

2507 超级双相不锈钢的热变形行为

王佳夫¹ 刘丽丽² 花福安¹ 李建平¹ 王国栋¹

(1 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110004; 2 烟台宝钢钢管有限责任公司, 烟台 265500)

摘要 用 MMS-200 热模拟实验机对 2507 超级双相不锈钢(/% : 0.022C、0.58Si、25.35Cr、7.17Ni、4.05Mo、0.28N) 12 mm 热轧板在 1 000 ~ 1 150 °C、应变速率 0.01 ~ 10 s⁻¹ 下进行了热压缩实验。实验结果表明, 在应变速率一定的条件下, 变形温度越高, 2507 超级双相不锈钢峰值应力越低; 在变形温度一定的条件下, 峰值应力随着应变速率的增加而增加。根据热变形方程计算得到压缩变形时的平均表观应力指数 $n = 3.25$, 热变形激活能 $Q = 460$ kJ/mol。基于实验数据构建了 2507 超级双相不锈钢在相应变形条件下的热变形方程。

关键词 超级双相不锈钢 热变形 真应力-真应变 激活能

Hot Deformation Behavior of 2507 Super Duplex Stainless Steel

Wang Jiafu¹, Liu Lili², Hua Fuan¹, Li Jianping¹ and Wang Guodong¹

(1 State Key lab of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110004;
2 Yantai Baosteel Pipe Co Ltd, Yantai 265500)

Abstract The hot compression test of 12 mm hot rolled sheet of 2507 super duplex stainless steel (/% : 0.022C, 0.58Si, 25.35Cr, 7.17Ni, 4.05Mo, 0.28N) with strain rate 0.01 ~ 10 s⁻¹ at 1 000 ~ 1 150 °C has been carried out by using MMS-200 thermal-mechanical simulator. Test results show that at definite strain rate, with increasing deformation temperature the peak stress of 2507 super duplex stainless steel decreases; and at definite deformation temperature, with increasing strain rate the peak stress increases. Based on the constitutive equation for hot deformation, the calculated hot compression average apparent stress exponent $n = 3.25$, and hot deformation activation energy $Q = 460$ kJ/mol. According to test data a hot deformation equation for 2507 super duplex stainless steel at corresponding deformation condition is established.

Material Index Super Duplex Stainless Steel, Hot Deformation, True Stress-True Strain, Activation Energy

超级双相不锈钢(SDSS)是指孔蚀抗力当量值(PREN) > 40, 含 Cr 质量分数为 25%, 高钼 (> 3.5%), 高氮(0.22% ~ 0.3%) 的钢。可适用于苛刻的介质条件, 具有良好的耐蚀与力学综合性能, 可与超级奥氏体不锈钢相媲美, 应用于化工和海洋工程等领域^[1]。

双相不锈钢在高温轧制或锻造过程中, 处于奥氏体和铁素体两相区。两相在热变形时有不均匀的应力和应变分布, 导致双相不锈钢在热变形时容易产生边部裂纹和表面裂纹^[2,3]。目前关于普通双相不锈钢的热变形方面研究的结论不尽相同^[4~6]。本文针对 2507 超级双相不锈钢的热变形行为进行了研究。

1 实验材料与方法

实验所用材料来自太原钢铁(集团)有限公司 2507 超级双相不锈钢(表 1)。经过 AOD 冶炼, 生产的连铸坯经热轧后得到 12 mm 厚的板材, 再固溶处理, 沿轧制方向机加工制成 $\Phi 8$ mm \times 15 mm 的圆柱形热模拟试样。

表 1 实验 2507 超级双相不锈钢化学成分 /%

Table 1 Chemical composition of test 2507 super duplex stainless steel /%

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	P	S	N
0.022	0.58	1.03	25.35	7.17	4.05	0.027	0.001	0.28

实验采用高温单道次压缩实验, 在 MMS-200 热模拟实验机上进行。考虑到实验钢的高温塑性及析出相对热加工变形的影响, 用 Thermo-Calc 软件计算了 2507 超级双相不锈钢在平衡状态下各相质量分数随温度的变化关系(见图 1)。由图 1 可以看出, 在 1 000 °C 以下有明显的 σ 脆性相析出, 选择热变形温度须避开此温度区间。

具体实验工艺制度如下: 将试样以 10 °C/s 的速度加热到 1 250 °C, 保温 300 s, 然后以 5 °C/s 的速度冷却到不同变形温度, 保温 20 s 以消除试样内部的温度梯度, 之后进行压缩变形, 变形量为 0.8。变形速率分别为 0.01、0.1、1、10 s⁻¹; 变形温度分别为 1 000、1 050、1 100、1 150 °C。

2 实验结果与分析

2.1 真应力-真应变曲线

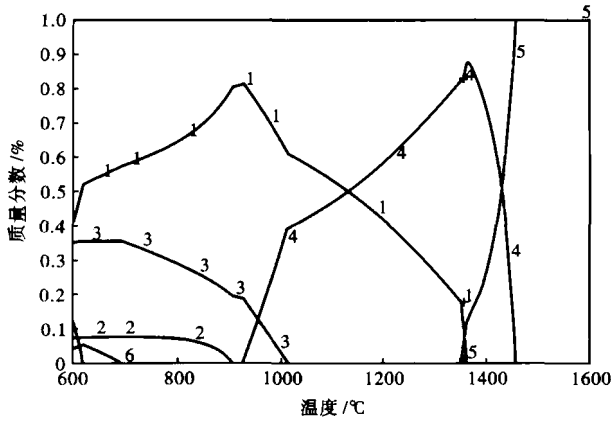


图1 温度对2507 超级双相不锈钢各相质量分数的影响:1-奥氏体;3-σ相;4-铁素体

Fig. 1 Effect of temperature on mass fraction of phases in 2507 super duplex stainless steel; 1- austenite; 3- σ phase; 4- ferrite

由图2(a,b)可以看出,在应变速率一定的条件下,对于同一应变值,变形温度越高,相应的流变应力越低,较高的温度有利于实验钢的软化。并且随着变形温度的降低,峰值应力向应变增大的方向移动。

在热加工过程中,一方面因形变使位错不断增殖和积累,发生形变硬化;另一方面,对于高层错能的铁素体,位错的交滑移和攀移过程容易进行,热加工时容易发生动态回复;对于层错能较低的奥氏体,它的回复过程比较慢。在热加工过程中动态回复往往难以同步抵消形变时位错的增殖和积累。在某一临界形变条件下,位错积累到一定程度后就会促发再结晶形核,发生动态再结晶。在再结晶时,大量位错被再结晶核心的大角度界面推移而消除,当这样

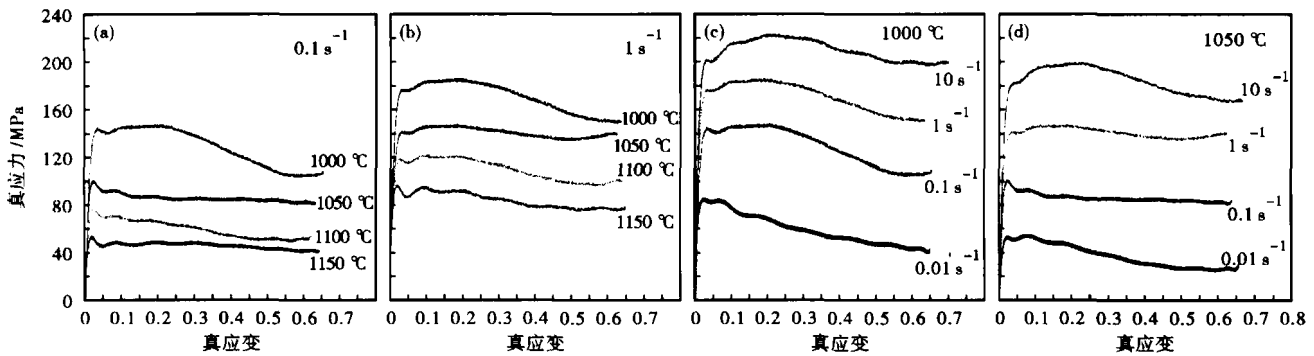


图2 实验2507 超级双相不锈钢的真应力-真应变曲线:(a)0.1 s⁻¹;(b)1 s⁻¹;(c)1000 °C;(d)1050 °C

Fig. 2 True stress-true strain curves of test 2507 super duplex stainless steel: (a) 0.1 s⁻¹; (b) 1 s⁻¹; (c) 1000 °C; (d) 1050 °C

的软化过程占主导地位时,流变应力下降,真应力-真应变曲线出现峰值。由于再结晶形核和长大的同时,材料继续承受变形,再结晶形成的新晶粒也经受形变,形变硬化又重新增加。当新晶粒内形变达到一定程度后又开始了第二轮再结晶。在这样复杂的硬化和软化的叠加情况下,真应力-真应变曲线周期性地出现了峰值^[7]。多峰摆动的幅度随应变的增加越来越小,有的曲线甚至后来出现稳态。

从图2(c,d)中可见,在变形温度一定的条件下,达到相同的变形量时,应变速率越高,对应的流变应力越大。在变形温度为1050 °C,2507 超级双相不锈钢的压缩变形应变速率从0.01 s⁻¹增加到10 s⁻¹时,其对应的峰值应力从55 MPa增加到191 MPa。由此可见,应变速率越低,实验钢中的铁素体和奥氏体发生动态回复和动态再结晶越充分,钢的软化效果越明显,从而越有利于进一步塑性变形。

2.2 2507 超级双相不锈钢的热变形方程

在高温条件下,多晶材料变形时的流变应力与

应变速率、变形温度之间的关系可用经典的双曲正弦公式描述:

$$\dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma_p)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \quad (1)$$

式中:ε̇- 应变速率;σ_p- 峰值应力;Q- 热变形激活能;n- 表观应力指数;R- 普适气体常数,R = 8.31;α = 0.012;A- 与温度无关的试验常数;T- 热力学温度。

将(1)式两边取对数可得:

$$\ln \sinh(\alpha\sigma_p) = -\frac{1}{n} \ln A + \frac{1}{n} \cdot \frac{Q}{RT} + \frac{1}{n} \ln \dot{\epsilon} \quad (2)$$

在温度一定的条件下,将(2)式两边对 ln ε̇ 求偏导得:

$$\frac{1}{n} = \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha\sigma_p)]}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (3)$$

在变形速率一定的条件下,将(2)式两边对1/T 求偏导得:

$$Q = nR \left\{ \frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]}{\partial (1/T)} \right\} \quad (4)$$

由真应力-真应变曲线实验数据可以得到峰值应力 σ_p 。根据公式(2),对 $\ln \sinh(\alpha \sigma_p)$ 和 $\ln \dot{\varepsilon}$ 的计算数据利用最小二乘法进行线性回归拟合得到图 3(a),由图 3(a)可以看出,在相同的变形温度下,2507 超级双相不锈钢 $\ln \sinh(\alpha \sigma_p)$ 和 $\ln \dot{\varepsilon}$ 呈良好的线性关系。峰值应力随应变速率的增加而增加。图 3(a)中线性拟合得到的直线基本平行,可以认为直线斜率变化范围很小,因而计算得到的平均值有代表性。从图 3(a)中的拟合结果根据公式(3)可以得到实验钢在 1 000 ~ 1 150 °C 变形时的平均表观应力指数 $n = 3.25$ 。对公式(2)中的 $\ln \sinh(\alpha \sigma_p)$ 和 $1/T$ 进行拟合得到图 3(b)。由图 3(b)可以看出,在应变速率相同时, $\ln \sinh(\alpha \sigma_p)$ 和 $10\,000/T$ 呈线性关系,在 1 000 ~ 1 150 °C 变形温度范围内,实验钢的热变形峰值应力随着变形温度的升高而降低。结合从(3)式得到的 n 值与图 3(b)中得到的斜率值,由(4)式计算得到 2507 超级双相不锈钢的热变形激活能 $Q = 460 \text{ kJ/mol}$ 。

综合上述结果,可以求得 A 值,进而得到 2507 超级双相不锈钢在 1 000 ~ 1 150 °C 变形温度区间的热变形方程:

$$\dot{\varepsilon} = 2.69 \times 10^{16} [\sinh(0.012\sigma_p)]^{3.25} \exp\left(-\frac{460\,000}{RT}\right) \quad (5)$$

3 结论

(1)在变形温度为 1 000 ~ 1 150 °C,应变速率为 0.01 ~ 10 s^{-1} 条件下,2507 超级双相不锈钢热变形受变形温度和应变速率的影响明显。在应变速率一定的条件下,变形温度越高,峰值应力越低,越有利于软化进行;随着变形温度的降低,峰值应力向应变增大的方向移动。在变形温度一定的条件下,峰值应力随着应变速率的增加而增加。

(2)2507 超级双相不锈钢在变形温度为 1 000 ~ 1 150 °C,应变速率为 0.01 ~ 10 s^{-1} 条件下,

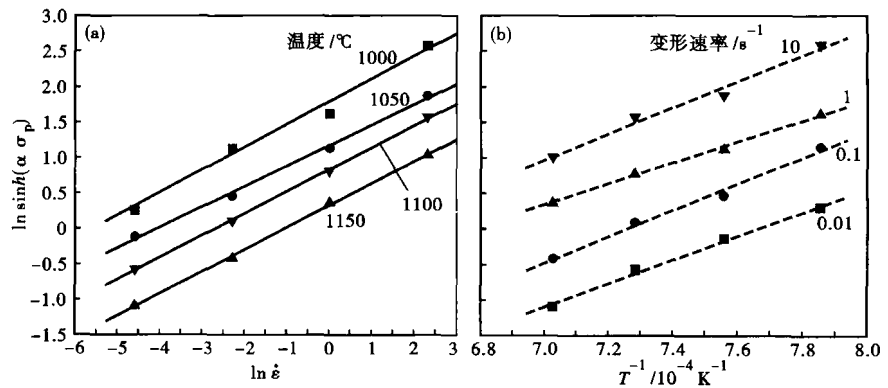


图 3 实验 2507 超级双相不锈钢峰值应力(σ_p)与应变速率($\dot{\varepsilon}$)(a)和峰值应力(σ_p)与变形温度(T)(b)的关系

Fig. 3 Relation between peak stress (σ_p) and strain rate ($\dot{\varepsilon}$) (a), and peak stress (σ_p) and deformation temperature (T) (b) of test 2507 super duplex stainless steel

压缩变形时的平均表观应力指数 $n = 3.25$,平均热变形激活能 $Q = 460 \text{ kJ/mol}$ 。

(3)在变形温度为 1 000 ~ 1 150 °C,2507 超级双相不锈钢的热变形方程为:

$$\dot{\varepsilon} = 2.69 \times 10^{16} [\sinh(0.012\sigma_p)]^{3.25} \exp\left(-\frac{460\,000}{RT}\right)$$

国家自然科学基金资助项目(50971039);轧制技术及连轧自动化国家重点实验室(东北大学)自主研究课题资助。

参考文献

- 1 吴 玟. 双相不锈钢. 北京:冶金工业出版社,1999
- 2 Siegmund T, Werner E, Fischer F D. On the Thermomechanical Deformation Behavior of Duplex-Type Materials. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1995, 43(4): 495
- 3 Duprez L, De Cooman B C, Akdut N. Flow Stress and Ductility of Duplex Stainless Steel during High Temperature Torsion Deformation. Metallurgical and Materials Transactions: A, 2002, 33(7): 1931
- 4 Iza-mendia A, Pinol-juea A, Urcola J J, et al. Microstructural and Mechanical Behavior of a Duplex Stainless Steel under Hot Working Conditions. Metallurgical and Materials Transactions: A, 1998, 29(12): 2975
- 5 宋红梅, 江来珠, 余 敏, 等. 双相不锈钢 2205 的热加工性能研究. 钢铁研究学报, 2010, 22(2): 41
- 6 Han Ying, Zou De-ning, Chen Zhi-yu, et al. Investigation on Hot Deformation Behavior of 00Cr23Ni4N Duplex Stainless Steel under Medium-high Strain Rates. Materials Characterization, 2011, 62(2): 198
- 7 余永宁. 金属学原理. 北京:冶金工业出版社, 2000

王佳夫(1970-),男,博士研究生,高级工程师,1994年沈阳黄金学院毕业,钢铁材料组织与性能研究。

收稿日期:2011-06-08