

材料与成形性能

铸态 Cr5 钢热变形行为及热加工图的研究

于保宁^{1,2}, 郭锐涛^{1,2}, 徐航涛^{1,2}, 庞 锦³, 何文武³

(1. 洛阳中重铸锻有限责任公司, 河南 洛阳 471039; 2. 中信重工机械股份有限公司, 河南 洛阳 471039;
3. 太原科技大学 材料科学与工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 以支承辊常用材料铸态 Cr5 钢为研究对象, 在单道次热压缩试验的基础上, 对其在不同试验参数下的热变形行为及热加工图进行分析研究。试验中, 变形温度为 850~1220 ℃, 变形速率为 0.01~1 s⁻¹, 真应变为 0.7。利用试验数据绘制了铸态 Cr5 钢的真应力-真应变曲线, 得出影响流变应力的因素。并通过拟合曲线计算了各待定材料系数, 给出了铸态 Cr5 钢的流动应力方程。最后, 基于真应力-真应变曲线, 绘制了 0.1~0.6 应变范围内的热加工图。结果表明: 提高变形温度以及减小应变速率可以降低 Cr5 钢的流变应力, 有助于动态再结晶的发生; 而随着应变的增加, 失稳区域与功率耗散因子变大。Cr5 钢高温下最适宜的加工参数区间为: 变形温度为 1000~1200 ℃, 应变速率为 0.03~0.37 s⁻¹。

关键词: 铸态 Cr5 钢; 流变应力; 热变形行为; 变形温度; 应变速率; 热加工图

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2023.04.031

中图分类号: TG142.5

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2023) 04-0236-06

Study on thermal deformation behavior and thermal processing map of as-cast Cr5 steel

Yu Baoning^{1,2}, Guo Ruitao^{1,2}, Xu Hangtao^{1,2}, Pang Jin³, He Wenwu³

(1. LuoYang CITIC HIC Casting & Forging Co., Ltd., Luoyang 471039, China;

2. CITIC Heavy Industries Co., Ltd., Luoyang 471039, China;

3. School of Material Science and Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: For common material as-cast Cr5 steel for back-up rollers, based on the single-pass thermal compression test, its thermal deformation behavior and thermal processing map under different test parameters were analyzed and studied, and in the test, the deformation temperature was 850~1220 ℃, the deformation rate was 0.01~1 s⁻¹, and the true strain was 0.7. Then, the true stress-true strain curve of as-cast Cr5 steel was drawn by the test data, and the factors affecting the rheological stress were obtained. Furthermore, the undetermined material coefficients were calculated by fitting the curves, and the rheological stress equation of as-cast Cr5 steel was given. Finally, based on the true stress-true strain curve, the thermal processing map in the strain range of 0.1~0.6 was drawn. The results show that increasing the deformation temperature and decreasing the strain rate can reduce the rheological stress of Cr5 steel, which is conducive to the occurrence of dynamic recrystallization. With the increasing of strain, the instability area and power dissipation factor become larger, and the optimum processing parameters range of Cr5 steel at high temperature is the deformation temperature of 1000~1200 ℃ and the strain rate of 0.03~0.37 s⁻¹.

Key words: as-cast Cr5 steel; rheological stress; thermal deformation behavior; deformation temperature; strain rate; thermal processing map

相比于 Cr3 钢, 用于支承辊材料的铸态 Cr5 钢, 由于在浇铸过程中添加了适量的微量合金元素, 使其强度、抗耐磨性与抗断裂性能均得到了显著提升, 在担任支承辊时可以很好地完成生产任务^[1]。而支

承辊作为生产轧钢设备的核心零部件之一, 因其体积较大, 重量较重, 且在使用过程中承受巨大的压力载荷挤压, 所以对其品质的要求也越来越高^[2]。然而, 想获得优质的 Cr5 钢支承辊锻件, 需要对其进行热加工处理, 而铸态 Cr5 钢在其高温状态下的热锻、热轧等热加工方式极易使锻件产生裂纹扩展、塑性局部流动、绝热剪切带和空洞形核等材料失稳行为^[3-5]。为了获得品质优良的 Cr5 钢支承辊锻件, 避免在热加工过程中产生失稳行为^[6], 本文从钢锭源头开始, 研究了铸态 Cr5 钢在热加工过程中的热变

收稿日期: 2022-10-14; 修订日期: 2023-01-19

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2020YFB2008400)

作者简介: 于保宁 (1988-), 男, 学士, 工程师

E-mail: citic1988@163.com

通信作者: 何文武 (1977-), 男, 博士, 教授

E-mail: hwwssl@126.com

形行为,并给出了流变应力方程,绘制了不同应变下的热加工图,并通过分析预测了适宜的高温加工区间,为支承辊的实际锻造生产提供工艺参考^[7]。

1 试验材料与方案

本文试验所选的研究材料为铸态 Cr5 钢,研究材料的化学成分如表 1 所示。在试验的第 1 步需将铸态 Cr5 钢在 1250 °C 下进行内部均质化热处理。随后利用履带式锯床及线切割机将其分为 $\Phi 8 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的圆柱试样。

表 1 铸态 Cr5 钢的化学成分 (% , 质量分数)

Table 1 Chemical compositions of as-cast Cr5 steel
(%, mass fraction)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	V	Al
0.53	0.45	0.56	0.116	0.002	5.10	0.52	0.110	0.008

第 2 步在热模拟机上进行单道次热压缩试验,压缩过程如图 1 所示。将试样以 $10 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{s}^{-1}$ 的加热速率加热至 1250 °C 后保温 2 min。调节温度至试样变形温度 (850、900、950、1000、1050、1100、1150、1200 和 1250 °C),并继续保温 2 min,使试样内部温度分布均匀。随后以不同应变速率 (0.01 、 0.1 和 1 s^{-1}) 压缩变形 50%,随后立即淬火,经过处理后得到试样微观组织图像。而此高温压缩试验的流变应力曲线通过数据转换最终获得。

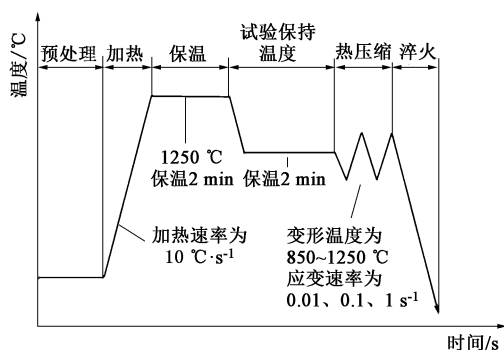


图 1 铸态 Cr5 钢热压缩示意图

Fig. 1 Schematic diagram of thermal compression for as-cast Cr5 steel

2 试验结果与分析

2.1 流变应力曲线

图 2 为铸态 Cr5 钢在 $0.01 \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 应变速率及 850~1250 °C 变形温度下的流变应力曲线。可以观察到,曲线明显呈现了两个不同的状态:(1) 存在加工硬化现象与动态回复现象的动态回复型 (Dy-

namic Recovery, DRV) 曲线;(2) 加工硬化与动态再结晶制衡的动态再结晶 (Dynamic Recrystallization, DRX) 型曲线^[8]。而在这两个类型中,变形初期的变形机理一致,在变形开始的一定阶段范围内,铸态 Cr5 钢内部的位错运动较为活跃,但在某些阻力的作用下,产生了加工硬化 (Working Hard, WH),使得流变应力曲线呈线性增长。当应变增大时,位错密度持续积累变大,促进了 DRV 现象的发生^[9],使得流变应力曲线增加的速率放缓。而在变形后期,由于变形机理发生变化,使得其变形过程也不同。当应变量增加至临界应变量时,铸态 Cr5 钢产生 DRX 现象,产生的新晶粒使位错密度减小,铸态 Cr5 钢内部的流变应力降低。由于这一作用,使得在此变形阶段的 DRX 的软化机制强于 WH 作用。当 WH 作用与 DRX 软化机制相互制约平衡时,位错增加速度与消失速度也近似一致,此时的变形达到了最终的平稳状态。由图 2a 可以看到,当应变速率为 0.01 s^{-1} 时,全部变形温度下曲线的流变应力均有所降低,产生了 DRX 现象。而增加应变速率到 1 s^{-1} 时,只有大于等于 1150 °C 时,才会存在 DRX 行为。由此得出,提高变形温度或者减小应变速率,可以降低铸态 Cr5 钢变形过程的流变应力,有助于发生 DRX 软化行为,提高铸态 Cr5 钢的锻后性能。

2.2 流变应力方程

Sellars C M 等^[10]、任劲宇等^[11]研究发现,金属材料在高温下发生塑性变形时,影响其流变应力的因素除了材料本身性质外,还与变形温度 T 及应变速率 $\dot{\epsilon}$ 等参数存在密切关系,可将其影响表示为:

$$\begin{cases} \dot{\epsilon} = A_1 \sigma^{n_1} \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) & (\alpha\sigma \leq 0.8) \\ \dot{\epsilon} = A_2 \exp(\beta\sigma) \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) & (\alpha\sigma > 0.8) \\ \dot{\epsilon} = A [\sinh(\alpha\sigma)]^n \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) & (\text{任意情况}) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s^{-1} ; σ 为应力, MPa; Q 为变形热激活能, ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$); R 为气体常数,约为 $8.314 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$; T 为变形温度, K; A_1 、 A_2 、 A 、 α 、 β 、 n_1 、 n 为待定材料系数,且 $\alpha = \beta/n_1$ 。

对式 (1) 等式两边分别取对数得到:

$$\begin{cases} \ln \dot{\epsilon} = \ln A_1 + n_1 \ln \sigma - \frac{Q}{RT} \\ \ln \dot{\epsilon} = \ln A_2 + \beta \sigma - \frac{Q}{RT} \\ \ln \dot{\epsilon} = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha\sigma)] - \frac{Q}{RT} \end{cases} \quad (2)$$

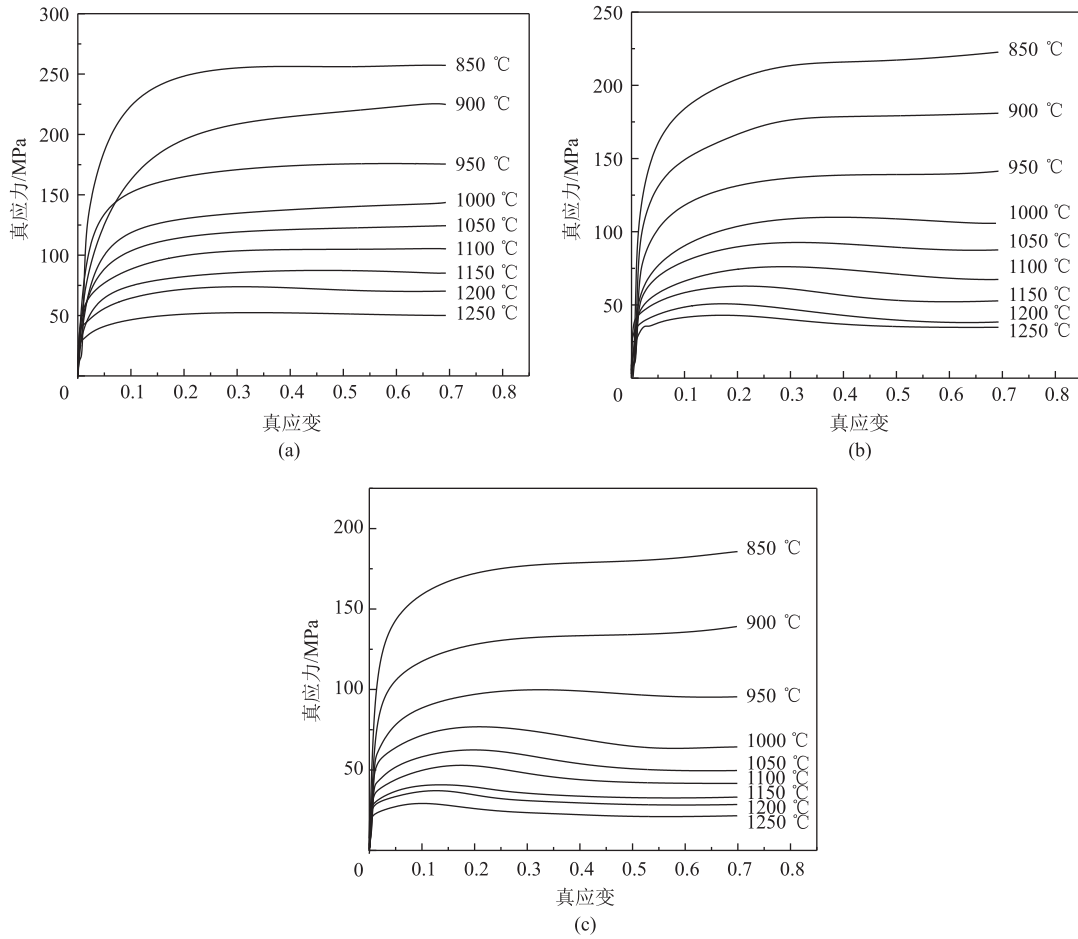


图 2 Cr5 钢在不同变形条件下的真应力-真应变关系曲线

(a) 0.01 s^{-1} (b) 0.1 s^{-1} (c) 1 s^{-1}

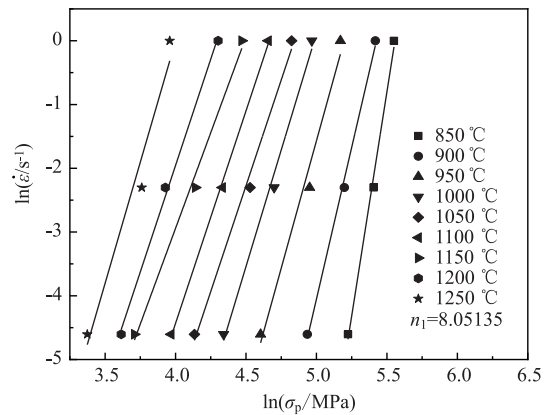
Fig. 2 True stress-true strain relationship curves of Cr5 steel under different deformation conditions

由试验可知, σ 可选择流变应力曲线中的饱和应力 σ_s 、峰值应力 σ_p 以及稳态应力 σ_{ss} , 但由于 σ_p 可直接通过流变应力的最大值获得, 因此本文所建立的模型采用 σ_p 。

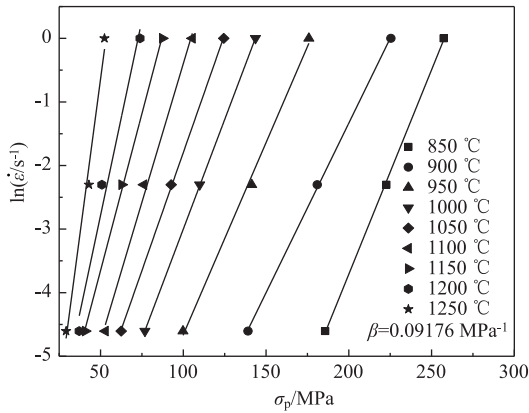
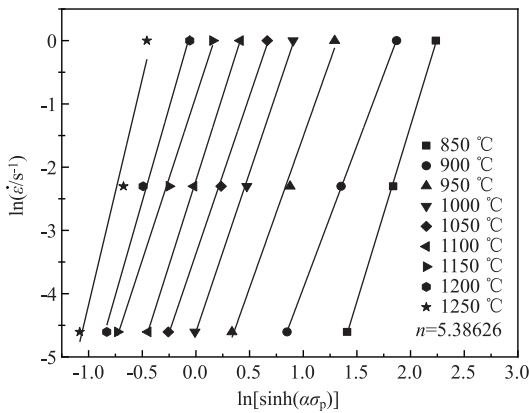
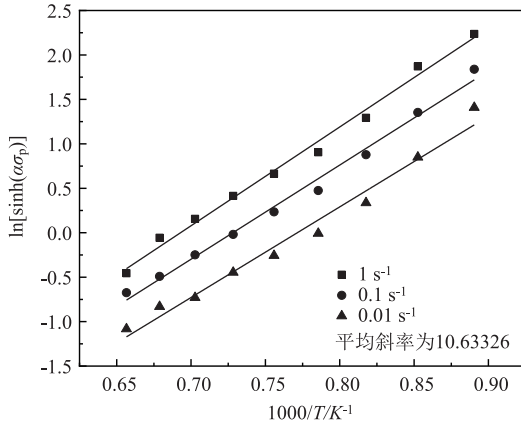
当保持变形温度 T 不变时, 由式 (2) 分析可得, $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma_p$ 与 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma_p$ 的关系呈线性增长, 其中 n_1 为 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma_p$ 拟合曲线的斜率, β 为 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma_p$ 拟合曲线的斜率。因此, 绘制 $\ln \dot{\epsilon} - \ln \sigma_p$ 与 $\ln \dot{\epsilon} - \sigma_p$ 拟合曲线, 如图 3 和图 4 所示, 得出 $n_1 = 8.05135$, $\beta = 0.09176 \text{ MPa}^{-1}$, 通过 $\alpha = \beta / n_1$, 计算得 $\alpha = 0.011397 \text{ MPa}^{-1}$ 。同样, 待定材料系数 n 也可通过拟合 $\ln \dot{\epsilon} - \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$ 的关系曲线求得, 如图 5 所示, 得到 $n = 5.38626$ 。

保持 $\dot{\epsilon}$ 不变时, 将式 (2) 对 $1000/T$ 求一阶偏导可得:

$$\frac{Q}{1000nR} = \left[\frac{\partial \ln [\sinh(\alpha \sigma)]}{\partial (1000/T)} \right]_{\dot{\epsilon}} \quad (3)$$

图 3 材料系数 n_1 的求解曲线Fig. 3 Solution curve of material coefficient n_1

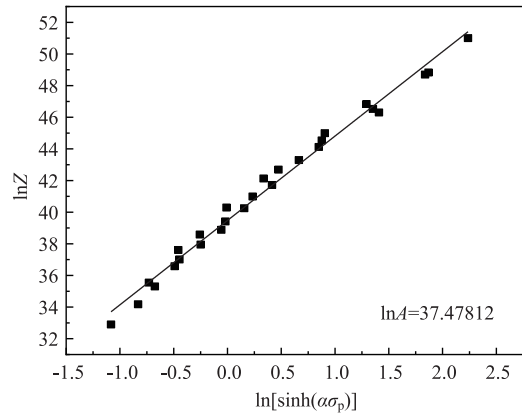
通过拟合 $\ln [\sinh(\alpha \sigma)] - 1000/T$ 关系曲线可得到平均斜率, 如图 6 所示, 将其带入式 (3) 可得到变形热激活能 $Q = 476171 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。将上述材料系数带入式 (1), 并由关系式 $\ln Z = \ln A + n \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$ 可知, $\ln Z$ 与 $n \ln [\sinh(\alpha \sigma_p)]$ 呈线性

图4 材料系数 β 的求解曲线Fig. 4 Solution curve of material coefficient β 图5 材料系数 n 的求解曲线Fig. 5 Solution curve of material coefficient n 图6 变形热激活能 Q 的求解曲线Fig. 6 Solution curve of deformation thermal activation energy Q

关系, 其中 Z 为参数, 而常数 A 可通过拟合这两者关系曲线求解获得, 如图7所示, 得到 $A = 1.89034 \times 10^{16} \text{ s}^{-1}$ 。

最终得到铸态 Cr5 钢的流变应力方程为:

$$\dot{\epsilon} = 1.89034 \times 10^{16} [\sinh(0.011397\sigma)]^{5.38626} \times \exp\left(\frac{-476171}{8.314T}\right) \quad (4)$$

图7 材料系数 A 的求解曲线Fig. 7 Solution curve of material coefficient A

2.3 热加工图的建立

描述金属材料加工性能的图称为热加工图。热加工图既能够直观地呈现不同变形温度和应变速率下材料的功率耗散系数及热稳定性, 也能反映金属材料在热变形时的安全区域, 从而达到预防锻件出现缺陷的目的。

2.3.1 功率耗散图的建立

动态材料模型理论^[12]提出, 金属材料在热加工过程中的耗散能量 P 分为两个方面: 塑性变形产生的功率耗散量 G 和组织演变生成的耗散协量 J , 如式(5)表示:

$$P = \sigma \dot{\epsilon} = G + J = \int_0^{\dot{\epsilon}} \sigma d\dot{\epsilon} + \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma \quad (5)$$

而 J 与 G 之比称为应变速率敏感因子 m , 可用式(6)表示:

$$m = \frac{\partial J}{\partial G} = \frac{\partial(\ln\sigma)}{\partial(\ln\dot{\epsilon})} \quad (6)$$

因此, 耗散协量 J 可变换为式(7):

$$J = \int_0^{\sigma} \dot{\epsilon} d\sigma = \frac{m}{m+1} \sigma \dot{\epsilon} \quad (7)$$

在理想情况下, $m=1$, 此时 J 值达到最大值 J_{\max} 。 J 与 J_{\max} 比值通过变换被定义为功率耗散因子 η :

$$\eta = \frac{J}{J_{\max}} = \frac{2m}{m+1} \quad (8)$$

2.3.2 失稳图的建立

材料在热加工过程中的失稳情况同样可以从动态材料模型理论^[13]中引出, 即:

$$\xi(\dot{\epsilon}) = \frac{\partial \ln\left(\frac{m}{m+1}\right)}{\partial \ln\dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (9)$$

式中: ξ 为加工失稳判据。

根据式 (9) 可得到同一应变率下, 不同的变形温度与应变速率下的 $\xi(\dot{\varepsilon})$, 然后绘制出铸态 Cr5 钢的失稳图, 小于 0 的区域即代表 Cr5 钢热加工时的失稳区间。

2.3.3 热加工图的建立

在相同热加工条件下, 通过叠加功率耗散图与失稳图, 即获得热加工图, 如图 8 所示。从图 8 中可以观察到, 深色阴影部分表示 Cr5 钢在热加工过程中易产生流动失稳的区域, 而等值实线表示 Cr5 钢在热加工过程中功率耗散因子的分布数值。图 8a、图 8b、图 8c 分别代表应变 $\varepsilon=0.2$ 、 $\varepsilon=0.4$ 、 $\varepsilon=0.6$ 下的热加工图, 可知随着应变的增加, 阴影区域即流动失稳区域逐渐变大, 且存在于大应变速率及变形温度较低的区域。从图 9a 所示微观组织也可观察到, 当变形温度为较低的 900 °C、应变速率为较大的 1 s^{-1} 时, 在变形的晶粒内部出现了明显的局部波状带, 导致 Cr5 钢内部的金属塑性流动不均匀, 从而易产生各种缺陷, 影响 Cr5 钢的锻后性能, 因此, 提高热变形温度与减小加工应变速率有利于避开流动失稳区域, 使材料不易产生缺陷。而功率耗散因子的等值线随着应变的增加, 逐渐密集且数值也变大, 而功率耗散因子数值越大, 说明 Cr5 钢越适宜在此区域内进行热加工。由图 9b 可知, 当变形温度为 1150 °C、应变速率为 0.1 s^{-1} 时, 观察组织可发现晶粒已发生完全的动态再结晶, 且晶粒呈现均匀细小状态, 具备优良的热加工性。同时发现铸态组织遗传下来的带状偏析, 故需要防止开裂与失稳, 选择合适的变形温度与变形速率, 通过后续的多向锻造或反复锻粗拔长与再加热扩散来消除, 再进行组织控制^[13]。因此, 适当提高变形温度、减小小应变速率可使 Cr5 钢在热加工过程中更加稳定地发生动态再结晶, 使其具有良好的锻后综合性能。综上所述, 依据热加工图选择 Cr5 钢的最佳热加工范围: 变形温度为 1000~1200 °C, 应变速率为 $0.03 \sim 0.37 \text{ s}^{-1}$ 。

3 结论

(1) 通过对铸态 Cr5 钢流变应力的分析可知, 当应变速率为 0.01 s^{-1} 时, 不同变形温度下曲线的流变应力均产生了 DRX 现象。而当应变速率为 1 s^{-1} 时, 变形温度大于 1150 °C 时才会存在 DRX 行为。提高变形温度或者减小小应变速率, 有助于降低 Cr5 钢的流变应力, 发生 DRX 软化行为, 一定程度上提高 Cr5 钢

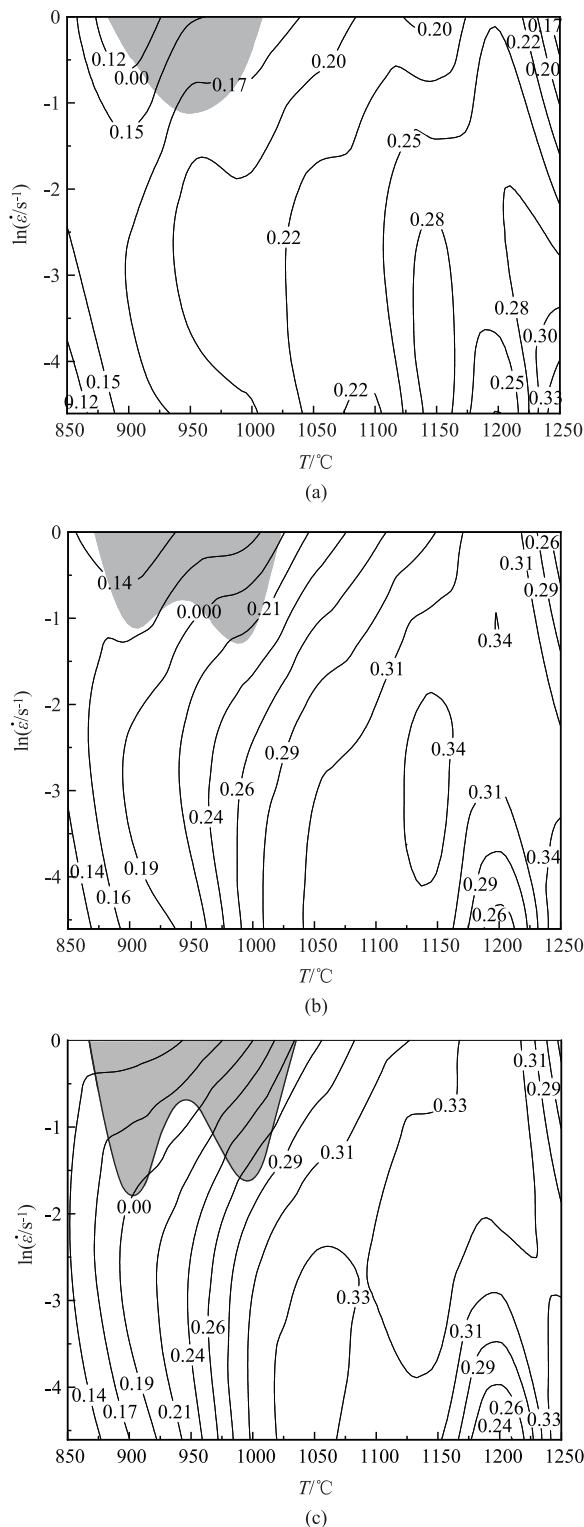


图 8 铸态 Cr5 钢在不同应变下的热加工图

(a) $\varepsilon=0.2$ (b) $\varepsilon=0.4$ (c) $\varepsilon=0.6$

Fig. 8 Thermal processing maps of as-cast Cr5 steel under different strains

的性能。

(2) 通过拟合各变形参数之间的关系计算得到各个材料系数, 最终得到 Cr5 钢的流变应力方程为: $\dot{\varepsilon} =$

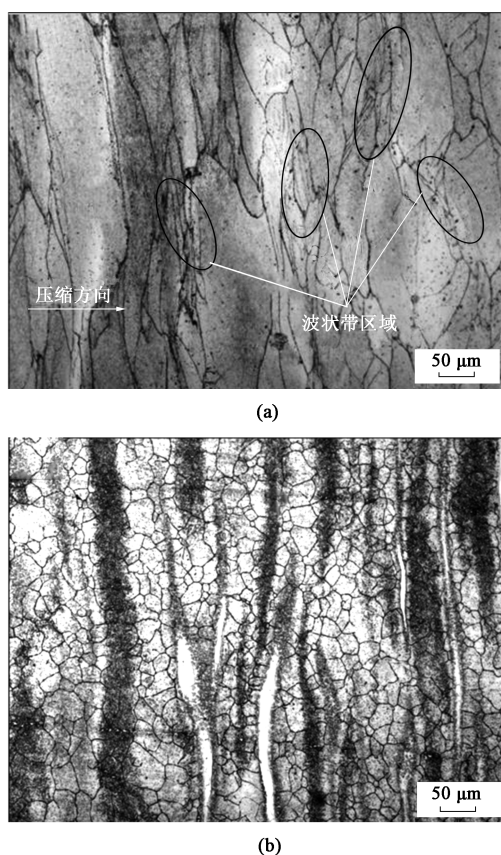


图9 铸态 Cr5 钢压缩 50% 时的微观组织图

(a) 900 °C, 1 s⁻¹ (b) 1150 °C, 0.1 s⁻¹

Fig. 9 Microstructure diagrams of as-cast Cr5 steel compressed by 50%

$$1.89034 \times 10^{16} [\sinh(0.011397\sigma)]^{5.38626} \exp\left(\frac{-476171}{8.314T}\right)。$$

(3) 通过对铸态 Cr5 钢的热加工图和金相显微组织分析,发现 Cr5 钢在低温、高应变速率条件下容易发生局部塑形流动。因此,更适宜在高变形温度、低应变速率下进行热加工,且得出最佳的热加工范围为:变形温度为 1000~1200 °C,应变速率为 0.03~0.37 s⁻¹。

参考文献:

- [1] 张萌. Cr3、Cr5 钢锻造冷轧辊双频感应加热淬火工艺研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2020.
Zhang M. Research on Dual-frequency Induction Heating Quenching Process of Cr3 and Cr5 Steel Forging Cold Roll [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2020.
- [2] 罗玉立, 何亚军, 赵秀清. 大型锻钢支承辊冶炼技术 [J]. 大型铸锻件, 2008, (2): 32-33.
Luo Y L, He Y J, Zhao X Q. Smelting technology of large forged steel support roll [J]. Large Castings and Forgings, 2008, (2): 32-33.
- [3] 于瑞芝, 刘成业. 我国支承辊材料的发展过程及热处理工艺简介 [J]. 大型铸锻件, 2007, (5): 46-48.

- Yu R Z, Liu C Y. Development process and heat treatment process of China's support roll material [J]. Large Castings and Forgings, 2007, (5): 46-48.
- [4] 贺强, 徐济进. 大型锻钢支撑辊残余应力评估技术 [A]. 中国金属学会、宝钢集团有限公司. 第十届中国钢铁年会暨第六届宝钢学术年会 [C]. 北京: 冶金工业出版社, 2015.
He Q, Xu J J. Residual stress assessment technology of large forged steel support roll [A]. China Metal Society, Baosteel Jiquan Co., Ltd. The 10th China Iron and Steel Annual Meeting and The sixth Baosteel Academic Annual Meeting [C]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2015.
- [5] 张全新, 江海军, 王春奕. 4Cr5MoSiV1 钢模块锻造开裂原因 [J]. 理化检验: 物理分册, 2020, 56 (7): 66-68, 72.
Zhang Q X, Jiang H J, Wang C Y. Forging cracking of 4Cr5MoSiV1 steel die block [J]. Physical Testing and Chemical Analysis; Part A: Physical Testing, 2020, 56 (7): 66-68, 72.
- [6] 邱宇, 袁飞, 曾元松, 等. 4Cr5MoSiV1 热作模具钢的热变形行为与热加工图 [J]. 机械工程材料, 2021, 45 (2): 71-77.
Qiu Y, Yuan F, Zeng Y S, et al. Hot deformation behavior and hot working diagram of 4Cr5MoSiV1 hot working die steel [J]. Materials for Mechanical Engineering, 2021, 45 (2): 71-77.
- [7] Chen X, Si Y H, Bai R R, et al. Hot formability study of Cr5 alloy steel by integration of FEM and 3D processing maps [J]. Materials, 2022, 15 (14): 4801.
- [8] 王永善, 胡志强, 王开坤, 等. 热作模具钢 5CrNiMoV 的亚动态再结晶行为研究 [J]. 塑性工程学报, 2021, 28 (3): 118-125.
Wang Y S, Hu Z Q, Wang K K, et al. Study on subdynamic recrystallization behavior of hot work die steel 5CrNiMoV [J]. Journal of Plasticity Engineering, 2021, 28 (3): 118-125.
- [9] 周会军. 支承辊材料 Cr5 钢的热变形行为及微观组织仿真技术研究 [D]. 洛阳: 河南科技大学, 2015.
Zhou H J. Research on Thermal Deformation Behavior and Microstructure Simulation Technology of Cr5 Steel for Support Roll Material [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2015.
- [10] Sellars C M, Whiteman J A. Recrystallization and grain growth in hot rolling [J]. Metal Science, 1979, 13 (3-4): 187-194.
- [11] 任劲宇, 陈飞, 张晓峰, 等. 铸态 ER8 车轮钢的热变形行为及本构模型研究 [J]. 锻压技术, 2021, 46 (1): 202-207.
Ren J Y, Chen F, Zhang X F, et al. Study on hot deformation behavior and constitutive model of as-cast ER8 wheel steel [J]. Forging & Stamping Technology, 2021, 46 (1): 202-207.
- [12] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel [J]. Journal of Applied Physics, 1944, 15 (1): 22-32.
- [13] 周琳, 刘运玺, 陈玮, 等. Ti-4Al-5Mo-6Cr-5V-1Nb 合金的热变形行为及热加工图 [J]. 稀有金属, 2022, 46 (1): 27-35.
Zhou L, Liu Y X, Chen W, et al. Thermal deformation behavior and processing map of Ti-4Al-5Mo-6Cr-5V-1Nb alloy [J]. Chinese Journal of Rare Metals, 2022, 46 (1): 27-35.