

# 含钪 Al-Cu-Li 合金的研究

Study of Al-Cu-Li Alloys Containing Sc

周昌荣<sup>1, 2</sup>, 刘心宇<sup>1, 2</sup>, 潘青林<sup>2</sup>

(1 桂林电子工业学院 信息材料科学与工程系, 广西 桂林 541004;

2 中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

ZHOU Chang-rong<sup>1, 2</sup>, LIU Xin-yu<sup>1, 2</sup>, PAN Qing-lin<sup>2</sup>

(1 Department of Information Material and Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541001, Guangxi, China; 2 School of Material Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

摘要: 通过显微组织观察和室温拉伸实验, 研究了微量 Sc 对 Al-Cu-Li 合金微观组织和拉伸性能的影响。结果表明: 在 Al-Cu-Li 合金中加入 0. 10% (质量分数, 下同) Sc 消除了合金铸态枝晶组织, 有效抑制合金再结晶, 明显提高了合金的强度和塑性, 添加 0. 15% Sc 显著细化合金铸态晶粒组织, 合金强度基本不变而塑性进一步提高, 但添加 0. 25% Sc 促进合金再结晶, 降低合金强度。在本实验中, Sc 的理想加入量约为 0. 10% ~ 0. 15%。

关键词: Al-Li 合金; 含 Sc 铝合金; 显微组织; Al<sub>3</sub>Sc

中图分类号: TG146. 2 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2006) 03-0022-03

**Abstract:** The effect of minor Sc additions on microstructure and tensile property of Al-Cu-Li alloys has been investigated by observation of microstructure and tensile test at room temperature. The results show that addition of 0. 10% scandium can obvious improve the strength and elongation, eliminate the dendrite, and strongly restrain recrystallization of the alloys. The addition of 0. 15% scandium causes obvious grain refinement, keeps invariable strength, and increases elongation further. Whereas the addition of 0. 25% scandium accelerates recrystallization and reduce the strength of the alloy. The favorable addition of Sc is about 0. 10% ~ 0. 15% under the experimental conditions.

**Key words:** Al-Li alloy; aluminum alloy containing Sc; microstructure; Al<sub>3</sub>Sc

铝钪合金是继铝锂合金之后新一代铝合金结构材料, 它不仅具有高的强度和塑韧性, 而且具有优异的焊接性能、低温性能、耐蚀性能和天然的超塑成型性能<sup>[1-3]</sup>。前苏联早在 70 年代初, 就开始了铝钪合金的研究, 到目前为止已研制出四个系列十四种牌号的铝钪合金, 主要包括 Al-Mg-Sc (01515, 01523, 01535, 01545, 01570, 01571), Al-Cu-Li-Sc (01460, 01464), Al-Zr-Mg-(Cu)-Sc (01970, 01975, 01981), Al-Mg-Li-Sc (01421, 01423, 01424) 等<sup>[1-9]</sup>, 而国内关于铝钪合金的研究起步较晚, 迄今为止, 还很少看到在 Al-Cu-Li 合金中添加 Sc 的报道。为此, 本工作研究了微量 Sc 对 Al-Cu-Li 合金组织与性能的影响, 并探讨了微量 Sc 在合金中的作用机理。

## 1 材料与实验方法

以纯 Al、纯 Li 和 Al-Cu, Al-Zr, Al-Sc 中间合金为原料, 采用活性溶剂-惰性气体双重保护, 水冷铜模急

冷铸造法制备了实验用不同 Sc 含量的 Al-3. 5Cu-1. 5Li+0. 12Zr 合金, 合金化学成分如表 1 所示。合金铸锭均匀化处理后经热轧、冷轧成 2. 3mm 厚的薄板, 总变形量达到 92%。之后沿轧向裁取拉伸试样, 试样固溶后经 4. 0% 预拉伸量再时效 24h, 然后在 CSS-44100 电子万能材料实验机上进行拉伸实验。金相样品经氟硼酸水溶液电解抛光后阳极复膜在偏振光下观察。透射电镜样品经机械预减薄后双喷穿孔而成, 电解液为硝酸甲醇 (体积比为 1: 3) 溶液, 温度约 -20℃。显微组织观察在 H-800 电镜上进行。

表 1 研究用合金的名义化学成分 (质量分数/%)

Table 1 Chemical composition of the studied alloys (mass fraction/ %)					
Alloy	Cu	Li	Sc	Zr	Al
A	3. 5	1. 5	—	0. 12	Bal
B	3. 5	1. 5	0. 10	0. 12	Bal
C	3. 5	1. 5	0. 15	0. 12	Bal
D	3. 5	1. 5	0. 25	0. 12	Bal

## 2 实验结果

### 2.1 微量 Sc 对 Al-Cu-Li 合金拉伸性能的影响

四种实验合金冷轧板材 T8 态( 525℃/ 1h 固溶水淬+ 4.0% 预拉伸变形+ 160℃/ 24h 时效) 的拉伸性能如表 2 所示。由表 2 可以看出, 添加 0.10% (质量分数, 下同) Sc 的合金 A 的强度和塑性得到明显提高, 其抗拉强度提高了 23MPa, 屈服强度提高了 14MPa, 延伸率提高了 2.6%。添加 0.15% Sc 的合金 C 的强度几乎没有变化, 但延伸率进一步提高, 比合金 A 延伸率提高了 3.2%。添加 0.25% Sc 的合金 D 虽然延伸率显著提高, 但强度明显下降, 合金的抗拉强度和屈服强度分别下降了 77MPa 和 74MPa。这表明在 Al-3.5Cu-1.5Li+0.12Zr 合金中加入微量 Sc 微合金化能提高合金的强度和塑性, 但加入量不宜超过 0.15%, 超过 0.15% 会降低合金的强度。

表 2 四种实验合金 T8 态的拉伸性能

Table 2 The tensile properties of alloy A, B, C and D ( 525℃/ 1h solution W. Q. + 4.0% pretension+ 160℃/ 24h aging)			
Alloy	$\sigma_b$ / MPa	$\sigma_{0.2}$ / MPa	$\delta$ / %
A	530	504	5.0
B	553	518	7.6
C	533	507	8.2
D	456	433	8.6

### 2.2 微量 Sc 对 Al-Cu-Li 合金显微组织的影响

图 1 为四种实验合金在铸态下的金相显微组织。由图可以看出, 未添加 Sc 的合金 A 晶粒粗大, 晶内存在明显的枝晶组织( 图 1a), 添加 0.10% Sc 的合金 B 基本消除了枝晶组织, 但没有出现明显的晶粒细化现象( 图 1b), 添加 0.15% Sc 的合金 C 和添加 0.25% Sc 的合金 D 则出现明显的晶粒细化现象( 图 1c, d)。这表明在 Al-3.5Cu-1.5Li+0.12Zr 合金中添加微量 Sc 能消除合金的枝晶组织, 加入量超过一定值后能显著细化合金铸态晶粒组织。

四种实验合金冷轧板材经 525℃/ 1h 固溶水淬后的金相组织见图 2。由图可见, 合金 A 发生部分再结晶( 图 2a), 合金 B 为未再结晶的纤维状组织( 图 2b), 而合金 C 也发生了部分再结晶( 图 2c), 合金 D 几乎发生了完全再结晶( 图 2d)。这表明在 Al-3.5Cu-1.5Li+0.12Zr 合金中, 添加微量 Sc 能抑制合金的再结晶, 但添加量不宜过多, 超过 0.15% 反而会促进再结晶。

图 3 为实验合金冷轧板材经 525℃/ 1h 固溶水淬, 然后在 160℃下时效 24h 的 TEM 显微组织。由图 3 可

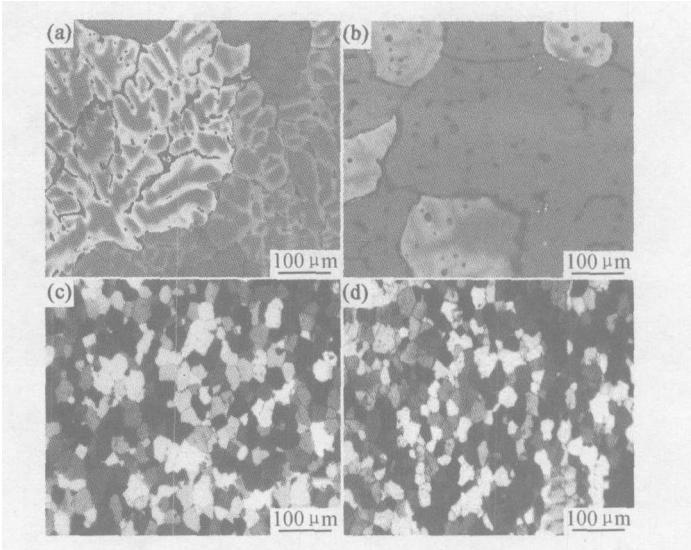


图 1 四种实验合金铸态金相组织  
(a) 合金 A; (b) 合金 B; (c) 合金 C; (d) 合金 D  
Fig. 1 Optical micrographs of as-cast alloys  
(a) alloy A; (b) alloy B; (c) alloy C; (d) alloy D

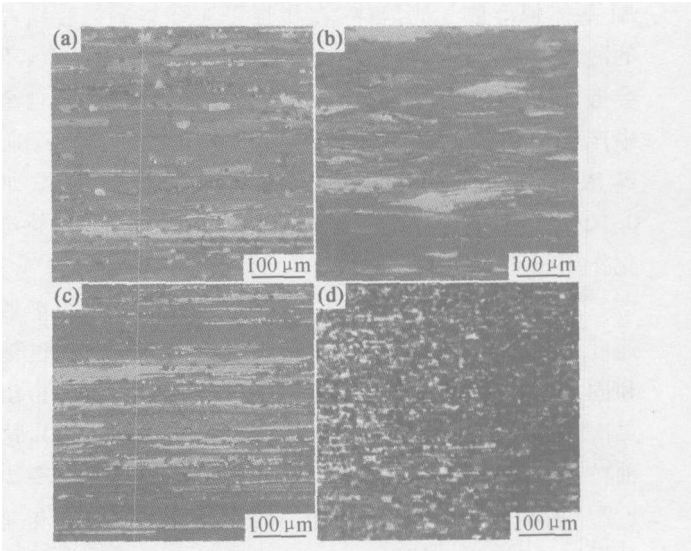


图 2 四种实验合金固溶态的金相组织  
(a) 合金 A; (b) 合金 B; (c) 合金 C; (d) 合金 D  
Fig. 2 Optical micrograph of solid solution alloys  
(a) alloy A; (b) alloy B; (c) alloy C; (d) alloy D

以看出, 合金 A 和合金 B 析出了大量弥散细小的第二相粒子( 图 3a, b), 粒子呈双叶花瓣状, 与基体共格, 根据文献<sup>[2, 5, 8]</sup> 及分析判断, 合金 A 中的粒子为  $\beta$  (Al<sub>3</sub>Zr) 相, 合金 B 中的粒子为 Al<sub>3</sub>Sc 或  $\beta'$  (Al<sub>3</sub>Zr) 相。添加 0.25% Sc 的合金 D 晶内析出粗大的片状相( 图 3 c), 参考有关文献<sup>[10, 11]</sup>, 经分析该相可能为 W(Al<sub>3</sub>-8Cu<sub>2</sub>-4Sc) 相。

## 3 分析与讨论

在铝合金中, Sc 能与 Al 发生反应, 会从熔体中优

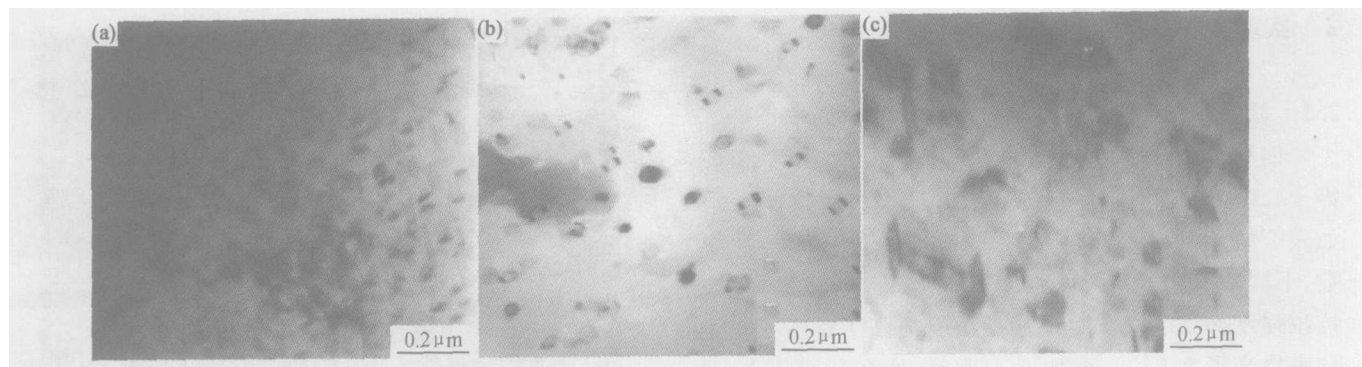


图 3 实验合金时效态(160 °C / 24h)的透射电子显微组织

(a) 合金 A ; (b) 合金 B ; (c) 合金 D

Fig. 3 TEM micrograph of aging alloys (160 °C / 24h)

(a) alloy A; (b) alloy B; (c) alloy D

先析出一次  $\text{Al}_3\text{Sc}$  不熔性质点; 这种相与基体完全共格, 可成为良好的非均质晶核, 合金凝固时, 可以起到非均质晶核的作用<sup>[1, 2, 9]</sup>。分析  $\text{Al}-\text{Sc}-\text{Zr}$  三元合金相图可知, 当  $\text{Sc}$  与  $\text{Zr}$  的含量较低时,  $\text{Sc}$  与  $\text{Zr}$  被固溶在  $\text{Al}$  基体中形成  $\alpha$  固溶体, 在相当于连续铸造铸锭结晶的冷却速度条件下,  $\text{Sc}$  与  $\text{Zr}$  在  $\text{Al}$  内固溶度更大, 不会形成初生  $\text{Al}_3\text{Sc}$  或  $\text{Al}_3\text{Zr}$  粒子, 所以要想  $\text{Sc}$  在合金中产生有效的晶粒细化效果, 其含量必须超过一个临界浓度。在  $\text{Al}-3.5\text{Cu}-1.5\text{Li}-0.12\text{Zr}$  合金中添加 0.10%  $\text{Sc}$ , 其含量低于这个临界浓度, 所以铸态晶粒细化作用不明显。

此外,  $\text{Sc}$  在  $\text{Al}$  中的固溶度很低, 在  $\text{Al}$  中的扩散速度小, 合金凝固结晶时  $\text{Sc}$  扩散不完全, 形成  $\alpha$  过饱和固溶体。在随后的热加工过程中过饱和固溶体析出二次细小, 弥散分布, 呈球状的  $\text{Al}_3\text{Sc}$  粒子(图 3a), 这种粒子与母相铝共格, 有着极大的共格错配(错配率为 1.2% 左右), 引起晶格强烈的应变, 从而锁住位错和亚晶界运动, 抑制再结晶的发生, 明显提高变形组织的稳定性, 同时提高合金的强度和塑性。Zr 在铝合金中也能形成  $\text{Al}_3\text{Zr}$  弥散相(图 3b), 其错配率为 0.8%, 也可抑制再结晶, 但效果不如  $\text{Al}_3\text{Sc}$  粒子。因此添加微量  $\text{Sc}$  能抑制合金的再结晶。至于添加 0.15%  $\text{Sc}$  合金 C 和 0.25%  $\text{Sc}$  合金 D 在 525 °C/h 固溶时已发生部分再结晶和完全再结晶, 强度降低, 这是由于在  $\text{Al}$  合金中, 当  $\text{Cu}$  含量大于 1.5%,  $\text{Sc}$  含量过高会形成粗大的  $\text{W}(\text{Al}_{1-8}\text{Cu}_{2-4}\text{Sc})$  相<sup>[10]</sup>, 这种相在一定条件下可能会促使  $\text{Al}$  合金发生再结晶。另一方面进入  $\text{W}$  相的  $\text{Cu}$ 、 $\text{Sc}$  使合金中的其他强化相减少, 减弱了合金抑制再结晶的效果, 降低了合金的强度。因此在  $\text{Cu}$  含量较高的  $\text{Al}$  合金中, 加入微量  $\text{Sc}$  合金化时, 其含量不宜过高, 否则不利于有效的发挥添加  $\text{Sc}$  合金化的潜在优势。

## 4 结论

(1) 在  $\text{Al}-\text{Cu}-\text{Li}$  合金中, 添加 0.10%  $\text{Sc}$  明显提高了合金的强度和塑性, 但添加量不宜超过 0.15%, 否则会降低合金强度。

(2) 在  $\text{Al}-\text{Cu}-\text{Li}$  合金中, 添加 0.10%  $\text{Sc}$  消除了合金铸态的枝晶组织, 但晶粒细化效果不明显, 添加 0.15%  $\text{Sc}$  和 0.25%  $\text{Sc}$  则显著细化合金铸态的晶粒组织。

(3) 在  $\text{Al}-\text{Cu}-\text{Li}$  合金中, 添加 0.10%  $\text{Sc}$  使合金在热加工过程中析出次生  $\text{Al}_3\text{Sc}$  粒子, 有效地抑制合金的再结晶, 但添加量超过 0.15% 会促进合金的再结晶。

(4) 在本试验条件下, 合金中  $\text{Sc}$  的理想加入量约为 0.10% ~ 0.15%。

## 参考文献

- [1] 杨志强, 尹志民. 俄罗斯铝-钪合金的研究与开发[J]. 轻合金加工技术, 2003, (11): 34-36.
- [2] 张永红, 尹志民. 微量  $\text{Sc}$ 、 $\text{Zr}$  对  $\text{Al}-\text{Mg}$  合金的组织 and 力学性能的影响[J]. 稀土, 2002, 3: 29-32.
- [3] 周昌荣, 潘青林, 王新宇, 等. 含钪  $\text{Al}-\text{Cu}-\text{Li}$  合金的形变时效研究[J]. 金属热处理, 2004, 10: 1-3.
- [4] LAVERNIA E J, GRANT N J. Review aluminium-lithium alloys [J]. J Mater Sci, 1987, 22: 1521-1529.
- [5] MILMAN YU V, LOTSKO D V, SIRKO O I. Sc effect of improving mechanical properties in aluminium alloy [J]. Mater Sci Forum, 2000, 37(331): 1107-1112.
- [6] DRITS, A M, KRIMOVA T V. Aluminium-lithium alloys for aerospace [J]. Advanced material process, 1998, (6): 48-51.
- [7] FRUDLJANDER I N, KABLOV E N, KOLOBNEV N I, et al. Aluminum-base alloy and article made of it [P]. Russia patent: 2163940, 1999.
- [8] TAN CH Y, ZHENG Z Q, XIA CH Q, et al. The aging feature of  $\text{Al}-\text{Li}-\text{Cu}-\text{Mg}-\text{Zr}$  alloy containing  $\text{Sc}$  [J]. J cent south univ technol, 2000, 7(2): 65-67.

(下转第 28 页)

从图 6 可知, 硬度随电流密度增长并非呈线性增长, 而是在  $J_k = 2.5 \sim 3.0 \text{ A/dm}^2$  存在最大值。通过分析, 阴极电流密度对复合镀层的影响通过以下两方面起作用: 其一, 通过对镀层的致密度来影响镀层的硬度。随着电流密度增大, 镀层越来越致密, 使得镀层的强度增强, 硬度增大, 但当电流密度超过某一数值, 由于沉积速度过快使得镀层疏松度增加, 空隙率增大, 从而使硬度降低。其二, 镀层中  $\text{r-SiC}$  的含量和  $\text{W}$  的含量影响镀层的硬度。W 原子的存在可对镀层起固溶强化的作用, 阴极电流密度越大对 W 的诱导共沉积有利, 即电流密度越大越有利于 W 对镀层的强化作用。 $\text{r-SiC}$  能对镀层起弥散强化作用, 且 SiC 本身是硬质相, 具有较高的硬度, 因此镀层中  $\text{r-SiC}$  的含量对镀层硬度有相当大的影响。实验表明, 在复合镀层的强化中  $\text{r-SiC}$  强化起主导作用。从图 5 可知, 阴极电流密度对镀层中  $\text{r-SiC}$  共析量影响存在最大值, 从而阴极电流密度对镀层的强化也存在最大值。从以上两方面可得出, 当阴极电流密度  $J_k = 2.5 \sim 3.0 \text{ A/dm}^2$  时, 纳米复合镀层存在显微硬度最大值。小于最大值, 随着阴极电流密度的减小, HV 值下降; 大于最大值, 随着阴极电流密度的增加, HV 值也下降。

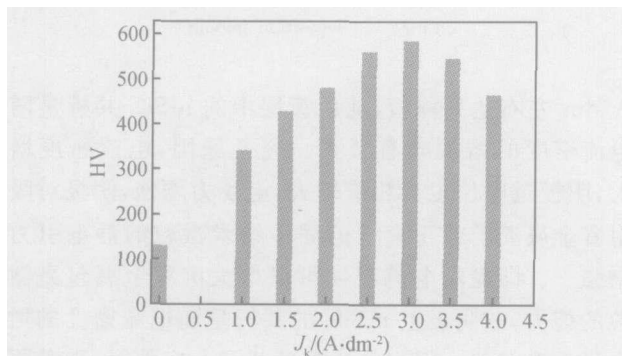


图 6 阴极电流密度对镀层硬度的影响

Fig. 6 The influence of cathodic current density on microhardness of coatings

### 3 结论

(1) 利用复合润湿剂的润湿性能及超声波的空化效应和机械剪切作用能够将纳米 SiC 微粒有效分散。

(2) 选择适当的阴极电流密度可制备出表面形貌良好、镀层致密、 $\text{r-SiC}$  分布均匀且硬度较高的纳米复合镀层。

(3) 在  $\text{Ni-W-SiC}$  纳米复合电镀体系中, 当  $\text{pH} = 3.5$ , 镀液温度为  $50^\circ\text{C}$ , 镀液中  $\text{r-SiC}$  的含量为  $10 \text{ g/L}$  时, 最佳的阴极电流密度  $J_k = 2.5 \sim 3.0 \text{ A/dm}^2$ 。

#### 参考文献

- [1] 李卫东, 朱军雄, 胡进, 等.  $\text{Ni-TiO}_2$  复合电镀工艺研究[J]. 表面技术, 2002, 31(2): 32–35.
- [2] 郭鹤桐, 张三元. 复合镀层[M]. 天津: 天津大学出版社, 1991.
- [3] GYFTOU P, PAVLATOU E A, SPYELLIS N, et al. Hardening modification of nickel matrix composite electrocoatings containing SiC nanoparticles [J]. Electroplating & Surface Treatment, 2001, 9(1): 23–28.
- [4] GYFTOU P, STROUMBOULI M, PAVLATOU E A, et al. Electrodeposition of  $\text{Ni-SiC}$  composite by pulse electrolysis [J]. Trans IM F, 2002, 80(3): 88–91.
- [5] KIM S K, YOO H J. Formation of bilayer  $\text{Ni-SiC}$  composite coatings by electrodeposition [J]. Surface and Coatings Technology, 1998, 108–109: 564–569.
- [6] 程森, 王玉林, 赵高敏. 纳米 SiC 复合镀层制备工艺的研究[J]. 材料保护, 2002, 35(8): 24–26.
- [7] 张文峰, 朱荻, 薛玉君, 等.  $\text{Ni-SiC}$  纳米复合电镀工艺的研究[J]. 电镀与环保, 2004, 24(4): 10–13.
- [8] 吴蒙华, 傅欣欣, 李智, 等. 超声电沉积镍/纳米碳化硅复合镀层组织结构研究[J]. 机械工程材料, 2004, 28(12): 46–48.
- [9] 谭澄宇, 郑子樵, 陈淮.  $\text{Ni-Al}_2\text{O}_3$  纳米复合电镀工艺的初步研究[J]. 材料保护, 2003, 36(4): 43–45.

收稿日期: 2005-05-25; 修订日期: 2005-11-15

作者简介: 王晋春(1976–), 男, 在读硕士, 主要从事金属腐蚀与防护方面研究, 联系地址: 武汉理工大学马房山校区 168 信箱(430070)。

(上接第 24 页)

- [9] 夏德顺. 含钨的铝和铝锂合金[J]. 航天工艺, 1999, (2): 37–42.
- [10] 肖于德, 黄龙坚, 黎文献, 等. 钨、钼对  $\text{Al-Cu-Mg-Fe-Ni}$  系铝合金显微组织与力学性能的影响[J]. 稀有金属, 1999, 5(23): 331–335.
- [11] YELAGING V I, ZAKHAROV V V, 谢燮撰译. 用钨合金化的铝合金[J]. 轻金属, 1993, (3): 54–59.

基金项目: 国家“863”项目(2002AA305104)

收稿日期: 2005-04-05; 修订日期: 2005-07-19

作者简介: 周昌荣(1975–), 男, 博士, 主要从事高性能铝合金的研究, 联系地址: 广西桂林市桂林电子工业学院信息材料科学与工程系(541004)。