

图 1 为粒子图象电影测速技术测量二维后向台阶起动涡速度场测量实验装置示意图。示踪粒子为直径 $20\mu\text{m}$ 的铝粉，氩离子激光器做光源。将连续输出的激光光束调制成周期性脉冲片光源入射到流场所测区域形成流场截面。采用快速航空 IV 型照相机连续记录流场截面内粒子图象。在水流起动过程中，激光脉冲片光源周期性入射到所测流场区域；同时照相机连续拍摄，即可获得起动涡发展过程中不同瞬态的两次或多次曝光 PIV 底片。要保证每帧 PIV 底片内至少有两次曝光，照相机快门开启时间 τ_c 与激光脉冲序列的周期 T 则需满足下式

$$\tau_c = NT \quad (N \geq 2) \quad (1)$$

PIV 底片内粒子图象曝光次数增多可增加杨氏条纹图象的尖锐度，但曝光次数也不能太多，否则会增加流场速度测量的时间和空间平均效果。

2 实验结果

图 2 为用上述方法拍摄的二维后向台阶起动涡 PIV 底片，底片内粒子图象有三次曝光。图 3 是由 PIV 底片获取的杨氏条纹图象。图 4 为采用逐点杨氏条纹法^[2]得到的某瞬时速度场，详细结果见文献[2]。

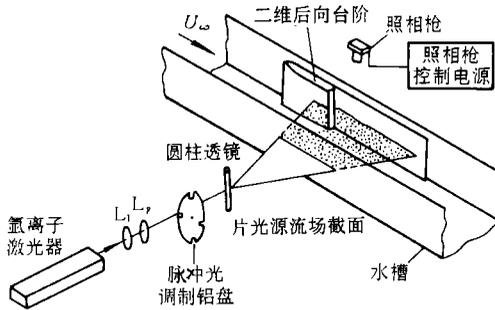


图 1 实验装置示意图

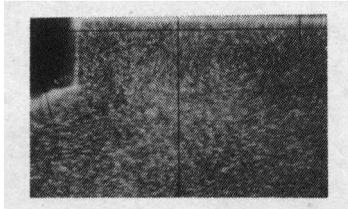


图 2 电影测速技术拍摄的 PIV 底片

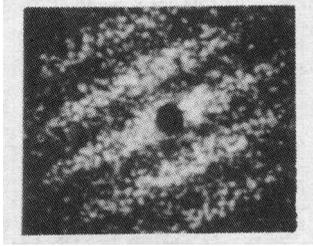


图 3 杨氏条纹图象

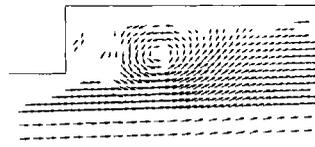


图 4 后向台阶起动涡速度场

参 考 文 献

1 Shen G-X, Ma G-Y. White Light Bubble Image Velocimetry. Int Conference on Exp Fluid Mech, 1991: 17~21
 2 马广云. 瞬态二维速度场测试技术及其初步应用. 北京航空航天大学博士论文, 1992.

技术简讯

Al-Li-Cu-Mg-Zr 合金拉伸断裂行为的扫描电镜原位观察

甄 良 茅建富 孙东立 杨德庄

(哈尔滨工业大学金属材料及工艺系, 哈尔滨, 150006)

SEM IN SITU OBSERVATION OF THE TENSILE FRACTURE BEHAVIOR IN AN Al-Li-Cu-Mg-Zr ALLOY

Zhen Liang, Mao Jian-fu, Sun Dong-li, Yang De-zhuang

(Department of Metal Material and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150006)

1991年6月26日收到, 1993年1月8日收到修改稿

铝-锂基合金具有密度低而比强度和比刚度高等优异性能,为探索新型的航空航天用金属结构材料提供了新的可能^[1, 2]。其在发展中所遇到的主要障碍是塑性低和韧性差^[3]。目前主要通过发展 Al-Li-Cu-Mg-Zr 系五元合金,引入新的强化相如 T_1 相、 S' 相等,分散 δ' 相所引起的共面滑移。本文通过在扫描电镜下进行动态拉伸,很好地完成了这类五元合金中裂纹萌生及扩展的实验验证。所用合金为用铸锭生产的 Al-1.94Li-2.36Cu-0.84 Mg-0.073Zr 五元合金板材。在 KNO_3 盐浴中经 530°C 固溶处理 30min 后水淬,立即于 190°C 时效,得到不同时效状态的试样。再将试样机械减薄至 0.5mm 左右,抛光后在 S-570 型扫描电镜上进行拉伸,原位观察不同时效状态试样中裂纹的萌生及扩展过程。

1 试样状态

(1) 固溶淬火态试样,拉伸应变超过一定值后,在晶内首先出现平直的滑移带。随着拉伸应变的增大,滑移带变得越来越粗大,并出现交叉滑移。塑性变形达到一定程度后,在夹杂物及粗大滑移带交叉处开始萌生裂纹。应变增大,裂纹穿晶扩展,见图 1 (a) 及图 1 (b),形成韧窝加阶梯混合型穿晶断口。

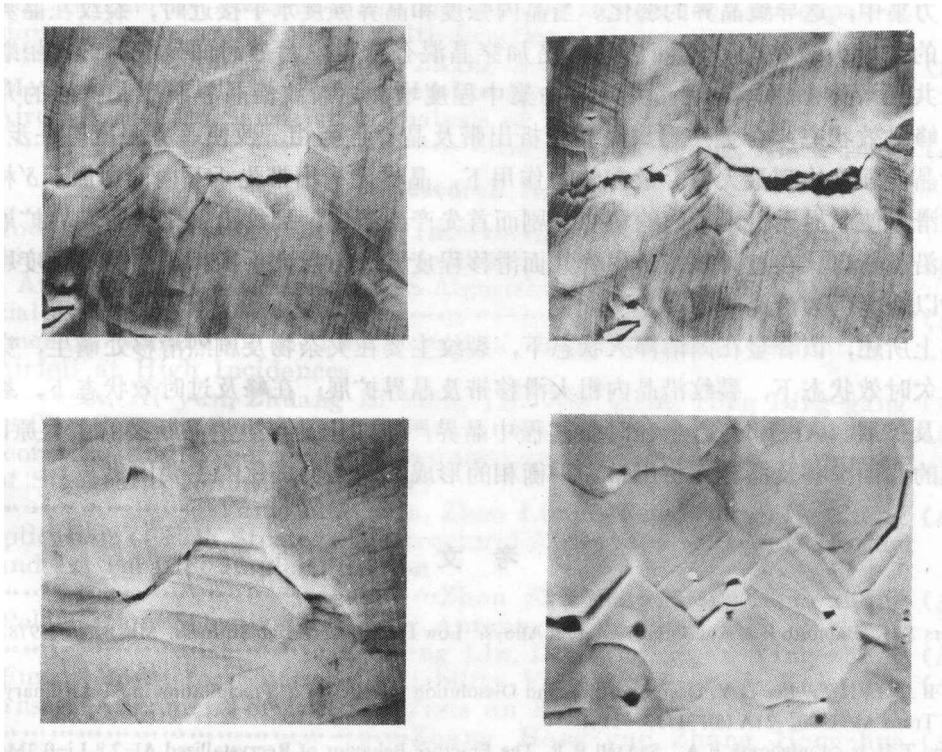


图 1 各种时效状态试样裂纹扩展情况 $\times 500$

- (a) 及 (b) 固溶淬火态试样,裂纹在夹杂物及剧烈滑移处萌生并沿粗大滑移带扩展;
 (c) 欠时效 ($190^\circ\text{C} / 10\text{h}$) 试样,裂纹在粗大滑移带与晶界交叉处萌生;
 (d) 峰时效 ($190^\circ\text{C} / 100\text{h}$) 试样,裂纹在晶界处萌生并扩展

(2) 欠时效 (190℃ / 10h) 试样在拉伸初始阶段也出现平直滑移带, 应变增大时滑移带变粗, 并在尚未出现交叉滑移时已开始萌生裂纹 (图 1c)。裂纹萌生部位主要为夹杂物及粗大滑移带与晶界交叉处。在晶内夹杂物处虽然易于萌生裂纹, 但一般不能扩展。裂纹主要沿晶界及粗大滑移带扩展, 最终形成沿晶加穿晶混合断口, 其中穿晶部分主要为阶梯型。

(3) 峰时效与过时效试样的断裂方式基本相同。晶内的滑移带还不很明显时, 裂纹即已经在晶界处萌生; 应变增大时, 裂纹完全沿晶界扩展, 见图 1 (d), 形成沿晶断口。沿晶断口上可观察到明显韧窝。

2 状态分析

(1) 固溶淬火状态 尽管已析出 δ' 相^[4], 但由于其体积分数很小, 强化作用弱, 故晶内强度低于晶界强度。因此在外加应力作用下, 裂纹主要在晶内萌生。裂纹沿滑移带扩展时, 相互平行的滑移面上的微裂纹通过撕裂两滑移面之间的金属而扩展和连接, 形成阶梯型穿晶断口。在夹杂物处萌生的裂纹, 以微孔聚集长大方式连接和扩展, 则形成韧窝型穿晶断口。

(2) 欠时效状态 δ' 相长大导致晶内强度提高。相反, δ' 相引起的共面滑移在晶界处产生应力集中, 这导致晶界的弱化。当晶内强度和晶界强度水平接近时, 裂纹在晶界和晶内萌生的几率大致相同, 从而形成沿晶加穿晶混合断口。时效时间延长时, δ' 相继续长大, 使共面滑移加剧, 导致晶界处应力集中程度增加, 裂纹沿晶界萌生和扩展的几率增大。到峰时效状态, 合金中形成晶界无析出带及晶界平衡相, 致使晶界强度进一步降低。而此时晶内强度达到最大值。故在外力作用下, 晶界无析出带先于晶内而屈服。 δ' 相引起的共面滑移使晶界无析出带内的塑变加剧而首先产生裂纹。裂纹沿弱化了晶界扩展则形成完全沿晶断口。在过时效态, 尽管共面滑移程度低, 但粗大平衡相等使晶界强度剧烈下降, 所以合金仍为沿晶断裂。

综上所述, 该合金在固溶淬火状态下, 裂纹主要在夹杂物及剧烈滑移处萌生, 穿晶扩展; 在欠时效状态下, 裂纹沿晶内粗大滑移带及晶界扩展; 在峰及过时效状态下, 裂纹沿晶萌生及扩展。Al-Li 基合金在时效过程中晶界严重弱化是产生沿晶断裂的主要原因。 δ' 相引起的共面滑移及晶界无析出带和平衡相的形成都是晶界弱化的主要因素。

参 考 文 献

- 1 Sanders T H, Balmuth E S. Aluminum-Lithium Alloys: Low Density and High Stiffness. Met Prog, 1978, 3: 32~37
- 2 Shaiu B J, Li H T, Lee H Y. Decomposition and Dissolution Kinetics of δ' Precipitation in Al-Li Binary Alloys. Metall Trans A, 1990, 21A (5): 1133~1141
- 3 Sanders T H Jr, Ludwiczak E A, Sawtell R R. The Fracture Behavior of Recrystallized Al-2.8 Li-0.3Mn Sheet. Mat Sci Eng, 1980, 43: 247~260
- 4 Gregson P J, Flower H M. Microstructural Control of Toughness in Al-Li Alloys. Acta Metall, 1985, 33(3): 527~537