

SiC_p/LY12复合材料的超塑性变形特性^①

林 彬 丁伟民

(上海交通大学复合材料研究所, 上海 200030)

摘 要 对 SiC_p/LY12 复合材料在超塑性变形前后的内部组织、超塑性断裂延伸率、 m - δ 关系进行了研究, 并分析了其原因。

关键词 复合材料 超塑性 变形特性

金属基复合材料比弹性模量高, 比强度高, 耐磨性好, 受到广泛青睐。超塑性成形可克服该材料因塑性差而难以进行加工的缺点, 引起了人们的极大兴趣, 国内外均在开展研究^[1]。本文研究该材料在超塑变形前后的组织性能变化, 可为超塑性成形工艺的选用提供理论依据。

1 实验材料和试验方法

本次实验采用 LY12 铝合金为基体, 以粒径 10 μm 的 SiC 颗粒为增强剂, 在配比为 10% 的条件下, 用搅拌铸造法制成 SiC_p/LY12 复合材料铸坯, 再经热挤压制成 SiC_p/LY12 复合材料棒料。将棒料加工成如图 1 所示的超塑拉伸试样。在 MTS 试验机上进行超塑拉伸, 超塑拉伸温度为 520℃, 初始应变速率为 $8.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

利用光学显微镜观察超塑拉伸变形前后的组织变化。用截线法估算晶粒大小。用扫描电镜观察断口附近的组织变化及断口形貌。

2 实验结果与分析

2.1 超塑拉伸变形前后晶粒大小比较

图 2(a) - (d) 是变形前的热挤压棒料的显

微组织, 挤压比分别为 55, 70, 85, 100。可见 LY12 基体为细小的等轴晶粒, 其上较均匀地分布有 SiC 颗粒。挤压比越大, 晶粒越细, SiC 颗粒也越细小均匀。图 3(a) - (d) 是相应试样在 520℃ 初始应变速率 $8.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 下超塑变形后的显微组织。它们的延伸率分别为 167%, 170%, 202%, 230%。可见经超塑变形后仍保持等轴晶组织, 但晶粒大小有了变化。用截线法估算的变形前后的晶粒尺寸如表 1 所示。

图 1 超塑拉伸试样(单位: mm)

从表 1 可以看出, 经过超塑变形后, 晶粒均有不同程度的长大, 变形前晶粒越细小的试样, 延伸率越大; 但变形后, 晶粒长大也越明显。晶粒长大受许多因素(如应变速率、变形温度等)控制。本次实验所用的应变速率和变形温度是固定不变的, 但不同挤压比的材料其超塑拉伸变形延伸率不同, 延伸率大则变形时间长, 其晶粒长大程度也大。但与其它经超塑

表 1 超塑变形前后的晶粒尺寸

① 收稿日期: 1995-04-05; 修回日期: 1995-12-12

编号	变形前 晶粒尺寸/ μm	变形后 晶粒尺寸/ μm	延伸率 / %
1	6.4	6.85	167
2	6.0	7.12	170
3	4.5	7.18	202
4	3.27	8.80	230

图2 不同挤压比的挤压态组织, 400×
(a) — 挤压比为55; (b) — 挤压比为70;
(c) — 挤压比为85; (d) — 挤压比为100

图3 不同挤压比下试样的超塑性
变形组织, 400×
(a) — 挤压比为55; (b) — 挤压比为70;
(c) — 挤压比为85; (d) — 挤压比为100

图4 断口附近 SEM 照片, 15k×
(a) — 挤压比100, 延伸率170%;
(b) — 挤压比100, 延伸率230%

变形后的铝合金相比, 在相近试验条件下, SiC_p/LY12复合材料的晶粒长大程度较小^[2]。

图4(a)、(b) 分别是延伸率为170%、230%的试样超塑变形后断口附近的扫描电镜照片。从图4可以看出, 超塑变形后, 晶粒有呈圆弧化、尖角消失的倾向, 并且晶界较宽; 晶粒相接的三角晶界处出现空洞和裂纹。这些在其它铝合金超塑变形后的金相组织中也可以看到^[3]。

2.2 SiC 颗粒在超塑变形过程中的作用

从图2~ 4可以看出, 经超塑拉伸变形后, SiC 颗粒本身变化不大。这是因为超塑变形不同于挤压变形, 其内部组织受力较小, 不至于使 SiC 颗粒破碎变细, 同时超塑性变形以及动态再结晶过程也不能明显地改变 SiC 颗粒的分布情况。但细小分散的 SiC 颗粒在超塑变形过程中作用颇大。前面已指出, SiC_p/LY12 复合材料与其它铝合金在相近超塑变形条件下的晶粒长大程度远较其它铝合金小。这是因为细小 SiC 颗粒的存在有效地阻碍了超塑变形过程中晶粒的长大, 稳定了材料在高温长时间变形的细晶组织。这一作用可从 SiC 颗粒的均匀分布情况得到证实。图4(a) 样品中 SiC 颗粒分布不均匀, 在颗粒贫乏的基体上晶粒尺寸就较大, 而材料的延伸率只有170%。图4(b) 样品中 SiC 颗粒分布相对较均匀, 晶粒尺寸较小, 延伸率达230%。因此, 细化晶粒, 提高超塑延伸率,

要力求使 SiC 颗粒分布均匀; 其措施之一是在搅拌铸造过程中搅拌均匀, 凝固时快速冷却。二是采用大变形热挤压^[4]或其他热变形方式使 SiC 颗粒破碎细化并分布均匀。

2.3 m - δ 关系及 δ 的预测

应变速率敏感指数 m 与延伸率 δ 间存在一定关系。图 5 是不同温度下的 m - δ 关系曲线。500、510、530℃ 下的 m 值均低于 520℃ 下的 m 值。500℃ 时 m 值最低, m - δ 曲线为下降式; 510℃ 先略为上升, 然后下降, 基本上是下降的; 520℃ 是先上升后又下降, m 值也较高; 530℃ 下的 m - δ 关系曲线是先略微下降后又上升, 大势是上升的。当延伸率在 40% 时, 不同温度的 m 值均在 0.37 ~ 0.44 间。其中 510℃ 和 520℃ 的 m 值较高, 为 0.44 左右。在 520℃、延伸率 90% 时 m 值最大, 达 0.7 左右, 说明材料超塑变形的最佳温度应在 520℃ 附近。温度过高, 变形过程中晶粒易长大, 过低又不利于晶粒晶界的滑动和转动, m - δ 曲线均不理想。

在温度固定的条件下, 刘勤^[5] 导出的 m - δ 关系式如下:

$$\delta = [C\epsilon^{(m_1 - m_0)} - 1] \times 100\%$$

式中 C 为与材料有关的常数, m_0 为 m - δ 曲线外推至 $\delta = 0$ 时的值。根据他的理论, 本次实验情况 $C = 1$ 。将图 5 中 520℃ 曲线外推至 $\delta = 0$ 时, $m_0 = 0.235$ 或 0.76(见图 6), 选 0.76。

本次实验是恒定夹头速度, 故应变速率是变的。初始 $\epsilon = 8.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 平均 $\bar{\epsilon} = 5.56 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 即 $3.34 \times 10^{-2} \text{ min}^{-1}$ 。对 520℃ 曲线, 断裂时 m 值没有测得。临近断裂时的 m 值

图 6 外推法求 m 值

为 0.44。根据趋势, 断裂时 m 值应低于 0.44。这里取 0.44 代入式中进行估算:

$$\begin{aligned} \delta &= [\epsilon^{(m_1 - m_0)} - 1] \times 100\% \\ &= [(3.34 \times 10^{-2})^{(0.44 - 0.76)} - 1] \times 100\% \\ &= 197\% \end{aligned}$$

计算结果与实验所得平均值 189.7% 十分接近。

2.4 超塑变形断口分析

图 7 为应变速率 $\epsilon = 8.33 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, 温度为 520℃ 下的超塑拉伸断口形貌, 前者延伸率为 169%, 后者为 230%; 对比其断口特征, 可发现延伸率高的试样, 拉伸断口呈韧窝和撕裂形貌。基体中 SiC 颗粒分布较均匀, 结合良好。延伸率低的拉伸断口大部分呈沿晶状, 韧窝少而浅。SiC 颗粒分布不太均匀, 有些 SiC 颗粒分布集中的区域, 出现较多孔洞。

该材料的断裂是由孔洞处裂纹扩展而断裂的。孔洞形核多半在 SiC 颗粒与基体交界面或

图 5 不同温度下 m - δ 关系曲线

1—500℃; 2—510℃; 3—520℃; 4—530℃

图 7 断口形貌, 800×

(a) 一挤压比为 100, 延伸率为 169%;
(b) 一挤压比为 100, 延伸率为 230%

晶界处萌生。三角晶界的地方更易出现。显示出超塑性变形的特征。

3 结论

超塑拉伸变形后, 热挤压成形的 SiC_p/LY12 复合材料同大多数超塑性铝合金一样, 内部组织发生了一定的变化。根据挤压比的不同, 晶粒有不同程度的长大, 晶界变宽, 在接近断裂时晶界出现空洞和裂纹。但由于 SiC 颗粒在超塑变形过程中阻碍晶粒长大的作用, 晶粒长大程度比大多数超塑性铝合金要小得多。

超塑变形的 m - δ 关系随温度不同呈不同的方式, 在 520℃ 条件下, m - δ 曲线是 m 先上升

再下降的一般式, 且此时 m 值比其它温度下较高, 同其它超塑性合金一样, 可以利用 m - δ 关系式预测断裂时的延伸率。

超塑变形后断口形貌反映了延伸率的大小, 延伸率大的韧窝多, 延伸率小的沿晶断口明显。

参考文献

- 1 海锦涛. 锻压技术, 1992, 6: 36- 40.
- 2 曾小平. 上海交通大学硕士论文, 1993: 2.
- 3 Naziratal H. Acta Metall, 1975, 23: 489.
- 5 丁伟民. 见: 复合材料学术会议论文集, 1992: 2.
- 6 刘 勤. 金属的超塑性. 上海: 上海交通大学出版社, 1989.

CHARACTERISTICS OF SUPERPLASTIC DEFORMATION OF SiC_p/LY12 COMPOSITE

Lin Bing, Ding Weiming

Composites Research Institute,

Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200030

ABSTRACT The microstructure, superplasticity fracture, elongation and m - δ relation of SiC_p/LY12 composite before and after superplastic deformation were studied. The cause of superplasticity was also analysed.

Key words SiC_p/LY composite superplasticity deformation characteristic microstructure

(编辑 彭超群)