

[文章编号] 1004- 0609(2002) S1- 0241- 04

熔体热速处理对铸造 Mg 合金组织和力学性能的影响^①

赵 鹏, 耿浩然, 田宪法, 崔红卫, 耿红霞, 刘建同
(山东大学 材料液态结构及其遗传性教育部重点实验室, 济南 250061)

[摘 要] 研究了熔体过热和热速处理对 AZ91 铸造 Mg-Al-Zn 合金组织和力学性能的影响。在含有 Mn 和钢坩埚内壁未刷有涂料的前提下, 熔体温度(820 ℃)不够高时, 会引起晶粒的粗化; 熔体温度(870 ℃)足够高时, 镁合金结晶晶核的增加引起了基体组织的细化, 同时组织中的 γ 强化相比未高温过热时弥散、均匀; 热速处理后组织部分保留了高温过热时的特性, 从而使镁合金的力学性能和铸件质量得到提高。

[关键词] 镁合金; 热速处理; 晶粒细化

[中图分类号] TG 146.2

[文献标识码] A

镁合金密度小, 比强度和疲劳强度较高, 具有较高的比弹性模量, 优良的切削加工性能和抛光性能。鉴于以上优点, 镁合金不仅在航空航天工业等尖端领域中广泛应用, 而且还在汽车、电子通讯工业等日常制造业中正得到日益广泛的应用^[1, 2]。Mg-Al-Zn 系的合金 AZ91 是目前常用的主要压铸镁合金, 具有良好的抗拉强度和铸造性能, 除了在汽车工业中得到应用外, 还用来生产手机壳体、笔记本电脑壳体、数码照相机和摄录像机的壳体等^[3, 4]。

然而现有的各种铸造镁合金的力学性能普遍较低, 很大程度上限制了镁合金的推广应用, 因此迫切需要改进镁合金的性能。铸造镁合金的晶粒比较粗大, 这使合金的缩松和热裂倾向增加, 影响了合金的力学性能^[5, 6]。在常温下, 金属合金的晶粒细小有利于提高强度、塑性和韧性, 因此, 通过细化晶粒来提高材料的力学性能是一种有效的技术途径。在工业生产中一般采用变质处理方法来改变合金的组织, 从而引起力学性能的变化^[7, 8]。热速处理(TRT)工艺作为一种新的熔炼工艺不同于传统的熔炼工艺(CM)。有研究者发现热速处理工艺对 Al-Si 和 Zn-Al 合金有很好的强化效果^[9, 10]。然而, 国内外对在不同过热温度和不同成分下、尤其高温过热镁合金组织变化的报道很少。作者研究了熔体过热和热速处理对镁合金组织及力学性能的影响, 为镁合金的变质技术提供了新的途径和方法。

1 试验方法

试验采用 SG-5-12 坩埚电阻炉、45 号钢坩埚熔

炼合金, 采用加入 RJ-2 熔剂覆盖防止镁合金熔炼时的燃烧和氧化。金属型浇注成 $d 12\text{ mm}$ 圆柱形拉伸试样, 拉伸实验在 60 吨万能材料实验机上按常规方法进行。采用布氏硬度计进行材料的硬度测试, 试验载荷为 1 000 kg, 压头直径为 10 mm, 加载时间为 30 s。合金显微组织用 KH-2200 高倍视频显微镜和 JXA-840 扫描电镜观察, 相成分分析采用 EDAX 能谱分析仪。

不同熔炼工艺和试验合金的成分见表 1。传统熔炼工艺是将炉料熔化至 720 ℃, 保温 10 min 后浇注。试验中采用的熔体热速处理工艺是将 70% ~ 80% 炉料升温至一定的过热温度, 保温 10 min, 加入所剩的经预热处理的一定块状炉料, 迅速搅拌熔液, 当合金液至 720 ℃左右时浇注。熔炼 1 号合金时坩埚内壁刷有滑石粉+ 硅酸钠, 熔炼其它两种时坩埚内壁无涂料, 以观察钢坩埚对组织的影响。

表 1 试验合金化学成分和试验熔体最高温度

Table 1 Compositions and the highest melt temperature of tested alloys

Sample No.	$w(\text{Al})/\%$	$w(\text{Zn})/\%$	$w(\text{Mn})/\%$
1	0.45~0.90	8.5~9.5	—
2	0.45~0.90	8.5~9.5	0.2
3	0.45~0.90	8.5~9.5	0.2

Sample No.	$w(\text{Be})/\%$	$w(\text{Mg})/\%$	Temp. in TRT/℃
1	0.002	Bal.	820
2	0.002	Bal.	820
3	0.002	Bal.	870

① [收稿日期] 2001- 07- 26; [修订日期] 2001- 10- 24

[作者简介] 赵 鹏(1978-), 男, 硕士研究生。

2 试验结果及分析

2.1 显微组织及分析

1 号合金在 CM 工艺下的试样视频显微组织见图 1(a)，热速处理工艺视频显微组织见图 1(b)。2 号合金 CM 工艺视频显微组织如图 2(a) 所示，热速处理工艺视频显微组织如图 2(b) 所示。3 号合金 CM 工艺后试样 SEM 照片见图 3(a)，在 870 °C 高温静置保温后直接浇注试样的 SEM 照片见图 3(b)，热速处理工艺试样 SEM 照片见图 3(c)。

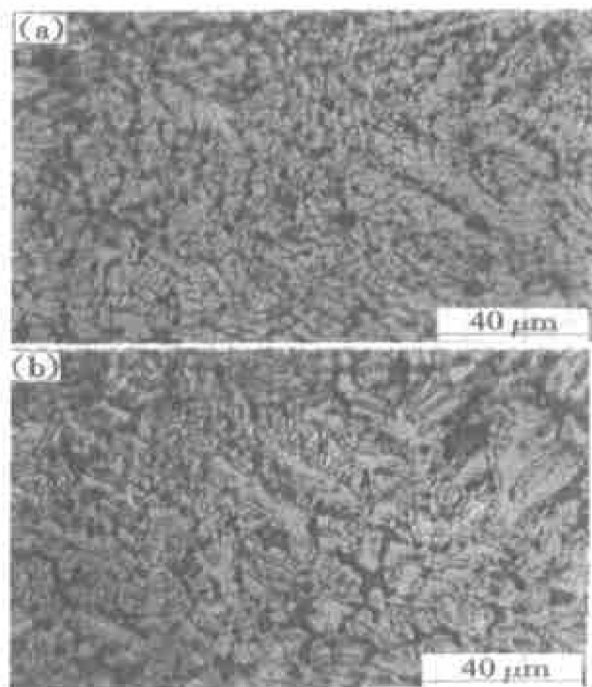


图 1 1 号合金的铸态组织

Fig. 1 Microstructures of as-cast alloy No. 1
(a) —CM; (b) —TRT

1 号合金热速处理试样产生了热裂缺陷，由于高温时熔炼工艺与其它条件和低温时相同，热裂缺陷的产生应该是合金本身的原因，认定是组织的粗化使合金液流动性下降从而产生了热裂，这可以从图 1 中得到证实。试验结果显示，1 号合金热速处理后的金相组织与 CM 相比明显粗大。坩埚内部由于刷有涂料，铁进入到合金液中的量特别少。文献 [5] 报道，铁在过热时会与镁(或与镁和锰)形成细小化合物的质点，成为结晶晶核。合金液中没有 Fe 和 Mn 元素，形成化合物小质点数量有限是没有发生组织细化的原因。

观察图 3 可以发现，3 号合金高温过热后引起了凝固组织的明显变化。图 3(b) 和 (c) 中的合金晶粒明显细化，尤其是图 3(b)，高温过热后直接浇注凝固试样的显微组织是最细的。不但晶粒得到细

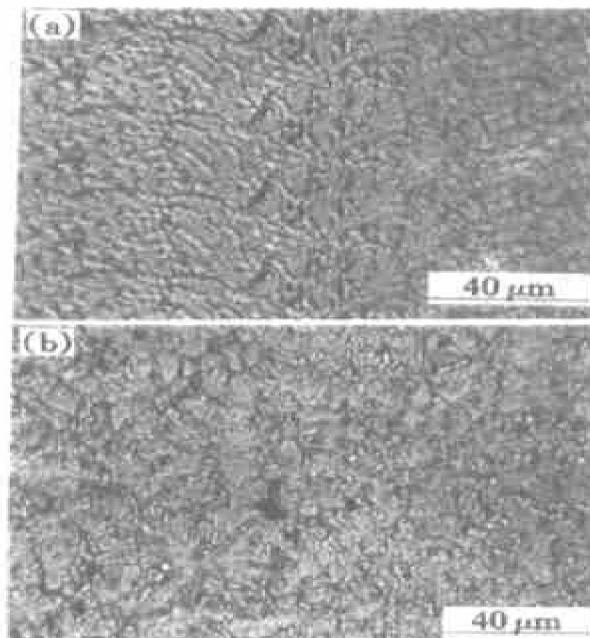


图 2 2 号合金的铸态组织

Fig. 2 Microstructures of as-cast alloy No. 2
(a) —CM; (b) —TRT

化，而且经 EDX 能谱分析发现成分也发生变化。图 3(a) 中晶界处的析出相(在 SEM 照片中呈白色)成分大致为 Mg-33% Al-4% Zn，高温直接浇注的图 3(b) 中的白色相成分变为 Mg-26% Al-3% Zn，热速处理后的图 3(c) 中，该相又变为 Mg-33% Al-4% Zn。包围此相的另一相(在 SEM 照片中呈黑色)在低温过热凝固时的成分大致为 Mg-9% Al，在高温过热后变为 Mg-15% Al，热速处理后成分与高温过热时的相同。这表明熔体高温过热后，晶界边缘的镁铝相成分发生了变化。根据 Mg-Al-Zn 三元相图^[11]可知，这些相应为镁合金中的强化相 γ 相。强化相成分的变化起源于组织的变化，如图 3 所示，强化相的形状与分布发生了明显的改变。图 3(b) 和 (c) 中的析出相比图 3(a) 中更加弥散与均匀。在熔体高温保温过程中，由于钢坩埚的存在和 870 °C 合金液温度，从而使铁组元析出于合金液的几率增加，又由于锰的存在，使铁锰铝化合物得以产生，此化合物在高温难熔，增加了镁合金液中的结晶晶核，使镁的晶粒细化。加入冷料后，合金液快速冷却使冷却组织保留了镁合金高温熔体的性质。虽然加入了粗晶粒的冷料，根据金属遗传学的原理，必然使合金晶粒有所粗化，但实际上热速处理组织与 CM 组织依然不同，仍然细化合金的组织，这一点可以从图 3 中看出。尽管 TRT 和 CM 浇注温度相近，组织却有所差别，这表明热速处理可

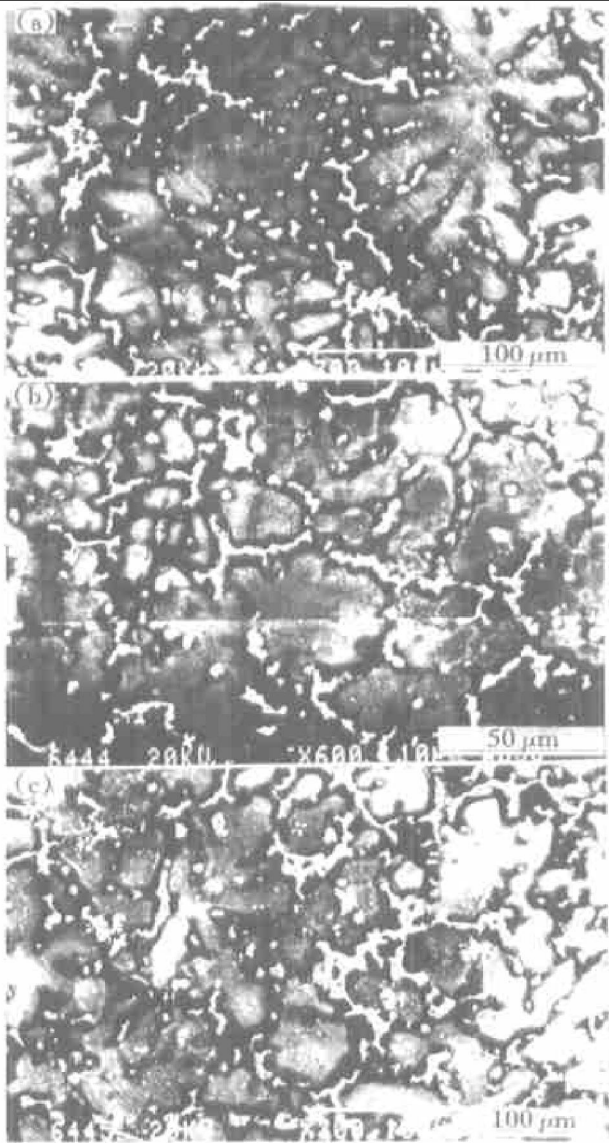


图 3 3 号合金的铸态 SEM 照片

Fig. 3 SEM images of as-cast alloy No. 3

(a) —CM; (b) —Cast directly at 870 °C; (c) —TRT

以保留或部分保留高温熔体的结构组织。同高温直接浇注工艺相比较, TRT 工艺可以减少热裂与浇注不足等缺陷, 更加符合工艺的要求, 从而使浇注简便, 并且使浇注时合金液的氧化减少, 因此, 热速处理工艺在实际中得到应用。然而, 从 1 号合金可以看出晶粒的细化本质并不在于热速处理, 只有热速处理工艺引起合金液中结晶晶核的增加, 热速处理工艺才具有变质的效果。

从图 2 可看出, 同 1 号合金相似, 热速处理工艺导致了 2 号合金的组织粗化。γ 相和 Mg 基体在热速处理前后是不同的, 尤其是 Mg 基体由等轴晶向枝晶转化。但是, 从图 1 与图 2 的比较中看出, 1 号和 2 号合金之间不但粗化程度不同, 而且微观组织也明显不同。1 号合金的 CM 组织枝晶富集, 而 2 号合金的 CM 组织等轴晶组织富集, 表明 Mn 的加

入对晶粒细化有良好的作用。虽然 1 和 2 号合金的 TRT 组织枝晶都发达, 但是 2 号合金的基体组织却比 1 号合金均匀, 从而表明 Mn 的加入对 TRT 组织的细化依然有良好的促进作用。另一方面, 从图 2 与图 3 的比较可看出, 粗化的原因在于过热温度太低, Fe 元素在镁合金中的溶解量有限, 不能生成足够的结晶晶核; 如果增加温度的话, 必然会引起结晶晶核的增加, 晶粒度会进一步增加, 从而如合金 3 那样引起晶粒的细化。

从以上结果和分析可以看出, AZ91 合金熔体的温度从 720 °C 升到 870 °C 时, 温度的升高能引起组织的变化。低温合金液存在着一些不均匀结构, 不均匀结构在高温保温静置时逐渐发生分解, 又由于 Fe 和 Mn 元素的存在, 它们和 Al 元素形成大量的难熔质点, 产生细化晶粒效果。将合金液高温过热到液相线以上 200~ 300 °C 足够高的温度, 产生变质效果, 预示着凝固合金晶粒的细化。

2.2 力学性能和铸件质量

表 2 为 3 号合金熔体采用不同熔体工艺后试样的力学性能。可以看出, 经热速处理后, 材料的硬度虽然变化不大, 但延伸率和拉伸强度有所提高。与传统工艺相比, 经过热速处理后合金的拉伸强度提高了 27%, 而延伸率提高了 36%。因此热速处理可以改善镁基合金的力学性能。这是由于镁合金在热速处理后, 晶粒细化、脆性析出相的弥散均匀分布的综合作用的结果。

表 2 3 号合金在不同熔炼工艺下的力学性能

Table 2 Mechanical properties of sample No. 3 with different melting techniques

Melting process	σ_b /MPa	δ /%	HB
CM	148	2.8	65
Cast at 870 °C	195	4.0	68
TRT	190	3.8	70

虽然高温浇注的性能更好些, 但实验结果显示, 采用 TRT 工艺制作的 AZ91 镁合金铸件可避免采用高温合金液直接浇注工艺易产生的热裂, 而且缩孔缩松等收缩缺陷也明显减少。因此, 同在 870 °C 下直接浇注工艺相比, TRT 工艺更符合工艺要求, 更易在实际中得到应用, 并且能改善合金的力学性能和铸件质量。

3 结论

1) AZ91 合金熔体从 720 °C 升温到 870 °C, 随

着温度的升高, 会引起晶粒的显著变化。

2) 在熔体温度不够高或合金中不含 Fe 和 Mn 元素时, 不会产生晶粒的细化。

3) 采用将合金液过热至液相线以上 200~ 300 °C 的热速处理工艺时, 合金基体明显细化, 而且还引起第二相粒子 γ 相分布的变化, 从而起到强化的作用, 与传统熔炼工艺相比改善了合金的力学性能和铸件质量。

[REFERENCES]

- [1] 孙伯勤. 镁合金压铸件在汽车工业中的巨大应用潜力 [J]. 特种铸造及有色合金, 1998(3): 40– 41.
SUN Bō-qin. Great applied potentialities of magnesium alloy die-castings in automobile trade [J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 1998(3): 40– 41.
- [2] 黄恢元. 铸造手册: 铸造非铁合金 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993. 166– 167.
HUANG Huī-yuan. Foundry Manual: Cast Nonferrous Alloys [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1993. 166– 1675.
- [3] Boermier I J. 轻合金 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1985. 11– 13.
Boermier I J. Light Alloys [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1985. 11– 13.
- [4] 曾小勤, 王渠东, 吕宜振, 等. 镁合金应用新进展 [J]. 铸造, 1998(11): 39– 43.
ZENG Xiāo-qin, WANG Qú-dong, Lǚ Yí-zhen, et al.

Progress in magnesium alloy application [J]. Foundry, 1998(11): 39– 43.

- [5] 陆树荪, 顾开道, 郑来苏. 有色铸造合金及熔炼 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1983. 185– 218.
LU Shù-sun, GU Kāi-dào, ZHENG Lāi-sù. Nonferrous Cast Alloys and Melting [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1983. 185– 218.
- [6] Koike J, Kawamura Y, Hayashi K, et al. Mechanical properties of rapidly solidified Mg-Zn alloys [J]. Materials Science Forum, 2000, 350– 351: 105– 110.
- [7] 崔忠圻. 金属学与热处理 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1989. 54– 55.
CUI Zhōng-qí. Metallurgy and Heat Treatment [M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 1989. 54– 55.
- [8] Yousuke T, Norio K, Tetsuichi M, et al. Grain refinement of cast Mg-Al alloys [J]. Journal of Japan Institute of Light Metals, 1998, 48(8): 395– 399.
- [9] GENG Hào-ran, MA Jiā-jī, BIAN Xiū-fang. Thermal rate treatment and its effect on modification of Al-Si alloys [J]. Trans Nonferrous Met Soc China, 1997, 7(1): 137– 141.
- [10] 耿浩然, 马家骥, 刘国栋, 等. Zr-Al 合金熔炼新工艺 [J]. 铸造, 1996(1): 13– 17.
GENG Hào-ran, MA Jiā-jī, LIU Guō-dong, et al. A new processing of smelting Zr-Al alloy [J]. Foundry, 1996(1): 13– 17.
- [11] Roberts C S. Magnesium and Its Alloys [M]. John Wiley and Sons Inc, 1960. 71.

Effects of thermal rate treatment on microstructure and mechanical properties of cast Mg based alloy

ZHAO Peng, GENG Hào-ran, TIAN Xiāo-fa, CUI Hong-wei, GENG Hong-xia, LIU Jiān-tong
(The Key Laboratory for Liquid Structure and Heredity of Materials of Ministry of Education,
Shandong University, Jí nan 250061, China)

[Abstract] The effects of melt superheating and thermal rate treatment technique on the microstructure and properties of AZ91 cast magnesium alloy were investigated. When the alloy contains Mn element and the crucible had no coating on the internal surface, the alloy grains thicken at the relatively low melt temperature(820 °C). However, the grains refine at the high enough melt temperature (870 °C), and the strengthening γ phrase is more dispersive and uniform. The microstructure of AZ91 alloy keeps some characteristics of the high temperature melt after thermal rate treatment, which improves the mechanical properties and casting quality of magnesium alloy.

[Key words] magnesium alloys; thermal rate treatment; grain refinement

(编辑 袁赛前)