

00Cr21Ni2Mn5N 双相不锈钢的高温变形

郭海生^{1,2} 宋志刚² 郑文杰² 周 芸¹ 郭志鹏^{1,2}

(1 昆明理工大学材料与冶金工程学院, 昆明 630091; 2 中国钢研科技集团公司结构材料研究所, 北京 100081)

摘 要 采用 Gleeble-3800 热/力模拟实验等方法研究了 00Cr21Ni2Mn5N 奥氏体-铁素体双相不锈钢(LDSS) 在温度为 850~1150 °C、应变速率为 5~50 s⁻¹、压下量 60% 的热变形行为及组织变化。结果表明, 00Cr21Ni2Mn5N 双相不锈钢的流变应力随温度的增加而降低, 随应变速率的增加而增加, 该钢的软化机制与 Zener-Hollomon (*Z*) 参数有关, 00Cr21Ni2Mn5N 双相钢的表现应力指数为 4.82, 热变形表现激活能(*Q*) 为 219 kJ/mol

关键词 双相不锈钢 00Cr21Ni2Mn5N 高温变形 流变应力 表现激活能

Hot Deformation Behavior of Dual Phase Stainless Steel 00Cr21Ni2Mn5N

Guo Haisheng^{1,2}, Song Zhigang², Zheng Wenjie², Zhou Yun¹ and Guo Zhipeng^{1,2}

(1 School of Material and Metallurgy Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 630091; 2 Institute for Structural Materials, China Iron & Steel Research Institute Group, Beijing 100081)

Abstract The hot deformation behavior and structure evolution of austenite-ferrite dual phase stainless steel 00Cr21Ni2Mn5N with strain rate 5~50 s⁻¹, reduction ratio 60% at 850~1150 °C have been studied by using Gleeble-3800 thermo-mechanical simulator etc. Results showed that with increasing temperature the flow stress of dual steel 00Cr21Ni2Mn5N decreased while with increasing strain rate the flow stress of steel increased; the mechanism of steel was related to Zener-Hollomon (*Z*) parameter; and the apparent stress exponent and apparent activation energy (*Q*) of the dual phase stainless steel 00Cr21Ni2Mn5N were 4.82 and 219 kJ/mol respectively.

Material Index Dual Phase Stainless Steel 00Cr21Ni2Mn5N, Hot Deformation, Flow Stress, Apparent Activation Energy

采用热模拟的方法对 00Cr21Ni2Mn5N 节约型双相不锈钢的高温应力应变曲线作了测试, 并对典型条件下的组织进行观察, 探讨低 Ni、无 Mo 含 N 节约型双相不锈钢的高温热变形行为。

1 试验材料和方法

00Cr21Ni2Mn5N 节约型双相不锈钢由 AOD 法熔炼, 其成分 (%) 为: 0.028C、20.98Cr、4.58Mn、1.99Ni、0.22N、0.6Si、0.022P、<0.010S、<0.10Mo、<0.050Al、<0.050Ti。

在 Gleeble-3800 热变形模拟机试验的压缩试样尺寸(mm)为 10×15×20, 变形温度为 850~1150 °C, 应变速率分别为 5, 15, 50 s⁻¹。将试样以 3 °C/s 加热到变形温度, 保温 180 s, 然后以不同的应变速率加载至真应变 0.7 (压下量约为 60%) 为止, 变形后立即水淬。将热变形后试样沿轴向中心剖开, 用 KOH 试剂进行电解浸蚀, 然后观察组织形貌。

2 试验结果及讨论

2.1 热变形组织

通常认为铁素体具有较高的层错能, 高温时位错的攀移和交滑移容易发生, 因此铁素体只发生动态回复而不发生动态再结晶, 而奥氏体则通过动态再结晶进行软化^[1]。在本实验中, 对于应变速率为 5 s⁻¹, 变形温度为 850 °C, 铁素体内部已经发生了动态回复亚晶(图 1a)。在 900 °C 时, 变形区已出现了再结晶(图 1b), 在 1150 °C 时可以看到再结晶的晶粒长大(图 1c)。而奥氏体在变形过程中晶粒产生拉长, 其晶粒内部未能观察到动态再结晶的产生。

2.2 高温流变曲线

从图 2 可见, 在变形的初始阶段, 流变应力随着应变量的增加而迅速达到最大值, 发生了明显的加工硬化。当应变量超过一定值后, 应力的变化趋于平缓, 呈现出稳态流变的特征。在应变速率相同的条件下, 当变形温度超过 1100 °C 时, 流变曲线的形状都表现出动态再结晶的特征。由图 2 还可以看出, 随着温度升高, 峰值应力逐渐变小, 且曲线越来越平缓, 说明随温度的提高, 钢的软化能力提高。当

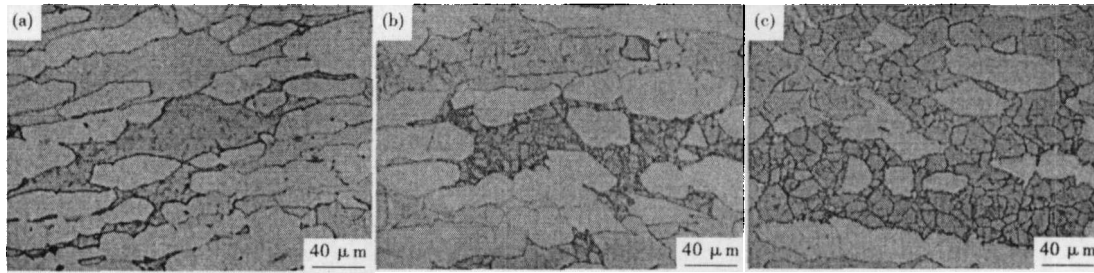


图 1 应变速率 5 s^{-1} 时 00Cr21Ni2Mn5N 双相不锈钢的热变形组织: (a) 850 °C; (b) 900 °C; (c) 1150 °C

Fig. 1 Structure of dual phase stainless steel 00Cr21Ni2Mn5N hot-deformed with strain rate 5 s^{-1} : (a) 850 °C; (b) 900 °C; (c) 1150 °C

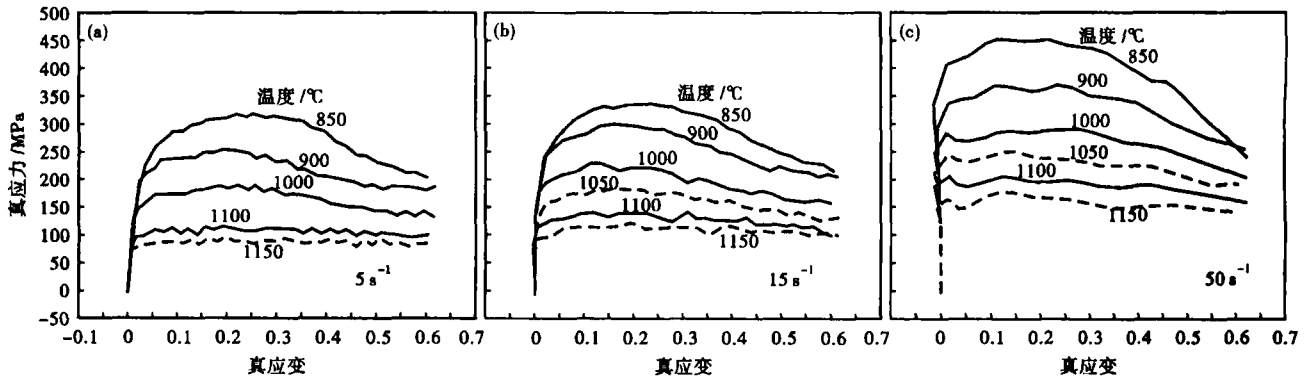


图 2 00Cr21Ni2Mn5N 双相不锈钢在不同温度和应变速率下热变形时的真应力-真应变曲线

Fig. 2 True stress-strain curves of dual phase stainless steel 00Cr21Ni2Mn5N hot-deformed at different temperature and strain rates

表 1 00Cr21Ni2Mn5N 双相不锈钢在不同温度和应变速率下的热变形峰值应力 σ_p /MPa

Table 1 Peak stress of hot deformation of dual phase stainless steel 00Cr21Ni2Mn5N hot-deformed at different temperature and strain rate σ_p /MPa

试验温度/ °C	应变速率 $\dot{\epsilon}/\text{s}^{-1}$		
	5	15	50
850	285.89	336.79	452.26
900	254.65	301.44	370.26
1 000	192.23	229.96	289.27
1 100	116.96	141.09	203.31
1 150	97.02	121.43	174.96

应变速率从 5 s^{-1} 增加到 50 s^{-1} , 峰值应力在同一温度随应变速率的增大而增大。由此可见, 应变速率越小, 合金软化能力越高, 峰值应力也随之减小。同时, 流变应力也随应变速率的减小而降低。由表 1 可知, 00Cr21Ni2Mn5N 钢峰值应力随着变形温度的降低和应变速率的增加而增大, 因此该合金是一种对温度和应变速率敏感的材料。

2.3 热变形方程的建立

变形温度及应变速率对峰值应力的影响可用式(1)表示^[2]:

$$\dot{\epsilon} e^{Q/RT} = A \sigma_p^n \quad (1)$$

式中: Q - 形变激活能; n - 表观应力指数; R - 普适气

体常数 ($R = 8.3$); σ_p - 峰值应力; $\dot{\epsilon}$ - 应变速率; A - 与温度无关的试验常数。

将式(1)两端取对数可得式(2)

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

根据公式(2)以及表 1 中峰值应力的数据进行拟合得出该钢的峰值应力与应变速率的关系曲线(图 3a)。同一变形温度下, 双相不锈钢的 $\ln \sigma_p$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 呈线性关系, 随着应变速率的增加, 峰值应力也逐渐增加(图 3a)。应变速率一定时, 双相不锈钢 $\ln \sigma_p$ 与 $1/T$ 呈线性关系, 随着变形温度的升高, 热变形峰值应力逐渐降低(图 3b)。

由图 3(a) 可以解得应力指数:

$$n = 5 / (0.1992 + 0.16269 + 0.17769 + 0.24113 + 0.25684) = 4.82 \quad (3)$$

由图 3(b) 的斜率值为:

$$K = (0.58521 + 0.55878 + 0.4968) / 3 = 0.54693 \quad (4)$$

由式(3)和式(4)可知 00Cr21Ni2Mn5N 双相不锈钢的热变形激活能:

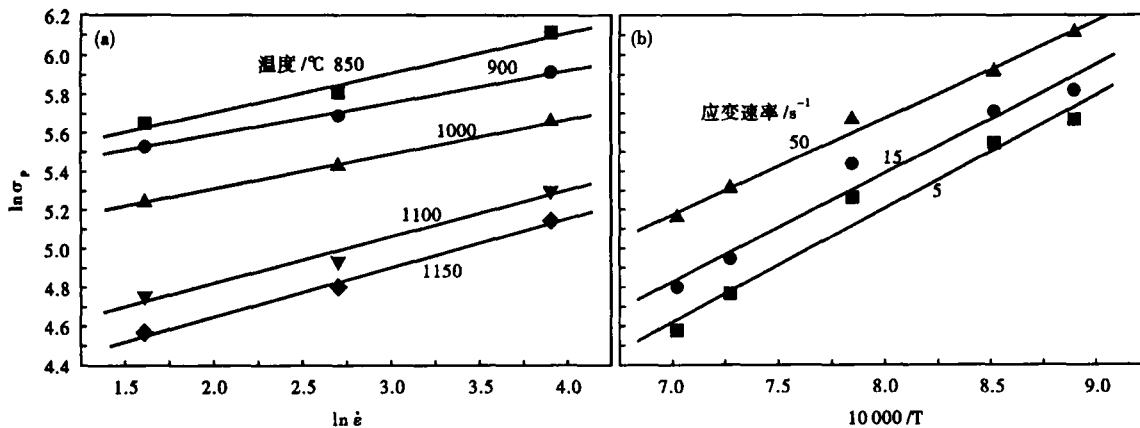


图 3 应变速率(a)和温度(b)对 00Cr21Ni2Mn5N 双相不锈钢热变形峰值应力的影响

Fig. 3 Effect of strain rate (a) and temperature (b) on peak stress of hot deformation of dual phase stainless steel 00Cr21Ni2Mn5N

$$Q = K \times nR \times 10\,000 = 4.82 \times 0.54693 \times 8.31 \times 10\,000 \approx 219 \text{ (kJ)} \quad (5)$$

由式(1)可得:

$$A = \dot{\epsilon} \sigma_p^{-n} \exp(Q/RT) = 6.57 \times 10^6$$

上述结果表明,在热变形过程中,降低应变速率和提高变形温度都使动态软化容易发生。通过已求得的热变形激活能 Q ,可以计算出 00Cr21Ni2Mn5N 双相不锈钢热变形的 Z 参数 $[Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT) = A \sigma_p^n]$,结果如图 4。

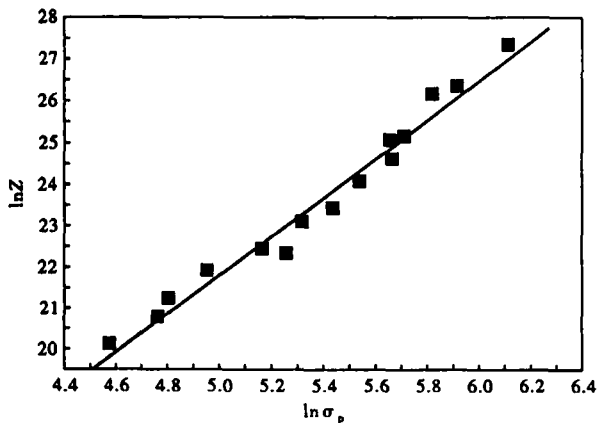


图 4 00Cr21Ni2Mn5N 双相不锈钢热变形峰值应力与 Z 参数的关系

Fig. 4 Relation between peak stress of hot deformation and Z parameter of dual phase stainless steel 00Cr21Ni2Mn5N

参数 Z 综合描述了在一定变形温度与应变速率条件下材料的变形行为, Z 值越小,位错和晶界的迁移性越高,变形中发生动态再结晶倾向越大,动态再结晶组织发展越充分,对应实验中最小的 Z 值

($Z = 5.46 \times 10^9$),也即变形温度为 1 150 °C,应变速率为 50 s^{-1} 时,铁素体已经发生了动态再结晶;反之, Z 值越大,动态再结晶驱动力越小,直至完全不发生动态再结晶,因而对应最大的 Z 值时($Z = 7.66 \times 10^{10}$),即变形温度为 850 °C,应变速率为 5 s^{-1} 时,则只可见发生了严重畸变的晶粒。

综合上述讨论可知, Z 值的提高对应着真应力-真应变曲线的流变应力水平、峰值应力的提高,同时伴随着曲线形状的转变,即从动态再结晶型曲线向动态回复型曲线转变,而当 Z 值高到一定程度时,动态回复也将难以发生。

3 结论

(1) 00Cr21Ni2Mn5N 双相不锈钢流变应力随着变形温度增加而降低,随应变速率增加而升高。

(2) 在热变形过程中,铁素体相存在两种软化机制,即 Z 值较大时的动态回复型和较小 Z 值时的动态再结晶型。

(3) 00Cr21Ni2Mn5N 超级双相不锈钢的热变形激活能为 219 kJ/mol,应力指数为 4.82,其热变形方程为 $\dot{\epsilon} = 6.57 \times 10^6 \sigma_p^{4.82} \exp\left(-\frac{219\,000}{RT}\right)$ 。

参考文献

- 1 Balancin, Hoffmann W A, Jonas J J. Influence of Microstructure on the Flow Behavior of Duplex Stainless Steel at High Temperatures. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31: 1353
- 2 余永宁. 金属学原理. 北京: 冶金工业出版社, 2000

郭海生(1970-),男,硕士研究生,1999年太原师范学院毕业,双相不锈钢研究。