

改型 403 钢热加工工艺的优化

李荣斌¹, 王良龙², 廖郁国², 金曼²

(1. 上海电机学院 机械学院, 上海 200245; 2. 上海大学 材料科学与工程学院, 上海 200072)

摘要: 利用 Gleeble-3180 热模拟机对 403(改型)钢进行了热压缩实验, 绘出了其真应力—真应变曲线, 并研究了在不同变形温度和应变速率条件下材料的动态再结晶规律。推荐一种热加工优化工艺: 1050~1190℃ 区间内变形, 同时应变速率应控制在 $0.1s^{-1}$ 以下, 以确保高的能量耗散效率, 金属稳态流动, 尺寸均匀的再结晶晶粒以及高温压缩时少量的 δ 铁素体。

关键词: 403(改型)钢; 热压缩; 动态再结晶; 热加工工艺优化

中图分类号: TG316.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2013)07-0018-04

Optimization of Hot Working Technology for 403 (Modified) Steel

LI Rongbin¹, WANG Lianglong², LIAO Yuguo², JIN Man²

(1. School of Mechanical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 200245, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: The 403 (modified) steel was compressed on Gleeble-3180 stimulator, by which the true flow stress true strain curves were plotted. The dynamic recrystallization (DRX) behavior was investigated at different strain rates and temperatures. An optimized hot working technology was recommended, that is, deforming between 1050-1190 °C with a strain rate below $0.1s^{-1}$ can ensure a high power dissipation efficiency, a stable metal flow, uniform DRX grain size as well as a small amount of δ -ferrite during the hot deformation.

Key words: 403(modified) steel; hot deformation; dynamic recrystallization; optimized hot working technology

403(改型)马氏体不锈钢, 即在原 403 钢成分的基础上调整部分元素的范围, 成分类似于国内的 1Cr13 钢, 是目前核电大锻件的主要材料之一, 常用于堆内构件压紧弹簧的制造。堆内不锈钢构件是影响反应堆寿命的心脏部件, 要求材料必须具有极高的均匀性和纯净度、优良的高温性能和耐蚀性能以及强烈的抗中子辐照脆化敏感性。鉴于堆内不锈钢工作环境特殊, 因而生产技术要求十分苛刻, 而热锻成形是生产中的关键环节。近年来, 基于动态材料模型(DMM)的热加工图技术被广泛应用于优化材料的热加工性能。利用热加工图不仅可以获得优化的热加工工艺参数, 还可避免热加工中的失稳流变产生, 进而获得所需要的组织和性能, 并使得热加工重复性好, 实现组织与性能的控制。国外对热加工图的研究可参考文献[1]。然而, 国内外关于利用

热加工图来探寻 403 马氏体不锈钢最优热加工工艺的报道较少。因此, 本文选用企业自制的 403(改型)钢, 利用 Gleeble-3180 试验机进行热压缩实验来模拟材料在锻造过程中的组织和性能变化规律, 并制作出相应的热加工图, 再结合 403 钢本身的一些特有属性, 最后得出该钢优化的热加工工艺, 以期对压紧弹簧实际锻造工艺的制订提供理论参考。

1 试验材料及方法

试验材料选用企业自制的改型 403 马氏体不锈钢, 材料为退火态, 将其加工成 $\phi 8mm \times 12mm$ 的标准试样。利用 Gleeble3180 热模拟试验机进行单向压缩试验, 热变形工艺参数制定如下: 变形温度为 900、1000、1100、1200℃; 真应变为 0.69; 应变速率分别为 0.017 、 0.17 、 $1.7s^{-1}$ 。试样以 $5^\circ C/s$ 的速度加热到 1200℃ 完全奥氏体化区域, 保温 5min, 使碳化物充分溶解后, 以 $5^\circ C/s$ 的速度冷却到不同的变形温度, 然后分别在各个应变速率和变形温度下进行压缩变形。变形后将试样放入水中快速冷却。制样时采用苦味酸、盐酸和酒精的混合溶液进行腐蚀, 并在光学显微镜下观看金相组织。

收稿日期: 2012-08-12

基金项目: 上海市优秀技术带头人计划项目(12XD1420700); 上海闵行科技项目 (2011MH09); 上海市教委重点学科项目 (J51902)

作者简介: 李荣斌(1969-), 男, 江苏人, 教授, 主要从事结构材料与性能研究; 电话: 021-64306661-3018; Email: lirb@sdju.edu.cn

2 试验结果和讨论

2.1 403 钢的应力应变曲线

从图 1(a)可以看出,随着变形温度的升高,在压缩过程中变形抗力随之降低;随着应变的增加,材料受到的应力在开始阶段迅速增加,增速逐渐变缓直至变形结束。在这几组变形条件下材料内部主要发生了动态回复的过程。由图 1 (b) 中可以看出,在 1100℃ 和 1200℃ 压缩时应力应变曲线上出现了峰值,这是发生动态再结晶现象的一个重要表征,而且

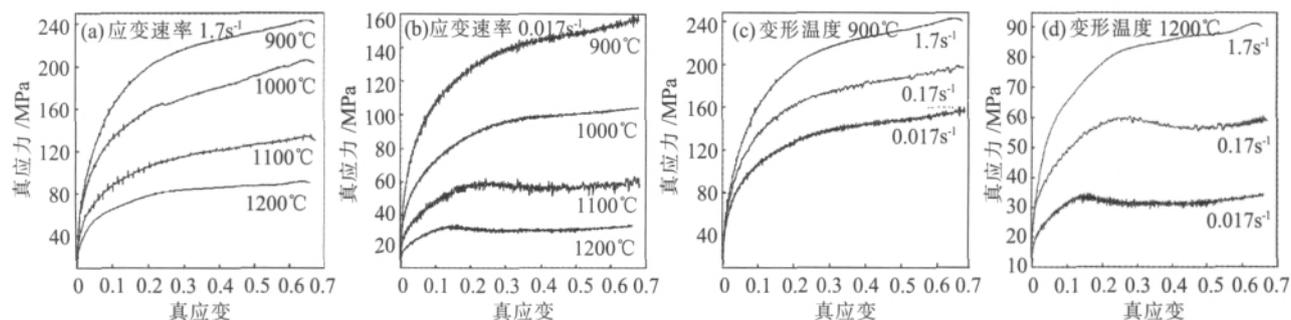


图 1 403 钢不同变形条件下的应力—应变曲线

Fig.1 The stress-strain curves of 403 steel at different deforming condition

2.2 热加工工艺优化

判断一种热加工工艺的优劣可从多种角度看,比如锻造过程中形成的再结晶晶粒大小状况、锻造组织的均匀性、是否存在锻造裂纹、缺陷等。只有综合考虑了多种情况,才能得到较为优化的锻造工艺。

(1) 从能量耗散效率最大的角度。在动态材料模型中,热加工材料体系被视为一个非线性的能量耗散单元,单位时间输入单位体积体系的能量 P 主要由两部分贡献:一部分是使工件的温度升高项(G);另一部分是使微观组织发生改变协同项 (J),如相变、回复、再结晶等^[2]。 G 与 J 是两个协同函数,具有一定的比例关系^[3]:

$$\frac{J}{G} = \frac{\partial(\lg\sigma)}{\partial(\lg\dot{\epsilon})} = m$$

m 即是应变速率敏感因子。当材料单元被视为一种理想的线性能量耗散体时,应变速率敏感因子 $m=1$,材料可以当成粘滞性流体,此时 J 具有最大值 J_{\max} 。定义 J/J_{\max} 为能量耗散效率因子 η ,按照动态材料模型 $\eta=2m/(m+1)$,它反映了一定温度和应变速率下材料微观结构的变化机制。 η 随变形温度和应变速率的变化即是能量耗散效率图,通常高值区域对应着最优的加工性能区^[3]。绘制能量耗散图时,这里采用形式最简单的幂指数本构方程 $\sigma_p = K\dot{\epsilon}^m$,然后结

随着变形温度的升高,曲线的峰值应变逐渐向左移动。从图 1(c)可以看出,随着应变的逐渐增加以及形变速率的变大,应力逐渐升高,材料内部主要发生了动态回复过程。而在图 1(d)中,可以明显看到曲线上的峰值以及随后应力随着应变的增加而保持不变的现象,这归因于材料内部由应变增加引起的硬化与动态再结晶造成的软化达到了动态平衡的效果。另外还可以看出,随着应变速率的降低,曲线的峰值应变逐渐向左移动,即更容易发生动态再结晶。

合不同温度和应变速率条件下所测的应力应变曲线,即可得到不同条件下的能量耗散效率因子 η ,如图 2 所示。

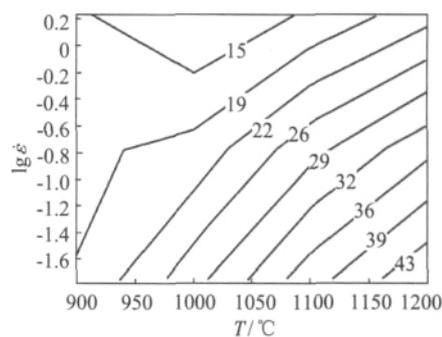


图 2 应变为 0.69 时 403 钢的能耗效率图谱
Fig.2 Power dissipation map for 403 steel at strain of 0.69

图 2 是不同变形条件下 403 钢(改型)耗散能量图谱。可以看出,随着温度的升高和应变速率的降低, η 值逐渐增加,即该钢的动态能量耗散能力增强,输入系统的能量主要耗散于冶金变化,如动态回复和动态再结晶等组织演变的过程^[4]。这一点可以从该钢典型的热变形组织(图 3)得到验证。图 3(a)对应于耗散效率图的左上角,变形温度低,应变速率大,从而能量的耗散效率低,材料内部只出现了少量的再结晶晶粒,而大部分能量消耗于材料的塑性变形,最终转化为热能。图 3(b)对应于耗散效率图的中

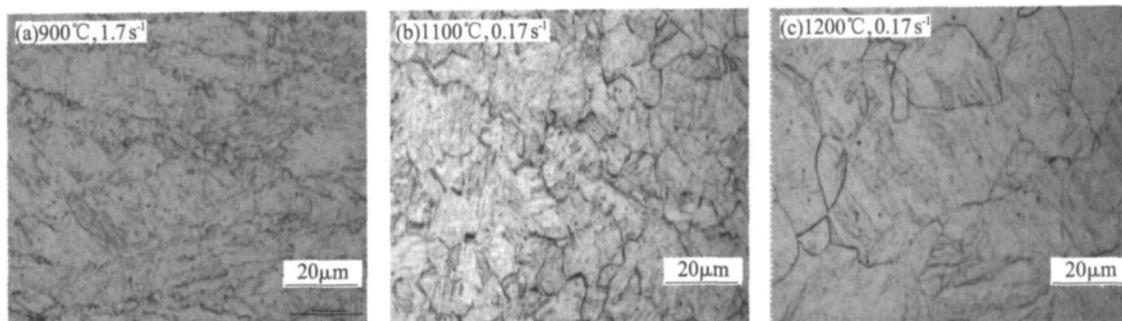


图3 403钢在不同的变形条件下的典型组织
Fig.3 The typical microstructure of 403 steel at different deforming conditions

间部位,变形温度稍高,应变速率稍慢,能量的耗散效率较高。根据金相组织的观察,材料内部发生了明显的动态再结晶过程,晶粒呈等轴分布,这是一种期望获得的金相组织。而在图3(c)中,随着变形温度的进一步升高,能量的耗散效率也进一步提升,再结晶晶粒已经充分长大。

(2)从金属高温变形时稳态流动的角度。Ziegler^[5]通过动态材料模型考虑了给定材料变形时的稳定情况,并提出如果下面不等式能够成立,那么金属稳态的流动即可实现。

$$\xi(\dot{\epsilon}) = +m > 0$$

$\xi(\dot{\epsilon})$ 随变形温度和应变速率的变化而变化。 $\xi(\dot{\epsilon})$ 为负值的区域为失稳区, $\xi(\dot{\epsilon})$ 为正值的区域为稳定区。失稳流动通常表现为产生绝热剪切带或变形局域化。在制定工艺参数时应尽量避开失稳区。结合上面讨论能量耗散效率时所获得 m 值,即可求得 $\xi(\dot{\epsilon})$ 的范围,将其绘成不同变形条件下金属流动的稳定性图谱,如图4所示。可以看出,随着应变速率的减小和变形温度的增加, $\xi(\dot{\epsilon})$ 值逐渐从负值的区域过渡到正值的区域,即金属在流动时逐渐由非稳态流动转化为稳态流动。非稳态流动的一个特征是金属发生局部区域的变形,见图5箭头所示。材料发生局部的

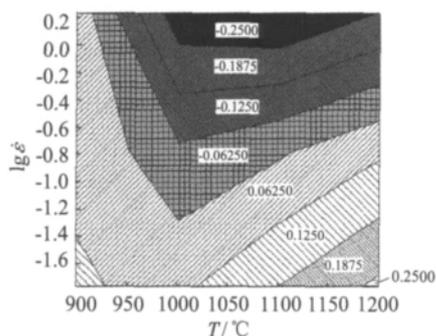


图4 不同变形条件下金属流动的稳定性图
Fig.4 The stability map of metal flow at different deforming conditions

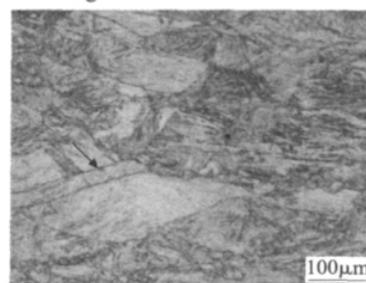


图5 在 1000°C、1.7 s⁻¹ 变形条件下试样的微观组织
Fig.5 The microstructure of specimen deformed at 1000°C, 1.7 s⁻¹

变形由于该处发生了软化效应。这是因为在高应变速率以及较低温度条件下所产生的热量在此处聚集而无法扩散,导致材料此处温度过高,从而引起了软化,造成了材料的局部流动^[6]。因此,为使 $\xi(\dot{\epsilon})$ 为正值,确保 403 钢(改型)在热压缩时发生稳态的金属流动,材料应在高于 1050°C,应变速率低于 0.1 s⁻¹ 条件下进行变形。

(3)从热压缩过程中再结晶晶粒尺寸的角度。根据霍尔-派奇公式,晶粒越细强化效果越明显,而且细小均匀分布的晶粒将为后续热处理工作提供良好的组织。因此,所形成的再结晶晶粒的尺寸也是衡量热加工工艺好坏的一个标准。图6为不同变形条件下所获得的再结晶晶粒尺寸。可以看出,随着变形

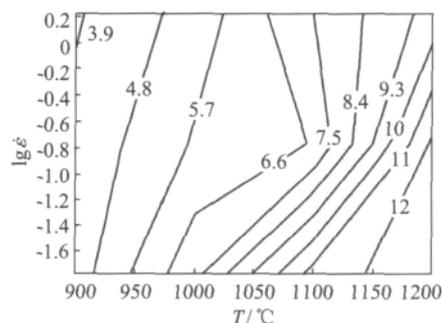


图6 不同变形条件下再结晶晶粒大小
Fig.6 DRX grain size at different deforming conditions

温度的升高和应变速率的降低,再结晶晶粒的尺寸

逐渐变大。另外,在 1050~1200℃ 这段温度区间内,即使变形的速率有所不同,晶粒的尺寸也相差不大,即尺寸相近的等轴晶粒呈现出较为均匀的分布。不同于本次实验过程中用到的小规格试样,在实际生产过程中进行热变形的坯料尺寸一般都较大,特别是本文中提到的大型压紧弹簧件。对于由 403 钢制成的大型锻件来说,在热变形的过程中,工件的表面和心部存在较大的温差,而且其各个部位存在变形不均匀、变形速率不一致的情况。因此,如果能在 1050~1200℃ 进行热变形,那么晶粒的大小将会呈现出一种分布较为均匀的现象,从而为后续的热处理工作做好组织准备。

(4) 从高温变形时形成 δ 铁素体数量的角度。403 钢是马氏体不锈钢的一种,其成分类似于国产 1Cr13 钢,在常规调质工艺条件下总存在一定数量的 δ 铁素体。这是一种脆性相,其数量和分布会对材料的冲击韧性造成很大的影响^[7]。因此,生产上总是尝试降低 δ 铁素体在基体中的数量。在热压缩过程中,试样会在高温下变形或者高温、变形速率较慢极易导致 δ 铁素体的形成。图 7 为试样在 1200℃、0.017s⁻¹ 变形条件下所获得的微观组织。有些刚形成的白色 δ 铁素体小颗粒分布于马氏体晶界上,部分小颗粒连在一起形成链状,另外也有一些基体中原本存在的 δ 铁素体长大成多边形的形状,这些组织不规则的分布势必对材料的最终性能产生不良的影响,而且其在高温下能够稳定存在,很难通过普通的热处理去除^[7]。因此,在高温变形的阶段就应该严格控制这种相的数量。通过 JmatPro 相图软件的模拟, δ 铁素体开始形成的温度为 1192℃。所以,在热变形

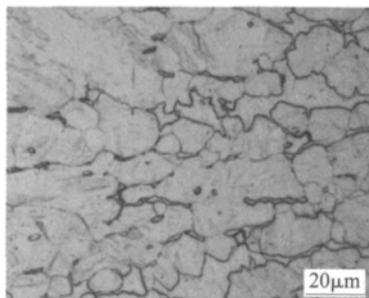


图 7 在 1200℃、0.017s⁻¹ 变形条件下试样的微观组织
Fig.7 The microstructure of specimen deformed at 1200℃,0.017s⁻¹

时应尽量使变形温度控制在这个 1192℃ 以下,甚至更低。

综合考虑以上各种因素,为使 403 钢(改型)试样在热压缩的过程中具有较高的能量耗散效率,能够发生金属稳态流动,同时应尽量获得尺寸均匀的再结晶晶粒以及减少高温压缩时 δ 铁素体的产生,推荐一种热加工优化工艺:1050~1190℃ 温度区间内变形,同时应变速率应控制在 0.1s⁻¹ 以下。

3 结论

(1) 在 Gleeble-3180 热模拟机上进行了热压缩试验,获得了 403(改型)钢的真应力—真应变曲线。变形温度越低,应变速率越高,变形抗力越大,越不容易发生动态再结晶。

(2) 随着变形温度的升高,应变速率的降低,403(改型)钢的能量耗散效率越大,金属的高温流动性越好,再结晶晶粒的尺寸越大且趋于均匀,同时越容易产生 δ 铁素体。

(3) 综合各种因素,推荐一种热加工优化工艺:1050~1190℃ 温度区间内变形,同时应变速率应控制在 0.1s⁻¹ 以下。

参考文献:

- [1] Prasad Y V R K, Geggel H L. Modeling of dynamic material behavior in hot deformation: forging of Ti-242 [J]. Met Trans, 1984, A15: 1883-1892.
- [2] Prasad Y V R K. Dynamic materials model: basis and principles [J]. Metallurgical Transactions, 1996, 27: 235-247.
- [3] Prasad Y V R K, Sasidhara S. Hot working guide: A compendium of processing map [M]. ASM International, Materials Park, OH, 1997.
- [4] 曾卫东,周义刚,周军,等. 加工图理论研究进展 [J]. 稀有金属材料与工程, 2006, 35(5): 673-677.
- [5] Ziegler H, Sneedon I N, Hill R. Progress in solid mechanics [M]. John Wiley and Sons, New York, 1963, (4): 63-193.
- [6] Morakabati M, Aboutalebi M, Kheirandish S. High temperature deformation and processing map of a NiTi intermetallic alloy [J]. Intermetallics, 2011, (19): 1399-1404.
- [7] 陈德和. 1Cr13 不锈钢中铁素体量对冲击韧性的影响及改进处理 [J]. 上海机械, 1962, (7): 27-30. 