

锻造方式对 7075 铝合金锻件动态再结晶的影响

周 建^{1,2}, 张廷杰², 张小明², 马光来², 田 锋², 周 廉²

(1. 东北大学 辽宁 沈阳 110004)

(2. 西北有色金属研究院, 陕西 西安 710016)

摘 要: 利用金相 (OM)、透射电镜 (TEM) 对 7075 铝合金热变形显微组织进行了观察。实验表明: 在热锻条件下, 7075 铝合金完全可以发生动态再结晶并通过动态再结晶产生细小的再结晶晶粒。动态再结晶的方式为不连续动态再结晶, 形核机制为亚晶转动、聚合形核; 其临界应变值和加工道次有关, 道次越多, 临界值越低。在相同 Z 值下, 再结晶晶粒尺寸随着应变的增加而减小。弥散的第二相粒子在动态再结晶过程中起了重要作用。

关键词: 7075 铝合金; 动态再结晶; 临界应变; 第二相粒子

中图分类号: TG146.2⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2004)08-0827-04

1 前 言

金属材料热变形过程中会同时发生形变硬化和形变软化。形变软化取决于形变过程中的动态复原行为: 动态回复和动态再结晶。铝和铝合金由于具有较高的层错能, 在热加工过程中容易发生动态回复, 而变形时位错增殖与位错相互抵消和重组达到动态平衡, 因而不容易出现动态再结晶^[1,2]。但是大量研究表明, 在一定的加工条件下, 铝和铝合金在热加工过程中也会发生动态再结晶^[2~7]。在热加工过程中, 通常采用 Z 参数值 (Zener-Hollomon 系数 $Z = \dot{\epsilon} \exp(Q/RT)$, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, Q 为激活能, T 为绝对温度, R 为气体常数) 来表示热加工参数。一些实验表明, Z 参数越小 (变形温度高, 应变率小), 越有利于发生动态再结晶。由于动态再结晶使晶粒细化, 可以提高强度和韧

性, 同时不损害金属的延性。因此, 将动态再结晶机理应用于工业生产以改善产品的综合性能一直是材料研究方向之一。本文研究了 7075 铝合金在不同的锻造条件下的动态再结晶, 并试图探明其热变形组织的演变规律。

2 实验过程

用 7075 铝合金挤压棒作为实验材料, 化学成分为 Zn: 5.67, Mg: 2.24, Cu: 1.47, Cr: 0.14, Fe: 0.22, Al 余量 (质量分数), 以应变速率为 10^2s^{-1} 左右, 加热温度 440 和不同的加工道次分别进行单向、双向和三向锻造, 锻后水淬以冻结高温变形组织。在本实验中采用真应变。其表示方法为 $\epsilon = \ln H/h$ (H 为工件锻造前的高度, h 为锻造后的高度), 锻造工艺列于表 1。

表 1 7075 铝合金在 440 自由锻造工艺参数

Table 1 Processing parameters of free forge for 7075 Aluminum alloy at 440

Specimens number	Methods of forge	Total strain	Average strain of per-pass	Pass
1	Single direction	1.45	1.45	1
2	Single direction	1.6	1.6	1
3	Single direction	0.8	0.4	2
4	Single direction	1.15	0.575	2
5	Single direction	1.25	0.625	2
6	Single direction	0.9	0.18	5
7	Double directions	2.2	1.1	2
8	Three directions	4.2	0.35	12

Olympas PMG3 金相显微镜观察了金相组织。透射电镜薄膜样品用双喷射电解方法制取, 电解液为

95% 乙醇和 5% 高氯酸溶液, JEM 200CX 电镜观察了薄膜样品中晶粒尺寸和第二相粒子的形态和分布。工

收到初稿日期: 2003-01-07; 收到修改稿日期: 2003-04-07

基金项目: 国家重点基础项目 (G1999064908-04)

作者简介: 周 建, 男, 1973 年生, 硕士, 西北有色金属研究院难熔金属研究所, 陕西 西安 710016, E-mail: naivem@sina.com

作电压 160 kV。

3 实验结果和讨论

图1显示了7075铝合金在不同应变下单道次锻造的金相组织。从图中可以看出,当应变达到1.45时(见图1a),已经基本上形成了再结晶组织,但是晶粒大小还不大均匀和等轴。当应变达到1.6(见图1b)时,已经完全形成了动态再结晶组织,晶粒比较细小,呈

等轴状,分布也比较均匀。

图2是7075铝合金在不同应变下单向多道次锻造的金相组织。从图中可以看出,在单向双道次锻造中,当应变较小时,晶粒基本上呈拉长状,组织分布不大均匀(见图2a),当应变达到1.25时,晶粒已经基本上呈等轴状(见图2b),这标志着动态再结晶晶粒的形成。而在单向5道次锻造过程中,尽管总应变和道次应变都不大,但也出现了动态再结晶组织(见图2c)。

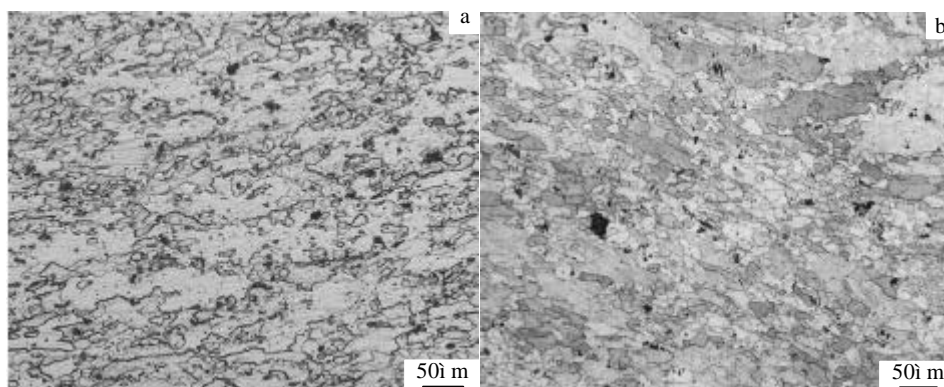


图1 单道次锻造锻件的金相组织

Fig.1 OM structure of forged piece for single pass at initial temperature of 440 °C : (a) $\epsilon=1.45$ and (b) $\epsilon=1.6$

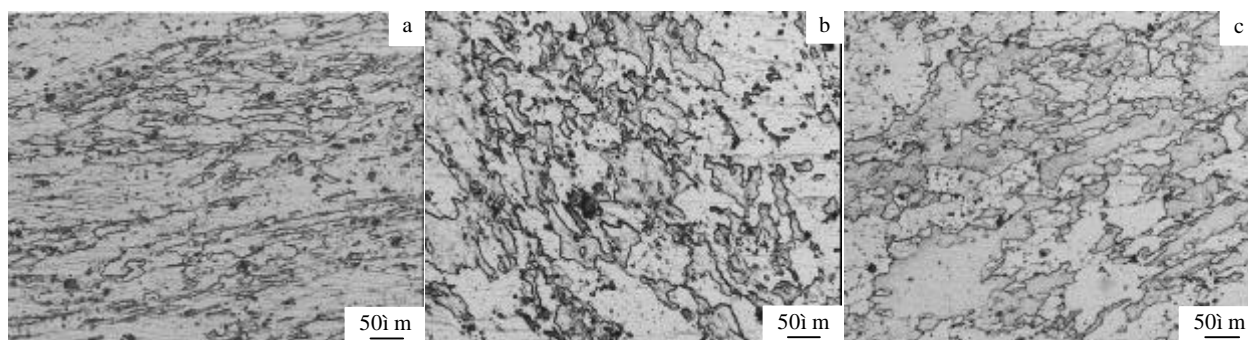


图2 单向多道次锻件的金相组织

Fig.2 OM structure of forged piece for single pass and multi-pass at initial temperature of 440 °C :

(a) double passes, $\epsilon=0.8$, (b) double passes, $\epsilon=1.25$, and (c) five passes, $\epsilon=0.9$

图3显示了双向双道次锻造的金相组织,从图中可以看出,经过应变为2.2的双向锻造后,已经完全形成了尺寸约在4 μm左右的等轴的再结晶晶粒。图4显示经过三向多道次锻造(真应变为4.2)后的TEM组织,从图中可以看出晶粒比较细小,尺寸大约在1 μm~2 μm,呈等轴状并且组织分布比较均匀;等轴晶粒内部仍然还存在着亚晶。

在动态再结晶的3种方式^[9](不连续动态再结晶、连续动态再结晶和几何动态再结晶)中,连续动态再结

晶和几何动态再结晶都是发生在低 Z (即高温低应变率)的情况下,因而对于7075铝合金来说,在高温锻造下的动态再结晶机制只能是不连续动态再结晶。

比较以上不同条件下的锻造组织,可以发现7075铝合金在锻造过程中还有以下特点:1) 动态再结晶的出现有一个临界应变值。2) 该临界应变值和加工方式有关。多道次锻造的临界应变值要比单道次锻造的临界应变值低,并且道次越多,相应的临界值也越小。对于单道次锻造,该临界值约为1.5,单向五道次锻造,

当应变达到 0.9 的时候就可以出现动态再结晶。

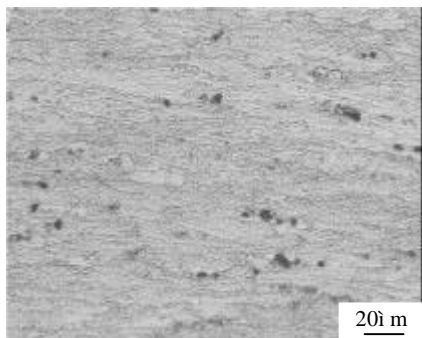


图 3 双向两道次锻造的金相组织

Fig.3 OM structure of forged piece for double direction and double passes at initial temperature of 440 °C, $\epsilon=2.2$



图 4 三向多道次锻件的 TEM 组织 (始锻温度 440 °C, $\epsilon=4.2$)

Fig.4 TEM structure of forged piece for three direction and multi-passes at initial temperature of 440 °C

出现上述情形的原因可能是: 动态再结晶的驱动力来自于塑性变形过程中的应变能, 由于单道次锻造过程中, 应变速率较高而形变时间很短, 当应变小于临界值的时候, 应变能不足以提供使所有晶粒产生动态再结晶所需要的能量, 因此只能出现不完全的动态再结晶, 而在多道次锻造过程中, 由于在道次间隙时间内的亚动态再结晶和静态再结晶所需要的应变能要小于产生动态再结晶所需要的应变能, 使得较小的应变值就可以出现动态再结晶晶粒。

一般认为, 在不连续动态再结晶条件下, 再结晶晶粒尺寸取决于 Z 值, 即当温度和应变速率一定时, 再结晶晶粒尺寸保持不变。但从试验结果中可以看出, 在相同的 Z 值下, 7075 铝合金锻件的再结晶晶粒尺寸随着应变的增加而减小。在单道次锻造中, 当应变为 1.6 时, 再结晶晶粒尺寸大约为 $10 \mu\text{m} \sim 15 \mu\text{m}$ 。在双向双道次锻造中, 当应变为 2.2 时, 再结晶晶粒尺寸迅速下降为 $5 \mu\text{m}$ 左右; 在三向多道次锻造中, 当应变为

4.2 时, 再结晶晶粒尺寸仅仅为 $1 \mu\text{m} \sim 2 \mu\text{m}$ 。可见, 应变对 7075 铝合金动态再结晶晶粒尺寸有着重要的影响。

不连续动态再结晶是大角界面的迁移过程, 包括晶粒的形核和长大。其形核机制与静态再结晶基本相同, 主要有 3 种^[2]: 晶界弓出形核、亚晶界迁移、亚晶长大形核和亚晶转动、聚合形核。由于晶界弓出形核、亚晶界迁移、亚晶长大形核分别发生在小变形量和低层错能的情形下, 而 7075 铝合金具有较高的层错能且在锻造过程中的变形比较大, 因此其形核机制是第 2 种, 即亚晶转动、聚合形核。

对于 7075 铝合金, 除了晶界形核外, 它的第二相粒子也为动态再结晶提供形核点。其中: 1) 初生的金属间化合物, 这些化合物在合金结晶时直接从液相生成, 在压力加工过程中被打碎, 热处理不能使他们变化。这些粒子在热加工过程中可能成为形核点。2) 含铬的弥散质点 $\text{Al}_{12}\text{Mg}_2\text{Cr}$, 他们是在合金均匀化时, 压力加工前的加热时以及固溶处理加热时, 在高温下从固溶体中析出的。图 5 显示了第二相粒子的形貌。在图中可以看出, 第二相粒子从尺寸上可以分为两种: 呈条状的大粒子和弥散分布的小粒子, 在热变形过程中, 弥散的大粒子往往可以通过增加再结晶晶粒形核部位的密度而加快再结晶速度。

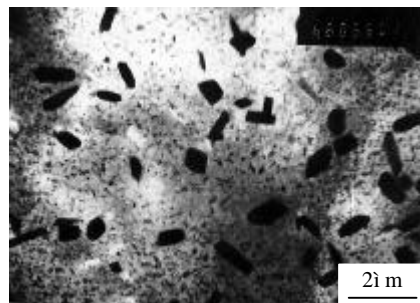


图 5 7075 铝合金在 TEM 下第二相粒子形貌

Fig.5 Morphology of secondary phase particles of 7075 aluminum alloy under TEM

弥散粒子还能有效地钉扎晶界而限制晶粒的长大, 对细化再结晶晶粒尺寸起了很重要的作用。在强应变加工过程中, 在大质点周围形成的强烈形变区是再结晶时新晶粒优先形核的部位, 弥散的小质点和高密度位错之间相互作用, 通过对晶界或亚晶界的迁移施加阻力而减慢晶粒长大的速度, 因此得到较为细小的再结晶晶粒。

4 结 论

1) 7075 铝合金在高温锻造条件下完全可以发生

动态再结晶。

2) 7075 铝合金的再结晶方式为不连续动态再结晶。

3) 发生动态再结晶的临界应变值和加工道次有关, 加工道次越多, 临界值越低。

4) 在相同的 Z 值下, 再结晶晶粒尺寸随着应变的增加而减小。

参考文献 References

- [1] Cui Zhongqi(崔忠圻). *Metallurgy and Heat-Treat*(金属学与热处理)[M]. Beijing: China Machine Press, 1991: 10
- [2] Pan Jinsheng(潘金生), Tong Jianmin(仝健民), Tian Minbo(田民波). *The Foundation of Materials Science*(材料科学基础)[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1998
- [3] Zhang Tingjie(张廷杰), Zhang Xiaoming(张小明), Tian Feng(田 锋) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2001, 30(5): 335
- [4] Zhang Tingjie(张廷杰), Zhang Xiaoming(张小明), Tian Feng(田 锋) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀

有金属材料与工程)[J], 2002, 31(4): 257

- [5] Zhang Yonghong(张永红), Yin Zhimin(尹志民), ZhangJie(张杰) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 2002, 31(3): 167
- [6] Li Huizhong(李慧中), Zhang Yonghong(张永红) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1999, 28(2): 110
- [7] Shen Jian(沈 健) *et al. Rare Metal Materials and Engineering*(稀有金属材料与工程)[J], 1997, 26(5): 26
- [8] Taku Sakai. *Journal of Materials Processing Technology*[J], 1995, 53: 349~361
- [9] Gourdet S, Montheillet F. *Materials Science Engineering*[J], 2000, A283: 274~288
- [10] Taku Sakai, Xuyue Yang, Hiromi Miura. *Materials Science and Engineering*[J], 1997, 234~236: 857~860
- [11] Gholinia F, Humphreys J, Prangnell P B. *Materials Science and Technology*[J], 2000, 16: 1 251~1 255

The Influence of Forge Mode on Dynamic Recrystallization for 7075 Aluminum Alloy during Forging

Zhou Jian^{1,2}, Zhang Tingjie², Zhang Xiaoming², Ma Guanglai², Tian Feng², Zhou Lian²

(1. Northeast University, Shenyang 110004, China)

(2. Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, China)

Abstract: The 7075 aluminum alloy is forged at different strain in different ways. OM(optical microscope) and TEM(transmission electric microscope) were employed to observe the microstructure of 7075 aluminum alloy after hot deformation. Experiment results indicated that 7075 aluminum can occur dynamic recrystallization under hot forging and fine grain can be obtained at the same time, whose recrystallization mechanism and nucleation mechanism are discontinuous dynamic recrystallization and subgrain rotation and polymerization respectively. Its critical strain value is related to deformation pass, the more passes are, the smaller critical strain value will become. Recrystallized grain size decreases with increase of strain, and dispersed second-phase particles play a very important role during dynamic recrystallization.

Key words: 7075 aluminum alloy; critical strain; dynamic recrystallization; second-phase particles

Biography: Zhou Jian, Male, Master, Northwest Institute for Nonferrous Metal Research, Xi'an 710016, P.R. China, E-mail: naivem@sina.com