

低镍电热合金高温热变形组织分析

高宏 陈光南 (中国科学院力学研究所 北京 100080) 陈其安 (冶金部钢铁研究总院)

TG132.24

A摘要 本文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着重分析了铝元素对该合金热变形行为的影响。

关键词:电热合金,热变形,再结晶,回复

Hot Deformation Behavior of Low Nickel Electric Heating Alloy

Abstract: The hot deformation behavior of a low nickel electric heating alloy was studied by means of hot simulating technology. True stress-true strain curves and hot deformation microstructures were given. In addition, the factors influencing the hot deformation behavior of this alloy were analysed.

key words: electric heating alloy, hot deformation, recrystallization, recovery

Correspondent: Gao Hong, Institute of Mechanics, Academia Sinica, Beijing, 100080

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。很早以来,许多研究人员就进行着电热材料的研制和改善工作^[1,2]。现在,铁路运输中已广泛采用电热合金以实现电阻制动。以往所使用的电热合金均限于高镍或中镍(Ni>40%)合金。由于生产力的发展和工业水平的提高,资源短缺已成为材料工程界人士普遍关注的问题。铁基低镍电热合金BERA就是从节镍的角度出发,以机车电阻制动为目标而研制开发的一种新型节镍电热合金^[3]。BERA合金具有与高镍(Ni%>60%)合金相近的抗氧化性,与中镍(Ni%>30%)合金一致的电阻率和电阻温度系数。该合金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,该合金在生产和使用过程中也存在一些问题,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,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φ15的圆棒,再机加工为如图1所示

收到稿件日期:1996年3月4日
课题部分得到北京市自然科学基金资助,2962001

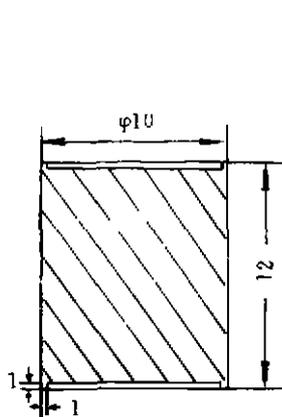


图1 试样尺寸示意图

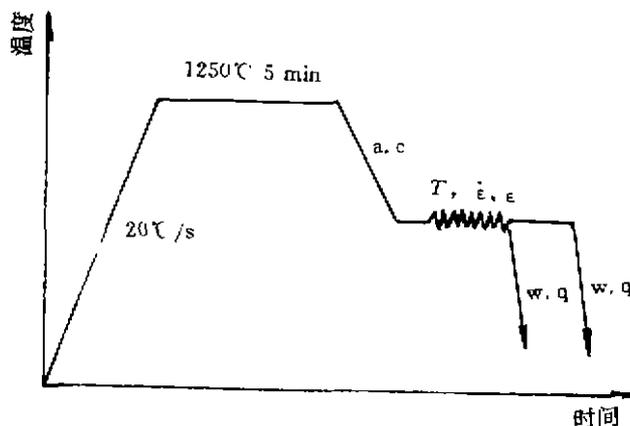


图2 试验变形制度示意图

的样品。样品为 $\phi 10 \times 12\text{mm}$ 的圆柱形,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,或因电击穿试样两端的高温合金垫片而粘结在试验机压头上。此外,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 试验设备

试验在 Gleeble-1500 热模拟试验机上进行。热模拟试验机的出现为高温变形过程的研究提供了简便手段,可以模拟各种热力学过程,是一种理想的热力学材料动态试验机。

1.3 试验方法

将试样以 $20^\circ\text{C}/\text{s}$ 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°C , 1150°C , 1050°C , 950°C , 850°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,在氩保护气中压缩变形,以防止高温氧化,变形量 ϵ 为 30%~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 BERA 合金在高温条件下变形行为的影响。

1.4 金相观察

利用热变形后瞬时水淬来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 试验结果与分析

2.1 各种试验条件下的 $\sigma-\epsilon$ 曲线

图 3 给出了热锻真应力-真应变曲线。结果表明,在以上各种变形条件($T, \dot{\epsilon}, \epsilon_{\text{max}}$)下,均未发现样品开裂。本材料热压缩到 $\epsilon_{\text{max}}=50\%$ 仍然没有出现开裂现象,说明 BERA 合金热塑性良好。这除了与其为单相奥氏体组织有关外,动态回复和动态再结晶软化提高了合金热变形时的工艺塑性,减缓或阻止了晶界裂纹的萌生^[4]。

从图 3 可以看到, $\sigma-\epsilon$ 曲线形式存在两种,一种是动态回复型,如 $T=1150^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0.05\text{s}^{-1}$ 下的 $\sigma-\epsilon$ 曲线;另一种是动态再结晶型,如 $T=1250^\circ\text{C}$, $\dot{\epsilon}=0.01\text{s}^{-1}$ 下的 $\sigma-\epsilon$ 曲线,并且可以发现:在本试验条件下该合金材料以动态回复为主要软化形式,其明显特征就是 $\sigma-\epsilon$ 曲线没

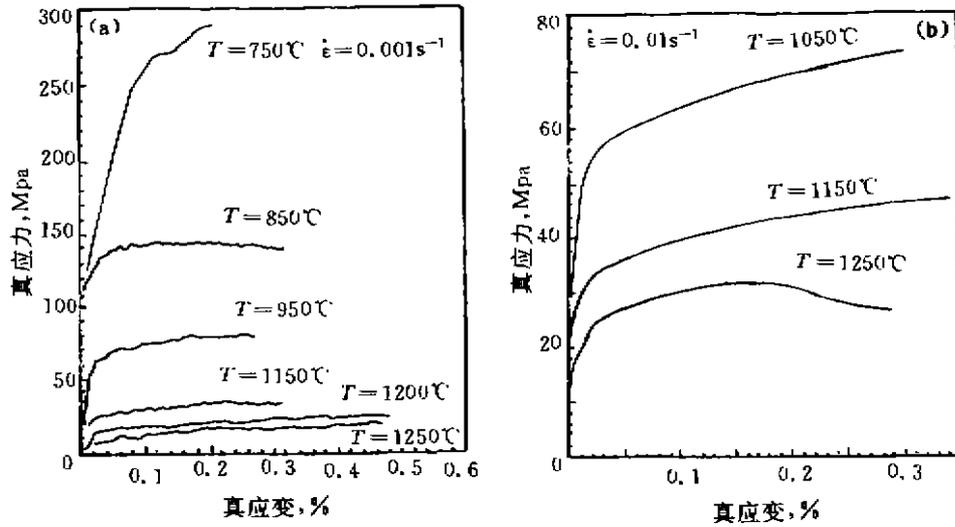


图3 BERA合金高温变形真应力-真应变曲线

有强化极限存在。

2.2 变形条件对动态软化行为的影响

从变形温度和变形速度对 σ - ϵ 曲线的影响可以看出,当变形温度高而变形速度较低时,

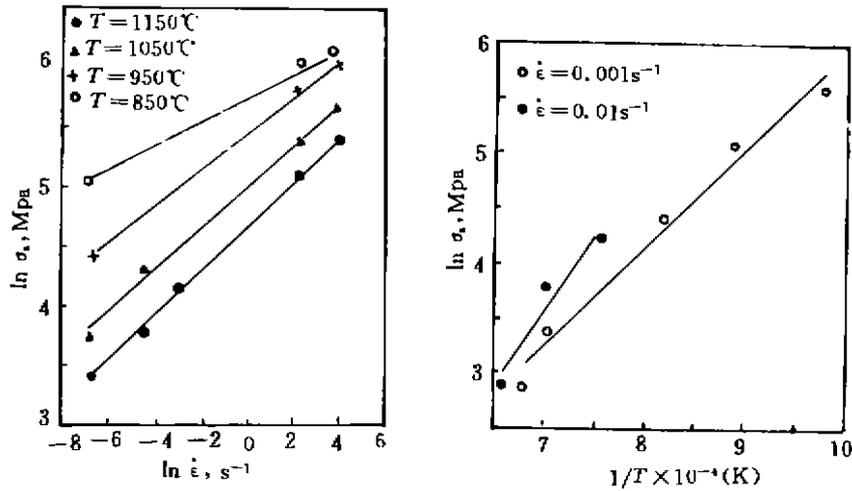


图4 稳态流变应力与温度和变形速度的关系

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。我们知道,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影响到合金的变形抗力,图4反映了稳态流变应力与 T 、 $\dot{\epsilon}$ 的关系,其中 $\ln \sigma_s$ 与 $\ln \dot{\epsilon}$ 、 $1/T$ 成线性关系。

2.3 退火孪晶的产生

试验过程中,对相同变形条件(T 、 $\dot{\epsilon}$)变形后的试样采取瞬时直接水淬和保温2min后再水淬的处理方法。图5为BERA合金在 $T=1150^\circ\text{C}$ 、 $\dot{\epsilon}=0.01\text{s}^{-1}$ 条件下的显微组织,可见保温2min后明显出现大量退火孪晶。试验还发现,当试样加热到 1250°C 时,变形前的组织由于发生

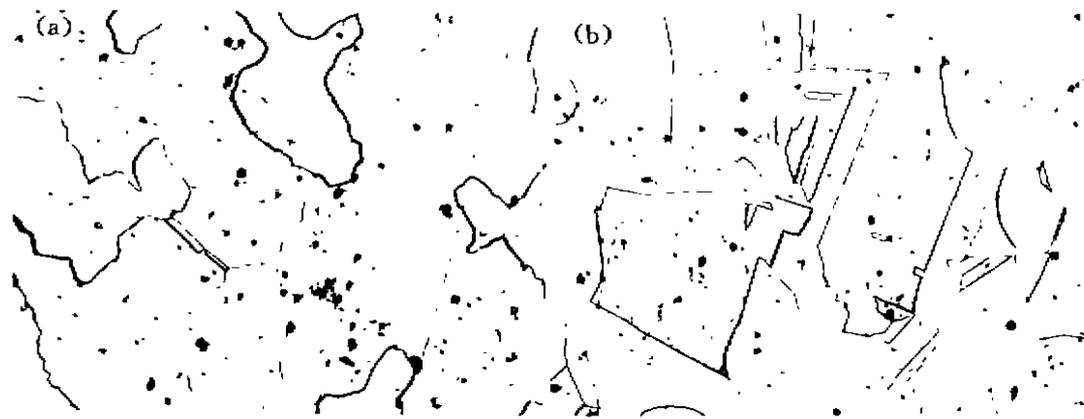


图5 BERA合金在1150℃变形后的显微组织 100×
(a)—直接水淬 (b)—保温2min

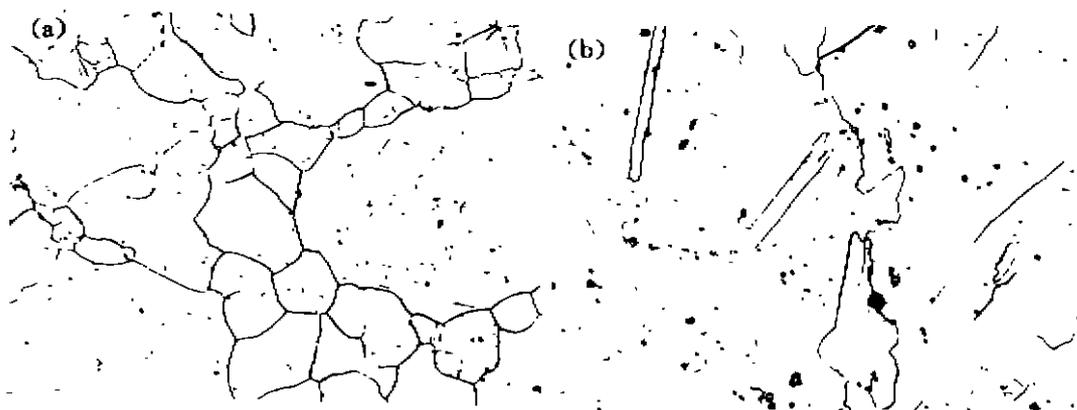


图6 BERA合金在1250℃变形前后的显微组织 100×
(a)—变形前 (b)—变形后

了“二次再结晶”呈现为大小晶粒共存的“颈圈”组织,如图6(a)所示。当以 0.01s^{-1} 的变形速率变形后,由于动态再结晶过程中伴随有孪生,结果得到图6(b)所示的再结晶组织,并有部分退火孪晶形成。这说明了BERA合金由于层错能低,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^[4]。因此,当BERA合金在高温下变形时,形成了许多孪晶晶粒。

2.4 铝元素对BERA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,在BERA合金中加入了0.9%~1.7%的铝元素。但从图7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BERA合金抗氧化性的同时,高温强度能够保持稳定。

同时,从图8中发现高铝含量合金变形后再结晶晶粒及退火孪晶数量比低铝含量BERA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,相对而言就阻止了动态再结晶的发生。

结论

(1) BERA电热合金的热变形软化方式以动态回复为主,而发生动态再结晶过程困难。

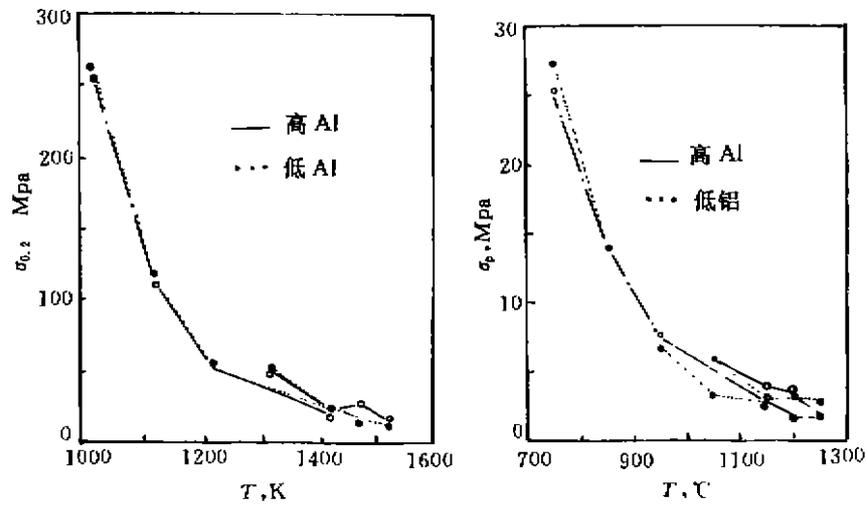


图7 铝元素对屈服强度和峰值应力的影响

图8 铝含量对BERA合金热变形组织的影响 100×
(a)—低铝 (b)—高铝

(2) 热变形后的保温过程将促进BERA电热合金中再结晶和孪晶晶粒的产生。

(3) 在Fe-20%Cr-25%Ni合金中加入0.9%—1.7%Al对合金高温强度影响不大,但却对合金的动态再结晶行为具有抑制作用。

参 考 文 献

- 1 精密合金(译文集). 中国科学技术情报研究所, 1971
- 2 发明专利公报, 公开号 CN1057680
- 3 低镍电热合金BERA研究报告, 首钢冶金研究院, 1992
- 4 Shibata K, Fujita T. ISIJ, Apr. 1987; 73(6): 723-730