

[文章编号] 1004- 0609(2002)04- 0784- 07

电磁铸造对 AZ91D 合金组织及力学性能的影响^①

袁晓光¹, 刘 正¹, 许 沂²

(1. 沈阳工业大学 材料科学与工程学院, 沈阳 110023; 2. 中国科学院 金属研究所, 沈阳 110016)

[摘 要] 研究了电磁场对 AZ91D 合金组织的影响, 分析和测试了 AZ91D 合金挤压变形后的组织及性能。结果表明: 电磁搅拌使 AZ91D 合金枝晶组织发生球化和细化, $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相数量增加, 并使 Zn 元素在 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相的偏聚倾向降低; 挤压成形后的合金极限抗拉强度高达 285 MPa, 比压铸合金提高 30%, 延伸率为 12%, 是压铸合金的 2 倍多。

[关键词] 镁合金; 电磁搅拌; 挤压; 微观组织; 力学性能

[中图分类号] TG 113.1

[文献标识码] A

随着对汽车低排放、高效率的要求, 汽车轻量化已成为汽车工业的发展方向之一, 因此, 高性能轻质材料的不断开发和应用越来越引起汽车制造业的关注^[1, 2]。目前, 汽车工业能使用的轻质金属材料主要是铝合金和镁合金, 而铝合金目前应用比较普遍, 包括铸造铝合金、压铸铝合金及铝基复合材料等^[3, 4]。然而, 随着金属镁冶炼技术的发展, 国内丰富的镁资源使镁合金的价格也越来越低。目前, 单位质量镁合金的价格已远低于铝合金。因此, 镁合金的应用, 特别是用于替代铝合金已成为当今材料领域的研究热点。

镁合金汽车零件在欧洲已得到较普遍的应用, 主要用于取代原来的铝合金件^[5]。由于对镁合金零件的性能(主要是强度和韧性)要求较高, 镁合金汽车零件的生产工艺多采用压力铸造, 使用的合金也以 Mg-Al 合金为主^[6~8]。近些年, 随着镁合金在汽车工业上应用范围的不断扩大, 进一步提高镁合金性能的要求也越来越迫切, 使得研究人员在不断优化合金成分的同时, 更注重研究合金的成形工艺, 促进了镁合金流变成形、触变成形、挤压成形等新工艺的研究和发展^[9~11]。

AZ91D 是主要的压铸合金之一, 但该合金的强度和延伸率与压铸高强度铝合金相比仍有一定的差距^[12], 因此, 用该合金取代压铸铝合金必须进一步提高合金的强度和延伸率。为此, 作者开展了 AZ91D 镁合金挤压成形工艺的研究, 拟采用电磁搅拌和挤压实现合金晶粒的细化, 从而达到提高合金性能的目的, 以满足汽车工业发展的要求。

1 实验

实验用 AZ91D 镁合金铸锭化学成分见表 1。

表 1 AZ91D 合金化学成分

Table 1 Chemical composition of AZ91D alloy
(mass fraction, %)

Al	Zn	Mn	Si	Ni	Cu	Mg
8.3~9.7	0.35~1.0	>0.13	<0.50	<0.03	<0.10	Bal.

实验用熔剂是 RJ 系列镁合金熔剂, 其主要组成物是氯盐和氟盐。精炼剂为六氯乙烷(C_2Cl_6)。熔炼在电阻炉内进行, 浇注温度为 720 ℃。

电磁搅拌工艺为: 熔炼后的镁合金液直接浇入不锈钢薄壁模具中, 并由熔剂保护, 然后, 在电磁场作用下直至凝固。电磁场强度由调节励磁电压来控制, 采用的励磁电压为 90 V, 搅拌作用时间为 2 min。模具壁厚为 1.0 mm, 制成的镁合金锭直径为 70 mm。

挤压在 500 t 压力机上进行, 挤压温度为 400 ℃, 挤压比为 9:1。

组织分析试样用 4% 的硝酸酒精溶液腐蚀; 组织观察在 IAS-4 型金相分析显微镜和 EPM-810Q 电子探针上进行。

拉伸实验在 WES-600D 万能试验机上进行。

2 结果及分析

2.1 铸态 AZ91D 合金的微观组织特征

图 1 所示是普通铸态 AZ91D 合金的微观组

① [收稿日期] 2001- 09- 06; [修订日期] 2001- 11- 09

[作者简介] 袁晓光(1963-), 男, 教授, 博士。

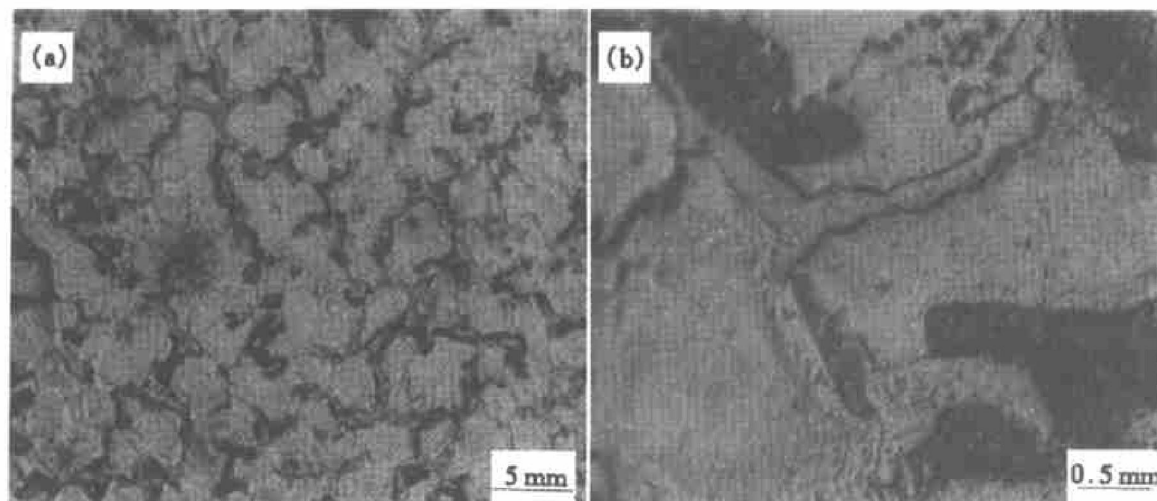


图1 铸态 AZ91D 合金显微组织

Fig. 1 Microstructures of as-cast AZ91D alloy

(a) —Intermetallic structure; (b) — $Mg_{17}Al_{12}$ phase and eutectic structure

织。由图可见, AZ91D 合金的组织是由尺寸较大的树枝状基体相和晶间存在的第二相组成。对晶间局部放大后发现(见图 1(b)), 晶间存在 2 种组织: 一种是沿晶分布的单相灰色组织; 另一种是黑白相间的组织。

根据 Mg-Al 合金相图, 此类合金中主要存在 α -Mg 和 β -(Mg, Al) 2 种相, α -Mg 相是基体相, β -(Mg, Al) 相是强化相。当合金中 Al 元素含量为 9% 时, 在非平衡凝固条件下, 可出现共晶组织, 即 α -Mg 和 β -(Mg, Al) 相共晶组织, 这种共晶组织属于离异共晶, 往往分布于 α -Mg 相的晶界上。其中, 图 1(b) 中的黑色组织即为此类共晶组织。

图 2 所示是合金中单相灰色组织的面成分分布图。由图可见, 灰色相主要含有 Mg, Al, Zn 3 种元素。根据 Mg-Al-Zn 铸造合金的组织特点^[8], 这种相应为 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相, 是合金中的强化相。由此可以判断, 共晶组织中的 β -(Mg, Al) 相也应为 $Mg_{17}Al_{12}$ 相。相对于共晶组织中的 $Mg_{17}Al_{12}$ 相, 灰色 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相是由 α -Mg 相中直接沉淀析出的。图 2(d) 表明, β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相中含有大量的 Zn 元素。实际上, β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相中的 Zn 元素不是以化合态形式存在, 而是以固溶的形式存在^[8]。此外, 合金元素面成分分布还说明, Zn 元素在合金中并非均匀地固溶在各相中, 而是更倾向于偏聚在 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相中(见图 2(d))。

由此可见, 铸态 AZ91D 合金的组织是由粗大的 α -Mg 树枝状基体相和沿晶分布的共晶组织组成, Zn 元素在 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相中偏聚。

2.2 电磁搅拌对 AZ91D 合金组织的影响

图 3 所示是电磁搅拌后 AZ91D 合金的微观组

织。与未搅拌合金相比(见图 1), α -Mg 相由粗大的枝晶状变为细小的球状, 沉淀析出的 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相和共晶组织数量显著增加, 几乎在 α -Mg 晶粒周围形成了连续的网状结构。由此可见, 电磁搅拌不但改变了基体相的形态, 而且还改变了相之间的体积分数。

图 4 所示是 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相形态及面成分分布。与搅拌前相比, 该相中含有的合金元素仍然为 Mg, Al 和 Zn, 但是, Zn 元素含量却显著减少, 而基体中的 Zn 元素却略有增加。这一结果说明, 电磁搅拌具有均化 Zn 元素分布的作用。

电磁搅拌均化 Zn 元素分布对进一步提高 Mg-Al-Zn 合金的性能十分有意义。一方面, Zn 元素的均匀分布有利于提高合金的耐腐蚀性; 另一方面, Zn 元素在 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相中的偏聚倾向降低, 可改善因其含量过高(超过 2% 时)而引起合金延伸率下降的问题。

综上所述, 电磁搅拌的主要作用为: 细化和球化 AZ91D 合金中的 α -Mg 相, 增加 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 和共晶相数量, 均化 Zn 合金元素分布。

2.3 AZ91D 挤压合金组织及性能

图 5 和图 6 所示分别是挤压后 AZ91D 合金横向和纵向微观组织。其中, 图 5(a) 和图 6(a) 未进行电磁搅拌, 而图 5(b) 和图 6(b) 经过了电磁搅拌。由图可见, 挤压后的合金微观组织较挤压前发生了明显的细化(见图 1 和图 3)。电磁搅拌前后的挤压组织相比较, 经电磁搅拌的合金横向和纵向微观组织均较未搅拌的 α -Mg 相晶粒更细小、均匀, 强化相 β - $Mg_{17}Al_{12}$ 相也更细小(见图 5 和图 6)。由此可见, 电磁搅拌细化和球化合金基体相, 有利于挤压后获

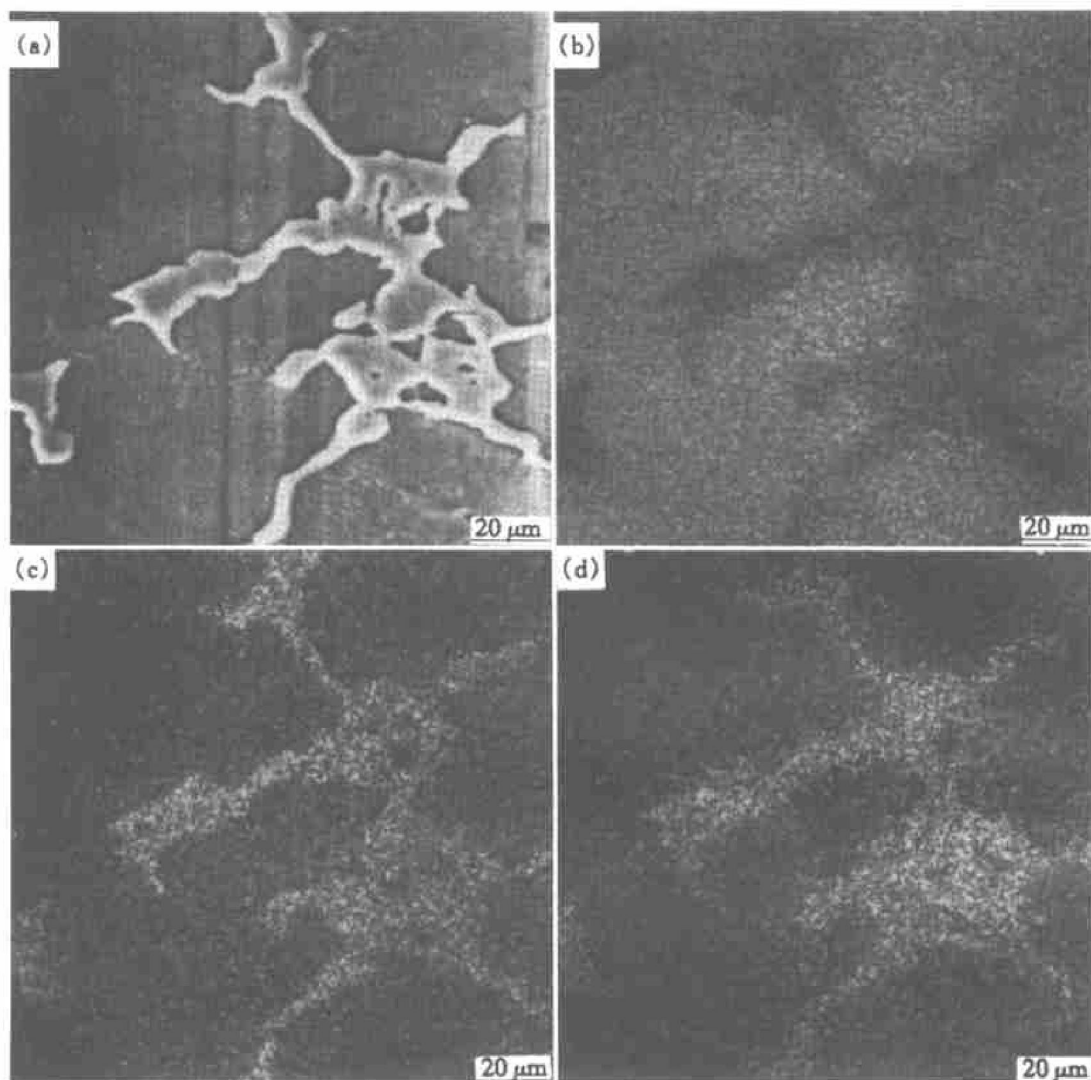


图 2 铸态 AZ91D 合金的面成分分布

Fig.2 Chemical elements distributions of as-cast AZ91D alloy

(a)—Microstructure; (b)—Mg; (c)—Al; (d)—Zn

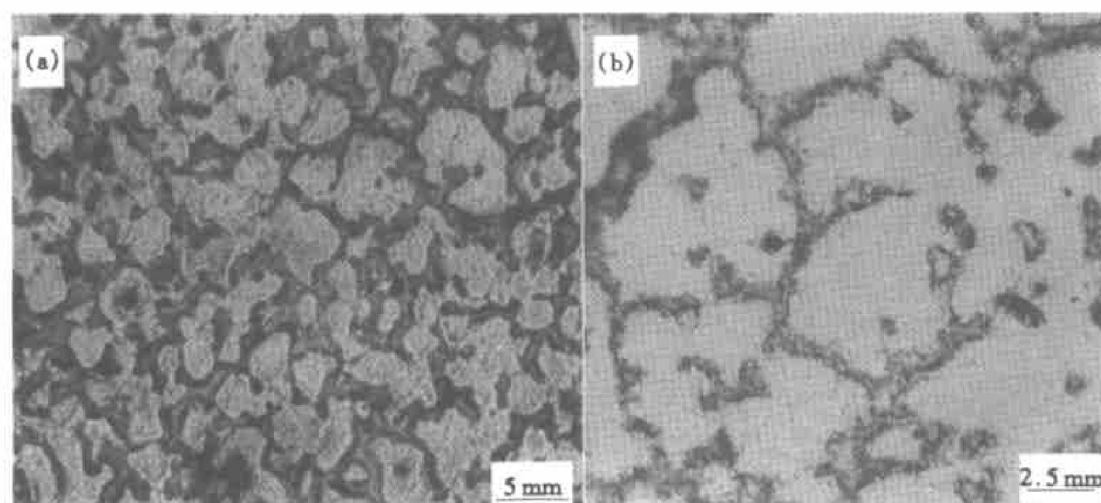


图 3 电磁搅拌后 AZ91D 合金的微观组织

Fig.3 Microstructures of AZ91D alloy by electromagnetic stirring

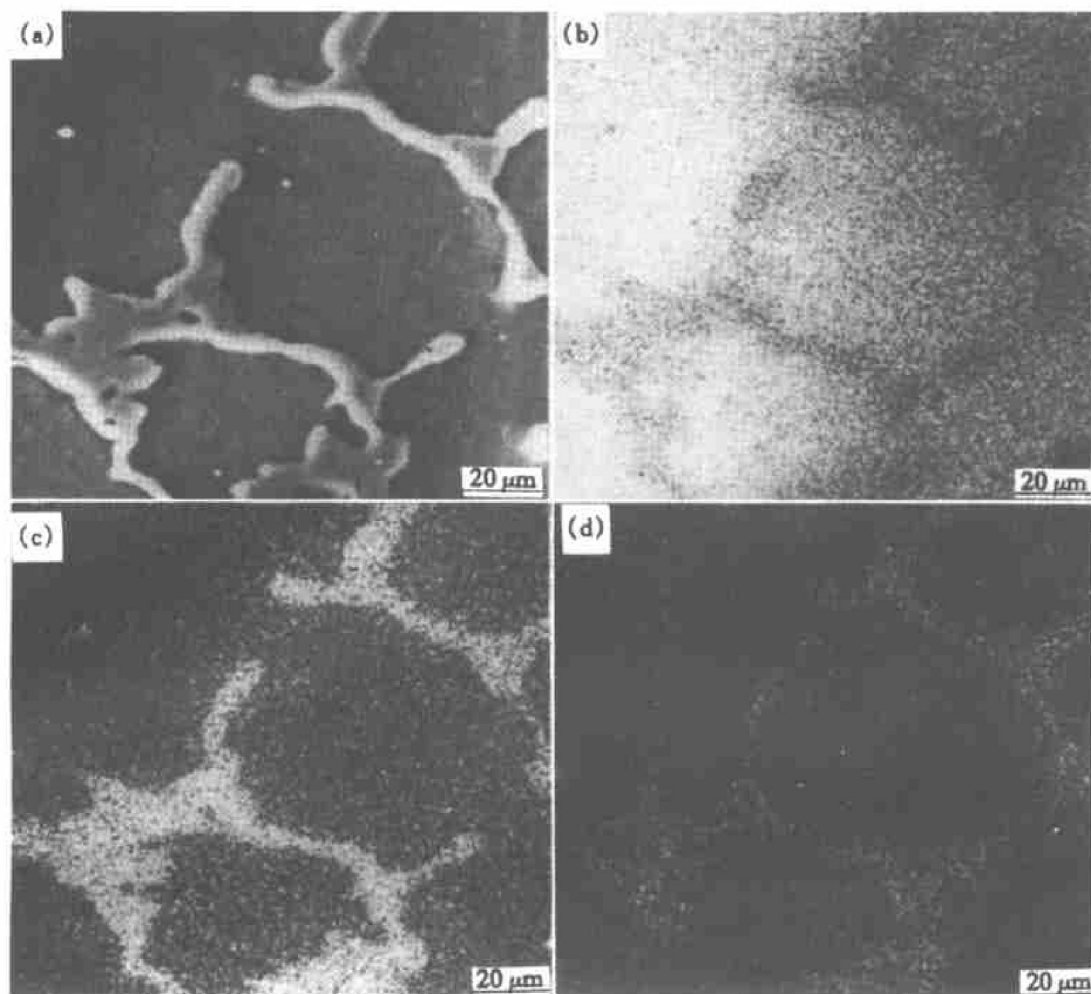


图 4 电磁搅拌后 AZ91D 合金的面成分分布

Fig.4 Chemical elements distribution of AZ91D alloy by electromagnetic stirring
(a)—Microstructure; (b)—Mg; (c)—Al; (d)—Zn

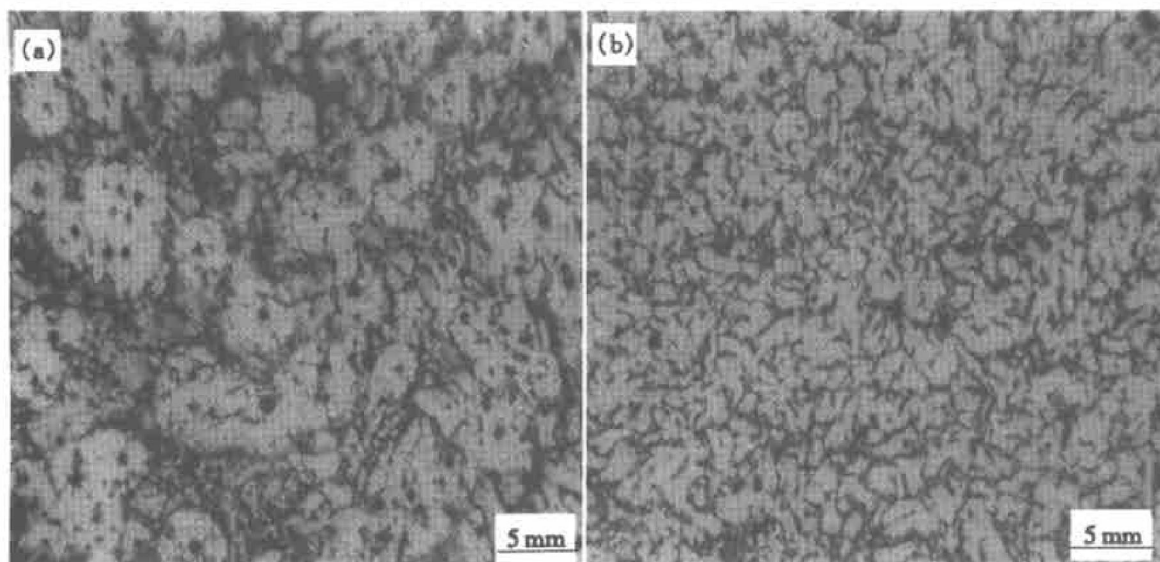


图 5 挤压后 AZ91D 合金的横向微观组织

Fig.5 Cross-sectional microstructures of extruded AZ91D alloy
(a)—Without electromagnetic stirring; (b)—With electromagnetic stirring

得更细的合金组织。

表2所列是经过电磁搅拌合金的拉伸实验结

表 2 AZ91D 挤压合金拉伸性能

Table 2 Tensile properties of extruded AZ91D alloy

Ultimate tensile strength σ_b /MPa	Yield strength σ_s /MPa	Elongation δ /%
285	210	12

果。可以看出：合金的屈服强度高达 210 MPa，极限抗拉强度最高达 285 MPa，比压铸合金高 30%；合金的延伸率为 12%，是压铸合金的 2.4 倍。由此可见，挤压变形既可提高 AZ91D 合金的拉伸强度，又可大幅度提高合金的延伸率。

图 7 所示是挤压合金的拉伸断口形貌。可以看出，合金的断裂具有明显的韧性断裂特征，虽然断口中存在个别较大的窝坑，但合金断口中的韧窝基

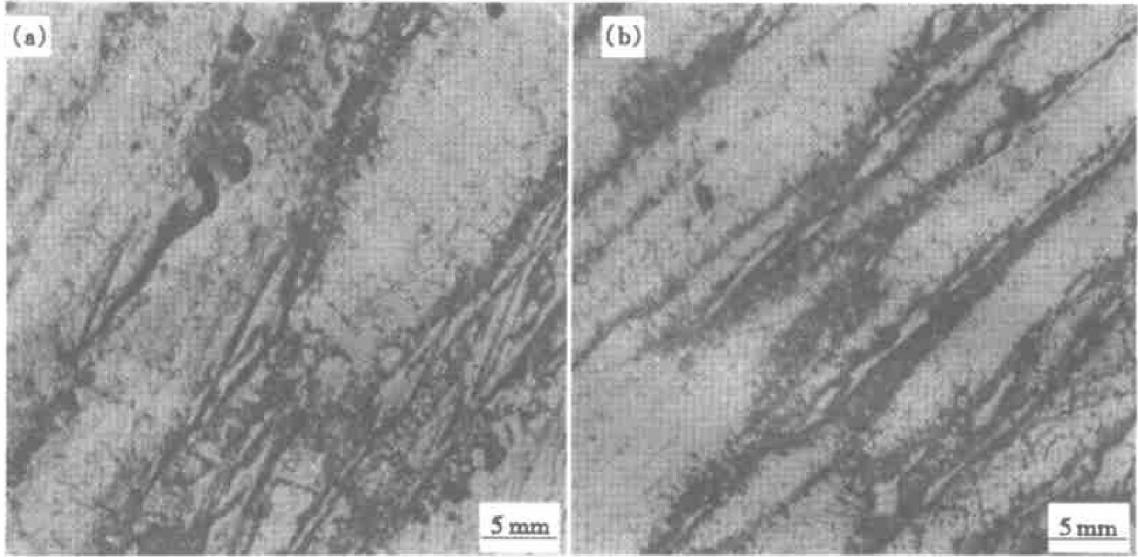


图 6 挤压后 AZ91D 合金的纵向微观组织

Fig.6 Longitudinal microstructures of extruded AZ91D alloy
(a)—Without electromagnetic stirring; (b)—With electromagnetic stirring

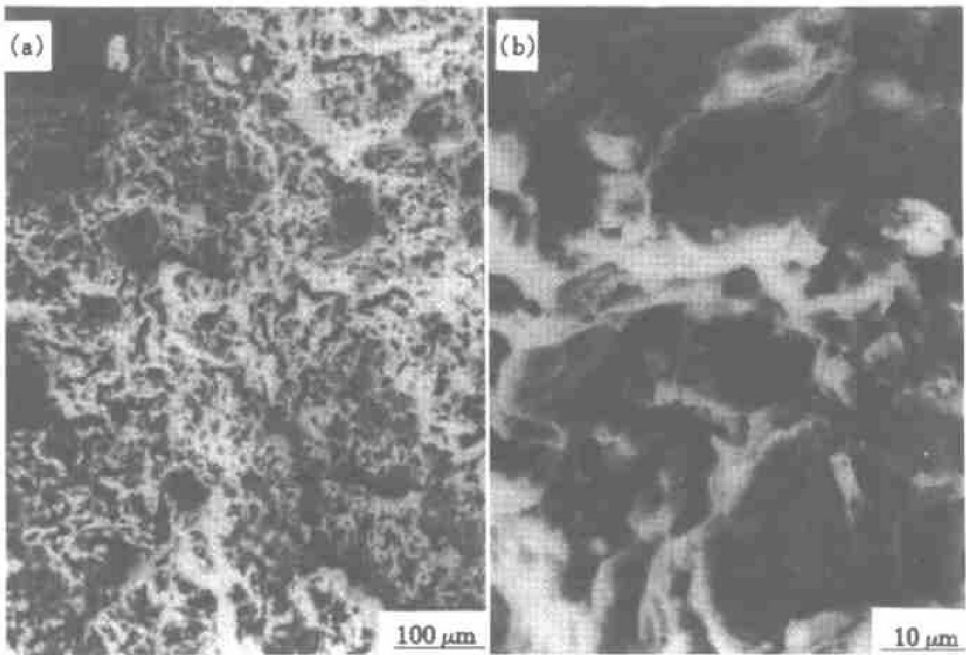


图 7 AZ91D 挤压合金断口形貌

Fig.7 Fracture morphology of extruded AZ91D alloy

本是细小而均匀的。局部放大断口可发现, 韧窝底部存在少量裂纹和脆断平台, 这是合金的裂纹源。根据合金微观组织特点, 脆性断裂平台可能是 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相断裂所致。由于挤压使合金中的 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相发生了明显的细化, 因而脆断平台也十分细小, 这是合金韧性高的主要原因。

3 结论

1) 电磁搅拌对 AZ91D 合金中的 $\alpha\text{-Mg}$ 枝晶相具有球化和细化作用; 电磁搅拌使 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相和共晶组织数量明显增多; 电磁搅拌能显著降低 Zn 元素在 $\beta\text{-Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ 相中的偏聚倾向, 有利于 Zn 元素在合金中的均匀分布。

2) 挤压显著细化 AZ91D 合金组织; 经过电磁搅拌的合金, 挤压后的组织比未搅拌的更细小、均匀。

3) AZ91D 合金挤压后的极限抗拉强度高达 285 MPa, 比压铸合金提高 30%; 延伸率高达 12%, 是压铸合金的 2 倍多。

[REFERENCES]

- [1] 彭晓东, 李玉兰, 刘江. 轻合金在汽车上的应用 [J]. 机械工程材料, 1999, 23(2): 1-4.
PENG Xiao-dong, LI Yu-lan, LIU Jiang. Application of lightweight alloys in automobile [J]. Materials for Mechanical Engineering, 1999, 23(2): 1-4.
- [2] Mitsugaki I, Murakami S. Development and application of aluminum extrusion for automotive parts [J]. Journal of Mater Processing Tech, 1993, 38(4): 635-654.
- [3] 赵鸿. 铝在汽车上的应用 [J]. 汽车工艺与材料, 1997(1): 19-21.
ZHAO Hong. Application of aluminum alloy in automobile [J]. Technology and Materials for Automobile, 1997(1): 19-21.
- [4] 邱庆荣, 孙宝德, 周尧和. 铝合金铸件在汽车上的应用 [J]. 铸造, 1998, 47(1): 46-49.
QIU Qing-rong, SUN Bao-de, ZHOU Yao-he. Application of aluminum alloy casting in automobile [J]. Foundry, 1998, 47(1): 46-49.
- [5] 朱和祥. 铝基复合材料 [J]. 汽车工艺与材料, 1993(8): 1-6.
ZHU He-xiang. Aluminum matrix composite materials [J]. Technology and Materials for Automobile, 1993(8): 1-6.
- [6] 陈力禾, 赵彗杰. 欧洲镁合金压铸及其在汽车工业中的应用与发展概况 [A]. 李荣德. 第二届中国国际压铸会议论文集 [C]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000. 17-21.
CHEN Li-he, ZHAO Hui-jie. Magnesium-today's lightweight solution for tomorrow's automobiles [A]. LI Rong-de. Proceedings of the Second China International Diecasting Congress [C]. Shenyang: Northeastern University Press, 2000. 17-21.
- [7] 张永忠, 崔代金, 张奎, 等. 压铸镁合金及其在汽车工业上的应用 [J]. 特种铸造及有色合金, 1999(3): 54-56.
ZHANG Yong-zhong, CUI Dai-jin, ZHANG Kui, et al. Die casting magnesium alloy and its application in automobile industry [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 1999(3): 54-56.
- [8] 刘正, 王越, 王中光, 等. 镁基轻质材料的研究与应用 [J]. 材料研究学报, 2000, 14(10): 449-456.
LIU Zheng, WANG Yue, WANG Zhong-guang, et al. Developing trends of research and application of magnesium alloys [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2000, 14(10): 449-456.
- [9] 王益志. 镁合金压铸的发展前景 [J]. 特种铸造及有色合金, 1998(增刊 1): 36-40.
WANG Yi-zhi. Developing foreground of magnesium die casting special [J]. Special Casting and Nonferrous Alloys, 1998(Suppl. 1): 36-40.
- [10] Fink R, Beck W. 镁合金压铸工艺的优化 [A]. 李荣德. 第二届中国国际压铸会议论文集 [C]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000. 180-185.
Fink R, Beck W. Optimization of magnesium die casting process [A]. LI Rong-de. Proceedings of the Second China International Diecasting Congress [C]. Shenyang: Northeastern University Press, 2000. 180-185.
- [11] 吕宜振, 蔚胤红, 曾小勤. 镁合金铸造成形技术的发展 [J]. 铸造, 2000, 49(7): 383-387.
LÜ Yi-zhen, WEI Yin-hong, ZENG Xiao-qin. Development of the forming process for cast magnesium alloy [J]. Foundry, 2000, 49(7): 383-387.
- [12] Kitamura K, Maguchi T. 镁合金的触变造型工艺 [A]. 李荣德. 第二届中国国际压铸会议论文集 [C]. 沈阳: 东北大学出版社, 2000. 174-178.
Kitamura K, Maguchi T. Thixomolding of magnesium alloy [A]. LI Rong-de. Proceedings of the Second China International Diecasting Congress [C]. Shenyang: Northeastern University Press, 2000. 174-178.
- [13] 中国机械工程学会铸造专业委员会. 铸造手册: 第 6 卷—铸造非铁合金 [M]. 北京: 冶金工业出版社,

2000.

The Foundry Institution of Chinese Mechanical Engineering Society. Foundry Handbook: Vol. 6—Casting

Nonferrous Alloys [M]. Beijing: Metallurgy Industry Press, 2000.

Effect of electromagnetic cast on microstructures and mechanical properties of AZ91D alloy

YUAN Xiaoguang¹, LIU Zheng¹, XU Yi²

(1. School of Materials Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110023, China;

2. Institute of Metal Research, The Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China)

[Abstract] The effects of electromagnetic field on the microstructures of AZ91D alloy were studied, and the microstructure and properties characteristics of the alloy were analyzed. The results show that electromagnetic stirring has the action of spheroidization and refining intermetallic structure of α Mg phase, and reduces the amount of $Mg_{17}Al_{12}$ phase and the segregation tendency of Zn element in $Mg_{17}Al_{12}$ phase. The ultimate tensile strength of the extruded AZ91D alloy is 285 MPa, which is 30% higher than that of die casting alloy, and elongation is about 12%, two times more than that of die casting alloy.

[Key words] magnesium alloy; electromagnetic stirring; extrusion; microstructure; mechanical properties

(编辑 陈爱华)