

## 工业化生产 N06625 镍基合金板材组织性能

王 岩, 李吉东, 谷 宇, 韩 东, 曾 莉

(太原钢铁(集团)有限公司先进不锈钢材料国家重点实验室, 山西 太原 030003)

**摘要:** 以太原钢铁(集团)有限公司工业化生产的 N06625 镍基合金板材为研究对象, 采用金相显微镜、扫描电镜、能谱分析等手段, 对其组织性能开展了研究。结果表明: 工业化生产的 N06625 镍基合金板材的轧制态析出物主要以条状的 (Nb, Ti) (C, N) 以及细小的 MoNbC 复合析出物为主; 高强度等级 N06625 镍基合金板材的适宜热处理温度为 1000 °C 左右, 低强度等级 N06625 镍基合金板材的适宜热处理温度为 1150 °C 左右; 所生产的 N06625 镍基合金板材具有优异的冶金纯净度、力学性能及耐腐蚀性能, 可为用户选材提供数据支撑。

**关键词:** N06625 镍基合金; 组织; 性能; 热处理温度; 析出物

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2024.03.007

**中图分类号:** TG335.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3940 (2024) 03-0047-06

## Microstructure and properties on N06625 nickel-based alloy plate produced in industrialization

Wang Yan, Li Jidong, Gu Yu, Han Dong, Zeng Li

(State Key Laboratory of Advanced Stainless Steel, Taiyuan Iron and Steel Group Co., Ltd., Taiyuan 030003, China)

**Abstract:** For N06625 nickel-based alloy plate industrially produced by Taiyuan Iron and Steel Group Co., Ltd., its microstructure and properties were studied by metallographic microscope, scanning electron microscope, energy spectrum analysis and other methods. The results show that in the industrial production of N06625 nickel-based alloy plate, the rolled precipitates are mainly strip-shaped (Nb, Ti) (C, N) and fine MoNbC composite precipitates. The suitable heat treatment temperature of high-strength grade N06625 nickel-based alloy plate is about 1000 °C, while that of low-strength grade plate is about 1150 °C. The produced N06625 nickel-based alloy plate has excellent metallurgical purity, mechanical properties and corrosion resistance, providing data support for user to select materials.

**Key words:** N06625 nickel-based alloy; microstructure; properties; heat treatment temperature; precipitates

N06625 是以 Ni 为基体, 以铬、钼、铌为主要强化元素的固溶强化型镍基合金, 具有良好的拉伸、疲劳、加工、焊接、腐蚀性能, 目前广泛应用于航空发动机零部件制造、石油化工管道、石化装备制造、关键装备焊接等领域<sup>[1-6]</sup>。受轧制装备以及使用业绩等条件制约, N06625 镍基合金板材仍然以进口为主, 主要供货企业有 ATI (Allegheny Technologies Incorporated)、SMC (Special Metals Corporation)、VDM (ThyssenKrupp VDM GmbH)、日本冶金工业株式会社等, 国产 N06625 镍基合金板材的市场认可度低、可供规格范围窄,

制约了产品的推广与应用。

国内外专家学者对 N06625 镍基合金已经开展了深入的研究工作, 但是均局限于实验室层面, 如热变形行为、再结晶行为、冷变形行为等<sup>[7-13]</sup>, 缺乏工业化生产数据支撑, 目前对工业化生产 N06625 镍基合金板材组织性能的研究鲜有报道。目前, 太原钢铁(集团)有限公司目前已经实现了镍基合金板材的批量化生产与供货, 其宽度已经覆盖至 3000 mm, 产品质量与国外相当, 已经在石化、核电、军工等方面实现了国产化替代。本文对工业化生产的 N06625 镍基合金板材的组织性能开展研究, 为相关研究提供实际生产数据支持。

### 1 研究材料与方法

实验材料为太原钢铁(集团)有限公司生产的

收稿日期: 2023-08-02; 修订日期: 2023-11-03

基金项目: 山西省关键核心技术和共性技术研发攻关专项 (20201102017)

作者简介: 王 岩 (1982-), 男, 博士, 正高级工程师

E-mail: 15448681@qq.com

N06625 镍基合金中厚板材, 其制备工艺为: 6 t VIM (真空感应炉)+8 t ESR (保护气氛电渣炉)+锻造开坯+板材轧制, 板材规格为 25 mm ×

1500 mm×6000 mm, 单重 1900 kg。实际化学成分如表 1 所示, 在 ASME SB-443-2023<sup>[14]</sup> 的要求范围内。

表 1 N06625 镍基合金的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of N06625 nickel-based alloy (% , mass fraction)

成分	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Al	Ti	Nb+Ta	Fe	Co	Cu	Ni
ASME SB-443-2023 要求	≤0.10	≤0.50	≤0.50	≤0.015	≤0.015	20.00~23.00	8.00~10.00	≤0.40	≤0.40	3.15~4.15	≤5.00	≤1.00	—	≥58
实际	0.01	0.08	0.02	0.003	0.001	22.49	8.89	0.14	0.25	3.63	3.47	0.01	0.01	余量

注: O 元素质量分数为 0.0012%, N 元素质量分数为 0.0041%, H 元素质量分数为  $2.4 \times 10^{-6}\%$ 。

锻造开坯温度控制在 900~1200 °C, 板材轧制前加热温度控制在 1200 °C, 终轧温度控制在 950 °C, 轧后水冷。在轧制态板材的 1/4 宽度位置取样 (图 1), 按照标准 ASTM E 8/E 8M-21<sup>[15]</sup> 进行力学性能测试。

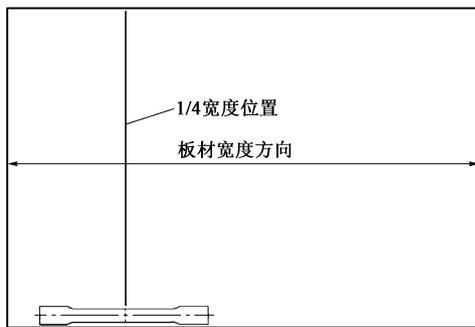


图 1 取样位置图

Fig. 1 Sampling location diagram

采用电加热热处理炉对板材进行不同温度 (950、1000、1050、1100、1150 和 1200 °C) 下的热处理实验, 保温时间为  $1.3 \text{ min} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。采用力学实验机、光学显微镜、扫描电子显微镜 (Scanning Electron Microscope, SEM)、能谱分析 (Energy Dispersive Spectrometer, EDS) 等对工业化生产 N06625 镍基合金的组织及性能开展深入的分析。

## 2 实验结果分析与讨论

### 2.1 轧制态板材组织分析

图 2a 为板材轧制态组织, 可以看出, 由于经过锻造+轧制加工, 铸态组织完全消失, 发生了完全动态再结晶, 晶粒极其细小、均匀。采用 SEM 背散射方式对板材的轧制态析出物进行观察 (图 2b), A 处和 B 处的能谱图见图 2c 和图 2d, 分析可知, 轧制态板材中析出物主要以两种方式存在: 一种是

(Nb, Ti) (C, N), 另一种是极其细小的 MoNbC。由于合金中 N 含量极低, 因此, 方块状的硬质 TiN 析出物极少, 均以条状的 (Nb, Ti) (C, N) 复合形式析出。

对轧制态板材进行力学性能检测, 得到规定非比例延伸强度  $R_{p0.2} = 573 \text{ MPa}$ , 抗拉强度  $R_m = 974 \text{ MPa}$ , 伸长率  $A = 43\%$ 。从图 2b 中可以看出, 板材析出物尺寸细小且呈弥散分布, 对室温及高温强度起到一定的析出强化作用。对于 N06625 镍基合金, 在级别 1 (高强度等级, 为退火工艺, 规定最低退火温度  $\geq 871 \text{ °C}$ ,  $871 \text{ °C} \leq \text{温度} < 1093 \text{ °C}$  的温度区间定义为退火, 主要获得高强度和高疲劳性能) 条件下服役时, Nb 的析出物主要起到析出强化作用; 在级别 2 (低强度等级, 为固溶退火工艺, 规定最低退火温度  $\geq 1093 \text{ °C}$ , 此温度区间定义为固溶退火, 主要获得高蠕变及持久性能) 条件下服役时, 成品热处理温度高, 并且服役温度高, 铌化物分解, 对高温强度的提升主要是 Nb 的固溶强化作用。

### 2.2 热处理对板材组织性能的影响

标准 ASME SB-443-2023<sup>[14]</sup> 中规定, 板材必须经过热处理后交货。N06625 镍基合金板材的交货状态分为: 级别 1 和级别 2。两种不同工艺的板材力学性能要求如表 2 所示。

对于镍基合金来讲, 温度因素对组织性能的影响远大于时间因素<sup>[16]</sup>。对轧制态板材进行不同温度下的热处理实验, 保温时间选择镍基合金板材工业化生产优化参数  $1.3 \text{ min} \cdot \text{mm}^{-1}$ 。图 3 为不同热处理温度条件下 N06625 镍基合金板材力学性能的变化曲线。图 4 为相同保温时间 (30 min) 条件下 N06625 镍基合金板材晶粒尺寸的变化曲线。

从图 3 可以看出, 随着热处理温度的提升, 板材的  $R_{p0.2}$  及  $R_m$  均呈下降趋势, 板材的伸长率迅速

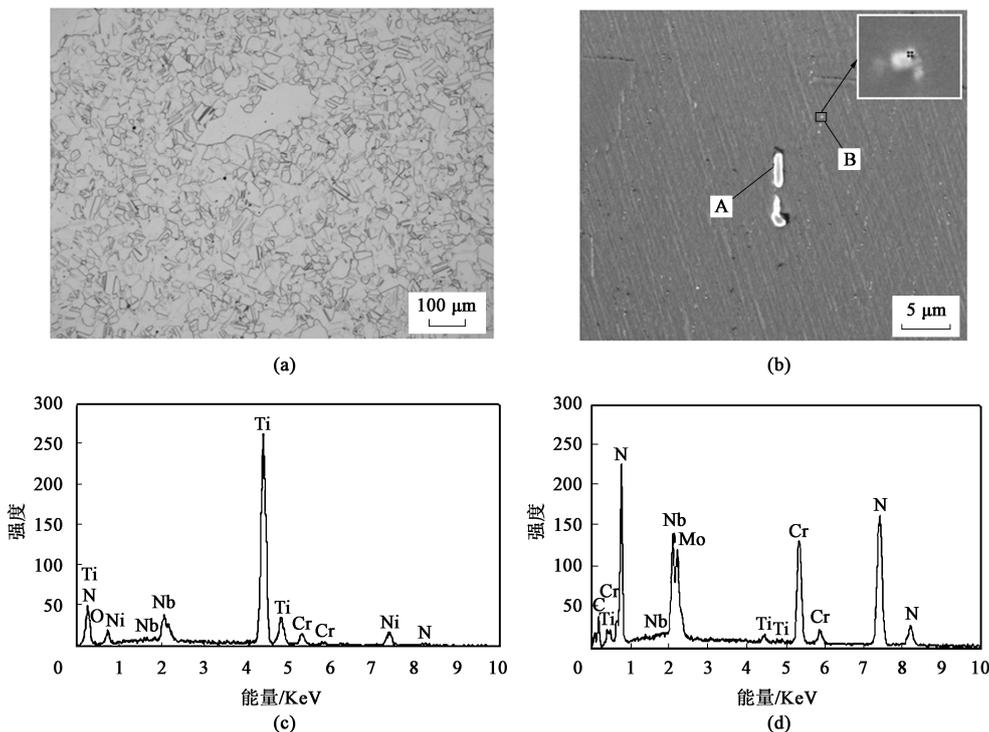


图 2 轧制态板材组织及析出物

(a) 组织 (b) 扫描电镜组织 (c) A 处能谱图 (d) B 处能谱图

Fig. 2 Microstructures and precipitates of hot rolled plate

(a) Microstructure (b) Scanning electron microscopy microstructure (c) Energy spectrum diagram of region A (d) Energy spectrum diagram of region B

表 2 N06625 镍基合金板材不同交货级别的力学性能要求  
Table 2 Mechanical performance requirements of N06625 nickel-based alloy plate at different delivery levels

级别	$R_{p0.2}$ /MPa	$R_m$ /MPa	$A$ /%
1	$\geq 379$	$\geq 758$	$\geq 30$
2	$\geq 276$	$\geq 690$	$\geq 30$

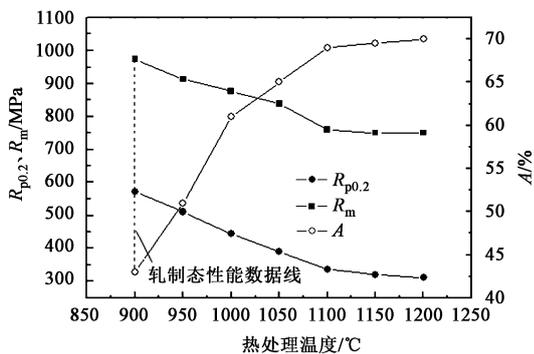


图 3 不同热处理温度下 N06625 镍基合金板材的力学性能变化曲线

Fig. 3 Change curves of mechanical properties for N06625 nickel-based alloy plate under different heat treatment temperatures

提升。当热处理温度达到 1000 °C 时,  $R_{p0.2} = 444$  MPa,  $R_m = 876$  MPa,  $A = 61\%$ , 达到较佳的强塑性匹配。当热处理温度达到 1050 °C 时,  $R_{p0.2} =$

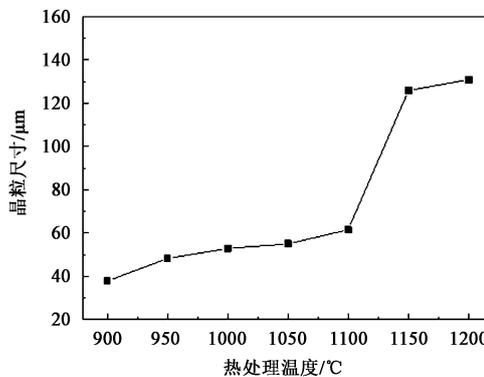


图 4 保温 30 min 时 N06625 镍基合金板材的晶粒尺寸变化曲线

Fig. 4 Change curve of grain size for N06625 nickel-based alloy plate when holding 30 min

391 MPa,  $R_m = 840$  MPa,  $A = 69\%$ , 虽然伸长率较 1000 °C 时有所提升, 但是  $R_{p0.2}$  已十分接近于级别 1 的最低要求。为了保持足够的性能余量, 对于级别 1 的退火温度可以设定在 1000 °C 左右。

当热处理温度达到 1100 °C 时,  $R_{p0.2} = 337$  MPa,  $R_m = 760$  MPa,  $A = 69\%$ 。在 1100~1200 °C 温度范围内, 强度及塑性变化不明显, 性能均能满足 ASME

SB-443-2023<sup>[14]</sup>的要求, 级别 2 工艺窗口范围较宽。但是, 在实际生产过程中, 考虑热处理设备温度的波动, 以及标准 ASME SB-443-2023<sup>[14]</sup>中规定的最低退火温度  $\geq 1093$  °C 要求, 一般选择 1150 °C 左右。

从图 4 可以看出, 当热处理温度小于 1100 °C 时, 晶粒尺寸长大不明显, 在此温度区间内, 原始轧制态组织主要发生静态回复及再结晶行为。但是,

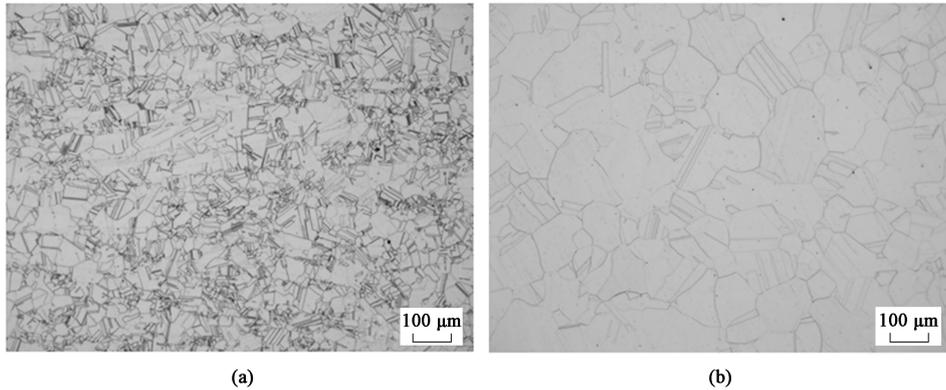


图 5 级别 1 (a) 及级别 2 (b) 板材的金相组织

Fig. 5 Metallographic structures of grade 1 (a) and grade 2 (b) plates

### 2.3 板材综合性能评估

在 ASME SB-443-2023<sup>[14]</sup>中, 仅对 N06625 镍基合金板材的性能作了基本要求的规定, 但是在某些复杂工况条件下的实际应用中, 还应该对板材的冶金纯净度、腐蚀性能、低温冲击性能等进行测试。太原钢铁(集团)有限公司生产的 N06625 镍基合金板材的夹杂物控制水平(参考 GB/T 10561—2023<sup>[17]</sup>)为总和 0.5 级(D 细 0.5 级),  $-70$  °C 冲击功 ( $AKV_2$ ) 分别为 198 J/199 J/211 J (级别 1) 以及 403 J/416 J/410 J (级别 2)。表 3 和表 4 分别为 N06625 镍基合金板材的力学性能及腐蚀性能数据(试样尺寸为 5 mm×20 mm×30 mm, 表面磨光), 腐蚀性能要求参考 ASTM A262C-2021<sup>[18]</sup>、ASTM

表 3 N06625 镍基合金板材力学性能

Table 3 Mechanical properties of N06625 nickel-based alloy plate

级别	$R_{p0.2}/\text{MPa}$	$R_m/\text{MPa}$	A/%	热处理温度/ °C
ASME SB-443-2023 级别 1	$\geq 379$	$\geq 758$	$\geq 30$	—
太原钢铁(集团)有限公司级别 1 产品	444	876	61	1000
ASME SB-443-2023 级别 2	$\geq 276$	$\geq 690$	$\geq 30$	—
太原钢铁(集团)有限公司级别 2 产品	320	751	69.5	1150

形变储能及热驱动力不足以促进组织发生完全静态再结晶晶粒的生长, 因此维持细晶组织, 在保持高强度的同时, 伸长率也得到了提升。当热处理温度高于 1100 °C 时, 晶粒迅速长大, 静态再结晶晶粒生长完全发生, 晶粒尺寸达到 100  $\mu\text{m}$  以上, 粗晶组织具有良好的蠕变及持久性能, 为高温条件下长期服役提供了良好的组织保障。图 5 为级别 1 及级别 2 板材的金相组织。

表 4 N06625 镍基合金板材腐蚀性能

Table 4 Corrosion performance of N06625 nickel-based alloy plate

要求	ASTM A262C- 2021	ASTM G28- 2015 中 A 方法	ASTM G48- 2020 中 A 方法
	(48~240 h)/ ( $\text{mm} \cdot \text{y}^{-1}$ )	(120 h)/ ( $\text{mm} \cdot \text{y}^{-1}$ )	(50 °C-72 h)/ ( $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ )
通用要求	$\leq 0.90$	$\leq 0.72$	$\leq 4$
太原钢铁(集团)有限公司(级别 1 和级别 2)产品	0.12~0.36	0.24~0.36	0

G28-2015<sup>[19]</sup>和 ASTM G48-2020<sup>[20]</sup>。图 6 为部分样品的晶间腐蚀测试后及冲击实验后的宏观图。综合表 3、表 4 和图 6 可知, 生产的 N06625 镍基合金板材具有优异的冶金纯净度、腐蚀性能和力学性能, 可为用户选材提供数据支撑。

## 3 结论

(1) 太原钢铁(集团)有限公司工业化生产的 N06625 镍基合金板材, 其轧制态析出物主要以条状的 (Nb, Ti) (C, N) 以及细小的 MoNbC 复合析出物为主。

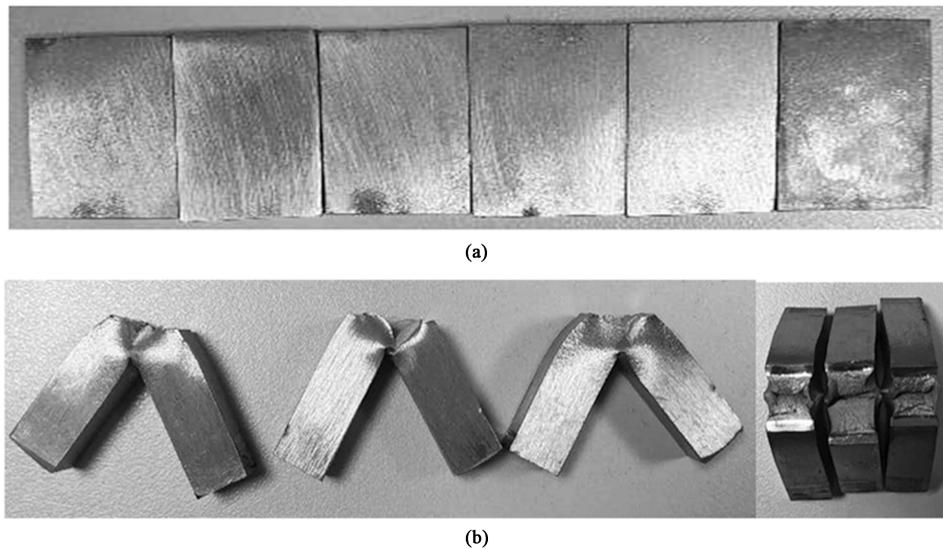


图6 部分样品晶间腐蚀测试后 (a) 及冲击实验后 (b) 的宏观图  
Fig.6 Macro views of some samples after intergranular corrosion test (a) and impact test (b)

(2) 本文生产条件下, 级别1的N06625镍基合金板材的适宜热处理温度为1000℃左右, 级别2的N06625镍基合金板材的适宜热处理温度为1150℃左右。

(3) 太原钢铁(集团)有限公司生产的N06625镍基合金板材具有优异的冶金纯净度、力学性能及耐腐蚀性能, 可为用户选材提供数据支撑。

#### 参考文献:

- [1] 高钰璧, 丁雨田, 孟斌, 等. Inconel 625合金中析出相演变研究进展[J]. 材料工程, 2020, 48(5): 13-22.  
Gao Y B, Ding Y T, Meng B, et al. Research progress in evolution of precipitated phases in Inconel 625 superalloy [J]. Journal of Materials Engineering, 2020, 48(5): 13-22.
- [2] Chen X M, Lin Y C, Chen M S, et al. Microstructural evolution of a nickel-based superalloy during hot deformation [J]. Materials & Design, 2015, 77: 41-49.
- [3] 王方军, 刘应龙, 时瑶, 等. 等温退火处理对Inconel 625合金箔材组织和性能的影响[J]. 金属热处理, 2022, 47(3): 77-81.  
Wang F J, Liu Y L, Shi Y, et al. Effect of isothermal annealing treatment on microstructure and properties of Inconel 625 alloy foil [J]. Heat Treatment of Metals, 2022, 47(3): 77-81.
- [4] 蔡远飞, 隋毅, 朱治愿, 等. 超低铁Inconel 625合金的热处理[J]. 金属热处理, 2018, 43(9): 175-181.  
Cai Y F, Sui Y, Zhu Z Y, et al. Heat treatment of ultra-low iron Inconel 625 alloy [J]. Heat Treatment of Metals, 2018, 43(9): 175-181.
- [5] 王岩, 徐芳泓, 李阳, 等. 应变速率对617B镍基高温合金组织演变的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2014, 43(12): 3027-3030.

- Wang Y, Xu F H, Li Y, et al. Effect of strain rate on the microstructural evolution of 617B Ni-base superalloy [J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2014, 43(12): 3027-3030.
- [6] 李烁, 闫森, 金奎文, 等. 碳含量及热加工变形量对镍基合金GH3625组织和性能的影响[J]. 特殊钢, 2022, 43(2): 75-78.  
Li S, Yan S, Jin K W, et al. Effect of carbon content and hot-working deformation on microstructure and properties of nickel base alloy GH3625 [J]. Special Steel, 2022, 43(2): 75-78.
- [7] 张春林, 王新鹏, 宁天信, 等. UNS N06625合金热成形工艺的模拟试验和分析[J]. 特殊钢, 2017, 38(2): 1-5.  
Zhang C L, Wang X P, Ning T X, et al. Simulation test and analysis on hot forming process of alloy UNS N06625 [J]. Special Steel, 2017, 38(2): 1-5.
- [8] Wang J, Dong J X, Zhang M C, et al. Hot working characteristics of nickel-base superalloy 740H during compression [J]. Materials Science and Engineering: A, 2013, 566: 61-70.
- [9] Zhang P, Hu C, Zhu Q, et al. Hot compression deformation and constitutive modeling of GH4698 alloy [J]. Materials & Design, 2015, 65: 1153-1160.
- [10] 丁雨田, 马元俊, 豆正义, 等. 固溶处理温度对GH3625合金热挤压管材微观组织和力学性能的影响[J]. 材料导报, 2018, 32(8): 1311-1317.  
Ding Y T, Ma Y J, Dou Z Y, et al. Effect of solution treatment temperature on microstructure and mechanical properties of GH3625 alloy hot extruded tube [J]. Materials Review, 2018, 32(8): 1311-1317.
- [11] 蔡梅, 刘建平, 吴香菊, 等. GH625合金锻造工艺研究[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2011, 28(4): 52-59.  
Cai M, Liu J P, Wu X J, et al. Technical study on GH625 alloy forging [J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2011, 28(4): 52-59.

(下转第93页)