

# 铸态 42CrMo 钢静态再结晶组织演变规律的研究

付甲<sup>1</sup>, 杜水明<sup>2</sup>, 李永堂<sup>3</sup>, 齐会萍<sup>4</sup>

(1 太原科技大学材料学院, 山西 太原030024 2 常州长江热处理厂, 江苏 常州213002; )

**摘要:**采用 Gleeble-1500D 热模拟机对铸态 42CrMo 钢进行双道次压缩试验, 研究在变形速率为  $0.1s^{-1}$  时, 不同变形温度和变形程度对静态再结晶的影响规律, 研究发现变形程度对于静态再结晶影响最为明显。运用金相法测量变形后的晶粒尺寸, 发现上述实验下在温度  $950^{\circ}C$ 、总应变 0.30、保温 30s 时所得晶粒尺寸最为细小。这为铸态 42CrMo 钢热塑性变形质量预报提供了相应的科学依据。

**关键词:** 铸态 42CrMo 钢; 双道次热变形; 静态再结晶; 晶粒度

## Research on static recrystallization microstructure evolution of as-cast 42CrMo steel

Fu Jia<sup>1</sup> Du Shui ming<sup>2</sup> Li Yongtang<sup>3</sup> Qi Huiping<sup>4</sup>

(1 TaiYuan university of science and technology Taiyuan Shanxi 030024; 2 ChangJiang company of heat treatment in Changzhou Changzhou Jiangsu 213002;)

**Abstract:** The influencing rule of various deformation degree and temperature under the strain rate  $0.1s^{-1}$  on static recrystallization of as-cast 42CrMo steel during two-passes hot compression deformation was investigated based on the analysis of Gleeble-1500 thermo-mechanical simulation experiment. It is indicated that deformation degree is the most obvious factor to static recrystallization. Besides, the grain sizes after deformation were also measured by metallographic method. The results show that the grain sizes decreased dramatically on the conditions of  $950^{\circ}C$ , holding time 30s and 0.30 total deformation degree, which has provides the quality forecast of as-cast 42CrMo steel during hot thermoplastic deformation with corresponding scientific basis.

**Key words:** as-cast 42CrMo steel; Two-pass hot deformation; Static recrystallization; Crystallite size

## 0 引言

由于我国轴承工业的快速发展, 对轴承环件的要求也越来越高。42CrMo 钢作为轴承环件材料, 其成形工艺和组织对于动片性能寿命至关重要。由于环件热辗扩过程中的微观组织变化是非常复杂的, 金属的再结晶组织又会直接影响到加工件的质量和性能, 所以对于如何控制变形热力学参数、加热制度及冷却速度以获得细化的再结晶组织, 成为大型件质量控制的关键<sup>[1]</sup>。但静态再结晶和亚动态再结晶规律有着很大的不同, 前者受变形程度影响最大, 温度影响次之, 变形速率影响最弱, 而后者受变形速率影响最大, 温度影响较小且几乎不受道次变形程度的影响<sup>[2-4]</sup>。铸目前对于铸态钢种的热变形行为的研究报道甚少, 本文利用双道次压缩的方法, 研究实验钢变形间隔时间内奥氏体的软化行为, 构建静态再结晶的动力学模型, 为制定合理的锻造工艺细晶粒化提供理论基础。

## 1. 实验材料和变形工艺

### 1.1 实验材料

实验材料为 42CrMo 钢, 其成分如下表 1 所示:

表 1 铸态 42CrMo 钢的化学成分(%)

Table 1 Chemical composition of as-cast 42CrMoV steel

元素/钢种	C(%)	Si(%)	Mn(%)	P(%)	Cr(%)	Mo(%)	S(%)
铸态 42CrMo 钢	0.46	0.28	0.72	0.012	1.13	0.22	0.007

### 1.2 实验方法

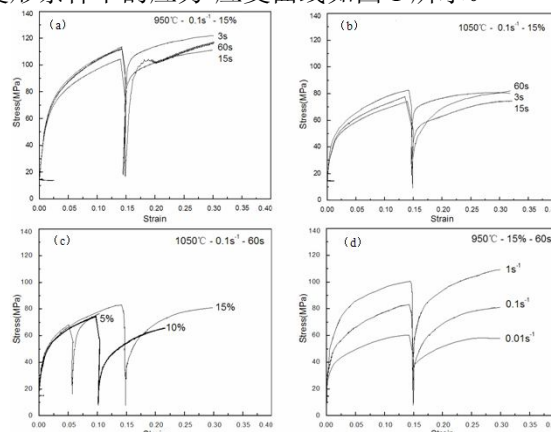
实验在 Gleeble-1500 热模拟机上进行, 试样规格为 Rastegaev 型  $\Phi 8mm \times 12mm$  的圆柱试样, 柱体两端开有 0.2mm 深的凹槽内填充润滑剂(其质量分数: 75% 石墨+ 20% 机油+ 5% 硝酸三甲苯酯), 以减少摩擦对应力状态的影响。双道次热压缩具体工艺为: 将试样以  $10^{\circ}C/s$  的速度加热到  $1200^{\circ}C$ , 保温

5min 后以  $10^{\circ}C/s$  的速度冷却到相应变形温度  $T_{def}$  ( $850^{\circ}C$ 、 $950^{\circ}C$  和  $1050^{\circ}C$ ), 保温 60s 以消除试样内部温度梯度, 然后进行双道次压缩, 并通过实验得到不同变形条件下的载荷行程数据及真应力-真应变曲线。由相关文献<sup>[5]</sup>可知, 试验范围内的应变都小于动态再结晶临界应变, 故铸态 42CrMo 钢热压缩变形在道次间只发生静态回复和静态再结晶。热变形后立即水冷至室温从而得到相应高温态组织, 试样沿轴向切开, 采用定量金相法测量试样中发生亚动态再结晶的体积分数。最后对圆柱试样进行轴向切除, 采用苦味酸浸蚀后, 取不同位置观察其金相组织。

## 2 实验结果及分析

### 2.1 真应力-真应变曲线及变形机制

运用 Gleeble-1500 热模拟试验机得到试样在不同变形条件下的应力-应变曲线如图 1 所示。



收稿日期: 修订日期:

作者简介: 付甲, 男, 1985 年出生, 陕西宝鸡人, 硕士研究生。联系电话: 15203431959 Email: 0917fujia@163.com

基金项目: 国家自然科学基金(51075000) 山西省科技支撑项目(20110331002)

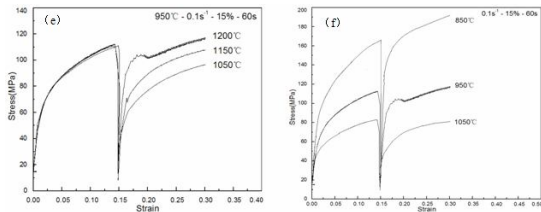


图1 双道次压缩实验不同变形条件应力-应变曲线

Fig.1 The stress- strain curves of two-pass experiment

由图1分析可知，道次停留越长，形变奥氏体残余应变能释放越多，变形抗力降低，再结晶体积分数增大；变形量越大，缺陷越多，位错密度越大，储存能越大，再结晶驱动力增大，再结晶速度加快。温度越高，原子扩散越快，晶界迁移速率增大，位错运动阻力减小，加工硬化程度减弱，再结晶不断产生；静态再结晶主要在未发生动态再结晶的显微组织上生成，再结晶形核与长大经历的时间长，其再结晶速度受应变和温度影响较大而受应变速率影响较小<sup>[6]</sup>。低温时再结晶孕育期延长，在一定时间范围内只发生静态回复，随着时间增加再结晶也会明显增加，而高温下的静态再结晶孕育期很短，再结晶能很快的进行。这表明保温时间较短时温度对静态再结晶百分数影响很大，而保温时间足够长时，只要在再结晶温度 $T_m$ 以上，即使较低的温度也可发生完全静态再结晶，这时温度对静态再结晶影响已不明显。

## 2.2 工艺参数对铸态 42CrMo 钢静态再结晶的影响

静态再结晶包括形核和长大，道次间隔时间延长可使形核数目不断增多与再结晶晶粒较快生长，故静态再结晶的体积分数也逐渐增加。除此之外，变形温度、应变速率、变形量与初始奥氏体晶粒尺寸也是影响静态再结晶的体积分数的主要因素。

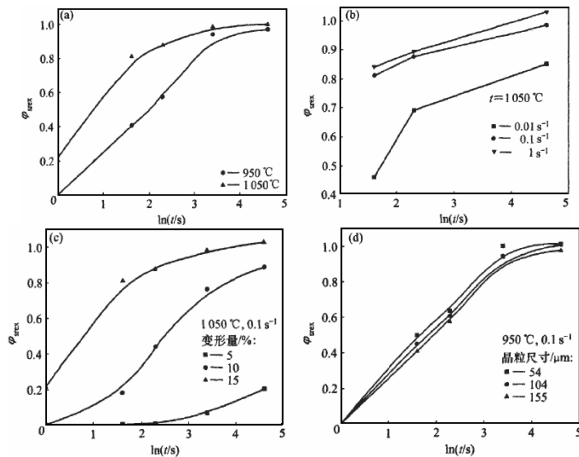


图2 工艺参数对42CrMo钢静态再结晶体积分数的影响

Fig.2 Effects of processing parameters on static recrystallization volume fractions of ZG42CrMo steel

图2为工艺参数对铸态42CrMo钢静态再结晶体积分数的影响规律图。图2(a)、2(b)、2(c)和2(d)分别表示出了变形温度、应变速率、变形量和初始奥氏体晶粒尺寸对静态再结晶体积分数的影响。由图3.15可知，工艺参数对铸态42CrMo钢静态再结晶体积分数的影响规律如下：

1) 变形温度越高，静态再结晶速率越快。温度越高，形变储存能越大，驱动力增大，静态再结晶的速率越快。如图2(a)可知，在 $0.1s^{-1}$ 、各道次变形量为15%、道次间隔3s时，变形温度为850、950和1050°C时对应的静态再结晶体积分数分别为4.6%、40.9%和80.8%。在850°C、 $0.1s^{-1}$ 、各道次变形量为15%时，静态再结晶体积分数在道次间隔为3s、15s和60s时间段内先快速增加之后在约为40%值附近趋于稳定。这可能是由温度较低时出现阻碍再结晶继续的析出现象从而导致不完全静态再结晶造成的<sup>[7]</sup>。

2) 应变速率增大，静态再结晶速率也增大。如图2(b)可知，在1050°C，道次间隔5s，各道次变形量为15%时，应变速率分别为 $0.01s^{-1}$ 和 $1s^{-1}$ 时发生静态再结晶的体积分数依次为45%和83.7%。这是由于热变形时位错持续快速增殖，应变速率增大使得变形储存能增大，动态回复缓慢而再结晶起主导作用，而回复时的位错消失速率减慢与热压缩时的位错密度增大共同作用使驱动力增大，从而静态再结晶速率不断加快。

3) 变形量的增加，静态再结晶速率增加。如图2(c)可知，在1050°C、 $0.1s^{-1}$ ，道次间隔3s时，变形量为5%、10%和15%时对应的静态再结晶体积分数分别约为0%、17.6%和80.8%。这是因为应变量在临界应变以下时加工硬化起主导作用，热变形位错密度随变形量的增加而急剧增大，使驱动力增大从而静态再结晶不断形成。

## 2.3 静态再结晶组织演变

图3为铸态42CrMo钢在双道次压缩试验各道次变形量为15%时不同变形条件下的静态再结晶组织。

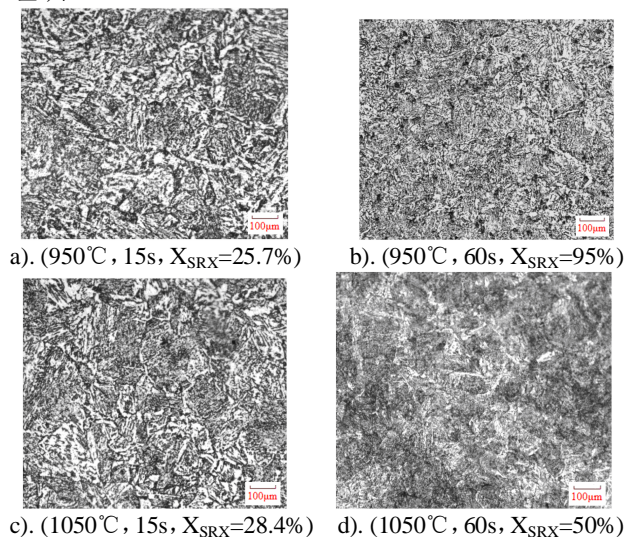


图3 钢静态再结晶组织

Fig.3 Static recrystallization microstructure

由图3可知，在相同的道次变形量、变形温度和变形速率下，道次停留时间越长，静态再结晶百分数越大，如图3 a)和图3 b)。温度950°C、 $0.1s^{-1}$ 、道次停留60s时发生同样静态再结晶百分数在1050°C时只需要15s，如图3 c)、图3 d)所示，可见温度



对静态再结晶影响之大。

图 4 为变形温度、应变速率和变形量对铸态 42CrMo 钢静态再结晶晶粒尺寸的影响规律图。

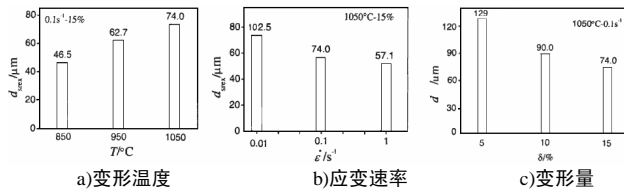


图 4 不同参数对铸态 42CrMo 钢完全静态再结晶晶粒尺寸影响

Fig.4 Effects of processing parameters on fully static recrystallization grain sizes of ZG42CrMo steel

由图4可知，工艺参数对铸态42CrMo钢静态再结晶晶粒尺寸的影响规律如下：

1) 在相同的道次变形量和变形速率下，变形温度升高，晶粒尺寸不断增大。温度升高，位错密度越小，再结晶形核率减少，热激活能增大使晶粒长大速度加快，后来形成的再结晶形核来不及长大就会被先前长大的初始大晶粒所吞并，晶粒数减少，从而发生再结晶后晶粒变粗。如图 4a) 可知，在应变速率  $0.1\text{s}^{-1}$ 、各道次变形量为 15% 时，850°C 和 1050°C 发生再结晶后的晶粒尺寸分别为  $46.5\mu\text{m}$  和  $74\mu\text{m}$ 。

2) 在相同的道次变形量和变形温度下，应变速率越大，再结晶晶粒越细小。应变速率越高，变形后位错密度越大，形核率也越高，再结晶驱动力越大，故再结晶晶粒数越多且平均晶粒尺寸越小。如图 4b) 可知，在 1050°C、变形量为 15% 时，应变速率为  $0.01\text{s}^{-1}$ 、 $0.1\text{s}^{-1}$  与  $1\text{s}^{-1}$  时对应静态再结晶平均晶粒尺寸分别为  $89.4\mu\text{m}$ 、 $74\mu\text{m}$  与  $57.1\mu\text{m}$ 。

3) 在相同的变形温度和变形速率下，变形量越大，再结晶晶粒越细小。变形量越大，变形后位错密度越大，形核率越高，故再结晶晶粒越多且平均晶粒尺寸也越小。如图 4c) 可知，在 1050°C、 $0.1\text{s}^{-1}$  时，变形量为 5%、10% 与 15% 时对应的静态再结晶平均晶粒尺寸分别为  $129\mu\text{m}$ 、 $90\mu\text{m}$  与  $74\mu\text{m}$ 。

## 结论

1) 变形温度对于静态再结晶影响最为明显。当变形量和保温时间一定时，随着温度的提高静态再结晶需要的孕育期越短，完成再结晶的时间越短。随着变形温度的提高，静态再结晶的形核加速，原子的扩散速度增加，晶粒的晶界扩展的比较迅速即静态再结晶的速度加快。

2) 当温度和保温时间一定时，随着变形量越大，静态再结晶驱动力越大，静态再结晶越迅速。

3) 当温度和变形量一定时，随着道次间保温时间的延长，晶粒形核的数量也明显增加，晶粒尺寸变大。

4) 在上述实验范围内，铸态 42CrMo 钢的静态再结晶体积分数随变形温度升高、应变速率增大和变形程度增加均逐渐增大。当变形程度一定时，变形温度越低，应变速率越高，晶粒越细。

## 参考文献：

- [1] 陈慧琴, 刘建生, 郭会光. 大型锻件锻造过程晶粒度的模拟预测[A]. 中国机械工程学会年会暨甘肃省学术年会论文集[C], 2008.
- [2] Bald Q, Yue S, Maceagno T. Static Recrystallization of Nb and Nb-B Steels under Continuous Cooling Conditions[J]. ISIJ International, 1996, 36(8):1084-1093.
- [3] P.D. Hodgson, J.J. Jonas, S. Yue. Processing Microstructure and Properties of Micro alloy and Other Modern HSLA Steels. TMS-AIME, 1992:41-48
- [4] Laasraouia, Jonas J. Prediction of Temperature Distribution, Flow Stress and Microstructure during the Multi-pass Hot Rolling of Steel Plate and Strip. ISIJ International, 1991, 31(1):95-105
- [5] 蔺永诚, 陈明松, 钟掘. 42CrMo 钢形变奥氏体静态再结晶[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2009, 40(2):411-416.
- [6] Elwazri A M, Wanjara P, Yue S. Metadynamic and static recrystallization of hypereutectoid steel [J]. ISIJ International, 2003, 43(7):1080 - 1088.
- [7] Humphreys F J, Hatherly M. Recrystallization and related annealing phenomena[J]. Oxford: Elsevier Science Ltd, 1999.