

38 mm × 1 820 mm 热轧超低碳带钢热压缩变形抗力

程曦¹ 任勇¹ 程晓茹¹ 胡伟东² 周学俊²

(1 武汉科技大学材料与冶金学院, 武汉 430081; 2 武汉钢铁公司, 武汉 430083)

摘要 通过热模拟试验机对超低碳钢 M21 (% : 0.003C, 0.045Al, 0.06Ti, 0.0027N, 0.0002B) $\Phi 8$ mm × 12 mm 圆柱体试样在 900 ~ 1 100 °C 以 5 ~ 50 s⁻¹ 变形速率进行 0 ~ 80% 压缩试验。结果表明, 随温度降低、变形速率提高和变形程度增加, 超低碳钢变形抗力增加。并借助 Origin 软件通过多元非线性回归建立了该超低碳钢变形抗力的数学模型, 拟合精度较高。

关键词 超低碳钢 热模拟试验 变形抗力 数学模型

Deformation Resistance of 38 mm × 1 820 mm Hot Rolled Strip of Ultra-Low Carbon Steel during Thermal Compression Process

Cheng Xi¹, Ren Yong¹, Cheng Xiaoru¹, Hu Weidong² and Zhou Xuejun²

(1 College of Materials Science and Metallurgical Engineering, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 2 Wuhan Iron and Steel Corp., Wuhan 430083)

Abstract Hot compressive test of $\Phi 8$ mm × 12 mm cylinder test specimen of ultra-low carbon steel M21 (% : 0.003C, 0.045Al, 0.06Ti, 0.0027N, 0.0002B) with deformation extent 0 ~ 80% and strain rate 5 ~ 50 s⁻¹ at 900 ~ 1 100 °C has been carried out by thermal test machine. Results show that with decreasing temperature, increasing strain rate and deformation extent, the deformation resistance of ultra-low carbon steel increases. And the math model of deformation resistance of the ultra-low carbon steel is established by Origin software with multi-component non-linear regression, and the fit precision is higher.

Material Index Ultra-Low Carbon Steel, Hot Simulation Test, Deformation Resistance, Math Model

热轧超低碳带钢具有优异的深冲性能、高塑性应变比、高延伸率、高硬化指数以及较低的屈强比, 并具有优异的非时效性, 广泛应用于汽车覆盖件、家电、仪器仪表外壳等深冲制品^[1]。在热轧过程中超低碳带钢边部常常产生“翘皮”缺陷, 严重影响了带钢的表面质量和成材率。

1 实验过程

实验材料(表1)取自武钢二热轧 R2 后的粗轧板坯, 其原始坯料的厚度为 210 mm, 宽 1 800 mm, 长 2 200 mm; 经 R2 后的粗轧出口厚度为 38 mm, 宽 1 820 mm。将试样沿着轧制方向截取并制成 $\Phi 8$ mm × 12 mm 的圆柱体, 然后在热模拟机上进行试验。试样以 10 °C/s 加热到 1 200 °C, 保温 3 min, 以 5

°C/s 冷却到变形温度进行压缩。试样变形温度范围为 900 ~ 1 100 °C, 每 50 °C 为一个间隔, 变形速率分别为 5、10、20、50 s⁻¹, 相对变形量为 0.8。

2 实验结果分析

2.1 变形温度和变形速率对变形抗力的影响

由图 1 可见, 在变形程度一定, 变形速率不同的情况下, 变形抗力随着温度的升高而减小, 这是因为高温对金属有软化作用, 并且在高温下发生回复和再结晶, 可减轻或消除由于塑性变形产生的加工硬化, 使得变形阻力降低。

从图 2 中可以看到, 在温度一定时, 变形抗力随着变形速率的增加而增加。因变形速率的增加会使位错移动速度增加, 从而阻碍滑移的进行, 并发生动态回复的时间减少, 变形所产生的加工硬化来不及得到完全消除, 也使得变形抗力增加。

2.2 变形程度对变形抗力的影响

由图 3 可见, 随变形程度的增加, 超低碳钢的变形抗力逐渐增大。由于塑性变形过程中, 空间晶格

表 1 M21 超低碳钢的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of ultra-low carbon steel M21 / %

C	Mn	Si	P	S	Cu	Al	Als	Ti	N	B
0.003	0.17	0.01	0.009	0.009	0.04	0.045	0.031	0.06	0.0027	0.0002

产生弹性畸变所引起金属空间晶格的畸变,会阻碍滑移的进行。畸变越严重,塑性变形越难以进行,呈现变形抗力越大,塑性越低随着变形程度的增大,晶格的畸变增大,滑移带将产生严重的弯曲。在滑移带中,晶体将碎化为微晶块,同时产生裂纹,这就进一步使金属的变形阻力增大塑性降低。

2.3 超低碳钢的动态应变时效分析超低碳钢变形抗力曲

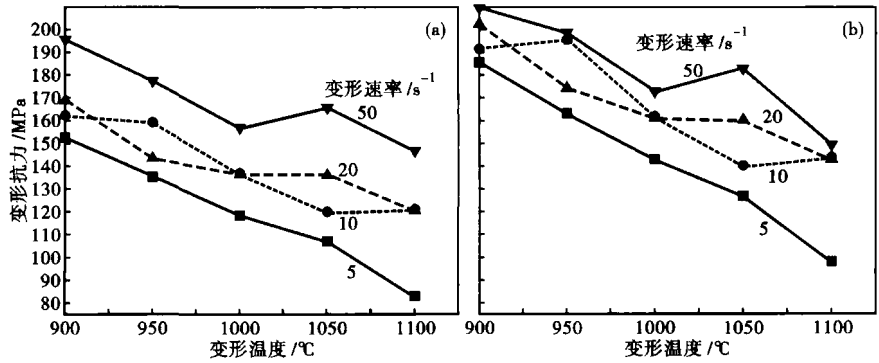


图 1 温度对 M21 超低碳钢变形程度- (a)0.4;(b)0.6 的变形抗力的影响
Fig. 1 Effect of temperature on deformation resistance of ultra-low carbon steel M21, deformation extent: (a) 0.4; (b) 0.6

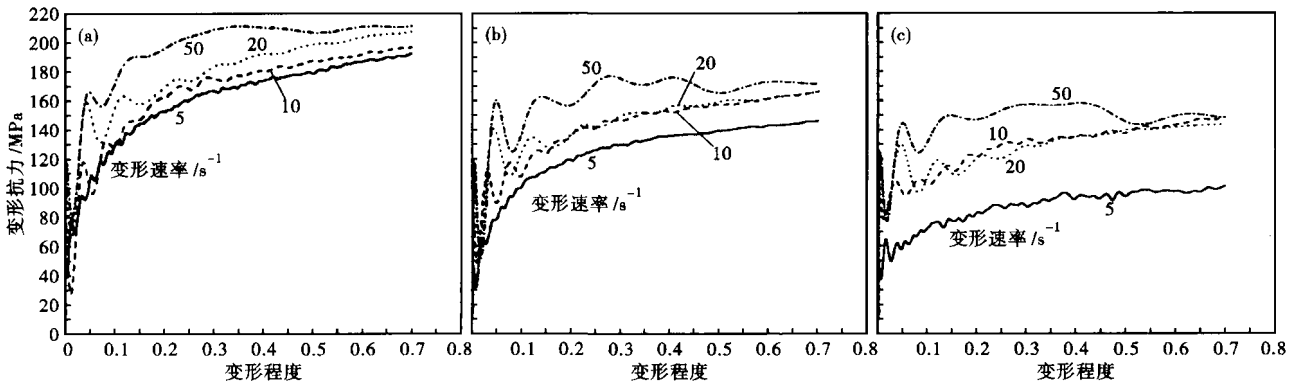


图 2 变形速率对超低碳钢 M21 变形抗力的影响:(a)900 °C;(b)1000 °C;(c)1100 °C
Fig. 2 Effect of strain rate on deformation resistance of ultra-low carbon steel M21: (a) 900 °C; (b) 1000 °C; (c) 1100 °C

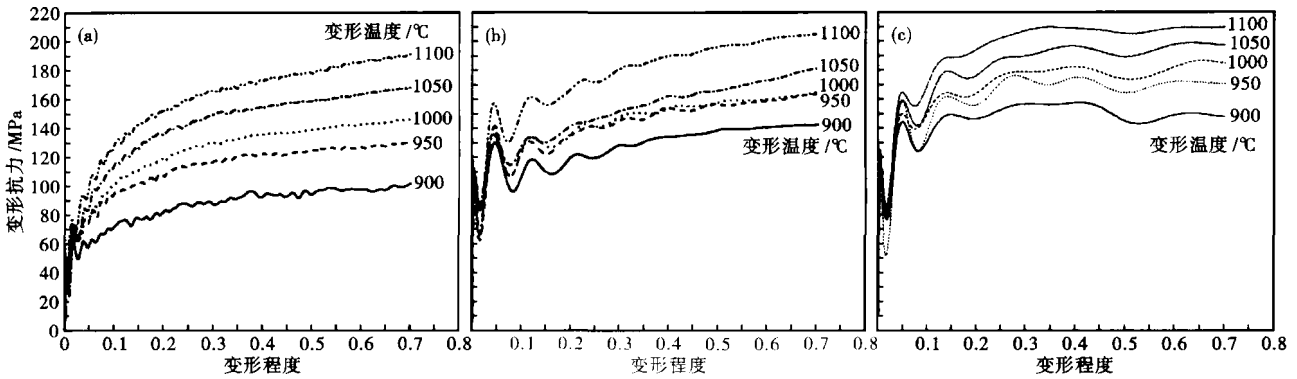


图 3 变形程度对超低碳钢 M21 变形抗力的影响:变形速率/s⁻¹- (a)5;(b)20;(c)50
Fig. 3 Effect of deformation extent on deformation resistance of ultra-low carbon steel M21, strain rate /s⁻¹: (a) 5; (b) 20; (c) 10

线的形态,发现曲线在到达屈服点之后出现了急剧跌落,并且随着应变的增大出现程度不等的锯齿形曲线。如图 4 所示,这一效应可以解释为“动态应变时效”^[2],即温度或应变在一定范围时,溶质原子气团的迁移速度与位错运动的速度相等,溶质原子气团来得及在位错障碍前被阻截等待时重新向位错扩散,时效,完成钉扎,溶质原子气团和位错就能一

再地反复钉扎和脱钉过程。宏观上能形成局域化的变形带和应力跌落,具体体现为材料在进入塑性变形阶段后表现出应力-应变曲线上的锯齿形屈服或锯齿形流动现象。

在微观上,位错的运动是不连续的,在此过程中,溶质原子将通过管扩散方式向该位错偏聚,并对其实施额外的钉扎,从而导致应力的上升。当位错

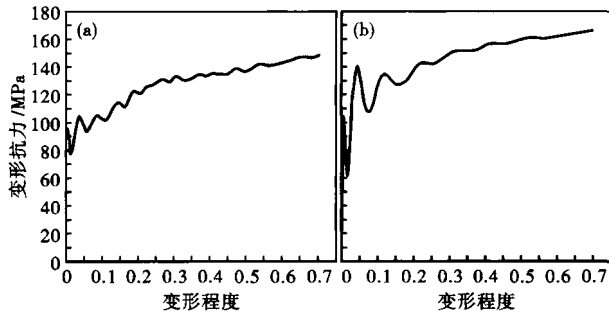


图4 超低碳钢 M21 锯齿形变形抗力曲线:(a)1100 °C, 10 s⁻¹; (b)1000 °C, 20 s⁻¹
Fig.4 Serration curves of deformation resistance of ultra-low carbon steel M21: (a) 1100 °C, 10 s⁻¹; (b) 1000 °C, 20 s⁻¹

在外力的作用下,以热激活的方式克服障碍重新大规模开动时,宏观应力迅速跌落。

从图3中可以看到,在一定的温度条件下,变形速率在 5 s⁻¹时所表现出的锯齿形变形抗力曲线最为明显,也就是说在这一变形速率时,超低碳钢中的溶质原子能赶上脱钉的可动位错并对其实施钉扎^[3];而随着变形速率的增加,变形抗力曲线上出现多个明显的屈服平台,这表明变形速率的增加使得位错运动的速度加快,溶质原子不能及时地进行钉扎,从而形成多个明显的屈服平台。

超低碳钢由于动态应变时效现象而产生的锯齿形屈服与这种热轧过程中边部出现较深皱折的实际情况是相吻合的。

2.4 变形抗力数学模型

根据影响金属变形抗力的主要因素变形温度、变形程度、变形速率^[4],建立超低碳钢的变形抗力数学模型^[5]。

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(a_1 \frac{T}{1\,000} + a_2\right) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10}\right)^{\left(a_3 \times \frac{T}{1\,000} + a_4\right)} \times \left[a_6 \left(\frac{\epsilon}{0.4}\right)^{a_5} - (a_6 - 1) \left(\frac{\epsilon}{0.4}\right) \right] \quad (1)$$

式中: $T = t + 273, K$; σ_0 - 基准变形抗力,即在 $t = 1\,000\text{ °C}, \epsilon = 0.4, \dot{\epsilon} = 10\text{ s}^{-1}$ 时的变形抗力/MPa; t - 变形温度/°C; $\dot{\epsilon}$ - 变形速率/s⁻¹; ϵ - 变形程度(对数应变); $a_1 \sim a_6$ - 回归系数,根据钢种的不同来确定回归系数。

表2 超低碳钢 M21 变形抗力数学模型的回归系数

Table 2 Regression coefficient of math model for deformation resistance of ultra-low carbon steel M21

σ_0 /MPa	a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	a_6
152	-2.136 2	2.717 0	0.719 1	-0.784 8	0.361 6	1.335 0

按照公式(1)所示的变形抗力数学模型结构,用 Origin 软件进行多元非线性回归,得到各回归系数的具体值,如表2所示。

由此得出的变形抗力数学模型为:

$$\sigma = 152 \exp\left(-2.136 2 \times \frac{T}{1\,000} + 2.717 0\right) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{10}\right)^{\left(0.719 1 \times \frac{T}{1\,000} - 0.784 8\right)} \times \left[1.335 0 \left(\frac{\epsilon}{0.4}\right)^{0.361 6} - (1.335 0 - 1) \left(\frac{\epsilon}{0.4}\right) \right]$$

该模型的相关系数为 0.958,曲线的拟合程度较好。用回归的数据与实测数据进行比较检验,得出模拟值与试验值吻合的较好(图5)。

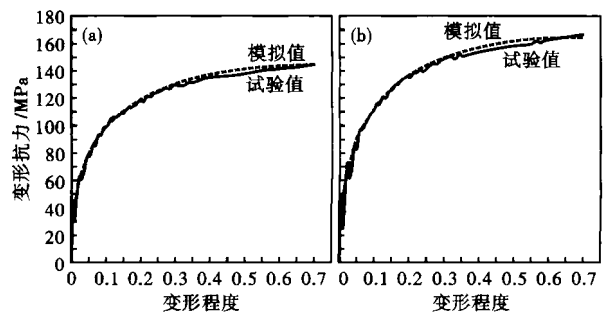


图5 变形抗力模拟值与试验值之比较:(a)950 °C, 5 s⁻¹; (b)900 °C, 5 s⁻¹
Fig.5 Comparison between simulated value and experimental value of deformation resistance: (a) 950 °C, 5 s⁻¹; (b) 900 °C, 5 s⁻¹

3 结论

- (1)随变形温度降低,变形速率提高和变形程度增加,超低碳钢变形抗力增加。
- (2)建立的超低碳钢变形抗力数学模型的拟合值与实测值之间具有良好的拟合程度,拟合精度较高。
- (3)超低碳钢的变形抗力曲线中出现锯齿形的实质为热变形过程中由于动态应变时效而产生的塑性失稳所致。

参考文献

- 1 李贺杰,赵劲松,韩静涛,等. IF 钢(无间隙原子钢)的发展、应用及展望. 唐山学院报,2008,21(4):3
- 2 Cottrell A H. A Note on the Portevin-Le Chateliereffect. Philosophical Magazine, 1953, 44(355):829
- 3 江慧丰,张青川,陈学东,等. 位错与溶质原子间动态相互作用的数值模拟研究. 物理学报,2007,56(6):3388
- 4 周纪华,管克智. 金属塑性变形阻力. 北京:机械工业出版社,1989
- 5 杨 节. 轧制过程数学模型(修订版). 北京:冶金工业出版社,1993

程 曦(1984-),男,硕士研究生,超低碳钢轧制工艺研究。

收稿日期:2009-12-07