

# 电磁铸造铝合金的疲劳性能及差热分析

## Fatigue Characteristics and Differential Scanning Calorimetry Investigation of the Electromagnetic Casting Aluminum Alloy

贾 非, 金俊泽, 张兴国, 曹志强, 郝 海  
(大连理工大学铸造工程研究中心, 大连 116024)

JIA Fei, JIN Jun-ze, ZHANG Xing-guo, CAO Zhi-qiang, HAO Hai  
(Research Center of Foundry Engineering,  
Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

**摘要:** 使用扫描电镜、透射电镜、X 射线衍射仪和差热分析仪等设备对比观察了电磁铸造和普通连续铸造 2024 铝合金铸态及热处理状态的显微组织和力学性能。与普通连续铸造铸锭相比, 电磁铸造铸锭的铸态及热处理状态的力学性能都有提高。通过观察差热分析曲线发现, 电磁铸造试样具有较高热焓, 说明其在加热过程中有更多沉淀强化物形成。而普通连续铸造铸锭尽管经过热处理仍然不能达到电磁铸造试样的性能。

**关键词:** 电磁铸造; 普通连续铸造; 铝合金; 显微组织; 力学性能

**中图分类号:** TG249.7    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1001-4381 (2003) 02-0027-04

**Abstract:** SEM, TEM, XRD and DSC etc. were carried out to contrast the microstructure and mechanical characteristics of EMC and DCC 2024 aluminum alloy before and after heat treatment. Compared to DCC ingot, the EMC ingot has better mechanical properties not only in as-cast condition but also in as-aged one. DSC curves show that the EMC specimens have high enthalpy that means much more precipitation formed during the heating process. Even though after heat-treatment, the DCC ingot still can not get the same quality as EMC one.

**Key words:** electromagnetic casting; direct chill casting; aluminum alloys; microstructure; mechanical characteristics

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。电磁铸造利用电磁力约束液体金属成型, 感应线圈内通过交变电流, 交变电流产生交变电磁场。交变电磁场与液体金属表面产生的感生电流相互作用, 产生电磁体积力<sup>[1]</sup>。由于是无模铸造, 消除了铸锭内部偏析和表面划痕, 铸锭表面非常光滑可以直接进行热轧, 而普通连续铸造铸坯则不可避免的要进行铣面处理<sup>[2]</sup>。

电磁铸造技术优势在于其熔体内部能产生电磁搅拌作用, 电磁搅拌导致整个铸锭断面的组织都非常均匀、晶粒尺寸细小, 使铸锭内部的合金元素分布更均匀, 降低了内部缩松和显微偏析, 消除了内部微裂纹<sup>[3]</sup>。尽管以往关于铝合金电磁铸造的研究很多, 但大多集中在电磁铸造的成型稳定性和磁流体力学方面, 而针对铸锭的力学性能及热处理特性的研究还很少。

本研究采用的 2024 铝合金是硬铝中应用最广、强度较高的一类。主要用于飞机的蒙皮、壁板; 压缩机的叶片、底盘等。由于合金含量高, 普通连续铸造

成型比较困难, 严重的表面偏析和易开裂的特性降低了它的成材率。而利用电磁铸造技术对提高铸锭表面质量和改善铸锭力学性能具有重要的现实意义。

### 1 实验方法

电磁铸造与普通连续铸造采用相同的工艺参数。铸造过程中采用的工艺条件是: 感应器电流 4800A, 液柱高度 40mm, 凝固前沿位于感应器底部上方 10mm, 浇注温度为 710 ~ 730 °C, 冷却水流量为 3m<sup>3</sup>/h, 铸造速度为 0.3 ~ 1.5mm/s。最终成功地铸造出了  $\phi 74$ mm 的电磁铸造铝坯。

实验过程中采用的 2024 铝合金的化学成分如表 1 所示。除了铸态试样外, 2024 合金还要经过 495 °C 条件下的固溶处理和人工时效处理 (T6 处理), 具体过程是将试样在盐浴中加热到 495 °C 并保温 1h, 然后在冰水里淬火, 淬火后马上在 190 °C 的硅油中保持一定时间进行时效硬化。

采用 F 型洛氏硬度计实测热处理前后试样的硬度。测量载荷为 588N, 每个点测量 7 次, 去掉最高值

和最低值后取平均值。

表 1 LD10 铝合金的化学成分 (质量百分数/%)

Table 1 Chemical composition of LD10 aluminum alloy (mass fraction/%)

元素	Cu	Mg	Mn	Fe	Ti	Zn	Si	Al
含量	4.53	1.47	0.62	0.35	0.10	0.25	0.35	Bal.

疲劳试样的尺寸参考美国材料学会标准 ASTM 466-96, 试样总长度 70mm, 细端直径 8mm, 长 18mm, 粗端直径 12mm, 过渡段为半径 64mm 的弧面。轴向取样, 在 Instron8516 水压疲劳实验机上进行测试, 室温为 23℃, 正弦波形加载形式, 应力比  $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = -1$ , 频率为 20Hz。

热分析实验温度范围为 30~530℃, 加热速率为 10℃/min。透射电镜试样在 -30℃ 的 30HNO<sub>3</sub>-70CH<sub>3</sub>OH (体积百分数/%) 溶液中进行双喷射电子减薄。

2 结果与讨论

2.1 力学性能

在铸态下, 电磁铸造试样的硬度 (HRF 31.72) 约为普通连续铸造试样硬度 (HRF 16.02) 的 2 倍。图 1 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 12h 左右时硬度达到峰值 (HRF 48.52), 而普通连续铸造试样则在人工时效 36h 后硬度才达到峰值 (HRF 44.4)。这说明电磁铸造铸锭较普通连续铸造铸锭具有更显著的时效硬化特性, 这主要是由冷却速度的不同造成的。

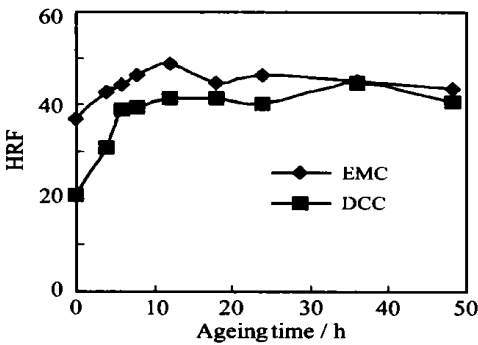


图 1 2024 合金的时效硬化曲线

Fig. 1 Age-hardening curves of 2024 alloy

图 2 是合金的疲劳试验结果。在铸态条件下, 电磁铸造试样的循环次数大约是普通连续铸造试样的 3 倍。时效处理可以增大位错密度, 改善合金的疲劳性能<sup>[4]</sup>。经过时效处理后, 电磁铸造试样在 100MPa 的

载荷下疲劳循环次数超过 9 百万次不断裂。在 150MPa 的载荷下, 时效处理后, 电磁铸造试样的疲劳寿命比普通连续铸造试样高约 25%。众所周知, 疲劳裂纹主要起源于铸锭表面及亚表面的疏松、氧化物、微观孔洞及非金属夹杂物等<sup>[5,6]</sup>。电磁铸造铸锭表面光滑, 无疏松和亚表面偏析, 具有良好的疲劳性能。经过人工时效的电磁铸造合金试样, 沉淀强化相的大量析出, 有更好的疲劳性能。镁原子与铜原子和位错相互作用, 减少了粗大滑移带的形成, 有利于合金疲劳性能的提高。

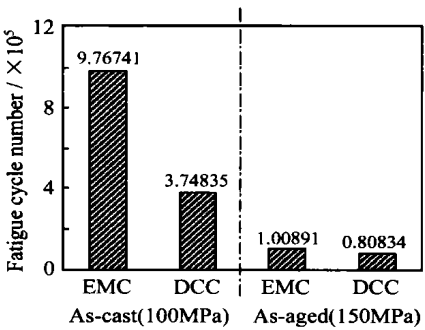


图 2 不同状态 2024 合金的疲劳寿命

Fig. 2 Fatigue life of 2024 alloy in different state

2.2 X 射线衍射

2024 合金属于 Al-Cu-Mg 系高强度铝合金。在铸造过程的非平衡冷却条件下, 铜和镁将以固溶体形式存在, 共晶组织成分如三元相图的左下角区域所示, 由  $\alpha + \text{CuAl}_2$  和  $\alpha + \text{CuAl}_2 + \text{CuMgAl}_2$  组成。从图 3 的 X 射线衍射结果可以看出, 电磁铸造 2024 铝合金的主要组成相为  $\alpha$ ,  $\text{CuAl}_2$  和  $\text{CuMgAl}_2$ 。主要的增强相是  $\text{CuMgAl}_2$  及其中间过渡相。其它的增强相还包括  $\text{CuAl}_2$  及  $(\text{FeMnSi})\text{Al}_6$  等。

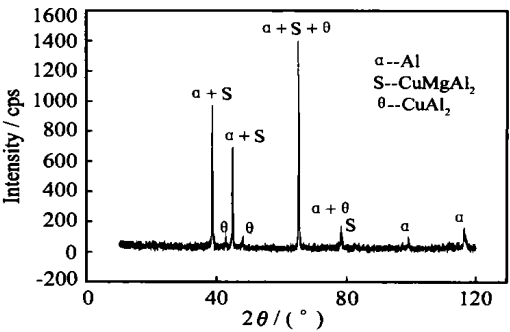


图 3 电磁铸造试样的 X 射线衍射分析

Fig. 3 XRD analysis on the specimen of EMC 2024

2.3 差热分析和透射电镜分析

经过固溶处理后, Al-Cu-Mg 过饱和固溶体按下列次序发生分解:

SSSS GP [I] GP [II] S S (CuMgAl<sub>2</sub>)  
SSSS GP [I] GP [II] θ θ (CuAl<sub>2</sub>)

在过饱和固溶体分解的过程中, GP [I] 区 (富溶质团) 和 GP [II] 区 (富空位团) 分别独立形成<sup>[7]</sup>。GP [I] 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 [II] 区在较宽的温度范围内都是稳定的。与基体保持共格关系的 S 相是主要的沉淀强化相, 而非共格的 S 相则是脆化相<sup>[8,9]</sup>。图 4 为差热分析曲线。位于 280 附近的放热峰是由 GP 区或结构团的形成引起的, 而位于 500 左右的放热峰则对应着 S 相的沉淀析出。经过时效处理后, 试样的放热峰值比淬火状态低得多。如图 4b 所示, 时效处理的试样在 230 附近出现吸热谷, 表明一些不稳定的 GP [I]

区在加热过程中被溶解<sup>[10]</sup>, 而放热主要是由 GP [II] 区的形成引起。较低的热流量和吸热过程都说明在经过时效处理后的试样中已经存在 GP 区。

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的峰值高于普通连续铸造试样。普通连续铸造试样的波峰较宽, 表明形成的原子富集区或尺寸差异比较大。对于 2xxx 系铝合金, 位错是促进 S 相形成的异质形核基底, 因此 S 相通常能在位错线上形成。图 5 是试样热处理后的透射电镜照片, 在电磁铸造试样中很容易观察到位错的存在, 表明电磁铸造试样中的位错密度较高。但在普通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。共格沉淀强

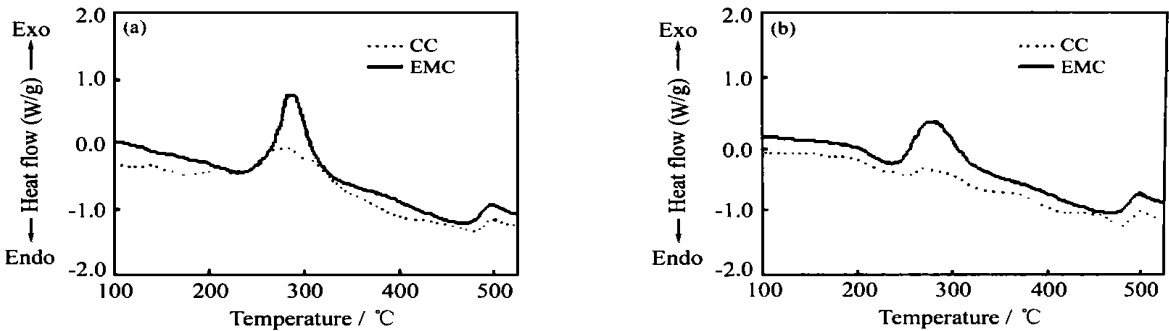


图 4 2024 合金的差热分析曲线

Fig. 4 DSC curves of quenched (a) and aged (b) 2024 alloys (heating rate 10 °C/min)

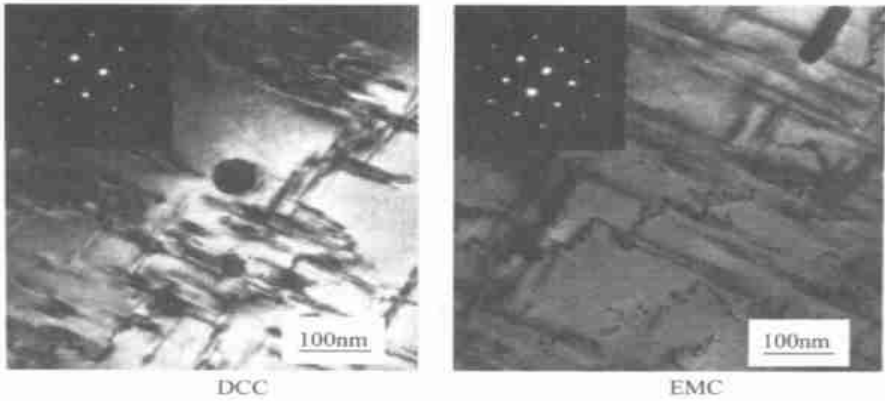


图 5 2024 铝合金热处理后透射电镜照片和对应的 [100] 铝衍射谱

Fig. 5 TEM micrograph and the corresponding [100] Al selected area diffraction patterns of 2024 alloy samples in as aged state

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。

2. 4 疲劳断口分析

图 6 显示了普通连续铸造 2024 铝合金疲劳试样条纹状断口形貌和电磁铸造试样韧窝状断口形貌。可以看出前者的准解理特征和后者的韧性特征。在普通连续铸造试样中, 缺少具有韧性断裂特征的韧窝和条纹, 显示出具有循环软化特性的准解理疲劳断裂。而

电磁铸造试样的疲劳断口呈现具有循环硬化特性的韧窝和条纹, 韧性断裂机制使其具有较高的疲劳寿命。

3 结论

(1) 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表明电磁铸造铸锭比普通连续铸造铸锭更容易形成沉淀强化相。而

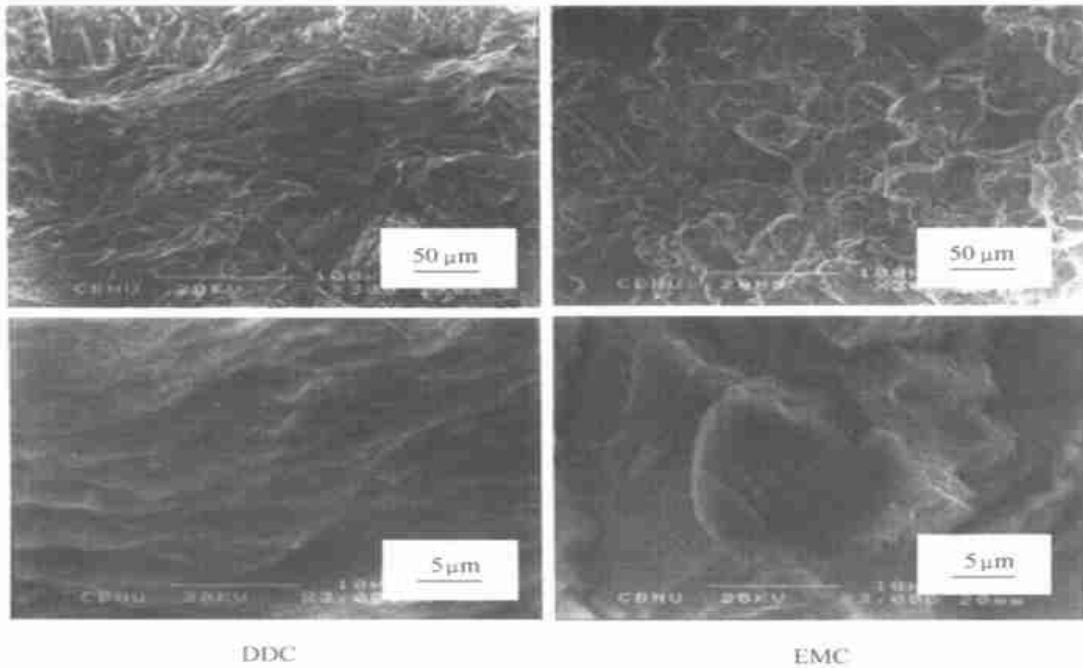


图6 铸态 2024 铝合金疲劳断口扫描电镜照片  
Fig.6 SEM fractographs of 2024 Al alloy (as-cast)

且前者具有较高的位错密度,这使其时效处理的时间缩短。

(2) 铸态条件下,电磁铸造试样的疲劳寿命大约是普通连续铸造试样的 3 倍。经过热处理后,电磁铸造试样的疲劳循环次数仍然比普通连续铸造试样多 25%,电磁铸造铸锭表面光滑、无显微缩松,这些均有利于其疲劳性能的提高。

#### 参考文献

- [1] Z N Getslev. Casting in an electromagnetic field [J] . J Metals, 1971, 23 (10): 38- 39.
- [2] D C Prasso, J W Evans and I J Wilson. Heat transport and solidification in the electromagnetic casting of aluminum alloys: part I- Experimental measurements on a pilot-scale caster [J] . Metal Trans B, 1995, 26B: 1243- 1251.
- [3] B Q Li. Solidification processing of materials in magnetic fields [J] . JOM-e, 1998, 50 (2): 1- 10.
- [4] I J Polmear. Light alloys [M] . Arnold, London, 1995: 58.
- [5] B Zhang, D R Poirier and W chen. Microstructure effects on high-cycle fatigue-crack initiation in A356. 2 casting alloy [J] . Metall Trans A, 1999, 30A: 2659- 2665.
- [6] H Jiang, P Brown and J F Knott. Fatigue performance of a cast aluminum alloy Al-7Si-Mg with surface defects [J] . Journal of Materials Science, 1999, 34: 719- 725.
- [7] X J Jiang, et al. Differential scanning calorimetry and electron diffraction investigation on low-temperature aging in Al-Zn-Mg alloy [J] . Metal Trans A, 2000, 31: 339- 347.
- [8] R A Higgins . The properties of Engineering Materials [ M ] . Edward Arnold, London, 1994: 264.

- [9] S Y Yuan, J W Yeh and C H Tsau. Improved microstructure and mechanical properties of 2024 aluminum alloy produced by a reciprocating extrusion method [J] . Materials Transactions, JIM, 1999, 40 (3): 233- 241.
- [10] W F Miao and D E Laughin. A differential scanning calorimetry study of aluminum alloy 6111 with different pre-ageing treatment [J] . Journal of Materials Science Letter, 2000, 19: 201 - 203.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (59995442); 国家自然科学基金青年基金资助项目 (59901001)

收稿日期: 2001-09-03

作者简介: 贾非 (1973-), 男, 博士研究生, 研究方向为电磁铸造铝合金的工艺及组织性能和软接触电磁铸造铝合金, 联系地址: 大连市凌工路 2 号, 大连理工大学铸造工程研究中心 (116024)。

\* \* \* \* \*

#### 新型抗辐射材料

University of Michigan 和 Pacific Northwest National Laboratory 的研究者发现了一种新型抗辐射材料, 它在钚和其它锕类元素的固定和抑制中具有良好的应用前景。象其它现有的一些材料一样, 这种锆酸钆类新材料可以将钚和其它锕类元素结合在自己的结构中。但现有的材料对辐射老化非常敏感, 这将导致锕类元素释放进入环境, 而锆酸钆类材料可耐辐射损坏, 并可保持上百万年不受影响。而且在有大量杂质存在的情况下仍然可以保持其抗辐射能力。

(杜林虎)