

合金化元素 Zn 对 GW 系镁合金组织和力学性能的影响 *

李杰华 介万奇 杨光昱
(西北工业大学材料学院, 西安 710072)

摘要 通过 OM、XRD、SEM 等分析方法及拉伸实验研究了合金化元素 Zn 对 GW 系镁合金铸造组织和力学性能的影响。研究表明: 加入合金化元素 Zn 后, 合金组织发生较大变化, 形成雪花状的 δ -Mg 枝晶, 第二相由骨骸状变为相互连接的网状; 而且在固溶处理以及时效处理过程中, 二者形貌没有变化。实验合金 GWZ721 热处理后室温的抗拉强度达到 250 MPa, 屈服强度达到 235 MPa, 延伸率达到 6.2%, 显著优于实验合金 GW72。热处理后的高温瞬时抗拉强度和屈服强度随着温度的升高均略有下降, 延伸率有所上升。在 200、250 和 300 °C 时, 实验合金的抗拉强度仍分别保持为 225、220 和 205 MPa。

关键词 显微组织, 力学性能, 铸造镁合金, 固溶处理

中图分类号 TG146.4

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2007)07-1077-05

INFLUENCES OF ALLOYING ELEMENT Zn ON THE MICROSTRUCTURES AND MECHANICAL PROPERTIES OF GW SERIES MAGNESIUM ALLOYS

LI Jiehua, JIE Wanqi, YANG Guangyu

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

Correspondent: LI Jiehua, Tel: (029)88495414, Fax: (029)88495414, E-mail: Lijiehua2008@126.com

Supported by National Basic Research Program of China (No.G2000067202)

Manuscript received 2007-02-12, in revised form 2007-06-13

ABSTRACT The influences of alloying element Zn on the microstructures and mechanical properties of GW magnesium alloys were investigated by using OM, XRD, SEM and mechanical property tests. The results show that the snow flake-like δ -Mg dendrites formed. Moreover, the morphology is still kept after annealing. The second phase changed from skeleton frame to net-shape with adding Zn. The ultimate tensile strength and the yield strength of the experimental alloys named GWZ721 reached 250 and 235 MPa respectively, and the elongation also reached 6.2%, which are much better than those of the experimental alloy named GW72 without adding Zn. The ultimate tensile strength and the yield strength of the alloys named GWZ721 at elevate room temperature decreased slightly with increasing the temperature, however, the elongation increased with increasing the temperature. The ultimate tensile strengths after heat-treatments at 200, 250 and 300 °C still kept 225, 220 and 205 MPa, respectively.

KEY WORDS microstructure, mechanical property, cast magnesium alloy, solid solution

目前, 镁合金的研究方兴未艾, 其应用也日益广泛。但镁合金的耐高温、抗蠕变性能较差, 限制了其在某些特定领域的使用, 如导弹舱体以及汽车的动力部件等。因此, 耐热镁合金的研究开发已经成为镁合金研究领域的热门课题。稀土元素, 尤其是重稀土元素, 作为提高镁合金耐热性能的最有效的合金化元素得到了越来越多的重视, 如近期报道的 Mg-Y 系、Mg-Sc 系、Mg-Gd 系、Mg-

Dy 系及 Mg-Sm 系等合金^[1-3]。研究表明^[4,5], 添加重稀土元素 Gd 能有效提高镁合金的三温(低温、室温和高温)性能、抗蠕变性能以及抗腐蚀性能。目前已有一系列含 Gd 镁合金材料报道^[6-9], 如: Mg-Gd-Y-Zr、Mg-Gd-Nd-Zr、Mg-Gd-Y-Mn 以及 Mg-Nd-Gd-Zn-Zr 等。但是, 由于此类镁合金大都需要较高含量的重稀土元素, 在一定程度上丧失了镁合金最有价值的低密度特性, 并且提高了生产成本, 其应用仅仅局限在一些特殊领域, 如赛车, 航空航天等。在保证此类合金具有良好高温性能的前提下, 减少重稀土元素的含量, 进而降低成本, 是目前国内外关注的焦点, 也是实现商品化的必由之路。本文

* 国家重点基础研究发展计划资助项目 G2000067202

收到初稿日期: 2007-02-12, 收到修改稿日期: 2007-06-03

作者简介: 李杰华, 男, 1979 年生, 博士

首先通过复合添加 Gd 和 Y 两种重稀土元素, 从而得到具有较高热稳定性的 GW 系镁合金; 并进一步探讨添加合金化元素 Zn 对 GW 系镁合金铸造组织和力学性能的影响。

1 实验方法

实验合金在 RJ-6 熔剂保护下在 6 kg 电阻坩锅中进行熔炼. Mg 和 Zn 以纯金属的形式加入, Gd 以 Mg-Gd (含 Gd 26%) 中间合金的形式加入, Y 以 Mg-Y (含 Y 25%) 中间合金的形式加入, Mn 以 $MnCl_2$ 的方式和熔剂一起加入. 合金熔炼好后, 升温至 800 °C 左右, 并保温 30 min. 在 750 °C 做精炼 / 变质处理并静置 15 min 后, 再在 760 °C 时分别浇铸成标称尺寸为直径 10 mm, 长 50 mm 的金相试样和直径 12 mm 标准拉力试样. 实验合金的成分分析结果见表 1.

表 1 实验合金的化学成分

Table 1 Chemical compositions of experimental alloys

Experimental alloy	(mass fraction, %)				
	Gd	Y	Zn	Mn	Mg
GW72	7.08	2.40	-	0.41	Bal.
GWZ721	6.68	2.46	0.98	0.43	Bal.

室温力学性能的测试在 CSS1220 型电子万能拉力试验机上进行. 每组测 3 根, 结果取其平均值. 拉力试验机的拉伸速度为 0.5 mm/min. 实验合金的化学成分分析采用电感耦合等离子原子发射光谱法. 金相组织观察采用 XJL-02 型光学金相显微镜. 采用差示扫描量热 (DSC) 法分析实验合金的相变, 差示扫描量热仪型号为 DSC-2910 型, 加热速率为 10 °C /min.

力学性能试棒的热处理在箱式炉中进行, 恒温区的温度均匀性为 ± 3 °C. 根据图 1a DSC 分析曲线可知, 合金 GW72 为单相组织; 但是从图 2a 实验合金 GW72 的 XRD 分析结果可知, 合金中存在两相. 参考 Mg-Y 合金二元相图可知, $Mg_{24}Y_5$ 的固相线约在 774.8 °C [10], 热分析只做到 700 °C, 而且, 考虑到 $Mg_{24}Y_5$ 的量较少, 经过较长时间的熔化过程可能会溶于镁基体, 同时考虑到热分析仪器的精度, 没有能够在热分析曲线上反应出来. 因此, 对 GW72 实验合金采取分段加热方式, 在 400 °C 下保温 3 h, 然后再逐步升温到固溶温度 (550 °C), 保温 12 h, 直接将试样淬于 70—80 °C 的热水中. 然后, 在固溶处理完成后 8 h 对试样进行时效处理 (205 °C /12 h, AC). 图 1b 实验合金 GWZ721 的 DSC 分析曲线表明, GWZ721 为两相组织, 其固相线温度约为 530 °C. 因此, 对 GWZ721 实验合金也采取了分段加热方式, 在 390 °C 下保温 3 h, 然后再逐步升温到固溶温度 (500 °C), 保温 12 h, 直接将试样淬于 70—80 °C 的热水中. 然后, 采用同上的时效处理工艺.

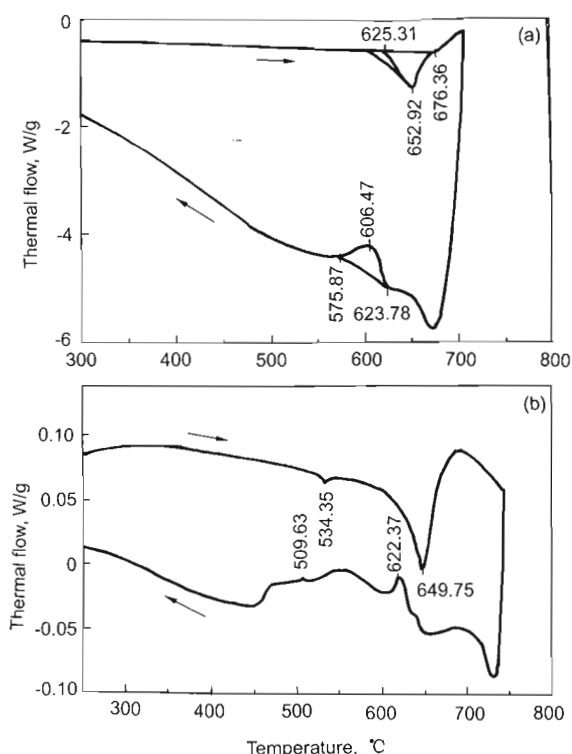


图 1 实验合金 GW72 和 GWZ721 的 DSC 曲线

Fig.1 DSC curves of the experimental alloys GW72 (a) and GWZ721 (b)

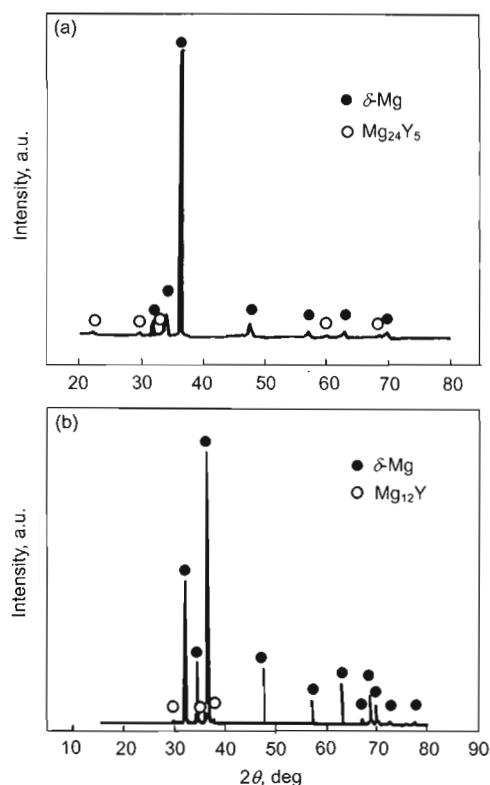


图 2 两种实验合金的 XRD 分析结果

Fig.2 XRD patterns of the as-cast alloy GW72 (a) and GWZ721 (b)

2 实验结果

2.1 实验合金的铸态组织

图 3 是实验合金的金相组织. 可以看出, GW72 实验合金中存在断续的第二相, 而 GWZ721 为非常发达的枝晶. 结合图 2 可知, GW72 合金中断续的第二相为 $Mg_{24}Y_5$, 而 GWZ721 实验合金中的第二相为 $Mg_{12}Y$. XRD 结果表明, 与纯 Mg 相比, 合金基体相 δ -Mg(hcp) 衍射峰向低角偏移, 这是因为原子半径大的 Gd 原子部分置换了 Mg 原子引起的. 图 4 是实验合金铸造组织的 SEM 照片. 可以看出, GW72 实验合金存在一些近似骨骼状的第二相, 虽然有相互联结的趋势, 但是没有连接成网状; 而 GWZ721 实验合金中第二相相互联结成为网状, 同时第二相也较 GW72 实验合金更为圆润. 通过添加合金化元素 Zn, 有效地改善了实验合金的组织.

2.2 实验合金的热处理组织

为了进一步观察实验合金的固溶强化效果, 对实验合金 GWZ721 按照上述的工艺进行了热处理. 图 5 是

GWZ721 实验合金热处理后显微组织. 与图 3b 对比可以看到, 在固溶以及时效处理过程中, 雪花状的枝晶形貌没有变化, 只是略有溶解, 说明基体具有良好的热稳定性.

图 6 是 GWZ721 实验合金热处理后的 SEM 照片. 对比图 4b 可以看到, 第二相在固溶处理过程中在晶界处部分溶入基体. 同时也可以更加清楚地看到, 在固溶以及时效处理过程中, 雪花状的枝晶形貌没有变化, 第二相的网状形态依然存在.

2.3 实验合金的力学性能

2.3.1 室温力学性能 表 2 是实验合金在铸态和热处理后的室温力学性能. 可以看到, 实验合金 GW72 铸态下的室温力学性能相对较差; 而实验合金 GWZ721 的室温力学性能则相对较好, 尤其是屈服强度和延伸率, 这与该合金组织中第二相的网状形态有关. 在经过热处理后, 实验合金的强度均有所增加, 而塑性也有所上升. GWZ721 合金抗拉强度达到 250 MPa, 屈服强度甚至达到 235 MPa, 显著优于实验合金 GW72. 同时该合金塑性也比实验合

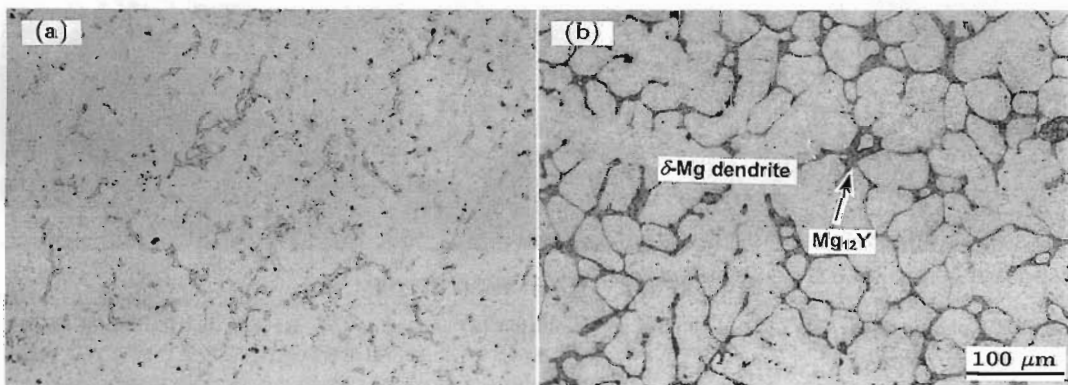


图 3 两种实验合金的铸态微观组织

Fig.3 OM photos of the as-cast alloys GW72 (a) and GWZ721 (b)

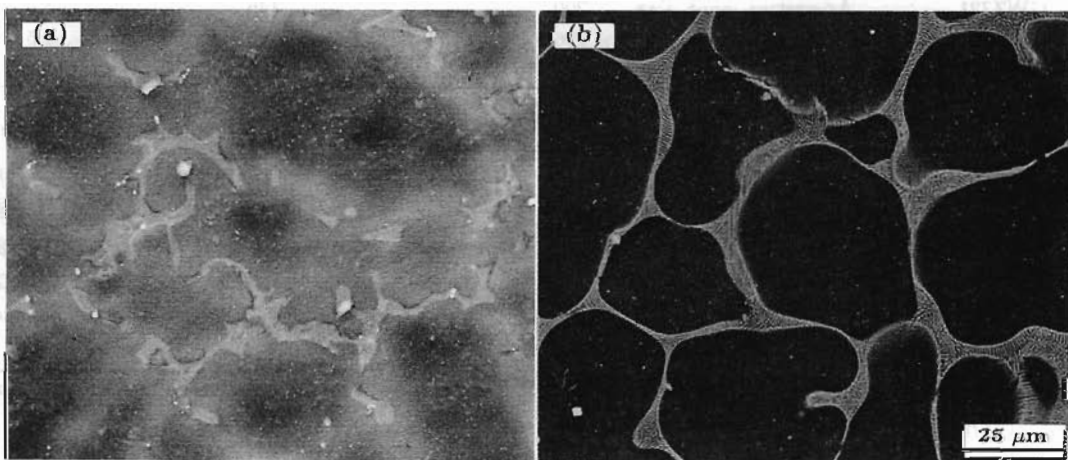


图 4 两种实验合金铸态的 SEM 照片

Fig.4 SEM photos of the as-cast alloys GW72 (a) and GWZ721 (b), morphologies of the second phase are obviously different

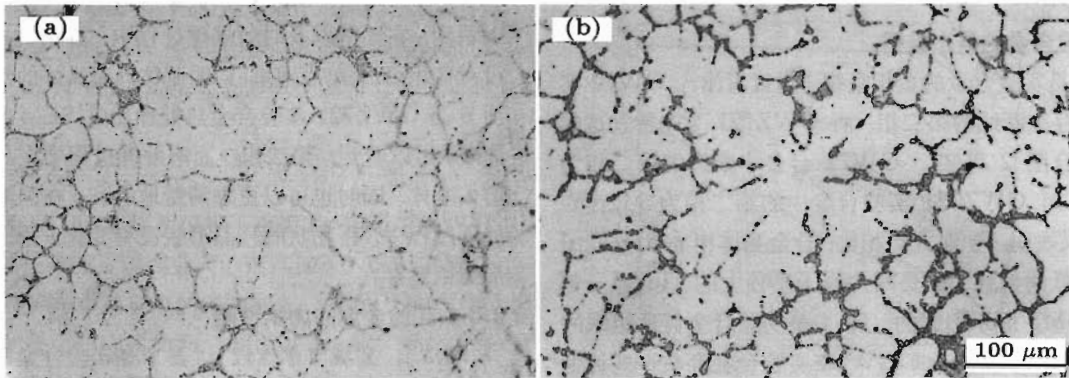


图 5 铸态合金 GWZ721 热处理后的微观组织

Fig.5 Microstructures of the alloy GWZ721 after solid solution at 500 °C for 12 h (a) and aging at 205 °C for 12 h (b), dendritic morphology no obviously changed

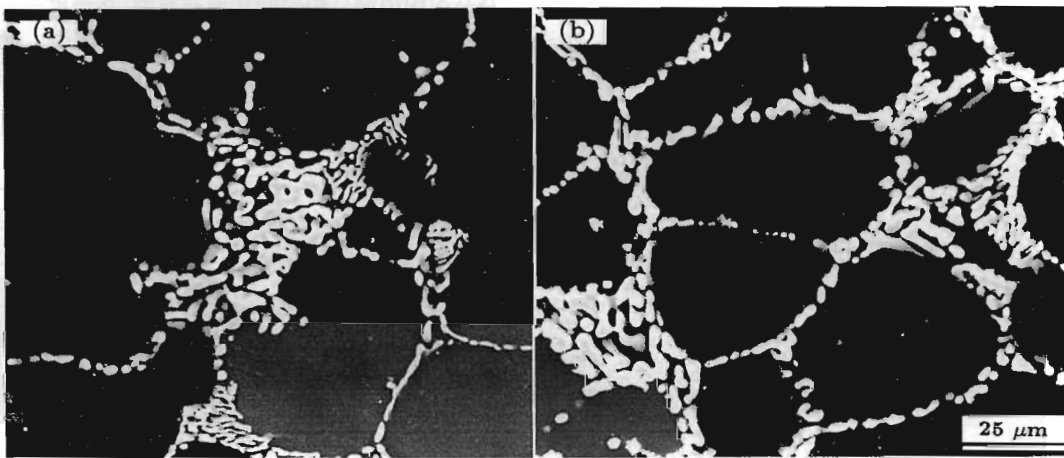


图 6 铸态合金 GWZ721 热处理后的 SEM 照片

Fig.6 SEM photos of the GWZ721 alloy after solid solution (a) and aging (b), net-like distribution of the second phase no changed

表 2 两种实验合金的室温力学性能值

Table 2 Mechanical properties of the tested alloys at room temperature

Experimental Alloy	State	Ultimate tensile strength, MPa	Yield strength, MPa	Elongation, %
GW72	As-cast	178	100	1.7
GWZ721	As-cast	200	146	3.0
GW72	T6	196	160	2.5
GWZ721	T6	250	235	6.2

金 GW72 好, 最高达到 6.2%。这可以从图 7 实验合金 GW72 和 GWZ721 T6 态室温拉伸试样断口 SEM 照片看出, 前者是典型的混合型断口, 大小不均匀的解理面和准解理面复杂排列; 后者则呈韧性断口。

2.3.2 高温力学性能 由于实验合金 GWZ721 的室温力学性能相对较好, 因此对其高温力学性能也进行了研究. 表 3 是实验合金 GWZ721 在热处理后的高温瞬时拉伸性能. 可以看出, 实验合金 GWZ721 热处理后的高温瞬时拉伸性能相当优良, 在 200, 250 和 300 °C 时, 实验合金的强度都能够保持在 205 MPa 以上, 说明合金在该系列温度范围内具有使用价值. 抗拉强度和屈服强度随

着温度的升高均略有下降, 延伸率则随着温度的升高有所上升, 这也可以从高温拉伸试样的断口加以说明. 图 8 是

表 3 实验合金 GWZ721 热处理后的高温力学性能
Table 3 Mechanical properties of the tested GWZ721 alloys after heat-treatment at high temperature

Temperature °C	Ultimate tensile strength MPa	Yield strength MPa	Elongation %
200	225	126	18.5
250	220	119	20.5
300	205	113	25.0

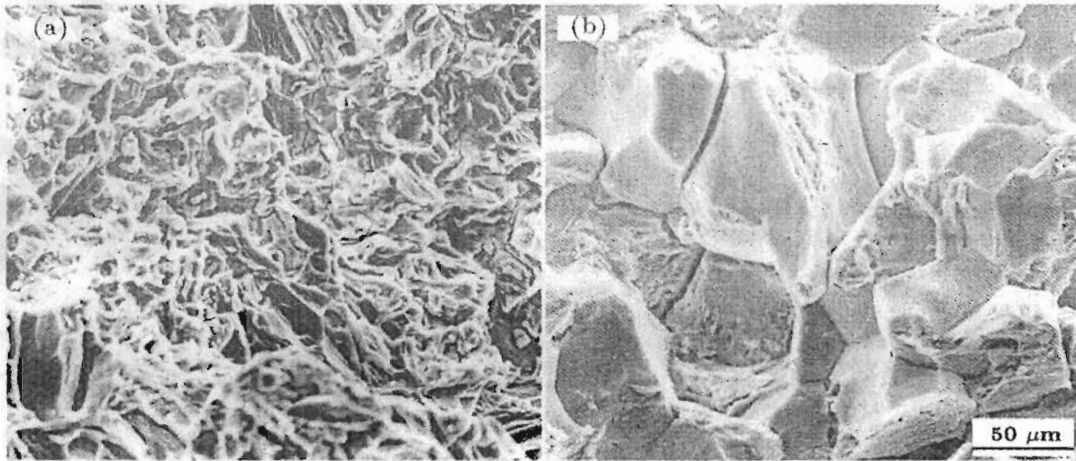


图 7 两种实验合金 T6 态拉伸试样断口形貌的 SEM 照片

Fig.7. RT fractographs of the experimental alloys GW72 (a) and GWZ721 (b) after T6 heat-treatment

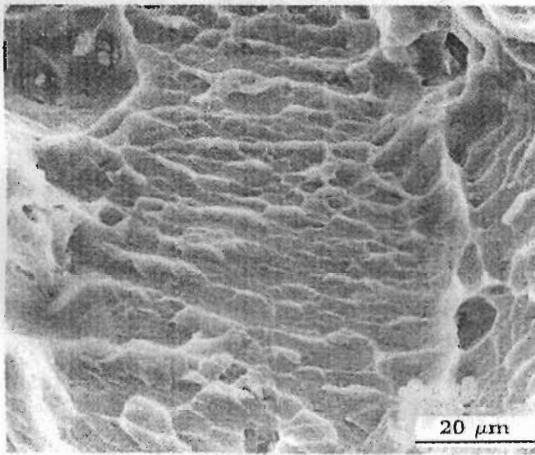


图 8 实验合金 GWZ721 T6 态高温拉伸试样断口形貌

Fig.8 HT fractograph of the experimental alloy GWZ721 after T6 heat-treatment

实验合金 GWZ721 T6 态高温拉伸试样断口的 SEM 照片。从图中可以看出,有大量的韧窝和撕裂棱,是典型的韧性断口。

3 结论

(1) 在 GW 系镁合金中加入 Zn 后,合金凝固组织发生较大变化,形成雪花状的 δ -Mg 枝晶,而且在固溶及时效处理过程中其形貌没有变化。第二相由骨骼状变为相互联结的网状。

(2) 实验合金 GWZ721 热处理后的室温抗拉强度达到 250 MPa,屈服强度达到 235 MPa,延伸率达到 6.2%,

显著优于实验合金 GW72。

(3) 实验合金 GWZ721 热处理后的高温瞬时抗拉强度和屈服强度随着温度的升高均略有所下降,延伸率有所上升。在 200, 250 和 300 °C 时,实验合金的抗拉强度分别保持为 225, 220 和 205 MPa。

参考文献

- [1] Grobner J, Schmid-Fetzer R. *J Alloy Compd*, 2001; 320: 296
- [2] Buch F V, Lietzau J, Mordike B L, Pisch A, Schmid-Fetzer R. *Mater Sci Eng*, 1999; A263: 1
- [3] Guo X T, Li P J, Zeng D B. *Chin Rare Earth*, 2002; 23(2): 63
(郭旭涛, 李培杰, 曾大本. 稀土, 2002; 23(2): 63)
- [4] Nikitina N I. *J Alloy Compd*, 1998; 279: 166
- [5] Zhang X M, Chen J M, Deng Y L, Xiao Y, Jiang H, Deng Z Z. *Chin J Nonferrous Met*, 2006; 16: 219
(张新明, 陈健美, 邓运来, 肖阳, 蒋浩, 邓桢桢. 中国有色金属学报, 2006; 16: 219)
- [6] Xiao Y, Zhang X M, Chen J M, Jiang H. *Chin J Nonferrous Met*, 2006; 16: 709
(肖阳, 张新明, 陈健美, 蒋浩. 中国有色金属学报, 2006; 16: 709)
- [7] Peng Q M, Wang J L, Wu Y M, Wang L M. *Mater Sci Eng*, 2006; A433: 133
- [8] He S M, Zeng X Q, Peng L M, Gao X, Nie J F, Ding W J. *J Alloy Compd*, 2006; 421: 309
- [9] Nie J F, Gao X, Zhu S M. *Scr Mater*, 2005; 53: 1049
- [10] Li W X. *Magnesium and Magnesium Alloy*. Changsha: Central South University Press, 2005: 51
(黎文献. 镁及镁合金. 长沙: 中南大学出版社, 2005: 51)