

# 热处理对 ZW21 镁合金组织及性能的影响

张大华 陈体军 郝远 马颖 李元东

(兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室)

**摘要** 采用金相显微镜、扫描电镜、X射线衍射仪及 WDW-100D 型电子万能实验机等对 ZW21 镁合金铸态及固溶十时效态的显微组织和力学性能进行了观察与分析。结果表明,经 525 °C 固溶 4 h 后进行 250 °C 时效,合金中没有完全溶解的第二相将会随着时效时间的延长逐渐向晶内聚集,最后在晶粒内形成菊花状组织,并且经时效 24 h 后,合金的抗拉强度达到最大 243 MPa,伸长率达 23.75%,硬度(HV)达 68.7,与铸态下的 ZW21 镁合金相比,其综合力学性能得到了显著提高。

**关键词** ZW21 镁合金;热处理;显微组织;力学性能

**中图分类号** TG146.2+2

**文献标志码** A **文章编号** 1001-2249(2009)10-0961-04

**DOI**: 10.3870/tzzz.2009.10.026

镁合金作为最轻质的商用金属工程材料,因其具有的优越综合性能符合“21 世纪绿色结构材料”的特征<sup>[1,2]</sup>。近年来,随着镁合金材料生产成本的降低、镁合金结构件成形工艺的进步和产品品质的提高,镁合金在交通、计算机、通信、家电以及军事等领域得到广泛应用<sup>[3]</sup>。目前,大多数研究集中在合金化和微合金化改善镁合金的综合力学性能,在镁合金中添加稀土(RE)元素是提高其热强性的有效途径<sup>[4]</sup>,如加入少量稀土 Y 可提高镁合金的力学性能,同时又能改善抗腐蚀性<sup>[5,6]</sup>。在 Mg-Zn 合金中加入稀土元素 Y 不但可以改善铸造性能,而且可以提高其高温强度和推迟时效发生的时间<sup>[7~9]</sup>。鉴于 Mg-Zn-RE 系合金开发低成本高温镁合金很有潜力,可以通过热处理来进一步改善组织提高性能。本课题研究固溶十时效热处理工艺对自主开发的 ZW21 镁合金的组织及性能的影响,为提高新型 Mg-Zn-RE 系合金的性能,同时为新型 Mg-Zn-RE 系合金的进一步研究及技术开发提供必要的理论依据。

## 1 试验方法

### 1.1 材料制备

试验采用纯 Mg 锭(99.95%)、纯 Zn 锭(99.99%)、纯 Sn(99.9%)、纯 Ca(98.7%)、Mg-Zr、Mg-Nd 和 Mg-Y 中间合金熔炼。合金的熔炼是在 GDJX-0405 型电阻炉中并通入 Ar 气的环境中进行的。在熔炼过程中使用 HG 镁稀土合金专用熔剂覆盖保护熔炼,待所有合金完全熔化后,用 JDMJ 精炼剂<sup>[10]</sup>精炼 15 min,约 720 °C 时浇入金属型得到  $\phi 16$  mm 的棒材,其成分见表 1<sup>[11]</sup>。

表 1 ZW21 镁合金化学成分

wB							%
Zn	Zr	Y	Nd	Sn	Ca	Mg	
2	0.3	1	0.5	0.5	0.05	95.65	

### 1.2 材料热处理及测试方法

试验合金的热处理在箱式电阻炉中进行,试验时首先将硫磺粉放入炉中,以防止合金氧化燃烧,然后将试样放入炉中加热至 525 °C,保温 4 h 后将试样取出经 63 °C 水淬。待固溶后的试样干燥后,将其再次放入炉中加热至 250 °C,分别保温 0、2、8、24、48 h。

从棒材中间截取金相观察试样,经机械抛光后对试样进行腐蚀。铸态试样以体积分数为 1% 的酒石酸溶液腐蚀;热处理态试样用体积分数为 4% 的硝酸酒精溶液进行腐蚀,然后使用 MeF3 型金相显微镜进行金相组织观察。分别将铸态和热处理态试样加工成拉伸试棒进行力学性能试验,并利用 JSM-6700F 型扫描电镜对拉伸试样的断口进行观察分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 合金的铸态及热处理后组织特征

图 1 为 ZW21 镁合金铸态和热处理后的显微组织。由图 1a 可见,ZW21 镁合金的铸态组织主要由  $\alpha$ -Mg 基体和 W 相( $Mg_3RE_2Zn_3$ )、H 相( $Mg_{12}REZn$ )等主要分布在晶间的第二相组成,且 H 相呈点状、W 相呈棒状不连续状分布。图 1b~图 1f 为 ZW21 镁合金在不同时效时间下的金相组织,可以看出,ZW21 合金在经 525 °C 固溶处理 4 h 后,晶间组织在晶粒边界相互交叉形成的三角区域及部分晶界上的第二相没有完全溶解便在界面张力的作用下形成的球状颗粒。在时效处理过程中,晶界处没有完全溶解的第二相将随时效时间

收稿日期:2008-12-09;修改稿收到日期:2009-01-01

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2007CB613706);兰州理工大学博士基金资助项目(SB01200412)

第一作者简介:张大华,男,1981 年出生,硕士研究生,兰州理工大学甘肃省有色金属新材料省部共建国家重点实验室,兰州(730050),电话:13679452876, E-mail: zhanghua108@163.com

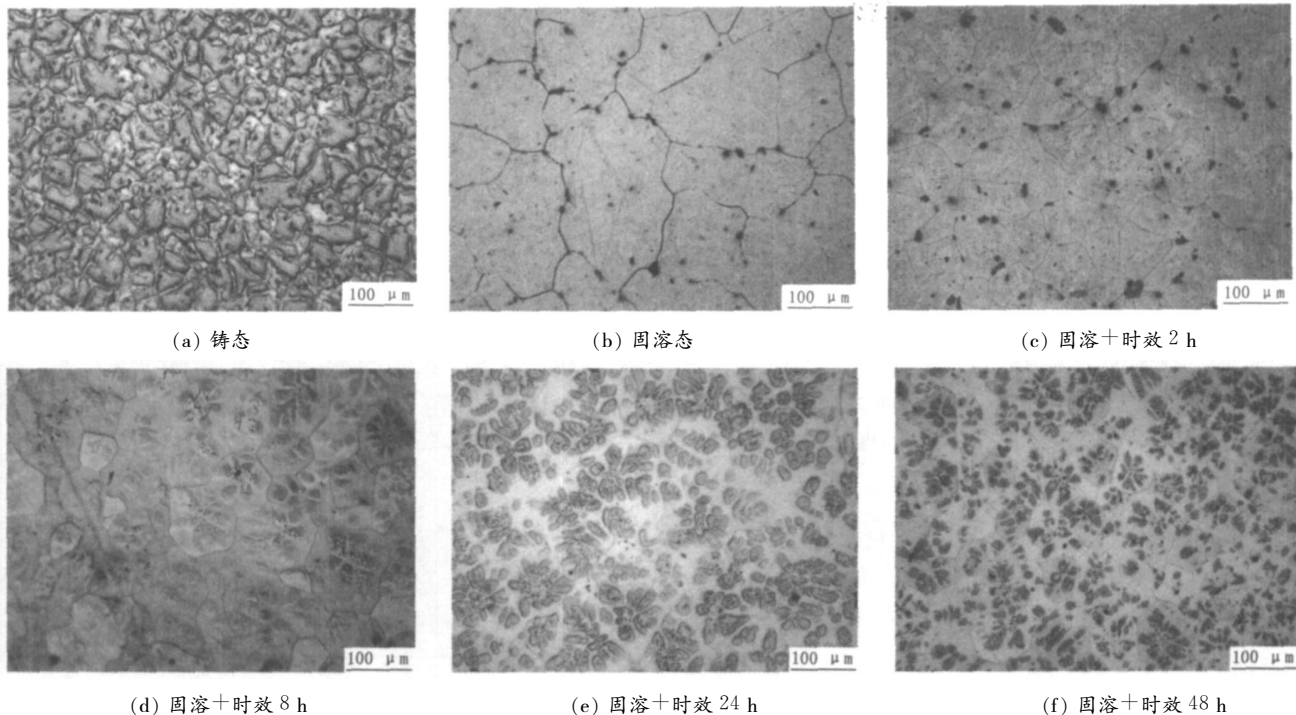


图1 ZW21 镁合金的显微组织

的延长逐渐消失,而晶粒内部会形成析出花瓣状组织,并且随时效时间的延长,晶内析出的组织更呈现出花瓣状的特征。 $Mg-Zn-Y$  三元合金中这种花瓣状组织具有很高的硬度、低的断裂韧度和超低的摩擦因数、较低的热膨胀系数、并具有同类合金系晶态材料相同的耐蚀性能<sup>[12,13]</sup>。其中高硬度特点使其特别适合于作韧性基体材料中的强化相。并且从图1中可以看出,随着时效时间的延长,晶粒逐渐减小,而时效24 h后变化不明显。

经过EDS分析(见图2、表2),ZW21合金固溶+时效24 h后所析出的菊花状组织中Zn和RE的摩尔比为1,同时菊花状组织中含有Sn元素,所以时效过程

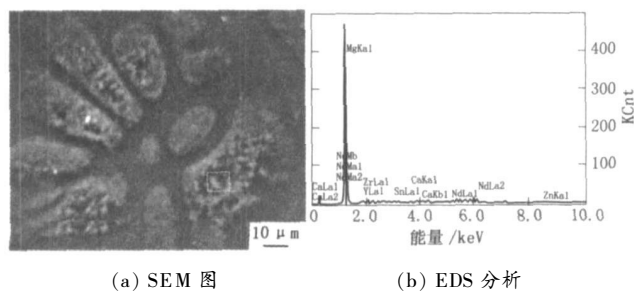


图2 ZW21 镁合金固溶+时效24 h的SEM图及EDS分析  
表2 ZW21 镁合金固溶+时效24 h的EDS分析结果

元素	$w_B/\%$	K 因子	CPS	$x_B/\%$
Mg Ka	85.47	0.652 0	184.11	95.42
Ca Ka	0.80	0.006 8	1.28	0.54
Zn Ka	3.77	0.031 7	1.45	1.56
Y La	2.74	0.013 1	1.49	0.84
Zr La	1.99	0.010 3	1.19	0.59
Sn La	1.43	0.010 4	1.01	0.33
Nd La	3.79	0.028 8	1.46	0.71

中析出的菊花状组织由H相和 $Mg_2Sn$ 相聚集形成的。图3为ZW21镁合金的X射线衍射图谱,在ZW21镁合金的铸态组织中RE及大部分Zn均富集于晶界形成三元金属间化合物,合金中主要存在的三元相为W相( $Mg_3RE_2Zn_3$ )和H相( $Mg_{12}REZn$ )。国内外学者一致认为,W相为立方结构<sup>[7,14]</sup>,H相为18R调制结构<sup>[15]</sup>。

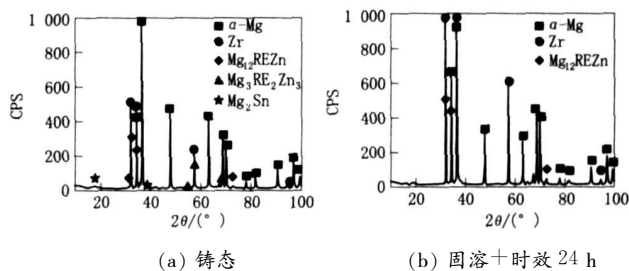


图3 ZW21 镁合金的XRD谱

## 2.2 合金热处理后的室温力学性能

对热处理后的试样进行拉伸性能测试,结果见图4。从图4中可以看出,经过固溶+不同时间的时效处理后,ZW21镁合金的抗拉强度和硬度均有不同程度的提高。而且随着时效时间的延长,抗拉强度和硬度呈现出了相似的变化趋势,即在250℃时效24 h的综合力学性能达到最好,抗拉强度为243 MPa,伸长率为23.75%,硬度(HV)为68.7。这是因为热处理使固溶时没有完全溶解的第二相随着时效时间的延长逐渐向晶粒内聚集,最后在晶粒内弥散析出菊花状组织,对基体起到了强化作用。因此合金的抗拉强度、硬度与铸态相比较均有所提高。

但是,当时效时间达到24 h后进一步延长,抗拉强

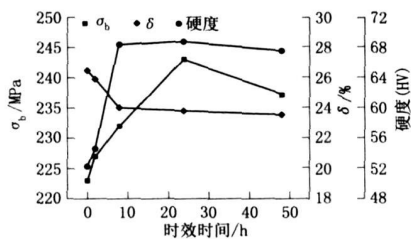


图4 时效时间对 ZW21 镁合金的力学性能的影响

度和硬度又均呈现下降的趋势。而合金的伸长率随着时效时间的延长略有下降。这是由于在低温下 Zn、RE 的扩散速度很慢, RE 由于其较大的原子半径, 扩散速度比 Zn 更慢。所以它们只能通过缓慢的扩散在位错和晶界等缺陷聚集的地方偏聚析出, 这就导致了合金伸长率的下降。

ZW21 镁合金室温拉伸的断口形貌见图 5。经过对比可知, ZW21 镁合金的铸态断口具有明显的沿晶断裂+解理断裂混合特征(见图 5a), 这是因为 W 相、H

相是主要强化相, 多位于晶界, 具有 bcc 结构的 W 相及六边形 18R 长程调制结构的 H 相与具有 hcp 结构的镁基体均不共格, 导致 Mg/W 相、Mg/H 相界面的易脆性, 裂纹易从界面形成并扩展即裂纹走向以沿晶断裂为主(见图 5b)。经热处理后的试样断口解理台阶大量出现, 并有少量的韧窝出现。从断面形貌上看, 固溶态逐渐呈现出了韧性断裂的特点(见图 5c), 从断口纵剖面可知裂纹走向既有沿晶断裂又有穿晶断裂(见图 5d)。而随着时效时间的延长, 固溶+时效 24 h 时的断口呈现的韧性断裂特征更加明显(见图 5e)。这是由于随着时效时间的延长, 析出相的增加会导致晶格畸变孪晶增加, 裂纹扩展时阻碍增加, 从而导致镁基体与时效析出相界面的韧性增加(见图 4, 合金的抗拉强度和硬度随时效时间的延长而提高), 所以经固溶+时效处理的合金断口裂纹易在晶粒内扩展, 从断口纵剖面可知裂纹走向是以穿晶断裂为主(见图 5f)。

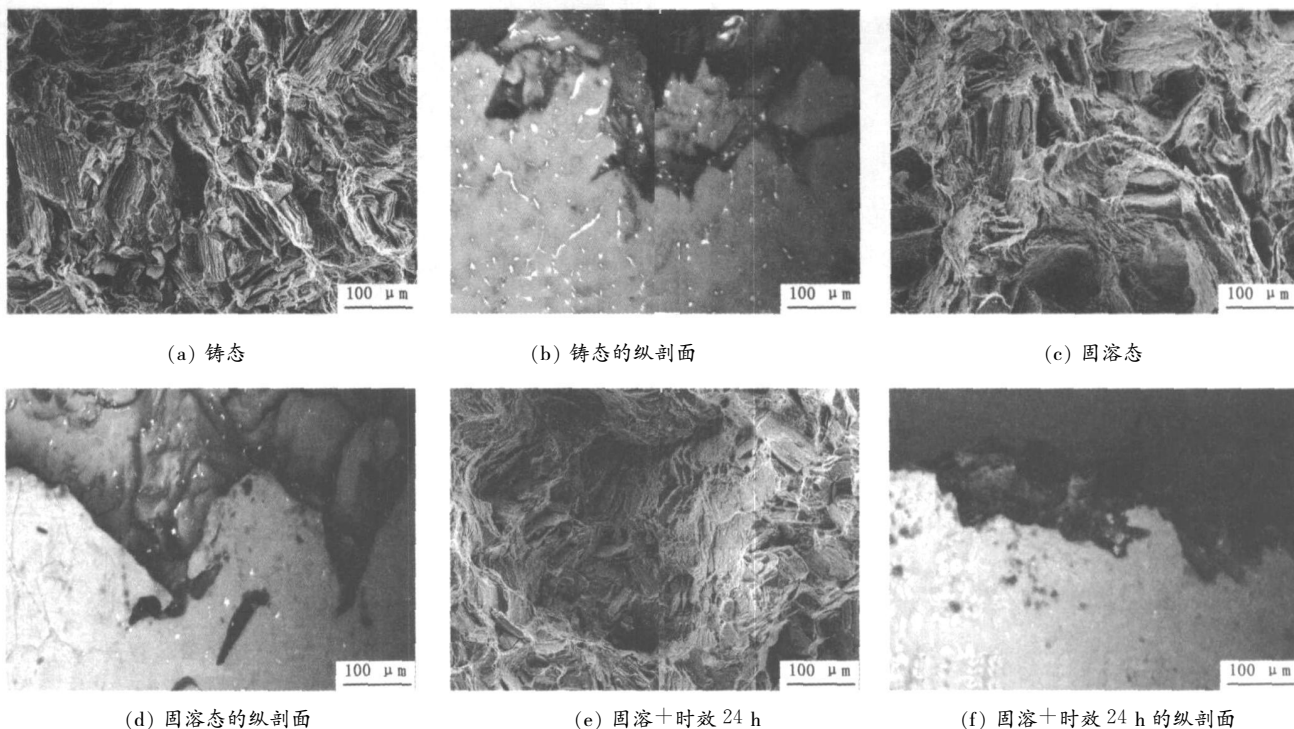


图5 ZW21 镁合金的拉伸断口 SEM 形貌

### 3 结论

(1) ZW21 镁合金的铸态组织主要由  $\alpha$ -Mg 基体和 W 相、H 相等第二相所组成, 通过对合金进行固溶+时效处理, 合金在晶粒内析出对基体起强化作用的菊花状组织。

(2) 随着时效时间的延长, ZW21 镁合金的抗拉强度和硬度均呈现先升高后降低的趋势, 而合金的伸长率略呈下降的趋势。合金经过固溶+时效 24 h 的处理, 其综合力学性能达到最佳, 抗拉强度为 243 MPa, 伸长率为 23.75%, 硬度(HV)为 68.7。

(3) ZW21 镁合金的铸态断口呈现出沿晶断裂和解

理断裂混合特征; 固溶态的断裂方式为既有沿晶断裂又有穿晶断裂, 固溶+时效 24 h 为穿晶断裂, 呈现韧性断裂的特点。

### 参 考 文 献

- [1] 范才河, 陈刚, 严红革, 等. 稀土在镁及镁合金中的作用[J]. 材料学报, 2005, 19(7): 61-63.
- [2] 杨楨, 王正品, 石崇哲. 不同热处理状态下 Mg-Ce 合金的组织结构及断口分析[J]. 铸造技术, 2008, 29(2): 228-231.
- [3] 柴跃生, 孙钢, 梁爱生. 镁及镁合金生产知识问答[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005.
- [4] 陶春虎, 张少卿, 贾立奇. Mg-Zn-Zr-RE 系镁合金中的稀土相分析[J]. 中国稀土学报, 1990, 8(1): 52-57.

# B对含Zr铝合金微观组织的影响机理

单鹏 杨昇 刘凤芹

(郑州大学材料物理教育部重点实验室)

**摘要** 对铝合金中B的加入对Zr在合金中的存在形态和相组成的影响以及B对合金中Zr的影响机理进行了分析。结果表明,B的加入使合金中的部分Zr由固溶态转变为析出态,以细小的板片状第二相粒子的形态存在于晶粒内部和晶界处,减少了晶格畸变,改善了Al基体的有序性,这会对合金导电性的改善产生有益影响。

**关键词** B;Zr;铝合金;微观组织;导电性

**中图分类号** TG146.2<sup>+1</sup>

**文献标志码** A **文章编号** 1001-2249(2009)10-0964-03

**DOI**: 10.3870/tzzz.2009.10.027

在导电铝合金中加入适量的Zr能明显改善合金的耐热性能,但是Zr的加入也会对合金的导电性产生负面影响<sup>[1~3]</sup>,有研究表明在含Zr的铝合金中加入适量的B,在保证合金耐热性的前提下提高其导电性<sup>[4]</sup>,但铝合金中B的加入对Zr在合金中的存在形态和相组成的影响以及影响机理还不是很清楚,本课题对此进行了分析。

## 1 试验方法

### 1.1 试验材料

所采用的试验材料:质量分数为99.85%的纯Al, Al-1.08B中间合金, Al-0.11Zr-0.12Ce中间合金。

### 1.2 试验方法

用纯Al、Al-Zr-Ce合金和Al-B中间合金分别熔配含B与不含B的两种铝合金铸锭,使两种合金中的Zr含量(质量分数)均为0.08%,并控制B与Zr的摩尔比为2:1。

把熔配得到的铝合金铸锭制备成尺寸为20 mm×20 mm×20 mm的试样,然后对其表面进行抛光,并用0.25 mL/L的NaOH溶液腐蚀,对腐蚀后的铸态试样在JEOL JSM-6700F扫描电镜下观察其显微组织,利用扫描电镜附件Inca Energy能谱仪进行能谱分析。对铸锭试样用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>溶液进行腐蚀,试样基体中的Al大部分被腐蚀掉,对腐蚀后得到的粉状残余物进行过滤、洗涤、烘干,然后做XRD测试,并在扫描电镜下观察粉状残余物的显微组织,利用Inca Energy能谱仪进行能谱分析。

## 2 试验结果与分析

### 2.1 粉状残余物的XRD测试结果

图1为不含B试样的粉状残余物的XRD测试结果,其中主要有以下物相:Al<sub>3</sub>Zr、Zr<sub>2</sub>Si、Al<sub>11</sub>Ce<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。这表明Zr在合金中主要是以Al<sub>3</sub>Zr、Zr<sub>2</sub>Si金属间化合

收稿日期:2009-02-10;收到修改稿日期:2009-03-27

第一作者简介:单鹏,男,1983年出生,硕士研究生,郑州大学材料物理教育部重点实验室,郑州(450052),电话:13658889087, E-mail: shanpengmaster@163.com

通讯作者:杨昇,男,1970年出生,副教授,郑州大学材料物理教育部重点实验室,郑州(450052),电话:13838260787, E-mail: samsenyang@zzu.edu.cn

- [5] MATSUDAA M, IIB S, KAWAMURAA Y, et al. Interaction between long period stacking order phase and deformation twin in rapidly solidified Mg<sub>97</sub>Zn<sub>1</sub>Y<sub>2</sub> alloy [J]. *Materials Science and Engineering*, 2004, A 386: 447-551.
- [6] NIE J F, MUDDLE B C. Precipitation in magnesium alloy WE54 during isothermal ageing at 250 °C [J]. *Scripta Materialia*, 1999, 40 (10): 1 089-1 094.
- [7] SINGH A, TSAI A P. On the cubic W phase and its relationship to the icosahedral phase in Mg-Zn-Y alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2003, 49: 143-148.
- [8] SUGAMATA M, HANAWA S, KANEKO J. Structures and mechanical properties of rapidly solidified Mg-Y based alloys [J]. *Materials Science and Engineering*, 1997, A 226-228: 861-866.
- [9] KIM I J, BAE D H, KIM D H. Precipitates in a Mg-Zn-Y alloy reinforced by an icosahedral quasicrystalline phase [J]. *Materials Science and Engineering*, 2003, A 359: 313-318.

- [10] 许并杜,李明照. 镁冶炼及镁合金熔炼工艺(第一版)[M]. 北京:化学工业出版社,2005.
- [11] 王伟,陈体军,马颖,等. 新型镁合金ZW21的开发[J]. *热加工工艺*, 2008, 37(14): 55-57.
- [12] 史菲,郭学锋,张忠明. 普通凝固 Mg-Zn-Y 合金中的准晶相[J]. *中国有色金属学报*, 2004, 14(1): 112-116.
- [13] 史菲,郭学锋,张忠明. Y对普通凝固 Mg-Zn-Y系合金组织及准晶相形成的影响[J]. *稀有金属材料与工程*, 2005, 34(11): 1 726-1 729.
- [14] SUZUKI M, KIMURA T, KOIKE J, et al. Strengthening effect of Zn in heat resistant Mg-Y-Zn solid solution alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2003, 48: 997-1 002.
- [15] SINGH A, WATANABE M, KATO A, et al. Formation of icosahedral-hexagonal H phase nano-composites in Mg-Zn-Y alloys [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 51: 955-960.

(编辑:张春明)

continuous casting (EMC), respectively, were comparatively analyzed. The results show that compared to direct chilling continuous casting aluminum alloy ingot, the soft-contact electromagnetic continuous casting one exhibits desirable surface quality and uniformly fine microstructure, and its tensile strength, yield strength and elongation are improved by 8.3%, 5.1% and 17.6%, respectively. T<sub>4</sub> treated aluminum bar was produced by extruding the ingot with extruding ratio of 5 : 1 and then solid solution treatment plus natural aging for 96 hours. Effects of solution time on microstructure, mechanical properties and fracture morphology of the extruded aluminum bar were investigated at a fixed aging parameters. The results indicate that, with increasing in solution time, the strength of the aluminum alloy is increased gradually. The alloy with solution for 60 min exhibits desirable comprehensive properties, where tensile strength and elongation reach 538MPa and 23.3%, respectively, however, with extending solution time to 90 min, the plasticity of the alloy is deteriorated.

**Key Words:** Electromagnetic Continuous Casting, Aluminum Alloy, Squeezing Casting, Solution Time

**Effects of Minor Gallium Addition on Microstructure and Mechanical Properties of A356 Alloy** Lin Jinping<sup>1</sup>, Zhao Hongsheng<sup>2</sup>, Zhu Guoliang<sup>1</sup>, Wang Jun<sup>1</sup>, Zhang Jun<sup>2</sup>, Sun Baode<sup>1</sup> (1. The State Key Laboratory of Metal Matrix Composites, Shanghai Jiaotong University, Shanghai, China; 2. Baotou Aluminum Co., Ltd., Baotou, China) 2009, 29(10)0957~0960

**Abstract** Effects of trace gallium (0.02%~0.06%) on microstructure and tensile strength of A<sup>356</sup> alloys were investigated. The results show that ambient tensile strength of homogenized annealed A<sup>356</sup> alloy has been slightly affected while elevated tensile strength is increased by 14.5%, meanwhile, elongation is greatly decreased with increasing in Ga addition to 0.06%. Ambient tensile strength of the T<sub>6</sub> treated A<sup>356</sup> alloy with slightly decreasing in elongation is somewhat improved, however, elevated tensile strength is greatly improved, and elongation is obviously decreased with Ga addition.

**Key Words:** Ga, A<sup>356</sup> Alloy, Microstructure, Mechanical Properties

**Effects of Heat Treatment on Microstructure and Mechanical Properties of ZW21 Magnesium Alloy** Zhang Dahua, Chen Tijun, Hao Yuan, Ma Ying, Li Yuan-dong (State Key Laboratory of Gansu Advanced Non-

ferrous Metal Materials, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, China) 2009, 29(10)0961~0964

**Abstract** Microstructure and mechanical properties of as-cast and solid solution-aged ZW<sup>21</sup> magnesium alloy were investigated by OM (optical microscope), SEM (scanning electron microscope), XRD (X-ray diffraction) and WDW-100D electronic universal materials testing machine. The results indicate that the alloy with aging at 250°C after solid solution at 525 °C for 4 hours, with extending aging time, the secondary phase which is not completely dissolved into the alloy, can gradually be gathered into the crystal to form the rosette-like structure. Moreover, with aging for 24 hours, tensile strength and elongation of the alloys reach 243 MPa and 23.75%, respectively, greatly superior to those of as-cast ZW<sup>21</sup> magnesium alloy.

**Key Words:** ZW<sup>21</sup> Magnesium Alloy, Heat Treatment, Microstructure, Mechanical Properties

**Influence of Boron on the Microstructure of Zr Containing Aluminum Alloy** Shan Peng, Yang Sheng, Liu Fengqin (Key Laboratory of Material Physics, Ministry of Education, Zhengzhou University, Zhengzhou, China) 2009, 29(10)0964~0966

**Abstract** Effects of B addition on morphology and phase constituent of Zr in the aluminum alloy and its working mechanism were described. The results reveal that some Zr is converted from solid solution phase into fine secondary platelet existing in grain and on grain boundary with B addition, which is beneficial for the improvement of electric conductivity of the A<sup>356</sup> alloy by reducing the lattice distortion and improving the orderly degree of Al matrix.

**Key Words:** B, Zr, Aluminum Alloy, Microstructure, Electric Conductivity

**Effects of B, Ti, Zr Composite Modification on As-cast Microstructure and Mechanical Properties of Permanent Mold Casting Lead Brass ZCuZn<sub>40</sub>Pb<sub>2</sub>** Cheng Jiqiang, Liu Zhixue, Hu Yao (College of Materials Science and Chemical Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an, China) 2009, 29(10)0967~0969

**Abstract** Effects of B, Ti, Zr composite modification and melt holding time on as-cast microstructure and mechanical properties of permanent mold casting lead brass ZCuZn<sub>40</sub>Pb<sub>2</sub> were investigated by OM (optical microscope) and SEM (scanning electron microscope) and tensile testing. The results reveal that B, Ti, Zr composite modification can refine as-cast microstructure and improve mechanical properties of the lead brass by im-