

文章编号:1000-582X(2012)08-022-04

低 Gd 含量 Mg-Gd-Y-Zr-Zn 镁合金组织及性能

饶劲松, 薛寒松, 张丁非, 陈祖权, 邵兴洲

(重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要:针对 Mg-Gd 系镁合金含 Gd 量高, 导致成本及比重增加, 文中采用溶剂保护熔炼法制备 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr- x Zn ($x=1, 1.5, 2$) 镁合金。经均匀化处理、热挤压及 200 °C 时效处理制得试样, 通过光学显微镜(OM)和扫描电子显微镜(SEM)等对合金组织、力学性能进行研究。结果表明, 与固溶态相比, 经过时效处理后析出的第二相更细小、分布更均匀; Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-2Zn 合金 T5 态的抗拉强度和屈服强度分别为 403 MPa 和 336 MPa, 延伸率为 7.0%, 达到或接近含 Gd 量较高的 Mg-Gd-Y 系镁合金的综合力学性能。

关键词: Mg-Gd-Y 镁合金; 时效; 组织; 力学性能

中图分类号: TG223

文献标志码: A

Microstructure and properties of Mg-Gd-Y-Zr-Zn magnesium alloy with lower Gd content

RAO Jinsong, XUE Hansong, ZHANG Dingfei, CHEN Zuquan, SHAO Xingzhou

(College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Aiming at Mg-Gd magnesium alloy with higher Gd amount may lead to the increase of cost and specific gravity, Mg-6Gd-3Y-0.4Zr- x Zn alloys are prepared by solvent protection, Zn content is 1%, 1.5%, 2% respectively. The microstructures and mechanical properties of alloys are studied by optical microscope (OM) and scanning electron microscope (SEM), after solid solution treatment, hot extrusion and 200 °C aging treatment. The results show that after 200 °C aging treatment, the second phases in alloys have better refinement and distribution uniformity than those in solid solution state alloys, the tensile strength and yield strength of Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-2Zn magnesium alloy is 403MPa and 336MPa, the elongation is 7.0%, the mechanical properties reached or approached those of Mg-Gd-Y magnesium alloy with higher Gd amount.

Key words: Mg-Gd-Y alloy; aging; microstructures; mechanical properties

作为工程应用中密度最轻的金属结构材料, 镁合金具有高比强、高比模、高阻尼以及优异的铸造、机械加工性能和易回收等优点, 在国防和民用工业中的应用日益增多而受到广泛关注和研究。但镁合金由于较低的绝对强度和较差的塑性变形能力成为制约其广泛应用的主要原因之一^[1-3]。研究表明, Mg-RE 系合金一般具有良好的综合力学性能^[4-5], 高强 Mg-RE 系镁合金一

般都含有稀土元素 Gd 和 Y, 尤其是重稀土 Gd 含量一般在 10% (有些甚至达到 20%) 以上^[6-8], 这种方法虽然显著提高了合金的力学性能, 但由于 Gd 的大量添加不仅增加了镁合金的成本, 同时也使镁合金的比重大幅提高, 限制了其实际使用范围。

笔者以 Mg-Gd-Y 系合金为基础, 通过添加适量的 Zr 和 Zn 结合热处理在获得良好的综合力学性能

时,降低稀土 Gd、Y 的添加量。设计的 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-xZn(x=1,1.5,2)合金,经热挤压后进行 200 °C 时效处理,探讨合金元素及时效处理对合金性能影响机制,为进一步研究该系合金的合金化及热处理工艺提供参考。

1 实验材料及方法

Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-xZn 合金在 5 kW 井式坩埚电阻炉中熔炼,熔炼过程中采用自制专用溶剂保护,750 °C 进行金属模浇注。实验用原材料采用 Mg-30%Gd、Mg-30%Y、Mg-30%Zr 中间合金及高纯镁锭和高纯 Zn 块。

将所得铸锭进行 520 °C × 16 h 固溶处理,铸锭表面氧化层车削后,在 XJ-500 吨卧式挤压机热挤压。挤压前在 430 °C 下保温 1 h,挤压温度为 350 °C,挤压速度为 1 m/min,挤压比为 11:1。热挤压后再进行 200 °C 时效处理。挤压棒材经机加工后成标准拉伸试样,力学性能测试在 CMT5105 微机控制电子万能拉力机上进行,拉伸速率为 2.0 mm/min。金相试样用冰醋酸+酒精+苦味酸的腐蚀剂进行浸蚀,采用光学显微镜和 KYKY-1000B 扫描电镜进行组织观察。

2 实验结果和讨论

2.1 时效工艺的确定

时效工艺的选择会对合金时效效果产生不同影响。镁合金时效温度一般控制在 150~250 °C 之间^[9-11]。根据前期探索实验,笔者选择时效温度为 200 °C,为了确定 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-xZn 合金峰时效时间,每隔 6 h 对实验合金试样取一次样进行硬度测试。结果如图 1 所示,随着 Zn 含量的增加,达到峰值时效的时间也延长,峰值硬度也越大。故对

含 Zn 为 1%、1.5%、2% 的合金,时效处理时间分别采用 36、48、54 h。

2.2 合金的显微组织

图 2 为 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-xZn(x=1,1.5,2)合金的显微组织图,其中图 2(a)、(c)、(e)为合金经过热挤压后的显微组织;图 2(b)、(d)、(f)为合金在热挤压后,经 200 °C 时效处理的合金显微组织,时效时间分别为 36、48、54 h。从图 2(a)、(c)、(e)中可以看出,经均匀化热处理后,再进行热挤压,晶界和基体中分布有少量的第二相。随着 Zn 含量的增加,合金晶粒呈变小趋势。

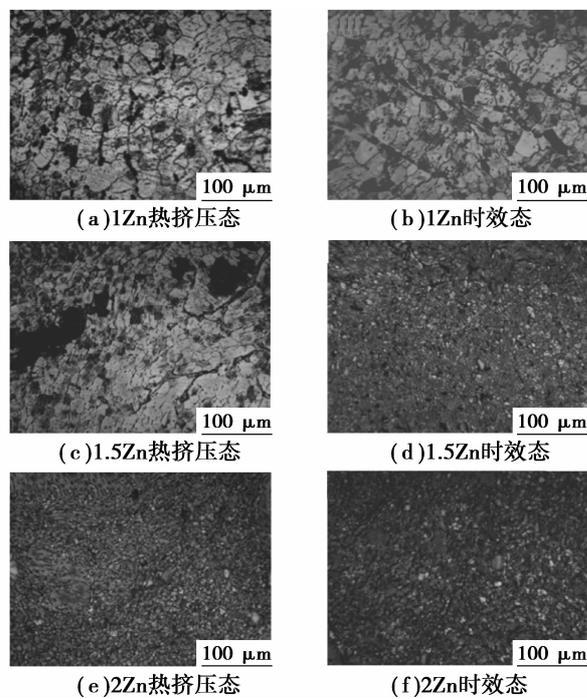


图 2 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-xZn(x=1,1.5,2)合金的 SEM 形貌

从图 2(b)、(d)、(f)中可以看出,经峰值时效后,合金的晶粒与热挤压态相比,同种成分的合金晶粒大小几乎没有变化,时效处理后,第二相组织增加。

为了进一步研究合金的显微组织和微区成分,对 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-xZn(x=1,1.5,2)合金进行了 SEM 和 EDS 分析。图 3 为各合金试样在扫描电镜下的显微组织形貌。从图中可以看出,经过峰值时效后,合金基体上有较大的第二相析出,且时效后的晶界第二相数量明显比热挤压态要多。随着 Zn 含量的增加,分布于晶界上的粗大片层状第二相由不连续的网络状结构转变为半连续的网状结构,且其体积更大数量更多。

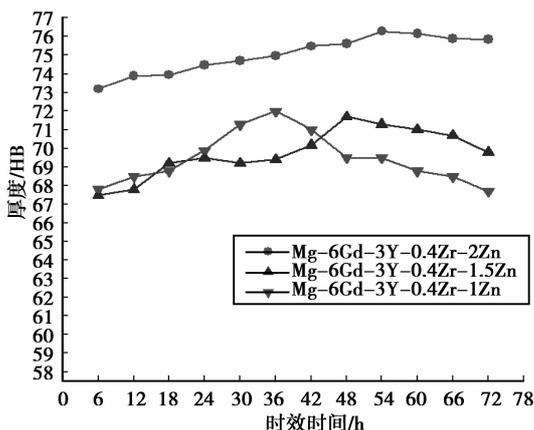


图 1 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-xZn(x=1,1.5,2)合金时效-硬化曲线

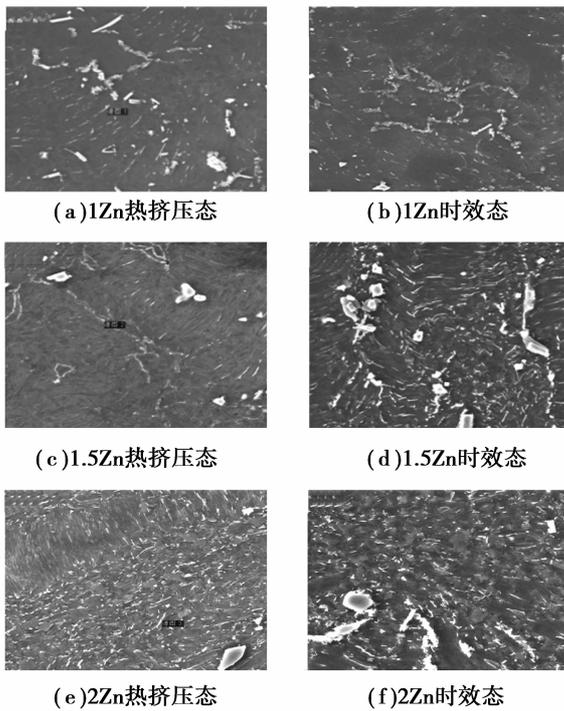


图 3 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-xZn ($x=1, 1.5, 2$) 合金的 SEM 形貌

由图 2、图 3 可知,随着 Zn 含量的增加,合金中片层状第二相越来越多,它是合金的主要强化相,笔者着重对片层状的第二相进行分析。图 3 中的谱图 1、谱图 2、谱图 3 的 3 点为各合金基体中分布的片层状第二相,其 EDS 分析结果见表 1。从能谱分析结果看出,3 种合金经过热挤压和时效处理后,一直保留下来的片层状第二相分别为 Mg-6.06Y-1.97Gd-4.72Zn、Mg-6.53Y-2.04Gd-5.12Zn 和 Mg-6.28Y-1.62Gd-4.30Zn(at%)。这些片层状第二相的成分与 Itoi 等人研究的 Mg97Zn1Y2 合金中片层状的 18R 型 LPSO 的 Mg12Zn(Gd, Y) 相的成分相似^[12],进一步验证了实验中在晶界上存在的片层状第二相为 Mg12Zn(Gd, Y)。

表 1 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-xZn 合金第二相的 EDS 分析结果

含量	位置		
	谱图 1	谱图 2	谱图 3
Mg, K	64.71	63.20	66.00
Y, L	16.50	17.32	17.37
Gd, K	9.45	9.50	7.90
Zn, K	9.34	9.98	8.73
Total	100.00	100.00	100.00

2.3 合金的力学性能

Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-xZn 合金室温力学性能如图 4 所示。

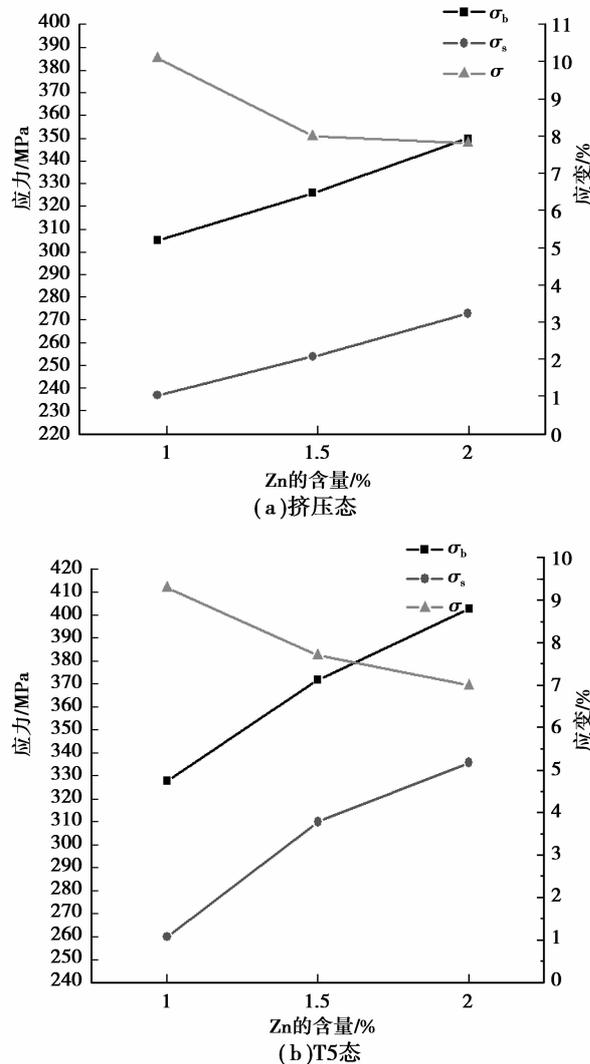


图 4 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-xZn ($x=1, 1.5, 2$) 合金力学性能

当含 Zn 量为 1 wt% 时,合金热挤压态的抗拉强度和屈服强度分别为 305 MPa 和 237 MPa,延伸率为 10.1%。通过时效处理后抗拉强度和屈服强度分别为 328 MPa 和 260 MPa,较热挤压态时分别提高了 7% 和 9.7%,但延伸率略有下降,由 10.1% 下降至 9.3%。时效处理后合金强度提高而延伸率略有下降的原因是镁合金在室温下的滑移系较少,并且在时效过程中析出的片层状分布的第二相能够增强晶界和基体的结合强度,阻碍位错运动,导致位错塞积,使得变形抗力增加,变形困难,因此合金抗拉强度增加的同时延伸率略有下降。

由于这些片层状第二相具有良好的变形塑性,因此对提高 Mg-RE-Zn 系镁合金强度和塑性有着重要影响^[13]。使得合金拥有高强度高硬度的同时具有良好的塑韧性。

当 Zn 含量增加到 1.5 wt% 时,经热挤压和时效处理后,实验合金的抗拉强度和屈服强度分别为

372 MPa 和 310 MPa, 延伸率为 7.7%。从图 4 可知, 3 种成分的合金中, Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-2Zn 具有最好的综合力学性能, T5 态抗拉强度和屈服强度分别为 403 MPa 和 336 MPa, 延伸率为 7.0%, 达到或接近高 Gd 的 Mg-Gd-Y 系镁合金的综合力学性能^[14-16]。

3 种 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr- x Zn ($x=1, 1.5, 2$) 合金在热挤压态和时效态的抗拉强度和屈服强度都随着 Zn 含量的增加而增大。结合微观组织形貌可知, Zn 含量从 1 wt%~2 wt% 过程中, 析出片层状第二相数量增多, 片层状 Mg₁₂Zn(Gd, Y) 相形貌发生了改变, 由 1 个 Zn 含量时的不连续网络状分布向半连续甚至近弥散状分布转变。Mg₁₂Zn(Gd, Y) 相是 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr- x Zn ($x=1, 1.5, 2$) 合金中主要的强化相, 所以随着 Mg₁₂Zn(Gd, Y) 数量的增加使得合金强度较大幅度提升。延伸率随 Zn 含量的增加而减小。

3 结 论

1) 随着 Zn 含量的增加, Mg-6Gd-3Y-0.4Zr- x Zn ($x=1, 1.5, 2$) 合金在挤压态和 T5 态的抗拉强度和屈服强度增加, 延伸率下降。

2) Zn 含量的提高使镁合金基体中相的形貌及数量发生改变, 由不连续网络状分布向半连续甚至近弥散状分布转变。组织形貌的改变导致合金力学性能的改变。

3) 随着 Zn 的增加, 合金综合力学性能得到改善, 主要是因为 Zn 能够和合金中的稀土元素 Gd、Y 形成具有 LPSO 结构的 Mg₁₂Zn(Gd, Y) 相, 这种相数量多, 呈片层状分布, 是合金中的最主要强化相, 能够增强晶界和基体的结合强度, 同时阻碍位错运动, 从而使合金得到强化。由于该相具有良好的塑性, 所以在提高合金强度的同时使合金具有良好的塑性。

4) 通过热挤压和时效处理后, 综合力学性能较高的合金为 Mg-6Gd-3Y-0.4Zr-2Zn, 其抗拉强度和屈服强度分别为 403 MPa 和 336 MPa, 延伸率为 7.0%, 达到或接近高 Gd 含量的 Mg-Gd-Y 系镁合金的综合力学性能。

参 考 文 献:

[1] 胡耀波, 邓娟, 赵冲, 等. 稀土 Mg-Gd 系合金的研究现状与展望[J]. 材料导报, 2010, 24(23): 95-99, 103.
HU Yaobo, DENG Juan, ZHAO Chong, et al. Research status and development of rare Mg-Gd series alloys

[J]. Materials Review, 2010, 24(23): 95-99, 103.
[2] 师昌绪, 李恒德, 王淀佐, 等. 加速我国金属镁工业发展的建议[J]. 材料导报, 2001, 15(4): 5-6.
SHI Changxu, LI Hengde, WANG Dianzuo, et al. A proposal on accelerating development of metallic magnesium industry in China [J]. Materials Review, 2001, 15(4): 5-6.
[3] 王玮. Mg-10Gd-3Y-0.5Zr 合金复合净化行为研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010: 40-47.
[4] 李理, 张新明, 周楠, 等. Mg-Gd-Y-Zr 合金热轧板材的粗晶超塑性行为与微结构[J]. 中国有色金属学报, 2010, 20(3): 390-396.
LI Li, ZHANG Xinming, ZHOU Nan, et al. Coarse-grained superplastic behavior and microstructural characterization of Mg-Gd-Y-Zr hot-rolled sheet [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2010, 20(3): 390-396.
[5] 吴文祥, 靳丽, 董杰, 等. Mg-Gd-Y-Zr 高强耐热镁合金的研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(11): 2710-2718.
WU Wenxiang, JIN Li, DONG Jie, et al. Research progress of high strength and heat resistant Mg-Gd-Y-Zr alloys [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(11): 2710-2718.
[6] Liang S Q, Guan D K, Tan X P. The relation between heat treatment and corrosion behavior of Mg-Gd-Y-Zr alloy [J]. Mater Design, 2011, 32(3): 1194-1199.
[7] Gao L, Chen R S, Han E H. Fracture behavior of high strength Mg-Gd-Y-Zr magnesium alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2010, 20(7): 1217-1221.
[8] Peng T, Wang Q D, Han Y K, et al. Microstructure and high tensile strength of Mg-10Gd-2Y-0.5Zr alloy by solid-state recycling [J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 528(2): 715-720.
[9] 王慧敏, 陈振华, 严红革, 等. 镁合金的热处理[J]. 金属的热处理, 2005, 30(11): 49-54.
WANG Huimin, CHEN Zhenhua, YAN Hongge, et al. Heat treatment of magnesium alloys [J]. Heat Treatment of Metals, 2005, 30(11): 49-54.
[10] 陈先华, 刘娟, 潘复生, 等. 镁合金热处理的研究现状及发展趋势[J]. 材料导报, 2011, 25(12): 142-145.
CHEN Xianhua, LIU Juan, PAN Fusheng, et al. Research status and development trend of heating treatment for magnesium alloy [J]. Materials Review, 2011, 25(12): 142-145.

- Bridge; a challenge and a dream [M]. London: Talor & Francis, 2009.
- [6] ANON. Bridge across the strait of Messina [J]. *Revista de Obras Publicas*, 2006, 153(3446): 76-77.
- [7] 贾丽君. 大跨度悬索桥体系及其性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2009.
- [8] Ge Y J, Xiang H F. Recent development of bridge aerodynamics in China [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(6/7): 736-768.
- [9] Zhang X J. Wind-resistant performance of cable-supported bridges using carbon fiber reinforced polymer cables [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2008, 36(5): 572-577.
- [10] Zhang X J, Ying D L. Aerodynamic stability of cable-supported bridges using CFRP cables [J]. *Journal of Zhejiang University*, 2007, 8(5): 693-698.
- [11] 张新军, 应东磊. 应用 CFRP 索的缆索承重桥梁抗风稳定性研究[J]. *公路*, 2007(7): 38-42.
ZHANG Xinjun, YING Donglei. A study on wind stability of cable-supported bridges using CFRP cables [J]. *Highway*, 2007(7): 38-42.
- [12] 张新军, 应东磊. 应用碳纤维索的大跨度悬索桥抗风稳定性研究[J]. *土木工程学报*, 2006, 39(12): 80-82.
ZHANG Xinjun, YING Donglei. Wind stability of long-span suspension bridges using carbon fiber reinforced polymer cables [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2006, 39(12): 80-82.
- [13] 项海帆. 高等桥梁结构理论[M]. 北京: 人民交通出版社, 2001.
- [14] Jimsing N J. Cable supported bridges concept & design [M]. England: John Wiley & Sons, 1997.
- [15] 李扬, 肖汝诚. 悬索桥主塔纵向受力的估算方法[J]. *深圳大学学报: 理工版*, 2009, 26(4): 389-393.
LI Yang, XIAO Rucheng. Simplified analytical method for longitudinal mechanical properties of suspension bridge towers [J]. *Journal of Shenzhen University: Science and Engineering*, 2009, 26(4): 389-393.
- [16] 王浩, 李爱群, 杨玉冬, 等. 中央扣对大跨悬索桥动力特性的影响[J]. *中国公路学报*, 2006, 19(6): 49-53.
WANG Hao, LI Aiqun, YANG Yudong, et al. Influence of central buckle on dynamic behavior of long-span suspension bridge [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2006, 19(6): 49-53.

(编辑 陈移峰)

(上接第 25 页)

- [11] Wang B S, Xiong S M, Liu Y B. Tensile fracture of as-cast and hot rolled Mg-Zn-Y alloy with long-period stacking phase [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2010, 20(sup2): 488-492.
- [12] Itoi T, Seimiya T, Kawamura Y, et al. Long period stacking structures observed in Mg₉₇Zn₁Y₂ alloy [J]. *Scripta Materialia*, 2004, 51: 107-111.
- [13] 李理, 张新明, 邓运来, 等. 第二相在 Mg-Gd-Y-Zr 合金挤压棒超塑性变形中的作用[J]. *中国有色金属学报*, 2010, 20(1): 11-16.
LI Li, ZHANG Xinming, DENG Yunlai, et al. Effect of second phase on superplastic deformation of extruded rod of Mg-Gd-Y-Zr alloy [J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2010, 20(1): 11-16.
- [14] 王其龙, 吴国华, 郑韞, 等. Mg-Gd-Y 系合金的研究进展[J]. *材料导报*, 2009, 23(6): 104-108.
WANG Qilong, WU Guohou, ZHENG Yun, et al. Research development of Mg-Gd-Y alloys [J]. *Materials Review*, 2009, 23(6): 104-108.
- [15] Wang J, Yang Y S, Tong W H. Effect of purification treatment on corrosion resistance of Mg-Gd-Y-Zr alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21(4): 949-954.
- [16] LI Jilin, CHEN Rongshi, KE Wei. Microstructure and mechanical properties of Mg-Gd-Y-Zr alloy cast by metal mould and lost foam casting [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2011, 21: 761-766.

(编辑 陈移峰)