

# 多道次搅拌摩擦加工制备的 5083 铝合金 细晶材料超塑性研究

叶 奔,丁 强,秦 未,周 健,李红军

(浙江理工大学机械与自动控制学院,杭州 310018)

**摘 要:** 通过多道次搅拌摩擦加工 5083 铝合金材料,细化材料晶粒,使用倒置金相显微镜分析其晶体结构、微观形貌,然后对试样进行高温拉伸实验,通过分析其材料的延伸率、应力和应变的情况,研究试样材料的超塑性性能。研究表明:经过多道次搅拌摩擦加工后,材料晶粒细化均匀;通过高温拉伸试验,其延伸率是未进行加工的 2.6 倍。多道次搅拌摩擦加工成本较低,具备加工大面积铝合金材料的能力,这种加工方式在铝合金晶粒细化的加工中有着广阔的应用前景。

**关键词:** 5083 铝合金;搅拌摩擦加工;细化晶粒;超塑性

**中图分类号:** TG456.9

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-3851(2017)04-0502-04

## 0 引 言

5083 铝合金材料展现超塑性的一个条件是细小的晶粒尺寸,如何高效、快速地制备超细晶材料是目前研究的一个重点。任峻等<sup>[1]</sup>和汤皓元等<sup>[2]</sup>分别在铝合金材料中加入  $B_2O_3$  和 Al-5Ti-1B 来细化其晶粒,该方法需先将材料加热至熔化状态后才能加入化学元素,过程相对繁琐且成本较高。郭晓亮等<sup>[3]</sup>研究发现超声波处理可以细化晶粒,但是经过超声波处理后晶粒细化的效果不明显,无法达到超细晶材料的晶粒尺寸要求。黄姝珂等<sup>[4]</sup>研究了通道转角挤压技术细化 V-5Cr-5Ti 合金晶粒。杨明刚等<sup>[5]</sup>采用热处理的方法来细化晶粒尺寸,所需加热的温度较高,周期相对较长,而且制备大尺度超细化材料尚有一定难度。高雪等<sup>[6]</sup>通过研究搅拌摩擦加工技术对 AZ31 镁合金晶粒尺寸的影响,发现搅拌摩擦加工能细化镁合金的晶粒尺寸,但高温拉伸试验时,经过搅拌摩擦加工后的镁合金材料的塑性较之前变差。

搅拌摩擦加工技术利用搅拌头高速旋转插入工

件,在搅拌头轴肩与工件紧密接触并产生摩擦后,沿待加工方向移动,使搅拌头位置材料产生强烈塑性变形,堆积形成新的微观结构。多道次搅拌摩擦加工技术是指在被加工大片区域重复使用单道次搅拌摩擦加工,通过调整加工参数,使被加工大片区域都得到新的微观组织结构。采用该技术,被加工材料会产生强烈塑性变形、混合和破碎,在微观结构上均匀化、致密化,使被加工材料可能具有超塑性。本文通过多道次搅拌摩擦加工制备晶粒细化的 AA5083 铝合金材料,并进行拉伸实验研究其超塑性性能。

## 1 实 验

### 1.1 细晶材料制备

搅拌摩擦加工实验材料为 200 mm×100 mm×5 mm 的轧制 AA5083 铝合金板。设置多道次搅拌摩擦加工的工艺参数:搅拌头旋转速度 1300 r/min、进给速度 400 mm/min、轴肩下压量 0.3 mm。在此工艺参数下,接头试样无缺陷且接头的各力学性能较好。多道次加工时使用带螺纹的锥形搅拌头,各道次之间的间隔为 3.66 mm,并在加工过程中进行

水冷却。使用3.66 mm的间隔进行加工时,试板的所有区域均被完全搅拌。

### 1.2 拉伸试样制备及拉伸试验

试样为板材结构,故采用线切割机切取高温拉伸试样,切割完成后用砂纸进行打磨以消除线切割留下的划痕,防止拉伸过程中出现应力集中。拉伸试样的切取位置和切割外形尺寸如图1和图2所示。

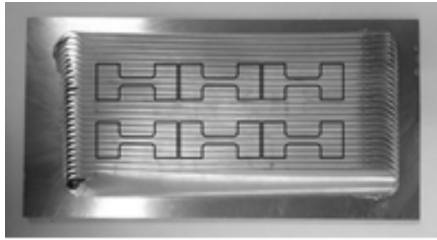


图1 试样切取位置

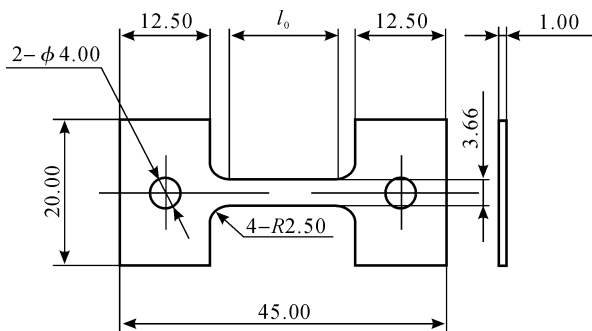
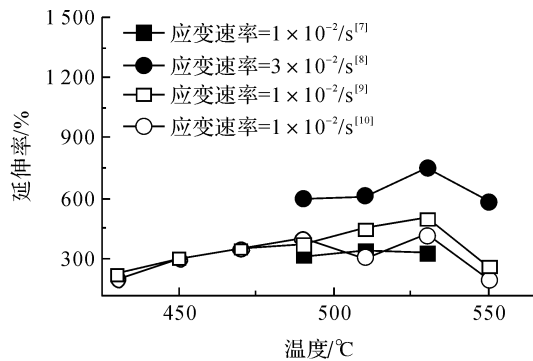
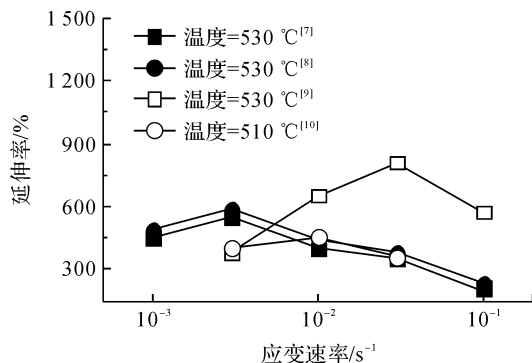


图2 拉伸试样尺寸(mm)



(a) 温度与延伸率的关系



(b) 应变速率与延伸率的关系

图3 温度、应变速率与延伸率的关系

高温拉伸试验在万能拉伸试验机上进行。将温度上升至所需温度后保温2 min,然后开始进行拉伸试验,拉伸时在保温炉中充入含量大于或等于99.99%的高纯氮作为保护。拉伸过程的初始应变速率和拉伸温度,在参考其他对5083铝合金超塑性研究<sup>[7-10]</sup>的基础上,根据实际研究情况选定。文献<sup>[7-10]</sup>中的温度、应变速率、延伸率等数据如图3(a)和图3(b)所示,以此确定本次超塑性试验的参数值,其中温度设为460、500、530 °C,初始应变速率 $\epsilon$ 为 $3 \times 10^{-3}/s$ 。

试样的初始长度 $l_0 = 15$  mm,如图2(a)所示。根据公式可以计算拉伸速度 $v$ :

$$v = \epsilon \times l_0 = 3 \times 10^{-3}/s \times 15 \text{ mm} = 0.045 \text{ mm/s} \\ = 2.7 \text{ mm/min},$$

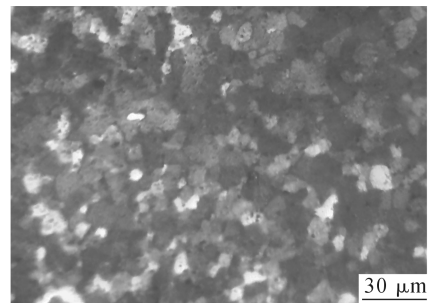
本次实验以该拉伸速度进行,并记录实验数据。

## 2 实验结果分析与讨论

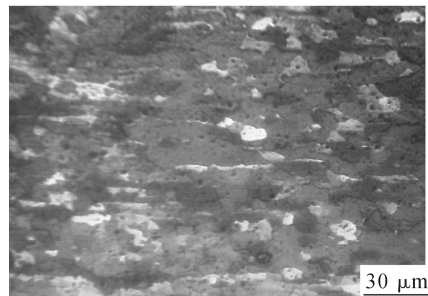
### 2.1 结果分析

#### 2.1.1 晶粒细化分析

利用倒置金相显微镜观察经过加工和未加工的晶粒图,如图4(a)和图4(b)所示。从图中可以发现:经过搅拌头搅拌的区域晶粒尺寸约为 $9.5 \mu\text{m}$ ;而未经过搅拌头搅拌的区域晶粒尺寸约为 $12.8 \mu\text{m}$ ,可以明显看出经过加工的晶粒较之前均匀细化。



(a) 经过搅拌



(b) 未经过搅拌

图4 晶粒图

### 2.1.2 真实应力-真实应变分析

图5为高温拉伸试验所得到的载荷-位移( $P-L$ )曲线。由图5可知,试样在匀速拉伸过程中,载荷迅速达到最大,然后下降直至试样被拉断。试样在530℃时,拉伸位移最大。

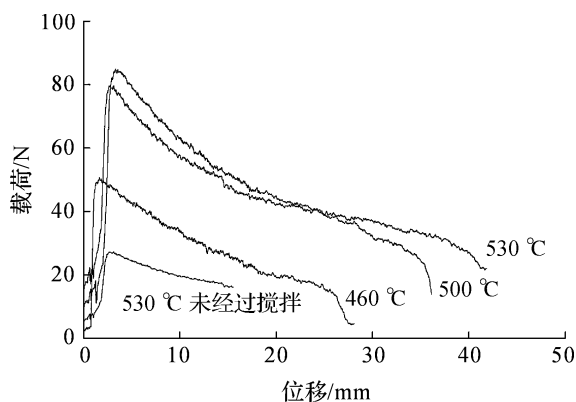


图5 载荷位移曲线

由于本次拉伸为匀速,故位移与时间成线性关系,载荷-位移( $P-L$ )可计算为载荷-时间的函数关系,以方便得到每一时刻的载荷,计算材料的名义应力 $\sigma_{\text{nom}}$ 、名义应变 $\epsilon_{\text{nom}}$ ,其计算公式为:

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{F}{A_0} \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{nom}} = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2)$$

其中: $\Delta l$ 是铝合金试样的长度变化量; $F$ 是载荷; $A_0$ 是试样的初始载荷面积。

由真实应变 $\epsilon_{\text{true}}$ 、真实应力 $\sigma_{\text{true}}$ 与名义应变 $\epsilon_{\text{nom}}$ 、名义应力 $\sigma_{\text{nom}}$ 公式可得:

$$\epsilon_{\text{true}} = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln(1 + \epsilon_{\text{nom}}) \quad (3)$$

$$\sigma_{\text{true}} = \frac{F}{A} = \frac{F}{A_0 \frac{l_0}{l}} = \sigma_{\text{nom}} (1 + \epsilon_{\text{nom}}) \quad (4)$$

计算上述公式得到的真实应力-真实应变关系并绘制函数曲线,如图6所示。从图6中可以看出,在各个温度下的应力应变曲线都出现了应力硬化、应变硬化与应变软化平衡及应变软化过程。在应变开始时,应力随着真实应变的增加迅速上升,到达最高点后,随后出现一个应变硬化与应变软化动态平衡的稳态过程,最后真实应力迅速下降。

### 2.1.3 延伸率分析

试样经过高温拉伸试验后试样的延伸率情况如图7所示。从图7中可以看出在初始应变速率为 $3 \times 10^{-3}/\text{s}$ 。搅拌摩擦加工能明显增加材料的塑性。

在530℃条件,加工后试样的延伸率能达到未加工延伸率的2.6倍。

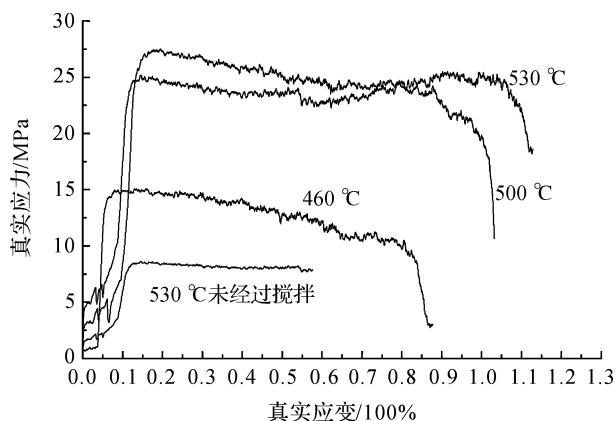


图6 真实应力应变曲线

应变速率 $=3 \times 10^{-3}/\text{s}$

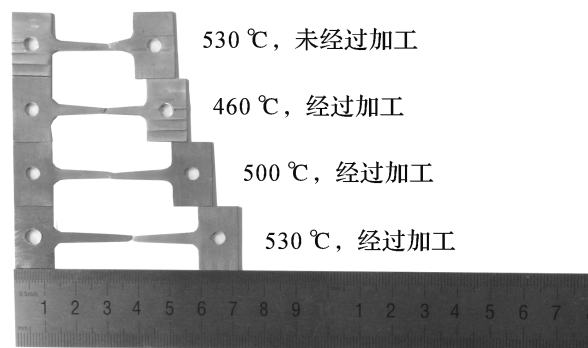


图7 高温拉伸试验后试样的延伸率

## 2.2 讨论

AA5083铝合金经过搅拌摩擦加工后,晶粒得到细化,尺寸从 $12.8 \mu\text{m}$ 下降到 $9.5 \mu\text{m}$ ,降低了25.8%,晶界变多,晶粒位错变形阻力就越大,造成材料屈服强度和抗拉强度提高。从图6的曲线来看,在530℃下,晶粒细化后的材料屈服强度是未被搅拌材料的3倍,抗拉强度提高了2.1倍。Hall-petch公式可以表示为: $\sigma_s = \sigma_0 + Kd^{-1/2}$ ,其中: $\sigma_s$ 是材料的屈服强度, $\sigma_0$ 和 $K$ 是常数, $d$ 是晶粒直径。<sup>[11-12]</sup>根据该公式,材料的屈服强度与晶粒尺寸倒数的平方根成正比。因此,晶粒细化能改善材料的强度。

材料在搅拌后,晶粒变小的同时,也更加均匀,有利于减少晶粒滑动和转动阻碍。在变形过程中,晶粒的滑移与转动相配合,能有效防止裂纹产生,提高材料延伸率,从而使材料具有超塑性。在本研究的拉伸实验中,材料的最大真实应变达110%,与未搅拌试样相比,延伸率显著提高。

### 3 结 论

本文采用搅拌摩擦加工技术对 AA5083 铝合金板材进行多道次搅拌加工,获得了晶粒细化的铝合金材料;通过分析其晶粒尺寸、延伸率以及真实应力和真实应变以研究材料超塑性,结果发现:

a) 材料在进行高温拉伸时会出现应力硬化、应变硬化与应变软化平衡以及应变软化三个阶段。

b) 通过高温拉伸试验的数据对比发现,试样在初始应变速率为  $3 \times 10^{-3}$  /s,温度为 530 °C 时所对应的延伸率最大。

c) 相比于未经过加工的试样,经过多道次搅拌摩擦加工后试样的平均晶粒尺寸降低到 9.5  $\mu\text{m}$ ,在高温拉伸时的延伸率是未加工试样的 2.6 倍。

#### 参考文献:

- [1] 任峻,陶钦贵,马颖,  $\text{B}_2\text{O}_3$  替代  $\text{KBF}_4$  用氟盐法制备 Al-Ti-B 晶粒细化剂的研究[J]. 稀有金属, 2016, 40(2): 188-192.
- [2] 汤皓元,陈越,冯绍棠,等. Al-5Ti-1B 晶粒细化剂添加量和细化时间[J]. 热加工工艺, 2016, 45(1): 65-71.
- [3] 郭晓亮,周生刚,竺培显,等. 功率超声对合金熔体处理和晶粒细化的研究现状[J]. 热加工工艺, 2016, 45(7): 6-10.
- [4] 黄姝珂,李敬民,孟玉堂,等. 基于等通道转角挤压的 V-5Cr-5Ti 合金晶粒细化机理[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(9): 2313-2316.
- [5] 杨明刚,胡艳华,余占军. 循环热处理超细化 38CrSi 钢晶粒[J]. 金属热处理, 2015, 40(1): 128-130.
- [6] 高雪,张郑,王文,等. 搅拌摩擦加工 AZ31 细晶镁合金超塑性行为[J]. 稀有金属材料与工程, 2016, 45(7): 1855-1860.
- [7] JOHANNES L B, CHARIT I, MISHRA R S, et al. Enhanced superplasticity through friction stir processing in continuous cast AA5083 aluminum [J]. Materials Science & Engineering A, 2007, 464(1): 351-357.
- [8] GARCL'A-BERNAL M A, MISHRA R S, et al. High strain rate superplasticity in continuous cast Al-Mg alloys prepared via friction stir processing[J]. Scripta Materialia, 2009, 60(10): 850-853.
- [9] CHARIT I. Evaluation of microstructure and superplasticity in friction stir processed 5083 Al alloy [J]. Journal of Materials Research, 2004, 19(11): 3329-3342.
- [10] MISHRA R S, DE P S, KUMAR N. Friction stir Welding and Processing [M]. Switzerland: Springer international publishing, 2014: 264-272.
- [11] PETCH N J. The cleavage strength of polycrystals[J]. J Iron Steel Inst, 1953, 174(1): 25-28.
- [12] HALL E O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results [J]. Proceedings of the Physical Society B, 1951, 64(9): 747-753.

## Superplastic Study of AA5083 Aluminum Alloy Processed by Multi-Pass Friction Stir Technology

YE Ben, DING Qiang, QIN Wei, ZHOU Jiang, LI Hongjun

(Faculty of Mechanical and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** 5083 Aluminum Alloy was processed by multi-pass friction stir technology to refine grain. The crystal structure and micromorphology of sample materials were researched by inverted metallurgical microscope, and then the specimens were experimented with the high temperature tensile. We researched the superplastic properties of specimens by the analysis of elongation rate, stress and strain. The results show that grain refinement is uniform by use of the multi-pass friction stir processing; after the experiment of high temperature tensile, the elongation rate is 2.6 times as much as while it is not processed. Meanwhile the low cost of multi-pass friction stir processing has the condition of processing Aluminum Alloy material in a large area, and makes this processing method have a good application prospect in the processing of grain refinement of Aluminum Alloy.

**Key words:** 5083 aluminum alloy; friction stir processing; grain refinement; superplastic

(责任编辑: 康 锋)