

## AZ91 镁合金的热压缩行为(III) ——基于元胞自动机模拟的再结晶动力学

刘六法<sup>1</sup>, 丁汉林<sup>1</sup>, 鎌土重晴<sup>2</sup>, 丁文江<sup>1</sup>, 小島陽<sup>2</sup>

- (1. 上海交通大学 轻合金精密成型国家工程研究中心, 上海 200030;  
2. 長岡技術科学大学 機械系, 新潟 940-2188, 日本)

**摘要:** 根据元胞自动机的模拟结果研究了 AZ91 合金热压缩过程中的再结晶动力学。结果表明, 随着应变量增加, 再结晶分数增加; 随着变形温度升高, 再结晶速率加快。稳态组织的平均晶粒尺寸与 Zener-Hollomon 参数成反比, 指数为-0.05。压缩过程中, 所有晶粒的平均尺寸迅速下降后缓慢减小至稳态值, 原始晶粒平均尺寸呈线性减小为 0, 再结晶晶粒平均尺寸先增加至某一峰值后缓慢下降至稳态值。基体内同时存在的多次再结晶现象使得流变曲线呈单峰特征。

**关键词:** AZ91 合金; 元胞自动机; 动态再结晶; 动力学

中图分类号: TG 146.2

文献标识码: A

## Hot compression behavior of AZ91 alloy(III) ——Recrystallization kinetics based on cellular automata simulation

LIU Liu-fa<sup>1</sup>, DING Han-lin<sup>1</sup>, KAMADO S<sup>2</sup>, DING Wen-jiang<sup>1</sup>, KOJIMA Y<sup>2</sup>

- (1. National Engineering Research Center of Light Alloy Net Forming,  
Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030, China;  
2. Department of Mechanical Engineering, Nagaoka University of Technology, Niigata 940-2188, Japan)

**Abstract:** The kinetics of dynamic recrystallization (DRX) during the hot compression process of AZ91 magnesium alloy was investigated based on the cellular automata simulation. The simulation results indicate that the fraction of DRX increases with strain increase and the velocity of DRX increases with process temperature increase. The relationship between the average grain size in the final microstructure and Zener-Hollomon parameter follows an inverse power law with the exponent of -0.05. During a compression process, the average size of total grains decreases rapidly in an initial stage, and then slowly to a steady value; the average size of initial grains decreases linearly to zero; the average size of recrystallized grains increases to a peak value and then decreases slowly to a steady value. Multi-cycle recrystallization occurs concurrently in the matrix, resulting in a single peak on each flow curve.

**Key words:** AZ91 alloy; cellular automata; dynamic recrystallization; kinetics

动态再结晶动力学对研究塑性变形过程、组织演变及稳态组织的晶粒尺寸控制等方面有十分重要的意义。然而, 由于实验中很难对变形过程进行即时观察、难于严格区分再结晶晶粒和非再结晶晶粒、难于记录

和判断再结晶晶粒形核的起始时刻等因素的限制, 长期以来, 多数的再结晶动力学研究仅局限于 Johnson-Mehl-Avrami-Kolmogorov 方程、Avrami 指数、流变曲线的单/多峰现象及初始晶粒尺寸对流变曲线<sup>[1-7]</sup>的影

响等方面。

本研究先后通过实验和计算机模拟的方法研究了 AZ91 镁合金热压缩变形过程的流变行为和动态再结晶。本文作者将利用元胞自动机模拟的结果, 通过提取研究再结晶动力学所需要的精确数据, 深入研究了 AZ91 合金热压缩过程中的再结晶动力学。

## 1 元胞自动机模型

本研究中所构建的元胞自动机模型中, 不同晶粒(包括所有原始晶粒和再结晶晶粒)被赋予不同且唯一的取向号, 其在变形及组织转变过程中不发生任何变化, 除非该晶粒被其它晶粒吞噬而消失。变形过程中不同再结晶晶粒的形核位置及形核前该位置处的晶粒取向均由计算机进行保存。模拟完成后, 根据这些记录的数据能够简单地区分出再结晶区和非再结晶区、初次再结晶和再次再结晶等, 便于分析和研究变形过程中的再结晶动力学。

## 2 结果与讨论

### 2.1 再结晶分数

从 EBSD 实验和 CA 模拟的 AZ91 合金压缩组织演变中均可看出, 初始晶粒逐渐被再结晶晶粒所取代, 再结晶分数随着应变量的增加而不断增加。图 1 示出了应变速率为  $1.0 \text{ s}^{-1}$  时, AZ91 合金在不同变形温度下的再结晶动力学曲线。可以看出, 温度较高时, 动态再结晶的速率较快。随着应变量的增加, 变形初期

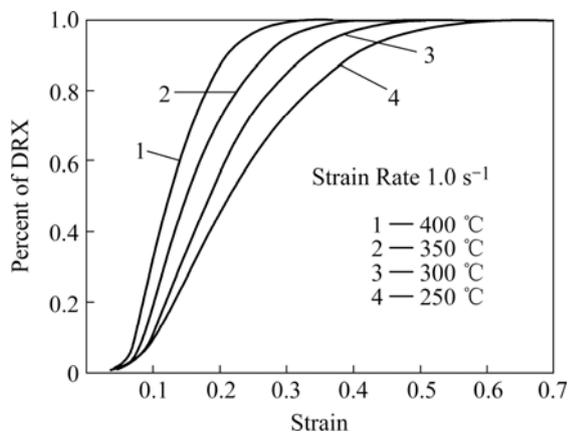


图 1 AZ91 合金压缩过程中的再结晶动力学曲线

Fig.1 Typical kinetics curves of AZ91 alloy during hot compression process obtained from simulation

的再结晶分数迅速增加, 其增加速率随变形温度升高而提高。当合金压缩至一定变形量时, 再结晶分数增长的速度减慢直至再结晶完全。

图 2 所示为应变量为 0.2、应变速率为  $1.0 \text{ s}^{-1}$ 、不同温度下的再结晶模拟组织。为了便于比较, 组织图均选自于模拟范围内的同一位置。从图中可以看出, 在较高变形温度下, 基体内的再结晶分数及再结晶晶粒尺寸都相对较大。这是因为高温下的位错增长速率和晶界移动速率均高于低温。

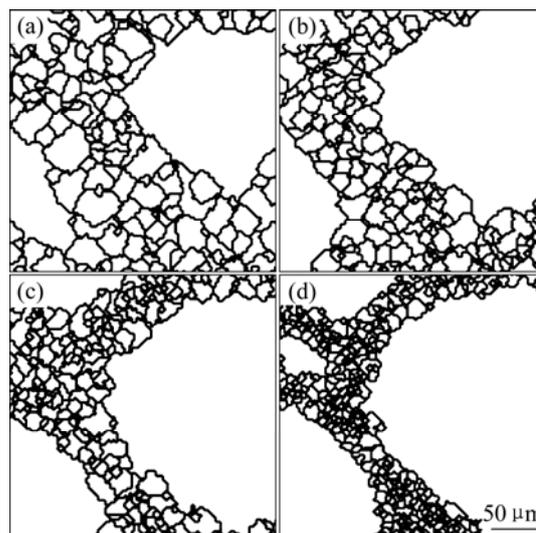


图 2 变形温度对再结晶分数的影响

Fig.2 Influences of deformation temperature on percent of DRX (Strain and strain rate are 0.2 and  $1.0 \text{ s}^{-1}$  respectively): (a)  $400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (b)  $350 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (c)  $300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ; (d)  $250 \text{ }^{\circ}\text{C}$

### 2.2 平均晶粒尺寸与变形条件之间的关系

从实验及模拟的组织转变及稳态组织的分析结果可以看出, 变形过程中晶粒尺寸的变化及稳态组织平均晶粒尺寸与变形条件(即 Zener-Hollomon 参数, 简称 Z 参数)有着十分密切的关系。图 3 示出 AZ91 合金压缩过程中平均晶粒尺寸随应变量增加的变化(应变速率  $1.0 \text{ s}^{-1}$ )。结合组织分析可以看出, 在变形的初始阶段, 由于再结晶晶粒形核的发生, 基体内晶粒数量急剧增加, 平均晶粒尺寸急剧下降。随着变形量的增加, 平均晶粒尺寸下降的速率减缓直至达到某一稳态值。还可看出, 稳态晶粒尺寸随着变形温度的升高而增加。

图 4 所示为稳态组织平均晶粒尺寸与 Z 参数的关系。可以看出, Z 参数较小(低应变速率或高变形温度)时, 稳态组织的平均晶粒尺寸较大; 而 Z 参数增大时, 稳态组织的平均晶粒尺寸减小。这一结果在文献 [6, 8] 中的实验结果中得到验证。对图 4 中的数据点

进行线性拟合可得, 平均晶粒尺寸与  $Z$  参数呈反比关系, 指数为  $-0.05$ 。这一结果与 AZ31 的热压缩实验结果十分接近<sup>[8]</sup>。

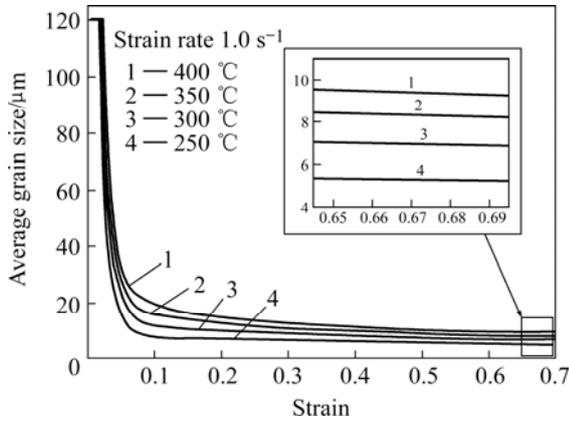


图3 压缩过程中平均晶粒尺寸的变化  
Fig.3 Variations of average grain size of AZ91 during hot compression

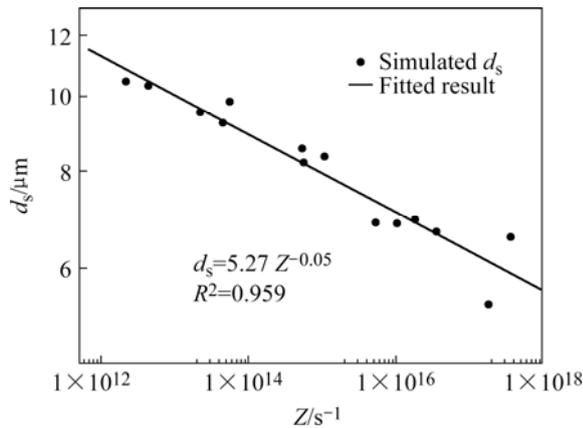


图4 平均晶粒尺寸与变形条件的关系  
Fig.4 Relationship between average grain size and deformation conditions during hot compression

### 2.3 再结晶动力学

与实验过程相比, 模拟中可以精确区分再结晶晶粒和非再结晶晶粒, 进而有助于再结晶动力学的研究。图5示出了  $400\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $1.0\text{ s}^{-1}$  下基体内所有晶粒平均尺寸  $d_{av}$ 、初始晶粒平均尺寸  $d_0$  及再结晶晶粒平均尺寸  $d_{rex}$  与应变量之间的关系。结合组织分析可知: 压缩初始阶段, 大量细小的再结晶晶粒在原始晶界处形核, 导致所有晶粒平均尺寸  $d_{av}$  迅速下降, 与此同时, 初始晶粒平均尺寸  $d_0$  呈线性下降而再结晶晶粒平均尺寸  $d_{rex}$  缓慢增加。随着再结晶分数逐渐增加至  $100\%$ , 原始晶粒逐渐被细小的再结晶晶粒吞噬, 此时, 再结晶晶粒尺寸  $d_{rex}$  增加至峰值后缓慢下降至某一稳态值。

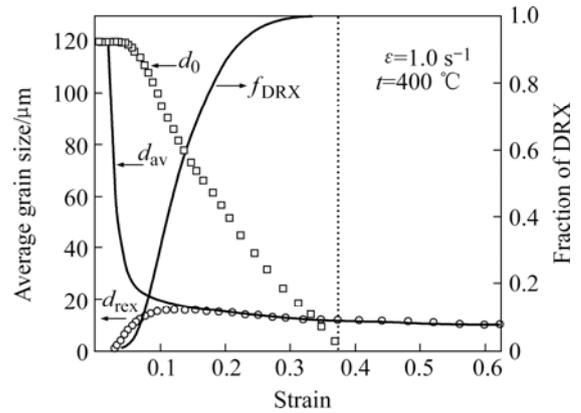


图5 平均晶粒尺寸随应变量的变化  
Fig.5 Dependence of average grain size and fraction of DRX on strain based on simulation

文献[9, 10]中对再结晶晶粒尺寸的变化做出了相关分析, 本研究结合 EBSD 组织分析可对  $d_{rex}$  的变化情况作如下分析: 一方面, 由于高温下的晶界迁移, 再结晶晶粒发生长大现象, 导致再结晶晶粒平均尺寸增加; 另一方面, 由于基体内位错密度不断累积促进了再结晶晶粒的不断形核, 而当再结晶晶粒内的位错密度达到其临界值后亦可发生再结晶, 从而导致再结晶晶粒尺寸的下降。当两种作用达到平衡时, 平均尺寸将达到稳态。

一般认为, 变形过程中动态再结晶的发生可使流变曲线呈现单峰和多峰两种截然不同的现象<sup>[11-13]</sup>。本研究中, AZ91 合金的热压缩曲线表现出单峰现象。据文献[9]分析, 单峰的出现是由于基体中同时发生了多次循环再结晶现象(组织中所有晶粒全部完成再结晶定义为再结晶的一个循环), 即再结晶晶粒在满足再结晶形核条件后可再次发生动态再结晶。图6中示出

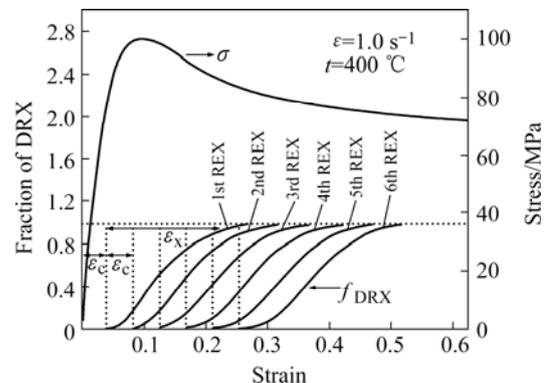


图6 再结晶分数与应力、应变的关系  
Fig.6 Relationships between fraction of DRX and flow stress obtained from simulation at  $400\text{ }^\circ\text{C}$  and  $1.0\text{ s}^{-1}$  ( $N$ -th REX represents  $n$ -th cycle of recrystallization during deformation)

了 CA 模拟中动态再结晶分数与流变曲线之间的关系, 其中  $\varepsilon_c$  为动态再结晶开始的临界应变,  $\varepsilon_x$  为动态再结晶完成 98% 的应变量。由图 6 可以看出, 由于  $\varepsilon_c < \varepsilon_x$ , 在一个循环的再结晶完成之前, 后续循环的再结晶已经开始, 而且每次再结晶开始的时刻不同, 即使在同一时刻, 不同的再结晶又处于不同的阶段。正是由于多次循环再结晶的并发和重叠导致了流变曲线的单峰特征。此外, 由于多次循环再结晶的同时发生, 即使原始晶粒已经完全被再结晶晶粒消耗, 基体内晶粒仍然可以进一步细化, 这也正是图 5 中  $d_{\text{rex}}$  在再结晶分数达到 100% 后仍有所下降的原因。

### 3 结论

1) 根据元胞自动机方法的模拟数据, 研究了 AZ91 合金热压缩过程中的再结晶晶粒尺寸与变形条件之间的关系, 重点分析了再结晶动力学。

2) 基体内的动态再结晶速率和再结晶晶粒尺寸随变形温度升高而增大。

3) 稳态组织的平均晶粒尺寸与  $Z$  参数呈反比关系, 指数为 -0.05。

4) 压缩过程中, 随应变增加, 平均晶粒尺寸迅速下降后缓慢减小至稳态值, 原始晶粒平均尺寸呈线性减小为 0, 再结晶晶粒平均尺寸先增加至某一峰值后缓慢下降至稳态值。

5) 压缩过程中基体内多次循环再结晶的同时发生导致了流变曲线的单峰特征。

### REFERENCES

[1] HESSELBARTH H W, GÖBEL I R. Simulation of recrystallization by cellular automata[J]. Acta Metall, 1991, 39: 2135-2143.  
[2] GOETZ R L, SEETHARAMAN V. Static recrystallization

kinetics with homogeneous and heterogeneous nucleation using a cellular automata model[J]. Metall Mater Trans A, 1998, 29A: 2307-2321.  
[3] GOETZ R L, SEETHARAMAN V. Modeling dynamic recrystallization using cellular automata[J]. Scripta Mater, 1998, 38: 405-413.  
[4] KUGLER G, TURK R. Study of the influence of initial microstructure topology on the kinetics of static recrystallization using a cellular automata model[J]. Comput Mater Sci, 2006, 37: 284-291.  
[5] DING R, GUO Z X. Microstructural evolution of a Ti-6Al-4V alloy during  $\beta$ -phase processing: Experimental and simulative investigations[J]. Mater Sci Eng A, 2004, 365: 172-179.  
[6] DERBY B. The dependence of grain size on stress during dynamic recrystallization[J]. Acta Metall Mater, 1991, 39: 955-962.  
[7] PECZAK P, LUTON M J. The effect of nucleation models on dynamic recrystallization II. Heterogeneous stored-energy distribution[J]. Phil Maga B, 1994, 70: 817-849.  
[8] BARNETT M R. Quenched and annealed microstructures of hot worked magnesium AZ31[J]. Mater Trans, 2003, 44: 571-577.  
[9] SAKAI T, JONAS J J. Dynamic recrystallization: Mechanical and microstructural considerations[J]. Acta Metall, 1984, 32: 189-209.  
[10] YANG X, MIURA H, SAKAI T. Dynamic evolution of new grains in magnesium alloy AZ31 during hot deformation[J]. Mater Trans, 2003, 44: 197-203.  
[11] PRASAD Y V R K, RAO K P. Mechanisms of high temperature deformation in electrolytic copper in extended ranges of temperature and strain rate[J]. Mater Sci Eng A, 2004, 374: 335-341.  
[12] LUTON M J, SELLARS C M. Dynamic recrystallization in nickel and nickel-iron alloys during high temperature deformation[J]. Acta Metall, 1969, 17: 1033-1043.  
[13] STÜWE H P, ORTNER B. Recrystallization in hot working and creep[J]. Metals Sci, 1974, 8: 161-167.

(编辑 陈爱华)