# 稀土 Ce 对 T91 钢高温塑性变形和动态再结晶的影响*

张占川，富晓阳，杨吉春

（内蒙古科技大学材料与冶金学院，内蒙古 包头 014010）

**摘 要**：为了研究含0.016%稀土 Ce 的 T91 钢的高温变形行为，采用 Gleeble－1500D 热模拟机进行热压缩测试，测定该材料在变形温度 T 为 1 100～1 250 ℃和应变速率为 0.5～5.0 $s^{-1}$时变形的应力－应变曲线，采用 Zener－Hollomon参数法构建高温塑性变形的本构方程，然后计算材料的能量耗散图，并且对高温变形组织在光学显微镜下进行研究。结果表明：添加稀土 Ce 的 T91 钢的应力－应变曲线没有出现双峰特性，存在动态再结晶现象；通过流变应力模型计算的热变形激活能为 559.46 kJ·$mol^{-1}$，说明稀土 Ce 的添加增加了 T91 钢的热变形激活能；结合能量耗损图和微观组织可知，稀土 Ce 推迟了 T91 钢的动态再结晶过程，在高温和小应变速率下，动态再结晶容易发生。

**关键词**：流变应力；能量耗散图；动态再结晶；本构方程

**中图分类号**：TG142.13 **文献标识码**：B **文章编号**：1009－5438(2019)06－0079－06

DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2019.06.020

# Effects of Rare Earth Ce on High Temperature Plastic Deformation and Dynamic Recrystallization of T91 Steel

*Zhang Zhan－chuan, Fu Xiao－yang, Yang Ji－chun*

(*School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Inner Mongolia Autonomous Region, China*)

**Abstract**: In order to study the high temperature deformation behavior of T91 steel containing 0.016% rare earth Ce, the thermal shrinkage test was carried out with the Gleeble－1500D thermal simulator. Its stress－strain curves were measured when the deformation temperature T was 1 100～1 250 ℃ and the strain rate was 0.5～5.0 $s^{-1}$. The constitutive equation of high temperature plastic deformation was constructed with the Zener－Hollomon parametric method, the energy dissipation diagram was calculated and the high temperature deformed microstructure was studied with optical microscope. The results showed that the stress－strain curves of T91 steel with rare earth Ce were without characteristics of double peaks and there was dynamic recrystallization; the hot deformation activation energy calculated by flow stress model was 559.46 kJ·$mol^{-1}$, which indicated that the addition of rare earth Ce increased the hot deformation activation energy of T91 steel; rare earth Ce delayed the dynamic recrystallization process of T91 steel combining with the energy loss diagram and microstructure as well as dynamic recrystallization was easy to occur at high temperature and low strain rate.

**Key words**: flow stress; energy dissipation diagram; dynamic recrystallization; constitutive equation

**收稿日期**：2019－03－01

**作者简介**：张占川(1994－)，男，内蒙古乌兰察布市人，硕士，主要从事稀土钢、不锈钢新工艺新技术开发及应用工作。

中国知网 https://www.cnki.net

T91是未来大功率散裂源液态金属容器的备选材料，作为液态金属容器材料，T91在形变诱导大量第二相产生的同时，必须经过大量的辐射破坏检测[1]。因此，材料在大应变速率和高温下变形的研究对不同工程设计问题有重要的影响，也和原子能材料设计和安全分析有很大的关系[2-5]。由于Mo原子的固溶强化和细小弥散分布的$M_X$和$M_{23}C_6$碳化物的沉淀强化作用，T91钢拥有好的综合力学性能[6]。Park et al.[7]提出在钢中添加稀土，细小的稀土氧化物和稀土硫化物使晶粒细化，材料的强度和塑性提高。李亚波等[8]研究了铈对低铬铁素体不锈钢晶粒和碳化物的影响，可知，铈对铁素体不锈钢中$M_{23}C_6$型碳化物的析出有影响，使析出更加细小、弥散。因此，对于原子能材料设计和安全分析，研究稀土Ce对T91钢高温力学性能的影响是非常必要的。本文采用含0.016%稀土Ce的T91钢，通过Gleebe－1500D热模拟试验机，研究添加稀土Ce的T91钢在不同变形速率和变形温度条件下热压缩的流变应力，并且建立高温流变应力模型，计算热加工图，研究稀土Ce对T91钢高温塑性变形的影响，也为添加稀土Ce的T91钢高温变形提供了理论依据。

## 1 试验材料与方法

试验材料为含稀土Ce的T91钢种，该材料采用容量为10 kg的真空感应炉进行冶炼，冶炼原料中加入了纯度为99.98%的稀土Ce，冶炼后浇铸成直径80 mm的圆柱钢锭，其实验所测得化学成分如表1所示。将圆柱锭进行热轧，随后进行正火和高温回火处理，将处理后的钢板加工成尺寸为Φ8 mm×h15 mm的热模拟压缩试样。

**表1 实验材料的化学成分**(质量分数) %

| C | Mn | Si | Cr | Ni | Mo | V | Nb | N | S | P | Ce | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.08 | 0.44 | 0.34 | 8.76 | 0.14 | 0.90 | 0.19 | 0.07 | 0.041 | 0.005 | 0.011 | 0.016 | 余量 |

采用Gleeble－1500D热模拟试验机对试样进行高温压缩试验，首先以5 ℃/s加热速率升温到1 280 ℃，然后保温2 min，保证整个试样的温度均匀一致，然后以30 ℃/s冷却到设定的变形温度，热压缩工艺图如图1所示。最后在热变形过程中分别设定变形温度为1 100 ℃、1 150 ℃、1 200 ℃、1 250 ℃和应变速率为0.5 $s^{-1}$、1.0 $s^{-1}$、2.0 $s^{-1}$、5.0 $s^{-1}$下进行，试样的变形量均为70%，热变形后进行水冷，保留高温组织状态，热压缩参数表如表2所示。

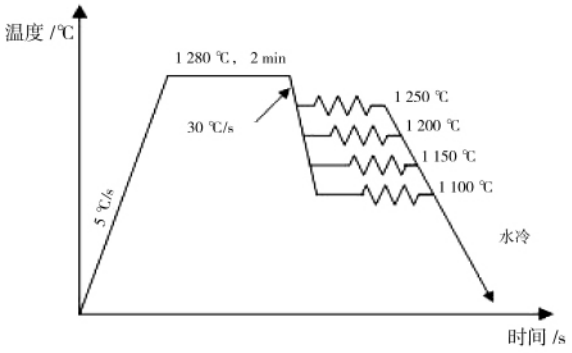



图1 热压缩工艺图

**表2 热压缩参数表**

| 应变速率 $\varepsilon/s^{-1}$ | 变形温度/℃ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 1 100 | 1 150 | 1 200 | 1 250 |
| 0.5 | (1100,0.5) | (1150,0.5) | (1200,0.5) | (1250,0.5) |
| 1.0 | (1100,1.0) | (1150,1.0) | (1200,1.0) | (1250,1.0) |
| 2.0 | (1100,2.0) | (1150,2.0) | (1200,2.0) | (1250,2.0) |
| 5.0 | (1100,5.0) | (1150,5.0) | (1200,5.0) | (1250,5.0) |

## 2 实验结果与分析

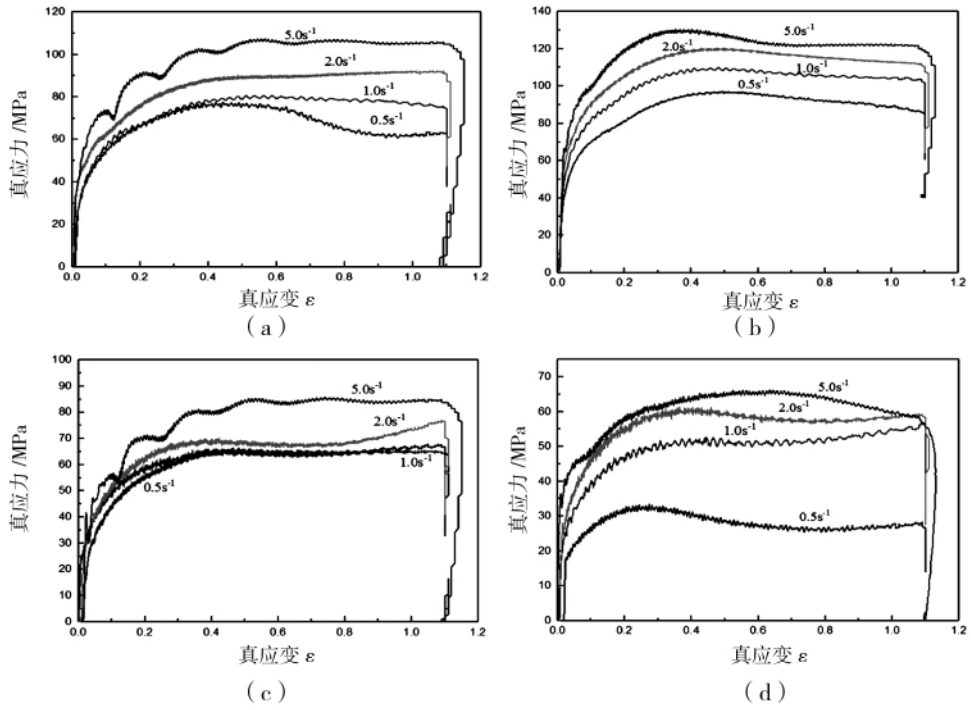
### 2.1 变形条件对流变应力的影响

在热压缩过程中，Gleeble－1500D热模拟机自动记录的在不同温度和应变速率下的应力－应变数据如图2所示，大部分曲线呈现出典型的动态再结晶现象，都存在流变应力峰值和一段稳定应力状态，并且可以直观地观察出试样的硬化和软化现象。由图2可知，当变形温度一定时，随着应变速率的增大流变应力峰值增大。应变速率增大使变形能在单位时间内迅速升高，导致位错移动、增值、缠结和塞积的速度加快，使动力学回复和再结晶没有足够的时间进行，同时加工硬化的程度增加，流变应力增大。当应变速率一定时，随着温度的增大流变应力峰值

中国知网 https://www.cnki.net

减小。这主要是由于随着热压缩温度增大，原子动能增大，热变形更容易被激活。同时，动态再结晶形核变得容易，在高温动态再结晶过程加快。这两个因素极大的加速了软化过程，使流变应力降低。添加稀土 Ce 的 T91 钢，在热加工过程中仍然发生了动态结晶，变形温度越高，应变速率越小，动态再结晶的临界应变量越小，动态再结晶的程度越大。

陈振湘等[9] 测定了不加稀土的 T91 钢在应变速率为 0.01 ~ 1.00 $s^{-1}$，温度为 1 100 ~ 1 250 ℃的应力应变曲线。对比可知，T91 钢和 T91 - Ce 钢在不同应变速率和温度下进行热压缩，加稀土的 T91 钢没有出现明显的双峰特性。这是由于稀土 Ce 高的化学活泼性和大的原子半径，它能很容易和元素 H、O、N、S 等元素反应[10]，生成第二相，阻碍晶粒长大，细化晶粒，晶界增多，增加了位错移动的通道，缓解了位错塞积引起的应力集中现象。




(a) 1 100 ℃; (b) 1 150 ℃; (c) 1 200 ℃; (d) 1 250 ℃

图 2　T91 钢真空应力 - 应变曲线

## 2.2　含稀土 Ce 的 T91 钢流变应力模型

材料在高温的本构方程(Arrhenius 方程) 主要是用来描述热轧过程中热力学参数的定量关系，这些热力学参数包括流变应力、变形温度、应变速率和应变。对于这些热力学参数，Zener - Hollomon 参数一般被用来定义热变形中应变速率和温度的关系，物理意义为温度补偿的应变效率因子，其表达式[11] 如下:

$$Z = \dot{\varepsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right) \tag{1}$$

其中: $Z$ 为 Zener - Hollomon 参数; $Q$ 为变形激活能; $\dot{\varepsilon}$ 为应变速率; $R$ 为气体常数 8.314 J/(mol·K); $T$ 为变形温度。

Sellars 和 Tegart[12] 提出了一个双曲正弦函数方程(3) 来描述热力学参数之间的关系，一些研究[13-14] 也提出，在相对低的应力下( $[\alpha\sigma] < 0.8$)，式(2) 能被改写成(4)，在相对高的应力下( $\alpha\sigma > 1.2$)，式(2) 能被改写成(5)，方程(2) 适应于各种应力状态。

$$\dot{\varepsilon} = A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \tag{2}$$

$$Z = \dot{\varepsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right) A[\sinh(\alpha\sigma)]^n \tag{3}$$

$$\dot{\varepsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_1\delta^{n1}(\alpha\sigma < 0.8) \tag{4}$$

$$\dot{\varepsilon}\exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A_1\exp(\beta\sigma)\ (\alpha\sigma > 1.2) \tag{5}$$

中国知网　https://www.cnki.net

其中: $A$、$A_1$、$A_2$、$\beta$、$\alpha$、$n_1$ 和 $n$ 都是材料常数。其中,$\beta$、$\alpha$、$n_1$ 可以由不同变形状态下的实验数据[12,15]计算得到:

$$\alpha = \frac{\beta}{n_1} \tag{6}$$

对上面的(2)、(3)、(4)、(5) 取对数,可以得到下面的方程:

$$\ln\dot{\varepsilon} = n\ln\sinh(\alpha\sigma) + \ln A - \frac{Q}{RT} \tag{7}$$

$$\ln Z = \ln A + n\ln[\sinh(\alpha\sigma)] \tag{8}$$

$$\ln\dot{\varepsilon} = n_1\ln\sigma + \ln A_1 - \frac{Q}{RT} \tag{9}$$

$$\ln\dot{\varepsilon} = \ln A_1 - \frac{Q}{RT} + \beta\sigma \tag{10}$$

材料在不同应变速率及变形温度下进行热压缩实验,由试验测得的应力 - 应变曲线(如图1) 可得到不同应变速率和变形温度下的流变应力峰值如表2所示。由表2可知,当材料在任一温度 $T$ 变形时,随着 $\dot{\varepsilon}$ 增大,峰值流变应力明显变大,一方面 $\dot{\varepsilon}$ 增加提高了T91钢的形变储存能,使材料的加工硬化更明显; 而 $\dot{\varepsilon}$ 的提高导致晶间的破坏速度远大于软化(回复与再结晶) 修复速度,从而使应力上升。当 $\dot{\varepsilon}$ 不变时,随着变形温度 $T$ 的升高,峰值流变应力降低。

**表3 不同变形条件下的流变应力峰值**

| 变形温度 $T$/℃ | 试样应变速率 $\dot{\varepsilon}$/s$^{-1}$ | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0.5 | 1.0 | 2.0 | 5.0 |
| 1 100 | 97.041 | 109.820 | 120.400 | 130.310 |
| 1 150 | 77.451 | 80.724 | 92.304 | 107.340 |
| 1 200 | 66.370 | 67.822 | 76.825 | 85.753 |
| 1 250 | 33.285 | 56.492 | 61.247 | 66.126 |

由式(9)、(10) 可知,在任一温度下,$\ln\sigma_s$ 和 $\sigma_s$ 与 $\ln\dot{\varepsilon}$ 都符合线性回归关系,根据表2数据拟合的 $\ln\sigma_s - \ln\dot{\varepsilon}$ 和 $\sigma_s - \ln\dot{\varepsilon}$ 线性关系如图3所示,在图3(a) 中,1 250 ℃时的流变应力相对较小,由(9) 可知,$n_1$ 为1 250 ℃时 $\ln\sigma_s - \ln\dot{\varepsilon}$ 曲线斜率的倒数; 而图3(b) 中1 100 ℃、1 150 ℃、1 200 ℃三条拟合曲线对应应力相对较大,由(10) 可知,$\beta$ 取三者曲线斜率倒数的平均值。计算可得 $n_1 = 3.66$,$\beta = 0.085$,所以由(6) 知,$\alpha = 0.023\ 2$。

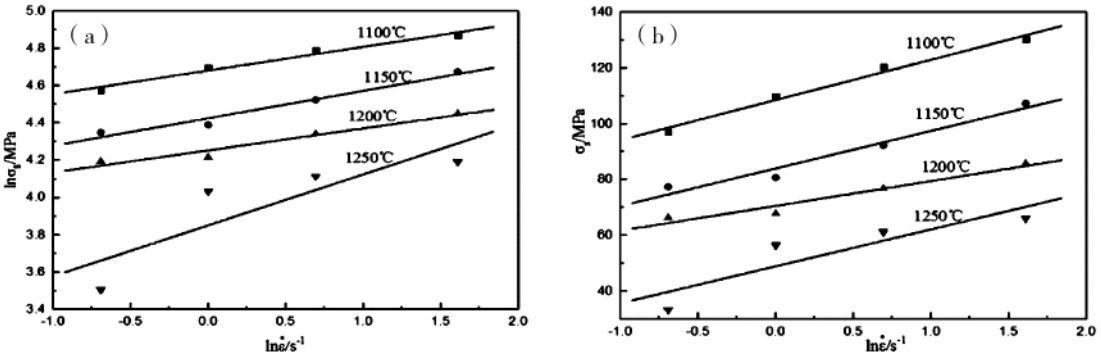



图3 变形温度与应变速率对峰值应力的影响

同理,由式(7) 进行线性回归可得图4、图5,分别为峰值流变应力和形变速率、变形温度的线性关系,由图可知,$n = 3.29$,$Q = 559.46\ \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$。然后将 $Q$ 代入(1) 中得: $Z = \dot{\varepsilon}\exp(5.594\ 6 \times 10^5/RT)$。

将 $\alpha$ 代入式(8) 中,可以绘制出 $\ln Z - \ln[\sinh(\alpha\sigma_s)]$ 的关系图,并做线性拟合,得到的曲线如图6所示。可以求得,$n = 3.15 \pm 0.17$,$\ln A = 43.17 \pm 0.24$,拟合曲线的相关系数为0.981 8。由图4计算出的 $n = 3.29$,在图6拟合值之内。

从上述计算分析可得:

$$Z = \dot{\varepsilon}\exp(5.5946 \times 10^5/RT) = 5.6 \times 10^{18}[\sinh(0.023\sigma)]^{3.15} \tag{11}$$

在不同温度下进行热变形流变应力和应变速率关系为:

$$\ln\dot{\varepsilon}\exp = 3.15\ln\sinh(0.023\ 2\sigma) + 43.17 - 5.594\ 6 \times 10^5/RT \tag{12}$$

由上述模型计算可以看出,在T91钢中添加0.016%的稀土Ce,$Q = 559.46\ \text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$,T91钢的热变形激活能Q(不含稀土的T91钢 $Q$ =

中国知网 https://www.cnki.net

484 kJ·mol$^{-1}$) 增大,这主要是由于固溶在晶界的稀土 Ce 与 H、O、N、S 等元素反应形成第二相,第二相的沉淀强化作用使钢的变形激活能提高。

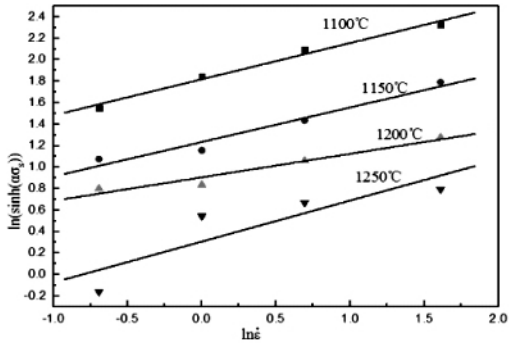



图 4　峰值应力与变形速率的关系

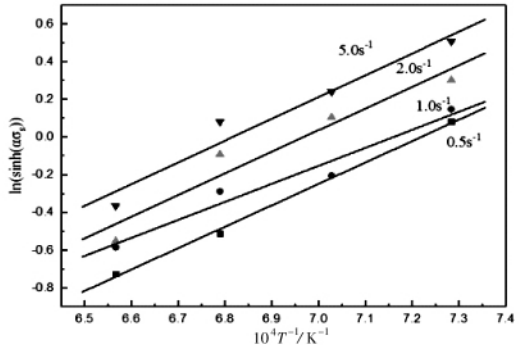



图 5　峰值应力与变形温度的关系

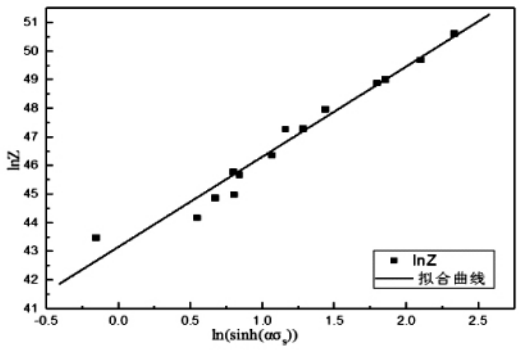



图 6　$Z$ 参数与峰值应力的拟合曲线

## 2.3　能量耗散图

Prasad et al. [16] 根据动态材料模型得到能量耗散图,热变形下的工件起能量耗散的作用。微观组织转变消耗的能量用无量纲参数 $\eta$ 来表示,表示能量消耗率,它是应变速率敏感性函数,表达式为:

$$\eta = \frac{2m}{m+1} \tag{13}$$

式中,$m$ 为应变速率敏感因子,$m = (\partial \ln\sigma / \partial \ln\dot{\varepsilon})_{T,\varepsilon}$。

钢在应变速率为 0.01 ~ 1.00 s$^{-1}$和变形温度为 1 100 ~ 1 250 ℃下进行热压缩,由公式(12) 和(13),得到的能量耗散图如图 7 所示,轮廓线的数值代表等功率能量耗损效率值。这个图直观地显示了不同变形温度和应变速率进行热变形时微观组织转变消耗的能量,功率耗损效率值越大,说明材料在热变形时发生动态再结晶可能性就越大,对材料的组织和性能改善就越大。由图 7 也可以知道,随着应变速率的减小和变形温度的增大,动态再结晶越容易发生。同时,与陈振湘等[9] 得到的 T91 钢功率耗损效率值相比,加稀土 Ce 的 T91 钢组织转变消耗的能量值更小。证明: 在热变形过程中,T91 钢比含稀土 Ce 的 T91 钢更有可能发生动态再结晶,也就是说,稀土 Ce 推迟了 T91 钢的动态再结晶过程。

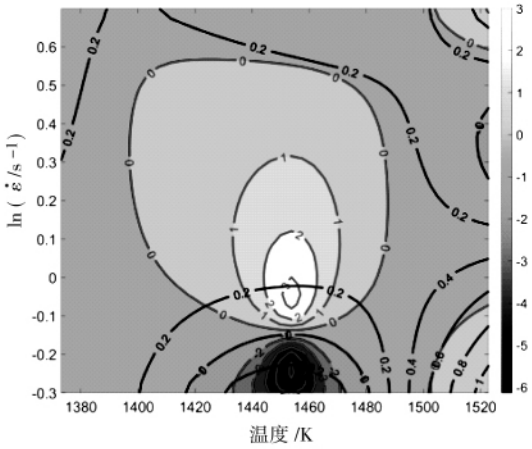


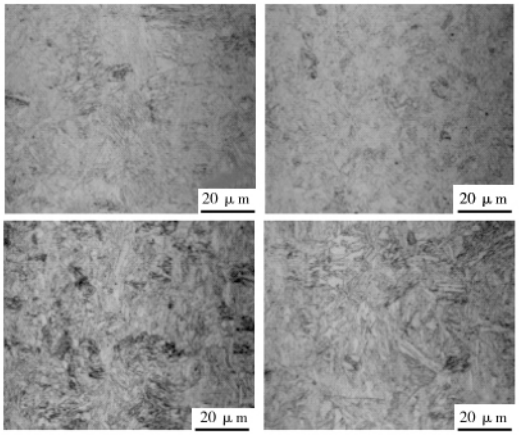

图 7　加稀土 Ce 的 T91 钢热变形能量耗散图

## 2.4　含稀土 Ce 的 T91 钢的动态再结晶过程

对不同压缩条件下的试样进行光学显微观察,图 8( a) 完全发生了动态再结晶过程,形成新的细小的板条状马氏体组织,图 8( b) 还有局部发生动态再结晶的形核,而图 8( c) 只有部分区域发生动态再结晶。当应变速率增大时,大的应变速率导致动态再结晶激活能来不及积累,推迟了动态再结晶,使动态再结晶软化作用减小。由图 8( c) 和( d) 可知,材料在应变速率为 5 s$^{-1}$时发生热压缩,温度达到 1 200 ℃时,材料完全发生了动态再结晶过程,所以当温度增大时,原子的平均动能增加和晶体滑移的临界剪切应力减小,使材料容易发生软化,材料的动态再结晶软化作用增大。

中国知网　https://www.cnki.net

上述结果也验证了通过流变应力模型计算得到的能量耗散图(图7)的准确性,对加稀土Ce的T91钢的热变形有指导作用。




(a) 1 150 ℃,1.0 $s^{-1}$; (b) 1 150 ℃,2.0 $s^{-1}$;
(c) 1 150 ℃,5.0 $s^{-1}$; (d) 1 200 ℃,5.0 $s^{-1}$

图8 材料在不同变形条件下的典型微观组织形貌

## 3 结论

(1) 含0.016%稀土Ce的T91钢在温度为1 100~1 250 ℃和应变速率$\dot{\varepsilon}$为0.5~5 $s^{-1}$的条件下发生热变形,发现真应力应变曲线没有明显的双峰特性,而且大部分真空应力-应变曲线呈现出动态再结晶的象,并且部分有软化硬化交替现象出现。

(2) 含稀土Ce的T91钢的热变形激活能为:$Q$ = 559.46 kJ·$mol^{-1}$,相比T91钢,热变形激活能明显增大。

(3) 含稀土Ce的T91钢的功率耗散效率值小于T91钢的功率耗散效率值,此现象说明稀土Ce的添加推迟了T91钢的动态再结晶行为。

(4) 结合材料热变形后的微观组织,证明通过流变应力模型得到的能量耗散图的准确性,由微观组织形貌可以知道,随着钢种高温塑性变形温度的增大和应变速率的减小,其动态再结晶行为越容易发生。

## 参 考 文 献

[1] J. Henry, X. Averty, Y. Dai, et al. Tensile behaviour of 9Cr - 1Mo tempered martensitic steels irradiated up to 20dpa in a spallation environment [J]. Journal of Nuclear Materials, 2008, 377(1): 80-93.

[2] Ezio Cadoni, Matteo Dotta, Daniele Forni, et al. Strain-rate behavior in tension of the tempered martensitic reduced activation steel Eurofer97 [J]. Journal of Nuclear Materials, 2011, 414(3): 360-366.

[3] G. Solomos, C. Albertini, K. Labibes, et al. Strain rate effects in nuclear steels at room and higher temperatures [J]. Nuclear Engineering and Design, 2004, 229(2-3): 139-149.

[4] P. Spötig, et al. Plastic flow properties and fracture toughness characterization of unirradiated and irradiated tempered martensitic steels [J]. Journal of Nuclear Materials, 2007, 367-370: 527-538.

[5] Woei-Shyan Lee, Chi-Feng lin, Tao-Hsing Chen, et al. High temperature deformation and fracture behaviour of 316L stainless steel under high strain rate loading [J]. Journal of Nuclear Materials, 2012, 420(1-3): 226-234.

[6] Grzegorz Golański, Anna Zielińska-Lipiec, A. Zieliński, et al. Effect of Long-Term Service on Microstructure and Mechanical Properties of Martensitic 9% Cr Steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2017, 26(3): 1101-1107.

[7] Xiaocong Ma, Zijun An, Lei Chen, et al. The effect of rare earth alloying on the hot workability of duplex stainless steel-A study using processing map [J]. Materials & Design, 2015, 86: 848-854.

[8] 李亚波,王福明,李长荣. 铈对低铬铁素体不锈钢晶粒和碳化物的影响[J]. 中国稀土学报,2009,(01):123-127.

[9] 陈振湘,许晓嫦,王斌,等. T91钢的高温塑性变形及动态再结晶行为[J]. 北京科技大学学报,2012,(03):298-304.

[10] Guojun Cai, Changsheng Li. Effects of Ce on Inclusions, Microstructure, Mechanical Properties, and Corrosion Behavior of AISI 202 Stainless Steel [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2015, 24(10): 3989-4009.

(下转第94页)

中国知网 https://www.cnki.net

合金钢(YSBC 112030 - 99)和低合金钢 (35CrMoAlTiRE)进行精密度实验。具体数据见表5。

表5 精密度实验数据 %

| 样品 | 元素 | 测定值 | 标准偏差SD | 相对标准偏差RSD |
|---|---|---|---|---|
| 低合金钢(35CrMoAlTiRE) | La | 0.014 5 | 0.000 32 | 2.19 |
| | Ce | 0.049 | 0.001 48 | 3.02 |
| | Pr | 0.004 8 | 0.000 14 | 2.92 |
| | Nd | 0.016 2 | 0.000 39 | 2.42 |
| 低合金钢(YSBC 112030 - 99) | La | 0.005 4 | 0.000 43 | 7.97 |
| | Ce | 0.015 2 | 0.000 98 | 6.42 |
| | Pr | 0.001 5 | 0.000 12 | 7.93 |
| | Nd | 0.005 2 | 0.000 43 | 8.40 |

从以上数据可以看出:两个标准物质精密度实验数据的相对标准偏差均小于10%,对于痕量元素的测定本方法具有较高的精密度。

## 3 结束语

通过精密度和准确度实验说明本方法能快速、准确的测定钢铁及合金中镧、铈、镨、钕、钐的含量。

## 参 考 文 献

[1] 魏春艳,丁美英. ICP - AES法测定钢中微量La、Ce、Pr、Nd、Sm[J]. 稀土,2004,25(5):24 - 26.

[2] 于媛君,亢德华,王铁,等,电感耦合等离子质谱法测定钢铁及合金中镧、铈、镨、钕、钐[J]. 冶金分析,2011,31(9):18 - 21.

[3] 聂玲清. 高分辨电感耦合等离子体质谱法测定钢中痕量铈[J]. 冶金分析,2009,29(8):11 - 15.

[4] GB/T 223.49—1994,钢铁及合金化学分析方法:萃取分离 - 偶氮氯膦mA分光光度法测定稀土总量[S].

[5] 孙靖,沈怡文. ICP - MS分析技术及干扰问题[J]. 理化检验,1998,34(7):318 - 319.

(上接第84页)

[11] C. Zener, J. H. Hollomon. Effect of Strain Rate Upon Plastic Flow of Steel[J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15(1): 22 - 32.

[12] C. M. Sellars, W. J. M. G. Tegart. Relationship between strength and structure in deformation at elevated temperatures[J]. Mem. Sci. Rev. Met, 1966, 63.

[13] A. Mwembela, E. B. Konopleva, H. J. McQueen. Microstructural development in Mg alloy AZ31 during hot working[J]. Scripta Mater, 1997, 37(11): 1789 - 1795.

[14] J. J. Jonas, C. M. Sellars, W. J. McG. Tegart. Strength and structure under hot - working conditions[J]. Metallurgical Reviews, 1969, 14: 1 - 24.

[15] H. J. McQueen, W. A. Wong, J. J. Jonas. Deformation of aluminum at high temperatures and strain rates[J]. Canadian Journal of Physics, 1967, 45: 1225 - 1234.

[16] Y. V. R. K. Prasad, H. L. Gegel, S. M. Doraivelu, et al. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: forging of Ti - 6242[J]. Metallurgical Transactions A, 1984, 15: 1883 - 1892.

中国知网 https://www.cnki.net