

文章编号: 1673-9981(2008)02-0111-04

不同通磁温度下直流磁场 对 AZ91D 镁合金凝固组织的影响

曹晨华¹, 华林¹, 张旭光²

(1. 武汉理工大学材料科学与工程学院, 武汉 430070; 2. 一汽轿车股份有限公司, 吉林 长春 130012)

摘要: 研究了在不同通磁温度下直流磁场对 AZ91D 镁合金凝固组织的影响, 并对其影响机理进行了探讨。结果表明, 直流磁场对 AZ91D 镁合金的凝固组织有明显影响。随着通磁温度的提高, AZ91D 镁合金晶粒被细化; β 相碎化且分布均匀, 形貌由连续网状变为分散颗粒状; 基体相中 Al 元素含量增加, 晶界厚度变薄且晶界中 Al 元素含量减少, 改善了 AZ91D 镁合金的力学性能。

关键词: 通磁温度; AZ91D 镁合金; 直流磁场; 显微组织

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

AZ91D 镁合金是镁-铝-锌系合金, 该合金不含稀土金属和锆元素, 是一种比较价廉的镁合金, 在国内外获得了广泛应用^[1]。合金的性能是影响合金应用的关键因素, 而合金的显微组织结构对合金的性能有着直接的影响。因此, 研究如何改善合金显微组织结构有着十分重要的意义。材料电磁工艺是指将电场或磁场引入到材料制备和加工过程中, 从而实现对材料制备或加工过程和产品质量的控制及改善材料组织和性能^[2]。大量文献表明^[3-8], 无论是直流还是交流磁场, 都会对镁合金显微组织结构产生显著的影响, 然而电磁场对镁合金的结晶行为的影响尚处于初步研究阶段。因此, 进一步研究磁场对镁合金显微组织结构的作用, 对改善镁合金的性能, 促进镁合金的应用, 推动镁合金产业的发展, 将起到积极的作用。

1 实验

1.1 设备

在 5 KW 坩埚电阻炉中对 AZ91D 镁合金进行熔炼, 采用精度较高的 PID 方式控温; 用直径 25 mm、长 120 mm 的圆柱型刚玉管盛放合金, 这样可

以消除对磁场的屏蔽; 在 RC1-134 型热磁仪上对合金进行通磁凝固。

1.2 方法

在 AZ91D 镁合金棒料铸锭上截取五个大小合适的样品, 并在样品表面均匀撒上 RJ2 熔剂。然后装入刚玉管中, 加热至 615 °C, 静置保温 10 min, 再用细铁丝缓慢搅动 1 min, 以保证合金全部熔化。搅拌期间通入氩气保护气, 以防止镁合金被氧化。待温度稳定在 615 °C 时, 迅速用坩埚钳将刚玉管移至热磁仪上对样品进行通磁凝固。磁场强度为 0.29 T, 通磁温度分别为 610, 595, 575, 555, 535 °C。

经通磁凝固的样品作为试样, 选磁力线穿过试样中部的横断面作为观测面。首先对观测面进行粗磨、细磨, 并在抛光机上抛光至镜面, 然后用质量分数为 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀, 最后用 QUANTA-400 型扫描电镜观察试样的显微组织。在扫描后的金相照片上选取 20 个晶粒分别进行测量, 取平均值作为合金的晶粒尺寸和晶粒面积。用 OXFORD 公司生产的 INCAX-sight 能谱分析仪测定试样基体相和晶界中的 Al 元素质量分数。AZ91D 镁合金的化学成分列于表 1。

收稿日期: 2008-01-29

作者简介: 曹晨华(1984-), 男, 山东聊城人, 硕士研究生。

表 1 AZ91D 镁合金的化学成分

Table 1 Composition of magnesium AZ91D alloy in the experiment		w/%							
元素	Al	Zn	Mn	Si	Fe	Cu	Ni	Be	Mg
含量	8.95	0.632	0.261	0.022	0.0003	0.0018	0.0005	0.0003	余量

2 结果及分析

2.1 显微组织形貌

图 1 为 AZ91D 镁合金的原始金相组织图. 从图 1 可以看出, AZ91D 镁合金的原始组织是由 α 相(图中 A)、沿晶界呈较为连续网状分布的 β 相(图中 B)及散布在 α 相中的细小的 Mn-Al 化合物质点(图中 C)组成, 其中 α 相为基体 Mg, β 相为 $Mg_{17}Al_{12}$. 由于 AZ91D 镁合金中 β 相分布不均匀, 影响了 AZ91D 镁合金的硬度、拉伸强度及耐腐蚀性等性能, 制约了 AZ91D 镁合金的应用.

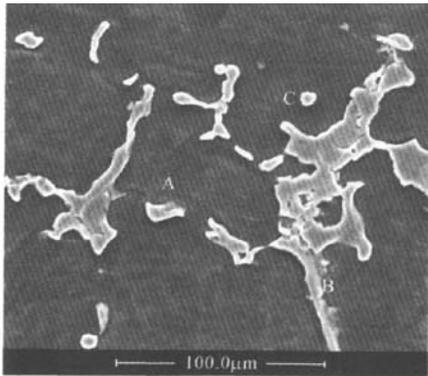


图 1 AZ91D 镁合金的原始组织

Fig. 1 SEM image of AZ91D magnesium alloy primary structure

图 2 为试样在不同通磁温度下经直流磁场处理后的扫描电镜照片. 从图 2(a-c)可以看出, 在较高通磁温度下施加磁场, α 相镁基体得到明显的细化, 晶界厚度变薄, β 相在晶界上出现碎化且沿晶界分布更加均匀, 成为细小的颗粒状. 从图 2(d)和图 2(e)可以看出: 当通磁温度降低时, β 相在晶界上出现集结, 并有长大的趋势. 当通磁温度降低为 535 °C 时(图 2(f)), β 相在晶界上变得连续且粗大, 分布也不均匀, 向未经磁场处理过的原始组织形貌转化.

AZ91D 镁合金在直流磁场下凝固时, 其组织发

生了显著的变化. 铸态组织中 β 相由连续网状变为分散的颗粒状, 且分布更加趋于均匀, 这样有利于合金力学性能的改善. 磁场的作用是使不连续沉淀相减少, 晶内析出相应地增多, 这对提高 AZ91D 镁合金的热强性、塑性及耐腐蚀性等综合力学性能有利.

众所周知, 金属由大量电子和离子等微观粒子组成, 无磁场作用时, 这些粒子以速度 v 在空间自由运动. 当施加磁场 B 时, 可把速度 v 分解为垂直于磁场的分量 v_{\perp} 和平行于磁场的分量 v_{\parallel} . 以速度运动的带电量为 q 的离子在磁场 B 中受到洛伦兹力 $f = qv_{\perp} \times B$, 则熔体粒子的运动轨道回旋半径 $r_c = \frac{v_{\perp}}{\omega_c} = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}$

由于 Al^{3+} , Zn^{2+} 和 Mg^{2+} 的质量和电荷量各不相同, 因此, 在直流磁场中它们的回旋半径也各不相同. 直流磁场作用使得各溶质粒子相对基体镁产生了运动, 这种运动使溶质粒子在镁中的扩散能力增强, 从而改变了合金中各成分分布情况, 尤其是改变了 Al 元素的分布情况. 即在磁力的作用下, 镁合金中 Al 元素与 Mg, Mn 和 Zn 等元素的结合力发生改变, 使得合金元素在各相中的含量发生变化, 进而使 β 相组织形貌及分布发生改变.

在较高的通磁温度下施加磁场, 对 AZ91D 镁合金的组织影响较为明显. 这是因为高温下原子运动剧烈, 自然对流较快, 有利于溶质离子的扩散.

2.2 晶粒尺寸

经通磁处理后的 AZ91D 镁合金的晶粒尺寸列于表 2. 由表 2 可知, AZ91D 镁合金的晶粒尺寸随着通磁温度的下降而逐渐增大. 当通磁温度为 610 °C 时, AZ91D 镁合金的晶粒尺寸为 64.85 μm , 与原始尺寸 110.3 μm 相比, 降低了 70.1%, 合金晶粒得到细化. 当通磁温度继续降低时, 会导致 AZ91D 镁合金的热能降低, 磁场对合金晶粒的影响能力也逐渐降低, 镁合金的晶粒尺寸逐渐增大.

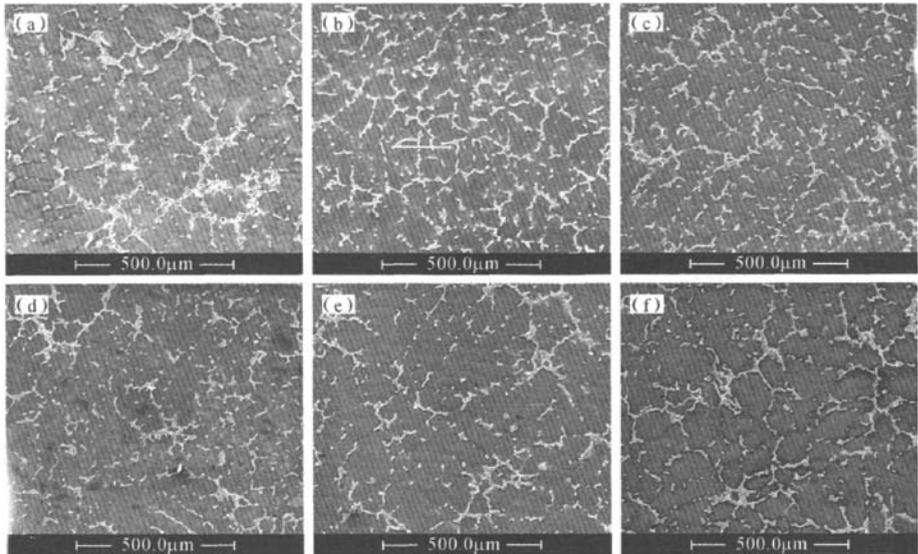


图2 不同通磁温度下 AZ91D 合金的组织形貌

(a) 未经通磁处理; (b) 610 °C; (c) 595 °C; (d) 575 °C; (e) 555 °C; (f) 535 °C

Fig. 2 Microstructure morphology of AZ91D alloys treated by magnetic field under different temperatures

由于合金晶粒的不规则性,所以测量了合金晶粒的平均面积.当通磁温度为 610 °C 时,经通磁处理的合金晶粒面积为 5062.81 μm^2 ,与原始晶粒面积 7099.06 μm^2 相比,降低幅度较大.当通磁温度较低时,经通磁处理后,合金晶粒面积开始变大,表明磁场对其影响作用降低.

表2 AZ91D 镁合金的 α 相晶粒的平均直径和面积

Table 2 Average grain size and area of AZ91D alloys

通磁温度/°C	晶粒平均直径/ μm	晶粒平均面积/ μm^2
610	64.85	5062.81
595	72.19	5310.08
575	78.28	6165.00
555	87.10	6594.22
535	98.22	7099.06

根据 Hall-Petch 公式可知 $\sigma_s = \sigma_0 + kd^{-1/2}$, 其中 σ_s 为屈服强度, σ_0 及 k 均为材料常数, d 为晶粒大小. 由该式可知, 晶粒尺寸越小屈服强度越大. 由改进的 Taylor 理论^[9] 也可知道, 具有较少滑移系的六方结构的金属晶界对晶粒的滑移变形具有强烈的阻碍作用. 晶粒粒度对金属材料的力学性能有很大影

响, 晶粒越细小, 合金强度、硬度和塑性越高. 因此, 晶粒的细化将会提高 AZ91D 镁合金塑性变形能力, 改善力学性能.

2.3 溶质分布

图 3 为在不同通磁温度下 AZD91 镁合金中 Al 元素质量分数变化曲线. 从图 3 可以看出, 在不同通磁温度下施加磁场, Al 元素在 Mg 基体中的质量分数呈递增趋势, 在晶界中的质量分数则是递减的. 当通磁温度为 595 °C 时, Al 在 Mg 基体中的质量分数为 6.69%; 当通磁温度为 610 °C 时, Al 在 Mg 基体中的质量分数大幅度增加为 12.18%, 增幅高达 48.44%, 这已接近 Al 在 Mg 基体中溶解的理论值 12.7%^[10]. 当通磁温度较低时, 由于晶粒的粗化, 基体相中铝含量的下降以及 β 相的聚集, 磁场对合金各项力学性能的影响变小. 随着通磁温度的升高, Al 在 Mg 基体中的质量分数增加、晶界厚度变薄且 β 相成颗粒状分散, 晶界中 Al 的质量分数降低. 因为 Al 元素是强化相, 其含量决定镁合金的硬度, 随着合金基体组织中 Al 的含量及分布的变化, 镁合金的硬度也将随之发生变化, 这既有利于提高镁合金基体的强度, 又有利于减少脆性共晶组织对合金塑性的不良影响, 提高镁合金的力学性能.

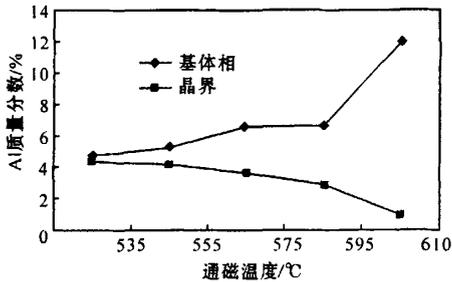


图3 Al元素含量变化曲线

Fig.3 Curve of Al element content

3 结论

随着通磁温度的升高, AZ91D 镁合金晶粒被细化、 β 相形貌由网状变为分散的颗粒状且分布均匀、镁基体中 Al 的质量分数增加、晶界厚度减薄且晶界中 Al 的质量分数降低。在不同通磁温度下施加直流磁场改变了 AZ91D 镁合金的组织结构, 提高了其塑性变形能力, 改善了力学性能。

参考文献:

[1] 刘正, 张奎, 曾小勤. 镁基轻质合金理论基础及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.

[2] 张伟强. 金属电磁凝固原理与技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.

[3] HANS C. Influence of an electric or magnetic field on the liquid transformation in materials and on the microstructure of the solid [J]. *Materials Science and Engineering*, 2002, A287(2): 205-212.

[4] NAKADA M, FLEMINGS M C. Modification of solidification structures by pulse electric discharging [J]. *ISIJ International*, 1990, 30(1): 27-33.

[5] VIVES C. Crystallization of aluminum alloys in the presence of vertical electromagnetic force fields [J]. *Journal of Crystal Growth*, 1997, 173(3-4): 541-549.

[6] ASAI S. Birth and recent activities of electromagnetic processing of materials [J]. *ISIJ International*, 1989, 29(12): 981-992.

[7] 许光明, 包卫平, 崔建忠, 等. 不同磁场作用下 ZK60 镁合金的凝固组织 [J]. *东北大学学报*, 2004, 25(1): 48-50.

[8] 李廷举, 佐左健介, 浅井滋生. 间断高频磁场作用下连铸型内金属液的运动和铸坯的表面质量 (II) 金属液的运动特性 [J]. *金属学报*, 1997, 33(9): 971-974.

[9] 俞汉青, 陈金德. 金属塑性成形原理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 8.

[10] 王渠东, 丁文江. 镁合金研究开发现状与展望 [J]. *有色金属*, 2004(7): 8-11.

Effect on microstructure of AZ91D magnesium alloy by direct magnetic field under different temperature

CAO Chen-hua¹, HUA-Lin¹, ZHANG Xu-guang²

(1. College of Material Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. FAW CAR Co. Ltd., Changchun 130012, China)

Abstract: Effect on solidification microstructure of AZ91D magnesium alloy by direct magnetic field under different temperature were studied and the mechanism that direct magnetic field affects microstructure of AZ91D alloy was discussed. The result of experiments indicates that the grains of AZ91D alloy were refined, β metallic phase fragmented and distributed in even, the image changed from continuous network into discontinuous islet when temperature rose; simultaneously thickness of grain boundary was reduced, Al element contained in grain boundary also reduced and increased in the α -phase. Consequently, mechanical property of AZ91D alloy will be improved.

Key words: temperature; magnesium alloy; direct magnetic field; microstructure