

# 8090 铝-锂合金的热形变行为<sup>①</sup>

贺维勇 高国忠 陈继志 侯风华

(中国科学院金属研究所)

## 摘 要

通过热顶锻和热拉伸试验,研究了8090铝-锂合金的热形变行为。结果表明,该合金的可锻性较低,一次形变量不宜过大,铸态下的最佳变形温度在400~500℃之间;热形变过程为动态回复型,其晶粒在热形变过程中一方面被拉长,另一方面又发生回复并形成许多亚晶界。用透射电镜对不同形变量样品的薄膜观察结果表明,回复过程中,变形晶粒内出现位错聚集,并最终形成亚晶界。

**关键词:** 8090铝-锂合金 热形变行为 拉伸 顶锻

铝-锂合金的比强度和比模量高,是制造航空部件的新材料之一。该类合金的组成比较复杂,熔炼和加工的要求也较严。在本文之前,已有不少研究者对其冶炼、加工及有关性能做了大量工作<sup>[1,2]</sup>,但对其热形变行为及机制研究尚少。本文通过热顶锻和热拉伸试验,结合电镜观察,较深入地研究了该合金的热形变行为及组织变化。

## 1 实验过程

用真空感应炉在氩气保护下熔炼8090铝-锂合金,并浇注成重约4 kg的铸锭,其化学组成(wt.-%)为: Al-2.5 Li-1.3 Cu-1.1 Mg-0.16 Zr。再在460℃保温24 h后升到510℃保温10 h进行均匀化热处理。一部分加工成 $d 14.6 \text{ mm} \times 22 \text{ mm}$ 的顶锻试样,该试样的轴向与锭的轴向平行;另一部分锻成 $d 15 \text{ mm}$ 的园棒。然后加工成 $d 10 \text{ mm} \times 130 \text{ mm}$ 的拉伸试棒。顶锻试验是在不同的温度下进行的,每次试验的应变量均用垫圈控制;锻后观察试样的开裂情况及组织变化。拉伸试样先经530

℃保温1 h水淬,再在真空下加热至550℃保温3 min,以1℃/s的速度冷却到试验温度进行拉伸,至颈向应变量达0.5为止。试验温度分别为550、500、450、400和350℃。为了解形变过程,将不同应变量的拉伸样品水冷后制成薄膜,用电镜观察位错变化。并用金相显微镜观察应变量恒定、应变速率和形变温度不同时的样品组织变化。

## 2 实验结果及分析讨论

### 2.1 顶锻试验

#### 2.1.1 顶锻试样的宏观状况

铸态顶锻试样的宏观状况如图1示。由其左图见,在500℃下顶锻,当一次应变量 $> 0.87$ (相当于 $\Delta h/h = 54\%$ )时出现宏观裂纹;由其右图可见,一次应变量均为 $\Delta h/h = 52\%$ 、形变温度 $\leq 400^\circ\text{C}$ 时出现宏观裂纹;形变温度达550℃时出现过烧现象。

从不同温度、不同一次形变量的顶锻试样的开裂统计情况(图2)可以看出,形变温度在400~500℃时,一次形变量可达 $\varepsilon = 0.78$ (相当

<sup>①</sup>于1992年6月15日收到

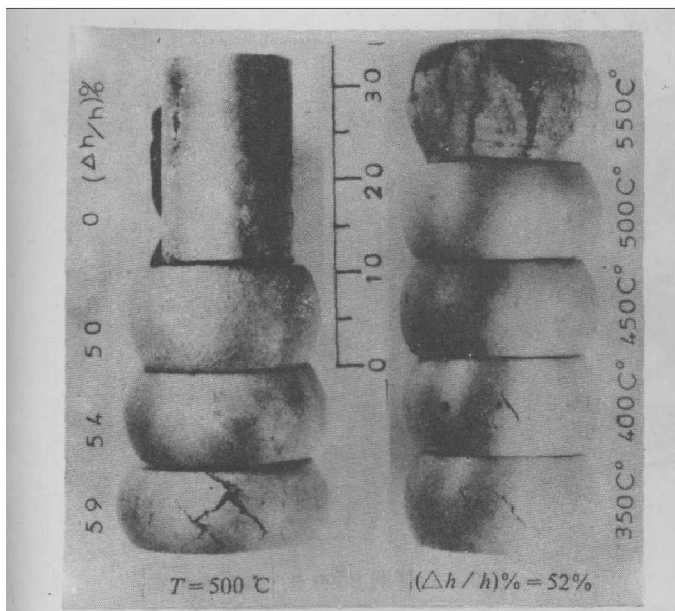
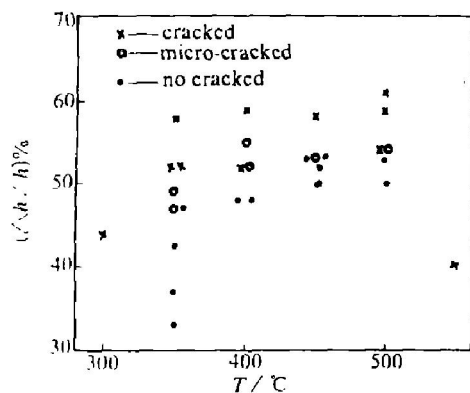


图1 顶锻试样的宏观状况

图2 形变温度  $T$  和形变量  $\Delta h/h$  对试样开裂的影响

于  $\Delta h/h = 50\%$ ), 甚至更高; 而在低于  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  或高于  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 一次应变量不到  $0.78$  就开裂了。这说明在  $400\sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$  之间合金的热塑性比较好, 特别是在  $450\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 合金的热塑性最好, 一次应变量达  $\varepsilon = 0.85$  时也没有产生宏观裂纹。

### 2.1.2 顶锻试样的显微组织

温度分别为  $350$ 、 $400$ 、 $450$ 、 $500$  和  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 未变形样品的显微组织示于图3。它表明随着温度的升高, 存在于晶界的第二相减少, 到  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  时已基本看不到; 在较短的保温时间内, 晶粒无明显长大趋势, 但当保温时间

大于  $15\text{ min}$  后  $550\text{ }^{\circ}\text{C}$  试样的晶粒大小已有明显的长大趋势。一次应变量为  $0.78$ 、 $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  顶锻后的合金显微照片明显表明晶粒被强烈地压扁, 晶界上第二相被压碎, 并成链状排列(见图4); 形变裂纹产生于晶界中第二相处, 并沿晶界扩展(图5), 它表明晶界中第二相的存在对变形过程不利。

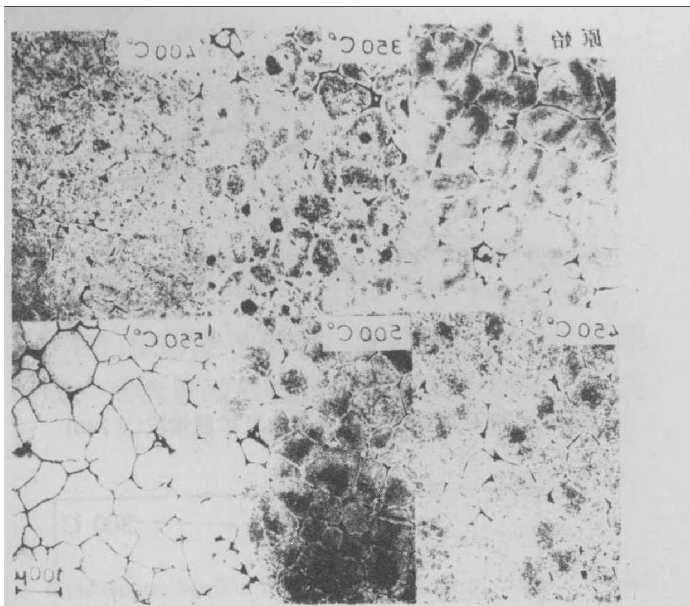


图3 不同温度下, 未变形样品的显微组织

图4  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  顶锻后的显微组织( $\times 85$ )

## 2.2 拉伸试样的热变形行为

### 2.2.1 合金的热变形行为

图6给出的该合金在不同温度下的真应力-真应变曲线, 都是典型的动态回复曲线。随

试验温度的降低, 合金的流变应力明显增加。由 350 °C 降到 300 °C 时, 流变应力增加的幅度相当于由 550 °C 降到 350 °C 时的增加幅度, 可见在较低温度时合金难于变形。

在 550 °C 下做拉伸试验时, 其应变速率和屈服应力的关系示于图 7。可见, 屈服应力随应变速率的增加而增加。

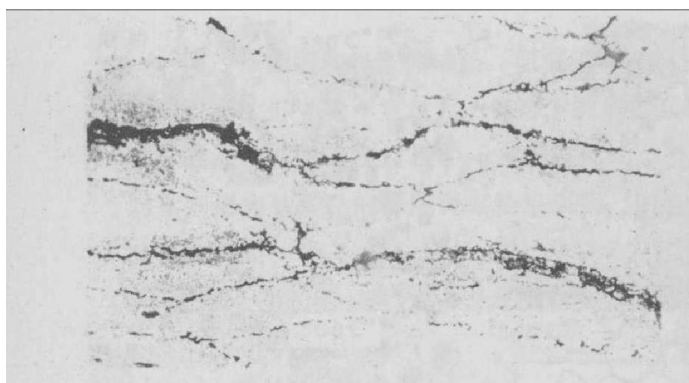


图 5 500 °C 顶锻时裂纹的发生及扩展情况( $\times 240$ )

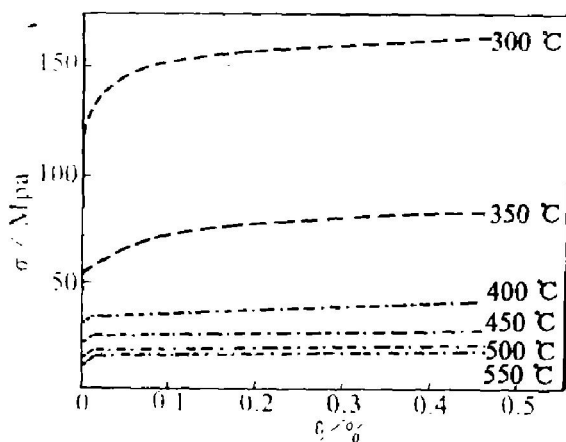


图 6 合金在不同温度的真应力  $\sigma$ -真应变  $\varepsilon$  曲线

### 2.3 合金的显微组织变化

图 8 给出了该合金在相同形变速率、不同温度下, 和相同形变温度、不同形变速率下的显微组织变化。可见, 随变形速率的降低或形变温度的升高, 合金的晶粒均变细。

### 2.4 合金热变形行为的电镜分析

500 °C 下, 应变速率为  $10^{-3} \text{ s}^{-1}$  时, 经不同应变量拉伸后的试样电镜分析结果如图 9。可见, 随应变量的增加, 回复后, 合金中的位错密度增加, 并产生聚集现象。随应变量进一步增加, 在回复过程中, 位错聚集成位错链,

形成了亚晶界。

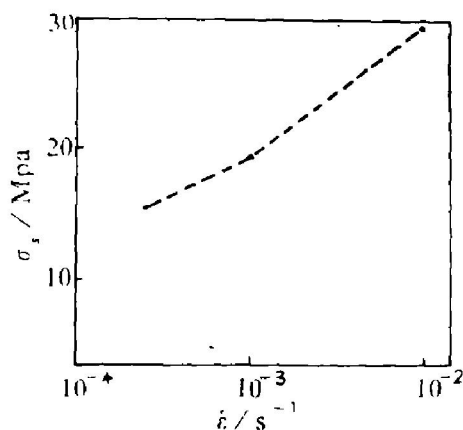


图 7 500 °C 拉伸时 8090 铝-锂合金的屈服应力  $\sigma_{0.2}$  与应变速率  $\dot{\varepsilon}$  的关系

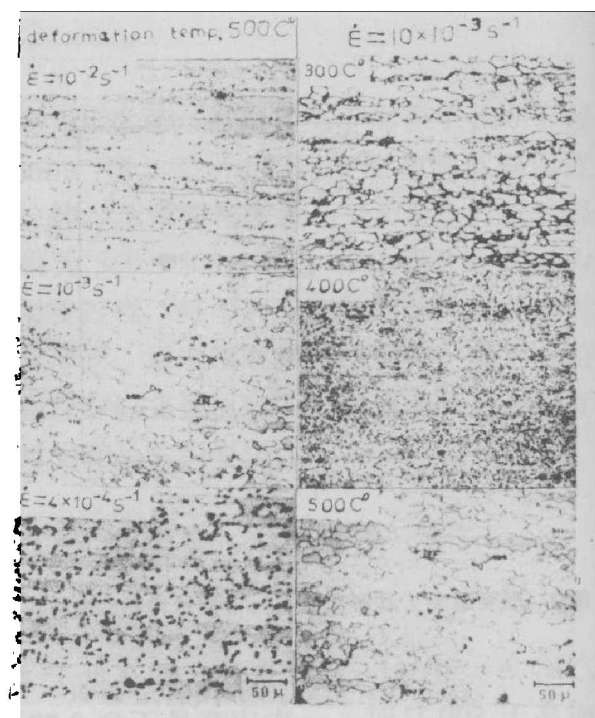


图 8 变形速率  $\dot{\varepsilon}$  和形变温度对显微组织的影响

### 2.5 讨论

从该合金的形变组织(图 4)可以看出, 形变时, 晶粒首先沿着易滑移面和易滑移方向滑移, 使位错密度增加。随后晶粒伸长, 在回复过程中, 位错聚集形成亚晶界。此时, 亚晶界由原晶界开始向晶内延伸(图 9), 直到与另一晶界或与另一晶界形成的位错链联合, 产生动态回复。

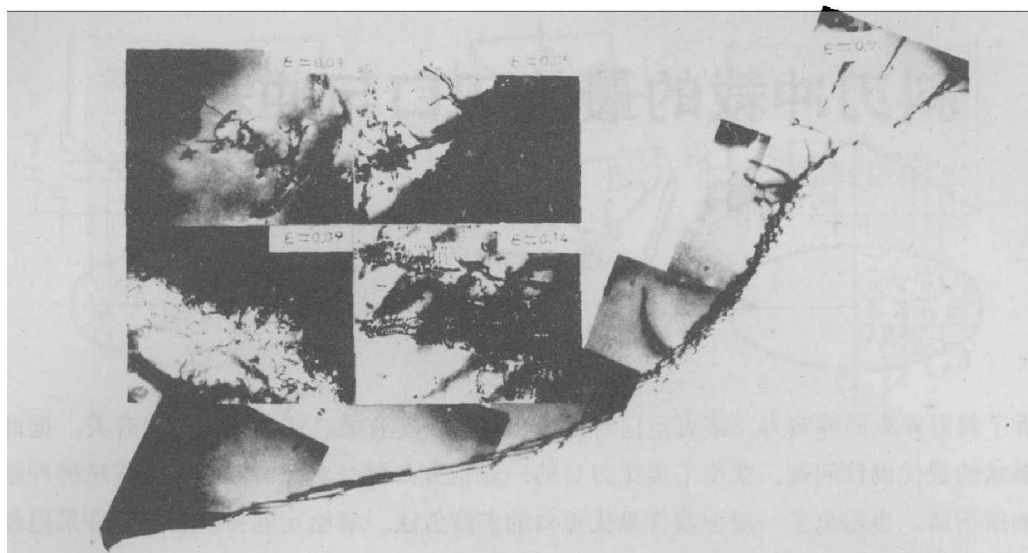


图9 不同应变量下的试样电镜分析结果

### 3 结论

(1) 8090 铝-锂合金的最佳热形变温度为  $400 \sim 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 一次应变值允许达 0.85 左右, 在低于  $400\text{ }^{\circ}\text{C}$  或高于  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 合金的可锻性差易产生裂纹;

(2) 该合金的热形变行为属动态回复型, 回复过程中生成亚晶界, 亚晶界将变形晶粒划分成若干亚晶粒;

(3) 在回复过程中, 亚晶界由位错的聚集构成, 其数量随形变晶粒伸长的程度不同而各异。

#### 参考文献

- 1 Katakashi Mnikura *et al.* 3<sup>rd</sup> Int. Conf. Al-Li Alloys, Paris, 1985, 213.
- 2 Ahrens, T *et al.* 5<sup>th</sup> Int. Conf. Al-Li Alloys, Virginia, 1989, 386.