

# 低 Ni, Cr, Cu 和 Mo 高性能桥梁钢的动态再结晶行为

陈俊, 唐帅, 刘振宇, 王国栋

(东北大学 轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 采用单道次压缩实验研究了一种低 Ni, Cr, Cu 和 Mo 高性能桥梁钢的动态再结晶行为. 同时, 采用 9 次多项式对实测真应力-真应变曲线进行了拟合, 消除了实测曲线上的波动, 进而确定了不同条件下的加工硬化率-真应力曲线. 加工硬化率-真应力曲线特征表明, 在所研究的不同热压缩变形工艺条件下, 均发生了动态再结晶. 通过计算将常数  $\alpha$  修正为  $0.009 \text{ MPa}^{-1}$ , 得到了实验钢的动态再结晶激活能, 确定了  $\varepsilon_c = 0.63 \varepsilon_p$  关系式, 建立了动态再结晶临界应变模型. 而且降低 Ni, Cr, Cu 和 Mo 含量将显著降低动态再结晶激活能.

**关键词:** 高性能桥梁钢; 热模拟; 动态再结晶; 激活能; 临界应变

中图分类号: TG 142.1

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2014)07-0960-05

## Dynamic Recrystallization Behaviors of High Performance Bridge Steels with Lower Ni, Cr, Cu and Mo Contents

CHEN Jun, TANG Shuai, LIU Zhen-yu, WANG Guo-dong

(State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.

Corresponding author: TANG Shuai, E-mail: tangshuai@ral.neu.edu.cn)

**Abstract:** The dynamic recrystallization behaviors of high performance bridge steel with lower Ni, Cr, Cu and Mo contents were investigated using single pass compression tests. At the same time, the true stress-true strain curves were fitted and smoothed using a ninth-order polynomial in order to eliminate fluctuations in experimental curves, and the strain hardening rate vs true stress curves under different conditions were determined. The characteristics of the strain hardening rate vs true stress curves show that the dynamic recrystallization has occurred for different hot compression deformation processes studied. The constant  $\alpha$  was modified as  $0.009 \text{ MPa}^{-1}$ , the dynamic recrystallization activation energy was gained, the relationship of  $\varepsilon_c = 0.63 \varepsilon_p$  was determined and the critical strain model for predicting dynamic recrystallization initiation was established. Moreover, the dynamic recrystallization activation energy was significantly lowered with reducing Ni, Cr, Cu and Mo contents.

**Key words:** high performance bridge steels; thermo-simulation; dynamic recrystallization; activation energy; critical strain

随着桥梁设计和人跨度桥梁的建造和发展, 对桥梁用钢提出了越来越高的要求, 促进了高性能桥梁钢的发展<sup>[1-2]</sup>. 高性能桥梁钢通常采用低碳, 同时采用 Nb, V 和 Ti 微合金化以及 Ni, Cr, Cu 和 Mo 合金化的成分设计, 获得贝氏体组织. 而合金元素的添加将使成本大大提高, 因此在满足性能要求的条件下, 适当降低 Ni, Cr, Cu 和 Mo

合金元素用量具有重大意义. 但是合金元素的降低将显著影响再结晶行为, 必须对其进行深入研究.

高性能桥梁钢不仅具有较高的强度, 还具有极佳的低温韧性、焊接性能、塑性、冷成形性能, 同时兼具耐候性, 进而大大降低桥梁建造成本, 提高桥梁的使用安全性及寿命. 目前, 高性能桥梁钢的

收稿日期: 2013-09-02

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (N110607003, N110307002)

作者简介: 陈俊 (1982-), 男, 河南南阳人, 东北大学博士研究生; 刘振宇 (1967-), 男, 内蒙古赤峰人, 东北大学教授, 博士生导师; 王国栋 (1942-), 男, 辽宁大连人, 东北大学教授, 博士生导师, 中国工程院院士.

生产通常采用 TMCP ( thermo-mechanical control process) 工艺<sup>[3]</sup>, 而控制轧制作为 TMCP 工艺的重要组成部分, 显著影响奥氏体的组织状态, 也就是奥氏体晶粒尺寸、分布及织构等, 进而显著影响钢铁材料的力学性能. 且奥氏体的组织状态主要受热变形过程中的动态再结晶及道次间隔时间内的亚动态再结晶和静态再结晶影响, 尤其是热变形过程中的动态再结晶行为显著影响奥氏体的组织状态, 因此有必要深入研究高性能桥梁钢的动态再结晶行为, 进而最大程度地发挥再结晶区轧制的细化效果.

本文采用单道次压缩实验研究了一种低 Ni, Cr, Cu 和 Mo( 同文献[4] 相比) 高性能桥梁钢的

动态再结晶行为, 确定了实验钢的再结晶激活能, 建立了临界应变模型.

### 1 实验方法

实验钢的化学成分如表 1 所示. 实验钢采用真空感应炉熔炼并浇注为铸锭, 然后采用 450 mm 二辊可逆实验轧机在 1 150 ~ 1 100 ℃ 温度范围内将铸锭轧制为 12 mm 厚钢板, 轧后立即淬火至室温. 从淬火板上切取试样并加工为  $\phi 8\text{ mm} \times 15\text{ mm}$  圆柱形热模拟试样. 采用 MMS-300 热力模拟实验机进行单道次压缩实验, 测得不同变形条件下的流变应力数据.

表 1 实验钢化学成分( 质量分数)											%
Table 1 Chemical composition of the tested steel( mass fraction)											
C	Si	Mn	P	S	Al	Ni	Cr	Cu	Ti	Mo	Nb
0. 051	0. 44	1. 60	0. 007	0. 001	0. 011	0. 33	0. 46	0. 44	0. 027	0. 17	0. 044

将试样以 10 ℃/s 的加热速度加热到 1 200 ℃, 并保温 300 s, 进行充分的奥氏体化, 然后以 10 ℃/s 的冷却速度冷却至 950, 1 000, 1 050, 1 100 和 1 150 ℃ 的变形温度, 并保温 15 s 以消除温度梯度, 之后以 0. 01, 0. 1, 0. 2, 0. 5, 1, 5 s<sup>-1</sup> 的恒应变速率进行压缩变形, 真应变为 0. 7, 同时记录压缩变形过程中的流变应力数据.

## 2 结果与讨论

### 2. 1 流变应力曲线及与之对应的加工硬化率 - 真应力曲线

实验钢的流变应力曲线及与之对应的加工硬化率 - 真应力曲线如图 1 所示. 图 1a, 1c, 1e, 1g 显示, 除了较低变形温度和较高应变速率条件下的流变应力曲线外, 不同变形条件下的流变应力曲线均明显地呈随着应变的增加, 其流变应力先增加至峰值应力, 随后降低, 直至达到稳定状态. 另外, 图 1b, 1d, 1f, 1h 显示, 除了 1 150 ℃ - 0. 01 s<sup>-1</sup>, 1 100 ℃ - 0. 01 s<sup>-1</sup> 和 1 150 ℃ - 0. 1 s<sup>-1</sup> 变形条件下加工硬化率 - 真应力曲线外, 其他变形条件下的加工硬化率 - 真应力曲线上均存在转折. 这些现象表明动态再结晶已经开始<sup>[5]</sup>.

在较低变形温度和较高应变速率条件下, 如图 1e 和 1g 所示, 虽然未观察到明显的峰值应力, 但与之对应的加工硬化率 - 真应力曲线上存在着明显的转折, 说明动态再结晶已经发生, 但

根据之前的研究结果, 此时的动态再结晶分数较小. 在 1 150 ℃ - 0. 01 s<sup>-1</sup>, 1 100 ℃ - 0. 01 s<sup>-1</sup> 和 1 150 ℃ - 0. 1 s<sup>-1</sup> 变形条件下, 虽然其流变应力曲线呈明显的动态再结晶型流变应力曲线特征, 但在与之对应的加工硬化率 - 真应力曲线上未观察到明显的转折.

### 2. 2 动态再结晶激活能

金属材料在高温塑性变形条件下, 应力、应变速率和变形温度之间的关系可用如下经验方程来描述<sup>[6]</sup>:

$$\dot{\epsilon} = A \{ \sinh(\alpha \sigma_p) \}^n \exp(-Q_{\text{def}}/RT).$$

(1)

式中:  $A, n, \alpha$  为常数;  $Q_{\text{def}}$  为激活能;  $R$  为气体常数, 其值为 8. 31 J/mol·K;  $T$  为绝对温度.

对于式(1) 中的常数  $\alpha$  可用式(2) 和式(3) 来确定:

$$\dot{\epsilon} = B_1 \sigma_p^m,$$

(2)

$$\dot{\epsilon} = B_2 \exp(\beta \sigma_p).$$

(3)

式中,  $B_1, B_2, m, \beta$  均为与材料有关的常数, 且  $\beta = \alpha m$ . 所以对式(2) 和式(3) 两边取自然对数, 在温度一定的条件下, 可知  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln \sigma_p$  和  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\sigma_p$  呈线性关系, 即可求得  $\beta$  的平均值为 0. 064 23,  $m$  的平均值为 7. 102 8, 进而求得  $\alpha = 0. 009\text{ MPa}^{-1}$ .

对式(1) 两边取自然对数并求导可得

$$Q_{\text{def}} = R \times \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}}{\partial [\ln \sinh(\alpha \sigma_p)]} \bigg|_T \left[ \frac{\partial [\ln \sinh(\alpha \sigma_p)]}{\partial (1/T)} \right] \bigg|_{\dot{\epsilon}} =$$

$$Rnb.$$

(4)

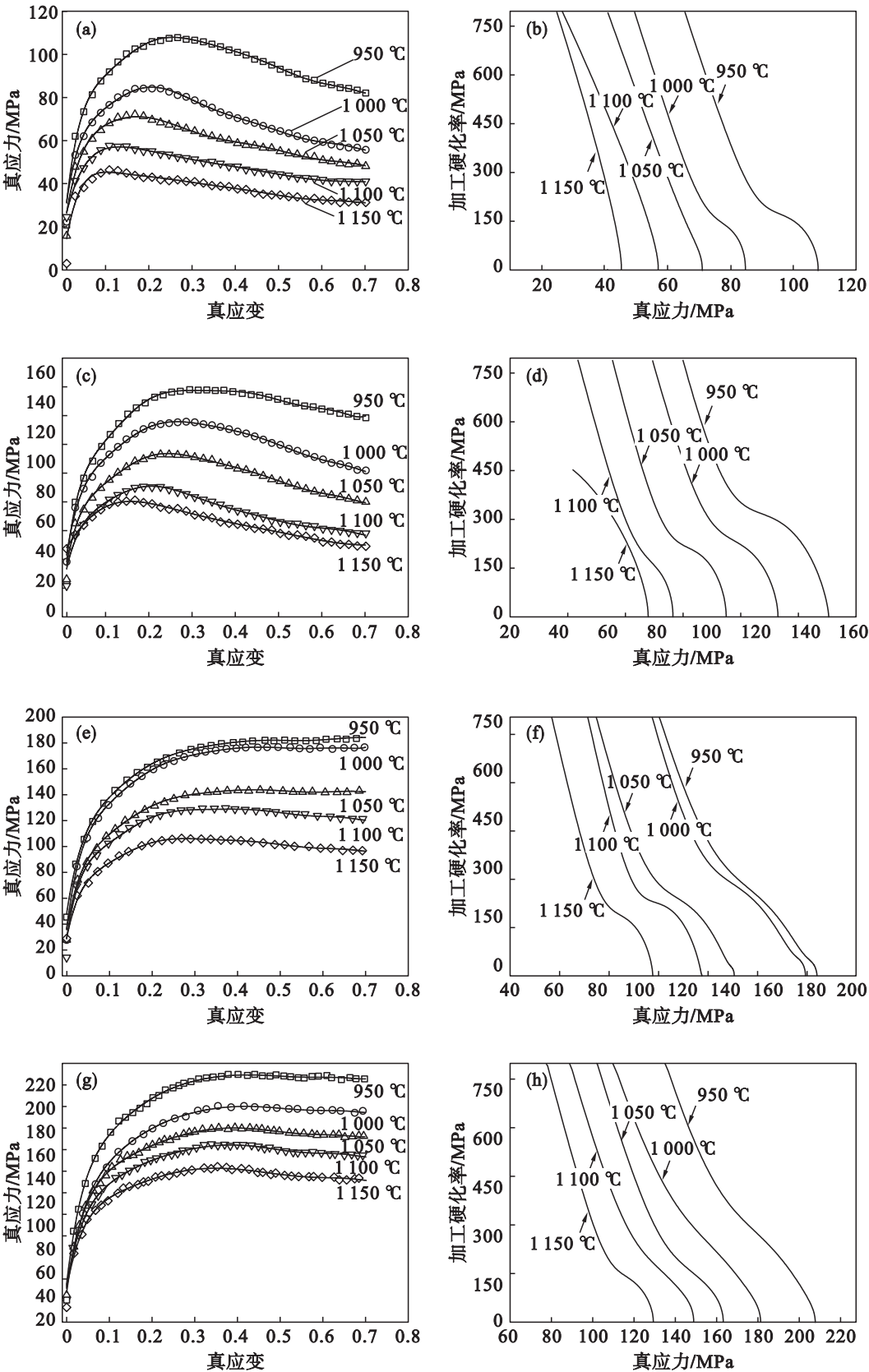


图 1 实验钢的典型流变应力曲线和与之对应的加工硬化率 - 真应力曲线

Fig. 1 Typical flow stress curves of the tested steel and their corresponding strain hardening rate vs true stress curves

(a),(b)—0.01 s<sup>-1</sup>; (c),(d)—0.1 s<sup>-1</sup>; (e),(f)—1 s<sup>-1</sup>; (g),(h)—5 s<sup>-1</sup>.

可知,  $\ln \dot{\epsilon}$  与  $\ln \sinh(\alpha \sigma_p)$  呈线性关系, 其斜率即为  $n$  值, 如图 2a 所示;  $\ln \sinh(\alpha \sigma_p)$  与  $1/T$  呈

线性关系, 其斜率即为  $b$  值, 如图 2b 所示. 即可求得  $n$  的平均值为 5.16,  $b$  的平均值为 7.762, 将  $n$

值和  $b$  值代入式(4)可得实验钢的激活能  $Q_{\text{def}} = 333.0 \text{ kJ/mol}$ . 此值较文献[4]中所报道的激活能  $Q_{\text{def}} = 425.7 \text{ kJ/mol}$  低约  $100 \text{ kJ/mol}$ , 说明降低 Ni, Cr, Mo 和 Cu 含量使得激活能  $Q_{\text{def}}$  显著降低.

2.3 动态再结晶临界应变的确定及模型的建立

已知动态再结晶只有在大于临界变形程度  $\varepsilon_c$  时才会发生, 确定临界应变  $\varepsilon_c$  在热变形模拟中具有重要意义<sup>[5]</sup>. 通常认为  $\varepsilon_c = (0.60 \sim 0.85) \times \varepsilon_p$ <sup>[7]</sup>, 谢章龙等<sup>[8]</sup> 给出了其系数为 0.79, 陈礼清等<sup>[9]</sup> 给出了不同的  $\varepsilon_c$  表达式. 本文确定了不同变形条件下的峰值应变  $\varepsilon_p$  和临界应变  $\varepsilon_c$ , 并取其平均值, 得到  $\varepsilon_c = 0.63 \varepsilon_p$  关系式.

Zener - Hollomon 参数是综合反映热加工过程中变形温度和变形速率影响的一个重要参数, 可用下述关系式表述:

$$Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q_{\text{def}}/RT) = A \{ \sinh(\alpha \sigma_p) \}^n. \quad (5)$$

根据回归得到的激活能  $Q_{\text{def}}$ , 常数  $\alpha$  和  $n$ , 可以计算出  $Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q_{\text{def}}/RT)$  及  $\{ \sinh(\alpha \sigma_p) \}^n$ , 然后用  $Z = \dot{\varepsilon} \exp(Q_{\text{def}}/RT)$  对  $\{ \sinh(\alpha \sigma_p) \}^n$  作图, 并对其进行线性回归, 如图 3 所示, 即可得到实验钢的材料常数  $A$  值为  $5.66 \times 10^{11}$ .

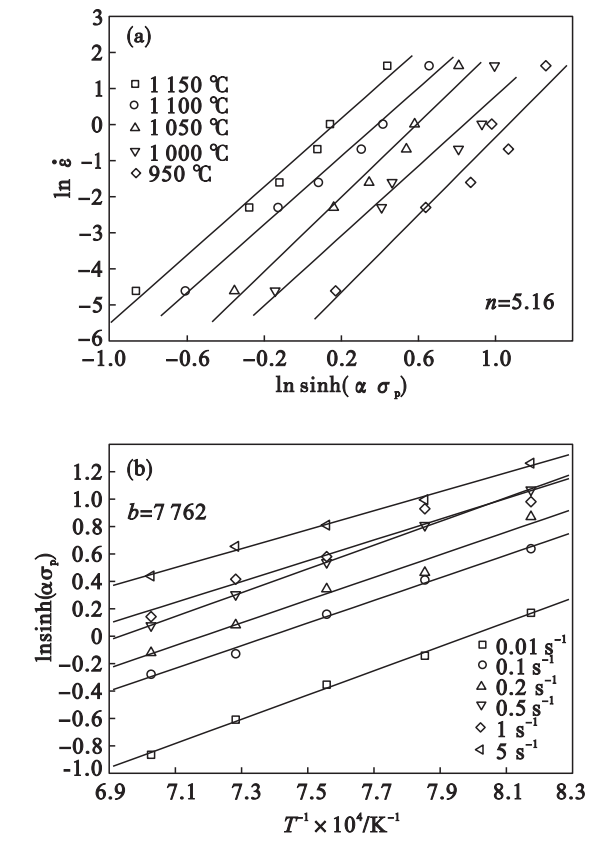


图 2 实验钢峰值应力与应变速率和变形温度的关系  
Fig. 2 Correlations between the peak stress, strain rate and deformation temperature of the tested steel  
(a) 峰值应力与应变速率的关系;  
(b) 峰值应力与变形温度的关系.

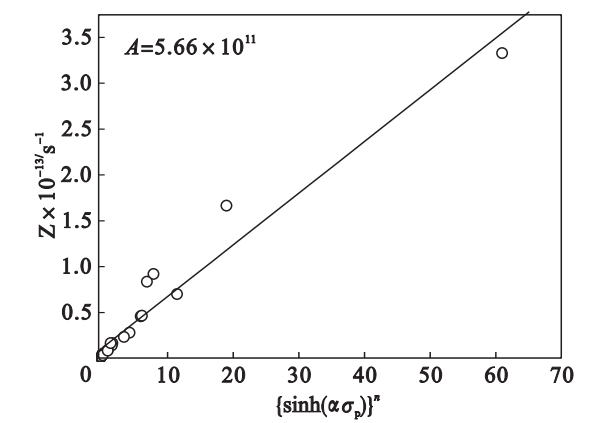


图 3 Zener - Hollomon 参数与  $\{ \sinh(\alpha \sigma_p) \}^n$  的关系  
Fig. 3 Correlations between Zener-Hollomon parameter and  $\{ \sinh(\alpha \sigma_p) \}^n$

图 4 表明, 峰值应力所对应的峰值应变  $\varepsilon_p$  与  $Z/A$  近似为幂函数关系, 所以采用式(6)对其进行回归计算, 得到常数  $a = 0.20572$ ,  $b = 0.15654$ , 且  $R^2 = 0.94$ , 说明此经验方程可以很好地拟合实验数据. 将参数代入式(6), 得到了实验钢的临界应变表达式(7).

$$\varepsilon_p = a \times \left( \frac{Z}{A} \right)^b, \quad (6)$$
$$\varepsilon_c = 0.1296 \times \left( \frac{\dot{\varepsilon} \exp(333000/(8.31T))}{5.66 \times 10^{11}} \right)^{0.15654}. \quad (7)$$

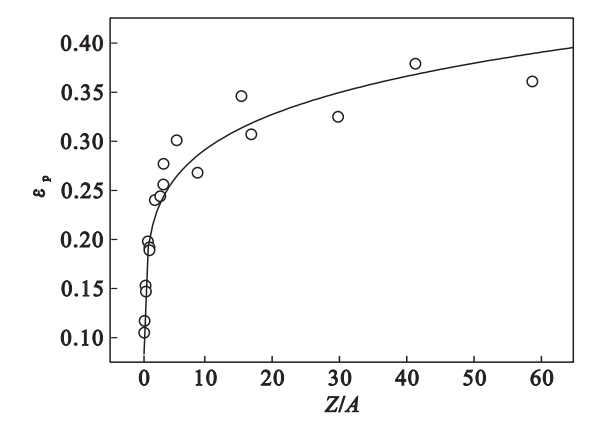


图 4  $\varepsilon_p$  与  $Z/A$  的关系  
Fig. 4 Correlations between  $\varepsilon_p$  and  $Z/A$

3 结 论

- 1) 在所研究的不同热压缩变形工艺条件下, 均发生了动态再结晶.
- 2) 通过计算将常数  $\alpha$  修正为  $0.009 \text{ MPa}^{-1}$ , 同时根据所确定的临界应变和峰值应变, 得到了  $\varepsilon_c = 0.63 \varepsilon_p$  关系式. 回归得到了实验钢的动态再结晶激活能约为  $333.0 \text{ kJ/mol}$ , 建立了临界应变模型.