

镍基耐蚀合金 GH536B (G3) 的高温变形特性

苏玉华^{1,2} 包耀宗² 董瀚² 雍岐龙² 张英杰^{1,3}

(1 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 昆明 650093; 2 钢铁研究总院结构材料研究所, 北京 100081; 3 曲靖师范学院, 曲靖 655011)

摘要 通过 Thermomacmaster-Z 热模拟机试验和显微组织观察, 研究了镍基耐蚀合金 GH536B (G3, %: 0.002C, 20.30Cr, 17.50Fe, 8.70Mo, 1.32W, 1.90Cu, 0.20Nb) 1 030 ~ 1 300 °C、应变速率 1 ~ 25 s⁻¹ 的应力-应变曲线以及温度对合金断面收缩率的影响, 高温变形下合金组织的变化和应变速率对合金动态再结晶温度的影响。结果表明, G3 合金变形抗力大, 热成形温度区间小, 随应变速率增大, 热塑性降低; 当 Φ10 mm × 140 mm 试样拉伸速率为 100 mm · s⁻¹, 合适的成形温度为 1 130 ~ 1 260 °C, 当拉伸速率为 200 mm · s⁻¹, 合适的成形温度为 1 130 ~ 1 220 °C。

关键词 耐蚀合金 GH536B 热模拟 动态再结晶 热塑性

Hot Deformation Characteristics of Nickel Base Corrosion Resistant Alloy GH536B (G3)

Su Yuhua^{1,2}, Bao Yaozong², Dong Han², Yong Qilong² and Zhang Yingjie^{1,3}

(1 School of Material and Metallurgical Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093; 2 Institute for Structural Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 3 Qujing Normal University, Qujing 655011)

Abstract The stress-strain curves of nickel base corrosion resistant alloy GH536B (G3; 0.002C, 20.30Cr, 17.50Fe, 8.70Mo, 1.32W, 1.90Cu, 0.20Nb) with strain rate 1 ~ 25 s⁻¹, at 1 030 ~ 1 300 °C, the effect of temperature on reduction of area of alloy, the change of alloy structure with hot deformation and effect of strain rate on dynamic recrystallization temperature of alloy have been studied by Thermomacmaster-Z thermal simulation machine test and microstructure observation. Results showed that the G3 alloy had large resistance of deformation and narrow hot deformation temperature range, and with increasing strain rate, the hot ductility decreased such as for Φ10 mm × 140 mm sample the tensile strain rate was 100 mm/s, the available temperature for deformation was 1 130 ~ 1 260 °C but as the tensile strain rate was 200 mm/s the available temperature for deformation was 1 130 ~ 1 220 °C.

Material Index Corrosion Resistance Alloy GH536B, Thermal Simulation, Dynamic Recrystallization, Hot Ductility

耐蚀合金具有高温塑性低、变形区间窄、变形抗力大等特征^[1]。本文对耐蚀合金 GH536B (G3) 在高温下进行压缩、拉伸及敏化试验, 并就其高温热塑性的特性及组织变化规律进行了研究。

1 试验方法

试验用耐蚀合金 G3 (表 1) 在 50 kg 真空感应炉熔炼后, 铸锭, 空冷到室温, 经 1 200 °C × 3 h 固溶处理, 再经 1 190 ~ 1 100 °C 温度范围内锻造, 最终经 1 180 °C × 1 h 加热保温后水冷。热压缩试样 Φ8 mm × 12 mm; 热拉伸试样 Φ10 mm × 140 mm。试验在 Thermomacmaster-Z 型热模拟试验机上进行。热压缩试验加工应变量 ε = 0.8, 1 030 ~ 1 300 °C、变形

速率 1, 5, 10, 12.5, 20, 25 s⁻¹。试样以 10 °C · s⁻¹ 速度加热到预定温度后保温 300 s, 随即进行热压缩, 变形后立即通氦气以冷却速度为 50 °C · s⁻¹ 进行气冷。

热拉伸试验行程 50 mm, 拉伸速率 100 mm · s⁻¹、200 mm · s⁻¹, 其余同热压缩试验。

2 试验结果

2.1 应力-应变曲线

随着温度的增加, G3 合金变形抗力及其最大值在降低 (图 1a), 同时其变形抗力随着应变速率的增加而增加 (图 1b)。G3 合金即使是在高温区域内变形, 仍具有很高的变形抗力, 如试验在 1 220 °C 变形, 应变速率为 25 s⁻¹ 时的应力-应变曲线, 其最大变形抗力仍有约 195 MPa。

2.2 断面收缩率

G3 合金在高温条件下拉伸, 如图 1(c) 所示, 同

表 1 镍基合金 G3 的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of nickel base alloy G3 /%

Cr	Fe	Mo	W	C	Cu	Nb
20.30	17.50	8.70	1.32	0.002	1.90	0.20

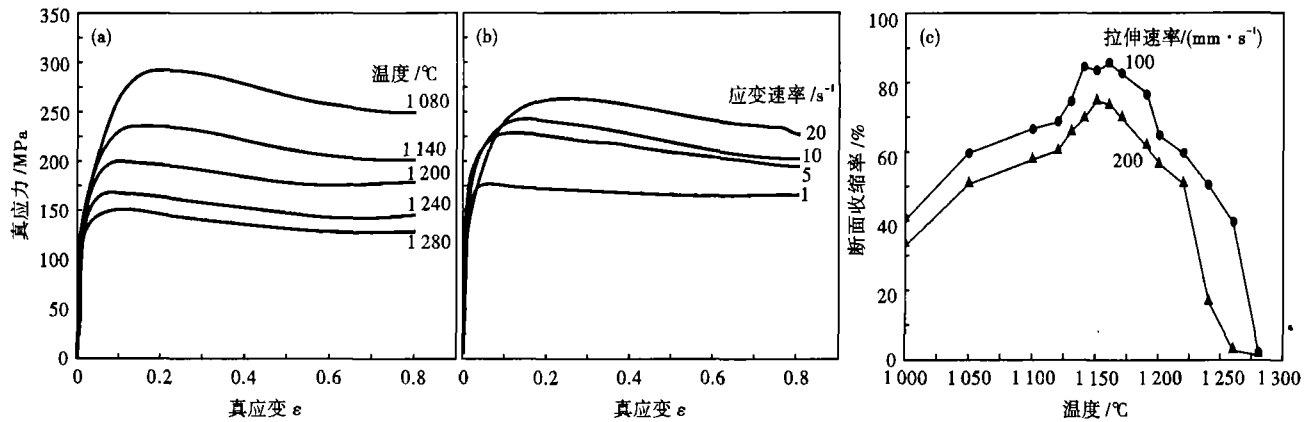


图 1 镍基合金 G3 压缩试验应变速率 5 s^{-1} (a) 和温度 $1160 \text{ }^\circ\text{C}$ (b) 时的应力-应变曲线; 温度对 G3 断面收缩率的影响 (c)
 Fig. 1 Stress- strain curves of nickel base alloy G3 by compression test at strain rate 5 s^{-1} (a) and temperature $1160 \text{ }^\circ\text{C}$ (b); effect of temperature on reduction of area of nickel base alloy G3 (c)

一温度下随着拉伸速率的增加,断面收缩率降低;相同拉伸速率条件下拉伸,断面收缩率随温度的变化也表现出较大的差异性,其峰值所对应的温度为 $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。实际工业生产操作方面一般要求断面收缩率 $40\% \sim 50\%$ 。因此,综合温度、拉伸速率与断面收缩率的影响变化规律,当拉伸速率为 $100 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, G3 合金热成形温度在 $1000 \text{ }^\circ\text{C} \leq T < 1260 \text{ }^\circ\text{C}$ 为宜;当拉伸速率为 $200 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,热成形温度在

$1050 \text{ }^\circ\text{C} \leq T < 1220 \text{ }^\circ\text{C}$ 为宜。

2.3 高温变形中的组织变化

光学显微镜和扫描电镜 (SEM) 分析了镍基合金 G3 的高温应变后的组织。 $1030 \text{ }^\circ\text{C}$ 变形其组织是动态回复及有部分动态再结晶 (图 2a), $1080 \text{ }^\circ\text{C}$ 为少量动态回复及大部分动态再结晶 (图 2b), $1150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时晶粒约为 $17 \mu\text{m}$ 完全动态再结晶 (图 2c), $1220 \text{ }^\circ\text{C}$ 为完全动态再结晶组织,晶粒约为 25

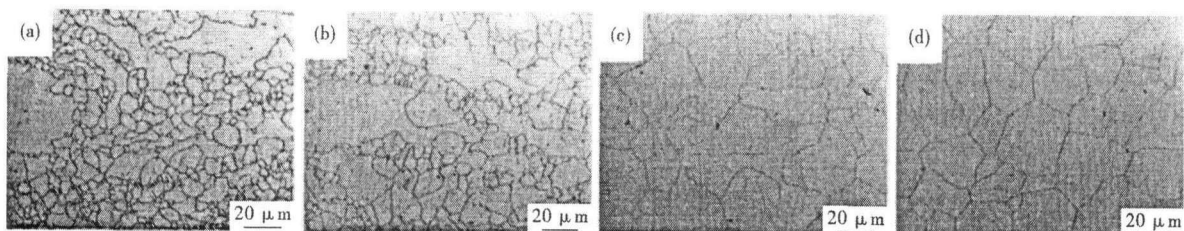


图 2 镍基合金 G3 应变速率 20 s^{-1} 、应变量为 0.8 热变形后的组织形貌: (a) $1030 \text{ }^\circ\text{C}$; (b) $1080 \text{ }^\circ\text{C}$; (c) $1150 \text{ }^\circ\text{C}$; (d) $1220 \text{ }^\circ\text{C}$
 Fig. 2 Structure morphology of nickel base alloy G3 hot deformed with strain rate 20 s^{-1} and $\epsilon 0.8$: (a) $1030 \text{ }^\circ\text{C}$; (b) $1080 \text{ }^\circ\text{C}$; (c) $1150 \text{ }^\circ\text{C}$; (d) $1220 \text{ }^\circ\text{C}$

μm (图 2d)。该试验条件下得到 G3 合金,软化开始温度约 $1320 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

3 讨论分析

3.1 再结晶的探讨

动态再结晶一般具有晶界凸凹,晶粒之间是大角度晶界,晶粒内残存有部分位错等特征^[2]。综合整理 G3 合金变形温度、应变速率后得图 3 所示,图 3 中应变量为 0.8 ,发现再结晶的变形条件用 \circ 表示,未发现再结晶的变形条件用 \bullet 表示。

通常动态再结晶粒的是否被发现,以及晶粒大小用整理后的温度补偿系数 Z (Zener-Holloman parameter) 来表示^[3]:

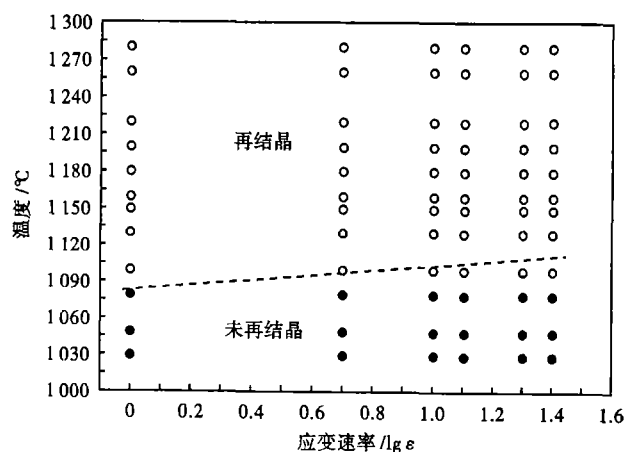


图 3 镍基合金 G3 发生再结晶的条件
 Fig. 3 Condition of recrystallization for nickel base alloy G3

$$Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) \quad (1)$$

式中: Q - 表面激活能; R - 气体常数(8.314 J/mol); T - 绝对温度/K; $\dot{\epsilon}$ - 应变速率/s。 Z 是随应变速率的增加和温度的降低而增大,反之则减小。而再结晶后平均晶粒直径 d 的大小,只与 Z 值有关。 d 随着 Z 值的增大而减小,随着 Z 值的减小而增大。

3.2 热塑性特性

经敏化处理水冷后的 G3 组织如图 4 所示,在低温区域($T < 1150\text{ }^{\circ}\text{C}$)晶界和晶内都有大量链状

析出物(脆性相),这些析出物随着温度增加而逐渐减小,到 $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 全部以固溶态存在。通常这些析出物为碳化物 Me_{23}C_6 、 M_6C 、 MC 和 Laves 相(Fe_2Mo),以及金属间化合物 Z 相^[1]。这些链状的碳化物严重影响 G3 合金热塑性,同时图 1(c)也展示了,随着温度进一步增加断面收缩率开始降低,分析其原因,首先是因为随着变形温度的增加晶粒逐渐长大,造成热塑性降低,如图 5 所示,温度从 $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$ 增加到 $1220\text{ }^{\circ}\text{C}$,晶粒增大了近5倍,严重影响热塑性;另

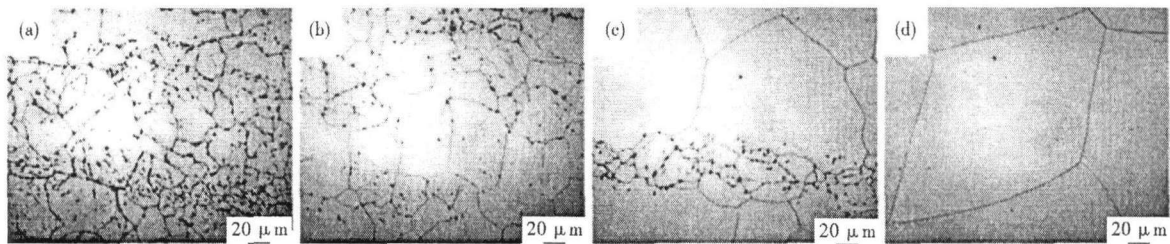


图4 敏化处理镍基合金 G3 的组织形貌:(a) $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $1080\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $1130\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig.4 Structure morphology of nickel base alloy G3 sensitizing-treated at: (a) $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$; (b) $1080\text{ }^{\circ}\text{C}$; (c) $1130\text{ }^{\circ}\text{C}$; (d) $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$

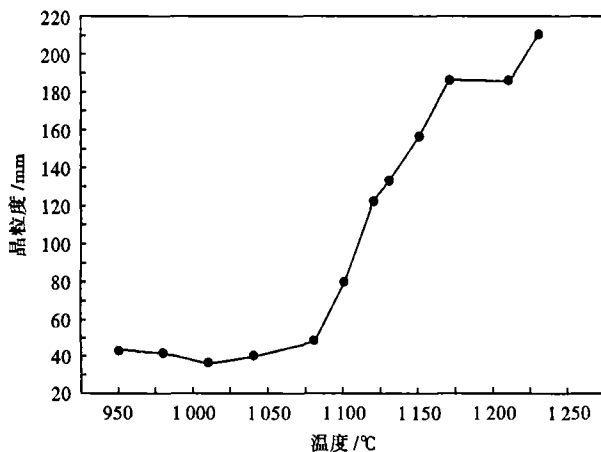


图5 加热温度对镍基合金 G3 晶粒度的影响

Fig.5 Effect of heating temperature on grain size of nickel base alloy G3

外,变形造成试样升温使塑性急剧降低。采用速率为 $200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 变形,变形温度 $T_{\text{soak}} = 1220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,G3 合金断面收缩率急剧下降,推测变形过程中发生了较高升温,而这时材料实际变形温度 $T_{\text{def}} = T_{\text{soak}} + \Delta T$;运用式(2)^[4]计算平均升温 ΔT 约 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

$$\Delta T = (\sigma \cdot \epsilon) / (C \cdot \rho) \quad (2)$$

式中: ΔT - 升温/ $^{\circ}\text{C}$; σ - 真应力/ $(\text{N}\cdot\text{m}^{-2})$; ϵ - 真应变; C - 质量热容/ $[\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}]$; ρ - 密度/ $(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$ 。

T_{def} 已经处于 $1270\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度范围,从图 1(c)可

知在此温度下 G3 已是脆性断裂温度范畴。

4 结论

(1) G3 合金在合适的变形条件下,发生了动态再结晶。晶粒大小随着温度补偿系数 Z 的增大而减小。

(2) G3 合金热成形区间窄,随着应变速率的增大热塑性变差,当拉伸速率为 $100\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,G3 合金热成形温度在 $1130\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T < 1260\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为宜;当拉伸速率为 $200\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,热成形温度在 $1130\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T \leq 1220\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为宜。

参考文献

- 1 陆世英,康喜范. 镍基及铁镍基耐蚀合金. 北京:化学工业出版社,1989
- 2 Bao Y Z, Abachi Y, Toomine Y, et al. Dynamic Recrystallization Behavior in Martensite in 18Ni-0.2C and SM490 Steel. Tetsu-to-Hagane, 2005, 91(7):602
- 3 Maki T, Akasaka K, Okuno K, et al. Dynamic Recrystallization of Austenite in 18-8 Stainless Steel and 18 Ni Maraging Steel and its Related Phenomena. Tetsu-to-Hagane, 1980, 66(12):1659
- 4 Niikura M, Takahashi K, Ouchi C. Trans. Iron Steel Inst. Jpn, 1987, 27:485

苏玉华(1982-),女,硕士研究生,2005年哈尔滨工业大学毕业,耐蚀合金油套管国产化的研制与开发。

收稿日期:2007-08-15