

Nd 对 2519 铝合金组织与耐热性能的影响

张新明, 王文韬, 刘 波, 陈明安, 刘 瑛, 高志国, 叶凌英, 贾寓真

(中南大学 材料科学与工程学院, 长沙 410083)

摘 要: 利用力学性能测试、金相、X 射线衍射、扫描电镜与透射电镜等研究微量 Nd 对 2519 铝合金组织与力学性能的影响。结果表明: 添加 0.14% Nd 提高合金的强度, 硬度最适宜; Nd 元素与 Cu 和 Al 元素主要形成 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Nd}$ 金属间化合物, 并沿晶界分布。这些金属间化合物有效地阻碍高温时基体的变形和晶界的迁移, 从而提高了合金的高温强度。Nd 能细化合金的时效强化相, 提高合金力学性能。添加 0.14% Nd 时, 合金在 300 °C 时的抗拉强度提高 15.4%, 室温抗拉强度提高 4.4%; 当 Nd 含量进一步增加时, 合金室温及高温力学性能降低。

关键词: 2519 铝合金; 显微组织; 力学性能; 热稳定性; 稀土; Nd

中图分类号: TG 146.2⁺1

文献标识码: A

Effect of Nd addition on microstructures and heat-resisting properties of 2519 aluminum alloy

ZHANG Xin-ming, WANG Wen-tao, LIU Bo, CHEN Ming-an, LIU Ying, GAO Zhi-guo, YE ling-ying, JIA Yu-zhen

(School of Materials Science and Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: The effect of Nd on the mechanical properties and microstructures of 2519 aluminum alloy were investigated by means of hardness test, mechanical properties test, X-ray diffraction, OM, SEM and TEM. The results show that, with addition of Nd, the hardness and strength enhance. Nd can react with Al and Cu, and the intermetallic compound $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Nd}$ forms, which disperses along the grain boundaries. The mechanical properties at elevated temperature are improved because this dispersed compound prevents the deformation of matrix and movement of the grain boundaries at elevated temperature. The aging precipitates can be refined with appropriate addition of Nd, which increases the mechanical properties of the alloy. Adding 0.14% Nd increases the tensile strength about 15.4% at 300 °C and that at room temperature by 4.4%. With further addition of Nd, the mechanical properties at room and high temperature decrease.

Key words: 2519 aluminum alloy; microstructure; mechanical properties; thermal stability; rear earth; Nd

2519 铝合金是美国 20 世纪 80 年代后期研发的一种新型装甲铝合金, 具有优良的力学性能、抗应力腐蚀性能和焊接性能^[1-3]。因此, 提高 2519 合金的耐热性能对拓宽合金的应用领域具有重要的意义。在铝合金中添加少量稀土元素往往可以起到变质、净化和微合金化的作用^[4-6], 而当添加量足以生成金属间化合物或形成固溶体时, 则对提高铝合金的耐热性具有显著作用。文献[7-9]研究了不同稀土元素对 Al-Cu 合金组

织与性能的影响, 结果表明稀土能细化合金的主要强化相, 阻碍高温时晶界的滑移, 提高了合金的高温强度。稀土元素 Nd 对镁合金的影响的研究较多, Nd 对提高合金常温、高温力学性能以及抵抗高温蠕变有积极的作用^[10-11]。添加 Nd 至 Al-Si 合金中可以细化强化相, 提高时效硬度^[12]。但 Nd 在 Al-Cu 合金中的作用未见报道。本文作者研究了 Nd 对 2519 铝合金组织与耐热性能的影响, 以期对 Al-Cu 合金耐热性能的研究

基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB623706)

收稿日期: 2008-07-02; **修订日期:** 2008-10-20

通讯作者: 张新明, 教授, 博士; 电话: 0731-8830265; E-mail: xmzhang@mail.csu.edu.cn

提供参考。

1 实验

1.1 实验材料

实验合金的化学成分(质量分数)如表 1 所列。采用 Al-Mn 和 Al-Nd 中间合金以及工业纯铝、纯铜、纯镁配制合金。熔炼在电阻石墨坩埚中进行,熔炼温度为 780 °C,采用 NaCl 和 KCl 精炼,将合金于 740 °C 浇入预热至 250 °C 的铁模中,铸锭尺寸为 120 mm×100 mm×25 mm。铸锭经 505 °C, 18 h 均匀化处理,铣面后加热至 460 °C,保温 2 h 热轧至 7 mm,再经 430 °C, 2 h 中间退火,最后轧至 2.2 mm。合金的形变热处理工艺为 533 °C, 2 h 固溶,水淬(水温 15 °C),冷变形 10%,峰值时效(165 °C, 15 h)。

1.2 实验方法

硬度测试在 HV-10B 维氏硬度计上进行,负荷为 3 kg。常温拉伸实验在 CSS-44100 万能材料力学拉伸机上进行,拉伸速度为 2 mm/min,高温拉伸实验在 Instron Model 8032 电子拉伸机上进行,试样随炉升温,保温 10 min 后进行拉伸,拉伸速度为 0.02 mm/s。

在 XJP-6A 型金相显微镜下观察金相组织,在 D/max2500 转型 X 射线衍射仪上进行物相分析,在 Sirion200 扫描电镜上进行拉伸试样的表面形貌观察与能谱分析。在 Tecnai G²20 型透射电镜上进行 TEM 分析,加速电压为 200 kV,薄膜试样采用电解双喷减薄,电解液为 30%硝酸和 70%甲醇混合液,在-15 °C 和 15 V 条件下制备。

表 1 实验合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of experimental alloys (mass fraction, %)

Alloy No.	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Nd
1	5.80	0.18	0.55	0.22	0.04	0
2	5.91	0.21	0.52	0.25	0.04	0.06
3	5.82	0.23	0.50	0.23	0.05	0.11
4	5.79	0.23	0.54	0.28	0.04	0.14
5	5.88	0.20	0.48	0.20	0.05	0.18
6	5.93	0.22	0.51	0.18	0.04	0.26

2 结果与分析

2.1 Nd 对合金力学性能的影响

不同 Nd 含量的 2519 合金经峰值时效后,在不同温度下的力学性能如图 1 所示。由图 1 可见,添加 Nd 后,2519 合金的强度在室温和高温下均得到提高。在室温下,不含 Nd 元素的合金强度为 478.6 MPa;随着 Nd 的加入,强度上升,当 Nd 含量为 0.14%时,合金强度达到最大值,为 506.5 MPa,而伸长率变化不大;但当 Nd 含量超过 0.14%时,强度下降,伸长率也下降;当 Nd 含量达到 0.26%时,抗拉强度降至 490.8 MPa。在 300 °C 时,合金强度变化趋势与在室温下大体相同。添加 0.14% Nd 后,合金的抗拉强度由 144.2 MPa 增加到 171.0 MPa;当 Nd 含量增加到 0.26%时,合金抗拉强度下降至 155.6 MPa,而伸长率随 Nd 含量的增加而不断下降。

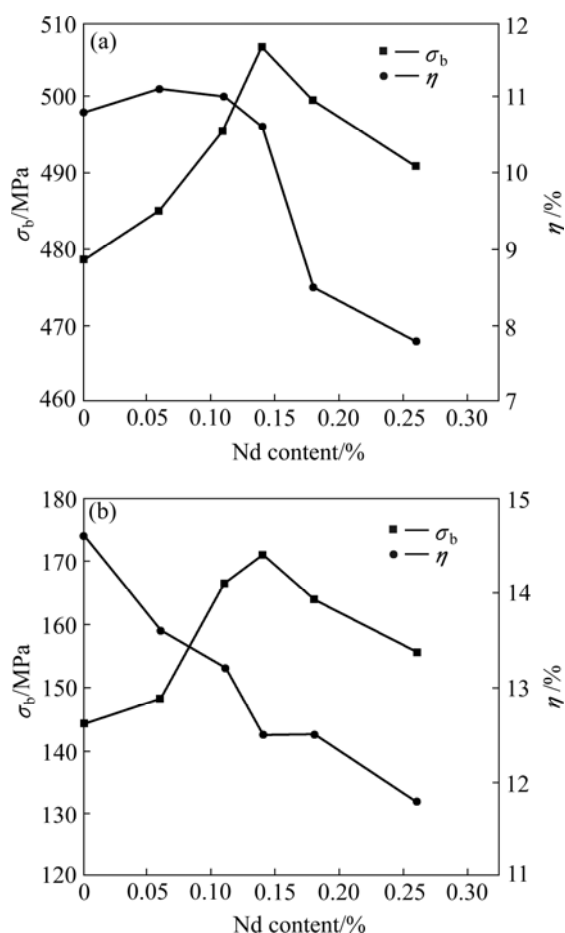


图 1 不同 Nd 含量的合金在不同温度下的拉伸性能

Fig.1 Tensile strength of alloys with different Nd contents at different temperatures

2.2 Nd 在 2519 合金中的分布及其存在状态

图 2 所示为含 0.26% Nd 合金铸态试样中 Cu 与 Nd 元素的线扫描分布图。由图 2 可看出, Cu 与 Nd 元素主要分布在晶界上,形成由 Al、Cu 和 Nd 元素所组成的稀土化合物。晶界上 A 点的能谱图如图 3 所示。

铸态合金 X 射线衍射分析如图 4 所示。由图 4 可看出, 合金 1 的主要相为 $\alpha(\text{Al})$ 相和 $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$ 相; 而添

加了 0.26%Nd 的合金 6 中, 还含有少量的 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Nd}$ 相。

2.3 Nd 对 2519 合金时效态组织的影响

不同 Nd 的合金在峰值时效下的显微组织如图 5 所示。由图 5 可看出, 添加 0.14% Nd 合金 4 析出的 θ' 相比未加 Nd 的合金 1 晶内的细小; 而当 Nd 含量达到 0.26% 时, 合金 6 析出的 θ' 相反而粗化, 且数量减少; 在晶界上, 未添加 Nd 的合金析出细小、不连续相, 随着 Nd 含量的增加, 晶界析出相开始随之长大; 当 Nd 含量达到 0.26% 时, 晶界上有大粒子出现, 其长向尺寸可达到 $1.2\text{ }\mu\text{m}$ (见图 6)。对其进行能谱分析, 发现主要为 Al、Cu 和 Nd 的化合物。

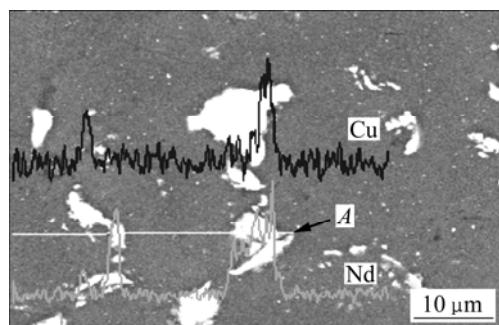


图 2 铸态合金中 Cu 和 Nd 元素的线扫描

Fig.2 Line scanning of Cu and Nd in as-cast alloy

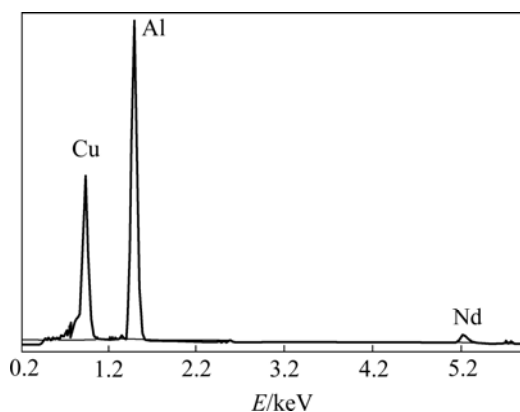


图 3 晶界上 A 点粒子的能谱分析

Fig.3 EDS pattern of particles of point A along grain boundary

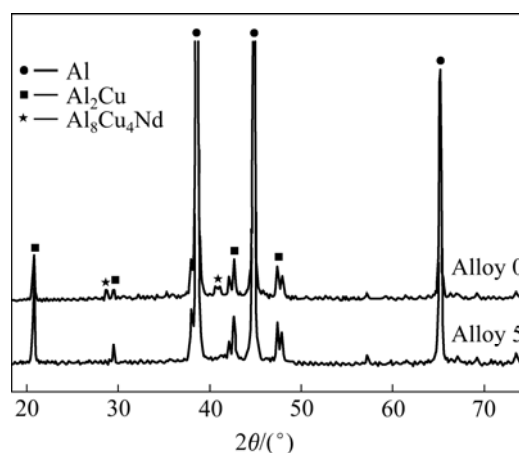


图 4 合金铸态样的 X 射线衍射谱

Fig.4 XRD patterns of as-cast samples

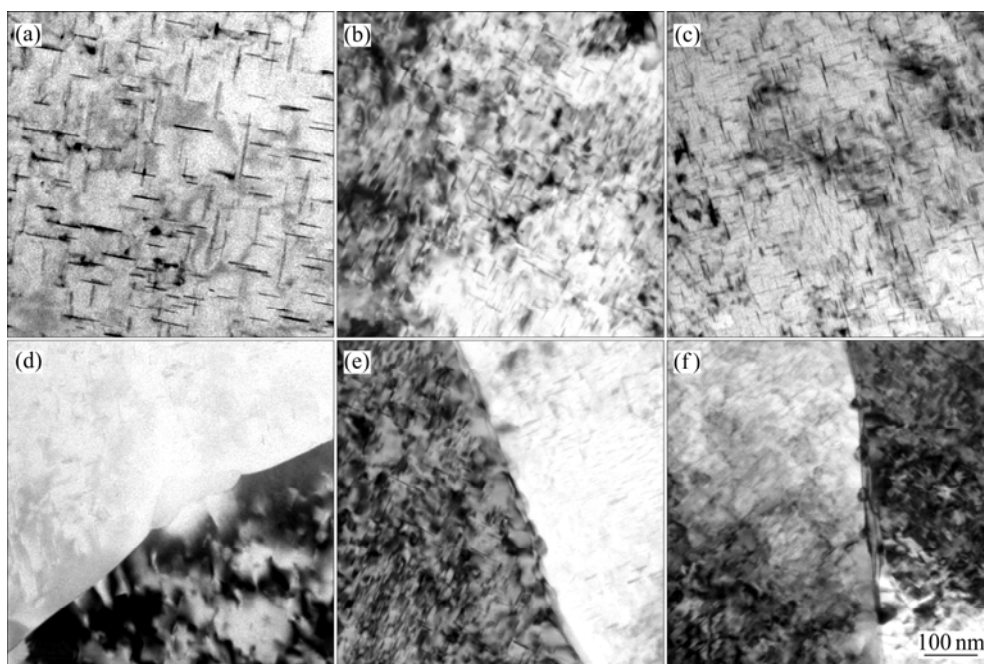


图 5 合金在峰值时效下的 TEM 像

Fig.5 TEM images of studied alloys under peak-aging: (a) In grain, alloy 1; (b) In grain, alloy 4; (c) In grain, alloy 6; (d) Along grain boundary, alloy 1; (e) Along grain boundary, alloy 4; (f) Along grain boundary, alloy 6

合金在 300 °C 保温 10 min 的显微组织如图 7 所示。由图 7 可见, 未添加 Nd 的合金析出细小棒状相, 延晶界分布; 随着 Nd 含量的增加, 析出相成粒状, 尺寸

变大, 当 Nd 含量达到 0.26% 时, 粒状析出相已变得相当粗大, 有的其长向尺寸可达到 1.5 μm (见图 8), 对其进行能谱分析, 发现主要成分为 Al、Cu 和 Nd。

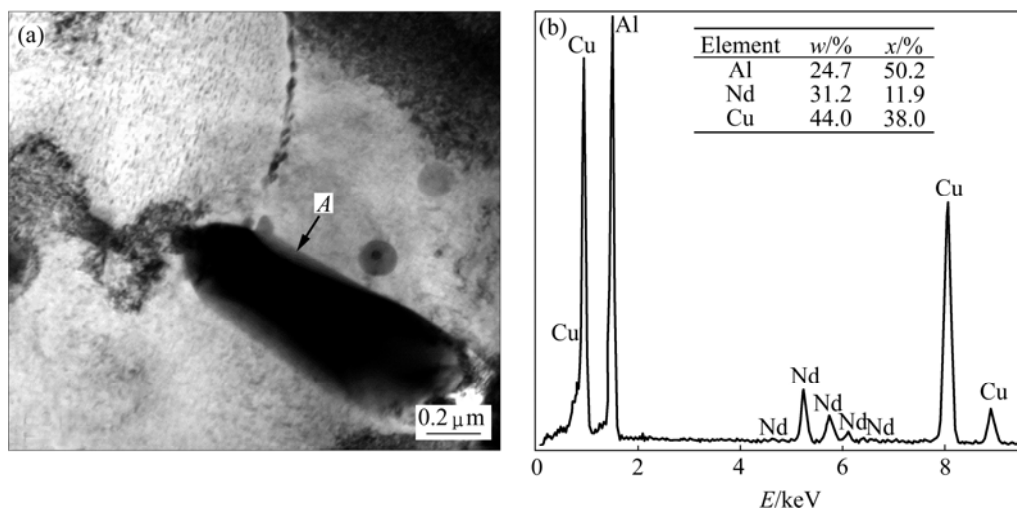


图 6 合金 6 在峰值时效下的 TEM 像及 A 点能谱分析

Fig.6 TEM image(a) and EDS pattern of particle A(b) of alloy 6 under peak aging

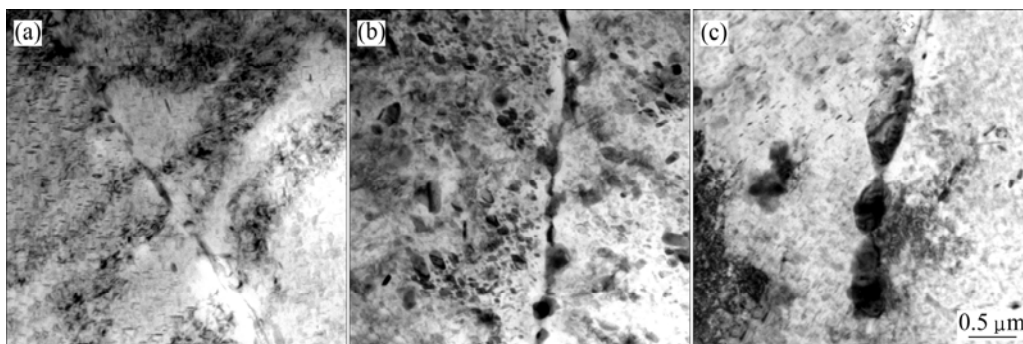


图 7 合金在 300 °C 时的 TEM 像

Fig.7 TEM images of studied alloys at 300 °C: (a) Alloy 1; (b) Alloy 4; (c) Alloy 6

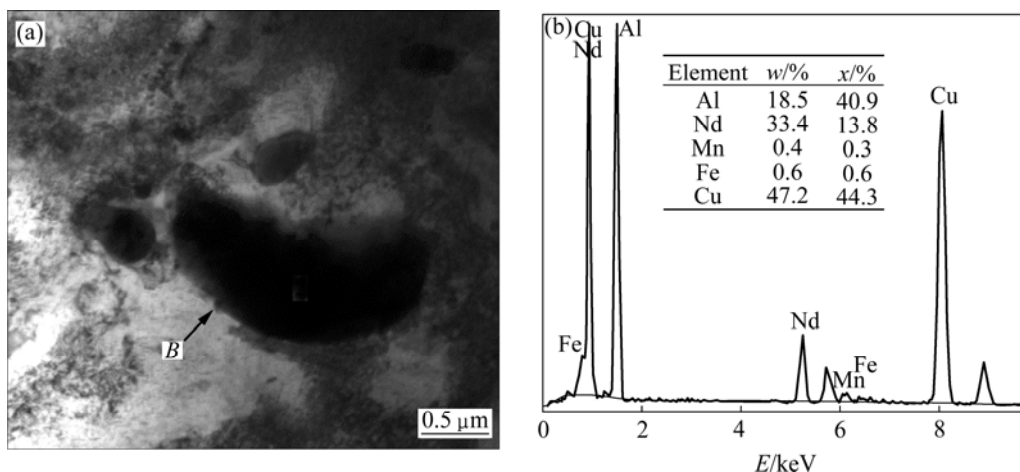


图 8 合金 6 在 300 °C 时的 TEM 像及 B 点能谱分析

Fig.8 TEM image(a) and EDS pattern of particle B(b) of alloy 6 at 300 °C

3 讨论

由以上结果可看出, Nd 对 2519A 合金的时效组织与性能有较大影响。由图 3 可见, Nd 元素主要分布在晶界。由文献[13]可知, 稀土元素主要延晶界分布是由稀土元素半径大于 Al 的半径引起的。Nd 的原子半径为 0.182 nm, 大于 Al 原子半径(Al 原子半径为 0.143 nm), 若进入晶格内, 势必引起较大的晶格畸变, 使系统能量增加。而晶界原子排列较松散, 稀土化合物在晶界上的聚集引起的畸变能要比基体中析出产生的畸变能小得多, 为了保持系统自由能降低, Nd 原子只能向原子排列不规则的晶界富集, 因而, 富稀土化合物 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Nd}$ 基本上沿晶界析出。然而, 在高温条件下, 合金的晶粒强度高于晶界的晶粒强度, 要提高合金强度就得减小晶界的弱化。沿晶界分布的含 Nd 稀土化合物熔点高, 具有较强的热稳定性(见图 8), 这种颗粒状化合物可以很好地钉扎位错, 阻碍高温下晶界的滑移。同时, Nd 是一种表面活性元素^[12], 容易与晶界的空位结合集聚在晶界, 降低了晶界能, 提高了界面的结合力, 进而强化晶界, 提高了合金的耐热性。但当加入过量 Nd(大于 0.14%)时, 含 Nd 化合物聚集长大成块状(见图 7(c)), 对基体产生不良影响, 阻碍晶界运动的作用减弱, 导致高温力学性能下降。

合金的力学性能与主要强化相密切相关^[14]。2519 铝合金沉淀相析出序列如下^[15]: α 过饱和固溶体 $\rightarrow$ G.P. 区 $\rightarrow \theta''$ 相 $\rightarrow \theta'$ 相 $\rightarrow \theta(\text{CuAl}_2)$ 相, 主要强化相为 θ' 相。从图 6(b)可见, 加入 0.14% Nd 后, θ' 相得到细化, 密度增大。这是由于 Nd 的添加为强化相提供了更多的形核位置, 从而使 θ' 相更细小弥散, 提高常温力学性能。然而, 当 Nd 过量时, 会与 Al 和 Cu 元素形成大量 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Nd}$ 稀土化合物, 减小了 Cu 在 Al 中的固溶度, 从而减少了时效强化相的析出量(见图 5(c)), 导致常温力学性能下降。

4 结论

1) Nd 能提高 2519 合金的高温力学性能和常温力学性能。当 Nd 含量为 0.14 % 时, 合金强度最高, 在 300 °C 和室温下的抗拉强度分别提高了 15.4% 和 4.4%。

2) Nd 在 2519A 合金中主要以稀土化合物 $\text{Al}_8\text{Cu}_4\text{Nd}$ 的形式存在, 并沿晶界分布。该稀土化合物

热稳定性强, 高温下能有效地阻碍基体的变形和晶界的迁移, 从而明显提高了合金的高温性能。但当 Nd 含量超过 0.14 % 时, 会使含 Nd 化合物聚集长大成块状, 耐热性能下降。

REFERENCES

- [1] CARTER H B, SAXENA A. Transient crack growth behavior in aluminum alloy C415-T8 and 2519-T87[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 1999, 62(1): 1-22.
- [2] KRAMER L S, BLAIR T P, BLOUGH S D, FISHER Jr J J, PICKENS J R. Stress-corrosion cracking susceptibility of various product forms of aluminum alloy 2519[J]. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2002, 11(6): 645-650.
- [3] DYMEK S, DOLLAR M. TEM investigation of age-hardenable Al 2519 alloy subjected to stress corrosion cracking tests[J]. *Materials Chemistry and Physics*, 2003, 81(2/3): 286-288.
- [4] 杜挺. 稀土元素在金属材料中的一些物理化学作用[J]. *金属学报*, 1997, 33(1): 69-77.
DU Ting. Physical-chemistry effect of rear earth elements on metallic material[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 1997, 33(1): 69-77.
- [5] FERRO R, SACCONI A, BORZONE G. Rare earth metal in light alloy[J]. *Journal of Rare Earths*, 1997, 15(1): 45-50.
- [6] KUBOTA M, SUQUMATA M, KANEKO J. Structures and mechanical properties of rapidly solidified Al-8%Y based alloys containing transition metals[J]. *Light Metals*, 1994, 4(6): 336-341.
- [7] XIAO D H, HUANG B Y. Effect of Yb addition on precipitation and microstructure of Al-Cu-Mg-Ag alloys[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2007, 17(6): 1181-1185.
- [8] 肖代红, 王健农, 陈世朴, 丁冬雁. 钕对高 Cu/Mg 比率 Al-Cu-Mg 合金组织和耐热性能的影响[J]. *中国稀土学报*, 2003, 21(5): 564-567.
XIAO Dai-hong, WANG Jian-nong, CHEN Shi-pu, DING Dong-yan. Effect of Ce addition on microstructure and elevated temperature properties in Al-Cu-Mg alloy with high Cu/Mg ratio[J]. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 2003, 21(5): 564-567.
- [9] 李慧中, 张新明, 陈明安, 周卓平, 龚敏如. 稀土钕对 2519 合金组织及耐热性能的影响[J]. *材料科学与工程学报*, 2005, 23(1): 38-41.
LI Hui-zhong, ZHANG Xin-ming, CHEN Ming-an, ZHOU Zhuo-ping, GONG Min-ru. Effect of Y addition on microstructure and elevated temperature properties of 2519 aluminum alloy[J]. *Journal of Materials Science & Engineering*, 2005, 23(1): 38-41.
- [10] 黄晓锋, 王渠东, 曾小勤, 朱燕萍, 卢晨, 丁文江. 钕对 Mg-5Al-1Si 高温蠕变及组织性能的影响[J]. *中国稀土学报*,

- 2004, 22(3): 361–364.
- HUANG Xiao-feng, WANG Qu-dong, ZENG Xiao-qing, ZHU Yan-ping, LU Chen, DING Wen-jiang. Effect of neodymium on microstructure and high temperature creep properties of Mg-5Al-1Si magnesium alloy[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2004, 22(3): 361–364.
- [11] 迟大钊, 吉泽升, 梁维中. Mg-Nd-Zr-Zn 合金的制备及钕对合金组织性能的影响[J]. 中国稀土学报, 2004, 22(2): 251–253.
- CHI Da-zhao, JI Ze-sheng, LIANG Wei-zhong. Preparation of Mg-Nd-Zr-Zn alloy and effect of neodymium on its structure and property[J]. Journal of the Chinese Rare Earth Society, 2004, 22(2): 251–253.
- [12] 李荣德, 许国宇, 李润霞. 钕对铸造 Al-Si-Cu-Mg 合金力学性能的影响[J]. 铸造, 2006, 55(4): 390–392.
- LI Rong-de, XU Guo-yu, LI Rui-xia. Effect of Nd addition on the mechanical property of Al-Si-Cu-Mg cast alloy[J]. Foundry, 2006, 55(4): 390–392.
- [13] 李慧中, 张新明, 陈明安, 周卓平. 钕对 2519 铝合金铸态组织的的影响[J]. 中南大学学报: 自然科学版, 2005, 36(4): 545–549.
- LI Hui-zhong, ZHANG Xin-ming, CHEN Ming-an, ZHOU Zuo-ping. Effect of yttrium on as-cast microstructure of 2519 aluminum alloy[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2005, 36(4): 545–549.
- [14] 刘 刚, 丁向东, 孙 军, 陈康华. 具有盘状析出相铝合金的时效强化模型[J]. 中国有色金属学报, 2001, 11 (3): 337–347.
- LIU Gang, DING Xiang-dong, SUN Jun, CHEN Kang-hua. A model for age strengthening of plate-like-precipitate-containing Al alloys[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2001, 11 (3): 337–347.
- [15] TAKEDA T, MAEDA Y, YOSHIDA A, YABUTA K, KONUMA S, ENDO T. Discontinuity of G.P.(I) zone and θ' -phase in an Al-Cu alloy[J]. Scripta Materialia, 1999, 41(6): 643–649.

(编辑 李艳红)