

[文章编号] 1004- 0609(2002)03- 0573- 05

1420 铝锂合金的各向异性^①

魏齐龙, 陈 铮, 王永欣

(西北工业大学 材料科学与工程学院, 西安 710072)

[摘 要] 以 1420 铝锂合金为对象, 研究了轧板的各向异性在时效过程中的演化, 并探讨了 δ' 相强化的各向异性机制。研究表明: 随着时效的进行, 合金的各向异性逐渐增强, 合金的拉伸断裂特征也出现各向异性; 且随着时效的进行, 合金的断裂方式由沿晶分层断裂向沿亚晶分层断裂转变。可以认为, δ' 相是通过共面滑移来软化滑移面、减少滑移系数目, 从而增强合金的各向异性。

[关键词] 各向异性; 时效; δ' 相; 断裂特征

[中图分类号] TG 111.5; TG 156.92

[文献标识码] A

为获得一定程度的形变强化效果, 1420 合金多在未再结晶状态以轧板或型材的形式使用。这样, 在热变形过程中形成的组织将使合金的性能出现各向异性。合金中仅有的晶内强化相 δ' 易为位错切过^[1, 2], 可能对合金的各向异性产生作用。 δ' 相的数量、形貌和尺寸在时效过程中均发生变化, 其强化效果及其各向异性也将发生变化。目前, 对 1420 合金的研究主要集中在时效过程中析出相的形核、长大以及晶界无沉淀区(PFZ)等微观特性方面, 而对合金力学性能及断裂特性的各向异性的研究很少。由于 1420 合金中仅有 δ' 相一种晶内强化相, 在分析其强化及各向异性时不需考虑不同类型的晶内析出相之间的交互作用和耦合关系, 可以较容易地分析单个析出相的强化各向异性, 这对研究多个析出相的强化各向异性具有重要的理论意义。

1 实验方法

采用俄罗斯生产的 1420 铝锂合金轧板, 其化学成分见表 1。供应状态为 T1(轧制+ 水淬+ 冷校正)。

表 1 1420 铝锂合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of 1420 Al-Li alloy (mass fraction, %)

Li	Mg	Zr	Al
2.140	5.150	0.081	Balance

在轧制平面内分别沿轧制方向、横向和与轧制方向成 45° 的方向取样。采用 460 ℃, 0.5 h 的固溶处理工艺, 空气电阻炉加热, 空冷。随后在 120 ℃ 进行时效处理, 时间分别为 10 h 和 20 h, 烘箱加热, 空冷, 将部分经过 120 ℃, 20 h 时效处理的试样进行 265 ℃, 5 min 的回溶处理, 于盐浴炉中加热, 水冷。

试样加工成型后在 Instron-1196 电子拉伸机上进行拉伸实验, 拉伸速率为 0.2 mm/min。采用 Amray Model 1000B 扫描电子显微镜分析拉伸断口形貌, 加速电压为 20 kV。采用 Keller's 腐蚀剂制样分析光学金相组织。

2 实验结果

合金的屈服强度、延伸率随取样方向和时效状态的演化如图 1 所示。其中, 0° 为轧制方向, 45° 为短横向, 90° 为横向。

在固溶状态, 合金的强度水平较低, 强度的各向异性也较小; 在 120 ℃ 时效 10 h 后, 合金在各方向的屈服强度均有较大幅度的提高, 尤其是在轧制方向和横向, 其各向异性也凸现出来; 时效 20 h 后, 合金的屈服强度及其各向异性均进一步提高; 其后的回溶处理, 则使合金的强度水平显著下降, 甚至低于固溶状态的强度水平。总之, 合金在轧制方向和横向的屈服强度较高, 且两者差异较小; 而短横向的屈服强度则低于上述 2 个方向的值, 尤其

① [基金项目] 国家自然科学基金资助项目(50071046)

[收稿日期] 2001- 07- 09; [修订日期] 2001- 09- 03

[作者简介] 魏齐龙(1975-), 男, 博士研究生。

是在较长时间时效之后。

合金延伸率的变化则有所不同: 在各状态均是短横向的延伸率最大, 而轧制方向的值略小, 横向的值最小。在同一取样方向, 以固溶状态延伸率最大, 其次为回溶状态及时效状态。

图 2 所示为 1420 合金在 120 °C 时效 20 h 后的显微组织。在轧制平面内, 大小晶粒并存, 大晶粒尺寸在 30~ 50 μm 之间, 小晶粒尺寸在 1~ 10 μm 之间; 横截面内为普遍的流线组织, 流线带起伏较大, 其内有少量的细小再结晶晶粒, 其余均为未再结晶的拉长晶粒, 流线带宽度在 1 μm 上下。晶粒的空间形貌即为薄饼状。

图 3 所示为 1420 合金拉伸断口形貌在时效过程中的变化, 试样沿轧制方向取样。在固溶状态, 合金出现一定比例的沿晶分层断裂, 并伴有穿晶解理面及少量韧窝(其底部有破碎颗粒), 二次裂纹较浅。在 120 °C 时效 10 h 后, 在断口上出现细密的沿晶分层, 由于轧制流线的起伏, 分层带取向略显紊

乱, 二次裂纹较深, 在局部有少量穿晶解理面及韧窝。在 120 °C 时效 20 h 后, 断口上除有较紊乱的沿晶分层外, 还出现了较多的沿亚晶分层, 二次裂纹较深。经回溶处理后, 合金的断口特征变化不大。

其余 2 个取样方向试样的断裂特征随时效及回溶处理的变化与上述相似。

图 4 所示为 1420 合金在 120 °C 时效 20 h 后沿轧制方向、短横向和横向取样的拉伸断口形貌。短横向取的试样, 其断口与拉伸轴垂直; 在低倍下表现为粗大的分层断裂, 裂纹较深, 而分层带表面变形较小。沿轧制方向和横向取样的试样, 其断口与拉伸轴约成 45° 角; 在低倍下可见细小沿晶分层断裂, 裂纹较浅, 并有一定数量的穿晶解理面及韧窝出现。在高倍下可见, 3 个试样的断口均为如图 3 (c) 所示的典型的沿晶和沿亚晶分层开裂, 只是分层尺寸及比例略有差异而已。而在不同状态下, 这些方向的断裂特征尽管出现一些变化, 但基本差异仍与上述相同。

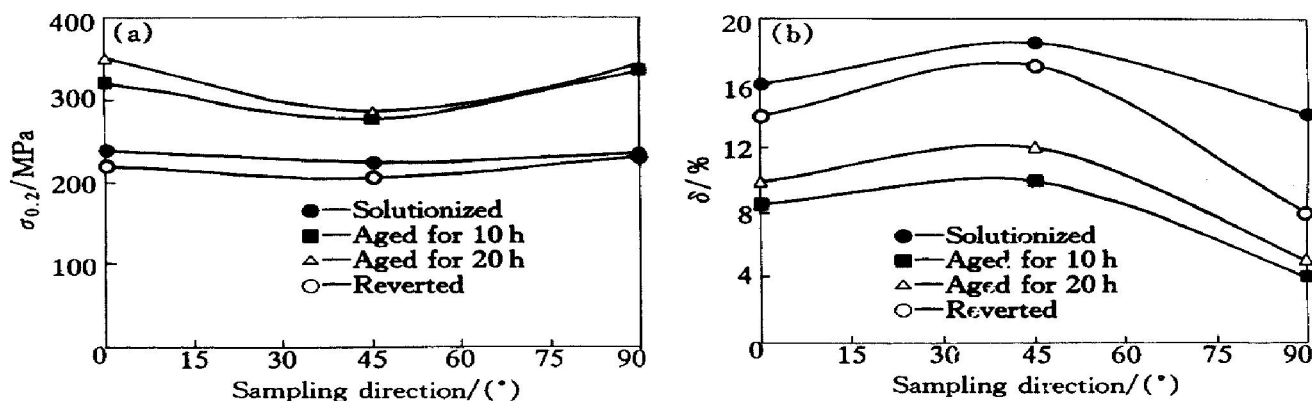


图 1 1420 铝锂合金的屈服强度(a)和延伸率(b)在不同状态下随取样方向的变化

Fig. 1 Variation of yield strength (a) and elongation(b) of 1420 Al-Li alloy with sampling direction

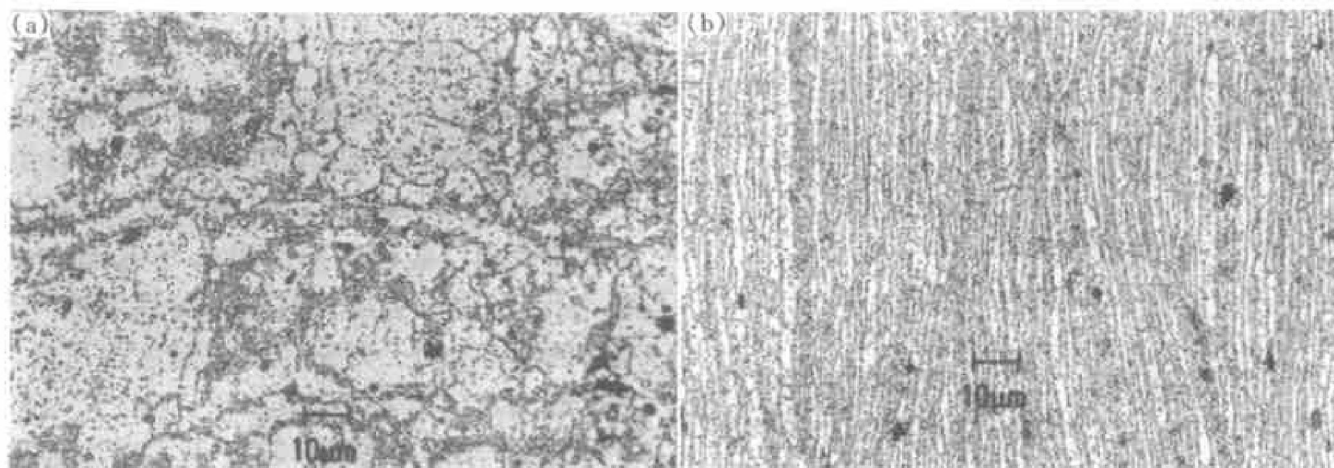


图 2 1420 铝锂合金时效 20 h 的组织

Fig. 2 Microstructures of 1420 Al-Li alloy aged for 20 h

(a) —Rolling plane; (b) —Transverse section

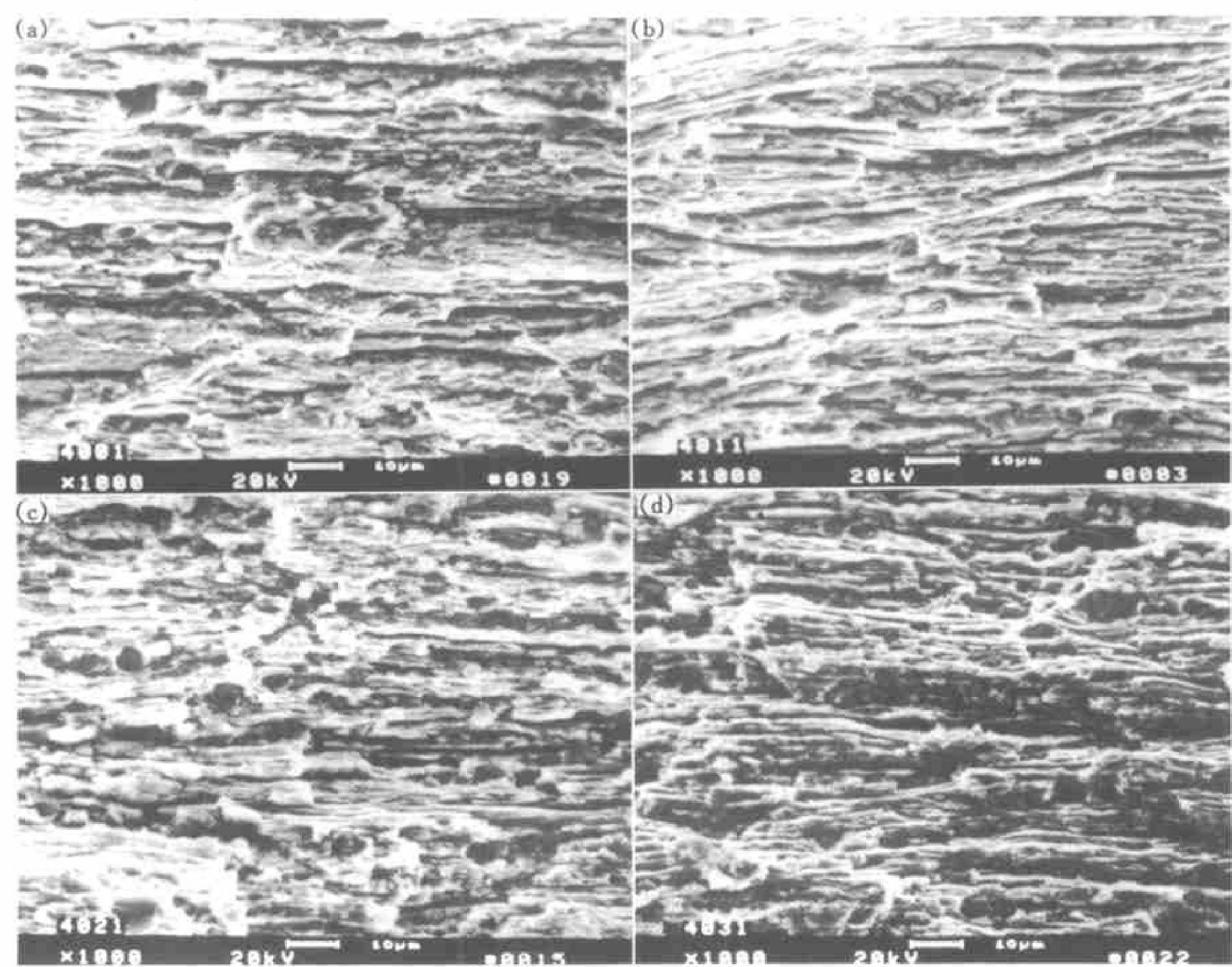


图 3 1420 铝锂合金拉伸断口形貌随时效的变化(沿轧制方向取样)

Fig. 3 Fractographies of 1420 Al-Li alloy sampled along rolling direction

(a) —Solutioned; (b) —Aged for 10 h; (c) —Aged for 20 h; (d) —Reverted after aged for 20 h

3 讨论

1420 合金在时效及回溶处理过程中性能和断裂特性的演变取决于析出相及晶界 PFZ 的变化。合金的主要强化相 δ' 在固溶淬火过程中形核, 在时效过程中长大和粗化。其平均颗粒半径与时效时间 t 存在正比关系:

$$\overline{r}^3 \propto t$$

(1)

在达到峰值时效之前 δ' 相为位错切过。合金的临界分切应力为

$$\tau_A = K \frac{\gamma_S^{3/2} \phi^{1/2}}{Gb^3} r^{1/2} + \tau_0$$

(2)

式中 τ_A 和 τ_0 分别为合金、基体的临界分切应力, K 为常数, G 为剪切模量, ϕ 为颗粒体积分数, r 为颗粒半径, b 为柏氏矢量, γ_S 为反相畴界面能^[1]。

可见, 颗粒体积分数一定时, 位错切过颗粒的强化效果随其尺寸增大而增大; 而在时效过程中, 除颗粒尺寸增大外, 颗粒的体积分数也将增大。因此, 随着时效的进行, 合金的强度水平不断升高。

由于合金固溶采用空冷淬火, 在冷却过程中有一定数量的细小的 δ' 相析出; 而回溶之后, 采用水冷淬火, 可有效抑制 δ' 相的形核与长大。所以, δ' 相在回溶处理后的强化效果低于固溶后的强化效果, 合金在回溶处理之后的强度水平低于固溶状态的强度水平。

由于 δ' 相与基体完全共格, 反相畴界面能小(约 0.150 J/m^2)^[3], 第 1 个位错切过 δ' 相后, 后续位错更易从该滑移面滑过, 即产生共面滑移。由于形变铝锂合金的晶界强度较低, 共面滑移带将使晶界断裂, 由于薄饼状晶粒的存在, 合金中产生沿晶分层断裂。

在固溶和人工时效过程中, 由于平衡的 T 相

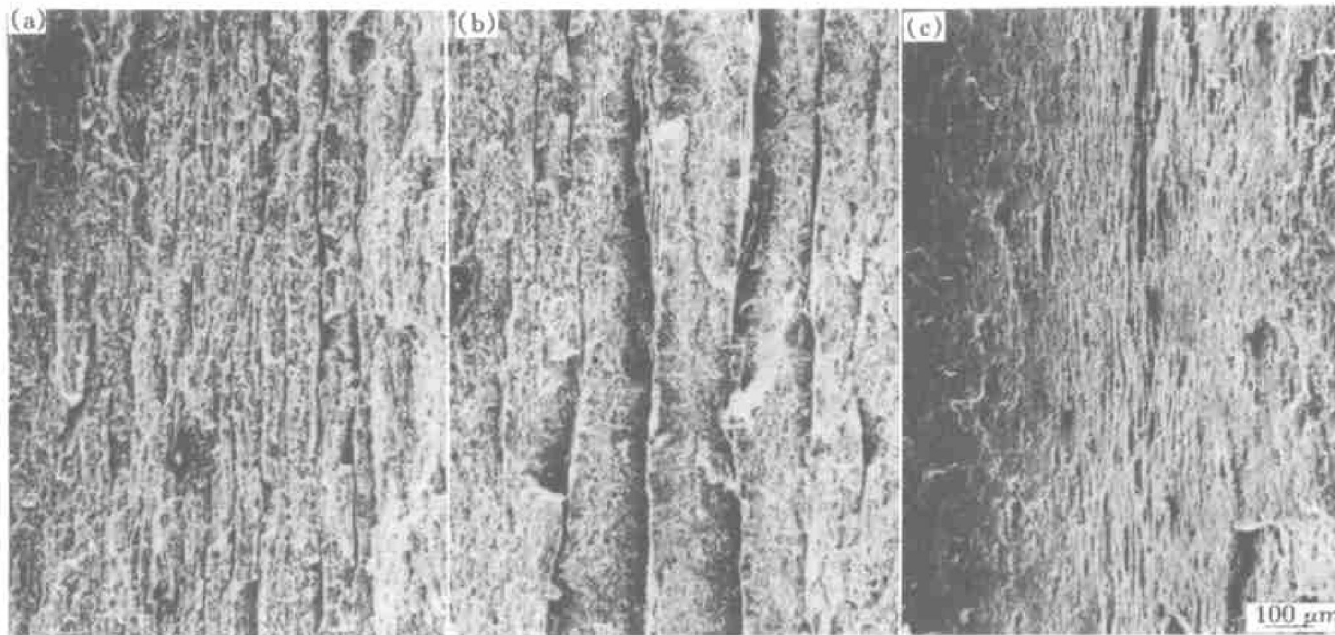


图 4 1420 铝锂合金于 120 °C 时效 20 h 的拉伸断口形貌

Fig. 4 Fractographies of 1420 Al-Li alloy aged at 120 °C for 20 h

(a) —Sampled along rolling direction; (b) —Short-transverse direction; (c) —Transverse direction

(Al₂MgLi) 在晶界及亚晶界非均匀析出, 晶界、亚晶界无析出带 (PFZ) 形成并长大。PFZ 的宽度 W 与时效时间 t 之间存在如下关系^[2, 4]:

$$W \propto t^{1/2} \quad (3)$$

即随着时效的进行, PFZ 逐渐变宽。

在固溶状态, 合金中只有在淬火过程中形成的极小的 δ' 相, 其强化作用有限。此时, 合金的变形与断裂特性即取决于基体。合金的组织为薄饼状晶粒组成的流线 (横截面内), 变形即以沿晶分层的方式进行。但由于晶界、晶内强度差异不大, 合金的分层不完全, 且较粗大。随着时效的进行, 淬火组织中的亚结构形成亚晶粒, 且亚晶粒不断长大, 其取向差也增大, 且 PFZ 也在亚晶界形成^[1]。由于晶内强化 (δ' 相) 和晶界、亚晶界弱化 (PFZ), 在时效过程中, 沿晶分层断裂逐渐显现, 且沿亚晶分层断裂的比例也逐渐增加。回溶处理使 δ' 相溶于基体, 它使晶内强化效果大大减弱。但由于在时效 20 h 后晶界、亚晶界的弱化已十分显著, 合金的断裂方式并未发生明显的变化。

共格有序的 δ' 相的强化各向异性是与它容易被位错切过而产生共面滑移相关的。Vasudeven 等认为, 如果析出相不可切过, 则它对合金的各向异性没有影响^[5]。但是, 在时效之初至峰值时效之前, δ' 相是被运动位错切过的。这样, 它诱发位错的共面滑移, 将变形限制于几个可动的滑移面上, 即软化了滑移面, 减少了滑移系数量^[6, 7], 使合金

的变形出现不均匀, 故对合金的各向异性是有作用的。此外, 由于 δ' 相与基体共格, 且晶粒在多组元组织存在的条件下择优取向, δ' 相的分布也相应具有择优取向。

在固溶状态, 由于 δ' 相极细小, 它的强化作用及其各向异性很小, 合金的各向异性主要决定于形变织构。而由图 1 可见, 此时合金基本未表现出各向异性, 这表明形变织构较弱。这可能是由于在轧制过程中采用了交轧制和中温再结晶退火工艺^[8]。

随着时效的进行, δ' 相对共面滑移的影响显现出来。Blankenship Jr 等提出了滑移面软化的表征:

$$N = \phi^{1/2} r^{1/2} L \frac{c_p}{c_B b} \quad (4)$$

式中 L 为滑移长度, c_p 为与颗粒强化机制相关的常数, c_B 为与基体剪切模量相关的常数, N 为滑移长度上的位错数目^[9]。

可见, 随着时效的进行, δ' 相的体积分数和半径均增大, 滑移面软化将加剧。故 δ' 相对合金的各向异性的作用增强。而由于时效温度较低, 原子扩散速率较慢, δ' 相的长大难以充分进行^[10], 经长时间时效之后, δ' 相对合金的各向异性的作用仍不明显。

目前, 尚难以确定 δ' 相强化的各向异性与共面滑移间直接的定量关系。进一步的研究可从介观力学的角度着手, 将微观变形与宏观性能联系起

来^[11]。

4 结论

1) δ' 相通过共面滑移减少滑移系数目, 从而增强合金的各向异性, 并使之随时效的进行而增强。

2) 合金的拉伸断裂特征出现各向异性, 尤其是在低倍下可见纵向和横向的断裂特征与短横向差异较大。

3) 随着时效的进行, 由于沿晶和沿亚晶 PFZ 的发展, 合金的断裂由沿晶分层方式向沿亚晶分层方式转变。

[REFERENCES]

- [1] 崔建忠, 胡 骏, 马龙翔. AlMg-Li(01420) 合金的时效与断裂 [J]. 宇航学报, 1991(2): 45– 50.
CUI Jian-zhong, HU Jun, MA Long-xiang. Aged and fracture of AlMg-Li(01420) alloy [J]. Acta Astronautica Sinica, 1991(2): 45– 50.
- [2] Birt M J, Hafley R A, Wagner J W, et al. The fracture resistance of 1420 and 1421 AlMg-Li alloys [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1993, 28(8): 919– 923.
- [3] Huang J C, Ardell A J. Addition rules and the contribution of δ' precipitates to strengthening of aged AlLi-Cu alloy [J]. Acta Metall, 1988, 36(11): 2995– 3006.
- [4] Jha S C, Sandors T H Jr, Daynana M A. Grain boundary precipitate free zones in AlLi alloys [J]. Acta Metall, 1987, 35(2): 473– 482.

- [5] Vasudevan A K, Prozystupa M A, Fricke W G Jr. Texture-microstructure effects in yield strength anisotropy of 2090 sheet alloy [J]. Scripta Metallurgica et Materialia, 1990, 24(8): 1429– 1434.
- [6] Gregson P J, Flower H M. Microstructural control of toughness in aluminum-lithium alloys [J]. Acta Metall, 1985, 33(3): 527– 537.
- [7] Lavernia E J, Srivatsan T S, Mohamod F A. Strength, deformation, fracture behavior and ductility of aluminum-lithium alloys [J]. Journal of Materials Science, 1990, 25: 1137– 1158.
- [8] Csontos A A, Sturke E A Jr. Effect of processing and microstructure development on slip and fracture behavior of 2.1 wt pct Li Al/C-489 and 1.8 wt pct Li Al/C-418 AlLi-Cu-X alloy [J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2000, 31A(8): 1965– 1976.
- [9] Blankship C P Jr, Hornbogen E, Starke E A Jr. Predicting slip behavior in alloys containing shearable and strong particles [J]. Materials Science and Engineering A, 1993, A169(9): 33– 41.
- [10] 蒋 呐, 向曙光, 郑子樵. CP276 铝锂合金的应变时效工艺 [J]. 中国有色金属学报, 1999, 9(4): 694– 699.
JIANG Na, XIANG Shu-guang, ZHENG Zi-qiao. Strain ageing process for AlLi alloy CP276 [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 1999, 9(4): 694 – 699.
- [11] Panin V E. 固体范性形变与断裂的介观力学物理原理 [J]. 金属学报, 1997, 33(2): 187– 197.
Panin V E. Physical fundamentals of mesomechanics of plastic deformation and fracture of solids [J]. Acta Metallurgica Sinica, 1997, 33(2): 187– 197.

Anisotropy of 1420 Al-Li alloy

WEI Qi-long, CHEN Zheng, WANG Yong-xin

(College of Materials Science and Engineering, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072, China)

[Abstract] Variations of anisotropy during aging treatment in 1420 AlLi alloy rolled sheet, and the mechanism by which δ' phase strengthens the alloy anisotropically were investigated. It is found that anisotropy of properties increases as aging treatment progresses. The fracture character is also anisotropic, and it transits from intergranular one to intersubgranular one as aging treatment progresses. It is deduced that δ' phase softens slip planes and lessens the number of slip systems by coplanar slip, thereby enhances anisotropy in this alloy.

[Key words] anisotropy; aging treatment; δ' precipitate; fracture character

(编辑 陈爱华)