

铁基低镍电热合金的热变形行为

高宏 陈其安

(中国科学院力学研究所) (冶金部钢铁研究总院)

摘要 利用热模拟技术对铁基低镍电热合金的热变形行为进行了试验研究。绘制出了该合金的高温变形真应力-真应变曲线,并结合热变形后的显微组织分析了影响合金热变形行为的因素,给出了该合金热变形的回复激活能。

关键词 电热合金; 热变形; 再结晶; 回复

中国图书资料分类号 TG15

0 引言

电热合金作为一种功能材料,以其特有的高电阻率和高抗氧化性而命名。以往所使用的电热合金均限于高镍或中镍($\text{Ni} > 40\%$)合金。铁基低镍电热合金主要是以机车电阻制动为目标研制开发的一种新型节镍电热合金^[1]。该合金具有与高镍($\text{Ni} > 60\%$)合金相近的抗氧化性,与中镍($\text{Ni} > 30\%$)合金一致的电阻率和电阻温度系数。目前,已成功地运用于铁路运输中的机车电阻制动,是我国首创的低镍电热合金。但是,该合金在生产使用过程中也存在某些问题,同时对上述材料的高温热塑性尚缺乏系统深入的研究。本文利用热变形模拟试验手段,主要对该合金的高温热塑性及其影响因素进行了研究。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

本试验所用材料为铁基低镍电热合金(BERA合金),其化学成分见表1。

表1 试验材料的化学成分(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	Fe
≤0.1	2	≤1.5	<0.03	<0.02	25	20	0.9-1.7	余

该合金材料经中频感应电炉冶炼、铸锭后热锻加工成 $\Phi 15\text{mm}$ 的圆棒,再机加工成如图1所示 $\Phi 10 \times 12\text{mm}$ 的试样形状。试样上下端面加工平行度要保证,否则试验用Gleeble-1500热模拟机电加热时,会因接触不均造成局部受热而使端面发生局部熔化,或因电击穿试样两

本文于1996年2月29日收到

联系人:高宏,硕士,中国科学院力学研究所材料工艺工程中心(北京),100080

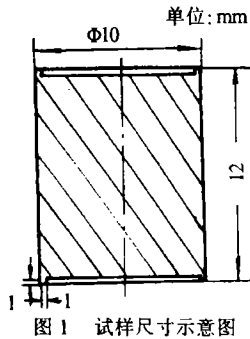


图 1 试样尺寸示意图

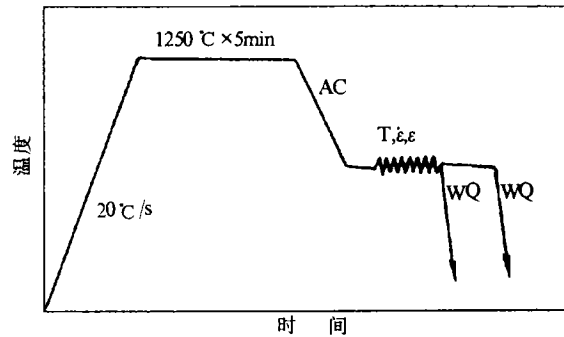


图 2 试验变形制度示意图

Fig.1 Schematic diagram of the specimen

Fig.2 heat treatment technology of BERA electric heating alloy

端的高温合金垫片而粘结在试验机压头上。试样两端要加工成凹槽,槽内添加玻璃粉作润滑剂,防止鼓形,以保证变形的均匀性。槽壁不宜过薄,以免熔化崩裂。

1.2 试验方法

试验在 Gleeble-1500 动态热模拟试验机上进行。将试样以 $20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{s}$ 的加热速度加热到 1250°C , 保温 5min, 然后分别冷却到不同的变形温度 $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$, $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, $850\text{ }^{\circ}\text{C}$, 750°C , 在每一温度下分别以 50s^{-1} , 10s^{-1} , 0.1s^{-1} , 0.01s^{-1} , 0.001s^{-1} 的应变速率变形。在氩保护气中压缩变形,以防止高温氧化。变形量 ε 为 $30\sim 50\%$ 。采用变形后立即水淬和保温 2min 再水淬两种不同热处理方式。变形工艺制度如图 2 所示。试样分为高铝 (Al 含量为 1.26%) 和低铝 (Al 含量为 0.98%) 两组,其它成分相同,以便研究铝含量对该合金在高温条件下变形行为的影响。

1.3 金相观察

利用热变形后瞬时水淬固定试样高温变形组织,用光学显微镜对试样中心处沿轴线磨出的平面进行观察,采用盐碱苦味酸酒精溶液显示变形后奥氏体晶粒。

2 试验结果及分析

2.1 变形条件 ($T, \dot{\varepsilon}, \varepsilon$) 对流变应力的影响

从图 3 可以看到,铁基低镍电热合金热变形 $\sigma-\varepsilon$ 曲线形式存在两种,一种是动态回复型,如 $T=1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=0.001\text{s}^{-1}$ 下的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线 (图 3-a); 另一种是动态再结晶型,如 $T=1250^{\circ}\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=0.01\text{s}^{-1}$ 下的 $\sigma-\varepsilon$ 曲线 (图 3-b)。可以发现,在本试验条件下该合金以动态回复为主要软化形式,其明显特征就是 $\sigma-\varepsilon$ 曲线没有强化极限 σ_p 存在。

从变形温度和变形速度对 $\sigma-\varepsilon$ 曲线的影响可以看出,当变形温度高而变形速度较低时,易发生动态再结晶;相反,当变形温度较低而变形速度较高时,动态回复更容易发生。如所周知,热变形过程是动态回复和动态再结晶同时进行又相互竞争的过程,因此,二者往往相伴发生,只是程度不同而已。变形条件对动态软化行为的影响必然会涉及到合金的变形抗力^[23]图 4 反映了稳态流变应力与 $T, \dot{\varepsilon}$ 的关系,其中 $\ln\sigma_s$ 与 $\ln\dot{\varepsilon} \cdot 1/T$ 成线性关系。

2.2 金相组织观察

2.2.1 退火孪晶的产生

试验过程中,对相同变形条件 ($T, \dot{\varepsilon}$) 变形后的试样采取瞬时直接水淬和保温 2min 后再水淬两种不同的处理方法。图 5 为铁基低镍电热合金在 $T=1150\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\dot{\varepsilon}=0.01\text{s}^{-1}$ 条件下的显微组

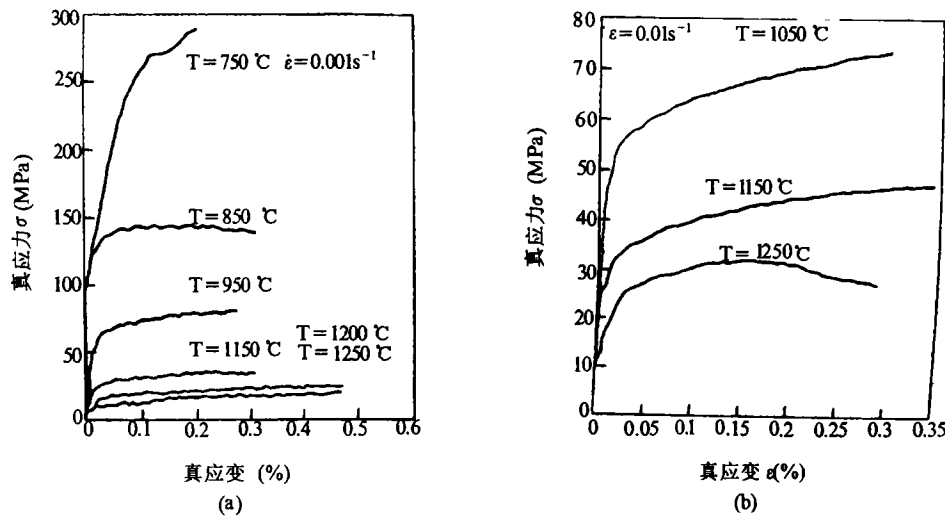


图3 BERA 合金高温变形真应力-真应变曲线

Fig.3 True stress-true strain curves of BERA alloy under hot deformation

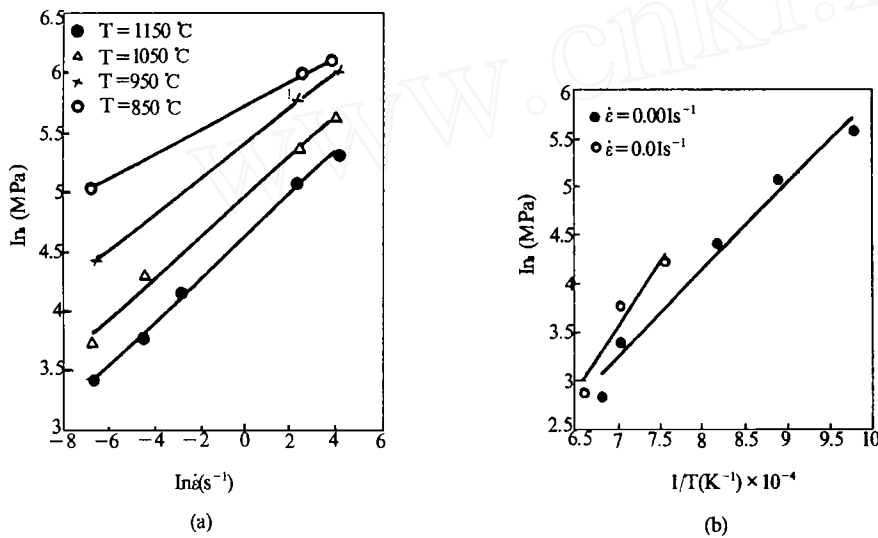


图4 稳态流变应力与温度和变形速度的关系

Fig.4 Relation between stable flow stress, temperature and deformation velocity

组织,可见保温 2min 后明显出现大量退火孪晶。这说明了铁基低镍电热合金合金由于层错低,很难发生交滑移和位错攀移,而孪生倾向则随层错能的降低而增加。所以当合金在高温下变形时,容易形成许多退火孪晶。

2.2.2 铝元素对铁基低镍电热合金热变形行为的影响

为了提高电热合金的高温抗氧化性,加入了 0.9 ~ 1.7% 的铝元素。但从图 6 看到,铝元素含量的变化对屈服强度 $\sigma_{0.2}$ 及峰值应力 σ_p 的影响甚微。这说明在提高铁基低镍电热合金抗氧化性的同时,高温强度能够保持稳定。

图 7 所示为两种含铝量的试验用电热合金热变形组织。其中可见,高铝含量合金变形后

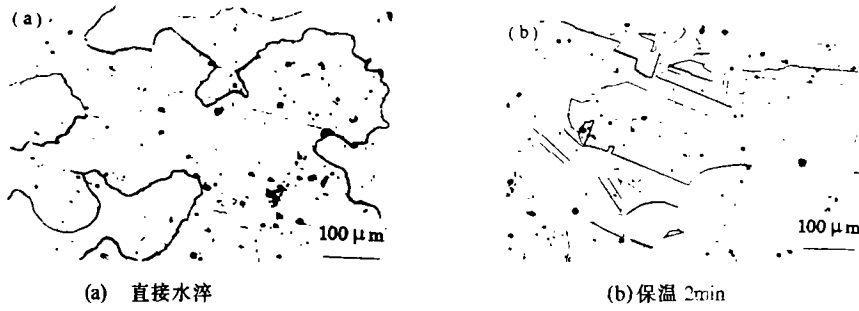


图 5 BERA 合金在 1150 °C 变形后的显微组织

Fig.5 Microstructures of BERA alloy after hot deformation at 1150 °C

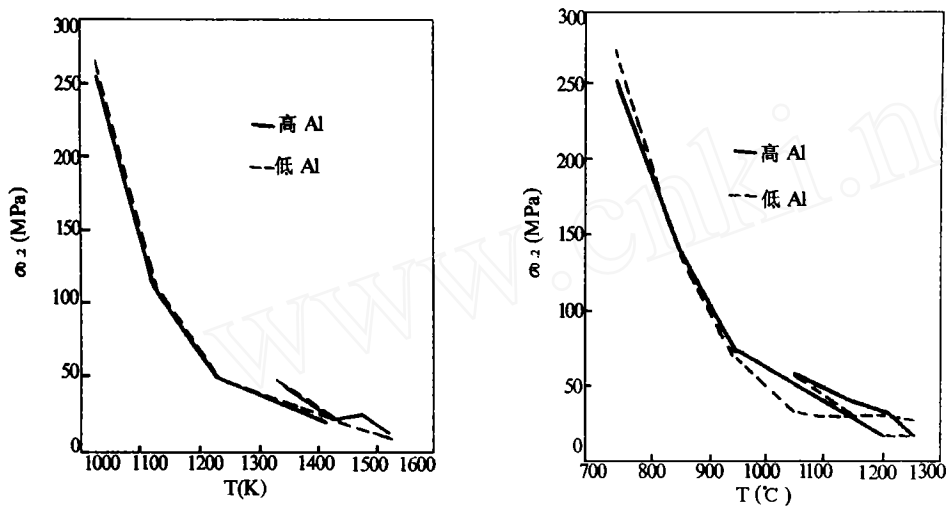


图 6 铝元素对屈服强度和峰值应力的影响

Fig.6 Effect of aluminum on the yield strength and the peak-stress

再结晶晶粒及退火孪晶数量比低铝含量合金要少。说明铝元素的增加提高了合金的层错能，使高铝合金发生动态回复的激活能降低，使其更容易发生动态回复，相应地阻止了动态再结晶的发生。

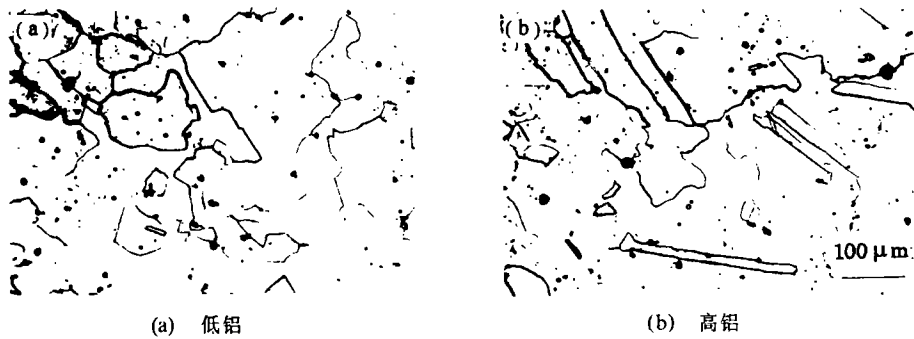


图 7 铝含量对 BERA 合金热变形组织的影响

Fig.7 Effect of aluminum on the hot deformation microstructure of BERA alloy

3 铁基低镍电热合金的热变形回复激活能

金属的热变形过程是受 σ_p 、 T_d 、 $\dot{\epsilon}$ 为变量的一个热激活过程所支配, 可用 Zener-Hollon 因子 (Z) 综合表示^[4,5]

$$Z=f(\sigma_s)=A\sigma_s^n=\dot{\epsilon} \cdot \exp(Q/RT) \quad (1)$$

式中, σ_s 为稳态流动应力 (MPa); $\dot{\epsilon}$ 为应变速率 (s^{-1}); Q 为回复激活 (KJ/mol); A , a , n 为由试验确定的材料常数; R 为气体常数; T 为变形温度 (K); Z 为温度补偿应变速率因子。分别对等式两边求自然对数和偏导得:

$$\ln \dot{\epsilon} + Q/R \cdot (1/T) = n \cdot \ln \sigma_s \quad (2)$$

若 $T = \text{const}$, 则

$$n = \left. \frac{\ln \dot{\epsilon}}{\ln \sigma_s} \right|_{T = \text{const}}$$

若 $\dot{\epsilon} = \text{const}$, 则

$$\begin{aligned} Q &= n \cdot \left. \frac{\ln \sigma_s}{(1/T)} \right|_{\dot{\epsilon} = \text{const}} \cdot R \\ &= \left(\left. \frac{\ln \dot{\epsilon}}{\ln \sigma_s} \right|_{T = \text{const}} \right) \cdot \left(\left. \frac{\ln \sigma_s}{\ln(1/T)} \right|_{\dot{\epsilon} = \text{const}} \right) \cdot R \end{aligned} \quad (3)$$

这样, 从图 4 中 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma_s, \ln \sigma_s - 1/T$ 关系曲线代入 (3) 式可得

$$\text{低 Al: } Q = 400.1 \text{ KJ/mol; } \quad \text{高 Al: } Q = 338.3 \text{ KJ/mol}$$

4 结论

(1) 铁基低镍电热合金的热变形软化方式以动态回复为主, 在热变形后的保温过程中将有大量孪晶晶粒生成。

(2) 在 Fe-20%Cr-25%Ni 合金中加入 0.9 ~ 1.7%Al 元素对合金高温强度影响不大, 但却抑制了动态再结晶和孪晶晶粒的产生。

(3) 铁基低镍电热合金中的铝元素提高了合金层错能, 从而降低了动态回复激活能, 不同铝含量电热合金发生动态回复的激活能为

$$\text{高铝: } Q = 338.3 \text{ KJ/mol; } \quad \text{低铝: } Q = 400.1 \text{ KJ/mol}$$

参 考 文 献

- 1 首钢冶金研究院. 低镍电热合金 BERA 研究报告, 1992
- 2 锻压技术手册. 北京: 机械工业出版社, 1985
- 3 周纪华, 管克智. 金属塑性变形抗力. 北京: 机械工业出版社, 1989
- 4 酒井拓, 作井诚太. 铁と钢, 1979, 63 (2) :87
- 5 Shibata K, Fujita T. ISIJ, Apr. 1987, 73 (6) :723 ~730

Hot Deformation Behavior of Low Nickel Electric Heating Alloy

Gao Hong

Chen Qian

(Institute of Mechanics, Academia Sinica)

(Central Iron & Steel Research Institute, Metallurgical Ministry)

Abstract

The hot deformation behavior of low nickel electric heating alloy was studied by means of hot simulating technology. True stress-true strain curves and hot deformation microstructures were given. The dynamic recovery was the main type of softening in hot deformation, and a large number of twin crystals were generated during holding time after hot deformation. In addition, the influencing factors of this alloy on hot deformation behavior were analysed. The additive element of aluminum had little influence on the high temperature strength, but restrained the generation of dynamic recrystal and twin grains. Furthermore, the activated energy of hot deformation for recovery were provided

Key words: electric heating alloy; hot deformation; recrystallization; recovery