

Study of Static Recrystallization Behavior of 5083 Aluminum Alloy

Jiaqi Zhang¹, Qingsong Dai^{2,3}, Ping Fu^{1,3}, Yunlai Deng^{1,2}

¹Light Alloy Research Institute, Central South University, Changsha Hunan

²School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan

³Guangxi Liuzhou Yin Hai Aluminum Co., Ltd., Liuzhou Guangxi

Email: Jessie_Zhang111@163.com

Received: Apr. 20th, 2016; accepted: May 7th, 2016; published: May 10th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

This paper examined the effects of hot deformation conditions and heat treatment conditions on the static recrystallization behavior of 5083 aluminum alloy, using Gleeble thermal simulation experiment, metallography experiment and hardness test. The results indicate that with the rising of Zener-Hollomon parameter value or deformation amount during 5083 hot deformation process, the recrystallization rate increases and the recrystallized grain size of the alloy becomes finer. Moreover, the increase of annealing temperature after hot deformation can promote the recrystallization rate while annealing temperature has no obvious effect on the recrystallized grain size of the alloy. Microstructure of the alloy develops from a fibrous structure into an equiaxed one with the increase of holding time, and grain growth appears with the increase of time. The kinetics equation of static recrystallization of 5083 aluminum alloy was established based on the experimental results.

Keywords

5083 Aluminum Alloy, Hot Deformation Conditions, Heat Treatment Conditions, Kinetics Equation of Static Recrystallization

5083铝合金静态再结晶行为研究

张佳琪¹, 戴青松^{2,3}, 付平^{1,3}, 邓运来^{1,2}

¹中南大学, 轻合金研究院, 湖南 长沙

²中南大学, 材料科学与工程学院, 湖南 长沙

³广西柳州银海铝业股份有限公司, 广西 柳州
Email: Jessie_Zhang111@163.com

收稿日期: 2016年4月20日; 录用日期: 2016年5月7日; 发布日期: 2016年5月10日

摘 要

本文采用Gleeble热模拟实验、金相实验、硬度实验, 研究了热变形条件及热处理条件对5083铝合金静态再结晶行为的影响。研究表明: 5083铝合金热变形过程中Zener-Hollomon参数值越大或变形程度越大, 则合金在后续退火过程中的再结晶速率越大, 再结晶后的晶粒尺寸越细小; 热变形后的退火温度越高, 则合金在退火过程中的再结晶速率越大, 但退火温度对合金再结晶后的晶粒尺寸影响不明显; 随着退火时间的延长, 合金金相组织从纤维状转变为等轴状, 进一步延长退火时间后晶粒将发生长大现象。根据实验结果建立了5083铝合金静态再结晶动力学方程。

关键词

5083铝合金, 热变形条件, 热处理条件, 静态再结晶动力学方程

1. 引言

5083 铝合金金属 Al-Mg 系合金, 具有轻质、耐蚀、易成型等特征[1] [2], 5083 铝合金板带材在汽车板、船舶板、运煤敞车、压力罐、易拉罐、花纹板、铝塑复合板等领域应用广泛[3] [4]。随着我国工装水平的提高, 热连轧高效制备技术广泛应用于 5083 铝合金产品的制备, 而在热连轧生产过程中, 合金组织将随着工艺的变化发生动态回复、动态再结晶、静态回复、静态再结晶等多种变化, 合金再结晶行为直接影响材料性能, 尤其是材料卷取后的静态再结晶行为甚至将影响中厚板成品性能。因此, 铝合金静态再结晶行为的研究具有重要意义。为此, 作者以已完全再结晶 5083 铝合金热粗轧板为材料, 在 Gleeble-3800 热模拟机上对试样进行高温压缩, 对高温压缩试样进行了盐浴退火, 分析了热变形条件及后续热处理条件对 5083 铝合金静态再结晶行为的影响, 并建立了静态再结晶动力学方程, 为生产过程中热连轧工艺参数设置与产品性能预测提供依据。

2. 实验方法

实验材料为已完全再结晶退火的 5083 铝合金热粗轧板, 其化学成分如表 1 所示。

将试样制备成直径为 10 mm、高度为 15 mm、两端带有深度为 0.2 mm 凹坑的热压缩标准样品[5]。在 Gleeble 3800 热模拟机上进行等温压缩试验, 压缩前在试样两端的凹槽内填充 75% 石墨 + 20% 机油 + 5% 硝酸三甲苯脂, 减少摩擦对应力状态的影响, 压缩后立即水淬以保留高温变形组织。根据热压缩试验数据计算出不同压缩条件下样品所对应的 Zener-Hollomon 参数值[6], 将水淬后的圆柱试样沿纵向剖开进行盐浴退火, 并对退火后的试样剖分面进行光学金相观察与维氏硬度检测。本文试样的热压缩变形条件、Z 参数值、试样退火条件如表 2 所示。

3. 实验结果与分析

3.1. 热变形与热处理条件对显微组织的影响

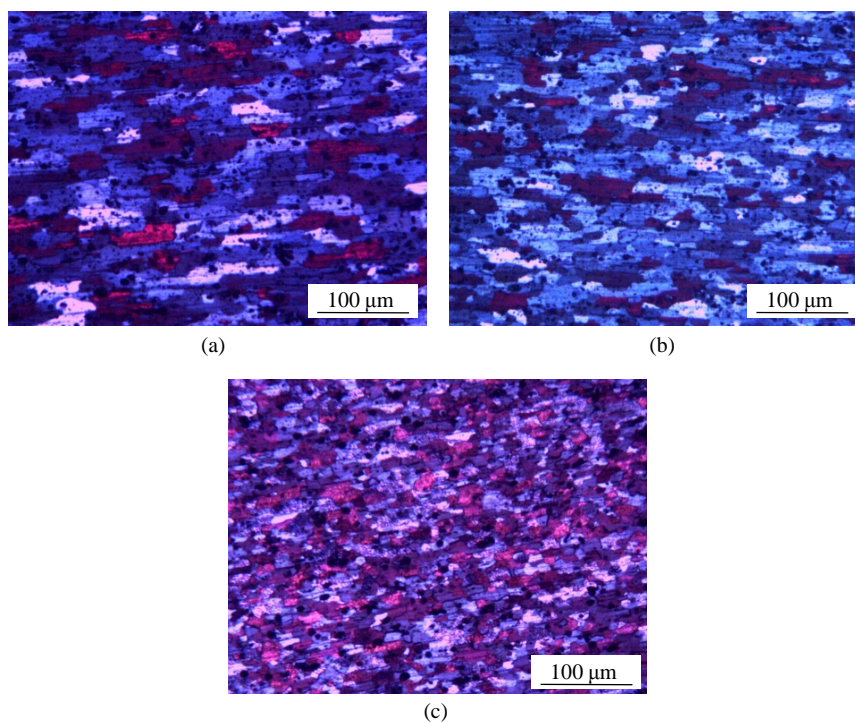
图 1 为 8#、3#、6#试样完全再结晶退火后的金相组织照片, 如表 2 所示, 3 组试样变形量及后续退

Table 1. Chemical composition of the investigated 5083-type alloy (wt.%)**表 1.** 实验所用 5083 铝合金化学成分(wt.%)

Chemical elements	Fe	Si	Mg	Mn	Zn	Cr	Ti	Al
composition	0.29	0.11	4.65	0.49	0.03	0.1	0.03	Bal.

Table 2. Sample number and test conditions**表 2.** 试样编号及试验条件

number	Deformation temperature/°C	Strain rate/s ⁻¹	deformation/%	lnZ	Annealing temperature/°C
1#	350	0.1	50	30.2	400
2#	350	1	50	32.5	350
3#	350	1	50	32.5	400
4#	350	1	50	32.5	450
5#	350	10	30	34.8	400
6#	350	10	50	34.8	400
7#	350	10	70	34.8	400
8#	450	10	50	30.2	400

**Figure 1.** Optical micrographs of different Z parameters of 5083 aluminum. (a) lnZ = 30.2; (b) lnZ = 32.5; (c) lnZ = 34.8**图 1.** 不同 Z 参数下的 5083 铝合金光学显微组织。lnZ = 30.2; (b) lnZ = 32.5; (c) lnZ = 34.8

火温度都保持一致，而变形过程中的 lnZ 分别为 30.2、32.5、34.8，通过 Image-Pro Plus 软件统计得到其再结晶后的平均晶粒尺寸分别为 38.6 μm 、28.5 μm 、19.3 μm ，这说明在一定范围内随着试样变形过程中 Z 参数值的增大，试样退火后的平均再结晶晶粒尺寸减小。

Z 值越小, 说明热压缩过程中应变速率较低或变形温度较高, 原子热运动加剧, 试样有足够的时间进行位错运动和空位扩散, 因而动态回复程度大, 形成大量的亚晶结构, 在后续热处理过程中, 小的亚晶粒通过相互合并粗化长大形成大的亚晶粒, 粗大的亚晶无需孕育期直接形核长大, 且已形核的动态再结晶晶粒将成为静态再结晶晶粒的核心优先长大, 因此图 1 中 8# 试样平均再结晶晶粒尺寸相对较大。

图 2 为 5#、6#、7# 试样完全再结晶退火后的金相组织照片, 其热变形温度均为 350°C , 应变速率均为 10 s^{-1} , 退火温度均为 400°C , 变形量分别为 30%、50%、70%, 再结晶平均晶粒尺寸分别为 $46.2\ \mu\text{m}$ 、 $19.3\ \mu\text{m}$ 、 $16.8\ \mu\text{m}$, 这说明变形量越大, 试样的再结晶平均晶粒尺寸越小。

对于 5#、6#、7# 试样, 变形量越大, 变形过程中形成的位错密度越高, 形变储能也越多, 在后续退火过程中, 试样晶界在形变储能的驱动下向高密度位错晶粒移动时, 晶界所扫过的区域位错密度降低, 能量释放, 所形成的无应变小区域尺寸达到一定值时成为了再结晶核心[6]。形变储能较高的试样将获得较大的形核率, 这些晶粒还未充分长大之前晶界就相遇, 阻碍了各自的长大, 因此也降低了晶粒的长大速率。变形量越大, 长大速率/形核率比值越小, 因此 7# 试样平均再结晶晶粒尺寸相对较小。

图 3 为 2#、3#、4# 试样再结晶退火后的金相组织照片, 其热变形温度均为 350°C , 应变速率均为 1 s^{-1} , 变形量均为 50%, 退火温度分别为 350°C 、 400°C 、 450°C , 退火后的试样平均晶粒尺寸分别为 $26.0\ \mu\text{m}$ 、 $28.5\ \mu\text{m}$ 、 $29.1\ \mu\text{m}$, 这说明退火温度对再结晶晶粒的尺寸的影响较小。

对于 2#、3#、4# 试样, 其热变形条件一致, 因此退火初期试样的位错密度及畸变储能一致, 3 组试样的形核率相近。当退火温度高于再结晶温度时, 完全再结晶能够在较短的时间内完成[7], 2#、3#、4# 试样的退火温度分别为 350°C 、 400°C 、 450°C , 均高于 5083 铝合金再结晶温度, 因此 3 组试样完成完全再结晶的时间相近, 并且晶粒周围临晶生长过程也相似, 因此 3 组试样的再结晶晶粒尺寸相差不大。

图 4 为 6# 试样经过不同时间再结晶退火后的金相组织照片, 退火时间分别为 0 s、8 s、45 s、45 min, 随着退火时间的延长, 晶粒发生了显著的变化。热粗轧板变形完成后, 纤维组织是其主要的组织特征, 随着退火过程的进行, 纤维组织开始粗化, 当退火进行到 8 s 时纤维组织中开始出现细小的再结晶晶核, 随着退火时间的延长, 再结晶组织所占比例逐渐增大, 经过 45 s 退火之后, 整个组织基本都被再结晶晶粒所代替。当退火时间达到 45 min 时, 晶粒发生明显长大的现象。

图 1~4 表明变形过程中随着 Zener-Hollomon 参数值的增大、变形量的增加, 再结晶晶粒尺寸越细小, 而退火温度对再结晶后的晶粒尺寸影响不明显。随着退火时间的延长, 纤维组织逐渐演变为等轴的晶粒, 并且随着时间的增加, 晶粒发生明显长大的现象。

3.2. 热变形与热处理条件对再结晶速率的影响

试样经过盐浴退火后的再结晶百分数可以通过硬度值的降低来表征, 根据文献[8]可知计算公式如下:

$$X_v = \frac{h_{\text{que}} - h}{h_{\text{que}} - h_{\text{p-rec}}} \quad (1)$$

其中, h_{que} 为热压缩试样淬火后的硬度值, $h_{\text{p-rec}}$ 为试样完全再结晶后的硬度值, h 为试样经过不同时间盐浴退火后的硬度值。

试样按照表 2 所示的温度进行盐浴退火, 退火时间由 0 s 逐渐增大至试样完全再结晶, 将试样在不同退火时间下测得的硬度值带入公式(1), 可得到热变形条件及热处理条件与材料再结晶速率的关系, 其曲线关系如图 5 所示。

由图 5(a)可知, Z 参数越大, 再结晶速率越快, 再结晶是一个热激活的过程, 涉及到位错运动、晶界迁移, Z 参数越大表明试样应变速率越大或变形温度越低, 因而变形过程中发生回复或者再结晶软化等

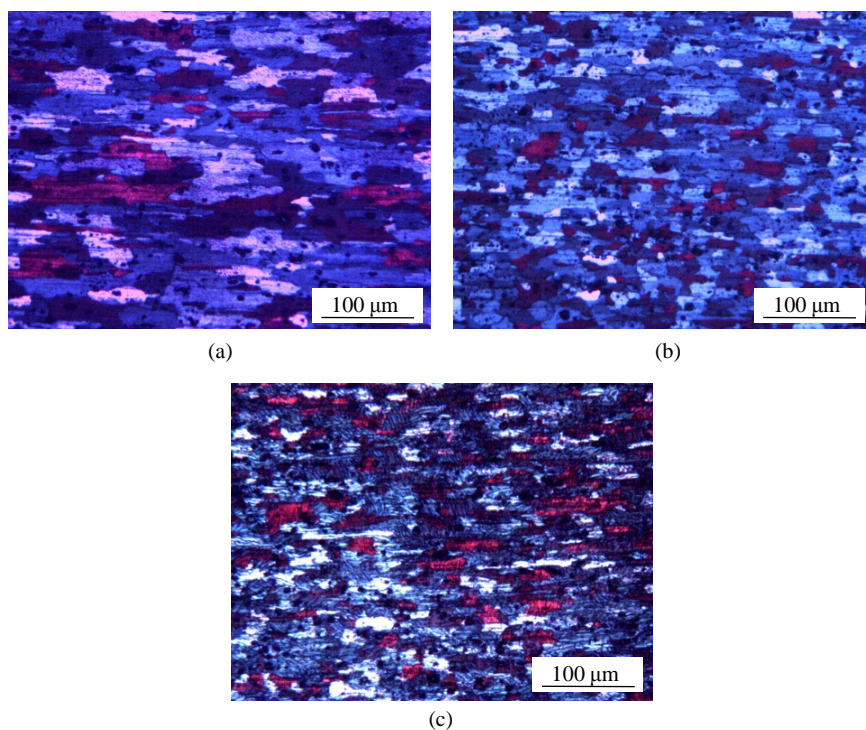


Figure 2. Optical micrographs of different deformation of 5083 aluminum. (a) 0.3; (b) 0.5; (c) 0.7

图 2. 不同变形量下的 5083 铝合金光学显微组织。(a) 0.3; (b) 0.5; (c) 0.7

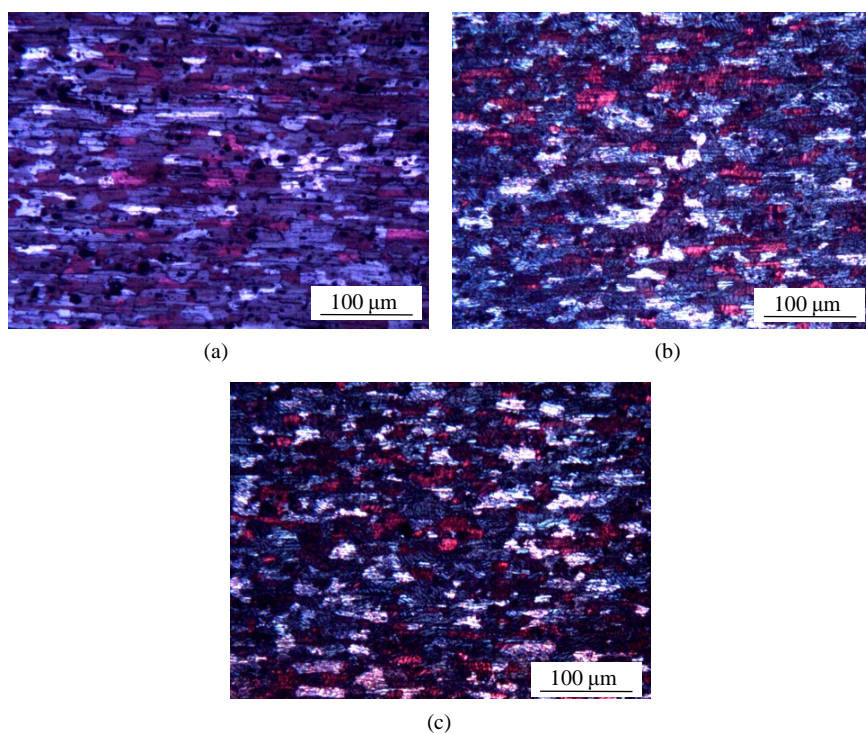


Figure 3. Optical micrographs of different annealing temperature of 5083 aluminum. (a) 350°C; (b) 400°C; (c) 450°C

图 3. 不同退火温度下的 5083 铝合金光学显微组织。(a) 350°C; (b) 400°C; (c) 450°C

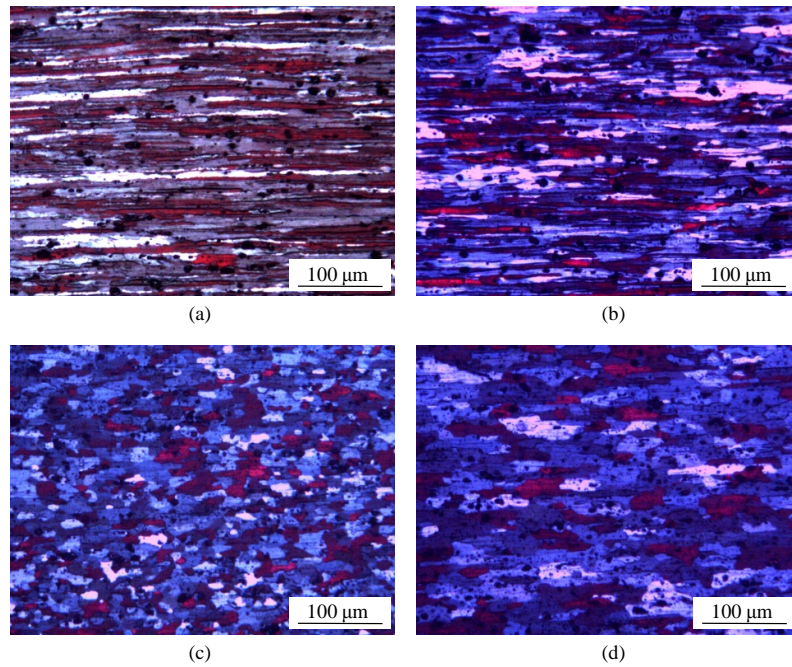


Figure 4. Optical micrographs of different annealing time of 5083 aluminum, deformation conditions: $T_{\text{def}} = 350^{\circ}\text{C}$, $\varepsilon = 0.5$, $T_{\text{rec}} = 400^{\circ}\text{C}$, $\dot{\varepsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$, (a) 0 s; (b) 8 s; (c) 45 s; (d) 45 min

图 4. 5083 铝合金经不同时间退火后的光学显微组织

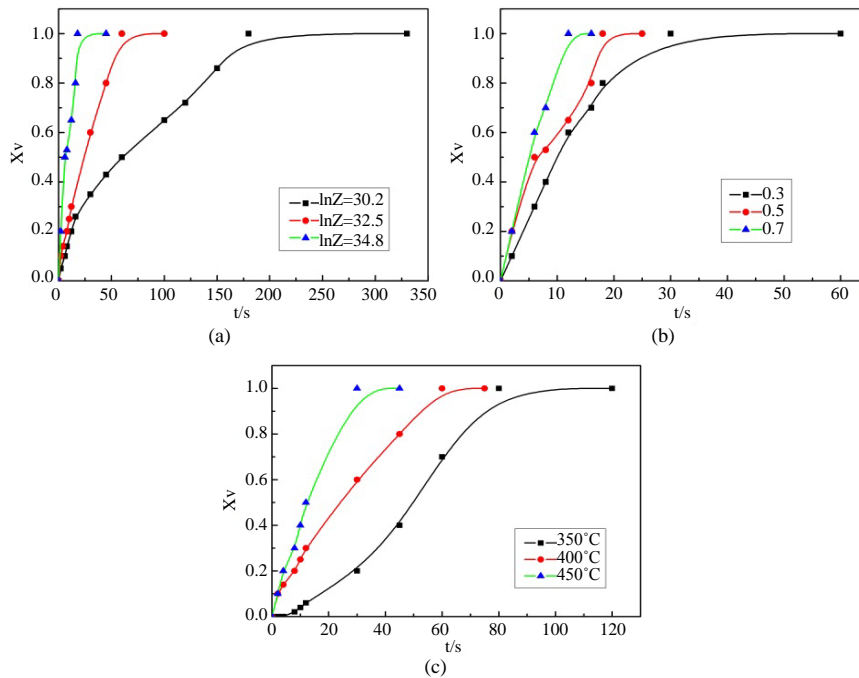


Figure 5. The effects of hot compression conditions and annealing temperature on recrystallization rate: (a) The influence of Z parameters ($\varepsilon = 0.5$, $T_{\text{rec}} = 400^{\circ}\text{C}$); (b) the influence of different deformation ($T_{\text{def}} = 350^{\circ}\text{C}$, $\dot{\varepsilon} = 10 \text{ s}^{-1}$, $T_{\text{rec}} = 400^{\circ}\text{C}$); (c) the influence of annealing temperature ($T_{\text{def}} = 350^{\circ}\text{C}$, $\dot{\varepsilon} = 1 \text{ s}^{-1}$, $\varepsilon = 0.5$)

图 5. 热压缩条件及退火温度对再结晶速率的影响

过程的时间越短, 软化过程进行的程度越低, 这些都能导致变形完成之后试样有更大的畸变储能, 使得再结晶的驱动力增大, 因此再结晶速率也越大。由图 5(b)可知, 随着应变量增大, 再结晶速率增大, 应变量越大, 变形后位错密度越高, 再结晶的驱动力也越大, 从而导致再结晶速率增大。图 5(c)表明随着退火温度的升高, 再结晶速率加快。退火温度越高, 原子之间的相互作用力越小, 位错越容易运动, 因此运动速率越快, 再结晶速率越快。

3.3. 再结晶动力学方程

再结晶是一个热激活过程, 可采用 Avrami 方程[9]描述不同条件下样品的再结晶速率, 方程如公式(2)、(3)所示:

$$X_v = 1 - \exp\left(-0.693\left(\frac{t}{t_{0.5}}\right)^n\right) \quad (2)$$

$$t_{0.5} = C\varepsilon^a Z^b d_0^c \exp\left(\frac{Q_{\text{rec}}}{RT_{\text{rec}}}\right) \quad (3)$$

X_v 为再结晶百分数, t 为退火时间, k 、 n 为材料常数。 $t_{0.5}$ 为再结晶百分数达到 50% 所需的退火时间, 因热压缩实验所选取样品的初始晶粒度一致, 因此将公式中 Cd_0^c 作为常数 D , 即公式(3)简化为公式(4):

$$t_{0.5} = D\varepsilon^a Z^b \exp\left(\frac{Q_{\text{rec}}}{RT_{\text{rec}}}\right) \quad (4)$$

对公式(4)两边取对数可得:

$$\ln(t_{0.5}) = \ln D + a \ln \varepsilon + b \ln Z + \left(\frac{Q_{\text{rec}}}{RT_{\text{rec}}}\right) \quad (5)$$

根据图 5 中的数据进行线性拟合与计算, 可求得 $a = -0.687$, $b = -0.24$, $Q_{\text{rec}} = 57.782 \text{ kJ/mol}$, $D = 0.204$ 。将计算所得的各参数值代入公式(5)可得到 5083 铝合金静态再结晶的动力学方程:

$$t_{0.5} = 0.204 \times \varepsilon^{-0.687} Z^{-0.24} \exp\left(\frac{57782}{RT_{\text{rec}}}\right) \quad (6)$$

n 值为材料常数, 与合金再结晶速率及晶粒生长维度有关。根据公式(4)及公式(8)可计算得到不同变形及退火条件下的 $t_{0.5}$ 及 n 值。

根据文献[9]可知, n 值与变形及退火条件的关系可以用如下公式来表示:

$$n = A\varepsilon^p \exp\left(\frac{Q}{RT_{\text{rec}}}\right) \quad (7)$$

对所求得到 n 值进行数值拟合可求得公式(7)中各参数值, 最终可确定 n 可表示为:

$$n = 5.29 \times 10^{-2} \varepsilon^{0.83} \exp\left(\frac{19674}{RT_{\text{rec}}}\right) \quad (8)$$

4. 结论

1) 5083 铝合金热变形过程中 Z 参数值越大或变形程度越大, 则合金在后续退火过程中的再结晶速率越大, 再结晶后的晶粒尺寸越细小; 热变形后的退火温度越高, 则合金在退火过程中的再结晶速率越大, 但退火温度对合金再结晶后的晶粒尺寸影响不明显; 随着退火时间的延长, 合金金相组织从纤维状转变

为等轴状，进一步延长退火时间后晶粒将发生长大现象。

2) 建立了 5083 铝合金静态再结晶动力学方程，静态再结晶激活能为 57.782 kJ/mol，再结晶方程可表示为：

$$t_{0.5} = 0.204 \times \varepsilon^{-0.687} Z^{-0.24} \exp\left(\frac{57782}{RT_{\text{rec}}}\right)$$

基金项目

广西“八桂学者”计划课题、广西科学研究与技术开发计划课题(桂科重 1598001-2)。

参考文献 (References)

- [1] 梁岩, 王国军. 舰船用 Al-Mg 系铝合金[J]. 黑龙江冶金, 2007(3): 3-6.
- [2] Wang, J.Y., Cheng, L., Zheng, S.L., Yin, C.Y. and Wang, Y.H. (2014) Growth and Corrosion Behaviors of Thin Anodic Alumina Membrane on AA5083 Al-Mg Alloy in Incandescent Medium. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **24**, 3023-3030. [http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63440-3](http://dx.doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63440-3)
- [3] Gali, O.A., Riahi, A.R. and Alpas, A.T. (2014) The Effect of Surface Conditions on the Elevated Temperature Sliding Contact Deformation of AA5083 Alloy. *Wear*, **330**, 309-319.
- [4] Panagopoulos, C.N. and Georgiou, E.P. (2010) Cold Rolling and Lubricated Wear of 5083 Aluminum Alloy. *Materials & Design*, **31**, 1050-1055. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.09.056>
- [5] Neil, D.H., William, H.V.G. and Wojciech, Z.M. (2009) Surface Grain Structure Evolution in Hot Rolling of 6061 Aluminum Alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, **209**, 5990-5995. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.07.019>
- [6] Chao, H.Y., Sun, H.F., Chen, W.Z. and Wang, E.D. (2011) Static Recrystallization Kinetics of a Heavily Cold Drawn AZ31 Magnesium Alloy under Annealing Treatment. *Materials Characterization*, **62**, 312-320. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matchar.2011.01.007>
- [7] 赵新兵, 毛卫民. 金属的再结晶与晶粒长大[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1994.
- [8] Lin, Y.C., Chen, M. and Zhong, J. (2008) Study of Static Recrystallization Kinetics in a Low Alloy Steel. *Computational Materials Science*, **44**, 316-321. <http://dx.doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.03.027>
- [9] Wells, M.A., Samarasekera, I.V., Brimacombe, J.K. and Hawbolt, E.B. (1998) Modeling the Microstructural Changes during Hot Tandem Rolling of AA5XXX Aluminum Alloys: Part I. Microstructural Evolution. *Metallurgical and Materials Transactions B*, **29**, 611-620. <http://dx.doi.org/10.1007/s11663-998-0096-9>