺在台车式蓄热加热炉（有效尺寸为 8 m×3 m×3 m、燃料为混合煤气）中进行实践加热，加热后按照 2.3 节中的锻造工艺在 60 MN 快锻机进行实践锻造。将模拟结果与实践生产进行对比验证，模拟与实际终锻温度如图 8 所示。成材后经过砂轮扒皮、磁粉探伤后的缺陷数量见表 2 和图 9，1/4 直径处的晶粒度情况见表 2 和图 10。

对于钢材中间部位，1 组的实际温度比模拟温度低 7.07 °C，2 组的实际温度比模拟温度低 5.50 °C，3 组的实际温度比模拟温度低 1.27 °C。3 组工艺下实际终锻温度与模拟温度差均不超过 10 °C，模型可以接受。钢材头、尾部受环境温度及

夹钳的影响较大，温差在 3.87~14.16 °C 之间。

由于 1 组下的终锻温度低于 800 °C，部分变形处于脆性变形区，表面质量较差，裂纹深度为 5.0 mm，见图 9a；由于 2、3 组下的终锻温度大于 800 °C，整个变形过程处于塑性变形区，表面质量较好，2 组实物表面质量对应图 9b，3 组实物表面质量对应图 9c，可以接受^[14-15]。

观察 3 组工艺下钢锭成材后 1/4 直径处的晶粒度，发现 1 组的晶粒度为 6 级，由于形变温度较低，组织出现了混晶，见图 10a；2 组的晶粒度为 7 级，较理想，见图 10b；3 组的晶粒度较粗大，为 5 级^[15]，见图 10c。因此，针对 9 t 的 30CrNi2MoV 钢锭而言，21 h 为最优加热时间。

4 结论

(1) 通过 Gleeble 3800 高温热模拟拉伸试验，测试出 30CrNi2MoV 钢材料在 650~1100 °C 下的断面收缩率为 79.8%~99.8%，温度≥800 °C 时，断面收缩率≥93.8%，应力-应变曲线表现为塑性变形；

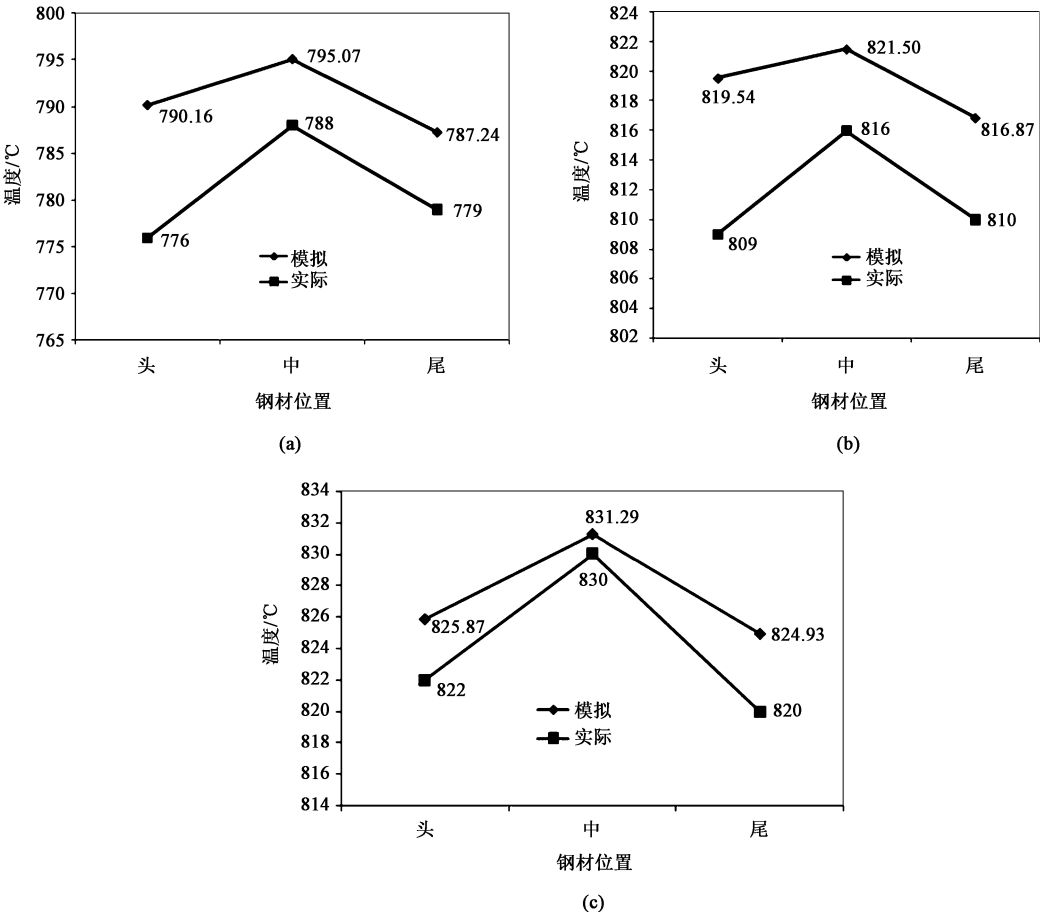


图 8 不同加热时间下的模拟与实际终锻温度分布曲线

(a) 19 h (b) 21 h (c) 23 h

Fig. 8 Distribution curves of simulated and actual final forging temperatures under different heating time

表 2 30CrNi2MoV 钢的缺陷指标及晶粒度
Table 2 Defect indexes and grain size of 30CrNi2MoV steel

试验组别	加热时间/ h	缺陷数量/ 个	缺陷长度/ mm	缺陷深度/ mm	晶粒度/级
1 组	19	21	8	5.0	6 (混晶)
2 组	21	5	4	1.2	7
3 组	23	4	3	0.8	5

800 ℃ 以下为脆性变形。实际生产将终锻温度控制在 800 ℃ 以上，表面质量良好。

(2) 通过对比实践生产与模拟的终锻温度发现，钢材中间部位的温差在 7.07~1.27 ℃，不超过 10 ℃，模型可以接受。运用 Simufact Forming 模拟将加热模型与锻造模型数据有机结合起来，可以精准控制终锻温度。

(3) 加热时间不足会导致锻造温度过低，表面容易产生深裂纹而报废，若温度过高、加热时间过

长，会导致组织晶粒粗大，影响力学性能。通过 Simufact Forming 模拟及生产实践发现，对 9 t 的 30CrNi2MoV 钢锭而言，21 h 为最优加热时间，避免了加热时间过长造成的能源浪费以及材料组织晶粒粗大影响力学性能。

参考文献：

[1] JB/T 6052—2005，钢质自由锻件加热通用技术要求 [S]. JB/T 6052—2005，General specifications for heating up of steel free forgings [S].

[2] 夏琴香，单会星，朱羽辰，等. 运用 Deform 数值模拟的钢锭加热规范的制定 [J]. 现代制造工程，2012，6 (10)：55-59. Xia Q X, Shan H X, Zhu Y C, et al. Establishment of ingot heating specification based on numerical simulation by Deform [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012, 6 (10)：55-59.

[3] GJB 1220A—2020，火炮零件用合金结构钢棒规范 [S]. GJB 1220A—2020，Specification for alloy structure steel bar for artillery parts [S].

[4] 赵宝纯，李桂艳，杨静. Gleeble-3800 热模拟试验机的应用研究 [J]. 鞍钢技术，2010，(5)：28-31.

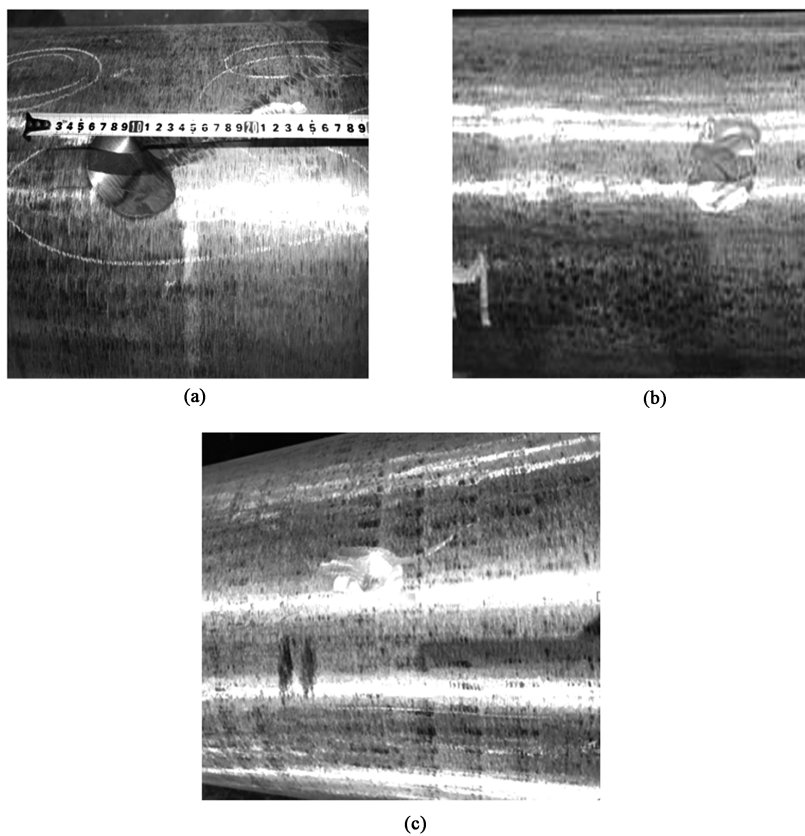


图 9 不同加热时间下成材后的表面情况

(a) 19 h (b) 21 h (c) 23 h

Fig. 9 Surface conditions after forming under different heating time

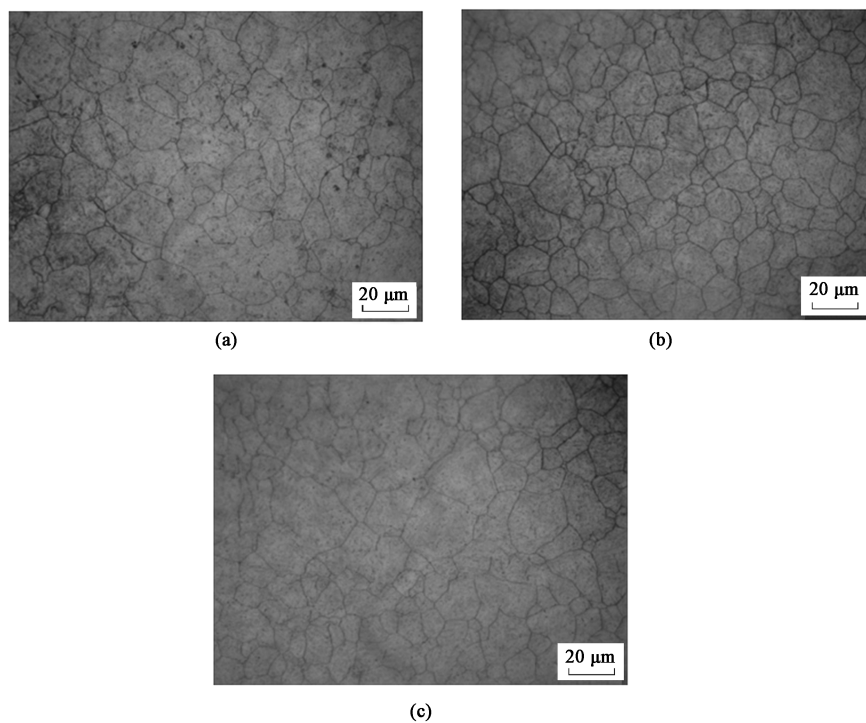


图 10 不同加热时间下成材后的晶粒度

(a) 19 h (b) 21 h (c) 23 h

Fig. 10 Grain size after forming under different heating time

- Zhao B C, Li G Y, Yang J. Study on application of Gleeble-3800 thermal simulated test machine [J]. *Angang Technology*, 2010, (5): 28-31.
- [5] 胡加佳, 熊自柳, 薛峰, 等. Gleeble-3800 热压缩模块低应力加载试验设计 [J]. *理化检验-物理分册*, 2010, 53 (9): 638-641.
- Hu J J, Xiong Z L, Xue F, et al. Testing design of low stress loading of compression module on Gleeble-3800 thermal simulation testing machine [J]. *Physical Testing and Chemical Analysis: Part A: Physical Testing*, 2010, 53 (9): 638-641.
- [6] 王哨兵, 孙文强, 王曼, 等. Gleeble 热模拟在 S32750 奥氏体-铁素体双相钢中的热塑性应用研究 [J]. *特殊钢*, 2022, 43 (4): 5-9.
- Wang S B, Sun W Q, Wang M, et al. Application of Gleeble thermal simulation for hot plasticity of S32750 austenite-ferrite duplex steel [J]. *Special Steel*, 2022, 43 (4): 5-9.
- [7] 刘劲松, 王传辉, 孙丹丹. Simufact Forming 金属成型工艺仿真标准教程 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2021.
- Liu J S, Wang C H, Sun D D. Metal Forming Process Simulation Standard Tutorial by Simufact Forming Software [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2021.
- [8] 张华伟, 黄艳萍, 吴佳璐. 轧制差厚板成形极限的理论预测与数值模拟 [J]. *锻压技术*, 2022, 47 (3): 59-64.
- Zhang H W, Huang Y P, Wu J L. Theoretical prediction and numerical simulation on forming limit for tailor rolled blank [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2022, 47 (3): 59-64.
- [9] 刘绍波, 李晓峰. 某曲轴热模锻成形工艺设计及优化 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (8): 57-65.
- Liu S B, Li X F. Design and optimization on hot die forging process for a crankshaft [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (8): 57-65.
- [10] 束德林, 陈九磅, 凤仪. 工程材料力学性能 [M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- Shu D L, Chen J B, Feng Y. Mechanical Properties of Engineering Materials [M]. 2nd Edition. Beijing: China Machine Press, 2007.
- [11] 郑芳, 宋红梅. Gleeble 3800 热模模拟在宝钢的典型应用与功能开发 [J]. *宝钢技术*, 2003, (5): 29-32, 59.
- Zheng F, Song H M. Typical applications and functional development of Gleeble 3800 at Baosteel [J]. *Baosteel Technology*, 2003, (5): 29-32, 59.
- [12] 王宁涛, 王利军, 郭俊成, 等. 16MnCr5 高温热塑性及连续冷却转变曲线测定及应用 [J]. *特殊钢*, 2022, 43 (4): 120-124.
- Wang N T, Wang L J, Guo J C, et al. Determination and application of high temperature thermoplasticity and continuous cooling transition (CCT) curve of 16MnCr5 [J]. *Special Steel*, 2022, 43 (4): 120-124.
- [13] 卢蔚红. 基于数值模拟的车用法兰连接件多工位冷锻工艺研究与改进 [J]. *锻压技术*, 2023, 48 (2): 30-35, 110.
- Lu W H. Research and improvement on multi-station cold forging process for vehicle flange connector based on numerical simulation [J]. *Forging & Stamping Technology*, 2023, 48 (2): 30-35, 110.
- [14] 赵景存, 朱叶. 钎具钢 55SiMnMo 轧材表面裂纹的成因分析及工艺改进 [J]. *特殊钢*, 2023, 44 (1): 45-48.
- Zhao J C, Zhu Y. Cause analysis on surface crack of drill steel 55SiMnMo rolling product and process improvement [J]. *Special Steel*, 2023, 44 (1): 45-48.
- [15] 徐亮, 李涛, 马永强. 退火工艺对高温轴承钢 M50 钢材晶粒度的影响 [J]. *特殊钢*, 2022, 43 (6): 50-53.
- Xu L, Li T, Ma Y Q. Effect of annealing process on grain size of high temperature bearing steel M50 [J]. *Special Steel*, 2022, 43 (6): 50-53.

第 20 届国际金属成形会议征文通知

(The 20th International Conference on Metal Forming)

第 20 届国际金属成形会议 (The 20th International Conference on Metal Forming) 将于 2024 年 9 月 15-18 日于波兰克拉科夫召开。国际金属成形系列会议由克拉科夫 AGH 科技大学于 1974 年发起, 至今已举办 20 届。2022 年, 中国机械工程学会塑性工程分会和太原理工大学首次以线上+线下混合形式成功举办了“第十九届国际金属成形会议”。在本次第 20 届国际金属成形会议期间, 预计将邀请 6 场大会报告和 200 余场口头报。中国机械工程学会塑性工程分会拟组织参加本次会议。

一、主办单位: 克拉科夫 AGH 科技大学

二、会议网址: <http://metalfforming.agh.edu.pl/>

三、重要时间节点

· 全文投稿截止时间: 2024 年 1 月 25 日

· 全文接收告知时间: 2024 年 5 月 15 日

· 提前缴费截止时间: 2024 年 6 月 15 日

· 会议召开时间: 2024 年 9 月 14-18 日

四、联系方式

联系人: Anna Smyk, Conference Secretariat, E-mail: barana@agh.edu.pl

联系地址: AGH University Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland

tel. +48 12 617 56 99, E-mail: metalfforming@agh.edu.pl

中国机械工程学会塑性工程分会