



中间退火对 2A97 铝锂合金晶粒细化及超塑性的影响

刘 丽^{1,2,3}, 叶凌英^{1,2,3}, 邓运来^{1,2,3}, 张新明^{1,2,3}, 曾世宝^{1,2,3}, 孙大翔^{1,2,3}, 单朝军^{1,2,3}

- (1. 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083;
2. 中南大学 有色金属先进结构材料与制造协同创新中心, 长沙 410083;
3. 中南大学 有色金属材料科学与工程教育部重点实验室, 长沙 410083)

摘 要: 采用形变热处理法制备 2A97 铝锂合金细晶板材, 利用光学显微镜、透射电镜和高温拉伸等试验方法研究中间退火温度对板材晶粒细化和超塑性的影响。结果表明: 板材在室温轧制时, 当变形量达到 22% 时, 出现开裂, 随着轧制温度的升高, 开裂程度逐步缓解; 将开轧温度提高到 400 °C、轧制变形量达到 88% 时, 分别在 240、300 和 400 °C 进行中间退火 1 h, 可解决开裂问题。但退火温度对超塑性伸长率有很大影响, 当退火温度为 400 °C 时, 合金发生了明显部分再结晶, 位错密度大幅降低, 虽获得总变形量为 92% 的无开裂板材, 由于较多的形变储能被释放, 晶粒细化程度不高, 伸长率仅为 260%; 将退火温度降低到 240 °C 时, 合金内部仅发生了位错运动与重新组合, 保留了较高的位错密度, 晶粒得到细化, 伸长率高达 650%。

关键词: 2A97 铝锂合金; 中间退火; 形变热处理; 变形储能; 超塑性

中图分类号: TG166.3

文献标志码: A

Effects of intermediate annealing on grain refinement and superplasticity of 2A97 aluminum-lithium alloy

LIU Li^{1,2,3}, YE Ling-ying^{1,2,3}, DENG Yun-lai^{1,2,3}, ZHANG Xin-ming^{1,2,3}, ZENG Shi-bao^{1,2,3},
SUN Da-xiang^{1,2,3}, SHAN Zhao-jun^{1,2,3}

- (1. School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;
2. Nonferrous Metal Oriented Advanced Structural Materials and Manufacturing Cooperative Innovation Center, Central South University, Changsha 410083, China;
3. Key Laboratory of Nonferrous Materials Science and Engineering, Ministry of Education, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Fine-grained 2A97 alloy sheets were produced by thermo-mechanical processing. The effects of intermediate annealing temperature on the grain refinement and superplasticity were investigated by optical microscopy (OM), transmission electron microscopy (TEM) and high temperature tensile test. The results show that the fracture of sheet is observed when rolling at room temperature with a reduction of 22%. With increasing the rolling temperature, the degree of cracking gradually reduces. Non-fractured sheets can be obtained by enhancing the preheating temperature to 400 °C, and then intermediate annealing the sheets for 1 h at 240, 300 and 400 °C, respectively, when the rolling reduction reaches 88%. But the reheating temperatures have an obvious influence on the superplastic elongation. When the reheating temperature is 400 °C, the obvious recrystallization occurs, which reduces the density of dislocations. Though non-fractured sheets with a total reduction of 92% are obtained, the superplastic elongation only reaches 260%, because of more deformation stored energy released and low grain refinement. High density of dislocations and a superplastic elongation of 650% are obtained when the reheating temperature decreases to 240 °C, during which only the movement and reconfiguration of dislocations happen.

Key words: 2A97 aluminum-lithium alloy; intermediate annealing; thermo-mechanical processing; deformation stored energy; superplasticity

铝锂合金具有密度低、比强度高、比刚度大、良好的低温性能和耐腐蚀性能, 用其替代常规铝合金, 可使构件质量降低 10%~15%, 刚度提高 15%~20%^[1]。2A97 铝锂合金是 Al-Cu-Li 系脱溶强化型合金, 合金化程度高, 强度高, 是我国自主研发的一种新型合金, 在航空航天领域具有较好的应用前景^[2]。将超塑性技术应用于铝锂合金可以使复杂结构部件整体成型, 达到进一步减轻质量, 提高整体刚度, 减少装配时间和难度的目的^[3]。

实现超塑性一般要求材料具有 10 μm 以下的细晶组织, 获得细晶组织是实现超塑性成形的关键^[4]。细化铝锂合金晶粒的有效方法是形变热处理方法 (Thermo-mechanical processing, TMP), 其技术工艺路线为: 固溶处理 $\rightarrow$ 过时效 $\rightarrow$ 大压下量轧制变形 $\rightarrow$ 静态再结晶。通过对过时效后的样品进行大压下量轧制变形使在大尺寸第二相粒子 (约 1 μm) 周围形成强应变区, 在接下来的再结晶退火过程中, 这些强应变区域便可能成为再结晶的形核位置, 这个过程即为粒子激发再结晶形核 (Particle stimulated nucleation, PSN)^[5]。一般而言, TMP 方法要求轧制过程不断地增加合金的储能而不使其发生再结晶^[6], 因此, 希望轧制温度越低越好, 而低温轧制又常常导致合金轧制开裂^[7]。目前, 对于 2A97 铝锂合金的研究主要集中在微合金化^[8]、力学性能^[9-10]、腐蚀性能^[11-13]、焊接性能^[14-15]、时效制度^[2, 12, 16-19]和疲劳性能^[20]等方面, 对 2A97 铝锂合金超塑性方面的研究在国内外尚未见公开报道。在此, 本文作者研究中间退火对 2A97 铝锂合金轧制开裂及晶粒细化的影响, 以探寻适合该合金晶粒细化用 TMP 方法的有效轧制工艺。

1 实验

实验材料为 25 mm 厚的 2A97 铝锂合金热轧板, 合金经过 520 $^{\circ}\text{C}$ 、2 h 固溶水淬以及 400 $^{\circ}\text{C}$ 、48 h 过时效后, 在 400 $^{\circ}\text{C}$ 预热 1 h 立即轧制, 道次压下量为 10%~20%。当板材轧制到 3 mm, 即变形量达到 88% 时进行中间退火, 温度为 240~400 $^{\circ}\text{C}$, 时间 1h。退火后采用转向轧制, 即前一次轧制板材的横向作为再次轧制方向。最终板材轧制到 2 mm, 总变形量 92%。将轧制板材在盐浴炉内进行 490 $^{\circ}\text{C}$ 、1 h 的再结晶退火后进行金相组织观察。

将轧制后的板材沿轧向线切割成标准的高温拉伸试样, 标距部分长 10 mm, 宽 6 mm, 在 RWS550 电子蠕变拉伸试验机上进行试验, 变形温度为 470 $^{\circ}\text{C}$,

初始应变速率为 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 。再结晶退火和高温拉伸后的试样经机械抛光后, 直接进行阳极覆膜, 在 MX-3000 型光学显微镜下观察其晶粒组织。覆膜液为体积比为 1:40 的氟硼酸 (HFB₄) 与蒸馏水。制膜电压为 18V, 电流 $< 0.1 \text{ A/cm}^2$, 时间为 2~3 min。晶粒尺寸按照国家标准 GB/T 3246.1—2000 进行分析计算。用于透射电镜观察的试样取自退火后板材的板平面, 在 TecnaiG²20 型透射电镜下进行观察与分析。

2 实验结果

2.1 轧制温度对板材开裂的影响

图 1 所示为过时效处理后 2A97 铝锂合金板材在不同温度轧制后的宏观照片。室温轧制时, 变形量达到 22% 时就出现沿板材心部张嘴型严重开裂, 无法继续轧制 (见图 1(a))。提高轧制温度可以缓解板材轧制开裂问题, 200 $^{\circ}\text{C}$ 轧制时变形量达到 32% 时开始出现边裂, 当总变形量达到 92% 时, 板材仍然出现了非常严重的开裂 (见图 1(b))。继续提高轧制温度到 400 $^{\circ}\text{C}$ 时, 当变形量达到 78% 时开始出现边部开裂, 继续增加变形量达到 88% 时, 板材开始出现比较严重的边部裂纹, 此时板材厚度减少至 3 mm, 表面积增大, 温降加速, 随后的变形裂纹迅速扩展, 最终轧制至总变形量为 92% 时, 裂纹沿边部向板材中心处扩展, 裂纹深度达到 20 mm 左右 (见图 1(c))。因此, 在接下来的轧制过

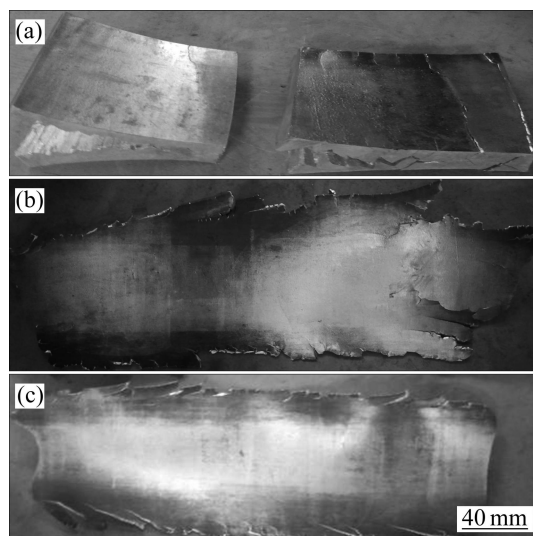


图 1 2A97 铝锂合金板材在不同温度轧制后的宏观照片

Fig. 1 Macro-photos of 2A97 Al-Li alloy sheets rolled at different temperatures: (a) Room temperature, rolling reduction of 22%; (b) 200 $^{\circ}\text{C}$, rolling reduction of 32%; (c) 400 $^{\circ}\text{C}$, rolling reduction of 78%

程中, 当 400 °C 热轧至变形量达到 88% 时进行不同温度的中间退火。图 2 所示为 2A97 铝锂合金板材经 400 °C 预热轧制至变形量 88%、再经不同温度中间退火后轧制至总变形量 92% 时的宏观照片。由图 2 可知, 经过 240 °C 中间退火后, 轧制至总变形量 92% 时, 板

材的开裂程度大幅减少, 裂纹深度达到 12 mm 左右(见图 2(a))。当退火温度提高到 300 °C 时, 轧制至总变形量 92% 时, 板材的开裂程度进一步减少, 边部的裂纹只有 8 mm 左右(见图 2(b))。随着退火温度的升高, 轧制板材开裂程度越来越小, 当退火温度升高到 400 °C 时, 获得了变形量为 92% 的无明显开裂的板材(见图 2(c))。

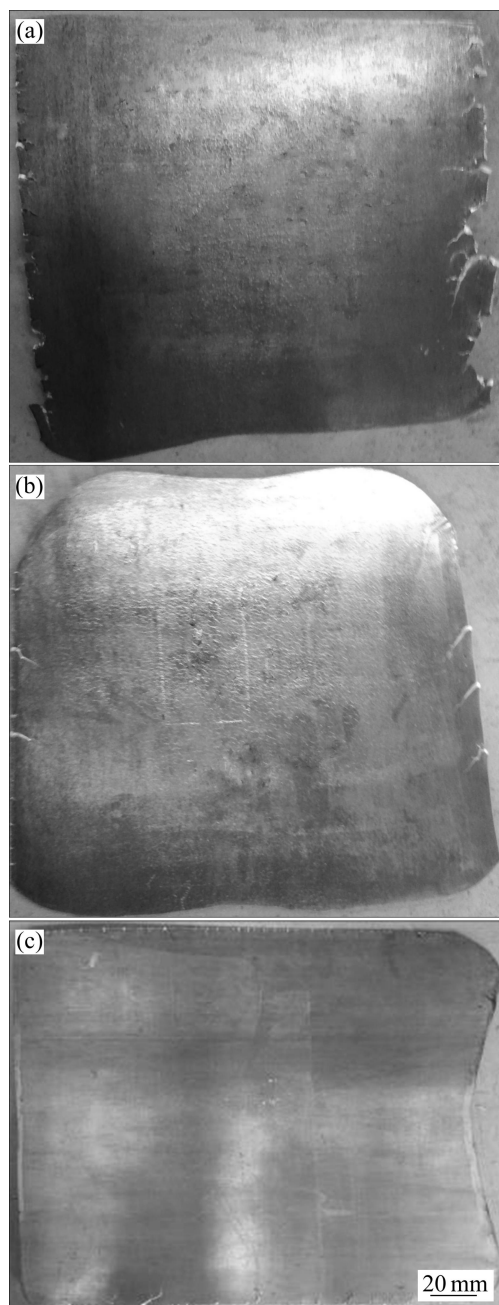


图 2 2A97 铝锂合金板材经 400 °C 预热轧制至变形量 88%、再经不同温度中间退火后轧制至总变形量 92% 时的宏观照片

Fig. 2 Macro-photos of 2A97 Al-Li alloy sheets preheated at 400 °C followed by intermediate annealing at different temperatures when rolled to reduction of 88% and finally rolled to total reduction of 92%: (a) 240 °C; (b) 300 °C; (c) 400 °C

2.2 退火温度对再结晶的影响

图 3(a)所示为 2A97 铝锂合金原始板材经 520 °C 固溶后纵截面的晶粒组织, 图 3(b)~(d)所示分别为原始板材分别经固溶及时效处理后, 先在 400 °C 热轧至变形量 88%, 再均分 3 份进行不同温度退火轧制至总变形量 92% 后, 再经 490 °C、1 h 静态再结晶退火处理后的板材的纵截面晶粒组织。由图 3 可以看出, 与固溶态的晶粒组织相比(见图 3(a)), 经形变热处理后的板材内部发生了部分再结晶, 晶粒组织仍以扁平状为主。当中间退火温度为 240 °C 时, 由图 3(b)可以看出, 板材内部出现了一些细小的再结晶晶粒, 其平均晶粒尺寸约为 3 μm 。随着中间退火温度提高到 300 °C, 细小的再结晶晶粒数量逐渐减少(见图 3(c))。当中间退火温度提高到 400 °C 时, 板材内部几乎没有发生再结晶(见图 3(d))。由上述晶粒组织观察结果可以看出, 虽然在形变热处理的最后一步对合金进行了 490 °C、1 h 盐浴再结晶退火, 板材并没有发生完全的不连续再结晶, 这主要是由于合金中含有 0.1% 的 Zr(质量分数)元素, 形成的 Al_3Zr 粒子可以强烈地钉扎晶界, 抑制再结晶的发生。也正是由于这个原因, Al-Cu-Li 系合金主要依靠超塑性变形初始阶段的动态再结晶来完成由形变组织到细小的完全再结晶组织的转变。因此, 通过动态再结晶可以获得较为细小的晶粒组织, 且超塑拉伸后伸长率也要明显大于经静态再结晶处理后样品的^[21]。因此, 需要根据不同温度退火轧制后的板材在超塑性变形过程中动态再结晶晶粒尺寸来分析退火温度对板材超塑性的影响。

2.3 退火温度对板材超塑性能的影响

图 4 所示为 3 种不同温度退火轧制的板材在变形温度为 470 °C、应变速率为 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 的变形条件下进行超塑性拉伸所获得的真应力-真应变曲线; 表 1 所列为与图 4 中曲线所对应的伸长率、最大流变应力等力学特性。从图 4 和表 1 可以看出, 经 240 °C 和 400 °C 中间退火轧制后的板材在超塑拉伸过程中具有相近的最大流变应力, 分别为 15.31 MPa 和 15.47 MPa, 当中间退火温度为 240 °C 时, 随着真应变的增大, 流变

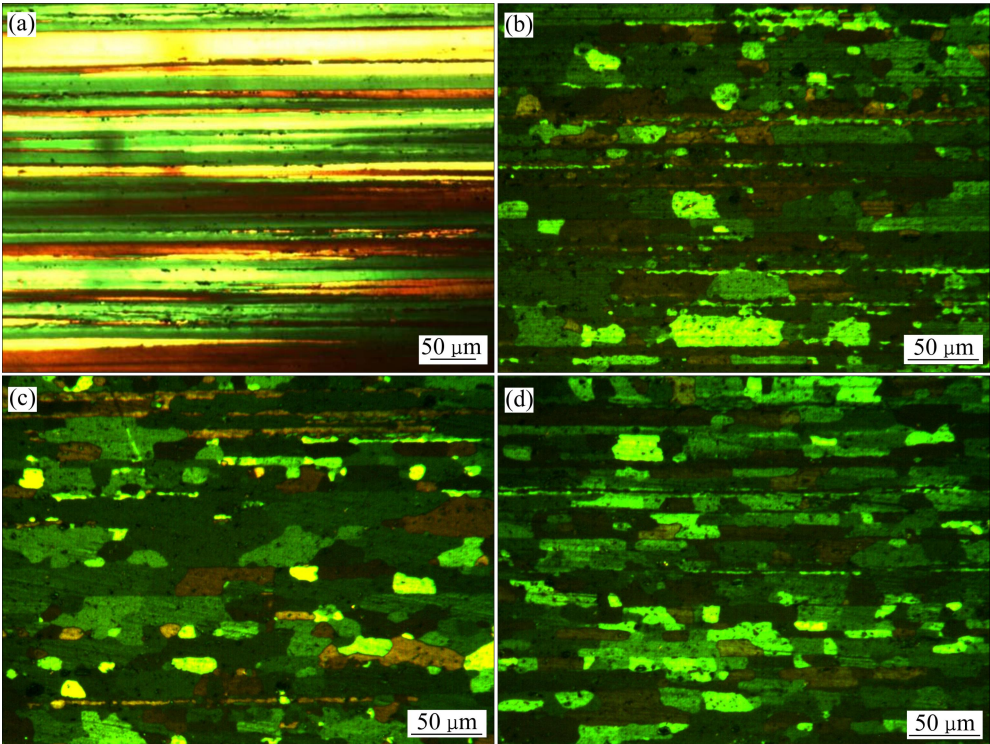


图 3 中间退火温度对 2A97 铝锂合金静态再结晶组织的影响

Fig. 3 Effects of intermediate annealing temperatures on static recrystallized grain structures of 2A97 Al-Li alloy: (a) 520 °C, 2 h, solution treated; (b) 240 °C; (c) 300 °C; (d) 400 °C

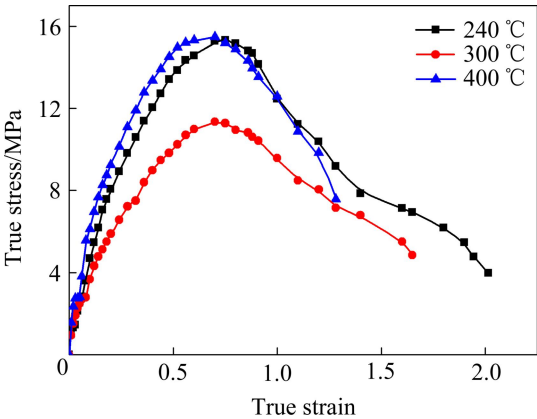


图 4 中间退火温度对 2A97 铝锂合金板材在 470 °C、应变速率为 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下变形时的真应力-真应变曲线的影响

Fig. 4 Effects of intermediate annealing temperatures on true stress-true strain curves of 2A97 Al-Li alloy sheets deformed at 470 °C and strain rate of $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

应力达到峰值后迅速下降,且在变形后期真应力下降缓慢,因此伸长率最高,为 650%,真应变为 2.01。400 °C 中间退火的板材在超塑拉伸过程中,随着真应变的增大,流变应力达到峰值后迅速下降,并未出现近似的流动稳定平台,因此伸长率较低,仅为 260%,

表 1 中间退火温度对 2A97 铝锂合金板材在 470 °C、应变速率为 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下变形时流动应力及伸长率的影响

Table 1 Effects of intermediate annealing temperatures on flow stress and superplastic elongation of 2A97 Al-Li alloy deformed at 470 °C and strain rate of $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

Annealing temperature/°C	Maximum true strain	Maximum true stress/MPa	Maximum elongation/%
240	2.01	15.31	650
300	1.64	11.34	420
400	1.28	15.47	260

真应变为 1.28。而经 300 °C 中间退火的板材在超塑拉伸过程中的流变峰值应力仅为 11.34 MPa,随着真应变的增大,流变应力达到峰值后下降缓慢,因此,与 400 °C 中间退火的板材相比,伸长率较高,为 420%,真应变为 1.64。

2.4 动态再结晶晶粒组织

图 5 所示为不同温度退火轧制的 2A97 铝锂合金板材在适宜的超塑性变形条件(470 °C、 $2 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$)下拉伸至真应变 $\epsilon=1.09$ 时标距部分纵截面的晶粒组织。从图 5 可以看出,3 种不同温度退火轧制后的板材在

$\varepsilon=1.09$ 时均已发生了完全再结晶, 且随着中间退火温度的升高, 晶粒组织逐渐粗化。用截距法对晶粒尺寸进行统计, 随着退火温度的升高, 3 种不同温度退火轧制的板材沿轧向平均晶粒尺寸分别约为 5.7、7.1 和 8.3 μm 。

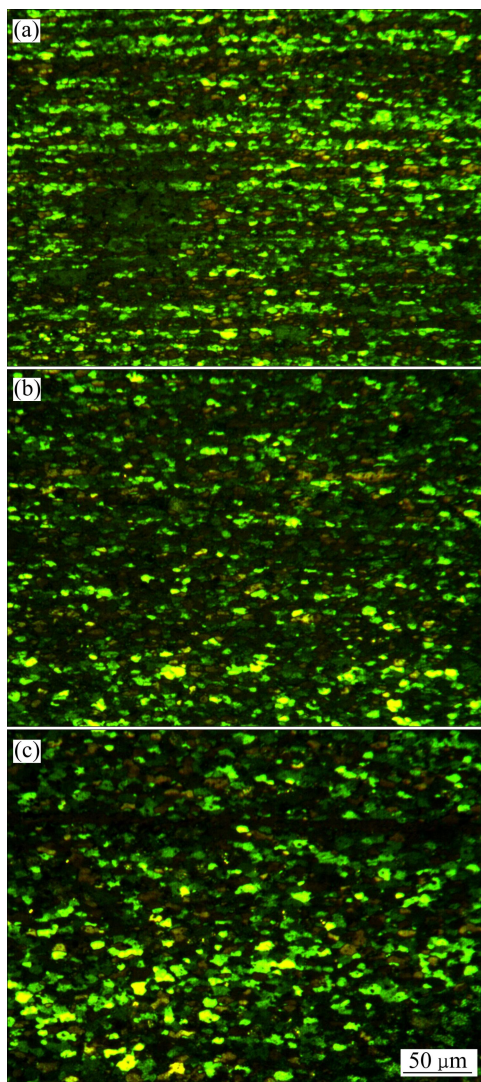


图 5 不同退火温度轧制的板材在 470 $^{\circ}\text{C}$ 、 $2\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ 条件下拉伸至真应变为 1.09 时标距部分的显微组织

Fig. 5 Microstructures in gauge of 2A97 Al-Li alloy sheets produced by different annealing temperatures when deformed to true strain of 1.09 at 470 $^{\circ}\text{C}$ and strain rate of $2\times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$: (a) 240 $^{\circ}\text{C}$; (b) 300 $^{\circ}\text{C}$; (c) 400 $^{\circ}\text{C}$

3 分析与讨论

2A97 铝锂合金的室温塑性较差, 在低温轧制时常开裂(见图 1(a))。采用 400 $^{\circ}\text{C}$ 预热后开始轧制, 虽然开裂程度较室温有很大程度的缓解, 但当变形量达到

88%以后时, 由于板材表面积增大导致温降过快, 板材仍出现较为严重的开裂(见图 1(c))。因此, 为了控制轧制过程中板材的开裂, 需要在轧制过程中采用中间退火工艺。由图 2 可知, 增加中间退火工艺后可进一步缓解板材轧制开裂。在轧制过程中采用 240 $^{\circ}\text{C}$ 退火轧制后, 板材开裂的裂纹深度达减小到 12 mm 左右, 把中间退火温度提高到 400 $^{\circ}\text{C}$ 后, 最终获得了无明显开裂的板材(见图 2(c))。

但中间退火对超塑性板材的制备存在着矛盾的作用, 从控制板材开裂的角度考虑希望轧制温度越高越好, 因为提高退火温度可以显著缓解开裂。但从晶粒细化角度考虑, 用于制备超塑性板材的形变热处理工艺一般希望轧制温度越低越好, 因为这样可以形成更大的储能, 在接下来的静态或者动态再结晶过程可以获得更为细小的晶粒组织。不同中间温度退火对板材回复与再结晶的影响如图 6(a)~(c)所示。240 $^{\circ}\text{C}$ 退火使

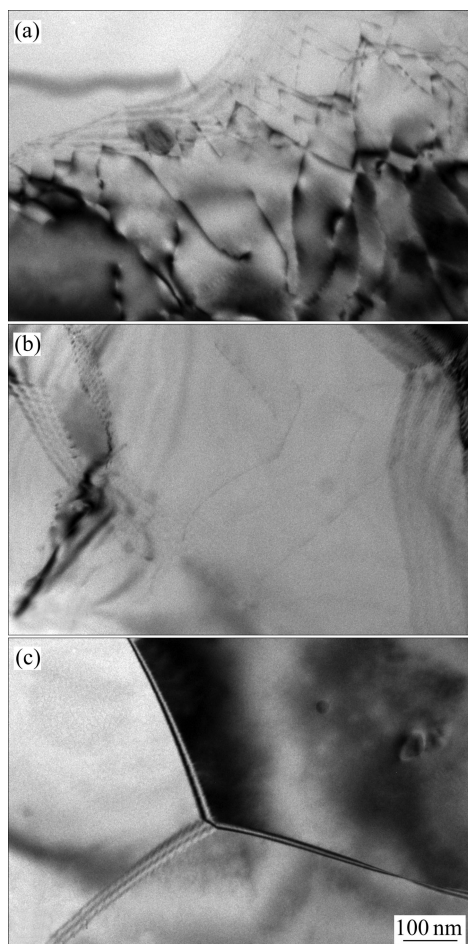


图 6 2A97 铝锂合金板材轧制至 88%经不同温度中间退火后的透射电镜照片

Fig. 6 TEM images of 2A97 Al-Li alloys sheets intermediate annealed at different temperatures and rolling reduction of 88%: (a) 240 $^{\circ}\text{C}$; (b) 300 $^{\circ}\text{C}$; (c) 400 $^{\circ}\text{C}$

合金发生了位错的运动与重新组合,但基体中仍然存在很多混乱的位错,保留了较高的位错密度(见图6(a))。提高温度到300℃,位错密度进一步降低,属于典型的回复组织,未发生明显的再结晶(见图6(b))。而将温度提高到400℃时,已达到该合金的再结晶开始温度,经过透射电镜观察合金晶粒粗大,出现了很多三叉晶界,属于典型的大角度晶界特征,合金发生了明显的部分再结晶(见图6(c))。因此,虽然将中间退火温度提高到400℃可以解决板材开裂问题(见图2(c)),但中间退火过程中降低了合金的变形储能(见图6(c)),导致静态再结晶过程中未发生明显的不连续再结晶(见图3(d)),超塑性变形过程中动态再结晶获得的晶粒也最为粗大(见图5(c)),所以最终获得的超塑性伸长率也最低,仅为260%(见表1)。

当中间退火温度降低为240℃时,由于保留了较大的位错密度(见图6(a)),再结晶过程可以提供更多的形核点和驱动力,因此,在静态再结晶过程中获得的部分的细小等轴再结晶晶粒,在高温超塑性拉伸过程中随着真应变的增加,流变应力达到峰值后迅速下降(见图4),这主要是因为动态再结晶的发生,且获得了最为细小的动态再结晶晶粒(见图5(a)),获得最终的超塑性伸长率较高,达到650%。而选取中间退火温度为300℃时,虽然未发生明显的再结晶(见图6(b)),但由于位错密度的降低,储能和再结晶驱动力减小,导致再结晶形核点减少,在静态再结晶过程中仅出现了少量的再结晶新晶粒(见图3(c)),在超塑性变形过程中动态再结晶获得的晶粒也变得比240℃中间退火粗大,导致伸长率较低,只有420%。

因此,通过引进中间退火工艺,可获得无开裂的2A97铝锂合金超塑性板材。随着退火温度的升高,板材开裂程度逐渐减小,但由于释放的形变储能越来越多,再结晶驱动力逐渐减小,晶粒细化程度逐渐降低,因此,伸长率随着退火温度的升高而逐渐降低。

4 结论

1) 2A97铝锂合金在低温轧制时容易开裂,室温轧制至变形量为22%便出现严重开裂。提高轧制预热温度到400℃并在轧制过程中采取中间退火工艺可解决其轧制开裂问题。随着中间退火温度从240℃提高到400℃,轧制开裂程度逐渐缓解并可获得无明显开裂板材。

2) 中间退火温度对板材超塑性伸长率有较大影响。400℃中间退火时,合金内部发生了明显的部分

再结晶,降低了合金的储能,导致超塑性变形过程中动态再结晶晶粒最为粗大,伸长率仅有260%。中间退火温度降低到240℃时,合金内部仅发生了位错的运动与重组,具有较高的位错密度,保留了较高的再结晶储能与驱动力,因此再结晶形核位置较多,晶粒得到了细化,伸长率达到650%。

3) 通过引进中间退火,可以解决2A97铝锂合金室温轧制易开裂的问题,且退火温度越高,板材晶粒细化程度逐渐降低,因此,伸长率逐渐减小。

REFERENCES

- [1] ZHANG Yan-ling, GUO He-ping, LI Zhi-qiang. The superplastic deformation and microstructural analysis of fine-grained 1420 Al-Li alloy[J]. *Advanced Materials Research*, 2011, (148): 434-438.
- [2] 袁志山, 吴秀亮, 陆 政, 谢优华, 戴圣龙, 刘常升. 2A97 铝锂合金时效行为研究[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(11): 1898-1902.
YUAN Zhi-shan, WU Xiu-liang, LU Zheng, XIE You-hua, DAI Sheng-long, LIU Chang-sheng. The aging behavior of aluminum-lithium alloy 2A97[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(11): 1898-1902.
- [3] 杜予晖, 张新明, 叶凌英, 罗智辉. 一种 Al-Cu-Li 合金的超塑性性能研究[J]. *航空材料学报*, 2007, 27(2): 1-5.
DU Yu-xuan, ZHANG Xin-ming, YE Ling-ying, LUO Zhi-hui. Superplasticity in an Al-Cu-Li alloy[J]. *Journal of Aeronautical Materials*, 2007, 27(2): 1-5.
- [4] NIEH T G, WADSWORTH J, SHERBY O D. Superplasticity in metals and ceramics[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1997.
- [5] HUMPHREYS FJ, HATHERLY M. Recrystallization and related annealing phenomena[M]. 2nd ed. Oxford: Pergamon Press, 2004.
- [6] FAN W, KASHYAP B P, CHATURVEDI M C. Anisotropy in flow and microstructure evolution during superplastic deformation of a layered-microstructured AA8090 Al-Li alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2003, 349(2): 166-182.
- [7] 叶凌英, 张新明, 刘颖维, 唐建国. 温度对 01420 铝锂合金轧制开裂及晶粒细化的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2008, 37(8): 1431-1435.
YE Ling-ying, ZHANG Xin-ming, LIU Ying-wei, TANG Jian-guo. Effects of temperatures on rolling failure and grain refinement of 01420 Al-Li alloy[J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2008, 37(8): 1431-1435.
- [8] 梁文杰, 潘青林, 朱朝明, 何运斌, 刘元斐. 含铈 Al-Cu-Li-Zr 合金的组织与性能[J]. *材料科学与工艺*, 2007, 15(2): 154-157.
LIANG Wen-jie, PAN Qing-lin, ZHU Zhao-ming, HE Yun-bin, LIU Yuan-fei. Microstructure and properties of Al-Cu-Li-Zr

- alloys containing Sc[J]. Materials Science and Technology, 2007, 15(2): 154–157.
- [9] GAO Chong, LUAN Yang, YU Jun-chuan, MA Yue. Effect of thermo-mechanical treatment process on microstructure and mechanical properties of 2A97 Al-Li alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(7): 2196–2202.
- [10] 孙 刚, 苏 海, 高文理, 刘洪波, 陆 政, 冯朝辉, 张显峰. 热处理对 2A97 铝锂合金轧板微观组织与力学性能的影响[J]. 金属热处理, 2011, 36(2): 74–78.
- SUN Gang, SU Hai, GAO Wen-li, LIU Hong-bo, LU Zheng, FENG Zhao-hui, ZHANG Xian-feng. Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties of rolled 2A97 Al-Li alloy plate[J]. Heat Treatment of Metal, 2011, 36(2): 74–78.
- [11] 林 毅, 郑子樵, 韩 焯, 张海锋. 热处理工艺对 2A97 铝锂合金拉伸性能和腐蚀性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2012, 22(8): 2181–2186.
- LIN Yi, ZHENG Zi-qiao, HAN Ye, ZHANG Hai-feng. Effect of heat treatment on tensile and corrosion property[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2012, 22(8): 2181–2186.
- [12] 廖忠全, 郑子樵, 钟 申, 蔡 彪, 李世晨. 时效制度对 2A97 铝锂合金腐蚀行为和微观组织的影响[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2011, 16(4): 478–486.
- LIAO Zhong-quan, ZHENG Zi-qiao, ZHONG Shen, CAI Biao, LI Shi-chen. Effect of ageing treatment on corrosion behavior and microstructure of 2A97 Al-Li alloy[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2011, 16(4): 478–486.
- [13] 贾志强. 7150 铝合金回归再时效微观组织与性能及 2A97 铝锂合金应力作用下的腐蚀电化学行为[D]. 长沙: 中南大学, 2010.
- JIA Zhi-qiang. The effect of RRA treatment to the properties of 7150 alloy and electrochemical corrosion behavior under stress of 2A97 Al-Li alloy[D]. Changsha: Central South University, 2010.
- [14] 张 华, 孔德跃, 陈雪峰, 曹 健, 赵衍华, 黄继华. 2A97 铝锂合金搅拌摩擦焊[J]. 焊接学报, 2012, 33(5): 41–44.
- ZHANG Hua, KONG De-yue, CHEN Xue-feng, CAO Jian, ZHAO Yan-hua, HUANG Ji-hua. Study on friction stir welding of 2A97 Al-Li alloy[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2012, 33(5): 41–44.
- [15] 蔡 彪, 郑子樵, 孙景峰, 廖忠全, 钟 申, 贺地求. 2A97 铝锂合金搅拌摩擦焊焊缝的微观组织特征[J]. 粉末冶金材料科学与工程, 2012, 17(2): 147–152.
- CAI Biao, ZHENG Zi-qiao, SUN Jing-feng, LIAO Zhong-quan, ZHONG Shen, HE Di-qiu. Microstructural characteristics of joint line of friction stir welding of 2A97 Al-Li alloy[J]. Materials Science and Engineering of Powder Metallurgy, 2012, 17(2): 147–152.
- [16] 袁志山, 陆 政, 谢优华, 吴秀亮, 戴圣龙, 刘常升. 2A97 铝锂合金双级时效研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(3): 443–447.
- YUAN Zhi-shan, LU Zheng, XIE You-hua, WU Xiu-liang, DAI Sheng-long, LIU Chang-sheng. Study on double-aging of 2A97 aluminum-lithium alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(3): 443–447.
- [17] 钟申, 郑子樵, 廖忠全, 蔡 彪. 时效制度对 2A97 铝锂合金强韧性的影响[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(3): 546–553.
- ZHONG Shen, ZHENG Zi-qiao, LIAO Zhong-quan, CAI Biao. Effects of aging treatment on strength and fracture toughness of 2A97 aluminum-lithium alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(3): 546–553.
- [18] 袁志山, 陆 政, 谢优华, 戴圣龙, 刘常升. 高强 Al-Cu-Li-X 铝锂合金 2A97 三级时效工艺及性能研究[J]. 航空材料学报, 2006, 26(3): 79–82.
- YUAN Zhi-shan, LU Zheng, XIE You-hua, DAI Sheng-long, LIU Chang-sheng. Study on triple aging and mechanical properties of high strength Al-Cu-Li-X aluminum lithium alloy-2A97[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2006, 26(3): 79–82.
- [19] 高文理, 闫 豪, 冯朝辉, 陆 政. 时效制度对 2A97 铝锂合金组织和力学性能的影响[J]. 中国有色金属学报, 2014, 24(5): 1206–1211.
- GAO Wen-li, YAN Hao, FENG Zhao-hui, LU Zheng. Effect of aging treatment on microstructure and mechanical properties of 2A97 Al-Li alloy[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2014, 24(5): 1206–1211.
- [20] ZHONG Jing, ZHONG Shen, ZHENG Zi-qiao, ZHANG Hai-feng, LUO Xian-fu. Fatigue crack initiation and early propagation behavior of 2A97 Al-Li alloy[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(2): 303–309.
- [21] 杜予晖, 张新明, 叶凌英, 罗智辉. 一种 Al-Cu-Li 合金的超塑性性能研究[J]. 航空材料学报, 2007, 27(2): 1–5.
- DU Yu-xuan, ZHANG Xin-ming, YE Ling-ying, LUO Zhi-hui. Superplasticity in an Al-Cu-Li alloy[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2007, 27(2): 1–5.

(编辑 龙怀中)