

材料与成形性能

## 铸态 ER8 钢高温塑性变形行为及热加工图

陈 飞<sup>1,2</sup>, 张晓峰<sup>3</sup>, 党淑娥<sup>1,2</sup>, 任劲宇<sup>1,2</sup>, 朱雪彤<sup>1,2</sup>

(1. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024; 2. 太原科技大学 山西省大型铸锻件工程技术研究中心, 山西 太原 030024; 3. 太原重工轨道交通设备有限公司 技术中心, 山西 太原 030032)

**摘要:** 在 Gleeble-1500D 热力模拟试验机上, 以  $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$  的应变速率和  $900 \sim 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$  的温度对铸态 ER8 钢进行了单轴热压缩试验, 得到了流动应力曲线, 并基于此, 建立了热加工图, 详细地分析了温度和应变率对材料热加工性能的影响。结果表明: 在变形温度为  $900 \sim 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为  $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$  范围内, 铸态 ER8 钢的流动应力曲线为动态再结晶型曲线, 仅当变形温度低于  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率高于  $1 \text{ s}^{-1}$  时, 流动应力曲线具有明显的动态回复型曲线的特征。结合 ER8 钢的热加工图分析可知, 为了防止高温塑性变形失稳, 在锻造时变形温度应大于  $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 当应变为 0.20 时, 应变速率建议小于  $0.05 \text{ s}^{-1}$ 。

**关键词:** 铸态 ER8 钢; 高温塑性变形; 热加工图; 流动应力曲线; 热加工性能

**DOI:** 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.08.031

**中图分类号:** TG314.4

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-3940 (2023) 08-0224-07

## High temperature plastic deformation behavior and hot processing map on as-cast ER8 steel

Chen Fei<sup>1,2</sup>, Zhang Xiaofeng<sup>3</sup>, Dang Shu'e<sup>1,2</sup>, Ren Jinyu<sup>1,2</sup>, Zhu Xuetong<sup>1,2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;  
2. Heavy Castings and Forgings Engineering Technology Research Center of Shanxi Province, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China; 3. Technique Center, Taiyuan Heavy Industry Transit Equipment Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

**Abstract:** The uniaxial hot compression test of as-cast ER8 steel at the strain rate of  $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$  and the temperature of  $900 \sim 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$  was carried out by thermal simulation testing machine Gleeble-1500D, and the hot processing map was established based on the obtained flow stress curve. Then the influences of temperature and strain rate on the hot workability of material were analyzed in detail. The results show that in the deformation temperature range of  $900 \sim 1250 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and the strain rate range of  $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ , the flow stress curve of as-cast ER8 steel is a typical dynamic recrystallization curve. Only when the deformation temperature is lower than  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$  and the strain rate is higher than  $1 \text{ s}^{-1}$ , the flow stress curve has obvious characteristics of dynamic recovery curve. According to the analysis of the hot processing map of as-cast ER8 steel, in order to prevent the instability of high temperature plastic deformation, the deformation temperature during forging should be greater than  $950 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , and when the strain is 0.20, the strain rate is recommended to be less than  $0.05 \text{ s}^{-1}$ .

**Key words:** as-cast ER8 steel; high temperature plastic deformation; hot processing map; flow stress curve; hot workability

21 世纪以来, 我国高速铁路发展迅猛, 高铁运营里程早在 2021 年 12 月 30 日即已经超过 4 万公里<sup>[1]</sup>。高速铁路的发展是一个国家经济发展的必然

产物, 同时也体现着一个国家的科技水平与工业实力<sup>[2]</sup>。而高铁车轮作为高速铁路列车的关键行车部件是影响列车安全稳定与运行速度的关键零部件。目前, 世界上的高铁车轮通常为辗钢车轮, 是通过锻造、轧制、热处理及机加工等工艺联合制造而成<sup>[3]</sup>。其中, 车轮的锻造和轧制塑性变形过程是保障车轮质量最关键的环节。

ER8 钢是高铁车轮常用的钢种之一。高铁车轮

收稿日期: 2022-10-25; 修订日期: 2023-01-13

基金项目: 山西省重点研发计划重点项目 (201703D111005);

太原科技大学科研启动基金资助项目 (20222051)

作者简介: 陈 飞 (1990-), 男, 博士, 讲师

E-mail: chenf@tyust.edu.cn

的塑性变形是在高温下进行的，在热变形过程中不仅要求“成形”，更要求“成性”。不合理的工艺参数往往容易导致金属流动困难、无法顺利成形等问题，使工件内部产生空洞、楔形开裂、局部流变失稳等缺陷。为了更好地设计车轮的高温塑性变形方案，提高车轮的生产质量，需要系统地研究 ER8 钢的热变形行为，确定适合的高温塑性变形工艺范围。张芳萍等<sup>[4]</sup>通过等温热压缩试验得到的高温流动应力曲线建立了 2209 双相不锈钢的热加工图，得到了 2209 双相不锈钢在不同高温条件下的最佳应变速率，并通过背向散射电子衍射（Electron Back Scatter Diffraction, EBSD）试验对比了试样的晶粒与亚结构，验证了建立的热加工图的准确性。郝建军等<sup>[5]</sup>基于 2205 双相不锈钢的流动应力曲线，建立了其在变形温度为 850~1100 ℃、应变速率为 0.01~10 s<sup>-1</sup>、真应变为 0.91 条件下的热加工图，得到了 2205 双相不锈钢的最佳热变形范围，并通过 EBSD 观察微观组织变化，得到了材料耗散值增大的原因。Zhou P 等<sup>[6]</sup>通过不同温度和应变速率下的压缩变形，系统地研究了 25CrMo4 钢的高温变形行为，确定了动态再结晶动力学模型，并借助再结晶动力学模型讨论了应变对功率耗散效率的影响，建立了热加工图，确定了 25CrMo4 钢锻造的最佳工艺参数。Jiao Y X 等<sup>[7]</sup>在 0.005~5 s<sup>-1</sup> 的应变速率和 900~1200 ℃ 的变形温度范围内对 06Cr19Ni9NbN 钢进行了热压缩试验，建立了 06Cr19Ni9NbN 钢的热加工图，详细地分析了温度和应变速率对热加工图的影响，确定了热压缩的最佳工艺参数，并使用推荐的工艺参数进行了平面应变压缩试验，平面应变压缩试验的结果与热加工图结果一致，表明热加工图用于优化压缩工艺参数是准确的。李昌民等<sup>[8]</sup>通过对 Inconel 718 高温合金进行热变形试验，得到了 In-

conel 718 高温合金的热加工图，并结合不同变形条件下的微观组织分析确定了该合金的合理热加工区间。

目前，关于各类金属材料高温塑性变形行为及工艺容限的研究较多且相对成熟，然而关于 ER8 钢的热变形行为，特别是关于热加工工艺容限的研究十分少见。现阶段，国际上较为流行的获得热加工工艺容限的研究方法即热加工图法，该方法主要根据物理试验所得的材料的流动应力曲线的特点，从而建立材料的热加工图，进而得到材料在高温变形条件下的最佳变形温度和应变速率范围，以准确确定最佳热变形参数<sup>[9]</sup>。本文基于单轴热压缩试验，得到了铸态 ER8 钢的高温流动应力曲线数据，从而建立了其在不同应变下的热加工图。最后，结合压缩试验结果和热加工图，得出了铸态 ER8 钢的最佳变形工艺参数范围。

## 1 试验材料与方法

本研究选用的试验材料为铸态 ER8 钢，其化学成分如表 1 所示。为了获得铸态 ER8 钢的流动应力曲线，研究其热变形行为，建立其热加工图，本研究利用 Gleeble-1500D 热力模拟试验机对铸态 ER8 钢进行等温热压缩试验，热压缩前需要将材料加工为  $\Phi 8\text{ mm}\times 12\text{ mm}$  的标准试样。热压缩的具体试验方案为：首先，将试样以 10 ℃·s<sup>-1</sup> 的速度加热至 1250 ℃，保温 3 min；而后，以 5 ℃·s<sup>-1</sup> 的速度冷却至变形温度（900、1000、1100、1200 和 1250 ℃），并保温 60 s；最后，在不同的应变速率下进行等温热压缩。试验所用的应变速率分别为 0.001、0.01、0.1 和 1 s<sup>-1</sup>，压缩变形量为 50%。试样热压缩完成后，立即进行水冷处理。

表 1 铸态 ER8 钢的化学成分（%，质量分数）  
Table 1 Chemical compositions of as-cast ER8 steel（%，mass fraction）

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V	Cr+Mo+Ni	Fe
≤0.56	≤0.40	≤0.80	≤0.020	≤0.015	≤0.30	≤0.30	≤0.08	≤0.30	≤0.06	0.50	余量

## 2 试验结果与分析

铸态 ER8 钢的高温流动应力曲线如图 1 所示。由图 1 中可知，在相同应变速率条件下（图 1a），流动应力随变形温度的升高而迅速降低。铸态 ER8 钢

在 1000 ℃ 时的变形抗力约为 1250 ℃ 时的 2.5 倍；而 900 ℃ 时的变形抗力约为 1250 ℃ 时的 3.8 倍。所以，当变形温度低于 1000 ℃ 后，变形抗力急剧升高。在相同变形温度条件下（图 1b），流动应力随应变速率的升高而迅速升高。铸态 ER8 钢在应变速率为 0.001~0.01 s<sup>-1</sup> 时，变形抗力较低，约为 20~

40 MPa; 而当应变速率为  $0.1 \sim 1 \text{ s}^{-1}$  时, 变形抗力较高, 约为 45~80 MPa。在一定的应变速率和变形温度条件下, 流动应力先随着应变的增加而急剧增加, 当应变达到一定数值时流动应力达到峰值; 然后, 应力随着应变的增大而逐渐得到软化; 最后趋于平稳, 即应力不再随着应变的增加而增加。可见, 在试验参数范围内, 铸态 ER8 钢的流动应力曲线为

动态再结晶型曲线, 即流动应力曲线具有明显的应力峰和软化特征; 应力峰值对应的应变随着应变速率的升高或变形温度的降低而增大。仅当变形温度低于  $900 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、应变速率高于  $1 \text{ s}^{-1}$  时, 流动应力曲线具有明显的动态回复型曲线的特征<sup>[10]</sup>, 即流动应力随着应变的增加而不断增加, 当应变增大至一定程度后, 流动应力值基本稳定。

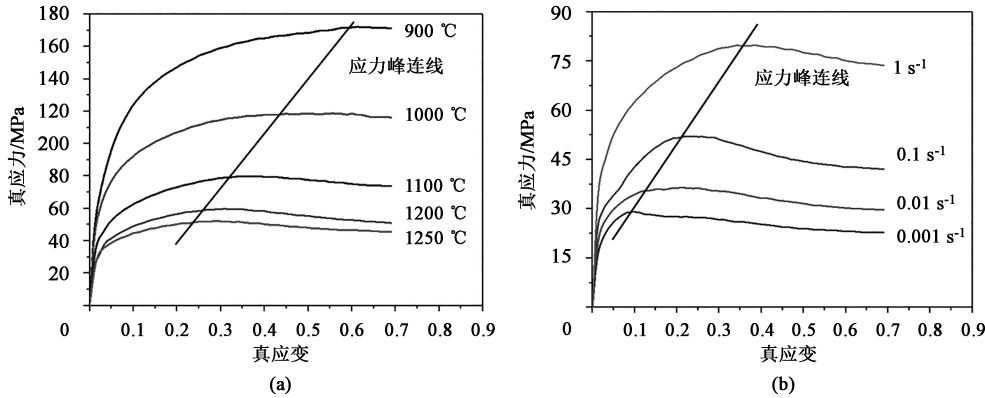


图 1 铸态 ER8 钢的流动应力曲线

(a) 应变速率为  $1 \text{ s}^{-1}$  (b) 变形温度为  $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 1 Flow stress curves of as-cast ER8 steel

(a) Strain rate of  $1 \text{ s}^{-1}$  (b) Deformation temperature of  $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$

### 3 热加工图的建立与分析

#### 3.1 热加工图的建立

目前, 确定金属材料的热塑性变形工艺参数时, 主要基于动态材料模型 (Dynamic Material Model, DMM) 的热加工图理论, 确定材料在不同温度和应变速率下的流变稳态区与失稳区, 判断材料加工的工艺参数是否合理。基于广泛采用的 DMM 热加工图理论, 本文针对铸态 ER8 钢进行了热加工图的研究, 根据热加工图系统地研究了该材料在不同变形条件下的变形机制, 并以热加工图得到的安全加工区域为标准, 为后续工艺参数的制定提供了技术支持。

动态材料模型理论认为, 单位体积材料吸收的能量可分为耗散量  $G$  和耗散协量  $J$ <sup>[11]</sup>, 总能量  $P$  与它们之间的关系可以表示为:

$$P = \sigma \cdot \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为流动应力;  $\dot{\epsilon}$  为应变速率。

耗散量  $G$  和耗散协量  $J$  呈互补关系, 两者的比例关系由系数  $m$  决定:

$$m = \frac{\partial J}{\partial G} = \frac{\dot{\epsilon} \partial \sigma}{\sigma \partial \dot{\epsilon}} = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\epsilon}} \quad (2)$$

系数  $m$  即材料变形动态本构方程中的应变速率敏感指数, 如式 (3) 所示。

$$\sigma = K \dot{\epsilon}^m \quad (3)$$

式中:  $K$  为强度系数。

如图 2 所示, 整个矩形的面积表示总能量  $P$ , 当  $m=0$  时, 材料不发生能量耗散; 当  $0 < m < 1$  时, 材料呈现非线性耗散状态 (图 2a); 当  $m=1$  时, 材料呈现理想线性耗散状态, 此时的耗散协量  $J$  达到了最大值  $J_{\max} = \sigma \dot{\epsilon} / 2$  (图 2b)<sup>[11-13]</sup>。

当温度和应变一定时,  $J$  可以表示为:

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \frac{m}{m+1} \sigma \dot{\epsilon} \quad (4)$$

功率耗散率  $\eta$  为实际的耗散协量与理想线性耗散能量 (最大值) 的比值, 表示为:

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (5)$$

塑性变形过程中由于变形参数选择不合理容易使材料产生流变失稳现象。失稳判据有多种, 式 (6) 所示的失稳判据为钢材料在建立热加工图时最常用的判据之一<sup>[7]</sup>。本文通过式 (6) 可计算获得失稳判据  $\xi(\dot{\epsilon})$ 。

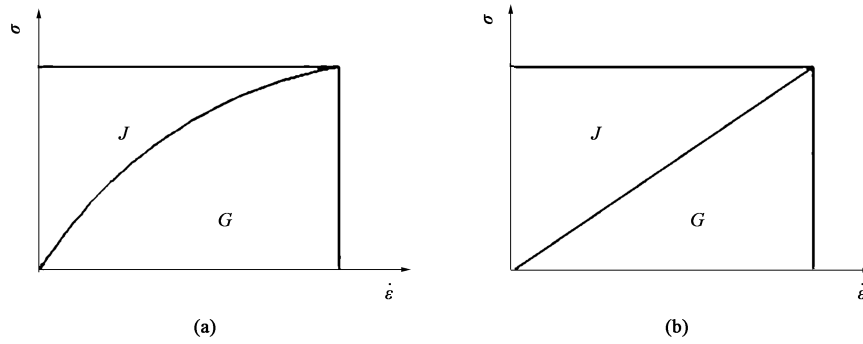


图2 材料系统能量耗散示意图

(a) 非线性耗散 ( $0 < m < 1$ ) (b) 理想线性耗散 ( $m = 1$ )

Fig. 2 Schematic diagrams of energy dissipation for material system

(a) Nonlinear dissipation ( $0 < m < 1$ ) (b) Ideal linear dissipation ( $m = 1$ )

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln(\frac{m}{m+1})}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m < 0 \quad (6)$$

3.1.1 应变速率敏感指数  $m$  和功率耗散率  $\eta$  的计算

(1) 用三次函数表示  $\ln \sigma = k_1 + k_2 \ln \dot{\varepsilon} + k_3 (\ln \dot{\varepsilon})^2 + k_4 (\ln \dot{\varepsilon})^3$ , 其中,  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3$  和  $k_4$  为相关系数, 将不同应变量、不同温度对应的  $\ln \sigma$  和  $\ln \dot{\varepsilon}$  值导入 Origin 软件进行计算, 求出对应的相关系数。

(2) 将三次函数代入式 (2) 可得:

$$m = \frac{\partial \ln \sigma}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} = k_2 + 2k_3 (\ln \dot{\varepsilon}) + 3k_4 (\ln \dot{\varepsilon})^2 \quad (7)$$

将  $\ln \dot{\varepsilon}$  的数值代入即可求得不同温度对应的应变速率敏感指数  $m$ 。

(3) 当温度和应变一定时,  $J$  可以表示为式 (4), 将  $m$  代入式 (5) 进一步求得对应的功率耗散率  $\eta$ 。

3.1.2 流变失稳判据  $\xi(\dot{\varepsilon})$  的计算

(1) 将应变速率敏感指数  $m$  代入, 求得  $\ln [m/(m+1)]$  的值。

(2) 同理, 设  $\ln [m/(m+1)] = k'_1 + k'_2 \ln \dot{\varepsilon} + k'_3 (\ln \dot{\varepsilon})^2 + k'_4 (\ln \dot{\varepsilon})^3$ , 其中,  $k'_1$ 、 $k'_2$ 、 $k'_3$  和  $k'_4$  为相关系数, 将对应数值导入 Origin 软件中求得相关系数。

(3) 将求得的各项系数代入式 (6) 可得:

$$\xi(\dot{\varepsilon}) = \frac{\partial \ln(\frac{m}{m+1})}{\partial \ln \dot{\varepsilon}} + m = [k'_2 + 2k'_3 (\ln \dot{\varepsilon}) + 3k'_4 (\ln \dot{\varepsilon})^2] + m < 0 \quad (8)$$

$\xi(\dot{\varepsilon})$  为无量纲参数, 该参数与应变速率敏感指数  $m$  和应变速率  $\dot{\varepsilon}$  有重要关系, 当  $\xi(\dot{\varepsilon})$  为负值时即为失稳。参数  $\xi(\dot{\varepsilon})$  与变形温度  $T$  和应变速率  $\dot{\varepsilon}$  三者组成失稳图。

## 3.2 热加工图的分析

图3显示了应变为0.20、0.40和0.66时  $\ln \sigma$  和  $\ln \dot{\varepsilon}$  之间的关系。图3a、图3b和图3c中的曲线根据式 (2) 通过三项式拟合得到, 其中,  $\varepsilon$  为应变。

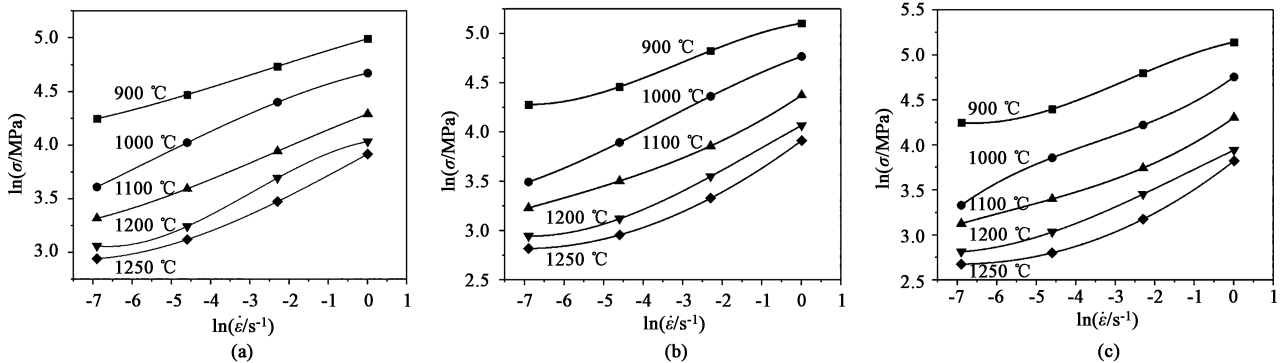
图3 不同应变条件下的  $\ln \sigma - \ln \dot{\varepsilon}$  曲线(a)  $\varepsilon = 0.20$  (b)  $\varepsilon = 0.40$  (c)  $\varepsilon = 0.66$ Fig. 3  $\ln \sigma - \ln \dot{\varepsilon}$  curves under different strain conditions



图 4 显示了应变为 0.20、0.40 和 0.66 时,  $m$  在不同变形条件下的变化曲线。如图 4a~图 4c 所示,  $m$  随着变形温度和应变速率的变化呈不规则变化, 但是变化规律基本一致。当变形温度为 900 和 1200  $^{\circ}\text{C}$  时,  $m$  值达到波谷; 当变形温度为 1000  $^{\circ}\text{C}$  时,  $m$  值达到波峰。如图 4a 所示, 在应变为 0.20、变形温度为 1250  $^{\circ}\text{C}$  和应变速率为  $1 \text{ s}^{-1}$  的条件下,  $m$

最大, 为 0.20, 其他条件下的  $m$  值基本保持在 0.05~0.15 范围内。如图 4b 所示, 在应变为 0.40、变形温度为 1250  $^{\circ}\text{C}$  和应变速率为  $1 \text{ s}^{-1}$  的条件下,  $m$  最大, 为 0.30, 当变形温度大于 900  $^{\circ}\text{C}$  时,  $m$  值基本保持在 0.10~0.25 范围内。当变形温度为 900  $^{\circ}\text{C}$  且应变速率为  $0.001 \text{ s}^{-1}$  时,  $m$  值接近零; 当应变速率为  $0.1 \text{ s}^{-1}$  时,  $m$  仅为 0.10。

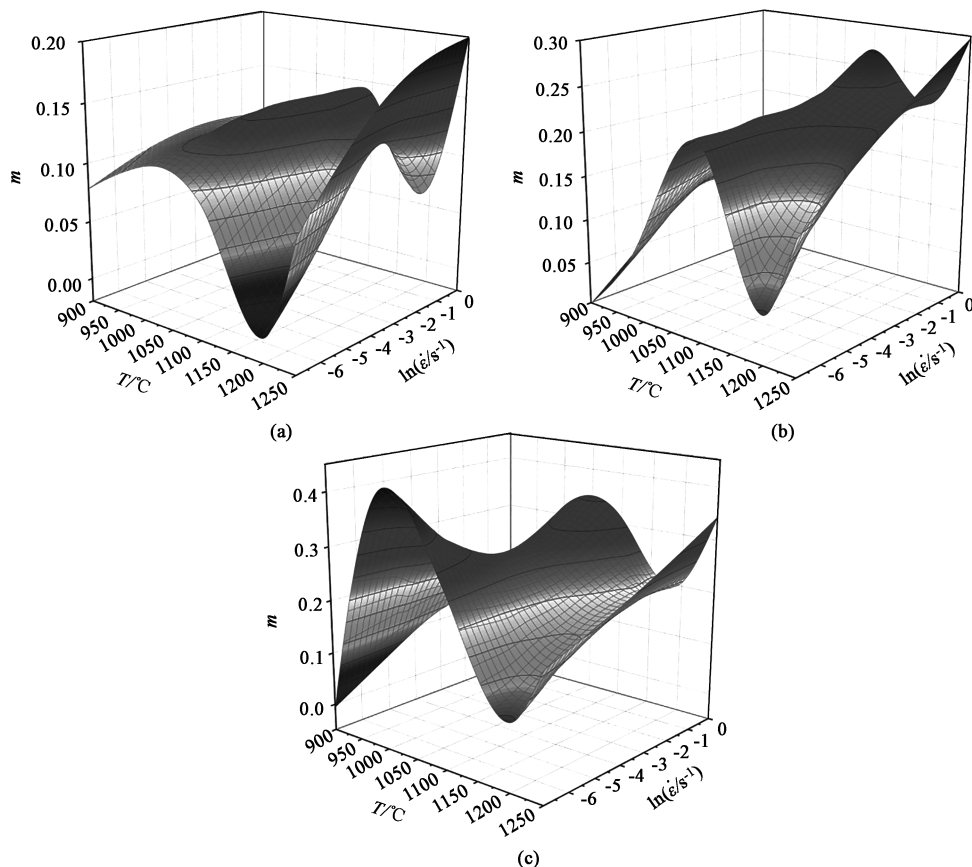


图 4 不同应变条件下  $m$ 、 $T$  和  $\ln \dot{\varepsilon}$  之间的关系

(a)  $\varepsilon=0.20$  (b)  $\varepsilon=0.40$  (c)  $\varepsilon=0.66$

Fig. 4 Relationships among  $m$ ,  $T$  and  $\ln \dot{\varepsilon}$  under different strain conditions

将计算得到的功率耗散率  $\eta$  与变形温度  $T$ 、应变速率  $\dot{\varepsilon}$  三者组合, 构成了功率耗散图。流变失稳判据  $\xi(\dot{\varepsilon})$  与变形温度  $T$ 、应变速率  $\dot{\varepsilon}$  构成失稳图。以变形温度为横坐标、 $\ln \dot{\varepsilon}$  为纵坐标, 建立坐标系, 将功率耗散图与失稳图叠加构成了材料的热加工图。图 5 给出了铸态 ER8 钢在 0.10、0.20、0.40、0.50 和 0.66 这 5 种应变情况下, 变形温度为 900~1250  $^{\circ}\text{C}$ 、应变速率为  $0.001 \sim 1 \text{ s}^{-1}$  时的热加工图。图 5 中等值线值为功率耗散值, 深色部分表示非稳定变形区域即失稳区。根据此热加工图可以明确判断制定的工艺参数是否合理, 以避免失稳缺陷的产生。

从图 5 可以看出, 当应变为 0.20~0.66 时, 热

加工图中均出现了失稳区。当应变为 0.20 时, 失稳区出现在 925~1025  $^{\circ}\text{C}$  以及 1125~1250  $^{\circ}\text{C}$  范围内, 且均发生在高应变速率条件下。铸态 ER8 钢在低温、高应变速率下变形时, 材料的塑性相对较差, 故会出现失稳区<sup>[7]</sup>。而铸态 ER8 钢在应变为 0.20、应变速率为  $0.1 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 、变形温度为 1125~1250  $^{\circ}\text{C}$  时出现失稳区, 主要原因为: 动态再结晶的软化效应, 材料在应变为 0.20 附近陆续达到应力峰值, 导致应力波动显著, 导致材料的非线性耗散程度变大, 从而出现失稳区。当应变为 0.40~0.66 时, 失稳区出现在变形温度为 900~950  $^{\circ}\text{C}$  且应变速率大于  $0.01 \text{ s}^{-1}$  的低温、高应变速率区, 且失稳区域随着

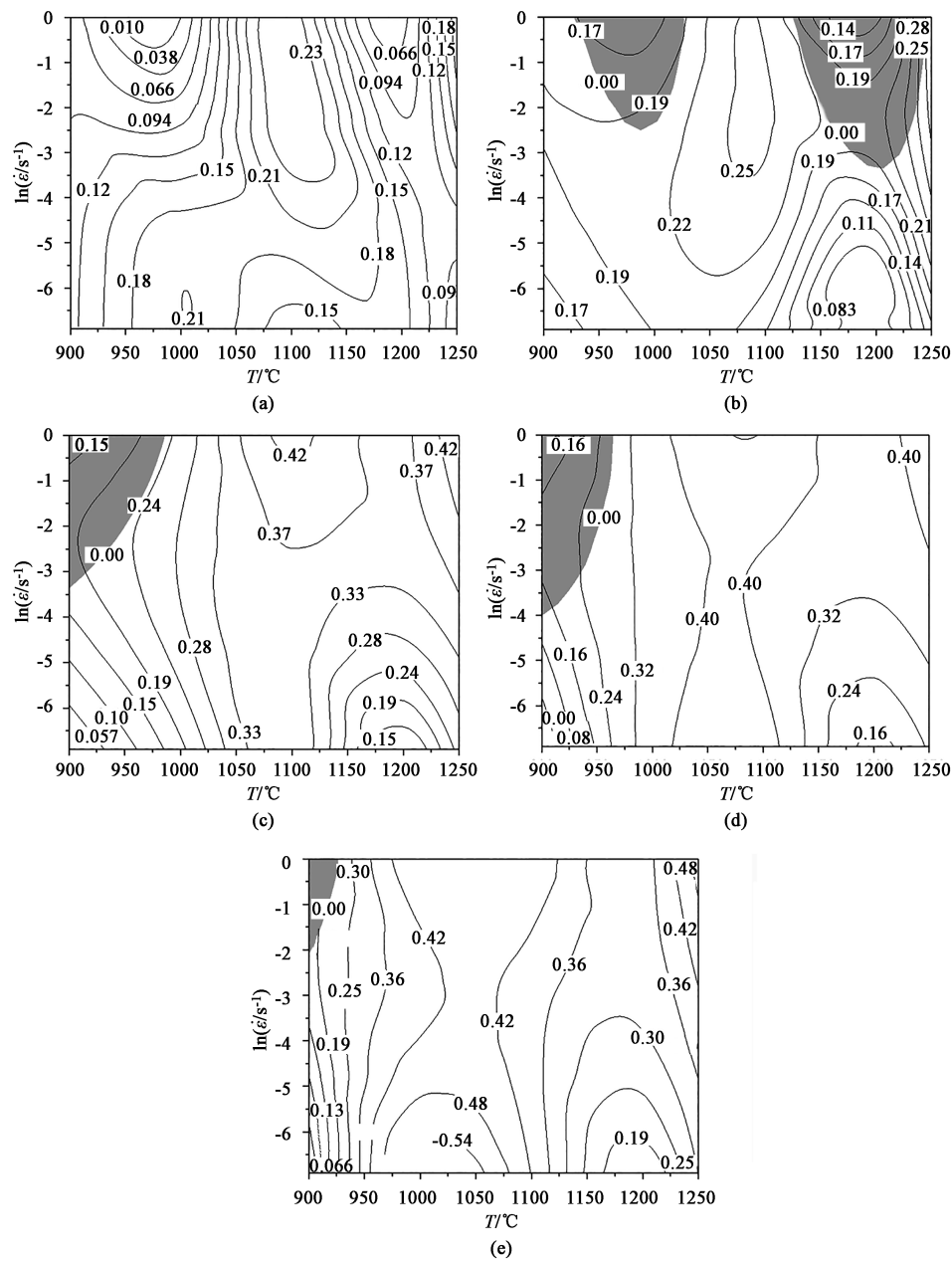


图 5 不同应变条件下 ER8 钢的热加工图  
(a)  $\varepsilon=0.10$  (b)  $\varepsilon=0.20$  (c)  $\varepsilon=0.40$  (d)  $\varepsilon=0.50$  (e)  $\varepsilon=0.66$   
Fig. 5 Hot processing maps of ER8 steel under different strain conditions

应变的增加逐渐减小。从出现失稳区的热加工图(图 5b~图 5d)中可知,为了防止失稳,锻造时的变形温度应大于 950 ℃;需要注意的是,当应变为 0.20 时,应变速率应小于 0.05 s<sup>-1</sup>。

#### 4 结论

(1) 在变形温度为 900~1250 ℃、应变速率为 0.001~1 s<sup>-1</sup> 范围内,铸态 ER8 钢的流动应力曲线为动态再结晶型曲线,仅当变形温度低于 900 ℃、

应变速率高于 1 s<sup>-1</sup> 时,流动应力曲线具有明显的动态回复型曲线的特征。

(2) 应变不同时,  $m$  随着变形温度和应变速率的变化呈不规则变化,但是变化规律基本一致。

(3) 从出现失稳区的热加工图中可知,为了防止失稳,锻造时变形温度应大于 950 ℃;另外需要注意的是,当应变为 0.20 时,应变速率建议小于 0.05 s<sup>-1</sup>。

#### 参考文献:

[1] 广州日报. 中国高铁运营里程突破 4 万公里,可绕地球赤道

- 一圈 [Z]. <https://www.gzdaily.cn/amucsite/web/index.html#/detail/1738851>.  
Guangzhou Daily. China's High-speed Rail Operation Mileage Exceeded 40000 Kilometers, Can be a Circle Around the Equator of the Earth [Z]. <https://www.gzdaily.cn/amucsite/web/index.html#/detail/1738851>.
- [2] 卿三惠, 李雪梅, 卿光辉. 中国高速铁路的发展与技术创新 [J]. 高速铁路技术, 2014, 5 (1): 1-7.  
Qing S H, Li X M, Qing G H. Development and technical innovation of China's high-speed railway [J]. High Speed Railway Technology, 2014, 5 (1): 1-7.
- [3] 沈晓辉. 高速车轮成形理论及组织演变规律研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.  
Shen X H. Research on Forming Theories and Microstructure Evolution of High Speed Railway Wheels [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [4] 张芳萍, 曹宇, 成鑫尧, 等. 2209 双相不锈钢的热加工图和软化机制 [J]. 重型机械, 2022, (3): 43-49.  
Zhang F P, Cao Y, Cheng X Y, et al. Thermal deformation behavior of 2209 duplex stainless steel and finite element analysis of billet opening process [J]. Heavy Machinery, 2022, (3): 43-49.
- [5] 郝建军, 张瑞丰, 宋耀辉, 等. 2205 双相不锈钢的热加工图和组织研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (7): 190-198.  
Hao J J, Zhang R F, Song Y H, et al. Study on thermal processing diagram and microstructure for 2205 duplex stainless steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (7): 190-198.
- [6] Zhou P, Ma Q X. Dynamic recrystallization behavior and processing map development of 25CrMo4 mirror plate steel during hot deformation [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2017, 30 (9): 907-920.
- [7] Jiao Y X, Zhou C L, Liu J S, et al. Process optimization of plane strain compression for 06Cr19Ni9NbN steel based on processing maps [J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2020, 29: 662-671.
- [8] 李昌民, 谭元标, 赵飞. Inconel 718 高温合金流变曲线修正及热加工图 [J]. 稀有金属, 2020, 44 (6): 585-596.  
Li C M, Tan Y B, Zhao F. Modification of flow stress curve and processing maps of inconel 718 superalloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2020, 44 (6): 585-596.
- [9] Chen H Q, Wang Z X, Qin F M, et al. Hot deformation behavior and processing maps of as-cast Mn18Cr18N steel [J]. Journal of Wuhan University of Technology: Materials Science Edition, 2017, 32: 935-943.
- [10] Zhang X Z, Chen F, Jiao Y X, et al. Hot-deformation behavior and a modified physically based constitutive model for as-cast 12%Cr steel during hot deformation [J]. Materials and Technologies, 2020, 54 (5): 715-723.
- [11] 贾伟涛. AZ31B 镁合金中厚板热轧工艺数学模型的建立 [D]. 太原: 太原科技大学, 2015.  
Jia W T. Establishment of Mathematical Model for Hot Rolling Process of AZ31B Magnesium Alloy Plate [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Science & Technology, 2015.
- [12] 赵春禄. 7059 铝合金的热变形特性及热加工图 [D]. 黑龙江: 哈尔滨理工大学, 2016.  
Zhao C L. Hot Deformation Characteristic and Processing Maps of 7059 Aluminum Alloy [D]. Heilongjiang: Harbin University of Science and Technology, 2016.
- [13] 罗锐, 周皓天, 陈乐利, 等. 高温合金 NiCr22Mo9Nb 的热塑性行为与加工图研究 [J]. 稀有金属, 2021, 45 (1): 1-9.  
Luo R, Zhou H T, Chen L L, et al. Thermoplastic behavior and processing map of superalloy NiCr22Mo9Nb [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2021, 45 (1): 1-9.

欢迎关注“锻压技术杂志”微信公众号

@杂志动态 @行业信息 @企业宣传



• 锻造 • 冲压 • 钣金 • 模具 • 加热 • 标准化 •