

热处理对 ZM6 镁合金 TIG 焊后组织性能的影响

张铁磊¹, 吉泽升¹, 赵振华²

- (1. 哈尔滨理工大学 材料科学与工程学院, 哈尔滨 150040;
2. 哈尔滨东安汽车动力股份有限公司, 哈尔滨 150066)

摘要: 采用钨极氩弧焊对 ZM6 铸造镁合金进行焊接, 并对其进行了 T6 热处理, 利用光学显微镜及扫描电镜对焊后及热处理后的焊接接头显微组织进行观察, 对试样进行显微硬度和抗拉强度测试。结果表明: 经过 540 °C 固溶处理后, 晶界处的化合物已基本固溶到基体。经 200 °C 时效 16 h 后, 出现 3 种析出相, 并且焊缝及母材显微硬度均达到最大值, 分别为 85HV 和 81HV。热处理后拉伸试验断裂位置在熔合区附近, 抗拉强度达到 260 MPa, 较未热处理的 160 MPa 有较大提高。热处理后拉伸断口形貌呈现出两个不同的区域, 分别为解理和韧窝-解理混合断裂。

关键词: ZM6 铸造镁合金; 钨极氩弧焊; T6 热处理

中图分类号: TG166.4

文献标志码: A

Effect of heat treatment on microstructure and mechanical properties on TIG welded ZM6 magnesium alloy

ZHANG Tie-lei¹, JI Ze-sheng¹, ZHAO Zhen-hua²

- (1. School of Material Science and Engineering, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150040, China;
2. Harbin Dongan Auto Engine Co., Ltd., Harbin 150066, China)

Abstract: Tungsten inert gas welds were performed on cast ZM6 magnesium alloy and T6 heat treatment was carried out followed. The microstructures of welded joints and heat treated joints were investigated by optical and scanning electron microscopy. The microhardness and tensile strength were determined. The results demonstrate that after solution treatment at 540 °C, the compounds in the grain boundary dissolve into the matrix. After aging at 200 °C for 16 h, three kinds of precipitates appear. The microhardness of weld seam and base metal reaches the maximum, which are 85HV and 81HV, respectively. The fracture locations of heat treated specimens in the tensile test are near the fusion zone. The heat treated specimens show the ultimate tensile strength of 260 MPa. Compared with not heat-treated of 160 MPa, the tensile strength of heat treated specimens is improved significantly. The tensile fracture of heat treated specimen surface shows two different areas, which are cleavage fracture and dimple-cleavage mixed fracture, respectively.

Key words: ZM6 cast magnesium alloy; tungsten inert gas arc welding; T6 heat treatment

由于对环境保护的日趋重视以及节能减排的要求, 轻量化设计在汽车、航空领域成为一种趋势^[1-2]。镁合金由于具有较低的密度、较好的力学性能以及铸造性能, 具有替代钢铁材料甚至铝材的潜力。焊接是构件成型及修复的一种重要方法, 但是镁合金焊接较易存在热裂纹、气孔、氧化物夹杂等问题。目前对镁

合金焊接的研究主要集中于镁-铝-锌系列合金, 包括 AZ31^[3-5]、AZ61^[6-7]、AZ81^[8]以及 AZ91^[9-11]等, 但对稀土镁合金的焊接研究很少。

ZM6 是一种以加入稀土 Nd 作为强化元素的镁合金, 具有较好的高温瞬时力学性能和抗蠕变性能, 主要用于使用温度不高于 250 °C 的航空部件^[12]。ZM6 镁

合金在铸造过程中比较容易出现缩孔、缩松及夹沙等缺陷, 需要进行补焊修复, 因此对其进行焊接研究具有一定的理论和实际意义。本文作者采用常用的钨极氩弧焊方法对 ZM6 镁合金进行焊接, 并对其进行焊后 T6 热处理, 研究了热处理对其组织性能的影响。

1 实验

试验材料采用 ZM6 铸造镁合金, 其化学成分见表 1, 采用线切割将其加工为 200 mm×60 mm×3 mm 的板材。焊接形式为对接方式, 采用 V 型 60°坡口。背面放置铜板作为衬垫, 衬垫中心开有半圆形沟槽, 宽度为 5 mm, 深度为 1 mm。母材两侧采用夹具夹持以防止发生焊接变形, 影响力学性能测定。焊接前用丙酮清除试板表面的油污, 并用钢丝刷去除氧化膜。使用直径 2 mm 的 ZM6 焊丝, 采用交流脉冲进行焊接, 焊接气体采用 99.9% 的纯氩, 气体流量为 10 mL/min, 钨极直径为 2.4 mm, 喷嘴直径为 10 mm。其他焊接参数如表 2 所列。

对于 ZM6 耐热镁合金, 焊接后可通过后续的热处理来实现对其组织的控制, 进而提高合金的焊缝及整体的力学性能。根据相关研究^[13], 热处理工艺选定如下: 固溶处理温度为 540 ℃±1℃, 保温 5 h, 放入水中快速冷却; 时效处理温度为 200 ℃±1 ℃。时效时间分别为 4、8、12、16 和 20 h。

采用日本理学 D/Max2200 型 X 射线衍射仪对母材及焊缝进行物相分析。试样焊接及 T6 热处理后的硬度用 HXD-1000 型维氏硬度仪测量, 显微组织及断口形貌观察在 FEI-SIRION 热场发射扫描电子显微镜 (加速电压 20.0 kV) 上进行。

表 1 ZM6 镁合金的化学成分

Table 1 Chemical composition of ZM6 magnesium alloy (mass fraction, %)

Nd	Zn	Zr	Mn	Fe	Mg
2.95	0.38	0.39	0.01	0.002	Bal.

表 2 焊接参数

Table 2 Welding parameter

Base current/A	Peak current/A	Base current time/s	Peak current time/s
55	110	0.5	0.5
Arc voltage/V	Welding speed/(mm·s ⁻¹)	Wire feed speed/(mm·s ⁻¹)	
18-20	4	10	

2 结果与分析

2.1 焊接接头组织及相组成

ZM6 镁合金的铸态显微组织如图 1(a)所示。组织

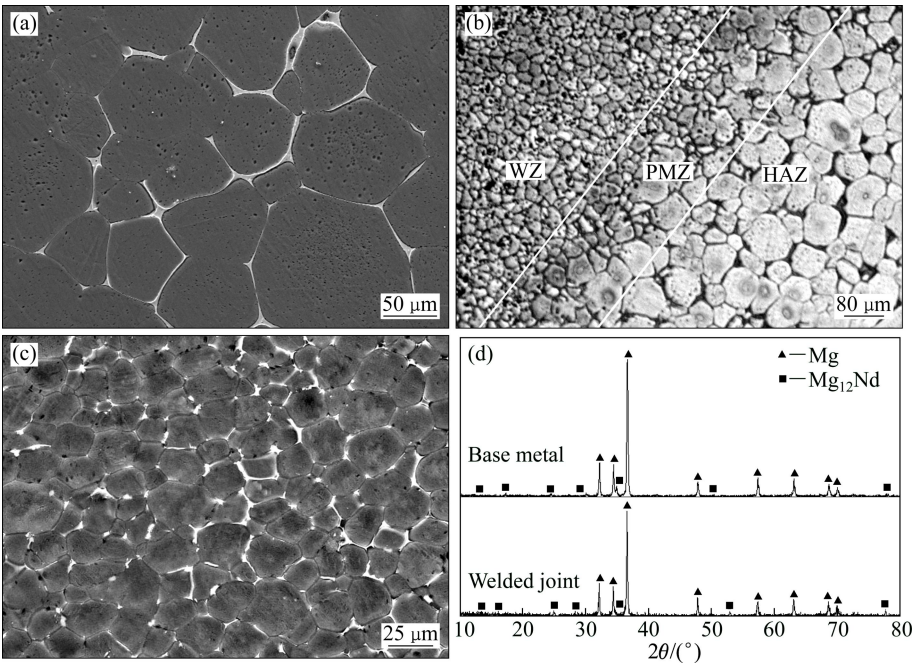


图 1 ZM6 镁合金 TIG 焊接组织及相组成

Fig. 1 Microstructures and phase compositions of TIG welded ZM6 magnesium alloy: (a) Base metal; (b) Fusion zone and heat-affected zone; (c) Weld seam; (d) XRD pattern

呈现典型的等轴晶, 平均的晶粒尺寸大约为 $91\ \mu\text{m}$ 。显微组织中颜色较深的为基体 $\alpha\text{-Mg}$, 白色的部分为合金凝固过程中形成的中间相, 沿着晶界和晶界交汇处, 分布着大量的板条状和岛状的金属间化合物。图 1(b) 所示为 ZM6 镁合金 TIG 焊接的典型组织, 热影响区与母材显微组织区别不大, 未出现明显的长大现象, 半熔化区宽度约为 $160\ \mu\text{m}$, 可以观察到焊缝组织与热影响区组织相互过渡。焊缝组织呈现细小的等轴晶组织, 其平均晶粒尺寸为 $26\ \mu\text{m}$, 远小于母材组织; 第二相组织在晶界处以断续的网格状存在。XRD 的分析表明, 焊缝金属与母材金属中间相均为 Mg_{12}Nd 。根据 Mg-Nd 相图^[14], Nd 含量在 3% 左右的平衡凝固组织为 $\text{Mg}_{41}\text{Nd}_5$, 而 Mg_{12}Nd 为亚稳相, 说明母材及焊缝组织均发生了非平衡凝固。

2.2 热处理后显微组织及硬度分布

经过 $540\ ^\circ\text{C}$ 固溶处理后, ZM6 镁合金熔合区附近的显微组织如图 2(a) 所示, 晶界处的第二相已经完全消失, 形成单相的过饱和 $\alpha\text{-Mg}$ 固溶体, 晶界变得更为平直, 焊缝、熔合区及热影响区晶粒尺寸未发生明显变化。在焊缝中部的显微组织如图 2(b) 所示, 部分晶粒在固溶的过程中发生了再结晶, 出现明显长大, 晶粒尺寸达到 $150\ \mu\text{m}$ 左右。发生再结晶一方面是因

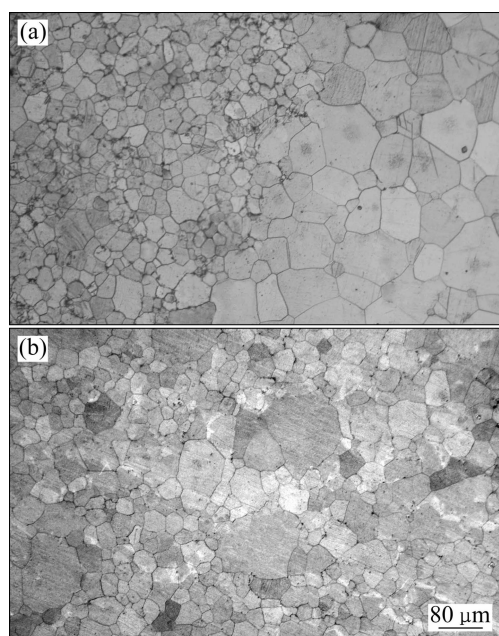


图2 $540\ ^\circ\text{C}$ 固溶处理后 ZM6 镁合金显微组织
Fig. 2 Microstructures of ZM6 magnesium alloy after solution treated at $540\ ^\circ\text{C}$: (a) Fusion zone and heat-affected zone; (b) Center of weld seam

为固溶温度较高, 已经接近液相线温度 $t_m(567.7\ ^\circ\text{C})$ ^[15], 而一般金属再结晶温度最低约为 $0.4t_m$, 因此 ZM6 镁合金已经达到再结晶温度; 另一方面由于焊接过程中存在拘束, 熔池凝固后焊缝中心具有较大的残余应力, 为再结晶提供了驱动力。另外, 在固溶过程中, 随着晶界处第二相的减少, 晶界迁移阻力变小, 这也有利于晶粒长大。

不同时效时间及未热处理的焊接接头显微硬度分布如图 3 所示。未热处理的 ZM6 镁合金母材显微硬度约为 54HV , 熔合区附近的显微硬度迅速增加, 焊缝边缘处的显微硬度达到最大值 65HV , 焊缝的平均硬度约为 63HV 。焊缝边缘硬度较高的原因如下: 在焊缝的熔化边界, 镁合金熔池与温度较低的母材接触, 冷却速度快, 晶粒较为细小。经 $200\ ^\circ\text{C}$ 时效 4 h 后, 焊接接头的显微硬度较未热处理的焊接接头的显微硬度有较大提高。随着时效时间的延长, 焊接接头的显微硬度不断提高, 直到时效 16 h 后达到峰值; 此时, 焊缝硬度约为 85HV , 母材硬度约为 81HV 。经过 20 h 时效后, 母材及焊缝显微硬度均有所下降。对比不同的时效试样, 显微硬度变化趋势基本与未经热处理的焊接接头一致, 但由于在固溶过程中焊缝中心处的晶粒长大, 焊缝中心处的显微硬度有所下降。

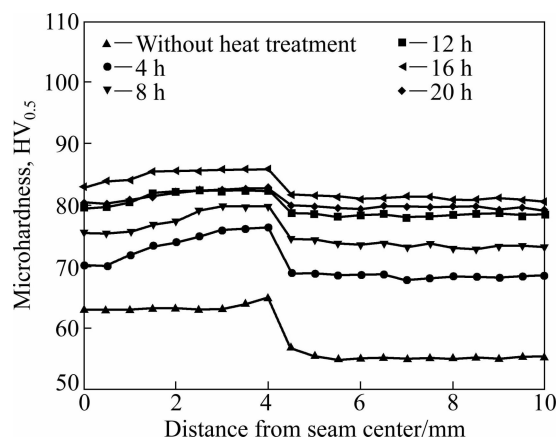


图3 不同时效时间下焊接接头的显微硬度分布
Fig. 3 Distribution of microhardness of weld joints after different aging times

图 4 所示为时效 16 h 的焊缝的光学显微组织, 从焊接接头显微组织可以看出, 时效 16 h 后, 晶粒尺寸基本未发生变化。在图 4(b) 中可以明显地看到两种析出相, 一种析出相呈断续的点状分布, 晶粒内部沿着统一方向析出, 而不同的晶粒内的析出相沿着不同的方向析出, 表明析出相与基体存在一定位相关系; 另

一种析出相呈团聚状,在晶粒内部和晶界处均有分布。

图5所示为时效16 h的SEM像,可以看到团聚状的组织中包括两种析出相:一种为片状,一种为杆状。片状相与 α -Mg基体不具有明显的位相关系,长度约为2 μm ,宽度约为0.3 μm 。析出的杆状相之间大约呈60°角,长度约为1 μm ,宽度约为0.1 μm 。在晶粒内部可以观察到链状小坑,可能为断续的点状分布析出相在抛光过程中剥落后形成的。王晓芳等^[16]在Mg-Nd合金时效强化相中发现颗粒状的 β' 相以及呈一定角度分布的 β 相,本研究中析出相与其非常相似,小坑中剥落的可能为 β' 相。

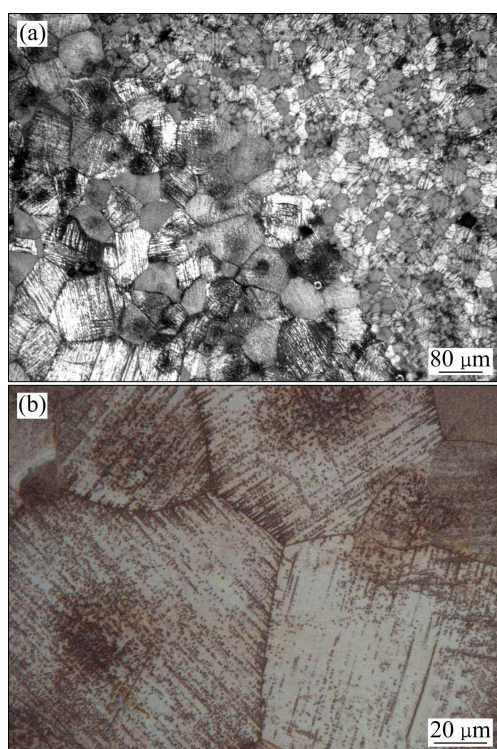


图4 200 °C时效16 h后ZM6镁合金焊接接头的光学显微组织

Fig. 4 Optical microstructures of ZM6 magnesium alloy weld joint after aging at 200 °C for 16 h: (a) Fusion zone and heat-affected zone; (b) Magnified heat-affected zone

2.3 力学性能及断口分析

分别对ZM6焊后及焊后固溶+200 °C时效16 h试样进行拉伸试验,所有拉伸试样均未出现明显塑性变形。焊后试样的抗拉强度为160 MPa,T6热处理后试样的抗拉强度为260 MPa,说明经过T6热处理后抗拉强度明显提高。

断口形貌如图6所示,断口呈现典型的穿晶断裂,断口表面上下两侧出现明显不同的形貌:上侧出现明显解理河流和解理台阶,解理裂纹在遇到晶界处发生

偏转;而下侧出现较小的解理面和较浅等轴韧窝,韧窝的形成是因为团聚状分布的析出相对位错滑移和攀移起到钉扎作用。团聚状分布的析出相在热影响区以及焊缝区均有存在,但在热影响区断口却未发现韧窝,可以认为热影响区部分的断裂机制有所不同。

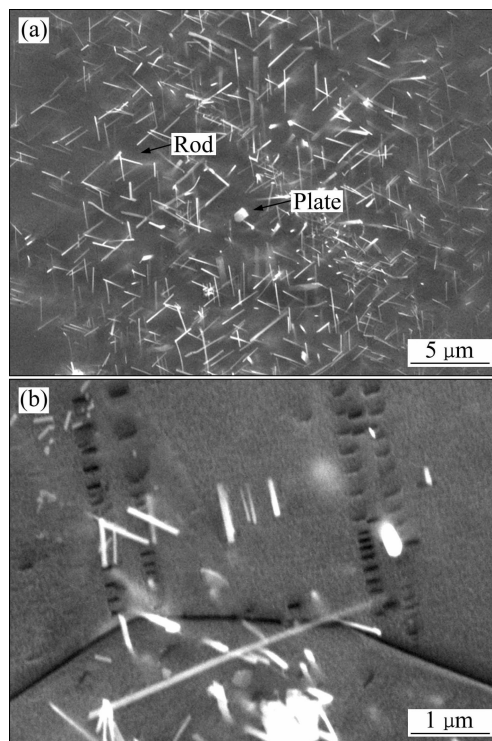


图5 200 °C时效16 h后ZM6镁合金焊接接头的SEM像
Fig. 5 SEM images of ZM6 magnesium alloy weld joint after aging for 16 h at 200 °C: (a) Rod-like and plate-like participate phase; (b) Chain-like pits

对于单个晶粒,裂纹沿着单个解理面的扩展,可以将其视为带有裂纹的弹性体,在线弹性条件下裂纹尖端延长线上应力 σ_y 为

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}}, \quad K_I = Y\sigma\sqrt{a} \quad (1)$$

式中: K_I 为应力强度因子, r 为离裂纹尖端的距离, a 为裂纹长度的1/2, σ 为裂纹垂直方向上的应力, Y 为裂纹形状因子。

由式(1)可以看出,裂纹尖端延长线上的应力与裂纹长度成正比,对于晶粒尺寸较小的焊缝区,解理裂纹遇到被析出相钉扎的基体时,由于裂纹长度较短,裂纹尖端附近应力较小,无法继续扩展;而对于晶粒尺寸较大的热影响区,解理裂纹则会直接穿过。根据断口形貌判断,可能是在熔合区首先出现裂纹萌生,在拉应力的作用下,裂纹向热影响区及焊缝区扩展。

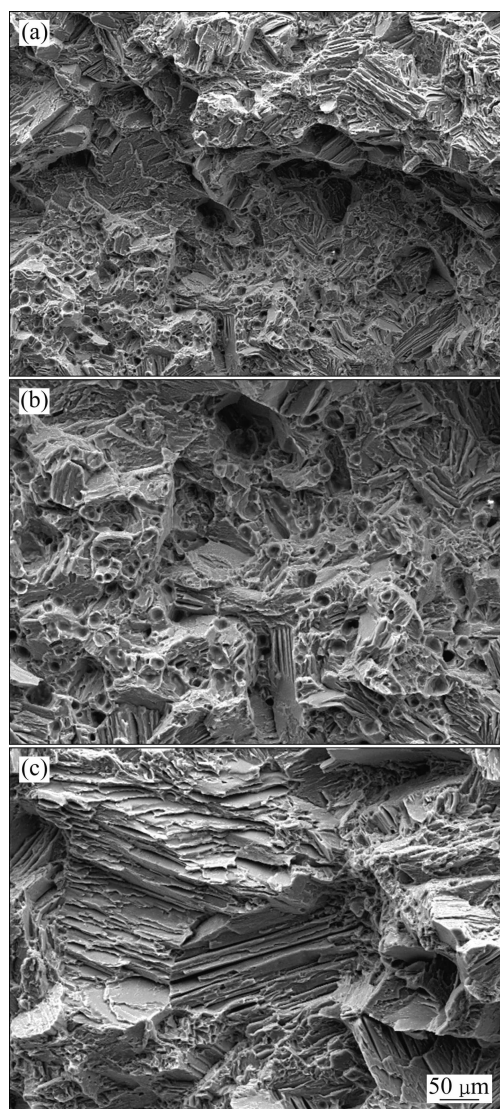


图 6 ZM6 镁合金焊后 200℃时效 16h 拉伸断口的形貌

Fig. 6 Fractographs of welded ZM6 magnesium alloy tensile specimens after aging at 200 °C for 16 h: (a) Overall morphology; (b) Weld seam zone; (c) Heat-affected zone

3 结论

1) ZM6 镁合金焊后焊缝为细小的等轴晶组织, 平均晶粒尺寸远小于母材组织, 第二相 $Mg_{12}Nd$ 在母材及焊缝处晶界处以断续的网格状存在。经过 540 °C 固溶 4h 后, 第二相溶入 α -Mg 基体, 焊缝中心处部分晶粒异常长大。

2) 经过 T6 热处理后, ZM6 焊接接头的显微硬度明显提高, 200 °C 时效 16 h 后, 焊缝及母材的显微硬度均达到最大值, 分别为 85HV 和 81HV。对 200 °C 时效 16 h 试样的观察发现, 时效组织中出现了杆状相

和片状相, 对合金产生时效强化作用。

3) ZM6 镁合金焊后经 T6 热处理后的抗拉强度为 260 MPa, 较未热处理试样的抗拉强度 180MPa 有明显提高。拉伸试验断裂位置为熔合区附近, 热影响区和焊缝处所呈现的断裂形貌不同, 焊缝处为解理-韧窝混合断裂, 热影响区为典型的解理断裂。

REFERENCES

- [1] SHIGEHARU K, TREVOR A, JUNICHI K, KATSUYOSHI K, YOSHIHITO K. Magnesium research trend in Japan[J]. Material Science Forum, 2003, 419: 21-34.
- [2] KOJIMA Y, AIZAWA T, HIGASHI K, SHIGEHARU K. Automotive applications of magnesium alloys[J]. Material Science Forum, 2003, 419: 67-74.
- [3] LIU Li-ming, DONG Chang-fu. Gas tungsten-arc filler welding of AZ31 magnesium alloy[J]. Materials Letters, 2006, 60(17/18): 2194-2197.
- [4] LIU Li-ming, XU Rong-zheng. Investigation of the corrosion behaviour of laser-TIG hybrid welded Mg alloys[J]. Corrosion Science, 2010, 52(9): 3078-3085.
- [5] PADMANABAN G, BALASUBRAMANIAN V. Fatigue performance of pulsed current gas tungsten arc, friction stir and laser beam welded AZ31B magnesium alloy joints[J]. Materials and Design, 2010, 31(8): 3724-3732.
- [6] XU Nan, SHEN Jun, XIE Wei-dong, WANG Lin-zhi, WANG Dan, MIN Dong. Abnormal distribution of microhardness in tungsten inert gas arc butt-welded AZ61 magnesium alloy plates[J]. Materials Characterization, 2010, 61(7): 713-719.
- [7] MIN Dong, SHEN Jun, LAI Shi-qiang, CHEN Jie. Effect of heat input on the microstructure and mechanical properties of tungsten inert gas arc butt-welded AZ61 magnesium alloy plates[J]. Materials Characterization, 2009, 60(12): 1583-1590.
- [8] 柯黎明, 邢 丽, 徐卫平. AZ81A 镁合金焊接接头的组织与性能[J]. 材料工程, 2005(1): 41-44.
- [9] KE Li-ming, XING Li, XU Wei-ping. Microstructure and properties of welding joints for cast magnesium alloy AZ81A[J]. Journal of Materials, 2005(1): 41-44.
- [10] ZHOU W, LONG T Z, MARK C K. Hot cracking in tungsten inert gas welding of AZ91D Mg alloy[J]. Materials Science and Technology, 2007, 23(11): 1293-1299.
- [11] MUNITZ A, COTLER C, STERN A, KOHN G. Mechanical properties and microstructure of gas tungsten arc welded magnesium AZ91D plates[J]. Materials Science and Technology,

- 2001, 302(1): 68–73.
- [11] ZHU Tian-ping, CHEN Z W, GAO Wei. Incipient melting in partially melted zone during arc welding of AZ91D magnesium alloy[J]. *Materials Science and Engineering A*, 2006, 416(1/2): 246–252.
- [12] 陈振华. 耐热镁合金[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 517–518.
- CHEN Zhen-hua. Heat-resistant magnesium alloy[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2007: 517–518.
- [13] 文丽华. 固相再生 ZM6 耐热镁合金组织和性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009: 25–26.
- WEN Li-hua. Study on Microstructure and mechanical property of zm6 heat-resistant magnesium alloy prepared by solid state recycling[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009: 25–26.
- [14] ROKHLIN L L. Magnesium alloys containing rare earth metals[M]. San Diego: Taylor and Francis, 2003: 31–32.
- [15] 杜建锋. ZM6 合金组织及高温性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006: 24.
- DU Jian-feng. The microstructure and the study of elevated temperature property of ZM6 alloy[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006: 24–25.
- [16] 王晓芳, 孙扬善, 王 奇, 薛 烽, 白 晶, 薛 山, 陶卫建. Mg-2Nd 合金的组织与力学性能[J]. *中国有色金属学报*, 2007, 17(6): 927–933.
- WANG Xiao-fang, SUN Yang-shan, WANG Qi, XUE Feng, BAI Jing, XUE Shan, TAO Wei-jian. Microstructures and mechanical properties of Mg-2Nd alloy[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2007, 17(6): 927–933.

(编辑 何学锋)