

新型抗热损伤车轮钢 20CrSiMnMo 的热变形行为

陈慧琴^{1,2}, 刘建生², 郭会光²

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 太原科技大学现代材料加工技术中心, 山西太原 030024)

摘要: 采用热力模拟试验研究了新型抗热损伤车轮钢 20CrSiMnMo 在温度为 850~1 250 °C、应变速率为 0.1~1 s⁻¹ 条件下的热变形行为。结果表明: 车轮钢在高温低应变速率下具有动态再结晶型流变曲线, 低温高应变速率下其应力-应变曲线呈现硬化型; 动力学分析得到该钢的热变形激活能 $Q=352.2725$ kJ/mol, 应力指数 $n=5.56$; 组织观察和加工图表明, 温度和应变速率参数选择在 1 000~1 100 °C, 0.1~0.5 s⁻¹ 或 1 250 °C, 1~0.25 s⁻¹ 范围内变形, 将获得细小的动态再结晶晶粒和转变组织。

关键词: 车轮钢; 热变形; 热力模拟

中图分类号: TG115.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-3738(2006)12-0072-04

Hot Deformation Behavior of the New Hot-damage-resistant Wheel Steel 20CrSiMnMo

CHEN Hui-qin^{1,2}, LIU Jian-sheng², GUO Hui-guang²

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Hot deformation behavior of the new hot-damage-resistant wheel steel 20CrSiMnMo was investigated by thermo-mechanical modeling tests in 850—1 250 °C and strain rate range 0.1—1 s⁻¹. The results indicate that the flow curves at higher temperature and lower strain rate are characterized by dynamic recrystallization, and strain-hardening curves are obtained at lower temperature and higher strain rate. Kinetic analysis is carried out to determine the stress exponent $n=5.56$ and the activation energy $Q=352.2725$ kJ/mol. Microstructure observation and processing map indicate that finer dynamic recrystallization grains and transformed structure will be obtained deforming in temperature and strain rate ranges of 1 000—1 100 °C, 0.1—0.5 s⁻¹ or 1 250 °C, 1—0.25 s⁻¹.

Key words: wheel steel; hot deformation; thermo-mechanical modeling

0 引言

车轮是列车的关键部件之一。随着工作时间的延长, 车轮踏面的剥落、剥离和擦伤等热损伤会日益加剧, 这不仅造成车轮镟修费用增加, 而且车轮频繁镟修大大缩短了车轮的服役寿命。热损伤产生的主要原因是车轮制动时在钢轨上滑动产生了脆性的马氏体^[1]。随着列车速度的提高, 轮轨滑动倾向增大, 车轮的服役条件较常规使用条件发生了很大的变

化, 对车轮的内在质量、组织性能提出了更高的要求。而普通碳钢车轮在热处理后得到的珠光体车轮踏面, 不足以抵抗由此产生的热损伤。为此, 国内外纷纷开发新材料来代替珠光体型的碳锰钢, 如微合金钢、贝氏体钢等^[2-5]。对于新开发的车轮钢, 研究其热变形行为、优化其成形工艺参数, 对于充分发挥车轮钢的潜力, 改善其组织性能具有一定的理论和实际意义。因此, 作者采用热力模拟试验对国内新开发的 20CrSiMnMo 贝氏体车轮钢的热变形行为进行了研究, 并采用加工图优化了其热变形工艺参数。

1 试样制备与试验方法

试验材料为新研发的抗热损伤贝氏体钢 20CrSiMnMo^[5]。从锻坯上切取并加工成 $\phi 8$ mm

收稿日期: 2005-12-21; 修订日期: 2006-06-29

基金项目: 山西省青年科技研究基金资助项目(20021026)

作者简介: 陈慧琴(1968—), 女, 山西太原人, 博士研究生。

导师: 曹春晓研究员

×15 mm 的圆柱体试样,在 Gleeble 1500 型热模拟试验机上进行热压缩试验,试验温度为 850 ~ 1 250 °C,应变速率为 0.1~1 s⁻¹。试验过程中,试样温度由焊接在试样中部的热电偶测试并以此保证恒温压缩。试样的应变由置于试样中部的应变仪测量,从而直接输出真应力-真应变曲线。为了减少压缩试样出现鼓形,在试样端面与压头之间垫石墨片。压缩变形 50% 后立即用水冷却,以保留高温变形组织。压缩后的试样经 300 °C × 1 h 回火后用线切割沿轴线切成两半,将其中一半镶样,经研磨、抛光和 4% 硝酸酒精腐蚀后用 Zeiss AX10 型光学显微镜观察试样剖面中心组织。

2 结果及讨论

2.1 热压缩曲线

由图 1 可见,应力随着温度的升高而降低,随着应变速率的增加而增加。在应变较小时,所有曲线的应力均随应变增加而增大,发生加工硬化;随着应变的增大,加工硬化率逐渐减小,且低温下的应变硬化率比高温下的大。在高应变速率(1 s⁻¹)、较低温度(850 °C 和 950 °C)下,应力到达峰值后,应力不再随着应变的增加而变化,变形达到稳定状态,这是典型的动态回复型流变曲线特征^[6]。变形初期,材料内位错密度随着变形程度的增大而增加,硬化作用大于软化作用,加工硬化占主导地位,其宏观表现为应变硬化现象;应力达到峰值后,由变形引起的硬化和动态回复引起的软化相平衡,从而使变形达到稳定状态。而在低应变速率(0.1 s⁻¹)和较高温度下(1 050~1 250 °C),应力到达峰值后,软化作用开始大于硬化作用,于是曲线出现下降,继续变形当变形造成的硬化与动态回复造成的软化达到动态平衡时,曲线进入稳定状态。这种曲线为典型的动态再结晶型流变曲线^[5]。这种类型的曲线,一般在应变为 0.83 倍的峰值应变时^[6],开始产生无应变的动态再结晶新晶粒,从而使应力下降。但动态再结晶产生的晶粒在继续变形过程中又会产生硬化,所以一定温度和应变速率下,动态再结晶产生的软化和晶粒的同步硬化达到动态平衡时,应力达到稳定状态;真应变达到 0.7 左右时,所有热变形参数下的曲线都基本达到稳定状态。

2.2 热变形动力学分析

金属的热变形是热力参数所支配的一个热激活过程。为了说明热变形过程中应变速率 $\dot{\epsilon}$ 和温度 T 的综合影响,根据稳态蠕变公式^[6]进行动力学分析:

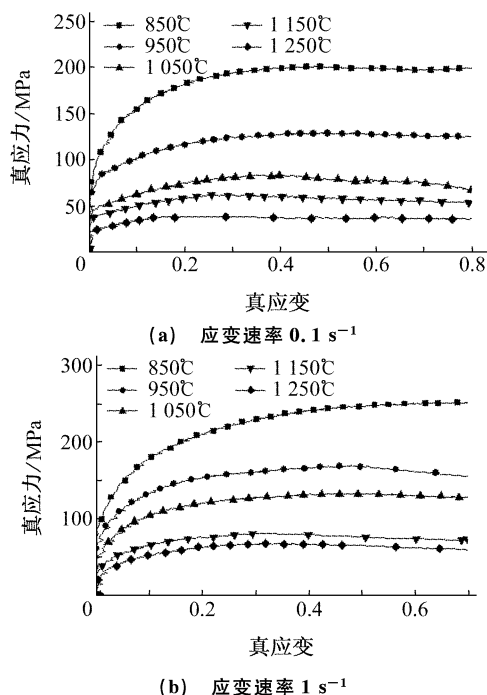


图 1 新型车轮钢热压缩真应力-应变曲线

Fig. 1 Stress-strain relation of the new wheel steel specimens by hot compression

$$\dot{\epsilon} = A \sigma^n \exp(-Q/RT) \quad (1)$$

式中: A 为常数; n 为应力指数; T 为变形温度, K; Q 为热变形激活能, kJ/mol; R 为气体常数; $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, s⁻¹; σ 为流变应力, MPa。对于热加工, 通常采用峰值应力进行分析。对式 1 两边取对数得:

$$\ln A + n \ln \sigma = \ln \dot{\epsilon} + Q/RT \quad (2)$$

分析式 2 可知, 当变形温度一定时, $\ln \dot{\epsilon}$ 和 $\ln \sigma$ 成线性关系, 斜率为应力指数 n 。而当应变速率一定时, $\ln \sigma$ 和 $1/T$ 成线性关系, 斜率为 Q/nR , 从而可以推算出热变形激活能 Q 。由图 2、图 3 可见, 试验数据的分布与上述分析得出的线性规律吻合很好, 说明用式 1 分析该钢热变形过程是合理的。数据线性拟合得出该车轮钢热变形的应力指数 $n = 5.56$, 热变形激活能 $Q = 352.2725$ kJ/mol。

2.3 热变形参数对组织的影响

由图 4 可见, 应变速率为 1 s⁻¹, 应变为 0.7 时, 转变组织随变形温度的提高而变细小。结合上述热变形行为分析可知, 该应变速率下, 温度越高越有利于动态再结晶的发生, 动态再结晶产生的细小均匀的晶粒导致相变后转变组织也较细小。这是因为相变析出的针状或条状的组织(条状马氏体和针状贝氏体)的长短取决于变形奥氏体晶粒的大小。所以, 细小的晶粒回火后将获得细小的转变组织。由图 5 还可见, 在 1 250 °C 下变形到真应变 0.7 时, 转变组

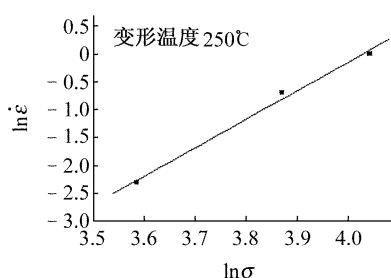


图 2 应变速率对流变应力的影响

Fig. 2 Influence of strain rate on flow stress

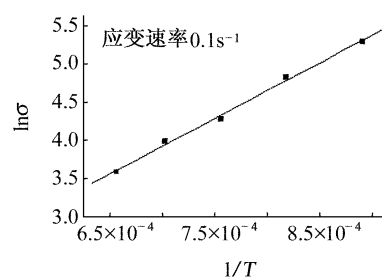


图 3 温度对流变应力的影响

Fig. 3 Influence of temperature on flow stress

织随应变速率的提高而变细小。原因是在发生动态再结晶的温度和变形程度下,应变速率越高动态再结晶产生的晶粒越小,从而转变组织也细小,这不仅

能够提高车轮钢的强度,而且有利于提高车轮钢的韧性、抗疲劳性能。所以,合理选择和控制热变形参数可以有效提高车轮钢的综合性能。

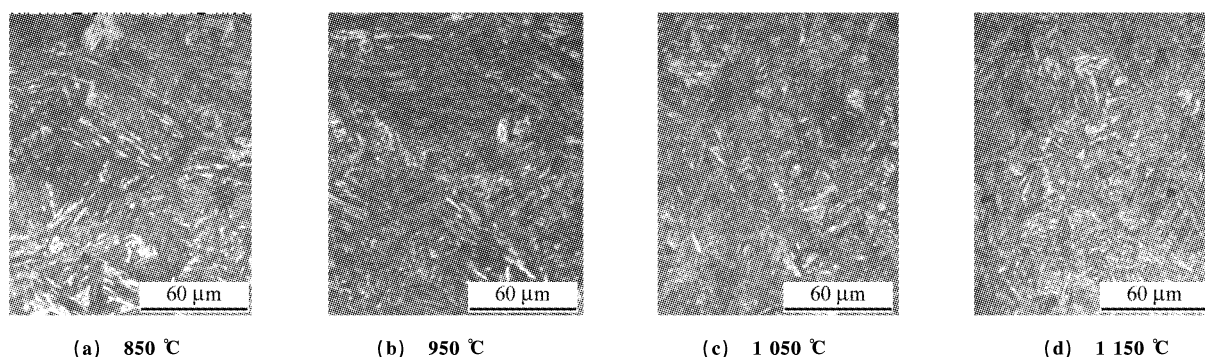

 图 4 应变速率 1 s^{-1} 、应变 0.7、不同温度下变形后的组织

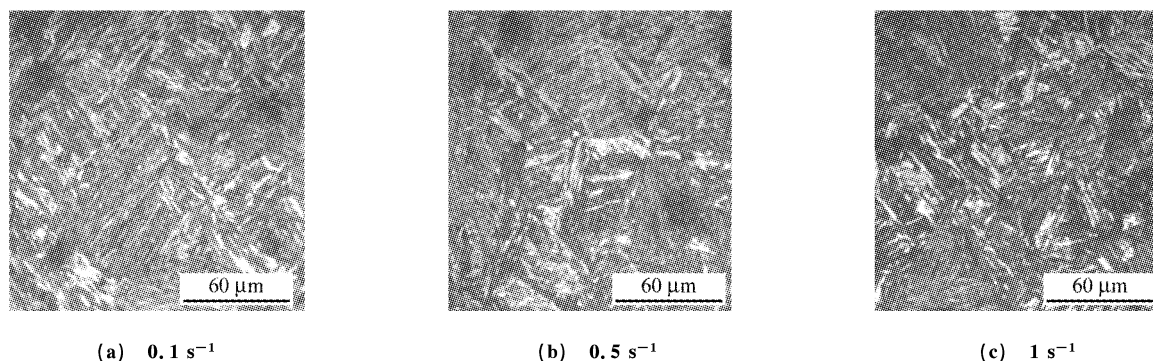
 Fig. 4 Transformed structure after hot compression of strain rate 1 s^{-1} and strain 0.7


图 5 温度 1 250 °C、应变 0.7、不同应变速率下变形后的组织

Fig. 5 Transformed structure after hot compression of temperature 1 250 °C and strain 0.7

3 热变形参数的优化

合理选择变形温度和应变速率不仅有利于细化晶粒,而且有利于改善变形材料的热加工性能。由能量耗散效率图和失稳图叠加而成的加工图,广泛应用于金属热变形参数的优化和微观组织的控制^[7,8]。能量耗散效率 η 表示不同温度和应变速率下变形能中由组织演变消耗的能量与理想线性耗散的能量的比率,具体表示为:

$$\eta = 2m/(m+1) \quad (3)$$

式中: m 为变形材料流变应力的应变速率敏感指数 $m = [\partial(\ln\sigma)/\partial(\ln\dot{\epsilon})]_{\epsilon,T}$, 能量耗散效率图中不同的值域代表与该区域参数条件下的组织演变机理,其中伴随应力软化的动态再结晶区域有利于改善变形材料的热加工性能,最佳的热变形参数应选择在具有较高耗散值的动态再结晶区域。根据连续失稳准则,当失稳参数 ζ 为负值时,即:

$$\zeta = \frac{\partial \ln(m/m+1)}{\partial \ln \dot{\epsilon}} + m < 0 \quad (4)$$

该区域则表示热加工性能较差的区域,选择热变形参数应避免该区域。

根据热加工图原理建立的热力模拟试验条件下的 20CrSiMnMo 在应变为 0.7 时的热加工图见图 6。可见,能量耗散效率值的分布出现两个区域,一个在 1 000~1 100 °C 附近,应变速率为 0.1~0.5 s⁻¹,耗散效率值达到最大 0.39;另一个在 1 250 °C 附近,应变速率为 1~0.25 s⁻¹,耗散值为 0.34。而失稳区则位于图中低温和高应变速率范围。对照图 4 和图 5 可见,该加工图反映出的组织演变规律和组织观察结果一致。高能量耗散效率值对应细小均匀的组织,而低能量耗散效率值处和失稳区对应着粗大的组织。所以,该加工图表明优化的变形温度和应变速率为 1 000~1 100 °C,0.1~0.5 s⁻¹;1 250 °C,1~0.25 s⁻¹。

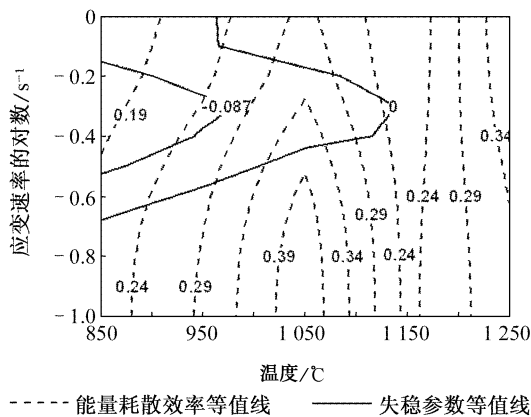


图 6 20CrSiMnMo 在应变为 0.7 时的热加工图

Fig. 6 Processing map of 20CrSiMnMo at strain of 0.7

4 结 论

(1) 20CrSiMnMo 钢在高温低应变速率下具有动态再结晶型流变曲线,而低温高应变速率下则呈动态回复型曲线。新型车轮钢热变形的应力指数 $n = 5.56$,热变形激活能为 $Q = 352.2725 \text{ kJ/mol}$ 。

(2) 温度和应变速率选在 1 000~1 100 °C,0.1~0.5 s⁻¹或 1 250 °C,1~0.25 s⁻¹范围内变形,将获得细小的动态再结晶晶粒和细小的转变组织,有利于提高车轮的强度、韧性和抗疲劳性能。

参考文献:

- [1] 季怀中,苏航,杨才福,等. 车轮钢摩擦热影响区的相变及其损伤机理[J]. 钢铁研究学报,2005,17(4):55—59.
- [2] Cassidy P. 具有发展前景的车轮材料[J]. 国外机车车辆工艺,2005,(2):22—23.
- [3] 崔银山,张建平,苏航,等. 高速列车车轮用钢研究和应用的进展[J]. 钢铁研究,2005,(3):53—57.
- [4] 水恒勇,张永权,杨才福. 高速列车车轮用材料的开发动向[J]. 钢铁研究学报,2003,15(3):66—69.
- [5] 郭玉玺,张弘. 基于贝氏体组织的抗热损伤辗钢车轮研究[A]. 第九届全国塑性工程学术年会论文集[C]. 太原:2005. 192—195.
- [6] 周纪华,管克智. 金属塑性变形阻力[M]. 北京:机械工业出版社,1989.
- [7] Venugopal S, Sivaprasad P V, Vasudevan M, et al. Validation of processing maps for 304L stainless steel using hot forging, rolling and extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology,1995,59:343—350.
- [8] Prasad Y V R K, Seshacharyulu T. Processing maps for hot working of titanium alloys[J]. Materials Science and Engineering,1998,A243:82—88.

(上接第 68 页)

- [2] 傅高升,陈文哲,陈鸿玲,等. 铝熔体高效净化的理论及净化处理技术的现状分析[J]. 铸造技术,2004,25(4):290—292.
- [3] FU Gaosheng, SHUN Fengshang, REN Liying, et al. Modification behavior of trace rare earth on impurity phases in commercial purity aluminum[J]. Journal of Rare Earths,2002,20(1):61—66.
- [4] 傅高升,陈文哲,钱匡武. 高效铝熔体综合处理技术及其效果[J]. 中国有色金属学报,2001,12(2):269—274.
- [5] 陈永禄. 经高效熔体处理的易拉罐用铝材微观组织与力学性能研究[D]. 福州:福州大学,2002.
- [6] Klepazko J R. A practical stress-strain-strain rate-temperature constitutive relation of the power form[J]. J Mech Work Technol,1987,15:143—165.
- [7] Lassaroui A, Jonas J J. Prediction of steel flow stress at high temperatures and strain rates[J]. Metallurgical Transactions A,1991,22A(7):1545—1558.
- [8] 王火生,傅高升,陈文哲,等. 经高效熔体处理的易拉罐用铝材的高温流变应力行为[J]. 福建工程学院学报,2005,3(1):57—60.
- [9] 王火生. 易拉罐用铝材高温变形的流变应力行为及微观组织特征[D]. 福州:福州大学,2004.
- [10] Zener C, Hollomon J H. Effect of strain rate upon plastic flow of steel[J]. J Appl Phys,1944,15(1):22—32.
- [11] Avrami M. Kinetic of phase change (I)-General theory[J]. Journal of Chemical Physics,1939,(7):1103—1112.