

## 核电阀门用不锈钢热变形行为研究及应用

王 行<sup>1,2,3</sup>, 王爱琴<sup>1</sup>, 李昌义<sup>2,3</sup>, 谢敬佩<sup>1</sup>, 禹兴胜<sup>2,3</sup>, 宋玉冰<sup>2,3</sup>

(1. 河南科技大学 材料科学与工程学院, 河南 洛阳 471023; 2. 洛阳中重铸锻有限责任公司, 河南 洛阳 471039;  
3. 中信重工机械股份有限公司, 河南 洛阳 471039)

**摘要:** 针对大型特厚 F316H 不锈钢阀门锻件易出现粗晶、混晶和探伤无底波等难题, 对其高温下的流变行为进行了研究, 以探索最佳的热加工变形工艺参数来指导实际生产应用。采用 Gleeble-1500D 热模拟试验机, 在应变速率为  $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为  $950 \sim 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$  条件下开展了热压缩变形试验。基于 Arrhenius 模型, 建立了高温流变应力本构方程, 并计算得到热变形激活能为  $393.857 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。基于 DMM 动态材料模型, 建立了应变量为 0.8 的热加工图, 在变形温度为  $1100 \sim 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为  $0.005 \sim 0.01 \text{ s}^{-1}$  时, 功率耗散因子达到峰值, 结合微观金相分析, 该变形条件下晶粒发生了充分的动态再结晶, 可作为热加工的主加工区域。结合热加工图, 设计了核电不锈钢阀体锻件 (规格为 12 寸) 的锻造工艺, 并经生产验证得到了晶粒度、无损探伤和力学性能优异的锻件。

**关键词:** F316H 不锈钢; 高温流变应力; 本构模型; 热加工图; 动态再结晶

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2022.12.033

**中图分类号:** TG316

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2022) 12-0221-06

## Research and application on thermal deformation behavior for stainless steel of nuclear power valve

Wang Hang<sup>1,2,3</sup>, Wang Aiqin<sup>1</sup>, Li Changyi<sup>2,3</sup>, Xie Jingpei<sup>1</sup>, Yu Xingsheng<sup>2,3</sup>, Song Yubing<sup>2,3</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;  
2. Luoyang CITIC HIC Casting & Forging Co., Ltd., Luoyang 471039, China;  
3. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, China)

**Abstract:** For the problems that coarse grains, mixed grains and without bottom wave in detection of large extra-thick F316H stainless steel valve forgings, the thermal rheological behavior at high temperature was studied to explore the best thermal working process parameters so as to guide practical production and application, and the thermal compression deformation tests were carried out by the thermal simulation tester Gleeble-1500D under the conditions of the strain rates of  $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$  and the deformation temperatures of  $950 \sim 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . Then, the constitutive equation of high temperature rheological stress was established based on the Arrhenius model, and the thermal deformation activation energy was calculated to be  $393.857 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ . Furthermore, the thermal processing map with the strain of 0.8 was established based on the DMM dynamic material model, and when the deformation temperature was  $1100 \sim 1150 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and the strain rate was  $0.005 \sim 0.01 \text{ s}^{-1}$ , the power dissipation factor reached the peak value. Combined with microscopic metallographic analysis, the grains within this range underwent sufficient dynamic recrystallization, which could be used as the main processing area of thermal working. Finally, combined with the thermal processing map, the forging process of nuclear power stainless steel valve body forgings (12 inches in size) was designed, and the forgings with excellent grain size, non-destructive flaw detection and mechanical properties could be obtained through the production verification.

**Key words:** F316H stainless steel; high temperature rheological stress; constitutive model; thermal processing map; dynamic recrystallization

核电阀门是核电站安全运行不可或缺的关键零

部件, 调节控制着核电站管道内如高温水蒸汽、放射性介质、辐照腐蚀物、氦气和钠等流体介质的流量、温度和压力等<sup>[1]</sup>。核电阀门通常按用途分为核岛、常规岛和电站辅助阀门, 鉴于其复杂苛刻的应用工况及核电安全性要求, 各项理化检验指标均高于常规阀门的要求。核岛阀门利用奥氏体不锈钢材料具有优异的强韧性、抗腐蚀、耐高温和抗辐照等

收稿日期: 2022-01-20; 修订日期: 2022-04-26

基金项目: 洛阳市科技重大专项 (2101005A)

作者简介: 王 行 (1989-), 男, 博士研究生, 工程师

E-mail: wanghangred@163.com

通信作者: 王爱琴 (1964-), 女, 博士, 教授

E-mail: aiqin\_wang888@163.com

特点<sup>[2-3]</sup>, 被设计应用在长期服役于高达 650 ℃ 温度的四代核电钠冷快中子反应堆中。为实现阀门不锈钢锻件的组织晶粒细小均匀, 需对锻造工艺中的主变形温度区间和应变速率等参数进行合理设计。

本文开展了 F316H 不锈钢热压缩模拟试验, 对其热变形行为进行了研究, 并建立了热加工图来分析材料在热加工过程中的能量耗散与变形温度和应变速率的关系, 旨在为生产工艺提供理论指导<sup>[4-10]</sup>。基于研究结果, 对核电不锈钢阀门锻件的锻造工艺进行优化, 通过生产验证实现了良好的实施效果。

## 1 试验材料与方法

试验材料选用 F316H 不锈钢, 化学成分 (% , 质量分数) 为: C (0.04~0.05)、Si ( $\leq 0.6$ )、Mn (1.0~2.0)、Cr (17.0~18.0)、Ni (11.5~12.5)、Mo (2.5~2.7)、N (0.05~0.07)、O ( $\leq 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ) 和 H ( $\leq 5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )。采用 Gleeble-1500D 热模拟试验机进行热压缩模拟试验, 高温压缩试样尺寸为  $\Phi 8 \text{ mm} \times 13 \text{ mm}$ , 变形温度为 950~1250 ℃, 温度间

隔为 50 ℃, 应变速率为  $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ , 压缩量为 55% (最大真应变为 0.8)。热压缩试验完成后立刻将试样水淬, 沿中心轴线切开, 然后进行抛磨、腐蚀, 在光学显微镜下观察并分析金相组织。

## 2 结果与讨论

### 2.1 真应力-真应变曲线分析

图 1 为 F316H 不锈钢在不同变形温度和应变速率下的真应力-真应变曲线。可以看出: 变形初始阶段由于加工硬化, 真应力急剧增加, 随着真应变的增加材料发生动态回复, 真应力的增长率降低; 曲线达到峰值应力后, 动态再结晶软化逐渐起主导作用, 加工硬化与软化 (动态回复和动态再结晶) 作用相互抵消, 真应力趋于稳定。同一温度下, 随着真应变的增大, 软化时间变短, 软化作用降低, 导致真应力随之增大。同一应变速率下, 随着变形温度的升高, 原子扩散速率增大, 软化作用 (动态回复和动态再结晶) 增强, 真应力随之减小。材料整体呈现出典型的动态再结晶真应力曲线<sup>[4,7-11]</sup>。

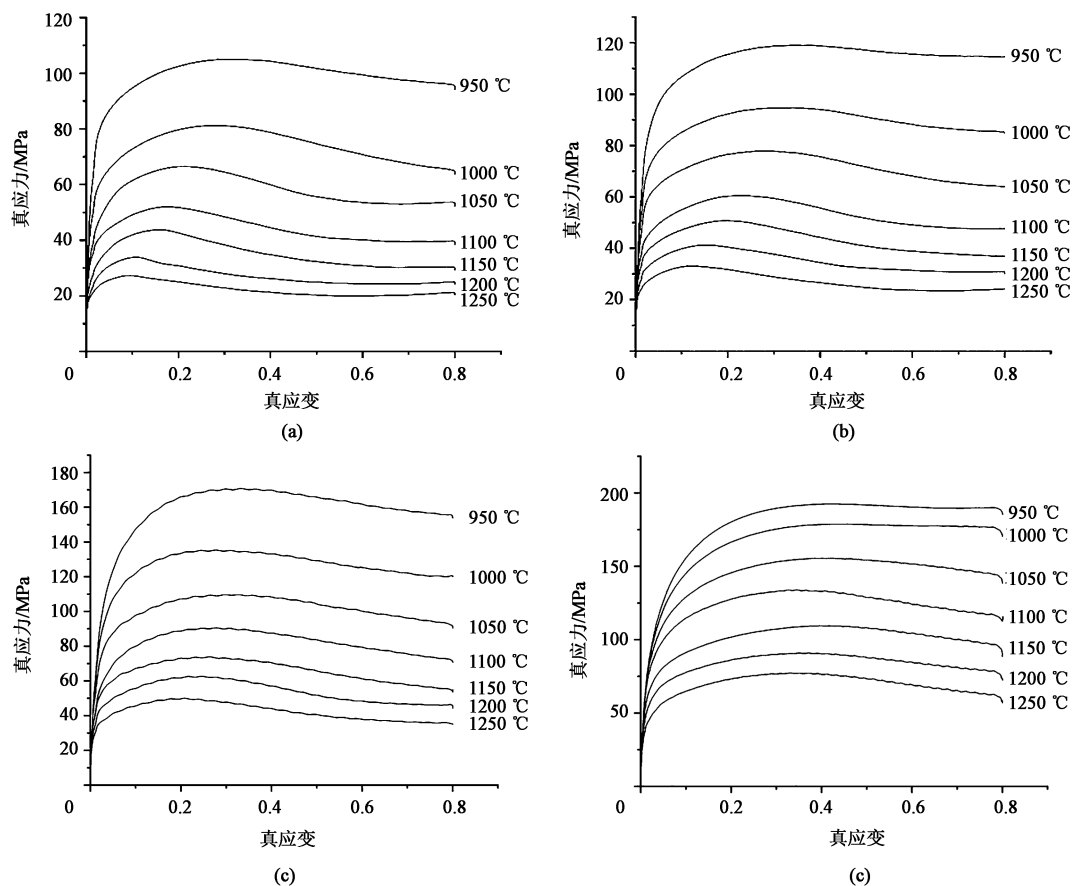


图 1 不同应变速率及变形温度下的真应力-真应变曲线

(a)  $0.001 \text{ s}^{-1}$  (b)  $0.01 \text{ s}^{-1}$  (c)  $0.1 \text{ s}^{-1}$  (d)  $1 \text{ s}^{-1}$

Fig. 1 True stress-true strain curves at different strain rates and deformation temperatures

## 2.2 峰值应力本构方程构建

Zener-Hollomon 参数<sup>[12]</sup> (参数  $Z$ ) 为温度补偿的应变速率表达式如式 (1) 所示:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q/RT) = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \quad (1)$$

式中:  $\dot{\varepsilon}$  为应变速率;  $\sigma$  为峰值应力;  $Q$  为热变形激活能;  $R$  为理想气体常数;  $T$  为变形温度;  $A$ 、 $\alpha$ 、 $n$  为材料常数。

针对不同应力条件, 式 (1) 有以下形式:

$$\dot{\varepsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp[-Q/(RT)], \alpha\sigma < 0.8 \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp[-Q/(RT)], \alpha\sigma > 1.2 \quad (3)$$

$$\dot{\varepsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp[-Q/(RT)], \text{所有 } \sigma \quad (4)$$

式中:  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $n_1$ 、 $\beta$  均为材料常数, 其中  $\alpha = \beta/n_1$ 。

对式 (2) ~ 式 (4) 两边同时取对数可得:

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - Q/(RT) \quad (5)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A_2 + \beta\sigma - Q/(RT) \quad (6)$$

$$\ln \dot{\varepsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - Q/(RT) \quad (7)$$

$$Q = R \left[ \frac{\partial \ln \dot{\varepsilon}}{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]} \right]_T \cdot \left[ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma)]}{\partial (1/T)} \right]_{\dot{\varepsilon}} \quad (8)$$

当变形温度恒定时, 取峰值应力, 并根据试验得到的真应力-真应变曲线数据作图  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$  和  $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$ , 如图 2a 和图 2b 所示, 通过线性拟合可得  $n_1 = 6.633$ 、 $\beta = 0.0786 \text{ MPa}^{-1}$ 、 $\alpha = 0.0118 \text{ MPa}^{-1}$ 。当变形温度恒定时, 如图 2c 所示, 作图  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ , 求得  $n = 4.75$ 。当应变速率恒定时, 如图 2d 所示, 作图  $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ , 进行线性回归, 得到热变形激活能  $Q = 393.857 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。

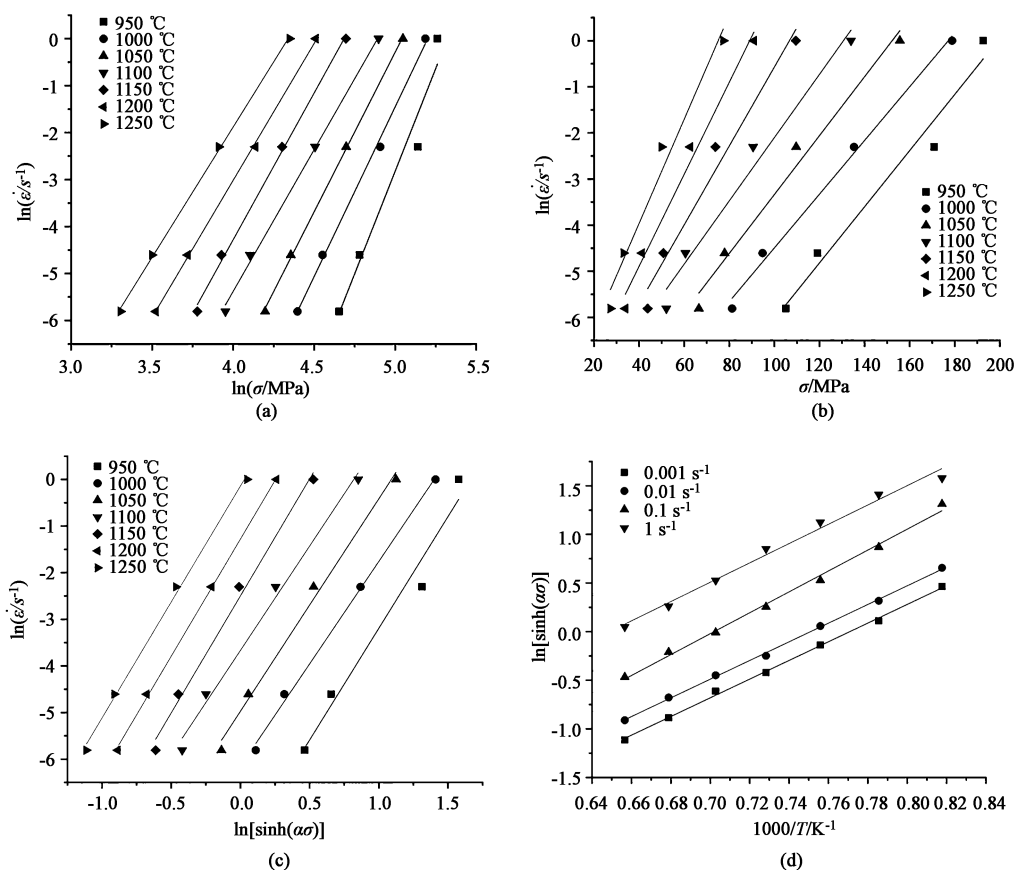


图 2 不同变形温度下各变量之间的关系

(a)  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln \sigma$  (b)  $\ln \dot{\varepsilon} - \sigma$  (c)  $\ln \dot{\varepsilon} - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$  (d)  $\ln [\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$

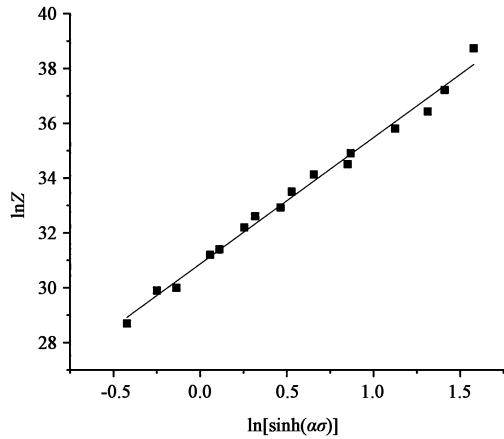
Fig. 2 Relationships among variables at different deformation temperatures

对式 (1) 两边同时取对数, 作图  $\ln Z - \ln [\sinh(\alpha\sigma)]$ , 如图 3 所示, 线性拟合可得  $\ln A = 30.87$ ,  $A = 2.54 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$ 。

则 Zenner-Hollomon 参数为:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(393857/RT) \quad (9)$$

高温流变应力方程为:

图3  $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$  关系图Fig. 3 Relationship diagram of  $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 

$$\dot{\varepsilon} = 2.54 \times 10^{13} \times [\sinh(0.0118\sigma)]^{4.75} \times \exp\left(-\frac{393857}{RT}\right) \quad (10)$$

### 2.3 热加工图及分析

根据动态材料模型 DMM<sup>[13-14]</sup>, 热加工过程具

有动态、不可逆、耗散、非线性等特征, 可为热成形工艺参数的制定和优化提供依据。材料的能量耗散  $P$  由塑性变形耗散  $G$  和微观组织演化耗散  $J$  两部分组成:

$$P = G + J = \int_0^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma \quad (11)$$

对于非线性消耗过程, 功率耗散因子  $\eta$  为微观组织演化耗散能量与线性耗散能量的比例关系, 即:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (12)$$

式中:  $m$  为应变速率敏感指数;  $J_{\max}$  为理想线性耗散参数下的能量。

在应变量为 0.8 的条件下, 应变速率和变形温度构成的二维平面得到的功率耗散因子  $\eta$  的等高线图即为耗散图, 如图 4a 所示。基于 Prasad 失稳区判据<sup>[15]</sup>, 材料变形的失稳条件为:

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln[m/(m+1)]}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \quad (13)$$

式中:  $\xi(\dot{\varepsilon})$  为失稳因子。

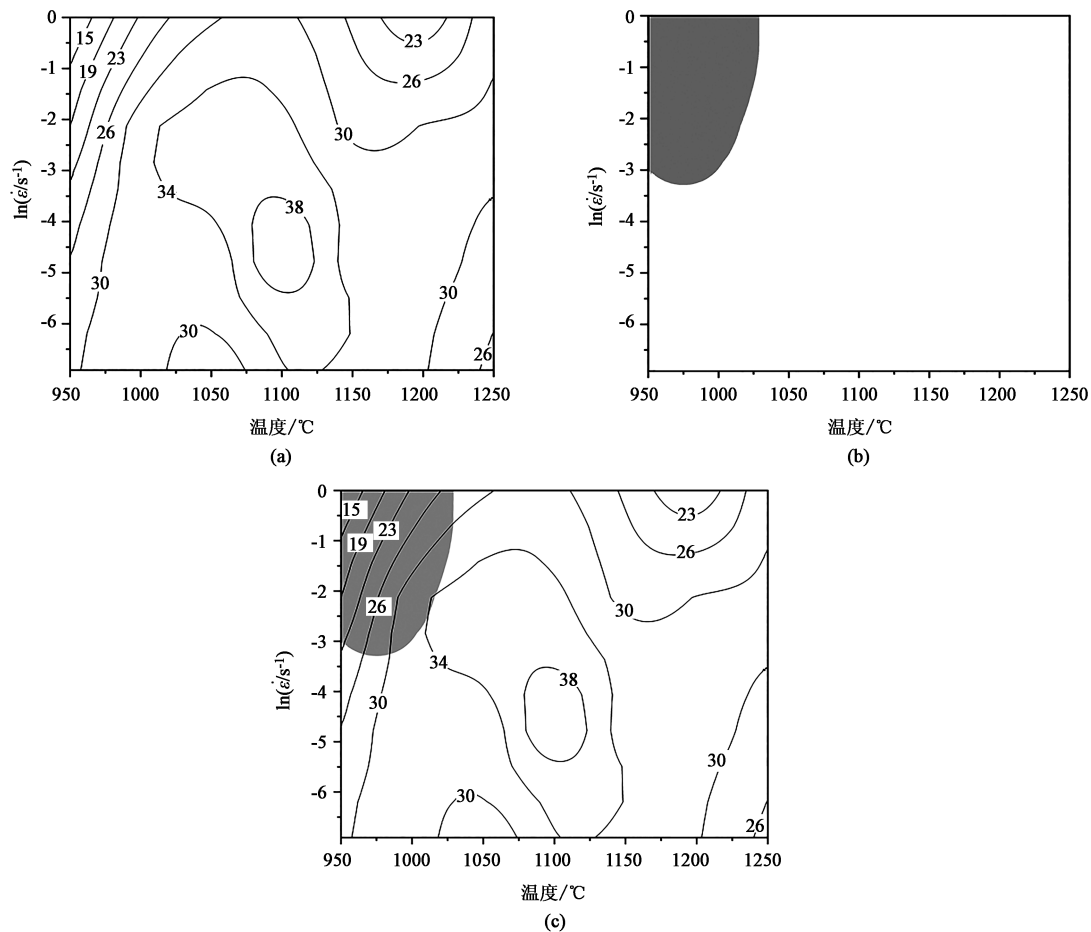


图4 F316H 不锈钢的功率耗散图 (a)、失稳图 (b) 和热加工图 (c)

Fig. 4 Power dissipation map (a), instability map (b) and thermal processing map (c) of F316H stainless steel



图 4b 是应变量为 0.8 下的 F316H 不锈钢的流变失稳图, 其中应变速率和变形温度对应的区域 (灰色) 为流变失稳区。将功率耗散图与失稳图叠加即可得到材料的热加工图, 如图 4c 所示。可以看出, 材料整体的可加工性良好, 失稳区域出现在低温高应变速率区域。在温度为 1100~1150 °C、应变速率为 0.005~0.1 s<sup>-1</sup> 的区域, 能量耗散达到峰值 38%。结合不同热变形条件下的微观组织 (图 5a) 分析, 变形温度为 1100 °C、应变速率为 0.01 s<sup>-1</sup> 条

件下的金相组织均为等轴细小晶粒, 材料发生了充分的动态再结晶, 该区域是适合热加工的安全区域。在低温高应变速率区域出现了失稳区, 该区域的功率耗散值较低, 对照图 5b, 变形温度为 950 °C、应变速率为 1 s<sup>-1</sup> 条件下的金相组织中晶粒大部分呈变形拉长态, 为不均匀形变组织, 基本未发生动态再结晶, 该区域大部分能量用于塑性变形, 未实现动态再结晶细化晶粒的目的, 热加工应避开该区域。

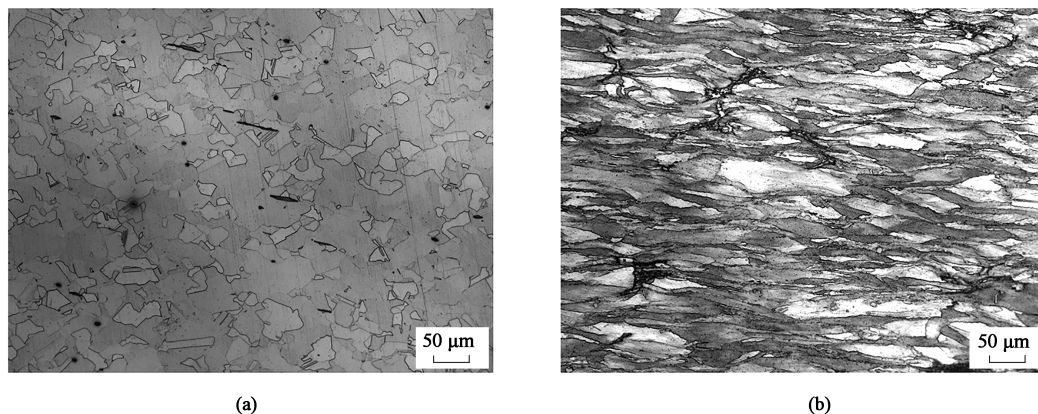


图 5 F316H 不锈钢在不同热变形条件下的微观组织

(a)  $T=1100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{\varepsilon}=0.01\text{ s}^{-1}$  (b)  $T=950\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\dot{\varepsilon}=1\text{ s}^{-1}$

Fig. 5 Microstructures of F316H stainless steel under different thermal deformation conditions

### 3 生产验证

核电用 F316H 不锈钢的 12 寸阀体锻件, 其规格尺寸为 660 mm×900 mm×1200 mm, 单重为 5600 kg, 对于该类厚截面锻件, 中心部位的晶粒度较难保证达到 3.5 级以上, 易出现粗晶、混晶和探伤无底波等问题, 需合理设计锻造工艺参数, 以达到充分动态再结晶, 从而细化晶粒的效果。采用 2500 kg 电渣锭进行拔长下料, 分若干火次锻造成形, 前序若干火次锻造结束返炉加热过程将使变形产生的再结晶晶粒迅速粗化, 因此, 控制最后火次的工艺参数较为关键。根据热加工图的功率耗散峰值区域, 即主加工区来设定锻造成品火次的工艺参数: 始锻温度为 1180 °C, 应变速率控制在 0.005~0.01 s<sup>-1</sup> 范围内, 坯料以锻造比为 2 进行镦粗, 然后以锻造比为 1.8 进行拔方, 最终修整、出成品。阀体锻件按照上述工艺参数锻造成形, 后经固溶热处理和精加工, 取锻件中心晶粒度按照 GB/T 6394—2017<sup>[16]</sup> 检验为 4 级 (图 6); 按照 NB/T 20003.2—2010 标准<sup>[17]</sup> 进行超声波探伤, 满足 IV 级

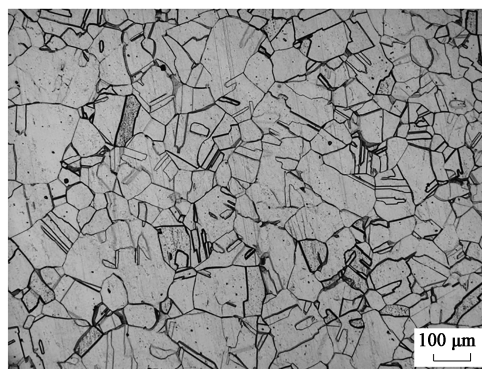


图 6 阀体锻件成品的金相组织

Fig. 6 Metallographic structure of finished valve body forgings

要求, 不存在大于  $\Phi 3\text{ mm}$  的超标缺陷; 室温力学性能满足屈服强度  $R_{eL} \geq 205\text{ MPa}$ , 抗拉强度  $R_m \geq 485\text{ MPa}$ , 伸长率  $A \geq 45\%$ , 冲击功  $KV_2 \geq 225\text{ J}$ ; 350 °C 下的高温拉伸屈服强度  $R_{eL} \geq 127\text{ MPa}$ , 抗拉强度  $R_m \geq 420\text{ MPa}$ 。

### 4 结论

(1) F316H 不锈钢在应变速率为 0.001~1 s<sup>-1</sup>、

变形温度为 950~1250 ℃ 条件下进行热压缩试验, 其真应力-真应变曲线为典型的动态再结晶特征。

(2) F316H 不锈钢的热变形激活能  $Q = 393.857 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 其高温流变应力本构方程为  $\dot{\varepsilon} = 2.54 \times 10^{13} \times [\sinh(0.0118\sigma)]^{4.75} \exp\left(-\frac{393857}{RT}\right)$ 。

(3) F316H 不锈钢热加工图的最佳工艺参数范围为: 变形温度为 1100~1150 ℃、应变速率为 0.005~0.01  $\text{s}^{-1}$ , 结合热加工图的最佳工艺参数范围, 开展了核电阀门的锻造生产验证, 锻件的晶粒度和无损检测结果均满足技术条件要求, 取得了良好的实施效果。

#### 参考文献:

- [1] 施业寿. 核电阀门国产化分析 [J]. 阀门, 2013, (1): 31-33.  
Shi Y S. The localization of nuclear valves [J]. Valve, 2013, (1): 31-33.
- [2] 赵昌盛. 不锈钢的应用及热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.  
Zhao C S. Application and Heat Treatment of Stainless Steel [M]. Beijing: China Machine Press, 2010.
- [3] 王艺南, 兰亮云, 张一婷, 等. 轧态 904L 超级奥氏体不锈钢动态再结晶行为 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (7): 138-144.  
Wang Y N, Lan L Y, Zhang Y T, et al. Dynamic recrystallization behavior of as-rolled 904L super austenitic stainless steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (7): 138-144.
- [4] Babu K A, Mandal S, Athreya C N, et al. Hot deformation characteristics and processing map of a phosphorous modified super austenitic stainless steel [J]. Materials & Design, 2017, 115: 262-275.
- [5] 齐珂, 隋大山, 陈飞, 等. 316LN 钢奥氏体晶粒长大模型 [J]. 塑性工程学报, 2014, 21 (3): 98-103.  
Qi K, Sui D S, Chen F, et al. Study on austenite grain growth behavior of 316LN steel [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21 (3): 98-103.
- [6] 吴从风, 李时磊, 张海龙, 等. 316LN 奥氏体不锈钢的高温拉伸断裂行为 [J]. 材料研究学报, 2014, 28 (7): 481-489.  
Wu C F, Li S L, Zhang H L, et al. On high temperature tensile fracture behavior of 316LN austenitic stainless steel [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2014, 28 (7): 481-489.
- [7] 赵晓东. 304 不锈钢热变形条件下动态再结晶行为研究 [D]. 太原: 太原科技大学, 2009.  
Zhao X D. Study on Dynamic Recrystallization Behavior of 304 Stainless Steel Under Hot Deformation [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science and Technology, 2009.
- [8] Wang C J, Feng H, Zheng W J, et al. Dynamic recrystallization behavior and microstructure evolution of AISI 304N stainless steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, 2013, 20 (10): 107-112.
- [9] 裴文娇, 郭训忠, 王文涛, 等. 316L 奥氏体不锈钢的高温流变行为 [J]. 塑性工程学报, 2014, 21 (3): 104-110.  
Pei W J, Guo X Z, Wang W T, et al. Flow behaviors of 316L stainless steel at high temperature [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2014, 21 (3): 104-110.
- [10] 胡峰. 含铌奥氏体不锈钢热变形行为及热加工图 [D]. 镇江: 江苏大学, 2018.  
Hu F. Hot Deformation Behavior and Hot Working Diagram of Nb Containing Austenitic Stainless Steel [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2018.
- [11] 齐珂. 核电用钢 316LN 动态再结晶行为试验研究与数值模拟 [D]. 上海: 上海交通大学, 2014.  
Qi K. Experimental and Numerical Study on Dynamic Recrystallization of 316LN Nuclear Power Steel [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2014.
- [12] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15 (1): 22-32.
- [13] Srinivasan N, Prasad Y V R K. Hot working characteristics of ni-monic 75, 80A and 90 superalloys: A comparison using processing maps [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 51: 171-192.
- [14] Gronostajski Z. The deformation processing map for control of microstructure in CuAl9.2Fe3 aluminium bronze [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 126 (9): 119-124.
- [15] Prasad Y. Processing maps: A status report [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2003, 12 (6): 638-645.
- [16] GB/T 6394—2017, 金属平均晶粒度测定法 [S].  
GB/T 6394—2017, Metal—Methods for estimating the average grain size [S].
- [17] NB/T 20003.2—2010, 核电厂核岛机械设备无损检测 第 2 部分: 超声检测 [S].  
NB/T 20003.2—2010, Non-destructive testing for mechanical components in nuclear island of nuclear power plants—Part 2: Ultrasonic testing [S].

新资讯  
新营销  
新媒体



《QC检测》神页



《机加工》神页



QC检测仪器-公众号



天下机械-公众号

天下机械网 [www.qctms.cn](http://www.qctms.cn)  
QC检测仪器网 [www.qctester.com](http://www.qctester.com)

【神页: 扫码直接阅读、  
收藏、下期自动更新。】