

电磁铸造对 2024 铝合金力学性能和组织的影响*

贾非 金俊泽 曹志强 张兴国 郝海

(大连理工大学铸造工程研究中心, 大连 116024)

摘要 通过光学显微镜、差热分析仪和透射电子显微镜, 对比分析了电磁铸造和连续铸造 2024 铝合金铸态及热处理态的显微组织和力学性能。电磁铸造铝锭的硬度较连续铸造铸锭提高 1 倍, 疲劳性能提高 2 倍。差热分析曲线显示, 电磁铸造试样具有比连续铸造高的热焓, 说明其在加热过程中沉淀强化物析出较多。

关键词 电磁铸造, 连续铸造, 铝合金, 显微组织, 力学性能

中图分类号 TG249.7, TF777 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2002)04-0393-04

INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC CASTING ON THE MECHANICAL CHARACTERISTICS AND MICROSTRUCTURE OF 2024 ALUMINUM ALLOY

JIA Fei, JIN Junze, CAO Zhiqiang, ZHANG Xingguo, HAO Hai

Research Center of Foundry Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024

Correspondent: JIA Fei, Tel: (0411)4708244, E-mail: jiafei@student.dlut.edu.cn

Supported by Major Projects of National Natural Science Foundation of China (No. 59995442)

Manuscript received 2001-08-14, in revised form 2001-11-08

ABSTRACT The mechanical characteristics and microstructures of EMC and continuous casting (CC) 2024 aluminum alloys are analyzed not only in as-cast condition but also in aged one by optical microscope, differential scanning calorimetry and transmission electron microscopy. It is found that the hardness of EMC specimens increases one time than that of CC ingot and the fatigue property of EMC ingot is three times as high as CC one in as-cast state. The higher enthalpy peak occurring in the DSC curves expresses that the precipitation hardening phase more easily forms in EMC specimens than in CC ones during the heating process.

KEY WORDS electromagnetic casting (EMC), continuous casting (CC), aluminum alloy, microstructure, mechanical characteristic

电磁铸造技术是铸造工程和电磁流体力学相结合的一门技术。由于是无模铸造, 消除了铸锭内部的溶质偏析和表面划痕, 因而铸锭表面非常光滑, 可以直接进行热轧, 而连续铸造铸坯则不可避免的要进行铣面处理^[1,2]。此外, 电磁铸造技术更重要的特征是整个铸锭断面的组织都非常均匀、晶粒尺寸更加细小, 周边方向的偏析瘤可以消除。尽管以往关于铝合金电磁铸造的研究很多, 但大多集中在电磁场和磁流体力学方面, 针对两种铸锭的力学性能及热处理特性的研究还很少。

本文采用的 2024 铝合金相当于国内变形铝合金 LY12, 是高强铝合金中应用最广、强度较高的一种。主

要用于飞机的蒙皮、壁板和翼梁等结构件, 也可用于制作航空发动机的叶片、底盘等。由于合金元素含量高, 其铸造成型比较困难, 严重的表面偏析和易开裂的特性也明显降低了它的成材率。利用电磁铸造技术提高铸锭的表面质量, 细化铸锭显微组织, 改善铸锭力学性能及热处理条件等具有重要的现实意义。

1 实验方法

如图 1 所示, 电磁铸造装置主要由感应器、屏蔽罩, 冷却水套及底模组成。附属机构还包括拉坯系统、浇注控制系统、熔化装置及电源等。感应器内通交变电流, 产生交变磁场, 交变磁场与液体金属表面产生的感生电流相互作用, 产生指向铸锭内部的电磁力^[3]。电磁力使铸锭上部的液态金属保持悬浮成型, 屏蔽罩用来控制熔融金属上部的磁场, 使电磁压力和液态金属的静压力保持平衡。

铸造工艺参数如下: 感应器电流为 4800 A, 液柱高

* 国家自然科学基金重大项目资助 59995442

收到初稿日期: 2001-08-14, 收到修改稿日期: 2001-11-08

作者简介: 贾非, 男, 1973 年生, 博士生

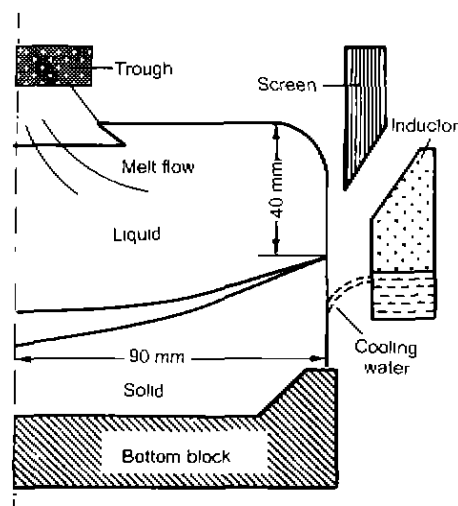


图1 电磁铸造装置简图

Fig.1 Schematic illustration of electromagnetic casting (EMC) apparatus

度为 40 mm, 凝固前沿位于感应器底部上方 10 mm 处, 浇注温度为 720 °C、冷却水流量为 3.0 m³/h, 铸造速度为 1.5 mm/s.

采用的 2024 铝合金的化学成分 (质量分数, %) 为: Cu 4.53, Mg 1.47, Mn 0.62, Fe 0.35, Ti 0.1, Zn 0.25, Si 0.35. 金相试样经切割、磨光、抛光和腐蚀得到, 腐蚀剂为 Keller's 溶液 (95% H₂O, 1.5% HCl, 1% HF, 2.5% HNO₃). 显微组织用光学显微镜拍照. 除铸态试样外, 2024 铝合金还要经 495 °C 固溶处理和人工时效 (T6) 处理, 即将试样在盐浴中加热到 495 °C 保温 1 h 后淬入冰水, 再在 190 °C 的硅油中保持一定时间进行时效硬化.

2 实验结果与讨论

2.1 力学性能测试

2.1.1 硬度测量 为了比较两种铸造方法生产的铸锭的力学性能, 检验热处理效果, 实测了热处理前后试样的硬度. 采用 F 型 Rockwell 硬度计测量, 载荷为 588 N. 在铸态下, 电磁铸造试样的硬度 HRF (31.7) 约为连续铸造试样硬度 HRF (16.0) 的 2 倍. 图 2 为 2024 合金的时效硬化曲线. 由于 GP 区和其它中间相的形成, 试样的硬度随时效时间增加而提高. 电磁铸造试样在人工时效 12 h 左右时硬度 HRF 达到峰值 (48.5), 而连续铸造试样则在 36 h 后硬度 HRF 才达到峰值 (44.4). 说明电磁铸造铸锭较连续铸造铸锭具有更显著的时效硬化特性.

2.1.2 疲劳实验 疲劳试样的尺寸设计参考 ASTM 466-96 标准. 试样总长度为 70 mm, 细端和粗端直径分别为 8 和 12 mm, 长为 18 mm, 过渡段是半径为 64 mm 的弧面. 实验在 Instron 8516 水压疲劳实验机上进行, 试样沿轴向放置. 疲劳性能测试的温度为 23 °C, 采用正弦波形加载的方法完成其性能测试, 其应力比 $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max} = -1$, 频率为 20 Hz.

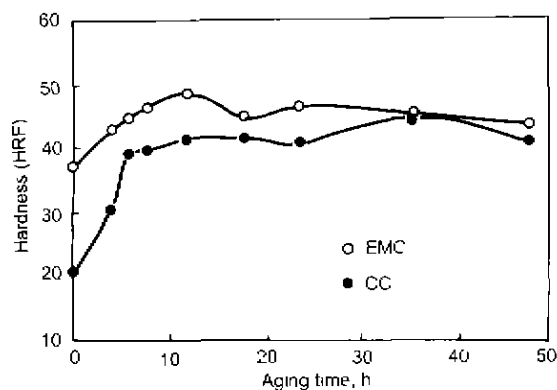


图2 2024 合金的时效硬化曲线

Fig.2 Age-hardening curves of electromagnetic casting (EMC) and continuous casting (CC) 2024 alloys

图 3 是合金的疲劳实验结果. 在铸态条件下, 电磁铸造试样的循环次数约是连续铸造试样的 3 倍, 时效处理可以增大位错密度, 改善合金的疲劳性能^[4]. 经过热处理后, 电磁铸造试样在 5000 N 的载荷下疲劳循环次数超过 9×10^6 时并不断裂, 因此时效处理时选用 7500 N 的载荷. 电磁铸造试样的疲劳寿命比连续铸造试样的疲劳寿命约高 25%. 疲劳裂纹主要起源于表面的粗糙处、亚表面疏松、氧化物、微观孔洞及非金属夹杂物等位置^[5,6], 电磁铸造铸锭表面光滑, 无疏松和亚表面偏析, 因此有良好的疲劳性能. 对于经过时效的电磁铸造试样, 沉淀强化相的大量析出预示其会有良好的力学性能, 观察到的结果也确实如此. 镁原子和铜原子与位错相互作用, 减少了粗大滑移带的形成, 这有利于合金疲劳性能的提高.

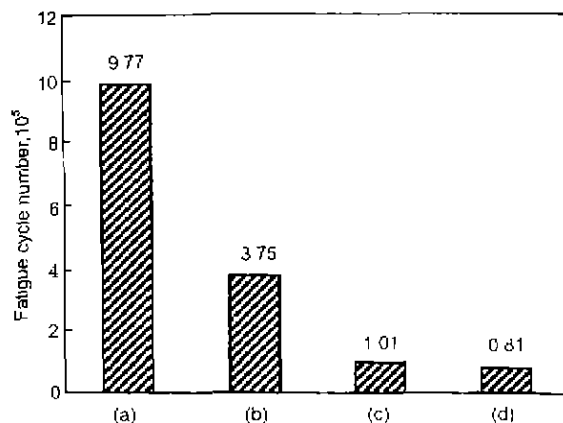


图3 不同状态 2024 合金的疲劳寿命

Fig.3 Fatigue life of 2024 alloy in different states

- (a) EMC sample in as cast (load 5000 N)
- (b) CC sample in as-cast (load 5000 N)
- (c) EMC sample in as-aged (load 7500 N)
- (d) CC sample in as-aged (load 7500 N)

2.2 显微组织

图 4 为连续铸造和电磁铸造 2024 铝合金铸锭的铸态横截面显微组织. 连续铸造铸锭表面因急冷组织较细, 晶

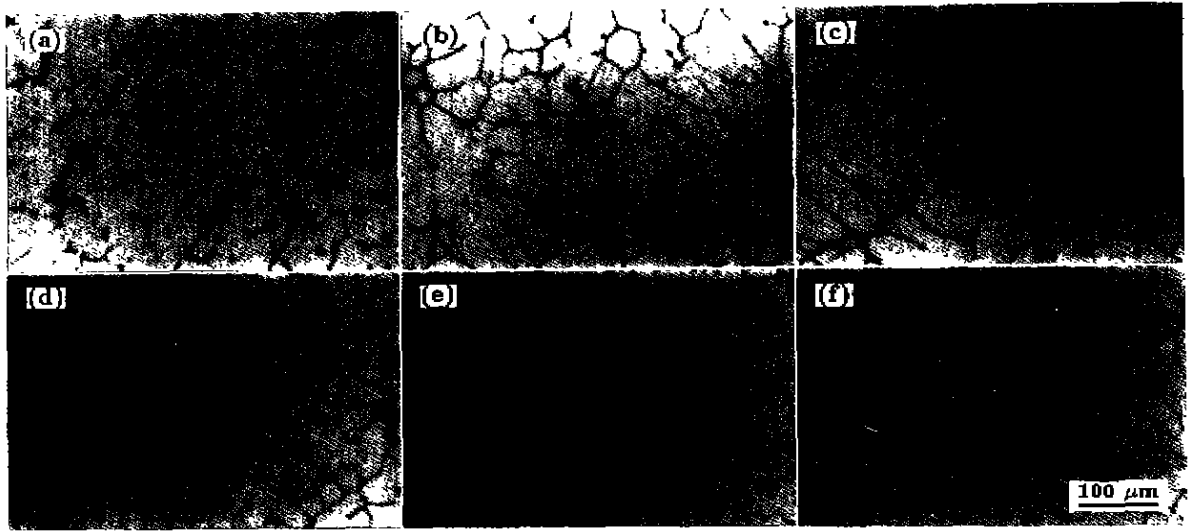


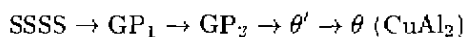
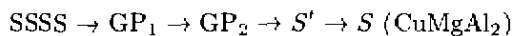
图 4 连续铸造和电磁铸造 2024 铝合金铸态的显微组织对比

Fig.4 As-cast microstructure of 2024 CC and EMC ingots with diameter of 180 mm
 (a) edge of CC ingot (b) 60 mm from edge of CC ingot (c) center of CC ingot
 (d) edge of EMC ingot (e) 60 mm from edge of EMC ingot (f) center of EMC ingot

粒尺寸由表及里逐渐变粗 而电磁铸造过程中的搅拌作用使凝固过程趋向于同时凝固和均匀生长, 结果无论是铸锭边部、内部还是中心处的组织都非常均匀细小且为等轴晶. Ricou 等^[7]和 Sakane 等^[8]分别测量和计算了电磁铸造系统中熔融金属的流动, 结果表明, 液体金属中的流动非常剧烈. 这种激烈的强迫对流加速了过热的驱散并打碎枝晶臂, 从而导致晶粒数目倍增. 凝固前沿附近的悬浮晶核很容易被带走, 并重新分布于液体溶池中, 最终整个溶池中因大量悬浮晶核的存在, 几乎同时凝固, 从而形成了细小的等轴晶. 因此, 电磁铸造铸锭的晶粒尺寸从边缘到铸锭中心变化不大, 最终的组织结构更加均匀.

2.3 热分析和透射电镜分析

经固溶处理后, Al-Cu-Mg 过饱和固溶体 (SSSS) 按下列次序发生分解



在过饱和固溶体分解的过程中, GP_1 区 (富溶质团) 和 GP_2 区 (富空位团) 分别独立形成^[9]. GP_1 区在较低的时效温度时形成, 而在时效温度升高过程中被溶解; 而 GP_2 区在较宽的温度范围内都是稳定的. 与基体有共格关系的 S' 相是主要的沉淀强化相, 而非共格关系的 S 相则是脆化相^[10,11]. 图 5 为差热分析曲线. 位于 280 °C 附近的放热峰是由 GP 区或原子富集区的形成引起的, 而位于 500 °C 左右的放热峰则对应着 S' 相的沉淀析出. 如图 5b 所示, 较低的热流量说明在经过时效处理后的试样中已经存在 GP 区, 在 230 °C 附近出现的吸热谷表明一

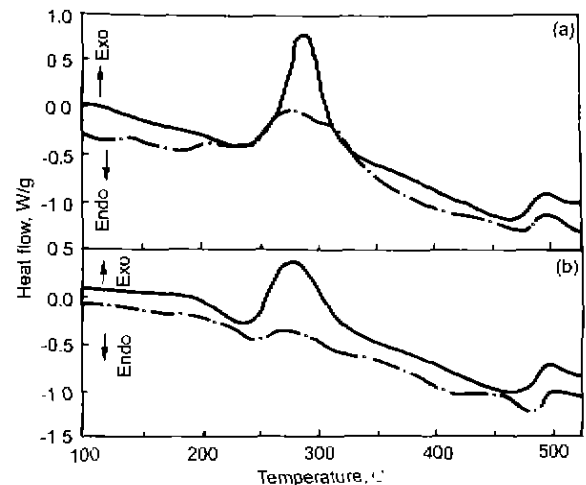


图 5 2024 合金的差热分析曲线

Fig.5 DSC curves of quenched (a) and aged (b) 2024 alloys (heat rate 10 °C /min: —●— CC, — EMC)

些 GP 区在加热过程中被溶解^[12].

可以看出, 差热分析曲线的一个重要特征是电磁铸造试样沉淀析出放热峰高于连续铸造试样放热峰. 电磁铸造铸锭无偏析, 溶质原子的分布区域更均匀、更广阔, 溶质原子和溶剂原子易实现规则排列, 发生有序化, 形成 GP 区. 连续铸造试样的波峰较宽, 表明形成的原子富集区的尺寸差异比较大, 也表明连续铸造试样的化学成分不如电磁铸造试样的均匀. 图 6 为合金淬火状态下的透射电镜照片, 可以看出, 电磁铸造试样中存在大量针状或杆状的强化相, 而连续铸造试样几乎没有沉淀相析出.

对于 2 / × × 系铝合金, 位错是促进 S' 相形成的异

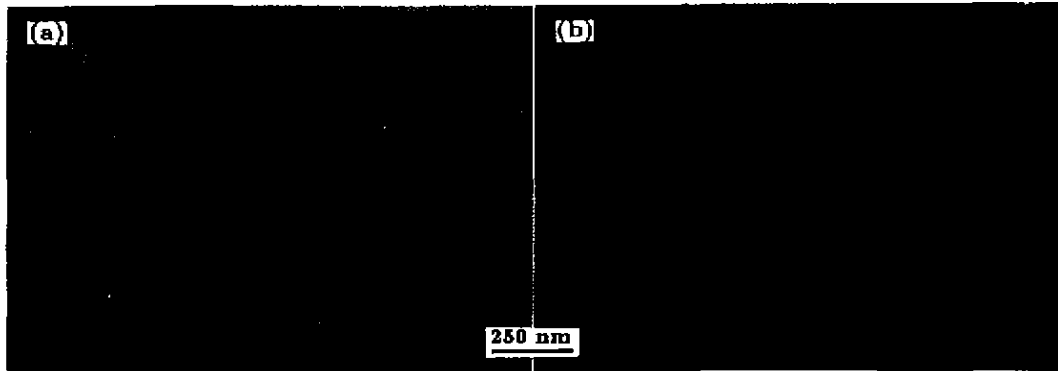


图6 2024 铝合金淬火状态的透射电镜照片

Fig.6 TEM micrographs of quenched 2024 alloy samples prepared by CC (a) and EMC (b)

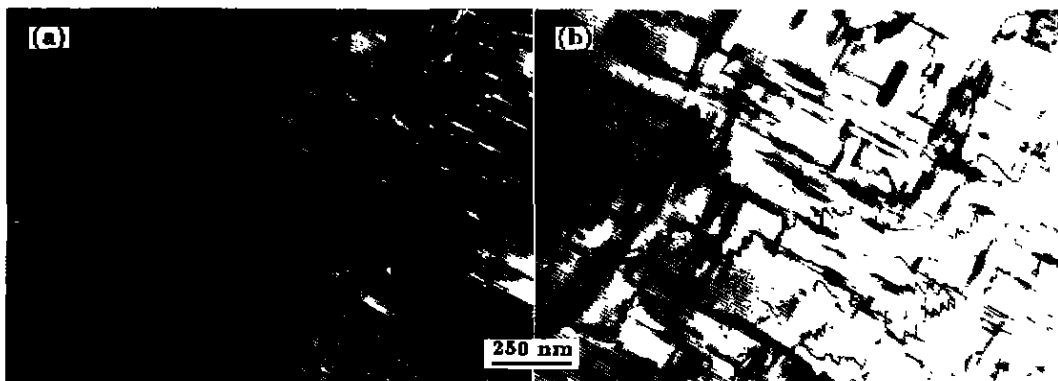


图7 2024 铝合金热处理后的透射电镜照片

Fig.7 TEM micrographs of aged 2024 alloys prepared by CC (a) and EMC (b)

质形核点, S' 相经常出现在位错附近, 止如图 7 所示。在电磁铸造试样中很容易观察到位错的存在, 电磁铸造试样中的位错密度较高, 但是在连续铸造试样中很难观察到明显的位错, 这是电磁铸造试样容易形成较多的沉淀强化相的原因之一。换言之, 高位错密度对于金属的强化是非常重要的。电磁铸造铸锭细小的等轴晶结构有利于与基体有共格关系的沉淀强化相的形成。反之, 沉淀强化相能阻碍位错运动, 从而使电磁铸造铸锭具有较高的强度和其它优良的力学性能。

3 结论

(1) 电磁搅拌的存在导致了电磁铸造铸锭具有细小的晶粒尺寸和均匀的显微结构, 这有利于提高其铸态及热处理态的力学性能。

(2) 电磁铸造 2024 铝合金具有较好的固溶和时效处理效果。差热分析和透射电镜分析结果表明, 电磁铸造铸锭比连续铸造铸锭更容易形成沉淀强化相, 而且前者具有较高的位错密度, 使其时效处理的时间缩短。

(3) 铸态条件下, 电磁铸造铸锭的疲劳寿命大约是连续铸造铸锭的 3 倍, 经过热处理后, 电磁铸造试样的疲劳

循环次数仍然比连续铸造试样多 25%。电磁铸造铸锭无显微疏松, 有利于其疲劳性能的提高。

参考文献

- [1] Geiselev Z N. *J Met*, 1971; 23(10): 38
- [2] Prasso D C, Evans J W, Wilson I J. *Metall Trans*, 1995, 26B: 1243
- [3] Furni M, Kojima Y, Matsuo M. *ISIJ Int*, 1993; 33: 400
- [4] Polunear I J. *Light Alloys*. London: Edward Arnold, 1995: 58
- [5] Zhang B, Poirier D R, Chen W. *Metall Mater Trans*, 1999; 30A: 2659
- [6] Jiang H, Brown P, Knott J F. *J Mater Sci*, 1999, 34: 719
- [7] Ricou R, Vives C. *Metall Trans*, 1985; 16B: 377
- [8] Sakane J, Li B Q, Evans J W. *Metall Trans*, 1988; 19B: 397
- [9] Jiang X J, Noble B, Holme B, Waterloo G, Tafto J. *Metall Mater Trans* 2000; 31A: 339
- [10] Higgins R A. *The Properties of Engineering Materials* London: Edward Arnold, 1994: 264
- [11] Yuan S Y, Yeh J W, Tsau C H. *Mater Trans JIM*, 1999, 40: 233
- [12] Miao W F, Laughlin D E. *J Mater Sci Lett*, 2000; 19: 201