

## Cr5 型冷轧工作辊用钢的热变形行为

李倩<sup>1</sup> 蔡大勇<sup>1</sup> 唐志国<sup>1</sup> 廖波<sup>1</sup> 朱学刚<sup>2</sup>

(1 燕山大学亚稳材料制备技术与科学国家重点实验室, 秦皇岛 066004; 2 中钢集团邢台机械轧辊有限公司, 邢台 054025)

**摘要** 采用 Gleeble-3500 热模拟试验机, 研究了 Cr5 钢(% : 0.85C, 5.0Cr, 0.6Si, 0.5Ni, 0.4Mo, 0.1V) 在应变速率 0.001 ~ 1 s<sup>-1</sup>、变形温度 900 ~ 1 200 °C 条件下的热变形行为。Cr5 钢的热变形激活能  $Q$  为 307 kJ/mol, 确定了表征热变形峰值应力与温度和应变关系的 Cr5 钢的热变形方程, 建立了其热加工图(Processing Map); 随着变形温度的升高及应变速率的降低, 能量消耗效率  $\eta$  逐渐升高; 真应变为 0.7, 变形温度为 1 100 °C、应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup> 时, 能量消耗效率达到峰值, 约为 40%。

**关键词** Cr5 型冷轧工作辊用钢 热变形方程 热加工图

## Behaviour of Thermal Deformation of Steel Cr5 for Cold Working Roll

Li Qian<sup>1</sup>, Cai Dayong<sup>1</sup>, Tang Zhiguo<sup>1</sup>, Liao Bo<sup>1</sup> and Zhu Xuegang<sup>2</sup>

(1 State Key Lab of Metastable Materials Science & Technology, Yanshan University, Qinhuangdao 066004;  
2 Xingtai Machinery & Mill Roll Co Ltd, Zhonggang Group, Xingtai 054025)

**Abstract** Behaviour of thermal deformation of steel Cr5 (% : 0.85C, 5.0Cr, 0.6Si, 0.5Ni, 0.4Mo, 0.1V) with strain rate 0.001 ~ 1 s<sup>-1</sup> at 900 ~ 1 200 °C has been studied by using Gleeble-3500 thermal simulator. The apparent activation energy  $Q$  for steel Cr5 is 307 kJ/mol. The thermal deformation equation for steel Cr5 is given to characterize the dependence of peak stress of thermal deformation on temperature and strain, and its processing map is established. With increasing deformation temperature and decreasing strain rate, the efficiency  $\eta$  of power dissipation increases, and with true strain 0.7 and strain rate 0.001 s<sup>-1</sup> at 1 100 °C the efficiency of power dissipation is up to peak value that is about 40%.

**Material Index** Steel Cr5 for Cold Working Roll, Thermal Deformation Equation, Processing Map

Cr5 型冷轧工作辊用钢是在 Cr3 型材质的基础上, 提高了 Cr5(%), Si、Mo、V 等合金元素含量。Cr 含量从 3% 提高到 5% 时, 不仅使 Cr5 钢冷轧辊的耐磨性能和淬硬层深度大大提高, 而且对于延缓裂纹形成、扩展和提高抗回火能力都起到了积极作用, 同时辊面毛化初始粗糙度也大幅度延长, 从而减少了剥落, 提高了轧辊的使用寿命。Cr5 型冷轧工作辊用钢已在生产上得到了广泛应用<sup>[1,2]</sup>。本文通过对 Cr5 型冷轧工作辊用钢进行高温热压缩变形的试验模拟, 研究了该合金高温流变应力与应变速率、变形温度之间的关系, 并建立了加工图(Processing Map), 为该合金锻造工艺的优化奠定了理论基础。

### 1 试验材料与研究方法

试验材料取自 Cr5 型冷轧工作辊锻坯锻后热处理态, 其主要成分如表 1 所示。热变形试验在 Gleeble-3500 热模拟试验机上进行, 试样尺寸为  $\Phi 10 \text{ mm} \times 15 \text{ mm}$ , 变形温度为 900 ~ 1 200 °C, 应变

表 1 Cr5 型冷轧工作辊用钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of steel Cr5 for cold working roll /%

C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni	Mo	V
0.85	0.2	0.6	<0.02	<0.02	5.0	0.5	0.4	0.1

速率为 0.001 ~ 1 s<sup>-1</sup>, 变形量为工程应变 50%。

### 2 试验结果及分析

#### 2.1 Cr5 型冷轧工作辊用钢的高温流变曲线

随着变形温度的升高以及应变速率的降低, 流变曲线由加工硬化型逐渐向动态回复型和动态再结晶型转变。变形温度相同时, 随着应变速率的增加, Cr5 钢真应力随之增加; 应变速率相同时, 流变应力随变形温度的升高而降低(图 1)。

#### 2.2 热变形方程

金属材料的高温流变应力既与材料化学成分有关, 又与变形温度  $T$ 、应变速率  $\dot{\epsilon}$  及应变量  $\epsilon$  有关。在材料的成分不变时, 峰值应力  $\sigma_p$  与变形条件之间

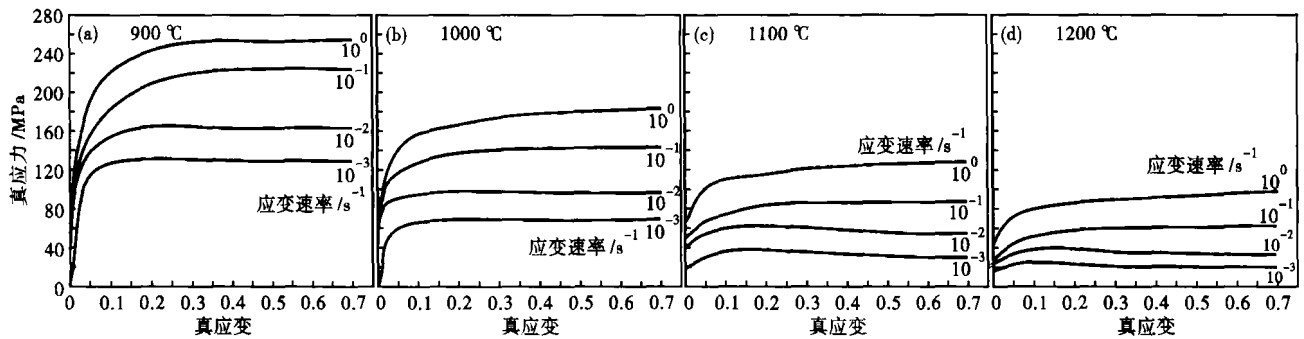


图 1 Cr5 型冷轧工作辊用钢的高温真应力-应变曲线

Fig.1 True stress-strain curves of steel Cr5 for cold working roll at elevated temperature

有如下关系<sup>[3,4]</sup>:

$$\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] = \frac{1}{n} \ln \dot{\epsilon} - \frac{1}{n} \ln A + \frac{Q}{nRT} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_p$ - 峰值应力;  $A$ 、 $\alpha$ 、 $n$ - 与变形温度无关的常数;  $Q$ - 热变形激活能;  $R$ - 气体常数;  $T$ - 绝对温度。

由式(1)可知,  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] - \ln \dot{\epsilon}$  和  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] - \frac{1}{T}$  都呈一次线性关系, 而斜率分别为  $1/n$  和  $Q/(nR)$ 。  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] - \ln \dot{\epsilon}$  和  $\ln[\sinh(\alpha\sigma_p)] - \frac{1}{T}$  的拟合曲线如图 2(a, b) 所示。可以看出, 两组关系曲线都近似为直线, 回归分析可得:  $Q = 307 \text{ kJ/mol}$ ,  $n = 4.591$ ,  $A = 9.85 \times 10^{12}$ 。

Cr5 型冷轧工作辊用钢的热变形方程可表示为:

$$\dot{\epsilon} = 9.85 \times 10^{12} [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]^{4.591} \exp\left(-\frac{307000}{RT}\right) \quad (2)$$

$Z$  参数被广泛用于表示变形温度及应变速率对热变形过程的综合作用, 本试验条件下, 通过已求得的热变形激活能  $Q$ , 可以计算 Cr5 型冷轧工作辊用钢热变形的  $Z$  参数 [ $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$ ]。随着  $Z$  值

的增加, 热变形峰值应力相应增加(图 2c)。

### 2.3 热加工图

根据动态材料模型 (Dynamic Materials Model)<sup>[5-9]</sup>, 材料热变形过程中的能量消耗行为取决于材料显微组织的变化。

热变形过程中材料的能量消耗包括两部分, 即材料塑性变形而消耗的能量  $G$  以及材料组织动态变化所消耗的能量  $J$ , 应变速率敏感性指数  $m$  可认为是两部分能量之间的分配系数。

对于非线性消耗过程, 能量消耗效率  $\eta$  (Efficiency of power dissipation) 可表示为:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (3)$$

$\eta$  为一无量纲参数, 描述了材料热变形过程中因显微组织改变而消耗的能量与总能量的比值。能量消耗效率  $\eta$  取决于热加工温度  $T$  及应变速率  $\dot{\epsilon}$ 。Cr5 型冷轧工作辊用钢的热加工图如图 3 所示。

Cr5 型冷轧工作辊用钢的热加工图有如下特征: (1) 真应变对热加工图形状的影响不大, 随着变形温度的升高及应变速率的降低, 能量消耗效率逐渐升高。(2) 真应变量为 0.7 时, 变形温度在

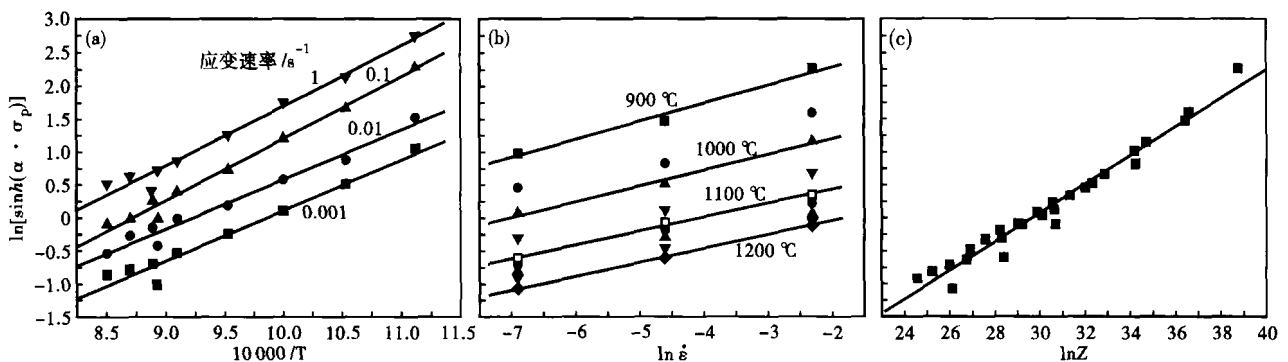


图 2 变形温度(a)、应变速率(b)和 Z 参数(c)对 Cr5 型冷轧工作辊用钢峰值应力的影响

Fig.2 Effect of temperature (a), strain rate (b) and Z parameter (c) on thermal deformation peak stress of steel Cr5 for cold working roll

1 100 ℃、应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup> 时,能量消耗效率(η)达到峰值,约为 40%。

热变形温度与应变速率的不同,可导致热变形过程中组织变化的不同,使不同区域 η 值产生差别。对真应变量为 0.7 的热加工图不同区域相应工艺的热变形试样进行组织观察,典型特征见图 4。由图 4 可见,可以将热变形组织分为形变组织(图 4 a),部分再结晶组织

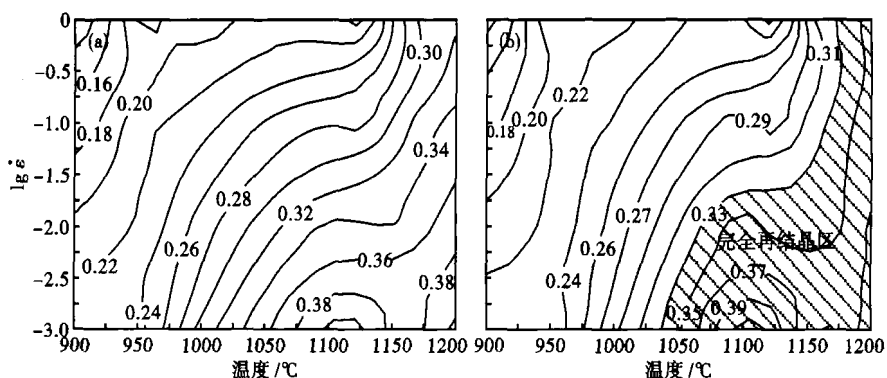


图 3 Cr5 型冷轧工作辊用钢典型的热加工图:(a)真应变量为 0.4;(b)真应变量为 0.7  
Fig.3 Typical processing map of steel Cr5 for cold working roll: (a) true strain 0.4; (b) true strain 0.7

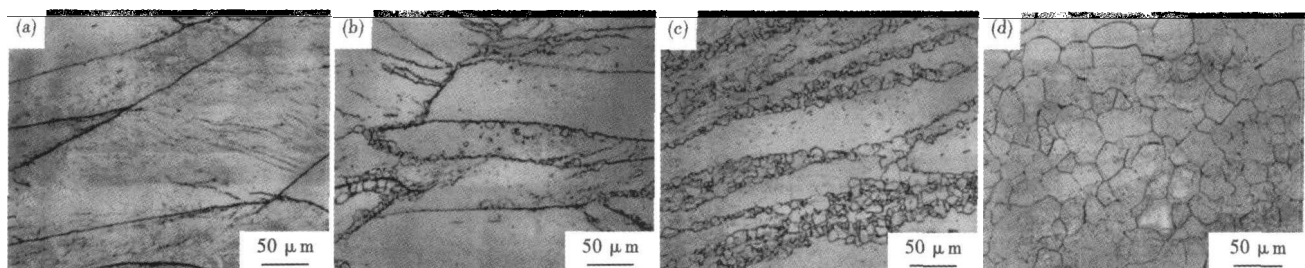


图 4 Cr5 型冷轧工作辊用钢的热变形组织,应变速率 1 s<sup>-1</sup>:(a) 900 ℃;(b) 950 ℃;(c) 1000 ℃;(d) 1150 ℃  
Fig.4 Structure of thermal deformed steel Cr5 for cold working roll with strain rate 1 s<sup>-1</sup> at 900 ℃ (a), 950 ℃ (b), 1000 ℃ (c) and 1150 ℃ (d)

(图 4b,c)和完全再结晶组织(图 4d)。

### 3 结论

(1)在应变速率 0.001 ~ 1 s<sup>-1</sup>、变形温度 900 ~ 1 200 ℃条件下,Cr5 型冷轧工作辊用钢在真应变较小时,流变应力随着真应变量的增加迅速增加,当超过一定应变后,流变应力开始升高或趋于恒定或略有降低。变形温度相同时,随着应变速率的增加,真应力随之增加;应变速率相同时,流变应力随温度的升高而降低。

(2)Cr5 型冷轧工作辊用钢的热变形激活能 Q 为 307 kJ/mol;热变形方程为:

$$\dot{\epsilon} = 9.85 \times 10^{12} [\sinh(\alpha \cdot \sigma_p)]^{4.591} \exp\left(-\frac{307\,000}{RT}\right)$$

(3)真应变对热加工图的影响不大。随着变形温度的升高及应变速率的降低,能量消耗效率逐渐升高。变形温度为 1 100 ℃、应变速率为 0.001 s<sup>-1</sup>时,能量消耗效率 η 达到峰值,约为 40%。

河北省科技支撑计划资助项目(0721209D)

### 参考文献

- 1 俞誓达,陈 茜.我国轧辊业现状及发展中应注意的问题.钢铁,2007,42(7):1
- 2 武建平,贾建平,王自东.V-N 微合金化含钨改进型 Cr5W 冷轧工作辊用钢.特殊钢,2007,28(5):40
- 3 蔡大勇,熊良银,孙贵东,等.GH708 高温合金热变形行为.稀有金属材料与工程,2006,35(A02):144
- 4 沈 健,李德峰.铝锂合金高温塑性变形流变应力的研究.稀有金属材料与工程,1997,26(5):26
- 5 Gronostajski Z. The Deformation Processing Map for Control of Microstructure in CuAl19.2Fe3 Aluminium Bronze. Journal of Materials Processing Technology,2002,125/126(9):119
- 6 李立新,汪凌云.含硼微合金钢动态再结晶模型的研究.特殊钢,2003,24(6):30
- 7 魏立群.BH08G 焊接用钢的热变形行为及动力学再结晶模型.特殊钢,2007,28(1):10
- 8 Desvallees Y, Bouzidi M, Bois F, et al. Delta Phase in Inconel 718. Mechanical Properties and Forging Process Requirements. In "Superalloys 718, 706 and Various Derivatives", E. A. Loria. TMS, 1994: 281
- 9 Srinivasan N, Prasad Y V R K. Hot Working Characteristics of Nimonic 75, 80A and 90 Superalloys: a Comparison using Processing Maps. Journal of Materials Processing Technology, 1995, 51(1~4):171

李 倩(1982-),女,硕士研究生,主要研究方向为轧辊材料的开发与工艺优化。

收稿日期:2009-04-07