

· 试验研究 ·

Ti-Nb IF 钢铁素体区的热加工性能

张 鹏^{1,2} 汪凌云² 李 伟²

(1 四川省川威集团有限公司技术中心, 成都 610100; 2 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘 要 按照 Gleeble 1500D 机热模拟试验结果, 通过回归分析得出 Ti-Nb IF (无间隙原子) 钢 (%: 0.005C、0.055Al、0.01Nb、0.08Ti) 在铁素体温度区 (840 ~ 780 °C) 流变应力峰值 σ_p 与 Zener-Hollomon 参数 $Z(T, \dot{\epsilon})$ 之间的解析表达式; 利用铁素体区变形的功率耗散图和加工失稳图建立了该钢的热加工图, 获得其加工安全区和失稳区。结果表明, 变形温度 800 ~ 825 °C, 应变速率 0.02 ~ 0.002 s⁻¹ 区域为 Ti-Nb IF 钢铁素体区热加工安全区域。

关键词 Ti-Nb IF 钢 铁素体区 Zener-Hollomon 因子 流变应力 热加工图

Hot Workability for a Ti-Nb IF Steel in Ferrite Area

Zhang Peng^{1,2}, Wang Lingyun² and Li Wei²

(1 Technology Center, Sichuan Chuanwei Group Co Ltd, Chengdu 610100;
2 College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044)

Abstract According to hot simulation test results by Gleeble 1500D machine, the analytic expression between flow peak stress σ_p and Zener-Hollomon factor $Z(T, \dot{\epsilon})$ for Ti-Nb IF (interstitial atom free) steel (0.005C, 0.055Al, 0.01Nb, 0.08Ti) in ferrite temperature area (840 ~ 780 °C) has been obtained; and the hot processing map for the steel has been established by using power dissipation map and working instability map for test steel in ferrite deformation area to get its processing safety area and instability area. Results showed that the area with deformation temperature 800 ~ 825 °C and strain rate 0.02 ~ 0.002 s⁻¹ was processing safety ferrite area for hot workability of the Ti-Nb IF steel.

Material Index Ti-Nb IF Steel, Ferrite Area, Zener-Hollomon Factor, Flow Stress, Hot Processing Map

20 世纪 90 年代以来, 随着冶金生产技术的进步和汽车工业的发展, IF 钢 (无间隙原子钢) 得到了迅速的发展^[1], 其中, Ti-Nb 处理的高强 IF 钢板具有较好的综合性能^[2]。

1 试验材料及方法

试验钢 (Ti-Nb IF 钢) 生产工艺流程为: 转炉冶炼 → RH 深脱碳处理 → 保护浇铸 → 200 mm × 1 000 mm × 11 000 mm 方坯 → 热轧成 3.23 mm × 10 000 mm × L 带卷。

试样取自 3.23 mm × 10 000 mm × L Ti-Nb IF 钢

热轧带卷, 成分为 (%): 0.005C、0.02Si、0.22Mn、0.008P、0.006S、0.055Al、0.01Nb、0.08Ti。

试样在综合热分析仪 STA 449C 上测得 Ar₁ 和 Ar₃ 分别为 862 °C 和 914 °C。通过 Gleeble 1500D 热模拟实验机将试样在 1 200 °C 保温 120 s, 快冷至 840、810、780 °C 进行变形速率 $\dot{\epsilon}$ 为 2, 0.2, 0.02, 0.002 s⁻¹ 的拉伸变形。图 1 为 Ti-Nb IF 钢真应力-真应变曲线。

2 结果及分析

2.1 流变应力方程的建立

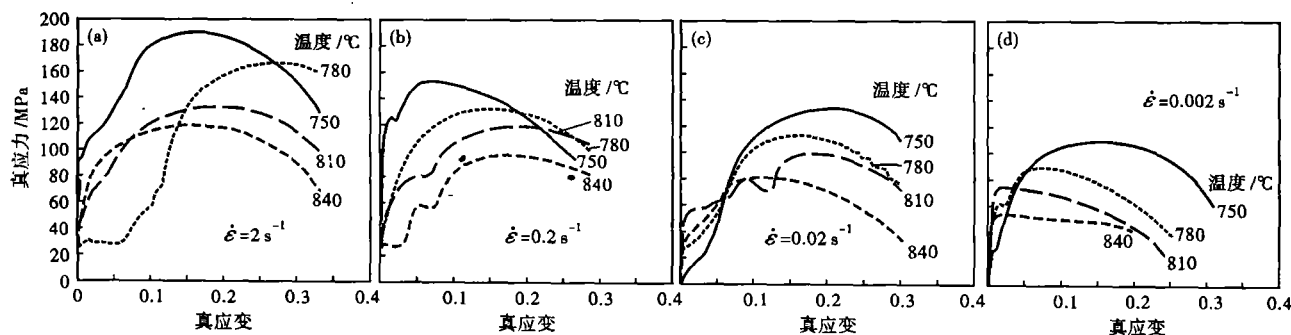


图 1 不同拉伸变形条件下 Ti-Nb IF 钢的拉伸流变真应力-真应变曲线

Fig. 1 Curves of true stress - true strain for Ti-Nb IF steel in different tensile conditions

Zener 和 Hollomon 提出 Zener-Hollomon 参数 Z 表示^[2]:

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

$$\sinh(\alpha\sigma) = [e^{(\alpha\sigma)} - e^{-(\alpha\sigma)}] / 2$$

式中: $\dot{\varepsilon}$ - 应变速率; T - 温度; σ - 流变应力; Q - 平均变形激活能; R - 气体常数; A, α, n - 与钢种有关的常数。

当应变速率为常数时, 假定一定温度范围内 Q 保持不变, 可以得到:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma)] = A' + B' \left(\frac{1000}{T} \right) \quad (2)$$

式中: A', B' - 系数。

将不同变形条件下的流变应力峰值代入上式, 进行线性回归, 绘制相应的 $\ln[\sinh(\alpha\sigma)] - 1000/T$ 关系图。从图 2 可见, 各变形条件下的实验数据间的线性关系均吻合的较好, 一元线性回归分析表明, 回归效果较好, 由回归数据得到 $\alpha = 0.0100$, $n = 7.7055$ 。

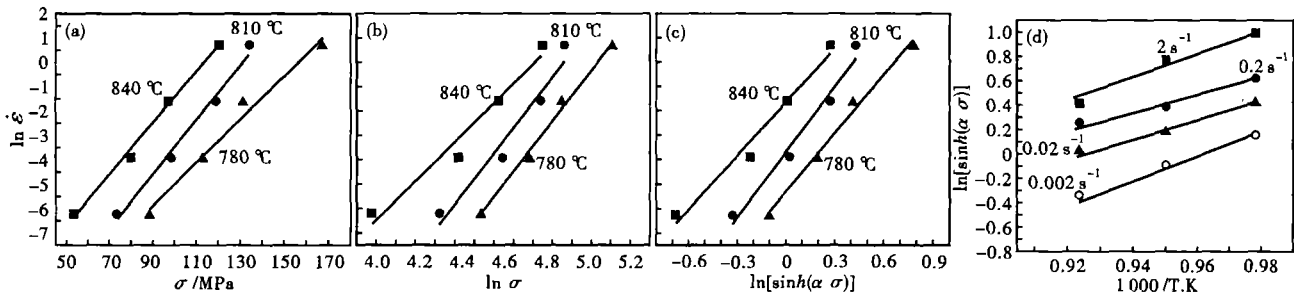


图 2 Ti-Nb IF 钢 $\ln \dot{\varepsilon}-\sigma$ (a), $\ln \dot{\varepsilon}-\ln \sigma$ (b), $\ln \dot{\varepsilon}-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (c) 和 $1000/T-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (d) 曲线

Fig. 2 Curves of $\ln \dot{\varepsilon}-\sigma$ (a), $\ln \dot{\varepsilon}-\ln \sigma$ (b), $\ln \dot{\varepsilon}-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (c) and $1000/T-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ (d) for test Ti-Nb IF steel

由此可见, Ti-Nb IF 钢等温热塑性变形时, 应力-应变关系满足(1)式所示的双曲正弦函数关系。由此可求得平均变形激活能 $Q = 573.33 \text{ kJ/mol}$ 。在 $\ln \dot{\varepsilon}-\ln[\sinh(\alpha\sigma)]$ 关系曲线中, 直线的截距即为 $\ln A - Q/RT$ 的值, 所以只要将 Q, R, T 的值代入, 即可得到 A 值。取其平均值得 $A = 5.6288 \times 10^{25}$ 。

将求得的 Q, α, n, A 等材料参数值代入式中, 即可得到 Ti-Nb IF 钢在铁素体高温区拉伸流变应力方程:

$$\sigma_p = \left[\frac{1}{\alpha} \operatorname{arcsinh}(Z/A) \right]^n = [100 \operatorname{arcsinh}(0.1777 \times 10^{-25} \dot{\varepsilon} e^{68959.6/T})]^{7.7055} \quad (3)$$

2.2 热加工图的建立

可用新方法-加工图^[3]研究材料高温变形行为, 并采用包含流变应力 σ 、应变 ε 、应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 和变形温度 T 的以上本构方程来描述。当温度和应变一定时, 这种关系可以表示为:

$$\sigma = K \dot{\varepsilon}^m \quad (4)$$

式中: K - 常数; m - 应变速率敏感系数(0~1)。

按照动态材料模型的观点, 材料在热加工过程中单位体积内所吸收的功率 P 可以分为两部分, 即

$$P = \sigma \dot{\varepsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma \quad (5)$$

式中: P - 总的功率, 可以表示为两个互补函数 G (耗散量) 和 J (耗散协变量)。在式(5)中的两个积分 $\int_0^{\dot{\varepsilon}} \sigma d\dot{\varepsilon}$ 和 $\int_0^{\sigma} \dot{\varepsilon} d\sigma$ 分别代表 G 和 J 。 G 值代表由于塑性变形引起的功率消耗, 其大多数转化成粘塑性热, 另外小部分以晶格缺陷的形式保留下来。耗散协变量 J 是与材料变形过程中组织变化有关的功率消耗。冶金学过程变化是由于耗散协变量 J 的变化所引起的, 这些过程包括: 动态回复、动态再结晶、内部断裂(无效变形或者楔形断裂)、动态条件下微粒或者第二相的脱溶和长大、针状结构的动态球化以及变形诱导的相变动态变形条件下第二相的析出等过程^[4], 并引入了一个与尺寸无关的功率耗散效率(power dissipation efficiency)的参变量 η :

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (6)$$

η 同应变 ε 、应变速率 $\dot{\varepsilon}$ 和变形温度 T 一起构成了加工图。

流变失稳判定标准^[5]:

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\delta \ln \left(\frac{m}{m+1} \right)}{\delta \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \quad (7)$$

参数 $\xi(\dot{\varepsilon})$ 作为变形温度和应变速率的函数, 在

能耗图上标出该值为负的区域称为流变失稳区域,该图称为流变失稳图。

将功率耗散图同加工失稳图叠加在一起就构成了通常意义上的加工图。在金属材料的加工图中包含一些对热加工安全的区域,同时也包含对热加工来讲容易出现流变失稳和断裂的非安全区域^[6]。

功率耗散图(图3a)中功率耗散系数较大的区域为温度765~825℃,应变速率0.020~0.002 s⁻¹的这个区域,功率耗散系数在0.50以上,特别是在770~800℃区间,功率耗散系数达到了近0.70,最高达到0.82。但是从失稳图(图3b)中发现770~800℃区间几乎在0.002~2 s⁻¹的应变速率变化范围内都为流变失稳区域。而在较高温度区域,即变形温度为800~825℃、应变速率为0.02~0.002 s⁻¹这个区域,功率耗散系数保持较高水平,由失稳图3(b)可见,该区域未出现流变失稳,因此可以认为该区域是该试验钢的热加工安全区域。

图3(a)中,系数是热变形过程中,在不同的变形温度和应变速率条件下,加工产物的熵和改变显微结构所耗散能量的比例。功率耗散图3(a)由于实际代表热加工变形过程中的显微组织变化率,因此又被称作“显微组织轨迹”。加工图中局部区域存在功率耗散效率最大值,它代表特殊的显微组织机制或流变失稳机制。功率耗散图中高功率耗散区定义为具有最佳加工性能区,然而由于楔形裂纹破坏机制通常也对应着高功率耗散系数,因此分析加工图需要进一步的显微组织来佐证。

图3(b)中,当失稳判据为负数时,表示该区域流变不稳定。当这个负的失稳判据绝对值越大时,表示流变不稳定的可能性越大。为了安全起见,制定热加工工艺时,应该避免失稳区域。加工图(图3c)表明,在变形温度为770~800℃与应变速率为0.002~2 s⁻¹范围内,流变失稳区大,可加工范围窄,特别是在高应变速率区,几乎都是失稳区,表明

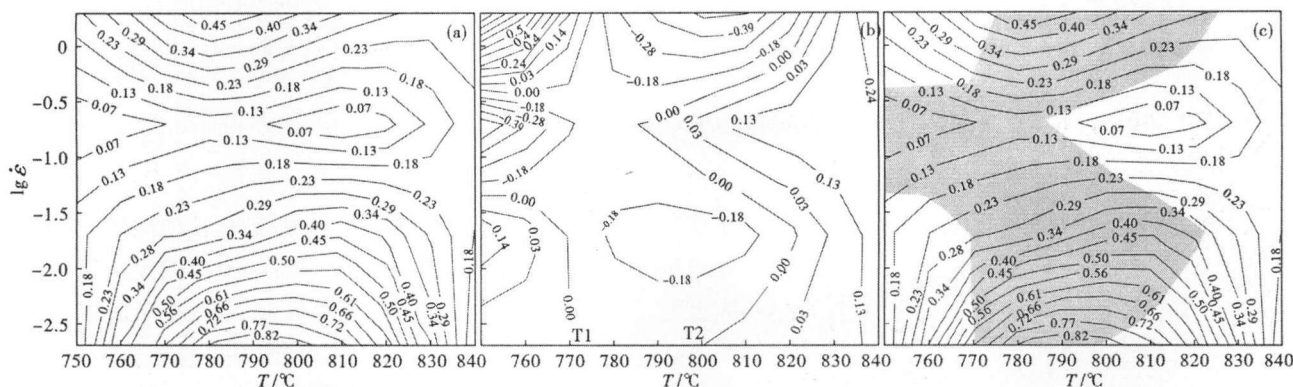


图3 $\varepsilon = 0.25$ 时,试验 Ti-Nb IF 钢的功率耗散图(a),失稳图(b)和加工图(c)

Fig. 3 Power dissipation map (a), instability map (b) and processing map of test Ti-Nb IF steel with $\varepsilon = 0.25$

该钢材加工难度较大。

3 结论

(1) 经热加工图分析,钛加铌共处理的无间隙原子钢在变形温度为800~825℃、应变速率为0.02~0.002 s⁻¹这个区域为铁素体区热加工安全区域。

(2) 在变形温度为770~800℃与应变速率为0.002~2 s⁻¹范围内,流变失稳区大,可加工范围窄,特别是在高应变速率区,几乎都是失稳区。

参考文献

- 1 张 鹏,汪凌云,任正德.微合金化超深冲-无间隙原子(IF)钢生产技术的进展.特殊钢,2005,26(2):1
- 2 Oudin A, Barnett M R, Hodgson P D. Grain Size Effect on the Warm

Deformation Behaviour of a Ti-IF Steel. Materials Science and Engineering A, 2004, 367: 282

- 3 汪凌云,范永革,黄光杰,等.镁合金 AZ31B 的高温塑性变形及加工图.中国有色金属学报,2004,14(7):1068
- 4 Prasad Y V R K, Sasidhara S. Hot Working Guide: A Compendium of Processing Maps. Materials Park, OH: ASM International, 1997: 23
- 5 Bozzini B, Cerri E. Numerical Reliability of Hot Working Processing Maps. Materials Science and Engineering A, 2002, 328: 344
- 6 Murty S V S N, Rao B N. On the Flow Localization Concepts in the Processing Maps of IN718. Materials Science and Engineering A, 1999, 267: 159

张 鹏(1965-),男,博士研究生,副教授,轧制工艺优化及材料组织性能研究。

收稿日期:2008-05-21